



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**SIMULAÇÕES DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA RADIATIVA
NA ATMOSFERA PARA CONDIÇÕES TÍPICAS BRASILEIRAS
PARA ESTUDOS DE AEROSSÓIS COM O SENSOR MODIS**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/CNPq/INPE)**

Carlos Pires (IF/USP, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: cpires@cptec.inpe.br

Dr. Alexandre Correia (DSA/CPTEC/INPE, Orientador)
E-mail: acorreia@cptec.inpe.br

COLABORADORES

Dra. Judith Johanna Hoelzemann (CPTEC/INPE)
Dra. Karla Longo (CPTEC/INPE)
Dr. Juan Carlos Ceballos (DSA/CPTEC/INPE)
Profa. Dra. Márcia Akemi Yamasoe (IAG/USP)

Cachoeira Paulista
Julho de 2007

SUMÁRIO

1.	Resumo do plano de trabalho inicial	03
2.	Resumo das atividades realizadas no período	03
2.1.	Atividades de pesquisa	03
2.2.	Disciplinas cursadas e em andamento	04
2.3.	Participação e presença em seminários	04
2.4.	Participação em congressos e artigo publicado	05
3.	Resultados	06
3.1.	Testes de utilização do SBDART	06
3.2.	Modelos atmosféricos	08
3.3.	Modelos ópticos e microfísicos de aerossóis	11
3.4.	O produto de AOD MODIS-DSA	13
3.4.1.	O produto atual – versão 2.0	13
3.4.2.	A versão 2.1 – o uso de novas look-up tables	15
3.4.2.	A versão 2.3 – assimilação de dados e parametrizações	18
4.	Atividades futuras	19
5.	Conclusão	19
6.	Referências	20
	ANEXO A – Certificados referentes ao XIV CBMET	22
	ANEXO B – Resumo expandido do trabalho apresentado no XIV CBMET	24
	ANEXO C – Artigo publicado	31

1. Resumo do plano de trabalho inicial

A importância de aerossóis atmosféricos para o clima vem sendo discutida há vários anos pela comunidade científica internacional. As dificuldades associadas à caracterização dos aerossóis atmosféricos, aliadas à heterogeneidade de sua distribuição espacial, contribuem para parte significativa das incertezas em modelos meteorológicos e de previsão de mudanças climáticas. Um dos instrumentos utilizados para estudos de caracterização de aerossóis atmosféricos em grande escala são sensores à bordo de satélites. Com esse fim, a NASA, a agência espacial americana, opera vários sensores, como o MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), presente em satélites que varrem toda a superfície do planeta. No entanto, em razão de sua cobertura global, os produtos do sensor MODIS são grandemente simplificados, acarretando inferências de propriedades de aerossóis com erros significativos em escalas regionais.

Neste âmbito, o projeto de iniciação científica em andamento tem os seguintes objetivos específicos:

- Obtenção de resultados para cálculos de transferência radiativa em várias condições de iluminação solar, usando modelos de atmosfera e aerossóis realistas para o Brasil;
- Integração dos resultados no sistema de detecção de aerossóis por satélite usando o MODIS atualmente em operação na DSA/CPTEC;
- Validação de resultados de inferências de profundidade óptica do aerossol (AOD) obtidas por satélite e calibração dos modelos de aerossóis desenvolvidos, a partir de medidas experimentais da rede AERONET.

2. Resumo das atividades realizadas no período

2.1. Atividades de pesquisa

A seguir são listadas as principais atividades relacionadas no projeto inicial, com indicação de status:

- ✓ Realizada
- Em andamento
- Atividade futura

- ✓ Familiarização com o ambiente computacional instalado nas dependências da DSA/CPTEC;
- ✓ Estudo de linguagens de programação científica: Fortran, C e shell scripts;
- ✓ Estudo da transferência radiativa na atmosfera utilizando o pacote SBDART;
- ✓ Estudo de modelos ópticos e microfísicos de aerossóis obtidos a partir de medidas experimentais realizadas em vários locais do Brasil com a colaboração de pesquisadores da Universidade de São Paulo;
- ✓ Execução de testes utilizando o código SBDART e validação com medidas da AERONET;
- ✓ Desenvolvimento de modelos ópticos e microfísicos de aerossóis;
- ✓ Realização de cálculos de transferência radiativa na atmosfera sob várias condições de iluminação solar e parâmetros físicos da atmosfera;
- ✓ Integração dos modelos desenvolvidos no sistema de detecção de aerossóis por satélites com o sensor MODIS em operação na DSA/CPTEC;
- ✓ Análise de resultados e calibração a partir de medidas experimentais da rede AERONET;
- ✓ Elaboração do relatório PIBIC, e participação em encontros científicos.

2.2. Disciplinas cursadas e em andamento

✓ Física III	6 créditos	IF/USP
✓ Cálculo Diferencial e Integral III	6 créditos	IF/USP
✓ Meteorologia Física II	6 créditos	IAG/USP
• Cálculo Diferencial e Integral IV	4 créditos	IF/USP
• Física V	6 créditos	IF/USP
• Física Matemática I	6 créditos	IF/USP
• Eletromagnetismo I	6 créditos	IF/USP

2.3. Participação e presença em seminários

- I Oficina de Seminários da DSA

11 e 12 de Dezembro de 2006

Auditório do CPTEC, Cachoeira Paulista, SP, Brasil

- Produtos de Oceanografia por Satélites – Milton Kampel
- Radiação solar e terrestre – Juan Ceballos
- Aerossóis e o Modelo GL – Regina Miranda
- Classificação de imagens – Marcus Bottino
- Sondagens atmosféricas – Rodrigo Souza
- Aerossóis atmosféricos – Alexandre Correia
- Balanço e perspectivas das pesquisas sobre RUV – Marcelo Corrêa
- Precipitação a partir de pluviômetros, radares e satélite – Carlos Angelis
- Sistemas penetrativos – Wagner Lima
- Tempestades severas usando satélite e radar – Luiz Machado
- Modelos de estimativa de precipitação sobre o Brasil – Carlos Morales
- Novos modelos para estimativa de precipitação na DSA – Thiago Biscaro
- Estimativa de ventos – Renato Negri
- Estimativas de temperatura e emissividade da superfície – Leonardo Peres
- Emissividade da cultura da soja – André Souza
- Estimativas de umidade do solo – Angélica Piccini
- Atividades do Grupo de Queimadas – Fabiano Morelli
- Saúde e Meio Ambiente – Helen Gurgel
- Assimilação de dados – Dirceu Herdies
- Impacto de sondagens remotas na previsão de tempo – Rita de Souza
- Assimilação de IWV no modelo global do CPTEC – Luiz Sapucci
- Assimilação de química no CCATTBRAMS – Karla Longo/Saulo Freitas
- Assimilação de aerossóis no CCATTBRAMS – Judith Hoelzemann
- Integração de sistemas na DSA – Luiz Machado

2.4. Participação em congressos e artigo publicado

- Artigo publicado:

- OLIVEIRA, Paulo Henrique de ; ARTAXO, Paulo ; **PIRES, Carlos** ; DE LUCCA, S. ; PROCÓPIO, Aline S ; HOLBEN, Brent ; SCHAFER, Joel ; CARDOSO, LUIZ F ; WOFSY, S. C. ; ROCHA, H. R. . The effects of biomass burning aerosols and clouds on the CO2 flux in Amazonia. Tellus. Series B, v. 59B, p. 338-349, 2007.

- XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia
27 de Novembro a 01 de Dezembro de 2006
UFSC, Florianópolis, SC, Brasil
 - Trabalho como primeiro autor:
 - **PIRES, C., CORREIA, A., PAIXÃO, M.A., ARTAXO, P.**, “Estudo da climatologia regional de coeficiente de Angstrom como extensão do procedimento de cloud-screening da AERONET”.
 - Trabalhos como co-autor:
 - CORREIA, A., **PIRES, C.**, “Validation of aerosol optical depth retrievals by remote sensing over Brazil and South America using MODIS”. *Trabalho premiado como “Melhor trabalho na sessão de Radiação Atmosférica”*.
 - PAIXÃO, M.A., **PIRES, C.**, ARTAXO, P., CORREIA, A., “Climatologia das propriedades ópticas do aerossol na Amazônia com base na rede AERONET”.
 - DE LUCCA, S., ARTAXO, P., CASTANHO, A.D.A., CORREIA, A., **PIRES, C.** “Questões relacionadas à obtenção de espessura óptica de aerossóis em alta resolução na Amazônia”.

- XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto
21 a 26 de Abril de 2007
Florianópolis, SC, Brasil
 - Trabalhos como co-autor:
 - CORREIA, A., MORELLI, F. **PIRES, C.**, “Aerosol loading maps and hot pixels over Brazil and South America”.

3. Resultados

3.1. Testes de utilização do SBDART

O SBDART é um código computacional que realiza cálculos de transferência radiativa plano-paralela em condições de céu limpo e nublado, através da atmosfera terrestre e na superfície. Todos os processos importantes que afetam os campos de radiação ultravioleta, visível e infravermelha são incluídos. Esse código é um casamento entre um sofisticado módulo de transferência radiativa por ordenadas discretas, modelos de transmissão atmosférica de baixa resolução, e resultados da teoria Mie de espalhamento em casos de espalhamento de luz por gotas de água e cristais de gelo. O código é bem apropriado para uma grande variedade de estudos de balanço de energia radiativa na atmosfera e de sensoriamento remoto, e foi desenhado para poder ser utilizado tanto para estudos de caso como para análises de sensibilidade.

Para adquirir familiaridade com o código e com os parâmetros utilizados como entrada, os primeiros testes realizados foram os de simular os fluxos de radiação que atingem o topo da atmosfera (adotado como 80 km de altitude) e a superfície, utilizando diferentes espectros solares disponíveis na base de dados interna. Nesses testes foi utilizado modelo de atmosfera definido como US62 (atmosfera padrão norte-americana em 1962). A figura 01 mostra os resultados obtidos com os espectros 5S, LOWTRAN_7 e MODTRAN_3. Nota-se a diferença de resolução entre os espectros, especialmente na região do visível.

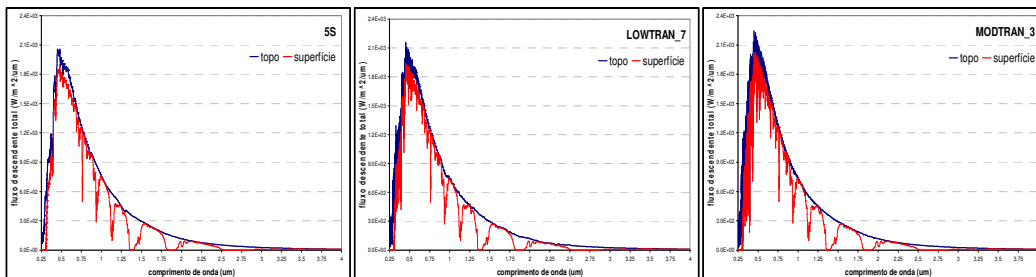


Figura 01: Diferentes espectros de fluxo descendente de radiação solar no topo da atmosfera e na superfície simulados através do SBDART.

Outro teste simples foi o de simular condições de geometria solar diferentes, como no caso do ângulo solar zenital variando ao longo de um dia, novamente com a atmosfera US62, e agora especificamente no comprimento de onda de 466 nm. A figura 02 mostra o ciclo diurno da intensidade da radiação que atinge a superfície.

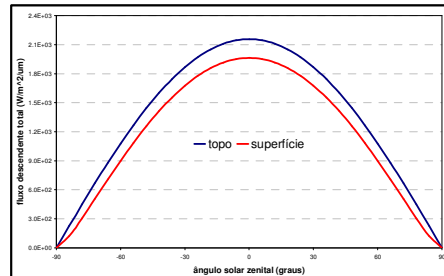


Figura 02: Ciclo diurno do fluxo descendente total de radiação que atinge o topo da atmosfera e a superfície, no comprimento de onda de 466 nm, simulado através do SBDART.

Foram testados os principais tipos de saídas do código SBDART, como os que fornecem fluxos por comprimento de onda ou integrados em bandas específicas, bem como radiâncias em diferentes níveis na atmosfera e irradiâncias em condições diversas de geometria solar e de observação. Especial atenção foi dada aos tipos de saída relacionados à intensidade da radiação ascendente no topo da atmosfera, necessária para simulação do sinal detectado por satélites.

3.2. Modelos atmosféricos

Ao realizar simulações de transferência radiativa na atmosfera terrestre para a obtenção de resultados úteis às aplicações em sensoriamento remoto, um passo fundamental é a utilização de perfis de composição atmosférica adequados à região e à época em que se realizam as medições. Códigos como o SBDART utilizam-se de perfis de temperatura, pressão, umidade, ozônio, etc. para calcular os efeitos do espalhamento e da absorção de radiação solar por moléculas, fenômenos que alteram de maneira significativa os resultados finais de radiâncias no topo da atmosfera.

O SBDART possui internamente 6 modelos de perfis atmosféricos, objetivando cobrir de maneira geral os perfis típicos encontrados em média ao redor do globo. São eles: tropical, latitudes médias no verão, latitudes médias no inverno, sub-árticas no

verão, sub-árticas no inverno, além da chamada atmosfera padrão norte-americana de 1962 (US62). Os parâmetros que compõem esses perfis são definidos para 33 níveis, entre a superfície e 100 km. Na figura 03 vemos os perfis de temperatura e vapor d'água definidos em cada um dos modelos internos do SBDART.

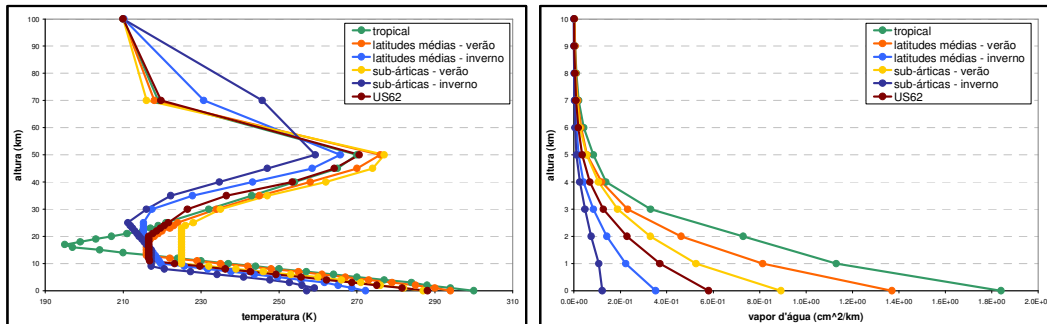


Figura 03: perfis de temperatura e vapor d'água em cada um dos 6 modelos de atmosfera contidos internamente no código SBDART.

O efeito do perfil atmosférico utilizado na simulação de radiâncias no topo da atmosfera pode ser observado na figura 04. Nela são apresentados os resultados de simulações de intensidade da radiação ascendente em 80 km de altura, para diferentes geometrias de observação, para cada modelo de perfil atmosférico interno do SBDART, sem incluir aerossóis atmosféricos.

As diferenças relativas entre os vários perfis atmosféricos nos valores das intensidades simuladas para condições geométricas específicas (ângulo solar zenital igual a 30 graus, ângulo zenital de observação variando de 0 a 72 graus e ângulo azimutal de observação indo de 0 a 180 graus) são apresentadas na Figura 05. Alimentar o código de transferência radiativa com perfis adequados é tarefa que pode ser realizada de diversos modos, indo desde a utilização de resultados climatológicos observados em diferentes regiões até o uso de perfis obtidos simultaneamente às medidas de radiâncias a partir das quais se deseja realizar inversões para obtenção de produtos de sensoriamento remoto.

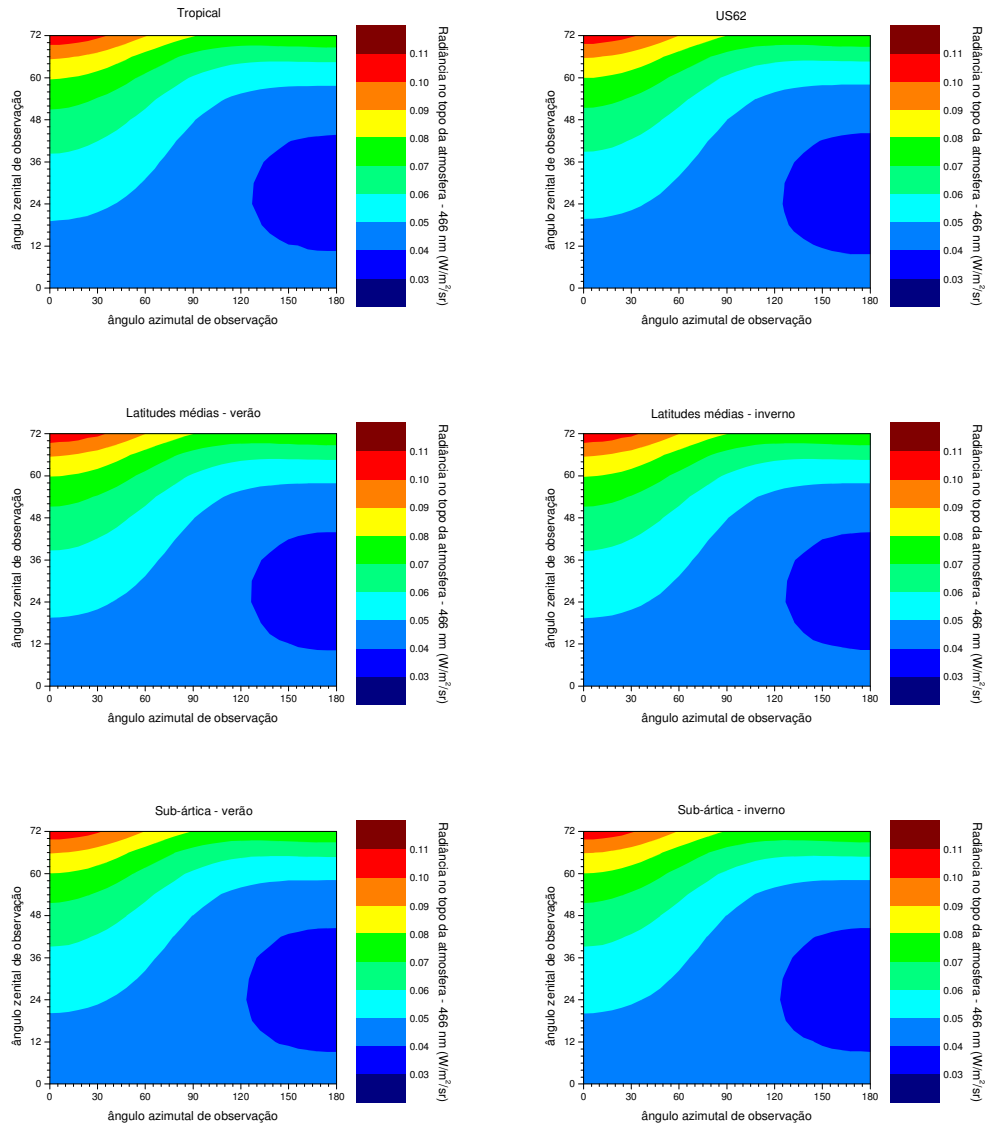


Figura 04: radiações no topo da atmosfera, para uma dada geometria solar e variadas geometrias de observação, utilizando cada um dos modelos de perfis atmosféricos do SBDART.

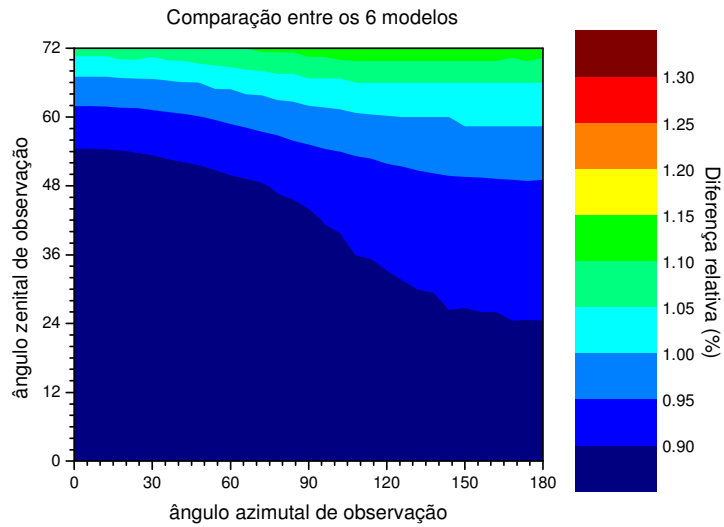


Figura 05: Diferença relativa entre os resultados obtidos com o uso de cada um dos modelos de perfis atmosféricos do SBDART, em condições geométricas específicas.

3.3. Modelos ópticos e microfísicos de aerossóis

Um modelo óptico e microfísico de aerossol atmosférico é um conjunto de valores representativos, encontrados em populações de partículas de um mesmo tipo, para certas propriedades, essencialmente o albedo de espalhamento simples (ssa), o índice de refração complexo (refr e refi), o fator de assimetria (g), a eficiência de extinção (q) e a distribuição de tamanho (siz). A figura 06 a seguir apresenta os valores de ssa e g para cada um dos 4 modelos de aerossol atmosféricos presentes na biblioteca interna do código SBDART.

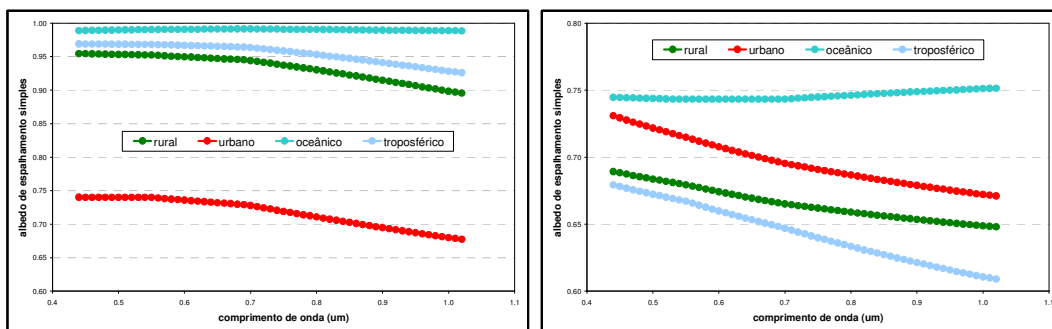


Figura 06: Albedo de espalhamento simples e fator de assimetria para cada um dos modelos de aerossol presentes na biblioteca interna do SBDART.

Para introduzir o uso de modelos de aerossol atmosférico diferentes, foram feitas simulações da intensidade de radiação ascendente no topo da atmosfera, no caso de uma superfície escura (albedo de superfície igual a zero), para cada um dos tipos de aerossol incluídos no código. A figura 07 apresenta esses resultados. É possível observar, por exemplo, como o albedo relativamente baixo do modelo de aerossol urbano, representando portanto partículas mais absorvedoras e menos espalhadoras do que os outros modelos, provoca uma intensidade de radiação ascendente significativamente mais baixa no topo da atmosfera.

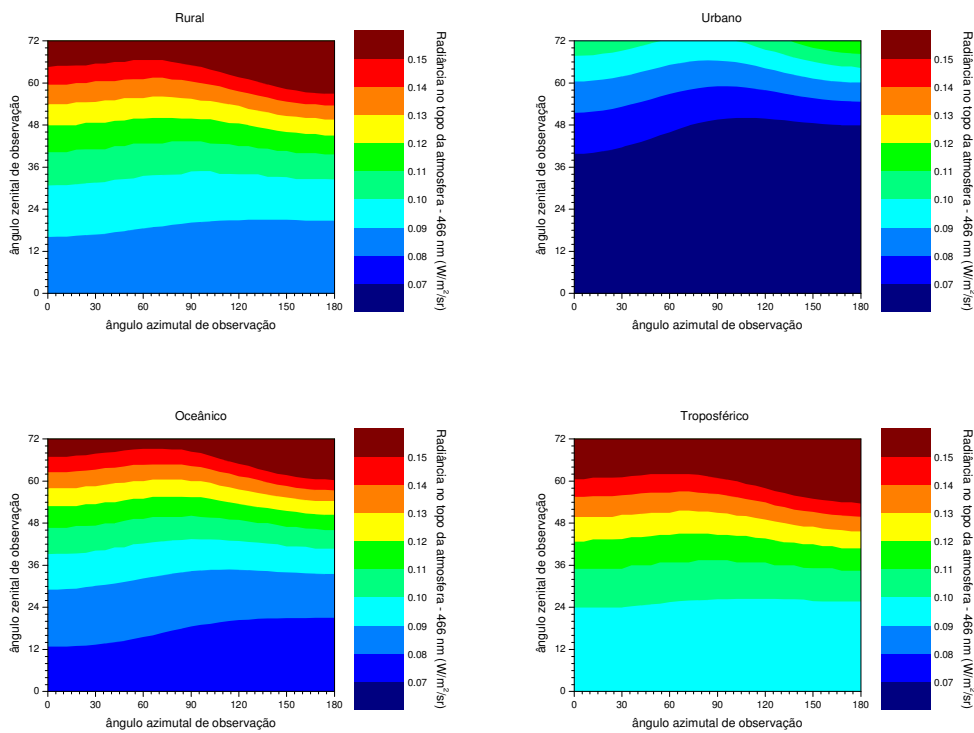


Figura 07: simulações de radiação ascendente no topo da atmosfera, para o caso de uma superfície escura, usando cada um dos 4 modelos de aerossol presentes na biblioteca do SBDART.

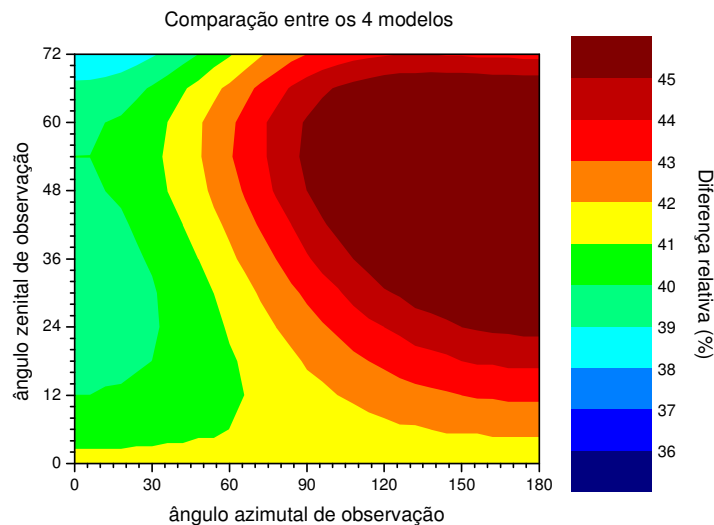


Figura 08: diferenças relativas entre as simulações de radiação no topo da atmosfera utilizando dois modelos extremos de aerossol da biblioteca interna do SBDART (urbano e oceânico).

A figura 08 mostra claramente que diferenças nos modelos de aerossol atmosférico utilizados podem acarretar resultados de radiações simuladas no topo da atmosfera significativamente variados. Por esse motivo, a primeira abordagem na direção de obter um produto de AOD a partir do sensor MODIS que seja mais realista do que o produto operacional da NASA foi exatamente no sentido de incorporar ao processo modelos de aerossol mais representativos da América do Sul e dos tipos de emissão de material particulado mais característicos dessa região. Esse trabalho é descrito no próximo item.

3.4. O produto de AOD MODIS-DSA

3.4.1. O produto atual – versão 2.0

A versão do produto de AOD MODIS-DSA atualmente em operação é a 2.0. Esta versão é baseada nos algoritmos de inversão da chamada Coleção 4 do produto NASA/GSFC, com alterações referentes a aspectos computacionais específicos do ambiente de processamento da DSA/CPTEC/INPE, bem como alterações ligadas à implementação de mudanças apresentadas pela NASA na chamada Coleção 5.

Os algoritmos utilizados nesta versão funcionam basicamente através da comparação das radiâncias medidas pelo sensor no topo da atmosfera com valores constantes nas chamadas 'look-up tables' (LUT's). As LUT's são tabelas que contêm resultados de simulações de transferência radiativa para diferentes geometrias solares e de observação, bem como para diferentes cargas de aerossol, apontadas através da AOD. A partir desses valores tabelados, interpolações são feitas no sentido de aferir o valor da AOD em cada pixel amostrado pelo sensor a partir da radiância medida.

A versão 2.0 utiliza as mesmas LUT's da Coleção 4 da NASA/GSFC. Essas LUT's foram construídas alimentando códigos de transferência radiativa com modelos globais de aerossóis, bem como com modelos de atmosfera padronizados, como o US62 da biblioteca interna do SBDART, mencionado anteriormente.

As condições geométricas e de AOD simuladas na LUT operacional são as seguintes:

- 2 comprimentos de onda: 466 e 646 nm;
- 9 ângulos solares zenitais: 0, 12, 24, 36, 48, 54, 60, 66 e 72 graus;
- 13 ângulos zenitais de observação: 0, 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 54, 60, 66 e 72 graus;
- 31 ângulos azimutais de observação: 0, 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 54, 60, 66, 72, 78, 84, 90, 96, 102, 108, 114, 120, 126, 132, 138, 144, 150, 156, 162, 168, 174, 180 graus;
- 8 valores de AOD: 0,00, 0,25, 0,50, 0,75, 1,00, 2,00, 3,00, 5,00.

Para corrigir os efeitos da diferença entre a atmosfera padrão utilizada para confeccionar a LUT e aquela observada na ocasião da medida pelo sensor, o algoritmo executa a assimilação de dados atmosféricos, tanto de previsão como de reanálises fornecidos pelo NCEP. Atualmente, encontra-se em andamento trabalho feito por grupo de pesquisadores do CPTEC/INPE, cujo representante na DSA/CPTEC/INPE é o Dr. Rodrigo Augusto Ferreira de Souza, no sentido de disponibilizar de modo operacional o mesmo tipo de informação atualmente adquirida junto ao NCEP diretamente dos resultados do modelo regional do CPTEC.

No entanto, o algoritmo da versão 2.0 não realiza nenhuma alteração ou correção com relação às diferenças entre os modelos globais de aerossóis utilizados na criação da LUT e aqueles existentes nas regiões e épocas em que as medidas são feitas. Como pôde ser observado na figura 08, a utilização de modelos de aerossóis inapropriados para determinada região e/ou época pode levar a diferenças significativas nos valores simulados de radiâncias no topo da atmosfera e, conseqüentemente, acarretar erros consideráveis no valor final de AOD calculado pelo algoritmo.

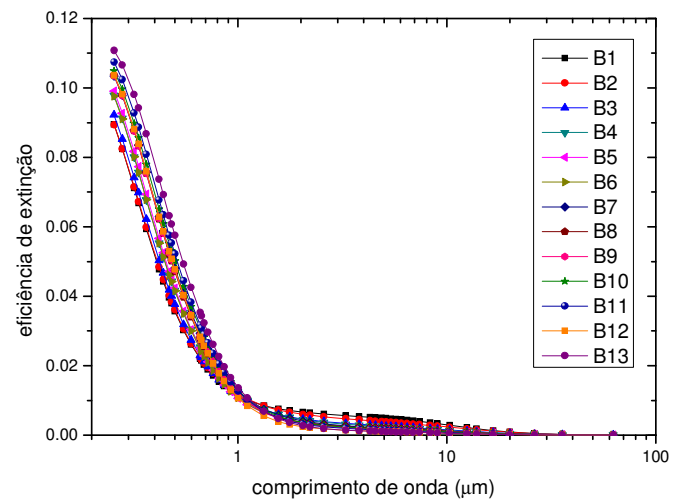
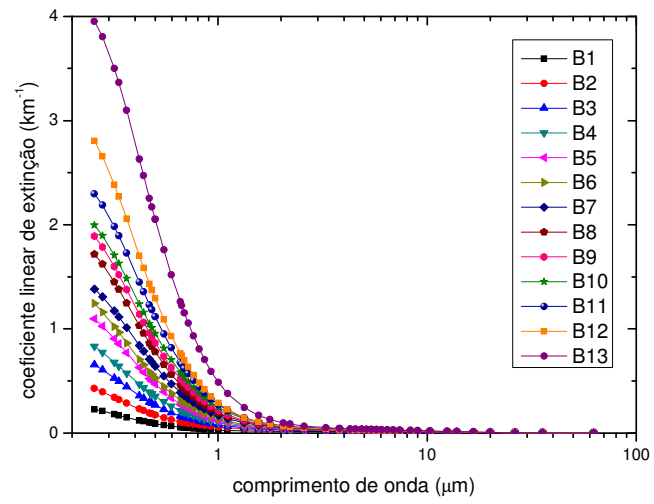
Na direção de assimilar modelos de aerossóis desenvolvidos para regiões da América do Sul por pesquisadores do LFA-IF/USP e na DSA dentro do presente projeto, são apresentadas duas novas versões do produto de AOD MODIS-DSA, ambas ainda em fase de avaliação e testes.

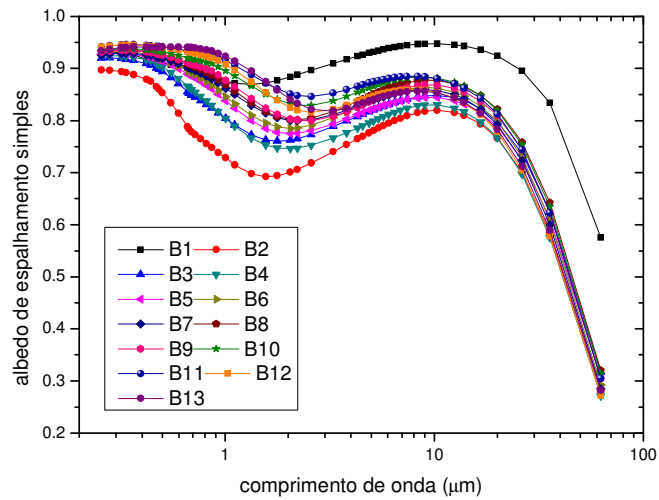
3.4.2. A versão 2.1 – o uso de novas ‘look-up tables’

Baseado em modelos ópticos e microfísicos de aerossóis típicos da região amazônica durante o período de queimadas, obtidos a partir de estudos de climatologia dos dados da rede AERONET por Melina Andrade Paixão no LFA-IF/USP, foi criada uma primeira versão para testes de uma LUT específica para a América do Sul.

Esses modelos são obtidos separando a base de dados de propriedades ópticas e microfísicas do aerossol em 13 casos de AOD, cada caso correspondendo a um intervalo com largura de 0,1. Para adaptar esses intervalos aos valores de AOD usados como referência na LUT, foram calculadas médias dos modelos ao redor do valor de AOD desejado.

Nas figuras a seguir vemos os principais parâmetros ópticos utilizados para caracterizar os modelos de aerossol alvo deste projeto.





A figura 09 mostra a diferença relativa entre as radiâncias simuladas apresentadas pela LUT atual e pela LUT confeccionada para a versão 2.1, para dada geometria solar e de observação, no comprimento de onda de 466 nm e utilizando o modelo de aerossol de queimadas na Amazônia. As diferenças observadas sugerem diferenças significativas nos valores de AOD obtidos pelos algoritmos, o que será verificado nas próximas atividades do projeto, com a obtenção de mapas de AOD com cada uma das LUT disponíveis e posterior comparação entre esses mapas.

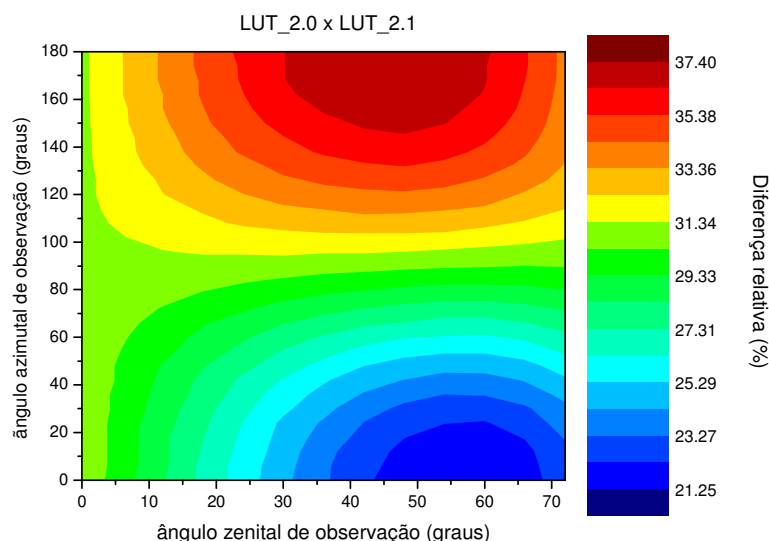


Figura 09: diferença relativa entre as radiâncias simuladas apresentadas na LUT atualmente utilizada na versão 2.0 e a nova LUT proposta para a versão 2.1, para dada geometria solar e de observação, no comprimento de onda de 466 nm e utilizando o modelo de aerossol de queimadas na Amazônia.

A confecção das LUT's utilizando o SBDART se mostrou satisfatoriamente rápida, possibilitando interação dinâmica com novos resultados no modelamento de aerossóis para outras regiões do Brasil e da América do Sul.

3.4.2. A versão 2.3 – assimilação de dados e parametrizações

Outra abordagem que foi testada na obtenção de um produto de AOD MODIS-DSA mais realista para a América do Sul em relação ao produto global da NASA/GSFC é o uso do código de transferência radiativa SBDART diretamente acoplado ao algoritmo de processamento dos dados obtidos pelo sensor a bordo do satélite.

Nesta versão, em fase de implementação, não são mais utilizadas LUT's, e sim simulações com o SBDART sendo alimentado com as condições de geometria solar e de observação de cada passagem do satélite, bem como com dados sobre a atmosfera no instante e local da passagem.

Neste caso, o modelo de aerossol a ser utilizado também será definido tendo como base a saída da versão 2.0 atualmente em uso, que servirá de estimativa do valor de AOD para identificação do caso correspondente e utilização dos parâmetros ópticos e microfísicos específicos para dada região, época do ano e carga de aerossóis atmosféricos em suspensão, através da parametrização do valor final de AOD em função da radiância medida no topo da atmosfera pelo sensor MODIS.

4. Atividades futuras

A realização do projeto de pesquisa continuará com o desenvolvimento de novos modelos ópticos e microfísicos de aerossóis atmosféricos, em colaboração com pesquisadores do Laboratório de Física Atmosférica do IF/USP. Tais modelos serão gradualmente incorporados às versões já apresentadas do produto de AOD MODIS-DSA, bem como servirão de base para o desenvolvimento de novas versões.

Serão realizadas análises referentes ao tempo de processamento envolvido em cada estratégia de inversão, possibilitando a verificação de viabilidade de operacionalização das novas versões dentro do sistema de processamento da DSA/CPTEC/INPE.

A análise dos resultados e a calibração a partir de medidas experimentais da rede AERONET será feita em conjunto com pesquisadores do CPTEC interessados na assimilação do produto no modelo CCATT-BRAMS, e que vêm desenvolvendo estudos relativos à assimilação também dos dados obtidos por essa rede de fotometria solar de superfície.

5. Conclusão

As etapas do projeto foram concluídas dentro dos prazos idealizados, bem como atividades auxiliares de aprendizado foram possíveis, como a participação em seminários, cursos e congressos.

As atividades acadêmicas do bolsista vêm sendo cumpridas sem prejuízo das atividades de pesquisa, tendo servido, inclusive, de motivação para um envolvimento ainda maior com as disciplinas diante de aplicações imediatas dos conteúdos estudados.

A interação com outros grupos de pesquisa tem aumentado significativamente o aprendizado a respeito de aplicações dos resultados do presente projeto, e ajudado de modo decisivo a direcionar de modo mais objetivo o desenvolvimento de novas versões do produto e a validação do mesmo.

6. Referências

- Andreae, M.O. Humanity: passenger or pilot on spaceship Earth?. *IGBP Global Change Newsletter* 52, 2-7, 2002.
- Andreae, M., Artaxo, P., Fischer, H., Freitas, S., Grégoire, J., Hansel, A., Hoor, P., Kormann, R., Krejci, R., Lange, L., Lelieveld, J., Lindinger, W., Longo, K., Peters, W., Reus, M., Scheeren, B., Silva-Dias, M., Ström, J., Velthoven, P., Williams, J. Transport of biomass burning smoke to the upper troposphere by deep convection in the equatorial region. *Geophysical Research Letters* 28(6), 951-954, 2001.
- Andreae, M.O., Merlet, P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global Biogeochemical Cycles* 15(4), doi:10.1029/2000GB001382, 2001.
- Andreae, M.O., Rosenfeld, D., Artaxo, P., Costa, A.A., Frank, G.P., Longo, K.M., Silva-Dias, M.A.F. Smoking rain clouds over the Amazon, *Science*, v.303, p.1337-1342, 2004.
- Artaxo, P., Andreae, M.O., Guenther, A., Rosenfeld, D. Unveiling the lively atmosphere-biosphere interactions in the Amazon. *IGBP Global Change Newsletter* 45, 12-15, 2001.
- Artaxo, P., Pauliquevis, T.M., Lara, L.L. Dry and wet deposition in Amazonia: from natural biogenic aerosols to biomass burning impacts. *IGACTivities Newsletter* 27, 12-16, 2003.
- Brasseur, G.P. An integrated view of the causes and impacts of atmospheric changes. Em: Brasseur, G.P., Prinn, R.G., Pszenny, A.A.P. (ed.) *Atmospheric Chemistry in a changing world: an integration and synthesis of a decade of tropospheric chemistry research*. Springer-Verlag, Berlin e Heidelberg, 207-271, 2003.
- Corrêa, M.P. Índice ultravioleta: avaliações e aplicações. Tese (Doutorado), Departamento de Ciências Atmosféricas, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, 247p., 2003.
- Freitas, S., Longo, K., Silva Dias, M., Silva Dias, P., Chatfield, R., Prins, E., Artaxo, P., Grell, G., Recuero, F. Monitoring the transport of biomass burning emissions in South America. *Environmental Fluid Mechanics*, (em impressão), 2004.
- Gu, L., Baldocchi, D.D., Wofsy, S.C., Munger, J.W., Michalsky, J.J., Urbansky, S.P., Boden, T.A. Response of a Deciduous Forest to the Mount Pinatubo Eruption:

- Enhanced Photosynthesis. *Science*, V.299, p.2035-2038, 2003.
- Holben, B.N., Eck, T.F., Slutsker, I., Tanré, D., Buis, J.P., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J.A., Kaufman, Y., Nakajima, T., Lavenu, F., Jankowiak, I., Smirnov, A., AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sensing of the Environment*, v.66, p.1-16, 1998.
- Kaufman, Y.J., Tanré, D. Algorithm for remote sensing of tropospheric aerosol from MODIS. NASA/GSFC, MODIS ATBD, 1998.
- Kaufman, Y.J., Tanré, D., Boucher, O. A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature*, v.419, p.215-223, 2002.
- King, M.D., Kaufman, Y.J., Menzel, W.P., Tanré, D., Gao, B.-C. *Modis Atmosphere Validation Plan*. NASA/GSFC, 1999.
- Koren, I., Kaufman, Y.J., Remer, L.A., Martins, J.V. Measurement of the Effect of Amazon Smoke on Inhibition of Cloud Formation. *Science*, v.303, p.1342-1345, DOI:10.1126/science.1089424, 2004.
- Noone, K. The indirect radiative effect of aerosols. *IGACTivities Newsletter 23*, 16-17, 2001.
- Rosenfeld, D. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution. *Science* 287, 1793-1796, 2000.
- Schoeberl, M.R., Douglass, A.R., Hilsenrath, E., Bhartia, P.K., Barnett, J., Gille, J., Beer, R., Gunson, M., Waters, J., Levelt, P.F., DeCola, P. Earth Observing System missions benefit atmospheric research. *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, v.85, n.18, p.177-181, 2004.
- Thompson, A.M. Tropical tropospheric ozone: a perspective on photochemical and dynamical interactions from observations in the past five years. *IGACTivities Newsletter 28*, 6-11, 2003.
- Ver, L.M.B., Mackenzie, F.T., Lerman, A. Carbon cycle in the coastal zone: effects of global perturbations and change in the past three centuries. *Chemical Geology* 159, 283-304, 1999.
- Yamasoe, M.A. e Manzi, A.O. Effect of smoke on the vertical profile of photosynthetically active irradiance inside the canopy observed at Rebio Jaru. *Anais da 3a. Conferência Científica do LBA*, 25.14-P, 2004.
- Walthier, G.-R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T.J.C., Fromentin, J.-M., Hoegh-Guldberg, O., Bairlein, F. Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416, 389-395, 2002.

ANEXO A - Certificados referentes ao XIV CBMET



XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA FLORIANÓPOLIS 27 NOV a 1 DEZ de 2006

CERTIFICADO

Certificamos que o trabalho **"ESTUDO DA CLIMATOLOGIA REGIONAL DE COEFICIENTE DE ANGSTRÖM COMO EXTENSÃO DO PROCEDIMENTO DE CLOUD-SCREENING DA AERONET"**, de autoria de: **CARLOS PIRES; ALEXANDRE CORREIA; MELINA MARA DE ANDRADE PAIXÃO; PAULO EDUARDO ARTAXO NETTO**, foi apresentado no XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, em 29 de novembro de 2006.

Maria G. A. Justo
Maria Cecília dos Anjos Jure da Silva
Presidente

Teresinha de Maria Bezerra Sampaio Xavier
Teresinha de Maria Bezerra Sampaio Xavier
Diretora Científica

SBMET

PATROCINADO:

- PETROBRAS
- FAPERJ
- JAPESP
- CNPq
- FAPESP
- CONSEA
- CREA-SC
- CEATEC
- INMET
- OLPE
- RSL

AFUNDADO:

- Ciram
- FURB



XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA FLORIANÓPOLIS 27 NOV a 1 DEZ de 2006

CERTIFICADO

Certificamos que o trabalho **"VALIDATION OF AEROSOL OPTICAL DEPTH RETRIEVALS BY REMOTE SENSING OVER BRAZIL AND SOUTH AMERICA USING MODIS"**, de autoria de: **ALEXANDRE CORREIA; CARLOS PIRES**, foi apresentado no XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, em 29 de novembro de 2006.

Maria G. A. Justo
Maria Cecília dos Anjos Jure da Silva
Presidente

Teresinha de Maria Bezerra Sampaio Xavier
Teresinha de Maria Bezerra Sampaio Xavier
Diretora Científica

SBMET

PATROCINADO:

- PETROBRAS
- FAPERJ
- JAPESP
- CNPq
- FAPESP
- CONSEA
- CREA-SC
- CEATEC
- INMET
- OLPE
- RSL

AFUNDADO:

- Ciram
- FURB

XIV CONGRESSO
BRASILEIRO DE
METEOROLOGIA
FLORIANÓPOLIS
27 NOV a 1 DEZ de 2006

CERTIFICADO

Certificamos que o trabalho "ESTUDO DA CLIMATOLOGIA REGIONAL DE COEFICIENTE DE ANGSTRÖM COMO EXTENSÃO DO PROCEDIMENTO DE CLOUD-SCREENING DA AERONET", de autoria de: **CARLOS PIRES; ALEXANDRE CORREIA; MELINA MARA DE ANDRADE PAIXÃO; PAULO EDUARDO ARTAXO NETTO**, foi apresentado no XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, em 29 de novembro de 2006.

Maria G. A. Justo
Maria Cecília dos Anjos Jure da Silva
Presidente

Teresinha de Maria Bezerra Sampaio Xavier
Teresinha de Maria Bezerra Sampaio Xavier
Diretora Científica

SBMET

PATROCÍNIO:

BR PETROBRAS

FAPERJ

JAPESP

CNPq

FAPESP

CONSEA CREA-SC

EXAT

UNICAMP

INMET

OLP

RSL

AFILIAÇÃO:

UFPA

UFPA

Ciram

UFPA

UFPA

UFPA

UFPA

UFPA

UFPA

XIV CONGRESSO
BRASILEIRO DE
METEOROLOGIA
FLORIANÓPOLIS
27 NOV a 1 DEZ de 2006

CERTIFICADO

Certificamos que o trabalho "QUESTÕES RELACIONADAS À OBTENÇÃO DE ESPESSURA ÓPTICA DE AEROSSÓIS, EM ALTA RESOLUÇÃO, NA REGIÃO AMAZÔNICA.", de autoria de: **SILVIA DE LUCCA; PAULO EDUARDO ARTAXO NETTO; ANDREA DARDDES DE ALMEIDA CASTANHO; ALEXANDRE CORREIA; CARLOS PIRES**, foi apresentado no XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, em 28 de novembro de 2006.

Maria G. A. Justo
Maria Cecília dos Anjos Jure da Silva
Presidente

Teresinha de Maria Bezerra Sampaio Xavier
Teresinha de Maria Bezerra Sampaio Xavier
Diretora Científica

SBMET

PATROCÍNIO:

BR PETROBRAS

FAPERJ

JAPESP

CNPq

FAPESP

CONSEA CREA-SC

EXAT

UNICAMP

INMET

OLP

RSL

AFILIAÇÃO:

UFPA

UFPA

Ciram

UFPA

UFPA

UFPA

UFPA

UFPA

UFPA

ANEXO B – Resumo expandido do trabalho apresentado no XIV CBMET

ESTUDO DA CLIMATOLOGIA REGIONAL DE COEFICIENTE DE ANGSTROM COMO EXTENSÃO DO PROCEDIMENTO DE CLOUD-SCREENING DA AERONET

Carlos Pires^{1,2}, Alexandre Correia², Melina Andrade Paixão¹, Paulo Artaxo¹

RESUMO: A AERONET (*Aerosol Robotic Network*) é uma rede mundial de radiômetros para o monitoramento de aerossóis, e utiliza um protocolo padronizado de aquisição e processamento de dados, bem como de calibração de instrumentos. Na passagem da base de dados de nível 1.0 para nível 1.5, aplica-se um procedimento de *cloud-screening* visando eliminar medidas contaminadas por nuvens. Este trabalho utiliza os resultados do procedimento de *cloud-screening* usual da AERONET, juntamente com a climatologia regional de Coeficiente de Angstrom, para obter um método de extensão do processo operacional que permite uma identificação mais rigorosa de medidas contaminadas remanescentes nas medidas de nível 1.5. São apresentados os resultados obtidos para 7 locais de medição da AERONET na América do Sul, para os quais a aplicação da metodologia descrita neste trabalho permitiu a identificação e exclusão de cerca de 2 a 13% de medidas de nível 1.5, contaminadas por nuvens. Mostra-se também um exemplo de aplicação deste método realizado em estudos de comparação entre medidas da profundidade óptica do aerossol obtidas pela AERONET com aquelas obtidas por um sensor à bordo de satélites sobre os locais de medição estudados.

ABSTRACT: AERONET (Aerosol Robotic Network) is a global sun/sky radiometer network for aerosol monitoring, using standard protocols for data acquisition, processing and instrument calibration. Processing data from base levels 1.0 to 1.5, a cloud-screening procedure is applied, in order to eliminate cloud contaminated measurements. This work uses the standard AERONET cloud-screening procedure results, in addition to regional Angstrom coefficient climatology, to derive a method for extending the operational procedure allowing a more restrictive identification of cloud contaminated measurements remaining in level 1.5 data base. We present the results obtained for 7 AERONET sites over South America, for which the use of the methodology described in this work allowed identification and removal of about 2 to 13% of level 1.5 measurements contaminated by clouds. We also present an application example of this method in a comparison study between aerosol optical depth measurements obtained by AERONET and those obtained by a satellite sensor over the studied sites.

Palavras-Chave: sensoriamento remoto de aerossóis, AERONET, *cloud-screening*.

INTRODUÇÃO

A AERONET (*Aerosol Robotic Network*) é uma rede mundial de monitoramento óptico de aerossóis atmosféricos, mantida pela NASA e expandida por diversas instituições de pesquisa ao redor do mundo. Contando com mais de 200 locais de medição, utiliza protocolo padronizado de aquisição e processamento de dados, bem como de calibração de instrumentos. O instrumento utilizado em toda a rede é o radiômetro espectral automático CIMEL CE-318, que realiza medidas

¹ Instituto de Física da Universidade de São Paulo – Laboratório de Física Atmosférica – Rua do Matão, Trav. R, 187 – CEP 05508-900 – São Paulo/SP – Phone: +55-11-3091-6925 – e-mail: capjr@if.usp.br

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – Rod. Pres Dutra, km 39 – CEP 12630-000 – Cachoeira Paulista/SP – Phone: +55-12-3186-9372 – e-mail: acorreia@cptec.inpe.br

de radiâncias direta e difusa a cada 15 minutos em média, mantido por energia solar e com colimador direcionado roboticamente (Holben *et al.*, 1998).

Como o instrumento realiza medidas independentemente da presença de nuvens, cujo efeito é especialmente difícil de detectar em medidas apontando diretamente para o sol, é necessário um procedimento automático de *cloud-screening*, ou seja, de limpeza ou exclusão das medidas contaminadas pela presença de nuvens da base considerada. Tal procedimento foi apresentado por Smirnov *et al.* (2000), e utiliza critérios ligados à variação temporal das medidas, partindo da hipótese de que maior variabilidade indica maior probabilidade de contaminação por nuvens. Por esse procedimento, ficam definidos dois níveis de bases de dados: o primeiro, chamado de nível 1.0, corresponde ao conjunto de medidas não processadas; o segundo, chamado de nível 1.5, contém as medidas que não foram excluídas pelos critérios do *cloud-screening*.

Por considerar apenas critérios relacionados à variação temporal das medidas, e por ser projetado para processar de modo automatizado resultados obtidos em todos os locais de medição pelo mundo, o algoritmo operacional de *cloud-screening* apresenta algumas limitações. No mesmo trabalho em que o procedimento é apresentado (Smirnov *et al.*, 2000) é discutida uma dessas limitações, referente ao chamado Coeficiente de Angstrom. Esse parâmetro, definido em função da dependência espectral da profundidade óptica do aerossol, é um bom indicador qualitativo do tamanho das partículas de aerossol (Angstrom, 1929). O Coeficiente de Angstrom possui valores típicos entre 0 e 4, sendo que valores mais altos correspondem a populações de partículas de raios efetivos menores e vice-versa. Valores muito próximos de 0, inclusive valores negativos, podem indicar a contaminação pela presença de nuvens, que possuem partículas significativamente maiores do que as partículas de aerossol tipicamente encontradas. Por isso, o Coeficiente de Angstrom é apontado como um possível parâmetro de verificação de contaminação por nuvens, podendo ser utilizado para restringir a base de dados estudada a partir de um valor limite inferior desse parâmetro, valor limite este que deve variar de acordo com o local e os tipos de aerossol considerados (Smirnov *et al.*, 2000).

O objetivo do presente trabalho foi estabelecer um método de identificação dos valores limite de Coeficiente de Angstrom para cada local estudado, e aplicar esse método para medidas coletadas em vários locais com radiômetros da AERONET na América do Sul. Os valores limite obtidos poderão ser utilizados por outros autores para realizar um *cloud-screening* mais restritivo sobre medidas AERONET de nível 1.5, possibilitando uma exclusão mais criteriosa de medidas realizadas sob efeito da presença de nuvens e que eventualmente não tenham sido excluídas pelo procedimento operacional utilizado pela própria AERONET.

MÉTODOS

Foram utilizadas medidas AERONET de nível 1.0 e 1.5 coletadas em 7 locais na América do Sul: Cuiabá-Miranda, Alta Floresta, São Paulo, ABRACOS Hill, no Brasil; Santa Cruz de la Sierra, na Bolívia; Córdoba e Buenos Aires, na Argentina. Os períodos analisados e os respectivos números de medidas para cada local estudado podem ser vistos na Tabela 1.

Foram analisados os valores de coeficiente de Angstrom (440-675 nm) de nível 1.0. Histogramas construídos para cada local de medidas apontaram a ocorrência, em geral, de valores entre -1.0 e 4.0, distribuídos em duas modas principais, cuja ocorrência indica a existência de populações diferentes para o coeficiente de Angstrom. Pelos motivos já expostos anteriormente (Smirnov *et al.*, 2000), especial atenção foi dada à moda correspondente aos valores mais baixos, geralmente centrada em valores próximos de zero, possivelmente relacionada à contaminação das medidas pela presença de nuvens.

Partindo do princípio de que o procedimento de *cloud-screening* da AERONET é capaz, de um modo tão geral quanto o possível (Smirnov *et al.*, 2000), de minimizar a contaminação por nuvens nas medidas de nível 1.5, uma primeira abordagem para testar a hipótese da relação entre baixos valores de Coeficiente de Angstrom e a contaminação por nuvens foi a comparação dos histogramas obtidos a partir dos dados de nível 1.0 com seus correspondentes de nível 1.5. Essa comparação mostrou que a principal consequência da aplicação do procedimento operacional de *cloud-screening* sobre a base de nível 1.0 é a quase total eliminação da moda inferior em análise, tendo a moda superior aproximadamente mantido suas características, como pode ser observado na Figura 01 (a).

Para estudar a definição de um limite entre as modas do Coeficiente de Angstrom de forma objetiva, foi procurada uma função que, ajustada à distribuição de frequências das medidas de nível 1.0, apresentasse, no limite superior da região correspondente à moda superior, tida como livre de contaminação por nuvens, as mesmas características estatísticas que permaneceram intactas na passagem dos dados de nível 1.0 para nível 1.5. A função procurada deveria representar um comportamento assimétrico em relação a posição de seu valor máximo, apresentando elevação gradual até esse máximo e queda relativamente rápida após esse ponto. Entre as funções analisadas, a que apresentou melhor adequação aos objetivos traçados foi a sigmoidal assimétrica (Equação (1)).

$$y = y_0 + A \cdot \frac{1}{1 + e^{-\frac{x-x_c + \frac{w_1}{2}}{w_2}}} \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + e^{-\frac{x-x_c - \frac{w_1}{2}}{w_3}}} \right) \quad (1)$$

Na Figura 01 (b), vemos os resultados da Figura 01 (a) sobrepostos pela curva ajustada (em azul) sobre as medidas de nível 1.0 (em vermelho). É possível observar a manutenção das

propriedades da distribuição no limite superior, sendo o limite inferior influenciado pela moda de valores mais baixos de Coeficientes de Angstrom, tida como sinal de contaminação pela presença de nuvens.

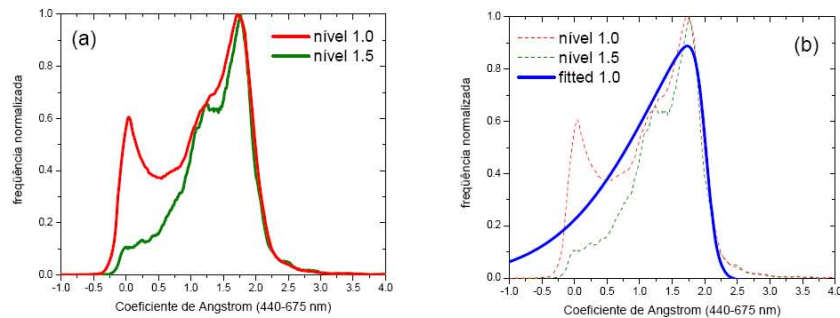


Figura 01. (a) Exemplo de comparação entre a frequência de ocorrências de valores de Coeficiente de Angstrom nas bases de dados de nível 1.0 (antes do procedimento operacional de *cloud-screening*) e de nível 1.5 (após a aplicação do procedimento pela AERONET). (b) Gráfico anterior, agora incluindo a curva ajustada a partir dos dados de nível 1.0, que contém, na moda superior, as propriedades da distribuição dos dados de nível 1.5. Em ambos os gráficos, os resultados referem-se aos dados coletados em Alta Floresta (MT), entre os meses de Janeiro de 1999 e Agosto de 2006.

Em busca de uma maneira objetiva e operacional de identificar valores de Coeficiente de Angstrom que pudessem ser utilizados como limites inferiores de uma distribuição relativamente livre de contaminação, foi estudado o comportamento dos resíduos resultantes desse procedimento de ajuste, apresentado na Figura 02. Nesse ponto, o valor do Coeficiente de Angstrom correspondente à primeira intersecção entre a distribuição original e a curva ajustada, após a moda inferior, foi adotado como limite inferior adequado. É importante ressaltar que tal escolha não se apresentou como fruto do estudo do processo físico envolvido, e sim se deveu apenas ao objetivo de determinar de modo operacional um critério de refinamento do procedimento de *cloud-screening* utilizado em larga escala pela AERONET. Assim, a obtenção de tais valores limite de Coeficiente de Angstrom presta-se à função de proporcionar uma limpeza mais rigorosa sobre os dados de nível 1.5, de acordo com a necessidade e a relação custo operacional / benefício em cada caso. Além disso, esse procedimento possibilita a estimativa de um desvio padrão associado ao valor limite apontado, feita a partir da razão entre a frequência de ocorrência desse valor e as áreas de cada uma das modas observadas nos histogramas dos dados de nível 1.5. Tal desvio padrão estimado pode ser usado como medida do rigor aplicado na nova limpeza dos dados já processados. Aplicações que necessitem maior ou menor rigor podem utilizar valores limites de Coeficiente de Angstrom acrescidos ou diminuídos da quantidade de desvios-padrão adequada. Ao elevar o valor limite utilizado, elimina-se uma parcela de dados não contaminados por nuvens, mas aumenta-se a confiança na eliminação de dados contaminados, e vice-versa. Resultados preliminares já apontaram que os resíduos do ajuste realizado podem conter informações importantes sobre outras

modas presentes na distribuição estudada, modas essas que podem representar diferentes tipos de aerossol influenciando cada um dos locais estudados.

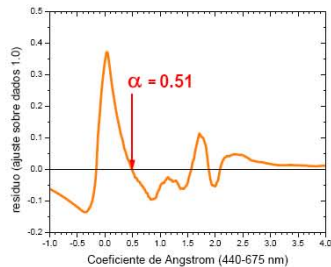


Figura 02. Gráfico de resíduos resultantes do ajuste da curva descrita pela Equação (1) à distribuição de dados de nível 1.0. O valor apontado, $\alpha = 0.51$, corresponde ao limite inferior de valores de Coeficiente de Angstrom (440-675 nm) considerado como indicativo do efeito da presença de nuvens. O gráfico e o valor apontado correspondem aos resultados obtidos sobre o conjunto de dados coletados em Alta Floresta (MT), entre os meses de Janeiro de 1999 e Agosto de 2006.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na figura 03 a seguir podemos observar os resultados obtidos para cada um dos locais estudados na América do Sul. Em vermelho, vemos a curva de frequência normalizada de ocorrência de valores de Coeficiente de Angstrom na base de medidas de nível 1.0, enquanto que em verde são apresentados os resultados referentes às medidas de nível 1.5.

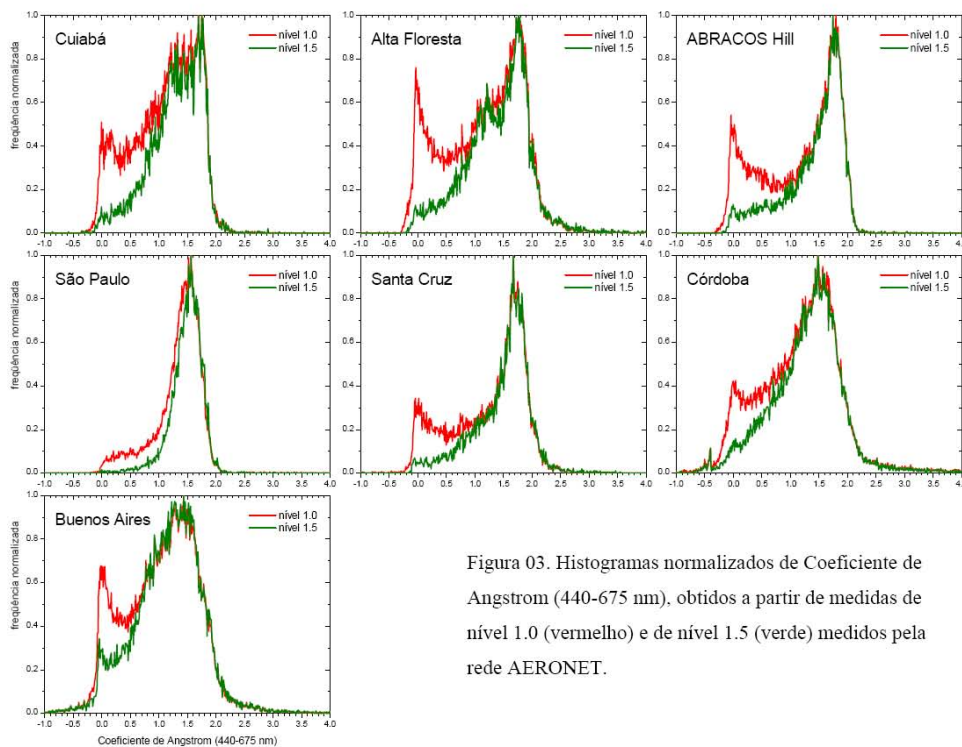


Figura 03. Histogramas normalizados de Coeficiente de Angstrom (440-675 nm), obtidos a partir de medidas de nível 1.0 (vermelho) e de nível 1.5 (verde) medidos pela rede AERONET.

A Tabela 1 mostra os resultados da aplicação do método de extensão do procedimento de *cloud-screening* às medidas ilustradas na Figura 03, identificando os valores de Coeficiente de Angstrom apontados pelo método como limites inferiores adequados para a exclusão, da base de nível 1.5, de medidas contaminadas pela presença de nuvens, acompanhados de seus respectivos desvios padrão. Na última coluna, podemos observar a porcentagem de dados de nível 1.5 excluídos utilizando os valores limite apontados. Vemos que essa porcentagem ilustra o quanto determinados locais são mais afetados pela presença de medidas contaminadas na base de nível 1.5, como Córdoba, enquanto que outros são relativamente pouco afetados, como São Paulo.

Tabela 1. Valores identificados como limites inferiores de Coeficiente de Angstrom, para cada local analisado, incluindo o período e o tamanho da base de dados utilizada, bem como a porcentagem de dados de nível 1.5 com valores abaixo do limite e, assim, apontados como contaminados por nuvens.

<i>Site AERONET</i>	<i>Período analisado</i>	<i>Número de dados nível 1.0</i>	<i>Coeficiente de Angstrom (440-675 nm) limite inferior identificado</i>	<i>Porcentagem de dados nível 1.5 excluídos</i>
Cuiabá-Miranda	2001-2006	30864	0,41 (11)	5,15 %
Alta Floresta	1999-2006	51820	0,51 (12)	6,50 %
Abracos Hill	1999-2005	35818	0,61 (10)	11,21 %
São Paulo	2000-2006	38906	0,84 (12)	2,25 %
Santa Cruz	1996-2006	25753	0,68 (11)	8,15 %
Córdoba	1999-2006	69028	0,57 (17)	12,99 %
Buenos Aires	1999-2006	72281	0,34 (09)	10,17 %

Esses resultados, apesar de ainda em estágio preliminar, já vêm sendo aplicados com sucesso na seleção de bases de dados utilizadas para validação do produto de Profundidade Óptica de Aerossóis (AOD) obtido pela DSA-CPTEC/INPE a partir de medidas de radiância efetuadas pelo sensor MODIS, a bordo dos satélites Terra e Aqua da NASA (*Correia et al.*, 2006). A aplicação do método apresentado neste trabalho melhorou os resultados da comparação entre as medidas de superfície em sites da AERONET com aquelas feitas pelo sensor em órbita da seguinte maneira:

- Antes da aplicação do método:

$$\text{AOD(MODIS)} = -0,033(11) + 0,769(39) * \text{AOD(AERONET)},$$

com coeficiente de correlação $R = 0,71$;

- Após a aplicação do método (excluindo pontos contaminados por nuvens):

$$\text{AOD(MODIS)} = -0,089(66) + 1,25(27) * \text{AOD(AERONET)},$$

com coeficiente de correlação $R = 0,92$.

CONCLUSÕES

Foi apresentado um novo método para a identificação de valores limite de Coeficiente de Angstrom como indicador da contaminação por presença de nuvens em medidas de nível 1.5 da rede AERONET. Esse método leva em consideração os resultados do procedimento operacional de *cloud-screening* já utilizado, e fornece meios para uma seleção mais rigorosa, baseada em características regionais de cada local analisado, dificilmente abrangidas por procedimentos gerais como o usado globalmente. Sua aplicação permitirá que outros autores, deparando-se com a necessidade de utilizar resultados AERONET ainda mais livres de medidas contaminadas por nuvens do que as encontradas no nível 1.5, possam usar o Coeficiente de Angstrom como parâmetro auxiliar nesse processo.

Apesar de se tratar de trabalho ainda em desenvolvimento, esse método já apresenta resultados interessantes, não só do ponto de vista de validação como de aplicação em estudos correlatos, como o apresentado por *Correia et al.* (2006).

Os próximos passos a serem dados são a obtenção dos valores limite de Coeficiente de Angstrom para outros locais de medidas AERONET, a validação dos resultados obtidos com a aplicação desse método e, principalmente, a caracterização das propriedades ópticas obtidas nos pontos excluídos pelo método, para um aprimoramento cada vez maior do conhecimento sobre os efeitos da contaminação pela presença de nuvens nas medidas AERONET analisadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Brent Holben por seus esforços em estabelecer e manter os sites da AERONET utilizados neste trabalho, bem como a Gilberto Nishioka por seu importante papel na construção da base de dados estudada. C. Pires e M. Andrade Paixão agradecem ao CNPq pelo suporte financeiro (Processos PIBIC 117362/2006-9 e 100961/2006-1). A. Correia agradece à FAPESP pelo suporte financeiro (Processos 04/10084-8 e 05/51356-3).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Angstrom, A. On the atmospheric transmission of Sun radiation and dust in the air. *Geogr. Ann.*, 11, 156-166, 1929.
- Correia, A., Pires, C. Validation of aerosol optical depth retrievals by remote sensing over Brazil and South America using MODIS. *Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia*, 2006.
- Holben, B.N., Eck, T.F., Slutsker, I., Tanré, D., Buis, J.P., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J.A., Kaufman, Y.J., Nakajima, T., Lavenu, F., Jankowiak, I., Smirnov, A. AERONET - A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sensing of the Environment* v.66, n.1, p1-16, 1998.
- Smirnov, A., Holben, B.N., Eck, T.F., Dubovick, O., Slutsker, I. Cloud-screening and quality control algorithms for the AERONET database, *Remote Sensing of the Environment*, v.73, p.337-349, 2000.

The effects of biomass burning aerosols and clouds on the CO₂ flux in Amazonia

By PAULO H. F. OLIVEIRA^{1*}, PAULO ARTAXO¹, CARLOS PIRES¹, SILVIA DE LUCCA¹, ALINE PROCÓPIO², BRENT HOLBEN³, JOEL SCHAFFER³, LUIZ F. CARDOSO⁴, STEVEN C. WOFSY⁵ and HUMBERTO R. ROCHA⁶, ¹LFA – Laboratório de Física Atmosférica, Instituto de Física, Universidade de São Paulo, Rua do Matão, Travessa R, 187, São Paulo, SP, CEP 05508-900, Brazil; ²Departamento de Engenharia Bioquímica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Av. Brig. Trompowski, Rio de Janeiro, R.J., CEP: 21949-900, Brazil; ³NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, United States.; ⁴UNIR Fundação Universidade Federal de Rondônia, Campus de Ji-Paraná, Ji-Paraná, Brazil; ⁵Harvard University, Department of Earth and Planetary Science, 29 Oxford St., Cambridge, MA 02138, USA; ⁶Departamento de Ciências Atmosféricas – IAG - Universidade de São Paulo, Rua do Matão, 1226 - CEP 05508-900, São Paulo, SP - Brazil

(Manuscript received 30 april 2006; in final form 28 December 2006)

ABSTRACT

Aerosol particles associated with biomass burning emissions affect the surface radiative budget and net ecosystem exchange (NEE) over large areas in Amazonia during the dry season. We analysed CO₂ fluxes as a function of aerosol loading for two forest sites in Amazonia as part of the LBA experiment. Aerosol optical thickness (AOT) measurements were made with AERONET sun photometers, and CO₂ flux measurements were determined by eddy-correlation.

The enhancement of the NEE varied with different aerosol loading, as well as cloud cover, solar elevation angles and other parameters. The AOT value with the strongest effect on the NEE in the FLONA-Tapajós site was 1.7, with an enhancement of the NEE of 11% compared with clear-sky conditions. In the RBJ site, the strongest effect was for AOT of 1.6 with an enhancement of 18% in the NEE. For values of AOT larger than 2.7, strong reduction on the NEE was observed due to the reduction in the total solar radiation. The enhancement in the NEE is attributed to the increase of diffuse versus direct solar radiation. Due to the fact that aerosols from biomass burning are present in most tropical areas, its effects on the global carbon budget could also be significant.

1. Introduction

Global emissions from fossil fuel burning have added large quantities of CO₂ to the atmosphere since the beginning of the last century (Schimel, 1995), and a variety of studies have examined the processes that could account for the fate of this additional carbon injected to the atmosphere, in both oceanic and terrestrial component of the global carbon cycle (e.g. Fan et al., 1998; Houghton et al., 2000). The tropical rain forest biome plays a large role in the global carbon budget (Melillo et al., 1996; Field et al., 1998), but there is great uncertainty about their current and future impact on atmospheric CO₂ concentrations (Tans and White 1998; Schimel et al., 2001).

Tropical forests in Amazonia play an especially important role in the terrestrial component of the global carbon cycle (Malhi

et al., 1998; Kruijt et al., 2004), and they respond strongly to climate variability, such as changes in precipitation (Marengo et al., 2001), temperature and radiation (Procopio et al., 2004). Carbon cycling in Amazonia has been studied in several short and long term measurements, showing very different values for the CO₂ fluxes measured through the eddy-correlation technique (Grace et al., 1996; Malhi et al., 1998; Keller et al., 2001; Andreae et al., 2002; von Randow et al., 2002; Kruijt et al., 2004; Ometto et al., 2005). The first measurements of ecosystem CO₂ exchange conducted in Amazonia using eddy-correlation (Grace et al., 1995a,b, 1996; Malhi et al., 1998), suggested a huge net carbon uptake of 3–6 tC ha⁻¹ yr⁻¹. The main problem with these measurements lie in the difficult in assessing the night time fluxes under stable conditions (von Randow et al., 2002; Kruijt et al., 2004; Ometto et al., 2005) that can cause large errors in the estimation of diurnal and annual carbon fluxes in tropical forests. Saleska et al. showed that forest disturbances also play a large role in carbon exchange at least for some areas in Amazonia (Saleska et al., 2003). In terms of carbon fluxes the

*Corresponding author.
e-mail: pauloh@if.usp.br
DOI: 10.1111/j.1600-0889.2007.00270.x

compilation of Ometto et al. (2005), indicates that in Amazonia the natural forest could be a small carbon sink of the order of $-0.5 \text{ tC ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$. These values are confirmed by dendrometry measurements. Ometto indicates that the overall estimates from losses from deforestation and the assimilation by the natural forest in Amazonia showed a carbon flux range that goes from -3.0 to $+0.75 \text{ PgC yr}^{-1}$.

Deforestation in the Amazon region, which has the largest continuous area of tropical forest, has been studied using remote sensing techniques (Fearnside et al., 1996). The average deforestation rate for the nineties was $17\,000 \text{ km}^2$ per year, increasing to approximately $25\,000 \text{ km}^2$ in 2002 and 2003 (INPE, 2004). Up to 2005, an estimated area of 16% of the total Brazilian Amazon area of 5.8 million km^2 have been deforested (INPE, 2004). Most of this process has been concentrated in the Southern and Eastern part of Amazonia, while the central areas, less accessible, are relatively preserved. Deforestation affects the ecosystem in several ways, first there is a change in the energy and water balance when forest is replaced by pastures and this change has the potential to alter the atmospheric water content and precipitation patterns (Silva Dias et al., 2002). Second, a large amount of aerosol particles is released to the atmosphere as forests are cut and burned in the course of managing pastures and fields, leading to profound changes in the atmospheric composition (Artaxo et al., 1998, 2002), surface radiation balance (Schafer et al., 2002a,b; Procopio et al., 2003, 2004), as well as in cloud cover due to the presence of large amounts of black carbon particles (Koren et al., 2004; Kaufman and Koren, 2006).

During biomass burning events in Amazonia, ground level particle concentrations of up to $800 \mu\text{g m}^{-3}$ have been observed (e.g. in Alta Floresta, north of Mato Grosso state). Aerosol optical thicknesses (AOT) of more than 3 at 500 nm are frequently observed. AOT is a measurement of the amount of aerosol particles integrated over the atmospheric column, weighted by the scattering and absorption properties of the average aerosol. It is defined mathematically as the integration of the *linear extinction coefficient* throughout the atmospheric column (Eck et al., 1998; Holben et al., 1998).

Particle number concentrations that are very low in the wet season, averaging around 300 particles per cubic centimetre, can reach very high concentrations of around 30000 particles per cubic centimetre in the dry season (Andreae et al., 2002; Artaxo et al., 2002; Procopio et al., 2004). The interaction of the downward solar radiation with these particles and with clouds in the region, directly affect the atmospheric radiative budget, reducing the direct beam of downward solar radiation and increasing the diffuse fraction, especially in the wavelengths of the photosynthetically active radiation (PAR) region (Gu et al., 1999; 2003; Schafer et al., 2002a,b; Niyogi et al., 2004). The instantaneous reduction in total surface solar radiation can be as much as 375 Wm^{-2} (Schafer et al., 2002b) for PAR, and average daily values reduced by up to 37% (Procopio et al., 2004). The effects of this strong radiation deficit on the CO_2 net flux (net ecosystem

exchange-NEE), and on the environmental variables that influence these CO_2 flux in the Amazonia, are complex and far from being fully understood. This large amount of aerosol can reduce surface temperatures by $2\text{--}3^\circ$ degrees over large areas. Additionally, high atmospheric aerosol loading also changes cloud microphysics and low cloud occurrence that affects precipitation and surface radiation balance in significant ways (Andreae et al., 2004; Koren et al., 2004).

Field measurements in several different sites have showed that high CO_2 exchange occurs more frequently on cloudy days instead of clear-sky days (Price and Black, 1990; Hollinger et al., 1994; Gu et al., 1999, 2003; Niyogi et al., 2004). Some studies have showed that for a certain level of irradiance, cloudy days show higher NEE values compared with clear-sky days (Fan et al., 1995; Baldocchi, 1997; Niyogi et al., 2004). To explain such observations, some mechanisms have been postulated by various authors. They include an increase in the diffuse radiation fraction (Price and Black, 1990; Hollinger et al., 1994), a reduction in the vapour pressure deficit (VPD), and therefore a reduction of the respiration of tree leaves (Baldocchi, 1997), and other effects.

The major objectives in the present study are to quantify the influence of aerosol particles emitted by biomass burning on the NEE for two sites in Amazonia. We also want to analyse the net effect of the increase in the diffuse radiation fraction and the reduction of the total solar flux on carbon fluxes. Using long-term eddy-correlation flux data, plus meteorological and aerosol optical thickness measurements, this work presents strong evidence that the presence of aerosol particles can actually enhance CO_2 uptake in Amazonian forests sites during the dry season.

2. Site descriptions

Two LBA tower sites were chosen for this study; both have long term data for carbon fluxes and for aerosols and radiation. They are about 3000 km apart, with different climatology for precipitation and different biomass burning impacts. The Rondônia state site (Reserva Biológica Jarú-RBJ) is heavily influenced by biomass burning particles (Silva Dias et al., 2002; Andreae et al., 2004), and previous studies have shown high carbon assimilation for measurements at this site (von Randow et al., 2002). A second site in the Pará state (Floresta Nacional do Tapajós - FLONA-Tapajós), was chosen because of a smaller impact by biomass burning particles during dry season. FLONA-Tapajós is the only LBA site that shows net carbon loss overall from the ecosystem (Saleska et al., 2003). Figure 1 shows a map with the location of the two sites.

2.1. Reserva Biológica Jarú (RBJ)

The Reserva Biológica Jarú (RBJ) Tower Site ($10^\circ 05' \text{S}$ and $61^\circ 55' \text{W}$) is located approximately 100 km to the North of the urban area of Ji-Paraná, Rondônia, Brazil (Fig. 1). The RBJ

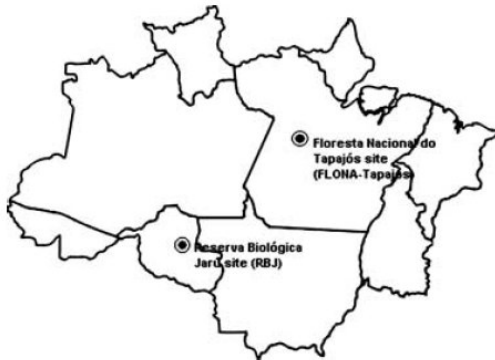


Fig. 1. Map of the sites studied: Reserva Biológica Jarú (RBJ), in Rondônia, Brazil and Floresta Nacional do Tapajós (FLONA-Tapajós), in Pará, Brazil.

is a 'terra firme' forest area with approximately 268 000 ha of undisturbed tropical forest, at an altitude varying between 100 and 150 m above mean sea level. The forest canopy has an average height between 30 and 35 m; however some trees can reach 45 m. Among the large number of different species that can be found at the RBJ are *Hymenaea courbaril* (Jatobá), *Apeiba tibourbou* (Pente de Macaco) and *Soracea guilleminiana* (Jaca-branca, Jaca-brava). The *Hymenaea* and *Apeiba* trees lose their leaves in the dry season, while the *Soracea* is an evergreen species.

The average temperature is almost constant throughout the year, but precipitation varies strongly with seasons. The southern hemisphere summer is the rainiest period in the region, with monthly totals over 200 mm. In contrast, during the dry season, from June to October, it is common to observe several weeks without rain. After the construction of the Cuiabá-Porto Velho highway (BR 364) in 1968, a dense network of adjacent roads to this highway gradually was built and the state is severely affected by deforestation. The area where the measurements were done is a protected area by Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) and remains undisturbed over most of the area.

Figure 2a shows the time series of the aerosol optical thickness (500 nm) at the Abracos Hill site, near to Ji-Paraná, Rondônia, measured by the AERONET sun photometer from 1999 to 2006. Note the very high AOT values during the dry season due to biomass burning emissions. The wet season background AOT values are very low, on the order of 0.05.

2.2. Floresta Nacional do Tapajós (FLONA-Tapajós)

The FLONA-Tapajós Tower Site (3°01'S and 54°58'W) is located approximately 83 km to the south of Santarem city, in the Pará state, Brazil (Fig. 1). FLONA-Tapajós has an area of approx-

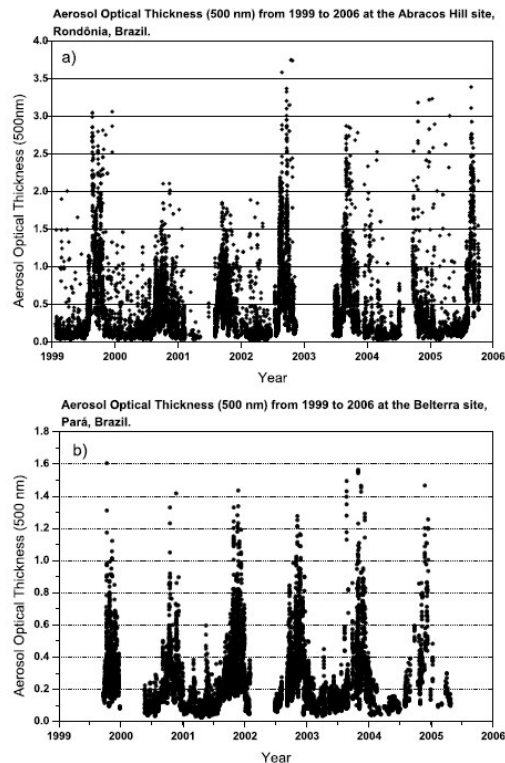


Fig. 2. Time series of aerosol optical thickness (AOT) at 500 nm from 1999 to 2006 for Abracos Hill site (a), in Rondônia, and for Belterra (b) site, in Pará, showing very high AOT values during the dry season.

imately 600 000 hectares characterized by dense primary forest on flat upland terrain, with an average canopy height between 35 and 40 m. The forest is semi deciduous, with mostly evergreen and a few deciduous species. Among the dominant species are *Cedrela odorata* (Cedar), *Aniba guianensis* (Blond), *Lecythis pisonis* (Chestnut sapucaia) and *Mezelaurus itaúba* (Itaúba), among others.

The FLONA-Tapajós dry season, which extends from August to November, are the months with monthly precipitation below 4% of the annual total (Hernandez et al., 1993). The Figure 2b shows the time series of aerosol optical thickness (500 nm) at the Belterra site, near to Santarem, Pará, from 1999 to 2006, showing values significantly lower than Rondônia, but still very high in terms of AOT values.

3. Methods

The set of meteorological and radiation measurements for the RBJ and FLONA-Tapajós sites is based on commercial sensors

coupled to automatic weather stations installed on the towers. Meteorological measurements were averaged to 30 min during the study period. At the RBJ site, the total downward solar radiation was measured with the CM21 pyranometer from Kipp & Zonen, while the total downward PAR radiation was measured with a quantum sensor LI-190SZ from LICOR. At the FLONA-Tapajós site the total downward solar radiation was measured with the CM6 thermopile pyranometer from Kipp & Zonen, and total downward PAR radiation was measured with LI-190 from LICOR.

Both sites were equipped with *eddy-correlation systems*, similar to that described by Moncrieff et al. (1997) and Saleska et al. (2003). At the RBJ site the systems is closed-path, composed of a three axis sonic anemometer (Solent 1012R2, Gill Instruments, UK), and a fast response (0.1 s response time) infrared gas analyser (IRGA, LI-6262, LICOR, USA). The air is collected through a Teflon tube of 4 mm internal diameter, 5 m in length, from an inlet near the sonic anemometer to the IRGA instrument, using a membrane air pump at a flow rate of about 7 l min^{-1} . To prevent dust entering the sampling tubing, Teflon filters of $1 \mu\text{m}$ pore were used. The CO_2 and H_2O mixing ratio analogue signals plus the sonic anemometer data were processed by A/D converters. This signal plus temperature and wind velocities measured by the sonic anemometer were recorded at a rate of 10.4 Hz for later off-line flux calculations. An algorithm was set to compensate the time delay of the IRGA signals and include corrections for instrument response and damping fluctuations, following the methodology described by Moncrieff et al. (1997) and Aubinet et al. (2000). Generally these corrections were small and represent an almost negligible uncertainty factor on the final carbon flux value (Kruijt et al., 2004).

The closed-path turbulent fluxes of CO_2 at the FLONA-Tapajós site were digitized and stored at 4 Hz. Wind and temperature were measured with a three axis sonic anemometer (Campbell Scientific, Logan UT). The CO_2 and H_2O concentrations were measured using an infrared gas analyser (IRGA, LI-6262, LICOR, Lincoln NE). Air was collected through a Teflon tube of 9.5 mm inner diameter, 75 m in length, from a coarse polyethylene screen inlet 50 cm above the sonic anemometer, drawing 20–24 standard l min^{-1} of the air through the closed-path IRGA. To prevent dust entering the sampling tubing, Teflon filters of $1 \mu\text{m}$ pore were used. Corrections for time delay of the IRGA signals, including corrections for instrument response and damping of fluctuations through the IRGA tube were performed.

The AERONET CIMEL sun-photometers have been operated at two sites: the Abracos Hill site, at the Fazenda Nossa Senhora Aparecida ($10^\circ 45' \text{S}$ and $62^\circ 22' \text{W}$), about 100 km from the RBJ CO_2 flux tower and the Belterra ($02^\circ 39' \text{S}$ and $54^\circ 57' \text{W}$) site, close to FLONA-Tapajós CO_2 flux tower ($3^\circ 01' \text{S}$ and $54^\circ 58' \text{W}$). The AERONET sun photometers were close enough of the towers to be representative of the aerosol loading over them, since

during the dry season the atmospheric aerosol loading is a regional component, with high concentrations rather uniform over hundreds of kilometres (Andreae et al., 2002; Procopio et al., 2003).

The data analysis performed in this work cover a measurement period from June 28, 2000 to December 31, 2003 at the FLONA-Tapajós site and from January 28, 2000 to December 31, 2001 at the RBJ site.

3.1. Methodology for the quantification of the aerosol loading and cloud cover

In order to quantify the aerosol and cloud effects on the NEE, we calculated the so-called *relative irradiance* (f) (eq. 1) to produce a measurement of the reduction in the total downward solar flux caused by the presence of aerosol particles and clouds in the atmosphere, compared with the clean atmosphere. The 'experimental' f is defined here as the ratio between the total downward solar irradiance measured by the pyranometer, and the total downward solar irradiance that this same pyranometer would be measuring in cloudless conditions and with atmospheric background aerosol loading (defined at $\text{AOT} = 0.05$, that is the average value of the wet season in both sites) (eq. 1). This cloudless solar irradiance with background aerosol condition was calculated with the radiative transfer code Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer (SBDART) (Ricchiuzzi et al., 1998). The aerosol model used in the SBDART calculations was carefully developed with measurements in Amazonia, and was the same as used in Procopio et al. (2003, 2004).

$$f = \frac{S_{\text{MEAS}}[\text{AOT, clouds and aerosols}]}{S_0[\text{AOT} = 0.05, \text{cloudless}]} \quad (1)$$

In the eq. (1), $S_{\text{MEAS}}[\text{AOT, clouds and aerosols}]$ is the total downward solar irradiance measured by the pyranometer in actual sky conditions, and $S_0[\text{AOT} = 0.05, \text{cloudless}]$ is the total downward solar irradiance that the same pyranometer would be measured for cloudless and background aerosol ($\text{AOT} = 0.05$) condition, calculated from SBDART. From eq. (1), measurements of f performed during cloudless days with background aerosols show relative irradiance equal to 1.0. Increasing aerosol loading and cloud cover makes f approach zero.

3.2. Methodology used to isolate the aerosol effect on the NEE measurements

Aerosols and clouds both affect the surface radiative flux. To observe only the aerosol effect on the solar irradiance flux (computed from ' f '), and consequently on the NEE measurements, the aerosol effect has to be isolated from the cloud effect. Measurements were classified as affected only by aerosols if they

were performed under cloudless condition. AERONET has a very carefully designed algorithm to exclude cloud contamination on the AOT measurements (Holben et al., 1998). Only AERONET level 2.0 data (after cloud screening and recalibration of the CIMEL sun photometer) were used in this study, but the procedure cannot exclude the possibility of a small cloud contamination that could be observed by the pyranometer, but not sensed by the sun photometer. This condition could happen for instance at high solar zenith angles and for azimuth angles. These un-screened clouds can significantly reduce (or slightly increase) the level of total downward solar irradiance measured by the pyranometer for days viewed as cloudless. This effect, called *cloud gap effect*, (Gu et al., 1999), happens because the sunlit area, located in the end of the trajectory of the solar beam, when this travel between 'windows' formed by individual clouds, receives the same amount of direct radiation whatever clouds are present outside the direct view. However, the diffuse fraction is increased due to the scattering and reflection of the beam by adjacent clouds, so the name 'cloud gap effect'.

The *cloud gap effect* was observed in the total downward solar irradiance, and consequently on the f measurements, performed at the RBJ and FLONA-Tapajós site. Therefore to identify cloud influence on the solar irradiance and to separate only the aerosol effect on the relative irradiance (f), the aerosol optical model developed by Procopio et al. (2003, 2004) was used. This approach produces the modeled f (named ' f_s ') as a function of the AOT in cloudless conditions (eq. 2):

$$f_s = \frac{S_{\text{SIM}}[\text{AOT}, \text{cloudless}]}{S_0[\text{AOT} = 0.05, \text{cloudless}]} \quad (2)$$

$S_{\text{SIM}}[\text{AOT}, \text{cloudless}]$ is the value of the modeled total downward solar irradiance that should be measured by the pyranometer in completely cloudless conditions, for any AOT value, and $S_0[\text{AOT} = 0.05, \text{cloudless}]$ is the solar irradiance modeled for a cloudless and background aerosol (AOT = 0.05) condition. $S_{\text{SIM}}[\text{AOT}, \text{cloudless}]$ and $S_0[\text{AOT} = 0.05, \text{cloudless}]$ were calculated with the radiative transfer code SBDART (Ricchiuzzi et al., 1998). The inputs used in this code to calculate $S_{\text{SIM}}[\text{AOT}, \text{cloudless}]$ were the optical properties of biomass burning aerosol particles (asymmetry parameter, extinction efficiency and single scattering albedo) derived in previous experiments in the Amazonia. It was considered that the atmospheric background conditions have AOT equal to 0.05 at 500 nm wavelength. The solar irradiance was calculated for the solar spectra (0.3–3.8 μm). This procedure provides an expected (modelled) relationship between relative irradiance and AOT.

Our cloud screening algorithm removes measurements of experimental relative irradiance (f (AOT)) outside the range given by the modelled relative irradiance [f_s (AOT)], plus or minus its standard deviation. Basically, we assume that cloud free conditions occur when $f \pm \sigma$ lie within the interval $f_s \pm \sigma_s$ (σ denotes the standard deviation of f or f_s).

3.3. Quantifying the aerosol and clouds influence on the NEE

To quantify the magnitude of the influence of aerosols and clouds on the NEE measurements in relation to clear-sky NEE measurements (background aerosols with AOT = 0.05 and cloudless), the following expression was used:

$$\%NEE = \frac{100 \times [NEE(\alpha) - NEE_{\text{CLEAR-SKY}}(\alpha)]}{NEE_{\text{CLEAR-SKY}}(\alpha)}, \quad (3)$$

where $NEE(\alpha)$ is the measurement of the NEE made for actual sky conditions for a solar zenithal angle α , and the $NEE_{\text{CLEAR-SKY}}(\alpha)$ is the measurement of the NEE in clear-sky days (f equal to 1.0 and AOT = 0.05). $NEE_{\text{CLEAR-SKY}}(\alpha)$ is calculated from the relationship between clear-sky NEE and the solar zenithal angle (α) (Fig. 3a for FLONA-Tapajós and Fig. 3b for RBJ). Calculations were done for morning and afternoon clear-sky NEE because there are asymmetries in the data between the morning and afternoon periods. At the RBJ only a

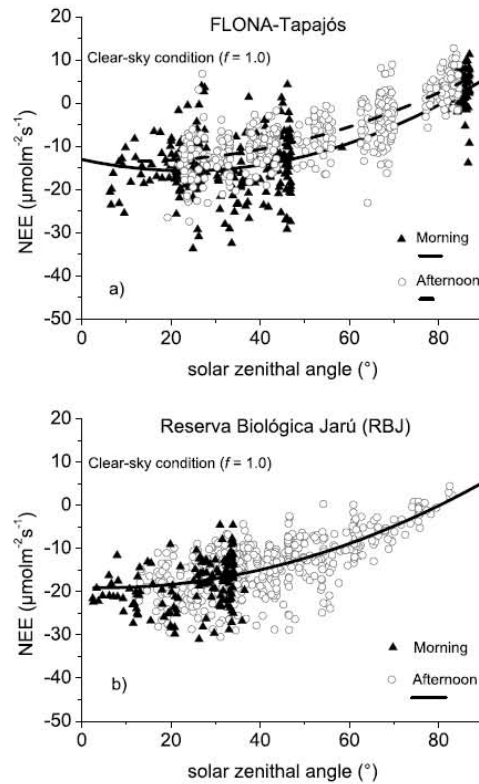


Fig. 3. Relationship between the NEE and solar zenithal angle (α) measurement for clear-sky conditions ($f = 1.0$) at the FLONA-Tapajós (a) and RBJ (b) sites.

few cases of $NEE_{CLEAR-SKY}(\alpha)$ could be obtained for the morning period (Fig. 3b).

4. Results

In the Amazonia most NEE measurements are influenced by clouds, all over the entire year. Even in the dry season, clouds are present most of the time, and precipitation occurs frequently. Hence we first examine the NEE relationship with radiation for a mixture of clouds and aerosols. In this analysis we will study the behaviour of NEE as a function of the relative irradiance (f), for days totally covered by clouds ($f = 0.0$) up to cloudless and background atmospheric aerosol loading days ($f = 1.0$). In the second part of the analysis, the aerosol effect on the NEE will be isolated from the changes at the surface radiation due to clouds, using the cloud screening procedure described in section 3.2.

4.1. The joint effects of clouds and aerosol on the NEE

Figure 4 shows the variability of NEE with the relative irradiance (f) for the FLONA-Tapajós and RBJ site. The data on these two plots were for solar zenith angle (α) between 25° and 30° . In both sites, the NEE minimum does not occur in clear-sky conditions ($f = 1.0$), but for situations in which there is some aerosols and clouds, that increase the fraction of diffuse radiation.

From eq. (3), the relationship between the %NEE and the relative irradiance was calculated for all solar zenith angle intervals, from 10° to 70° . The average of the %NEE was calculated in 0.1 bins of the relative irradiance for solar zenith angle interval of the 20° for the two sites. Figure 5 shows the average relative change in the NEE for relative irradiance range observed, for three intervals of solar zenith angles (α). The data show that at the FLONA-Tapajós, for α between 10° and 30° , the NEE increased by about 15% compared to the clear-sky NEE. At the RBJ, for the same α interval, this increase in the NEE is more pronounced, about 25%. For measurements with $\alpha > 50^\circ$, the two sites have similar patterns of relative changes in the NEE. The increase on the NEE measurements in the presence of aerosols and clouds (in this case mostly clouds) becomes smaller for $\alpha > 50^\circ$ at both sites. In order to obtain the value of the relative irradiance that producing the largest change in the %NEE, we calculated the average of the %NEE in bins of 0.1 (of the relative irradiance) for all measurements with α between 10° and 70° . The result of this calculation is shown in Figure 6, where it is possible to observe that the largest increase on the NEE occurs for the relative irradiances of 0.60–0.75. The maximum increase in the NEE value at the FLONA-Tapajós site was 11% for a relative irradiance value of 0.65. For the RBJ site, the %NEE value increased by 18% for a relative irradiance value of 0.70. Increases in the NEE of 12–18% are very significant, and have important impacts in the Amazonian ecosystem.

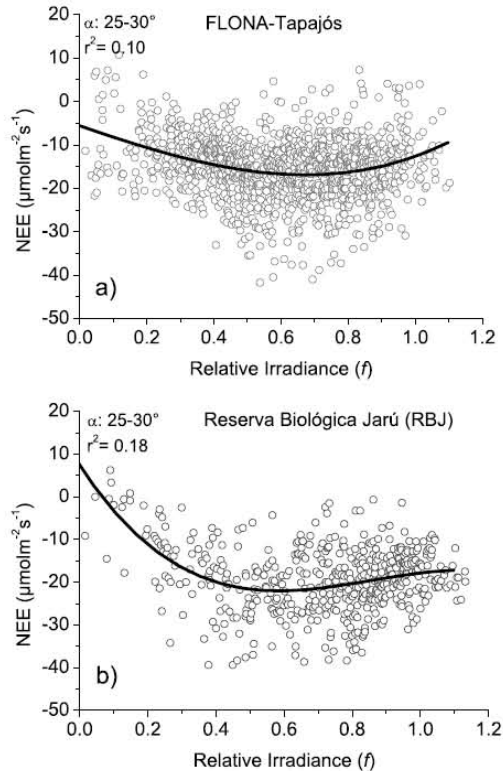


Fig. 4. Variability of NEE with the relative irradiance (f) for the FLONA-Tapajós (a) and RBJ (b) sites for solar zenith angle interval (α) between 25° and 30° .

4.2. The aerosol effect on the NEE measurements

Figure 7 shows the behavior of the relative irradiance (f) as a function of AOT for solar zenith angle (α) between 20° and 30° after applying the cloud screening process discussed earlier. The reduction of the solar irradiance at the surface due to the radiative effects of aerosols is very large. At the RBJ site, the aerosol loading can cause an instantaneous reduction in the total downward solar irradiance of 192 W m^{-2} for $AOT = 1.2$, while for $AOT = 0.9$, there is a reduction of 98 W m^{-2} . At the FLONA-Tapajós site the reduction in the flux is 48 W m^{-2} for $AOT = 0.6$ at 500 nm . These are very significant reductions in total direct solar flux and there is a strong relationship between relative irradiance and AOT for biomass burning aerosols, as can be observed by the fitted function showed in Figure 7. After cloud screening, it is possible to use either f or AOT for quantifying the amount of particles in the atmosphere, for α between 20° and 30° and AOT values up to 1.4.

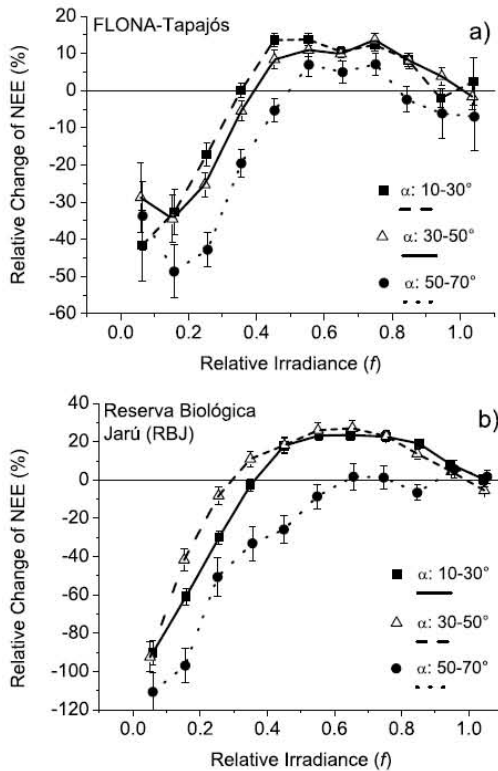


Fig. 5. Relative change of NEE (%NEE) as a function of the relative irradiance (f) for three ranges of solar zenith angle interval (α) for the FLONA-Tapajós (a) and RBJ (b) sites.

Figure 8 shows the relationship between NEE and the relative irradiance (f) for both sites, for α from 20° to 30° after cloud screening process (Section 3.2). It can be observed that with the increase of the amount of aerosol particles in the atmosphere (a reduction of f), the NEE values increase (gets more negative). Similarly for the observation in the case of the predominantly cloud presence, the maximum (more negative) value of the NEE measurements does not occur on clear-sky days ($f = 1.0$ and $AOT \sim 0.05$), but occurs with relatively high aerosol loading in the atmosphere.

From Figure 9 it was calculated the relative increase in NEE (%NEE) due to the aerosol effects for α between 20° and 30° in both sites. This increase is 8.4% for $f = 0.82$, or $AOT = 0.83$, at the FLONA-Tapajós site. For the RBJ site an increase of 16% was obtained for $f = 0.77$, that corresponds to $AOT = 1.26$.

From relationship between f and %NEE (Fig. 6) and the derived relationship between f and AOT (Fig. 7), it was calculated the AOT value that maximizes the %NEE. This value is 1.7 at 500 nm for the FLONA-Tapajós site, with %NEE increase of

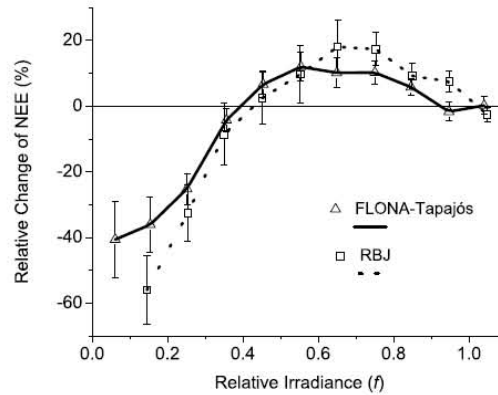


Fig. 6. Relative change of NEE (%NEE) as a function of the relative irradiance (f), averaged for all solar zenith angle intervals (α) (from 10° to 70°). Note that this plot includes clouds and aerosol effects.

11%, and 1.6 at 500 nm for the RBJ site, with %NEE increase of 18%. For larger atmospheric aerosols loadings, NEE is reduced significantly in both sites due to the reduction in the total downward radiation. For values of AOT larger than 2.7 at the RBJ site, for example, NEE approaches to zero.

Figure 10 shows the behavior of the CO_2 flux as a function of the total downward PAR radiation for clear-sky days ($f = 1.0$ and $AOT \sim 0.05$) and for days with the influence of aerosols and clouds ($f < 1.0$), for FLONA-Tapajós (Fig. 10a) and RBJ (Fig. 10b) sites. It can be observed a large scattering of NEE versus PAR for conditions with aerosols and clouds. From this plot, it is possible to observe that for the same PAR value, $1400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, for example, the NEE measurements are larger (more negative) for days loaded by aerosol and clouds if compared to NEE clear-sky measurements.

5. Possible factors controlling CO_2 fluxes

The presence of aerosol particles and clouds also influences several environmental factors, such as the solar radiation, temperature, humidity, latent heat, precipitation, etc. All these factors have direct or indirect influence on the processes that control the CO_2 exchanges between the forest and the atmosphere. Many authors have pointed out that the radiation use efficiency (RUE) by the forest canopy is larger for the diffuse fraction of the PAR radiation as compared with its direct fraction (Gu et al., 1999, 2001, 2002; Roderick et al., 2001). There is a compensation effect in the carbon uptake through of the increase of the diffuse PAR compared to the decrease of the direct PAR. The analyses presented in this work shows that the FLONA-Tapajós and RBJ sites demonstrate a greater photosynthetic efficiency in cloudy and aerosol-loaded days, as compared to clear-sky days (Fig. 10a and b).

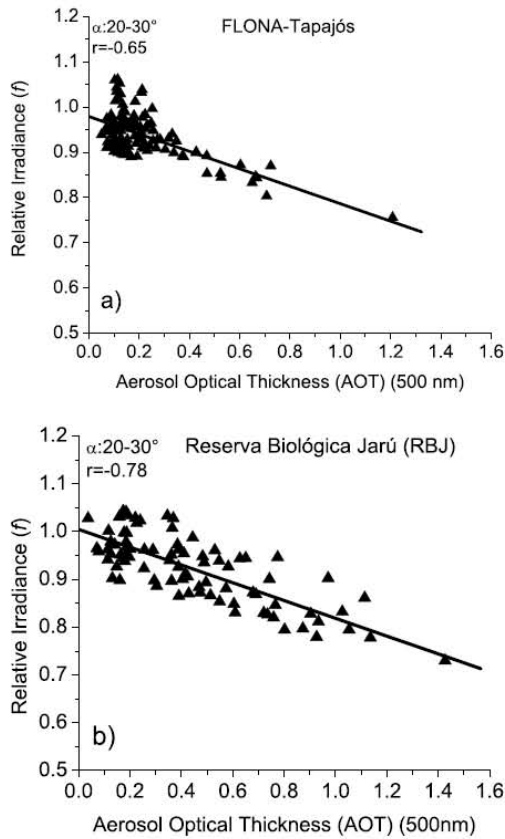


Fig. 7. Relative irradiance (f) as a function of AOT at the FLONA-Tapajós (a) and RBJ (b) sites, for solar zenith angle (α) between 20° and 30°. The regressions are statistically significant.

Certainly radiation is not the only factor controlling photosynthesis, and there are other environmental variables that influence the CO_2 fluxes. Surface temperature that is known to affect the photosynthetic rate was found to be significant in affecting CO_2 fluxes. In general, temperature is an important driver in the process of leaf and soil respiration. It is well documented that biomass burning aerosols and clouds cause a reduction of the surface temperature (Schafer et al., 2002a,b; Procopio et al., 2004). In this work, it was possible to observe only the combined effect of all variables on the NEE. It is not possible to separate the radiation changes from temperature or other variables in the NEE values. Another factor that can increase the photosynthesis of the forest canopy is the growth of the relative humidity with the increase of particles and clouds in the atmosphere (Gu et al., 1999; Niyogi et al., 2004). The effect of changes in relative humidity is also difficult to separate from the radiation effects.

Tellus 59B (2007), 3

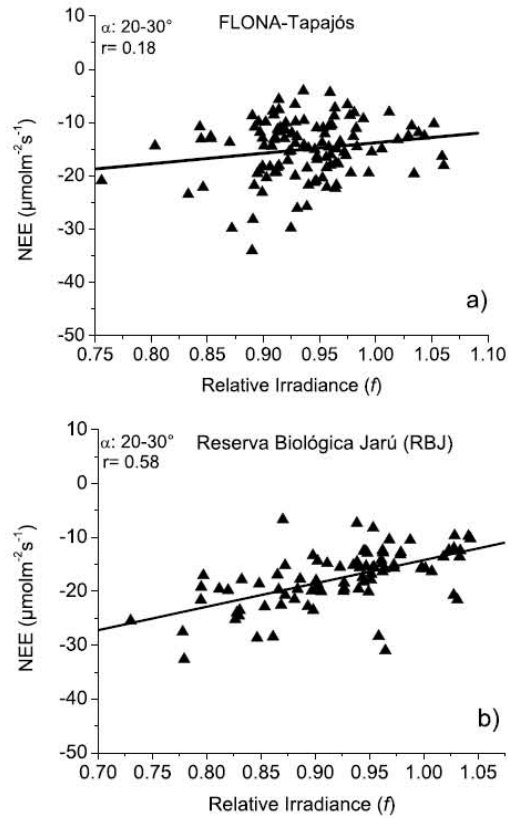


Fig. 8. Aerosols effects on NEE: relative irradiance (f) reduction versus NEE measurements at the FLONA-Tapajós (a) and RBJ (b) sites.

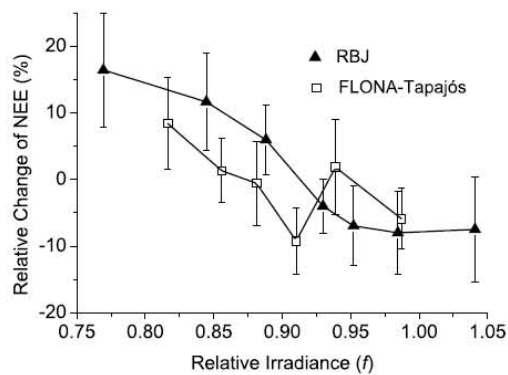


Fig. 9. Relative change of NEE ($\%NEE$) due to biomass burning aerosol loading; calculations for solar zenith angle (α) between 20° and 30°.

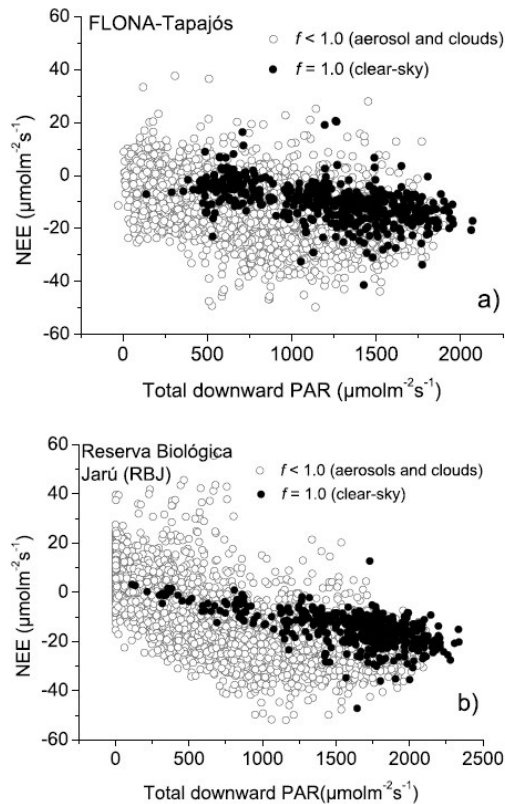


Fig. 10. NEE as a function of total downward PAR radiation for measurements between the 10:00 and 16:00 hr, for the FLONA-Tapajós (a) and RBJ (b) sites.

The aerosol effects on NEE are strong for large areas in Amazonia, and also occur for areas outside the Amazon region, as can be seen in Figure 11. In this MODIS image, a huge smoke plume from biomass burning emissions on September 16, 2004 cover large areas with very high AOT for Amazonia, Southern Brazil, as well as Paraguay, Bolivia, Peru, Venezuela and other countries on South America. Evidently NEE will be affected across the South American continent, and similarly in Africa, Southeast Asia and other regions where biomass burning is an important atmospheric driver.

6. Conclusions

The effect of aerosols and clouds on the CO₂ flux for two sites in Amazonia was observed and quantified. Using sun photometer data from the AERONET network, very high AOT was observed for large areas due to biomass burning emissions, with AOT

of 3–4 at 500 nm observed in Rondônia (RBJ site) and values of 1.2–1.6 observed in Santarem (FLONA-Tapajós site). This high aerosol loading and the cloud cover have important impacts on the assimilation of carbon by the Amazonian forest in areas impacted by biomass burning, due to the change in the amount of solar radiation on the ground and due to the increase in the diffuse to direct solar radiation ratio.

At the FLONA-Tapajós site, the average value of the change in NEE is 11% for a level of total radiation of 65% of clear-sky irradiance. For the RBJ site, the increase in NEE is about 18% for a level of total radiation reduction of 70% of clear-sky irradiance.

We also isolated the aerosol effects from cloud effects. It was observed that the relative increase in NEE (%NEE) by the aerosol effect alone is 8.4% for an AOT value of 0.83 at the FLONA-Tapajós site, and 16% for an AOT value of 1.26 at the RBJ site. It was also calculated that the AOT value that maximizes the %NEE value is 1.7 at 500 nm for the FLONA-Tapajós site, and 1.6 at 500 nm for the RBJ site. For larger atmospheric aerosol loadings, NEE is reduced significantly due to the reduction in the total radiation. These numbers show that for these two forest ecosystems, clear skies do not provide the ideal environmental condition for the maximum of carbon uptake, and aerosols and clouds actually enhance forest carbon uptake, depending on the atmospheric loading. This is attributed to the increase in the diffuse to direct solar radiation ratio in the forest canopy. Data from both sites showed that as atmospheric aerosol loading and cloudiness increase, several important environmental factors such as temperature and humidity also change. The surface temperature has values significantly reduced due to the clouds and aerosol presence. In this work it was not possible to separate the effects of changes in the solar radiation from changes in the surface temperature and humidity associated with high levels of aerosol particles from biomass burning.

In view of the large aerosol loading for about 4 months and over large areas in Amazonia, the effects of aerosols on the carbon uptake by the Amazonian forest is very significant. The effects observed in Amazonia are certainly also present in tropical forests of Africa and Southeast Asia, because of the similar biomass burning conditions and type of forest. Aerosol particles from biomass burning affect the global carbon budget and a quantification in a global scale could bring an important extra component to the global carbon cycle.

7. Acknowledgments

We thank the large number of researchers, students and technicians contributing to LBA science, from keeping up the continuous tower operation. Also a large number of researchers are contributing to the integration of disciplines that characterizes LBA. We thank MCT and CNPq for the Millennium Institute financial support and CAPES for the master degree scholarship to Paulo Henrique Fernandes de Oliveira. We also thank the LBA-ECO

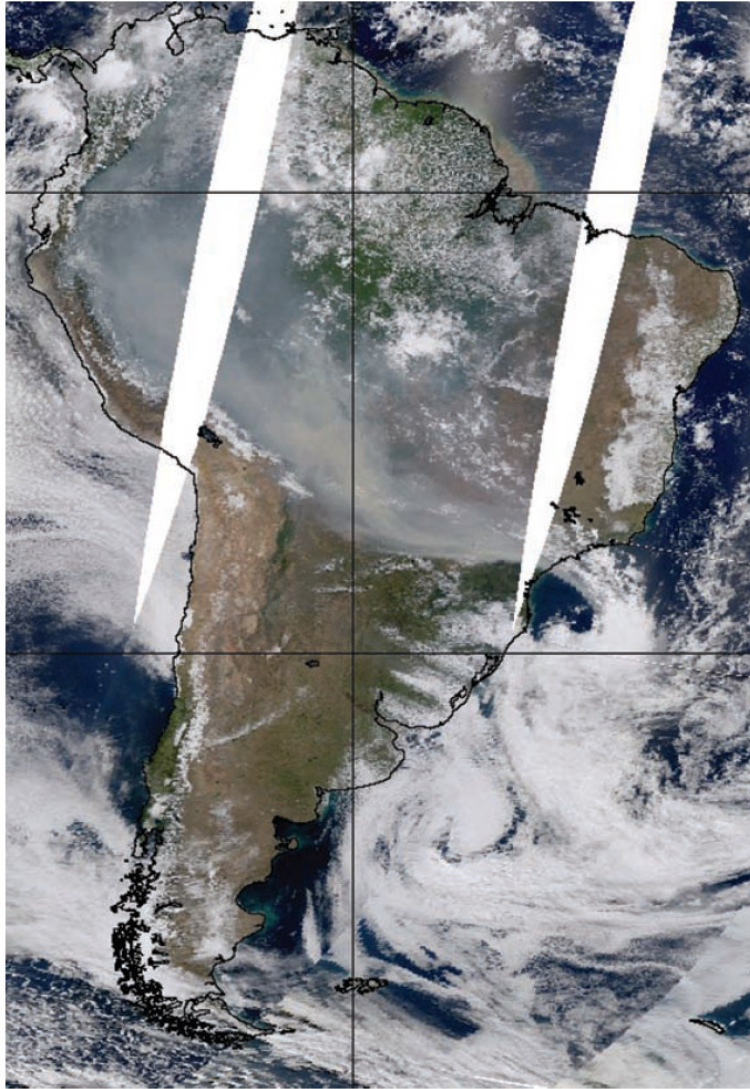


Fig. 11. Large smoke plume from biomass burning emissions on September 16, 2004, measured by MODIS covering large areas with very high AOT for Amazonia, and a large area of South America.

project from NASA for the support of the AERONET network operations.

References

- Andreae, M. O., Rosenfeld, D., Artaxo, P., Costa, A. A., Frank, G. P. and co-authors. 2004. Smoking rain clouds over the Amazon. *Science* **303**, 1337–1342.
- Andreae, M. O., Artaxo, P., Brandão, C., Carswell, F. E., Ciccioli, P. and co-authors. 2002. Biogeochemical cycling of carbon, water, energy, trace gases, and aerosols in Amazonia: The LBA-EUSTACH experiments. *J. Geophys. Res.* **107**(D20), 8066–8091.
- Artaxo, P., Fernandes, E. T., Martins, J. V., Yamasoe, M. A., Hobbs, P. V. and co-authors. 1998. Large-scale aerosol source apportionment in Amazonia. *J. Geophys. Res.* **103**(D24), 31837–31848.

- Artaxo, P., Martins, J. V., Yamasoe, M. A., Procopio, A. S., Pauliquevis, T. M. and co-authors. 2002. Physical and chemical properties of aerosols in the wet and dry season in Rondônia, Amazonia. *J. Geophys. Res.* **107**(D20), 8081–8095.
- Aubinet, M., Grelle, A., Ibrom, A., Rannik, U., Moncrieff, J. and co-authors. 2000. Estimates of the annual net carbon and water exchange of European forests: the EUROFLUX methodology. *Adv. Ecol. Res.* **30**, 113–175.
- Baldocchi, D. D. 1997. Measuring and modelling carbon dioxide and water vapour exchange over a temperate broad-leaved forest during the 1995 summer drought. *Plant, Cell Environ.* **20**, 1108–1122.
- Eck, T. F., Holben, B. N., Slutsker, I. and Setzer, A. 1998. Measurements of irradiance attenuation and estimation of aerosol single scattering albedo for biomass burning aerosols in Amazonia. *J. Geophys. Res.* **103**(D24), 31865–31878.
- Fan, S., Goulden, M. L., Munger, J. W., Daube, B. C., Bakwin, P. S. and co-authors. 1995. Environmental controls on the photosynthesis and respiration of a boreal lichen woodland: a growing season of whole-ecosystem exchange measurements by eddy correlation. *Oecologia* **102**, 443–452.
- Fan, S., Gloor, M., Mahlman, J., Pacala, S., Sarmiento, J. and co-authors. 1998. A large terrestrial carbon sink in North America implied by atmospheric and oceanic carbon dioxide data and models. *Science* **282**, 442–446.
- Fearnside, P. M. 1996. Amazonian deforestation and global warming: carbon stocks in vegetation replacing Brazil's Amazon forest. *Forest Ecol. Manag.* **80**, 21–34.
- Field, C. B., Behrenfeld, M. J., Randerson, J. T. and Falkowski, P. 1998. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science* **281**, 237–240.
- Grace, J., Lloyd, J., McIntyre, J., Miranda, A. C., Meir, P. and co-authors. 1995a. Carbon dioxide uptake by an undisturbed tropical rain forest in Southwest Amazonia, 1992 to 1993. *Science* **270**, 778–780.
- Grace, J., Lloyd, J., McIntyre, J., Miranda, A. C., Meir, P. and co-authors. 1995b. Fluxes of carbon dioxide and water vapour over an undisturbed tropical forest in south-west Amazonia. *Global Change Biol.* **1**, 1–12.
- Grace, J., Malhi, Y., Lloyd, J., McIntyre, J., Miranda, A. C. and co-authors. 1996. The use of eddy covariance to infer the net carbon dioxide uptake of Brazilian rain forest. *Global Change Biol.* **2**, 209–217.
- Gu, L., Fuentes, J. D., Shugart, H. H., Staebler, R. M. and Black, T. A. 1999. Responses of net ecosystem exchange of carbon dioxide to changes in cloudiness: Results from two North American deciduous forests. *J. Geophys. Res.* **104**(D24), 31421–31434.
- Gu, L., Fuentes, J. D., Garstang, M., Silva, J. T., Heitz, R. and co-authors. 2001. Cloud modulation of surface solar irradiance at a pasture site in southern Brazil. *Agric. Forest Meteorol.* **106**, 117–129.
- Gu, L., Baldocchi, D. D., Verma, S. B., Black, T. A., Vesala, T. and co-authors. 2002. Advantages of diffuse radiation for terrestrial ecosystem productivity. *J. Geophys. Res.* **107**(D6), 4050–4073.
- Gu, L., Baldocchi, D. D., Wofsy, S. C., Munger, J. W., Michalsky, J. J. and co-authors. 2003. Response of a deciduous forest to the Mont Pinatubo eruption: enhanced photosynthesis. *Science* **299**, 2035–2038.
- Hernandez, P., Shimabukuro, Y. E., Lee, D. C. L., Santos, C. P., Almeida, R. R. 1993. *Projeto de Inventário florestal na Floresta Nacional do Tapajós*. São José dos Campos, INPE, 126 p.
- Holben, B. N., Eck, T. F., Slutsker, I., Tanré, D., Buis, J. P. and co-authors. 1998. AERONET-A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sens. Environ.* **66**, 1–16.
- Hollinger, D. Y., Kelliher, F. M., Byers, J. N., Hunt, J. E., McSeveny, T. M. and co-authors. 1994. Carbon dioxide exchange between an undisturbed old-growth temperate forest and the atmosphere. *Ecology* **75**, 134–150.
- Houghton, R. A., Skole, D. L., Nobre, C. A., Hackler, J. L., Lawrence, K. T. and co-authors. 2000. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. *Nature* **403**, 301–304.
- INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). 2004. *Desflorestamento 1998–2004*. INPE, São José dos Campos, São Paulo, Brazil.
- Keller, M., Rocha, H. R., Trumbore, S. and Kruijt, B. 2001. Investigating the carbon cycle of the Amazon forests. *IGBP Newsl.lett.* **45**, 15–19.
- Kaufman, Y. J. and Koren, I. 2006. Smoke and pollution aerosol effect on cloud cover. *Science* **313**, 655–658.
- Koren, I., Kaufman, Y. J., Remer, L. A. and Martins, J. V. 2004. Measurement of the effect of Amazon smoke on inhibition of cloud formation. *Science* **303**, 1342–1345.
- Kruijt, B., Elbers, J. A., von Randow, C., Araujo, A. C., Oliveira, P. J. and co-authors. 2004. The robustness eddy correlation fluxes for Amazon rain of forest conditions. *Ecol. Appl.* **14**(4), 101–113.
- Malhi, Y., Nobre, A. D., Grace, J., Kruijt, B., Pereira, M. G. P. and co-authors. 1998. Carbon dioxide transfer over a Central Amazonian rain forest. *J. Geophys. Res.* **103**(D24), 31593–31612.
- Marengo, J. A. and Nobre, C. A. 2001. General characteristics and variability of climate in the Amazon Basin and its links to the global climate system. In: *The Biogeochemistry of the Amazon Basin* (eds. McClain, M. E., Victoria, R. L., Richey, J. E.). Oxford University Press, New York, 17–41.
- Melillo, J. M., Houghton, R. A., Kicklighter, D. W. and McGuire, A. D. 1996. Tropical deforestation and the global carbon budget. *Ann. Rev. Energy Environ.* **21**, 293–310.
- Moncrieff, J. B., Massheder, J. M., de Bruin, H., Elbers, J., Friborg, T. and co-authors. 1997. A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide. *J. Hydrol.* **188**, 589–611.
- Niyogi, D., Chang, H., Saxena, V. K., Holt, T., Alapaty, K., Booker, F. and co-authors. 2004. Direct observations of the effects of aerosol loading on net ecosystem CO₂ exchanges over different landscapes. *Geophys. Res. Lett.* **31**, 20506–20511.
- Ometto, J. P., Nobre, A. D., Rocha, H. R., Artaxo, P. and Martinelli, L. A. 2005. Amazonia and the modern carbon cycle: lessons learned. *Oecologia* **143**(4), 483–500.
- Price, D. T. and Black, T. A. 1990. Effects of short-term variation in weather on diurnal canopy CO₂ flux and evapotranspiration of a juvenile Douglas-Fir stand. *Agric. Forest Meteorol.* **50**, 139–158.
- Procopio, A. S., Artaxo, P., Kaufman, Y. J., Remer, L. A., Schafer, J. S. and co-authors. 2004. Multiyear analysis of Amazonian biomass burning smoke radiative forcing of climate. *Geophys. Res. Lett.* **31**, 3108–3112.
- Procopio, A. S., Remer, L. A., Artaxo, P., Kaufman, Y. J. and Holben, B. N. 2003. Modeled spectral optical properties for smoke aerosols in Amazonia. *Geophys. Res. Lett.* **30**(24), 2265–2270.
- Ricchiazzi, P., Yang, S., Gautier, C. and Sowle, D. 1998. SBDART: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the earth's atmosphere. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **79**, 2101–2114.

- Roderick, M. L., Farquhar, G. D., Berry, S. L. and Noble, I. R. 2001. On the direct effect of clouds and atmospheric particles on the productivity and structure of vegetation. *Oecologia* **129**, 21–30.
- Saleska, S. R., Miller, S. D., Matross, D. M., Goulden, M. L., Wofsy, S. C. and co-authors. 2003. Carbon in Amazon forests: unexpected seasonal fluxes and disturbance-induced losses. *Science* **302**, 1554–1557.
- Schafer, J. S., Holben, B. N., Eck, T. F., Yamasoe, M. A. and Artaxo, P. 2002a. Atmospheric effects on insolation in the Brazilian Amazon: Observed modification of solar radiation by clouds and smoke and derived single scatter albedo of fire aerosols. *J. Geophys. Res.* **107**(D20), 8074–8089.
- Schafer, J. S., Eck, T. F., Holben, B. N., Artaxo, P., Yamasoe, M. A. and Procopio, A. S. 2002b. Observed reductions of total irradiance by biomass-burning aerosols in the Brazilian Amazon and Zambian Savanna. *Geophys Res. Lett.* **29**(17), 1823–1826.
- Schimel, D. S. 1995. Terrestrial ecosystems and the carbon-cycle. *Global Change Biol.* **1**, 77–91.
- Schimel, D. S., House, J. I., Hibbard, K. A., Bousquet, P., Ciais, P. and co-authors. 2001. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature* **414**, 169–172.
- Silva Dias, M. A. F., Rutledge, S., Kabat, P., Silva Dias, P. L., Nobre, C. and co-authors. 2002. Clouds and rain processes in a biosphere-atmosphere interaction context in the Amazon Region. *J. Geophys. Res.* **107**(D20), 8072–8092.
- Tans, P. P. and White, J. W. C. 1998. The global carbon-cycle: in balance, with a little help from the plants. *Science* **281**, 183–184.
- von Randow, C., Sá, L. D. A., Prasad, G. S. S. D., Manzi, A. O., Arlino, P. R. A. and co-authors. 2002. Scale variability of atmospheric surface layer fluxes of energy and carbon over a tropical rain forest in southwest Amazonia I. Diurnal conditions. *J. Geophys. Res.* **107**(D20), 8062–8074.