

O SATÉLITE TERRA E AS PESQUISAS EM MUDANÇAS GLOBAIS

Veraldo LIESENBERG¹

André de LIMA¹

Antônio Roberto FORMAGGIO¹

Resumo

Em 18 de dezembro de 1999, a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) lançou o Satélite TERRA como marco principal do programa *Earth Observing System* (EOS), visando iniciar a mais abrangente missão científica até então tentada, destinada a gerar uma ampla avaliação física do Planeta Terra. Entre os principais objetivos da missão está o de buscar melhorar o entendimento quanto aos movimentos de carbono e energia em relação ao sistema climático terrestre. O presente artigo consiste numa revisão em que são apresentadas as características dos cinco sensores a bordo do Satélite TERRA, bem como o seu papel no contexto das mudanças globais.

Palavras-chave: Sistema de Observação da Terra; mudanças globais; sensoriamento remoto.

Abstract

Global change research and the TERRA satellite

On December 18, 1999, the National Aeronautics and Space Administration (NASA) launched the TERRA Satellite, the first one of the Earth Observing System program (EOS). It was developed with the objective to begin a scientific mission never accomplished before: to generate a complete physical check-up of the Earth, which nowadays began to show some symptoms of health problems. One of the main objectives of this mission is to measure main parameters that describe the conditions of the Earth and its atmosphere and begin a long-term monitoring of the human impact on the environment. This article provides a previous literature revision where the main characteristics and objectives of the five sensors onboard TERRA Satellite are presented, as well as its role in global change context.

Key words: Earth Observation System; TERRA Satellite; Global Changes; Remote Sensing.

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE – Divisão de Sensoriamento Remoto-DSR – Avenida dos Astronautas, 1758 – Jardim da Granja – CEP 1227-010 – São José dos Campos-SP. E-mail: vlberg@dsr.inpe.br

CONTEXTUALIZAÇÃO

Desde a Revolução Industrial a humanidade vem alterando, de forma significativa, o equilíbrio ambiental e desta forma diversos cientistas têm estimado que as atividades humanas já podem ser consideradas, em termos de grandeza, da magnitude de uma força geológica. Em um intervalo de tempo relativamente curto, o ser humano alterou aproximadamente 40% da superfície terrestre, mudando a sua reflectância e alterando o ciclo hidrológico em nível global (VITOUSEK et al., 1997).

Neste período houve um aumento da concentração e introdução de novos elementos químicos na atmosfera, como por exemplo, os gases do efeito estufa. É possível que a tendência do fluxo de aquecimento e as correspondentes mudanças no clima sejam contínuas e aceleradas, dada a atual projeção das atividades antrópicas. A ameaça das mudanças climáticas traz não somente o aumento da temperatura, mas também a possibilidade de causar anomalias climáticas, como estiagens e secas em alguns lugares e inundações em outros.

A concentração do dióxido de carbono na atmosfera aumentou em 30% desde o início da revolução industrial e continua aumentando sem precedentes, perturbando modelos climáticos e afetando as atividades fotossintéticas das plantas em nível global. Assim, surge a questão: estes recentes incrementos seriam devidos a causas naturais, a atividades humanas ou a uma combinação de ambos?

A ameaça das causas humanas nas mudanças climáticas, a despeito das incertezas científicas ainda prevalentes, levaram alguns países desenvolvidos à realização da Conferência de Mudanças Climáticas em Kyoto, no Japão, em dezembro de 1997. Essa conferência mostrou que os esforços para controlar os impactos humanos em clima são controversos, em função do potencial de repercussões sociais, econômicas e políticas.

Algumas questões de grande interesse e relevância são as seguintes: Qual é a contribuição humana para a tendência de aquecimento do Planeta? Quais são os fatores geofísicos primários nesse aquecimento? Seria a ascensão dos níveis dos gases do efeito estufa a causadora do aumento da temperatura média? Em caso positivo, quais seriam os efeitos regionais e temporais do aumento da temperatura nos padrões de precipitação, no nível dos oceanos, na saúde humana, na produção de alimentos, na qualidade das águas superficiais, na produtividade biológica terrestre e de oceanos e nos modelos climáticos?

Para responder a essas e a várias outras questões, a comunidade científica precisa desenvolver um abrangente e compreensivo programa de observação da Terra. O sensoriamento remoto em nível orbital é o único caminho possível para a obtenção de dados da superfície em séries temporais para a detecção de mudanças, e por fim o uso destes dados servem como parâmetros chaves para a alimentação de modelos climáticos globais (ROSENQVIST et al., 2003).

Parâmetros chaves, que são sensíveis para as mudanças climáticas, tipicamente mostram uma alta variabilidade temporal e espacial - aerossóis, nuvens, superfície e biota oceânica. Para estudar parâmetros que variam enormemente e a interação entre eles, há uma necessidade de medidas freqüentes de alta resolução temporal e espacial que somente são possíveis em nível orbital. Esta noção, como também o desenvolvimento da tecnologia espacial, de computadores, e de modelos empíricos nas últimas décadas, trouxeram as observações espaciais para as pesquisas de vanguarda.

Atualmente, o *Earth Science Enterprise* (ESE) da NASA está colaborando com um grande número de outras instituições governamentais de vários países para construir uma nova geração de sensores em nível orbital endereçadas à obtenção de

medidas identificadas pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC). O objetivo geral desse empreendimento é aumentar o conhecimento acerca de todos os sistemas naturais e das suas inter-relações, reduzindo incertezas na predição do clima.

O ESE é constituído de quatro partes: a) uma série de sistemas e sensores, no programa *Earth Observing System* (EOS); b) outra de sensores de menores dimensões, *Earth System Science Pathfinder* (ESSP); c) um programa interdisciplinar e interinstitucional de pesquisa e de intercâmbio científico; e, por fim, d) um sistema de armazenamento, processamento e distribuição dos dados científicos, no *EOS Data and Information System* (EOSDIS).

O EOS tem por objetivo prover dados para o período mínimo de 20 anos, o que permitirá distinguir entre anomalias térmicas curtas, as oscilações climáticas interanuais e interdecadais e as atividades antrópicas. Para endereçar estes objetivos, os dados do EOS estão sendo coletados num amplo intervalo do espectro eletromagnético, com diferentes resoluções espaciais e temporais, e com uma variedade de estratégias de observação, além de uma infinidade de produtos gerados a partir desses dados, além da ampla disponibilização para a comunidade científica.

O lançamento, em 1999, do satélite TERRA, inicialmente denominado EOS-AM1, o primeiro, contendo uma série de sensores com objetivos voltados principalmente para a superfície terrestre e oceânica, foi um marco para o programa EOS. Em relação aos sensores a bordo do satélite TERRA, são esperadas inúmeras contribuições, pois há a perspectiva de que eles respondam a uma série de perguntas dos 160 anos de história das pesquisas em clima.

OBJETIVOS DO SATÉLITE TERRA

O satélite TERRA começou a fornecer ao programa EOS um monitoramento compreensivo das interações entre: atmosfera, oceanos, Terra, Sol e o balanço da radiação terrestre. Ele está em uma órbita solssíncrona, cruzando o equador às 10h30 para minimizar os efeitos da cobertura de nuvens. Ele é seguido pelo satélite AQUA, anteriormente denominado EOS-PM1, lançado em 2002, que cruza o equador às 13h30 e possui alguns sensores semelhantes aos do TERRA, objetivando que seus dados sirvam para avaliar a variabilidade diurna do Globo.

Para ilustrar a importância do TERRA, pode ser utilizada a analogia de que a Terra seja uma pessoa que nunca tinha uma análise física completa, e que agora começa a mostrar alguns sintomas de problemas em sua saúde. Segundo Kaufman et al. (1998), os objetivos específicos do TERRA são:

- 1) Promover uma avaliação instantânea do estado da Terra, fornecendo as primeiras medidas sazonais de parâmetros e processos inter-relacionados, como a produtividade terrestre e oceânica, o uso do solo e a sua dinâmica espaço-temporal, mapas de cobertura de neve e gelo, temperatura do ar (diurna e noturna), nuvens macro e microfísicas, efeitos da radiação, e interações com aerossóis, e a correspondente inter-relação entre ambos e a forçante climática; fluxo de energia radiativa, propriedades de aerossóis e vapor d'água, e desflorestamento, ocorrências de queimadas, e emissões de elementos traços e particulados atmosféricos;
- 2) Detectar os impactos humanos na Terra e no seu clima. Melhorar a habilidade para a detecção de impactos humanos e aumento das capacidades de previsões climáticas a longo prazo, provendo atualizações da distribuição

global das mudanças de uso do solo, aerossóis, vapor d'água, nuvens e radiação, elementos traços de gases e produtividade oceânica para usos em modelos climáticos globais;

- 3) Prever anomalias passageiras e/ou repentinas e as variações sazonais interanuais. Prover informações para a melhoria de previsões do tempo, bem como a extensão geográfica de anomalias climáticas. Aumentar a capacidade das investigações quanto às correlações entre as variações anuais de nuvens, aerossóis, vapor d'água, biota na Terra e oceanos, queimadas e elementos traços de gases, e outros impactos de maiores proporções como o *El-Niño*, atividades vulcânicas e incêndios; e
- 4) Melhorar a capacidade de predições e de caracterização de desastres naturais (incêndios florestais, vulcões, inundações e estiagens), e iniciar um esforço a longo prazo para monitorar as mudanças no clima em abrangência global.

SENSORES DO SATÉLITE TERRA

O satélite TERRA possui cinco sensores que são calibrados e com capacidades sem precedentes de monitorar a superfície terrestre e a oceânica. Estes instrumentos são evoluções tecnológicas de vários antecessores, mas com um alto grau de precisão, e realizam agora medidas nunca antes obtidas. As características principais desses instrumentos são sumarizadas na tabela 1. Os sensores a bordo do TERRA possuem algumas características que são mencionadas a seguir:

- 1) **ASTER** (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*): coleta dados de resolução espacial acurada (entre 15 e 90m), multiespectrais, com 36 bandas espectrais distribuídas no visível, infravermelho próximo e termal para estudos de processos regionais e locais, incluindo temperaturas de superfície e o balanço de energia, permitindo mapear solos, geologia, uso do solo e suas respectivas dinâmicas (YAMAGUCHI et al., 1998);
- 2) Dois instrumentos **CERES** (*Clouds and the Earth's Radiant Energy System*) - com um plano imageador rotatório para determinar a forçante climática e o balanço radioativo com amostragens angulares (WIELICKI et al., 1998);
- 3) **MISR** (*Multi-angle Imaging SpectroRadiometer*): fornece imagens com uma moderada resolução espacial (275m e 1,1km) em nove diferentes ângulos de visada, permitindo estudar a anisotropia da superfície terrestre, aerossóis, nuvens (DINER et al., 1998);
- 4) **MODIS** (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*): habilita uma avaliação compreensiva da superfície terrestre, dos oceanos e da atmosfera, com 36 bandas espectrais e resoluções espaciais de 250m, 500m ou 1km. Algumas metas deste sensor são caracterizar em nível regional e global a superfície terrestre, a produtividade primária de oceanos, as propriedades de aerossóis sobre a Terra e os oceanos, o vapor d'água precipitável, obter perfis de temperatura atmosférica, o percentual de cobertura do solo, e a detecção de focos de calor, entre outros (JUSTICE et al., 1998); e
- 5) **MOPITT** (*Measurements Of Pollution In The Troposphere*): provê mapas globais de monóxido de carbono (CO) em três níveis de altitude e mapas globais de metano (CH₄) com 22km de resolução espacial (EDWARDS et al., 1999).

Tabela 1 - Resumo das principais características dos sensores a bordo do satélite TERRA

SENSOR	ASTER	MODIS	MISR	CERES	MOPITT
Resolução espacial no nadir	15m VIS 30m IVP 90m IVT	250m (2 bandas), 500m (5bandas), 1km (29bandas)	275m e 1,1km	20km	22km
Intervalo espectral	14 bandas: 0,5-12 μ m	250m (0,6-0,9 μ m); 500m (0,4-2,1 μ m); e 1km (0,4-14,4 μ m).	4 bandas: 0,45 μ m 0,55 μ m 0,67 μ m 0,86 μ m	3 bandas: 0,3-5 μ m 8-12 μ m 0,3-200 μ m	3 bandas: 2,3 μ m (CH ₄); 2,4 μ m (CO); e 4,7 μ m (CO)
Faixa imageada	60km	2330km	360km	2330km	640km
Resolução temporal	Imagens adquiridas sob requisição	16 dias (local) Cobertura global diária, com exceção no Equador	16 dias (local) 6-9 dias (global)	Diário	3-4dias
Estereoscopia	Sim	Não	Sim	Não relevante	Não
Principais aplicações	Caracterização da temperatura da superfície, aplicações na geologia e estereoscopia.	Caracterização da superfície, estudos globais oceânicos e atmosféricos sobre o espectro solar e termal.	Aplicações multiangulares para estudos da atmosfera, superfície terrestre e oceânica.	Balanco da radiação solar, termal e total e estudos sobre transferência radiativa.	Distribuição global de CO e CH ₄ .
Principais produtos	- Radiância espectral e reflectância de superfície; - Temperatura da superfície e emissividade; - Modelos digitais globais de elevação; - Mapas locais e regionais de vegetação; - Propriedades das nuvens, oceanos, e geleiras; e - Observações de desastres naturais.	- Temperatura da superfície terrestre e oceanos; - Identificação de sedimentos e fitoplâncton em oceanos; - Monitoramento da vegetação, geleiras e correntes oceânicas; - Características de nuvens; - Concentração e propriedades de aerossóis; - Temperatura e perfis de umidade.	- Reflectância angular de nuvens e efeitos do balanço da radiação solar; - Concentração de aerossóis da Troposfera e efeitos do balanço da radiação solar; - Propriedades angulares da reflectância de superfície e o impacto da superfície nos processos climáticos.	- Transferência radiativa de nuvens e suas inter-relações; - Mosaicos globais do fluxo radioativo da superfície de céu limpo.	- Concentrações de CO e CH₄ na Troposfera; - Perfil de CO com uma resolução de 22km na horizontal e 3km na vertical com acurácia de 10%; - Coluna de metano na troposfera com uma resolução de 22km e uma precisão melhor do que 1%.
Acesso	restrito	gratuito	gratuito	gratuito	gratuito

QUESTÕES A SEREM MONITORADAS PELO SATÉLITE TERRA

Balanco da radiação terrestre

O conhecimento sobre o balanço da radiação terrestre pode auxiliar na determinação da direção e da velocidade das mudanças climáticas. Qualquer força radiativa, como as devidas às mudanças na reflectância da superfície ou por absorção da radiação terrestre, muda o equilíbrio do balanço da radiação terrestre e pode causar uma rápida mudança na temperatura global. Medidas obtidas por sensores a bordo de satélites têm confirmado que a irradiância no topo da atmosfera é em média de 342Wm^{-2} e a média do albedo é de aproximadamente 30%. A atmosfera absorve cerca de 20% da radiação solar incidente, enquanto os outros 50% restantes são absorvidos pela superfície (RAMANATHAN; VOGELMANN, 1997).

Entretanto, recentes estudos que utilizaram dados obtidos por sensores lançados na década de 80, e com dados coletados em superfície, mostraram discrepâncias entre as observações e os valores preditos por modelos. Estas diferenças, segundo Ramanathan e Vogelmann (1997) poderiam estar associadas a uma absorção adicional de 25Wm^{-2} pela atmosfera, o que tem uma significativa implicação para o clima global. O sensor CERES (WIELICKI et al., 1998) possui melhorias tecnológicas em relação a seus antecessores quanto à sua acurácia, possibilitando a obtenção de medidas rigorosas da radiação, que podem ser usadas para entender essas discrepâncias.

A principal vantagem do TERRA é que os dados do sensor CERES são obtidos simultaneamente de um mesmo ponto do espaço, juntamente com medidas de alta resolução espacial e espectral de sensores como o MODIS, o MISR e o MOPITT. O conjunto destas medidas possibilitará relatar as variações no balanço de energia devidas a mudanças em nuvens, aerossóis, uso do solo, composição atmosférica e propriedades dos oceanos (KING et al., 1992).

As medidas de longo prazo do TERRA e as próximas missões do EOS permitirão estimar as mudanças nas propriedades de nuvens devidas aos impactos humanos (via aerossóis como agente principal), e as mudanças no clima devidas a mudanças na dinâmica de uso do solo e no ciclo da água, relacionando o impacto de ambos na forçante climática.

Fontes e sumidouros de gases do efeito estufa

O vapor d'água é o mais significativo gás do efeito estufa, que absorve e re-emite a radiação terrestre. Embora seja o gás mais abundante na atmosfera, o vapor d'água é também o mais variável e, como consequência, apresenta a maior incerteza relativa ao seu impacto no clima. Vapor d'água, dióxido de carbono (CO_2) e nuvens respondem por 90 a 95% da retenção de energia no planeta. Sem estes constituintes atmosféricos, o nosso planeta teria a sua temperatura reduzida em -240°C (RAMANATHAN, 1997).

Com as crescentes tendências do aumento da temperatura na superfície terrestre e particularmente, na superfície dos oceanos, é de se esperar que haja uma maior evaporação para a atmosfera e, conseqüentemente, uma maior ampliação das mudanças climáticas. Os resultados gerados pela aplicação de modelos climáticos sugerem que só o vapor d'água aumenta o efeito estufa em aproximadamente 1% para cada 1°C de aquecimento (RAMANATHAN, 1997). Mas o vapor d'água ainda é obscuro nas mudanças no ciclo hidrológico. Algumas hipóteses sugerem que o vapor

d'água acelere o aquecimento global pelo aumento da concentração do vapor d'água nas médias e nas altas altitudes, ou ele poderia contrair-se forçando as baixas nuvens a sombrear a superfície, tendo assim um efeito colateral.

Em média, o vapor d'água reside na atmosfera somente por alguns poucos dias antes de cair na forma líquida na superfície como precipitação. Então o conteúdo do vapor d'água da atmosfera poderia ajustar-se rapidamente às mudanças na temperatura da superfície. Em termos globais, o balanço da evaporação na precipitação é influenciado pelos maiores aumentos da temperatura na superfície que poderiam resultar em mais eventos de extrema precipitação. Estudos recentes baseados em dados coletados entre 1900 e 1988 mostram que as quantias de precipitação têm aumentado na proporção de 2,4mm para cada década (DAÍ et al., 1997). Entretanto, esse assunto é ainda bastante controverso (MINOBE; NAKANOWATARI, 2002).

O CO₂ é uma das chaves antrópicas do efeito estufa. Assim como o vapor d'água, ele absorve e re-emite a radiação terrestre de ondas longas, e está naturalmente presente em abundância na atmosfera. O nível de CO₂ tem aumentado na atmosfera em cerca de 30% desde 1700 (NOAA, 1997). Devido à sua longa permanência na atmosfera ele demora aproximadamente um século para estabilizar na atmosfera um novo balanço em resposta a cada novo incremento na emissão de CO₂.

Além da adição antrópica, os níveis de CO₂ também podem ser incrementados por fluxos que ocorrem entre a biosfera e os oceanos. As medidas atmosféricas de CO₂ revelam variações sazonais que resultam das atividades ocorrentes na biosfera terrestre. As variações sazonais podem ser correlacionadas pelas medidas obtidas via sensores orbitais, através do monitoramento da vegetação verde por índices normalizados de vegetação, índice de área foliar e fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida, produtos fornecidos pelos sensores MODIS e MISR (JUSTICE et al., 1998; DINER et al. 1999).

Aproximadamente metade da produção antropogênica de CO₂ ainda permanece na atmosfera, e dissolvem-se lentamente nos oceanos ou é utilizado pela vegetação terrestre (TANS et al., 1990).

Recentes trabalhos usando registros históricos de dados de sensores a partir de 1980 mostram: a) uma tendência de aumento no crescimento da vegetação em parte do hemisfério norte, sugerindo uma conexão entre esse crescimento e a absorção terrestre do carbono (MYNENI et al., 1997); e b) o fluxo de CO₂ da biosfera terrestre varia dependendo do clima e bioquímica (BRASWELL et al., 1997).

Entretanto, aspectos mais conclusivos têm sido dificultados devido a problemas associados com a calibração dos sensores, correções da trajetória orbital, influência dos largos campos de visada, associados a efeitos da geometria de visada, degradação da resolução espacial e interferências causadas pela atmosfera. A continuidade do programa EOS e dos dados gerados por seus sensores podem render novas perspectivas. A missão do satélite TERRA foi planejada para superar os problemas associados com a calibração, trajetória da órbita, visadas, efeitos de iluminação causados pelos efeitos angulares que limitaram a acurácia das medidas de vários de seus antecessores.

Os oceanos respondem pela metade da absorção do CO₂ antropogênico da atmosfera, produzindo e dirigindo o clima a uma variação inter-anual no conteúdo atmosférico do CO₂ (KEELING et al., 1996). Os oceanos representam sem dúvida o maior sumidouro deste componente atmosférico. Entretanto, o aumento da temperatura nos oceanos, associado ao aquecimento ocasionado pelo efeito estufa, pode causar a liberação de CO₂ para a atmosfera, com o rompimento da circulação do Atlântico Norte (BROECKER, 1997).

Os sensores a bordo do TERRA e as futuras missões permitirão ampliar o atual entendimento das respostas dos ecossistemas aquáticos e terrestres no incremento

de níveis de CO_2 aumento da temperatura e na variabilidade climática natural. Juntando dados de superfície sobre os níveis de CO_2 na atmosfera com dados obtidos pelos sensores MODIS, MISR e CERES, apresenta-se a possibilidade da caracterização das respostas destes sistemas sobre as mudanças no ciclo global de carbono. Com acuradas previsões dos níveis de CO_2 , será possível prever os possíveis impactos na temperatura da superfície e na produtividade biológica na Terra e nos oceanos, bem como sobre as mudanças no balanço global de energia.

O metano (CH_4) é outro gás que possui grande importância no efeito estufa. As suas fontes incluem ecossistemas aquáticos, animais ruminantes e emissões naturais. No entanto, as forças desta fonte individual ainda não são bem compreendidas, mas sabe-se que o CH_4 apresenta incrementos anuais na atmosfera da ordem de 1% (EDWARDS et al., 1999).

O CH_4 atmosférico pode ter um efeito significativo no clima e a mensuração de suas concentrações em nível global, bem como a identificação de suas fontes, é algo de grande importância. Espera-se que o sensor MOPITT possa obter medidas globais de CH_4 na troposfera com uma resolução espacial de 22km, permitindo responder a várias questões (EDWARDS et al., 1999).

Medidas globais de perfis de monóxido de carbono (CO) foram identificadas pela Organização Meteorológica Mundial como sendo criticamente importantes para um melhor entendimento das mudanças globais. O CO controla a concentração de oxidantes na atmosfera, afetando assim a habilidade da atmosfera em limpar, ela mesma, continuamente a geração contínua de altos níveis de ozônio troposférico prejudicial, oriunda da queima de biomassa e de poluentes urbanos (EDWARDS et al., 1999).

As medidas geradas pelo MOPITT dos níveis de CO podem auxiliar na melhor interpretação de como a troposfera interage com a emissão da vegetação e a poluição pela queima de biomassa e a oriunda de áreas urbanas. As fontes primárias de CO incluem oxidações naturais do metano (também medido pelo MOPITT) e terpenos, queima de biomassa e a queima de combustíveis fósseis. Sem dúvida, o maior sumidouro de CO é a oxidação pelo OH e uma menor contribuição pela remoção pelos solos (EDWARDS et al., 1999). As medidas do MOPITT dos níveis de CO, auxiliadas pelas medidas dos sensores MODIS e MISR, bem como as medidas da variabilidade nas fontes antropogênicas, podem ser usadas para estudar as fontes de CO e de seus respectivos sumidouros e podem fornecer novas perspectivas sobre os processos por reações químicas que ocorrem na troposfera.

Impacto das nuvens e dos aerossóis no clima

Durante o dia, as nuvens têm um efeito de esfriamento na superfície da Terra por refletirem a radiação incidente. Reciprocamente, à noite, as nuvens têm um efeito de aquecimento por conter a energia calorífica que a radiação emitiria da superfície terrestre para o exterior. Como as temperaturas globais aumentam, é possível que mais água evapore da superfície causando a formação de mais nuvens, tendo assim um efeito de esfriamento. Na presença de altos níveis de gases do efeito estufa, o efeito colateral é o aquecimento.

Recentes estudos têm confirmado uma relação entre a formação de nuvens baixas e a temperatura da superfície dos oceanos. De 1952 a 1981, verificou-se uma significativa tendência para baixo nas superfícies oceânicas em médias latitudes do Pacífico e no Oceano Atlântico, acompanhada por abundância de nuvens baixas. Ainda, desde o início de 1980, os dados mostram que essa tendência foi reversiva, ou seja, os oceanos estão aquecendo enquanto as nuvens de baixas altitudes estão decrescendo nas latitudes médias. Essa relação ainda não está completamente com-

preendida, mas dados dos sensores a bordo do TERRA podem propiciar novas perspectivas.

O relatório do IPCC mostrou que os aerossóis ainda são uma fonte de grande incerteza acerca do clima, devido aos seus efeitos na radiação solar, e pelo papel deles na formação de nuvens (KING et al., 1992). A maior e mais significativa fonte de aerossóis atmosféricos são as tempestades de areias vindas de regiões áridas e desérticas, as emissões urbanas e industriais, as grandes queimadas da biomassa vegetal e as erupções vulcânicas. Os aerossóis afetam o clima de duas maneiras e em ambas as situações causam o esfriamento da superfície. Na primeira situação, as partículas alteram as propriedades radiativas da atmosfera por espalhamento ou absorção da radiação solar incidente. Na segunda situação, eles modificam as nuvens afetando a sua formação e o seu tempo de vida, atuando como núcleos condensadores que atraem o vapor d'água.

Modificações na concentração de aerossóis na superfície podem aumentar a reflexão da radiação solar incidente, gerando assim uma forçante climática negativa (KAUFMAN; FRASER, 1997). Nas últimas três décadas, estudos têm sido realizados para identificar diferentes tipos de aerossóis e caracterizar as suas propriedades e os impactos nos balanços globais da radiação. Contudo, a variabilidade da concentração e composição dos aerossóis, impedem uma medida sistemática global, a não ser com a disponibilidade de uma alta acurácia espectral de dados orbitais (KING et al., 1992).

Usando duas diferentes técnicas de mensuração, o MODIS, com os seus largos intervalos espectrais (0,41-3,7mm), e o MISR, usando suas nove câmaras multiangulares, suprem estas necessidades globais de dados sobre aerossóis. Desta forma, com cadeias de instrumentos de superfície e medidas locais, os dados destes sensores podem ser utilizados para quantificar o papel dos aerossóis nas mudanças climáticas globais.

Estudos realizados com amostras de gelo mostraram que, durante o último período glacial, a concentração de particulados atmosféricos era 30 vezes superior à encontrada atualmente (YUNG et al., 1996). Por outro lado, a concentração de CO₂ no mesmo período foi 40% menor (VITOUSECK et al., 1997). Estes dados evidenciam que os aerossóis possuem uma significativa participação nas mudanças globais.

Além disso, modelos climáticos sugerem que um aquecimento global pode causar, em regiões interiores do continente, áreas mais áridas e como resultado haverá mais particulados sobre os oceanos. Vários estudos demonstraram também que há falta de ferro em amplas regiões oceânicas, limitando a absorção pela fotossíntese do CO₂ atmosférico (LOUNGHURST, 1996), apesar da abundância de outros nutrientes (como por exemplo, os nitratos). Neste sentido, experimentos de semeadura mostram que a adição de ferro para essas águas aumenta consideravelmente a produtividade de fitoplânctons (COALE et al., 1996). Desta forma, aumenta-se assim as suas habilidades para servir como um sumidouro de CO₂ (COALE et al., 1996).

É possível que os níveis de aerossóis no último período glacial tivessem causado um decréscimo de CO₂ e, então, essas considerações demonstram ainda mais as incertezas no entendimento das mudanças globais e da necessidade de maiores estudos sobre este tema. Outra necessidade são as medidas dos diversos parâmetros do sistema terrestre para que sejam possíveis o seu entendimento e a sua relação com os processos físicos e biofísicos, que juntos determinam o estado e o clima do globo.

A medição dos impactos desses aerossóis na produtividade primária nos oceanos, e a correlação do incremento (ou decréscimo) dos níveis de produção primária de CO₂ em mares, ainda se constitui como um desafio. Entretanto, com os diversos instrumentos a bordo do TERRA, uma habilidade sem precedentes foi obtida para o estudo no monitoramento dos impactos sobre mudanças na superfície em relação às tempestades continentais e a distribuição espacial dos particulados atmosféricos.

O papel dos oceanos

Cobrindo mais de 70% do nosso Planeta e garantindo 97% da água da superfície terrestre, os oceanos têm sido chamados de "a máquina de calor do clima global", devido à influência deles no cronômetro e nos padrões das mudanças climáticas. Os oceanos e a atmosfera interagem dinamicamente em trocas de calor, impulsos e gases. Todos esses elementos têm uma profunda influência nos padrões de tempo e da produtividade biológica nos continentes e nos oceanos.

Medidas fidedignas de temperaturas em oceanos através de sensores orbitais têm sido a meta dos oceanógrafos desde a década de 60. Entretanto, elas têm sido dificultadas por ruídos nos radiômetros, qualidade da calibração pré e pós-lançamento, ângulos de visada, falhas e incertezas nas correções atmosféricas, entre outros (JUSTICE et al., 1998).

Com a minimização de ruídos, e com bandas espectrais no intervalo espectral de 3,7-4,2mm, o sensor MODIS mede anomalias da temperatura de superfície oceânica com uma grande acurácia. Estes dados habilitam um melhor entendimento quanto às trocas entre oceano-atmosfera, particularmente durante o fenômeno *El-Niño*.

As águas oceânicas têm uma alta capacidade calorífica, e pequenas mudanças na temperatura dos oceanos podem ter maiores efeitos no tempo e no clima do que o esperado. A devastação causada pelo *El-Niño* em 1981-1982, por exemplo, mostrou uma variação de temperatura de somente 5°C, ainda mensurada pelos sensores a bordo da série NOAA. Estima-se que os prejuízos tenham ultrapassado a soma de 8 bilhões de dólares em danos, em termos mundiais, por ter causado inundações em algumas regiões e secas em outras (BUIZER et al., 2000).

Mudanças de uso do solo

Mudanças globais podem parecer muito óbvias quando os padrões da paisagem são considerados. A população humana triplicou no último século e conduziu a uma multiplicação de centros urbanos. Para alimentar a necessidade por espaço, energia e nutrição, a humanidade já alterou a cobertura em cerca de 40% da superfície terrestre (VITOUSECK et al., 1997).

Com a utilização de dados dos sensores MODIS, MISR e ASTER, torna-se possível a geração de mapas atuais em nível global e regional sobre a vegetação, visando prover estimativas regulares da sua distribuição nos grandes domínios florestais e avaliar a sanidade da vegetação. Monitorando globalmente as respostas sutis da vegetação, como os incrementos em ozônio na troposfera ou o decréscimo do ozônio na estratosfera, será possível a compreensão quanto à natureza e à severidade dos estresses na vegetação, como por exemplo, as previsões das taxas de geadas, inundações, ou danos de secas para o setor agrícola. Informações globais com uma resolução temporal que permita abranger todas as fases das culturas agrícolas, em uma moderada resolução espacial, são vitais para monitorar os recursos alimentares do Globo.

Dados dos sensores MODIS e MISR podem ser usados para obter estimativas do índice de área foliar e da fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação para calcular a massa e as trocas de energia entre a vegetação da superfície e a atmosfera (JUSTICE et al., 1998; DINER et al. 1999).

A habilidade de rastrear mudanças na superfície terrestre é essencial para melhor compreender as mudanças globais. Queimadas, por exemplo, em vastas regiões têm um duplo efeito: a) lançam o carbono armazenado e os particulados para a atmosfera; e b) eliminam a vegetação que poderia, em caso contrário, estar absor-

vendo carbono da atmosfera. Por outro lado, há instâncias em que as queimadas controladas são desejáveis, como por exemplo, onde as mesmas são naturais nos seus respectivos ecossistemas. Em algumas regiões do Globo, o controle de queimadas tem ocasionado uma vasta reserva de estoque de combustível em forma de biomassa morta. Essas regiões tornaram-se agora altamente susceptíveis à ocorrência de incêndios florestais. Usando dados de índices normalizados de vegetação e a temperatura de superfície do sensor MODIS, que podem ser providos com regularidade, mapas globais de áreas mais susceptíveis à ocorrência de incêndios podem ser gerados (JUSTICE et al., 1998).

Modelos que prevêem as mudanças climáticas para caracterizar parâmetros de cobertura da terra - como a sua elevação, rugosidade, albedo e fluxos de sensibilidade e calor latente - podem ser caracterizados pelos sensores MODIS, CERES, MISR e ASTER com uma acurácia sem precedentes.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O empreendimento científico ESE da NASA, em conjunto com agências espaciais ao redor do mundo, é baseado em esforços científicos visando responder à maioria das questões acerca das causas e dos efeitos das mudanças globais. O esforço pioneiro da NASA, com o lançamento do TERRA em 1999, a continuidade com o lançamento do AQUA em 2002 e a garantia da continuidade deste programa pelo período mínimo de 20 anos, garantem uma rica fonte de informações que podem ser acessadas e usadas por pesquisadores de qualquer instituição, e de forma gratuita (NASA, 2005).

Estes sensores são frutos de um grande aparato tecnológico e científico, permitindo a obtenção de dados simultâneos de um mesmo ponto de vista do espaço, e dos principais parâmetros associados com as mudanças climáticas globais.

O presente artigo provê uma visão geral de algumas aplicações desses dados de insubstituível valor científico. Não há dúvida de que várias outras aplicações podem ser vislumbradas encorajando-se essa busca científica com a disponibilidade e o acesso gratuito à maioria dos dados e produtos gerados por esses sensores, de modo que iniciativas por parte de instituições cresçam e possam gerar benefícios cada vez maiores ao conhecimento deste formidável Planeta Terra.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam especial agradecimento ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento. À Profa. Gisele Lima pela leitura prévia do manuscrito e aos revisores anônimos pelas sugestões.

REFERÊNCIAS

- BRASWELL, B. H.; SCHIMEL, D. S.; LINDER, E.; MOORE III, B. The response of global terrestrial ecosystems to interannual temperature variability. **Science**, v.278, n.5339, p.870 - 873, 1997.
- BUIZER, J. L.; FOSTER, J.; LUND, D. Global Impacts and Regional Actions: Preparing for the 1997-98 El Niño. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.81, n.9, p.2121-2139, 2000.
- BROECKER, W. Thermohaline circulation, the Achilles heel of our climate system: Will man-made CO₂ upset the current balance. **Science**, v.278, n.5343, p.1582-1588, 1997.
- COALE, K. H.; FITZWATER, S. E.; GORDON, R. M.; JOHNSON, K. S.; BARBER, R. T. Control of community growth and export production by upwelled iron in the Equatorial Pacific Ocean. **Nature**, v.379, n.6566, pp.621-624, 1996.
- DAÍ, A.; FUNG, I.; GENIO, A. D. Surface observed global land precipitation variations during 1900-1988. **Journal of Climate**, v.10, n.11, pp. 2943-2962, 1997.
- DINER, D. J.; BECKERT, J. C.; REILLY, T. H.; BRUEGGE, C. J.; CONEL, J. E.; KAHN, R. A.; MARTONCHIK, J. V.; ACKERMAN, T. P.; DAVIES, R.; GERSTL, S. A. W.; GORDON, H. R.; MULLER, J. P.; MYNENI, R. B.; SELLERS, P. J.; PINTY, B.; VERSTRAETE, M. M. Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR) instrument description and experiment overview. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.36, n.4, p.1072-1087, 1998.
- DINER, D. J.; ASNER, G. P.; DAVIES, R.; MULLER, J.-P.; PINTY, B.; SCHAAF, C. B.; STROEVE, J. New directions in Earth observing: scientific applications of multiple-view-angle remote sensing. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.80, n.11, p.2209-2228, 1999.
- EDWARDS, D. P.; HALVORSON, C. M.; GILLE, J. C. Radiative transfer modeling for the EOS Terra satellite Measurement of Pollution in the Troposphere (MOPITT) instrument. **Journal of Geophysical Research**, v.104, n.D14, p.16755-16775, 1999.
- JUSTICE, C. O.; VERMOTE, E.; TOWNSEND, J. R. G.; DEFRIES, R.; ROY, D. P.; HALT, D. K.; SALOMONSON, V. V.; PRIVETE, J. L.; RIGGS, G.; STRAHLER, A.; LUCHT, W.; MYNENI, R. B.; KNYAZIKHIN, Y.; RUNNING, S. W.; NEMANI, R. R.; ZHENGMIN W.; HUETE, A. R.; VAN LEEUWEN, W.; WOLFE, R. E.; GIGLIO, L.; MULLER, J.; LEWIS, P.; BRANSLEY, M. J. The Moderate Resolution Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.36, n.4, p.1228-1249, 1998.
- KAUFMAN, Y. J.; FRASER, R. S. The effect of smoke particles on clouds and climate forcing. **Science**, v.277, n.5332, p.1636-1639, 1997.
- KAUFMAN, Y. J.; HERRING, D. D.; RANSON, K. J.; COLLATZ, G. J. Earth Observing System AM1 mission to Earth. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.36, n.4, p.1045-1055, 1998.
- KEELING, C. D.; CHIN, J. F. S.; WHORF, T. P. Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO₂ measurements. **Nature**, v.382, n.6587, pp.146-149, 1996.
- KING, M.D.; KAUFMAN, Y.J.; MENZEL, W.P.; TANRE, D. Remote sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.30, n.1, p.2-27, 1992.

LONGHURST, A. Iron grip on export production. **Nature**, v.379, n.6566, pp.585-586, 1996.

MINOBE, S.; NAKANOWATARI, T. Global structure of Bidecadal Precipitation Variability in Boreal Winter. **Geophysical Research Letters**, v.29, n.10, pp. 1029-1033, 2002.

MYNENI, R. B.; KEELING, C. D.; TUCKER, C. J.; ASRAR, G.; NEMANI, R. R. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981-1991. **Nature**, v.386, n.6626, pp.698-702, 1997.

NASA (National Aeronautics and Space Administration). **Serviço de distribuição de dados científicos**. Disponível em <http://delenn.gsfc.nasa.gov/~imswww/pub/imswelcome/index.html>. Acesso em Junho de 2005.

NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Reports to the nation on our Changing Planet: Our changing climate. **NOAA Brochure**, v.4, n.1, 1997. Disponível em <http://www.ogp.noaa.gov/library/rtn4.pdf>. Acesso em Junho de 2005.

RAMANATHAN, V.; VOGELMANN, A. M. Greenhouse effect, atmospheric solar absorption and the Earth's radiation budget: From the Arrhenius-Langley era to the 1990s, **Ambio**, v.26, n.1, pp. 38-46, 1997.

ROSENQVIST, Å.; MILNE, A.; LUCAS, R.; IMHOFF, M.; DOBSONE, C. A review of remote sensing technology in support of the Kyoto Protocol. **Environmental Science and Policy**, v.6, n.5, p.441-455, 2003.

TANS, P. P.; FUNG, I. Y.; TAKAHASHI, T. Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget. **Science**, v.247, n.4949, pp.1431-1438, 1990.

VITOUSEK, P. M.; MOONEY, H. A.; LUBCHENCO, J.; MELILLO, J. M. Human domination of earth's ecosystems. **Science**, v.277, n.5325, p.494 - 499, 1997.

WIELICKI, B. A.; BARKSTROM, B. R.; BAUM, B. A.; CHARLOCK, T. P.; GREEN, R. N.; KRATZ, D. P.; LEE, R. B.; MINNIS, P.; SMITH, G. L.; TAKMENG WONG; YOUNG, D. F.; CESS, R. D.; COAKLEY, J. A.; CROMMELYNCK, D. A. H.; DONNER, L.; KANDEL, R.; KING, M. D.; MILLER, A. J.; RAMANATHAN, V.; RANDALL, D. A.; STOWE, L. L.; WELCH, R. M. Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES): Algorithm overview. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.36, n.4, p.1127-1141, 1998.

YAMAGUCHI, Y.; KAHLE, A. B.; TSU, H.; KAWAKAMI, T.; PNIEL, M. Overview of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.36, n.4, p.1062 - 1071, 1998.

YUNG, Y. L.; LEE, T.; WANG, C-H.; SHIEH, Y-T. Dust: a diagnostic of the hydrologic cycle during the last glacial maximum. **Science**, v.271, n.5251, p.962-963, 1996.

Recebido em setembro de 2005

Revisado em março de 2006

Aceito em março de 2006