

# ALBEDO PLANETÁRIO MEDIDO PELO EXPERIMENTO CÉLULA SOLAR DO SATÉLITE BRASILEIRO SCD2

MARIO FERREIRA BARUEL

Divisão de Eletrônica Aeroespacial – ETE/DEA  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE  
Av. dos Astronautas 1758, CP 515  
CEP 12201-970, São José dos Campos - SP, Brasil  
baruel@dea.inpe.br

NELSON VEISSID

Laboratório Associado de Sensores e Materiais – LAS/CTE  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE  
Av. dos Astronautas 1758, CP 515  
CEP 12201-970, São José dos Campos - SP, Brasil  
veissid@las.inpe.br

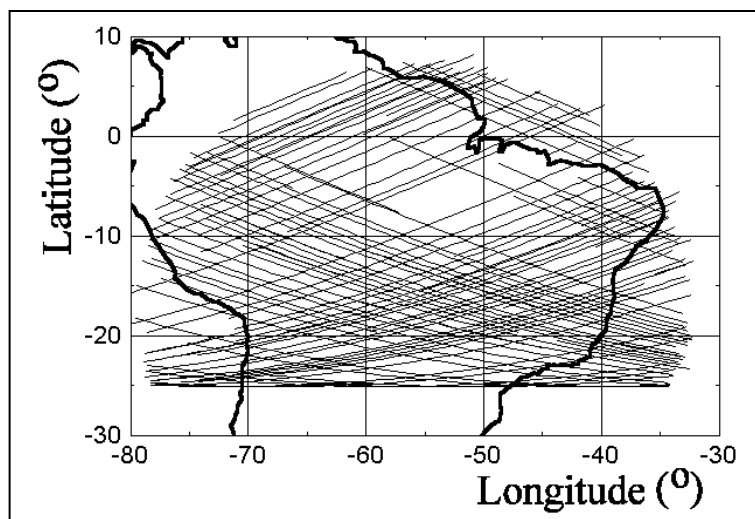
**Resumo:** *Albedo é a fração da radiação solar incidente que é refletida de volta por um corpo. O albedo do planeta Terra é a fração entre a radiação refletida para o espaço exterior e a radiação solar incidente. O seu valor depende das condições de superfície e atmosférica. Por exemplo, os maiores valores são encontrados na situação de céu coberto por nuvens. Usando os dados experimentais do Experimento Célula Solar do satélite SCD2 do INPE calcula-se o valor de albedo em função do tempo para diferentes valores de latitude e longitude. Imagens geográficas mensais feitas a partir de 1999 mostram os valores médios sobre a América do Sul. Estas imagens permitem obter análises sobre mudanças climáticas globais.*

**Palavras-chave:** albedo, SCD2, Experimento Célula Solar.

## INTRODUÇÃO

É importante fazer uma distinção entre variações do tempo atmosférico e variações climáticas. O primeiro é caracterizado por flutuações decorrentes de seus aspectos cíclicos. Por exemplo, variação diária dos parâmetros atmosféricos (temperatura, umidade, insolação e outros) provocados pelos ciclos de dia e noite. Também, flutuações sazonais e anuais provocados pelos ciclos das diferentes estações do ano e pelo ciclo da atividade solar, respectivamente. Todas estas informações agregadas e analisadas a longo termo definem o clima, que conseqüentemente tem uma natureza cíclica e define um ciclo climático. O estudo dos vários parâmetros atmosféricos permite definir as variações do clima ou variabilidade climática (Ayoade, 1986, p. 205). O valor do albedo (fração entre a radiação solar refletida pela incidente) é então aumentado com a cobertura por nuvens. Em função disto, podemos estabelecer que o estudo temporal e espacial do albedo pode ser usado como uma ferramenta para o estudo de mudanças do clima.

O Experimento Célula Solar (ECS) do satélite SCD2 do INPE (lançado em outubro de 1998) é composto por células de silício monocristalino e, em função de sua operacionalidade, permite determinar o albedo planetário sobre a América do Sul. No trabalho de Veissid e Pereira (2000) é descrita a metodologia usada para obtenção do albedo planetário usando os dados do Experimento Célula Solar. Os dados do ECS são obtidos em tempo real pela telemetria do satélite SCD2 quando é visível pela antena de recepção localizada na cidade de Cuiabá-MT. Em função disto, a área de estudo é limitada sobre a América do Sul. A Fig. 1 mostra parte das órbitas do satélite SCD2, durante o mês de novembro de 1998, dentro da visada desta antena de recepção.



**Figura 1- Partes das órbitas do satélite SCD2 durante o mês de novembro de 1998 na visada da estação receptora de Cuiabá-MT (latitude 16°S e longitude 56°O)**

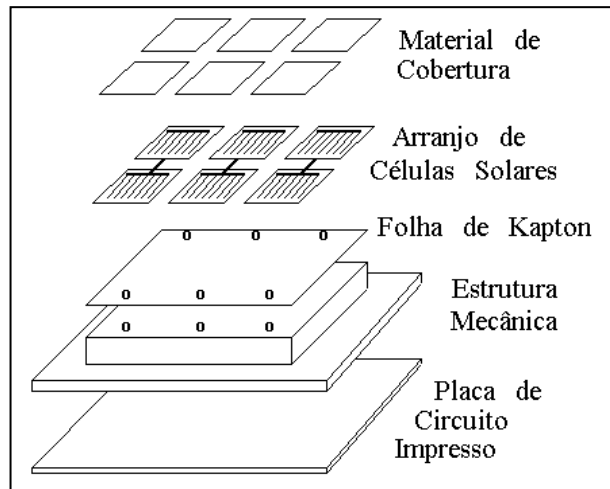
## MÉTODO EXPERIMENTAL

O satélite de coleta de dados meteorológicos (SCD2), lançado em outubro de 1998, atua como receptor e transmissor dos parâmetros medidos em plataformas terrestres remotas espalhadas ao longo do território Brasileiro. Este satélite tem a bordo um experimento de células solares (ECS) com o objetivo de qualificar células solares nacionais para uso em satélites e de estudar a degradação deste dispositivo pela irradiação com partículas ionizantes (elétrons e prótons de alta energia). Estas partículas deterioram a cristalinidade dos substratos semicondutores e diminuem o desempenho dos dispositivos em satélites. As células solares foram projetadas e fabricadas no LAS/INPE usando a infra-estrutura do Laboratório de Microeletrônica da Escola Politécnica da USP em São Paulo (LME/EPUSP). Elas são homojunções tipo n+/p e foram fabricadas a partir de substratos de silício monocristalino com resistividade de 1 Ohm.cm. Vários artigos foram publicados relatando o desenvolvimento do ECS (Veissid et al., 1990; 1995; 1997 e 1998). A conclusão principal desses artigos é que a degradação do desempenho das células solares pela radiação ionizante encontrada no espaço exterior está ocorrendo conforme o previsto para este dispositivo. Esta degradação é de 0,08% por ano em valores absolutos ou de 0,7% por ano em relação ao seu valor inicial de eficiência de conversão.

O plano da órbita do SCD2 está inclinado de aproximadamente 25° em relação ao plano do equador. A órbita é mantida dentro da eclíptica solar. A rotação ao redor do seu eixo é mantida em torno de 34 rpm. O período de translação do SCD2 em relação a Terra é de 100 min, sendo que o satélite fica sob iluminação do Sol durante 65 min e o restante de cada órbita (35 min) é eclipsado pela sombra da Terra. O Experimento Célula Solar do SCD2 (ECS) é composto por um arranjo de seis células solares conectadas de duas em duas em série. A descrição deste dispositivo encontra-se na referência (Veissid e Pereira, 2000). O arranjo de células solares é colocado na superfície externa de uma estrutura mecânica de alumínio. Elas têm um material de cobertura de borossilicato com 5% de dióxido de cério, com espessura de 150µm e fabricado pela Pilkington (*CMX cover glass*). Este dióxido serve para prevenir a formação de centros de cor no material de cobertura. A Fig. 2 mostra o diagrama estrutural do ECS2.

A placa de circuito impresso possui os componentes eletrônicos para o condicionamento de sinal. O ECS2 possui três pares de células, os quais são usados para operar em três condições distintas. O primeiro par simula a condição de trabalho próximo de curto circuito, isto é, os terminais de uma resistência de

carga de  $1 \Omega$  estão ligados a um amplificador que aumenta o seu sinal para o valor na faixa de 0-5V. O segundo par tem uma resistência de carga de  $8 \Omega$  e está ligado a um segundo amplificador, para simular a situação de potência máxima, e o terceiro par simula a condição de circuito aberto (ver Fig. 2).

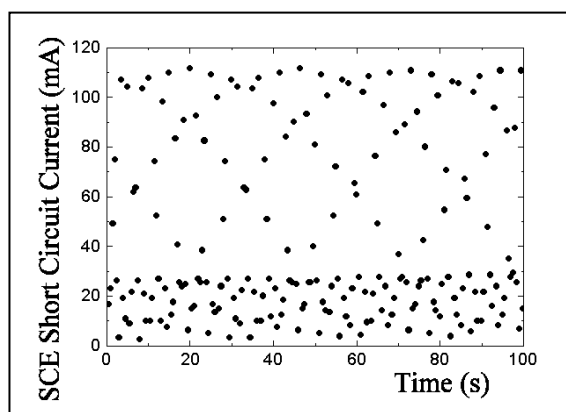


**Fig. 2 – Diagrama do Experimento Célula Solar do satélite SCD2 do INPE.**

A eletrônica do ECS do SCD2 amplifica o valor de tensão lido na resistência do par que simula a condição de curto circuito e passa para um conversor analógico-digital (AD) de 8 bits. Este sinal é transmitido por telemetria para a Terra a cada meio segundo. O modelo matemático usado para determinar o desempenho das células solares a partir destes dados usa a rotação intrínseca do satélite (*spin*), que é mantida em torno de 34 rotações por minuto (rpm). Em função do algoritmo usado para interpretar os sinais verificou-se que, além da função principal do experimento de monitorar em tempo real o desempenho de suas células em missão, ele permite determinar os valores da radiação solar refletida pela Terra durante a passagem do SCD2 pela visada da estação receptora de Cuiabá em Mato Grosso. Sua rotação intrínseca permite também obter leituras da radiação incidente no topo da atmosfera durante o período em que o experimento está apontado para o Sol e, desta forma, obter-se valores auto-calibrado do albedo planetário no campo de visada instantâneo - IFOV (*instantaneous field of view*) do Experimento. Através de um algoritmo, desenvolvido especificamente para a análise dos dados deste Experimento, determina-se o mosaico de albedo em uma grade sintética com resolução de  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ , em latitude e longitude, sobre a América do Sul (Veissid e Pereira, 2000).

Como foi explicado anteriormente, o objetivo do ECS é estudar a degradação que as suas células sofrem com a radiação ionizante. Para o estudo do albedo, através dos dados do ECS, consideramos que as células solares atuam como sensor de radiação visível (Veissid, 2002). Neste trabalho são considerados apenas os dados telemetrizados provenientes do par de células solares que opera na condição de curto circuito, pois este valor é proporcional a intensidade luminosa solar (Veissid et al., 1995), tanto aquela vinda diretamente do Sol como a parte que é refletida pela Terra. Conforme explicado adiante neste trabalho, só é possível de ser observado o albedo quando a curva que o representa não se superpõe com a curva da radiação solar. Portanto, esta condição de defasagem entre os picos da curva só é satisfeita na visada de Cuiabá durante o horário local entre 8:30 h e 15:30 h.

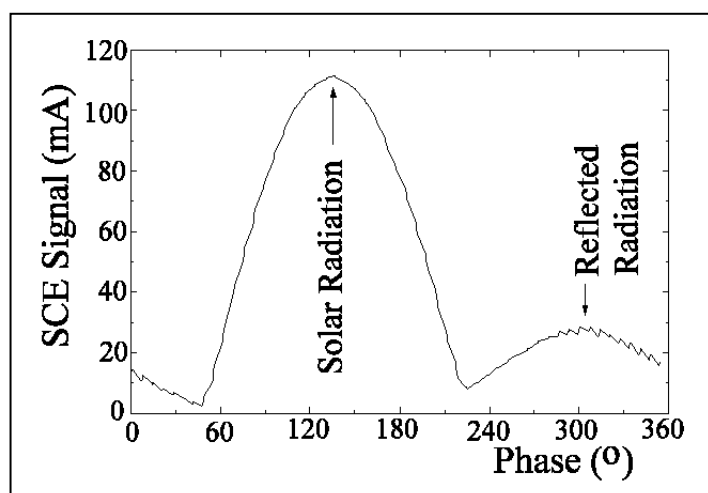
A Fig. 3 apresenta uma amostra de como os sinais são recebidos para o par da condição de curto circuito. Nesta figura são mostrados os pontos de leitura da telemetria do sinal do ECS que, em função da rotação intrínseca do satélite, variam de um valor máximo quando o ECS está orientado para o Sol até um valor mínimo. Estes pontos estão separados de meio segundo, pois a amostragem de leitura do computador de bordo do satélite tem uma taxa de duas leituras por segundo. O valor da telemetria está na unidade de mA, pois a resistência de carga permite a conversão da tensão em corrente.



**Fig. 3 – Amostra de dados do Experimento Célula Solar recebido pela telemetria do satélite SCD2.**

O pico da radiação solar ou amplitude solar  $A_s$ , é obtido pelo método dos mínimos quadrados no ajuste de uma parábola em torno do seu máximo (ver Fig. 4). A Fig. 4 mostra a curva dos dados da Fig. 3, obtida pela transformada de variável de tempo ( $t$ ) para ângulo de fase da rotação intrínseca do satélite ( $\theta$ ). Esta rotina de ajuste permite obter os valores experimentais dos picos associados a radiação refletida ( $A_a$ ) e radiação solar ( $A_s$ ). Após correções geométricas, estes valores convertem-se nas intensidades das radiações refletida e solar e o albedo é calculado pela razão entre estas duas intensidades.

A defasagem entre os dois picos vistos na Fig. 4 é função da normal à superfície da Terra na posição em latitude e longitude do satélite e a direção dos raios solares. O satélite na saída do cone de sombra da Terra apresenta um valor nesta defasagem menor do que  $90^\circ$  e na entrada do cone de sombra este valor é maior do que  $270^\circ$ . Nestas condições os dois picos estão superpostos e, isto, dificulta a leitura do sinal referente à radiação solar refletida. Portanto, a leitura deste sinal só é possível para ângulos entre  $100^\circ$  e  $260^\circ$ , sendo que a condição ideal é em torno de  $180^\circ$ , pois nesta situação o satélite encontra-se exatamente entre o Sol e a Terra.



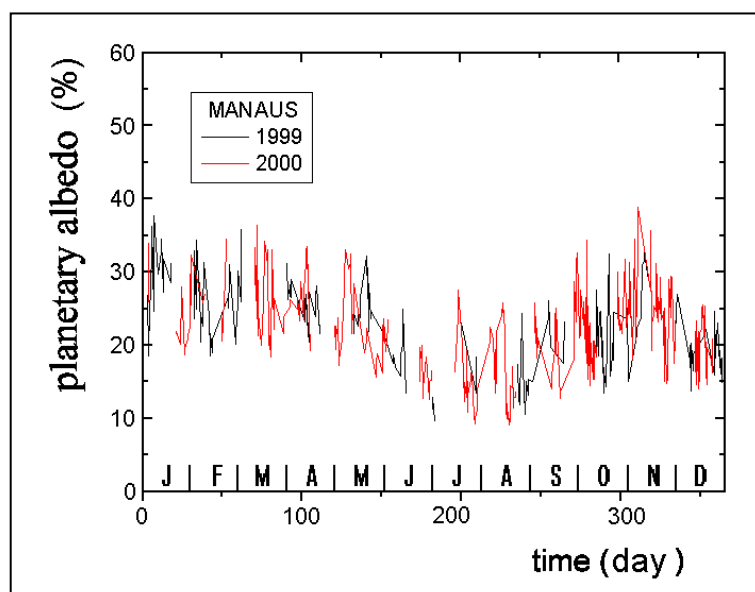
**Fig. 4 – Curva dos dados da Fig. 2 depois da transformada de variável de tempo para fase de rotação do SCD2.**

Uma avaliação semi-quantitativa desta nova metodologia foi realizada através de uma simulação comparativa com dados do satélite GOES-8 e os trabalhos de Veissid e Pereira, 2000 e 2003, mostram esta simulação.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O satélite SCD2 foi colocado em órbita no dia 23 de outubro de 1998 e desde esta data o INPE vem recebendo arquivos diários dos valores das telemetrias do Experimento Célula Solar. Todos estes dados juntos formam uma grande quantidade de informações sobre a variação temporal da radiação refletida pela Terra. Visto que os dados do ECS são transmitidos em tempo real para a estação receptora de Cuiabá, eles fornecem estas informações apenas na visada desta estação, mostrada na Fig. 1.

Os dados de albedo podem ser apresentados na forma de gráfico (local definido pela latitude e longitude) e de imagens (gráfico tridimensional do albedo sobre a América do Sul). A Fig. 5 mostra um exemplo da variação local do albedo sobre a cidade de Manaus (latitude de 3°S e longitude 60°W), na resolução de  $\pm 5^\circ$  e para os anos de 1999 e 2000. A partir de gráficos deste tipo é extraído informações úteis sobre os valores dos albedos mínimo, máximo, médio e do desvio padrão em relação a média.



**Figura 5 – Valores de albedo medidos pelo Experimento Célula Solar sobre a cidade de Manaus, dentro de uma resolução de  $\pm 5^\circ$ .**

Os resultados do Experimento podem, também, serem apresentados na forma de imagens que correspondem a gráficos tridimensionais dos valores de albedo sobre a América do Sul. Por exemplo, a Fig. 6 mostra a imagem do valor médio do albedo medido pelo ECS do satélite SCD2 para o mês de julho de 2000. Estes valores foram obtidos usando uma grade de células com dimensões de  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$  em latitude e longitude, conforme mostrada na Fig. 5. Todas as passagens do satélite sobre as células desta grade foram registradas e os valores médios do albedo calculados para cada célula. A Fig. 6 mostra a barra de cores superior que corresponde ao valor de albedo médio entre 8% e 35%. Para comparação a figura 7 mostra a imagem do valor médio da radiação de onda curta obtido pelo satélite ERBE do site <http://earthobservatory.nasa.gov/Observatory/Datasets/swflux.erbe.html>. Ela representa a radiação de onda curta ( $0,3 \mu\text{m} - 5 \mu\text{m}$ ) que escapa do topo da atmosfera da Terra para o espaço. A barra de cores mostra a escala dos “pixels” da figura na unidade de  $\text{W}/\text{m}^2$ . As duas figuras correspondem ao mesmo mês.

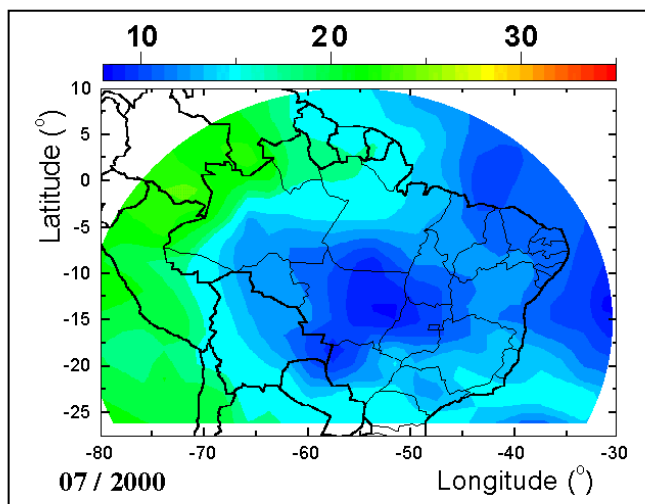


Figura 6 – Valores médio do albedo para o mês de julho de 2000, medido pelo ECS do satélite SCD2. 07/2000.

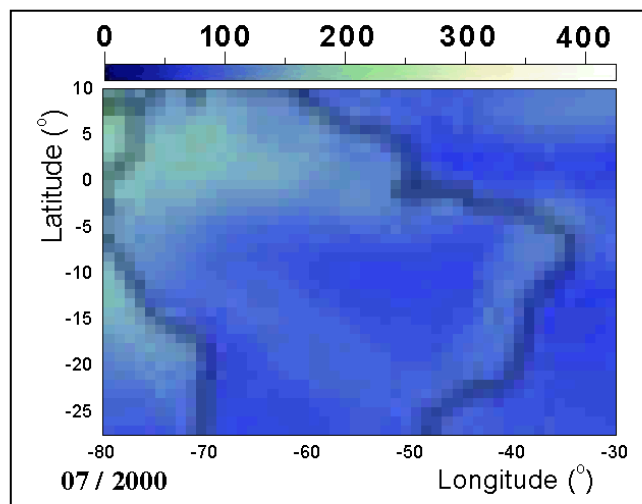


Figura 7 – Valores da radiação de onda curta (SWR) obtidos do satélite ERBE, para 07/2000.

## CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi empregar uma tecnologia simples e de baixo custo em conjunto com um algoritmo adequado de tratamento de dados para obter valores de albedo planetário no território brasileiro a partir dos dados do Experimento Célula Solar (ECS) do INPE, a bordo do satélite SCD2. Este método apresenta-se como uma alternativa tecnológica totalmente nacional para o emprego em satélites científicos de pequeno porte (até 150 kg) e promove o avanço da ciência e tecnologia espacial a custo moderado. Visto que o sinal do SCD2/ECS pode se manter provavelmente pelos próximos 10 anos, ou mais, espera-se que esta nova metodologia permita gerar maiores conhecimentos no desenvolvimento dos métodos para satélite de monitoração de longo período do albedo terrestre, dada a sua importância na climatologia e suas mudanças globais.

Os resultados da simulação empregando dados do ECS do SCD2 mostraram que os mosaicos de valores de albedo podem ser empregados para monitorar o clima e seus efeitos, tais como, por exemplo, o El-Niño. Devido ao fato de que a metodologia empregada independe da degradação natural das células dos sensores de radiação, tendo em vista a processo empregado de autocalibração pelo processo de rotação intrínseca do satélite, esta nova metodologia representa um ponto importante quando se trata de investigar variações do albedo. O método de obtenção do albedo a partir dos dados de um sensor não colimado, como é o caso do ECS do SCD2, apresenta vantagens em relação ao método convencional (câmaras CCD dos satélites meteorológicos) que são: auto-calibração, pequeno volume de dados e facilidade de extração de informações relevantes. A principal desvantagem reside na baixa resolução de superfície ( $2,5^\circ$  em latitude e  $2,5^\circ$  em longitude) quando comparado com a resolução das câmaras CCD. As imagens dos valores médios mensais, mostradas neste trabalho, podem ser úteis aos climatologistas e meteorologistas para o entendimento dos processos atmosféricos. Principalmente, no estudo de processos instáveis e no efeito de processos naturais (efeito El-Niño ou erupções vulcânicas) e humanos (poluição ou desmatamento), que são não sazonais.

Para futuros experimentos embarcados em satélites, a metodologia proposta pode ser adaptada para operar em janelas espectrais diferentes e possibilitar um estudo ainda mais detalhado do albedo espectral.

## REFERÊNCIAS

AYODE, J.O. (1986) - *Introdução a Climatologia para os Trópicos*, Edit. DIFEL, São Paulo-SP.

VEISSID, N. e PEREIRA, E.B. (2000) - Estimativa do Albedo Planetário Empregando Dados do Experimento Célula Solar do Satélite Brasileiro SCD2. *Brazilian Journal of Geophysics* **18(1)**: 26.

VEISSID, N., NUBILE, P., BELOTO, A.F. e DE ANDRADE, A.M. (1990) - The Solar Cell Experiment of the First Brazilian Complete Space Mission Satellite. *Twenty-First Specialists Photovoltaic Conference, Kissimmee, Florida-USA, 21 a 25 de maio de 1990*: 1184.

VEISSID, N., BONNET, D. e RICHTER, H. (1995) - Experimental Investigation of the Double Exponential Model of a Solar Cell under Illuminated Conditions: Considering the Instrumental Uncertainties in the Current, Voltage and Temperature Values, *Solid-State Electr.* **38(11)**: 1937.

VEISSID, N., NUBILE, P. E BELOTO, A.F. (1997) - Results of the solar cell experiment of the first Brazilian satellite, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **46(1)**: 1.

VEISSID, N., NUBILE, P. e BELOTO, A.F. (1998) - The Solar Cell Experiment of the First Brazilian Satellite: 1000 Days of Data Analysis. *Second World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna-Austria, 6 a 10 de julho de 1998*: 3582.

VEISSID, N. “New Developments in Using Solar Cells as Remote Sensors to Gauge Climate Change“, *Environmental Geosciences*, Vol. 10(2), p. 47-57, 2003.

VEISSID, N. “New Satellite Sensor and Method for the Direct Measurement of the Planetary Albedo, Results for the 1999, 2000 and 2001 in South America“, *Atmospheric Research*, Vol. 66, p. 65-82, 2003.