

Simulazioni di immagini ASTER da immagini MIVIS per la stima del flusso di SO₂ dell'Etna

Stefano Corradini,⁽¹⁾ Sergio Pugnaghi,⁽¹⁾ Maria Fabrizia Buongiorno⁽²⁾, Maria Paola Bogliolo⁽³⁾, Valerio Lombardo⁽²⁾, Luca Merucci⁽²⁾ e Sergio Teggi⁽¹⁾

Lo scopo di questo lavoro è la verifica della possibilità di determinare il flusso di SO₂ emesso dall'Etna da immagini simulate ASTER nel TIR. L'ASTER è uno degli strumenti montati a bordo di Terra, il primo satellite del progetto EOS lanciato il 18 dicembre del 1999, le cui immagini non sono ancora disponibili. La simulazione delle immagini ASTER è stata eseguita utilizzando le immagini MIVIS acquisite durante la campagna di misura "Sicily '97". Le mappe di contenuto colonnare di SO₂, mostrate in questo lavoro, sono state ottenute utilizzando un algoritmo basato sulla tecnica *Split-Window* e precedentemente applicato alle immagini MIVIS. I risultati sono in ottimo accordo con quelli ottenuti direttamente dalle procedure d'inversione delle immagini MIVIS e alle misure COSPEC effettuate durante la campagna di misura.

Introduzione

La stima del flusso di SO₂, ed in particolare la sua evoluzione temporale, è un parametro molto importante per il monitoraggio dei vulcani in stato di quiescenza, in quanto è considerato uno dei precursori delle eruzioni vulcaniche; vi sono studi che dimostrano che da quattro a sei settimane prima di un evento eruttivo si assiste ad una consistente diminuzione del flusso di SO₂ [Caltabiano et al., 1994; Mc Gee e Sutton, 1994]. In più la stima di questa grandezza permette una valutazione più accurata del contributo naturale alla presenza di questo gas in atmosfera e il confronto con l'emissione di origine antropica.

Il principale strumento tuttora utilizzato per la stima del flusso di SO₂ è il *Correlation Spectrometer* (COSPEC) che lavora nell'ultra-violetto (UV) [Malinconico, 1979; Casadewall et al., 1981, 1983, 1987; Stoiber et al., 1983, 1987; Allard et al., 1991]. Negli ultimi anni sono state proposte nuove tecniche, basate sull'inversione dell'equazione di trasferimento radiativo nell'infrarosso termico

The aim of this paper is to show the feasibility of the SO₂ flux evaluation emitted by Mt. Etna volcano, using simulated ASTER-TIR images. ASTER is one of the instruments on board of Terra, the first EOS satellite launched on December 18 1999, which images are not yet available. The ASTER images have been simulated using the MIVIS images acquired during the "Sicily '97" campaign. The SO₂ columnar content maps, shown in this paper, have been obtained by means of an algorithm based on the Split-Window technique previously applied on MIVIS images. The results are in good agreement with that obtained by the inversion procedure of the MIVIS data and with the COSPEC measurements performed during the campaign.

(TIR), applicate alle immagini telerilevate da aereo del *Thermal Infrared Multispectral Scanner* (TIMS) [Realmuto et al., 1994, 1997] e del *Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer* (MIVIS) [Teggi et al., 1999]. Stime di contenuto colonnare di SO₂ in stratosfera sono state effettuate da satellite, utilizzando il *Total Ozone Mapping Spectrometer* (TOMS) [Krueger et al., 1983, 1990, 1995] e il *Global Ozone Monitoring Experiment* (GOME) [Eisinger e Burrows, 1998; ESA, 1993]. L'Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer (ASTER), montato sul satellite Terra, è il primo strumento a presentare caratteristiche spettrali e di risoluzione geometrica al suolo adatte allo studio dell'emissione troposferica di SO₂ dei vulcani in stato di quiescenza.

In questo lavoro s'intende applicare la tecnica *Split-Window*, elaborata per le immagini MIVIS, alle immagini simulate ASTER, per la stima del flusso di SO₂ emesso dall'Etna. La simulazione delle immagini ASTER viene fatta utilizzando immagini MIVIS acquisite durante la campagna di misura "Sicily '97" [Buongiorno et al., 1999].

Caratteristiche ASTER e MIVIS

Terra, il primo satellite del progetto *Earth Observing System* (EOS) della NASA lanciato il 18 dicembre del 1999, è un satellite polare eliosincrono orbitante a circa 705 km dal suolo ed avente un ciclo di acquisizione di circa 16 giorni. A bordo di Terra ci sono cinque strumen-

⁽¹⁾ Osservatorio Geofisico dell'Università di Modena e Reggio Emilia, Via Campi 213/A, 41100 Modena, Italy.

⁽²⁾ Istituto Nazionale di Geofisica, Via di Vigna Murata, 605, 00143, Roma, Italy.

⁽³⁾ ISPEL Via Fontana Candida 1 Monte Porzio Catone, 00040, Roma, Italy.

Ricevuto il 08/06/00 - Accettato il 06/09/00

ti tra i quali l'ASTER. L'ASTER ha quattordici canali: tre nel visibile e vicino infrarosso (VNIR: 0.52-0.86 μm), sei nel medio infrarosso (SWIR: 1.60-2.43 μm) e cinque nell'infrarosso termico (TIR: 8.125-11.65 μm). Il suo angolo di vista totale (FOV) è di $\pm 2.44^\circ$ corrispondente a circa 60 km a terra, mentre l'angolo di vista istantaneo (IFOV), al nadir e nel TIR, è di 127.8 *mrad* corrispondente ad una risoluzione al suolo di 90 m.

Il MIVIS ha 102 canali in un *range* spettrale che va dal visibile all'infrarosso termico. Nel TIR presenta 10 canali (Tab. 1), il FOV è $\pm 35.55^\circ$ corrispondenti a 755 pixel e l'IFOV è 1.64 *mrad* (Fig. 1).

In Tabella 1 è mostrato un confronto tra i canali TIR dell'ASTER e del MIVIS mentre in Figura 1 sono mostrate le rispettive caratteristiche geometriche.

Simulazioni di immagini ASTER

Considerando una superficie lambertiana, utilizzando la legge di Kirchoff e considerando trascurabile lo scattering atmosferico, l'equazione di trasferimento radiativo, che descrive la radianza ricevuta dal sensore nei canali TIR, diventa:

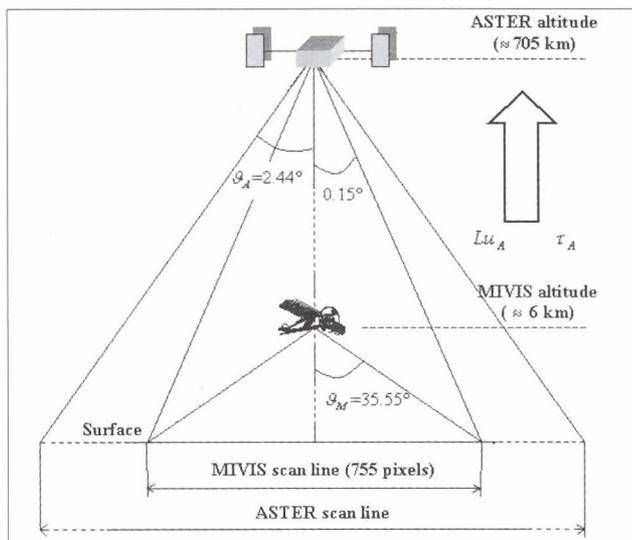


Figura 1 - Caratteristiche geometriche dell'ASTER e del MIVIS.

$$L_i = \varepsilon_i \cdot B_i(T_s) \cdot \tau_i + Lu_i + Ld_i \cdot (1 - \varepsilon_i) \cdot \tau_i \quad (1)$$

dove i indica il canale considerato, L_i è la radianza al sensore, ε_i è l'emissività superficiale, $B_i(T_s)$ è la funzione di Planck alla temperatura superficiale T_s , τ_i è la trasmittanza atmosferica, Lu_i rappresenta la radianza dello strato di atmosfera compreso tra il sensore e la superficie terrestre (*path radiance*) e infine $Ld_i \cdot (1 - \varepsilon_i)$ è la radianza riflessa dalla superficie terrestre (Fig. 2).

La simulazione dell'immagine ASTER in radianza deve essere effettuata tenendo conto delle differenze spettrali e geometriche tra l'ASTER stesso e il MIVIS; essa viene fatta in tre step:

- 1) calcolo, dall'immagine in radianza MIVIS (L_M), di una nuova immagine in radianza (L'_M) considerando l'angolo di vista dell'ASTER (Fig. 1);
- 2) ricampionamento spaziale e spettrale dell'immagine ottenuta per tenere conto della risoluzione a terra e delle caratteristiche radiometriche dell'ASTER (Fig. 1 e Tab. 1);
- 3) aggiunta dello strato di atmosfera compreso tra il MIVIS e l'ASTER (Fig. 1).

step 1)

Per calcolare l'immagine L'_M la *path radiance* e la trasmittanza vengono approssimate dalle seguenti relazioni analitiche:

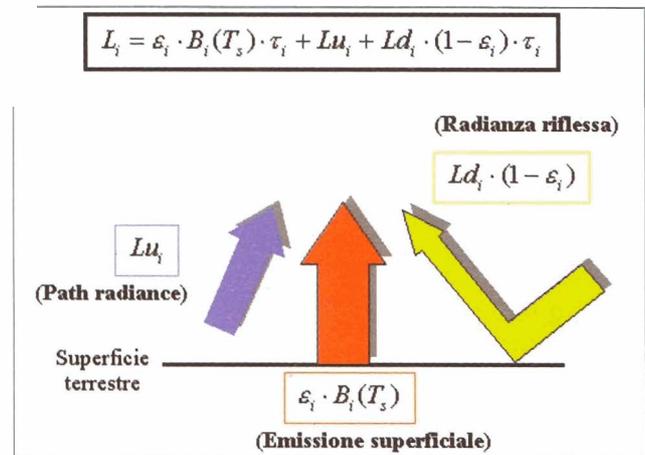


Figura 2 - Equazione del trasferimento radiativo nel TIR.

Tabella 1 - Bande TIR dell'ASTER e del MIVIS.

ASTER										
channel	10	11	12	13	14					
$\lambda(\mu\text{m})$	8.29	8.64	9.08	10.66	11.29					
MIVIS										
channel	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102
$\lambda(\mu\text{m})$	8.38	8.75	9.18	9.57	10.00	10.43	10.93	11.42	11.91	12.42

$$Lu_i = B_i(T_a) \cdot (1 - \tau_i) \quad (2)$$

$$\tau_i = 1 - \delta_i \cdot \mu \quad (3)$$

dove: $B_i(T_a)$ è la funzione di Planck alla "temperatura atmosferica" T_a , d_i è lo spessore ottico, $\mu = 1/\cos(\theta)$ e θ è l'angolo di vista (θ_M e θ_A rispettivamente per il MIVIS e l'ASTER).

Sostituendo la (2) e la (3) nell'equazione di trasferimento radiativo (1) e tenendo conto che la linea di scansione del MIVIS è "vista" dall'ASTER sotto un angolo di $\pm 0.15^\circ$ (Figura 1) si ottiene:

$$L'_{M,i} = L_{M,i} \cdot \cos(\theta_M) + b_i \cdot (1 - \cos(\theta_M)) \quad (4)$$

$$\text{dove } b_i = \varepsilon_i \cdot B_i(T_s) + L_{d,i} \cdot (1 - \varepsilon_i)$$

Il termine b_i è quindi dato dalla somma di due contributi: l'emissione superficiale e la radianza riflessa dalla superficie terrestre. Nel nostro caso il secondo termine è trascurabile rispetto al primo quindi si ha:

$$b_i \approx \varepsilon_i \cdot B_i(T_s) \quad (5)$$

Questo parametro è calcolato, pixel per pixel, utilizzando i valori di temperatura superficiale ottenuti dai dati MIVIS; l'algoritmo utilizzato per il calcolo della temperatura superficiale è basato sulla tecnica *Split-Window* ed è simile a quello proposto da Ulivieri et al. [1994]. L'emissività è stata ottenuta dalla stessa immagine MIVIS utilizzando l'*Emissivity Spectrum Normalization method* (ESN) [Realmuto, 1990] assumendo $\varepsilon_{\max} = 0.97$.

step 2)

Il ricampionamento spaziale è stato fatto all'altezza del plume tenendo conto della risoluzione dell'ASTER, mentre il ricampionamento spettrale è stato eseguito mediante una interpolazione lineare. Questa operazione fornisce la radianza $L'_{A,j}$, dove j indica il canale ASTER.

step 3)

Tenuto conto dello strato di atmosfera compreso tra i due strumenti, la radianza dell'ASTER è data da:

$$L_{A,j} = L'_{A,j} \cdot \tau_{A,j} + Lu_{A,j} \quad (6)$$

dove $\tau_{A,j}$ e $Lu_{A,j}$ sono rispettivamente la trasmittanza e la path radiance della porzione di atmosfera compresa tra i due sensori (Fig. 1).

Le immagini MIVIS utilizzate per la simulazione sono quelle acquisite il 12 e il 16 giugno 1997 durante la campagna di misura "Sicily '97".

Tecnica *Split-Window*

La tecnica *Split-Window* si basa sulla differenza di assorbimento atmosferico relativa a due lunghezze d'onda.

Essa è stata sviluppata da Saunders [1967] e Anding e Kauth [1970] ed è stata utilizzata per il calcolo di diversi parametri quali la temperatura superficiale degli oceani [McMillin, 1975; Prabhakara et al., 1974], l'emissività superficiale [Schmugge et al., 1991] [Gillespie et al., 1998], l'acqua precipitabile [Andersen et al., 1996; Oettle et al., 1997], e l'SO₂ [Pugnaghi et al., *submitted*].

L'algoritmo utilizzato per la stima del contenuto colonnare di SO₂ si ottiene considerando l'equazione di trasferimento radiativo, scegliendo due canali, uno affetto e l'altro non affetto dall'assorbimento dell'SO₂, e considerando una forma analitica approssimata della trasmittanza atmosferica. Poiché, nel caso dell'ASTER, i canali prescelti sono il 2 e il 5 la relazione finale è la seguente:

$$c_s = k_{0c} + k_{1c} \cdot \ln[(\varepsilon_2 \cdot (T_{b,5} - T_a + k_{2c})) / (\varepsilon_5 \cdot (T_{b,2} - T_a))] \quad (7)$$

dove c_s è il contenuto colonnare di SO₂, k_{0c} , k_{1c} , k_{2c} e T_a sono parametri, $T_{b,2}$, ε_2 e $T_{b,5}$, ε_5 sono rispettivamente le temperature di brillanza e le emissività dei canali 2 e 5.

I parametri k_{0c} , k_{1c} , k_{2c} e T_a vengono calcolati utilizzando le simulazioni eseguite con il MODTRAN 3.5 considerando il *plume* ad una altezza di 3300 m e 100 m di spessore. I valori di emissività per i cinque canali ASTER sono stati ottenuti da una interpolazione lineare dei valori di emissività del MIVIS. I risultati, per tre giorni (11, 12 e 16 giugno 1997), sono riportati in Tabella 2 assieme alla loro deviazione standard. La temperatura T_{TF} mostrata in Tabella 2 è la temperatura dell'aria misurata da una stazione meteorologica automatica posta a Torre del Filosofo a circa 2920 m s.l.m. Dall'analisi della Tabella 2 si può osservare che i valori dei parametri k_{0c} , k_{1c} e k_{2c} per i tre giorni esaminati, sono circa costanti, mentre i valori della temperatura T_a mostrano piccole variazioni legate alle differenti condizioni ambientali. Tuttavia della Figura 3 si può osservare una relazione lineare tra T_a e la temperatura misurata a Torre del Filosofo (T_{TF}).

Stima del flusso di SO₂

Le mappe di contenuto colonnare ottenute applicando l'equazione (7) alle immagini ASTER, simulate dalle immagini MIVIS del 12 e 16 giugno, sono mostrate in Figura 4 e 5 rispettivamente. Individuato l'asse del *plume* e i transetti (sezioni perpendicolari all'asse del *plume*), il flusso di SO₂ viene calcolato integrando i valori del contenuto colonnare lungo i transetti e moltiplicando questo valore per la velocità del vento ottenuta dalla radiosonda lo stesso giorno, alla stessa ora e alla stessa altezza. Nelle Figure 6 e 7 viene mostrato l'andamento del flusso lungo l'asse del *plume*. Il flusso è stato valutato a partire da circa 800 m dai crateri per tenere conto del fatto che in prossimità degli stessi le condizioni di equilibrio termodinamico non sono verificate. Nelle stesse due figure vengono mostrati anche i flussi di SO₂ ottenuti direttamente dalle immagini

Tabella 2 - Valori dei parametri k_{0c} , k_{1c} , k_{2c} e T_a per i giorni di misura, s è la deviazione standard, T_{TF} la temperatura dell'aria misurata da una stazione meteorologica automatica posta a Torre del Filosofo a circa 2920 m s.l.m..

GIORNO (GIUGNO 1997)	k_{0c} (g/m^2)	k_{1c} (g/m^2)	k_{2c} (K)	T_a (K)	σ (g/m^2)	T_{TF} (K)
11	-1.3	34.7	-1.7	277.7	0.2	284.6
12	-1.3	34.1	-1.8	279.8	0.1	286.1
16	-1.2	33.7	-1.8	281.7	0.1	288.3

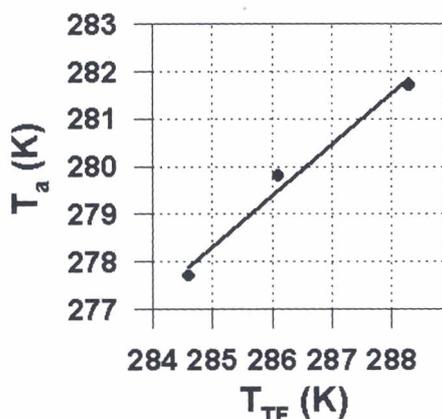


Figura 3 - Correlazione tra i valori della "temperatura atmosferica" T_a e i valori della temperatura dell'aria misurata a Torre del Filosofo T_{TF} (2920 m slm).

MIVIS alle quali è stata applicata la procedura sviluppata da Teggi et al.[1999].

I dati riportati in Tabella 3 mostrano il valore medio del flusso valutato utilizzando le immagini ASTER simulate, le immagini MIVIS e le altre misure effettuate durante la campagna.

Tabella 3 - Flussi medi valutati con le diverse procedure.

METODI E STRUMENTI UTILIZZATI	FLUSSO DI SO_2 (kg/s) (12 GIUGNO 1997)	FLUSSO DI SO_2 (kg/s) (16 GIUGNO 1997)
ASTER (Tecnica Split-Window)	42 ± 9	33 ± 7
MIVIS (MODTRAN-LUT)	45 ± 8	28 ± 9
COSPEC (T. Caltabiano)	49 ± 10	36 ± 9
COSPEC (P. Allard)	44 ± 3.6	32 ± 2.1

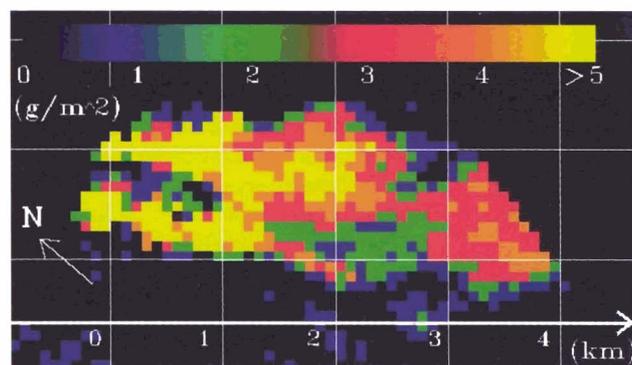


Figura 4 - 12 giugno 1997 - Immagine ASTER, in contenuto colonnare di SO_2 , del plume dell'Etna.

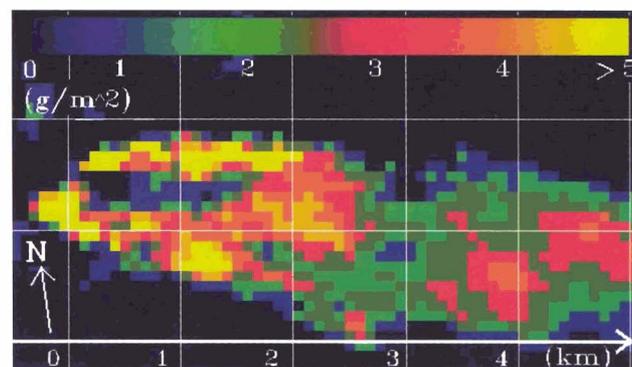


Figura 5 - 16 giugno 1997 - Immagine ASTER, in contenuto colonnare di SO_2 , del plume dell'Etna.

Conclusioni

In questo lavoro è stata verificata la possibilità di utilizzare le immagini TIR dell'ASTER per la stima del flusso di SO_2 dell'Etna. Le immagini ASTER sono state simulate a partire da immagini MIVIS acquisite durante la campagna di misura "Sicily '97". L'algoritmo utilizzato per la stima del contenuto colonnare di SO_2 è stato ottenuto utilizzando la tecnica dello *Split-Window* precedentemente applicata alle immagini MIVIS. I parametri dell'algorit-

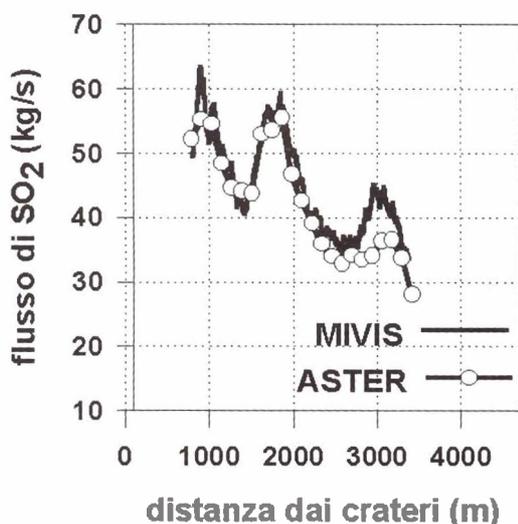


Figura 6 - 12 giugno 1997 - Andamento del flusso di SO₂ lungo l'asse del plume calcolato dall'immagine ASTER simulata e ottenuto direttamente dalle immagini MIVIS.

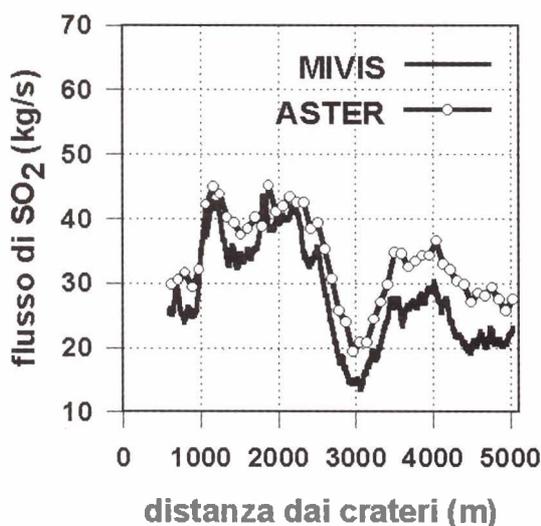


Figura 7 - 16 giugno 1997 - Andamento del flusso di SO₂ lungo l'asse del plume calcolato dall'immagine ASTER simulata e ottenuto direttamente dalle immagini MIVIS.

mo sono stati determinati, per tre differenti giorni, attraverso simulazioni MODTRAN 3.5 considerando il *plume* ad un'altezza di 3300 m e di spessore costante pari a 100 m (Tabella 2); i primi tre parametri risultano circa costanti mentre, il quarto mostra un andamento lineare con il valore di temperatura dell'aria misurata a Torre del Filosofo (2920 m s.l.m.) da una stazione meteorologica automatica (Figura 3). Questi aspetti dovranno essere studiati più in dettaglio considerando un *range* temporale maggiore.

Dalle mappe in contenuto colonnare di SO₂ e dalla velocità del vento all'altezza del plume è stato ottenuto il flusso emesso dall'Etna. Nelle Figure 6 e 7 vengono mostrati i confronti tra gli *andamenti* del flusso relativi alle immagini ASTER e quelli ottenuti dall'elaborazione diretta delle immagini MIVIS; si può notare che l'andamento delle curve risulta simile.

Infine i flussi medi, 42 kg s⁻¹ per il 12 e 33 kg s⁻¹ per il 16 giugno, sono in buon accordo con quelli ottenuti direttamente dalle immagini MIVIS e dalle misure COSPEC.

Bibliografia

Allard P., Carbonelle J., Dajlevic D., Bronce J. Le, Morel P., Robe M. C., Maurenas J. M., Pierret R. F., Martins D., Sabroux J. C., e Zettwoog P. (1991) - *Eruptive and diffuse emissions of CO₂ from Mount Etna*. Nature, 351: 387-391.

Andersen H. S. (1996) - *Estimation of precipitable water from NOAA-AVHRR data during the Hapex Sahel experiment*. Int. J. Remote Sens., 17; 2783-2801.

Anding D. e Kauth R. (1970) - *Estimation of sea surface temperature from space*. Remote Sensing Environment, 1, 217-220.

Buongiorno M.F., Bogliolo M. P., Caltabiano T., Carrere V., Corradini S., Merucci L., Pugnaghi S., Salvi S., Sterni A., e Teggi S. (1999) - *MVRRS Campaign: MIVIS mission on Sicilian volcanoes and ground measurements*. Pub. Ist. Naz. Di Geofisica, Rome, Italy (in press).

Caltabiano T., Romano R. e Budetta G. (1994) - *SO₂ flux measurements at Mount Etna (Sicily)*. Journal of Geophysical Research, 99(D6): 12809-12818.

Casadevall T. J., Johnston D. A., Harris D. M., Rose W. I., Malinconico L. L., Stoiber R. E., Bornhorst T. J., Williams S. N., Woodruff L., e Thompson J. M. (1981) - *SO₂ emission rates at Mount St. Helens from March 29 through December 1980*. U. S. Geol. Surv. Prof. Pap., 1250, 193-200.

Casadevall T. J., Rose W. I., Gerlach T., Greenland L. P., Ewert J., Wunderman R., e Symonds R. (1983) - *Gas emission and eruptions of Mount St. Helens through 1982*. Science, 221: 1383-1385.

Casadevall T. J., Stokes J. B., Greenwood L. P., Malinconico L. L., Casadevall J. R., e Furukawa B. T. (1987) - *SO₂ and CO₂ emission rate at Kilauea volcano, 1979-1984*. U. S. Geol. Surv. Prof. Pap., 1350, 771-780.

Eisinger M., e Burrows J. P. (1998) - *Observations of SO₂ from volcanic plumes*. ESA Earth Observation Q., 58: 16-18.

European Space Agency (ESA) (1993) - *Global Ozone Monitoring Experiment. interim science report*. Eur. Space Agency Spec. Publ., ESA SP-1182.

Gillespie A., Rokugava S., Matsunaga T., Cothorn J. S., Hook S., e Kale A. (1998) - *A temperature and emissivity separation algorithm for Advance Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer (ASTER) images*. IEEE Trans. Geosc. Remote Sens., 36: (4) 1113-1126.

Krueger A.J. (1983) - *Sighting of El Chichòn sulfur dioxide clouds with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer*. Science, 220: 1377-1379.

Krueger A.J., Walter L. S., Schnetzler C. C., e Doiron D. S. (1990) - *TOMS measurements of the sulfur dioxide emitted during the 1985 Nevada del Ruiz eruption*. J. Volcanol. Geotherm. Res., 41: 7-15.

Krueger A. J., Walter L. S., Bhartia P. K., Schnetzler C.C., Krotkov N. A., Sprod I., e Bluth G. J. S. (1995) - *Volcanic sulfur dioxide measurements from the Total Ozone Mapping Spectrometer instruments*. Journal of Geophysical Research, Vol. 100: NO. D7, 14057-14076.

Malinconico L. L. (1979) - *Fluctuations in SO₂ emission during recent eruption of Etna*. Nature, 278: 4345.

Mc. Gee K. A., e Sutton A. J. (1994) - *Eruptive activity at Mount St. Helens, Washington, USA, 1984-1988, A gas chemistry prospective*. Bull. Volcanol., 56: 433-446.

McMillin L.M. e Crosby D.S (1975) - *Theory and validation of the multiple window sea surface temperature technique*. Journal of Geophysical Research, Vol.89: 3661-3665.

Ottle C., Oualha S., Francois C., e LeMaguer S. (1997). - *Estimation of total atmospheric water vapour from split-window radiance absorption*. Geophys. Res., 80, 5113-5117.

Prabhakara C., Dalu G. e Kunde V. G. (1974) - *Estimation of sea surface temperature from remote sensing in the 11 to 13 mm window region*. Journal of Geophysical Research, Vol.79: 5039-5044.

Pugnaghi S., Teggi S., Corradini S., Buongiorno M. F., Bogliolo M. P., e Merucci L. (submitted to GRL) - *Estimation of sulfur dioxide plume from high resolution radiance measurements in thermal infrared using two MIVIS channels with different absorption: A case study from Mt. Etna volcano, Sicily 1997 campaign*. Geophys. Res. Lett., pp.4.

Realmutto V. J. (1990) - *Separating the effects of temperature and emissivity: Emissivity spectrum normalization*. In Proceedings, 2nd Thermal Infrared Multispectral Scanner (TIMS) Workshop, edited by E. A. Abbots, JPL Publ., 90-55, 310-316.

Realmutto V. J., Abrams M. J., Buongiorno M. F., e Pieri D. C. (1994) - *Multispectral Infrared Mapping of sulfur dioxide plumes: a case study from Mount Etna, Sicily, July 29, 1986*. Journal of Geophysical Research, 99: 481-488.

Realmutto V. J., Sutton A. J., e Elias T. (1997) - *Multispectral infrared mapping of sulfur dioxide plumes: A case study from the East Rift Zone of Kilauea Volcano, Hawaii*. J. Geophys. Res., 102: 15057-15072.

Saunders P.M. (1967) - *Aerial measurements of sea surface temperature in the infrared*. Journal of Geophysical Research, 72: 4109-4117.

Schmugge T. J., Becker F. e Li Z. L. (1991) - *Spectral emissivity variations observed in the airborne surface temperature measurements*. Remote Sens. Environ., 35:95-104.

Stoiber R. E., Malinconico L. L., e Williams S. N. (1983) - *Use of the correlation spectrometer at volcanoes*. In Forecasting Volcanic Events, edited by H. Tazieff and J. C. Sabroux, Elsevier, New York, pp. 425-444.

Stoiber R. E., Williams S. N., e Huebert B. (1987) - *Annual contributions of the sulfur dioxide to the atmosphere by volcanoes*. J. Volcanol. Geotherm. Res., 33: 1-8.

Teggi S., Bogliolo M. P., Buongiorno M. F., Pugnaghi S. e Sterni A. (1999) - *Evaluation of SO₂ emission from Mt. Etna using diurnal and nocturnal MIVIS TIR remote sensing images and Radiative transfer models*. Journal of Geophysical Research, 104(B9): 20069-20079.

Ulivieri C., Castronuovo M. M., Francioni R. e Cardillo A. (1994) - *A Split-Window algorithm for estimating land surface temperature from satellites*. Advanced Space Research, 14(3): 59-65.