

CORREZIONE DELLA GEOLOCAZIONE DI PIXEL NUVOLOSI DA SENSORE AVHRR CON STIMA DELLA QUOTA DELLE NUBI

Gabriele Poli (*), Giulia Adembri (*), Maurizio Tommasini (*), Alessia Iliopulos (*)

(*) Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni – Via S. Marta, 3 – 50139 Firenze (Italia),
Tel. +39055 4796387, Fax +39055494569, e-mail: g.poli@labtele.det.unifi.it, g.adembri@labtele.det.unifi.it,
m.tommasini@labtele.det.unifi.it, a.iliopulos@labtele.det.unifi.it

Riassunto

L'obiettivo del presente lavoro è la realizzazione di un algoritmo finalizzato alla correzione della geolocalizzazione dei pixel nuvolosi telerilevati dal sensore AVHRR/NOAA con ampi angoli di puntamento ($35 - 45^\circ$).

La determinazione di longitudine e latitudine geografiche di tali pixel risulta affetta da un errore sensibile se non si tiene conto della quota del corpo nuvoloso osservato; tale errore dipende dalla quota delle nubi e dall'angolo di puntamento. L'errore consiste nell'attribuire al pixel nuvoloso le coordinate del punto individuato dal prolungamento della retta sensore-nube sulla superficie terrestre, anziché le coordinate del punto sub-nube. L'entità dell'errore aumenta all'aumentare della quota delle nubi e dell'ampiezza dell'angolo di puntamento da satellite.

Il metodo di correzione proposto si basa innanzi tutto sull'individuazione dei pixel nuvolosi nella scena ripresa. Per ognuno di essi, effettuata la calibrazione radiometrica delle bande 4 e 5 AVHRR, viene valutata la temperatura di brillantezza a 10.8 e a $12.0 \mu\text{m}$. In particolare, la temperatura di brillantezza a $10.8 \mu\text{m}$, nel caso di nubi fortemente opache (caratterizzate da elevato spessore ottico), può essere considerata una buona approssimazione della temperatura termica della parte alta della nube. Riferendosi a opportuni modelli atmosferici, viene poi ricavata una relazione quota-temperatura, valida per la latitudine e il periodo dell'anno cui si riferiscono i dati satellitari, e con essa viene stimata la quota della nube che interessa il pixel. Nota la quota della nube ed i parametri della ripresa da satellite (quota del satellite, punto sub-satellite, angolo di puntamento), sulla base della geometria di ripresa sensore-Terra-nube, vengono calcolate le coordinate del punto sub-nube; il corretto posizionamento del pixel nuvoloso osservato consiste nell'assegnare ad esso le coordinate del punto sub-nube calcolate.

L'area di studio considerata per lo sviluppo e la prova dell'algoritmo proposto è quella della Regione Sicilia. I dati AVHRR utilizzati per lo sviluppo dell'algoritmo di correzione proposto sono stati prelevati dall'archivio della Stazione Ricezione Satelliti del Polo Universitario di Prato (PIN), che effettua la ricezione in tempo reale dei satelliti della costellazione NOAA. In particolare sono stati selezionati i passaggi satellitari diurni nei quali la zona della Sicilia è interessata da nubi e viene vista con angoli di puntamento lontani dal nadir.

L'entità delle correzioni sui pixel nuvolosi della scena, apportata dal metodo proposto, è stata valutata sia graficamente, attraverso rappresentazioni tridimensionali su riferimento Mercatore WGS84, sia numericamente, valutando le correzioni minime, medie e massime su una certa porzione della scena sotto studio ed i parametri di ripresa corrispondenti.

Sono state calcolate correzioni talvolta rilevanti (anche dell'ordine della decina di km) rispetto alla risoluzione a terra nominale del sensore AVHRR.

Abstract

The aim of this work was to create an algorithm directed at correcting the navigation of cloudy pixels remote-sensed from AVHRR/NOAA with wide off-nadir look angles ($35 - 45^\circ$).

Determining the geographic longitude and latitude of these pixels, without considering cloud presence, is affected by an evident error, depending on the cloud height and look angle. The error

consists of attributing to the cloudy pixel the coordinates of the point determined from the extension of the sensor-cloud line on the Earth's surface instead of the sub-cloud coordinates. This error increases with cloud height and look angle.

The proposed correction method is based above all on detecting the cloudy pixels in the acquired image. Performing AVHRR 4 and 5 band radiometric calibration, the brightness temperature at 10.8 and 12.0 μm is estimated for each cloudy pixel. Particularly, for heavily opaque clouds (characterised by an elevated optical thickness) 10.8 μm brightness temperature can be considered a good approximation to cloud top thermal temperature. Then, referring to an appropriate atmospheric model, a height-temperature relationship is extracted, which is valid for the latitude and the season in which the data is acquired, and the pixel's cloud height is estimated. Knowing the clouds height and satellite acquisition geometry (satellite height, sub-satellite point, look angle) and, based on the sensor-Earth-cloud geometry, the sub-cloud point coordinates are calculated; the correct positioning of the observed cloudy pixel consists of assigning the calculated sub-pixel coordinates to it.

The area of study considered for developing and testing the proposed algorithm is the Sicily Region (Italy). The AVHRR data used for algorithm's development were extracted from the archives at the Satellite Receiving Station of the University of Prato (PIN), that receives in real-time from NOAA satellites. Particularly diurnal satellite passages were selected where the Sicily area is covered by clouds and is seen from satellite with wide off-nadir look angles.

Correction on the cloudy pixels in the image, performed with the proposed method, was estimated both graphically, through a three-dimensional WGS84 Mercator representation, and numerically, estimating the minimum, average, and maximum corrections on a specified portion of the image under study and the parameters of satellite acquisition geometry.

Sometimes the calculated corrections are quite relevant (even tens of km) to the AVHRR sensor's nominal ground resolution.

Introduzione

Le Figure 1 e 2, che mostrano schematicamente la geometria del sistema sensore-Terra-nube, evidenziano come, osservando da satellite, alla nube U vengono associate le coordinate (λ_O, φ_O) del punto O (punto nube osservato), anziché le coordinate (λ_P, φ_P) del punto sub-nube P. L'entità dell'errore aumenta all'aumentare della quota delle nubi (h) e dell'ampiezza dell'angolo di puntamento da satellite (γ).

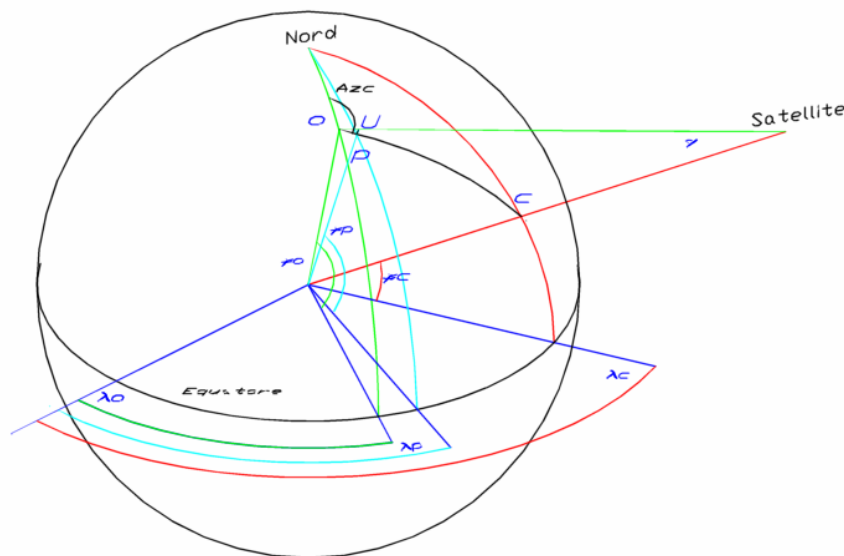


Figura 1 – Geometria di ripresa del sistema sensore-Terra-nube. U: punto nube; P (λ_P, φ_P) : punto sub-nube; O (λ_O, φ_O) : punto nube osservato; C (λ_C, φ_C) : punto sub-satellite; γ : angolo di puntamento da satellite; Az_C azimuth del satellite dal punto O.

Individuazione dei pixel nuvolosi e stima della quota delle nubi

L'individuazione dei pixel nuvolosi nella scena ripresa viene effettuata tramite un test a soglia sulla temperatura di brillanza a $10.8 \mu\text{m}$ ($Tb_{10.8}$). La soglia (S_{Tb}) da utilizzare per il test viene valutata analizzando l'istogramma dell'immagine di temperatura di brillanza (Di Vittorio, 2002). Vengono considerati nuvolosi i pixel per i quali $Tb_{10.8} < S_{Tb}$.

Le nubi opache sono caratterizzate da una piccola differenza tra le temperature di brillanza ($\Delta Tb = Tb_{10.8} - Tb_{12.0}$) a 10.8 e a $12.0 \mu\text{m}$, tipicamente $\Delta Tb < 2 \text{ K}$ (Météo-France, 2004). L'emissività di tali nubi è quasi unitaria e la temperatura $Tb_{10.8}$ può essere considerata come una buona approssimazione della temperatura termica (T) della parte alta della nube (Rossow, 1999).

Per la stima della quota h della nube è stato considerato il modello di atmosfera non standard CIRA-86 (COSPAR, 1989), con il quale si ricava una relazione $h = f(T)$ per la stima della quota, adattata alla latitudine della zona in esame e al periodo dell'anno cui si riferiscono i dati.

Correzione della geolocalizzazione dei pixel nuvolosi

Stimata la quota della nube h e ricavati i parametri orbitali e geometrici della ripresa satellitare (quota del satellite, punto sub-satellite, angolo di puntamento), risultano noti:

(λ_O, φ_O)	[deg]	coordinate geografiche del punto nube osservato O
(λ_C, φ_C)	[deg]	coordinate geografiche del punto sub-satellite C
R	[km]	raggio locale terrestre (curvatura locale della superficie)
H	[km]	quota del satellite
h	[km]	quota della nube U

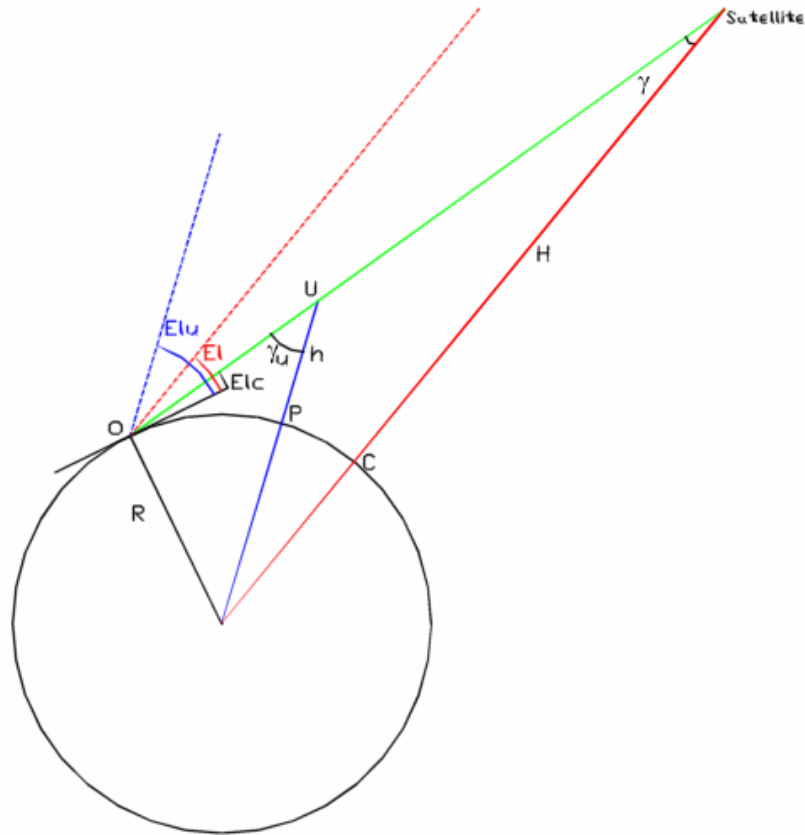


Figura 2 – Geometria di ripresa del sistema sensore-Terra-nube (sezione sul piano di scansione).
U: nube; P: punto sub-nube; O: punto nube osservato; C: punto sub-satellite; El_C : elevazione del satellite dal punto O; El : elevazione all'infinito relativa al satellite; El_U : elevazione all'infinito relativa alla nube U; γ_U : angolo di puntamento dalla nube U; R : raggio locale terrestre.

Con riferimento alla Figura 2, si calcola con la [1] l'elevazione all'infinito relativa al satellite (El) e da essa, con le [2] e [3] l'elevazione (El_C) e l'azimuth (Az_C) del satellite dal punto O.

$$El = \sin^{-1}[\sin(\varphi_O) \cdot \sin(\varphi_C) + \cos(\varphi_O) \cdot \cos(\varphi_C) \cdot \cos(\lambda_C - \lambda_O)] \quad [1]$$

$$El_C = \tan^{-1} \left[\frac{(R+H) \cdot \sin(El) - R}{(R+H) \cdot \cos(El)} \right] \quad [2]$$

$$Az_C = \tan^{-1} \left[\frac{\frac{\sin(\lambda_C - \lambda_O) \cdot \cos(\varphi_C)}{\cos(El)}}{1 - \frac{\cos(\varphi_O - El) - \sin(\varphi_C)}{\cos(\varphi_O) \cdot \cos(El)}} \right] \quad [3]$$

Calcolato con le [4] l'angolo di puntamento dalla nube U (γ_U) e elevazione all'infinito relativa alla nube (El_U), si ricavano con le [5] e [6] le coordinate (λ_P, φ_P) del punto sub-nube P che individuano il corretto posizionamento del pixel nuvoloso osservato.

$$\gamma_U = \sin^{-1} \left[\frac{R}{R+h} \cos(El_C) \right]; \quad El_U = El_C + \gamma_U \quad [4]$$

$$\lambda_P = \lambda_O + \tan^{-1} \left\{ \frac{\cos(\varphi_O) \cdot \sin(Az_C) \cdot \cos(El_U)}{\cos(\varphi_P) \cdot \cos(\varphi_O) \cdot \left[1 - \frac{\cos(\varphi_P - \varphi_O) - \sin(El_U)}{\cos(\varphi_O) \cdot \cos(\varphi_P)} \right]} \right\} \quad [5]$$

$$\varphi_P = \sin^{-1}[\sin(El_U) \cdot \sin(\varphi_O) + \cos(El_U) \cdot \cos(\varphi_O) \cdot \cos(Az_C)] \quad [6]$$

Risultati ottenuti

Si riportano di seguito, come caso di studio, alcuni risultati dell'applicazione del metodo proposto ai dati AVHRR acquisiti dal passaggio ascendente NOAA12 del 11 luglio 2006, ore 16:13 UTC, e ricevuti direttamente presso la Stazione Ricezione Satelliti del Polo Universitario di Prato (PIN).

Nel passaggio NOAA12 considerato, la zona della Sicilia è interessata da nuvolosità marcata ed è vista con angoli di puntamento compresi tra 37 e 47°; la traccia subsatellite è posizionata ad Ovest della zona sotto studio (rispetto alla direzione di moto del satellite, la Sicilia si trova a sinistra della traccia).

L'entità delle correzioni sui pixel nuvolosi della scena è stata valutata sia graficamente, attraverso rappresentazioni tridimensionali su riferimento Mercatore WGS84 (in ambiente AutoCAD®), sia numericamente, valutando le correzioni minime, medie e massime su una certa porzione della scena sotto studio ed i parametri di ripresa corrispondenti.

Per poter meglio visualizzare i risultati, si è scelto di operare su alcune sub-zone limitate dell'immagine corrispondenti all'area geografica dello Stretto di Messina, compresa negli intervalli di longitudine [15°05'E – 15°45'E] e di latitudine [37°45'N – 38°30'N], ed all'area geografica della Provincia di Trapani, compresa negli intervalli di longitudine [12°00'E – 13°30'E] e di latitudine [37°15'N – 38°23'N].

Le Figure 3 e 4 evidenziano, nelle sub-zone evidenziate, lo spostamento delle masse nuvolose provocato dalla correzione apportata sui pixel nuvolosi; vengono riportate in chiaro (azzurro) la posizione della nube osservata da satellite e in scuro (blu) la posizione della nube dopo la correzione apportata sui pixel. È possibile osservare come i pixel interessati dalla formazione nuvolosa si spostino, in funzione della loro quota, nella direzione perpendicolare a quella della traccia sub-satellite e verso di essa. Le Tabelle 1, 2 e 3 riportano alcuni risultati numerici relativi

all'entità delle correzioni apportate; in particolare, sono stati valutati la temperatura e la quota delle nubi e l'angolo di puntamento da satellite in corrispondenza delle correzioni minime e massime apportate ai pixel della sub-zona analizzata.

In alcuni casi si evidenziano correzioni anche superiori alla decina di km; l'entità delle correzioni risulta importante se confronta con l'effettiva risoluzione a terra del sensore AVHRR (che per angoli di puntamento molto lontani dal nadir si degrada di un fattore 3-4 rispetto a quella nominale di 1.1 km).

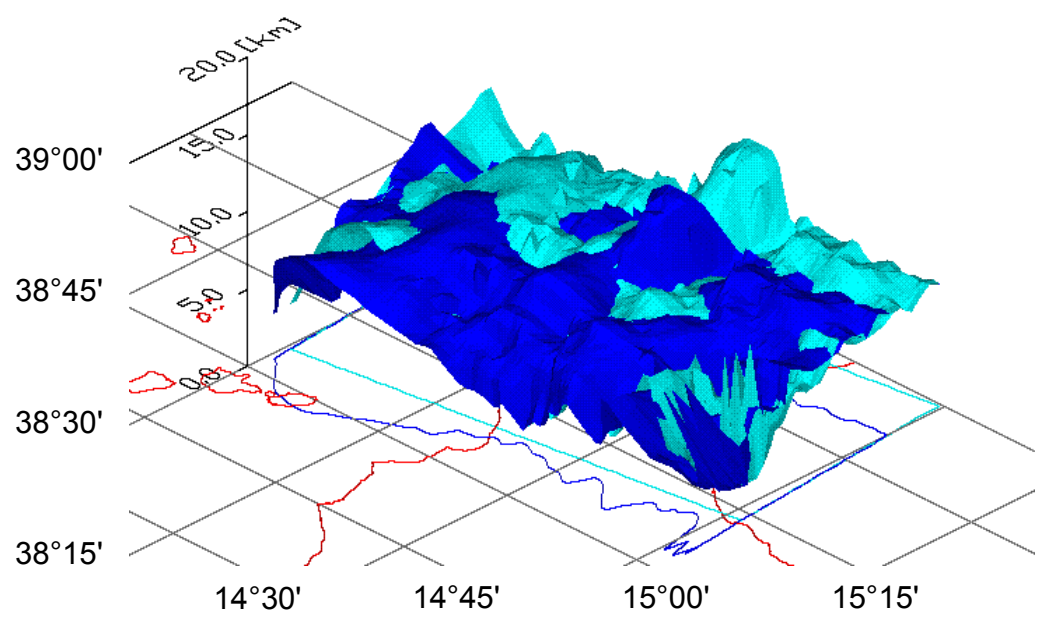


Figura 3 – Zona dello Stretto di Messina (longitudine 15°05'E – 15°45'E, latitudine 37°45'N – 38°30'N): posizione della nube osservata da satellite (in chiaro – azzurro) e della nube dopo la correzione apportata sui pixel (in scuro – blu). Rappresentazione Mercatore WGS84 in ambiente AutoCAD®.

AREA OSSERVATA:	Stretto di Messina [15°05'E - 15°45'E] [37°45'N - 38°30'N]		

ANGOLO DI PUNTAMENTO DA SATELLITE MEDIO	+46.9	[deg]	
TEMPERATURA Tb10.8 MEDIA RILEVATA	257.57	[K]	
QUOTA MEDIA DELLE NUBI	7551	[m]	
CORREZIONE MEDIA DEI PIXEL NUVOLOSI	10858.56	[m]	

Tabella 1 – Zona dello Stretto di Messina (longitudine 15°05'E – 15°45'E, latitudine 37°45'N – 38°30'N): valori medi dell'angolo di puntamento da satellite (γ), della temperatura di brillantezza a 10.8 μ m, della quota delle nubi (h) e della correzione sui pixel nuvolosi.

AREA OSSERVATA:	Stretto di Messina [15°05'E - 15°45'E] [37°45'N - 38°30'N]		

CORREZIONE MINIMA DEI PIXEL NUVOLOSI	1589		[m]
ANGOLO DI PUNTAMENTO DA SATELLITE (alla correz. min.)	+46.4379		[deg]
TEMPERATURA Tb10.8 RILEVATA (alla correz. min.)	287.63		[K]
QUOTA DELLE NUBI (alla correz. min.)	1128.66		[m]
CORREZIONE MASSIMA DEI PIXEL NUVOLOSI	18375		[m]
ANGOLO DI PUNTAMENTO DA SATELLITE (alla correz. max.)	+47.3609		[deg]
TEMPERATURA Tb10.8 RILEVATA (alla correz. max.)	229.16		[K]
QUOTA DELLE NUBI (alla correz. max.)	12530.79		[m]

Tabella 2 – Zona dello Stretto di Messina (longitudine 15°05'E – 15°45'E, latitudine 37°45'N – 38°30'N): correzioni minima e massima sui pixel nuvolosi e valori di temperatura di brillantezza a 10.8 μ m e quota delle nubi e dell'angolo di puntamento da satellite corrispondenti.

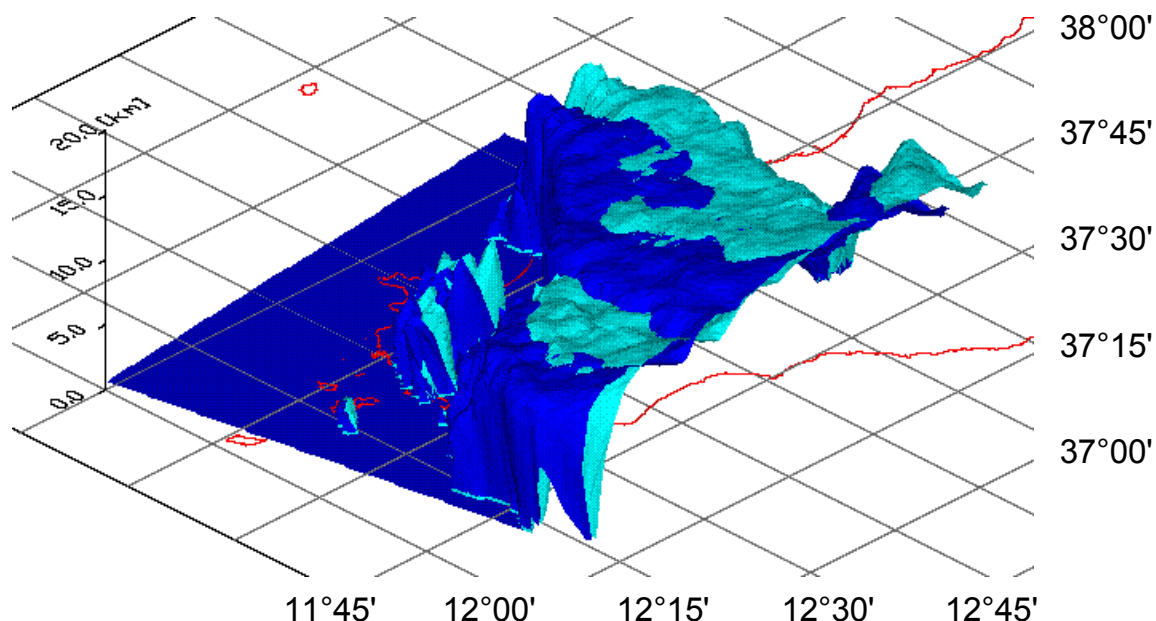


Figura 4 – Zona della Provincia di Trapani (longitudine 12°00'E – 13°30'E, latitudine 37°15' N – 38°23' N): posizione della nube osservata da satellite (in chiaro – azzurro) e della nube dopo la correzione apportata sui pixel (in scuro – blu). Rappresentazione Mercatore WGS84 in ambiente AutoCAD®.

AREA OSSERVATA: Provincia di Trapani [12°00'E – 13°30'E] [37°15'N-38°23'N]

CORREZIONE MASSIMA DEI PIXEL	14459.1319 [m]
ANGOLO DI PUNTAMENTO DA SATELLITE (alla correz. max.)	+40.8034 [deg]
TEMPERATURA Tb10.8 RILEVATA (alla correz. max.)	225.05 [K]
QUOTA DELLE NUBI (alla correz. max.)	13386.66 [m]

Tabella 3 – Zona della Provincia di Trapani (longitudine 12°00'E – 13°30'E, latitudine 37°15' N – 38°23' N): correzione massima sui pixel nuvolosi e valori di temperatura di brillantezza a 10.8 μ m e quota delle nubi e dell'angolo di puntamento da satellite corrispondenti.

Conclusioni

La procedura proposta per la correzione della geolocalizzazione di dati relativi ad immagini satellitari interessate da copertura nuvolosa, è stata verificata su dati AVHRR/NOAA ricevuti direttamente presso la Stazione Ricezione Satelliti del Polo Universitario di Prato (PIN). Essa ha permesso di evidenziare e correggere gli errori nel posizionamento dei pixel nuvolosi che si compiono se non si tiene conto della quota del corpo nuvoloso osservato.

Nel caso di studio mostrato, sono state riscontrate correzioni anche superiori alla decina di km, una dimensione notevole se confronta con l'effettiva risoluzione a terra del sensore AVHRR (che per angoli di puntamento molto lontani dal nadir si degrada di un fattore 3-4 rispetto a quella nominale di 1.1 km).

Il metodo di correzione proposto consente un più corretto posizionamento delle nubi nell'ottenimento di mappe geografiche con prodotti geofisici (ad esempio di temperatura superficiale del suolo o di indici di vegetazione). L'algoritmo di correzione può inoltre essere utilizzato per individuare con maggiore precisione l'epicentro di fenomeni meteorologici intensi (ad esempio piogge torrenziali) e per posizionare ed allineare correttamente osservazioni effettuate da sensori diversi che inquadrano la scena con angoli di puntamento diversi (ad esempio METEOSAT e NOAA).

Riferimenti

- COSPAR (1989), “COSPAR International Reference Atmosphere: 1986. Part I: Thermosphere Models”, Edited by D. Rees, Department of Physics and Astronomy, University College, London, UK, 1989 (<ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/models/atmospheric/cira/cira86ascii/>)
- Di Vittorio A. V., Emery W. J. (2002), “An Automated, Dynamic Threshold Cloud-Masking Algorithm for Daytime AVHRR Images Over Land”, in *IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 40, No. 8, 2002
- Météo-France (2004), Météo-France – Centre de Météorologie Spatiale, “User Manual for PGE01-02-03 of the SAFNWC/MSG: Scientific part”, *SAF/NWC/IOP/MFL/SCI/SUM/01*, Issue 1, Rev. 0, 12 May 2004 (<http://www.meteorologie.eu.org/safnwc>)
- Rossow W. B., Schiffer R. A. (1999), “Advances in Understanding Clouds from ISCCP”, in *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80, pp.2261-2288, 1999