

TELERILEVAMENTO DA SATELLITE DI EVENTI PRECIPITATIVI: ANALISI SUL BACINO DEL TRASIMENO

P. BASILI *, S. BONAFONI *, R. BIONDI **, E. BOCCI *, A. SERPOLLA *

* Dip. di Ingegneria Elettronica e dell'Informazione - Univ. di Perugia, Via Duranti, 93 - 06125 Perugia. Tel. 0755853663, Fax 0755853654, E-mail: bonafoni@diei.unipg.it

** Consorzio CRESCI, Piazza IV Novembre, 06100 Perugia

Riassunto

Prevedere e monitorare la distribuzione spaziale e temporale della pioggia è uno dei principali obiettivi della meteorologia e della diagnostica ambientale e il telerilevamento con sensori posti su satellite è sicuramente in grado di fornire un aiuto fondamentale. Il modo classico per ricavare la precipitazione da misure satellitari è basato su osservazioni da sensori a microonde, ma ultimamente si stanno utilizzando anche dati nell'infrarosso termico per stimare gli eventi precipitativi, dati in grado di fornire una migliore risoluzione spaziale e temporale. Sfruttando la disponibilità di un ampio data set di misure satellitari, sono state prodotte delle mappe di pioggia sul bacino del Trasimeno che sono state validate con dati di pioggia registrati da stazioni a terra.

I dati da satellite, ossia le temperature di brillanza a microonde fornite dal sensore AMSU e AMSR/E su satellite AQUA e le radianze nell'infrarosso termico fornite dal sensore MODIS sempre su satellite AQUA, sono stati elaborati con algoritmi di tipo statistico, noti in letteratura. Nel caso delle misure a microonde vengono fornite direttamente stime di intensità di precipitazione, mentre nel caso delle misure ad infrarosso viene analizzata la soglia che permette di rintracciare un evento precipitativo.

Gli algoritmi sono stati implementati in ambiente Matlab, realizzando una procedura automatica che permette di mappare i parametri geofisici ottenuti nella zona geografica di interesse.

I risultati relativi alla individuazione dell'evento piovoso e alla stima della intensità di precipitazione da misure da satellite sono stati prima ottenuti su tutta l'area del Mediterraneo, per effettuare confronti incrociati tra i vari sensori satellitari e i vari algoritmi noti in letteratura, per poterne valutare le prestazioni. Poi tali risultati sono stati confrontati con i contemporanei dati di pioggia forniti dai pluviometri del bacino del Trasimeno ottenendo risultati assai promettenti.

Abstract

Simultaneous rainfall analyses using AMSU/HSB and AMSR-E passive microwave measurements and thermal infrared measurements from MODIS on board the spacecraft AQUA are presented for several rainy events over the Mediterranean area and, particularly, over the Trasimeno lake, in the central Italy. The threshold for rainfall identification and the rain rate retrieval respectively from thermal infrared and microwave brightness temperatures were compared with ground-based raingauge measurements acquired in the Trasimeno lake area, evaluating also the performances of different retrieval algorithms.

I sensori per telerilevamento su satellite AQUA

Il satellite AQUA (http://eospsso.gsfc.nasa.gov/ftp_docs/Aqua_brochure.pdf) appartiene ad una missione satellitare NASA (National Aeronautics and Space Administration) – EOS (Earth Observing System) nata per raccogliere informazioni sul ciclo dell'acqua (vapor d'acqua nell'atmosfera, nubi, precipitazioni, umidità della superficie, ghiaccio e copertura nevosa su mare e

terra). E' stato lanciato il 4 maggio 2002 su un'orbita polare eliosincrona ad una altitudine di circa 705 Km e trasporta sei diversi strumenti per il monitoraggio ambientale (Parkinson, 2003):

- AIRS (Atmospheric Infrared Sounder);
- AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS);
- AMSU (Advanced Microwave Sounding Unit);
- CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System).
- HSB (Humidity Sounder for Brazil);
- MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer);

Ciascuno di questi presenta canali radiometrici il cui contemporaneo utilizzo consente di coprire gran parte dello spettro elettromagnetico.

A. Sensori a microonde

Le informazioni registrate dai sensori a microonde AMSR-E, AMSU e HSB, ossia le Temperature di Brillanza T_B , consentono in particolare di rilevare importanti parametri atmosferici come temperatura, umidità, nubi, vapor d'acqua e pioggia sia di giorno che di notte.

L'AMSR-E è un radiometro passivo a scansione conica, avente sei frequenze di lavoro tutte nella banda delle microonde (6.9, 10.7, 18.7, 23.8, 36.5, e 89 GHz) e dodici canali che effettuano misurazioni sia in polarizzazione orizzontale che verticale. La sua risoluzione spaziale varia da 5.4 km (89 GHz) fino a 56 km (6.9 GHz). I dati acquisiti dall'AMSR-E (T_B) sono raccolti e resi disponibili gratuitamente dalla NASA e dal NASDA (National Space Development Agency) (<http://www.ghcc.msfc.nasa.gov/AMSR/>) e vengono poi elaborati per produrre i vari parametri geofisici, tra i quali l'intensità di precipitazione che è di interesse in questo lavoro.

L'AMSU è un radiometro a scansione cross-track che presenta quindici canali, a 23.8, 31.4 e 89 GHz e i rimanenti nel complesso di assorbimento dell'ossigeno (60 GHz). L'HSB, sempre a scansione cross track, ha quattro canali: uno a 150 GHz e tre intorno all'assorbimento del vapor d'acqua a 183 GHz. La risoluzione spaziale è di circa 40 km per l'AMSU e di 13.5 km per l'HSB.

B. Sensori nel visibile e infrarosso

Il MODIS, utilizzato in questo lavoro, è un radiometro multispettrale cross-track, avente trentasei bande spettrali (venti nel visibile e sedici nell'infrarosso) uniformemente distribuite nel range 0.415 – 14.235 μm . Le risoluzioni spaziali disponibili sono 250 m, 500 m, 1000 m nel visibile e 1000 m nell'infrarosso, quindi decisamente migliori rispetto ai sensori a microonde.

Lo strumento monitora le proprietà fisiche dell'atmosfera, dell'oceano e della terra: attualmente fornisce 44 prodotti standard di cui gli studiosi si avvalgono per analizzare i cambiamenti climatici del pianeta Terra (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>). Come visto per i sensori a microonde, anche nel caso del MODIS i prodotti sono disponibili gratuitamente, tramite opportuna richiesta, in diversi livelli di elaborazione. Alle radianze registrate dal sensore, sono applicati appropriati algoritmi per ottenere le relative T_B e i vari prodotti geofisici. Per quanto riguarda le proprietà dell'atmosfera, sono ottenibili i profili atmosferici di temperatura e umidità, varie caratteristiche delle nubi (spessore ottico, pressione e temperatura del top delle nubi), vapor d'acqua precipitabile ecc..

Stima dell'intensità di precipitazione da sensori a microonde su satellite

La stima dell'intensità di precipitazione da misure radiometriche a microonde da satellite è tra le attività di ricerca più importanti nell'ambito del telerilevamento elettromagnetico ambientale (Ferraro, Marks, 1995; Ferraro, 1997), specialmente per le sue ricadute nella meteorologia e nella gestione del territorio.

Grazie alla disponibilità dei dati acquisiti da tali sensori, è possibile impiegare, testare ed eventualmente migliorare algoritmi noti in letteratura per produrre mappe di pioggia nella zona di interesse. Nel caso dei dati dell'AMSR-E, avendo come input le temperature di brillanza a 18.7, 36.5 e 89 GHz, tramite vari algoritmi è possibile derivare l'intensità di precipitazione (Petty, 2001). In questo lavoro, dal sito NASA-NASDA vengono direttamente forniti i valori di intensità di precipitazione (RR, mm/h) per ciascun pixel, di dimensioni pari a 5.4 km, sia su superficie marina

che terrestre. Infatti l'algoritmo dell'AMSR-E per il calcolo della precipitazione riflette il bisogno di due diverse metodologie che dipendono dal tipo di superficie. Di conseguenza vengono utilizzati due distinti algoritmi di tipo probabilistico per determinare la pioggia su mare e su terra: il **GSFC Profiling algorithm over ocean**, (Kummerow et al., 2001) e il **Modified GSFC Profiling algorithm over land** (McCollum, Ferraro, 2003).

Per quanto riguarda gli algoritmi per la stima della intensità di precipitazione dal sensore AMSU, esistono le due seguenti versioni ottenute su base statistica (Grody, 2000): **l'algoritmo di emissione su oceano** (utilizza le frequenze 23.8 e 31.4 GHz) e **l'algoritmo di scattering su terreno** (utilizza le frequenze 23.8 e 89 GHz). L'algoritmo per la determinazione della RR su oceano è ritenuto attendibile, mentre quello su terreno presenta alcune difficoltà: sono stati quindi sviluppati algoritmi per migliorare tali limiti utilizzando frequenze ancora più alte (Bennartz, 2002), come la 150 e la 183 GHz, alle quali lavora proprio il sensore HSB.

Per la ricostruzione della pioggia su terreno da AMSU/HSB sono stati utilizzati quattro diversi algoritmi. Il primo (*AMSU-terra 1*) utilizza le misure a 89 e 150 GHz, il secondo (*AMSU-terra 2*) le misure dalla 23 alla 183 GHz, il terzo (*AMSU-terra 3*) le misure dalla 23 alla 150 GHz, il quarto (*AMSU-terra 4*) le misure solo dell'AMSU e non dell'HSB, cioè solo le misure a 23 e a 89 GHz. Inoltre, mentre per gli anni 2002-2003 i dati da HSB e da AMSU erano sempre disponibili permettendo quindi l'utilizzo anche delle frequenze più alte, per l'anno 2004 erano disponibili solo i dati dal sensore AMSU, rendendo obbligatorio l'utilizzo del solo algoritmo *AMSU-terra 4*.

Gli algoritmi sopra descritti sono stati impiegati per mappare il valore d'intensità di precipitazione dall'AMSU/HSB e sono stati poi confrontati con le mappe ottenute dal sensore AMSR-E, le quali si riferiscono tutte alla zona del Mediterraneo. Nella Figura 1 è riportato un esempio di stima di pioggia su terra. Si nota il buon accordo tra l'AMSR-E e l'AMSU, in particolare usando per quest'ultimo gli algoritmi *AMSU-terra 1, 2, 3*. Invece *l'AMSU-terra 4* risulta meno preciso rispetto ai precedenti. Si può inoltre notare anche la migliore risoluzione spaziale fornita dall'AMSR-E.

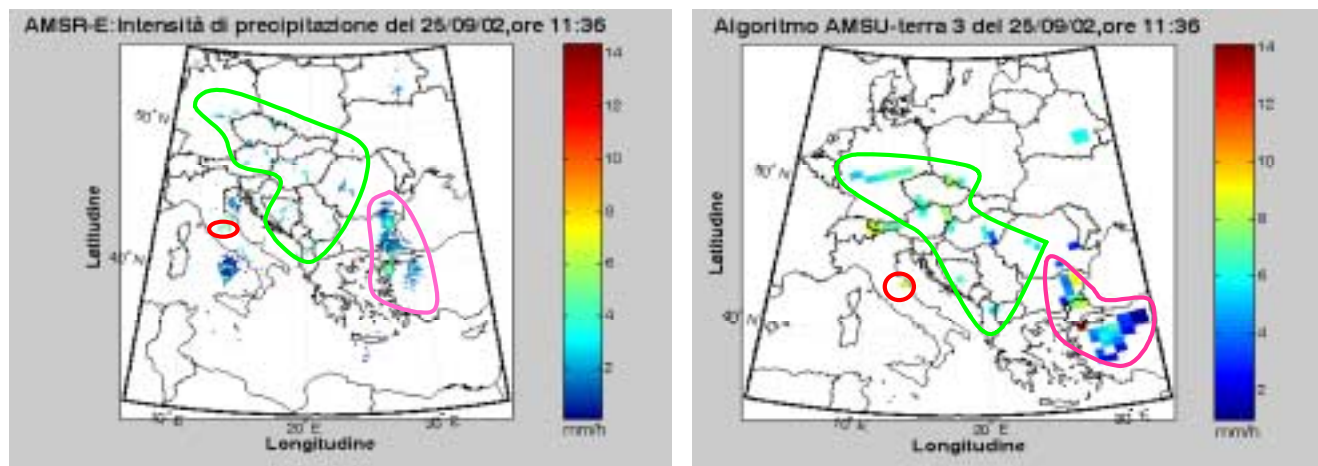


Figura 1 - Intensità di precipitazione (mm/h) stimata a microonde su terra il 25/09/02 alle h. 11:36 usando le misure da AMSR-E (sinistra) e da AMSU con AMSU-terra 3 (destra).

Individuazione della precipitazione da sensori a infrarosso su satellite

Negli ultimi anni sono stati compiuti studi sperimentali per stabilire un possibile legame tra la precipitazione e le misure fornite da sensori satellitari per telerilevamento operanti all'infrarosso (Levizzani et al., 1996). Com'è noto, la radiazione all'infrarosso penetra difficilmente oltre la nube: perciò lo strumento MODIS non è in grado di vedere cosa accade negli strati più bassi della nuvola per poter dedurre informazioni dirette su eventuali eventi piovosi, anche se possiede una risoluzione spaziale nettamente migliore rispetto ai sensori a microonde.

In pratica la temperatura di brillantezza ricavata in presenza di copertura nuvolosa, ottenuta dalla radianza misurata dal sensore, rappresenta la temperatura fisica del top della nube.

In letteratura è riportata una soglia massima della T_B , pari a 253 K, per rintracciare un evento precipitativo tipico dell'area del Mediterraneo (Borfecchia et al., 2004); questo limite superiore è stato preso come riferimento utilizzando il canale MODIS operante tra 8.400 e 8.700 μm .

Ove possibile si è proceduto ad incrociare i prodotti MODIS riguardanti lo spessore ottico e la pressione del top della nube per rintracciare il tipo di nube (se precipitativa o meno) associata ai pixel analizzati per verificare l'attendibilità di tale soglia, sfruttando la ISCCP Cloud Classification (<http://icp.giss.nasa.gov/education/cloudintro/page4.html>).

Dalle elaborazioni fatte si intuisce un andamento decrescente dell'intensità di precipitazione all'aumentare della temperatura di brillanza, come già ottenuto da studi condotti su dati METEOSAT che hanno portato all'EUMETSAT MPE (Multi-sensor Precipitation Estimate) (Heinemann, Kerényi, 2004). L'assunzione che sta alla base del metodo MPE è che nubi più fredde abbiano più probabilità di dare origine a precipitazioni rispetto alle nubi più calde. La relazione esistente tra intensità di precipitazione sulla superficie e temperatura del top della nube non è però semplice e dipende fortemente da altri parametri atmosferici, dalla stagione, dalla zona geografica.

Risultati sperimentali

Come primo studio, è stato ricavato un grafico dell'intensità di precipitazione stimata dall'AMSR-E su mare in funzione della contemporanea T_B a infrarosso registrata dal MODIS. I dati sono relativi al mar Mediterraneo, selezionati in corrispondenza di 16 giorni tra Agosto 2002 e Giugno 2004, in cui si sono individuate delle precipitazioni in corrispondenza del passaggio del satellite AQUA.

Dal grafico in Figura 2 si nota come ad una intensità di precipitazione superiore a 5 mm/h corrispondano generalmente T_B minori di 253 K: i pixel piovosi sono confinati tra i 210 K e i 253 K, sebbene se ne rilevino alcuni esterni al suddetto intervallo. Le intensità di precipitazione basse sono invece di difficile interpretazione.

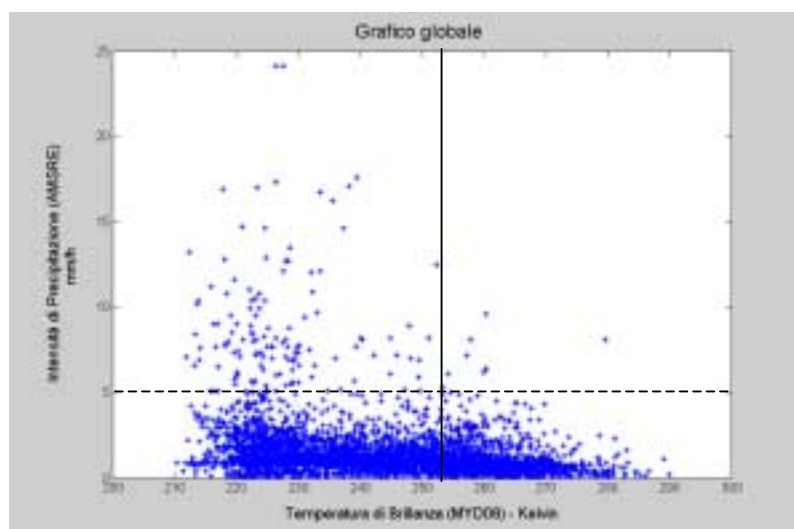


Figura 2 - Intensità di precipitazione stimata a microonde su mare (AMSR-E) in funzione della contemporanea temperatura di brillanza a infrarosso (MODIS). Pixel sul mar Mediterraneo relativi a 16 giorni di pioggia individuati tra Agosto 2002 e Giugno 2004.

Parallelamente sono stati analizzati i pixel non precipitativi, ovvero quelli aventi intensità di precipitazione nulla, che presentassero temperatura di brillanza inferiore a 253K. In tutti i giorni analizzati sono stati rintracciati solo 33 pixel con queste caratteristiche, ma si è notato che essi si localizzano esclusivamente nei dintorni degli eventi precipitativi; perciò si può concludere che un pixel che osservato da satellite all'infrarosso presenta una temperatura di brillanza inferiore a 253K, con alta probabilità sarà indicatore di pioggia. Invece le piogge deboli necessitano ancora di ulteriori studi per ridurre l'ambiguità evidenziata dalla Figura 1, anche se in tale esempio permane

l'incertezza dovuta alla stima di pioggia fatta da misure satellitari a microonde che in questo caso sono prese come riferimento.

Ovviamente disponendo di misure da pluviometri, come nel caso del bacino del Trasimeno e del sito di Perugia, tale analisi risulta più significativa. Sul bacino del lago Trasimeno, in cui erano disponibili ogni mezz'ora dati da 7 pluviometri, è stato calcolato un valore medio di intensità di precipitazione di bacino (RR, mm/h), relativo ad un'area di circa 6 x 6 km, su un intervallo temporale di un'ora, in corrispondenza del passaggio del satellite AQUA. Tale RR di bacino è stata confrontata con quella fornita dall'AMSR-E e dai vari algoritmi *AMSU-terra*. Tale confronto è mostrato nella Figura 2, dove in ascissa sono riportati i valori di RR del bacino del Trasimeno per i casi di pioggia selezionati e in ordinata la RR istantanea stimata dai sensori a microonde AMSR-E e AMSU. Bisogna precisare che il *Modified GSFC Profiling algorithm over land* per l'AMSR-E è stato aggiornato a partire dal 2004 divenendo molto più robusto, come evidenziato nella Figura 3 a sinistra. Nella figura a destra tale algoritmo viene riportato insieme con l'unico disponibile per le misure AMSU, cioè l'*AMSU-terra 4*.

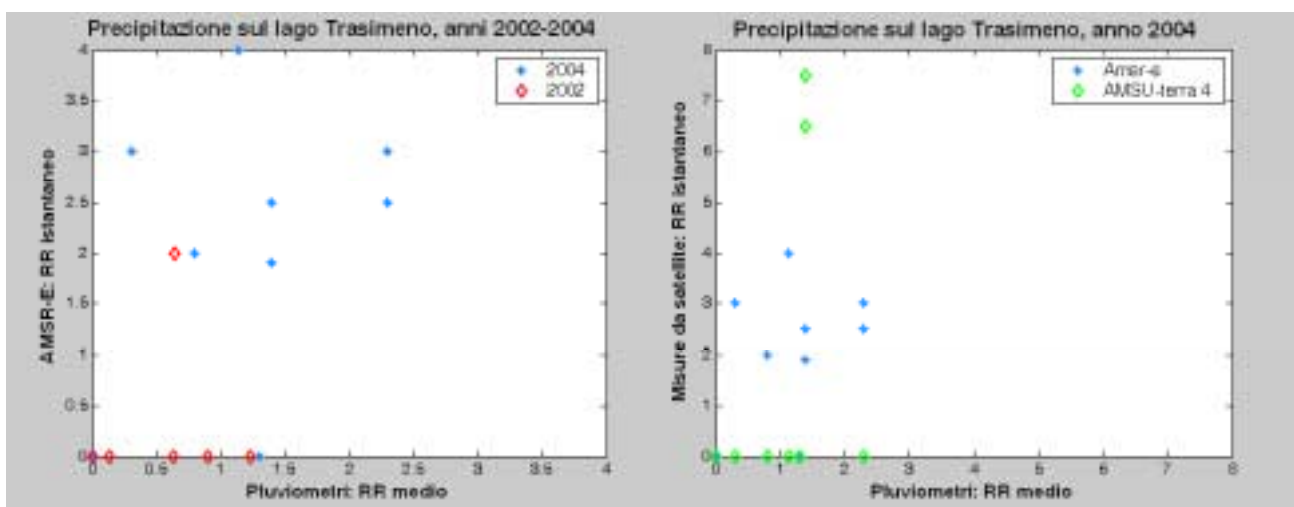


Figura 3 – Sinistra: RR (mm/h) stimata da misure AMSR-E con due algoritmi differenti (2002 e 2004) confrontata con RR calcolata sul bacino del Trasimeno. Destra: RR (mm/h) stimata dagli algoritmi AMSR-E 2004 e AMSU-terra 4 confrontata con RR del bacino del Trasimeno nel 2004.

Da tale confronto l'algoritmo AMSR-E del 2004 risulta attendibile per le stime di pioggia su terra, a differenza dei risultati forniti dall'*AMSU-terra 4*. Anche se non riportati in figura, i confronti effettuati nel 2002 e 2003 sempre con i dati pluviometrici del Trasimeno mostrano una migliore efficienza degli algoritmi *AMSU-terra 1, 2, 3* rispetto all'*AMSU-terra 4*, anche se tendono a sovrastimare l'intensità di precipitazione. In definitiva il più robusto appare il *Modified GSFC Profiling algorithm over land* per l'AMSR-E nella versione del 2004.

Un altro tipo di confronto, non più con valori medi su un'ora come nel caso precedente bensì con RR istantanei da pluviometro, è stato effettuato con le immagini a infrarosso fornite dal sensore MODIS. Sono stati selezionati nove episodi in cui c'era perfetta coincidenza spazio-temporale tra il passaggio del satellite e i valori forniti dal pluviometro situato a Perugia in grado di dare indicazioni di pioggia ogni minuto. Dall'indagine svolta, si evince come i nove casi analizzati confermino quanto già evidenziato in letteratura in termini di T_B inferiore a 253 K in caso di pioggia.

In particolare, in alcuni casi i pixel in corrispondenza del sito di Perugia e nel suo intorno hanno mostrato valori ampiamente al di sotto di 253 K, come evidenziato nella Figura 4 in cui il corpo nuvoloso presenta valori di T_B tra 220 e 230 K, mentre in altri casi si sono attestati intorno al limite. Si è però notato che tali valori al limite dei 253 K corrispondano a pixel posizionati ai margini della nube precipitativa, dove le T_B tendono a subire un incremento rispetto al nucleo dell'evento precipitativo.

Inoltre, in tutti i casi analizzati l'intensità di precipitazione rilevata dal pluviometro non superava i 5 mm/h.

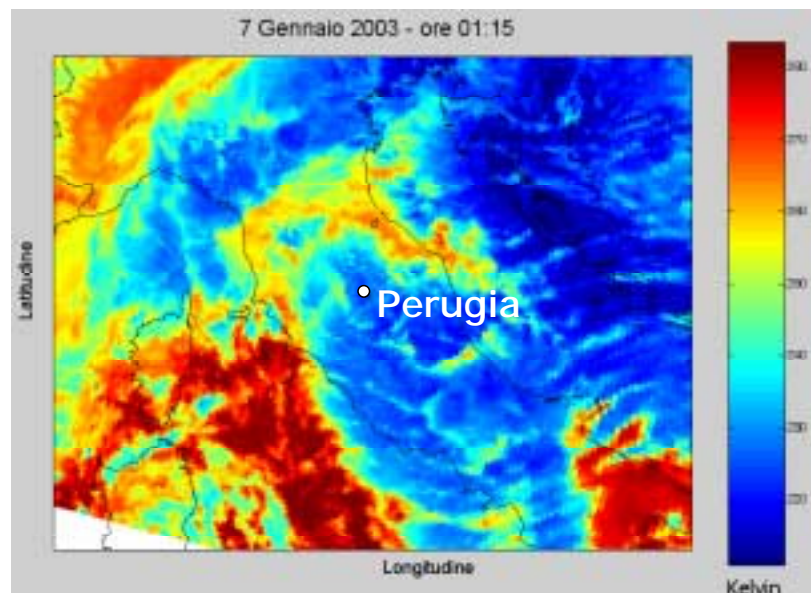


Figura 4 – Evento precipitativo registrato dal pluviometro su Perugia il 7 Gennaio 2003, h. 01:15: mappa delle Temperature di Brillanza (Kelvin) rilevate contemporaneamente dal sensore MODIS.

Bibliografia

- Bennartz R. (2002), "Precipitation analysis using the Advanced Microwave Sounding Unit in support of nowcasting applications", *Meteorol. Appl.*, 9: 177-189.
- Borfecchia F., D.Colao, E.Ferrari, F. Vitello (2004), "Stima della pioggia da satellite. Applicazione della tecnica CST al bacino del fiume Crati", http://217.58.108.240/cartografia/eventi/1_conf/cd/pdf/Atti/012.pdf
- Ferraro R. R. and G. Marks (1995), "Special sensor microwave Imager derived global rainfall estimates for climatological applications", *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 12: 755-770.
- Ferraro R. R. (1997), "Special sensor microwave Imager derived global rainfall estimates for climatological applications", *J. Geophys. Res.*, 102, D14: 16715-16735.
- Grody N., F. Weng, R. R. Ferraro (2000), "Application of AMSU for obtaining hydrological Parameters", *Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Earth's Surface and Atmosphere*, P. Pampaloni/S Paloscia Ed., VSP Science Press: 339-352.
- Kummerow C., Y.Hong, W.S.Olson, S.Yang, R.F.Adler, J.McCollum, R.Ferraro, G.Petty, D.-B.Shin and T.T.Wilheit (2001), "The Evolution of the Goddard Profiling Algorithm (GPROF) for Rainfall Estimation from Passive Microwave Sensors", *J.Appl Meteorol.*, 40: 1801-1820.
- Heinemann T., J. Kerényi (2004), "The EUMETSAT Multi-sensor Precipitation Estimate (MPE): concept and validation", http://www.eumetsat.int/en/area2/proceedings/eump39/docs/3_28_heinemann.pdf.
- Levizzani V., F. Porcù, F. S. Marzano, A. Mugnai, E. A. Smith, F. Prodi (1996), "Investigating a SSM/I microwave algorithm to calibrate Meteosat infrared instantaneous rainrate estimates", *Meteorol. Appl.*, 3: 5-17.
- McCollum, J., R. R. Ferraro (2003), "Next Generation of NOAA/NESDIS TMI, SSM/I, and AMSR-E microwave land rainfall algorithms", *J. Geophys. Res., Atmospheres* 108(D8): art. no. 8382.
- Parkinson C. L. (2003), "Aqua: An Earth-Observing Satellite Mission to Examine Water and Other Climate Variables", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 41: 173-183.
- Petty G. W (2001), "AMSR Precipitation Rate Retrieval Algorithm: Theoretical Basis and Operation", *Atmos. and Oceanic Sciences*, http://sharaku.eorc.nasda.go.jp/AMSR/doc/alg/6_alg.pdf
- Platnick S., M. D. King, S. A. Ackerman, W. P. Menzel, B. A. Baum, J. C. Riédi and R. A. Frey (2003), "The MODIS Cloud Products: Algorithms and Examples From Terra", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 41: 462-465.