



SINTESI SULL'ATTIVITA' SVOLTA NELL'AMBITO DEL PROGETTO DI RICERCA
DENOMINATO

MOBILITA' DI BREVE DURATA
SHORT TERM MOBILITY
BANDO 2016

Relazione Scientifica

Periodo: 4 settembre 2016 – 25 settembre 2016

Titolo del programma:

Implementazione e Test di Tecniche Satellitari Robuste su dati satellitari HIMAWARI per lo studio dell'attività vulcanica giapponese

Dipartimento di appartenenza:

Scienze del sistema Terra e tecnologie per l'ambiente

Istituto ospitante:

Department of Earth Sciences, Division of Geosystem and Biosystem Sciences, Graduate School of Science, Chiba University

Dr. Alfredo Falconieri

INDICE

1.	Introduzione	3
2.	Tecniche satellitari per il monitoraggio delle nubi eruttive	4
3.	L'algoritmo RST _{ASH}	5
4.	Attività svolta	8
4.1	Prima fase: studio delle caratteristiche del sistema satellitare utilizzato	8
4.1.1	Himawari-8 (AHI)	8
4.1.2	Pre-elaborazione dei dati	10
4.2	Seconda fase: Selezione del caso studio	12
4.2.1	Caso test	12
4.2.1.1	Il vulcano Sakurajima	12
4.2.1.2	L'evento studiato	12
4.3	Terza fase: analisi dell'evento eruttivo	14
4.3.1	RGB analysis	14
4.3.2	Implementazione della metodologia BTD	15
4.4	Quarta fase: verifica dell'applicabilità di RSTash	16
5.	Impatto dell'attività di ricerca svolta	19
6.	Ringraziamenti	19
7.	Referenze	20

1. Introduzione

Le recenti eruzioni del vulcano Eyjafjallajökull (Islanda) dell'Aprile-Maggio del 2010 hanno evidenziato il forte impatto che le nubi eruttive possono avere sul traffico aereo, con migliaia di voli cancellati e perdite economiche delle compagnie aeree stimate in diversi milioni di dollari.

Queste eruzioni hanno inoltre mostrato diverse criticità nel monitoraggio e nella previsione della dispersione della cenere vulcanica in atmosfera evidenziando la necessità di sviluppare metodologie satellitari che fossero in grado di supportare in maniera più efficace l'attività di controllo dei VAAC (*Volcanic Ash Advisory Centers*), centri preposti al monitoraggio operativo delle nubi vulcaniche nelle relative aree di competenza.

Al fine di meglio comprendere il fenomeno e valutare le potenzialità di sistemi satellitari di nuova generazione, il progetto STM 2016 si è svolto presso l'Università di Chiba, *Department of Earth Science* dove vi sono competenze nell'ambito del telerilevamento satellitare dei fenomeni vulcanici nonché disponibilità dei dati Himawari-8, satellite giapponese di ultima generazione, utile al monitoraggio di un'area geografica fortemente e frequentemente affetta da fenomeni eruttivi estremi.

Pertanto, il lavoro svolto nell'ambito del “*Programma Mobilità di Breve Durata – STM 2016*” finanziato dal Consiglio Nazionale delle Ricerche, è stato finalizzato alla verifica delle reali potenzialità di dati satellitari geostazionari Himawari-8 nello studio e caratterizzazione di alcune importanti eruzioni vulcaniche recentemente avvenute nel territorio giapponese mediante tecniche multi-temporali avanzate. Himawari-8 grazie all'elevata risoluzione temporale (10 minuti) e ad alcune bande spettrali sensibili alla presenza di cenere vulcanica in atmosfera può garantire infatti un efficiente monitoraggio delle nubi eruttive in tempo reale nelle aree del Pacifico occidentale anche nell'ambito di un eventuale contesto operativo.

Al fine di valutare le reali potenzialità di *detection e tracking* delle nubi vulcaniche offerte dai suddetti dati satellitari geostazionari è stata condotta una approfondita analisi delle caratteristiche spaziali, spettrali e temporali del sensore ed è stato successivamente selezionato un caso test di particolare interesse. Nello specifico è stata studiata l'eruzione esplosiva del vulcano Sakurajima avvenuta il 30 aprile 2016 verificando la possibilità di applicare un noto algoritmo multi-temporale denominato RST_{ASH} (Pergola et al., 2004; Filizzola et al., 2007; Marchese et al., 2010) anche nella sua configurazione ottimizzata al fine garantire un ulteriore miglioramento delle sue performance in termini di affidabilità/sensibilità (Falconieri et al., 2016).

Nel dettaglio, l'attività svolta presso l'Università di Chiba al *Department of Earth Science, Graduate School of Science*, ha riguardato:

- *Ricerca approfondita sulle caratteristiche dei dati Himawari-8,*
- *Ricerca e selezione dell'evento caso studio,*
 - *Analisi preliminari: Utilizzo di algoritmi di letteratura per il riconoscimento delle nubi vulcaniche,*
- *Creazione del database per le successive analisi multi-temporali*

Tali attività verranno descritte dettagliatamente nei prossimi paragrafi.

2. Tecniche satellitari per il monitoraggio di nubi eruttive

L'attività vulcanica è uno dei fenomeni naturali a più alto rischio per il suo forte impatto sul clima, l'ambiente e l'attività antropica. A seguito di grandi eruzioni esplosive, ingenti quantità di gas e ceneri possono essere immesse in atmosfera, rappresentando una causa potenziale di cambiamenti climatici a scala globale. La cenere può causare disturbi alle telecomunicazioni, contaminazione delle coltivazioni, inquinamento idrico nonché effetti tossici sia a breve che a lungo termine sulle popolazioni. Le nubi eruttive rappresentano inoltre un serio rischio per il traffico aereo. La cenere vulcanica intasando le turbine degli aerei può provocare perdite di potenza o spegnimento dei motori e può inoltre seriamente danneggiare le fusoliere dei velivoli causando anche problemi di visibilità ai piloti. Risulta quindi indispensabile lo sviluppo di sistemi automatici che siano in grado di monitorare efficacemente ed operativamente le nubi vulcaniche nonché di prevederne la dispersione in atmosfera al fine di mitigarne l'impatto sulle attività antropiche economiche e sociali.

Le tecniche di telerilevamento satellitare possono fornire un contributo molto importante per monitorare l'attività vulcanica e più specificatamente per rilevare e caratterizzare le nubi eruttive grazie alla presenza di numerose piattaforme satellitari in orbita attorno alla terra, le quali garantiscono una copertura globale delle aree vulcaniche con un'elevata frequenza di osservazione e fornendo con dati multispettrali generalmente a basso costo.

Sensori satellitari come MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) e AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), grazie al buon compromesso tra risoluzione spaziale (1km^2) e temporale (6 ore) e alla presenza di canali centrati nelle bande spettrali del visibile, del medio infrarosso e dell'infrarosso termico, sono stati ampiamente utilizzati per riconoscere le nubi vulcaniche disperse in atmosfera. I satelliti geostazionari, pure essendo caratterizzati da una più bassa risoluzione spaziale, grazie ad una elevata frequenza di rivisitazione temporale (fino a 15 minuti nel caso dei satelliti MSG-SEVIRI), hanno ulteriormente esteso la capacità di monitoraggio delle nubi vulcaniche soprattutto in contesti operativi.

Numerose metodologie sono state quindi sviluppate per studiare e monitorare le nubi eruttive utilizzando i dati forniti dalle piattaforme satellitari polari e/o geostazionarie. Esse sfruttano generalmente il noto effetto di assorbimento inverso della radiazione termica emessa dalla superficie terrestre mostrato dalle particelle silicatiche, alle lunghezze d'onda degli $11\mu\text{m}$ e $12\mu\text{m}$, rispetto all'acqua e al ghiaccio (Prata et al., 1989). Sulla base di questo diverso comportamento spettrale è stata infatti sviluppata la nota metodologia BTM (*Brightness Temperature Difference*) (Prata et al., 1989), che analizza valori negativi della differenza delle temperature di brillantezza misurate a $11\mu\text{m}$ e $12\mu\text{m}$ per individuare la cenere vulcanica in atmosfera, largamente utilizzata in studi di letteratura ed ancora usata da alcuni VAAC, anche per la sua facile implementazione. Tuttavia, in alcune condizioni di osservazione questa metodologia non fornisce sempre buoni risultati essendo fortemente condizionata da diversi fattori tra cui il contrasto di temperatura tra il top della nube e la superficie terrestre, lo spessore ottico delle nubi, la forma e la dimensione delle particelle, il contenuto di vapore d'acqua in atmosfera, la possibile presenza d'acqua e ghiaccio all'interno delle nubi vulcaniche, ecc. Metodologie che integrano correzioni sul contenuto di vapore d'acqua (Yu et al., 2002; Corradini et al., 2008) e/o utilizzano l'informazione proveniente da altre bande spettrali, come ad esempio il visibile, il medio infrarosso, e la banda dell' SO_2 (a $8.6\mu\text{m}$) fornita da sensori come MODIS e SEVIRI (Mosher, 2000; Ellrod et al., 2003; Pavolonis et al., 2006; Lin et al., 2011; Christopher et al., 2012; Francis et al., 2012; Naeger et al., 2013), hanno evidenziato chiari miglioramenti rispetto a tale metodologia. Tuttavia l'utilizzo di soglie empiriche, dipendenti dalle condizioni di osservazione, dalle caratteristiche delle nubi eruttive e dalla richiesta di dati ancillari, rende queste metodologie generalmente poco adatte ad essere utilizzate a scala globale ed in contesti operativi.

3. L'algoritmo RST_{ASH}

L'algoritmo RST_{ASH} (Pergola et al., 2004; Filizzola et al., 2007) è basato sul noto approccio RST (*Robust Satellite Techniques*, Tramutoli 1998; 2007), sviluppato per studiare e monitorare diversi fenomeni naturali e ambientali (e.g. incendi, inondazioni, tempeste di sabbia, attività vulcanica, sversamenti di petrolio in mare). Tale approccio considera ogni anomalia come una deviazione da uno stato imperturbato che può essere ricostruito analizzando, nel dominio spazio-temporale, serie storiche omogenee di dati satellitari (i.e. stessa banda spettrale, stesso mese, stessa fascia oraria di acquisizione). Un indice di variazione locale denominato ALICE (*Absolutely Local Index of Change of the Environment*) è poi implementato al fine di riconoscere variazioni statisticamente significative del segnale associate a possibili eventi perturbativi. Tale indice è definito come:

$$\otimes_V(x, y, t) = \frac{[V(x, y, t) - V_{ref}(x, y)]}{\sigma_V(x, y)} \quad (1)$$

Nell'equazione (1), $V(x, y, t)$ è il segnale misurato al tempo t per ogni pixel (x, y) , mentre V_{ref} e $\sigma_V(x, y)$ descrivono rispettivamente il valore atteso del segnale (in termini di massimo, minimo, e più comunemente di media temporale) misurato in condizioni imperturbate e la sua variabilità naturale. Entrambi questi parametri sono determinati processando immagini satellitari selezionate secondo i sopra citati criteri di omogeneità, navigare di precisione (con un'accuratezza di un pixel) e perfettamente co-locate. Una procedura di *cloud-detection* ed un filtro denominato *k σ -clipping filter* sono inoltre implementati, prima del calcolo dei campi di riferimento spettrale, al fine di rimuovere i pixel nuvolosi ed eventuali segnali spuri.

L'algoritmo RST_{ASH} rappresenta una configurazione specifica dell'approccio RST e prevede l'utilizzo di due indici di variazioni locale in combinazione per il riconoscimento delle nubi eruttive. Tali indici sono definiti secondo l'equazione (1) come:

$$\otimes_{T_{11}-T_{12}}(x, y, t) = \frac{[(T_{11}(x, y, t) - T_{12}(x, y, t)) - \mu_{T_{11}-T_{12}}(x, y)]}{\sigma_{T_{11}-T_{12}}(x, y)} \quad (2)$$

$$\otimes_{T_{3}-T_{11}}(x, y, t) = \frac{[(T_3(x, y, t) - T_{11}(x, y, t)) - \mu_{T_3-T_{11}}(x, y)]}{\sigma_{T_3-T_{11}}(x, y)} \quad (3)$$

Nelle equazioni (2) e (3) i termini $T_3(x, y, t)$, $T_{11}(x, y, t)$ and $T_{12}(x, y, t)$ rappresentano le temperature di brillantezza misurate rispettivamente nelle bande spettrali del medio (MIR) e dell'infrarosso termico (TIR) intorno ai 3-4 μ m, 11 μ m e 12 μ m. I termini $\mu_{T_{11}-T_{12}}(x, y)$, $\mu_{T_3-T_{11}}(x, y)$ rappresentano le medie temporali, mentre $\sigma_{T_{11}-T_{12}}(x, y)$ e $\sigma_{T_3-T_{11}}(x, y)$ sono le deviazioni standard temporali relative alle differenze di segnale $T_{11}(x, y, t) - T_{12}(x, y, t)$ e $T_3(x, y, t) - T_{11}(x, y, t)$.

L'indice di variazione locale $\otimes_{T_{11}-T_{12}}(x, y, t)$ tiene conto del sopra citato effetto di assorbimento inverso delle nubi vulcaniche rispetto a quelle meteorologiche nelle bande spettrali degli 11 μ m e 12 μ m. L'indice di variazione locale $\otimes_{T_3-T_{11}}(x, y, t)$ analizza il diverso comportamento spettrale evidenziato dalle nubi di cenere rispetto a quelle di acqua e ghiaccio nel medio e nell'infrarosso termico (Ellrod et al., 2003).

Per riconoscere le nubi eruttive sono quindi generalmente da aspettarsi valori negativi dell'indice $\otimes_{T11-T12}(x,y,t)$ e positivi dell'indice $\otimes_{T3-T11}(x,y,t)$, quest'ultimo d'intensità variabile in funzione delle diverse condizioni di illuminazione (giorno e notte) (Pergola et al. 2004, Filizzola et al. 2007).

L'algoritmo RST_{ASH} è stato già sperimentato con successo per rilevare e monitorare le nubi eruttive emesse da diversi vulcani attivi (e.g. Etna, Ulawun, Merapi; Shinmoedake; Eyjafjallajökull; Grimsvotn) utilizzando i dati forniti dai satelliti polari NOAA-AVHRR (*National Oceanic and Atmospheric Administration – Advanced Very High Resolution Radiometer*) ed EOS-MODIS (Earth Observing System - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (Pergola et al., 2004; Filizzola et al., 2007; Marchese et al., 2007; 2010) nonché i dati forniti dalle piattaforme satellitari geostazionarie MSG-SEVIRI (Meteosat Second Generation - Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager) ed MTSAT-1R/2 (Marchese et al., 2014; Falconieri et al., 2016). Tale algoritmo ha evidenziato prestazioni migliori rispetto alle tecniche tradizionali di *split window* (e.g. BTM) offrendo un migliore compromesso tra affidabilità e sensibilità nelle diverse condizioni atmosferiche e di osservazioni (Marchese et al., 2007; 2011; Piscini et al., 2011). Le principali limitazioni evidenziate da RST_{ASH} (e.g. difficoltà nel rilevare le nubi eruttive caratterizzate da un elevato spessore ottico; riduzioni di sensibilità in regioni caratterizzate da un elevato contenuto di vapor d'acqua atmosferico) ampiamente descritte in letteratura (e.g. Pergola et al., 2004; Marchese et al., 2007; Piscini et al., 2011) impattano sulle performance di questo algoritmo in maniera meno significativa rispetto ad altre metodologie satellitari.

Al fine di migliorare l'identificazione delle nubi vulcaniche da quelle meteorologiche in particolari condizioni di osservazione (i.e. di giorno nelle zone alle alte latitudini) è stata recentemente sperimentata una configurazione ottimizzata dell'algoritmo RST_{ASH} che implementa un ulteriore indice di variazione locale basato sull'analisi del segnale misurato nella spettrale del visibile intorno a 0.6 μm definito come:

$$\otimes_{VIS}(x,y,t) = \frac{[R_{VIS}(x,y,t) - \mu_{VIS}(x,y)]}{\sigma_{VIS}(x,y)} \quad (3)$$

in cui $R_{VIS}(x,y,t)$ è la radianza misurata nel visibile (e.g. canale 1 di SEVIRI), mentre $\mu_{VIS}(x,y)$ e $\sigma_{VIS}(x,y)$ rappresentano rispettivamente la media e la deviazione standard temporale dello stesso segnale misurato in condizioni imperturbate.

4. Attività svolta

L'attività di ricerca svolta presso il *Department of Earth Sciences, Division of Geosystem and Biosystem Sciences, Graduate School of Science, Chiba University*, è stata espletata mediante quattro diverse fasi di lavoro svolte in 3 settimane così come previsto dal progetto.

4.1 Prima fase: studio delle caratteristiche del sistema satellitare utilizzato

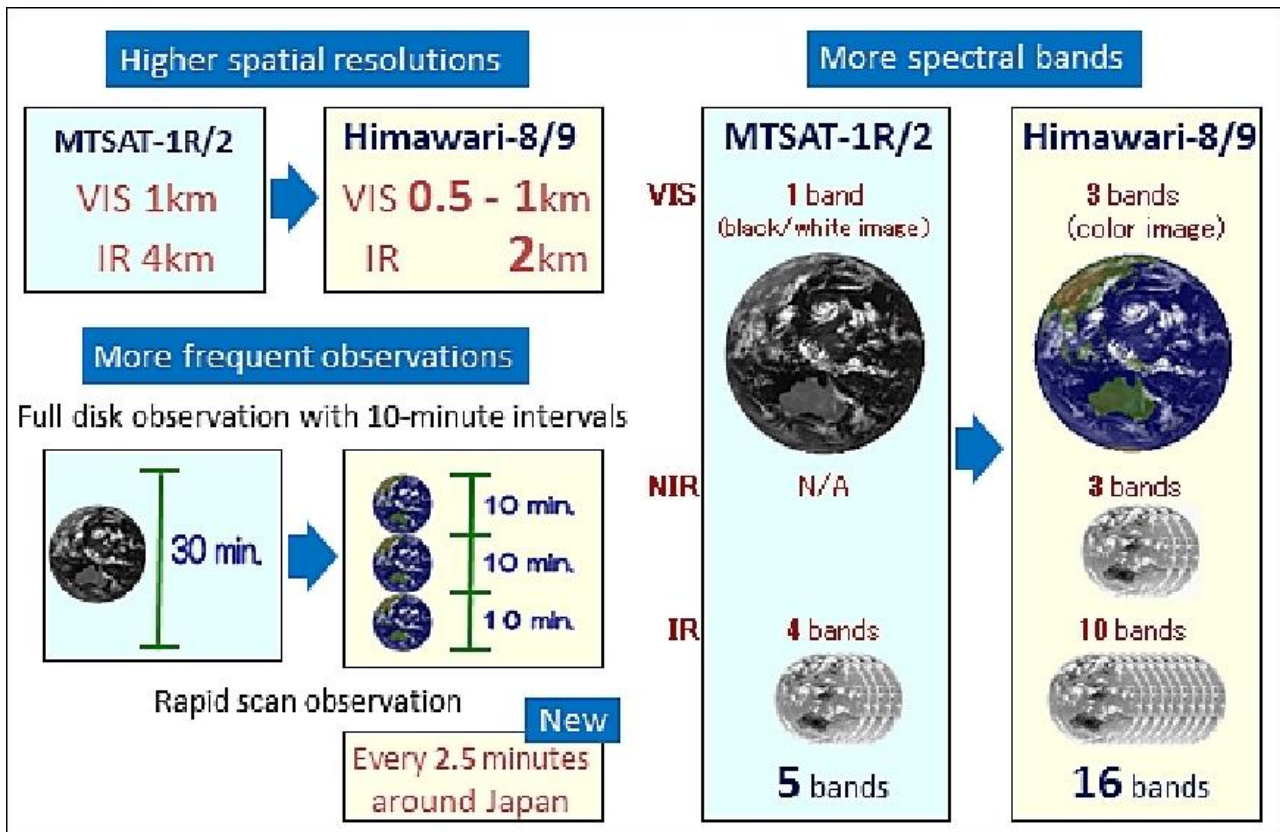
Nella prima fase della ricerca sono state studiate approfonditamente le caratteristiche principali del sensore AHI (Advanced Himawari Imager) a bordo del satellite Himawari-8 nonché dei dati (formati, caratteristiche, dimensioni, ecc.) acquisiti presso il CEReS (*Center for Environmental Remote Sensing*), al fine di poterne utilizzare adeguatamente le informazioni fornite.

Di seguito verranno descritte le caratteristiche del suddetto sensore:

4.1.1 HIMAWARI-8 (AHI)

Himawari 8 è un satellite meteorologico geostazionario giapponese, l'ottavo della serie Himawari, satelliti in orbita dal 1977 (Himawari-1 o GMS-1) e gestite dalla Japan Meteorological Agency, successivo al MTSAT-2 (Himawari-7). Himawari-8 fornisce dati satellitari con migliori caratteristiche di risoluzione spettrale, spaziale e temporale rispetto a quelli della precedente generazione. In particolare, Himawari-8 è operativo dal 7 luglio 2015 e rappresenta l'evoluzione del satellite MTSAT-2 (Himawari 7) lanciato nel 2006, attualmente in *stand-by* ed utilizzato come backup. Il lancio è avvenuto alle 05:16 UTC del 7 ottobre 2014 ed il satellite ha raggiunto la sua orbita geostazionaria operativa nel mese di ottobre 2014, a 140.7° E. Lo strumento principale a bordo di Himawari-8, prende in nome di *Advanced Himawari Imager* (AHI). Esso è un *imager* caratterizzato da 16 canali spettrali in banda ottica (visibile e infrarosso) che fornisce informazioni satellitari relativamente alla regione dell'Asia/Pacifico.

Di seguito sono schematizzate le caratteristiche tecniche dell'*imager* a bordo del precedente satellite MTSAT1R/2 (di vecchia generazione) in confronto al sensore AHI a bordo di Himawari-8.



L'AH1 è in grado di acquisire dati multispettrali con una risoluzione spaziale fino a 500 metri e di fornire osservazioni complete del disco ogni 10 minuti (con un campionamento temporale fino a 2,5 minuti sul Giappone).

La tabella seguente, invece, riassume le caratteristiche spettrali e spaziali del sensore AH1.

CEReS gridded data		JMA's H8, 9 band	Pixel × Line	Gridded resolution
EXT	01	Band 03 (0.64 μ m)	24000 × 24000	0.005 degree (approx. 0.5 km)
VIS	01	Band 01 (0.47 μ m)	12000 × 12000	0.01 degree (approx. 1 km)
	02	Band 02 (0.51 μ m)		
	03	Band 04 (0.86 μ m)		
SIR	01	Band 05 (1.6 μ m)	6000 × 6000	0.02 degree (approx. 2 km)
	02	Band 06 (2.3 μ m)		
TIR	01	Band 13 (10.4 μ m)	6000 × 6000	0.02 degree (approx. 2 km)
	02	Band 14 (11.2 μ m)		
	03	Band 15 (12.4 μ m)		
	04	Band 16 (13.3 μ m)		
	05	Band 07 (3.9 μ m)		
	06	Band 08 (6.2 μ m)		
	07	Band 09 (6.9 μ m)		
	08	Band 10 (7.3 μ m)		
	09	Band 11 (8.6 μ m)		
	10	Band 12 (9.6 μ m)		

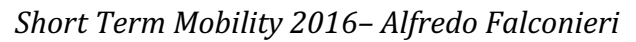
4.1.2 Pre-elaborazione dei dati

Successivamente si è approfondita, ed in parte modificata, la procedura fornita dal CEReS per il *download* delle immagini satellitari (aggiungendo alcune stringhe al fine di rendere lo *script* adatto anche ad elaborare dati presenti su supporti installati in locale) nonché per la loro calibrazione (conversione del dato satellitare da DN in radianze).

Di seguito il *bash-script*, fornito dal CEReS e modificato per al pre-elaborazione del dato Himawari8 utilizzato nel lavoro:

```
*****
#!/bin/bash
# Himawari-8 gridded format sample script. v1.00 201605
# fortran compiler and GMT plot tool is required.
#(Download, count2tbb and image converting )
# Himawari Gridded data path
dati="/Volumes/HD-PNFU3/Himawari/FD/V20151105"
FTP=${dati}
echo "path=$FTP"
# Count to tbb (albedo) program name
# 2km: main20 1km: main10 0.5km: main05
src="main20.f90"
exefile="tir.x"
#ifort ${src} -assume byterecl -o ${exefile}
gfortran ${src} -o ${exefile}
src="main10.f90"
exefile="vis.x"
#ifort ${src} -assume byterecl -o ${exefile}
gfortran ${src} -o ${exefile}
src="main05.f90"
exefile="ext.x"
#ifort ${src} -assume byterecl -o ${exefile}
gfortran ${src} -o ${exefile}
if [ ! -f tir.x ] || [ ! -f vis.x ] || [ ! -f ext.x ];then
    echo "fortran program is not ready"
    exit
fi
# Set DATE
for YYYY in 2016 ; do      # Year (from 2015)
    for MM in 04; do      # Month
        for DD in 01 02 03 04 05 06 07 08 09; do      # Day
            for HH in 00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23; do      # Hour
                for MN in 00 ;do      # 00 10 20 30 40 50 # Minute
                    # Set band type
                    for CHN in TIR ;do #VIS TIR SIR EXT tir;do
                        for NUM in 1 2 5;do #2 3 4 5 6 7 8 9 10 ;do #band number
                            # echo "canale"=$CHN
                            # echo "canale_NUM"=$NUM
                            chn=`echo $CHN | tr "[:upper:]" "[:lower:]"`
                            # echo "canale"=$chn
                            # -----
                            # Quick reference list (Released gridded data and Himawari8 band)
                            # [EXT] 01:Band03
                            # [VIS] 01:Band01 02:Band02 03:Band04
                            # [SIR] 01:Band05 02:Band06
                            # [TIR] 01:Band13 02:Band14 03:Band15 04:Band16 05:Band07
                            #      06:Band08 07:Band09 08:Band10 09:Band11 10:Band12
                            # -----
                            if [ ${CHN} = "VIS" ] && [ ${NUM} -gt 3 ];then
                                break
                            elif [ ${CHN} = "SIR" ] && [ ${NUM} -gt 2 ]; then
                                break
                            elif [ ${CHN} = "EXT" ] && [ ${NUM} -gt 1 ]; then
                                break
                            fi
                            if [ ${NUM} -lt 10 ];then
                                NUM=0${NUM}
                            fi
                            echo "File da Decomprimere e Calibrare:"
                            echo "${FTP}/${YYYY}/${MM}/${CHN}/${YYYY}/${MM}/${DD}/${HH}/${MN}.${chn}.${NUM}.fld.geoss.bz2"
                            # curl -O ${FTP}/${YYYY}/${MM}/${CHN}/${YYYY}/${MM}/${DD}/${HH}/${MN}.${chn}.${NUM}.fld.geoss.bz2

```



.....

4.2 Seconda fase: selezione del caso studio

Nella seconda fase dell'attività di ricerca è stato selezionato un caso test di particolare interesse per le caratteristiche della nube eruttiva emessa (*plume* vulcanico di piccola-media estensione) associata ad una eruzione di media intensità. In particolare, tale analisi è stata effettuata tenendo conto della disponibilità dei dati Himawari-8 presso il CERES a partire da settembre 2015.

4.2.1 Caso test

4.2.1.1 Il vulcano Sakurajima

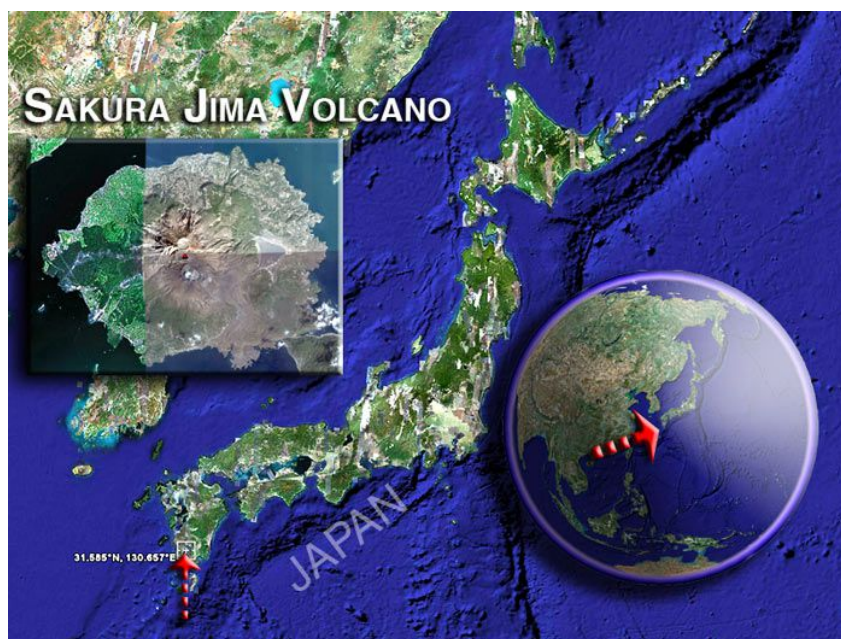


Figura 1. Localizzazione geografica del vulcano Sakurajima

(<http://www.unimeteo.net/attachment.php?attachmentid=5447&d=1343252401>)

Nel 1914, il vulcano Sakurajima ebbe una violentissima eruzione che seppellì di lava i villaggi circostanti. La recente attività eruttiva si è manifestata soprattutto attraverso l'emissione di cenere vulcanica in atmosfera con i prodotti piroclastici che hanno interessato le aree circostanti (e.g. Kagoshima). Nel 2013 è ripresa l'attività eruttiva caratterizzata da colonne di cenere che si sono innalzate per 5.000 metri per poi riversarsi sul centro abitato di Kagoshima.

4.2.1.2 L'evento studiato

L'eruzione del Sakurajima del 1914 è stata la più violenta eruzione vulcanica del XX secolo mai avvenuta in Giappone le cui colate laviche unirono l'edificio vulcanico alla terraferma. Prima di quell'anno, il vulcano era stato quiescente per più di un secolo. Dopo il 1914, il Sakurajima entrò

nuovamente in eruzione nel 1955 costringendo nuovamente gli abitanti ad evacuare l'area circostante il vulcano. Dopo l'ultima, significativa eruzione nel 1991 e quelle più recenti del maggio 2009 e dell'agosto 2013, il Sakurajima si è risvegliato nel 2016 dando origine ad una serie di eruzioni minori iniziate il 30 aprile 2016.

La prima esplosione registrata dal Tokyo VAAC (Volcanic Ash Advisory Center) avvenuta alle ore 00:20 GMT (09:20 LT) è stata caratterizzata da una colonna eruttiva alta circa 4,6 km. Essa ha dato inizio ad una sequenza di altre due esplosioni con quote rispettivamente di 4,3 km e 2,7 km. Attualmente il vulcano risulta in piena attività.

Lista degli eventi esplosivi del vulcano Sakurajima

Date and time (UTC)	Time UTC	Elevation of ash cloud	Source
	(Japan time JST = UTC+09:00)		
0Z	VA: D (ash plume obs.)	unknown	VAAC
26 Jul	02:13 (ash plume obs.)	7.000 ft (2.1 km)	VAAC
0Z	VA: D (ash plume obs.)	unknown	VAAC
0Z	VA: C (ash plume obs.)	unknown	VAAC
25 Jul	15:02 (explosion)	20.000 ft (6.1 km)	VAAC
	15:02 (explosion)	10.000 ft (3.1 km)	VAAC
02 Jul	08:04 (ash plume obs.)	5.000 ft (1.5 km)	VAAC
0Z	VA: D (ash plume obs.)	unknown	VAAC
01 Jul	19:13 (explosion)	unknown	VAAC
03 Jun	14:53 (explosion)	9.000 ft (2.7 km)	VAAC
	05:56 (explosion)	8.000 ft (2.4 km)	VAAC
	01:26 (explosion)	8.000 ft (2.4 km)	VAAC
0Z	VA: D (ash plume obs.)	unknown	VAAC
02 Jun	15:21 (explosion)	7.000 ft (2.1 km)	VAAC
0Z	VA: D (ash plume obs.)	unknown	VAAC
22 May	03:47 (explosion)	9.000 ft (2.7 km)	VAAC
21 May	07:54 (explosion)	8.000 ft (2.4 km)	VAAC
	02:12 (explosion)	9.000 ft (2.7 km)	VAAC
20 May	23:56 (explosion)	11.000 ft (3.4 km)	VAAC
0Z Dec	VA: D (ash plume obs.)	unknown	VAAC
18 May	06:34 (explosion)	7.000 ft (2.1 km)	VAAC
	03:45 (ash plume obs.)	11.000 ft (3.4 km)	VAAC
	03:39 (explosion)	10.000 ft (3.1 km)	VAAC
	02:16 (explosion)	7.000 ft (2.1 km)	VAAC
17 May	22:03 (explosion)	9.000 ft (2.7 km)	VAAC
	17:55 (explosion)	7.000 ft (2.1 km)	VAAC
	10:48 (explosion)	8.000 ft (2.4 km)	VAAC
	07:52 (explosion)	8.000 ft (2.4 km)	VAAC
15 May	21:30 (explosion)	15.000 ft (4.6 km)	VAAC
	14:09 (explosion)	10.000 ft (3.1 km)	VAAC
0Z	VA: D (ash plume obs.)	unknown	VAAC
0Z Dec	VA: C (ash plume obs.)	unknown	VAAC
13 May	07:38 (explosion)	15.000 ft (4.6 km)	VAAC
07 May	17:01 (explosion)	14.000 ft (4.3 km)	VAAC
02 May	05:39 (explosion)	7.000 ft (2.1 km)	VAAC
01 May	21:17 (explosion)	8.000 ft (2.4 km)	VAAC
0Z	VA: C (ash plume obs.)	unknown	VAAC
01 May	06:36 (explosion)	17.000 ft (5.2 km)	VAAC

0Z	VA: D (ash plume obs.)	unknown	VAAC
0Z	VA: C (ash plume obs.)	unknown	VAAC
30 Apr	10:07 (explosion)	9.000 ft (2.7 km)	VAAC
0Z	VA: C (ash plume obs.)	unknown	VAAC
30 Apr	01:24 (explosion)	14.000 ft (4.3 km)	VAAC
	00:25 (explosion)	15.000 ft (4.6 km)	VAAC



Figura 2. Fasi dell'eruzione del vulcano Sakurajima avvenuta il 30/04/2016 riprese da telecamere in loco.
(<http://strangesounds.org/2016/04/sakurajima-volcano-eruption-april-30-2016-video.html>)

4.3 Terza fase: analisi dell'evento eruttivo

4.3.1 RGB analysis

La terza fase del lavoro è consistita nella pre-analisi dell'evento eruttivo. Specificatamente, a seguito di una attenta indagine si è deciso di utilizzare, in primis, le bande spettrali del visibile ad alta risoluzione spaziale (1 km) ed in particolare le bande 01, 02 e 04. Esse sono state utilizzate per generare una sequenza di immagini RGB in falsi colori, dove ad R corrisponde la banda a $0.86 \mu\text{m}$ a G la banda a $0.51 \mu\text{m}$ e B quella a $0.47 \mu\text{m}$ in riferimento al 30 aprile 2016 con campionamento temporale di 10 minuti (i.e. dalle ore 00.00 GMT alle 01.40 GMT). Tale analisi ha consentito di sfruttare l'alta risoluzione temporale nonché la buona risoluzione spaziale dei dati Himawari-8 (che offrono anche un canale pancromatico a 500 m) per effettuare una prima verifica della presenza della nube eruttiva sulle aree del Giappone e del Pacifico emessa dal vulcano Sakurajima.

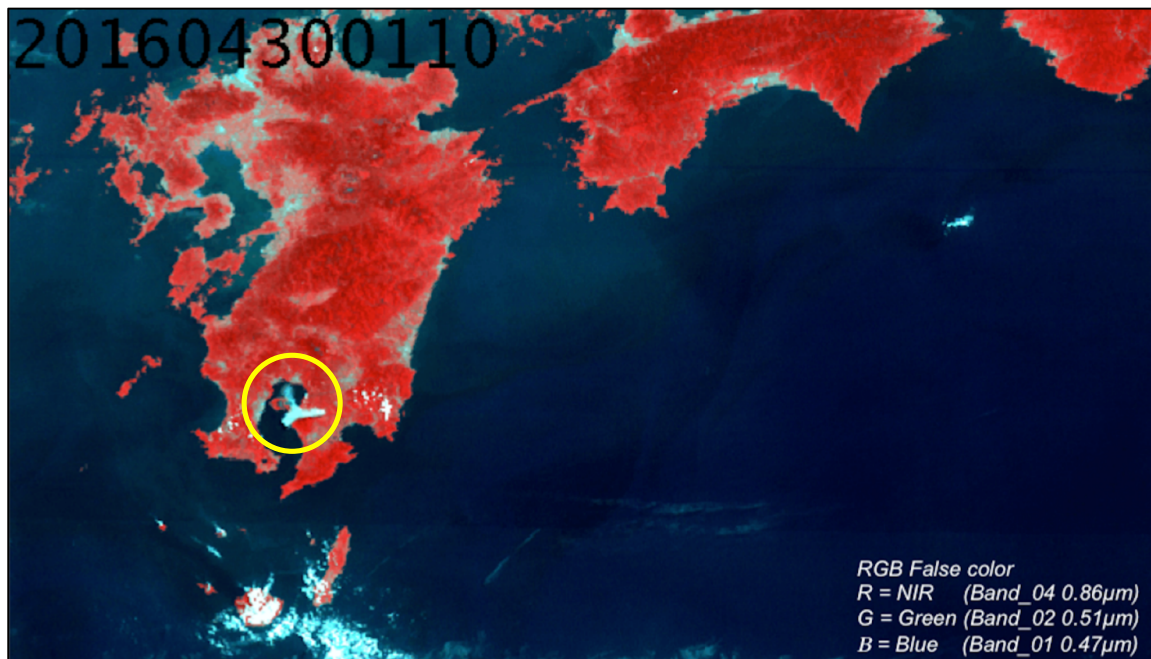


Figura 3. Esempio di prodotto RGB in falsi colori del 30 aprile 2016 delle ore 01:10 GMT.

Il cerchio in giallo evidenzia l'area interessata dal *plume*.

4.3.2 Implementazione della metodologia BTM

Individuato il caso test, si è proceduto nella quarta fase del lavoro al reperimento del database richiesto per implementare l'algoritmo BTM (*Brightness Temperature Difference*; Prata et al., 1989a;b) descritto nel capitolo 2. Le bande spettrali utilizzate che ricadono nella regione dell'Infrarosso Termico (TIR) sono quelle corrispondenti ai canali 13 e 14 forniti dal sensore AHI.

In particolare, sono stati scaricati ed analizzati i dati Himawari-8 acquisiti il 30 aprile 2016 durante le prime ore dell'eruzione, in particolare tra le 01.00 GMT e le 01.50 GMT con intervalli di 10 minuti. La scelta è stata fatta a causa dell'elevata dimensione (i.e. 3 TB) dei dati satellitari da processare.

Le caratteristiche tecniche del calcolatore utilizzato (processore Intel i5 a 2.0 GHz, Scheda grafica Intel Iris 540/550, RAM 8 Gb) per l'elaborazione delle immagini Himawari-8 si sono rivelate sufficienti per effettuare le analisi preliminari. Esse hanno riguardato la calibrazione dei dati satellitari, l'estrazione dell'area di interesse (AOI) l'applicazione dell'algoritmo BTM per il riconoscimento e la mappatura della nube vulcanica.

La figura 4 mostra una sequenza temporale dei prodotti BTM, con intervallo temporale di 10 minuti tra le 01:00 GMT e le 01:50 GMT. La figura mostra in rosso i pixel caratterizzati da valori della BTM < 0 tipicamente utilizzati per rilevare le nubi vulcaniche. La figura evidenzia come sia

praticamente impossibile distinguere la nube eruttiva a seguito dei numerosi falsi allarmi generati sia sulle aree di terra che sulle aree di mare.

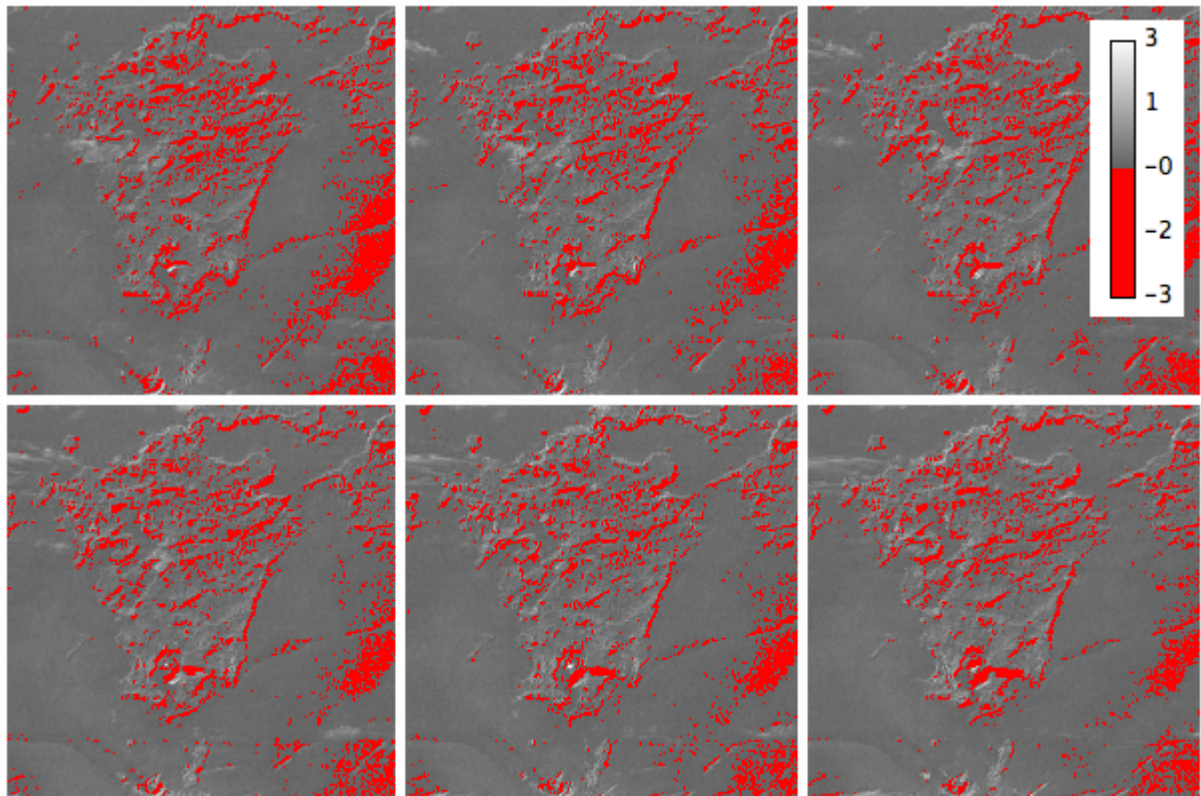


Figura 5. Sequenza temporale dell'area analizzata per il riconoscimento della nube eruttiva emessa dal vulcano Sakurajima e rilevata dall'algoritmo BTM (pixel in rosso) sulle immagini Himawari-8 acquisite il 30 aprile 2016 tra le 01:00GMT (16:00 LT) e le 01:50 GMT.

Tale analisi evidenzia la necessità di utilizzare algoritmi più performanti che garantiscano una maggiore capacità nel discriminare le nubi vulcaniche da quelle meteorologiche (indipendentemente dalle condizioni di illuminazione) in aree affette da una elevata copertura nuvolosa in diversi periodi dell'anno al fine di meglio sfruttare la risoluzione temporale dei dati Himawari 8. Conseguentemente si è verificata nell'ultima fase dell'attività di ricerca la possibilità di implementare l'algoritmo RST_{ASH} descritto nel capitolo 3 per poter rilevare le nubi eruttive sulle aree del Pacifico con un buon compromesso tra affidabilità e sensibilità.

4.4 Quarta fase: verifica dell'applicabilità di RST_{ASH}

Durante l'ultima fase della ricerca per ovviare alla mancanza di un database pluriennale di dati satellitari necessario all'implementazione dell'algoritmo RST_{ASH} si è verificata la possibilità di accorpare più slot temporali contigui per incrementare la statistica, nonché l'eventualità di processare dati satellitari acquisiti nei giorni precedenti (anziché negli anni precedenti come prescritto

dall'approccio RST) all'evento eruttivo di interesse per ricostruire l'andamento imperturbato del segnale necessario all'applicazione degli indici di variazione locale descritti nel capitolo 3. Tale attività di ricerca ha richiesto la messa a punto di codici opportunamente modificati che consentano di applicare l'algoritmo multi-temporale RST_{ASH} secondo le modalità descritte sopra, la cui progettazione ed implementazione è stata effettuata nell'ambito del progetto.

Di seguito sono mostrati e confrontati i campi di riferimento calcolati in due diverse configurazioni. Nella prima sono stati utilizzati solo gli slot temporali corrispondenti all'ora da analizzare (01:30 GMT) comprendenti quindi solamente le 30 immagini del mese dell'evento eruttivo (aprile 2016). La seconda configurazione, al fine di ampliare il data-set, ha previsto l'accorpamento di 6 diversi slot temporali contigui alle ore 01:30 GMT (i.e. 01:00, 01:10, 01:20, GMT; 01:40 e 01:50 GMT) costruendo un data-set composto da 180 immagini satellitari.

Nelle figure 6 e 7 sono mostrate a sinistra le immagini della media e della deviazione standard temporale generate utilizzando la prima configurazione mentre a destra sono riportate quelle prodotte accorpando i diversi slot temporali.

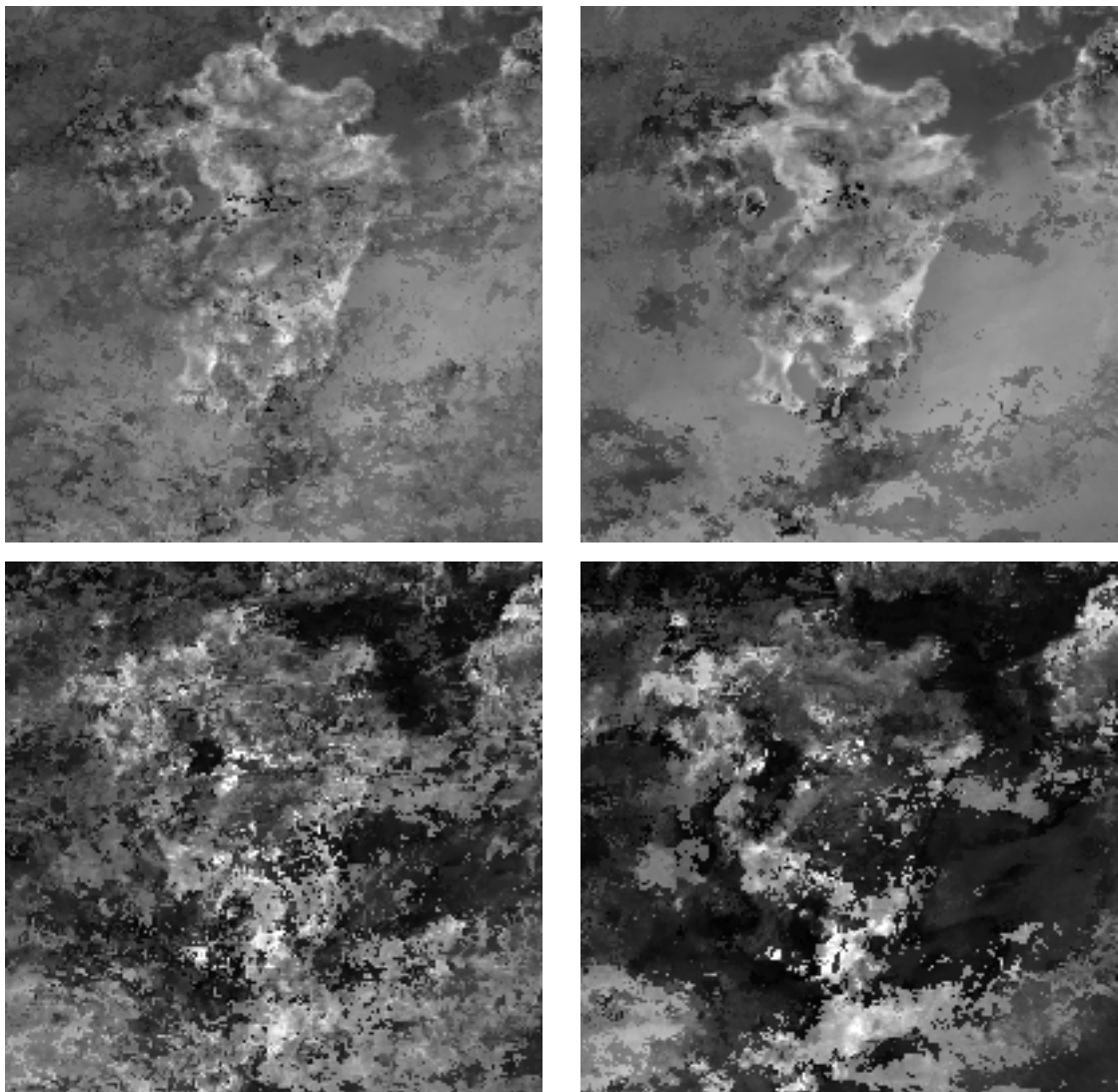


Figura 6. a) a sinistra l'immagine della media temporale generata utilizzando le immagini Himawari 8 acquisite alle 01:30 GMT, a destra il campo di riferimento prodotto accorrendo gli slot temporali; b) come il punto precedente in riferimento all'immagine della deviazione standard temporale.

Al fine di meglio evidenziare le differenze tra i diversi campi di riferimento spettrali generati, in Figura 7 sono mostrati gli istogrammi che riassumono il numero delle immagini usate per ciascuno dei due metodi utilizzati. La figura mostra come accorrendo gli slot temporali si sia incrementato il numero di immagini utilizzate per generare i campi di riferimento spettrale (i.e. da 10 a 54) migliorandone la qualità come evidenziato in Figura 6, grazie ad una più efficace riduzione della variabilità naturale del segnale misurato da satellite che passa da un valor medio di 2,678 ad uno di 2,114. Ciò conforta circa l'applicabilità dell'algoritmo RST_{ASH} anche in assenza di un data-set pluriennale di immagini satellitari.

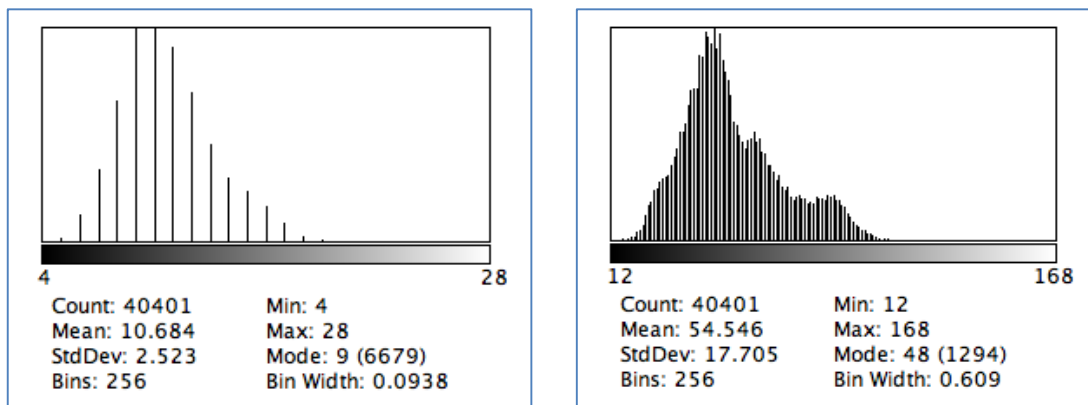


Figura 7. Istogramma delle immagini utilizzate per calcolare i campi di riferimento di media e di sigma. A sinistra utilizzando la tecnica tradizionale (singolo slot per ora), a destra applicazione della metodologia di accorpamento dei più slot temporali contigui (6 slot per ora, ogni 10 minuti).

L'attività di ricerca attualmente in corso grazie alle analisi svolte nell'ambito del programma STM 2016 consentirà quindi di verificare i miglioramenti in termini di affidabilità e sensibilità aspettati rispetto alle metodologie a singola immagine (e.g. BTM) applicate ai dati Himawari-8. Essa apre delle importanti prospettive rispetto all'utilizzo dell'algoritmo RST_{ASH} relativamente ai satelliti geostazionari di nuova generazione (e.g. MTG) consentendone di sfruttarne appieno da subito le caratteristiche di risoluzione spaziale, spettrale e temporale per il monitoraggio in tempo reale delle nubi eruttive anche nell'ambito di possibili contesti operativi.

5. Impatto dell'attività di ricerca svolta

L'attività di ricerca svolta nell'ambito del programma Short Term Mobility presso avrà le seguenti ricadute:

- Pianificazione di presentazione dei risultati ottenuti nell'ambito di questo programma di ricerca nell'ambito di prossimi congressi interazionali (e.g. AMS 97th Annual Meeting);
- Disseminazione dei risultati anche tramite la sottomissione su rivista internazionale di almeno un lavoro scientifico con citazione del CNR;
- Rafforzamento della collaborazione internazionale con il *Department of Earth Science, Graduate school of Science, Chiba University* in riferimento alle attività di studio e monitoraggio dei fenomeni vulcanici.

6. Ringraziamenti

Si ringraziano:

- il CNR, per la concessione del finanziamento nell'ambito del programma di “Short Term Mobility 2016” con il quale la presente attività di ricerca è stata svolta;
- il *Department of Earth Science, Graduate school of Science, Chiba University*, per l'ospitalità concessa durante il periodo di soggiorno ad Abu Dhabi per condurre la presente ricerca;
- il Dr. Katsumi Hattori e il suo gruppo di ricerca, per la collaborazione fornita e per i dati messi a mia disposizione per l'analisi effettuata nell'ambito della presente ricerca.

7. Referenze

Christopher, S.A., Feng, N., Naeger, A.R., Johnson, B.T., and Marengo, F., 2012. Satellite Remote Sensing Analysis of the 2010 Eyjafjallajökull Volcanic Ash Cloud over the North Sea during May 4 - May 18, 2010, *J. Geophys. Res.*, DOI:10.1029/2011JD016850.

Corradini, S., Spinetti, C., Carboni, E., Tirelli, C., Buongiorno, M. F., Pugnaghi, S., and Gangale, G., 2008. Mt. Etna tropospheric ash retrieval and sensitivity analysis using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer measurements. *J. Appl. Rem. Sens.*, 2, 023550, doi:10.1117/1.3046674.

Ellrod, G.P., Connell, B.H., Hillger, D.W., 2003. Improved detection of airborne volcanic ash using multispectral infrared satellite data. *J. Geophys. Res.* 108, 4356.

Falconieri A., Cooke M., Filizzola C., Marchese F., Pergola N., Tramutoli V., (2016). Improving volcanic ash detection and tracking from space integrating two independent algorithms based on MSG-SEVIRI data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Under review.

Filizzola, C., Lacava, T., Marchese, F., Pergola, N., Scaffidi, I., Tramutoli, V., 2007. Assessing RAT (Robust AVHRR Technique) performances for volcanic ash cloud detection and monitoring in near real-time: The 2002 eruption of Mt. Etna (Italy), *Remote Sens. Environ.* 107, 3, 440-454.

Francis, P.N., Cooke, M.C., and Saunders, R.W., 2012. Retrieval of physical properties of volcanic ash using Meteosat: A case study from the 2010 Eyjafjallajökull eruption. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 117(D2).

Lin, Z., Jian, L., Cheng, L., Meng, W. 2011. Satellite remote sensing of volcanic ash cloud in complicated meteorological conditions, *Sci China Ser D-Earth Sci*, 1-7, doi: 10.1007/s11430-011-4265-3.

Marchese, F., Malvasi, G., Ciampa, M., Filizzola, C., Pergola, N., & Tramutoli, V. (2007, July). A robust multitemporal satellite technique for volcanic activity monitoring: possible impacts on volcanic hazard mitigation. In *Analysis of Multi-temporal Remote Sensing Images*, 2007. MultiTemp 2007. International Workshop on the (pp. 1-5). IEEE.

Marchese, F., Filizzola, C., Mazzeo, G., Paciello, R., Pergola, N., & Tramutoli, V. (2010, July). Robust Satellite Techniques (RST) for active volcanoes monitoring. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2010 IEEE International (pp. 773-776). IEEE.

Marchese, F., Filizzola, C., Genzano, N., Mazzeo, G., Pergola, N., & Tramutoli, V. (2011). Assessment and improvement of a robust satellite technique (RST) for thermal monitoring of volcanoes. *Remote Sensing of Environment*, 115(6), 1556-1563.

Marchese, F., Falconieri, A., Pergola, N., Tramutoli, V. (2014). A retrospective analysis of the Shinmoedake (Japan) eruption of 26–27 January 2011 by means of Japanese geostationary satellite data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 269, 1-13.

Mosher, “Four channel volcanic ash detection algorithm,” Preprint Volume. 10th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography, Long Beach, California, 9-14 January, 457-460, 2000.

Naeger, A. R., and S. A. Christopher. "The identification and tracking of volcanic ash using the Meteosat Second Generation (MSG) Spinning Enhanced Visible and Infra-Red Imager (SEVIRI)." *Atmospheric Measurement Techniques Discussions* 6.3 (2013): 5577-5619.

Pavolonis, M.J., Wayne, F.F., Heidinger, A.K., Gallina, G.M. 2006. A daytime complement to the reverse absorption technique for improved automated detection of volcanic ash. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 23,1422-1444.

Pergola, N., Tramutoli, V., Marchese, F., Scaffidi, I., Lacava, T., 2004b. Improving volcanic ash cloud detection by a robust satellite technique. *Remote Sens. Environ.* 90, 1-22.

Piscini, A., Corradini, S., Marchese, F., Merucci, L., Pergola, N., Tramutoli, V., 2011. Volcanic ash cloud detection from space: a comparison between the RSTASH technique and the water vapour corrected BTD procedure. *GNH&R*, Special issue on “Passive satellite techniques and ground-based investigations for volcanic activity monitoring”, 1-15, doi: 10.1080/19475705.2011.568069.

Prata, A., and Grant, I., 2001. Retrieval of microphysical and morphological properties of volcanic ash plumes from satellite data: Application to Mt Ruapehu, New Zealand, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 127, 2153–2179, doi:10.1256/smsqj.57614

Prata, 2013. Detecting and Retrieving Volcanic Ash from SEVIRI Measurements Algorithm Theoretical Basis Document.

Tramutoli, V., 1998. Robust AVHRR Techniques (RAT) for Environmental Monitoring theory and applications. In Giovanna Cecchi, & Eugenio Zilioli (Eds.), In *Earth Surface Remote Sensing II*. SPIE, 3496, 101–113.

Tramutoli, V., 2007. Robust Satellite Techniques (RST) for Natural and Environmental Hazards Monitoring and Mitigation: Theory and Applications”, *Proceedings of Multitemp 2007*, doi: 10.1109/MULTITEMP.2007.4293057.

Yu, T., Rose, W.I., Prata, A., 2002. Atmospheric correction for satellite-based volcanic ash mapping and retrievals using “split window” IR data from GOES and AVHRR. *J Geophys Res.*, 107, 20.