

METODI DI INSEGUIMENTO DI NUBI E FRONTI TERMICI SUL MARE CON DATI METEOSAT E NOAA SU SCALA REGIONALE

Gabriele Poli (*), Maurizio Tommasini (*), Andrea Serena (*), Pier Franco Pellegrini (*)

(*) Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Via S. Marta, 3 - 50139 Firenze (Italia), tel.: +39 055 4796387, fax.: +39 055 494569, e-mail: g.poli@labtele.det.unifi.it, m.tommasini@labtele.det.unifi.it, a.serena@labtele.det.unifi.it, pf.pellegrini@labtele.det.unifi.it

Riassunto

L'obiettivo di questo lavoro è l'analisi di alcuni metodi per la stima del movimento di nubi e di fronti termici sulla superficie marina, applicati a immagini satellitari e mirati alla rilevazione della variabilità di fenomeni ambientali su aree di tipo regionale. Gli algoritmi di analisi sono stati applicati a dati METEOSAT e NOAA, ricevuti direttamente ed elaborati presso la Stazione Ricezione Satelliti del Polo Universitario di Prato. I dati METEOSAT vengono ricevuti con una frequenza di un'immagine ogni mezz'ora, mentre la frequenza di ricezione delle immagini NOAA è di circa un'immagine ogni 2-3 ore. I dati NOAA utilizzati provengono dal sensore AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) di diversi satelliti della costellazione (NOAA16, NOAA17). Vengono quindi presentati e comparati esempi di risultati ottenuti con algoritmi come il Metodo dei Momenti, il Metodo di Crosscorrelazione, il Metodo di Crosscorrelazione a Multirisoluzione con analisi wavelet, il Metodo di Ottimizzazione Globale (*optical flow*). Gli algoritmi sviluppati sono stati applicati ad immagini satellitari appositamente georiferite con precisione subpixel ed interpolate su una griglia regolare con proiezione di Mercatore (Datum WGS84); gli algoritmi agiscono su forme di interesse (nubi o fronti termici), definite tramite un metodo di individuazione ed accrescimento dei contorni ottimizzato per lo scopo. Lo studio dei risultati evidenzia che il Metodo dei Momenti consente, con tempi di esecuzione piuttosto contenuti, di individuare lo spostamento medio di una forma di interesse, associando al suo centroide un vettore di spostamento; il Metodo di Crosscorrelazione fornisce risultati puntuali più dettagliati ma richiede un notevole tempo di calcolo; il Metodo di Crosscorrelazione a Multirisoluzione permette di ottenere, grazie all'analisi wavelet, risultati analoghi con un tempo di calcolo molto minore; il Metodo di Ottimizzazione Globale fornisce un'informazione puntuale sul moto di una forma tempo-variante, ma i risultati ottenuti sono affidabili solo per alcuni punti delle immagini.

Abstract

This paper aims at presenting the results obtained from different methods of motion estimation of clouds and Sea Surface Temperature (SST) features on the sea surface, applied to satellite imagery, with the scope of revealing environmental variability phenomena on a regional scale. Motion analysis algorithms were applied to METEOSAT and NOAA data, directly received and processed at the Satellite Receiving Station of the University Centre in Prato. METEOSAT data receiving frequency is 1 image every half hour, whereas the NOAA data frequency is 1 image every 2-3 hours. NOAA data were taken from the AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) sensor of different satellites (i.e., NOAA16, NOAA17). Results obtained with algorithms, such as Moments Method, Crosscorrelation Method, Crosscorrelation with Multiresolution Analysis Method (with *wavelet* analysis) and Global Optimization Method (*optical flow*), are then presented and compared. The developed algorithms were applied to precise sub-pixel navigated satellite

images, that were registered on regular raster grids with Mercator projection (Datum WGS84). The algorithms work on image shapes (e.g., clouds or thermal features) defined by an edge detection and growing method fitted for the purpose. A results analysis points out that the Moments Method allows, with low computational time, the identification of some average feature movements by associating a shift vector to its centroid; the Crosscorrelation Method gives more detailed estimations but requires lengthy calculation; Crosscorrelation with Multiresolution, because of the use of wavelet analysis, makes it possible to obtain similar results with much less computational time; the Global Optimization Method gives punctual information on a time-varying shape motion, but results acquired are reliable only for some of the image pixels.

1. Introduzione

I metodi di analisi del movimento vengono utilizzati da tempo in molteplici campi dell'elaborazione di immagini digitali, a seconda delle loro diverse caratteristiche. Il Metodo dei Momenti consente di studiare una forma di interesse all'interno di un'immagine calcolandone il centroide e gli assi principali di inerzia (Tomita, 90) (Chaumette, 04); con il Metodo di Crosscorrelazione si ottengono stime di velocità piuttosto precise per ogni pixel dell'immagine, a fronte però di un notevole tempo computazionale (Rottensteiner, 93); il Metodo di Ottimizzazione Globale esegue una stima del campo delle velocità (*optical flow*) a partire dalle variazioni di luminosità in un'immagine (Horn, 1981); l'analisi *wavelet*, sviluppata a partire dai primi anni 90 (Mallat, 89), viene utilizzata nel Metodo Crosscorrelazione a Multirisoluzione ottenendo risultati puntuali con un notevole risparmio di calcolo (Tonsmann, 02) (Sarma, 04).

Nel presente lavoro i metodi di analisi del movimento sopra citati sono stati applicati a dati satellitari METEOSAT e NOAA nell'area geografica del Mar Tirreno allo scopo di confrontarne le prestazioni. E' stata infatti dimostrata l'utilità di studiare l'evoluzione temporale di una serie di immagini satellitari al fine di migliorare la comprensione di fenomeni ambientali dinamici che presentano una variabilità intermedia (Ikeda, 95) (Robinson, 95).

I dati satellitari qui utilizzati sono stati ricevuti, estratti ed elaborati utilizzando la strumentazione della Stazione Ricezione Satelliti – Polo Universitario di Prato ed i programmi originali sviluppati presso il Laboratorio di Telecomunicazioni del Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni – Università di Firenze. Dall'elaborazione dei dati vengono ottenute immagini di Temperatura di Brillanza dal canale all'infrarosso termico del METEOSAT e di Temperatura Superficiale del Mare (SST) dal NOAA convertite entrambe in proiezione di Mercatore (Datum WGS84) su griglia regolare (*raster*). Verranno indicate con u, v le coordinate che individuano un pixel immagine sulla griglia raster di riferimento, l'origine del quale coincide con l'estremo Sud-Ovest dell'immagine.

Viene riportata di seguito una breve descrizione dei metodi utilizzati e un confronto dei risultati ottenuti su immagini METEOSAT e NOAA.

2. Breve descrizione dei metodi di analisi del movimento utilizzati

Con il Metodo dei Momenti vengono calcolati i momenti associati ad una forma F di interesse, compresa in un'immagine *raster*, che forniscono varie informazioni sulle caratteristiche geometriche della forma (il centroide e l'estensione della forma, la lunghezza e l'orientazione degli assi principali di inerzia). Vengono di seguito riportate le formule utilizzate per il calcolo dei momenti geometrici e delle grandezze utili all'analisi del movimento. Nelle [1] m_{hk} e μ_{hk} sono il momento geometrico e il momento geometrico riferito al centroide di ordine $h+k$; $f(u, v)$ è il valore associato al pixel di coordinate u, v ; u_o, v_o nella [2] sono le coordinate del centroide della forma F ; nelle [3] a, b sono le lunghezze degli assi di inerzia (maggiore e minore) della forma F , dove $\Phi = (\mu_{20} - \mu_{02})^2 + 4\mu_{11}^2$; l'angolo θ esprime l'orientazione dell'asse maggiore della forma F (Tomita, 90) (Chaumette, 04).

$$m_{hk} = \sum_{(u,v) \in F} u^h v^k f(u,v); \mu_{hk} = \sum_{(u,v) \in F} (u - u_o)^h (v - v_o)^k f(u,v) \quad [1]$$

$$(u_o, v_o) = \left(\frac{m_{10}}{m_{00}}, \frac{m_{01}}{m_{00}} \right) \quad [2]$$

$$a = \left[4 \frac{(\mu_{20} + \mu_{02}) + \sqrt{\Phi}}{\mu_{00}} \right]^{1/2}; b = \left[4 \frac{(\mu_{20} + \mu_{02}) - \sqrt{\Phi}}{\mu_{00}} \right]^{1/2}; g = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2\mu_{11}}{\mu_{20} - \mu_{02}} \right) \quad [3]$$

Il Metodo di Crosscorrelazione viene applicato a due immagini consecutive nel tempo. Individuata un'area da ricercare S nella prima immagine, che contiene un dettaglio di interesse, in un'area di ricerca R più ampia della seconda immagine, si ricerca l'area che presenta la massima correlazione con l'area S (le dimensioni dell'area S vengono scelte in funzione del dettaglio da inseguire, quelle dell'area R in base ad una prima stima del massimo spostamento della forma di interesse). In particolare, si individua la posizione di S nella seconda immagine in cui è massimo il coefficiente di crosscorrelazione normalizzato $c_{R,S}$, definito dalla [4], che dipende dalla posizione delle aree R ed S (u_R, v_R e u_S, v_S) (Rottensteiner, 93). Nella [4] \bar{r} ed \bar{s} sono i valori medi dei pixel nelle aree R ed S ; le sommatorie sono estese alle coordinate u, v dei pixel appartenenti contemporaneamente ad entrambe le aree.

$$c_{R,S}(u_R, v_R, u_S, v_S) = \frac{\sum_{(u,v) \in R \cap S} [(r(u,v) - \bar{r}) \cdot (s(u,v) - \bar{s})]}{\sqrt{\sum_{(u,v) \in R \cap S} [r(u,v) - \bar{r}]^2 \cdot \sum_{(u,v) \in R \cap S} [s(u,v) - \bar{s}]^2}} \quad [4]$$

Il Metodo di Crosscorrelazione a Multirisoluzione riduce notevolmente il costo computazionale dell'algoritmo di crosscorrelazione esposto in precedenza. Il metodo è basato sulla riduzione della risoluzione delle due immagini raster da confrontare attraverso l'utilizzo della *trasformata wavelet discreta* (DWT) e sull'applicazione dell'algoritmo di crosscorrelazione alle immagini ridotte. Con l'analisi *wavelet* l'immagine originale viene scomposta in 4 sottoimmagini con dimensioni dimezzate: una contiene le basse frequenze dell'immagine originale, una le alte frequenze e le altre due una mistura di basse e alte frequenze. Questo procedimento viene applicato ripetutamente riducendo ogni volta di metà le dimensioni delle immagini e ottenendo così vari livelli di risoluzione. Il primo livello di risoluzione è quello dell'immagine originale, l'ultimo livello, cioè quello al quale si arresta il processo di scomposizione, è caratterizzato da immagini il cui confronto consente di rilevare uno spostamento massimo di 1 pixel per unità di tempo. Il numero di livelli di scomposizione necessari n_l è dato dalla [5] (Tonsmann, 02), dove V_{max} è una prima stima della massima velocità di spostamento rilevabile nelle immagini, Δt è l'intervallo di tempo tra le due immagini da confrontare, D rappresenta le dimensioni fisiche reali di un pixel-immagine (con $\lceil x \rceil$ si intende l'intero superiore più vicino a x).

$$n_l = \left\lceil \log_2 \left(\frac{V_{max} \Delta t}{D} \right) \right\rceil + 1 \quad [5]$$

Effettuata la scomposizione, si applica l'algoritmo di crosscorrelazione a partire dal livello a risoluzione più bassa. Ad ogni livello viene ricercato il massimo del coefficiente di crosscorrelazione, secondo la [4], con la stessa procedura descritta in precedenza. In questo caso però le aree S ed R hanno sempre la dimensione di 3×3 e 5×5 pixel rispettivamente ad ogni livello di risoluzione; ciò diminuisce notevolmente il costo computazionale dell'algoritmo. I risultati

ottenuti dall'analisi di ogni livello vengono ricampionati tramite interpolazione bilineare alla risoluzione del livello superiore e quindi utilizzati per il medesimo calcolo di crosscorrelazione. Il procedimento si conclude con l'analisi dell'immagine originale. Nel presente lavoro, per la scomposizione delle immagini, è stata usata la *wavelet di Haar* (Sarma, 04).

Con il Metodo di Ottimizzazione Globale è possibile valutare la variazione apparente della luminosità di un'immagine tempo-variante (*optical flow*) attraverso il confronto di due immagini consecutive ottenendo una stima del campo delle velocità di ogni pixel dell'immagine. Nell'ipotesi che la luminosità vari poco nell'intervallo di tempo che separa le due immagini, indicando con $E(u, v, t)$ la luminosità di un'immagine raster al tempo t , vale la [6] (*optical flow constraint equation*) che esprime un vincolo tra il gradiente della luminosità e le velocità dei pixel lungo le direzioni degli assi di riferimento, espressi dalle [7].

$$E_u \dot{u} + E_v \dot{v} + E_t = 0 \quad [6]$$

$$E_u = \frac{\partial E(u, v, t)}{\partial u}; E_v = \frac{\partial E(u, v, t)}{\partial v}; E_t = \frac{\partial E(u, v, t)}{\partial t}; \dot{u} = \frac{du}{dt}; \dot{v} = \frac{dv}{dt} \quad [7]$$

Vengono determinate, con un metodo iterativo, le velocità \dot{u}, \dot{v} di ogni pixel-immagine, che minimizzano l'errore nel computo della [6] e gli errori introdotti dall'eventuale non uniformità di variazione di velocità (Horn, 81).

3. Risultati

I metodi di studio del movimento considerati sono stati applicati a due immagini consecutive acquisite dal satellite METEOSAT (Tabella 1).

Nome file immagini confrontate	b409621m.t08 - b409622m.t08
Satellite/Sensore di acquisizione	METEOSAT7/ MVIRI
Canale, Banda Spettrale	IR (10.5 - 12.5 μm)
Tipo di immagine	Temperatura di Brillanza
Data di acquisizione [gg.mm.aaaa]	05.04.2004
Ora UTC di acquisizione [hh:mm]	10:30 - 11:00
Intervallo temporale tra le immagini, Δt [min]	30
Finestra geografica di studio (estremi SW - NE) [GG°MM.MM']	(10°00', 37°00') - (15°00', 41°00')
Dimensioni fisiche del pixel Mercatore, D [NM pixel⁻¹]	0.77855856

Tabella 1 – Immagini METEOSAT utilizzate per l'analisi dei metodi di studio del movimento.

Il software realizzato, che implementa i quattro metodi scelti, produce stime numeriche degli spostamenti e delle velocità dei pixel dell'immagine e consente di visualizzare i risultati delle analisi in ambiente AutoCAD[®] nella finestra geografica di studio. Per prima cosa, nelle immagini METEOSAT è stata evidenziata una zona corrispondente ad una massa nuvolosa in movimento; per individuarla è stato utilizzato un metodo di accrescimento di regione, inizializzato con un punto di innesco interno alla nube, e caratterizzato da due valori di soglia per la temperatura di brillanza (Figura 1). Successivamente è stato effettuato lo studio del movimento sull'area interessata dalla formazione nuvolosa.

Il primo metodo applicato è quello dei Momenti (Figura 1-A). Con questo metodo è possibile individuare con precisione le coordinate geografiche del centroide e calcolare altri parametri della nube sotto studio che ne caratterizzano le proprietà geometriche (l'estensione, la lunghezza, l'orientazione degli assi di inerzia); dal confronto dei risultati ottenuti sulle due immagini si ottengono lo spostamento e la velocità del centroide e la rotazione dell'asse maggiore di inerzia (Tabella 2). Questo metodo permette quindi di ricavare informazioni sull'intero insieme dei pixel che formano la nube e sul suo spostamento medio. Nella Figura 1-A si possono osservare la

posizione dei centroidi, le direzioni degli assi di inerzia e il vettore spostamento associato al centroide.

	nube a UTC 10:30	nube a UTC 11:00
Coordinate geografiche centroide [GG°MM.MM']	11°59.26', 39°16.79'	12°23.05', 39°10.32'
Estensione [NM²]	7458.835676	7127.750140
Lunghezza asse maggiore di inerzia, <i>a</i> [NM]	155.982687	150.938177
Lunghezza asse minore di inerzia, <i>b</i> [NM]	52.013039	51.088880
Orientazione asse maggiore di inerzia, <i>g</i> [GG°MM.MM']	+45°18.13'	+49°42.12'
Spostamento centroide, ΔS [NM]	25.200205	
Direzione di spostamento [GG°MM.MM']	-19°15.93'	
Velocità centroide, <i>V</i> [knot]	50.400411	
Rotazione asse maggiore di inerzia [GG°MM.MM']	+4°23.99'	

Tabella 2 – Parametri geometrici, in 30 minuti, calcolati con il Metodo dei Momenti applicato alle immagini METEOSAT (Tabella 1).

Con il Metodo di Crosscorrelazione è stata eseguita una prova con un'area *S* di 15×15 pixel (corrispondenti ad un'area reale di 10×10 NM) e un'area *R* di 61×61 pixel (50×50 NM) posizionata sul centroide della nube in movimento (Figura 1-B); per dimensionare l'area *R*, si utilizza come stima dello spostamento massimo lo spostamento del centroide calcolato con il Metodo dei Momenti (Tabella 2); nella Figura 1-B vengono visualizzati i vettori spostamento soltanto di alcuni pixel dell'area *R*. L'algoritmo ha richiesto un consistente tempo di calcolo (circa mezz'ora su un PC dotato di processore Pentium4 con clock a 3 GHz). Con il Metodo di Crosscorrelazione a Multirisoluzione si ottengono risultati analoghi (Figura 1-C); la direzione e il verso dei vettori spostamento appaiono però più uniformi. La massima velocità di spostamento rilevabile nelle immagini è stata stimata con la velocità del centroide calcolata col Metodo dei Momenti (Tabella 2); secondo la [5] dunque, il numero di livelli di scomposizione necessario è pari a 6. Il tempo di calcolo è stato molto inferiore a quello richiesto dal Metodo di Crosscorrelazione. Anche il Metodo di Ottimizzazione Globale fornisce stime puntuali di spostamento e di velocità. In questo caso però sono stati ottenuti risultati soddisfacenti soltanto per alcuni pixel vicini al bordo della nube (Figura 1-D); le stime dello spostamento si discostano molto rispetto a quelle ottenute con gli altri metodi, soprattutto nell'interno della nube dove per alcuni punti non viene rilevato alcun movimento.

Il Metodo di Crosscorrelazione a Multirisoluzione è stato applicato anche ad immagini di Temperatura Superficiale del Mare (SST) da dati AVHRR (Tabella 3), ottenute da diversi satelliti (NOAA16, NOAA17) e riportate su mappe Mercatore congruenti. Nelle immagini sono stati rilevati valori di temperatura leggermente diversi a seconda del satellite. Poiché interessava rilevare la variazione dei fronti termici, piuttosto che i valori puntuali della temperatura, questi sono stati normalizzati rispetto alla media dei valori della prima immagine, scelta come riferimento (Figura 2).

4. Conclusioni

Sono stati applicati alcuni metodi di analisi del movimento a dati ricevuti dai satelliti METEOSAT e NOAA; lo studio effettuato ha considerato i risultati numerici e grafici ottenuti. Il Metodo dei Momenti consente di ottenere informazioni globali sulle caratteristiche geometriche di una forma in movimento di interesse (estensione, coordinate geografiche del centroide, lunghezza e orientazione degli assi di inerzia); il Metodo di Crosscorrelazione consente di individuare con precisione sub-pixel lo spostamento di dettagli all'interno di una forma in esame, ma richiede un notevole tempo di calcolo; il Metodo di Crosscorrelazione a Multirisoluzione permette di ricavare le stesse informazioni del Metodo di Crosscorrelazione ma, mantenendo una precisione accettabile, richiede un tempo di calcolo molto minore; con il Metodo di Ottimizzazione Globale sono stati risultati soddisfacenti soltanto per alcuni pixel vicini al bordo della nube.

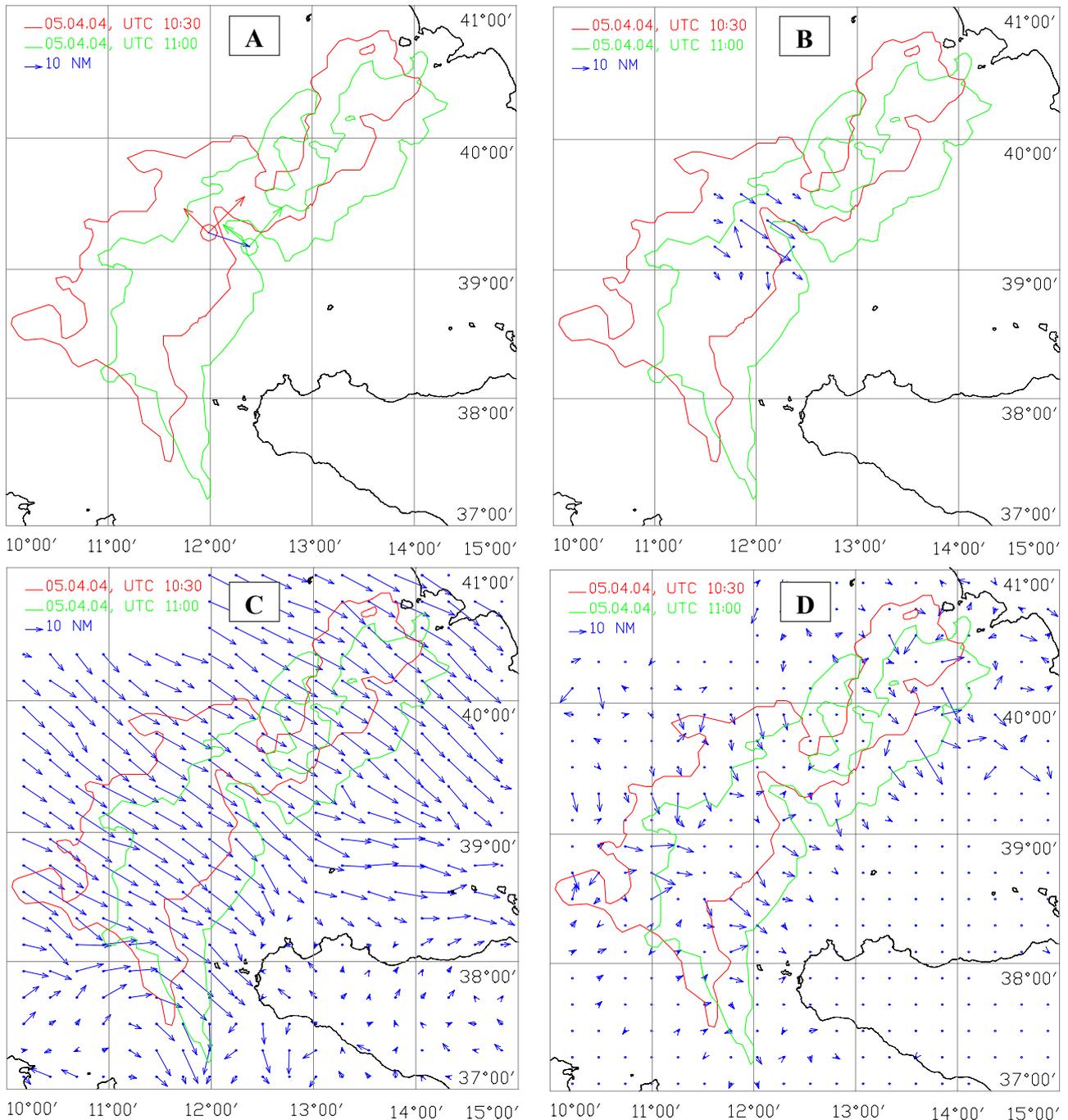


Figura 1 – Vettori di spostamento, in 30 minuti, calcolati con i metodi A: dei Momenti, B: di Crosscorrelazione, C: di Crosscorrelazione a Multirisoluzione, D: di Ottimizzazione Globale.

Nome file immagini confrontate	b0423009.wst - b0423013.wst
Satellite/Sensore di acquisizione	NOAA17-NOAA16/AVHRR
Tipo di immagine	Temperatura Superficiale del Mare
Data di acquisizione [gg.mm.aaaa]	17.08.2004
Ora UTC di acquisizione [hh:mm]	9:44 - 13:19
Intervallo temporale tra le immagini, Δt [min]	215
Finestra geografica di studio (estremi SW - NE) [GG°MM.MM']	(12°00', 38°00') - (16°00', 41°00')
Dimensioni fisiche del pixel Mercatore, D [NM pixel⁻¹]	0.77855856

Tabella 3 – Immagini NOAA cui è stato applicato il Metodo di Crosscorrelazione a Multirisoluzione (Figura 2).

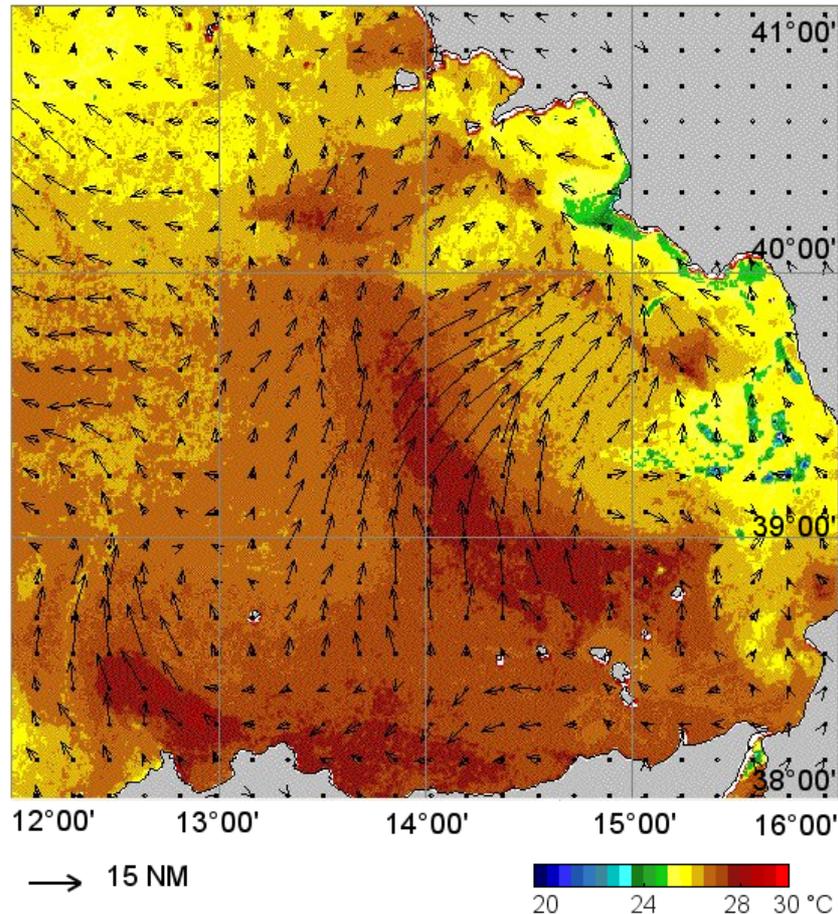


Figura 2 – Vettori di spostamento, in 3 ore e 35 minuti, calcolati con il Metodo di Crosscorrelazione a Multirisoluzione applicato alle immagini di SST da dati AVHRR/NOAA (Tabella 3); i colori sono relativi alla temperatura del mare del 17.08.2004, UTC 9:44.

Riferimenti

- Chaumette F. (2004), “Image Moments: A General and Useful Set of Features for Visual Servoing”, *IEEE Transactions On Robotics*, vol. 20, no. 4, pp. 713-723, August 2004.
- Horn B. K. P. (1986), *Robot Vision*, MIT Press, Cambridge, MA & McGraw-Hill, New York, 1986.
- Horn B. K. P., Schunck B. G. (1981), “Determining optical flow”, *Artificial Intelligence*, 17, pp.185-203, 1981.
- Ikeda M. (1995), “Mesoscale Variability revealed with sea surface temperature imaged by AVHRR on NOAA satellites”, in *Ocean. Appl. of Remote Sensing*, CRC Press, Boca Ranton, 1995, pp.3-13.
- Mallat S. G. (1989), “A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation”, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11, pp. 674-693, 1989.
- Robinson I. S. (1985), *Satellite Oceanography*, Ellis Horwood Series, Marine Sciences, 1985.
- Rottensteiner F. (1993), “Area-based Matching of Fiducial Marks in Scanned Images”, in *Image Analysis and Synthesis*, Proceedings of the 17th OeAGM Workshop, volume 68 of Schriftenreihe der OCG, pp.163-172, R. Oldenbourg Verlag Wien - München, 1993.
- Sarma M., Samanta D., Sundar Dhar A. (2004), “Motion Estimation using Multi-Resolution based on Haar Wavelet Transformation”, *TENCON 2004 – 2004 IEEE Region 10th Conference*, Volume A, 21-24, pp.247 – 250, vol. 1, 2004.
- Tomita F., Tsuji S. (1990), *Computer Analysis of Visual Textures*, Kluwer A. Publishers, 1990.
- Tonsmann G., Tyler J. M., et al. (2002), “A multiresolution algorithm for the estimation of oceanic surface velocity vector fields“, *7th Int. Conf. on Remote Sensing for Marine and Coastal Env.*, Miami-USA, May 22, 2002.