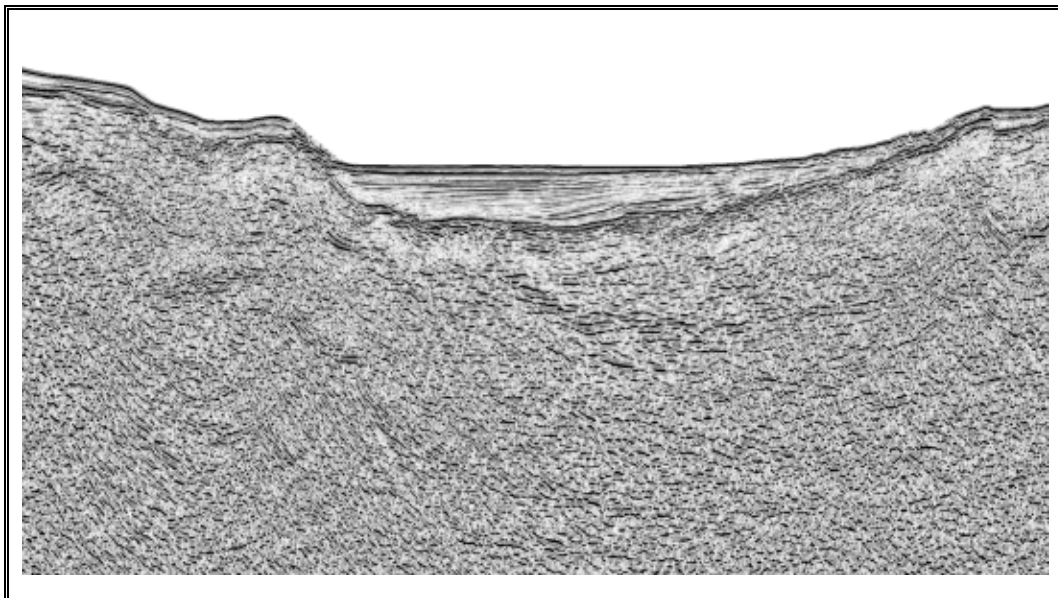




CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE
ISTITUTO DI SCIENZE MARINE
SEZIONE DI GEOLOGIA MARINA
(BOLOGNA)

ISMAR 
Sede di Bologna
Geologia Marina

**RAPPORTO TECNICO SULL'ATTIVITÀ DI
ELABORAZIONE SISMICA
DELLA LINEA CROP M-6A**



VALENTINA FERRANTE

ISMAR BOLOGNA RAPPORTO TECNICO N. 103

Bologna, Marzo 2007

INTRODUZIONE

Il Progetto CROP rappresenta il programma italiano di esplorazione geofisica della crosta profonda realizzato a partire dal 1986 dal Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) in collaborazione con da due importanti aziende del settore energetico quali l'ENI-AGIP e l'ENEL.

Nell'ambito del Progetto CROP, i sotto-progetti CROP MARE I (1991) e CROP MARE II (1993-94) sono stati realizzati con l'obiettivo di definire la struttura crostale profonda dei mari italiani e correlare le conoscenze a mare con quelle a terra.

La linea sismica M-6A (Figura 1), parte dell'ampio dataset CROP MARE I, si estende per circa 134 km dal margine continentale siciliano al mar Tirreno meridionale attraversando il Bacino di Cefalù e l'Alto di Solunto.

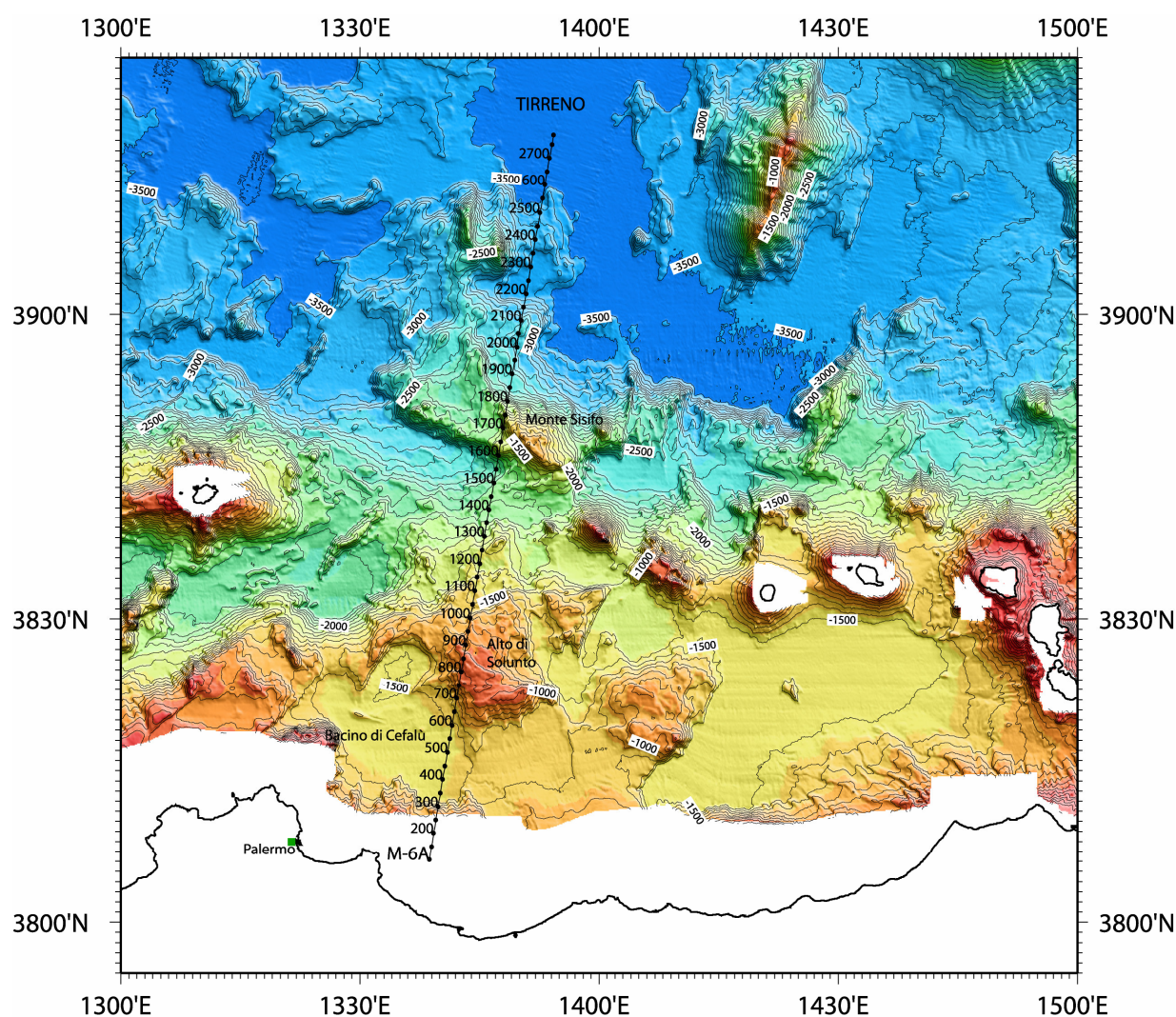


Figura 1: inquadramento geografico e posizionamento della linea CROP M-6A.

Questa zona, oggetto già di numerosi studi di carattere geologico (Bacini Sedimentari, 1980; Fabbri et al. 1981; Catalano et al., 1996; Pepe et al., 2000, 2004, 2005; Scrocca et al., 2006) e geofisico (Chironi et al., 2000; Giunta et al., 2004) è caratterizzata da una intensa sismicità strumentale di medio-bassa magnitudo (Castello et al., 2006) ed è stata ultimamente interessata da una sequenza di terremoti che si sono concentrati prevalentemente a largo di Palermo. All'evento principale del 6 Settembre 2002, ($M=5.8$) sono succedute numerose repliche di minore intensità ($M \leq 3.9$) la cui distribuzione mostra la presenza di un addensamento di eventi sismici orientato OSO-ENE e localizzato sulla regione dell'Alto di Solunto (Figura 2).

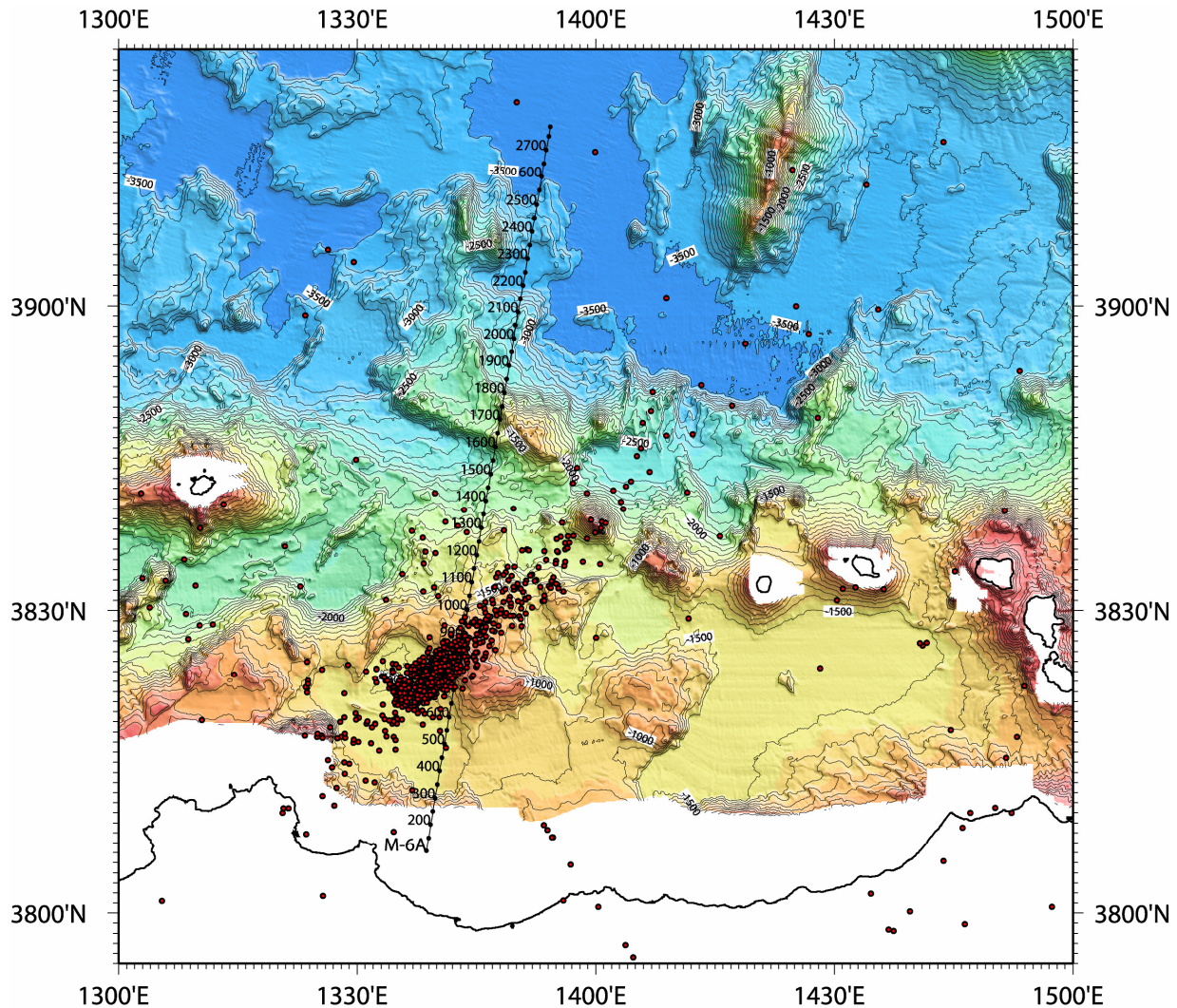


Figura 2: localizzazione degli epicentri successivi al terremoto del 6 Settembre 2002 (pallini rossi) sovrimposta alla mappa batimetrica. La sismicità, ricavata da Castello et al. (2006), è disposta lungo una fascia quasi perpendicolare all'Alto di Solunto. La linea M-6A attraversa obliquamente questo settore.

Recentemente è stato avviato un progetto che coinvolge l'Università di Roma "La Sapienza", l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia e il Dipartimento della Protezione Civile che si propone uno studio più dettagliato delle strutture superficiali e profonde dell'off-shore della Sicilia settentrionale, per contribuire ad una migliore definizione della geometria e delle caratteristiche delle sorgenti sismogenetiche presenti. A tal fine è stata avviata una completa ri-elaborazione della linea sismica CROP M-6A oggetto di questo rapporto tecnico.

L'acquisizione della M-6A è stata eseguita dall'OGS di Trieste nel 1991 ed è stata portata a termine con le metodologie standard della sismica a riflessione multicanale opportunamente parametrizzate per una penetrazione crostale profonda.

I parametri di acquisizione sono riportati nella Tabella 1.

Tabella 1: Parametri di registrazione	
Contractor	O.G.S
Vessel	OGS Expolra
System	SN 358-DMX
Record Length	17000 ms
Filter L.C. H.C.	OUT 77 Hz 70 Db/Oct
Sampling interval	4 ms
Coverage	45
Sorgente	
Energy Source	Air Gun
AVG. Source Depth	8 m
Shot interval	50 m
N° of Subarrays	8
Total Volume	4906 cu inc
Cavo	
Single Streamer Length	4500 m
N° of Group	180
Hydrophones for Group	32
Group Interval	25 m
AVG. Cable Depth	12 m

Nel 2006 i dati sono stati forniti dalla Banca Dati CROP ed elaborati presso la sede di Geologia Marina di Bologna dell'Istituto di Scienze del Mare (ISMAR) del CNR presso il quale sono disponibili sia gli elaboratori che il software necessario per il *processing* dei dati sismici a riflessione multicanale (FOCUS-DISCO Paradigm Geophysical su Sun Spark Station).

I dati in formato SEG Y su supporto ottico (DVD), consistono di tracce acquisite fino a 17 s ricampionate a 8 ms. Il ricampionamento a 8 ms è associato ad un pre-filtraggio *anti-alias* con sottrazione delle frequenze superiori a quella di Nyquist (da una frequenza massima di acquisizione di 77 Hz ad una di 62.5 Hz). L'elaborazione si è articolata in due fasi:

1. una elaborazione standard per valutare la qualità dei dati ed individuare le principali problematiche da risolvere attraverso una sequenza più elaborata;
2. una sequenza di elaborazione avanzata, mirata alla rimozione delle multiple.

FASE I: SEQUENZA DI ELABORAZIONE STANDARD

La prima fase di elaborazione si è svolta secondo i seguenti punti:

1. *Read SGY Data and Write Data in Focus-Disco internal format*
2. *Editing*
3. *Geometry Reconstruction*
4. *Deconvolution*
5. *CMP Sorting*
6. *Preliminary Velocity Analyses*
7. *NMO and DMO correction*
8. *Accurate Velocity Analyses*
9. *Stack*
10. *Time Migration*
11. *Time Variant Filter and Plotting*

1. *Read SGY Data and Write Data in Focus-Disco internal format*

I dati sono stati trasformati nel formato interno FOCUS-DISCO (Appendice-1) per permetterne l'elaborazione.

2. *Editing*

Questa fase preliminare, necessaria per la successiva elaborazione ed estremamente onerosa in termini di tempo uomo, ha permesso di determinare la qualità del segnale esistente. Durante questa fase sono state esaminate le singole *Shot Gather* con l'obiettivo di individuare quegli scoppi in cui sono presenti segnali dovuti ad una non corretta sincronizzazione degli elementi della stringa sorgente (Figura 3), canali rumorosi, *spikes* e tracce con polarità invertita (Figura 4). Gli eventi anomali sono stati rimossi con una procedura semi-automatica (Appendice-3).

3. *Geometry Reconstruction*

Sulla base dei parametri di registrazione e sulla base della geometria del sistema sorgente-ricevitori (Tabella 2) è stata ricostruita la corretta geometria di acquisizione dei dati (Appendice-2). Tali informazioni sono necessarie per il successivo passaggio di *CMP Sorting*.

Tabella 2: Parametri di acquisizione	
Lunghezza della registrazione	17000 ms
Intervallo di campionamento	8 ms
Numero di canali	180
Canale vicino	1
Offset Sorgente-Ricevitore	150 m
Distanza tra i Canali	25 m
Distanza tra gli Scoppi	50 m
Copertura	45

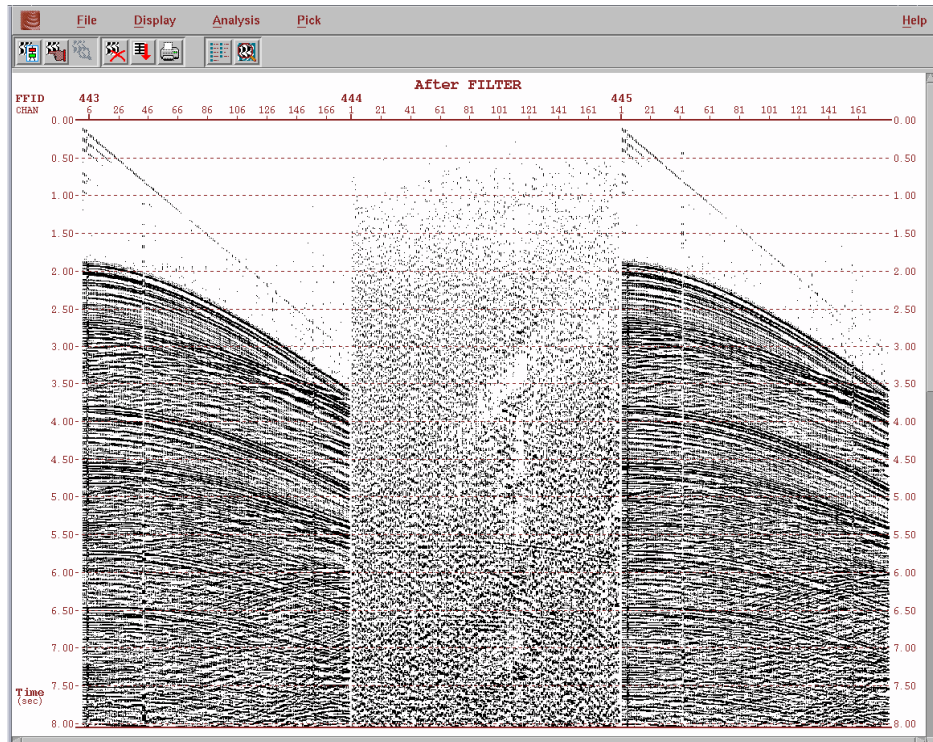


Figura 3: esempio di *miss-fire* sugli scoppi della Linea CROP M-6A

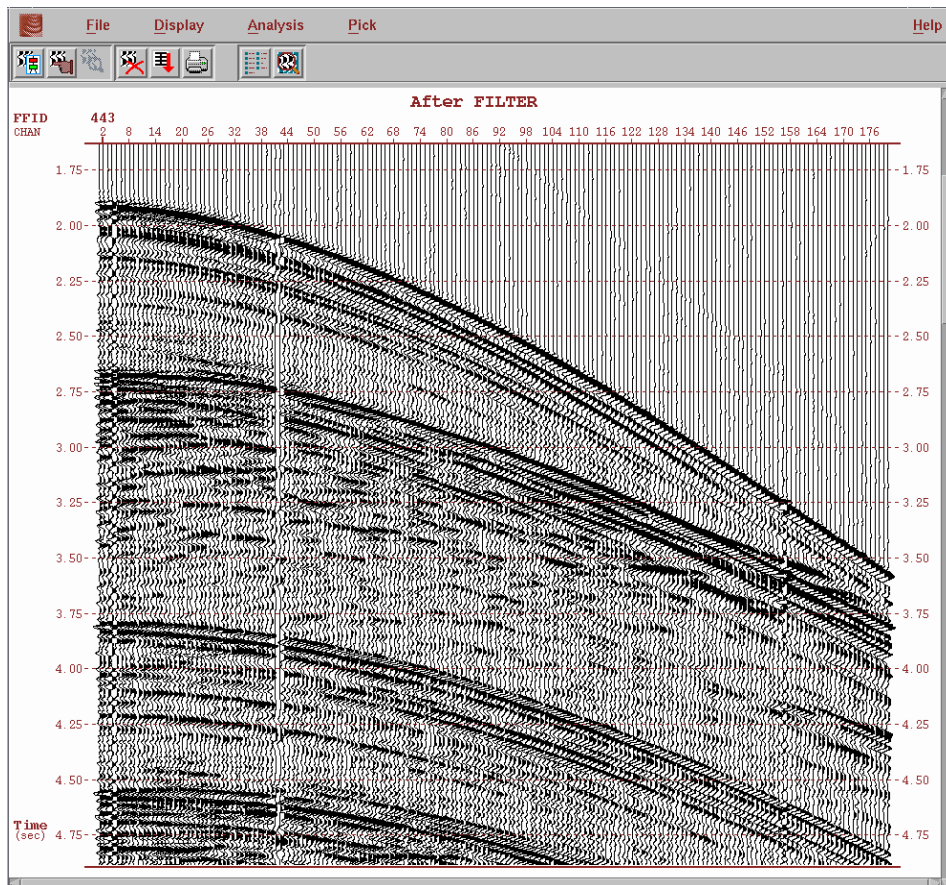


Figura 4: nelle Shot Gather sono state individuate diverse tipologie di tracce considerate “rumorose”: tracce con polarità invertita (chan 4 e 156), tracce con un basso contenuto in frequenza dovute al mal funzionamento dei canali di ricezione (chan 41 e 42), *spikes* ecc. che successivamente sono state rimosse con una procedura semi-automatica.

4. Deconvolution

La deconvoluzione predittiva *pre-stack* ha come scopo quello di aumentare la risoluzione verticale della sezione e attenuare il segnale associato alle multiple. Questa agisce attraverso la compressione dell'effettiva ondina sorgente riducendo così tutte le possibili ripetizioni periodiche del segnale entro una finestra di predizione opportunamente calibrata. A tal fine, la distanza di predizione (*prediction lag*) è stata selezionata valutando una serie di sezioni con deconvoluzione applicata e relative funzioni di autocorrelazione in cui il valore del *lag* predittivo variava con intervalli di 8 ms tra il primo ed il secondo zero della funzione di autocorrelazione della sezione non deconvoluta. La scelta è ricaduta sul valore della distanza di predizione che meglio minimizzava la funzione di autocorrelazione oltre lo *zero lag*. I parametri utilizzati per la deconvoluzione predittiva (Appendice-3) sono riportati nella tabella 3. L' algoritmo così calibrato è stato applicato su tutta la sezione con una finestra tempo, per il calcolo del filtro predittivo, pari a 3000 ms e progettata in modo da seguire l'andamento del fondo mare.

Tabella 3: Parametri di Deconvoluzione	
Lunghezza dell'Operatore	255 ms
Prediction Lag	32 ms
Pre-Whitening	2%

5. CMP Sorting

La procedura di *Sorting* permette, richiamando le informazioni relative alla geometria di acquisizione (Appendice-3), di organizzare i dati in *Common Mid Point Gather (CMP)*. Ad ogni traccia, che in una *Shot Gather* è descritta in funzione della posizione sorgente-ricevitore, viene assegnato un punto detto "*midpoint*" posizionato a metà tra la sorgente ed il ricevitore. Tutte le tracce aventi lo stesso "*midpoint*" vengono quindi raggruppate insieme a formare una *CMP Gather*. Generalmente si usa in modo equivalente il termine *CDP Gather (Common Depth Point)* con le relative approssimazioni.

6. Preliminary Velocity Analyses

Le Analisi di velocità sono state fatte allo scopo di ottenere una sezione stack preliminare che ci aiutasse a visualizzare in modo rapido le strutture presenti in profondità e a constatare la qualità del rapporto segnale/rumore. Le analisi di velocità sono state eseguite in modo interattivo nel programma FOCUS (modulo VELDEF nell'Appendice-4) su gruppi di 4 *CDP Gathers (Super Gathers)* selezionati con un intervallo di 1250 m (ogni 100 CDP), e di 625 m (ogni 50 CDP) in corrispondenza di scarpate e rilievi morfologici. L'output di ogni singola analisi è una tabella in cui sono riportati i valori della velocità (*Velocità Quadratiche Medie, VRMS*) in funzione della profondità espressa in tempi doppi (*TWT*).

7. NMO & DMO Corrections

Le velocità ottenute sono state utilizzate per applicare le correzioni di *NMO (Normal MoveOut)* e di *DMO (Dip MoveOut)* (Appendice-5). La correzione di *NMO* elimina le differenze nei tempi di percorso delle tracce afferenti ad uno stesso *CDP*: le iperboli di riflessione vengono riferite al tempo necessario per compiere il tragitto minore tra la sorgente ed il ricevitore, ovvero al tempo t_0 intercorso in una riflessione verticale in cui la posizione della sorgente e del ricevitore coincidono.

Se il *NMO* viene applicato correttamente le iperboli assumono un andamento virtualmente rettilineo e la *CDP Gather* viene trasformata in una sezione a *zero-offset*.

La correzione di *DMO* è analoga alla precedente ma tiene conto anche dei riflettori inclinati rimuovendo i conflitti di immersione presenti e facilitando dunque le successive analisi di velocità. Per la Linea M-6A si è optato per una correzione di *DMO* applicata sulle *Shot Gathers*, utilizzando un modulo (SHOTDMO nell'Appendice-5) che si basa su un algoritmo che lavora nel dominio delle frequenze e del numero d'onda (Cabrera and Levy, 1989).

8. Accurate Velocity Analyses

Dopo la correzione di *DMO* il segnale sismico presenta un maggior rapporto segnale/rumore: il segnale "buono" è rafforzato mentre le multiple e le diffrazioni sono "indebolite". A questo punto si è deciso di fare nuove analisi di velocità più accurate (Appendice-6). Lavorando in modo interattivo è stato possibile applicare in tempo reale una nuova correzione di *NMO* e verificarne l'efficacia.

Nella Figura 5 è mostrato un esempio di analisi di velocità interattiva: nel pannello di sinistra è rappresentata una *Super Gather* mentre in quello di destra la coerenza del segnale. Ad ogni riflessione è associato un definito picco di coerenza in corrispondenza del quale il programma calcola e mostra la velocità quadratica media dell'onda.

Particolare attenzione è stata posta al problema delle multiple. Queste riflessioni presentano dei picchi di coerenza associati a velocità molto basse che, risultando poco plausibili in un corretto profilo di velocità, sono stati accuratamente evitati durante le analisi.

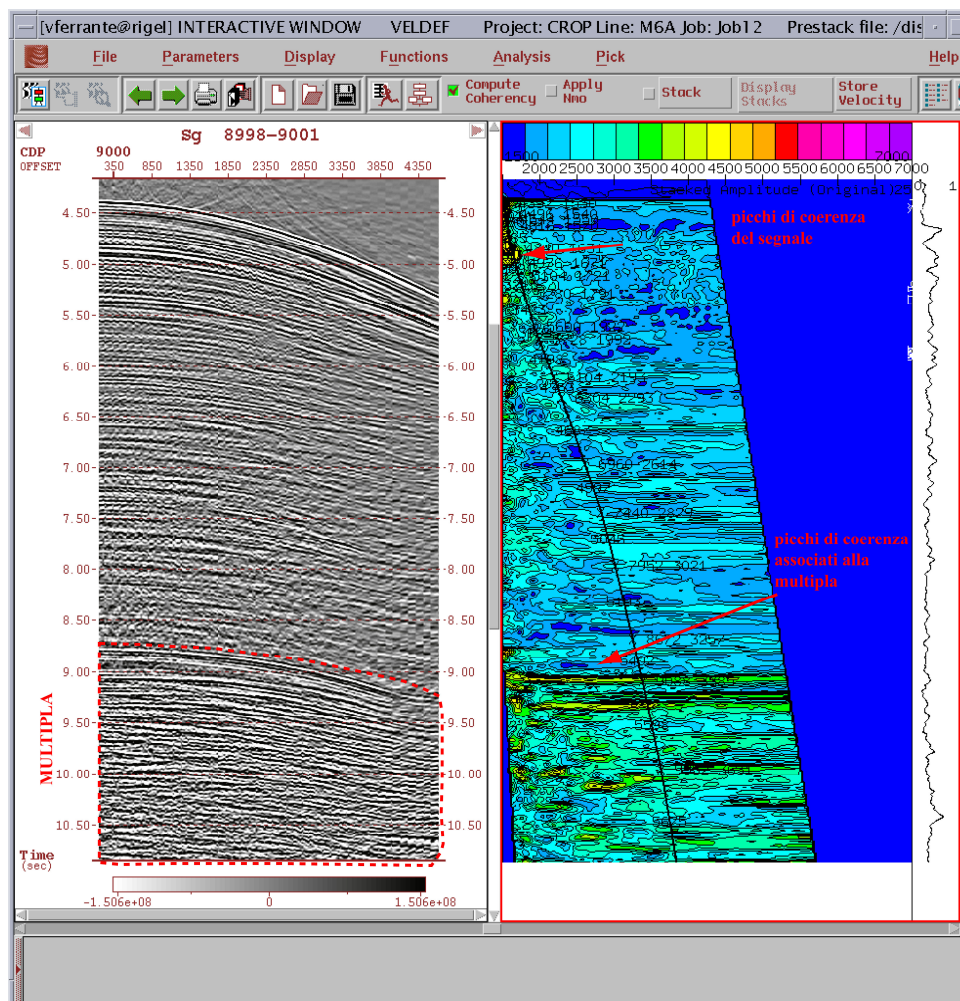


Figura5: pannello interattivo per le analisi di velocità. A sinistra la *Super Gather* composta da 4 *CDP* e a destra i picchi di coerenza associati alle riflessioni.

Nella Figura 6 l'applicazione in tempo reale del *NMO* mostra che laddove le riflessioni assumono un andamento orizzontale la *velocità di stack* scelta è corretta mentre, giustamente, le multiple rimangono sotto-corrette. Ciò ha importanti implicazioni in fase di *stack*, infatti il segnale multiplo che si va a sommare, non essendo in fase, si indebolisce ulteriormente.

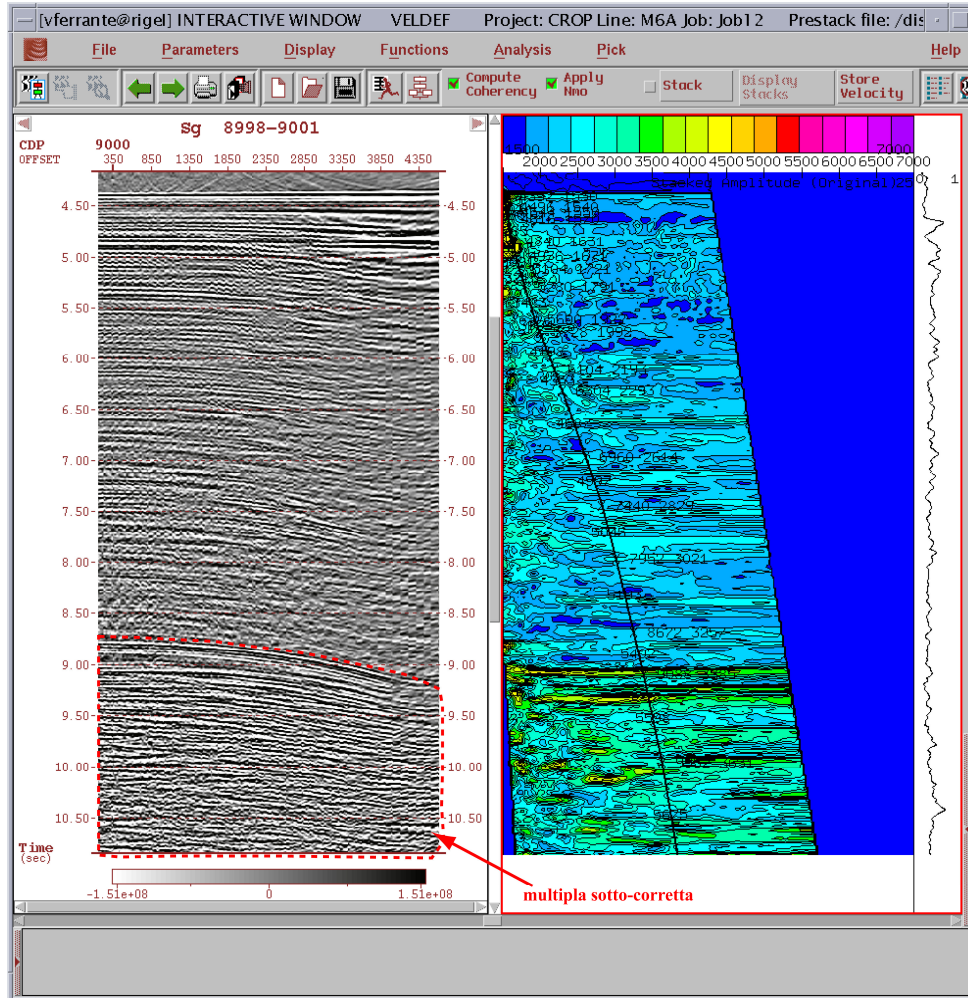


Figura 6: pannello interattivo per le analisi di velocità. A sinistra la *Super Gather* dopo la correzione di *NMO*. Le iperboli di riflessioni vengono orizzontalizzate mentre la multipla rimane sotto-corretta.

Le singole analisi di velocità sono state spazialmente interpolate lungo tutta la linea sismica ed è stato possibile estrapolare il modello di velocità nel sottosuolo utilizzato nella procedura di *stack* (Figura 7).

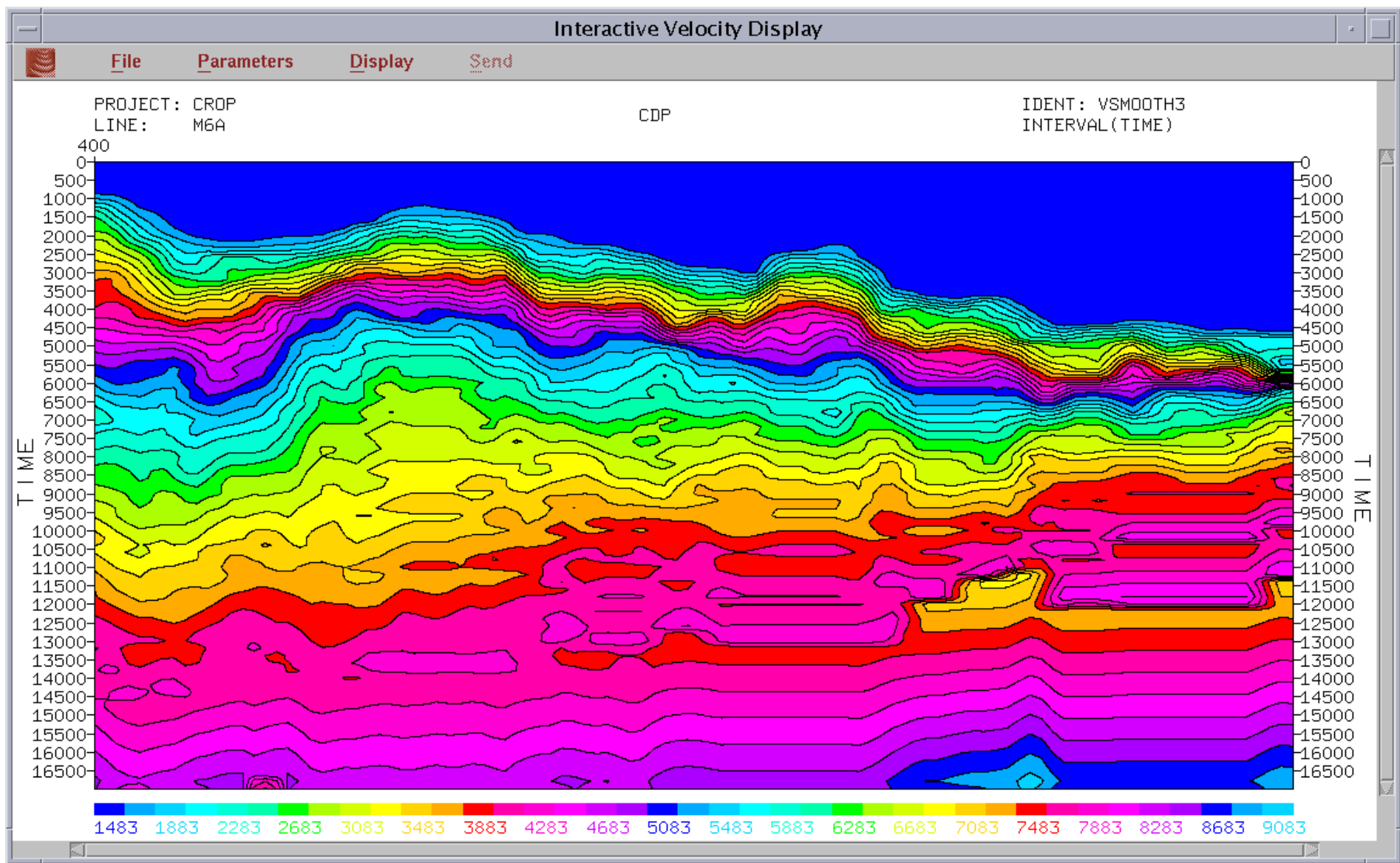


Figura7: modello di velocità ottenuto dall'interpolazione di tutte le analisi di velocità

9. Stack

L'applicazione del *NMO* sulle *CDP Gather*, produce un fenomeno detto di "*NMO-stretching*" che coinvolge principalmente la zona degli *offset* lontani delle riflessioni più superficiali (Figura 8). In pratica si verifica una distorsione della frequenza del segnale: l'allungamento della traccia comporta un aumento del periodo dominante T che si traduce in una traslazione verso frequenze più basse. Per risolvere questo problema, prima dello *stack*, sulle *CDP Gather* è stato applicato un "*mute degli offset lontani*" (Appendice-7).

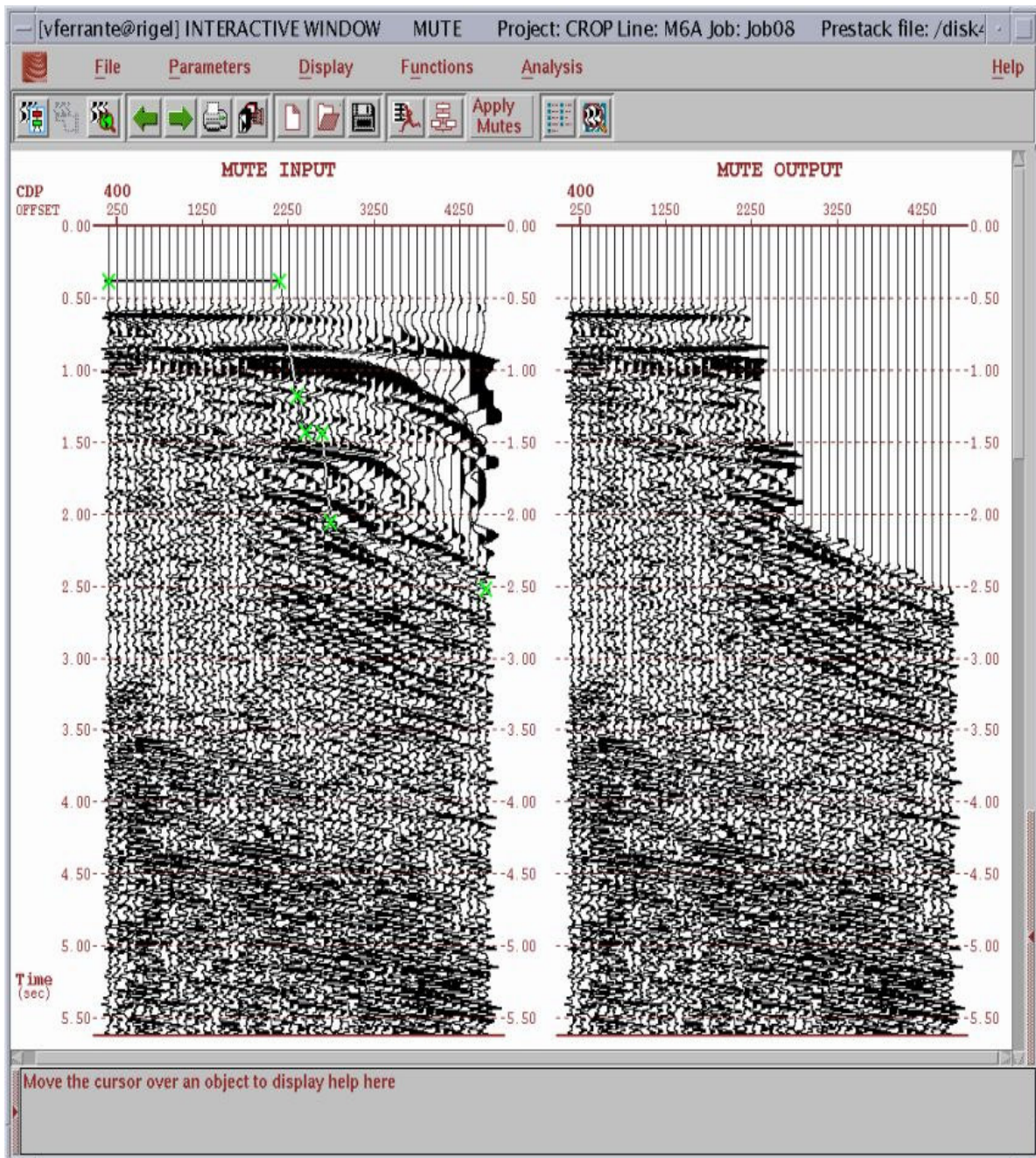


Figura 8: *CDP* corretto di *NMO* e *DMO*. Come conseguenza le tracce subiscono una distorsione in corrispondenza degli *offset* lontani. Per eliminare questo effetto indesiderato la porzione di segnale "deformata" viene eliminata.

L'applicazione del *NMO* tuttavia ha localmente corretto anche il segnale della multipla. Ciò si è verificato soprattutto nella regione degli *offset* vicini. Si è deciso di applicare, dunque, anche un *mute* degli *offset* interni, laddove i riflettori mostravano un andamento rettilineo (Figura 9).

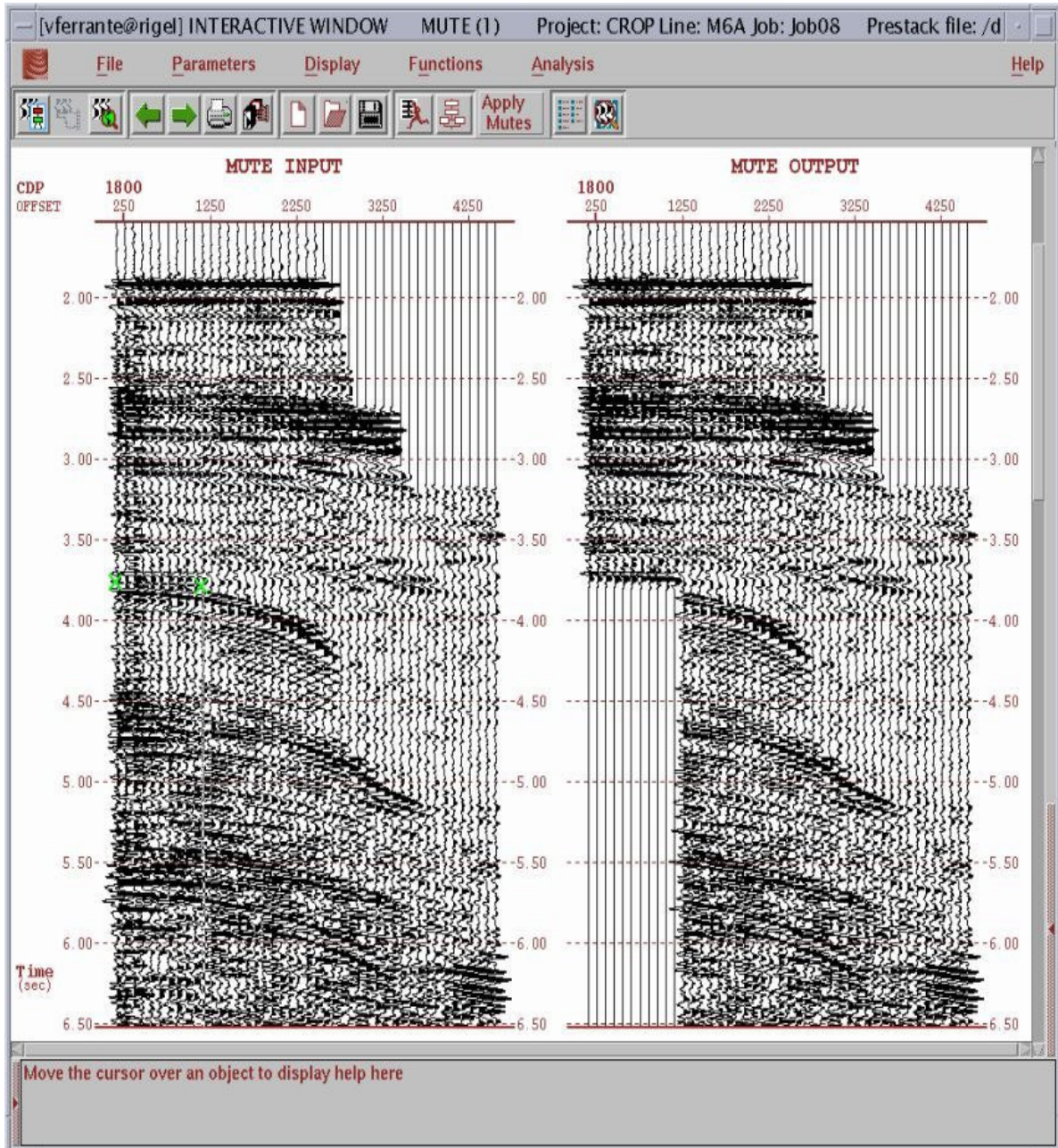


Figura 9: *mute* degli *offset* interni per indebilire la multipla in fase di *stack*.

Apportate queste correzioni è stato fatto lo *stack* che in pratica consiste nella somma algebrica delle tracce contenute in una *CDP Gather*. La procedura applicata a tutta la sezione ha fornito una prima immagine interpretabile delle strutture di sotto-superficie (Figura 10).

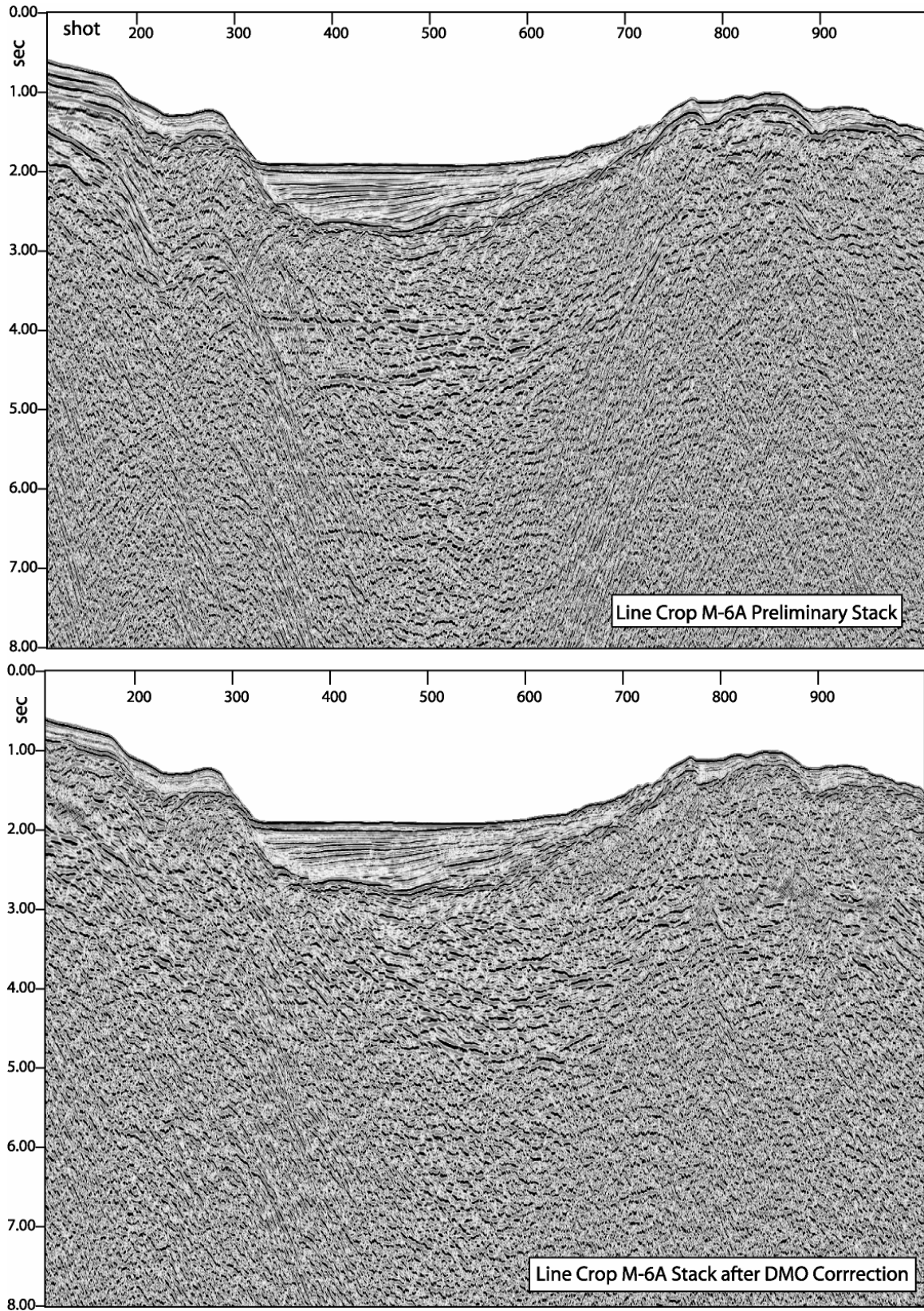


Figura 10: confronto tra la sezione *stack* preliminare (sopra) e la sezione ottenuta dopo l'elaborazione descritta nel testo (sotto). Si noti come sia le iperboli di diffrazione che le multiple siano notevolmente attenuate e come sia aumentata la risoluzione all'interno della sezione. I parametri di *plotting* (filtro, bilanciamento delle tracce, *AGC* e guadagno) sono i medesimi per le due sezioni.

10. Time Migration

La migrazione in tempi è un procedimento che serve a migliorare la risoluzione laterale della sezione sismica al fine di renderla quanto più possibile simile ad una sezione geologica e quindi più facilmente interpretabile. Questa procedura fondamentale genera due effetti: riporta i riflettori inclinati nella loro posizione geometrica reale e migliora la risoluzione di oggetti strutturalmente complessi come i piani di faglia, pieghe ecc.

La scelta del tipo di migrazione da applicare si è basata sui risultati ottenuti dalla precedente elaborazione. Le analisi di velocità hanno mostrato variazioni sia laterali che verticali delle velocità nei diversi mezzi attraversati, mentre l'esame della sezione *stack* ha messo in evidenza alcuni riflettori profondi, inclinati, la cui geometria voleva essere meglio rappresentata. A tale scopo si è deciso di utilizzare un algoritmo di migrazione (modulo MIGFX nell'Appendice-8) che si basa su una approssimazione alle differenze-finite dell'equazione dell'onda (Clearbout, 1985; Yilmaz, 1987). Le velocità di migrazione applicate sono quelle di *stack* scalate al 30%.

11. Time Variant Filtering and Plotting

Al termine dell'elaborazione si è proceduto a calibrare alcuni parametri che, utilizzati nella fase di *plotting*, rendessero la sezione *stack* e la sezione migrata quanto più possibile interpretabili. Sulla sezione *stack* è stato analizzato il contenuto in frequenza del segnale per vedere la variazione dello spettro delle frequenze con la profondità (*TWT*). È stato quindi progettato un filtro tempo variante (*Time Variant Filter*, Appendice-9) che preservasse le alte frequenze all'interno dei bacini e mettesse in evidenza le strutture presenti in profondità. Sono stati considerati due riflettori di riferimento: il fondo mare (A) ed un riflettore (B) caratterizzato da grande ampiezza e continuità laterale posto alla base della copertura sedimentaria più superficiale. A partire da questi due riflettori, i parametri del filtro tempo variante sono quelli descritti nella tabella 4.

Tabella 4: Filtro Tempo Variante	
Tipologia	Passa Banda
Lunghezza dell'Operatore	256 ms
Intervallo da A a B	5-10-44-56 Hz
Intervallo da B a (B+ 1000ms)	4-8-32-44 Hz
Intervallo da (B + 1000 ms) a (B+3000 ms)	3-6-24-32 Hz
Intervallo da (B + 3000 ms) a fine sezione	2-4-16-24 Hz

Infine l'ampiezza delle tracce è stata bilanciata su tutta la sezione ed è stato applicato un *AGC* (*Automatic Gain Control*) con una finestra di 500 ms.

FASE II: SEQUENZA DI ELABORAZIONE MIRATA

A questa elaborazione standard è seguita una fase in cui sono stati portati avanti diversi tentativi mirati ad una maggiore attenuazione delle riflessioni multiple e ad un miglioramento del rapporto segnale/rumore nella zona più profonda della sezione. L'esame delle sezioni *stack* e delle migrate ottenute dalla precedente elaborazione hanno infatti evidenziato che la presenza di multiple di lungo periodo interferisce con il segnale sismico principale limitando l'interpretabilità delle strutture più profonde. Le tecniche utilizzate in questa seconda fase del lavoro sono state:

12. *Predictive Deconvolution based on water depth*

13. *Slant-Stack and Filtering Multiple Reflections via Karhunen-Loewe Transform*

12. *Predictive Deconvolution based on water depth*

Per attenuare le multiple di lungo periodo e cioè quelle che "ricalcano" l'andamento del fondomare è stata utilizzata una deconvoluzione predittiva in cui il *prediction lag* è stato calcolato in funzione della profondità dell'acqua (Appendice-10). I nuovi parametri di deconvoluzione sono riportati nella tabella 5.

Tabella 5: Parametri di Deconvoluzione	
Lunghezza dell'Operatore	255 ms
Prediction Lag	0.9 WDepth ms
Pre-Whitening	2%

Poiché la deconvoluzione è un processo di tipo lineare per avere una verifica immediata della validità della nuova procedura abbiamo preferito fare un test sulle *CDP Gather* anziché sugli scoppi. Inoltre, poiché la correzione di *DMO* è un processo che comunque modifica il dato di partenza, abbiamo utilizzati dati privi di tale correzione.

La Figura 11 mostra una *CDP Gather* sulla quale è stata applicata la deconvoluzione. Il confronto tra i dati pre- e post-deconvoluzione tuttavia sembra lasciare inalterato il segnale contenuto nelle *CDP Gather* e non avere alcun effetto sulla multipla che rimane ancora molto evidente. Per tale motivo si è proceduto ad ulteriori tentativi.

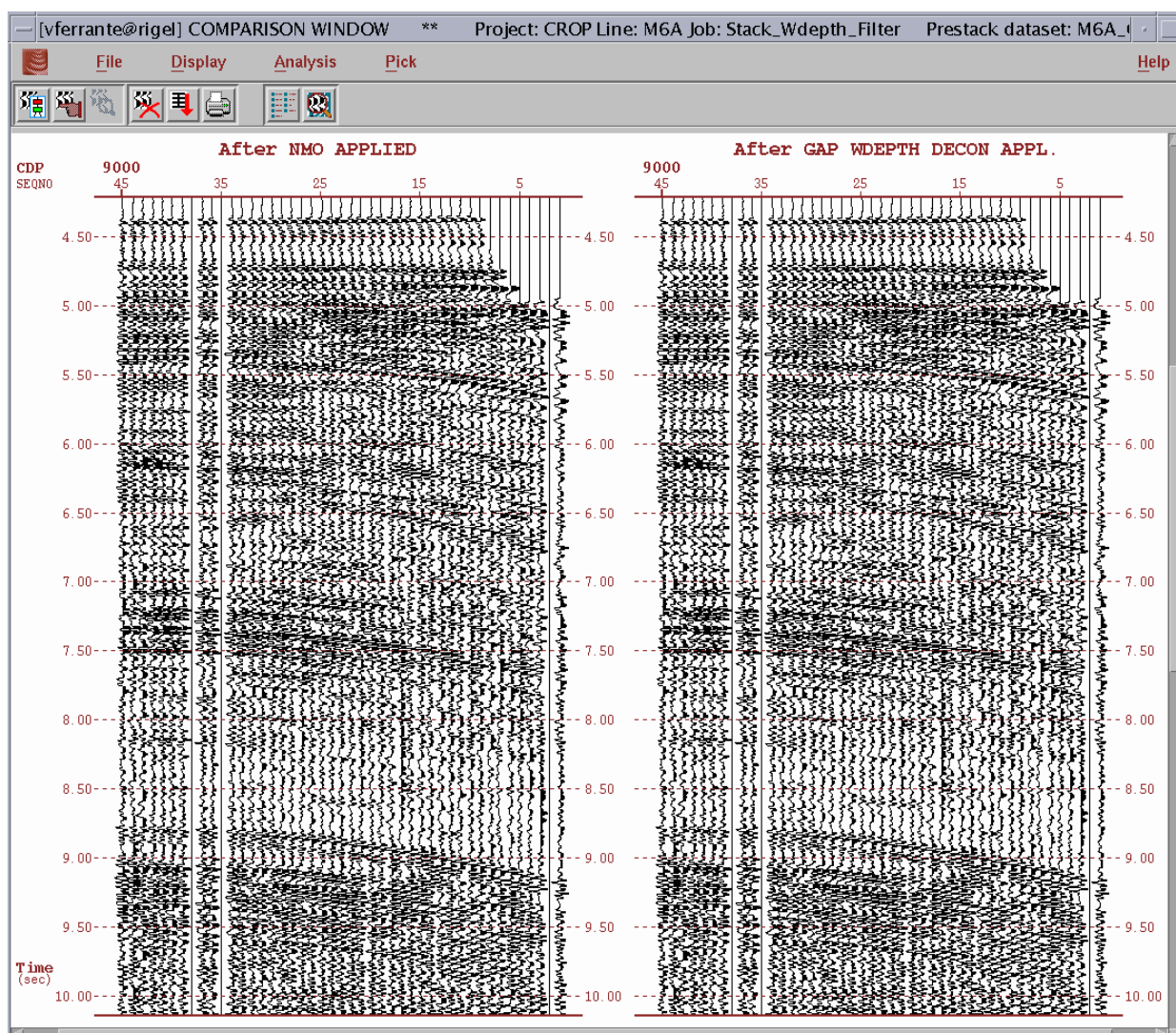


Figura 11: l'applicazione della deconvoluzione predittiva con il *prediction lag* funzione della profondità dell'acqua non sembra produrre alcun effetto sulla multipla presente a circa 8750 ms.

13. Slant-Stack and Filtering Multiple Reflections via Karhunen-Loewe Transform

Un altro modo per attenuare le riflessioni multiple è quello proposto nel modulo KLTRANS di FOCUS-DISCO (Appendice-11) che utilizza la trasformata di Karhunen-Loewe. Il corretto funzionamento di questa procedura si basa sulla possibilità di poter distinguere in modo evidente le multiple dalle altre riflessioni.

Sulle *CDP Gather* corrette di *DMO* sono state fatte nuove analisi di velocità mirate a correggere di *NMO* le multiple. In questo modo le multiple contenute nelle *CDP Gather* hanno assunto un andamento orizzontale mentre le riflessioni dovute a reali contrasti di impedenza acustica sono state sovra-corrette. La trasformata K-L opera quindi sui dati filtrando l'energia associata agli eventi orizzontali, ovvero le multiple, e lascia inalterata quella degli eventi sovra-corretti. Nella Figura 12 è mostrato un esempio pratico del metodo descritto: la multipla, ad una profondità di 8750 ms viene corretta di *NMO* e filtrata attraverso la trasformata K-L. La rimozione della correzione di *NMO* sulle multiple permette infine di procedere con la successiva elaborazione.

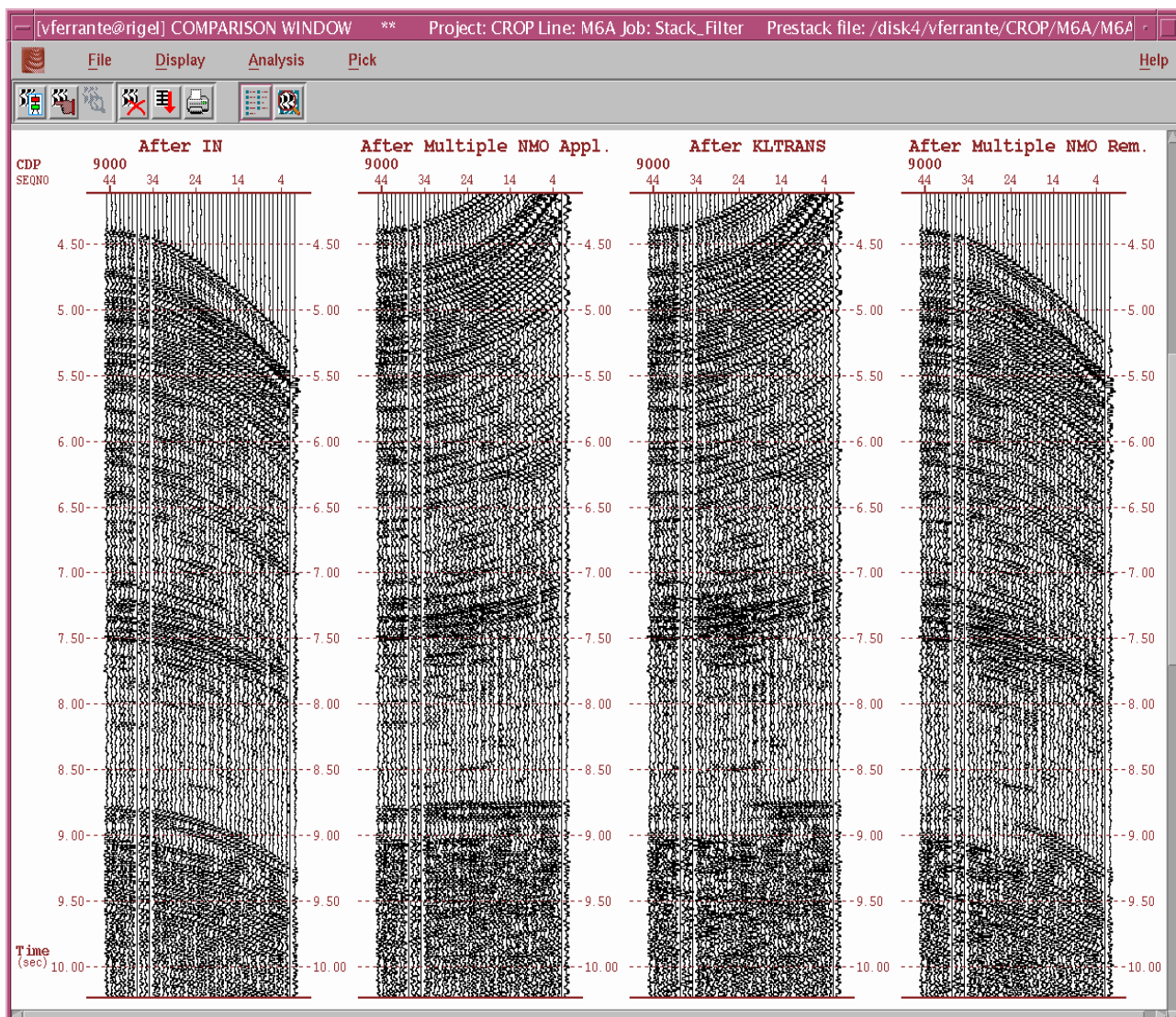


Figura 12: attenuazione della multipla attraverso la trasformata K-L.

Dalla figura 12 si osserva però che la trasformata K-L ha operato in modo discreto filtrando la multipla soprattutto sugli *offset* vicini. Per ottenere un miglioramento del rapporto segnale/rumore e produrre una maggiore attenuazione delle multiple e di altri eventi a bassa velocità è stato fatto un tentativo di filtraggio dei dati nel dominio “ τ - p ” applicando, prima della trasformata K-L, uno *slant-stack* convenzionale (Appendice-11) con i parametri riportati nella tabella 6.

Tabella 6: Parametri di Slant Stack	
Max. Dip Scan	-680 $\mu\text{s/m}$
Min. Dip Scan	40 $\mu\text{s/m}$
Step	4 $\mu\text{s/m}$
Rho Filter Length	128 ms

La Figura 13 mostra la qualità del dato dopo lo *slant-stack* e dopo il filtraggio tramite la trasformata K-L. Il “ τ - p ” migliora il rapporto segnale/rumore al di sopra della multipla, osservabile ad una profondità di 8750 ms, e filtra il segnale multiplo sugli *offset* lontani introducendo tuttavia del rumore. Dopo l’applicazione della trasformata K-L, la multipla è quasi completamente filtrata ma il rapporto segnale/rumore nella parte alta del CDP è diminuito.

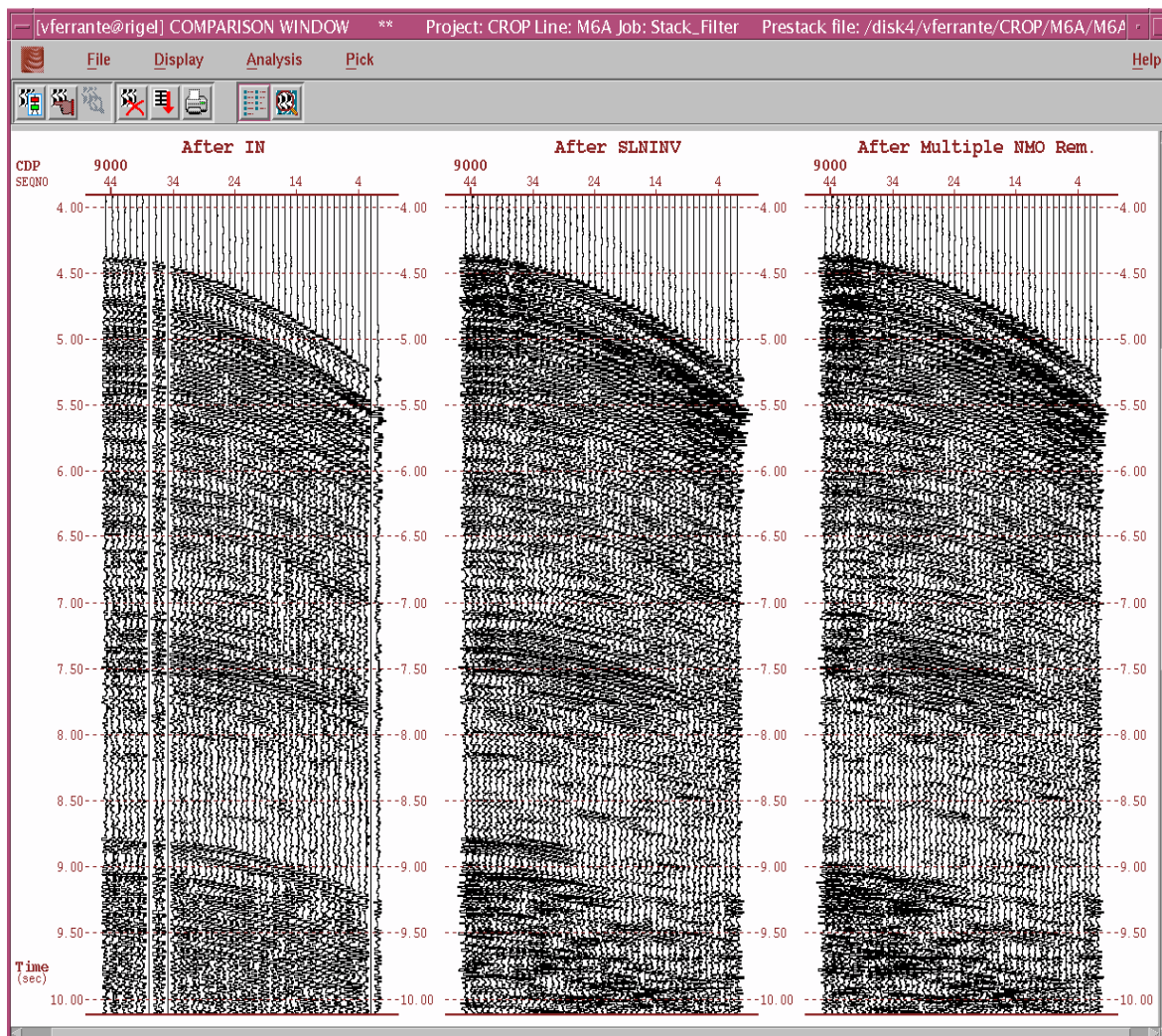


Figura 13: confronto tra una *CDP Gather* prima e dopo l'applicazione dello *slant-stack* e della trasformata K-L per l'attenuazione delle multiple.

CONCLUSIONI

L'attività di elaborazione della linea CROP M-6A si è conclusa con la produzione di una sezione migrata in tempi.

Le diverse procedure sperimentate nel corso dell'elaborazione allo scopo di rimuovere le multiple e di migliorare il rapporto segnale/rumore nella parte profonda della sezione non hanno prodotto risultati particolarmente significativi. La *Predictive Deconvolution based on the water depth* (punto 12) benché ben progettata non ha avuto alcun effetto sui dati; mentre l'applicazione dello *Slant-Stack* nel dominio "*tau - pi*" (punto 13) ha introdotto del rumore a bassa frequenza.

Buoni risultati si sono ottenuti applicando la sola trasformata K-L. Dopo questo tipo di filtraggio la multipla è risultata attenuata e la sezione *stack* è migliorata (Figura 14). Tuttavia sulla sezione migrata continua a rimanere un residuo di multipla caratterizzato da un alto contenuto in frequenze solo parzialmente attenuato da un *Time Variant Filter* progettato maggiormente verso le basse frequenze (Figura 14). Ciò nonostante la qualità della sezione è abbastanza buona.

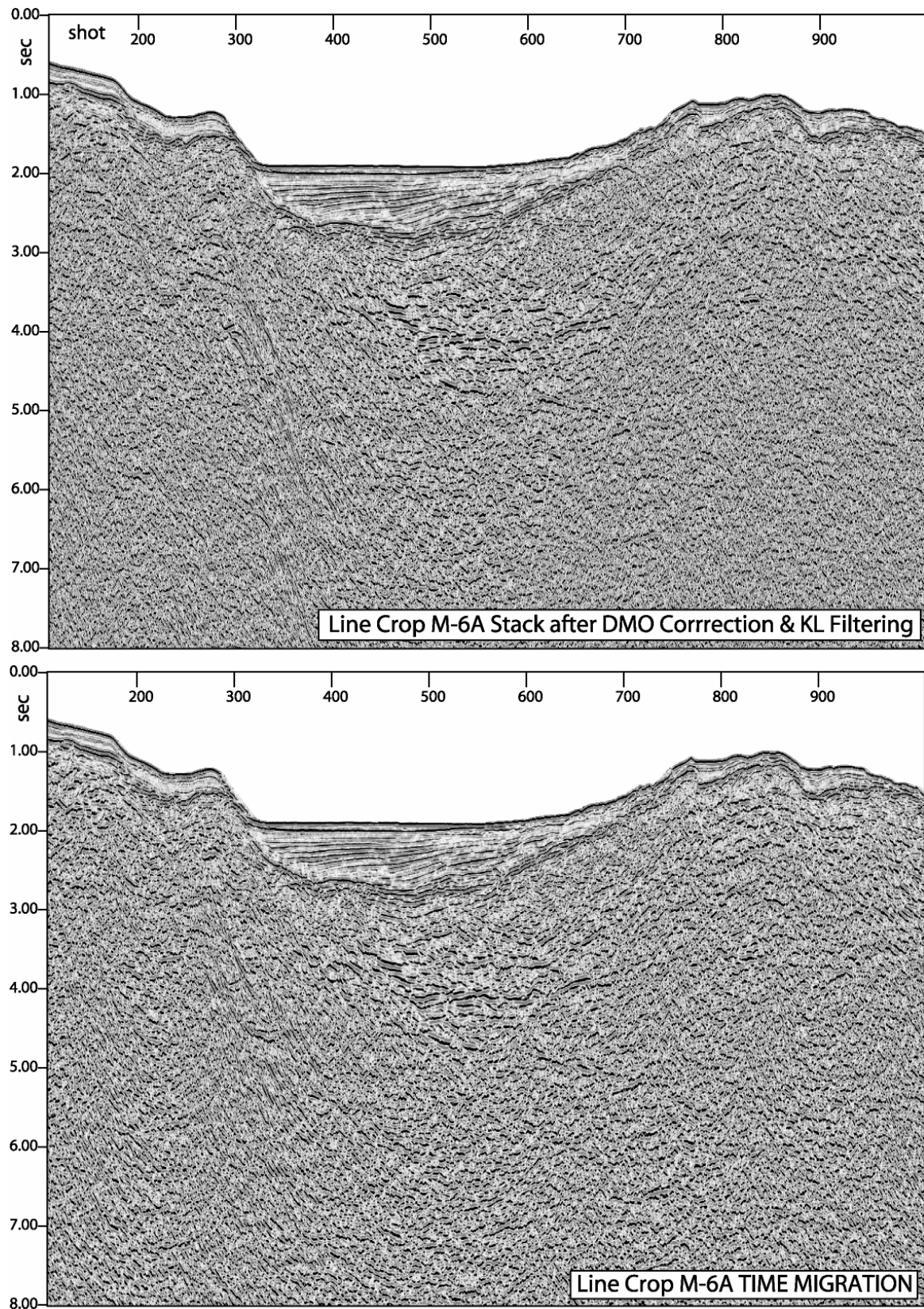


Figura 14: in alto sezione *stack* della linea M-6A come risultato finale della sequenza di elaborazione avanzata; in basso sezione migrata in tempi.

BIBLIOGRAFIA

- Al-Yahya, Kamal M., 1991, Application of the partial Karhunen-Loeve transform to suppress random noise in seismic sections: *Geophys. Prosp.*, **39**, no. 1, 77-94.
- Bacini Sedimentari, 1980. Dati geologici preliminari sul bacino di Cefalu` (Mar Tirreno). Ateneo Parm., *Acta Nat.* **16**, 3 – 18.
- Banca Dati CROP: www.crop.cnr.it.
- Cabrera, J., and Levy, S., 1989. Shot dip moveout with logarithmic transforms. *Geophys.*, **54**, 1038-1041.
- Castello B., Selvaggi G., Chiarabba C. e Amato A., 2006. CSI Catalogo della sismicità italiana 1981-2002, versione 1.1. INGV-CNT, Roma <http://www.ingv.it/CSI/>.
- Catalano, R., Di Stefano, P., Sulli, A., Vitale, P.F., 1996. Paleogeography and structure of the central Mediterranean: its offshore area. *Tectonophysics* **260**, 291– 323.
- Chironi, C., De Luca, L., Guerra, I., Luzio, D., Moretti, A., Vitale, M., & Sea Land Group, 2000. Crustal structures of the Southern Tyrrhenian Sea and the Sicily Channel on the basis of the M25, M26, M28, M39 WARR profiles. *Boll. Soc. Geol. It.*, **119**, 189-203.
- Claerbout, J. F. 1985. Imaging the earth's interior. *Oxford: Blackwell Scientific Publications*.
- Fabbri, A., Gallignani, P., Zitellini, N., 1981. Geologic evolution of the Peri-Tyrrhenian sedimentary basins of Mediterranean margins. In: Wezel, F.C. (Ed.), *Sedimentary Basins of Mediterranean Margins. Tecnoprint, Bologna, Italy*, pp. 101–126.
- Giunta, G., Luzio, D., Tondi, E., De Luca, L., Giorgianni, A., D'Anna, G., Renda, P., Cello, G., Nigro, F., Vitale, M., 2004. The Palermo (Sicily) seismic cluster of September 2002, in the seismotectonic framework of the Tyrrhenian Sea-Sicily border area. *Annals of Geophysics*, **47**, (6), 1755-1770.
- Pepe, F., Bertotti, G., Cella, F., Marsella, E., 2000. Rifted margin formation in the south Tyrrhenian Sea: a high-resolution seismic profile across the north Sicily passive continental margin. *Tectonics* **19**, 241– 257.
- Pepe, F., Bertotti, G., Cloetingh, S., 2004. Tectono-stratigraphic modelling of the north Sicily continental margin (southern Tyrrhenian sea). *Tectonophysics* **384** (1–4), 257– 273.
- Pepe, F., Sulli, A., Bertotti, G., Catalano, R., 2005. Structural highs formation and their relationship to sedimentary basins in the north Sicily continental margin (southern Tyrrhenian Sea): Implication for the Drepano Thrust Front. *Tectonophysics* **409**, 1 –18.
- D. Scrocca, C. Doglioni, R. Recanati, C. Chiarabba, V. Ferrante, M. Guerrini & M. Anastasio. Caratterizzazione delle principali strutture sismogenetiche nell'offshore della Sicilia settentrionale. Abstract at *GNGTS – 2006*.
- Yilmaz, O. 1987. Seismic data processing. *Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysicists*.

RINGRAZIAMENTI

Per la stesura di questo rapporto tecnico si ringrazia il Prof Carlo Doglioni (Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Roma “La Sapienza”), il Dr. Davide Scrocca (Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria, IGAG-CNR, Roma), il Dr. Luca Gasperini (Istituto di Scienze Marine, ISMAR-CNR, Sezione di Geologia Marina, Bologna), la Dr.ssa Gabriela Carrara (Responsabile Banca Dati CROP, Istituto di Scienze Marine, ISMAR-CNR, Sezione di Geologia Marina, Bologna), il Dr. Marco Ligi (Istituto di Scienze Marine, ISMAR-CNR, Sezione di Geologia Marina, Bologna), il Dr. G. Bortoluzzi (Istituto di Scienze Marine, ISMAR-CNR, Sezione di Geologia Marina, Bologna).

APPENDICE-1: LETTURA DEL FILE SEGYY E SCRITTURA DEI DATI NEL FORMATO INTERNO FOCUS-DISCO

```
*JOB      CROP      M6A      VALE      READSEGY
*CALL     GIN       17000    8         180      ffid     INCR     SEGY
DENSITY  6250
DEFINE    SHOT     9         4         int
TAPEOPT   /TAPEFILE="M6A.sgy"
REEL      1      100     105
LIST
*CALL     DSKWRT   M6A_Shot.dsk
*END
```

APPENDICE-2: RICOSTRUZIONE DELLA GEOMETRIA DEL CAVO SISMICO

```
*JOB      CROP      M6A      VALE      GEOMETRY
*CALL     DUMIN    8         17000    shot
** ----- Geometry Reconstruction
*CALL     MARINE  2686     180      1         150      25       50
100
*CALL     GDSPLY  100      2785
GEOPRNT
CHART     CDP      NORMAL
*END
```

APPENDICE-3: FLUSSO DI ELABORAZIONE DALL'EDITING AL CDP SORTING

```
*JOB      CROP      M6A      VALE      SORTING
** ----- Read Data From Disk
*CALL     DSKRD   M6A_Shot.dsk
** ----- Put Geometry into trace header
*CALL     PROFILE M6A      1
** ----- Shot Editing
*CALL     EDIT    shot     chan
ALL      KILL
393      444      537      592      632      638      725      1015
1173     1980     1981     1982     1983     1984     1985     1986
2785
** ----- Trace Editing
*CALL     EDIT    shot     chan
SEL      100     2785    KILL
23       29       41      42      64      123     124     132
156     172     173
** ----- Trace Editing due to reversal polarity
*CALL     EDIT    shot     chan
SEL      100     2785    KILL
```

```

-4
** ----- Selective Trace Editing
*CALL  EDIT    shot    chan
SEL    672    673    KILL
10     16     36     73
SEL    674                                KILL
4
SEL    676    680    KILL
4      6      10     16     23     29     30     36
37     73
SEL    684                                KILL
6
SEL    685                                KILL
23
SEL    926                                KILL
132
** ----- Surgical Trace Muting
*CALL  MUTE    shot    chan    0    NOINT  NOINT
OFF    671
6      11240   11     10000  16    10000  36     9600
37     12600   73     9900
OFF    672
19     16700   37     12700  73    11200  112    15100
OFF    683
6      16000   16     16000
OFF    684
16     14000   19     14000  23    14000  24     14000
37     15500   44     16000  73    14000
OFF    730
4      9200    5      9200   134   9400
** ----- Surgical Trace Muting
*CALL  MUTE    shot    chan    20    NOINT  INT
OFF    288
1      13000
OFF    290
1      14000
. . .
. . .
** ----- Gapped Deconvolution Applied
*CALL  DECONA  SHOT    CHAN    PE                HANN
KEYDEF 106     1      180
GAP    255    TIME    32     0.2
240    3240   3080   6080   240    17000  3080   17000
KEYDEF 108     1      180
GAP    255    TIME    32     0.2
240    3240   3088   6088   240    17000  3088   17000
KEYDEF 113    1      180
GAP    255    TIME    32     0.2
240    3240   3088   6088   240    17000  3088   17000
. . .
. . .
KEYDEF 2785   1      180
GAP    255    TIME    32     0.2
4000   7000   5056   8056   4000   17000  5056   17000
** ----- DC Bias Removal
*CALL  DEBIAS  0      17000
** ----- Seismic Traces Amplitude Equalization
*CALL  BALANCE shot    chan    1      180
GATES  100     1
0      17000   0      17000
GATES  2785   1
0      17000   0      17000

```

```

** ----- Water Layer Muting
*CALL  MUTE    SHOT    CHAN    20      INT    INT
ON     106
1      240     60      1088    120     2080    180     3080
ON     108
1      240     60      1088    120     2088    180     3088
. . .
. . .
ON     2785
1      4000    60      4144    120     4512    180     5056
** ----- CDP Sorting
*CALL  SORT    45      8101
MAJOR  CDP     NORMAL
MINOR  SOFFSET NORMAL
** ----- Write Data on Disk
*CALL  DSKWRT  Cdp.dsk
*END

```

APPENDICE-4: ANALISI DI VELOCITA' PRELIMINARI

```

*JOB    CROP    M6A
*CALL  IN      17000
SRCHSTR
/disk4/vferrante/CROP/M6A/*
FILNAM
(ieee)/disk4/vferrante/CROP/M6A/M6A_Cdp-nosphdiv.dsk
ORDER  FILE
CATNAM
M6A_Cdp.dsk
RANGE  189      11108    1      1
** ----- Velocity Analysis
*CALL  VELDEF  cdp                VRMS2                M6A
HANDVEL 301
736     1525    928     1546    1112    1559    1288    1591
1544    1628    1848    1725    2136    1809    3296    2263
3880    2521    4488    2799    5432    3220    6008    3479
6536    3661    7656    4072    8448    4316    9632    4649
10536   4897    11504   5132    12872   5417    14408   5703
16984   6099
HANDVEL 401
608     1526    760     1534    992     1543    1136    1560
1488    1636    1768    1728    2328    1903    3296    2263
3880    2521    4488    2799    5432    3220    6008    3479
6536    3661    7656    4072    8448    4316    9632    4649
10536   4897    11504   5132    12872   5417    14408   5703
16984   6099
. . .
. . .
HANDVEL 10901
4608    1534    4712    1542    4760    1550    4816    1557
4896    1573    4960    1580    5064    1588    5160    1604
5240    1604    5648    1673    5808    1720    6224    1891
6512    1959    6816    2083    7040    2185    7344    2304
7704    2459    8136    2660    8464    2830    9024    3095
10520   3699    11424   4056    12296   4357    13096   4609
14632   4993    16992   5507
*END

```

APPENDICE-5: CORREZIONE DI NMO E DMO

```

*JOB      CROP      M6A
*CALL    IN        17000
SRCHSTR
/disk4/vferrante/CROP/M6A/*
FILNAM
/disk4/vferrante/CROP/M6A/M6A_Cdp.dsk
ORDER    FILE
RANGE    189      11108    1      1
** ----- NMO Applied
*CALL    NMO      VRMS2    M6A      NOMUTE
** ----- Sorting Back to Shot
*CALL    SORT     180      8101
MAJOR    shot
MINOR    soffset
** ----- DMO Correction Applied
*CALL    SHOTDMO  25      60      500
LIMITS   150      4625
** ----- Sorting Back in CDP
*CALL    SORT     45      8101
MAJOR    cdp
MINOR    soffset
** ----- NMO Removal
*CALL    NMO      VRMS2    M6A      NMOREM
** ----- Write Data on Disk
*CALL    DSKWRT   M6A_CdpDmo.dsk
*END

```

APPENDICE-6: ANALISI DI VELOCITA' PIU' ACCURATE DOPO LA CORREZIONE DI DMO

```

*JOB      CROP      M6A
*CALL    IN        17000
SRCHSTR
/disk4/vferrante/CROP/M6A/*
FILNAM
/disk4/vferrante/CROP/M6A/M6A_CdpDmo.dsk
** ----- Velocity Analisys after DMO Correction
*CALL    VELDEF   CDP          VDMO          M6A
HANDVEL  300
640      1529     1072     1602     1456     1639     1856     1822
2336     2164     2632     2310     4024     2774     4752     3055
5680     3384     6408     3616     7368     3900     8824     4309
9928     4573     10784    4755     12416    5055     13792    5282
15280    5504     16992    5777
. . .
. . .
HANDVEL  11000
4600     1539     4736     1539     4864     1550     5056     1562
5200     1574     5344     1597     5584     1679     5944     1801
6288     1937     6688     2105     6952     2238     7240     2370
7752     2586     8112     2745     8512     2900     9064     3104
10072    3456     10864    3735     11688    4004     12520    4267
13496    4527     14232    4711     15152    4932     16992    5309

```



```

HANDVEL 11050
4600 1539 4736 1539 4864 1550 5056 1562
5200 1574 5344 1597 5584 1679 5944 1801
6288 1937 6688 2105 6952 2238 7240 2370
7752 2586 8112 2745 8512 2900 9064 3104
10072 3456 10864 3735 11688 4004 12520 4267
13496 4527 14232 4711 15152 4932 16992 5309
*END

```

APPENDICE-7: STACK

```

*JOB CROP M6A
*CALL IN 17000
SRCHSTR
/disk4/vferrante/CROP/M6A/*
FILNAM
/disk4/vferrante/CROP/M6A/M6A_CdpDmo.dsk
ORDER FILE
RANGE 189 11108 1 1
** ---- NMO Applied
*CALL NMO VDMO M6A NOMUTE
** ---- External Offset Muting
*CALL MUTE cdp SEQNO 16
ON 300
1 2992 10 2312 14 1624 16 1112
17 320 28 304
ON 400
1 2520 19 2056 20 1440 22 1432
23 1184 25 384 45 384
. . .
. . .
ON 11000
1 5296 6 5104 8 4496 15 3496
42 3496 45 3496
** ---- Internal Offset Muting
*CALL MUTE cdp SEQNO 16
OFF 365
1 17000 34 17000 35 1000 45 968
OFF 400
1 17000 34 17000 35 1072 45 1056
. . .
. . .
OFF 11000
1 17000 18 16992 19 9120 28 9072
34 16992 35 9128 45 9104
** ---- CDP Stack
*CALL STACK 45
TAPER 25
EQUAL CDP OFFSET 150 4625
GATES 189
0 17000 0 17000
GATES 11108
0 17000 0 17000
** ---- Write Data on Disk
*CALL DSKWRT M6A_Stack-DMO.dsk
*END

```

APPENDICE-8: TIME MIGRATION

```

*JOB      CROP      M6A
*CALL    IN        17000
SRCHSTR
/disk4/vferrante/CROP/M6A/*
FILNAM
/disk4/vferrante/CROP/M6A/M6A_Stack-DMO.dsk
ORDER    FILE
RANGE    189      11108    1      1
** ---- Time Migration Applied
*CALL    MIGFX    12.5     11108    2      62.5    32      87
TIME     VMIG3    200      200
** ---- Write Data on Disk
*CALL    DSKWRT   M6A_StkDMO_Migfx_vel50.dsk
*END

```

APPENDICE-9: TIME VARIANT FILTER, SECTION BALANCING, AGC AND PLOTTING

```

*JOB      CROP      M6A
*CALL    IN        17000
SRCHSTR
/disk4/vferrante/CROP/M6A/*
FILNAM
/disk4/vferrante/CROP/M6A/M6A_StkDMO_Migfx_Vel50.dsk
ORDER    FILE
RANGE    189      11108    1      1
** ---- Time Variant Filter 1 Applied
*CALL    FILTER   cdp
KEYDEF   307
BAND
504      5      10      44      56
744      4      8       32      44
1744     3      6       24      32
3744     17000  2      4       16      24
KEYDEF   658
BAND
800      5      10      44      56
1064     4      8       32      44
2064     3      6       24      32
4064     17000  2      4       16      24
. . .
. . .
KEYDEF   11077
BAND
4576     5      10      44      56
5232     4      8       32      44
6232     3      6       24      32
8232     17000  2      4       16      24
** ---- Section Balancing
*CALL    BALANCE  cdp      cdp      189      11108
GATES    189      1
0        17000   0      17000
GATES    11108   1
0        17000   0      17000

```

```

** ---- Automatic Gain Control Applied
*CALL  AGC      500
** ---- Water Layer Muting
*CALL  MUTE     cdp      CDP      0
ON     189
189    424      255      448      275      472      312      496
357    528      396      576      443      624      474      640
503    656      537      680      578      720      620      752
655    784      682      840      708      928      720      984
. . .
. . .
10399  4568    10643    4576    10859    4576    11105    4576
** ---- Plotting
*CALL  SECPLOT      VA      200      1      0
GAIN   1.75
PLOTOP OYO400
TITLE  Line M6A Time Migration
LABEL  CDP      100      1      shot      100
TRANGE 0      17000
SETAMP
*END

```

APPENDICE-10: MULTIPLE ATTENUATION VIA PREDICTIVE DECONVOLUTION (BASED ON WATER DEPTH)

```

*JOB   CROP      M6A
*CALL  IN        17000
SRCHSTR
/disk4/vferrante/CROP/M6A/*
FILNAM
/disk4/vferrante/CROP/M6A/M6A_Cdp.dsk
ORDER  FILE
RANGE  189      11108    1      1
** ---- NMO Applied
*CALL  NMO      VRMSNEW1M6A    NOMUTE
** ---- External Offset Muting
*CALL  MUTE     cdp      SEQNO    8
ON     400
1      5728     19      3608    21      3392    25      2800
26     1992     31      824     35      16      45      0
. . .
. . .
ON     10900
1      6464     10      4176    11      4176    13      4176
45     4168
ON     11000
2      7000     4       6336    8       4168    10      4176
11     4176     13      4176    45      4168
** ---- Water Depth Header Value Assignment
*CALL  WDEPTH   cdp      1500
HAND   189
(CDP)  (TIME)   (CDP)  (TIME)   (CDP)  (TIME)   (CDP)  (TIME)
189    424      255    448      275    472      312    496
357    528      396    576      443    624      474    640
503    656      537    680      578    720      620    752
655    784      682    840      708    928      720    984
. . .
. . .

```

```

10106 4528 10131 4520 10166 4528 10195 4536
10220 4504 10244 4544 10293 4560 10340 4560
10399 4568 10643 4576 10859 4576 11105 4576
** ---- Predictive Deconvolution Applied
*CALL DECONA cdp seqno
KEYDEF 365 1 45
GAP 255 WDEPTH 0.9 0.2
0 16000 0 16000 0 17000 0 17000
** ---- DC Bias Removal
*CALL DEBIAS 0 17000
** ---- Seismic Traces Amplitude Equalization
*CALL BALANCE cdp 1 45
GATES 365 1
0 17000 0 17000
** ---- CDP Stack
*CALL STACK 45
TAPER 25
EQUAL 150 4625
GATES 189
0 17000 0 17000
** ---- Write Data on Disk
*CALL DSKWRT M6A_WDEPTH_Stk.dsk
** ---- Time Varian Filter Applied
*CALL FILTER cdp
KEYDEF 307
BAND
504 5 10 44 56
744 4 8 32 44
1744 3 6 24 32
3744 17000 2 4 16 24
** ---- Section Balancing
*CALL BALANCE cdp cdp 189 11108
GATES 189 1
0 17000 0 17000
** ---- Automatic Gain Control
*CALL AGC 1000
** ---- Plotting
*CALL SECPLOT VA 200 1 0
*END

```

APPENDICE-11: MULTIPLE ATTENUATION VIA MULTIPLE ENERGY FILTERING

```

*JOB CROP M6A
*CALL IN 17000
SRCHSTR
/disk4/vferrante/CROP/M6A/*
FILNAM
/disk4/vferrante/CROP/M6A/M6A_CdpDmo1.dsk
ORDER FILE
RANGE 10698 10701 1 1
** ---- Forward Slant Stack Applied:it stacks each ensemble input to the
program along a user-specified number of dips in the slant stack,  $\tau - p$ , domain.
*CALL SLNFOW -680 40 180 128
** ---- Low Velocity Events Muting
*CALL MUTE CDP IRAY 0
OFF 9000
-680 1008 -458 3248 -390 3968 -289 5104

```

```
-225    6112    -161    7200    -120    8016    -88    8832
-76     9408    -68     10088   -60     10904   -56     11648
-48     13384   -36     16992
** ---- Inverse Slant Stack Applied: transforms the data back into the Space-
Time domain
*CALL   SLNINV  45
** ---- NMO Correction of Multiple Reflections Applied
*CALL   NMO     VMULT  M6A     NMOAPP
** ---- Filtering Flat Events via Karhunen-Loewe Transform
*CALL   KLTRANS REJECT
** ---- NMO Correction of Multiple Reflections Removal
*CALL   NMO     VMULT  M6A     NMOREM
*END
```