

VALUTAZIONE DELLE CORRENTI SUB-SUPERFICIALI NEL
MEDITERRANEO DA FLOAT ARGO

by

Milena Menna & Pierre Marie Poulain



Prodotto dal 'Mediterranean Argo Regional Centre (MedArgo)', OGS, Trieste, Italia

Approved for release by:

Dr. Alessandro Crise
Director, Department of Oceanography

Sommario

- 1. Introduzione**
- 2. Caratteristiche cicliche dei float del Mediterraneo**
- 3. Stima dei tempi di immersione e di affioramento per un float Apex**
- 4. Stima dei tempi di immersione e di affioramento per un float Provor**
- 5. Stima delle posizioni di affioramento ed immersione**
- 6. Valutazione dei tempi e delle posizioni corrispondenti alla profondità di parcheggio**
- 7. Conclusioni**
- 8. Appendice A**
- 9. Bibliografia**

1. Introduzione

Il progetto Argo per il Mar Mediterraneo (MedArgo) nasce nel 2000 dall'esigenza di conoscere e monitorare la circolazione presente in questo bacino. Dal 2003 in poi, grazie al progetto MFSTEP e a numerosi altri progetti che prendono vita sempre nell'ambito di MedArgo, il numero di float presenti nel Mediterraneo inizia a diventare significativo e a fornire una collezione di dati sufficienti per poter trarre informazioni sulla circolazione sub-superficiale.

I dati trasmessi dai float sono immagazzinati in 3 differenti tipi di file: di profilo, di traiettoria e file tecnico. In questo rapporto presentiamo i risultati del lavoro relativo ai file di traiettoria, che contengono informazioni sul moto tridimensionale dei float, allo scopo di ottenere le migliori stime possibili della circolazione alla profondità di parcheggio.

2. Caratteristiche cicliche dei float del Mediterraneo

Di tutti i float rilasciati nel Mediterraneo dal 2003 ad oggi, 36 profilatori (sia APEX - prodotti da Webb Research Corporation, che PROVOR - prodotti da MARTEC), posseggono le stesse caratteristiche cicliche; essi sono programmati per compiere cicli di circa 5 giorni con profondità di parcheggio a 350 m e profondità di profilo di 700-2000 m.

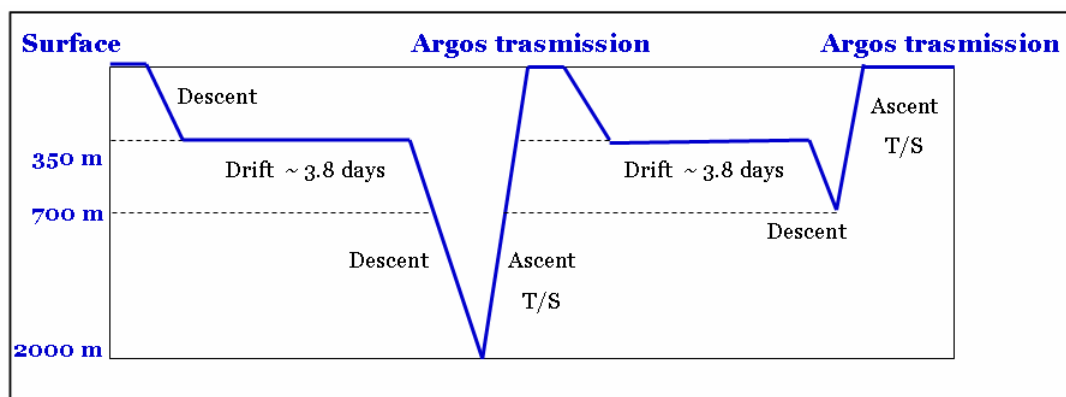


Figura 1 - Configurazione 'Parking and Profile' tipica di un float del Mediterraneo.

Il singolo ciclo (Figura 1) inizia quando il float si immerge, spostandosi dalla superficie del mare fino alla profondità di parcheggio programmata (350 m); a questa profondità si muove, trascinato dalla corrente, per un periodo di tempo medio di 3.8 giorni, per poi continuare ad immergersi fino alla profondità di profilo, che in genere è di 700m. Durante la risalita verso la superficie il float effettua le misure di temperatura e conducibilità. Una volta in superficie, inizia l'ultima fase del ciclo che consiste nella localizzazione da parte del sistema ARGOS (sistema di raccolta e posizionamento dati che utilizza satelliti ad orbita polare NOAA) e nella trasmissione dei dati acquisiti al satellite. La fase di trasmissione dura in media 6 ore.

Questi float del Mediterraneo sono programmati per raggiungere la profondità di profilo di 2000m ogni 10 cicli; in questo caso i dati del profilo CTD da trasmettere sono più numerosi, quindi il float resta in superficie più a lungo (circa 8 ore).

La Figura 2 mostra in maniera dettagliata le varie fasi del ciclo di un float, evidenziando i tempi e le posizioni utili per la valutazione delle correnti sub-superficiali.

La stima dei vettori velocità a 350m richiede la conoscenza della distanza che il float ricopre alla profondità di parcheggio (spostamento tra il punti A e B) e la durata del moto (tempi DE e DPS). Queste informazioni non sono direttamente misurate dai float; le misure dirette, infatti, interessano solo le posizioni ed i tempi superficiali (evidenziati in Figura 2 con delle stelle), acquisiti durante la fase di trasmissione.

In prima approssimazione le correnti alla profondità di parcheggio possono essere stimate utilizzando le coordinate dell'ultimo punto fissato dal satellite al ciclo n-1 e del primo punto fissato dal satellite al ciclo n (evidenziati dalle stelle blu in Figura 2). Una valutazione così prodotta risulterà affetta da differenti sorgenti di errore, che derivano dal trascurare il movimento verticale del profilatore durante le fasi di ascesa e discesa e dal trascurare lo spostamento del float in superficie, prima del primo punto e dopo l'ultimo punto fissato dal satellite.

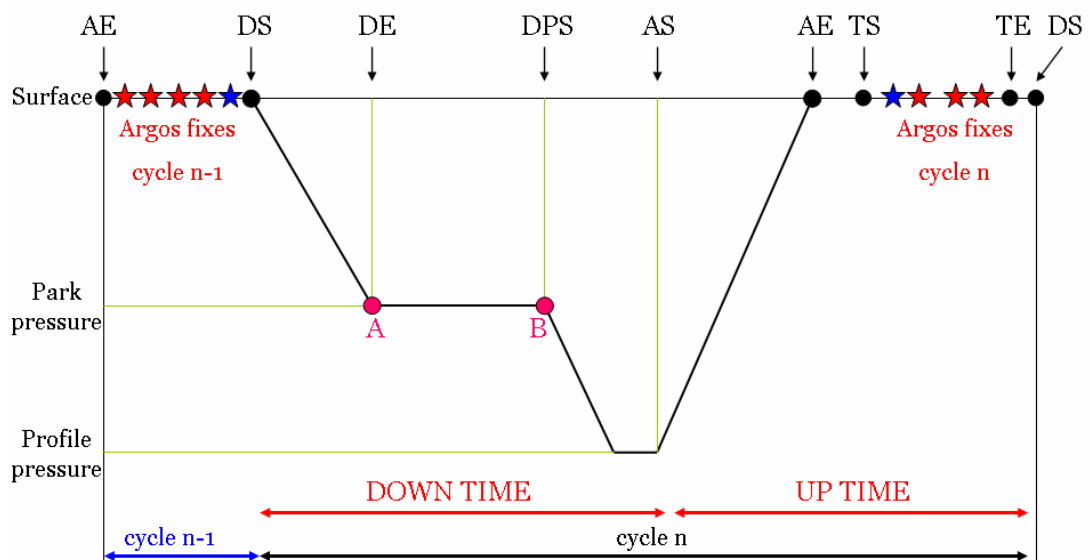
L'obiettivo di questo lavoro è migliorare le stime prodotte in prima approssimazione. Si comincia col determinare la migliore stima possibile dello spostamento superficiale mediante:

- stima dei tempi di immersione (DS - Descent Start Time) e affioramento (AE - Ascent End Time);

- estrapolazione delle posizioni corrispondenti ai tempi DS e AE, realizzata con un modello lineare multivariato basato sulla somma di un moto lineare e di un moto inerziale;

Si procede quindi nella determinazione della migliore stima dello spostamento sub-superficiale, mediante:

- valutazione dei tempi DE (Descent End Time) e DPS (Descent to Profile Start Time);
- impiego delle velocità medie di ascesa e discesa del float e applicazione di uno shear di velocità verticale per stimare le posizioni A e B localizzate a 350m ;



DS: Descent Start Time

DE: Descent End Time

DPS: Descent to Profile Start Time

AS: Ascent Start Time

AE: Ascent End Time

TS: Transmission Start Time

TE: Transmission end Time

Figura 2 – Il singolo ciclo n di un float inizia al tempo DS, quando esso si immerge fino alla profondità di parcheggio (punto A raggiunto al tempo DE); trascorre a questa profondità un periodo di tempo di 3.5-4 giorni ($\Delta t_{AB} = DPS - DE$) per poi continuare ad immergersi, a partire dal tempo DPS, fino alla profondità di profilo. Da qui inizia la fase di ascesa (tempo AS) in cui il float effettua il profilo CTD della colonna d'acqua sovrastante; infine, in corrispondenza del tempo AE, giunge in superficie dove può essere localizzato dal satellite ed iniziare la trasmissione dei dati (tempo TS). Terminata la fase di trasmissione inizia un nuovo ciclo.

I float impiegati nel Mediterraneo, APEX e PROVOR, hanno modalità di funzionamento diverse. I PROVOR mantengono traccia dei tempi AE, DS, DE, DPS, AS (Ascent Start Time) e TS (Transmission Start Time); gli APEX registrano solo il tempo TS.

3. Stima dei tempi di immersione e di affioramento per un float Apex

In Figura 3 è possibile osservare schematicamente due fasi di trasmissione successive prodotte da un float Apex. Quando il float arriva in superficie inizia a trasmettere i suoi dati (tempo TS) ma fino a quando non passa il satellite esso non può essere localizzato ed i dati non possono essere ricevuti. I tempi T_{first} e T_{last} in Figura 3, si riferiscono rispettivamente alla prima trasmissione del ciclo n e all'ultima trasmissione del ciclo $n-1$, ricevute (fissate) dal satellite. Le posizioni $(X_{\text{first}}^n, Y_{\text{first}}^n)$ e $(X_{\text{last}}^{n-1}, Y_{\text{last}}^{n-1})$, sono le coordinate dei float ai tempi T_{first} e T_{last} .

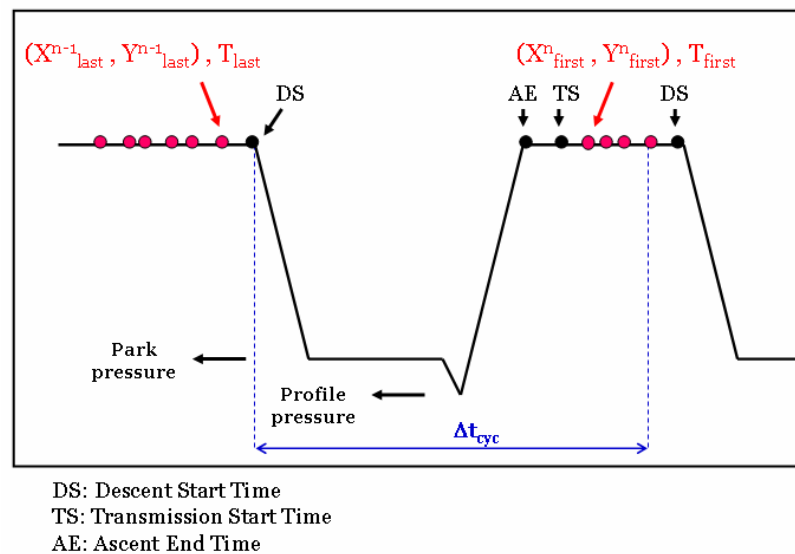


Figura 3 – Due fasi di trasmissione successiva per un float Apex. I file traiettoria di questi float contengono i dati di coordinate e tempi dei punti fissati dal satellite (circoletti rossi) ed il tempo in cui inizia la trasmissione (TS) per ogni ciclo; questi dati servono a stimare DS ed AE.

I file di traiettoria ci forniscono tempo e coordinate dei punti fissati dal satellite (rappresentati dai circoletti rossi), ma non ci danno informazioni su quello che succede prima dell'immersione (cioè nell'intervallo di tempo compreso tra T_{last} e DS) e subito dopo l'ascesa in superficie (cioè nell'intervallo di tempo compreso tra AE e T_{first}). Il moto non conosciuto che il float effettua in questi intervalli di tempo produce una significativa sorgente di errore nella stima della corrente profonda in quanto, le correnti in superficie, o in prossimità di essa, sono in genere molto più intense di quelle alla profondità di parcheggio.

Per eliminare questo tipo di errore è necessario valutare i tempi AE ed DS ed estrapolare le posizioni ad essi corrispondenti.

AE- Ascent End Time. Quando il float Apex arriva in superficie inizia a trasmettere i suoi dati, ma finché non passa il satellite non può essere localizzato ed i dati non possono essere ricevuti. E' possibile risalire al momento in cui il float arriva in superficie valutando il tempo intercorso tra la prima trasmissione del float (TS), e l'avvenuta ricezione dei dati da parte del satellite a cui il float sta trasmettendo (T_{first}).

Il messaggio #1 di ogni trasmissione Apex contiene informazioni sul numero di misure che sono state fatte durante il profilo (numero di triplette di temperatura, salinità e profondità). In base al numero di triplette è possibile risalire al numero di messaggi (**M**) da trasmettere per immagazzinare tutto il profilo; M è 11 per i profili effettuati a 700 m, diventa 15 o più per i profili di 2000m. Sapendo che gli Apex trasmettono ogni 30 secondi (**R**) e sapendo che l'**N**-esima copia del messaggio #1 è stata ricevuta al tempo **T** (User Manual-Apex SBE Profiler; Park et al., 2004; Solari, 2008), l'istante di tempo in cui è iniziata la trasmissione è dato da:

$$TS = T - (R * M)(N - 1)$$

La differenza tra TS e AE è un tempo strumentale programmato prima della messa a mare dello strumento che impone al float, una volta giunto in superficie, di attendere 10 minuti prima di iniziare la fase di trasmissione.

$$AE = TS - 10 \text{ minuti}$$

DS – Descent Start Time. Per valutare il tempo di immersione rappresentativo per tutti gli m cicli di un float, utilizziamo il set di tempi T_{last}^m (Figura 3) ed il periodo operativo ΔT_{cyc} (pari alla durata media di un ciclo, 5 giorni).

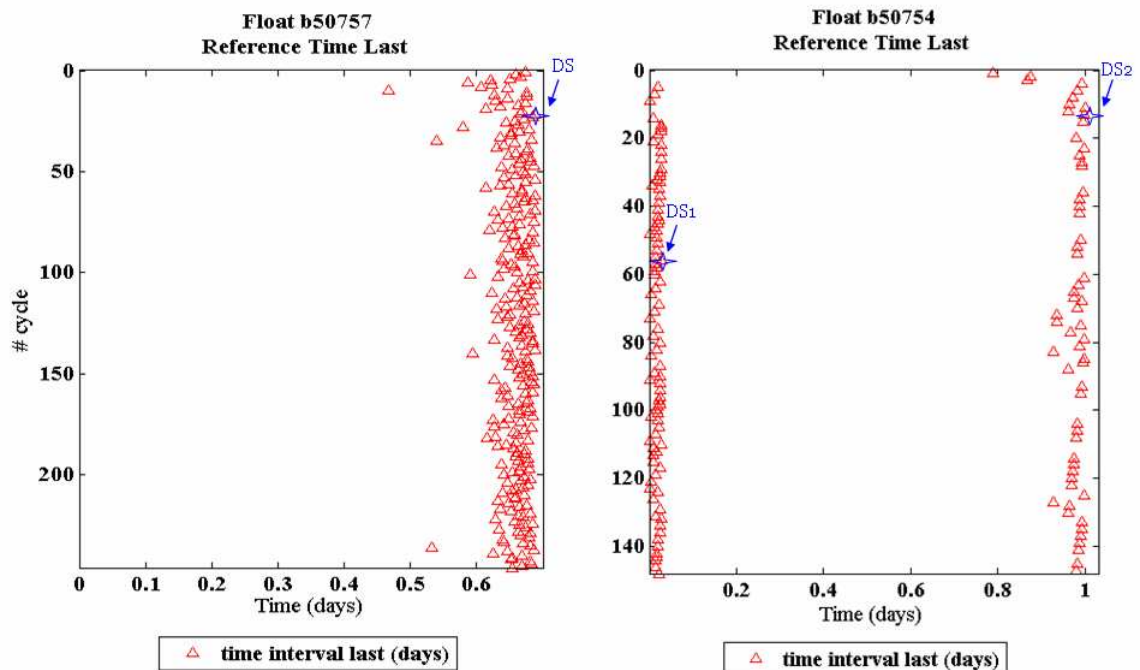


Figura 4 – Stima del tempo DS rappresentativo degli m cicli di un float, ottenuto sottraendo al set di tempi T_{last}^m il periodo del ciclo ΔT_{cyc} moltiplicato per m . Il tempo DS selezionato è il limite superiore della distribuzione (sinistra), a meno che la fase di trasmissione di alcuni cicli del float non avvenga a cavallo della mezzanotte (destra); in questo ultimo caso si sceglie di mantenere T_{last}^m come rappresentativo del tempo DS.

I tempi DS^m sono dati da:

$$DS^m = T_{last}^m - \Delta T_{cyc} m$$

La Figura 4 mostra graficamente due esempi del set di tempi DS^m . In particolare nell'immagine a sinistra si vede che tra tutti i valori di DS^m possibili, si sceglie come rappresentativo degli m cicli del float b50757 il limite superiore della distribuzione DS:

$$DS = \max(DS^m)$$

Nell'immagine a destra è mostrato un caso particolare in cui il float b50754 per alcuni cicli effettua la fase di trasmissione a cavallo della mezzanotte, per gli altri riesce a completare la fase di trasmissione subito prima della mezzanotte. Ne risulta che i valori DS^m si allineano in parte in corrispondenza di 0.03 giorni (DS_1 - 42 minuti dopo la mezzanotte) ed in parte in corrispondenza di 0.99 giorni (DS_2 - 14 minuti prima della mezzanotte).

In questi casi il tempo DS rappresentativo di tutti i cicli del float è scelto uguale a:

$$DS = \max(DS_1 + 1)$$

4. Stima dei tempi di immersione e di affioramento per un float Provor

I modelli di float Provor presenti nel Mediterraneo sono due: Provor CTS2 e Provor CTS3 (quest'ultimo è un'evoluzione del primo).

Nella Figura 5 sono rappresentate schematicamente due fasi di trasmissione successive per un Provor. I tempi DS ed AE, insieme al DE (Descent End Time), sono reperibili nel messaggio tecnico e non è dunque necessaria la loro stima.

Il tempo DPS (Descent to Profile Start Time) è registrato invece solo dal messaggio tecnico dei Provor CTS3.

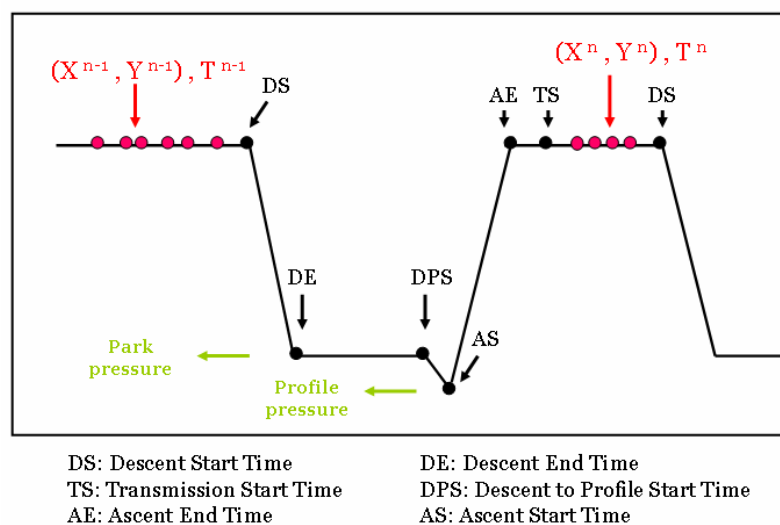


Figura 5 - Due fasi di trasmissione successiva per un float Provor. I file traiettoria di questi float contengono i dati di coordinate e tempi dei punti fissati dal satellite (circoletti rossi) ed i tempi DS, DE, DPS, AS, AE e TS

5. Stima delle posizioni di affioramento ed immersione

Le posizioni di immersione (X^{DS} , Y^{DS}) e affioramento (X^{AE} , Y^{AE}) corrispondenti ai tempi DS e AE sono estrapolate da un modello matematico scelto tra le possibili funzioni in grado di riprodurre le traiettorie superficiali tracciate dai punti discreti fissati dal satellite.

La tecnica di estrapolazione è quella proposta da Park et al.(2004), che utilizza un modello lineare multivariato in cui la traiettoria superficiale è la somma di:

moto lineare + moto inerziale + rumore

$$\Delta t_k = t_k - t_0, \quad (k=0, \dots, N-1)$$

$$x_k = u_l \Delta t_k + (x_0 - x_i) \cos(-f \Delta t_k) - (y_0 - y_i) \sin(-f \Delta t_k) + x_i$$

$$y_k = v_l \Delta t_k + (x_0 - x_i) \sin(-f \Delta t_k) + (y_0 - y_i) \cos(-f \Delta t_k) + y_i$$

dove N è il numero di punti fissati dal satellite, (x_k , y_k) sono le posizioni estrapolate ai tempi t_k , (u_l, v_l) è la velocità lineare, (x_0, y_0) è la posizione di riferimento al tempo t_0 , (x_i, y_i) è la posizione del centro del moto inerziale e f è il parametro di Coriolis locale.

L'equazione contiene sei incognite ($u_l, v_l, x_0, y_0, x_i, y_i$), che è possibile calcolare minimizzando la cost function J attraverso un modello lineare ai minimi quadrati:

$$J = \sum_k^N \frac{(x_k - x_{obs})^2 + (y_k - y_{obs})^2}{2\sigma_k^2} \quad \frac{\partial J}{\partial (u_l, v_l, x_0, y_0, x_i, y_i)} = 0$$

dove (x_{obs}, y_{obs}) sono le posizioni osservate, mentre σ_k è la deviazione standard, fornita dalla qualità delle posizioni osservate. Le posizioni fissate dai sistemi satellitari Argos sono infatti corredate da tre differenti classi di qualità nella determinazione delle posizioni: classe 1, 2 e 3 corrispondenti rispettivamente ad accuratezze di 1500m, 500m, 250m.

Una volta ottenuti i parametri u_l , v_l , x_0 , y_0 , x_i , y_i , utilizzando i tempi DS e AE stimati in precedenza, è possibile trovare le posizioni (X^{DS} , Y^{DS}) e (X^{AE} , Y^{AE}) per ogni ciclo:

$$\Delta t^{DS} = DS - t_0;$$

$$X^{DS} = u_1 \Delta t^{DS} + (x_0 - x_i) \cos(-f \Delta t^{DS}) - (y_0 - y_i) \sin(-f \Delta t^{DS}) + x_i$$
$$Y^{DS} = v_1 \Delta t^{DS} + (x_0 - x_i) \sin(-f \Delta t^{DS}) + (y_0 - y_i) \cos(-f \Delta t^{DS}) + y_i$$

$$\Delta t^{AE} = AE - t_0;$$

$$X^{AE} = u_1 \Delta t^{AE} + (x_0 - x_i) \cos(-f \Delta t^{AE}) - (y_0 - y_i) \sin(-f \Delta t^{AE}) + x_i$$
$$Y^{AE} = v_1 \Delta t^{AE} + (x_0 - x_i) \sin(-f \Delta t^{AE}) + (y_0 - y_i) \cos(-f \Delta t^{AE}) + y_i$$

In Figura 6 si può osservare un esempio del risultato prodotto dall'estrapolazione per il ciclo 142 del float b35506. In nero è rappresentata la traiettoria superficiale del float e le posizioni fissate dal satellite; la prima e l'ultima posizione del ciclo sono evidenziate da triangoli. Tutte questi punti si trovano al centro di circonferenze che rappresentano graficamente l'accuratezza nella determinazione delle posizioni, seguendo le classi 1, 2 e 3. In blu è rappresentata la traiettoria e le singole posizioni estrapolate dal modello, mentre i rombi verde e rosso rappresentano rispettivamente la posizione di immersione (X^{DS} , Y^{DS}) e quella di affioramento (X^{AE} , Y^{AE}).

I parametri caratteristici del ciclo, riportati in Figura 6 sono:

- **Inertial period:** periodo inerziale espresso in ore;
- **Time Surf. Interval:** periodo di tempo, espresso in ore, che il float trascorre in superficie per effettuare la trasmissione completa dei dati relativi a questo ciclo;
- **Time Interval Before:** periodo di tempo espresso in ore che intercorre tra l'arrivo in superficie del float ed il primo punto del ciclo fissato dal satellite;
- **Time Interval After:** periodo di tempo espresso in ore che intercorre tra l'ultimo punto del ciclo fissato dal satellite e l'immersione da parte del float;
- **Pos. Argos:** numero di punti fissati per il ciclo, dal sistema satellitare Argos;
- **Min. Cost Function:** è il risultato della valutazione della "cost function" J; questo valore fornisce un'indicazione di quanto i punti estrapolati si discostano da quelli osservati;
- **Explained Variance:** si tratta del **coefficiente di determinazione**, R^2 , parametro statistico che fornisce una misura della capacità del modello di approssimare le osservazioni:

$$R^2 = \frac{SSR}{SST}$$

$$SSR = \sum_k \frac{(x_k - \bar{x})^2 + (y_k - \bar{y})^2}{2\sigma_k^2}$$

somma della regressione dei quadrati

$$SST = \sum_k \frac{(x_{obs} - \bar{x})^2 + (y_{obs} - \bar{y})^2}{2\sigma_k^2}$$

somma totale dei quadrati

(k=1,...,N)

dove N è il numero dei punti fissati dal satellite.

Se la curva di regressione è un fit perfetto di tutti i punti osservati, allora SSR=SST ed $R^2=1$; se il fit diventa meno rappresentativo dei punti osservati, R^2 diminuisce. $R^2=0$ è il minimo valore possibile.

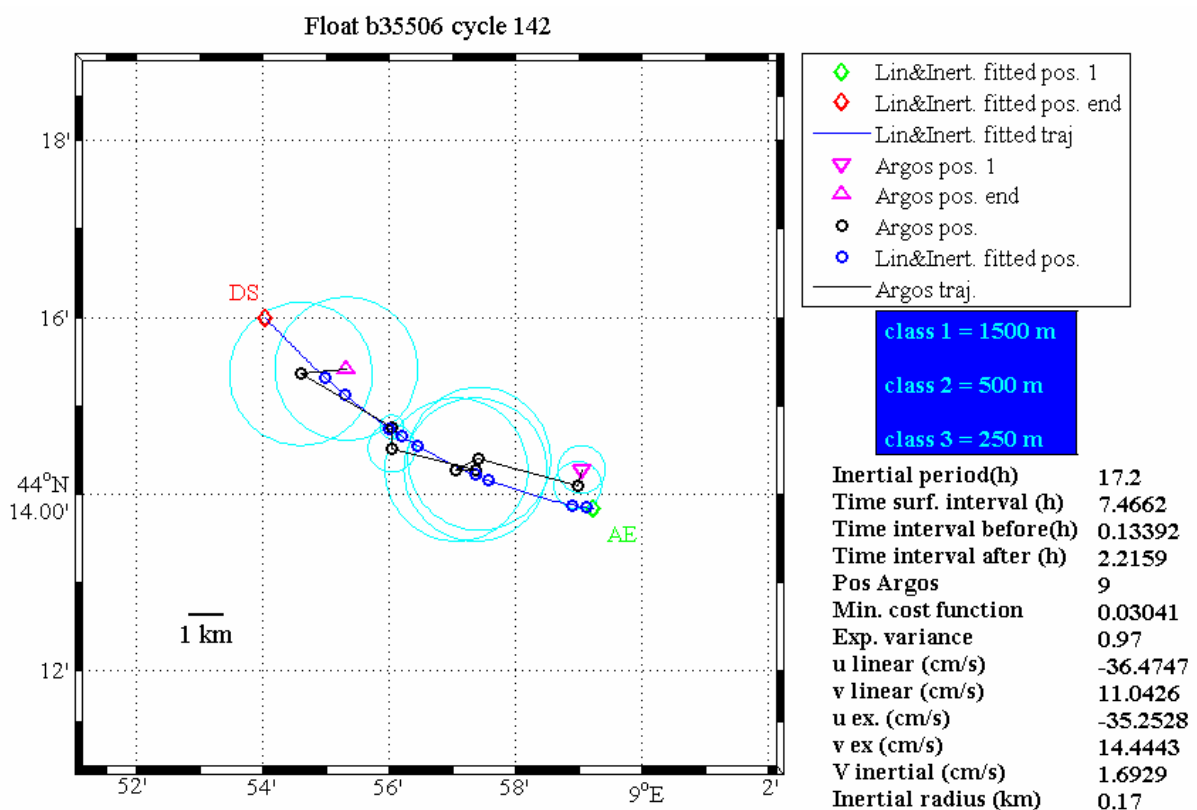


Figura 6 – Estrapolazione delle posizioni relative ai tempi DS ed AE per il ciclo 142 del float b35506; in nero la traiettoria fissata dal satellite, in blu quella estrapolata dal modello lineare multivariato. I rombi rappresentano i risultati dell'estrapolazione.

- **u_{linear} , v_{linear}** : componenti della velocità superficiale, espresse in cm/s, relative allo spostamento compreso tra il primo e l'ultimo punto fissato da satellite per ogni ciclo;
- **u_{ex} , v_{ex}** : componenti della velocità superficiale, espresse in cm/s, relative allo spostamento tra (X^{DS}, Y^{DS}) e (X^{AE}, Y^{AE}) ;
- **$V_{inertial}$** : velocità del moto inerziale in cm/s;
- **Inertial radius**: raggio del moto inerziale in km;

Nell'esempio in Figura 6, R^2 ha un valore prossimo all'unità (0.97), pertanto il modello esegue un buon fit dei dati e, verosimilmente, esegue anche una buona stima delle posizioni relative ai tempi DS e AE.

Non sempre il modello riesce a estrapolare in maniera corretta la componente inerziale del moto. Ad esempio, per il ciclo 4 del float b35506 (Figura 7), la velocità inerziale induce una sovrastima del dispiegamento orizzontale del float. Per questo motivo è bene confrontare i risultati del modello di regressione multivariata con quelli di un modello di regressione lineare semplice (Figura 8):

$$\Delta t_k = t_k - t_0, \quad (k=0, \dots, N-1)$$

$$x_k = u_1 \Delta t_k + x_0$$

$$y_k = v_1 \Delta t_k + y_0$$

le posizioni (X^{DS}, Y^{DS}) e (X^{AE}, Y^{AE}) per ogni ciclo sono date da:

$$\Delta t^{DS} = DS - t_0;$$

$$X^{DS} = u_1 \Delta t^{DS} + x_0$$

$$Y^{DS} = v_1 \Delta t^{DS} + y_0$$

$$\Delta t^{AE} = AE - t_0;$$

$$X^{AE} = u_1 \Delta t^{AE} + x_0$$

$$Y^{AE} = v_1 \Delta t^{AE} + y_0$$

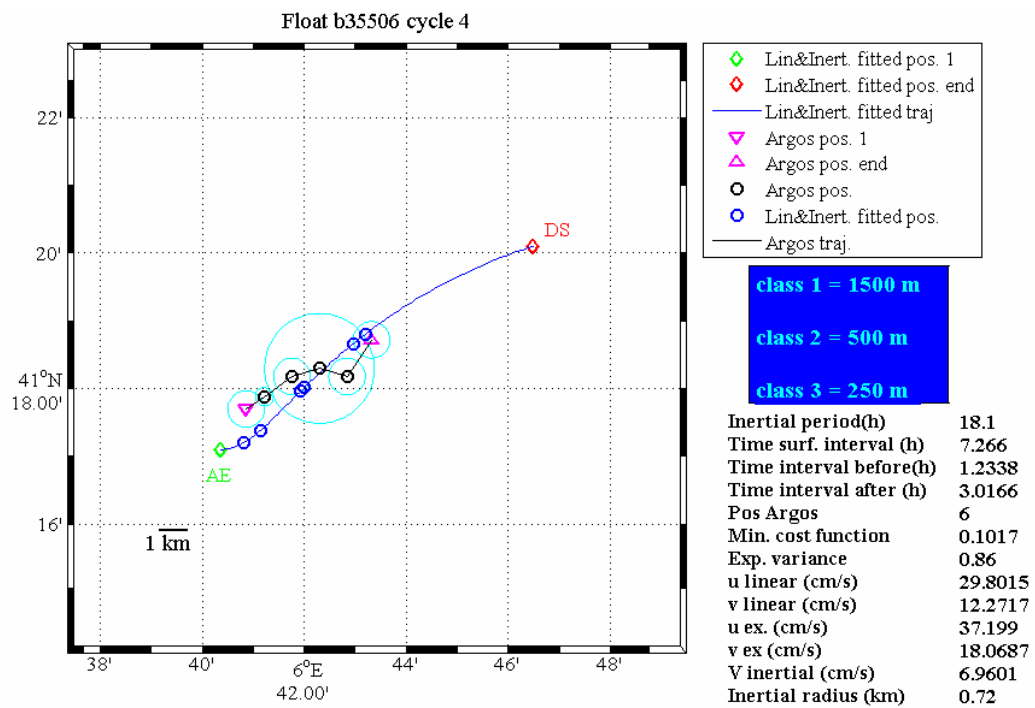


Figura 7 – Estrapolazione delle posizioni relative ai tempi DS ed AE per il ciclo 4 del float b35506, ottenuta con il metodo lineare multivariato.

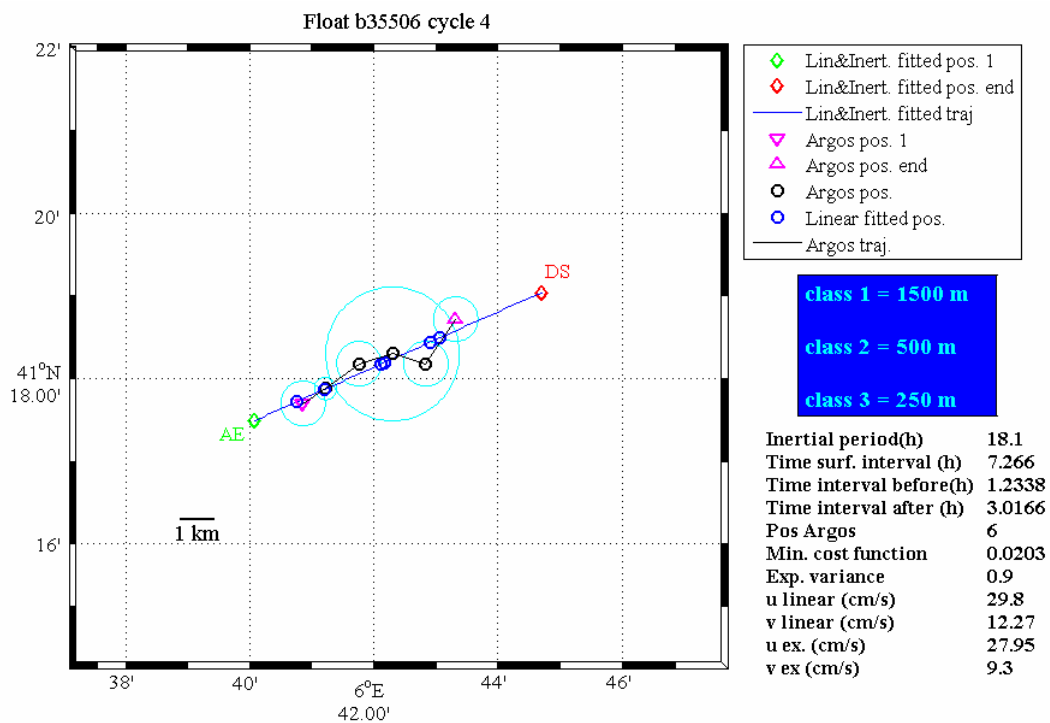


Figura 8 - Estrapolazione delle posizioni relative ai tempi DS ed AE per il ciclo 4 del float b35506, ottenuta con il metodo lineare semplice.

I coefficienti di determinazione R^2 , relativi all'extrapolazione lineare semplice vengono messi a confronto con i coefficienti relativi al modello di regressione multivariata. Il fit migliore è utilizzato nelle fasi successive del calcolo.

Dal confronto dei parametri statistici (cost function, explained variance) e delle stime di velocità superficiale, per il ciclo 4 del float b35506 (Figure 7 e 8), è possibile apprezzare come la regressione lineare semplice sia più efficace di quella multivariata.

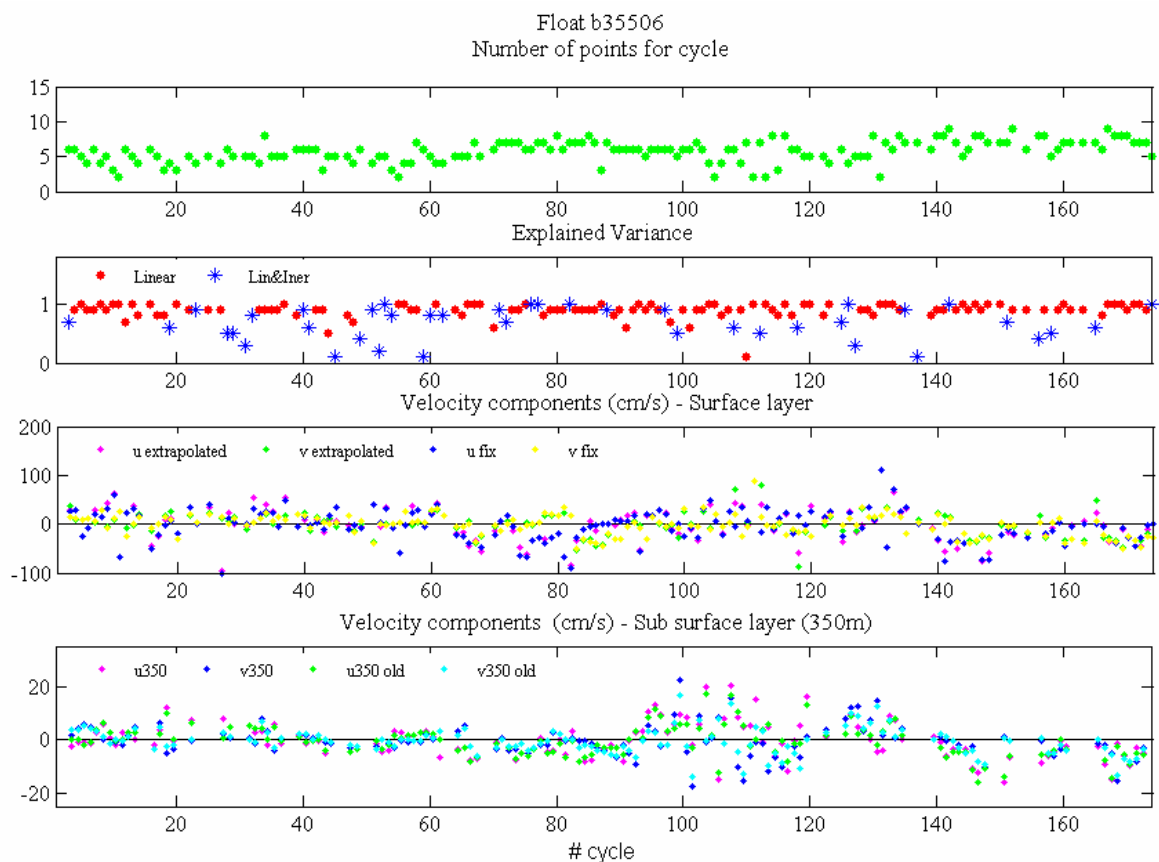


Figura 9 – Schema riassuntivo per il float b35506, relativo alla selezione, ciclo per ciclo, della migliore tecnica di extrapolazione (lineare o lineare&inerziale) per le posizioni di immersione ed affioramento, corredato dalle relative velocità superficiali, valutate per ogni ciclo, e velocità sub superficiali, valutate tra due cicli consecutivi.

La selezione, ciclo per ciclo, del miglior risultato tra le due tecniche di extrapolazione ha prodotto, per il float b35506 i risultati illustrati in Figura 9. Il primo sub-plot mostra il numero di punti fissati dal satellite, per ogni ciclo; il secondo mostra il valore di R^2_{best} scelto dal confronto dei risultati tra la regressione lineare semplice e quella multivariata; il terzo sub-plot mette a confronto le componenti della velocità, relative allo strato superficiale, per i

punti fissati dal satellite ($u_{\text{fix}}, v_{\text{fix}}$) e per i punti estrapolati ($u_{\text{extrapolated}}, v_{\text{extrapolated}}$); il quarto ed ultimo rappresenta le componenti della velocità a 350m calcolate tra due cicli successivi, sia in prima approssimazione (utilizzando l'ultima posizione fissata dal satellite al ciclo n-1 e la prima fissata al ciclo n) che in seconda approssimazione (utilizzando le posizioni corrispondenti ai tempi di affioramento ed immersione del float).

6. Valutazione dei tempi e delle posizioni corrispondenti alla profondità di parcheggio

DE – Descent End Time. Per valutare l'istante (DE) in cui un float Apex arriva alla profondità di parcheggio e le relative posizioni ($X^{\text{DE}}, Y^{\text{DE}}$), si utilizzano le coordinate superficiali ($X^{\text{DS}}, Y^{\text{DS}}$), il tempo DS e la velocità superficiale V_{ex}^{n-1} (Figura 10). Da risultati statistici ottenuti da Poulain et al. (2006), si è visto che un float Apex nel Mediterraneo, impiega mediamente due ore ad effettuare la fase di discesa alla profondità di parcheggio di 350m:

$$\Delta t_{\text{descent}} = 2 \text{ ore};$$

$$\text{DE} = \text{DS} + \Delta t_{\text{descent}};$$

imponiamo uno shear lineare di velocità lungo la verticale, che va da un valore in superficie V_{ex}^{n-1} , a zero alla profondità di parcheggio. Lo spostamento verticale del float ($\Delta X^z_{\text{descent}}, \Delta Y^z_{\text{descent}}$) è dato da :

$$\Delta X^z_{\text{descent}} = \Delta t_{\text{descent}} \frac{u_{\text{ex}}^{n-1}}{2};$$

$$\Delta Y^z_{\text{descent}} = \Delta t_{\text{descent}} \frac{v_{\text{ex}}^{n-1}}{2};$$

le coordinate corrispondenti a DE sono:

$$X^{\text{DE}} = X^{\text{DS}} + \Delta X^z_{\text{descent}}$$

$$Y^{\text{DE}} = Y^{\text{DS}} + \Delta Y^z_{\text{descent}}$$

DPS – Descent to Profile Start Time. Per valutare DPS e le relative posizioni (X^{DPS} , Y^{DPS}) per un Apex, utilizziamo le coordinate superficiali (X^{AE} , Y^{AE}), il tempo AE e la velocità superficiale V_{ex}^n (Figura 10). Valutiamo Δt_{ascent} assumendo che il float non compia spostamento orizzontale al di sotto della profondità di parcheggio (350m); la velocità media di ascesa è di 0.08 m/s (User Manual – Apex SBE Profiler):

$$\Delta t_{ascent} = 350m / 0.08m;$$

$$DPS = AE + \Delta t_{ascent};$$

imponiamo uno shear lineare di velocità lungo la verticale, che va da un valore in superficie V_{ex}^n , a zero alla profondità di parcheggio. Lo spostamento verticale del float ($\Delta X_{ascent}^z, \Delta Y_{ascent}^z$) è dato da :

$$\Delta X_{ascent}^z = \Delta t_{ascent} \frac{u_{ex}^n}{2};$$

$$\Delta Y_{ascent}^z = \Delta t_{ascent} \frac{v_{ex}^n}{2};$$

le coordinate corrispondenti a DPS sono:

$$X^{DPS} = X^{AE} - \Delta X_{ascent}^z$$

$$Y^{DPS} = Y^{AE} - \Delta Y_{ascent}^z$$

La velocità a 350m, V_{350} , ottenuta utilizzando la distanza tra (X^{AE} , Y^{AE}) e (X^{DPS} , Y^{DPS}) ed i tempi DE e DPS, è impiegata per reiterare il processo appena descritto. Lo shear di velocità imposto, assumerà il valore V_{ex}^{n-1} o a V_{ex}^n in superficie ($z = 0$), rispettivamente per le fasi di discesa e ascesa,; avrà invece il valore di V_{350} , a $z = 350m$. L'operazione di reiterazione si ripete fino a quando il valore di V_{350} non si stabilizza, risultando uguale a quello ottenuto dal ciclo precedente.

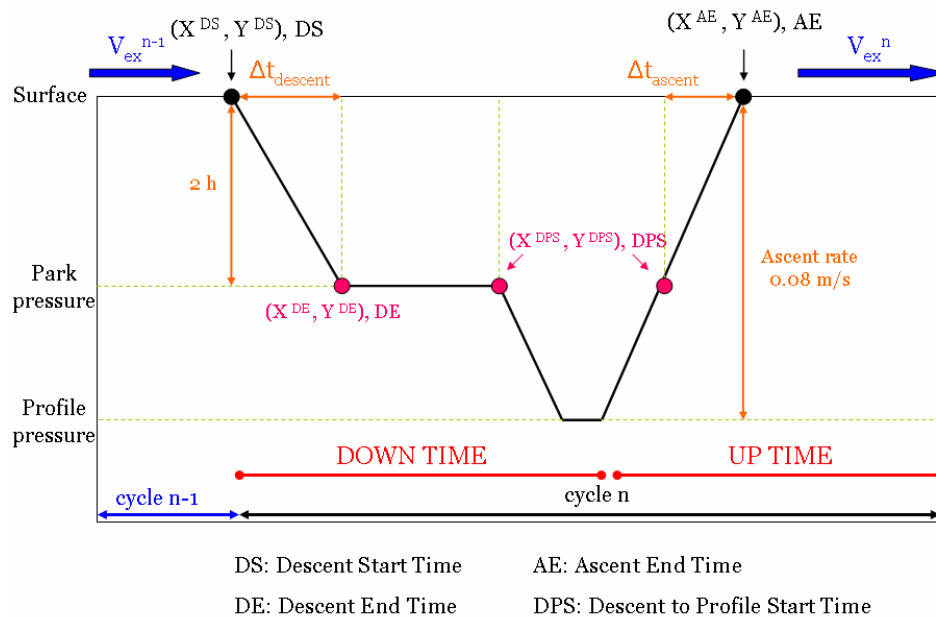


Figura 10 – Determinazione di $(X^{DE}, Y^{DE}), DE$ e di $(X^{DPS}, Y^{DPS}), DPS$ attraverso l'utilizzo delle velocità superficiali V_{ex}^{n-1} e V_{ex}^n , degli intervalli di tempo Δt_{ascent} e $\Delta t_{descent}$, della velocità media di ascesa del float e dell'approssimazione dello shear di velocità relativo alle fasi di ascesa e di discesa.

Il metodo di determinazione di DE e DPS per un Apex è esteso anche ai Provor, con qualche variante. I Provor CTS3, ci forniscono già il valore di DE e DPS, quindi è necessario solo conoscere la velocità di ascesa verso la superficie (0.1 m/s) per valutare $\Delta t_{descent}$.

I Provor CTS2 registrano, invece, il tempo DE, ma non il tempo DPS. Per ottenere una stima di DPS per questo strumento utilizziamo le statistiche condotte per i CTS3, relative al tempo medio che essi trascorrono a 350m (Δt_{350}^{CTS3}). Poiché i Provor CTS2 e CTS3 lavorano in modo identico e sono programmati con la stessa configurazione 'Park & Profile', possiamo ritenere valido il Δt_{350}^{CTS3} anche per i CTS2. Il tempo DPS_{CTS2} sarà dunque dato da:

$$DPS_{CTS2} = DE_{CTS2} + \Delta t_{350}^{CTS3}$$

Alcuni esempi dei risultati di questo processo sono mostrati nelle Figure 11, 12 e 13, relative ad un Apex, un Provor CTS2 ed un Provor CTS3. Tutte le immagini inquadrano due cicli consecutivi di un float. In nero le traiettorie osservate ed in blu quelle estrapolate; i triangoli

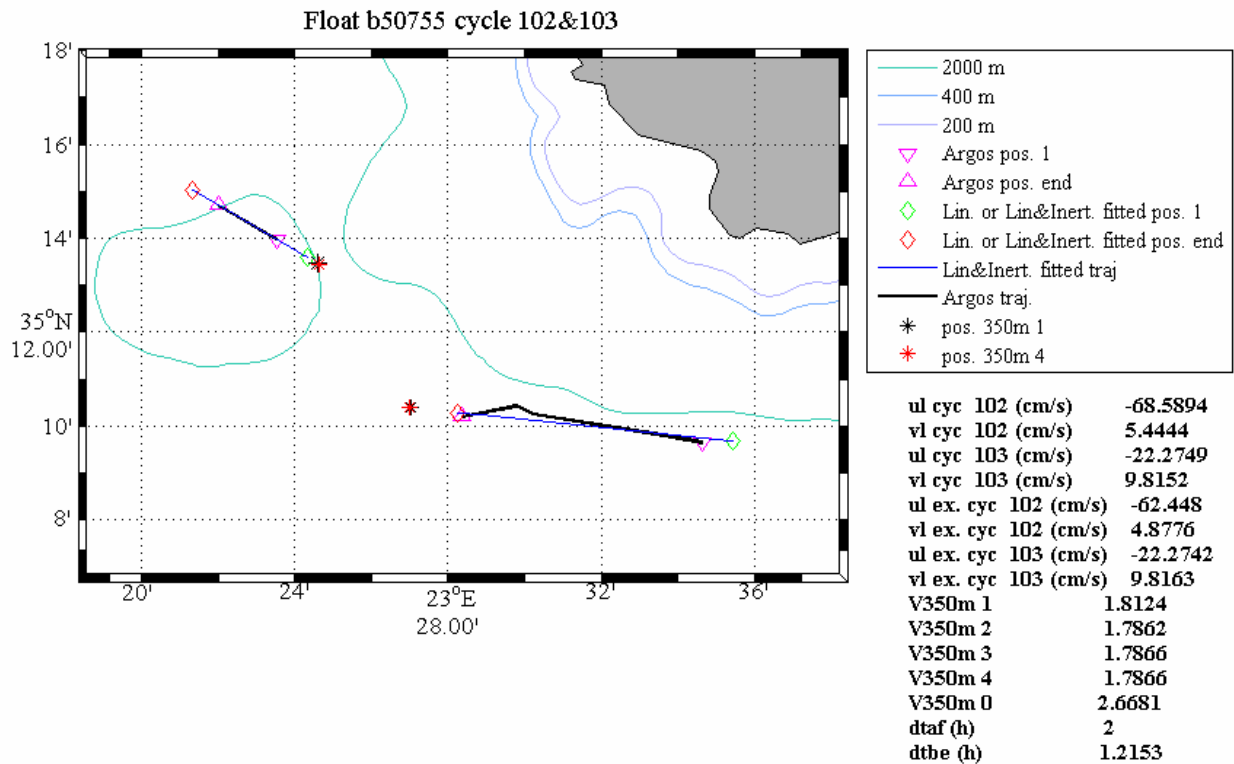


Figura 11 – Risultati del processo di estrapolazione delle posizioni (X^{DE} , Y^{DE}) e (X^{DPS} , Y^{DPS}) per un float Apex.

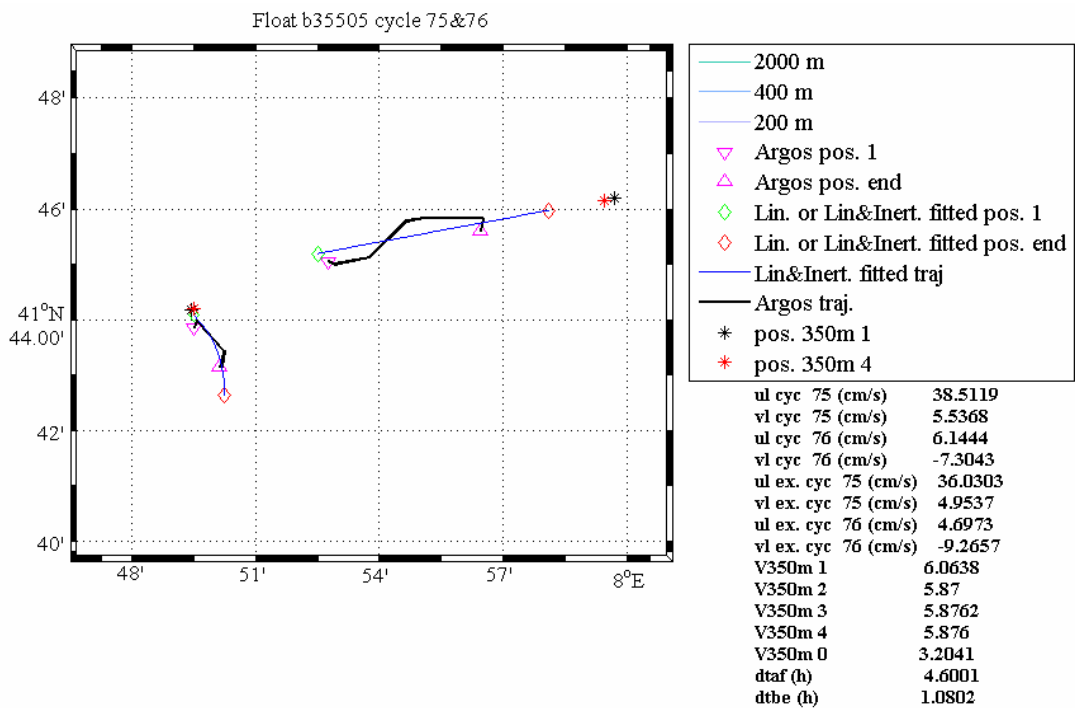


Figura 12- Risultati del processo di estrapolazione delle posizioni (X^{DE} , Y^{DE}) e (X^{DPS} , Y^{DPS}) per un float Provor CTS2.

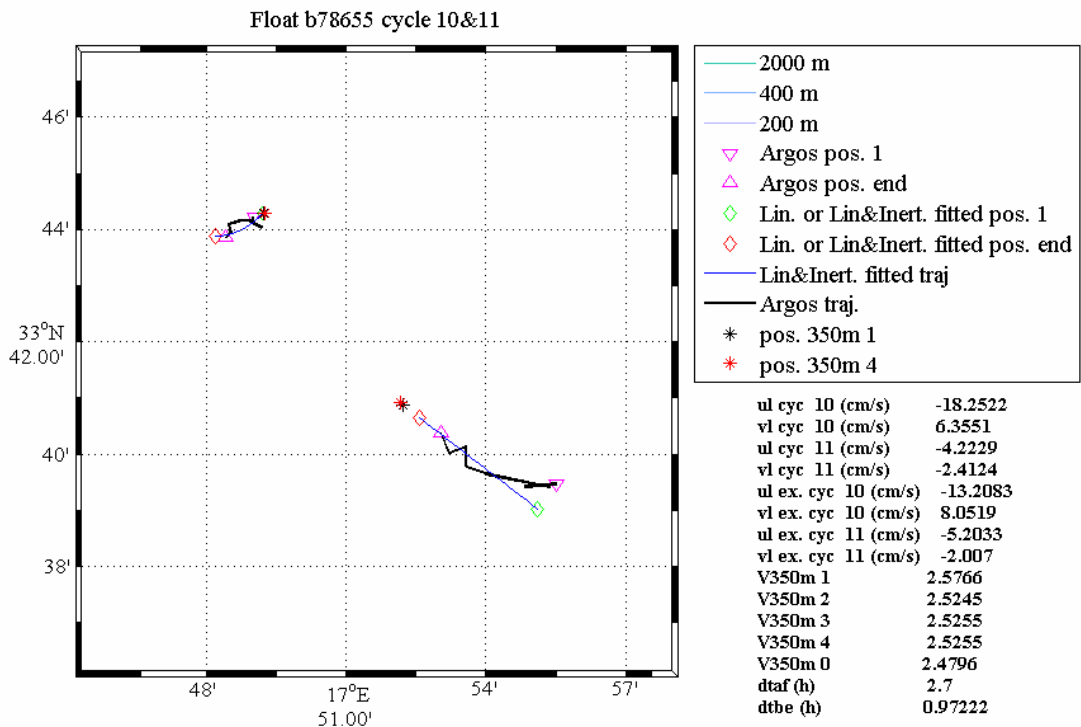


Figura 13 – Risultati del processo di estrapolazione delle posizioni (X^{DE} , Y^{DE}) e (X^{DPS} , Y^{DPS}) per un float Provor CTS3.

indicano la prima e l'ultima posizione di ogni ciclo; i rombi verdi indicano le posizioni di immersione, i rombi rossi quelle di affioramento. Gli asterischi indicano le posizioni a 350 m; in particolare l'asterisco nero individua la posizione ottenuta come risultato della prima reiterazione, l'asterisco rosso indica il risultato della quarta reiterazione.

A destra di tutte le immagini ritroviamo un box di testo con una serie di informazioni relative ai cicli:

- **ul**, **vl**, sono le componenti della velocità media di ogni ciclo, valutata tra la prima e l'ultima posizione fissata dal satellite, espresse in cm/s;
- **ul_{ex}**, **vl_{ex}** sono le componenti della velocità media estrapolata, valutata tra la prima e l'ultima posizione superficiale estrapolata dal modello lineare, espresse in cm/s;
- **V₃₅₀** rappresenta le velocità a 350 m; i numeri 1, 2, 3 e 4 rappresentano i risultati delle reiterazioni successive, mentre 'V₃₅₀ 0' rappresenta la velocità a 350 m ottenuta con i dati grezzi;
- **dt_{af}** è il tempo che il float impiega ad arrivare dalla superficie a 350m; **dt_{be}** è l'intervallo di tempo che il float impiega per arrivare da 350 m fino alla superficie.

In Figura 14 sono riassunti i risultati del processo di calcolo per il float b35505. L'ultimo sub-plot mette a confronto le velocità a 350m valutate in seconda approssimazione (utilizzando le posizioni corrispondenti ai tempi di affioramento ed immersione del float) e quelle valutate in terza approssimazione (utilizzando le posizioni corrispondenti ai tempi di arrivo e partenza dalle profondità di parcheggio).

In Appendice A si possono osservare, nella stessa forma dell'esempio in Figura 14, i risultati relativi agli altri float del Mediterraneo.

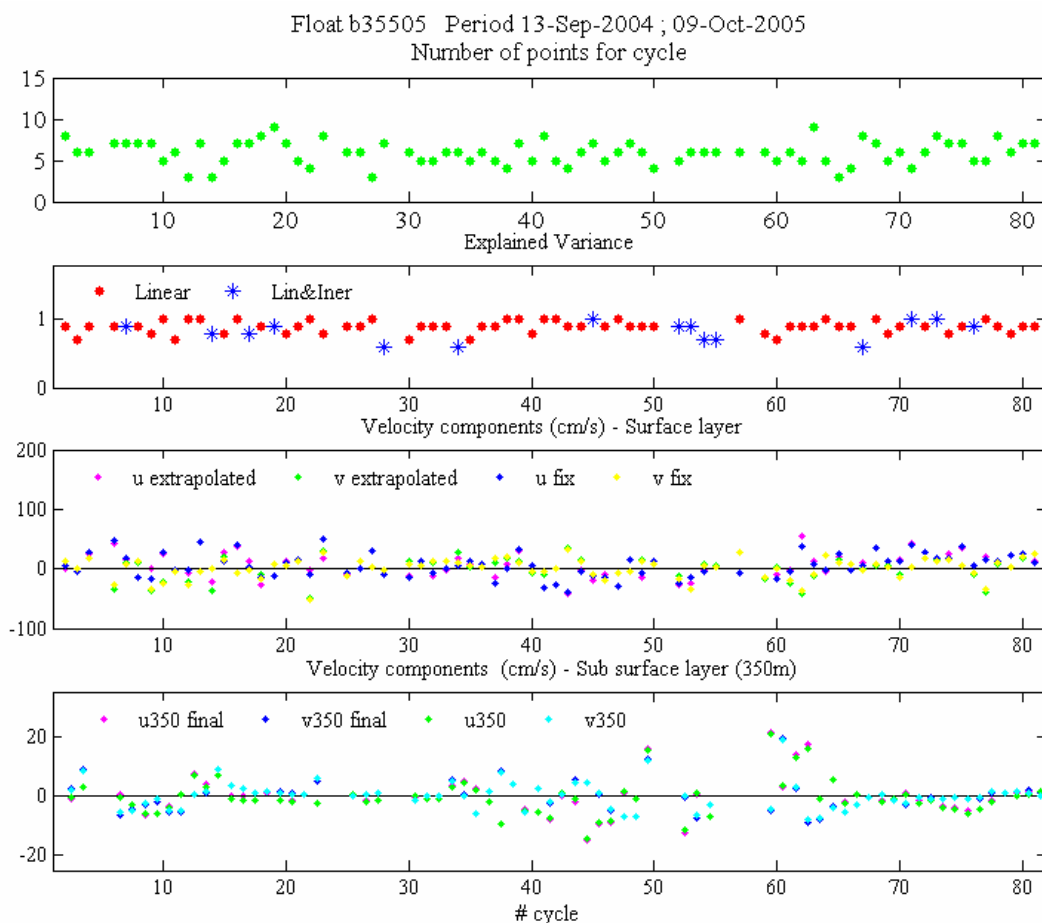


Figura 14 - Schema riassuntivo dei risultati per il float b35505. Il primo sub-plot mostra il numero di punti fissati dal satellite per il singolo ciclo; il secondo sub-plot è relativo alla selezione della migliore tecnica di estrapolazione (lineare o lineare&inerziale) per le posizioni di immersione ed affioramento; il terzo sub-plot mostra le velocità superficiali fissate (u_{fix} , v_{fix}) e quelle estrapolate ($u_{extrapolated}$, $v_{extrapolated}$), valutate per ogni ciclo. L'ultimo sub-plot mette a confronto le velocità sub superficiali ($u_{350\ final}$, $v_{350\ final}$), risultato finale di tutto il processo di estrapolazione, e le velocità in seconda approssimazione (u_{350} , v_{350}), ottenute utilizzando le posizioni di immersione ed affioramento.

7. Conclusioni

In questo rapporto tecnico sono stati presi in esame i dati di traiettoria provenienti da 36 profilatori Argo, selezionati tra tutti i float rilasciati nel Mediterraneo dal 2003 in poi, in base alle loro caratteristiche cicliche (cicli di 5 giorni; profondità di parcheggio di 350m; profondità massima di profilo di 700-2000m).

Il lavoro punta al miglioramento delle stime di corrente sub-superficiale in prima approssimazione, ottenute utilizzando le coordinate degli spostamenti in superficie del float. A questo scopo, si è partiti con la determinazione della migliore stima possibile dello spostamento superficiale, attraverso la valutazione dei tempi di immersione ed affioramento del float e la successiva estrapolazione, grazie all'utilizzo di un modello di regressione lineare (semplice o multivariato), delle posizioni corrispondenti a tali tempi. Si è proceduto, quindi, con la determinazione della migliore stima dello spostamento sub-superficiale, mediante la valutazione dei tempi di arrivo e partenza dalla profondità di parcheggio e la successiva stima delle posizioni corrispondenti, ottenuta dall'applicazione di uno shear lineare di velocità lungo la verticale (da 0 a 350m).

I tempi e le posizioni stimate a 350m (terza approssimazione) vengono quindi utilizzati per valutare le componenti zonali (u_{350}) e meridionali (v_{350}) del campo di velocità e la velocità totale (V_{350}), e metterli a confronto con i risultati ottenuti dai dati grezzi in prima approssimazione (u_{old} , v_{old} , V_{old}).

Dagli scatter plot realizzati, relativi alle componenti della velocità ed alla velocità totale (Figure 15, 16 e 17), è evidente una correlazione lineare positiva tra il set di dati ottenuti in terza approssimazione e quelli grezzi. I colori dei punti cambiano in base alle classi della "Explained Variance" in cui rientrano.

Le Tabelle 1, 2 e 3 riassumono rispettivamente le statistiche relative al confronto tra le componenti zonali (u_{350} ed u_{old}), tra le componenti meridionali (v_{350} e v_{old}) e tra le velocità totali (V_{350} e V_{old}); sono stati trascurati i punti in cui lo skill è inferiore a 0.6.

Il numero totale di osservazioni selezionato è 2838; la maggior parte di essi, 2505, si concentra nelle classi dove lo skill è migliore (> 0.8). In queste classi, la differenza media tra le variabili grezze e quelle stimate risulta trascurabile; la deviazione standard è inferiore a 7.3 cm/s ed il coefficiente di correlazione è ~ 0.9 .

Dai confronti effettuati, consideriamo il modello di estrapolazione applicato valido per tutti i cicli consecutivi con skill superiore a 0.8; prendiamo in considerazione il data set delle velocità a 350m calcolate tra questi cicli per la rappresentazione del campo di correnti sub-superficiali.

Tabella 1 - Statistiche relative alla componente zonale del campo di velocità.

Explain Varince	Number of observations	mean($u_{350}-u_{old}$) (cm/s)	Standard Deviation (cm/s)	Correlation Coefficient
Skill \geq 0.6	2838	-0.11	7.49	0.82
Skill \geq 0.7	2745	-0.14	7.34	0.85
Skill \geq 0.8	2505	-0.11	7.27	0.88
Skill \geq 0.9	1965	-0.13	7.57	0.88

Tabella 2 - Statistiche relative alla componente meridionale del campo di velocità.

Explain Varince	Number of observations	mean($v_{350}-v_{old}$) (cm/s)	Standard Deviation (cm/s)	Correlation Coefficient
Skill \geq 0.6	2838	-0.02	5.44	0.78
Skill \geq 0.7	2745	-0.01	5.34	0.81
Skill \geq 0.8	2505	0.06	5.19	0.87
Skill \geq 0.9	1965	-0.06	5.19	0.89

Tabella 3 - Statistiche relative al campo di velocità totale.

Explain Varince	Number of observations	mean($V_{350}-V_{old}$) (cm/s)	Standard Deviation (cm/s)	Correlation Coefficient
Skill ≥ 0.6	2838	0.67	6.50	0.74
Skill ≥ 0.7	2745	0.60	6.30	0.79
Skill ≥ 0.8	2505	0.49	6.09	0.85
Skill ≥ 0.9	1965	0.39	6.27	0.85

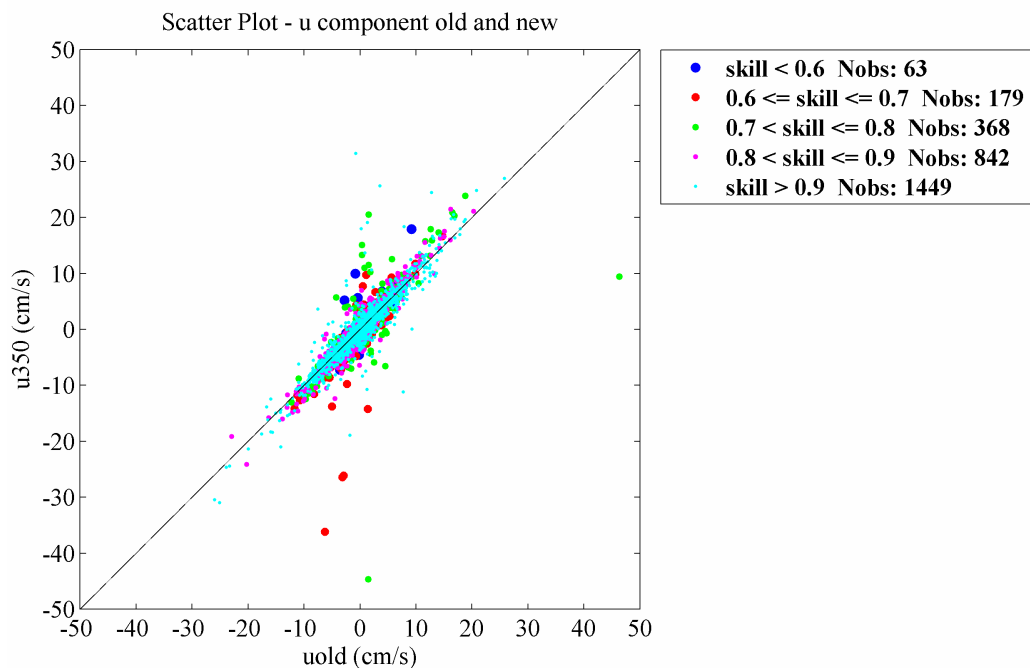


Figura 15 – Scatter plot delle componenti zonali della velocità ottenute dalle posizioni fissate dal satellite (u_{old}) e dalle posizioni valutate di arrivo e partenza dalla profondità di parcheggio (u_{350}). I differenti colori si riferiscono a differenti classi di skill.

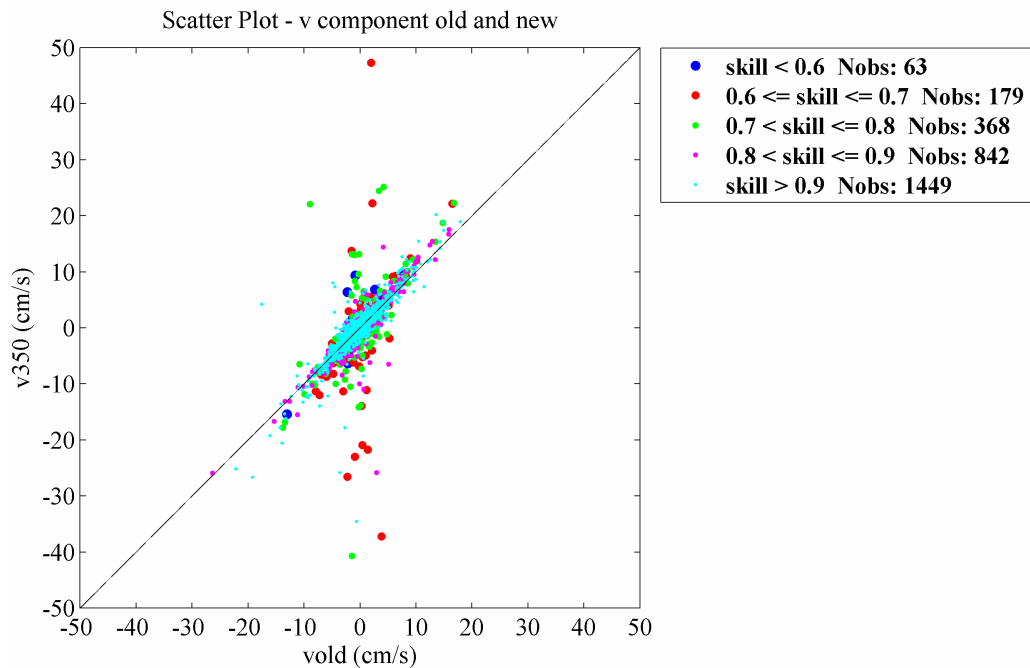


Figura 16 - Scatter plot delle componenti meridionali della velocità ottenute dalle posizioni fissate dal satellite (vold) e dalle posizioni valutate di arrivo e partenza dalla profondità di parcheggio (v350). I differenti colori si riferiscono a differenti classi di skill.

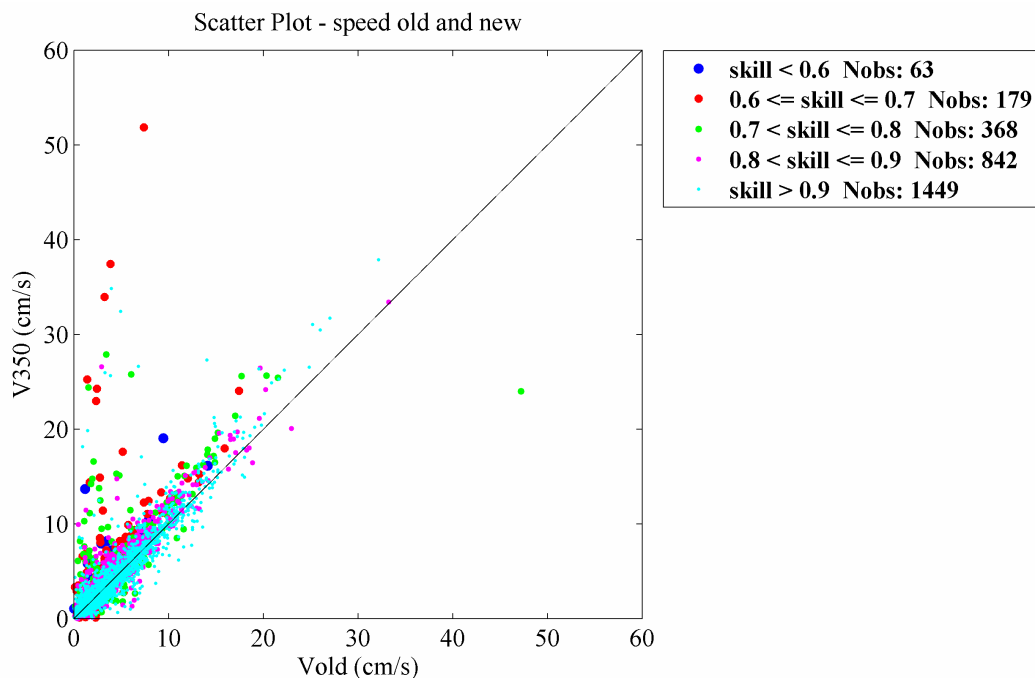


Figura 17 - Scatter plot della velocità totale ottenuta dalle posizioni fissate dal satellite (Vold) e dalle posizioni valutate di arrivo e partenza dalla profondità di parcheggio (V350). I differenti colori si riferiscono a differenti classi di skill.

8. Appendice A

Le figure, contenute in questa appendice, si riferiscono ai risultati della valutazione delle correnti sub superficiali, per 36 float Argo rilasciati nel Mediterraneo a partire dal 2003 e caratterizzati da cicli della durata di 5 giorni.

Le immagini riassumono sinteticamente i diversi step del processo di calcolo che ha portato all'individuazione delle componenti della velocità alla profondità di parcheggio ($u_{350\text{final}}, v_{350\text{final}}$).

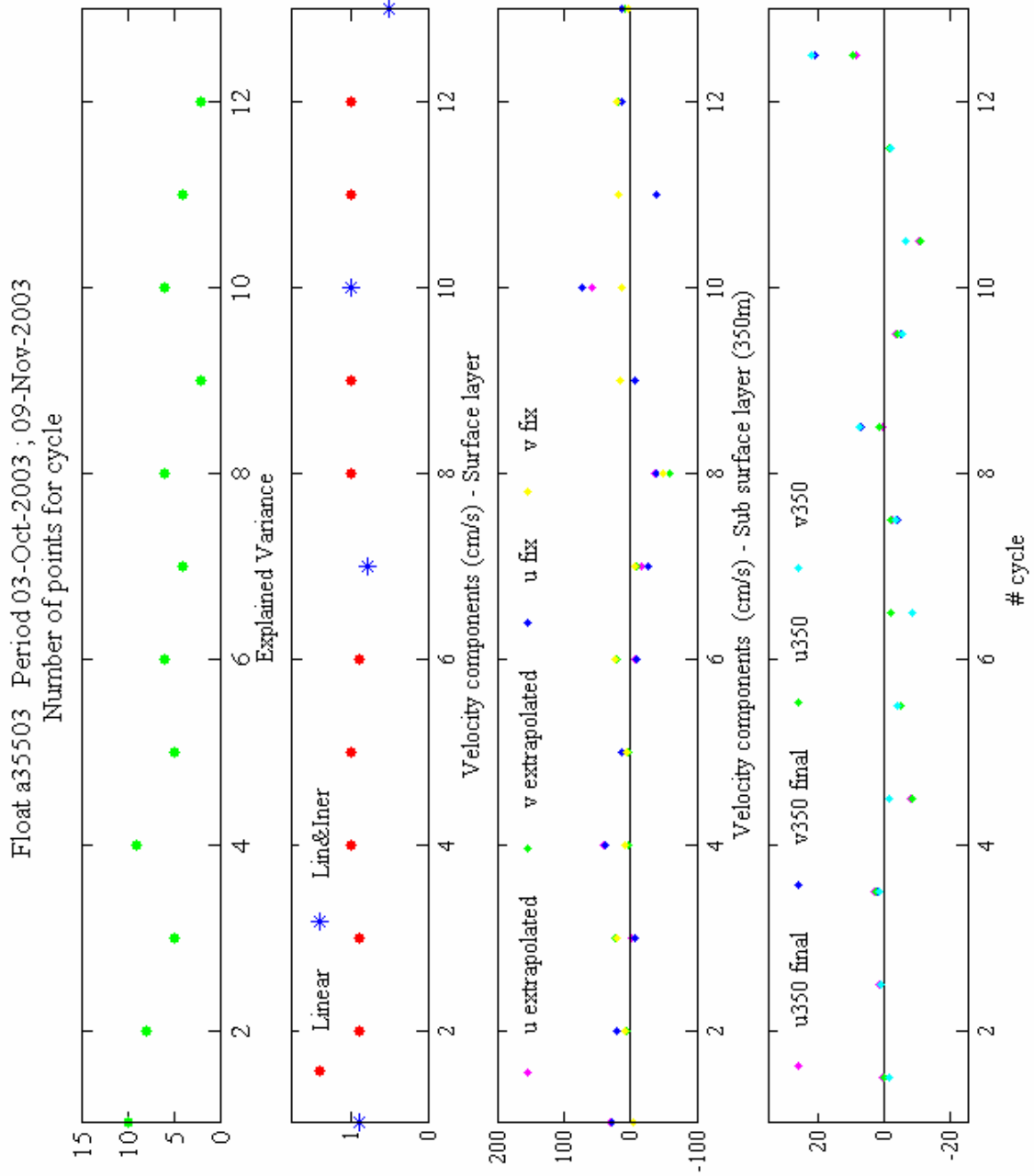
Subplot 1: numero di punti fissati dal satellite per ogni ciclo;

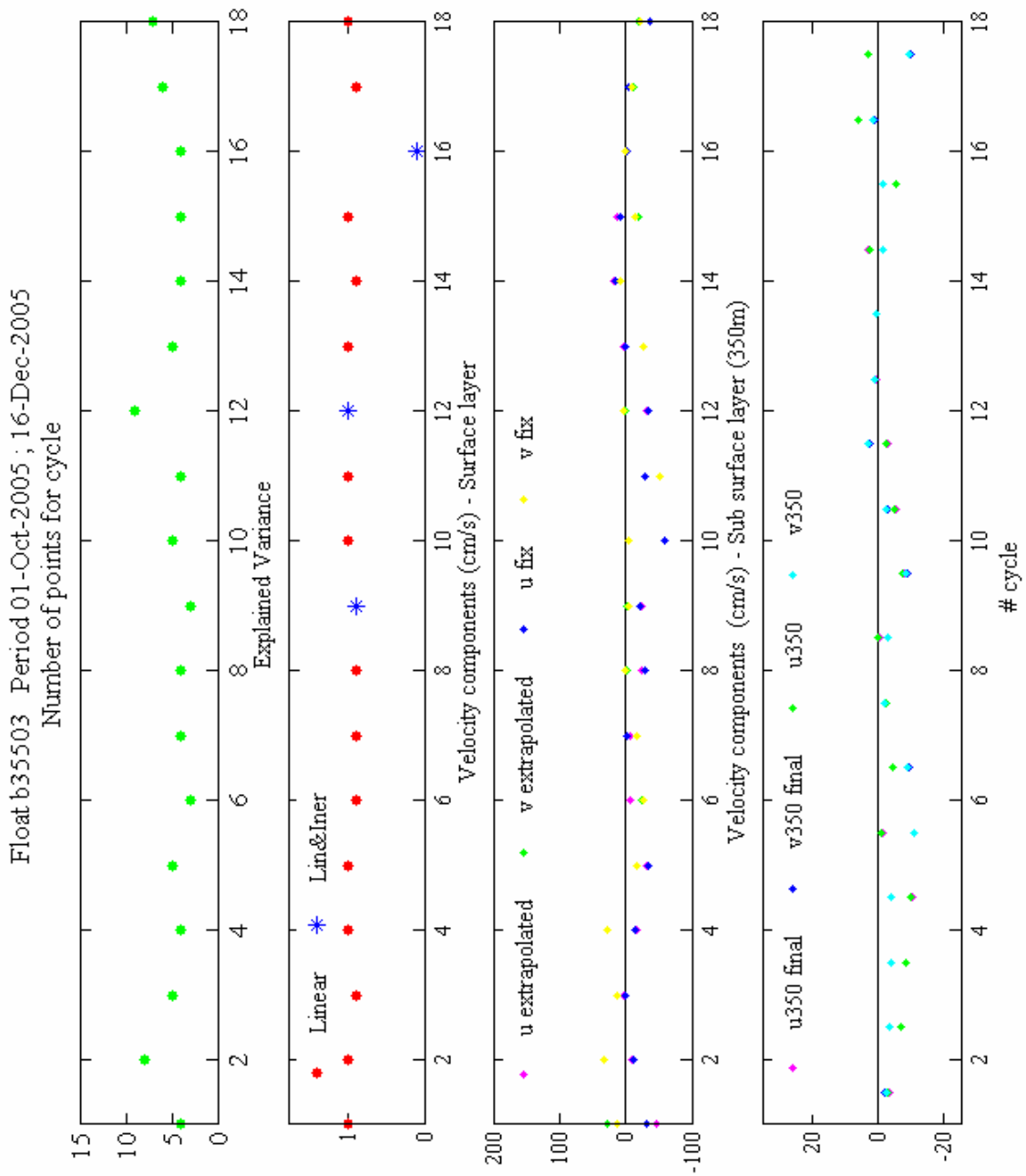
Subplot 2: valore dell'explained variance (R^2) e scelta dell'estrapolazione applicata per ogni ciclo (lineare o lineare&inerziale);

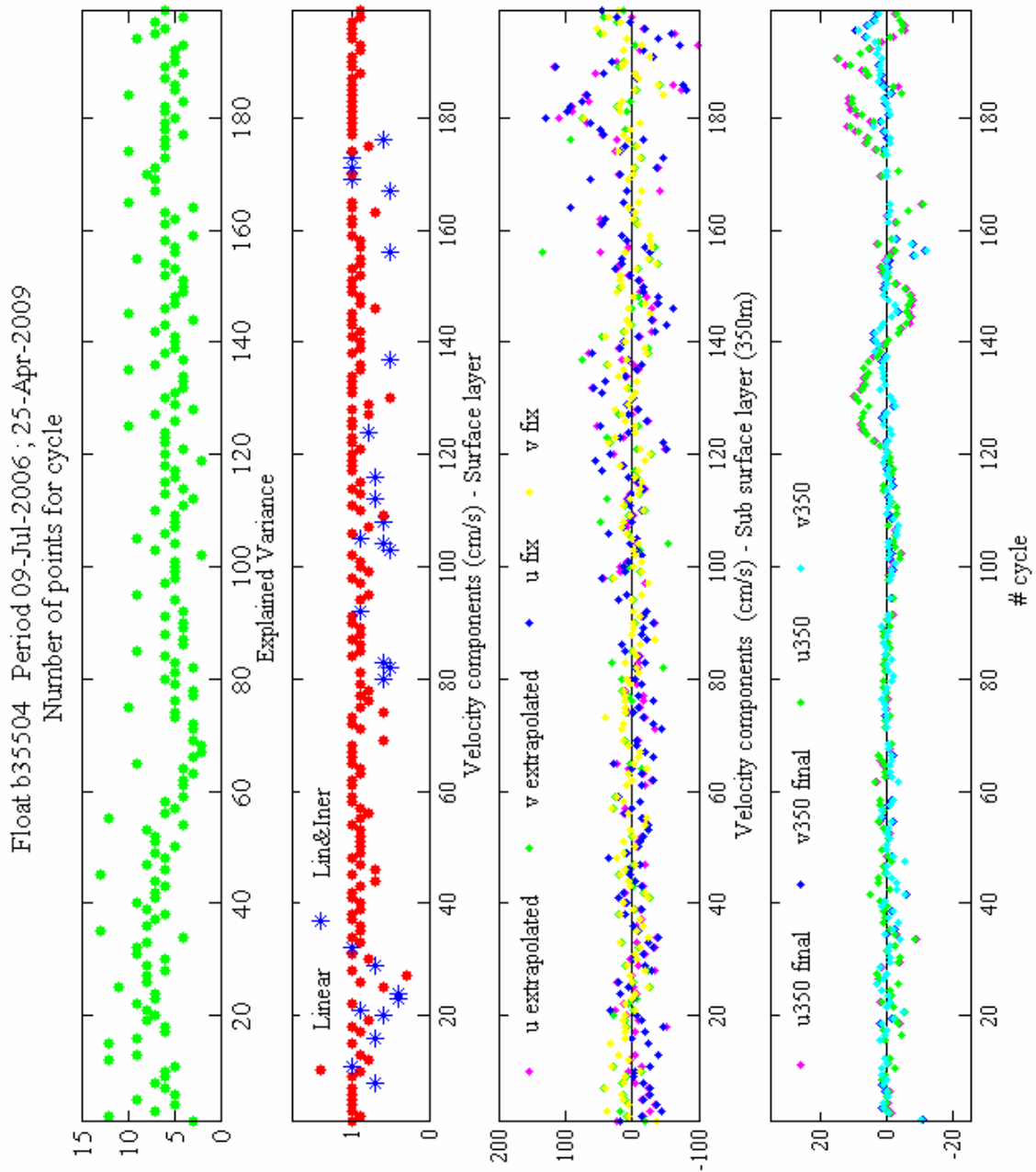
Subplot 3: componenti della velocità, relative allo straro superficiale, per i punti fissati dal satellite ($u_{\text{fix}}, v_{\text{fix}}$) e per i punti estrapolati ($u_{\text{extrapolated}}, v_{\text{extrapolated}}$);

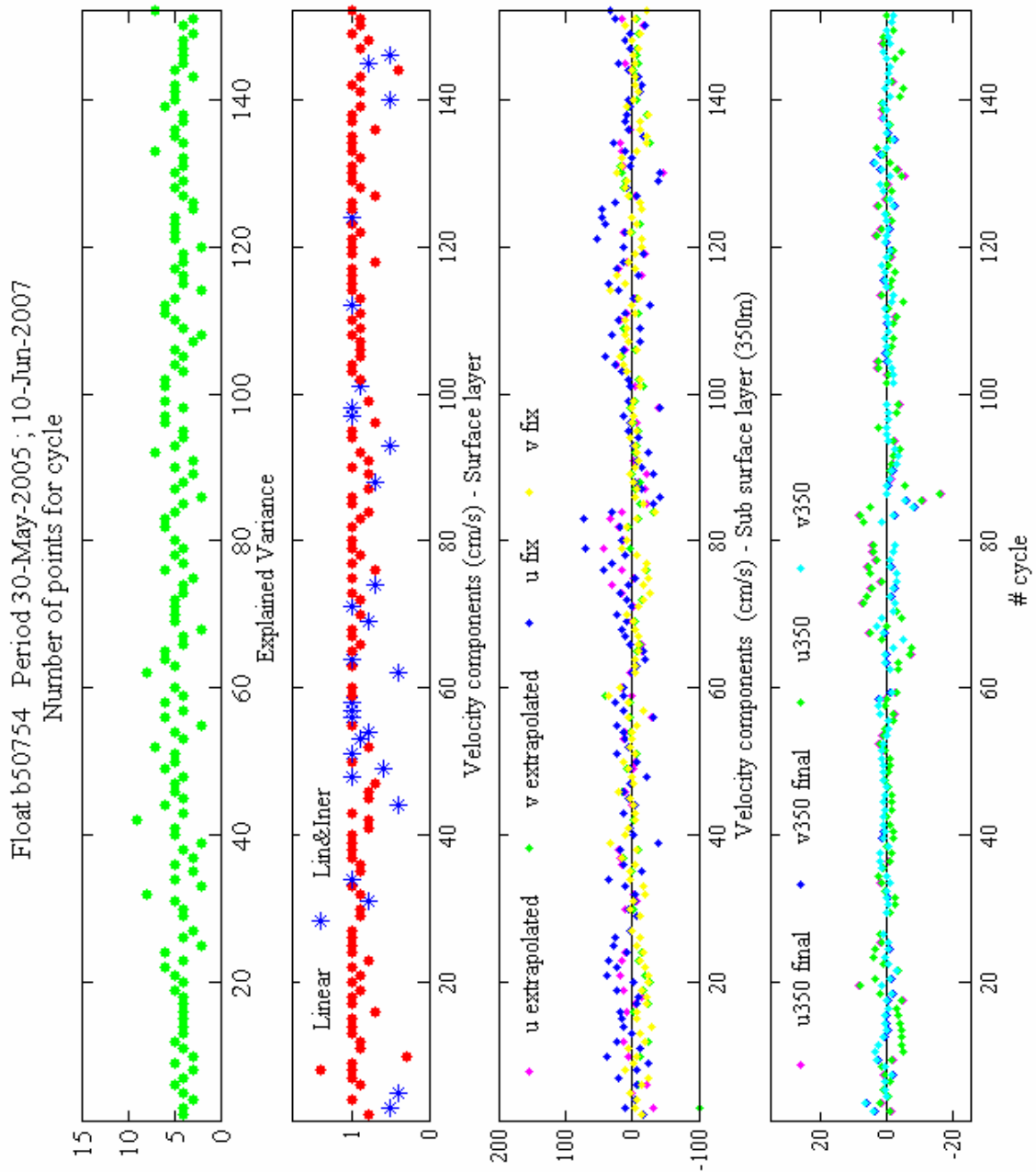
Subplot 4: componenti della velocità a 350m, considerando i punti di immersione ed affioramento del float (u_{350}, v_{350}) ed i punti di arrivo e partenza dalla profondità di parcheggio ($u_{350\text{ final}}, v_{350\text{ final}}$) .

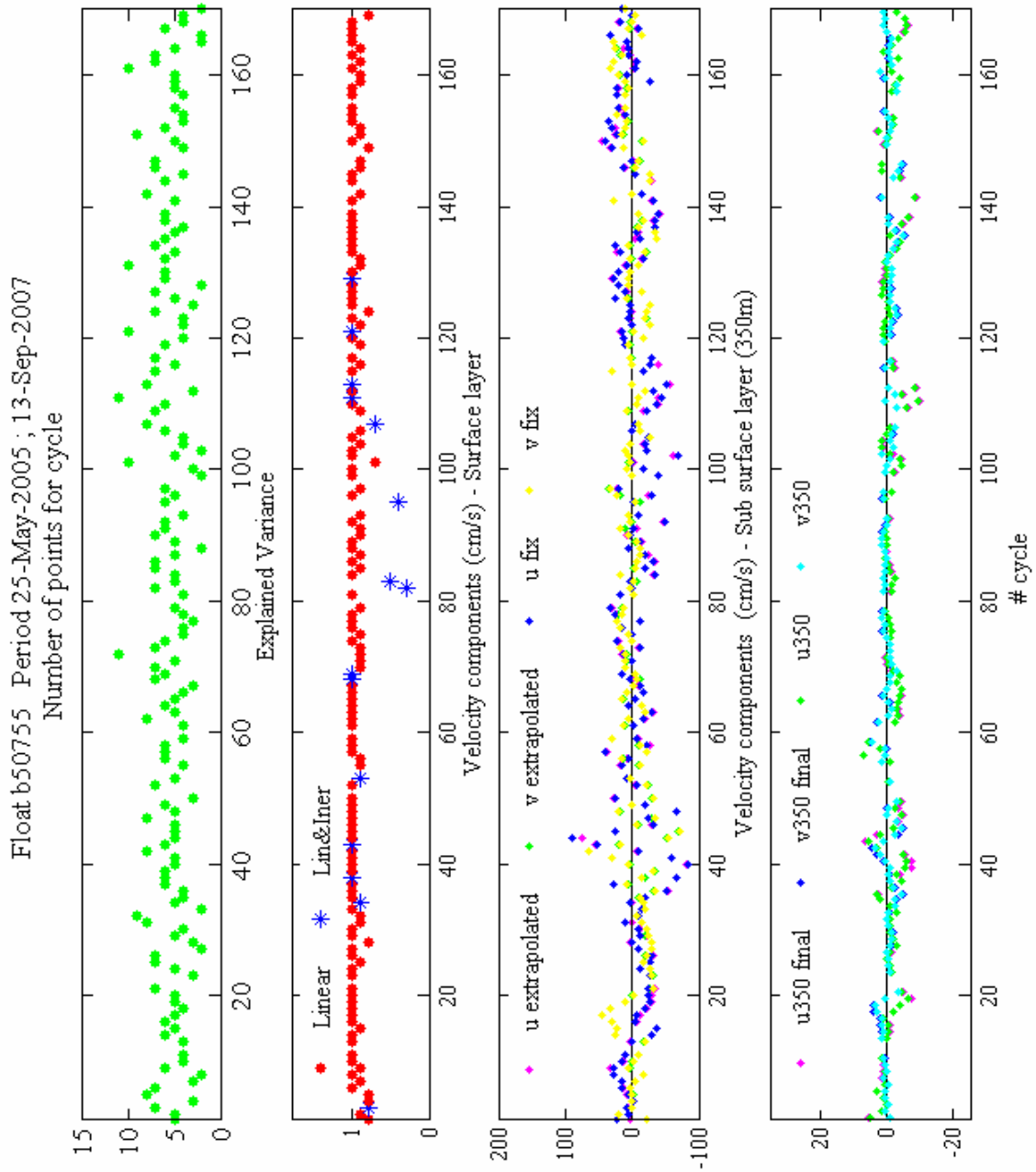
Apex



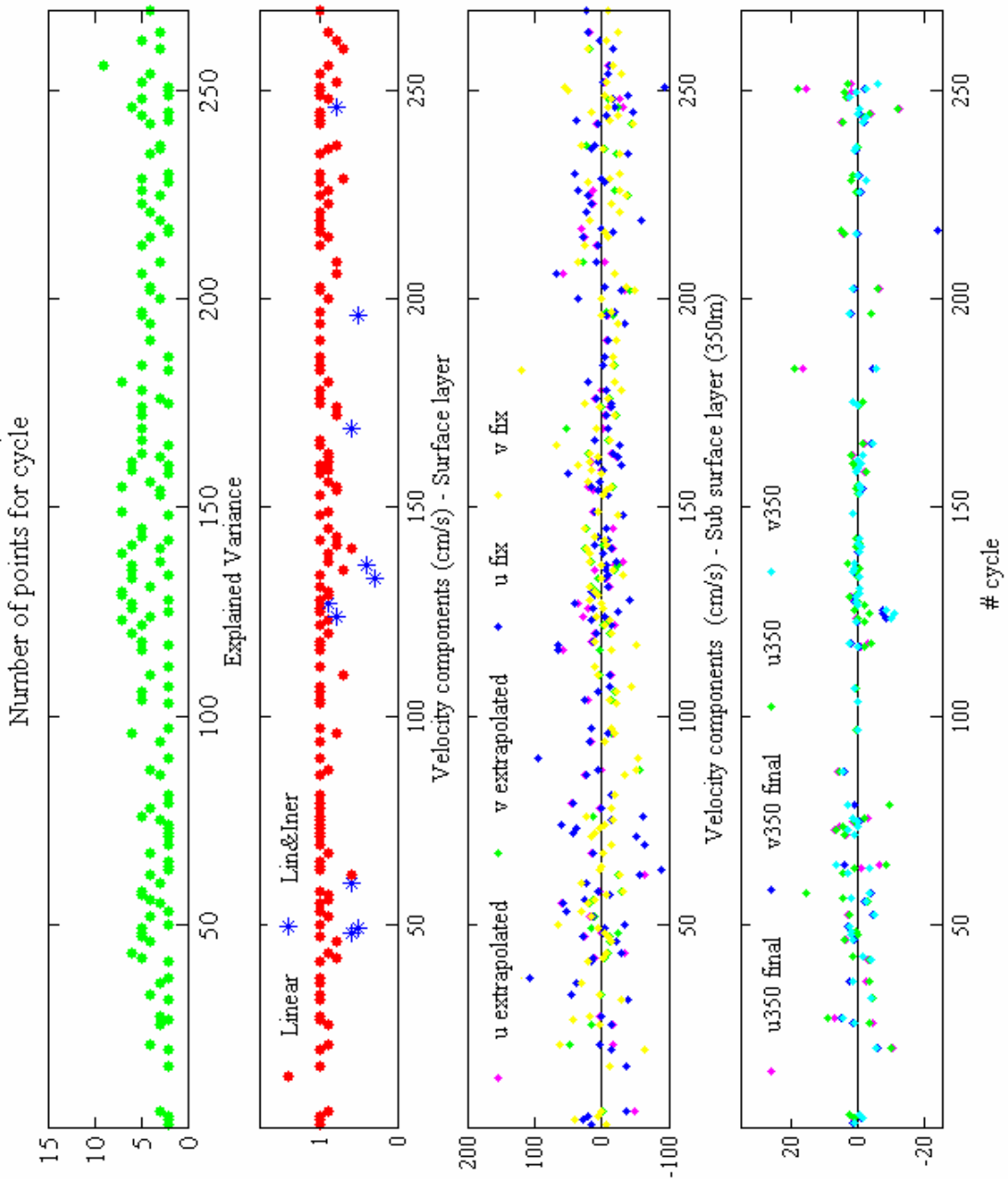


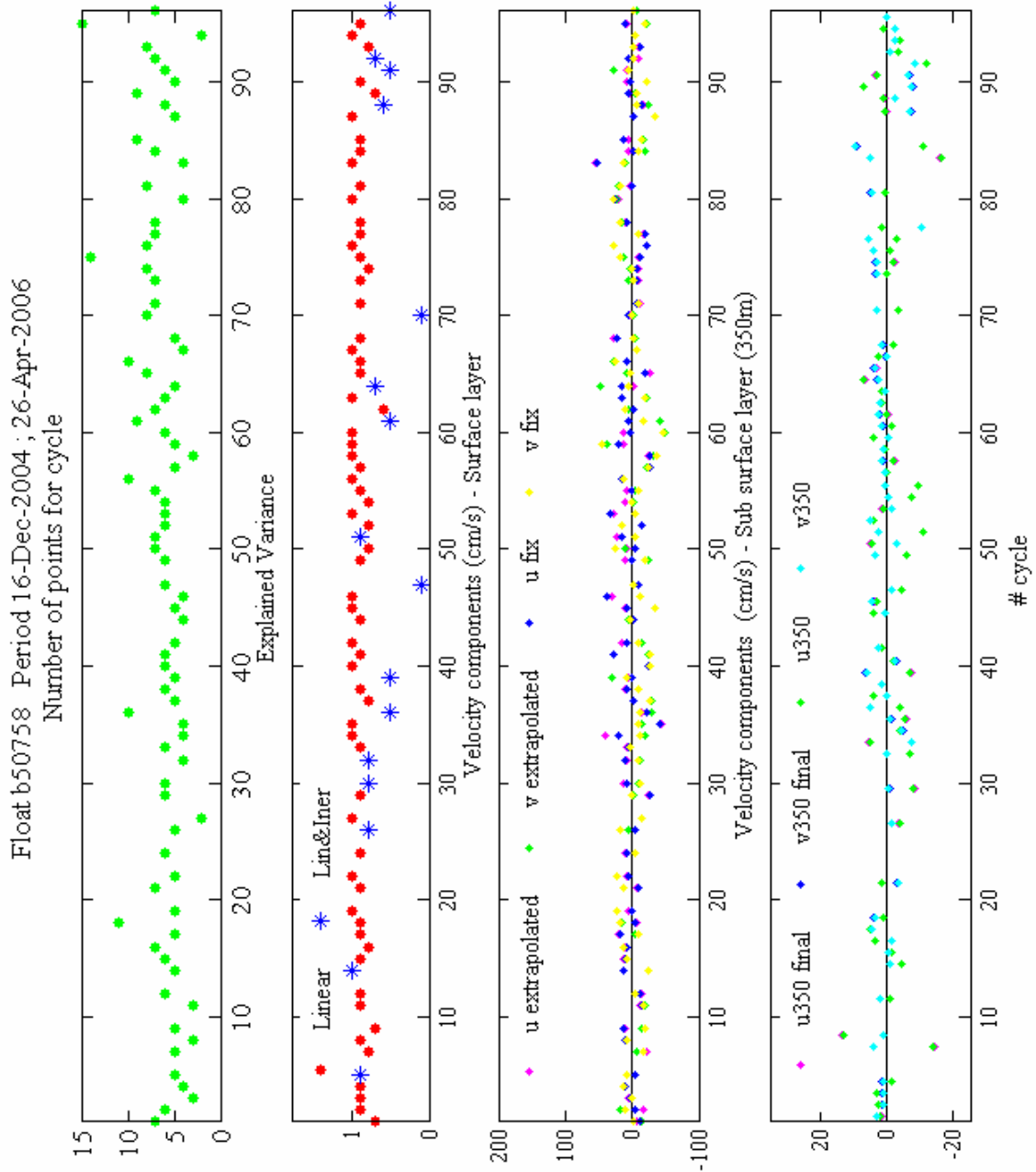


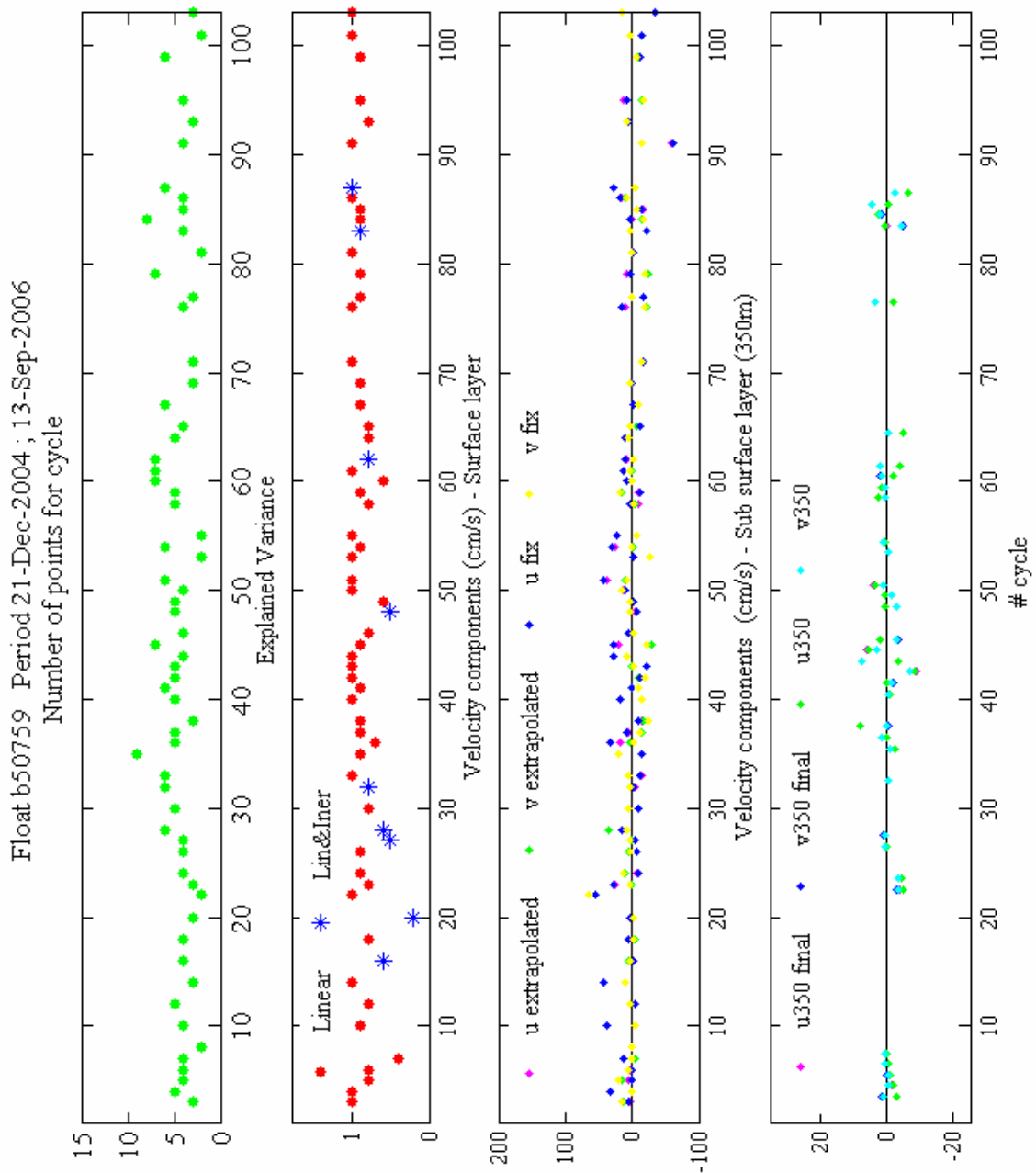


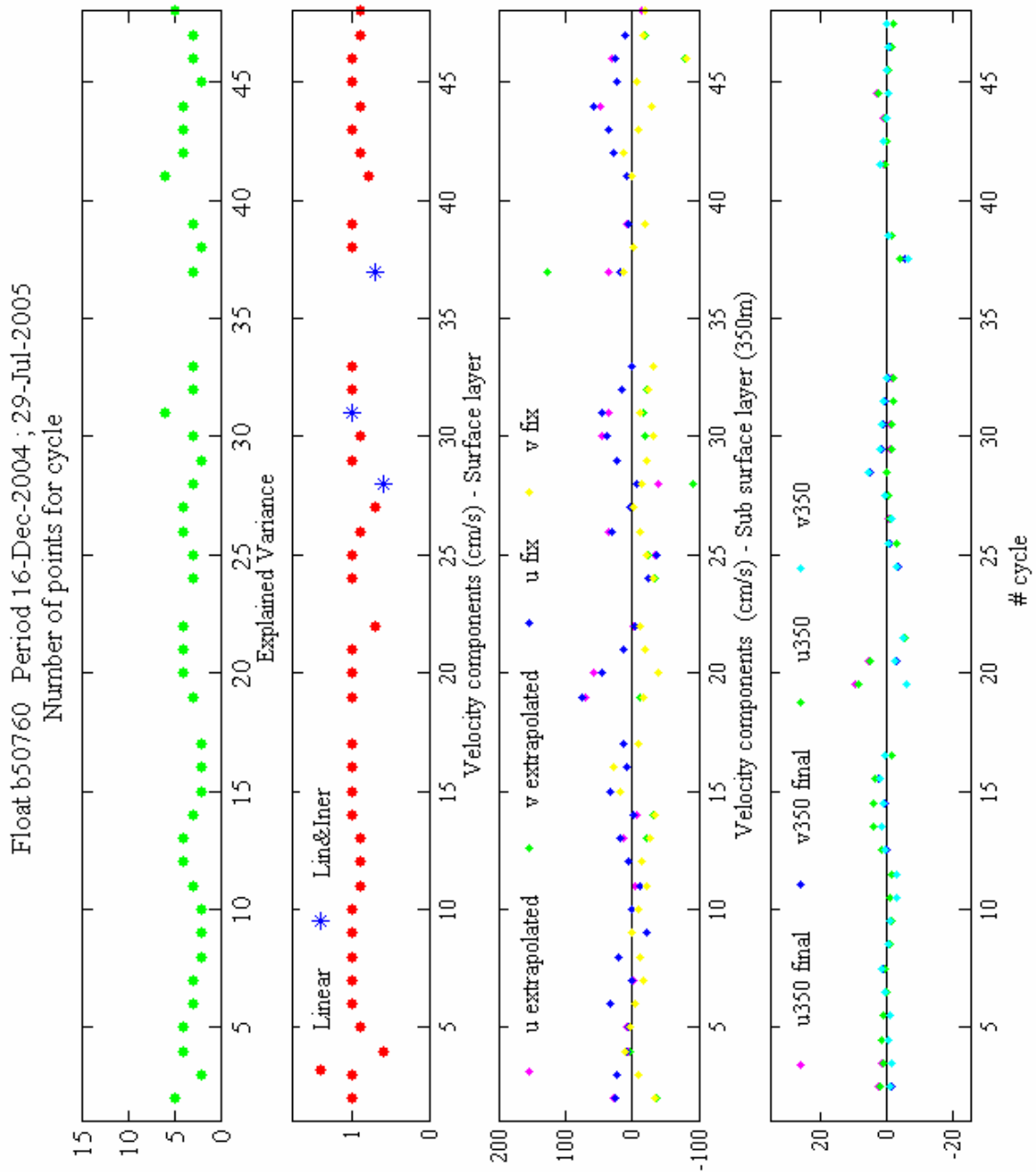


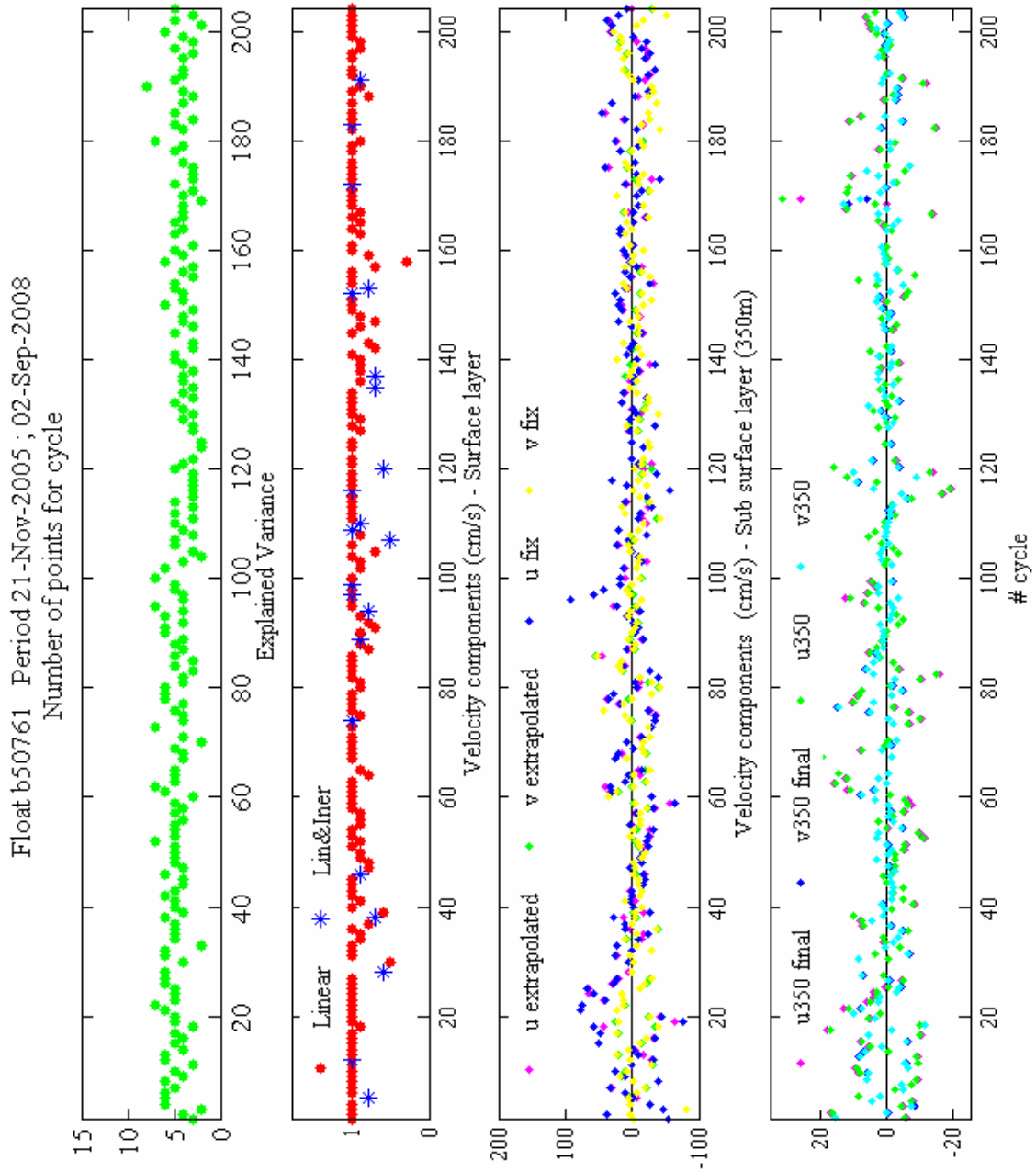
Float b50757 Period 17-Dec-2004 ; 09-Jun-2008

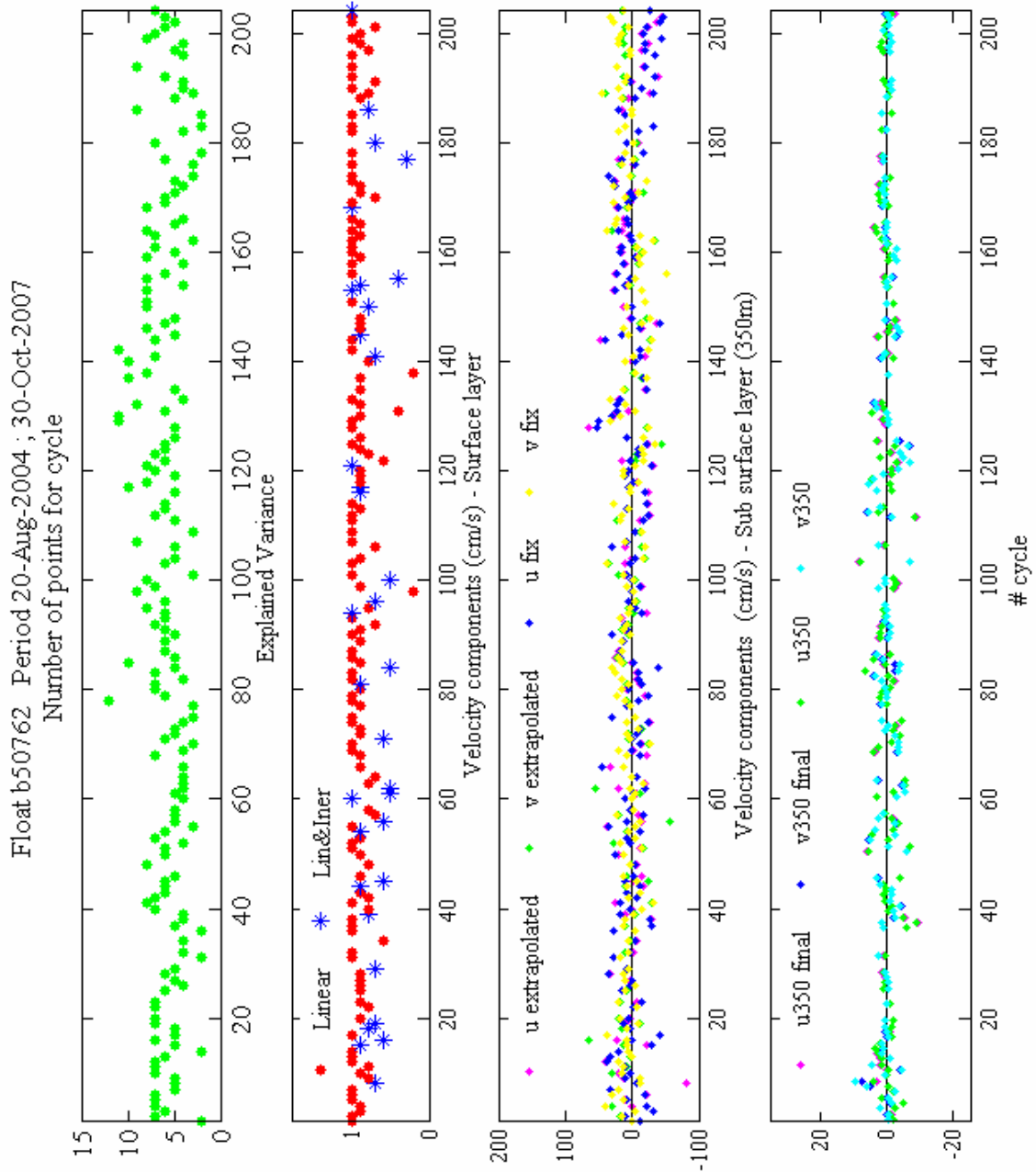


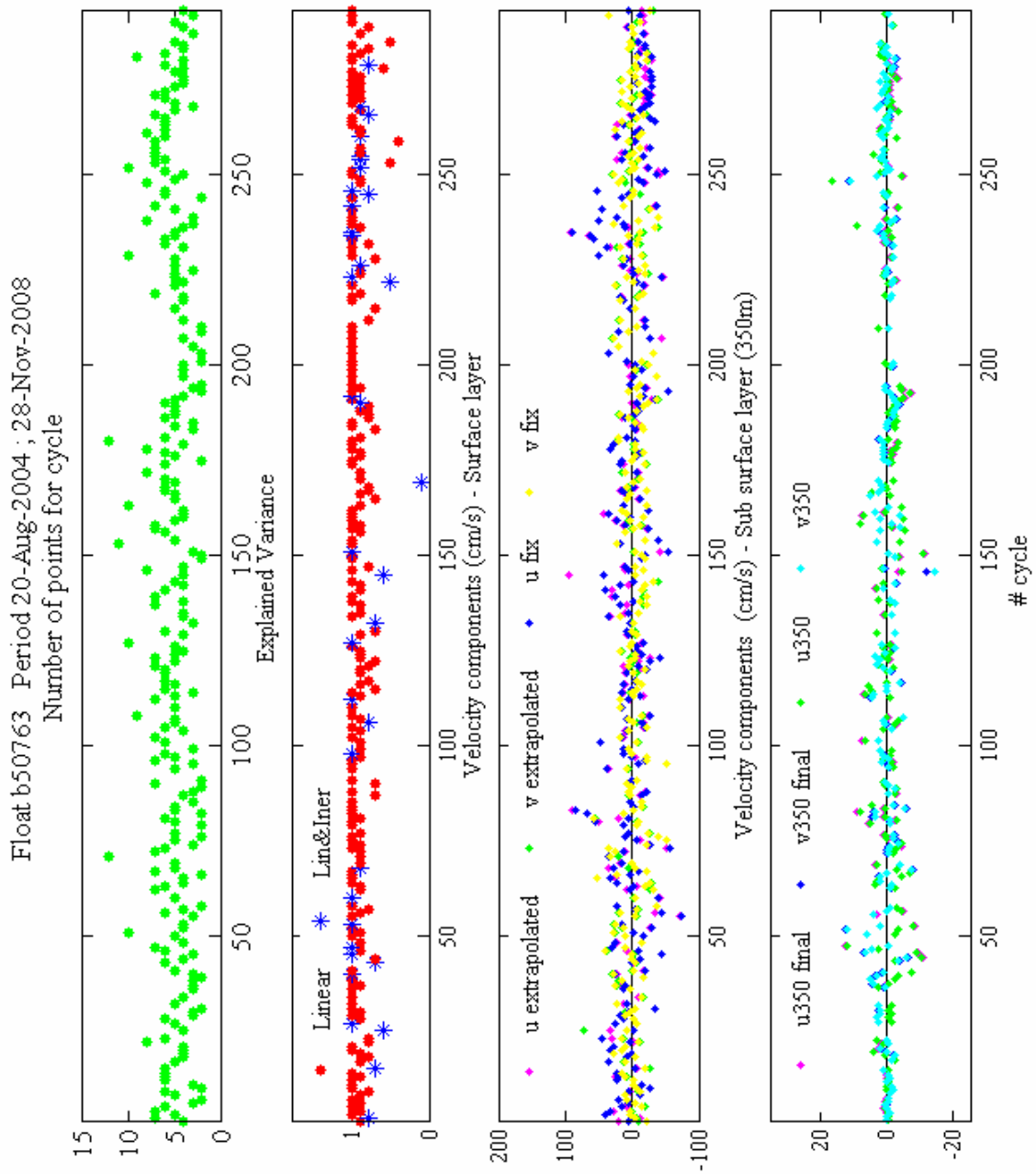


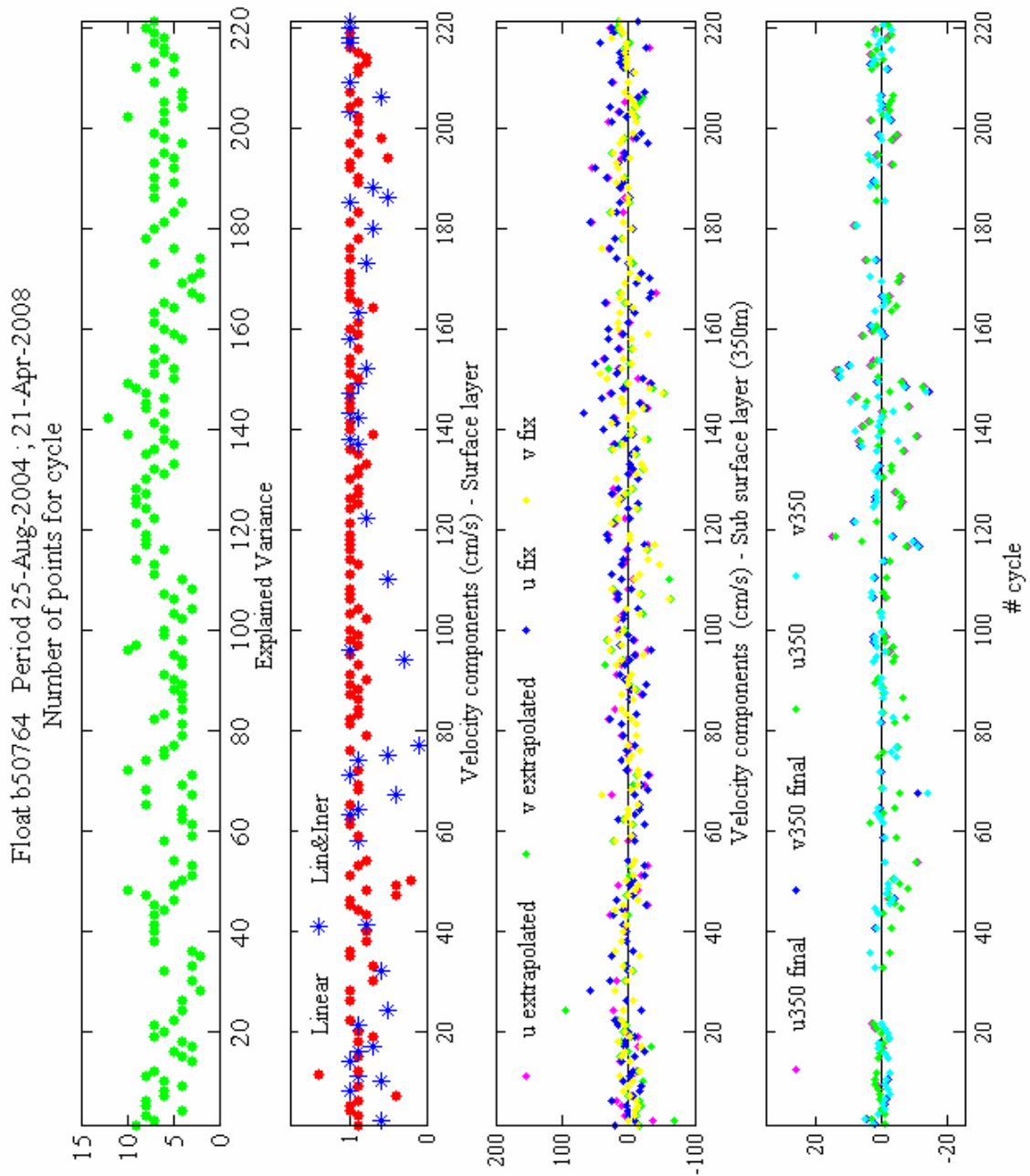


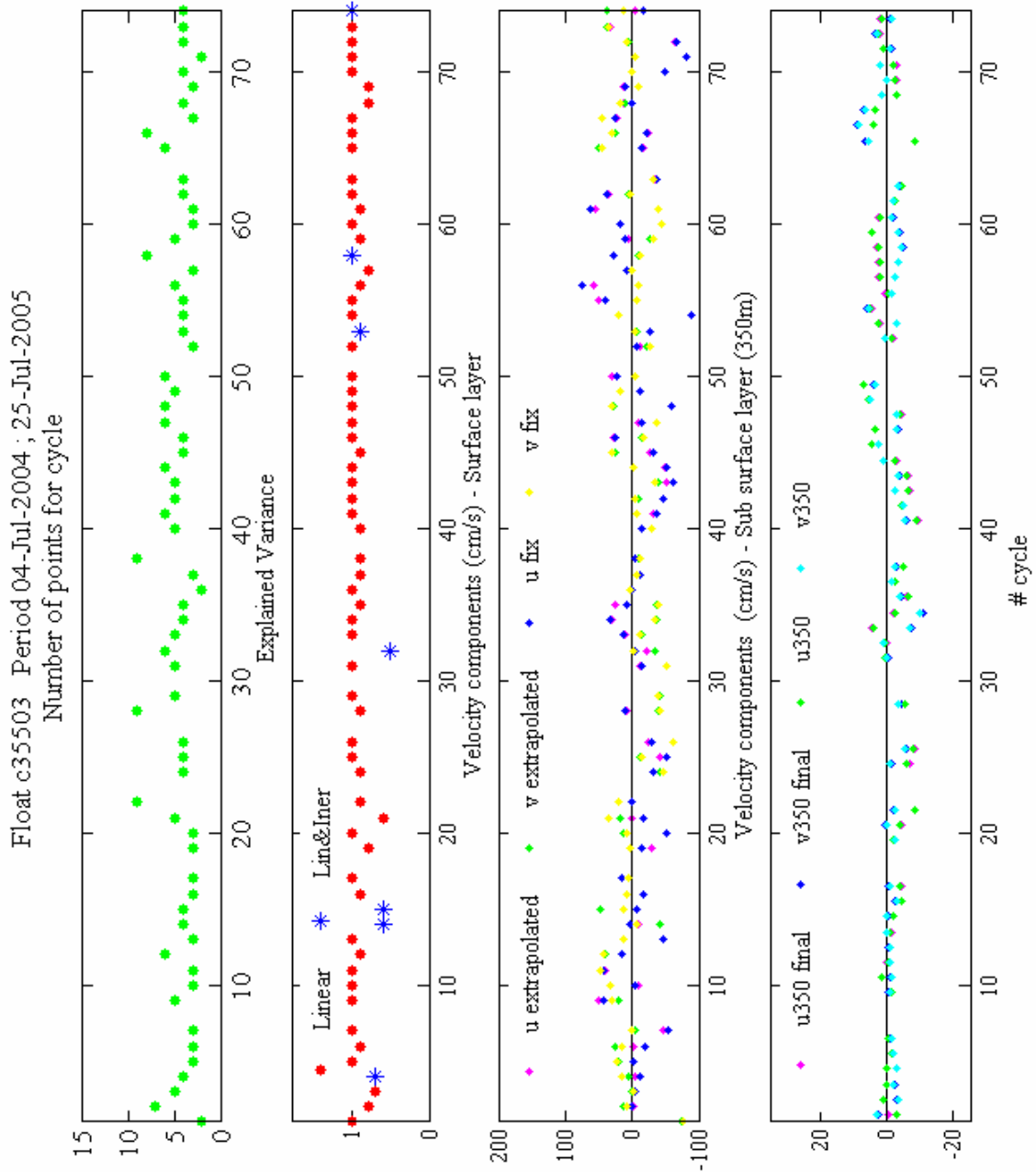


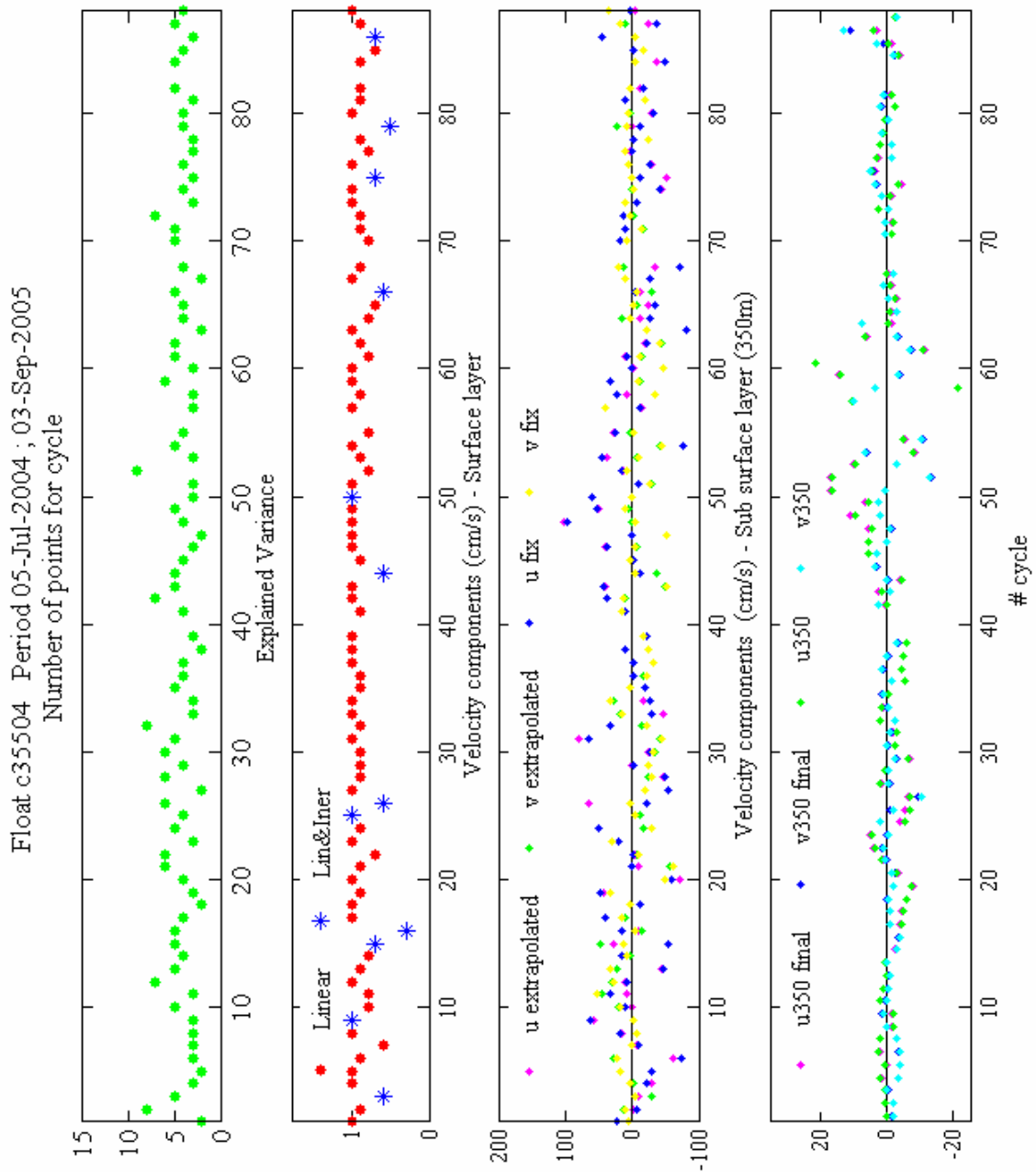




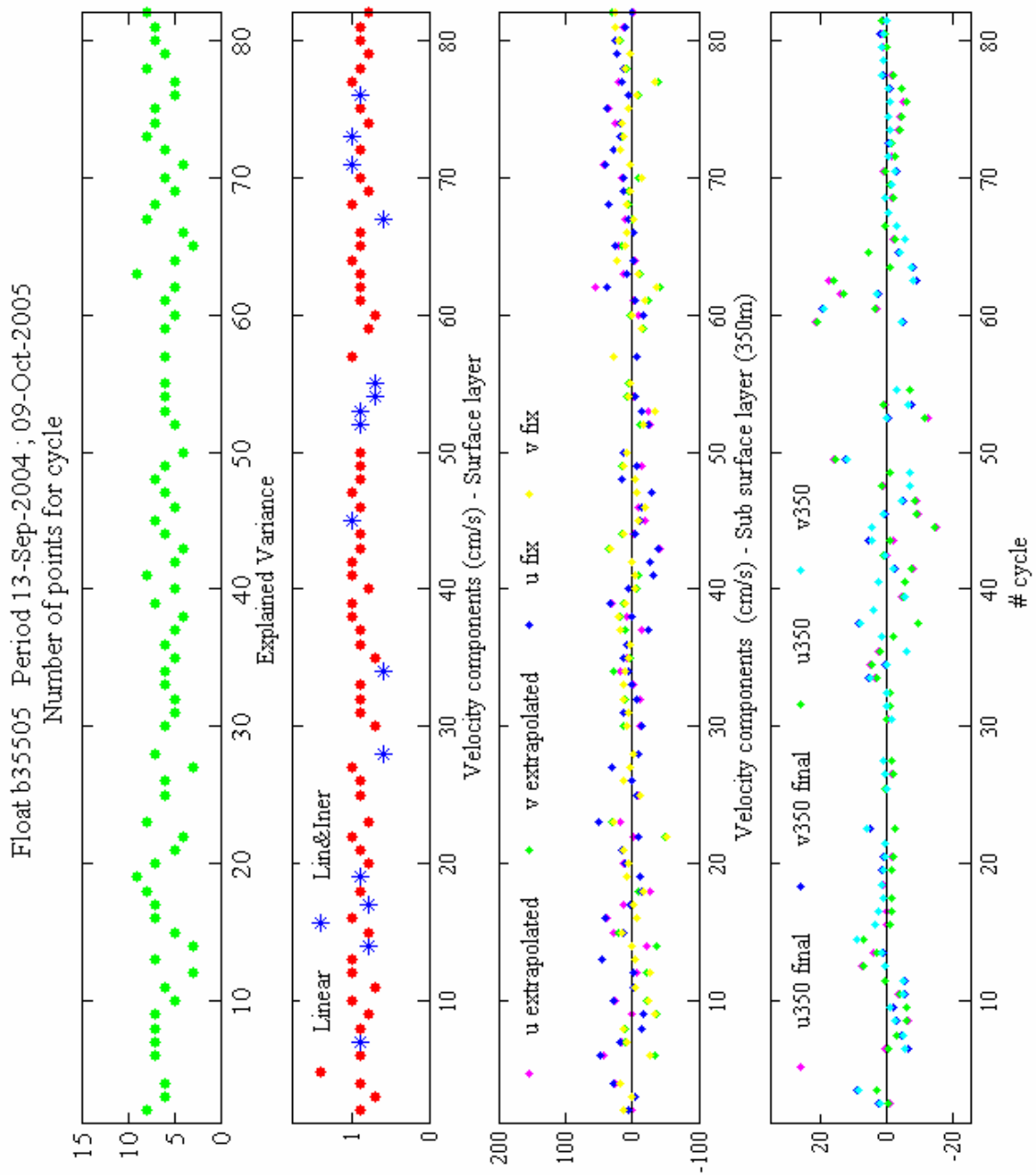




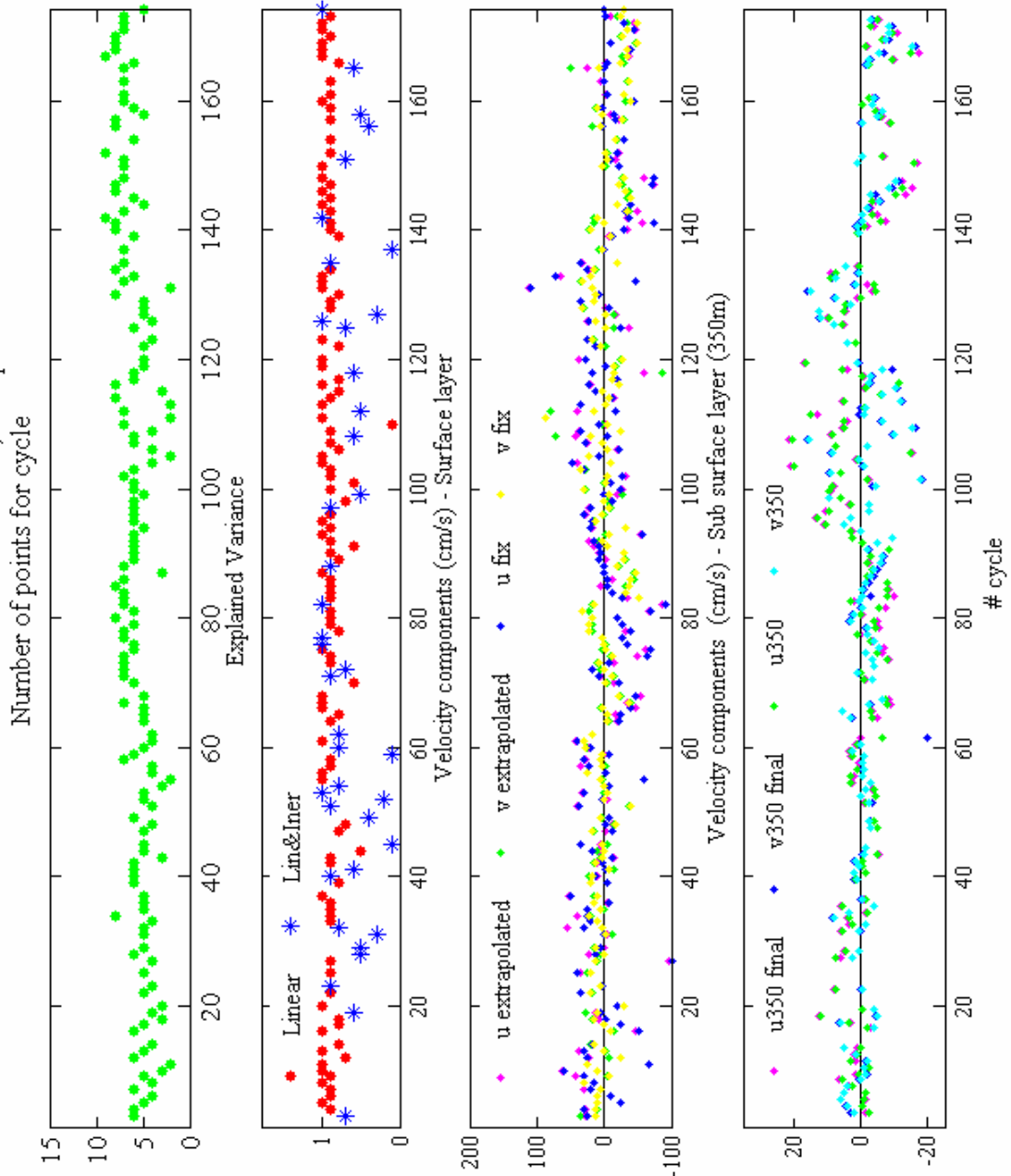


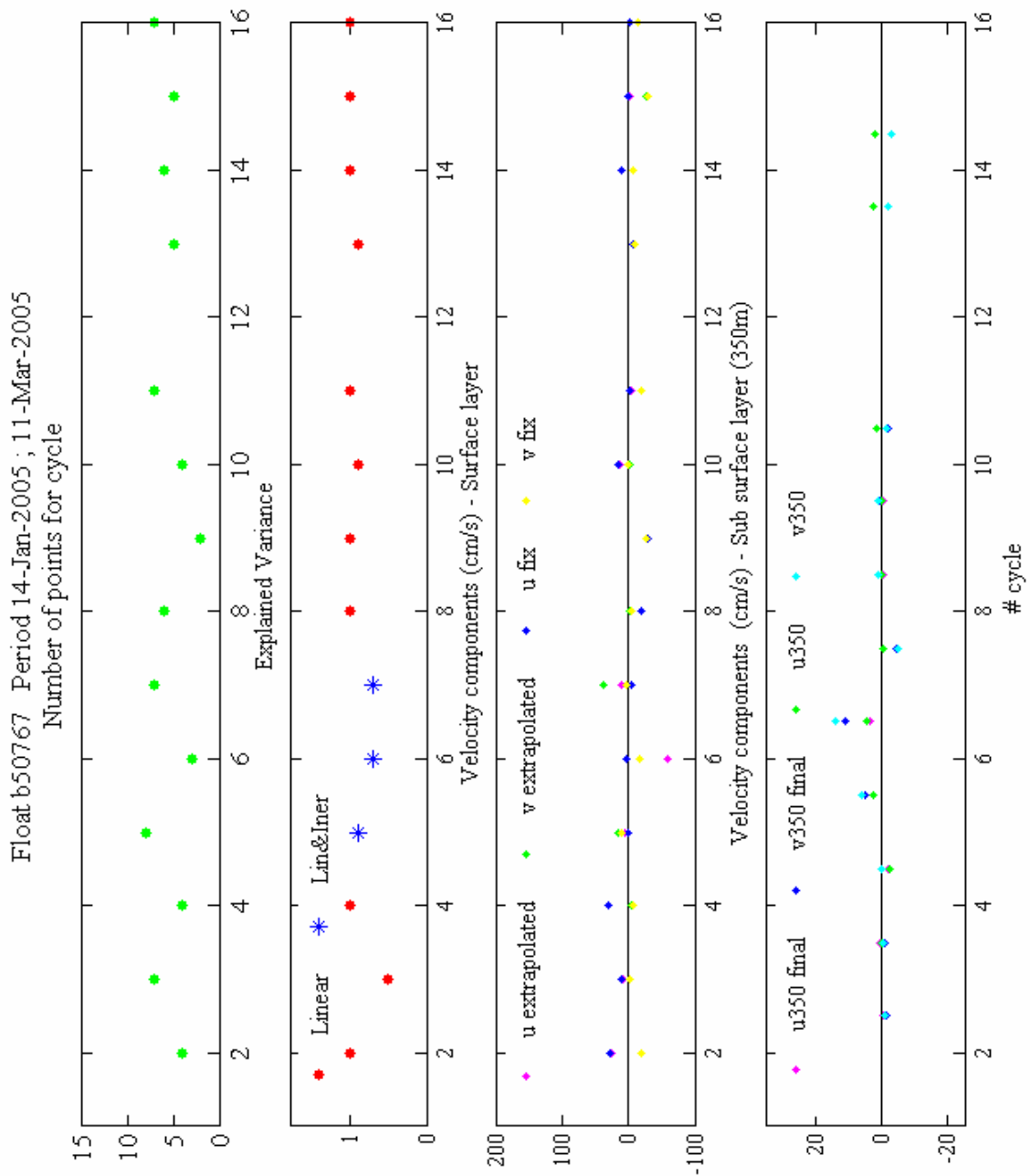


Provor CTS2

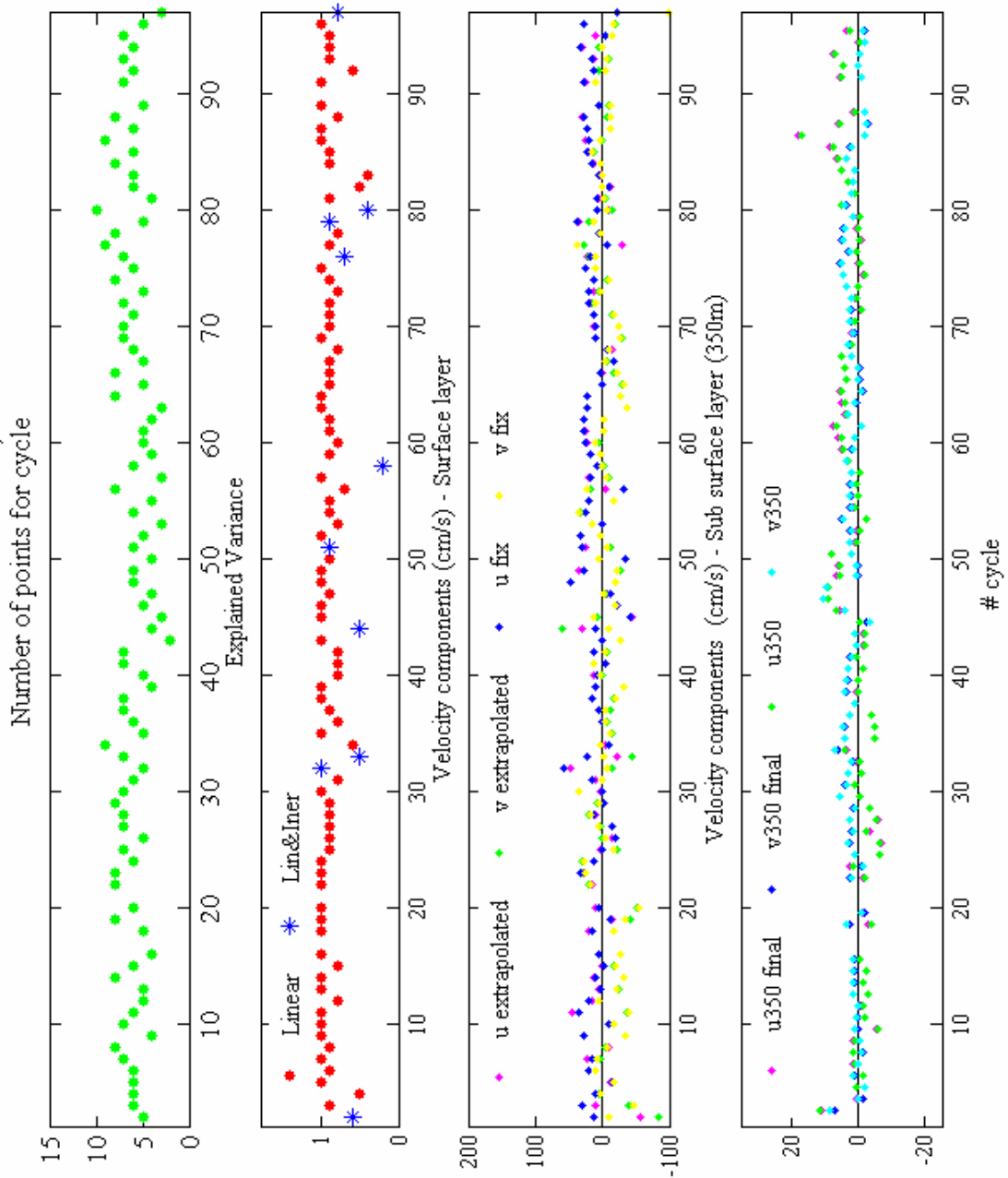


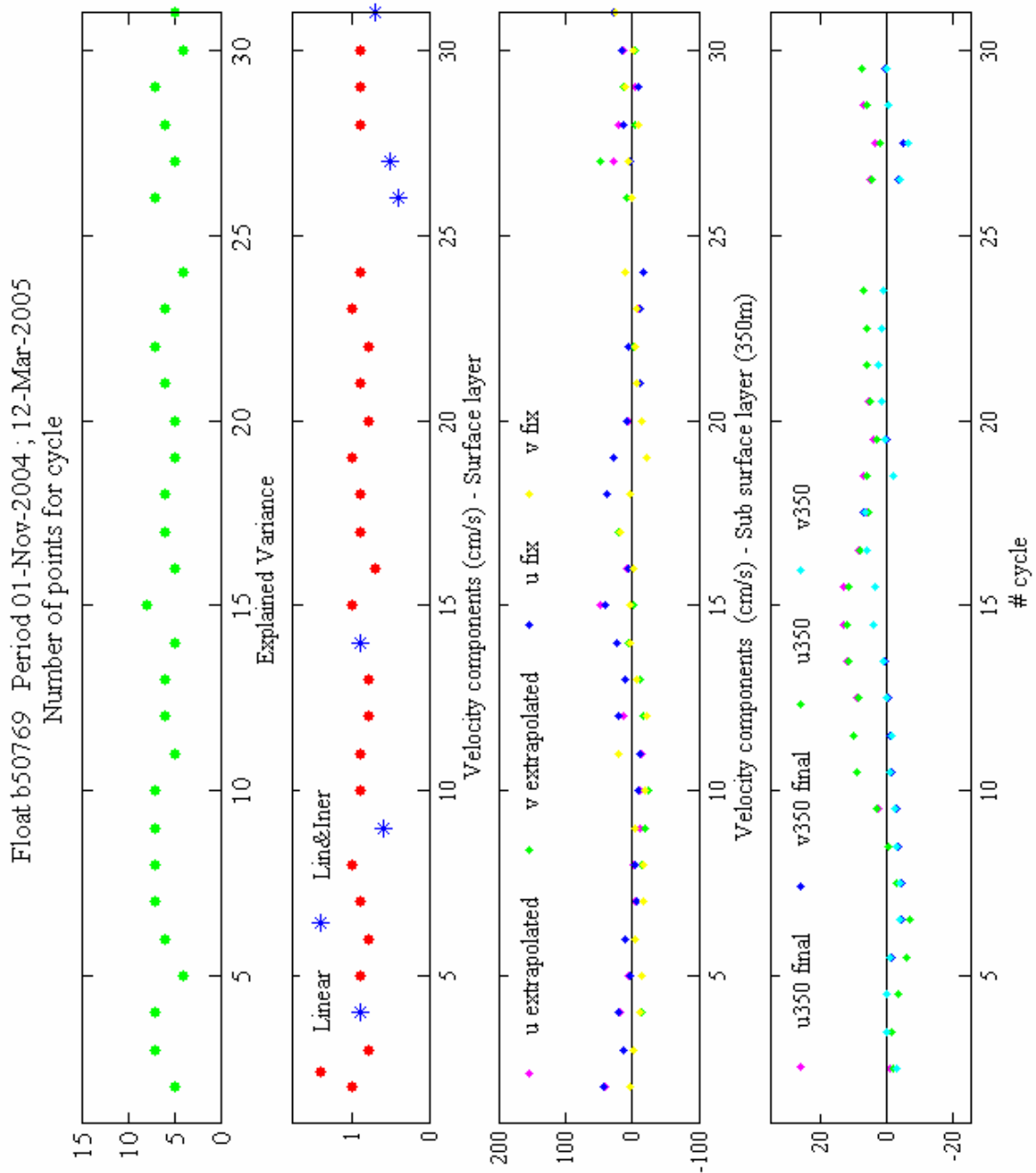
Float b35506 Period 09-Oct-2004 ; 28-Apr-2007



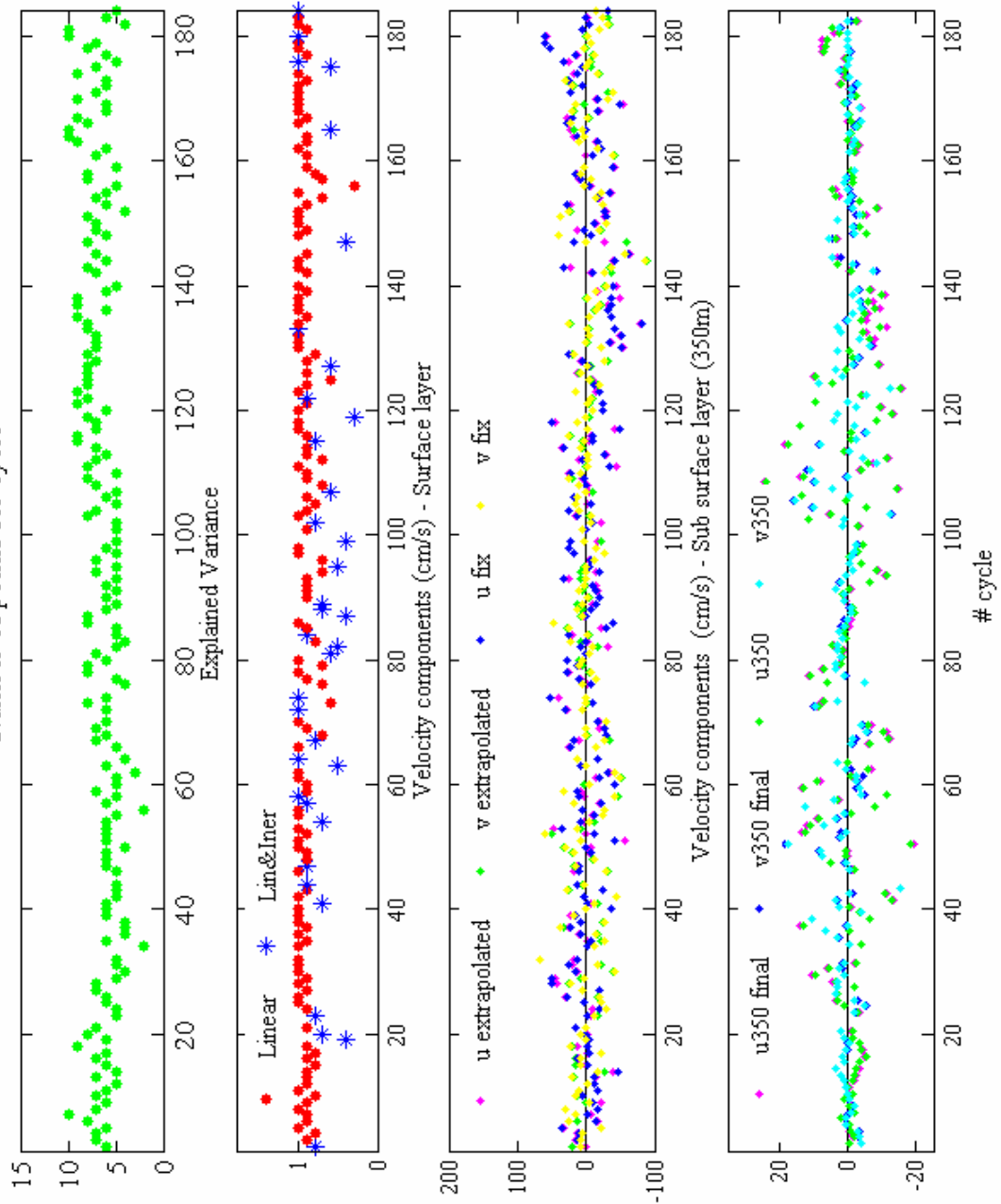


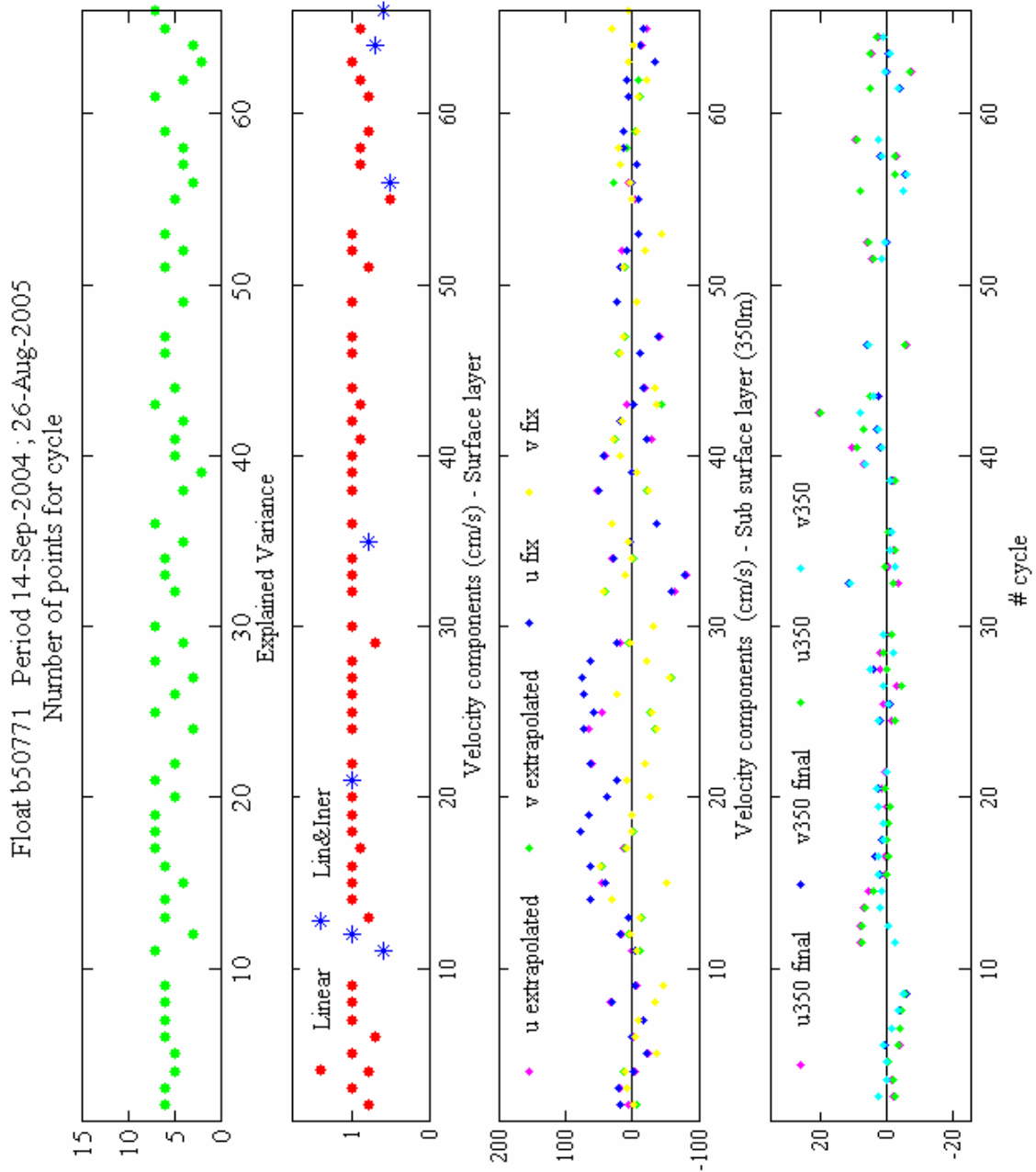
Float b50768 Period 18-Nov-2004 ; 22-Feb-2006

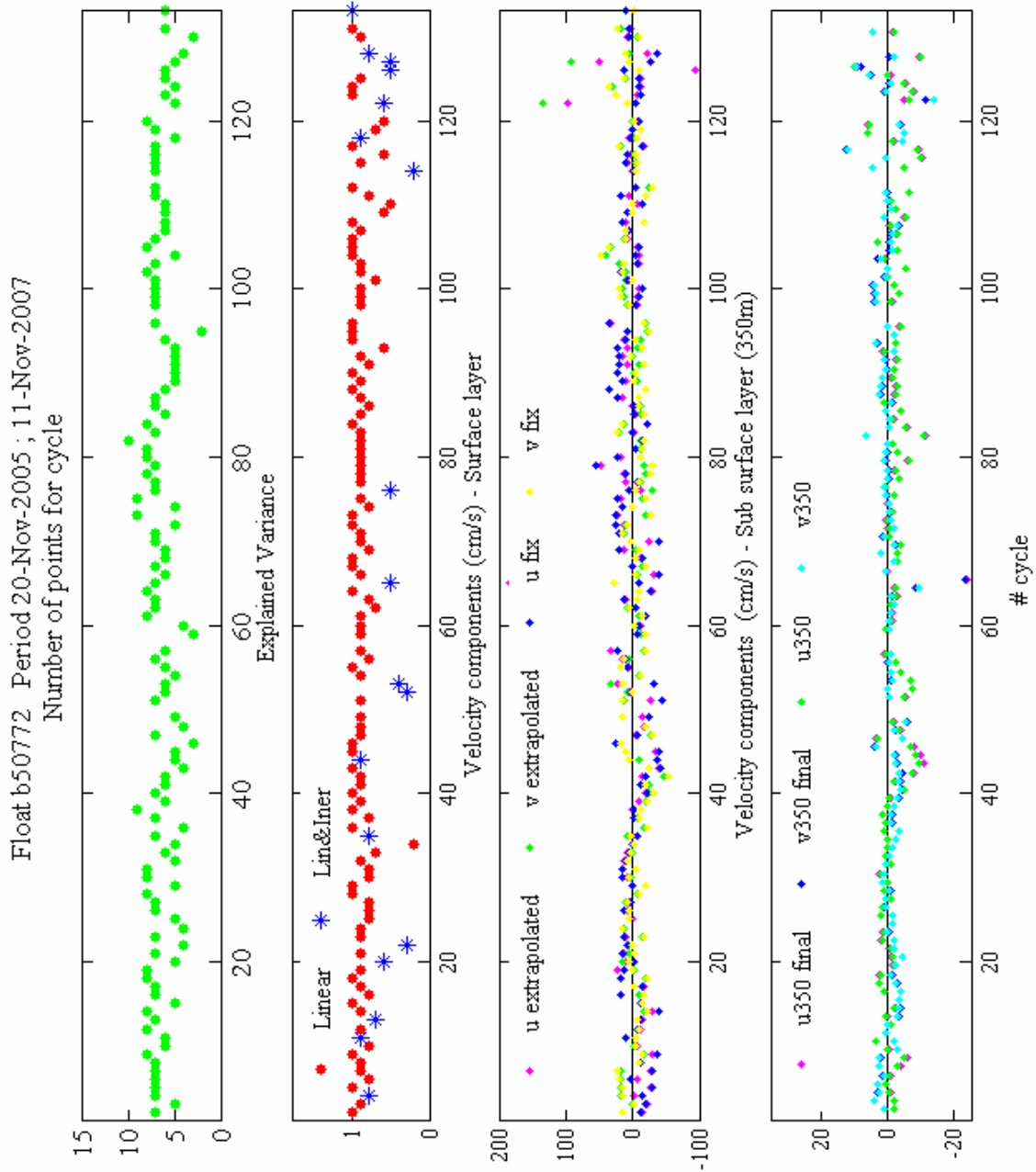




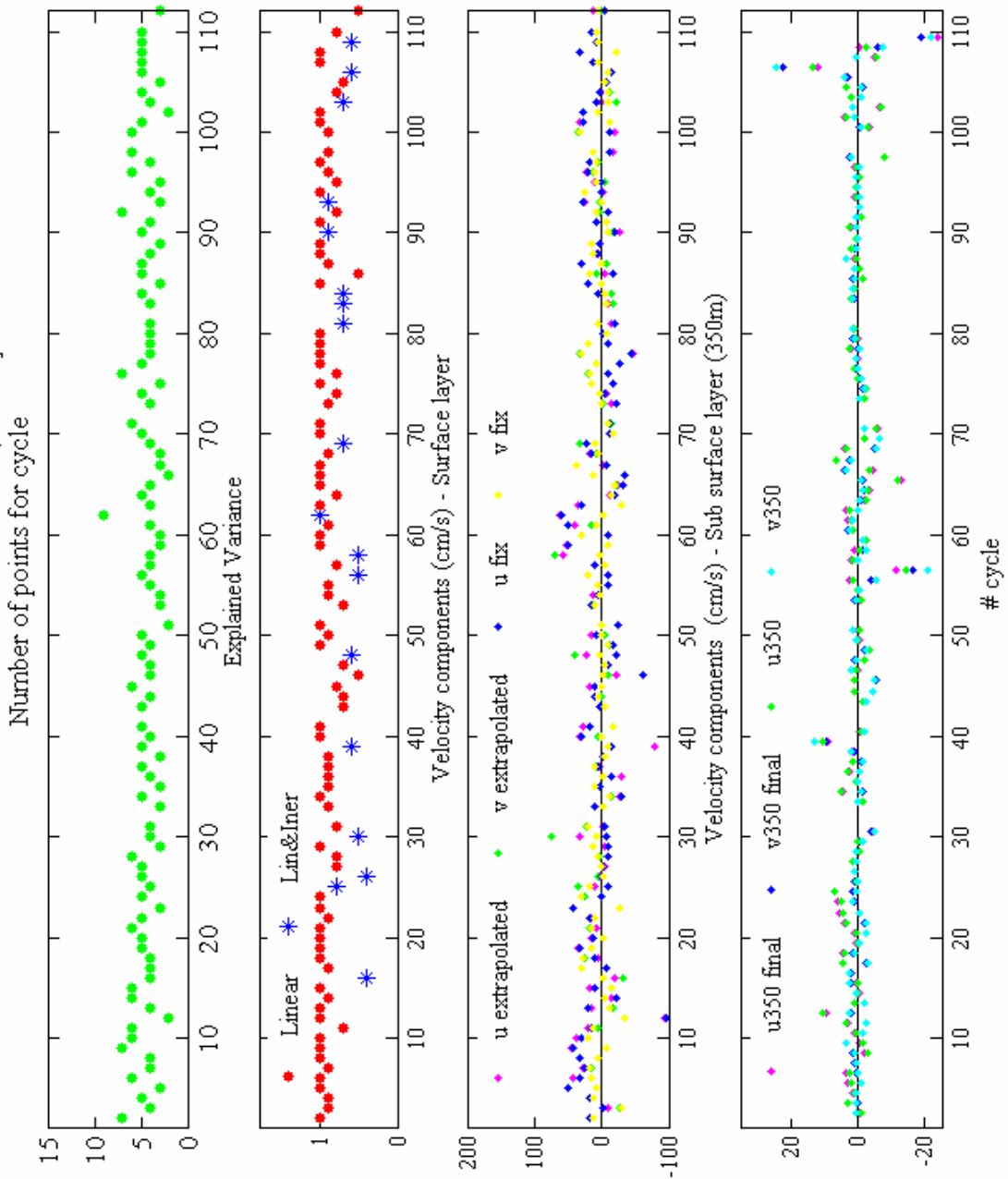
Float b50770 Period 13-Sep-2004 ; 26-Feb-2007
Number of points for cycle



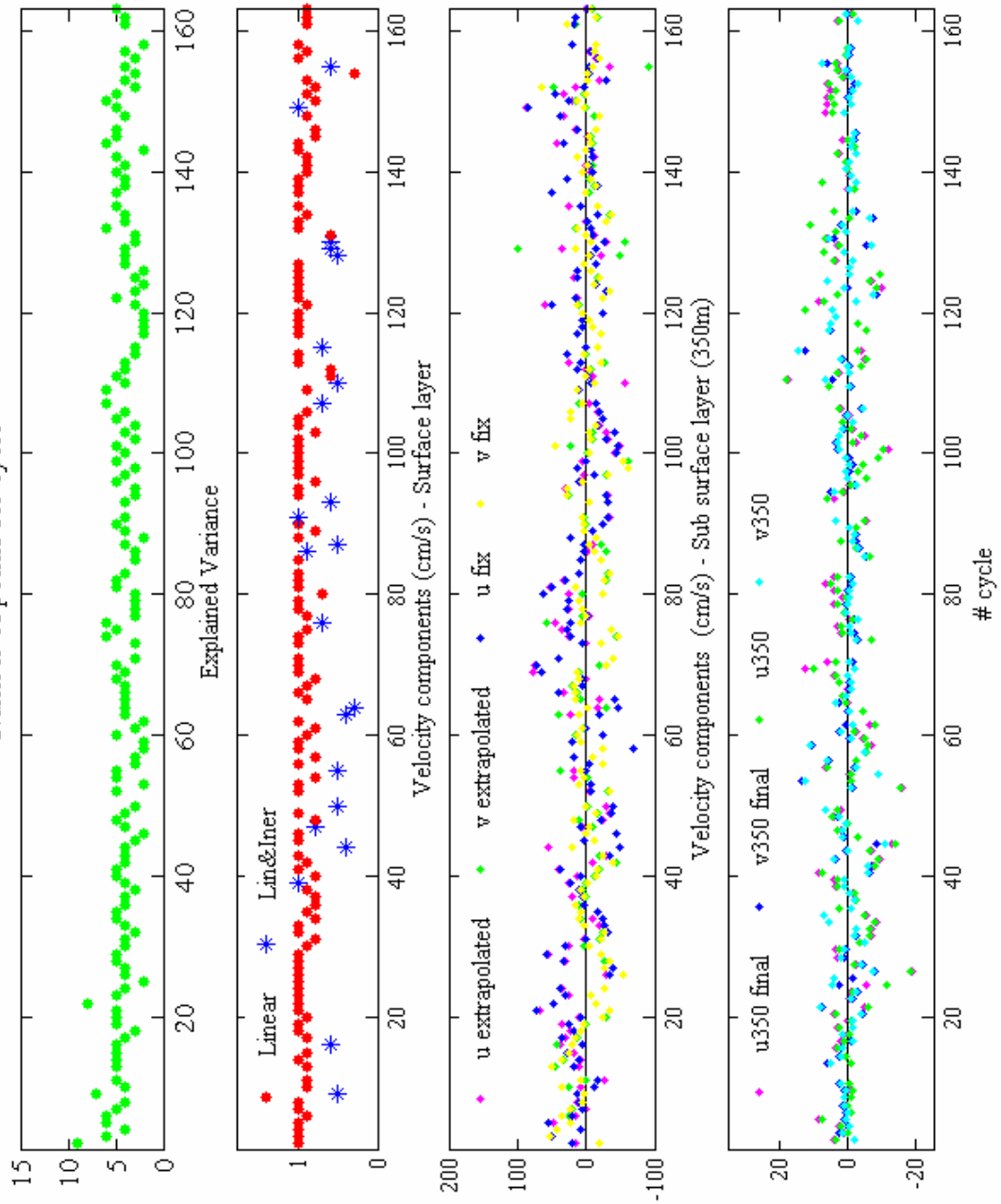




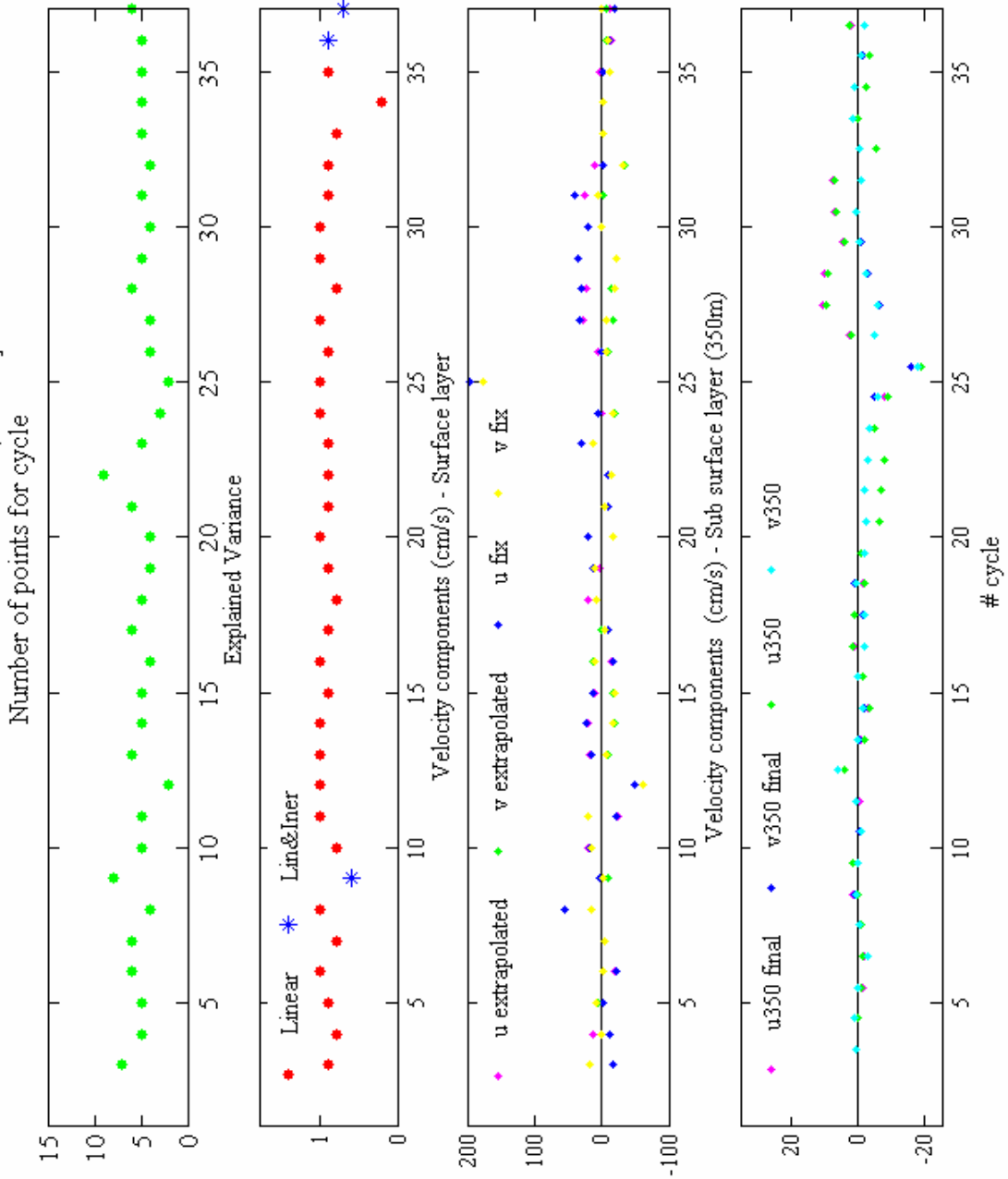
Float b52112 Period 20-Nov-2005 ; 05-May-2007

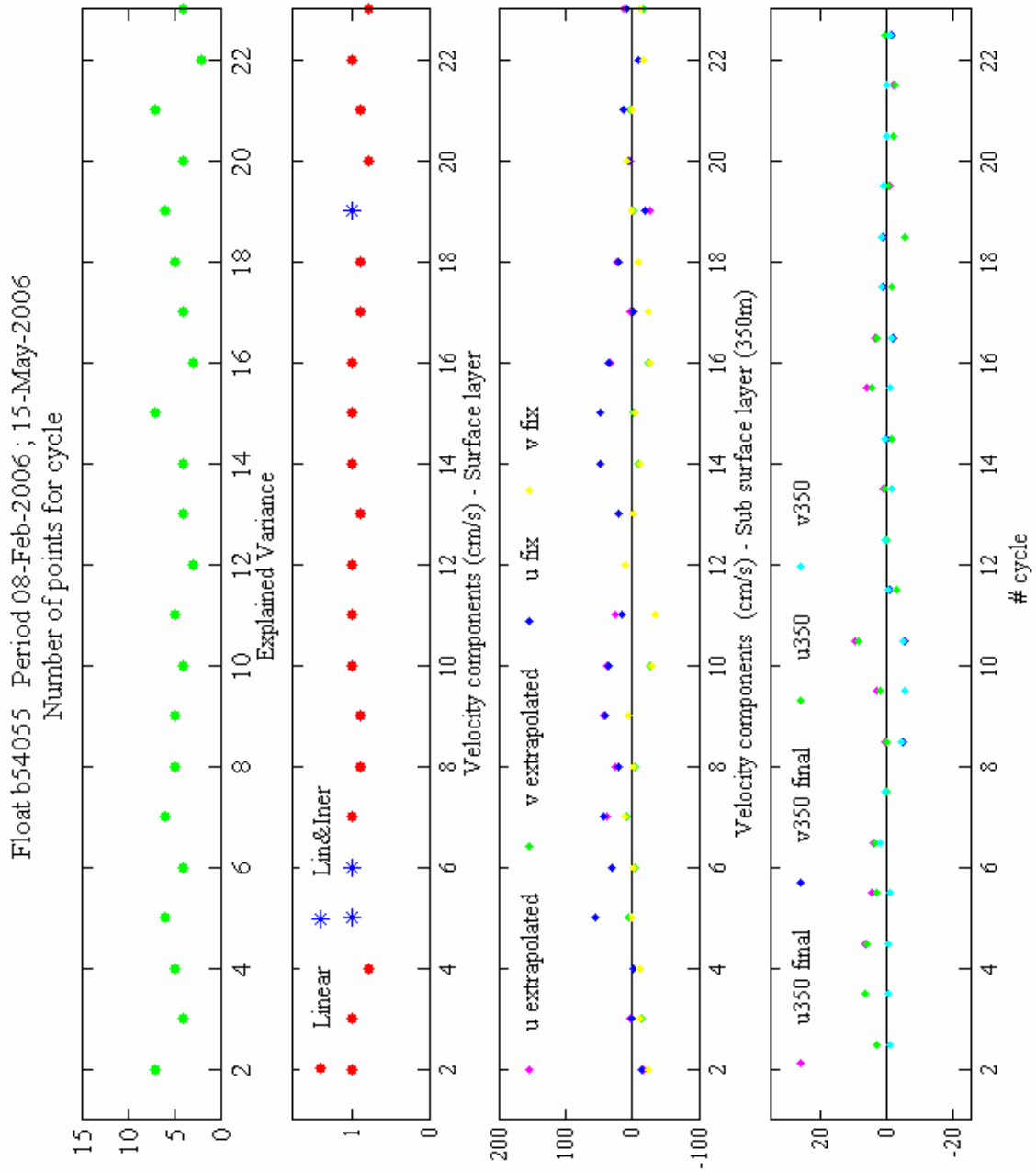


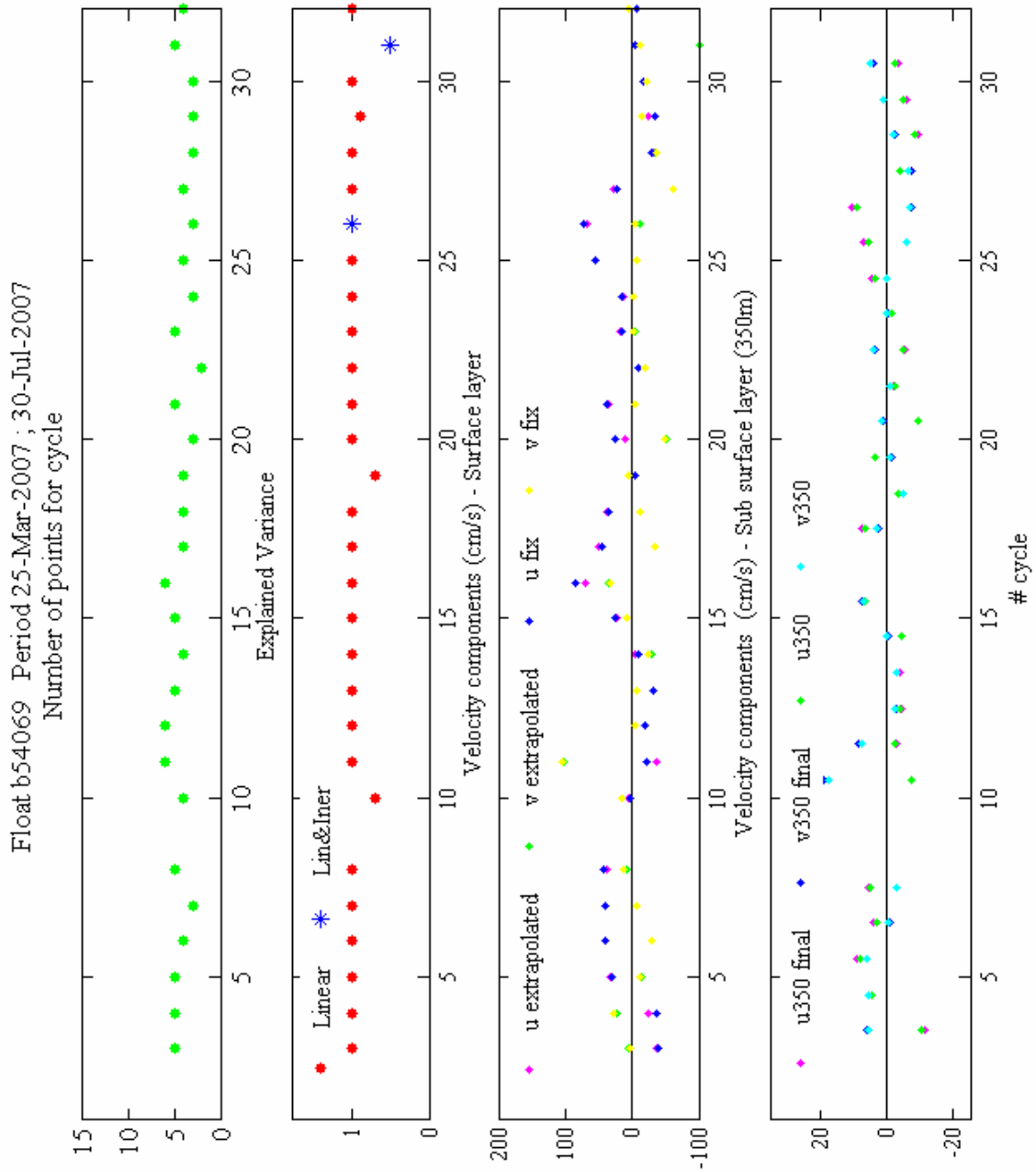
Float b54006 Period 21-Nov-2005 ; 15-Feb-2008
Number of points for cycle



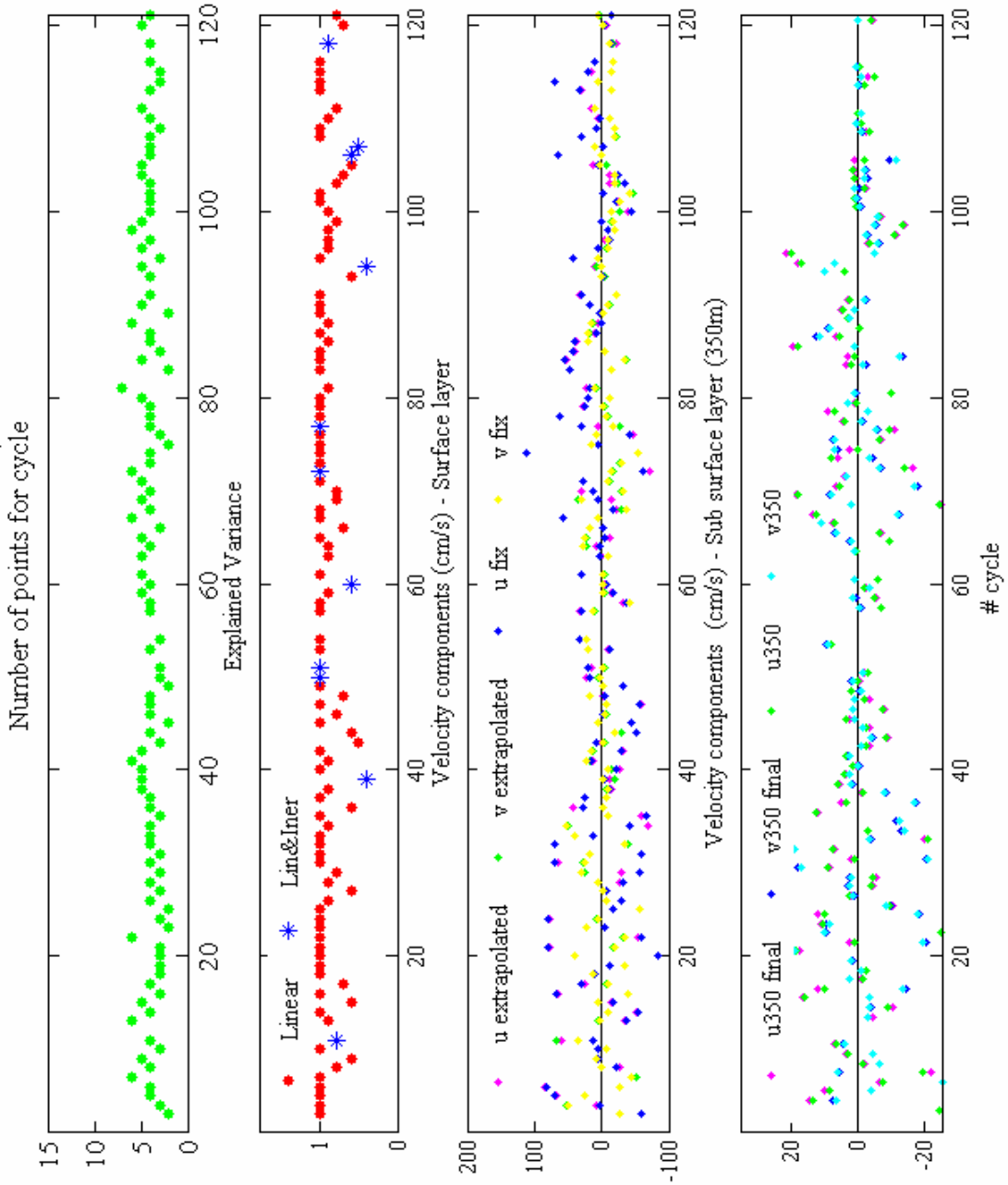
Float b54011 Period 26-Nov-2005 ; 06-May-2006



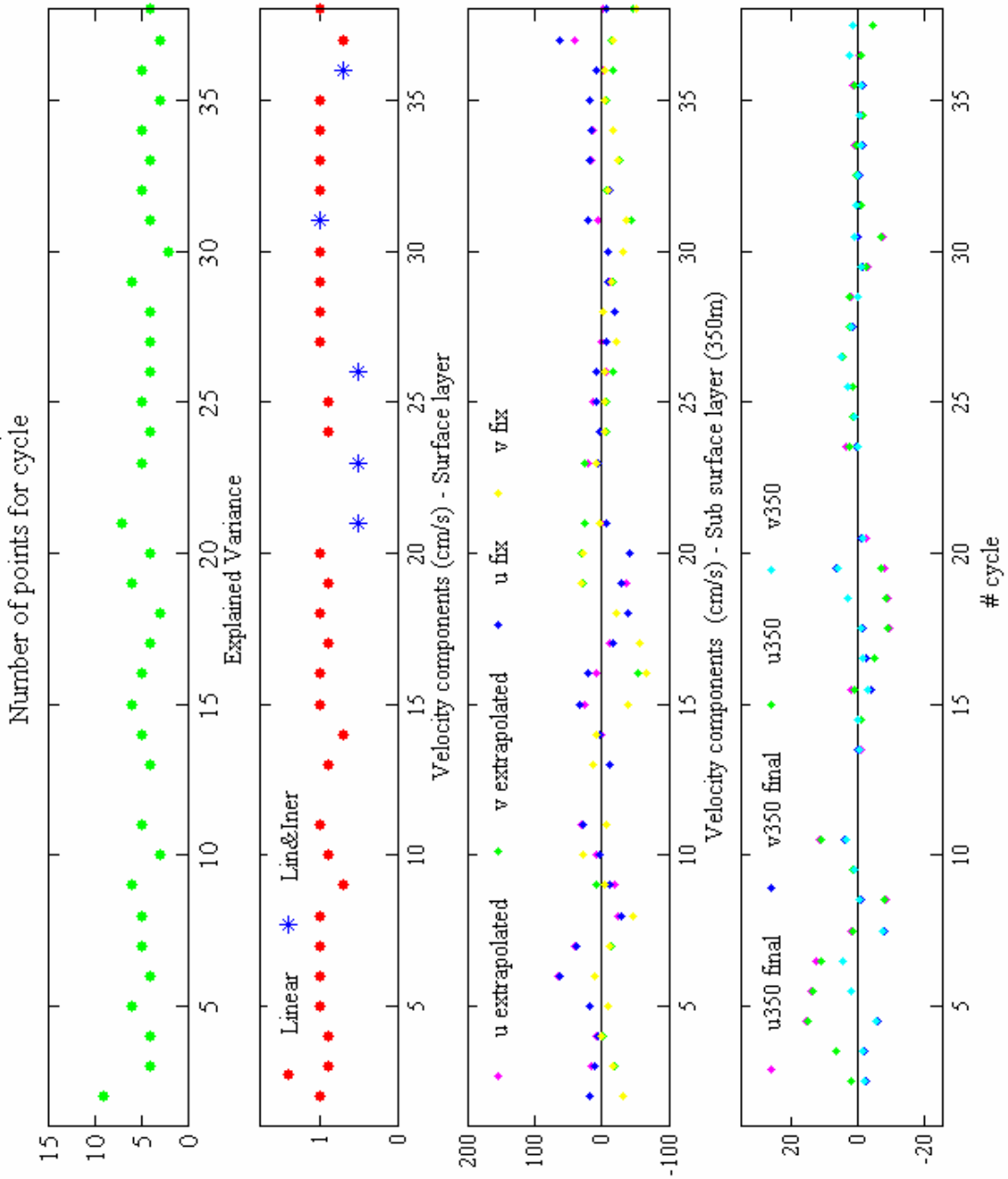




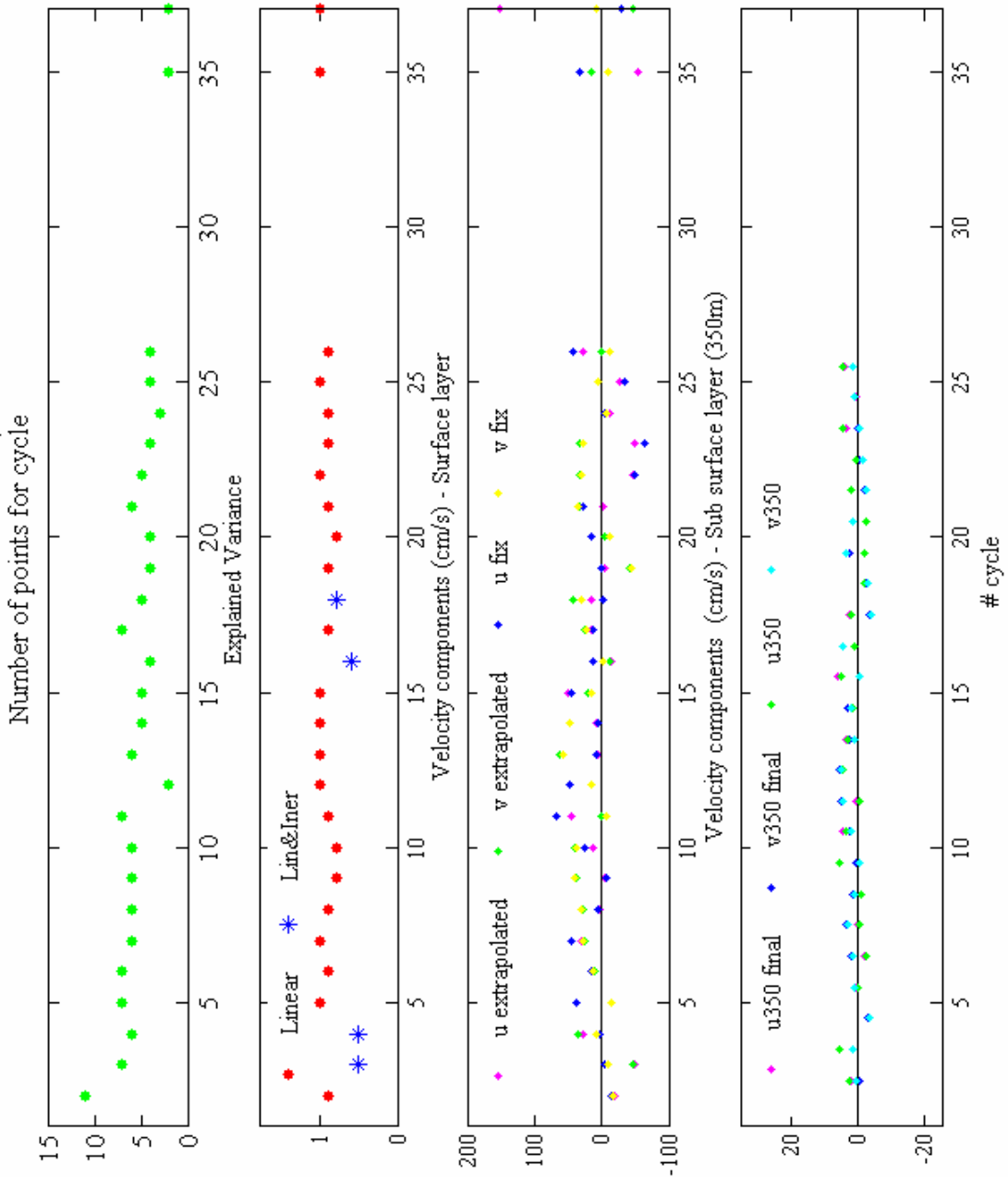
Float b54070 Period 24-Mar-2007 ; 30-Oct-2008

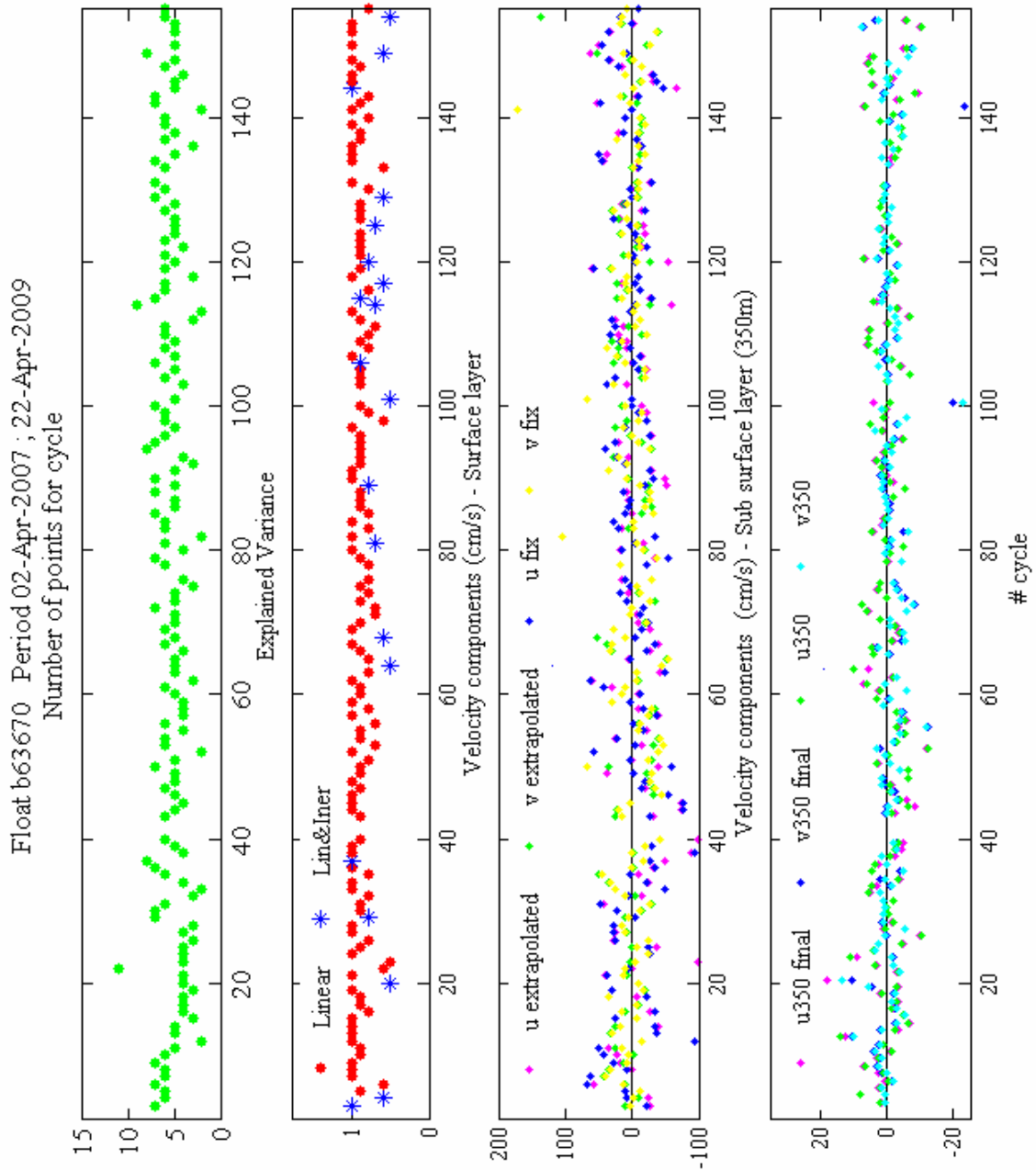


Float b54073 Period 08-Feb-2006 ; 29-Jul-2006

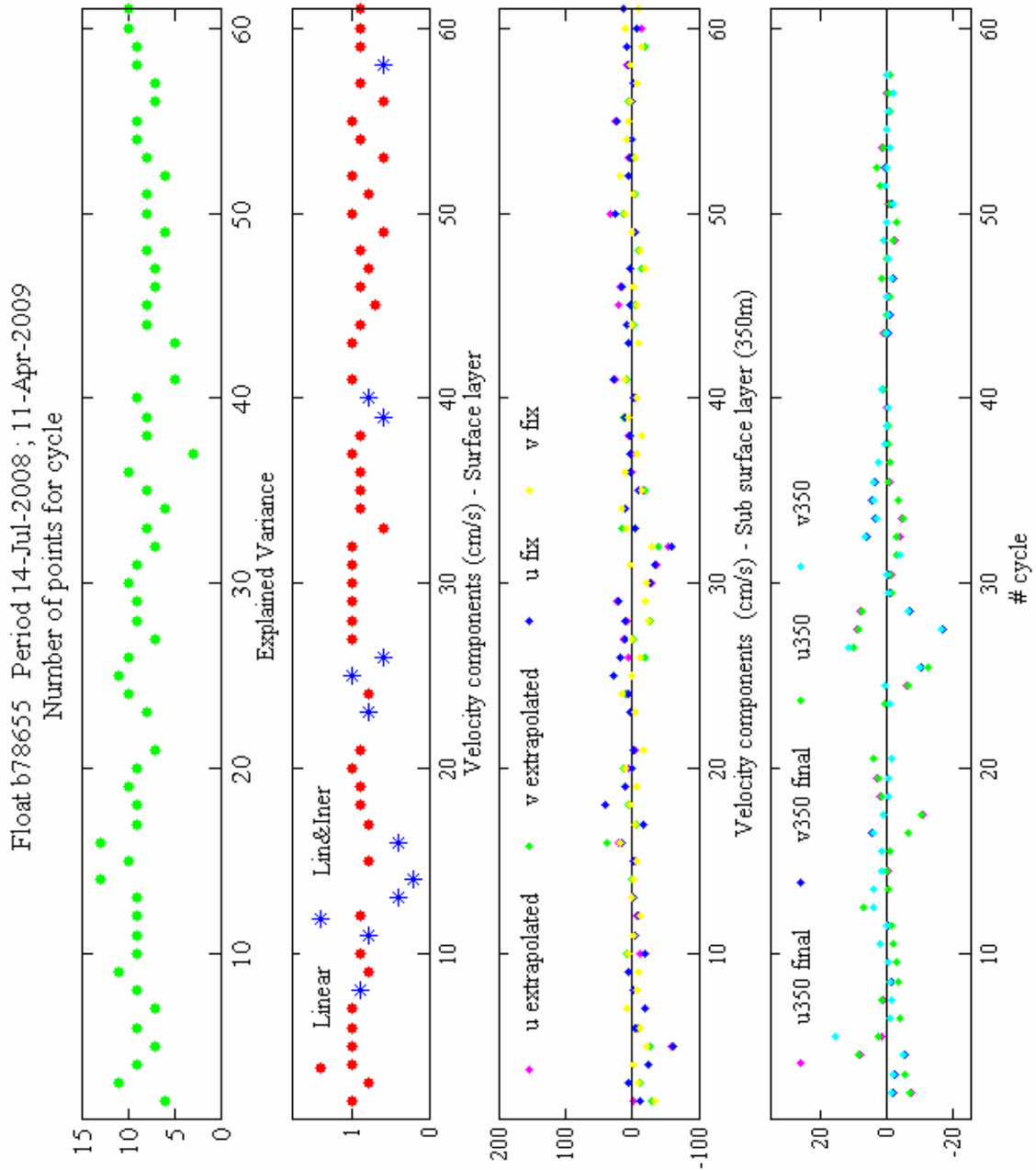


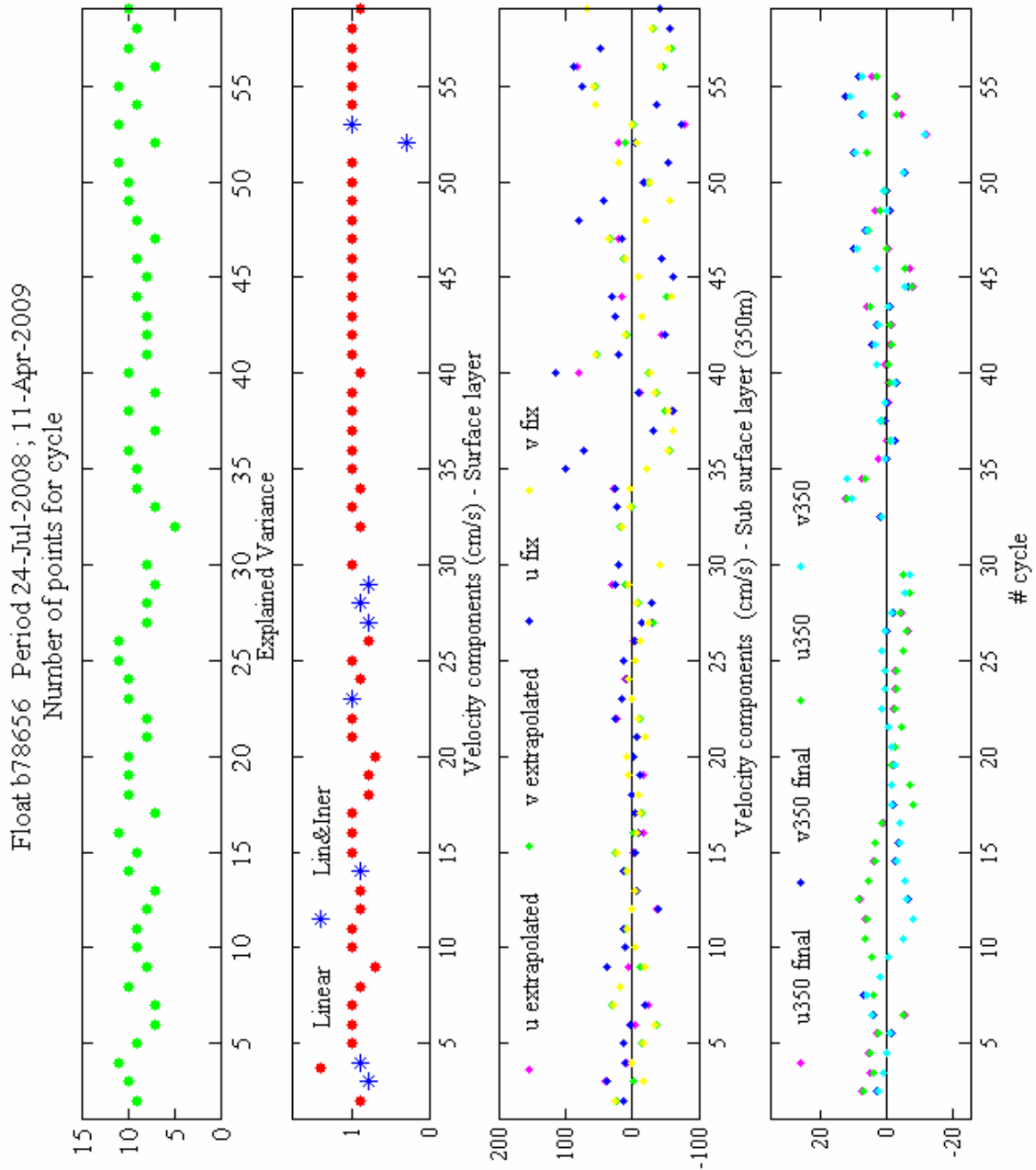
Float b63668 Period 28-Mar-2007 ; 17-Jul-2007

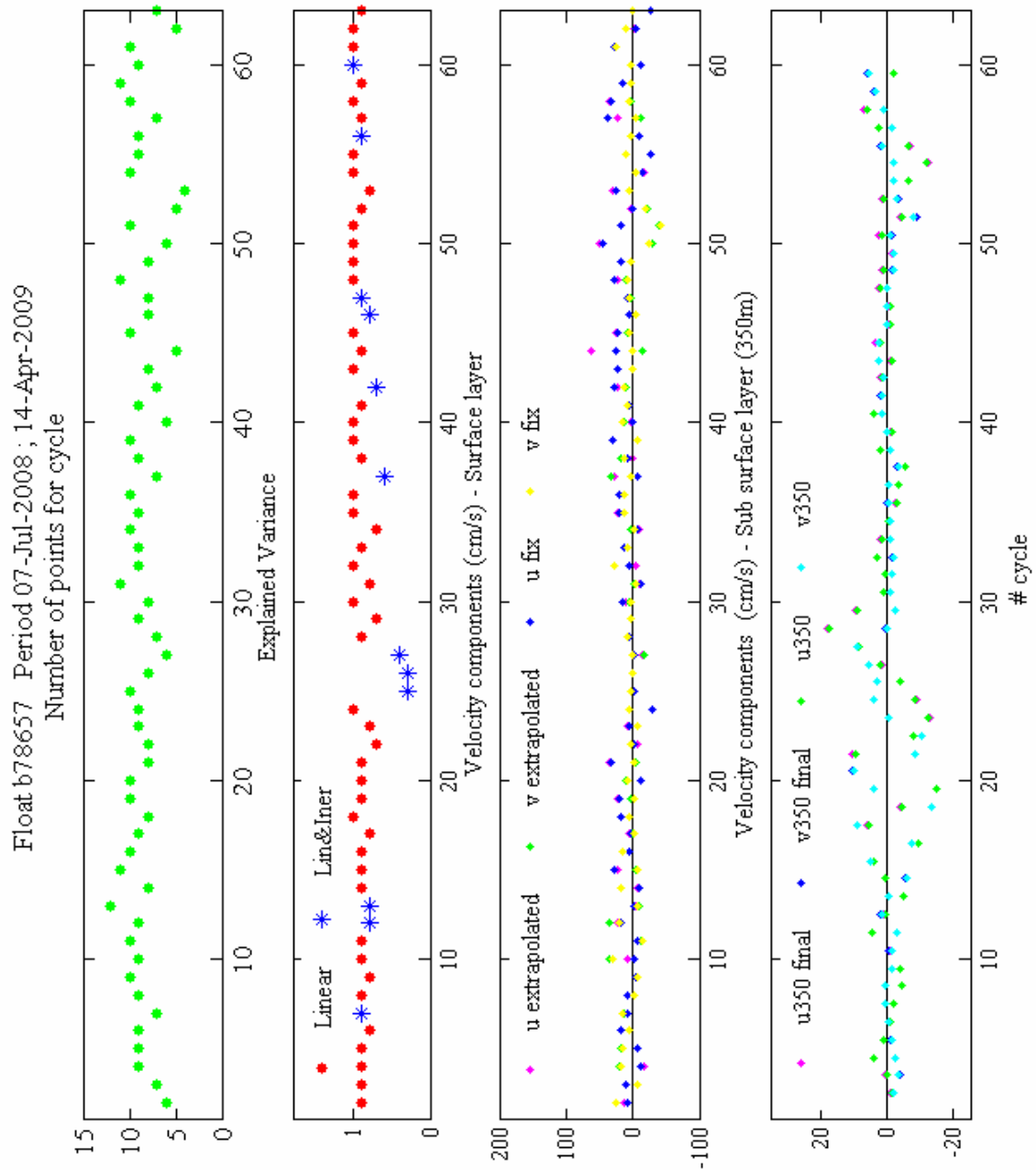


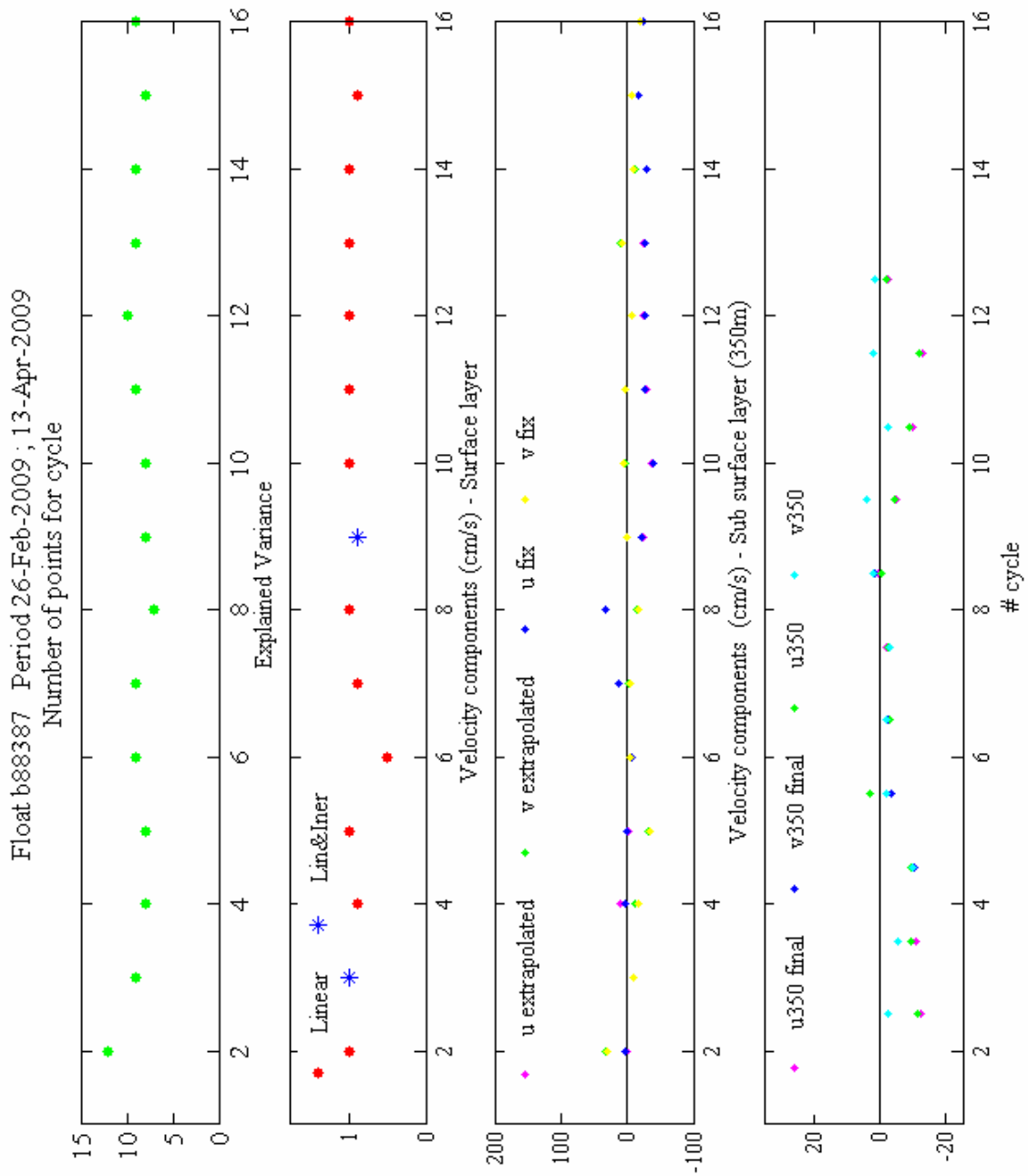


Provor CTS3









9. Bibliografia

Park J.J., Kim K., King B.A., Riser S.C., “ An Advanced Method to Estimate Deep Currents from Profiling Floats” , Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Volume 22, Issue 8, pp. 1294–1304, 2005.

Park J.J., Kim K., Crawford W. R., “ Inertial currents estimated from surface trajectories of Argo floats” , Geophys. Res. Lett., 31, L13307, 2004.

Poulain P.M., Barbanti R., Font J., Cruzado A., Millot C., Gertman I., Griffa A., Molcard A., Rupolo V., Le Bras S., Petit de la Villeon L., “MEDARGO: A drifting profiler program in the Mediterranean Sea” , Ocean Sci., 3, 379-395. 2007.

Solari M. , “Trattamento dei dati di posizione dei profilatori Argo nel Mar Mediterraneo per il periodo marzo 2000- maggio 2008” (Parte I e II) , Rapporto tecnico OGA-OGS, 2008.

User Manual – MARTEC Provor CTS2, 2004

User Manual – MARTEC Provor CTS3, 2006

User Manual- Apex-SBE Profiler