



Università della
Calabria



Politecnico di Bari



Università degli Studi
della Basilicata



Università del
Salento

*Dottorato di Ricerca in Ingegneria Idraulica per l'Ambiente e il
Territorio - XX Ciclo*

Settore scientifico-disciplinare ICAR/02

Dissertazione per il conseguimento del titolo di Dottore di Ricerca

*TARATURA E VERIFICA DI UN MODELLO
TIME-AVERAGED DI EVOLUZIONE DI
UNA SPIAGGIA CON DUNA*

Rosanna Gencarelli

Coordinatore
Prof. Ing. Paolo Veltri

Tutor
*Prof. Ing. Giuseppe Roberto
Tomasicchio*

Cosenza, Novembre 2007

INDICE

LISTA DELLE FIGURE	iv
LISTA DELLE TABELLE	xviii
SOMMARIO	xx

Capitoli

1. INTRODUZIONE	1
2. MODELLI PER L'EVOLUZIONE DEI PROFILI DI SPIAGGIA	6
2.1. Introduzione.....	6
2.2. Meccanismi che regolano il trasporto dei sedimenti.....	7
2.3. Distribuzione in direzione cross-shore del trasporto longitudinale.....	8
2.4. Modelli per l'evoluzione cross-shore dei profili di spiaggia.....	9
2.4.1. Modelli empirici.....	10
2.4.2. Modelli numerici.....	11
2.4.3. Modelli analitici.....	12
2.4.4. Modelli fisici.....	12
2.5. Modelli di evoluzione delle dune.....	13
3. IL MODELLO NUMERICO CSHORE	17
3.1. Introduzione.....	17
3.2. Modello di interazione onda-corrente.....	18
3.3. Il modello per la stima del trasporto dei sedimenti.....	26
4. TARATURA DEL MODELLO CSHORE: DATI DI LABORATORIO IN LARGA SCALA	31
4.1. Introduzione.....	31

4.2. Dati di laboratorio in larga scala.....	33
5. TARATURA DEL MODELLO CSHORE: CASO DELL'URAGANO ISABEL.....	47
5.1. Introduzione.....	48
5.2. L'uragano Isabel.....	48
5.3. Caratteristiche meteorologiche dell'uragano Isabel.....	58
5.4. Andamento della superficie marina.....	64
5.5. Analisi dei profili di spiaggia pre e post Isabel.....	66
5.5.1. Analisi dei profili LIDAR.....	66
5.5.2. Analisi dei profili FRF.....	83
6. APPLICAZIONE E VERIFICA DEL MODELLO CSHORE: DATI DI LABORATORIO IN LARGA SCALA.....	87
6.1. Introduzione.....	87
6.2. Taratura del parametro di frangimento.....	92
6.3. Profili di spiaggia.....	94
6.4. Trasporto di sedimenti in direzione cross-shore.....	100
7. APPLICAZIONE E VERIFICA DEL MODELLO CSHORE: DATI ISABEL.....	106
7.1. Introduzione.....	107
7.2. Taratura del parametro di frangimento.....	116
7.3. Trasporto medio dei sedimenti.....	117
7.4. Confronto tra i profili di spiaggia misurati e calcolati.....	119
7.5. Influenza dei dati di vento.....	121
8. CONCLUSIONI.....	123
 Appendici	
A. PROFILI LIDAR PRE E POST ISABEL.....	129

A-1. Area Souther Shores	130
A-2. Area Kitty Hawk.....	146
A-3. Area Kill Devis Hill.....	166
A-4. Area Nags Head Nord.....	190
A-5. Area Nags Head Centro.....	213
A-6. Aree Nags Head Sud e Cape Hatterras.....	236
B. PROFILI FRF PRE E POST ISABEL.....	253
C. ESTENSIONE DEI PROFILI FRF	283
D. APPLICAZIONE DEL MODELLO CSHORE AI PROFILI FRF	297
D-1. Trasporto dei sedimenti in direzione cross-shore e long-shore .	298
D-2. Profili di spiaggia.....	315
BIBLIOGRAFIA.....	332

LISTA DELLE FIGURE

2.1	Fenomeni evolutivi di una duna da spiaggia in conseguenza ad attacchi ondosì.....	13
3.1	Componenti di propagazione di un'onda irregolare obliqua e del vento incidenti su un tratto di costa rettilineo e uniforme in direzione long-shore.....	18
4.1	Grossenwellenkanal (Università di Hannover).....	34
4.2	Posizione dei wave gauges lungo il canale.....	36
4.3	Grossenwellenkanal: Esperimento 1 (16-22 luglio 1998). Profilo di spiaggia iniziale e finale (878 min) misurato.....	38
4.4	Grossenwellenkanal: Esperimento 2 (23-28 luglio 1998). Profilo di spiaggia iniziale e finale (691 min) misurato.....	40
4.5	Grossenwellenkanal: Esperimento 3 (28-31 luglio 1998). Profilo di spiaggia iniziale e finale (625 min) misurato.....	42
4.6	Grossenwellenkanal: Esperimento 4 (5-10 agosto 1998). Profilo di spiaggia iniziale e finale (693 min) misurato.....	45
4.7	Grossenwellenkanal: Esperimento 5 (10-12 agosto 1998). Profilo di spiaggia iniziale e finale (693 min) misurato.....	47
5.1.	Avanzamento dell'Uragano Isabel.....	48
5.2.	Outer Banks, North Carolina (USA).....	48
5.3.	Outer Banks: località per le quali si dispone di riprese aeree effettuate dall'USGS.....	49
5.4.a	Ocracoke, località 4, North Carolina (8 Agosto 2003).....	51
5.4.b	Ocracoke, località 4 (21 settembre 2003).....	51
5.5.a	Hatterras, località 7 (8 agosto 2003).....	52
5.5.b	Hatterras, località 7 (21 settembre 2003).....	52
5.6	Cape Hatterras, località 9: apertura di una nuova breccia (21 settembre 2003).....	53
5.7.a	Buxton, località 15 (8 agosto 2003).....	54

5.7.b	Buxton località 15 (21 settembre 2003).....	54
5.8.a	Rodanthe, località 21 (8 agosto 2003).....	55
5.8.b	Rodanthe, località 21 (21 settembre 2003).....	55
5.9.a	Nags Head, località 23 (8 agosto 2003).....	56
5.9.b	Nags Head, località 23 (21 settembre 2003).....	56
5.10.a	Kill Devis Hills, località 24, North Carolina (8 agosto 2003).....	57
5.10.b	Kill Devis Hills, località 24, North Carolina (21 settembre 2003).....	57
5.11	FRF: ripresa aerea.....	59
5.12	Strumenti di misura dell'FRF.....	59
5.13	Altezza d'onda significativa, H_{mo} , registrata dagli strumenti dell'FRF (15-21 settembre 2003).....	60
5.14	Periodo di picco, T_p , registrato dagli strumenti dell'FRF (15-21 settembre 2003).....	61
5.15	Direzione di propagazione del moto ondoso registrata dagli strumenti di misura dell'FRF (15-21 settembre 2003).....	62
5.16	Boe Ondametriche NOAA nel tratto di mare prospiciente Outer Banks.....	62
5.17	Valori dell'altezza d'onda significativa e del periodo di picco registrati dalla boa NOAA 41001 (15-21 settembre 2003).....	63
5.18	Velocità e direzione del vento rilevata presso l'osservatorio internazionale dell'FRF (15-21 settembre 2003).....	63
5.19	Strumenti di misura dell'andamento della superficie marina.....	64
5.20	Valori dell'andamento della superficie marina misurati presso l'osservatorio dell'FRF e mediante le boe NOAA di Oregon Inlet e Cape Hatterras (15-21 settembre 2003).....	65
5.21	Sistema satellitare LIDAR.....	66
5.22	Foto aerea (sinistra) e immagine LIDAR (destra) relativa alla località di Cape Hatterras presso cui, a seguito di Isabel, si è registrata l'apertura di una nuova breccia.....	67

5.23	Immagine LIDAR pre (sinistra) e post (destra) Isabel per la località di Cape Hatterras presso cui, a seguito dell'uragano Isabel, si è verificata l'apertura di una nuova breccia	67
5.24	Posizionamento dei profili LIDAR lungo Outer Banks (Immagine da Google Earth).....	68
5.25	Profili LIDAR: vista dall'altro (Immagine da Google Earth).....	69
5.26	Parametri caratteristici della duna.....	70
5.27	Altezza massima delle dune pre Isabel, Z_c , in funzione della distanza, x , in direzione long-shore, dal punto in cui l'uragano ha toccato terra.....	78
5.28	Pendenza della duna pre Isabel, $Z_c/(X_S - X_L)$, in funzione della distanza, x , in direzione long-shore, dal punto in cui l'uragano ha toccato terra.....	79
5.29	Differenza tra i valori di altezza delle dune pre e post Isabel, $(Z_C - Z_E)$, in funzione della distanza, x , in direzione long-shore, dal punto in cui l'uragano ha toccato terra.....	80
5.30	Area di duna erosa, A , funzione della distanza, x , in direzione long-shore, dal punto in cui l'uragano ha toccato terra.....	81
5.31	Erosione verticale media della duna, d , in funzione della distanza, x , in direzione long-shore, dal punto in cui l'uragano ha toccato terra.....	82
5.32	Profili FRF.....	83
5.33	Andamento batimentrico nel tratto di mare antistante il pontile dell'FRF....	84
5.34	Area erosa e variazione verticale media dell'altezza delle dune in funzione della distanza dal pontile dell'FRF.....	85
6.1	Wave flume e posizione dei vari gauges.....	89
6.2	Andamento dei valori di altezza d'onda significativa, H_{mo} , misurati e calcolati dal modello CSHORE alla distanza, in direzione cross-shore, a cui sono posizionati i gauges.....	93
6.3	Gossemwellenkanal: Esperimento 1. Profilo di spiaggia misurato (iniziale e finale) e calcolato (finale) dal modello numerico CSHORE.....	95
6.4	Grossenwellenkanal: Esperimento 2. Profilo di spiaggia misurato (iniziale e finale) e calcolato (finale) dal modello numerico CSHORE.....	96

6.5	Grossenwellenkanal: Esperimento 3. Profilo di spiaggia misurato (iniziale e finale) e calcolato (finale) dal modello numerico CSHORE	97
6.6	Grossenwellenkanal: Esperimento 4. Profilo di spiaggia misurato (iniziale e finale) e calcolato (finale) dal modello numerico CSHORE	98
6.7	Grossenwellenkanal: Esperimento 5. Profilo di spiaggia misurato (iniziale e finale) e calcolato (finale) dal modello numerico CSHORE	99
6.8	Grossenwellenkanal: Esperimento 1. Quantità di materiale trasportata in direzione cross-shore.....	101
6.9	Grossenwellenkanal: Esperimento 2. Quantità di materiale trasportata in direzione cross-shore.....	102
6.10	Grossenwellenkanal: Esperimento 3. Quantità di materiale trasportata in direzione cross-shore.....	103
6.11	Grossenwellenkanal: Esperimento 4. Quantità di materiale trasportata in direzione cross-shore.....	104
6.12	Grossenwellenkanal: Esperimento 5. Quantità di materiale trasportata in direzione cross-shore.....	105
7.1	Area erosa e variazione verticale media delle dune in funzione della distanza rispetto al pontile dell'FRF.....	110
7.2	Andamento della superficie marina tra l'8 agosto e il 21 settembre 2003..	111
7.3	Altezza d'onda significativa e periodo di picco registrati dal gauge 3111 tra l'8 agosto e il 21 settembre 2003.....	111
7.4	Valori della deviazione standard dell'andamento della superficie marina, η , misurati dal gauge 625 e calcolati dal modello utilizzando diversi valori del parametro di frangimento.....	116
7.5	Variazione della quantità media netta di materiale trasportato in direzione cross-shore, $q_x = q_{bx} + q_{sx}$, e relative componenti sul fondo, q_{bx} , e in sospensione, q_{sx}	117
7.6	Variazione della quantità media netta di materiale trasportato in direzione long-shore, $q_y = q_{by} + q_{sy}$, e relative componenti sul fondo, q_{by} , e in sospensione, q_{sy}	118
7.7	Profilo di spiaggia medio misurato (pre e post Isabel) e calcolato (post Isabel).....	120

7.8	Profilo di spiaggia medio misurato (pre e post Isabel) e calcolato dal modello (post Isabel) con e senza la presenza del vento.....	121
7.9	Quantità media di sedimenti trasportati in direzione cross-shore e long-shore con e senza vento.....	122
A-1.1	Vista dall'alto dei profili LIDAR per l'area di Souther Shores (Immagine da Google Earth).....	130
A-1.2	Souther Shores: profilo -150.....	131
A-1.3	Souther Shores: profilo -140.....	132
A-1.4	Souther Shores: profilo -130.....	133
A-1.5	Souther Shores: profilo -120.....	134
A-1.6	Souther Shores: profilo -110.....	135
A-1.7	Souther Shores: profilo -100.....	136
A-1.8	Souther Shores: profilo -90.....	137
A-1.9	Souther Shores: profilo -80.....	138
A-1.10	Souther Shores: profilo -70.....	139
A-1.11	Souther Shores: profilo -60.....	140
A-1.12	Souther Shores: profilo -50.....	141
A-1.13	Souther Shores: profilo -40.....	142
A-1.14	Souther Shores: profilo -30.....	143
A-1.15	Souther Shores: profilo -20.....	144
A-1.16	Souther Shores: profilo -10.....	145
A-2.1	Vista dall'alto dei profili LIDAR per l'area di Kitty Hawk (Immagine da Google Earth).....	146
A-2.2	Kitty Hawk: profilo 0.....	147
A-2.3	Kitty Hawk: profilo 9.....	148
A-2.4	Kitty Hawk: profilo 20.....	149
A-2.5	Kitty Hawk: profilo 30.....	150

A-2.6	Kitty Hawk: profilo 40.....	151
A-2.7	Kitty Hawk: profilo 50.....	152
A-2.8	Kitty Hawk: profilo 60.....	153
A-2.9	Kitty Hawk: profilo 70.....	154
A-2.10	Kitty Hawk: profilo 80.....	155
A-2.11	Kitty Hawk: profilo 89.....	156
A-2.12	Kitty Hawk: profilo 99.....	157
A-2.13	Kitty Hawk: profilo 109.....	158
A-2.14	Kitty Hawk: profilo 119.....	159
A-2.15	Kitty Hawk: profilo 130.....	160
A-2.16	Kitty Hawk: profilo 138.....	161
A-2.17	Kitty Hawk: profilo 149.....	162
A-2.18	Kitty Hawk: profilo 169.....	163
A-2.19	Kitty Hawk: profilo 179.....	164
A-2.20	Kitty Hawk: profilo 189.....	165
A-3.1	Vista dall'alto dei profili LIDAR per l'area di Kill Devis Hill (Immagine da Google Earth.....)	166
A-3.2	Kill Devis:profilo 199.....	167
A-3.3	Kill Devis: profilo 209.....	168
A-3.4	Kill Devis: profilo 219.....	169
A-3.5	Kill Devis: profilo 229.....	170
A-3.6	Kill Devis: profilo 240.....	171
A-3.7	Kill Devis: profilo 249.....	172
A-3.8	Kill Devis: profilo 260.....	173
A-3.9	Kill Devis: profilo 269.....	174
A-3.10	Kill Devis: profilo 279.....	175

A-3.11	Kill Devis: profilo 289.....	176
A-3.12	Kill Devis: profilo 299.....	177
A-3.13	Kill Devis: profilo 309.....	178
A-3.14	Kill Devis: profilo 320.....	179
A-3.15	Kill Devis: profilo 329.....	180
A-3.16	Kill Devis: profilo 340.....	181
A-3.17	Kill Devis: profilo 349.....	182
A-3.18	Kill Devis: profilo 359.....	183
A-3.19	Kill Devis: profilo 369.....	184
A-3.20	Kill Devis: profilo 380.....	185
A-3.21	Kill Devis: profilo 400.....	186
A-3.22	Kill Devis: profilo 410.....	187
A-3.23	Kill Devis: profilo 420.....	188
A-3.24	Kill Devis: profilo 429.....	189
A-4.1	Vista dall'alto dei profili di Nags Head Nord (Immagine da Google Earth).....	190
A-4.2	Nags Head Nord: profilo 439.....	191
A-4.3	Nags Head Nord: profilo 450.....	192
A-4.4	Nags Head Nord: profilo 460.....	193
A-4.5	Nags Head Nord: profilo 469.....	194
A-4.6	Nags Head Nord: profilo 483.....	195
A-4.7	Nags Head Nord: profilo 489.....	196
A-4.8	Nags Head Nord: profilo 499.....	197
A-4.9	Nags Head Nord: profilo 509.....	198
A-4.10	Nags Head Nord: profilo 519.....	199
A-4.11	Nags Head Nord: profilo 529.....	200

A-4.12	Nags Head Nord: profilo 540.....	201
A-4.13	Nags Head Nord: profilo 549.....	202
A-4.14	Nags Head Nord: profilo 559.....	203
A-4.15	Nags Head Nord: profilo 569.....	204
A-4.16	Nags Head nord: profilo 580.....	205
A-4.17	Nags Head Nord: profilo 589.....	206
A-4.18	Nags Head Nord: profilo 599.....	207
A-4.19	Nags Head Nord: profilo 609.....	208
A-4.20	Nags Head Nord: profilo 619.....	209
A-4.21	Nags Head Nord: profilo 630.....	210
A-4.22	Nags Head Nord: profilo 640.....	211
A-4.23	Nags Head Nord: profilo 649.....	212
A-5.1	Vista dall'alto dei profili LIDAR per l'area di Nags Head Centro (Immagine da Google Earth).....	213
A-5.2	Nags Head Centro; profilo 659.....	214
A-5.3	Nags Head Centro; profilo 670.....	215
A-5.4	Nags Head Centro; profilo 679.....	216
A-5.5	Nags Head Centro; profilo 689.....	217
A-5.6	Nags Head Centro; profilo 700.....	218
A-5.7	Nags Head Centro; profilo 709.....	219
A-5.8	Nags Head Centro; profilo 719.....	220
A-5.9	Nags Head Centro; profilo 729.....	221
A-5.10	Nags Head Centro; profilo 739.....	222
A-5.11	Nags Head Centro; profilo 749.....	223
A-5.12	Nags Head Centro; profilo 759.....	224
A-5.13	Nags Head Centro; profilo 771.....	226

A-5.14	Nags Head Centro; profilo 779.....	227
A-5.15	Nags Head Centro; profilo 789.....	228
A-5.16	Nags Head Centro; profilo 800.....	229
A-5.17	Nags Head Centro; profilo 809.....	230
A-5.18	Nags Head Centro; profilo 819.....	231
A-5.19	Nags Head Centro; profilo 829.....	232
A-5.20	Nags Head Centro; profilo 839.....	233
A-5.21	Nags Head Centro; profilo 850.....	234
A-5.22	Nags Head Centro; profilo 859.....	235
A-5.23	Nags Head Centro; profilo 869.....	236
A-6.1	Vista dall'alto dei profili LIDAR per le aree di Nags Head Sud e Cape Hatterras (Immagine da Google Earth).....	236
A-6.2	Hags Head Sud: profilo 879.....	237
A-6.3	Hags Head Sud: profilo 890.....	238
A-6.4	Hags Head Sud: profilo 899.....	239
A-6.5	Hags Head Sud: profilo 909.....	240
A-6.6	Hags Head Sud: profilo 920.....	241
A-6.7	Hags Head Sud: profilo 929.....	242
A-6.8	Hags Head Sud: profilo 940.....	243
A-6.9	Hags Head Sud: profilo 951.....	244
A-6.10	Hags Head Sud: profilo 960.....	245
A-6.11	Hags Head Sud: profilo 970.....	246
A-6.12	Hags Head Sud: profilo 978.....	247
A-6.13	Hags Head Sud: profilo 989.....	248
A-6.14	Hags Head Sud: profilo 999.....	249
A-6.15	Hags Head Sud: profilo 1009.....	250

A-6.16	Hags Head Sud: profilo 1020.....	251
A-6.17	Cape Hatterras : profilo 265.....	252
B-1	Profili FRF: vista dell'alto.....	254
B-2	Profilo 58.....	255
B-3	Profilo 59.....	256
B-4	Profilo 62.....	257
B-5	Profilo 64.....	258
B-6	Profilo 66.....	259
B-7	Profilo 67.....	260
B-8	Profilo 73.....	261
B-9	Profilo 76.....	262
B-10	Profilo 85.....	263
B-11	Profilo 95.....	264
B-12	Profilo 135.....	265
B-13	Profilo 155.....	266
B-14	Profilo 160.....	267
B-15	Profilo 164.....	268
B-16	Profilo 166.....	269
B-17	Profilo 171.....	270
B-18	Profilo 174.....	271
B-19	Profilo 176.....	272
B-20	Profilo 178.....	273
B-21	Profilo 181.....	274
B-22	Profilo 182.....	275
B-23	Profilo 183.....	276

B-24	Profilo 185.....	277
B-25	Profilo 186.....	278
B-26	Profilo 187.....	279
B-27	Profilo 188.....	280
B-28	Profilo 189.....	281
B-29	Profilo 190.....	282
C-1	Profili 58, 62 e 73 e profilo medio.....	284
C-2	Profili 183, 288 e 190 e profilo medio.....	285
C-3	FRF 59: profilo pre post Isabel misurato ed estrapolato come media dei profili 58,62 e 73	286
C-4	FRF 64: profilo medio pre e post Isabel misurato ed estrapolato come media dei profili 58, 62 e 73.....	287
C-5	FRF 66: profilo medio pre e post Isabel misurato ed estrapolato come media dei profili 58, 62 e 73.....	288
C-6	FRF 67: profilo medio pre e post Isabel misurato ed estrapolato come media dei profili 58, 62 e 73.....	289
C-7	FRF 76: profilo medio pre e post Isabel misurato ed estrapolato come media dei profili 58, 62 e 73.....	290
C-8	FRF 85: profilo medio pre e post Isabel misurato ed estrapolato come media dei profili 58, 62 e 73.....	291
C-9	FRF 182: profilo medio pre e post Isabel misurato ed estrapolato come media dei profili 183,188 e 190.....	292
C-10	FRF 185: profilo medio pre e post Isabel misurato ed estrapolato come media dei profili 183,188 e 190.....	293
C-11	FRF 186: profilo medio pre e post Isabel misurato ed estrapolato come media dei profili 183,188 e 190.....	294
C-12	FRF 187: profilo medio pre e post Isabel misurato ed estrapolato come media dei profili 183,188 e 19.....	295
C-13	FRF 189: profilo medio pre e post Isabel misurato ed estrapolato come media dei profili 183,188 e 190.....	296

- D-1.1** Profilo 58: distribuzione della quantità di materiale trasportata sul fondo, q_{bx} e q_{by} , in sospensione, q_{sx} e q_{sy} , e totale, $q_x = q_{bx} + q_{sx}$ e $q_y = q_{by} + q_{sy}$, in direzione cross-shore e long-shore, rispettivamente.....298
- D-1.2** Profilo 59: distribuzione della quantità di materiale trasportata sul fondo, q_{bx} e q_{by} , in sospensione, q_{sx} e q_{sy} , e totale, $q_x = q_{bx} + q_{sx}$ e $q_y = q_{by} + q_{sy}$, in direzione cross-shore e long-shore, rispettivamente.....299
- D-1.3** Profilo 62: distribuzione della quantità di materiale trasportata sul fondo, q_{bx} e q_{by} , in sospensione, q_{sx} e q_{sy} , e totale, $q_x = q_{bx} + q_{sx}$ e $q_y = q_{by} + q_{sy}$, in direzione cross-shore e long-shore, rispettivamente.....300
- D-1.4** Profilo 64: distribuzione della quantità di materiale trasportata sul fondo, q_{bx} e q_{by} , in sospensione, q_{sx} e q_{sy} , e totale, $q_x = q_{bx} + q_{sx}$ e $q_y = q_{by} + q_{sy}$, in direzione cross-shore e long-shore, rispettivamente.....301
- D-1.5** Profilo 66: distribuzione della quantità di materiale trasportata sul fondo, q_{bx} e q_{by} , in sospensione, q_{sx} e q_{sy} , e totale, $q_x = q_{bx} + q_{sx}$ e $q_y = q_{by} + q_{sy}$, in direzione cross-shore e long-shore, rispettivamente.....302
- D-1.6** Profilo 67: distribuzione della quantità di materiale trasportata sul fondo, q_{bx} e q_{by} , in sospensione, q_{sx} e q_{sy} , e totale, $q_x = q_{bx} + q_{sx}$ e $q_y = q_{by} + q_{sy}$, in direzione cross-shore e long-shore, rispettivamente.....303
- D-1.7** Profilo 73: distribuzione della quantità di materiale trasportata sul fondo, q_{bx} e q_{by} , in sospensione, q_{sx} e q_{sy} , e totale, $q_x = q_{bx} + q_{sx}$ e $q_y = q_{by} + q_{sy}$, in direzione cross-shore e long-shore, rispettivamente.....304
- D-1.8** Profilo 76: distribuzione della quantità di materiale trasportata sul fondo, q_{bx} e q_{by} , in sospensione, q_{sx} e q_{sy} , e totale, $q_x = q_{bx} + q_{sx}$ e $q_y = q_{by} + q_{sy}$, in direzione cross-shore e long-shore, rispettivamente.....305
- D-1.9** Profilo 85: distribuzione della quantità di materiale trasportata sul fondo, q_{bx} e q_{by} , in sospensione, q_{sx} e q_{sy} , e totale, $q_x = q_{bx} + q_{sx}$ e $q_y = q_{by} + q_{sy}$, in direzione cross-shore e long-shore, rispettivamente.....306
- D-1.10** Profilo 182: distribuzione della quantità di materiale trasportata sul fondo, q_{bx} e q_{by} , in sospensione, q_{sx} e q_{sy} , e totale, $q_x = q_{bx} + q_{sx}$ e $q_y = q_{by} + q_{sy}$, in direzione cross-shore e long-shore, rispettivamente.....307

D-1.11	Profilo 183: distribuzione della quantità di materiale trasportata sul fondo, q_{bx} e q_{by} , in sospensione, q_{sx} e q_{sy} , e totale, $q_x = q_{bx} + q_{sx}$ e $q_y = q_{by} + q_{sy}$, in direzione cross-shore e long-shore, rispettivamente.....	308
D-1.12	Profilo 185: distribuzione della quantità di materiale trasportata sul fondo, q_{bx} e q_{by} , in sospensione, q_{sx} e q_{sy} , e totale, $q_x = q_{bx} + q_{sx}$ e $q_y = q_{by} + q_{sy}$, in direzione cross-shore e long-shore, rispettivamente.....	309
D-1.13	Profilo 186: distribuzione della quantità di materiale trasportata sul fondo, q_{bx} e q_{by} , in sospensione, q_{sx} e q_{sy} , e totale, $q_x = q_{bx} + q_{sx}$ e $q_y = q_{by} + q_{sy}$, in direzione cross-shore e long-shore, rispettivamente.....	310
D-1.14	Profilo 187: distribuzione della quantità di materiale trasportata sul fondo, q_{bx} e q_{by} , in sospensione, q_{sx} e q_{sy} , e totale, $q_x = q_{bx} + q_{sx}$ e $q_y = q_{by} + q_{sy}$, in direzione cross-shore e long-shore, rispettivamente.....	311
D-1.15	Profilo 188: distribuzione della quantità di materiale trasportata sul fondo, q_{bx} e q_{by} , in sospensione, q_{sx} e q_{sy} , e totale, $q_x = q_{bx} + q_{sx}$ e $q_y = q_{by} + q_{sy}$, in direzione cross-shore e long-shore, rispettivamente.....	312
D-1.16	Profilo 189: distribuzione della quantità di materiale trasportata sul fondo, q_{bx} e q_{by} , in sospensione, q_{sx} e q_{sy} , e totale, $q_x = q_{bx} + q_{sx}$ e $q_y = q_{by} + q_{sy}$, in direzione cross-shore e long-shore, rispettivamente.....	313
D-1.17	Profilo 190: distribuzione della quantità di materiale trasportata sul fondo, q_{bx} e q_{by} , in sospensione, q_{sx} e q_{sy} , e totale, $q_x = q_{bx} + q_{sx}$ e $q_y = q_{by} + q_{sy}$, in direzione cross-shore e long-shore, rispettivamente.....	314
D-2.1	FRF: profilo 58. Profilo di spiaggia pre e post Isabel misurato e calcolato dal modello CSHORE.....	315
D-2.2	FRF: profilo 59. Profilo di spiaggia pre e post Isabel misurato e calcolato dal modello CSHORE.....	316
D-2.3	FRF: profilo 62. Profilo di spiaggia pre e post Isabel misurato e calcolato dal modello CSHORE.....	317
D-2.4	FRF: profilo 64. Profilo di spiaggia pre e post Isabel misurato e calcolato dal modello CSHORE.....	318
D-2.5	FRF: profilo 66. Profilo di spiaggia pre e post Isabel misurato e calcolato dal modello CSHORE.....	319

D-2.6	FRF: profilo 67. Profilo di spiaggia pre e post Isabel misurato e calcolato dal modello CSHORE.....	320
D-2.7	FRF: profilo 73. Profilo di spiaggia pre e post Isabel misurato e calcolato dal modello CSHORE.....	321
D-2.8	FRF: profilo 76. Profilo di spiaggia pre e post Isabel misurato e calcolato dal modello CSHORE.....	322
D-2.9	FRF: profilo 85. Profilo di spiaggia pre e post Isabel misurato e calcolato dal modello CSHORE.....	323
D-2.10	FRF: profilo 182. Profilo di spiaggia pre e post Isabel misurato e calcolato dal modello CSHORE.....	324
D-2.11	FRF: profilo 183. Profilo di spiaggia pre e post Isabel misurato e calcolato dal modello CSHORE.....	325
D-2.12	FRF: profilo 185. Profilo di spiaggia pre e post Isabel misurato e calcolato dal modello CSHORE.....	326
D-2.13	FRF: profilo 186. Profilo di spiaggia pre e post Isabel misurato e calcolato dal modello CSHORE.....	327
D-2.14	FRF: profilo 187. Profilo di spiaggia pre e post Isabel misurato e calcolato dal modello CSHORE.....	328
D-2.15	FRF: profilo 188. Profilo di spiaggia pre e post Isabel misurato e calcolato dal modello CSHORE.....	329
D-2.16	FRF: profilo 189. Profilo di spiaggia pre e post Isabel misurato e calcolato dal modello CSHORE.....	330
D-2.17	FRF: profilo 190. Profilo di spiaggia pre e post Isabel misurato e calcolato dal modello CSHORE.....	331

LISTA DELLE TABELLE

4.1	Caratteristiche dei sedimenti costituenti i profili di spiaggia per il caso dei test di laboratorio in piccola scala (Buck et al., 2007).....	32
4.2	Caratteristiche dei sedimenti costituenti i profili di spiaggia per il caso dei test di laboratorio condotti da Wang et al. (2002)	32
4.3	Caratteristiche dei sedimenti costituenti i profili di spiaggia per il caso dei test di laboratorio condotti da van Gent (2006).....	33
4.4	Test di laboratorio in larga scala: università di Hannover (1998). Parametri caratteristici delle onde.....	35
4.5	Grossenwellenkanal: Esperimento 1. Parametri ondametrici caratteristici e durata temporale di ogni attacco ondoso.....	37
4.6	Grossenwellenkanal: Esperimento 2. Parametri ondametrici caratteristici e durata temporale di ogni attacco ondoso.....	39
4.7	Grossenwellenkanal: Esperimento 3. Parametri ondametrici caratteristici e durata temporale di ogni attacco ondoso.....	41
4.8	Grossenwellenkanal: Esperimento 4. Parametri ondametrici caratteristici e durata temporale di ogni attacco ondoso.....	43
4.9	Grossenwellenkanal: Esperimento 5. Parametri ondametrici caratteristici e durata temporale di ogni attacco ondoso.....	45
5.1	Parametri caratteristici delle dune da spiaggia pre e post Isabel per l'area di Souther Shores.....	72
5.2	Parametri caratteristici delle dune da spiaggia pre e post Isabel per l'area di Kitty Hawk.....	73
5.3	Parametri caratteristici delle dune da spiaggia pre e post Isabel per l'area di Kill Devis.....	74
5.4	Parametri caratteristici delle dune da spiaggia pre e post Isabel per l'area di Nags Head.....	76
5.5	Parametri caratteristici delle dune da spiaggia pre e post Isabel per l'area di Cape Hatterras.....	77

5.6	Valori di area erosa, A , e variazione verticale, d , per i profili FRF a seguito dell'impatto dell'uragano Isabel.....	86
6.1	Grossenwellenkanal: Esperimento 1. Numero di attacchi ondosi, loro durata e corrispondenti parametri caratteristici.....	90
6.2	Grossenwellenkanal: Esperimento 2. Numero di attacchi ondosi, loro durata e corrispondenti parametri caratteristici.....	90
6.3	Grossenwellenkanal: Esperimento 3. Numero di attacchi ondosi, loro durata e corrispondenti parametri caratteristici.....	91
6.4	Grossenwellenkanal: Esperimento 4. Numero di attacchi ondosi, loro durata e corrispondenti parametri caratteristici.....	91
6.5	Grossenwellenkanal: Esperimento 5. Numero di attacchi ondosi, loro durata e corrispondenti parametri caratteristici.....	91
6.6	Posizione dei gauges rispetto al punto esterno del dominio di calcolo ($x = 0$).....	92
6.7	Altezza d'onda significativa, H_{mo} , misurata e calcolata dal modello CSHORE in corrispondenza dei vari gauges.....	93
7.1	Estensione in direzione cross-shore dei rilievi effettuati circa i profili FRF.....	109
7.2.a	Dati di input del modello CSHORE per il caso dell'uragano Isabel. Valori caratteristici dell'andamento della superficie marina e del moto ondoso per intervallo temporali di 3 ore	112
7.2.b	Dati di input del modello CSHORE per il caso dell'uragano Isabel. Valori caratteristici dell'andamento della superficie marina e del moto ondoso per intervallo temporali di 3 ore	113
7.3.a	Dati di input del modello CSHORE. Dati di vento per intervalli temporali di 3 ore.....	114
7.3.b	Dati di input del modello CSHORE. Dati di vento per intervalli temporali di 3 ore.....	115

SOMMARIO

L'analisi delle modifiche subite dai profili di spiaggia e dalle dune rappresenta, ad oggi, uno dei fenomeni della marittima più complessi da esaminare a causa sia della molteplicità degli elementi che entrano in gioco nel processo, difficili da definire in maniera univoca, sia della mancanza di dati reali in campo di buona qualità utilizzabili per effettuare studi di questo tipo.

Il lavoro svolto ha come principali obiettivo quello di valutare l'erosione subita dalle dune e dai profili di spiaggia a seguito di un evento ondoso estremo quale quello prodotto dall'impatto dell'uragano Isabel (18 Settembre 2003) sulle coste di Outer Banks, nel North Carolina (USA). L'analisi verrà condotta utilizzando, da un lato, i profili di spiaggia pre e post Isabel rilevati dal sistema satellitare LIDAR, relativamente alle sole dune da spiaggia, e dall'altro i rilievi effettuati presso l'osservatorio internazionale del Field Research Facility (FRF), a Duck in North Carolina, relativi ai profili di spiaggia sia emersi (dune) che sommersi.

Un nuovo modello numerico time-averaged per la previsione dell'erosione dei profili di spiaggia in direzione cross-shore, basato sulla combinazione di equazioni idrodinamiche e per la stima del trasporto solido, sarà, inoltre, tarato, applicato e verificato utilizzando da un lato dati di laboratorio in larga scala ricavati da esperimenti svolti presso l'Università di Hannover (1998), che riproducono condizioni ondometriche e profili di spiaggia tipici Italiani, e dall'altro utilizzando i rilievi, relativi ai profili di spiaggia e alle caratteristiche ondometriche, effettuati presso l'FRF per il caso dell'uragano Isabel. La taratura eseguita porterà a definire, in entrambi i casi, il valore del parametro di frangimento, γ , nonché a valutare la qualità delle previsioni effettuate dal modello circa l'evoluzione subita dai profili di spiaggia a seguito dei diversi attacchi

ondosi. Si valuterà, inoltre, qualitativamente la distribuzione della quantità di materiale trasportata dall'azione del moto ondoso sia in direzione cross-shore che long-shore, nonché, per il caso dell'uragano Isabel, l'influenza esercitata dall'azione del vento sui fenomeni di erosione e di trasporto di sedimenti.

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE

Lo studio dei fenomeni evolutivi dei profili di spiaggia, a seguito dell'azione continua, nel tempo, delle onde e delle correnti è di fondamentale importanza in molti problemi di ingegneria costiera soprattutto di quelli concernenti direttamente la difesa della costa. In questo contesto, un ruolo sempre maggiore è svolto dalla presenza delle dune che rappresentano l'ultima difesa offerta dalla spiaggia a protezione delle aree costiere poste a tergo di essa che possono essere interessate, durante eventi ondosi estremi, da eventuali fenomeni di inondazioni. Thieler e Young (1991), ad esempio, hanno dimostrato come la presenza delle dune prima di un evento ondoso particolarmente significativo, quale quello prodotto dall'impatto dell'uragano Hugo sulle coste degli Stati Uniti, ha comportato la riduzione sostanziale dei danni originati dall'azione delle onde. A causa, poi, del riscaldamento globale e del conseguente innalzamento del livello medio del mare, si comprende l'importanza crescente assunta dallo studio dei fenomeni di erosione, di *overwash* (trasporto di materiale e acqua al di sopra della cresta della duna (Donnelly et al. 2006)) e *breaching* (apertura di nuove breccie in corrispondenza di tratti spiaggia con conseguente scambio continuo d'acqua tra il mare aperto e quello posto a tergo della spiaggia stessa) che possono interessare una duna.

Attualmente non esistono modelli numerici capaci di prevedere, in maniera esatta, i fenomeni di erosione di una duna sia a causa della indisponibilità di dati reali di campo sufficientemente accurati sia, soprattutto, a causa della incapacità di riuscire a definire in maniera univoca le caratteristiche del trasporto di sedimenti in direzione cross-shore.

Modelli empirici time-dependent basati sul concetto dei profili di equilibrio sono stati, ad esempio, sviluppati al fine di predire l'erosione delle spiagge e delle dune durante attacchi ondosi (Kriebel e Dean, 1985; Kobayashi, 1987; Larson e Kraus, 1989). Tali modelli, capaci di valutare l'erosione della duna con uno scarto minimo rispetto a quella realmente registrata, presentano l'inconveniente di essere applicabili solo nel caso di onde con direzione di propagazione ortogonale alla linea di riva.

Hancock e Kobayashi (1994) hanno condotto esperimenti in laboratorio con l'obiettivo di studiare i fenomeni di overwash che caratterizzano una duna.

A questi si sono aggiunti, poi, altri esperimenti condotti sempre da Kobayashi et al. (2006 e 2007) allo scopo di ottenere un set di dati quanto più possibile accurato per la taratura e verifica di un nuovo modello numerico time-averaged per la stima del trasporto dei sedimenti in direzione cross-shore. Il modello, noto con il nome di CSHORE, si basa sulla combinazione di equazioni idrodinamiche (equazione del moto, di continuità, e di conservazione dell'energia) per la stima delle caratteristiche di propagazione del moto ondoso da largo verso riva, e di equazioni morfodinamiche, per la stima della quantità di materiale trasportata sia in direzione cross-shore che long-shore, nell'ipotesi di onda incidente sulla linea di riva con direzione obliqua.

Lo studio di seguito condotto è stato sviluppato in due diverse fasi.

Una prima fase ha avuto come principale obiettivo quello di analizzare i fenomeni di erosione che hanno caratterizzato i profili di spiaggia e le dune a seguito dell'impatto dell'uragano Isabel (18 Settembre 2003) sulle coste di Outer Banks, nel North Carolina (USA). Informazioni relative ai profili di spiaggia pre e post Isabel sono state fornite dal sistema satellitare LIDAR e dai rilievi di campo effettuati dallo staff dell'osservatorio internazionale dell'FRF (Field Research Facility) a Duck, sempre nel North Carolina.

Le riprese effettuate dal sistema LIDAR, gestito dall'U.S Geological Survey (USGS), lungo le coste di Outer Banks presentano l'inconveniente di non riuscire a penetrare all'interno delle acque torbide come, appunto, possono essere le acque di mare in corrispondenza della linea di riva. Conseguentemente, le informazioni fornite dal satellite sono state utilizzate, esclusivamente, per l'analisi dei fenomeni di erosione che hanno caratterizzato le dune giungendo alla stima quantitativa dell'area di duna erosa e della variazione verticale da essa subita. Entrambi i parametri sono stati diagrammati in funzione della distanza, misurata parallelamente alla linea di riva, rispetto al punto in cui l'uragano ha toccato terra.

I profili FRF, ricavati da rilievi in campo eseguiti dallo staff dell'osservatorio internazionale, forniscono informazioni relative sia alle dune che ai profili di spiaggia sommersi per una distanza, in direzione cross-shore, variabile da profilo e profilo. Questo ha permesso, quindi, di valutare l'effetto complessivo prodotto dall'impatto dell'uragano sui profili di spiaggia in direzione cross-shore, giungendo anche in questo caso, a valutare la quantità di area erosa.

Nella seconda fase, lo studio ha riguardato la taratura, l'applicazione e la verifica del modello numerico CSHORE utilizzando, da un lato, i dati di laboratorio in larga scala ricavati da esperimenti svolti presso il Grossenwellenkanal dell'Università di Hannover nel 1998, riproducenti condizioni ondamiche e profili di spiaggia tipici Italiani (Venezia), e dall'altro, utilizzando i profili di spiaggia e le informazioni relative ai parametri caratteristici di moto ondoso, della velocità e direzione del vento, dell'andamento della superficie marina registrati in maniera accurata dagli strumenti di misura dell'osservatorio internazionale del Field Research Facility durante l'uragano Isabel. La taratura del modello condotta in questo secondo caso, rappresenta una novità assoluta, mai prima d'ora, infatti, il modello era stata testato per condizioni ondamiche così estreme. Dal punto di vista teorico, infatti, l'uragano Isabel rappresenta il caso ideale da utilizzare per effettuare indagini di campo circa la taratura di un modello numerico grazie sia all'accuratezza delle registrazioni relative alle forze idrodinamiche, sia alla disponibilità di profili di spiaggia precedenti (8 Agosto 2003) e susseguenti (21 Settembre 2003) il suo impatto sulla costa (18 Settembre 2003).

Il lavoro svolto prevede, nel Capitolo 2 un breve cenno a quelli che sono i meccanismi che regolano il trasporto solido dei sedimenti in mare in direzione parallela e ortogonale alla linea di riva. Si passeranno poi in rassegna i principali modelli, sviluppati nel corso degli anni, per la stima dell'evoluzione dei profili di spiaggia a cui, negli ultimi anni, si sono aggiunti quelli relativi all'evoluzione delle dune.

Seguirà poi, nel Capitolo 3, l'analisi del modello numerico CSHORE e delle equazioni su cui esso si basa.

Nel capitolo 4, l'attenzione sarà rivolta alla descrizione dei test di laboratorio in larga scala eseguiti presso l'università di Hannover evidenziando le caratteristiche del canale di sperimentazione, dei profili di spiaggia e degli attacchi ondosi relativi ai 5 diversi test condotti.

Nel capitolo 5 lo studio riguarderà l'analisi delle caratteristiche dell'Uragano Isabel, mettendo in evidenza attraverso foto aeree realizzate dall'US Geological Survey, lungo Outer Banks, la sua forza distruttrice. Successivamente, si descriveranno le caratteristiche meteorologiche dell'uragano utilizzando, da un lato, le informazioni registrate dagli strumenti del Field Research Facility, presso Duck, in North Carolina, e, dall'altro, quelle fornite dalle boe ondometriche NOAA, poste nel tratto di mare prospiciente l'area di studio. Seguirà poi l'analisi relativa dell'andamento della superficie marina ed, infine, quella relativa ai profili di spiaggia pre e post Isabel, disponibili nello studio svolto, ed utilizzati, come già detto in precedenza, per definire l'erosione delle sole dune (profili LIDAR) e delle dune e dei profili sommersi (profili FRF).

Nei capitoli 6 e 7 si riportano i risultati relativi all'applicazione del modello CSHORE per il caso dei dati di laboratorio in larga scala e dell'uragano Isabel, rispettivamente.

In entrambi i casi, l'applicazione del modello permetterà di stimare il valore del parametro di frangimento, γ , di valutare le capacità previsionali del modello per quanto concerne l'erosione subita dai profili di spiaggia, nonché, di valutare dal punto di vista qualitativo la quantità di materiale trasportata, nella sola direzione cross-shore, nel caso dei dati di laboratorio, unitamente a quella long-shore per il caso dell'uragano Isabel. Infine, sempre per questo ultimo caso sarà possibile

valutare l'influenza esercitata dall'azione del vento sia sulle modifiche subite dai profili di spiaggia sia sulla quantità di materiale trasportata.

I grafici relativi alle varie fasi dello studio svolto sono riportati nelle Appendici A, B, C e D

CAPITOLO 2

I MODELLI PER L'EVOLUZIONE DEI PROFILI DI SPIAGGIA

2.1.Introduzione

I modelli di evoluzione del profilo trasversale di spiaggia si basano sull'accoppiamento di modelli idrodinamici e di trasporto solido. I primi permettono di conoscere le caratteristiche puntuali del moto ondoso e delle correnti, i secondi di valutare le componenti relative al trasporto solido dei sedimenti inteso come: trasporto in direzione longitudinale (long-shore) e/o trasversale (cross-shore) alla linea di riva, al fondo e/o in sospensione.

Se i modelli idrodinamici sono stati sviluppati in maniera dettagliata nel corso degli anni, lo stesso non si può dire per i modelli per il trasporto solido. Il motivo di ciò è dovuto, anche, al fatto che non esistono equazioni del trasporto solido capaci di descrivere il fenomeno nella sua totalità in quanto esso è regolato da un insieme di fattori, più o meno complessi, che variano nel tempo e nello spazio.

Nei paragrafi che seguono si farà una breve cenno a quelli che sono i meccanismi che regolano il trasporto solido, fornendo, successivamente, una classificazione dei modelli esistenti facendo riferimento, per ogni classe, ai quelli di uso più comune. Successivamente l'attenzione sarà rivolta ai modelli di stima dell'erosione delle dune.

2.2. Meccanismi che regolano il trasporto di sedimenti

Il trasporto dei sedimenti viene, generalmente, interpretato scomponendolo in una componente trasversale e una parallela alla linea di riva entrambe governate dall'azione congiunta delle onde e delle correnti. In acque profonde le correnti sono essenzialmente legate all'azione delle maree e del vento, man mano che la profondità diminuisce a queste si aggiungono quelle dovute all'azione delle onde e in particolare quelle generate dal frangimento.

Il trasporto trasversale (*cross-shore*) viene tipicamente indagato al fine di analizzare le modifiche subite dai profili di spiaggia e di caratterizzare le forme di fondo. Il suo studio, sviluppatosi negli ultimi anni, presenta notevoli incertezze legate alla stima di tutte le componenti che regolano il fenomeno. Il trasporto *cross-shore* è governato dall'azione delle onde che inducono delle forze idrodinamiche sulle particelle di sedimenti presenti nelle vicinanze del fondale marino. Partendo dalla zona al largo (*offshore*) e procedendo verso riva (*onshore*), le particelle di sedimento iniziano, progressivamente sempre di più, a risentire dell'azione dell'onda grazie alla quale vengono trasportate verso riva. A questo moto si contrappone la pendenza del fondale che tende a determinare i sedimenti verso il largo. Nel momento in cui queste due forze si bilanciano, la particella si deposita. Quando l'azione del moto ondoso sul sedimento è piuttosto debole, la sabbia inizia a formare piccole ondulazioni (*ripples*) con la cresta parallela alla linea di riva. Il trasporto *cross-shore* interessa sia la zona *offshore*, quando siamo in presenza di mareggiate, che quella *onshore*, dominante quando siamo in presenza di onde di mare morto.

Il trasporto longitudinale (*long-shore*) è in generale prevalente rispetto a quello *cross-shore*, specialmente nell'area di mare delimitata *offshore* dalla zona dei frangenti.

Quando un'onda con direzione obliqua rispetto alla linea di riva frange vengono generate delle correnti lungoriva che unite a quelle indotte dalle onde stesse, dalle maree e dal vento producono un trasporto *long-shore* di sedimenti noto come "*long-shore drift*". La sua analisi, sviluppata negli ultimi 50 anni, presenta notevoli incertezze legate agli aspetti che intervengono nel fenomeno tra i quali, ad esempio, l'importanza

che in esso assume la dimensione dei sedimenti, le caratteristiche dei fondali marini nonché la distribuzione in direzione cross-shore del trasporto longitudinale.

Come detto, il trasporto in direzione cross-shore e long-shore può avvenire al fondo e in sospensione. Il primo si verifica quando, per effetto delle forze intergranulari tra i sedimenti e il fondo marino, il materiale viene trasportato in corrispondenza o nelle vicinanze del fondale attraverso successivi rotolamenti, strisciamenti o piccoli salti. Il secondo si verifica quando le particelle di materiale sono trasportate più o meno lontane dal fondo per effetto delle correnti indotte, ad esempio, dal frangimento delle onde (Bagnold, 1956). Infatti, proprio nella zona dei frangenti risulta difficile fare una netta distinzione tra trasporto di fondo e in sospensione a causa della notevole concentrazione di sedimenti in movimento. Il tutto è complicato anche dal fatto che le modalità secondo le quali i sedimenti si muovono possono mutare nel tempo.

2.3. Distribuzione in direzione cross-shore del trasporto longitudinale

Le modalità in base alle quali il trasporto longitudinale si distribuisce procedendo da largo verso riva, è stato, nel corso degli anni, oggetto di studio.

Secondo **Thorton** (1973) la distribuzione del trasporto longitudinale, q_x , in direzione cross-shore, y , è proporzionale al prodotto tra i valori dell'energia media dell'onda, dissipata per unità di superficie, e delle correnti long-shore. Tale fattore di proporzionalità varia all'interno e all'esterno della surf zone. Gli esperimenti condotti da Thorton mostrano come il massimo del trasporto dei sedimenti in direzione long-shore si verifica in prossimità della linea media dei frangenti, ovvero in corrispondenza della zona in cui il rapporto $y/y_b = 1$, con y e y_b distanze cross-shore in corrispondenza delle quali, rispettivamente, si rileva il trasporto dei sedimenti e in cui mediamente si registra il frangimento delle onde.

Secondo **Komar** (1976) la distribuzione cross-shore del trasporto long-shore è proporzionale al:

1. prodotto tra i valori dello sforzo tangenziale al fondo e delle velocità che si verificano in direzione long-shore, funzioni, queste ultime, della componente del gradiente di radiation stress, S_{xy} , nella stessa direzione;

2. rapporto tra il valore medio dell'altezza delle onde al frangimento e la profondità media in corrispondenza della quale è collocata la linea media dei frangenti.

Il valore massimo di $q_x(y)$ si registra in corrispondenza del punto in cui il rapporto tra y e y_b è pari a 0.8.

Sawaragi e Deguchi (1978) hanno determinato la distribuzione del trasporto long-shore usando sia indagini sperimentali in laboratorio che indagini in campo. Utilizzando le indagini in campo, gli autori conclusero che, a causa dei diversi valori che l'angolo di incidenza delle onde può assumere, della continua variazione del livello medio del mare, causato dalle maree, e delle caratteristiche dei sedimenti, è molto difficile valutare la distribuzione del trasporto dei sedimenti. Utilizzando il modello basato sulle indagini di laboratorio, essi conclusero che il massimo del trasporto dei sedimenti in direzione long-shore si registra in corrispondenza dei punti in cui il rapporto tra y e y_b è compreso a 0.5 e 1.

Furford (1982, 1987) ha determinato un'espressione empirica per la stima della distribuzione del trasporto dei sedimenti basata sugli studi condotti da Savage (1959) che permisero di valutare i fenomeni evolutivi del trasporto dei sedimenti in relazione all'angolo di incidenza dell'onda. L'analisi di Furford si basa sull'equazione di conservazione del trasporto dei sedimenti:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} - \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (2.1)$$

con q_x e q_y trasporto locale di sedimenti in direzione long-shore e cross-shore, rispettivamente, per unità di superficie, e h profondità del mare.

2.4. Modelli per l'evoluzione cross-shore dei profili di spiaggia

Nel tentativo di comprendere e quantificare i movimenti dei sedimenti sotto l'azione del moto ondoso, è necessario valutare le trasformazioni che caratterizzano un'onda nel suo movimento da largo verso riva e delle conseguenti forze generate.

I modelli per l'evoluzione cross-shore dei profili di spiaggia vengono solitamente suddivisi in modelli empirici, numerici, analitici e fisici.

2.4.1. Modelli empirici

I modelli empirici, basati sulla sola osservazione diretta dei fenomeni, possono essere sviluppati secondo due differenti approcci: Euleriano e Lagrangiano. Il primo tipo di approccio permette di valutare direttamente la quantità di materiale trasportato misurando quello che di volta in volta viene trattenuto in apposite "trappole" (*sediment traps*) collocate lungo la direzione longitudinale delle vasche di sperimentazione. Il secondo approccio utilizza particelle fluorescenti colorate immerse nel fluido grazie alle quali è possibile definire le modalità di sviluppo del trasporto solido..

Seguendo un approccio di tipo empirico, la previsione della quantità di materiale trasportato può avvenire, anche, utilizzando le osservazioni storiche relative alle modifiche subite dai profili reali di spiaggia nel corso del tempo.

Con modelli empirici sono state ottenute le equazioni che regolano i profili di equilibrio nel caso di trasporto di materiale nella sola direzione cross-shore. I profili di equilibrio sono il risultato di un bilancio di forze, dovute all'azione del moto ondoso, che agendo nel tempo provocano l'erosione e il successivo ripascimento di un tratto di spiaggia. Il loro studio è di rilievo in tutti gli interventi di gestione delle coste. Diversi modelli sono stati sviluppati per l'analisi dei profili di equilibrio. Il primo modello venne proposto da **Bruun** nel 1954 e venne poi sviluppato da **Dean** (1977, 1993, 2006). A seguito di differenti studi condotti sulle spiagge di Monterey Bay in California e lungo le coste della Danimarca, Bruun (1954) concluse che l'andamento cross-shore dei profili di equilibrio di una spiaggia possono essere interpretati attraverso la relazione

$$h(y) = Ay^{2/3}$$

con $h(y)$ profondità legata alla distanza verso il largo, y , attraverso un parametro di scala A il cui valore è funzione delle dimensioni del sedimento (Dean 1993, 2002, 2005). Il modello di Bruun si basa sulle ipotesi fondamentali che le modifiche subite dai profili di spiaggia dipendono in primo luogo dalla turbolenza in corrispondenza della surf zone, e in secondo luogo dalla relazione esistente tra il diametro dei sedimenti e l'energia dell'onda dissipata per unità di superficie (Dean 1993). Per questo motivo il

modello proposto da Bruun e poi da Dean rientra all'interno dei modelli dissipativi. Tali modelli non tengono conto della pendenza dei fondali, per questo motivo **Larson** (1988) propose un modello che tenesse conto, tra le forze responsabili dell'evoluzione dei profili di spiaggia, anche quella indotta dalla gravità. Per Larson, l'equazione che descrive l'andamento del profilo di equilibrio assume la forma

$$y = \frac{h}{m} + \left(\frac{h}{A}\right)^{3/2}$$

con m pendenza del profilo di spiaggia.

2.4.2. Modelli numerici

I modelli numerici, noti anche come modelli dinamici, permettono di seguire l'evoluzione del trasporto di sedimenti sia nel tempo che nello spazio. Tali modelli si basano sull'utilizzo di equazioni la cui complessità di risoluzione varia in relazione al livello di accuratezza di risultati che si vuole raggiungere.

Nel caso del trasporto dei sedimenti, i modelli numerici nascono dall'unione di diverse formulazioni analitiche che descrivono le modifiche subite dalle onde, dalle correnti, dal trasporto dei sedimenti. Essi vengono solitamente ricondotti a due tipologie:

1. modelli mediati rispetto al periodo dell'onda (*time averaged*);
2. modelli che risolvono lo stato istantaneo del campo di moto (*time dependent*).

I modelli *time-averaged* determinano l'effetto netto dell'onda sulla circolazione idrodinamica costiera. Gli approcci meno sofisticati consistono nella simulazione limitata alle due dimensioni nel piano orizzontale (2DH) o alle due dimensioni nel piano verticale (2DV). Un modello di tipo 2DH risolve le equazioni del moto e di continuità, mediate rispetto al periodo, ipotizzando una distribuzione uniforme della corrente lungo la verticale; un modello di tipo 2DV, o di *cross-shore circulation*, trascura la componente di velocità ed i gradienti lungo la linea di riva. Entrambe le formulazioni sono semplificazioni, con evidenti limiti, ad un fenomeno 3D la cui formulazione matematica si può ritenere ancora in fase di sviluppo.

E' stata quindi introdotta la tecnica *quasi-3D* (**Davies**, 1987; **De Vriend** e **Stive**, 1987; **Svendsen** e **Lorenz**, 1989) che consiste in un'approssimazione al fenomeno 3D facente uso delle esistenti formulazioni 2D. La tecnica *quasi-3D* utilizza un modello 2DH

al quale si associa un modulo che descrive la distribuzione lungo la verticale del profilo di corrente.

Tra i modelli di tipo time-averaged quelli più diffusi sono quelli proposti da *Battjes e Janssen* (1978) e *Thornton e Guza* (1983), *Dally e Dean* (1986), *Mase e Kobayashi* (1991).

Tra i modelli di tipo time dependent i più diffusi sono quelli che risolvono le equazioni non lineari per acque basse (*Kobayashi e Wurjanto*, 1990) o le equazioni di tipo Boussinesq (*Whitting*, 1984; *Madsen et al.*, 1991; *Nwogu*, 1993; *Tomasicchio e Brunone*, 1998; *Tomasicchio e Aristodemo*, 2005).

2.4.3. Modelli analitici

I modelli analitici, al pari di quelli numerici, permettono di descrivere, il processo di trasporto dei sedimenti in direzione cross-shore seguendo un approccio di tipo dinamico.

Tra i modelli analitici più in uso ricordiamo quello proposto da *Kobayashi* (1987) ed da *Kriebel and Dean* (1993).

2.4.4. Modelli fisici

I modelli fisici permettono una rappresentazione visiva e diretta del fenomeno del trasporto solido attraverso l'utilizzo di prototipi, opportunamente scalati, grazie ai quali riprodurre le condizioni che regolano il processo di trasporto solido.

La possibilità che in un modello si riproducano azioni simili a quelle del prototipo è legata ad alcune condizioni di similitudine. La similitudine può essere geometrica, cinematica e dinamica. Nel caso della similitudine geometrica si dovrà avere che le dimensioni corrispondenti, nel modello e nel prototipo, dovranno essere nella stessa scala. La similitudine cinematica implica che il moto e i tragitti delle particelle omologhe siano in proporzione. La similitudine dinamica, infine, richiede che le masse e le forze nelle particelle liquide, nel modello e nel prototipo, siano ugualmente in proporzione. Per ottenere la similitudine dinamica è necessario avere, contemporaneamente, anche quella cinematica e geometrica.

Esempi di modelli fisici per la stima del trasporto solido in direzione cross-shore sono ad esempio, da *Noda* (1972) and *Hughes* (1994).

2.5. Modelli di evoluzione delle dune

Le dune rappresentano l'ultima linea di difesa fornita dalle spiagge, durante le mareggiate più intense, al fine di ridurre al minimo i rischi di allagamento delle aree costiere con conseguenti danni in termini economici e di vite umane. Si capisce come, soprattutto per alcune zone del mondo quali le aree costiere del Golfo del Messico, dell'est degli Stati Uniti e, per quanto riguarda l'Europa, dell'Olanda, risulta di fondamentale importanza riuscire a prevedere, in funzione delle caratteristiche delle mareggiate, il volume di duna eroso, il suo eventuale arretramento o avanzamento (Fig. 2.1), nonché la probabilità che possa essere soggetta a fenomeni di overtopping o breaching.

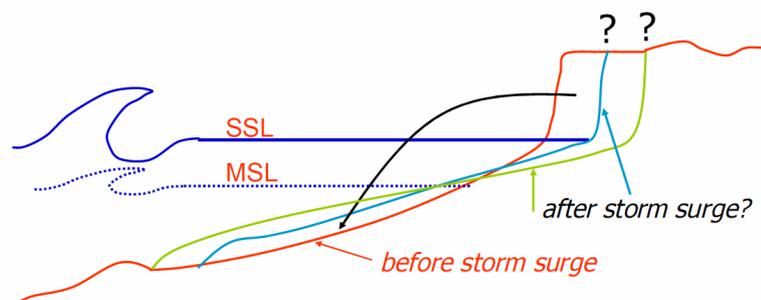


Figura 2.1. Fenomeni evolutivi di una duna da spiaggia in conseguenza ad attacchi ondosi

Secondo la definizione fornita da Donnelly et al. (2006), per *overwash* si intende un flusso d'acqua e di sedimenti al di sopra della cresta della spiaggia che non ritorna immediatamente all'interno del corpo d'acqua che lo ha generato. Si tratta di un fenomeno che può caratterizzare sia le spiagge basse che le dune in conseguenza di eventi ondosi significativi. Nonostante si tratti di un evento largamente discusso in letteratura, la modellistica di riferimento risulta ancora poco sviluppata se non del tutto carente a causa, da un lato, della difficoltà di comprendere i fenomeni che caratterizzano il processo e dall'altro per la mancanza di dati in campo dettagliati.

Per *breaching* si intende il fenomeno di apertura di una nuova breccia in corrispondenza delle barriere naturali o artificiali antistanti tratti di costa che comporta lo scambio continuo d'acqua tra il mare aperto e quello posto a tergo delle barriere stesse.

Lo studio del processo, che assume una notevole importanza soprattutto in relazione ai danni che lo stesso può comportare sulle aree costiere, ha ricevuto in letteratura poca attenzione se comparata a quella riservata ad altri fenomeni geomorfologici. Il tutto è ulteriormente complicato, anche in questo caso, dalla difficoltà di reperire informazioni dirette del fenomeno e della mancanza quasi totale di modelli numerici di riferimento.

Nel corso degli anni sono stati sviluppati numerosi modelli per la stima dell'erosione delle dune congiuntamente alla determinazione della quantità di materiale trasportato in direzione cross-shore.

In ordine di tempo, i primi modelli proposti per la stima dell'erosione delle dune sono stati quelli di **Bruun** (1962), **Edelman** (1962), sviluppati successivamente da **Van der Graaff** (1986) e **Vellinga** (1986), secondo i quali l'arretramento subito dalle dune e il conseguente volume eroso sono funzioni univoca della variazione del livello medio del mare.

Dean e **Maurmeyer** (1983) hanno proposto una equazione implicita per la stima dell'arretramento della duna funzione dell'elevazione del livello del mare, dell'altezza della duna e della profondità del mare in corrispondenza della linea di frangimento.

Kobayashi (1987) propose un modello analitico basato sulla risoluzione dell'equazione di continuità dei sedimenti accoppiata ad un'equazione empirica per la stima del trasporto solido. Il modello è costituito da una equazione differenziale risolvibile una volta fissate le condizioni iniziali e al contorno. Il modello è stato verificato per il caso dell'uragano Eloise.

Kriebel et al. (1991) propose un modello analitico capace di predire il volume di duna erosa tenendo conto della variazione del livello del mare, per effetto di una mareggiata, e dell'altezza delle dune.

Caratteristica comune a molti dei modelli citati è quella di ipotizzare un aumento repentino del livello del mare, a partire dall'istante di tempo $t=0$, che rimane costante durante l'intero evento di mareggiata. Questo tipo di modelli, indipendenti quindi dal tempo, tendono conseguentemente a soprastimare il volume di duna erosa.

Dette (1986) e **Dette** e **Uliczka** (1987), attraverso prove di laboratorio, misero in evidenza come l'erosione a cui una duna è soggetta durante una mareggiata tende a diminuire esponenzialmente nel tempo, man mano che una nuova condizione di

equilibrio viene raggiunta. La diminuzione esponenziale della quantità di materiale allontanato da una duna durante la mareggiata può essere ricavata utilizzando l'espressione empirica proposta da **Larson e Kraus** (1989)

$$q(t) = \frac{q_{m0}}{(1 + \alpha t)} \quad (2.2)$$

con q_{m0} quantità di materiale trasportata nell'istante di tempo $t=0$ e α coefficiente empirico.

Altri modelli si basano, esclusivamente, su quelle che sono le caratteristiche ondamiche della mareggiata in funzione delle quali, quindi, vengono proposte equazioni per la stima del volume di duna eroso. Tra questi ad esempio si possono citare i modelli proposti da **Fisher e Overton** (1985), **Fisher et al** (1987), e **Overton et al.** (1994) basati su test di laboratorio. Si ricorda, inoltre, il modello proposto da **Hallermeier e Rhodes** (1988) il quali hanno proposto una relazione empirica per la stima dell'erosione media subita da una duna in funzione del tempo di ritorno corrispondente ad un evento ondoso significativo. Sulla stessa scia, **Kriebel e Dean** (1993) hanno ricavato una espressione funzione della variazione del livello medio mare, dell'altezza d'onda e della durata dell'evento ondoso.

I modelli e le equazioni citate in precedenza non prendono in considerazione quelli che sono i fenomeni di breaching ed overwash che possono caratterizzare le dune. Pochissimi sono infatti, come già detto, gli studi di riferimento in queste ipotesi particolari.

Hancock e Kobayashi (1994) hanno eseguito una serie di esperimenti in piccola scala grazie ai quali hanno osservato l'evoluzione dei profili e il trasporto dei sedimenti verso terra causato dai fenomeni di overwash delle dune. Questi studi sono stati sviluppati ulteriormente da Kobayashi et al. 2006 arrivando a stimare l'overwash sulla cresta delle dune in funzione dei fenomeni di overtopping e delle concentrazione di sedimenti.

Gli esperimenti e gli studi citati sono stati utilizzati da **Tega e Kobayashi** (1999) per sviluppare un modello numerico per l'erosione delle dune in cui il trasporto dei sedimento viene stimato utilizzando la semplice equazione empirica proposta da Kobayashi nel 1987, già citata in precedenza.

Kobayashi et al (2006) hanno condotto nuovi test di laboratorio per testare e verificare un nuovo modello numerico (CSHORE) per la stima del trasporto dei sedimenti in direzione cross-shore.

Proprio questo modello sarà oggetto di taratura, applicazione e verifica nel prosieguo dello studio.

CAPITOLO 3

IL MODELLO NUMERICO CSHORE

3.1. Introduzione

Il modello numerico CSHORE (Kobayashi et al. 2007) è un modello ad 1 dimensione (1D) all'interno del quale i termini relativi alle componenti idrodinamiche, che regolano il trasporto dei sedimenti, sono integrati rispetto al tempo e mediati rispetto alla profondità del mare. Il modello di interazione onda-corrente, che simula le modalità di propagazione del moto ondoso da largo verso riva, è accoppiato ad un modello per la stima delle componenti del trasporto solido.

In Fig. 3.1 si riportano le convenzioni adottate nel prosieguo dello studio nell'ipotesi di onde irregolari incidenti in direzione obliqua rispetto alla linea di riva. In particolare, la coordinata in direzione cross-shore, x , è positiva se diretta verso riva, mentre quella long-shore, y , è positiva in direzione sottoflutto. Le componenti di velocità, mediate rispetto alla profondità, in direzione cross-shore e long-shore sono indicate, rispettivamente, con U e V . L'angolo di incidenza dell'onda, θ , si ipotizza essere uniforme in direzione long-shore e compreso nel range $|\theta| < 90^\circ$ in modo da assicurare

la propagazione dell'onda verso terra. La velocità e la direzione del vento, da tenere in conto nel momento in cui il modello viene utilizzato per dati reali in campo, sono misurati ad un'altezza di 10 metri rispetto al livello medio mare e vengono indicati con W_{10} e θ_w , rispettivamente.

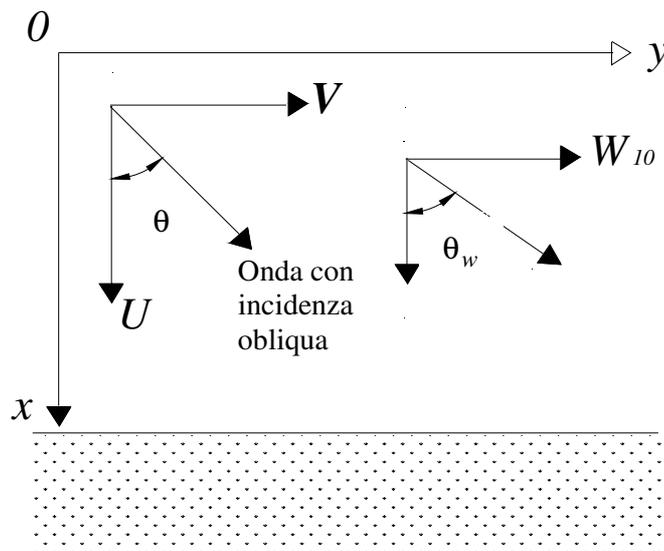


Figura 3.1. Componenti di propagazione di un'onda irregolare obliqua e del vento incidenti su un tratto di costa rettilineo e uniforme in direzione long-shore

3.2. Modello di interazione onda-corrente

Il modello combinato di interazione onda-corrente è un'estensione del modello proposto da Kobayashi et al (2007d) sulla scia di quelli olandesi di Reniers e Battjes (1997) e Ruessink et al. (2001). Schematizzando lo stato di mare come costituito da un'insieme di onde regolari generate dal vento, le equazioni idrodinamiche che ne regolano l'andamento vengono mediate rispetto al tempo. Esplicitando l'equazione di continuità mediata rispetto alla profondità, nell'ipotesi di spiaggia impermeabile, si ricava che

$$\bar{h}\bar{U} + \frac{g\sigma_{\eta}^2}{C_p} \cos \theta + q_r \cos \theta = 0 \quad (3.1)$$

con \bar{h} profondità media del mare, pari a $\bar{h} = (\bar{\eta} + z_b)$ con $\bar{\eta}$ elevazione media della superficie marina e z_b elevazione del fondale marino; \bar{U} componente della velocità, mediata rispetto alla profondità, in direzione cross-shore; g accelerazione di gravità; σ_η valore della deviazione standard dell'andamento della superficie marina; C_p celerità di fase dell'onda; e q_r volume di flusso associato al fenomeno di spostamento in avanti del fronte d'onda al frangimento che porta ad un incremento delle correnti sott'acqua dirette verso il largo (correnti di ritorno).

L'angolo di propagazione dell'onda viene stimato ricorrendo alla legge di Snell

$$\frac{\sin \theta}{C_p} = \frac{\sin \theta_0}{C_{p0}} \quad (3.2)$$

con θ_0 e C_{p0} angolo di propagazione e celerità dell'onda in corrispondenza del punto al largo.

Le equazioni di conservazione del moto, mediate rispetto al tempo e alla profondità del mare, valutano le variazioni subite dalle correnti marine in funzione dei cambiamenti che caratterizzano le forze che le hanno generate (onde, vento, incremento della superficie marina, attrito di fondo) e delle loro interazioni. Esplicitandone le componenti nelle direzioni cross-shore e long-shore, si ricava

$$\begin{aligned} \frac{dS_{xx}}{dx} &= -\rho g \bar{h} \frac{d\bar{\eta}}{dx} - \tau_{bx} + \tau_{wx} \\ \frac{dS_{xy}}{dy} &= -\tau_{by} + \tau_{wy} \end{aligned} \quad (3.3)$$

con S_{xx} componente del radiation stress in direzione cross-shore; ρ densità dell'acqua; τ_{bx} e τ_{by} attrito di fondo in direzione cross-shore e long-shore, rispettivamente; τ_{wx} e τ_{wy} attrito sulla superficie marina in direzione cross-shore e long-shore dovuto all'azione del vento; S_{xy} componente trasversale di radiation stress.

I valori di S_{xx} e S_{xy} vengono stimati ricorrendo alla teoria lineare per onde progressive, in particolare

$$\begin{aligned}
S_{xx} &= \left(\frac{C_g}{C_p} \cdot \rho g \sigma_\eta^2 + \rho C_p q_r \right) \cos^2 \theta + \rho g \sigma_\eta^2 \left(\frac{C_g}{C_p} - \frac{1}{2} \right) \\
S_{xy} &= \left(\frac{C_g}{C_p} \cdot \rho g \sigma_\eta^2 + \rho C_p q_r \right) \cos \theta \sin \theta
\end{aligned} \tag{3.4}$$

con C_g velocità di gruppo di un treno di onde, $C_g = \left(\frac{1}{2} + \frac{k_p \bar{h}}{\sinh(2k\bar{h})} \right) C_p$, k_p numero d'onda; $\rho g \sigma_\eta^2$ energia specifica, E , dell'onda caratterizzata da un valore di altezza quadratica media stimata come $H_{rms} = \sqrt{8} \sigma_\eta$; $\rho C_p q_r$ momento di flusso, M_r , associato alla rotazione del fronte d'onda che si propaga con celerità di fase $C_p \cdot M_r$, in particolare, rappresenta la forza che agendo sul fronte d'onda ne produce la rotazione in avanti in corrispondenza del frangimento. Nei precedenti modelli sviluppati da Battjes e Stive (1985), Stive e DeVriend (1994) e Ruessink et al. (2001) la quantità M_r non veniva considerata. Nonostante tale mancanza, i modelli suddetti erano in grado di valutare, con un buon livello di accuratezza, la variazione, in direzione cross-shore, dei valori dell'altezza quadratica media. Tale risultato veniva ottenuto prestando notevole attenzione alla taratura del parametro di frangimento, γ . Nel modello proposto da Svendsen et al. (2003) il momento di flusso associato alla rotazione dei fronti d'onda veniva considerato ed, in particolare, l'area del fronte d'onda soggetta a rotazione veniva correlata con il valore dell'altezza quadratica media.

Le componenti, in direzione cross-shore e long-shore, della forza di attrito sono espresse come

$$\begin{aligned}
\tau_{bx} &= \frac{1}{2} \rho f_b \bar{U} \bar{U}_a \\
\tau_{by} &= \frac{1}{2} \rho f_b \bar{V} \bar{U}_a
\end{aligned} \tag{3.5}$$

con

$$U_a = (U^2 + V^2)^{0.5} \tag{3.6}$$

ed f_b fattore di attrito sul fondo

I valori delle componenti delle velocità, U e V sono poste pari a

$$U = \sigma_T F_U \quad ; \quad V = \sigma_T F_V \quad (3.7)$$

con

$$F_U = U_* + r \cos \theta; \quad F_V = V_* + r \sin \theta; \quad U_a = \sigma_T F_a; \quad F_a = (F_U^2 + F_V^2)^{0.5} \quad (3.8)$$

e

$$U_* = \frac{\bar{U}}{\sigma_T} \quad ; \quad V_* = \frac{\bar{V}}{\sigma_T} \quad (3.9)$$

dove σ_T valore della deviazione standard delle oscillazioni, mediate rispetto alla profondità, della componente di velocità U_T , la cui espressione, ricavata utilizzando la teoria lineare per onde progressive ed in funzione delle oscillazioni dell'andamento della superficie marina, $(\eta - \bar{\eta})$, assume la forma

$$U_T = \frac{C_p}{h} (\eta - \bar{\eta}) \quad (3.10)$$

e quindi

$$\sigma_T = C_p \sigma_*; \quad \sigma_* = \frac{\sigma_\eta}{h} \quad (3.11)$$

La variabile r che compare nell'Eq. (3.8), definita come $r = U_T / \sigma_T$, segue un andamento oscillatorio esprimibile attraverso una distribuzione Gaussiana con funzione di densità di probabilità pari a

$$f(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{r^2}{2}\right) \quad (3.12)$$

I valori della deviazione standard delle componenti di velocità sono ricavate attraverso le espressioni

$$\sigma_U = \sigma_T \cos \theta; \quad \sigma_V = \sigma_T |\sin \theta| \quad (3.13)$$

Il valore assoluto viene incluso nell'espressione in quanto il valore del seno dell'angolo di propagazione del moto ondoso può essere anche minore di zero.

Sostituendo le Eq. (3.7) nella (3.5), si ricava

$$\tau_{bx} = \frac{1}{2} \rho f_b \sigma_T^2 G_{bx}; \quad \tau_{by} = \frac{1}{2} \rho f_b \sigma_T^2 G_{by} \quad (3.14)$$

con

$$G_{bx} = \int_{-\infty}^{\infty} F_U F_a f(r) dr; \quad G_{by} = \int_{-\infty}^{\infty} F_V F_a f(r) dr \quad (3.15)$$

L'attrito prodotto dal vento sulla superficie marina viene stimato come

$$\tau_{wx} = \rho_a C_D W_{10}^2 \cos \theta_w ; \quad \tau_{wy} = \rho_a C_D W_{10}^2 \sin \theta_w \quad (3.16)$$

con ρ_a densità dell'aria ($\rho_a \approx 1.225 \text{ kg/m}^3$); C_D coefficiente di trascinamento; W_{10} velocità del vento misurata ad un'altezza di 10 m rispetto al livello medio mare e θ_w angolo di propagazione del vento, come già in precedenza detto.

I valori del coefficiente di trascinamento vengono stimati ricorrendo all'espressione ricavata da Large e Pond (1981)

$$C_D = 0.0012 \quad \text{se } W_{10} < 11 \text{ m/s} \quad (3.17a)$$

$$C_D = (0.00049 + 0.000065 W_{10}) \quad \text{se } W_{10} \geq 11 \text{ m/s} \quad (3.17b)$$

La legge di conservazione dell'energia, su cui si basa il modello di propagazione delle onde (wave model), viene scomposta in due diverse equazioni differenziale, mediate rispetto al tempo, che tengono conto, la prima, della variazione di energia subita dall'onda per effetto del frangimento e dell'attrito del fondo, la seconda, delle variazioni di energia che accompagnano la rotazione del fronte d'onda al frangimento per effetto, anche in questo caso, dell'attrito del fondo e dell'energia spesa per mantenere il fronte d'onda inclinato di un'assegnata pendenza, ovvero

$$\frac{dF_x}{dx} = -D_B - D_f \quad (3.18)$$

$$\frac{d}{dx} (\rho C_p^2 q_r \cos \theta) = D_B - D_r \quad (3.19)$$

F_x rappresenta il flusso di energia in direzione cross-shore stimato utilizzando la teoria lineare per onde progressive

$$F_x = EC_g \cos \theta \quad (3.20)$$

e D_B , D_f e D_r energia dell'onda dissipata a causa del frangimento, dell'attrito di fondo, e per mantenere la pendenza del fronte d'onda, β_r , dell'ordine di 0.1, rispettivamente.

L'energia dissipata a causa del frangimento viene stimata utilizzando la formula proposta da Battjes e Stive (1985) modificata da Kobayashi et al.(2005) al fine di tener conto degli effetti dovuti alla pendenza del fondale marino. In particolare, l'energia dissipata a causa del frangimento delle onde viene stimata da Battjes e Stive, in accordo con quanto previsto da Battjes and Janssen (1978) come

$$D_B = \frac{\rho g a H_B^2 Q}{4T_p} \quad (3.21)$$

con a coefficiente empirico posto pari ad 1; Q frazione di onde soggette al frangimento; H_B altezza d'onda utilizzata per stimare D_B . La frazione di onde soggette al frangimento viene stimata attraverso l'espressione implicita

$$\frac{Q-1}{\ln Q} = \left(\frac{H_{rms}}{H_m} \right)^2 \quad (3.22)$$

con

$$H_m = \frac{0.88}{k_p} \tanh \left(\frac{\gamma k_p \bar{h}}{0.88} \right) \quad (3.23)$$

$Q = 0$ se nessuna onda frange diversamente è pari ad 1 se tutte le onde raggiungono il frangimento. H_m indica la massima altezza che un onda può raggiungere in corrispondenza di una fissata profondità, \bar{h} , prima che la stessa vada a frangere. In particolare nell'ipotesi di acque shallow water $H_m = \gamma \bar{h}$, con γ parametro di frangimento. Nella formula originale proposta da Battjes and Stive il valore di H_m coincideva con il valore di H_B . k_p , come già esplicitato in precedenza, rappresenta il numero d'onda pari a $k_p = 2\pi/(C_p T_p)$. Il fatto che $0 \leq Q \leq 1$ implica che, nell'Eq. 3.22 $H_{rms} < H_m$, ma tale ipotesi viene a cadere nel momento in cui ci troviamo in acque shallow water dove il valore di H_{rms} diventa più grande di H_m . Quando si verifica ciò, si ammette che tutte le onde raggiungano il frangimento ($Q = 1$) ed inoltre il valore di H_B è posto paria a H_{rms} .

La scelta del valore di $a = 1$ nell'Eq. (3.21) nasce dall'ipotesi che l'energia dissipata da un onda, nel suo propagarsi da largo verso riva, si distribuisca uniformemente lungo

l'intera lunghezza d'onda. Tale ipotesi non risulta accettabile nel momento in cui l'energia dissipata è governata dal frangimento. In questo caso infatti le perdite di energia sono concentrate localmente. Sulla base di questa osservazione Kobayashi et al. (2005) ha proposto una espressione per la stima di a pari al rapporto tra la lunghezza d'onda stimata come $T_p (g\bar{h})^{0.5}$ e la quantità $(b\bar{h}/S_b)$ funzione della pendenza del fondale $S_b = dz_b/dx$ in corrispondenza della profondità \bar{h} , quindi

$$a = \frac{S_b T_p}{3} \sqrt{g\bar{h}} \geq 1 \quad (3.24)$$

Sulla base di questa relazione, a è pari ad 1 nella regione in cui \bar{h} è grande ed S_b è piccola e tende progressivamente ad aumentare man mano che diminuisce la profondità del fondale e si risente maggiormente, quindi, della pendenza dello stesso. Il valore di b è stato sempre calibrato da Kobayashi et al. (2005) e posto pari a 3. E' bene sottolineare come la quantità di energia dissipata al frangimento tende ad aumentare incrementando il parametro di frangimento, γ (Raubenheimer et al, 1996).

L'energia dissipata a causa dell'attrito di fondo viene stimata come

$$D_f = \frac{1}{2} \rho f_b \bar{U}_a^3 \quad (3.25)$$

Sostituendo nell'espressione il valore di U_a ricavata nell'Eq. 3.8, si avrà

$$D_f = \frac{1}{2} \rho f_b \sigma_T^3 G_f \quad ; \quad G_f = \int_{-\infty}^{\infty} F_a^3 f(r) dr \quad (3.26)$$

con F_a ed $f(r)$ stimati nell'Eq. (3.8) e (3.12).

L'equazione di conservazione dell'energia dovuta alla rotazione in avanti, in corrispondenza del frangimento, (Eq. 3.1) è stata ricavata da come Ruessink et al, 2001. L'energia dissipata per mantenere la pendenza della cresta del fronte d'onda, β_r , dell'ordine di 0.1 viene stimata attraverso l'espressione

$$D_r = \rho g \beta_r q_r \quad (3.27)$$

Kobayashi et al. (2005) hanno proposto una nuova espressione empirica per la stima di β_r che tiene in conto anche della pendenza locale del fondale marino:

$$\beta_r = (0.1 + S_b) \geq 1 \quad (3.28)$$

Se gli effetti dovuti alla rotazione del fronte d'onda sono trascurati, q_r sarà pari a 0 e l'Eq. (3.19) assumerà la forma $D_r = D_b$.

Sostituendo le Eq. (3.11) e (3.13) nella (3.1) si ricava il valore della velocità in direzione cross-shore, mediata rispetto al tempo ed integrata lungo la profondità del mare

$$\bar{U} = -\frac{g\bar{h}}{C_p^2} \sigma_U \sigma_* \left(1 + \frac{C_p q_r}{g\sigma_\eta^2} \right) \quad (3.29)$$

Le equazioni dell'energia e del moto sono risolte usando un metodo alle differenze finite adoperando una griglia a maglia quadra, Δx . Il procedimento iterativo ha inizio in corrispondenza del punto $x = 0$ posto al largo, al di fuori della zona dei frangenti.

Nel tentativo di ridurre i tempi di calcolo, sono state proposte delle equazioni analitiche per la stima di G_{bx} , G_{by} e G_f che compaiono nelle Eq. (3.15) e (3.26), rispettivamente.

Il termine F_a viene riscritto come

$$F_a = \left[(r - r_m)^2 + F_m^2 \right]^{0.5} \quad (3.30)$$

con

$$r_m = -(U_* \cos \theta + V_* \sin \theta) \quad ; \quad F_m = V_* \cos \theta - U_* \sin \theta \quad (3.31)$$

L'Eq. (3.29) viene riscritta come

$$F_a = (r - r_m) + |F_m| \quad \text{se } r \geq 0 \quad (3.32a)$$

$$F_a = -(r - r_m) + |F_m| \quad \text{se } r < 0 \quad (3.32b)$$

Sostituendo tali ultime espressioni nelle Eq. (3.15) e (3.26) ed integrando le equazioni analitiche risultanti, si ricava

$$G_{bx} = \sqrt{\frac{2}{\pi}}(U_* - r_m \cos \theta) + U_* |F_m| \quad (3.33)$$

$$G_{by} = \sqrt{\frac{2}{\pi}}(V_* - r_m \sin \theta) + V_* |F_m| \quad (3.34)$$

$$G_f = 2\sqrt{\frac{2}{\pi}} + (1 + U_*^2 + V_*^2) |F_m| + \sqrt{\frac{2}{\pi}}(U_*^2 + V_*^2 + 2r_m^2) \quad (3.35)$$

Tali equazioni sono funzione del valore assunto dal $\sin \theta$ (il $\cos \theta$ per le ipotesi fatte circa il valore dell'angolo di propagazione del moto ondoso è sempre maggiore di zero), dai valori di r_m ed F_m ricavati utilizzando l'Eq. (3.30) e dai valori di $U_* = -(r_m \cos \theta + F_m \sin \theta)$ e $V_* = (F_m \cos \theta - r_m \sin \theta)$.

Nel caso di onda incidente con direzione ortogonale alle linea di riva ($\sin \theta = 0$ e $V_* = 0$) e in assenza di vento le Eq. (3.32)-(3.34) assumono la forma

$$G_{bx} = 1.6 U_* ; \quad G_{by} = 0 ; \quad G_f = (1.6 + 2.4U_*^2) \quad (3.36)$$

Nel caso in cui $|\sin \theta| \ll 1$ e $|U_*| \ll |V_*|$ il valore di G_{by} si approssima come

$$G_{by} = V_*(0.8 + |V_*|) \quad (3.37)$$

Comparando i valori di G_{bx} , G_{by} e G_f ricavati attraverso le Eq. semplificate (3.33)-(3.35) con i valori esatti ricavati risolvendo le Eq. (3.15) e (3.26) risulta che la massima percentuale di errore commesso è dell'ordine del 35%.

3.3. Il modello per la stima del trasporto dei sedimenti

Il modelli combinati di interazione onda-corrente, una volta risolti, permettono di ricavare le variazioni delle componenti idrodinamiche da inserire all'interno delle equazioni per la stima del trasporto solido dei sedimenti una volta assegnato il profilo iniziale di spiaggia, il valore del livello medio del mare e le condizioni ondamiche al largo. In particolare, si ipotizza come già detto in precedenza, che il fondo marino sia impermeabile e che i sedimenti presenti sul fondo siano uniformi e caratterizzati da un diametro medio, d_{50} , da una velocità di caduta, w_f , e da un peso specifico, s .

Il volume di sedimenti trasportati in sospensione, V_s , per unità orizzontale d'area, viene stimato utilizzando l'espressione empirica proposta da Kobayashi e Johnson (2001), in particolare

$$V_s = P_s \frac{e_B D_r + e_f D_f}{\rho g (s-1) w_f} (1 + S_b^2)^{0.5} \quad (3.38)$$

riassumendo, S_b indica la pendenza del fondo marino in direzione cross-shore; D_b e D_f l'energia dell'onda dissipata a causa del frangimento e dell'attrito di fondo, rispettivamente; e_B ed e_f coefficienti empirici funzione dell'energia dissipata e posti pari a 0.002 e 0.01, rispettivamente (Kobayashi et al. (2007d)). P_s indica la probabilità di avere materiale in sospensione e tiene conto, in particolare, delle modalità in base alle quali la concentrazione di materiale trasportato in sospensione in direzione cross-shore, varia man mano che ci si sposti da largo verso riva.

La variazione cross-shore del grado di sedimenti trasportati in sospensione viene stimata usando i risultati sperimentali ottenuti da Kobayashi et al. (2005). In particolare, tali test mostrano come le turbolenze relative alle componenti di velocità sviluppate vicino al fondo marino siano correlate con l'energia dissipata dall'onda per effetto dell'attrito di

fondo. La magnitudine delle turbolenze viene, quindi, stimata come $\left(\frac{D'_f}{\rho}\right)^{1/3}$ con D'_f ,

come detto, energia dissipata al frangimento e ricavata attraverso l'equazione 3.25. In particolare, la probabilità di avere sedimenti in sospensione viene correlata con la probabilità che il valore della magnitudine delle turbolenze superi quello che è il valore della velocità di caduta dei sedimenti, ovvero

$$\left(\frac{D'_f}{\rho}\right)^{1/3} > w_f \quad (3.39)$$

Anche in questo caso la probabilità di avere sedimenti in sospensione può essere ricavata in funzione della variabile Gaussiana, r . In particolare, la probabilità di avere materiale in sospensione è pari alla probabilità che $(r - r_m)^2 > F_s^2 = (R_s^2 - F_m^2)$ con

$$R_s = \left[\frac{\left(\frac{2}{f_b} \right)^{\frac{1}{3}} w_f}{\sigma_T} \right]. \text{ Anche in questo caso esplicitando il tutto in funzione di } r, \text{ si avrà}$$

che la probabilità, P_s , di avere materiale in sospensione sarà pari a

$$P_s = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{F_s - r_m}{\sqrt{2}} \right) + \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{F_s + r_m}{\sqrt{2}} \right) \quad \text{per } F_s^2 > 0 \quad (3.40a)$$

$$P_s = 1 \quad \text{per } F_s^2 \leq 0 \quad (3.40b)$$

con erfc errore della funzione di distribuzione

La quantità di materiale trasportata in sospensione in direzione cross-shore e long-shore risulta pari a

$$q_{sx} = a \bar{U} V_s \quad (3.41)$$

$$q_{sy} = \bar{V} V_s \quad (3.42)$$

con a parametro empirico legato al trasporto dei sedimenti in sospensione posto pari a 0.2.

La stima del trasporto di fondo in direzione cross-shore e long-shore avviene attraverso espressioni ricavate in maniera intuitiva a causa della mancanza di misure sperimentali dirette di tale tipo di trasporto. In particolare, le quantità di materiale trasportata sul fondo in direzione cross-shore, q_{bx} , e long-shore, q_{by} , mediata rispetto al tempo, viene espressa come

$$q_{bx} = B \overline{(U^2 + V^2)} U \quad (3.43a)$$

$$q_{by} = B \overline{(U^2 + V^2)} V \quad (3.43b)$$

con B parametro empirico

Esplicitando i valori di U e V ricavati attraverso le Eq. (3.7)-(3.9) e (3.12) si ricava che

$$q_{bx} = B \sigma_T^3 \left(b_* + U_* V_*^2 + 2 F_m \sin \theta \right) \quad (3.44a)$$

$$q_{by} = B\sigma_T^3 \left[V_* (1 + U_*^2 + V_*^2) - 2r_m \sin \theta \right] \quad (3.44a)$$

con $b_* = (3U_* + U_*^3)$ e F_m ed r_m definiti in precedenza utilizzando l'Eq (3.30).

Nell'ipotesi in cui un'onda incida sulla linea di riva con direzione normale, allora $\sin \theta = 0$ e $V_* = 0$, conseguentemente $q_{bx} = b_* B \sigma_T^3$ e $q_{by} = 0$.

I valori di B e b_* sono stati ricavati da Kobayashi et al. (2007e)

$$q_{bx} = \frac{bP_b}{g(s-1)} \sigma_T^3 (1 + U_* V_*^2 + 2F_m \sin \theta) G_s \quad (3.45)$$

$$q_{by} = \frac{bP_b}{g(s-1)} \sigma_T^3 \left[V_* (1 + U_*^2 + V_*^2) - 2r_m \sin \theta \right] \quad (3.46)$$

con b parametro empirico ricavato sperimentalmente in laboratorio è posto pari a 0.002. Il parametro G_s , noto come *bottom slope function*, è stata introdotta da Kobayashi et al (2007e) per tener conto della pendenza del fondo marino. In particolare

$$G_s = \frac{\tan \phi}{(\tan \phi + S_b)} \quad \text{per } -\tan \phi < S_b < 0 \quad (3.47)$$

$$G_s = \frac{(\tan \phi - 2S_b)}{(\tan \phi + S_b)} \quad \text{per } 0 < S_b < \tan \phi \quad (3.48)$$

con ϕ angolo di attrito interno dei sedimenti e $\tan \phi \approx 0.63$ (Bailard, 1981).

P_b indica, invece, la probabilità di avere materiale in movimento sul fondo. La sua variazione in direzione cross-shore viene stimata ricorrendo al valore del parametro critico di Shields, ψ_c (Madsen e Grant, 1976), pari a 0.05. In particolare, il movimento di sedimenti sul fondo ha inizio quando il valore puntuale dell'attrito di fondo, $\tau_b' = 0.5\rho f_b U_a^2$, supera il suo valore critico, $\rho g(s-1)d_{50}\psi_c$. La probabilità, P_b , di avere sedimenti in movimento è la stessa della probabilità che $(r - r_m)^2 > F_b^2 = (R_b^2 - F_m^2)$ con r_m ed F_m stimati attraverso l'equazione 3.30 mentre

$R_b = \sqrt{\frac{[2g(s-1)]d_{50}\psi_c}{f_b}}$. Utilizzando il valore della variabile Gaussiana, r , la cui

funzione di densità di probabilità è stata definita nell'Eq. 3.12, il valore della probabilità di avere materiale in movimento è pari a

$$P_b = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{F_b - r_m}{\sqrt{2}} \right) + \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{F_b + r_m}{\sqrt{2}} \right) \quad \text{per } F_b^2 > 0 \quad (3.49a)$$

$$P_b = 1 \quad \text{per } F_b^2 \leq 0 \quad (3.49b)$$

La probabilità di avere materiale in movimento sul fondo tende ad aumentare man mano che ci si sposta da largo verso riva subendo delle fluttuazioni, più o meno evidenti, tra la surf e la swash zone.

Concludendo, la variazione del profilo di spiaggia in direzione cross-shore viene valutata risolvendo l'equazione di continuità

$$(1 - n_p) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} = 0 \quad (3.50)$$

con n_p porosità del fondale, t istante di tempo in cui si valuta la variazione dell'elevazione del fondo marino, z_b , e q_x quantità netta di materiale trasportata in direzione cross-shore pari a $q_x = q_{sx} + q_{bx}$.

CAPITOLO 4

TARATURA DEL MODELLO CSHORE: DATI DI LABORATORIO IN LARGA SCALA

4.1. Introduzione

Il modello CSHORE nella sua formulazione attuale (Kobayashi et al nel 2007), è stato, ad oggi, tarato utilizzando: dati di laboratorio in piccola scala, ottenuti da esperimenti svolti da Buck et al. (2007) presso il *Center for Applied Coastal Research* dell'Università del Delaware (USA); dati di laboratorio in larga scala, ricavati da esperimenti eseguiti da Wang et al. nel 2002 presso il *Large-Scale Transport Facility* dell'*US Army Engineer Research and Development Center* (Vicksburg, USA); ed infine utilizzando esperimenti in larga scala eseguiti da van Gent et al. (2006).

Gli esperimenti in piccola scala (Buck et al. 2007), realizzati in un canale di lunghezza, larghezza e altezza pari a 30 m, 1.15 m e 1.5 m, rispettivamente, sono stati eseguiti con l'obiettivo di valutare l'influenza esercitata dalla presenza di una berma sull'erosione subita dalle dune a causa dell'azione del moto ondoso..

Le informazioni relative al diametro medio, alla velocità di caduta, w_f , al peso specifico, s , adimensionalizzato rispetto a quello dell'acqua, alla porosità, p , dei sedimenti costituenti i profili di spiaggia utilizzati nei test sono sintetizzate in Tab. 4.1.

d_{50} [m]	w_f [cm/s]	s	p
0.18	2.0	2.6	0.4

Tabella 4.1. Caratteristiche dei sedimenti costituenti i profili di spiaggia per il caso dei test di laboratorio in piccola scala (Buck et al., 2007)

Attraverso i test condotti è stato possibile dimostrare come la presenza e la geometria della berma influenzino le modalità di erosione della duna in maniera predominante negli istanti iniziali dell'attacco ondoso. Man mano, poi, che anche la berma viene erosa, la sua influenza circa le modifiche indotte dall'azione del moto ondoso sulla duna tendono a diventare progressivamente minime.

I test eseguiti da Wang et al (2002). sono stati utilizzati al fine di valutare la capacità del modello di predire la quantità di materiale trasportata in direzione long-shore e cross-shore (Kobayashi et al. 2007f). Le caratteristiche dei sedimenti (diametro medio, peso specifico, velocità di caduta) relativi ai profili di spiaggia utilizzati nei test sono riassunti in Tab. 4.2.

d_{50} [m]	w_f [cm/s]	s
0.15	1.65	2.65

Tabella 4.2. Caratteristiche dei sedimenti costituenti i profili di spiaggia per il caso dei test di laboratorio condotti da Wang et al. (2002)

Il confronto tra la quantità di materiale trasportata, misurata e calcolata dal modello CSHORE, è stato effettuato considerando condizioni di frangimento delle onde caratterizzate da un valore del parametro, γ , pari a 1.0 (frangimento tipo spilling) e 0.7 (frangimento tipo plunging).

I test in larga scala condotti da van Gent et al. (2006) in un canale caratterizzato da una lunghezza di 225 m, larghezza di 5 m e altezza di 0.7 m ed utilizzando profili di spiaggia costituiti da sabbia sottile (Tab. 4.3), sono stati utilizzati al fine di analizzare l'influenza esercitata dal periodo dell'onda sull'erosione della duna.

d_{50} [m]	w_f [cm/s]	s
0.20	2.65	2.65

Tabella 4.3. Caratteristiche dei sedimenti costituenti i profili di spiaggia per il caso dei test di laboratorio condotti da van Gent et al. (2002)

Nello studio di seguito condotto, la verifica dell'applicabilità del modello verrà estesa utilizzando da un lato dati di laboratorio in larga scala, ottenuti presso il centro di ricerca Grossenwellenkanal dell'università di Hannover (1998), che riproducono condizioni ondamiche e profili di spiaggia tipici Italiani; dall'altro utilizzando dati di campo relativi ad eventi ondosi estremi quali quelli prodotti dall'impatto dell'uragano Isabel (settembre 2003) sulle coste del North Carolina (USA).

Lo studio che si presenta ha come obiettivo quello di valutare la capacità previsionale del modello utilizzando dati di laboratorio in larga scala diversi da quelli fino ad ora considerati, in termini di diametro dei sedimenti costituente il profilo di spiaggia ed, inoltre, per la prima volta, di analizzare la risposta del modello nel caso di dati reali caratterizzati da situazioni ondamiche estreme.

4.2. Dati di laboratorio in larga scala

Gli esperimenti condotti nel 1998 presso il Grossenwellenkanal (Fig 4.1), dell'Università di Hannover, da un gruppo di ricercatori italiani coordinati dai Prof. De Girolamo e dal Prof. Noli dell'Università di Roma, sono stati finalizzati alla valutazione delle modifiche subite dai profili di spiaggia in conseguenza di diversi attacchi ondosi ricavando, inoltre, un insieme di dati utilizzabili per:

- ✓ valutare gli effetti di scala relativi ai modelli fisici;
- ✓ calibrare e verificare i modelli numerici per l'evoluzione dei profili di spiaggia;

- ✓ verificare i modelli di propagazione delle onde non lineari in acque basse.

Il canale, all'interno del quale gli esperimenti sono stati eseguiti, presenta una lunghezza totale di 324 m dei quali 15 m utilizzati per la generazione delle onde, da una larghezza di 5 m ed un'altezza di 7 m.



Figura 4.1. Grossenwellenkanal (Università di Hannover)

Le onde sono generate da un generatore di moto ondoso (*wave-maker*) a pistone. 19 Sonde (*Wave gauges*) sono dislocate lungo il canale al fine di misurare l'elevazione, η , della superficie marina, rispetto al livello medio mare, e i valori di altezza d'onda significativa, H_{mo} , registrati lungo il profilo di spiaggia in direzione cross-shore (Fig. 4.2)

I profili di spiaggia utilizzati nei test riproducono le condizioni fisiche di una spiaggia artificiale collocata presso Cavallino (Venezia), caratterizzata da un diametro medio dei sedimenti, d_{50} , pari a 0.35 mm e da una velocità di caduta, w_f , di 4.45 cm/s.

Tutti gli esperimenti sono stati eseguiti considerando un livello medio d'acqua ferma pari a 4 m ed un angolo di propagazione delle onde ortogonale alla linea di riva ($\theta = 0$).

Le onde generate (Tab. 4.4) sono rappresentate tramite uno spettro di tipo Jonswap.

Ogni test è stato eseguito con l'obiettivo di valutare le modifiche subite dai profili di spiaggia nel tempo in conseguenza ad attacchi ondosi consecutivi ognuno dei quali caratterizzato da una durata diversa (Tab. 4.5-4.9). La durata degli attacchi ondosi è stata scelta in relazione alla velocità di evoluzione dei profili, notevole negli istanti iniziali di ogni test e progressivamente in diminuzione man mano che ci si avvicina alle condizioni di equilibrio. I profili iniziali e finali relativi ad ogni esperimento condotto sono riportati nelle Fig. 4.3-4.7.

Onde	H_s [m]	T_p [s]	f_p [Hz]
1	1.00	4.619	0.261
2	1.33	5.196	0.192
3	0.833	3.849	0.260

Tabella 4.4. Test di laboratorio in larga scala: università di Hannover (1998). Parametri caratteristici delle onde

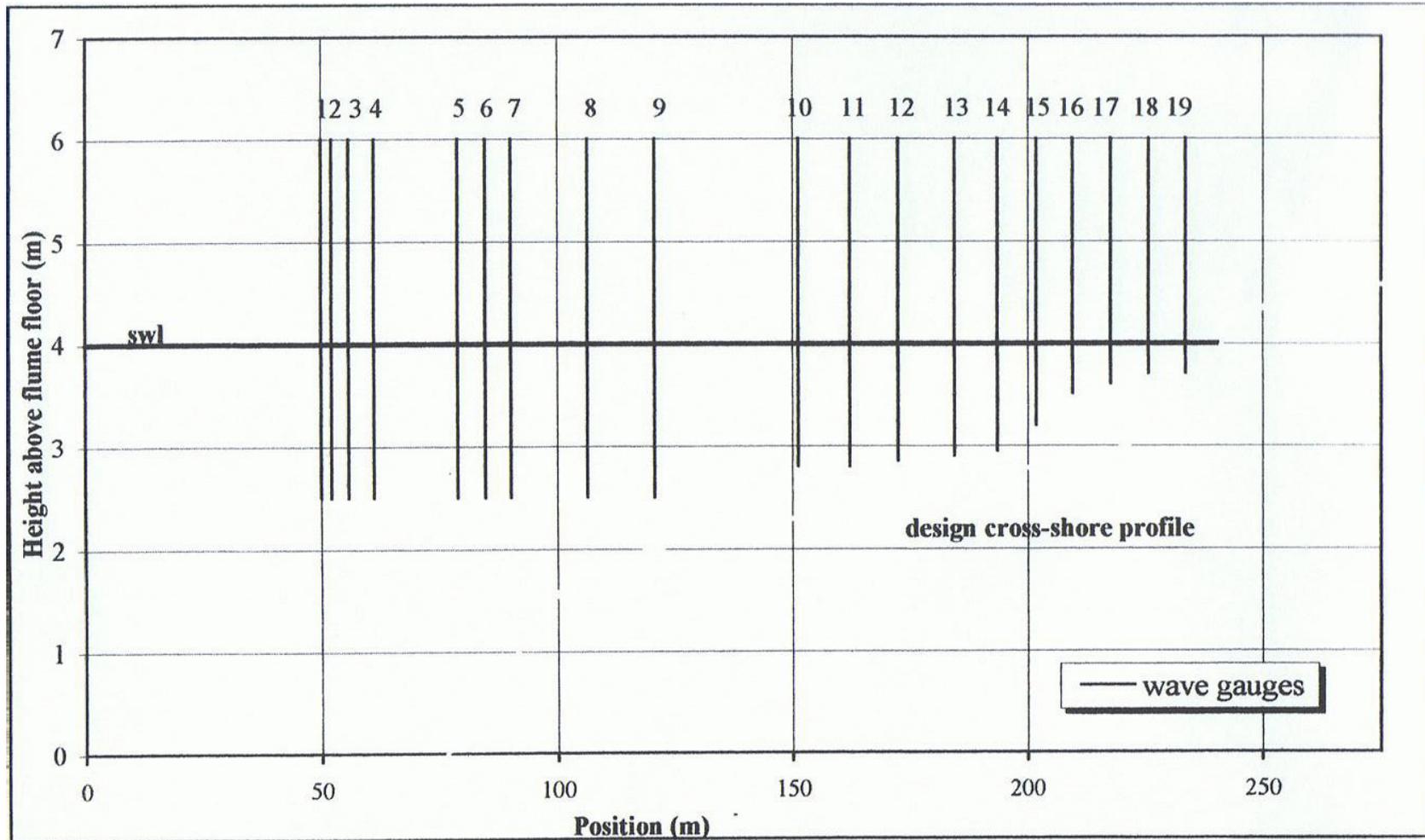


Figura 4.2. Posizione dei wave gauges lungo il canale

Esperimento 1 ($H_s=1$ m; $T_p=4.619$ s) (16-22 luglio 1998)	
Intervalli	Tempo progressivo [min]
1	10
2	38.5
3	77
4	115.5
5	154
6	231
7	308
8	462
9	651
10	786
11	863
12	878

Tabella 4.5. Grossenwellenkanal: Esperimento 1. Parametri ondamentrici caratteristici e durata temporale di ogni attacco ondoso

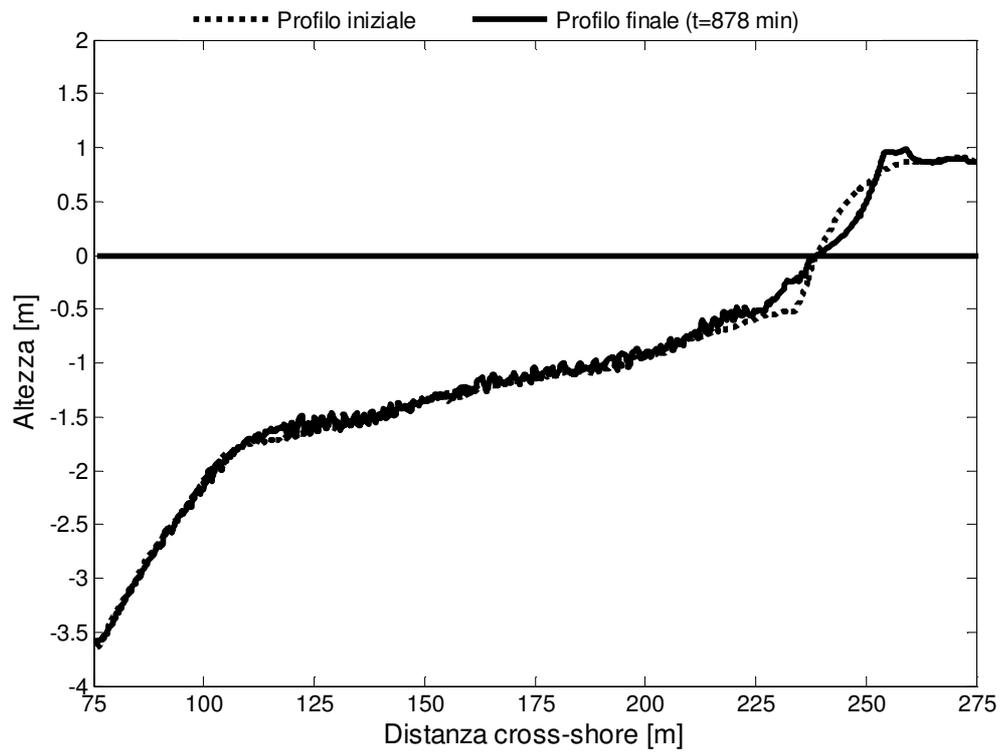


Figura 4.3. Grossenwellenkanal: Esperimento 1 (16-22 luglio 1989). Profilo di spiaggia iniziale e finale (878 min) misurato

Esperimento 2 ($H_s=1.33$ m; $T_p=5.196$ s) (23-28 luglio 1998)	
Intervalli	Tempo progressivo [min]
1	15
2	43
3	86
4	129
5	172
6	258.5
7	345
8	480
9	691

Tabella 4.6. Grossenwellenkanal: Esperimento 2. Parametri ondamentrici caratteristici e durata temporale di ogni attacco ondoso

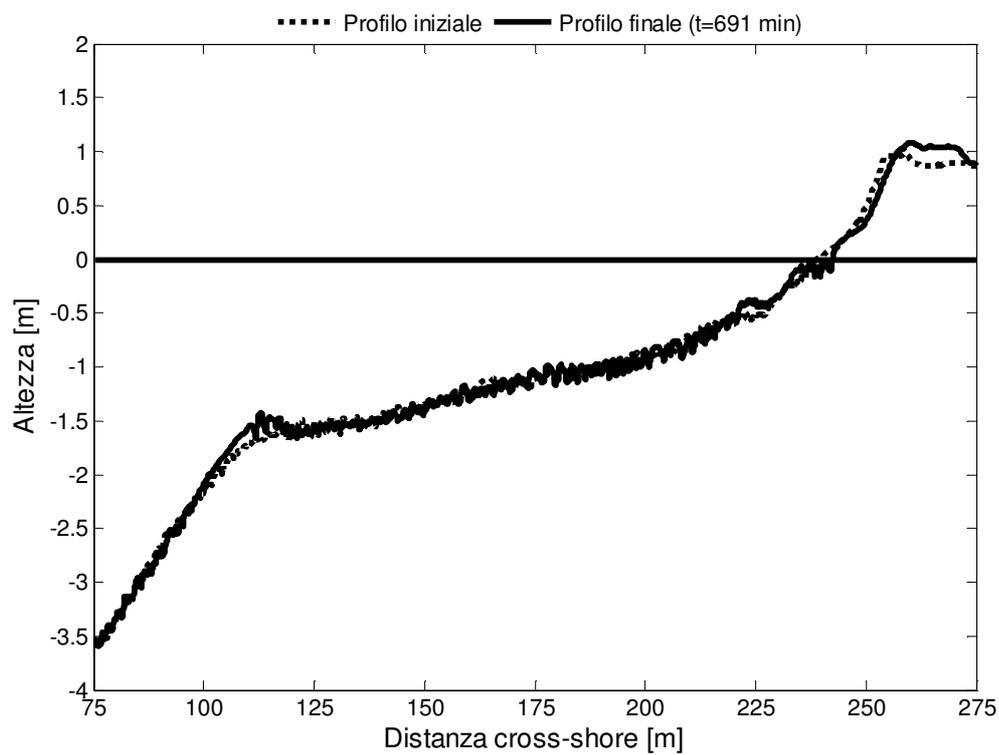


Figura 4.4. Grossenwellenkanal: Esperimento 2 (23-28 luglio 1998). Profilo di spiaggia iniziale e finale (691 min) misurato

Esperimento 3 ($H_s=0.833$ m; $T_p=3.849$ s) (28-31 luglio 1998)	
Intervalli	Tempo progressivo [min]
1	15
2	62.5
3	125
4	250
5	375
6	500
7	625

Tabella 4.7. Grossenwellenkanal: Esperimento 3. Parametri ondamentrici caratteristici e durata temporale di ogni attacco ondoso

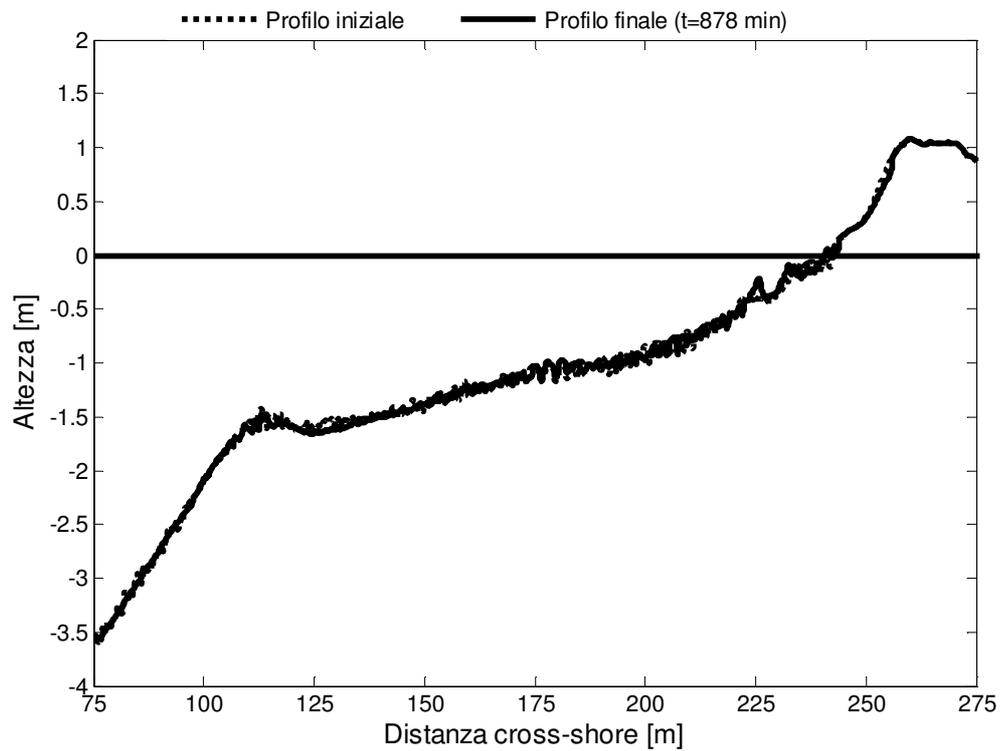


Figura 4.5. Grossenwellenkanal: Esperimento 3 (28-31 luglio 1998). Profilo di spiaggia iniziale e finale (625 min) misurato

Esperimento 4 ($H_s=0.833$ m; $T_p=3.849$ s) (5-10 agosto 1998)	
Intervalli	Tempo progressivo [min]
1	75
2	151
3	277
4	415
5	554
6	693

Tabella 4.8. Grossenwellenkanal: Esperimento 4. Parametri ondametrici caratteristici e durata temporale di ogni attacco ondoso

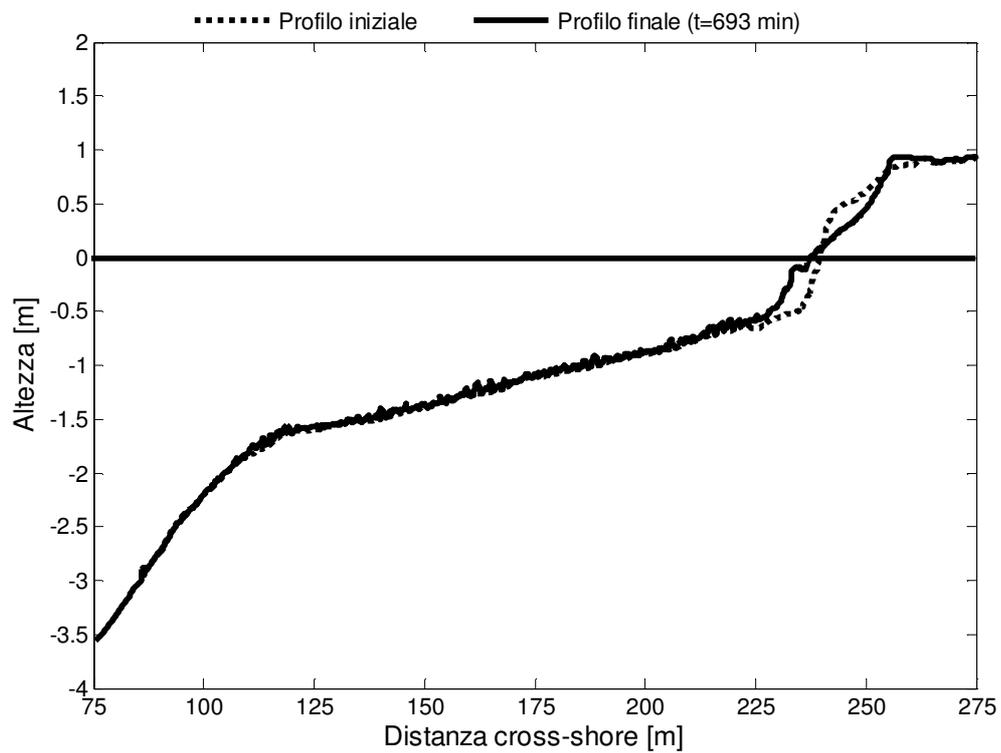


Figura 4.6. Grossenwellenkanal: Esperimento 4 (5-10 agosto 1998). Profilo di spiaggia iniziale e finale (693 min) misurato

Esperimento 5 ($H_s=1.00$ m; $T_p=4.619$ s) (10-12 agosto 1998)	
Intervalli	Tempo progressivo [min]
1	70
2	139
3	277
4	415
5	554
6	693

Tabella 4.9. Grossenwellenkanal: Esperimento 5. Parametri ondametrici caratteristici e durata temporale di ogni attacco ondoso

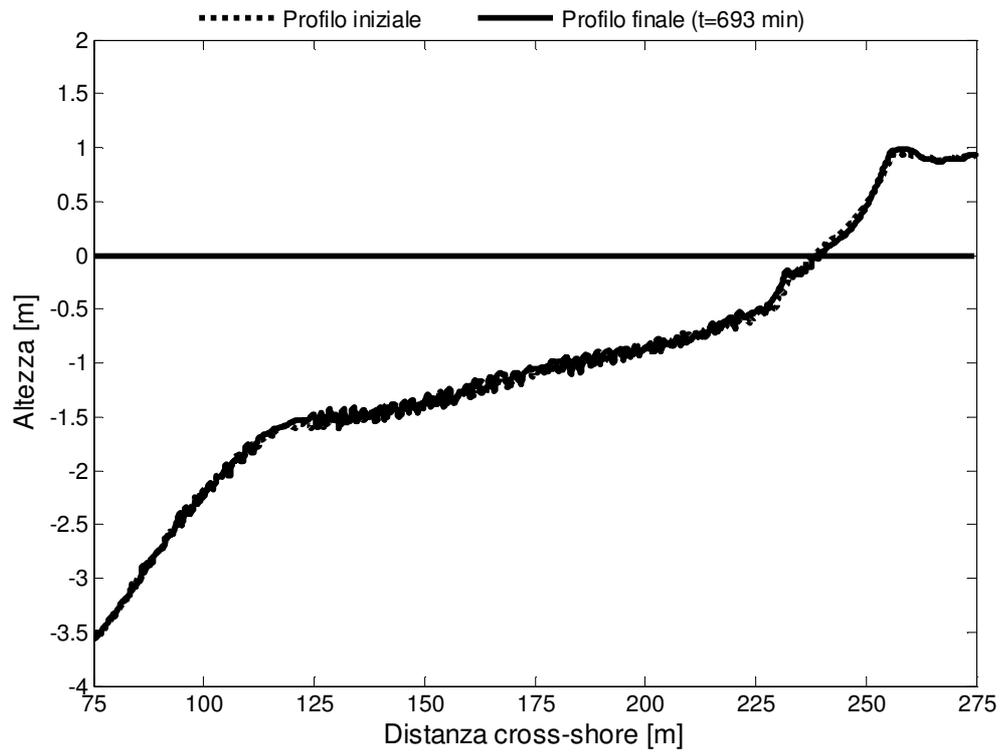


Figura 4.7. Grossenwellenkanal: Esperimento 5 (10-12 agosto 1998) profilo di spiaggia iniziale e finale (693 min) misurato

CAPITOLO 5

TARATURA DEL MODELLO CSHORE: IL CASO DELL'URAGANO ISABEL

5.1. Introduzione

La taratura e verifica del modello CSHORE, effettuata utilizzando dati di campo, è stata condotta con riferimento ad un evento ondoso estremo quale quello dovuto all'impatto dell'uragano Isabel (18 Settembre 2003) sulle coste del North Carolina (USA). In particolare, si fa riferimento a quanto determinato dall'uragano in termini di erosione delle dune e modifiche subite ai profili di spiaggia in direzione cross-shore. Le misure delle variazioni indotte rilevate dagli strumenti sono state confrontate con quelle previste dal modello valutando, così facendo, le sue capacità previsionali in situazioni così estreme. Nei paragrafi che seguono vengono descritte le caratteristiche dell'uragano Isabel in termini di altezze d'onda generate, velocità del vento registrate e variazioni del livello medio del mare prodotte. A questo farà seguito l'analisi qualitativa e quantitativa delle caratteristiche dei profili di spiaggia emersi (dune) e sommersi pre e post Isabel in modo da valutare le loro variazioni in conseguenza dell'impatto dell'uragano. In particolare, l'analisi dell'erosione subita dalle dune da spiaggia è stata

eseguita utilizzando i rilievi effettuati dal sistema satellitare LIDAR e le misure in campo presso dell'osservatorio internazionale del Field Research Facility (FRF), a Duck, in North Carolina. L'analisi delle modifiche subite dai profili di spiaggia sommersi è stata realizzata utilizzando, unicamente, i rilievi presso l'FRF.

5.2. L'uragano Isabel

L'Uragano Isabel (Fig. 5.1) si è abbattuto sulla zona di Outer Banks (Fig. 5.2), sottili lembi di terra prospicienti le aree costiere del North Carolina (USA), il 18 Settembre del 2003. Formatosi inizialmente come tempesta tropicale nell'Oceano Atlantico (6 Settembre 2003) si era poi mosso in direzione Nord-Ovest, incrementando, in una prima fase, e diminuendo, poi, la propria intensità fino a toccare terra come uragano di Categoria 2 (Scala Saffer-Simpson, 1969).

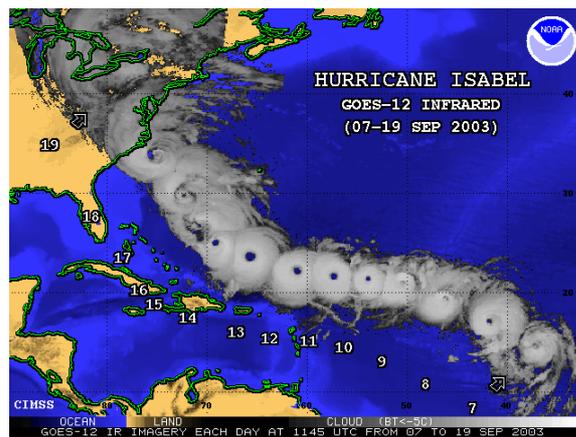


Figura 5.1. Avanzamento dell'Uragano Isabel



Figura 5.2. Outer Banks, North Carolina (USA)

Gli effetti dell'uragano furono avvertiti sulla terra ferma già a partire da 15 ore prima rispetto al suo reale tempo di impatto facendo registrare valori di altezza d'onda compresi tra 4 e 6 metri, così come variazioni del livello della superficie marina (*storme surge*) dell'ordine dei 2 metri.

I danni, in termini di erosione dei profili di spiaggia ed inondazioni delle aree costiere, prodotti da Isabel sono ben visibili se si vanno a comparare le foto aeree, pre (8 settembre 2003) e post (21 Settembre 2003) Isabel, prodotte dall'USGS (U.S Geological Survey), relative ad alcune aree (Ocracoke, Hatteras, Buxton, Rodanthe, Nags Head, Kill Devil Hills) posizionate lungo Outer Banks (Fig. 5.3).



Figura 5.3. Outer Banks: località per le quali sono disponibili di riprese aeree effettuate dell'USGS

Esempi delle riprese aeree effettuate sono riportate nelle Fig. 5.4-5.10 a (pre Isabel) e 5.4-5.10 b (post Isabel).

Nelle Fig. 5.4a e 5.4b si riporta quanto registrato per la località 4, posta nell'area di Ocracoke, per la quale è possibile osservare, a seguito dell'impatto dell'uragano, una significativa erosione subita dalla duna al suo piede unitamente a fenomeni di overwash che caratterizzano l'intero tratto di spiaggia, con conseguenti danni per le infrastrutture. Nelle Fig. 5.5a e 5.5b sono riportate le riprese aeree pre e post Isabel per la località 7 posta nell'area di Hatteras. In questo caso è evidente l'erosione subita dalla duna e la conseguente inondazione del tratto di costa posto a tergo di essa.

La forza distruttrice di Isabel può essere ulteriormente constatata osservando la Fig. 4.6 in cui è visibile l'apertura di una nuova breccia, posizionata nell' area di Cape Hatterras nelle vicinanze del punto in cui l'uragano ha toccato terra.

Le immagini delle Fig 5.7a e 5.7b si riferiscono alla località 15, nell'area di Buxton, per la quale si registrano fenomeni di overwash che caratterizzano l'intero tratto costiero legati, soprattutto, alla mancanza di dune.

Analoghe considerazioni possono essere fatte per la località 21 ricadente nell'area di Rodanthe (Fig. 5.8a e 5.8b).

Infine, le Fig. 5.9a e 5.9b e 5.10a e 5.10b testimoniano i danni prodotti dall'uragano sugli edifici nelle aree costiere di Nags Head e Kill Devil Hills, rispettivamente.

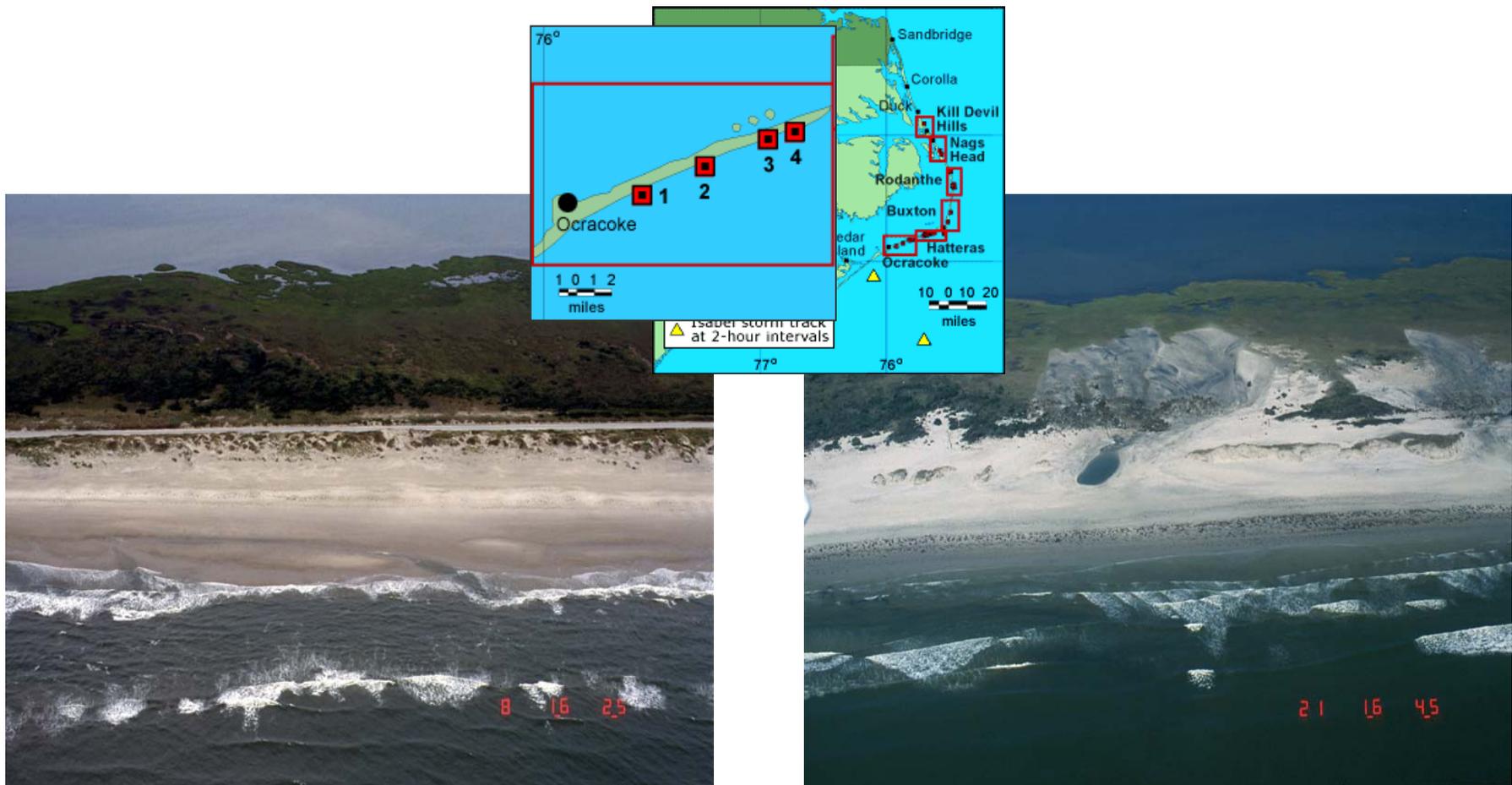


Figure 5.4a. Ocracoke, località 4, North Carolina (8 agosto 2003)

Figure 5.4 b. Ocracoke, località 4 (21 settembre 2003)



Figure 5.5a. Hatterras, località 7 (8 agosto 2003)

Figure 5.5b. Hatterras, località 7 (21 settembre 2003)

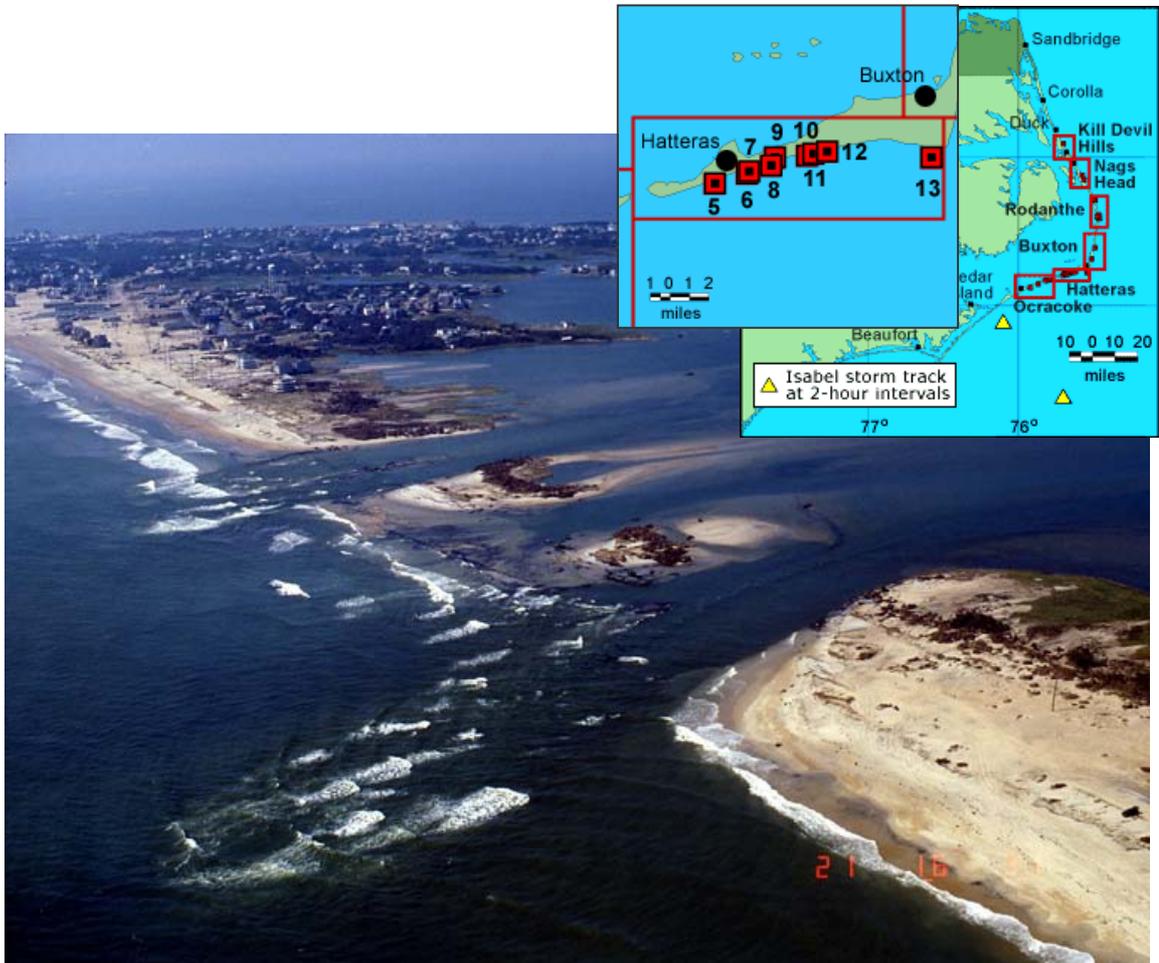


Figura 5.6. Cape Hatterras, località 9: apertura di una nuova breccia (21 settembre 2003)

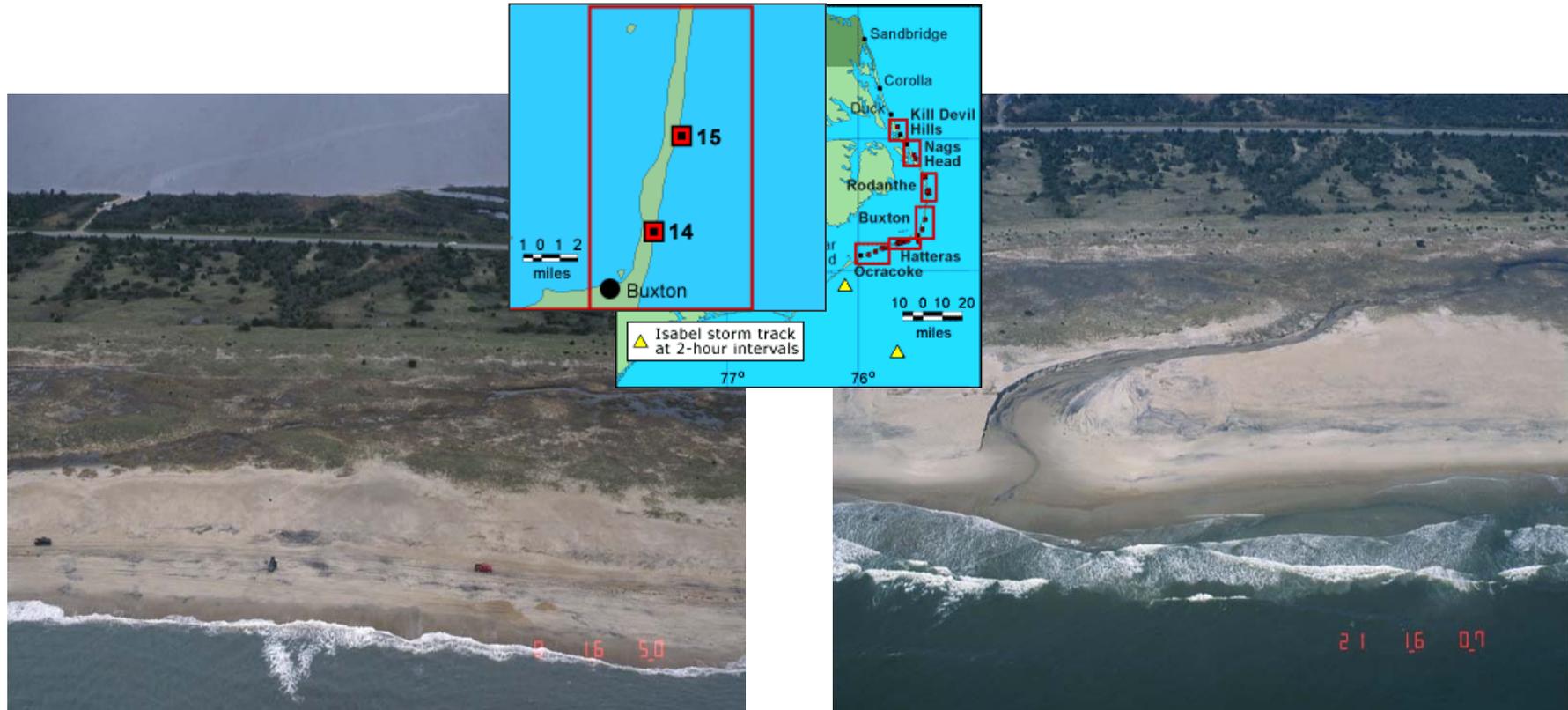


Figure 5.7a. Buxton, località 15 (8 agosto 2003)

Figure 5.7b. Buxton, località 15 (21 settembre, 2003)

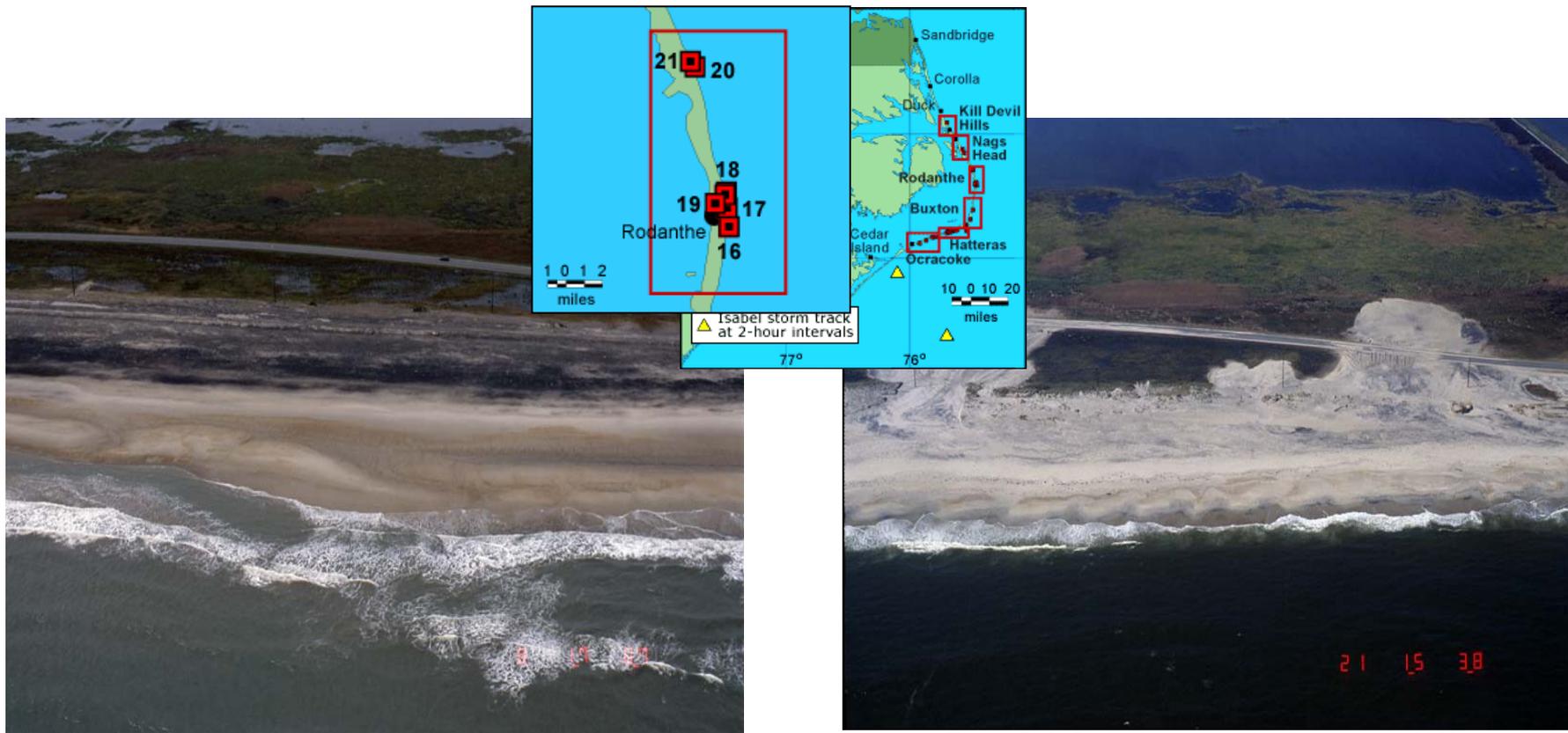


Figure 5.8a. Rodanthe, località 21 (8 agosto 2003)

Figure 5.8b. Rodanthe, località 21 (21 settembre 2003)

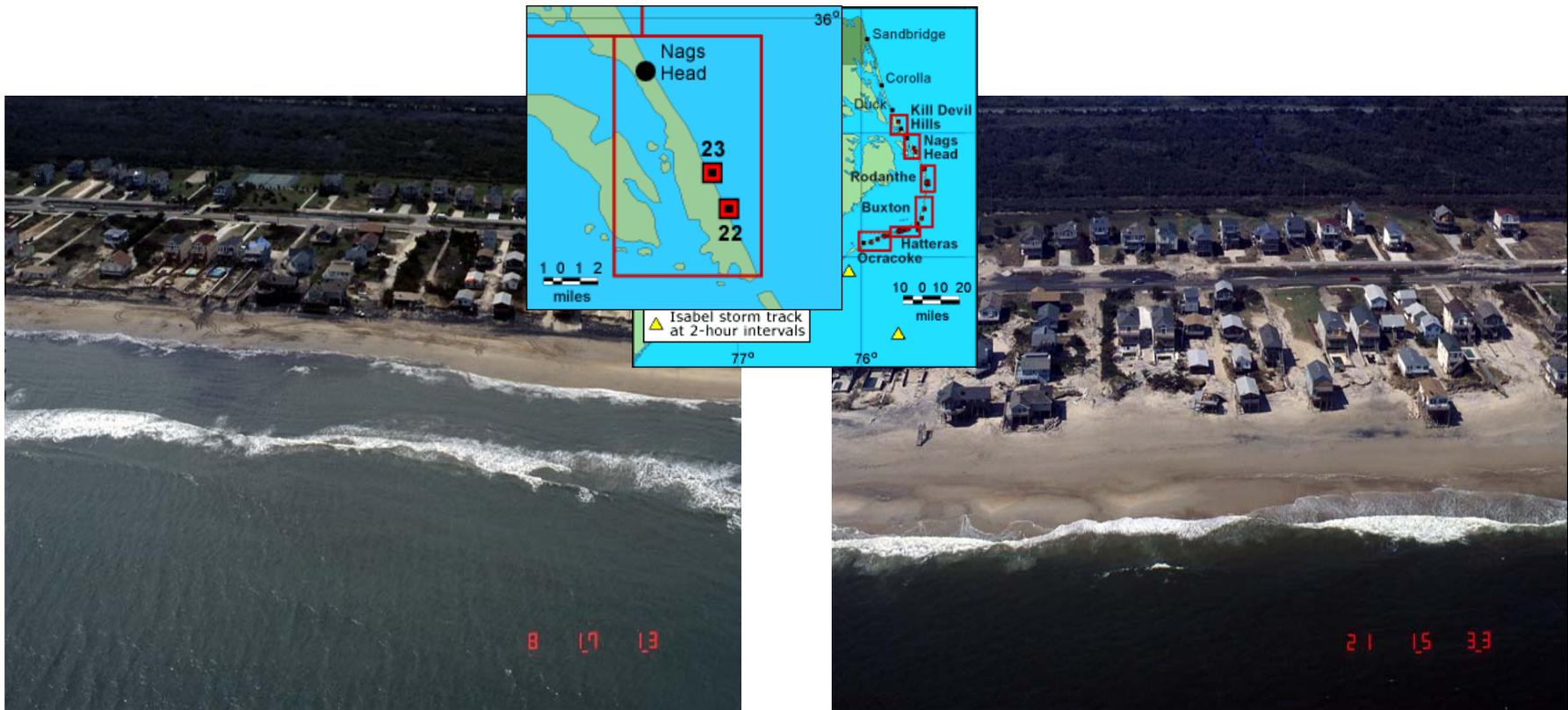


Figure 5.9a. Nags Head, località 23 (8 agosto 2003)

Figura 5.9b. Nags Head, località 23 (21 settembre 2003)

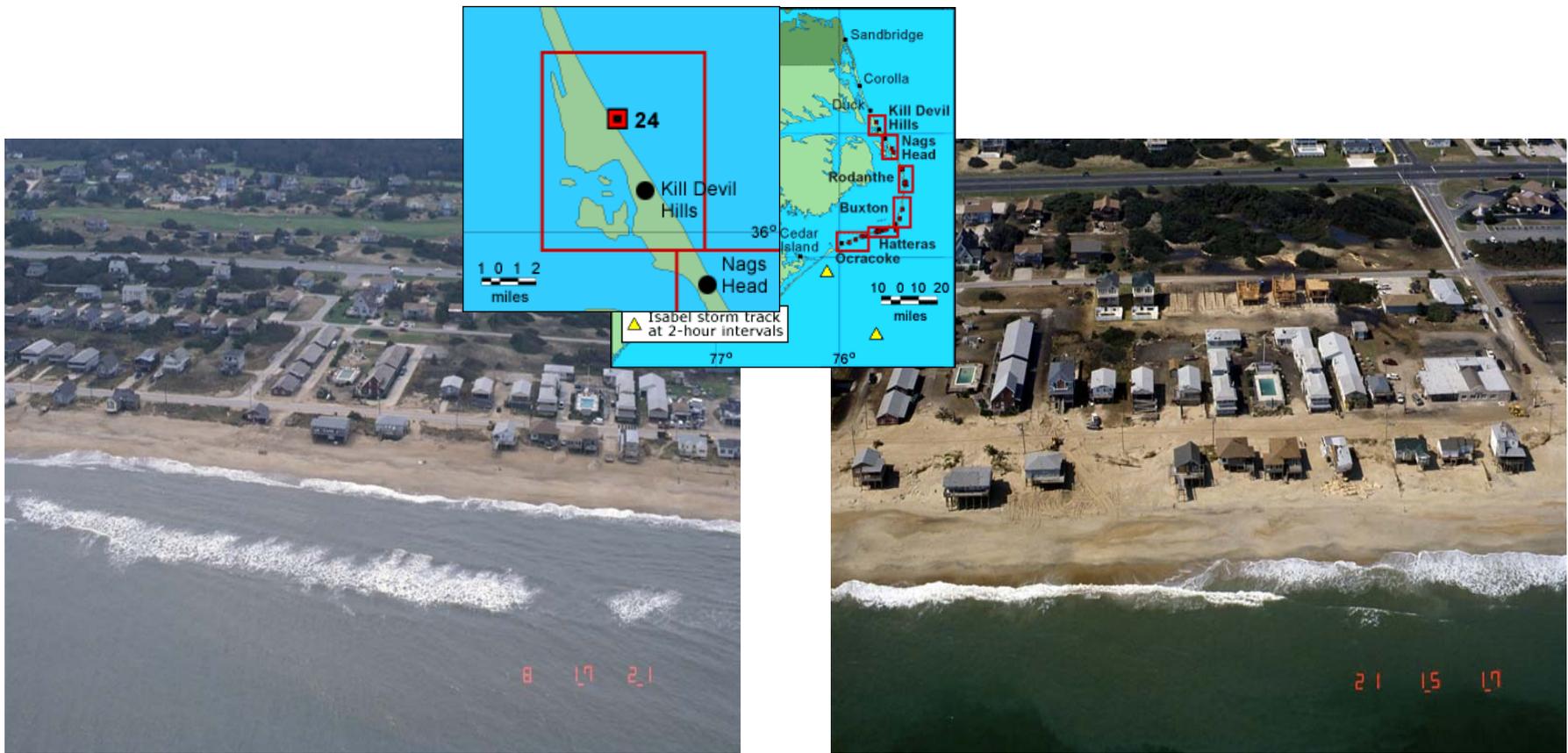


Figure 5.10a. Kill Devil Hills, località 24, North Carolina (8 agosto 2003)

Figura 5.10b. Kill Devil Hills, località 24, North Carolina (21 settembre 2003)

5.3. Caratteristiche metereologiche dell'uragano Isabel

Le informazioni relative alle caratteristiche metereologiche dell'uragano Isabel sono fornite da diversi strumenti di misura.

In primo luogo si dispone delle registrazioni effettuate dall'osservatorio internazionale del Field Research Facility posizionato presso Duck, in North Carolina, e fondato nel 1977 dall'U.S Army Corps of Engineers. L'osservatorio è costituito da un pontile di lunghezza pari a 560 m (Fig. 5.11), in direzione cross-shore, e da un insieme di strumenti di misura (Fig. 5.12) che rilevano costantemente i valori dell'andamento della superficie marina, dell'altezza d'onda, della velocità del vento e delle correnti indotte.

I parametri caratteristici di moto ondoso (altezza d'onda significativa, H_{mo} [m], periodo di picco, T_s [s], direzione di propagazione del moto ondoso, θ) sono registrati da tre differenti tipi di Il primo è il gauge 3111, composto da un insieme di 15 misuratori di pressione, montato approssimativamente ad una distanza cross-shore di 900 m e ad una profondità di 8 metri, posizionato a nord del pontile dell'FRF. La sua posizione tiene conto di tre differenti aspetti. In primo luogo, i misuratori sono collocati all'esterno della surf zone. In tal modo, lo studio dei processi di propagazione del moto ondoso da largo verso riva, può essere facilmente effettuato utilizzando la teoria dell'onda lineare. In secondo luogo, l'altezza, rispetto al fondo del mare, a cui è posizionato il gauge fa sì che le onde di breve periodo vengano registrate senza risentire troppo della presenza del fondale. Infine, il suo posizionamento non risente dell'andamento irregolare delle batimetriche nelle vicinanze del pontile contribuendo a ridurre al minimo i fenomeni di disturbo legati all'inomogeneità del fondale.

La direzione delle onde viene espressa in senso antiorario rispetto all'angolo formato con il pontile dell'FRF. Le onde con direzione 0° sono quelle che hanno una direzione di propagazione ortogonale al pontile, le onde con un angolo di propagazione positivo provengono dalla direzione nord-est mentre quelle con segno negativo provengono da sud-est.

Il secondo tipo di strumento è rappresentato da un Baylor gauge 625 e da un misuratore di pressione entrambi attaccati al pontile. Infine, il terzo è una boa di tipo Waverider 630 posizionata ad una profondità del fondale di 17 m.



Figura 5.11. FRF: ripresa aerea

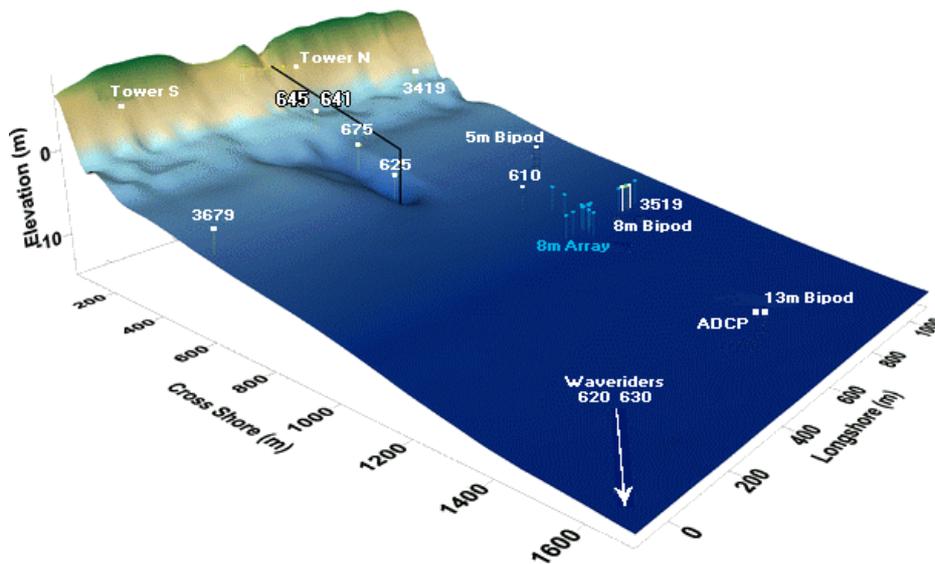


Figura 5.12. Strumenti di misura dell'FRF

Nelle Fig. 5.13, 5.14, e 5.15 sono riportati i valori di altezza d'onda significativa, H_{mo} [m], del periodo di picco, T_p [s], e la direzione media di propagazione del moto ondoso, Dir [°N], registrati dai tre tipi di strumenti di misura tra il 15 e il 21 settembre 2003.

I valori di H_{mo} massimi sono registrati dal gauge 3111 mentre quelli più bassi dal gauge 625 risentendo, lo strumento, dei fenomeni di frangimento delle onde. Per quanto concerne il periodo di picco, i valori rilevati dai tre strumenti di misura sono molto prossimi tra loro, fatta eccezione per quelli registrati dalla boa 630 che risente maggiormente dell'azione di disturbo prodotta dall'uragano soprattutto nelle ore in cui questo raggiunge la massima intensità. La direzione di propagazione del moto ondoso è rilevata, esclusivamente, dai gauges 630 e 3111. I valori sono riferiti all'angolo che le onde formano con il nord geografico (nel grafico con la linea continua nera, corrispondente ad 87°N , si indica la posizione del pontile dell'FRF). La differenza dei valori misurati è senz'altro imputabile alla distanza rispetto al fondo del mare a cui sono collocati i vari strumenti.

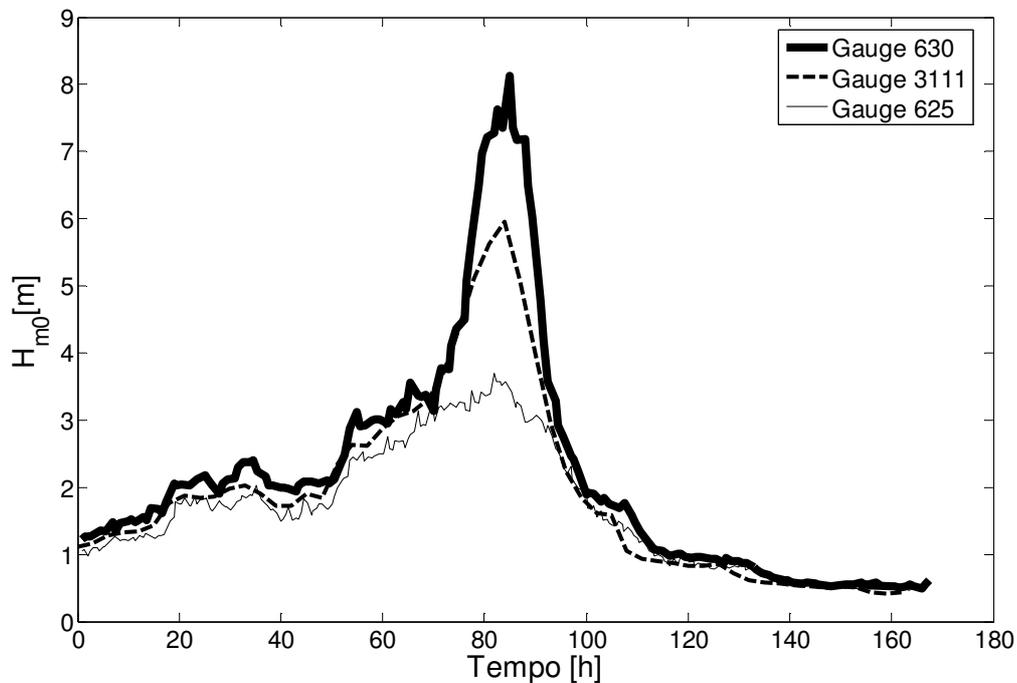


Figura 5.13. Altezza d'onda significativa, H_{mo} , registrata dagli strumenti di misura dell'FRF
(15-21 settembre 2003)

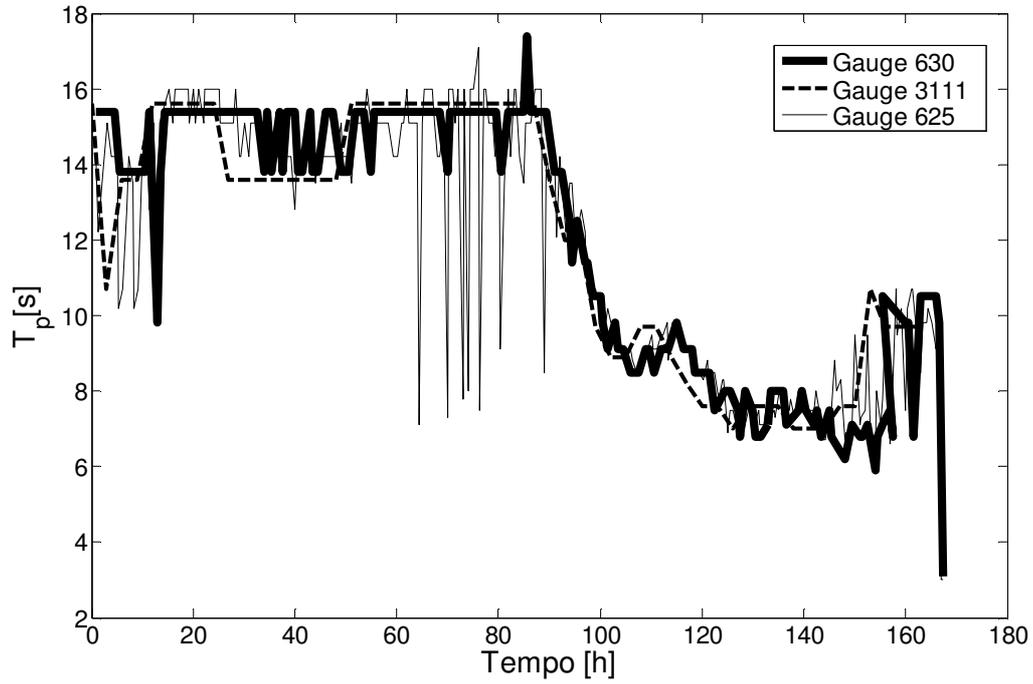


Figura 5.14. Periodo di picco, T_p , registrato dagli strumenti di misura dell'FRF (15-21 settembre 2003)

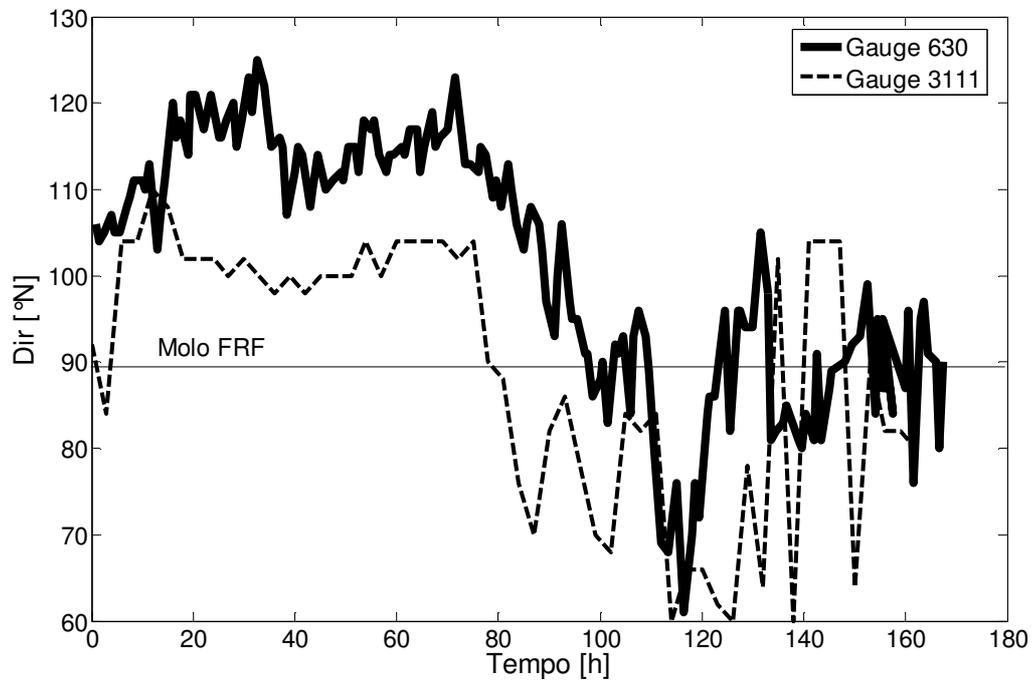


Figura 5.15. Direzione di propagazione del moto ondoso registrata dagli strumenti di misura dell'FRF (15-21 settembre 2003)

Altre informazioni relative ai parametri caratteristici del moto ondoso sono state ottenute dalle registrazioni effettuate dalle boe NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration) presenti nel tratto di mare prospiciente Outer Banks, ovvero: ORIN 7-8652587, collocata presso Oregon Inlet Marina, la boa 41001-150 NM, posizionata ad est di Cape Hatterras, le boe 1025, CLKN 7 e BFTN 7 (Fig. 5.16). Di queste solo la boa 41001 è in grado di fornire informazioni relativamente al settembre 2003. Tale boa è collocata a circa 250 km al di fuori della zona di Outer Banks ad una profondità del fondale pari a 4500 m.

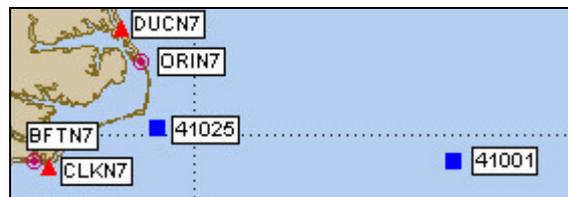


Figura 5.16. Boe Ondametriche NOAA nel tratto di mare prospiciente Outer Banks

I valori di altezza d'onda e periodo di picco rilevati tra il 15 e il 21 settembre 2003 sono riportati in Fig 5.17. La differenza tra i valori di altezza d'onda registrati dalle boe ondamiche NOAA e dagli strumenti dell'FRF dipende naturalmente dalla distanza degli strumenti rispetto alla costa e, soprattutto, dalla diversa profondità del mare a cui gli strumenti sono posizionati.

Le informazioni relative alla velocità e alla direzione del vento, espressa in gradi Nord, sono fornite dall'osservatorio internazionale dell'FRF. La massima velocità del vento rilevata è di 30 m/s (Fig. 5.18)

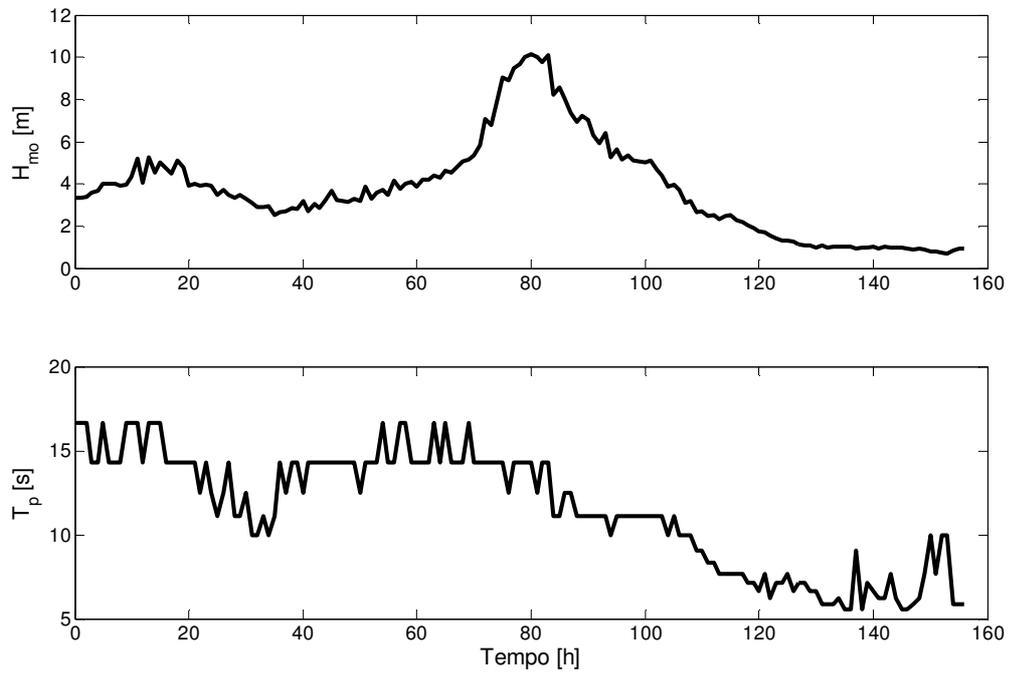


Figura 5.17. Valori dell'altezza d'onda significativa e del periodo di picco registrati dalla boa NOAA 41001 (15-21 settembre 2003)

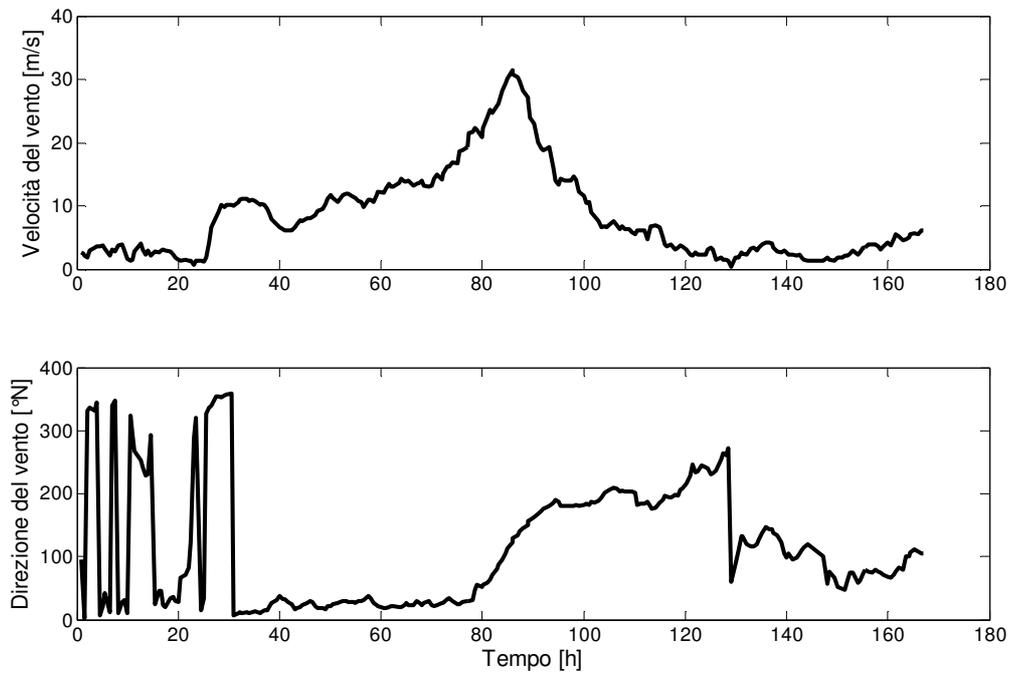


Figura 5.18. Velocità e direzione del vento rilevata presso l'osservatorio internazionale dell'FRF (15-21 settembre 2003)

5.4. Andamento della superficie marina

Le registrazioni relative all'andamento della superficie marina sono forniti da un diverso set di strumenti (Fig. 5.19).



Figura 5.19. Strumenti di misura dell'andamento della superficie marina

Un prima boa (*tide gauge*), attaccata direttamente al pontile dell'FRF, registra le informazioni relative all'andamento della superficie marina ogni 6 minuti, fornendo dati relativi:

1. all'andamento medio della superficie marina (*tide*),
2. ai valori osservati dell'elevazione marina (*storm tide*),
3. i valori dello *storm surge*, ovvero dell'incremento subito dall'andamento medio della superficie marina a seguito dell'evento ondoso, pari alla differenza tra i valori di *storm tide* e *tide*.

I dati sono espressi in metri secondo il sistema di riferimento NGVD (National Geodetic Vertical Datum). Nel caso dell'uragano Isabel, la massima elevazione della superficie marina registrata è di circa 2 metri. Il livello del mare presenta un'elevazione di 1.5 metri per circa 8 ore e di 1 metro per 9 ore.

Altre informazioni sull'andamento della superficie marina sono fornite dalle due boe NOAA presenti nell'area di studio. Una è posizionata a Cape Hatterras Fishing (Numero di identificazione 8654400) a nord rispetto al punto in cui l'uragano ha toccato terra. Il massimo livello della superficie marina registrato è di 2 metri. La boa ha smesso di funzionare nel momento in cui Isabel ha raggiunto la costa. La seconda boa è posizionata in corrispondenza della baia di Oregon Inlet Marina (Numero di Identificazione 8652587) a circa 60 km a Nord di Cape Hatterras. Il massimo valore dell'andamento della superficie marina misurato è di 1 metro.

In Fig. 5.20 si riportano i grafici relativi ai valori di *tide* misurati dai tre strumenti di misura. E' bene mettere in evidenza come il valore massimo (2 m) dell'elevazione della superficie marina è registrato dalle boe dell'FRF e di Caper Hatterras nello stesso istante di tempo. Diversamente, per la boa di Oregon Inlet non solo si registra un valore massimo più basso (1.6 m) ma, inoltre, questo massimo si registra in un istante temporale traslato di circa 11 ore rispetto a quello in cui si registra quello per le altre due boe. Il motivo di ciò è imputabile alla posizione stessa della boa, posta in un punto della costa più interno e quindi risente in maniera ridotta e soprattutto più in ritardo dell'arrivo di Isabel

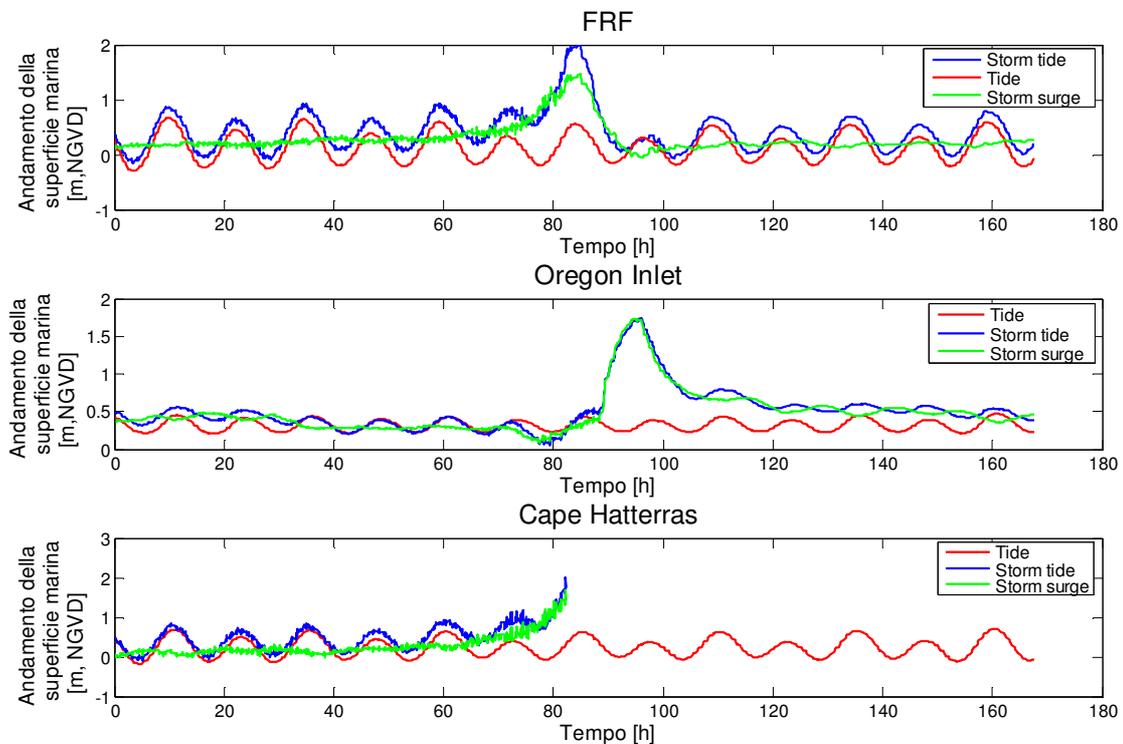


Figura 5.20. Valori dell'andamento della superficie marina misurati presso l'osservatorio dell'FRF e mediante le boe NOAA di Oregon Inlet e Cape Hatterras (15-21 settembre 2003)

5.5. Analisi dei profili di spiaggia pre e post isabel

Le informazioni relative all'evoluzione dei profili e delle dune come già detto in precedenza, sono state ricavate utilizzando i rilievi effettuati dall'FRF e le riprese satellitari fornite dal sistema LIDAR, gestito dall'USGS, per alcune località posizionate lungo il litorale di Outer Banks. Per entrambi questi set di dati si è provveduto alla stima quantitativa dell'area erosa/depositata in funzione della distanza rispetto al punto in cui l'uragano ha toccato terra ed in relazione alle caratteristiche delle dune pre-uragano.

5.5.1. Analisi dei profili LIDAR

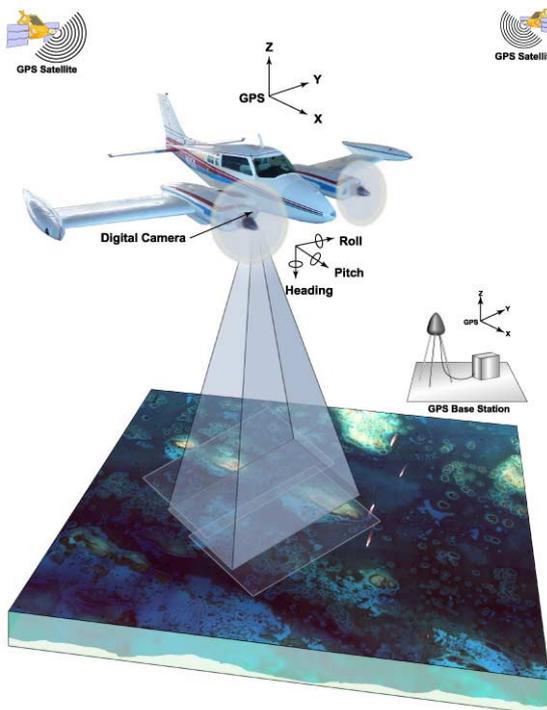


Figura 5.21. Sistema satellitare LIDAR

Il sistema satellitare LIDAR (Light Detection And Ranging) (Fig. 5.21) acquisisce informazioni altimetriche relative alle aree costiere degli Stati Uniti prima e dopo eventi estremi particolarmente intensi al fine di valutare l'evoluzione morfodinamica della costa. Il principale limite del sistema LIDAR è di non riuscire a penetrare all'interno delle acque torbide che caratterizzano, ad esempio, i tratti di mare prossimi alla riva a causa della elevata concentrazione di sedimenti movimentati dall'azione del moto ondoso. Per questo motivo, le informazioni fornite dal sistema satellitare sono state utilizzate per analizzare, esclusivamente, l'erosione subita

dalle dune. Nelle Fig. 5.22 e 5.23 si riportano esempi relativi alle riprese LIDAR effettuate per la località di Cape Hatterras in corrispondenza del punto in cui si è registrata l'apertura della nuova breccia. In particolare, in Fig. 5.22 si effettua un raffronto tra le riprese aeree fornite dall'USGS con quelle del sistema LIDAR. In Fig. 5.23, invece, il raffronto riguarda la situazione pre e post Isabel.

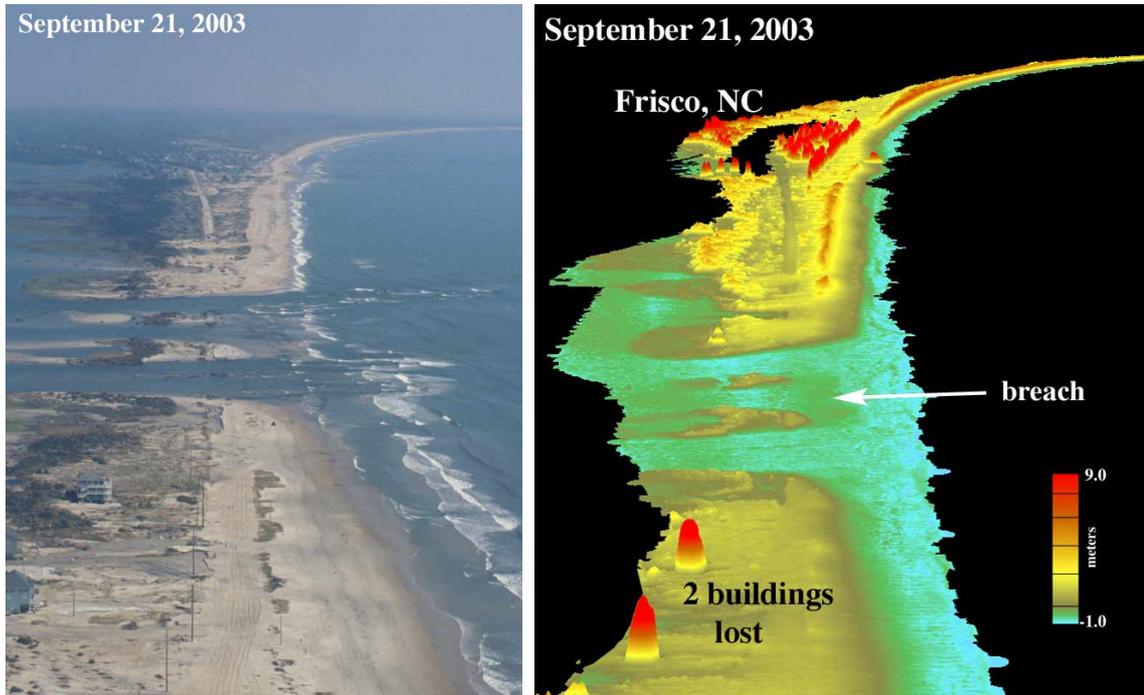


Figura 5.22. Foto aerea (sinistra) e immagine LIDAR (destra) relativa alla località di Cape Hatterras presso cui, a seguito di Isabel, si è registrata l'apertura di una nuova breccia

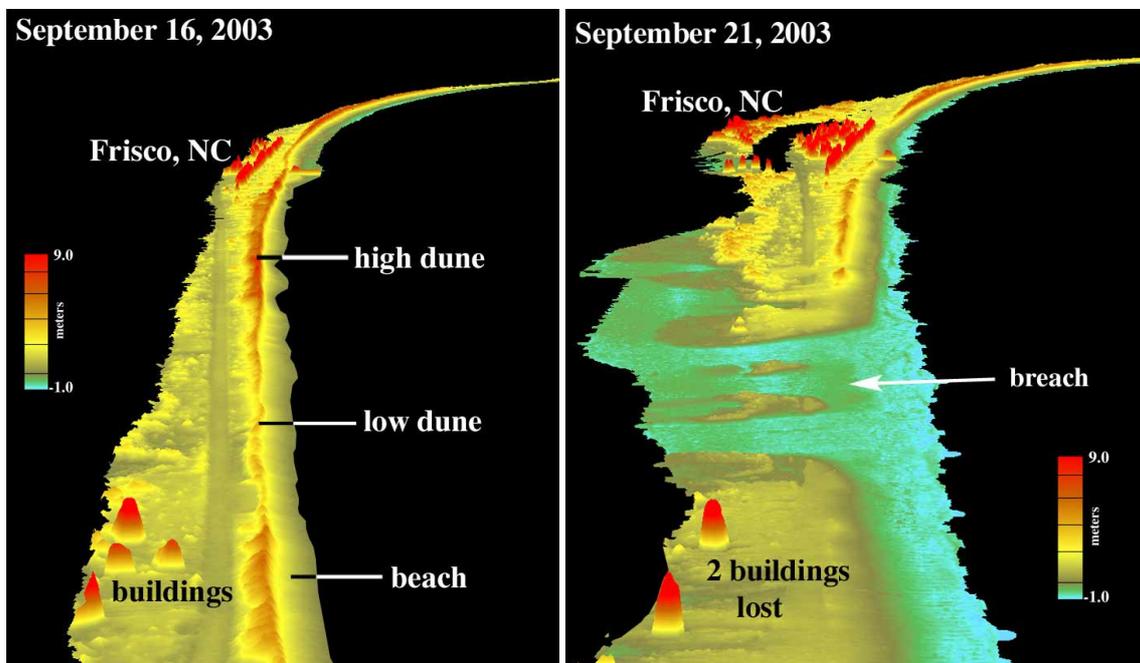


Figura 5.23. Immagine LIDAR pre (sinistra) e post (destra) Isabel per la località di Cape Hatterras presso cui, a seguito dell'uragano, si è verificata l'apertura di una nuova breccia

Per l'analisi dell'erosione delle dune da spiaggia si dispone di 116 diversi profili (Fig 5.24) posizionati lungo il litorale di Outer Banks tra le località di Souther Shores e Cape Hatterras, a circa 117 km e 81 km a nord rispetto al punto in cui Isabel ha toccato terra (Ocracoke), rispettivamente (Fig 5.25). In particolare, si dispone di 15 profili per l'area di Souther Shores, di 19 profili per la località di Kitty Hawk, di 22 profili per Kill Devis Hill, di 59 profili per Nags Head e di un profilo per la località di Cape Hatterras. Per le suddette località, le riprese relative ai profili pre Isabel risalgono al 16 agosto del 2003 quelle post Isabel al 21 settembre 2003



Figura 5.24. Posizionamento dei profili LIDAR lungo il litorale Outer Banks (Immagine da Google Earth)

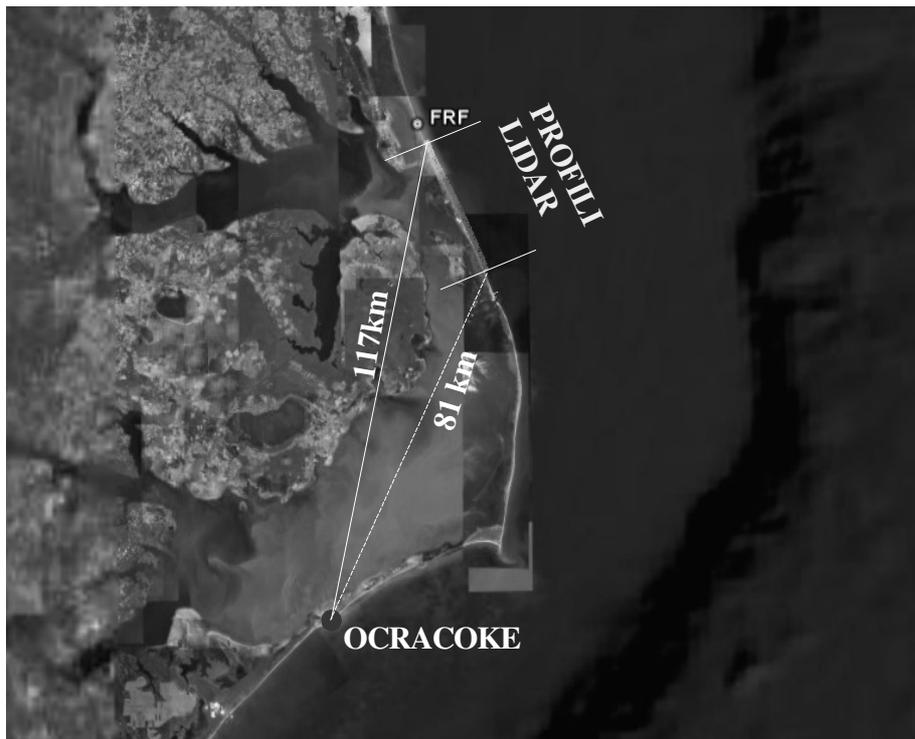


Figura 5.25. Profili LIDAR: vista dall'alto (Immagine da Google Earth)

L'analisi delle modifiche subite dalle dune da spiaggia durante il suddetto arco di tempo è stata condotta previa definizione dei parametri caratteristici delle dune (Fig. 5.26), ovvero:

- $Z_1(x)$: profilo della duna pre Isabel;
- $Z_2(x)$: profilo della duna post Isabel;
- X_L : limite della duna lato terra;
- X_S : limite della duna lato mare;
- Z_C : elevazione della duna pre Isabel;
- Z_E : elevazione della duna post Isabel;
- $A = \int_{X_L}^{X_S} [Z_2(x) - Z_1(x)]$: area della duna erosa/depositata;
- $d = \frac{A}{(X_S - X_L)}$: erosione/ incremento verticale medio della duna.

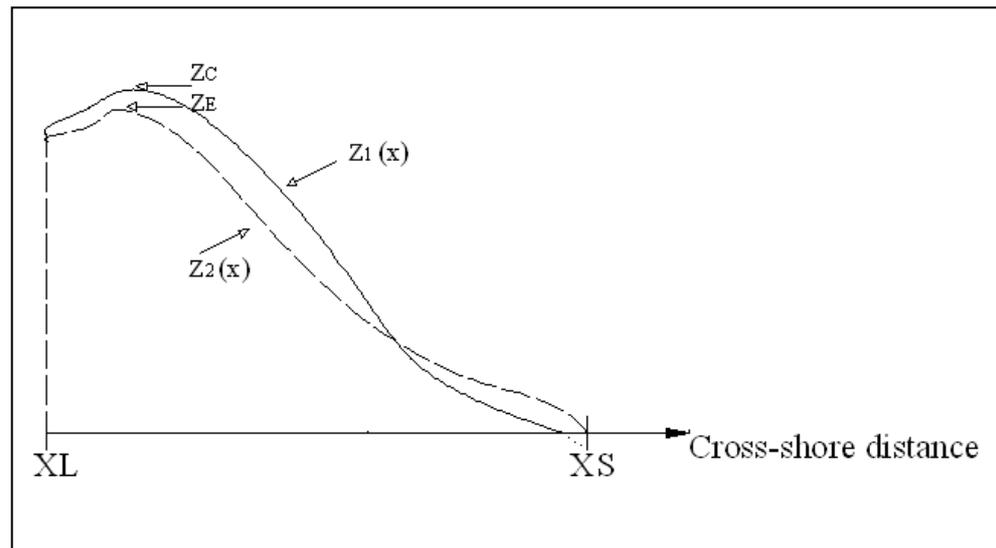


Figura 5.26. Parametri caratteristici della duna

Per l'area di Souther Shores (Tab. 5.1) le altezze medie delle dune prima e post Isabel sono pari a 6.77 m e 6.35 m, rispettivamente. L'area di duna mediamente erosa è pari a 10.3 m^2 mentre l'erosione verticale media è dell'ordine di 0.22 m. La quantità $X = X_S - X_L$ definisce la lunghezza della duna in direzione cross-shore.

Soffermandoci sul profilo -100, dai rilievi effettuati, sembrerebbe che a causa dell'impatto dell'uragano la duna abbia subito un incremento della sua area e della sua altezza, in contrasto, questo, con quanto ci si può aspettare. Tale risultato è, probabilmente, legato agli errori di misura associati alle riprese satellitari.

Per l'area di Kitty Hawk (Tab. 5.2) l'altezza media della duna pre e post Isabel è dell'ordine dei 5.93 m e 4.97 m, rispettivamente. Il valore medio di area erosa è dell'ordine dei 20.5 m^2 . I profili rappresentativi della duna indicati con 9, 50 e 130 sono soggetti a fenomeni di overwash. Per quanto riguarda, in particolare, questo ultimo aspetto si è ipotizzato che durante un evento estremo, con caratteristiche simili a quelle dell'uragano Isabel, fenomeni di overwash caratterizzano le dune che a seguito dell'impatto con la mareggiata presentano un'altezza, Z_E , minore o uguale a 3 m.

L'area di Kill Devis (Tab. 5.3) presenta un valore medio di $Z_C = 7 \text{ m}$ e di $Z_E = 6.45 \text{ m}$. L'area erosa è dell'ordine dei 17 m^2 .

Per Nags Head (Tab. 5.4) l'altezza media della duna pre e post Isabel è pari, rispettivamente, a 6.38 m e 5.50 m. L'area media di duna erosa è di 25.5 m².

Infine, per il profilo collocato nell'area di Cape Hatteras (Tab. 5.5) si registra in assoluto la più alta quantità di area erosa pari a 42.5 m².

I valori relativi all'altezza delle dune pre Isabel, Z_C , (Fig. 5.27), della pendenza delle dune pre Isabel, $\frac{Z_C}{(X_S - X_L)}$, (Fig. 5.28), della differenza tra le altezze massima della duna pre e post Isabel (Fig. 5.29), $(Z_C - Z_E)$, dell'area erosa (Fig. 5.30), A , e dell'erosione media verticale (Fig. 5.31), d , sono stati diagrammati in funzione della distanza, x , misurata in direzione long-shore, rispetto al punto in cui l'uragano ha toccato terra. Questo ha permesso di evidenziare come le modalità in base alle quali variano le caratteristiche delle dune sono funzione della distanza rispetto al punto di impatto dell'uragano. La quantità media di area erosa, relativa a tutti i profili LIDAR considerati, è pari a 20 m² in accordo con quanto si ricava utilizzando la relazione empirica proposta da Hallermeier e Rhodes (1989)

$$A [\text{m}^2] = 8 [T_r]^{0.4} \quad (5.1)$$

ove con T_r si indica il tempo di ritorno corrispondente dell'evento per il quale si vuole effettuare la stima di A . L'uragano, in particolare, è un evento estremo caratterizzato da un tempo di ritorno di 10 anni.

I grafici relativi ai profili LIDAR, pre e post Isabel, sono riportati in Appendice A.

SOUTHERN SHORES									
Profili	X_L [m]	X_S [m]	X_S-X_L [m]	Z_C [m]	Z_E [m]	Z_C-Z_E [m]	A [m ²]	d [m]	Caratteristiche
-150	75	130	55	7.42	6.50	0.92	-0.9	-0.02	Duna erosa
-140	68	122	54	7.18	6.89	0.29	-5.9	-0.11	Duna erosa
-130	159	211	52	7.84	7.93	-0.09	-12.6	-0.24	Duna erosa
-120	79	129	50	7.32	6.46	0.86	-35.4	-0.72	Duna erosa
-110	78	127	49	6.58	6.05	0.53	-42.0	-0.85	Duna erosa
-100	88	147	59	5.92	6.31	-0.39	20.4	0.34	Incremento
-90	110	161	51	5.95	6.08	-0.13	-6.1	-0.12	Duna erosa
-80	111	165	54	6.43	6.30	0.13	-10.0	-0.19	Duna erosa
-70	110	173	63	6.75	6.09	0.66	-4.6	-0.07	Duna erosa
-60	117	173	56	6.48	6.37	0.11	-1.7	-0.03	Modesta erosione
-50	107	180	73	6.79	6.65	0.14	13.1	0.18	Duna erosa
-40	101	152	51	6.49	5.82	0.67	-1.5	-0.03	Modesta erosione
-30	94	146	52	6.51	6.15	0.36	-7.7	-0.15	Modesta erosione
-20	85	137	52	6.04	5.48	0.56	-28.5	-0.54	Duna erosa
-10	79	123	44	6.36	6.10	0.26	-31.0	-0.70	Duna erosa
Media	97.4	151.73	54.33	6.67	6.35	0.33	-10.3	-0.22	

Tabella 5.1. Parametri caratteristici delle dune pre e post Isabel per l'area di Southern Shores.

KITTY HAWK									
Profili	X_L [m]	X_S [m]	$X_S - X_L$ [m]	Z_C [m]	Z_E [m]	$Z_C - Z_E$ [m]	A [m ²]	d [m]	Caratteristiche
0	43	99	56	5.50	5.56	-0.06	15.9	0.29	Modesta erosione
9	37	78	41	4.84	2.65	2.19	-76.3	-1.85	Overwash
20	24	78	54	5.34	5.90	-0.56	-27.1	-0.50	Duna erosa
30	27	84	57	7.18	7.51	-0.33	-20.7	-0.37	Modesta erosione
40	18	85	67	7.02	9.21	-2.19	31.0	0.46	Incremento
50	18	98	80	5.69	3.28	2.41	-26.1	-0.33	Overwash
60	20	71	51	7.54	5.75	1.79	-22.1	-0.43	Duna erosa
70	20	78	58	7.14	8.22	-1.08	22.9	0.40	Incremento
80	20	80	60	9.08	6.88	2.2	-37.6	-0.62	Duna erosa
89	20	82	62	5.32	3.89	1.43	-27.6	-0.44	Duna erosa
99	17	73	56	4.79	4.22	0.57	-43.4	-0.77	Duna erosa
109	24	69	45	4.87	4.43	0.44	-6.9	-0.15	Modesta erosione
119	8	53	45	3.76	3.20	0.56	-7.3	-0.16	Duna erosa
130	14	66	52	3.56	2.68	0.88	-26.9	-0.52	Overwash
138	20	82	62	5.47	5.12	0.35	-45.2	-0.73	Duna erosa
149	8	101	93	5.68	5.04	0.64	-39.7	-0.43	Duna erosa
169	20	85	65	4.75	5.23	-0.48	11.2	0.17	Incremento
179	11	65	54	6.25	5.0	1.25	-24.5	-0.46	Duna erosa
189	18	66	48	7.44	4.62	2.82	-74.7	-1.56	Duna erosa
Media	23.3	81.7	58.46	5.93	4.97	0.96	-20.5	-0.39	

Tabella 5.2. Parametri caratteristici delle dune pre e post Isabel per l'area di Kitty Hawk

KILL DEVIS									
Profili	X_L [m]	X_S [m]	$X_S - X_L$ [m]	Z_C [m]	Z_E [m]	$Z_C - Z_E$ [m]	A [m ²]	d [m]	Caratteristiche
199	20	50	30	5.03	1.76	3.27	-12.8	-0.42	Overwash
209	30	74	44	4.41	3.36	1.05	-3.8	-0.09	Modesta erosione
219	34	94	60	6.15	5.35	0.8	-42.4	-0.70	Duna erosa
229	40	117	77	5.97	5.90	0.07	15.1	0.19	Incremento
240	47	133	86	9.47	4.44	5.03	-22.7	-0.26	Duna erosa
249	50	120	70	5.63	6.17	-0.54	-10.3	-0.15	Duna erosa
260	59	126	67	6.46	6.07	0.39	-21.4	-0.32	Duna erosa
269	85	135	50	4.39	4.09	0.3	-35.2	-0.70	Duna erosa
279	90	126	36	5.71	5.66	0.05	-16.4	-0.45	Duna erosa
289	98	162	64	6.44	6.89	-0.45	-11.7	-0.18	Modesta erosione
299	159	212	53	7.21	6.96	0.25	10.9	0.21	Incremento
309	174	222	48	6.09	5.72	0.37	-15.7	-0.33	Duna erosa
320	170	214	44	6.91	6.34	0.57	-25.7	-0.58	Duna erosa
329	165	226	61	9.23	8.39	0.84	-31.0	-0.51	Duna erosa
340	165	217	52	6.64	6.41	0.23	-21.3	-0.41	Duna erosa
349	145	203	58	6.00	5.96	0.04	-20.8	-0.36	Duna erosa
359	139	218	79	8.03	7.79	0.24	-17.3	-0.22	Modesta erosione
369	114	207	93	9.90	9.84	0.06	-25.9	-0.28	Duna erosa
380	114	207	93	8.36	8.22	0.14	-27.0	-0.29	Duna erosa
400	104	197	93	8.38	7.75	0.63	-27.1	-0.29	Duna erosa
410	114	200	86	7.79	7.74	0.05	-12.2	-0.14	Modesta erosione
420	100	180	80	7.21	6.86	0.35	-3.30	-0.04	Modesta erosione
429	100	174	74	9.94	10.6	0.66	-4.5	-0.06	Modesta erosione
Media	100.7	165.8	65.1	7.00	6.45	0.57	-17	-0.28	

Tabella 5.3. Parametri caratteristici delle dune pre e post Isabel per l'area di Kill Devis

NAGS HEAD									
Profili	X_L [m]	X_S [m]	X_S-X_L [m]	Z_C [m]	Z_E [m]	Z_C-Z_E [m]	A [m ²]	d [m]	Caratteristiche
439	120	199	79	7.92	8.05	-0.13	-7.1	-0.09	Modesta erosione
450	110	181	71	7.54	7.27	0.27	-6.7	-0.09	Modesta erosione
460	100	165	65	6.73	6.60	0.13	-10.5	-0.16	Modesta erosione
469	145	200	55	7.03	6.80	0.23	-20.7	-0.37	Modesta erosione
483	100	160	60	8.23	8.21	0.02	-1.1	-0.02	Modesta erosione
489	100	161	61	6.84	6.48	0.36	4.6	0.08	Modesta erosione
499	78	132	54	6.92	6.63	0.29	-7.9	-0.15	Modesta erosione
509	90	130	40	5.93	5.92	0.01	-22.7	-0.56	Duna erosa
519	94	168	74	7.08	6.34	0.74	-9.7	-0.13	Duna erosa
529	65	120	55	6.63	4.85	1.78	-18.2	-0.33	Duna erosa
540	79	135	56	8.22	8.24	-0.02	-34.6	-0.62	Duna erosa
549	100	146	46	8.51	7.90	0.61	-18.2	-0.40	Duna erosa
559	94	147	53	5.78	5.37	0.41	-18.8	-0.36	Duna erosa
569	85	150	65	6.33	4.88	1.45	-26.7	-0.41	Duna erosa
580	90	161	71	6.36	5.19	1.17	-11.5	-0.16	Duna erosa
589	55	149	94	3.78	5.77	-1.99	-32.3	-0.34	Incremento
599	50	155	105	10.6	9.99	0.61	-46.0	-0.44	Modesta erosione
609	79	149	70	6.11	6.20	-0.09	-25.4	-0.37	Duna erosa
619	69	137	68	5.53	5.63	-0.1	-8.3	-0.12	Duna erosa
630	75	148	73	5.55	4.64	0.91	-5.0	-0.07	Duna erosa
640	79	149	70	7.46	7.43	0.03	-10.2	-0.15	Modesta erosione
649	79	146	67	6.57	5.65	0.92	-21.3	-0.32	Duna erosa
659	69	132	63	5.79	5.16	0.63	-19.7	-0.31	Duna erosa
670	90	142	52	6.23	5.86	0.37	-35.3	-0.68	Duna erosa
679	100	154	54	5.53	5.64	-0.11	-9.0	-0.17	Little change
689	100	155	55	7.08	7.83	-0.75	-16.5	-0.30	Modesta erosione
700	79	171	92	6.42	6.33	0.09	-8.3	-0.09	Duna erosa
709	90	154	64	5.64	5.11	0.53	-20.4	-0.32	Duna erosa
719	85	139	54	8.40	6.72	1.68	-38.8	-0.71	Duna erosa
729	100	171	71	5.28	5.09	0.19	-15.5	-0.22	Duna erosa
739	100	153	53	7.46	5.19	2.27	-36.7	-0.69	Duna erosa
749	100	153	53	7.30	5.77	1.53	-43.5	-0.82	Duna erosa
759	85	157	72	5.64	3.96	1.68	-44.1	-0.61	Duna erosa
771	85	155	70	9.50	8.60	0.9	-19.2	-0.27	Modesta erosione
779	110	161	51	4.81	3.56	1.25	-29.2	-0.57	Duna erosa
789	125	169	44	17.2	3.56	13.64	-62.4	-1.41	Overwash
800	125	181	56	6.28	6.47	-0.19	-36.6	-0.66	Duna erosa
809	139	197	58	7.14	7.01	0.13	-25.6	-0.44	Duna erosa
819	155	210	55	5.29	5.49	-0.2	-30.9	-0.56	Duna erosa
829	178	216	38	4.85	2.16	2.69	-28.2	-0.73	Overwash
839	165	216	51	6.82	5.41	1.41	-46.5	-0.91	Duna erosa
850	154	190	36	6.79	4.30	2.49	-29.3	-0.82	Duna erosa
859	125	178	53	5.57	4.24	1.33	-25.4	-0.48	Duna erosa
869	110	151	41	5.71	3.15	2.56	-43.5	-1.08	Overwash

879	107	152	45	6.18	6.08	0.1	-36.0	-0.81	Duna erosa
890	104	158	54	4.95	5.86	-0.91	-30.5	-0.57	Duna erosa
899	100	171	71	3.92	6.09	-2.17	-25.7	-0.36	Duna erosa
909	110	166	56	6.28	5.81	0.47	-39.2	-0.70	Duna erosa
920	130	195	65	5.67	3.86	1.81	-24.8	-0.38	Duna erosa
929	125	195	70	6.57	6.13	0.44	-28.9	-0.41	Duna erosa
940	146	194	48	5.60	4.76	0.84	-17.8	-0.38	Duna erosa
951	155	209	54	5.53	4.94	0.59	-24.3	-0.45	Duna erosa
960	170	212	42	3.97	2.35	1.62	-26.3	-0.63	Duna erosa
970	149	198	49	4.73	3.07	1.66	-63.2	-1.30	Duna erosa
978	159	214	55	4.31	2.27	2.04	-38.1	-0.69	Duna erosa
989	170	219	49	3.86	5.25	-1.39	27.2	-0.55	Duna erosa
999	139	207	68	7.41	7.33	0.08	-44.5	-0.66	Duna erosa
1009	130	174	44	3.36	2.66	0.7	-49.2	-1.09	Overwash
1020	117	188	71	4.84	3.90	0.94	-53.6	-0.76	Duna erosa
Media	107.1	166.0	59.0	6.38	5.50	0.88	-25.5	-0.48	

Tabella 5.4. Parametri caratteristici delle dune pre e post Isabel per l'area di Nags Head

CAPE HATTERAS									
Profilo	X_L [m]	X_S [m]	$X_S - X_L$ [m]	Z_C [m]	Z_E [m]	$Z_C - Z_E$ [m]	A [m ²]	d [m]	Caratteristiche
265	149	213	64	7.68	7.03	0.65	-42.5	-0.66	Duna erosa

Tabella 5.5. Parametri caratteristici della duna pre e post Isabel per l'area di Cape Hatterras

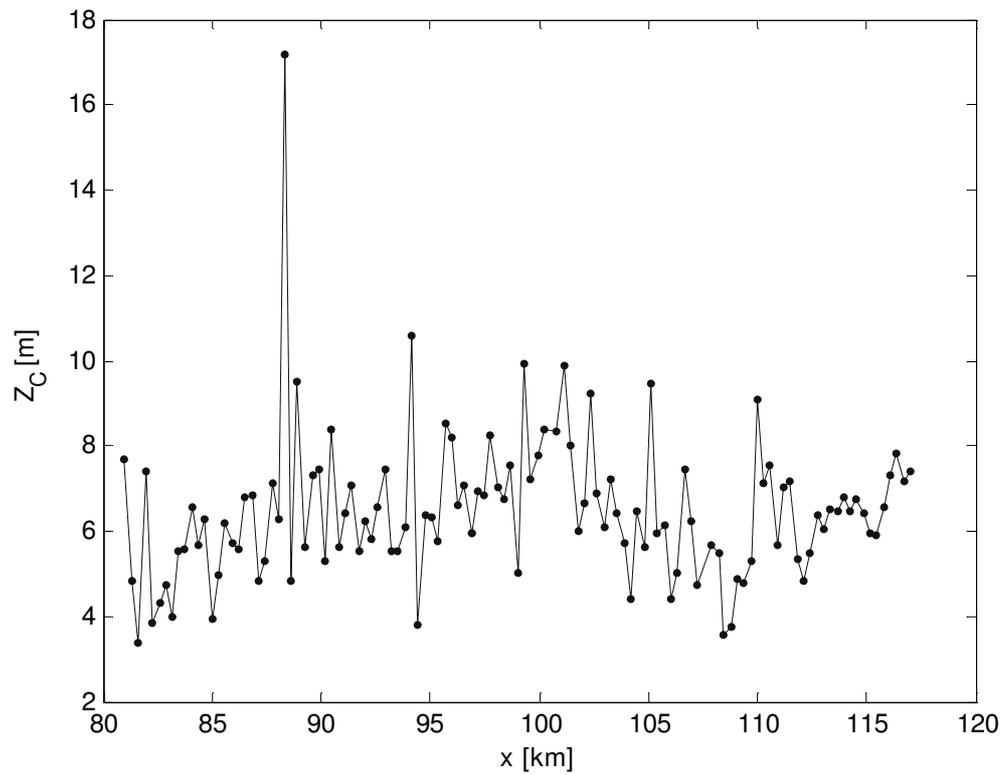


Figura 5.27. Altezza massima della duna pre Isabel, Z_C , in funzione della distanza, x , in direzione long-shore, dal punto in cui l'uragano ha toccato terra

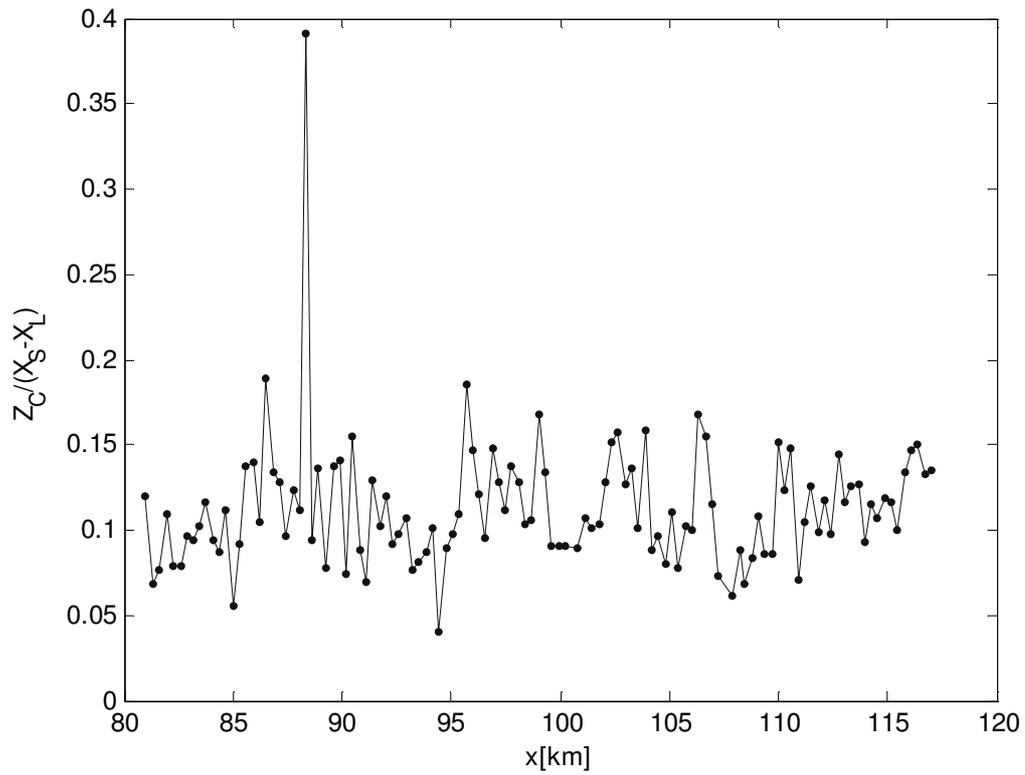


Figura 5.28. Pendenza della duna pre Isabel, $Z_c / (X_S - X_L)$, in funzione della distanza, x , in direzione long-shore, dal punto in cui l'uragano ha toccato terra

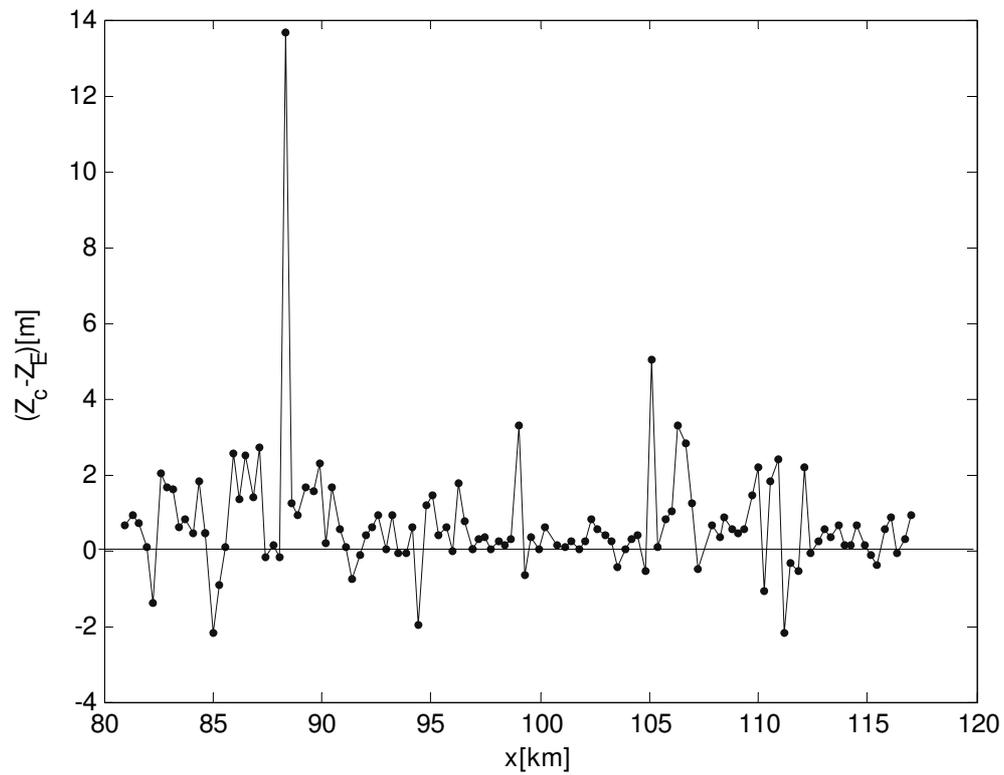


Figura 5.29. Differenza tra i valori di altezza delle dune pre e post Isabel, $(Z_C - Z_E)$, in funzione della distanza, x , in direzione long-shore, dal punto in cui l'uragano ha toccato terra

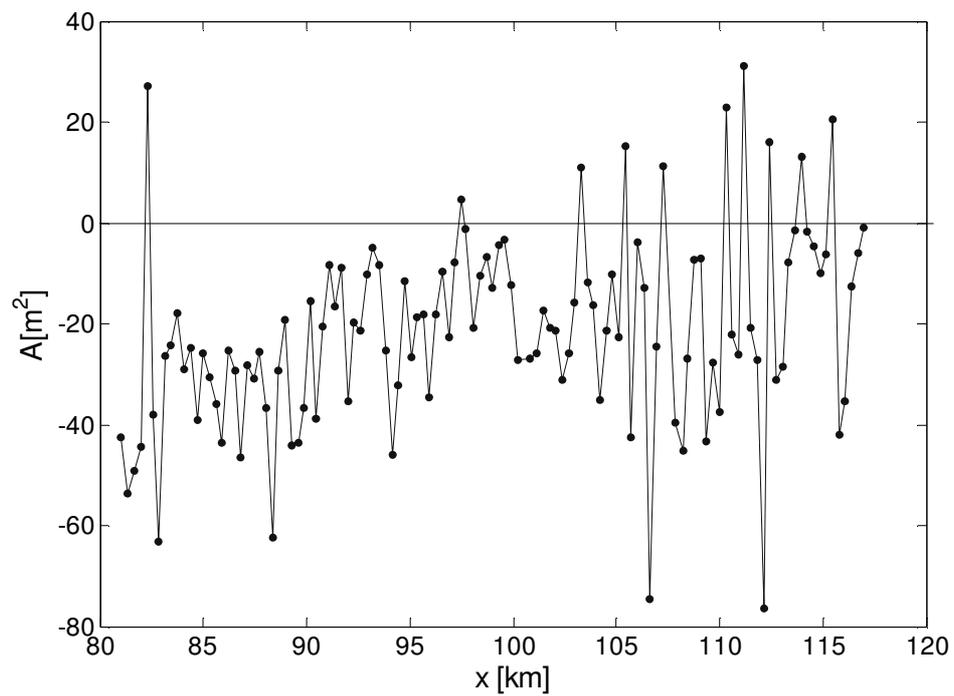


Figura 5.30. Area di duna erosa, A , in funzione della distanza, x , in direzione long-shore, dal punto in cui l'uragano ha toccato terra

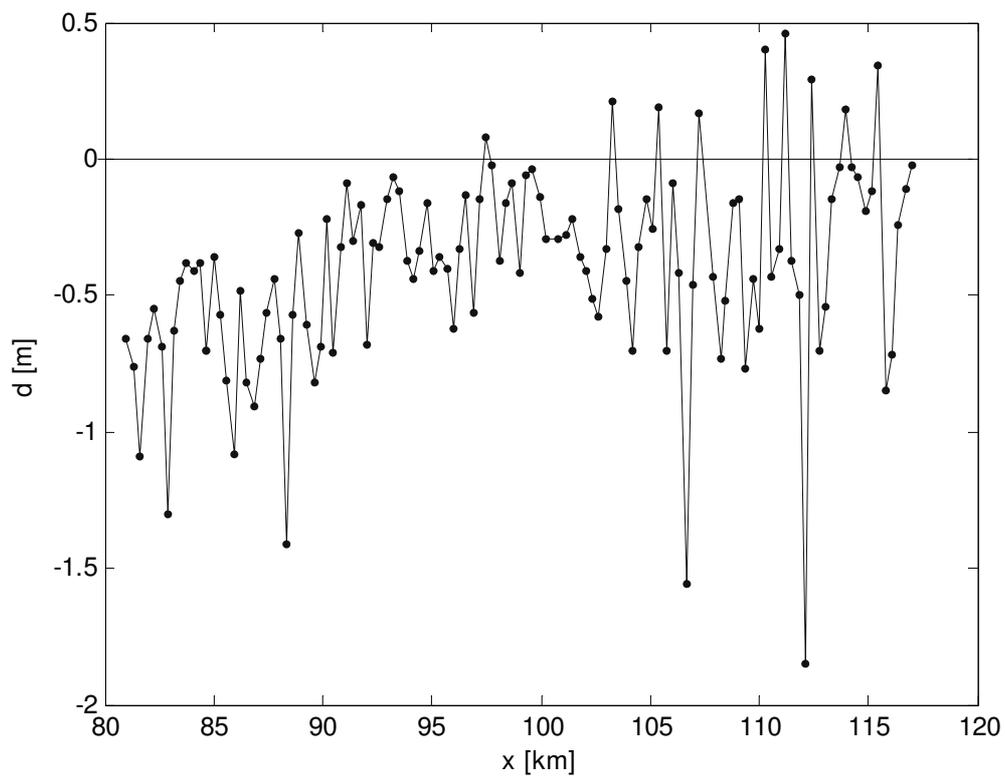


Figura 5.31. Erosione verticale media delle dune, d , in funzione della distanza, x , in direzione long-shore, dal punto in cui l'uragano ha toccato terra

5.5.2. Analisi dei profili FRF

A partire dal 1981, presso l'osservatorio dell'FRF sono stati condotti dettagliati rilievi di profili di spiaggia, emersi e sommersi. I rilievi, in particolare, riguardano 28 profili dislocati a nord e a sud del pontile dell'FRF, su una distanza long-shore di circa 1200 m (Fig. 5.32).

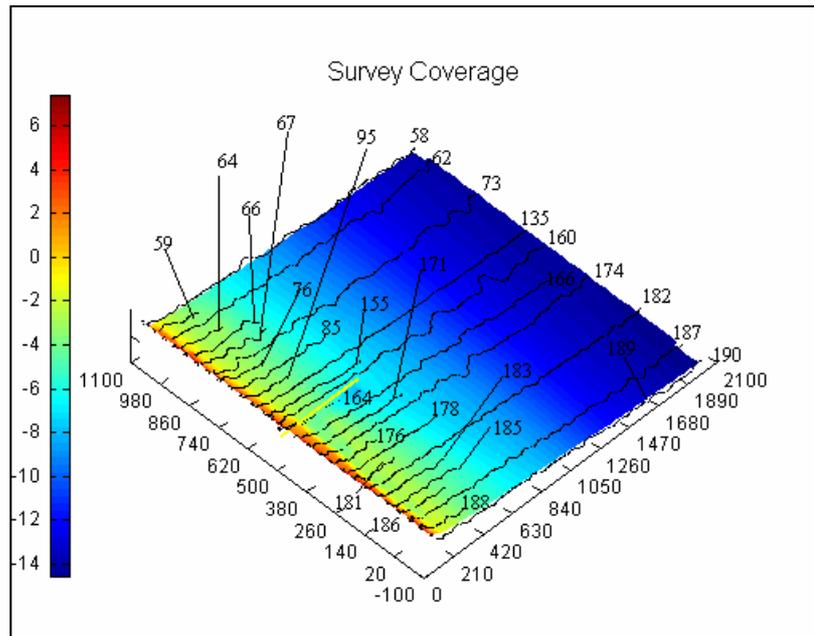


Figura 5.32. Profili FRF

L'area di mare antistante il pontile dell'FRF (Fig. 5.33) è caratterizzata da batimetriche rettilinee e parallele e da una modesta pendenza del fondale marino. Tale andamento, piuttosto regolare, si interrompe in corrispondenza del pontile dove si registrano variazioni della profondità del fondale fino a 3 metri superiore rispetto a quelle registrate nelle aree circostanti.

Per il caso di Isabel, i profili dell'FRF sono posizionati ad una notevole distanza rispetto al punto in cui l'uragano ha toccato terra (superiore ai 125 km), conseguentemente, gli effetti prodotti in termine di erosione delle dune e dei profili di spiaggia risultano meno evidenti rispetto a quelli osservati per i profili LIDAR. Nonostante ciò, l'analisi dei profili FRF risulta di fondamentale importanza nel prosieguo dello studio poiché, in primo luogo, grazie ad essi è possibile valutare l'erosione prodotta dall'uragano sui profili di spiaggia sia emersi che sommersi, al contrario di quanto è possibile fare usando i dati LIDAR, ed

inoltre, cosa ancora più importante, tali profili saranno utilizzati per tarare e verificare il modello numerico CSHORE.

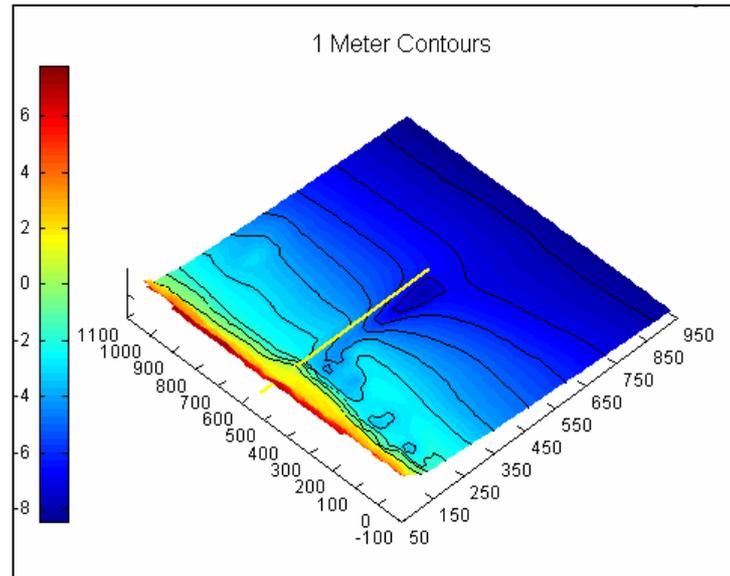


Figura 5.33. Andamento batimetrico nel tratto di mare antistante il pontile dell'FRF

La stima delle quantità di area erosa, A , e delle modifiche medie verticali, d , prodotte dall'impatto dell'uragano è stata valutata, in questo caso, in funzione della distanza rispetto al pontile dell'FRF (Fig. 5.34) al fine di valutare l'omogeneità delle variazioni subite dai profili in direzione long-shore. Questa condizione, infatti, rappresenta l'ipotesi fondamentale su cui si basa, come sottolineato anche in precedenza (Cap.3), il modello CSHORE. Dall'analisi effettuata risulta che la condizione di uniformità in direzione long-shore caratterizza tutti i profili dell'FRF fatta eccezione per quelli posti nelle immediate vicinanze del pontile.

Il valore medio di area erosa per i profili FRF è dell'ordine dei 150 m^2 (Tab. 5.6).

I profili di spiaggia pre e post Isabel misurati sono riportati in appendice B.

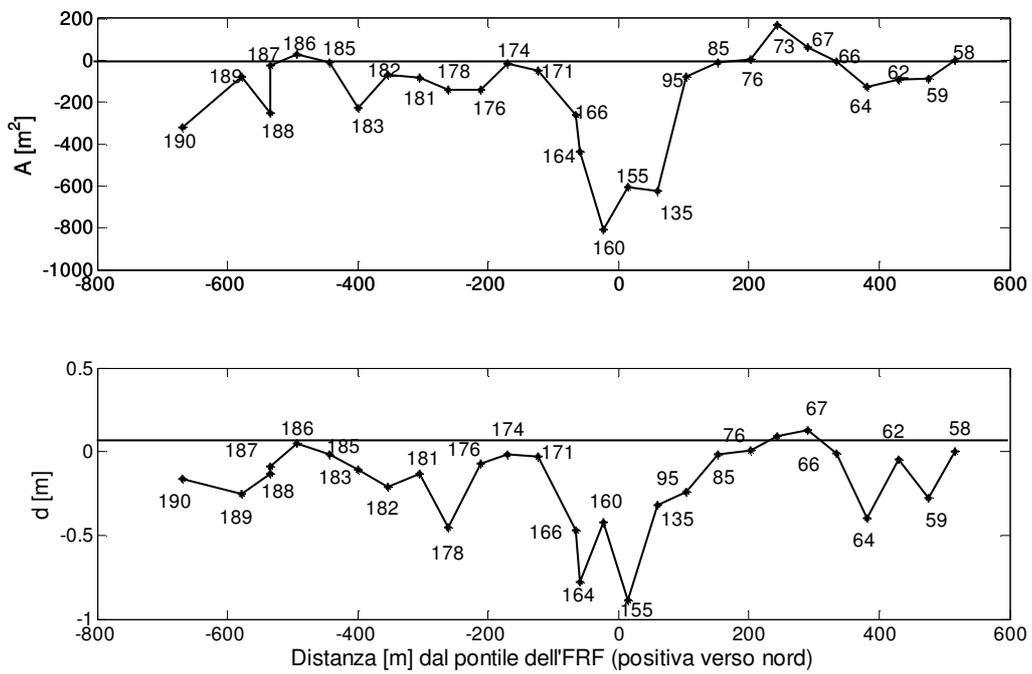


Figura 5.34. Area erosa e variazione verticale media dell'altezza delle dune in funzione della distanza dal pontile dell'FRF

Profili	X_L [m]	X_S [m]	A [m ²]	$d = \frac{A}{(X_S - X_L)}$ [m]
58	68	2002	0.1	0.00
59	67	377	-88.0	-0.28
62	62	2004	-93.2	-0.05
64	54	375	-127.3	-0.40
66	54	559	-5.7	-0.01
67	56	552	62.3	0.13
73	55	2013	170.2	0.09
76	53	369	2.7	0.01
85	52	752	-10.8	-0.02
95	55	269	-80.3	-0.24
135	56	1986	-623.9	-0.32
155	60	743	-604.8	-0.89
160	57	2004	-808.3	-0.42
164	37	591	-434.9	-0.78
166	37	591	-260.3	-0.47
171	55	1891	-48.2	-0.03
174	60	735	-16.8	-0.02
176	59	2007	-140.7	-0.07
178	61	377	-142.7	-0.45
181	56	691	-84.5	-0.13
182	55	373	-66.2	-0.21
183	55	2056	-226.9	-0.11
185	57	512	-11.3	-0.02
186	57	552	26.8	0.05
187	58	367	-27.2	-0.09
188	56	1983	-250.7	-0.13
189	57	367	-76.6	-0.25
190	65	2012	-320.5	-0.16

Tabella 5.6. Valori di area erosa, A , e variazione verticale, d , per i profili FRF a seguito dell'impatto dell'uragano Isabel

CAPITOLO 6

APPLICAZIONE E VERIFICA DEL MODELLO CSHORE: DATI DI LABORATORIO IN LARGA SCALA

6.1 Introduzione

La taratura del modello CSHORE, condotta utilizzando i dati di laboratorio in larga scala ricavati presso il Grossenwellenkanal dell'università di Hannover, è stata eseguita al fine di valutare le capacità previsionali del modello circa l'evoluzione dei profili di spiaggia a seguito di diversi e susseguenti attacchi ondosi.

Le variazioni indotte sui profili e sulle dune sono state valutate a partire da una distanza, rispetto al limite lato "mare" del *wave flume*, di 79.05 m (Fig. 6.1), coincidente con il punto estremo ($x=0$) del dominio di calcolo suddiviso in una griglia a maglie quadre i cui nodi distano tra loro 4 cm e che si protrae fino ad una distanza, verso terra, di circa 196 m. Le informazioni relative ai parametri caratteristici di moto ondoso sono fornite dal gauge 5, mentre i valori del wave set-up o setdown e dell'incremento della superficie a seguito della generazione del moto ondoso sono posti pari a zero. Le onde generate presentano un angolo di propagazione ortogonale alla linea di riva, $\theta = 0$, dando origine, quindi, ad un trasporto di materiale nella sola direzione cross-shore.

I sedimenti costituenti i profili riproducono, come già ricordato in precedenza, situazioni fisiche di una spiaggia artificiale presso Venezia e sono caratterizzati da un diametro medio, d_{50} , di 0.35 mm, da una velocità di caduta, w_f , di 4.45 cm/s e da un peso specifico, adimensionalizzato rispetto a quello dell'acqua, di 2.65.

Le informazioni relative ai diversi attacchi ondosi fornite in ingresso al modello per il punto di coordinata $x=0$ del dominio di calcolo, per ciascuno dei 5 esperimenti considerati, sono riportati nelle Tab. 6.1-6.5.

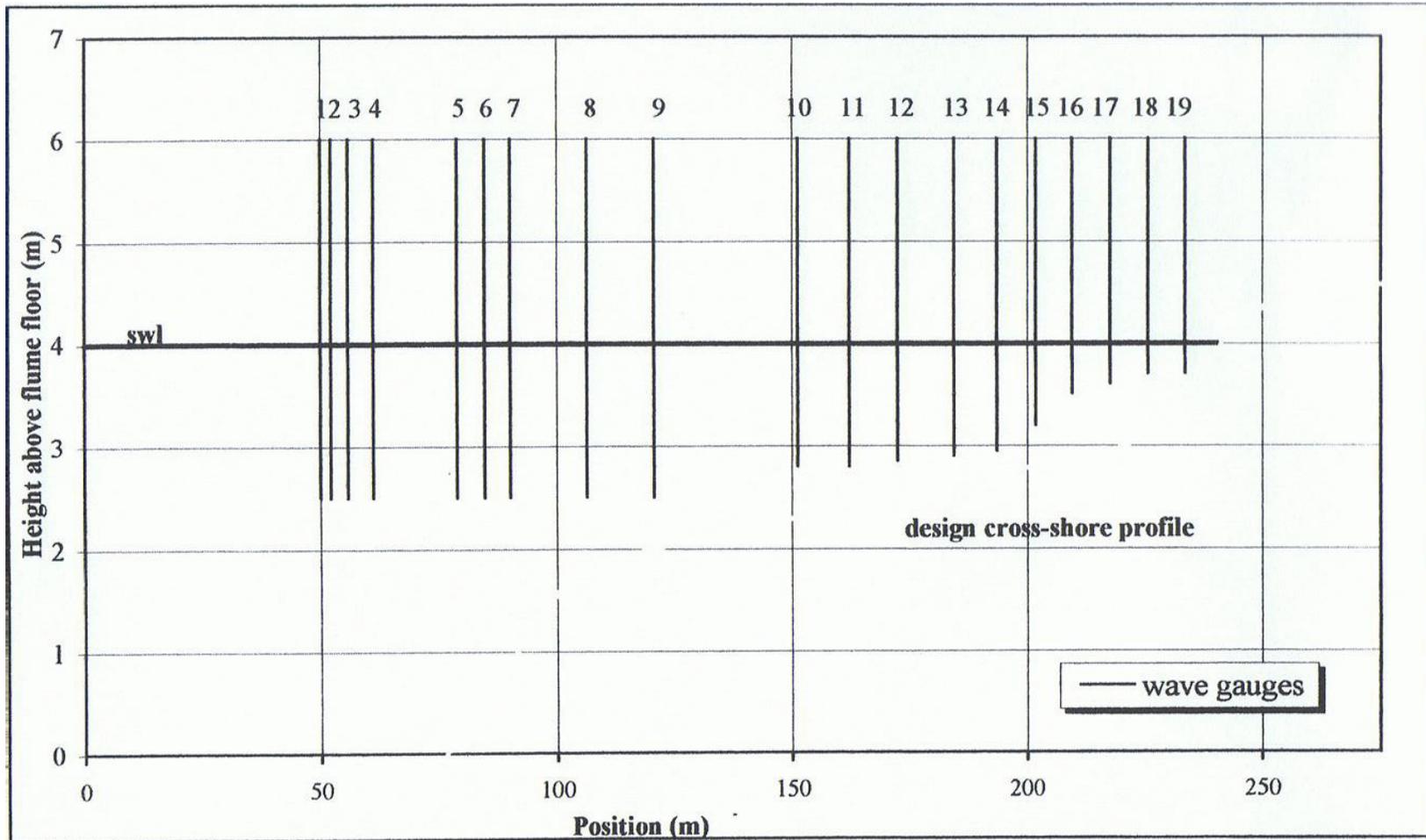


Figura 6.1. Wave flume e posizione dei vari gauges

Attacchi ondosi	Durata attacco ondoso	Durata attacco ondoso	T_p	H_{mo}	H_{rms}	Setup	SWL above $z=0$	θ
	[min]	[s]	[s]	[m]	[m]	[m]	[m]	
0	10	600	4.68	0.939	0.664	0	0	0
1	38.5	2310	4.68	1.023	0.723	0	0	0
2	77	4620	4.26	0.988	0.699	0	0	0
3	115.5	6930	4.68	0.975	0.690	0	0	0
4	154	9240	4.68	0.953	0.674	0	0	0
5	231	13860	4.68	0.958	0.678	0	0	0
6	308	18480	4.26	0.957	0.677	0	0	0
7	462	27720	4.68	0.966	0.683	0	0	0
8	651	39060	4.68	0.967	0.684	0	0	0
9	786	47160	4.68	0.95	0.672	0	0	0
10	863	51780	4.26	0.966	0.683	0	0	0
11	878	52680	4.68	0.929	0.657	0	0	0

Tabella 6.1. Grossenwellnkanal: Esperimento 1. Numero di attacchi ondosi, loro durata e corrispondenti parametri caratteristici

Attacchi ondosi	Durata attacco ondoso	Durata attacco ondoso	T_p	H_{mo}	H_{rms}	Setup	Swl above $z=0$	θ
	[min]	[s]	[s]	[m]	[m]	[m]		
0	15	900	5.196	1.333	0.943	0	0	0
1	43	2580	5.196	1.333	0.943	0	0	0
2	86	5160	5.196	1.333	0.943	0	0	0
3	129	7740	5.196	1.333	0.943	0	0	0
4	172	10320	5.196	1.333	0.943	0	0	0
5	258.5	15510	5.196	1.333	0.943	0	0	0
6	345	20700	5.196	1.333	0.943	0	0	0
7	480	28800	5.196	1.333	0.943	0	0	0
8	691	41460	5.196	1.333	0.943	0	0	0

Tabella 6.2. Grossenwellnkanal: Esperimento 2. Numero di attacchi ondosi, loro durata e corrispondenti parametri caratteristici

Attacchi ondosi	Durata attacco ondoso	Durata attacco ondoso	T_p	H_{mo}	H_{rms}	Setup	Swl above $z=0$	θ
	[min]	[s]	[s]	[m]	[m]	[m]		
0	15	900	3.9	0.809	0.572	0	0	0
1	62.5	3750	3.6	0.793	0.561	0	0	0
2	125	7500	3.9	0.786	0.556	0	0	0
3	250	15000	3.74	0.794	0.562	0	0	0
4	375	22500	3.74	0.808	0.571	0	0	0
5	500	30000	3.74	0.793	0.561	0	0	0
6	625	37500	3.9	0.791	0.559	0	0	0

Tabella 6.3. Grossenwellenkanal: Esperimento 3. Numero di attacchi ondosi, loro durata e corrispondenti parametri caratteristici

Attacchi ondosi	Durata attacco ondoso	Durata attacco ondoso	T_p	H_{mo}	H_{rms}	Setup	Swl above $z=0$	θ
	[min]	[s]	[s]	[m]	[m]	[m]		
1	75	4500	3.74	0.79	0.559	0	0	0
2	151	9060	3.74	0.793	0.561	0	0	0
3	277	16620	3.74	0.795	0.562	0	0	0
4	415	24900	3.74	0.787	0.557	0	0	0
5	554	33240	3.9	0.793	0.561	0	0	0
6	693	41580	3.9	0.796	0.563	0	0	0

Tabella 6.4. Grossenwellenkanal: Esperimento 4. Numero di attacchi ondosi, loro durata e corrispondenti parametri caratteristici

Attacchi ondosi	Durata attacco ondoso	Durata attacco ondoso	T_p	H_{mo}	H_{rms}	Setup	Swl above $z=0$	θ
	[min]	[s]	[s]	[m]	[m]	[m]		
1	70	4200	4.26	0.972	0.687	0	0	0
2	139	8340	4.46	0.961	0.680	0	0	0
3	277	16620	4.46	0.952	0.673	0	0	0
4	415	24900	4.46	0.957	0.677	0	0	0
5	554	33240	4.26	0.969	0.685	0	0	0
6	693	41580	4.26	0.985	0.697	0	0	0

Tabella 6.5. Grossenwellenkanal: Esperimento 5. Numero di attacchi ondosi, loro durata e corrispondenti parametri caratteristici

6.2. Taratura del parametro di frangimento

Le informazioni ricavate dall'applicazione del modello e il loro confronto con quanto effettivamente misurato, ha permesso in prima istanza di tarare il valore del parametro di frangimento, γ , che meglio sintetizza le condizioni di frangimento delle onde. Il tutto è stato condotto eseguendo un raffronto tra i valori di altezza d'onda significativa, H_{m0} , misurati dai gauges 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 e 19 posizionati lungo il canale con quelli calcolati dal modello alla stessa distanza, in direzione cross-shore, a cui essi sono collocati (Tab. 6.6). Le distanze sono calcolate con riferimento al limite esterno del dominio di calcolo, $x = 0$

Il raffronto è stato eseguito considerando valori di γ pari a 0.6, 0.7 e 0.8. Dai risultati ottenuti e riportati in Fig. 6.2 e Tab. 6.7 si evince come il valore di γ che meglio si adatta ai dati osservati è pari a 0.8, in accordo con quanto ricavato da Kobayashi et al.(2007) per quanto concerne i dati di laboratorio in larga scala condotti da van Gent (2006).

GAUGE	Distanza $x=0$ [m]
5	0
6	5.8
7	11.2
8	27.4
9	41.75
10	72.15
11	83.33
12	93.25
13	105.45
14	114.55
15	122.75
16	130.55
17	138.5
18	146.5
19	154.5

Tabella 6.6. Posizione dei gauges rispetto al punto esterno del dominio di calcolo ($x=0$)

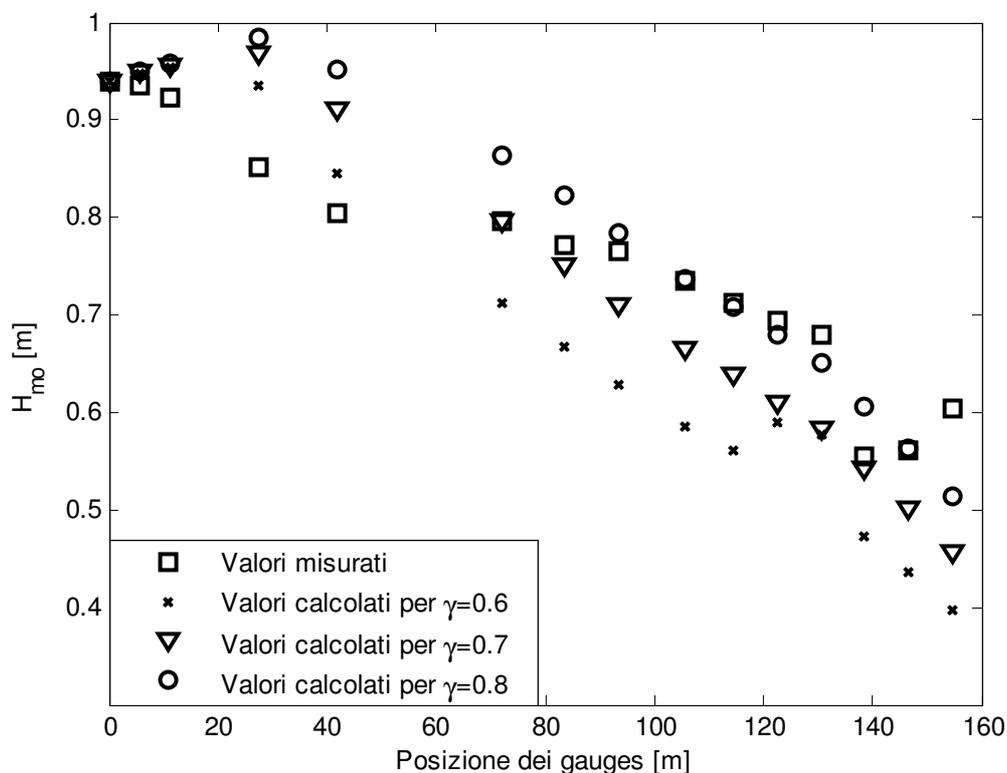


Figura 6.2. Andamento dei valori di altezza d'onda significativa, H_{mo} , misurati e calcolati dal modello CSHORE alla distanza, in direzione cross-shore, a cui sono posizionati i gauges

H_{mo} [m]				
Gauge	misurato	calcolato $\gamma=0.6$	calcolato $\gamma=0.7$	calcolato $\gamma=0.8$
5	0.939	0.941	0.941	0.941
6	0.936	0.948	0.949	0.949
7	0.924	0.954	0.957	0.957
8	0.851	0.935	0.968	0.984
9	0.805	0.846	0.910	0.952
10	0.796	0.712	0.796	0.865
11	0.772	0.666	0.751	0.822
12	0.765	0.628	0.711	0.784
13	0.735	0.586	0.665	0.737
14	0.712	0.561	0.638	0.709
15	0.694	0.590	0.610	0.679
16	0.68	0.577	0.583	0.650
17	0.555	0.473	0.542	0.606
18	0.561	0.437	0.502	0.562
19	0.604	0.397	0.457	0.513

Tabella 6.7. Altezza d'onda significativa, H_{mo} , misurata e calcolata dal modello CSHORE in corrispondenza dei vari gauges

6.3. Profili di spiaggia

Come già più volte detto, la verifica dell'applicabilità del modello CSHORE nel caso di dato di laboratorio in larga scala ha avuto come principale obiettivo quello di valutare le sue capacità nel prevedere le modifiche indotte ai profili di spiaggia a seguito di diversi attacchi ondosi. Tale verifica, in particolare, è stata eseguita effettuando un raffronto tra il profilo finale misurato e calcolato dal modello, per ciascuno dei 5 esperimenti considerati.

Dai risultati ottenuti, sintetizzati nelle Fig. 6.3-6.7, si evince, in generale, la buona capacità del modello di prevedere le modifiche subite dai profili di spiaggia che diventa ottima, nel caso degli esperimenti 3 e 5 (Fig. 6.5 e 6.7).

Maggiori difficoltà sembra, invece, avere il modello nel preveder l'evoluzione delle dune da spiaggia. Questo ad esempio accade con maggiore evidenza nel caso dell'esperimento 1 e 2 (Fig. 6.5 e 6.6). A tal proposito è bene sottolineare come nel caso di questi due esperimenti, l'erosione registrata delle dune segue un comportamento anomalo. Infatti, al naturale arretramento da questa subita in conseguenza ai diversi attacchi ondosi si accompagna un innaturale innalzamento dell'altezza della duna. La spiegazione di ciò può essere in parte imputabile a probabili imprecisioni nelle registrazione dell'andamento dei profili.

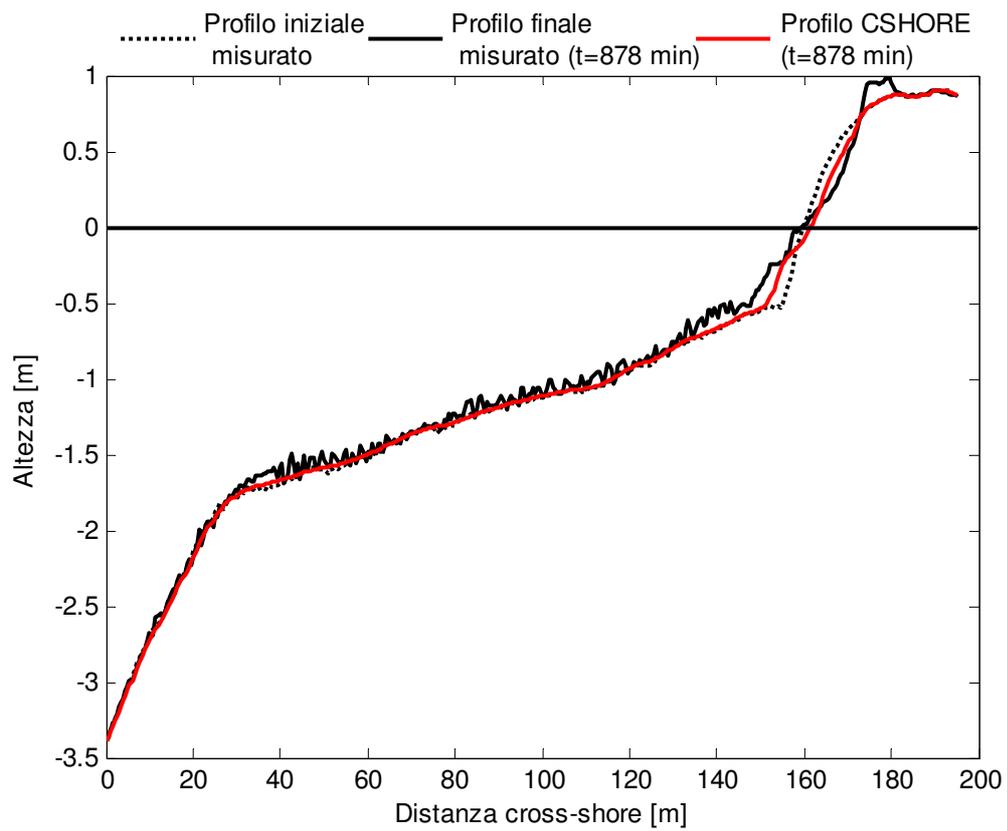


Figura 6.3. Grossenwellenkanal: Esperimento 1. Profilo di spiaggia misurato (iniziale e finale) e calcolato (finale) dal modello CSHORE

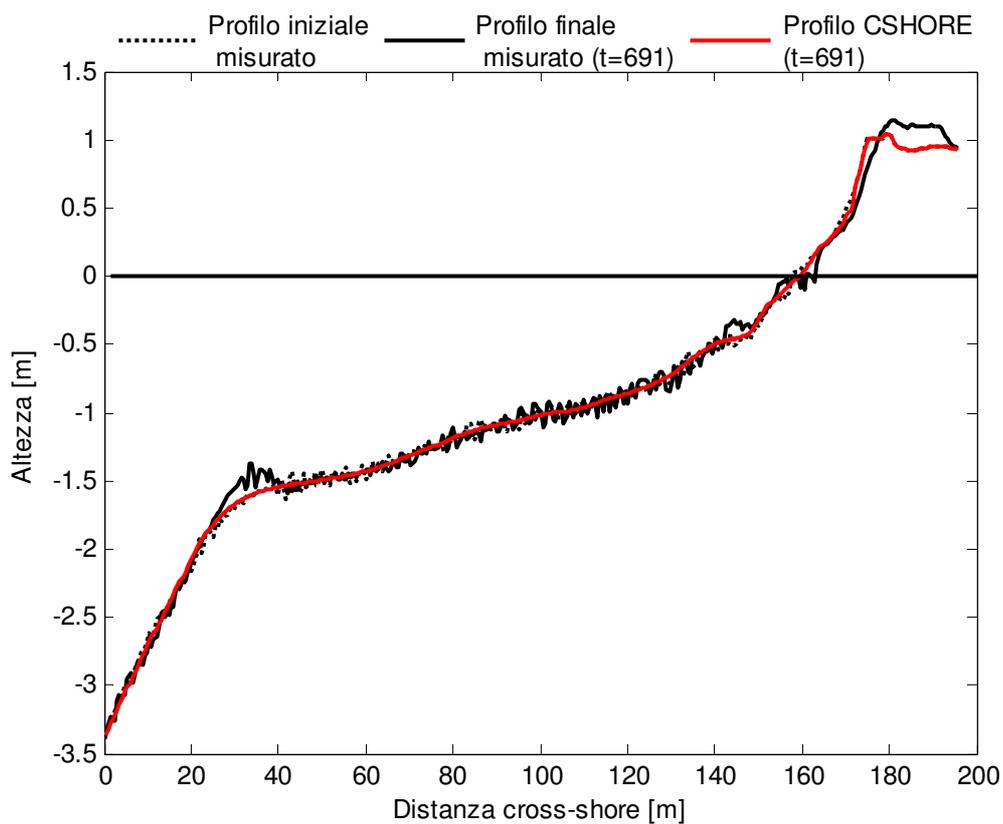


Figura 6.4. Grossenwellenkanal: Esperimento 2. Profilo di spiaggia misurato (iniziale e finale) e calcolato (finale) dal modello CSHORE

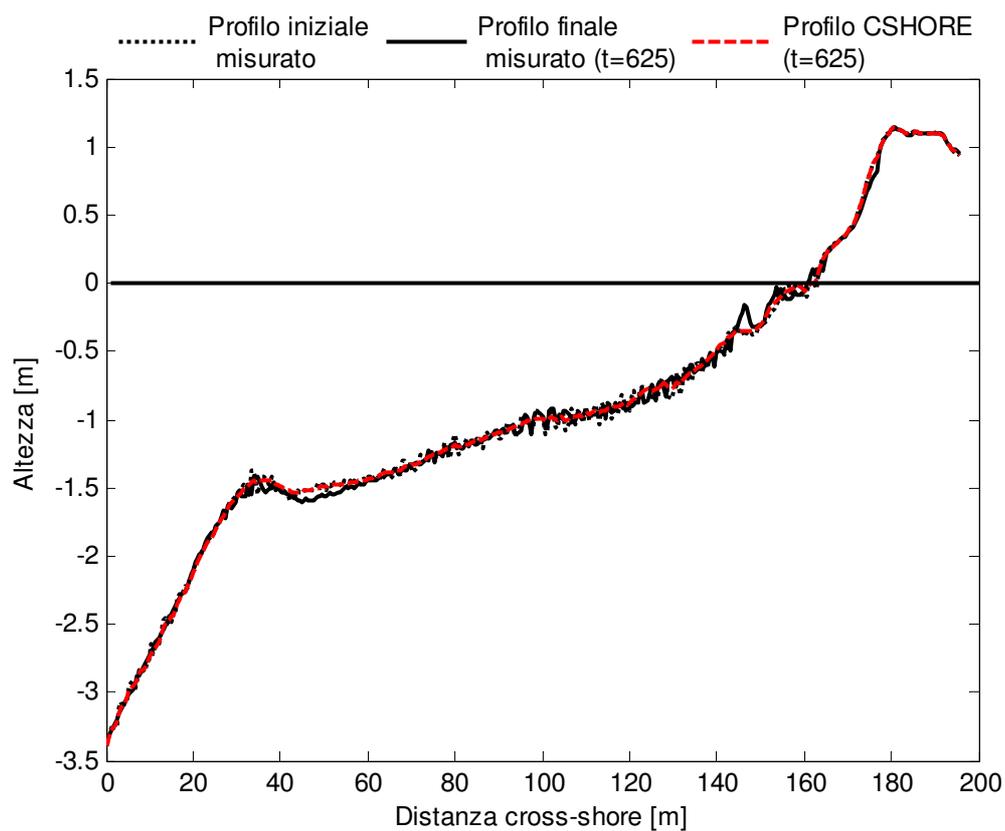


Figura 6.5. Grossenwellenkanal: Esperimento 3. Profilo di spiaggia misurato (iniziale e finale) e calcolato (finale) dal modello CSHORE

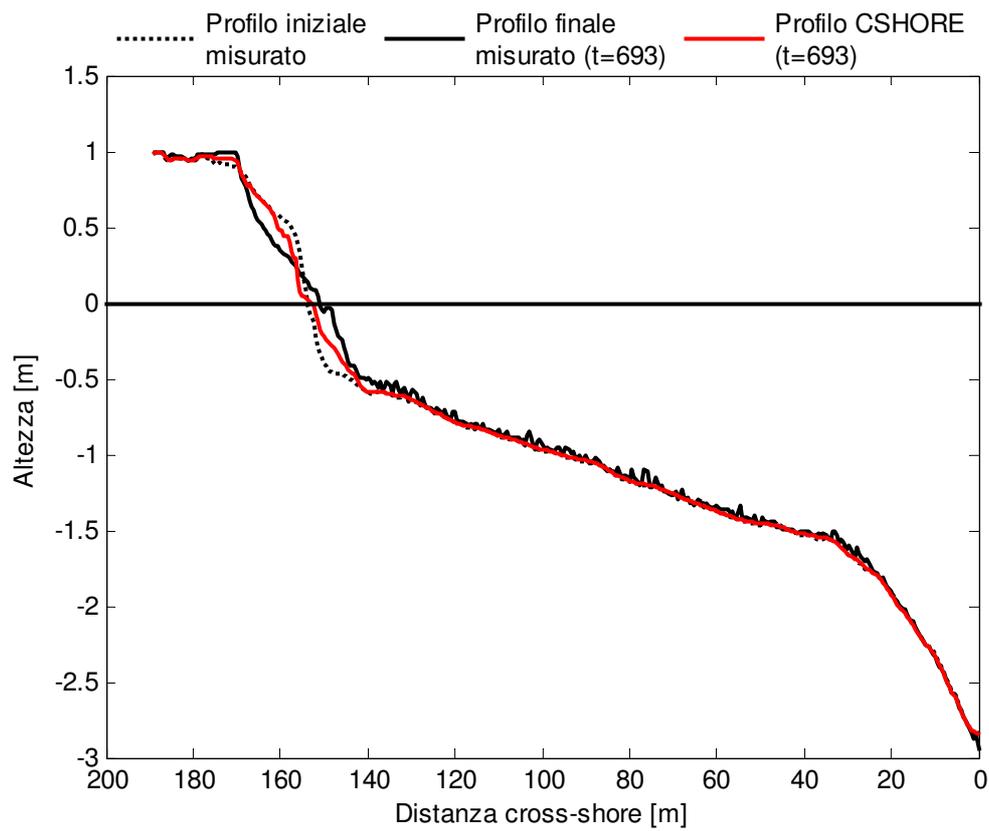


Figura 6.6. Grossenwellenkanal: Esperimento 4. Profilo di spiaggia misurato (iniziale e finale) e calcolato (finale) dal modello CSHORE

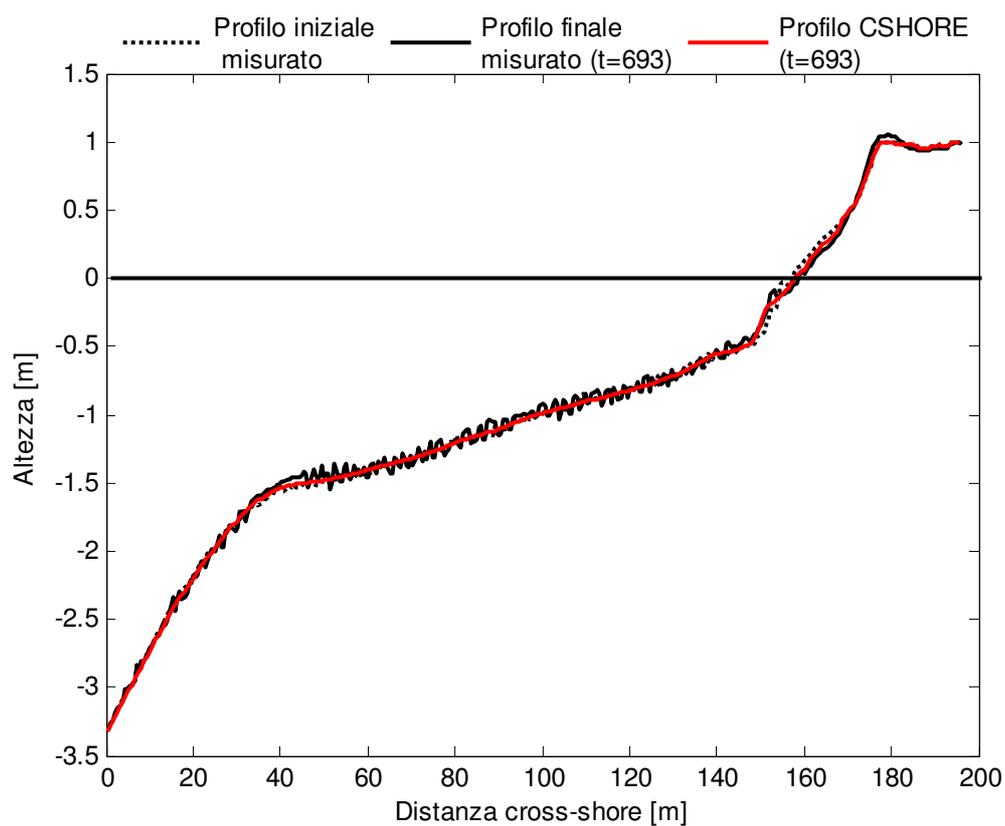


Figura 6.7. Grossenwellenkanal: Esperimento 5. Profilo di spiaggia misurato (iniziale e finale) e calcolato (finale) dal modello CSHORE

6.4. Trasporto di sedimenti in direzione cross-shore

La mancanza di registrazioni circa la quantità di materiale trasportata a seguito dei diversi attacchi ondosi fa sì che le informazioni ottenute, a tal proposito, dall'applicazione del modello possano essere utilizzate esclusivamente per effettuare un'analisi qualitativa delle varie grandezze.

Si sottolinea come, avendo a che fare con onde che presentano una direzione di propagazione ortogonale alla linea di riva, l'unica componente del trasporto solido da considerare è quella in direzione cross-shore. I risultati ottenuti sono sintetizzati nelle Fig. 6.8-6.12.

Per tutti e cinque gli esperimenti considerati risulta che la quantità di materiale trasportata sul fondo, q_{bx} , è positiva mentre quella trasportata in sospensione, q_{sx} , è negativa. Il diverso segno assunto da queste componenti del trasporto solido è funzione della direzione delle correnti che regolano i fenomeni. In particolare, le correnti di ritorno, che determinano il trasporto in sospensione, sono dirette da riva verso largo, e quindi in senso contrario alla convenzione positiva ipotizzata nel Cap. 3.

I valori assoluti di q_{bx} e q_{sx} registrano il picco in corrispondenza delle zone dei frangenti.

La quantità netta di materiale trasportato in direzione cross-shore, $q_x = (q_{bx} + q_{sx})$, presenta un segno positivo eccetto che nella zona dei frangenti posta vicino riva. Il valore massimo di q_x pari circa a 0.1 [m²/ore] si registra per gli esperimenti 1, 4 e 5 (Fig. 6.8, 6.11 e 6.12)

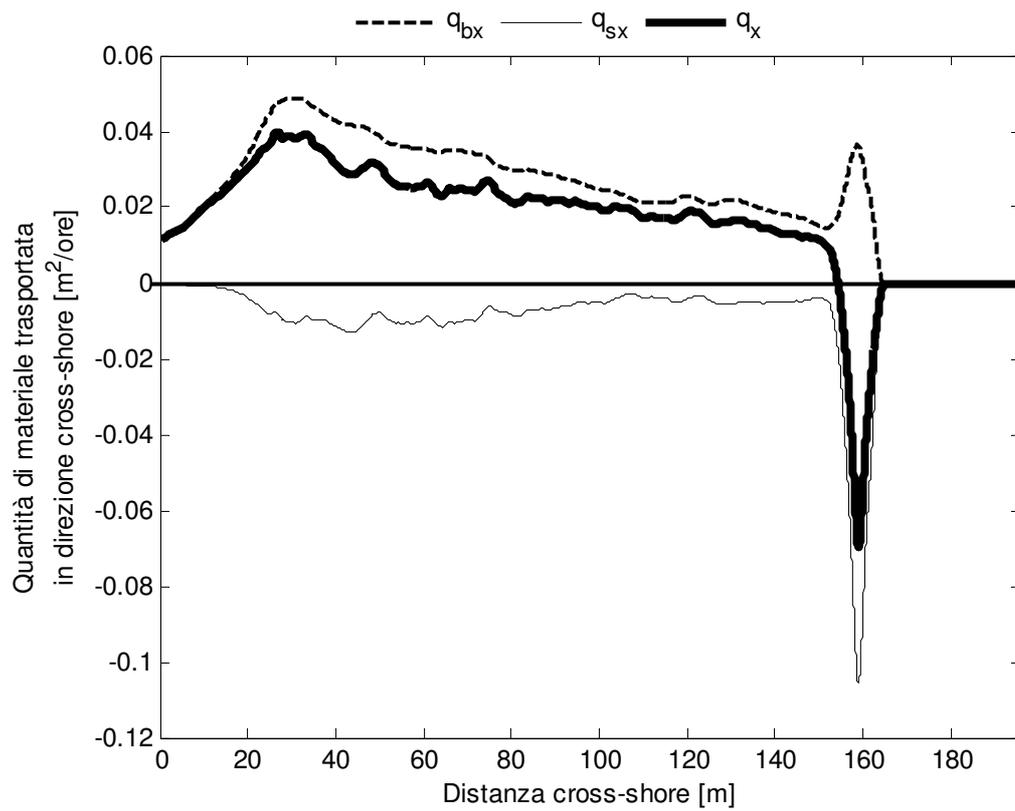


Figura 6.8. Grossenwellenkanal: Esperimento 1. Quantità di materiale trasportata in direzione cross-shore

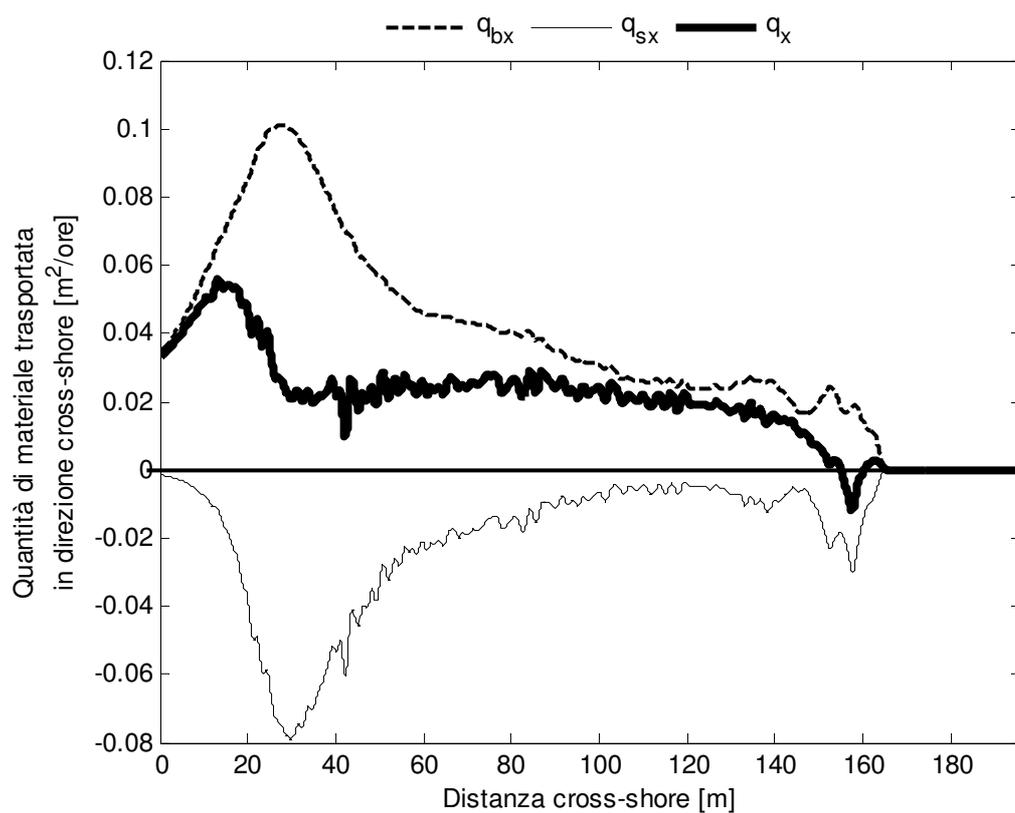


Figura 6.9. Grossenwellenkanal: Esperimento 2. Quantità di materiale trasportata in direzione cross-shore

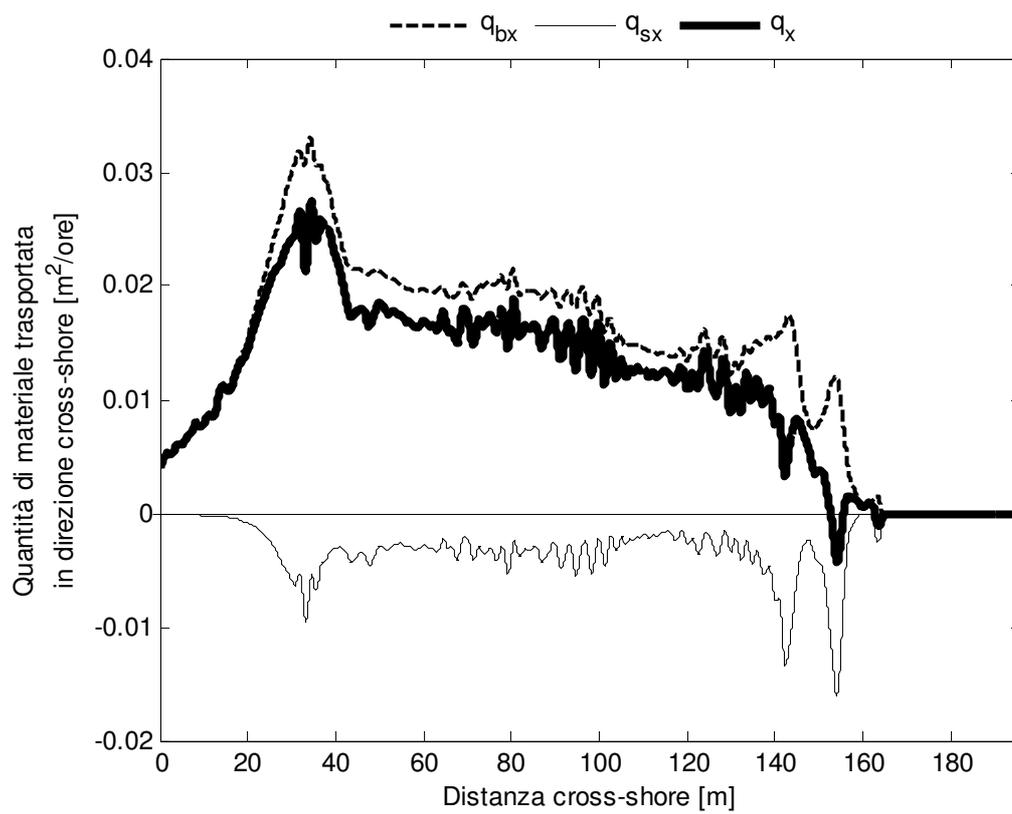


Figura 6.10. Grossenwellenkanal: Esperimento 3. Quantità di materiale trasportata in direzione cross-shore

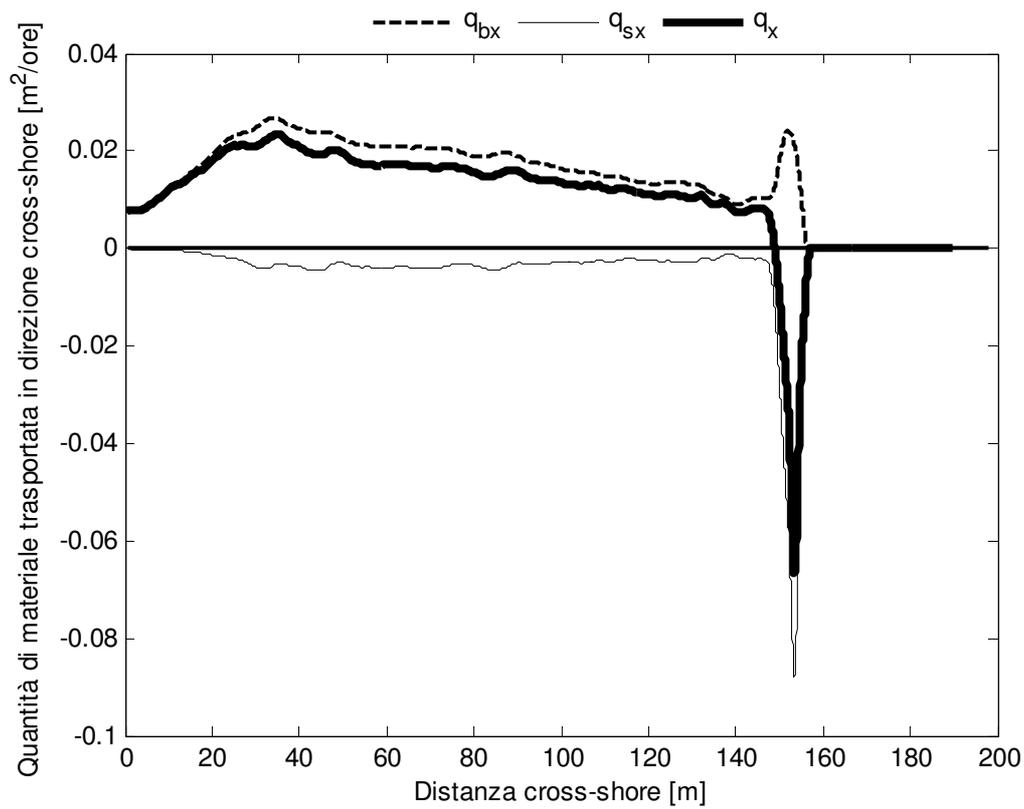


Figura 6.11. Grossenwellenkanal: Esperimento 4. Quantità di materiale trasportata in direzione cross-shore

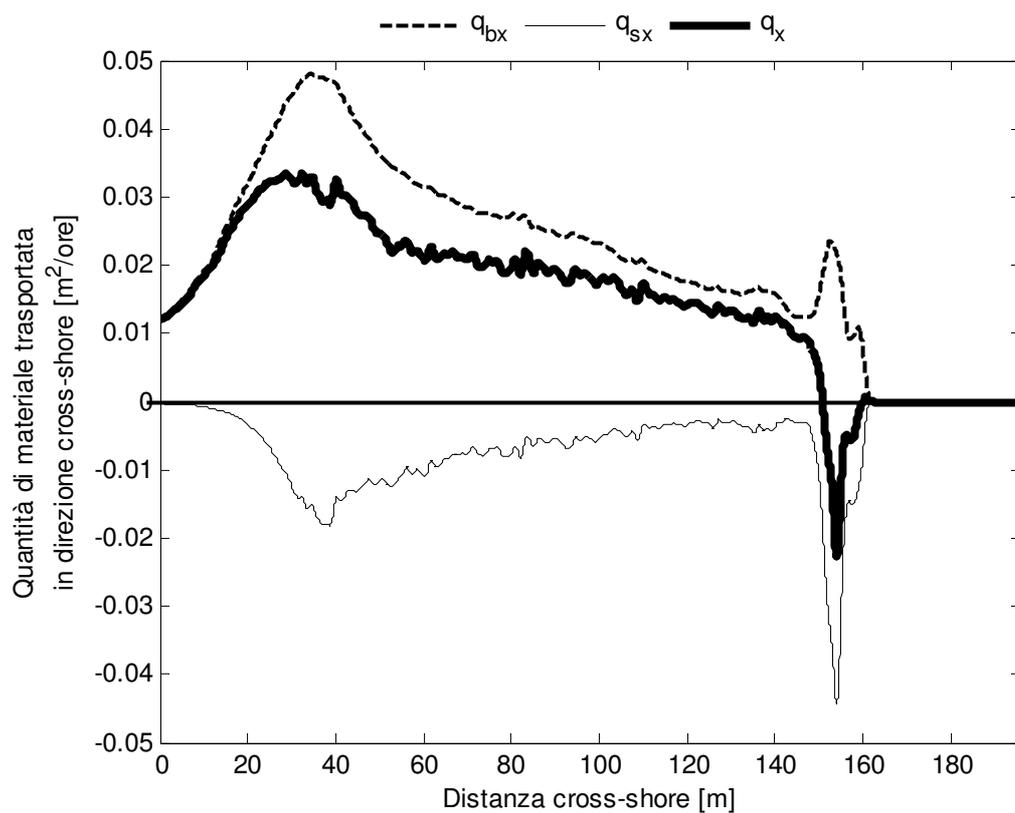


Figura 6.12. Grossenwellenkanal: Esperimento 5. Quantità di materiale trasportata in direzione cross-shore

CAPITOLO 7

APPLICAZIONE E VERIFICA DEL MODELLO CSHORE: DATI ISABEL

7.1 INTRODUZIONE

L'applicazione e verifica del modello CSHORE nel caso dell'uragano Isabel è stata condotta, come già detto, utilizzando i profili di spiaggia, pre e post Isabel, misurati dall'FRF. I sedimenti costituenti il fondale marino presentano un diametro medio, D_{50} , pari a 0.20 mm, una velocità di caduta, w_f , di 0.025 m/s ed un peso specifico, s , adimensionalizzato rispetto al peso specifico dell'acqua, di 2.60. Il valore del fattore di attrito, f_b , è stato posto pari a 0.015 secondo quanto indicato da Kobayashi et al. 2005.

Le informazioni relative all'andamento della superficie marina (*tide* e *wave setup* al largo), ai parametri caratteristici di moto ondoso (altezza quadratica media, H_{rms} [m], periodo di picco, T_p [s], direzione di provenienza del moto ondoso, θ) e del vento (velocità, W_{10} [m/s] e direzione, θ_w) sono fornite dagli strumenti di misura dell'FRF. In particolare, per i dati di moto ondoso si è fatto riferimento a quanto registrato dal

gauge 3111 collocato ad una distanza rispetto alla linea di riva di 900 m ed in corrispondenza di una profondità del mare di 8 m. Con riferimento a tale profondità è stato, inoltre, fissato il punto più esterno del dominio di calcolo, $x=0$, definito per l'applicazione del modello.

Per quanto concerne quest'ultimo punto c'è una precisazione da fare. I profili di spiaggia dell'FRF sono stati rilevati per una distanza, in direzione cross-shore, variabile da profilo a profilo (Tab. 7.1). In relazione alla scelta fatta in precedenza per definire il limite esterno del dominio di calcolo risulta, quindi, che non tutti i profili possono essere usati per tarare il modello, ma soltanto quelli per i quali i rilievi effettuati si estendono per una distanza in direzione cross-shore tale da superare la profondità, rispetto al livello medio mare, di 8 m. Se a questa condizione si aggiunge poi quella legata all'ipotesi su cui si basa il modello, ovvero variazione uniforme dei profili di spiaggia in direzione long-shore a seguito di un attacco ondoso, risulta come, da una prima analisi, i profili utilizzabili per tarare CSHORE sono solo 6 (Profili 58, 62, 63, 183, 188 e 190), ritenendo già esclusi dall'applicazione quelli posti nelle immediate vicinanze del pontile.

Per quanto concerne i restanti profili quelli, cioè, per i quali i rilievi effettuati non raggiungono profondità del fondale prossimi agli 8 m, è stata effettuata un'analisi al fine di valutare la possibilità della loro estensione, verso largo, attraverso interpolazione. In particolare, richiamando in Fig. 7.1 i grafici relativi alla quantità di area erosa e alla variazione verticale dei profili di spiaggia pre e post Isabel in funzione della distanza rispetto al pontile dell'FRF, già presentati nel Cap.5, è possibile osservare come i profili 58, 59, 62, 64, 66, 67, 73, 76 e 85 a nord del pontile, sono ragionevolmente uniformi in direzione long-shore. La stessa cosa si può dire per i profili 182, 183, 185, 186, 187, 188, 189 e 190 a sud del pontile. Questo suggerisce l'ipotesi di poter estendere verso il largo i profili più corti utilizzando la media dei profili più lunghi posti a sud e a nord del pontile, rispettivamente. In particolare i profili pre e post Isabel 59, 64, 66, 67, 76 e 85 sono stati prolungati fino ad una distanza cross-shore di 1000 metri utilizzando la media dei profili 58, 62 e 73 posti a nord del pontile. Analogamente, i profili 182, 185, 186, 187 e 189 sono stati prolungati utilizzando la media dei profili 183, 188 e 190 a sud dell'FRF.

I profili così ricavati, utilizzati insieme a quelli già citati in precedenza per tarate CSHORE, ed il relativo confronto tra il loro andamento pre e post Isabel sono riportati in appendice C.

Il modello CSHORE è stato tarato considerando un intervallo temporale di 168 ore relativo ai tre giorni che precedono e seguono Isabel (15-21 settembre 2003). Se i rilievi dei profili di spiaggia effettuati dall'FRF post Isabel risalgono proprio al 21 settembre, diverso è il discorso per quelli pre Isabel risalenti all'8 agosto del 2003.

Al fine di verificare se tra tale data e il 15 settembre i profili misurati potessero aver subito delle modifiche sostanziali, conseguenti magari ad altri attacchi ondosi estremi, sono stati diagrammati i valori dell'andamento della superficie marina (Fig. 7.2), dell'altezza d'onda significativa, H_{m0} , e del periodo di picco, T_p , (Fig. 7.3) tra il 8 agosto e il 21 settembre. Dai grafici risulta come, fatta eccezione per i valori relativi ad Isabel, per questi parametri non si registrano variazioni di rilievo tali da far supporre sostanziali modifiche dei profili di spiaggia.

L'intervallo temporale di 168 ore è stato suddiviso in intervalli più piccoli di 3 ore ad ognuno dei quali sono stati assegnati i valori relativi all'andamento della superficie marina media, del wave setup al largo, del moto ondoso (Tab. 7.2 a e b), della velocità e direzione del vento (Tab. 7.3 a e b).

La procedura iterativa ha inizio a partire dall'istante iniziale, $t = 0$, in corrispondenza del limite estremo del dominio di calcolo posizionato al largo ($x = 0$) a partire dal quale si definisce una griglia a maglie quadre di dimensioni pari a 0.75 m, sufficientemente piccola nell'ipotesi in cui si lavora con dati reali di campo.

I risultati ottenuti dal modello sono stati utilizzati al fine di tarare il parametro di frangimento, γ , valutare la capacità del modello di simulare l'evoluzione dei profili di spiaggia, valutare l'andamento della quantità di materiale trasportato in direzione cross-shore e long-shore, in sospensione e sul fondo, nonché, per la prima volta di valutare gli effetti prodotti dalla presenza del vento.

Profilo	Estensione cross-shore [m]
58	2002
59	377
62	2004
64	375
66	559
67	552
73	2013
76	369
85	752
95	269
135	1986
155	743
160	2004
164	591
166	591
171	1891
174	735
176	2007
178	377
181	691
182	373
183	2056
185	512
186	552
187	367
188	1983
189	367
190	2012

Tabella 7.1. Estensione in direzione cross-shore dei rilievi effettuati circa i profili dell'FRF

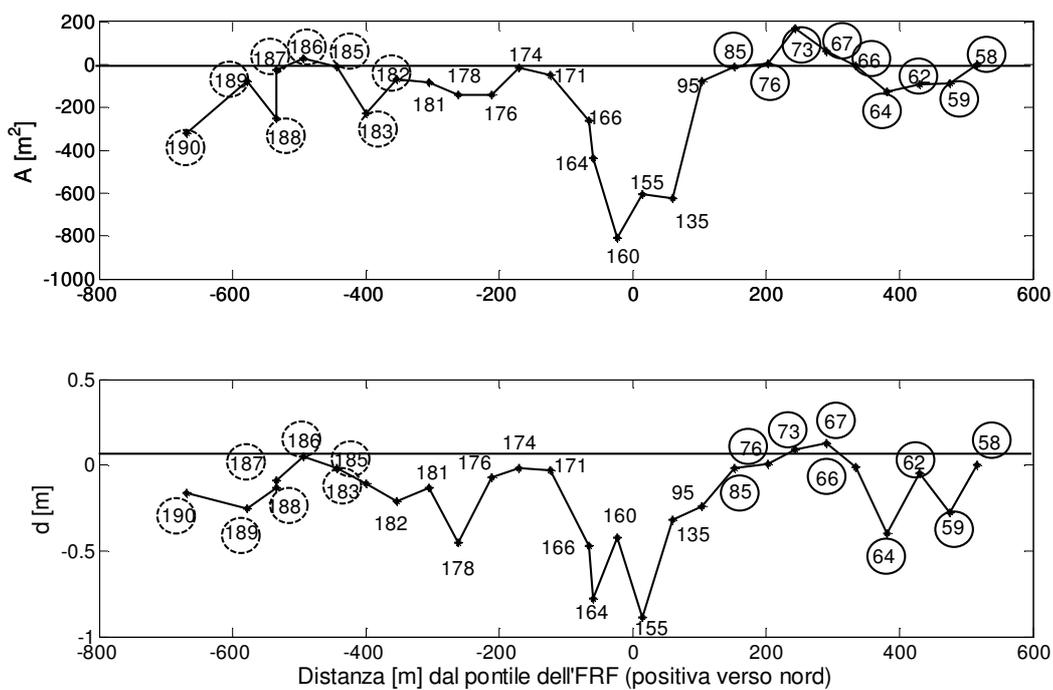


Figura 7.1. Area erosa e variazione verticale media delle dune in funzione della distanza dal pontile dell'FRF

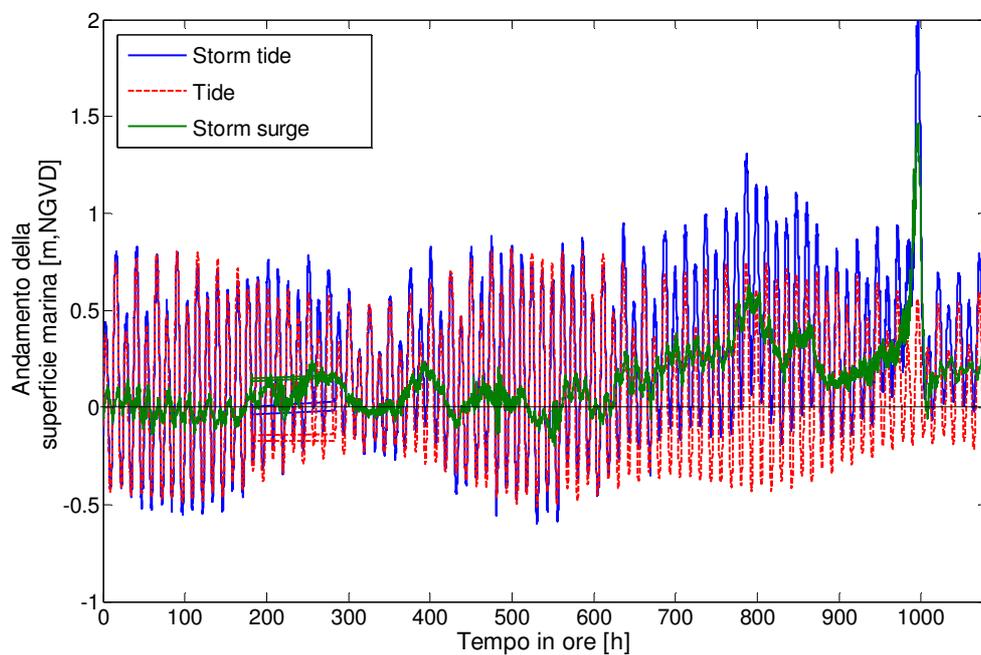


Figura 7.2. Andamento della superficie marina tra l'8 agosto e il 21 settembre 2003

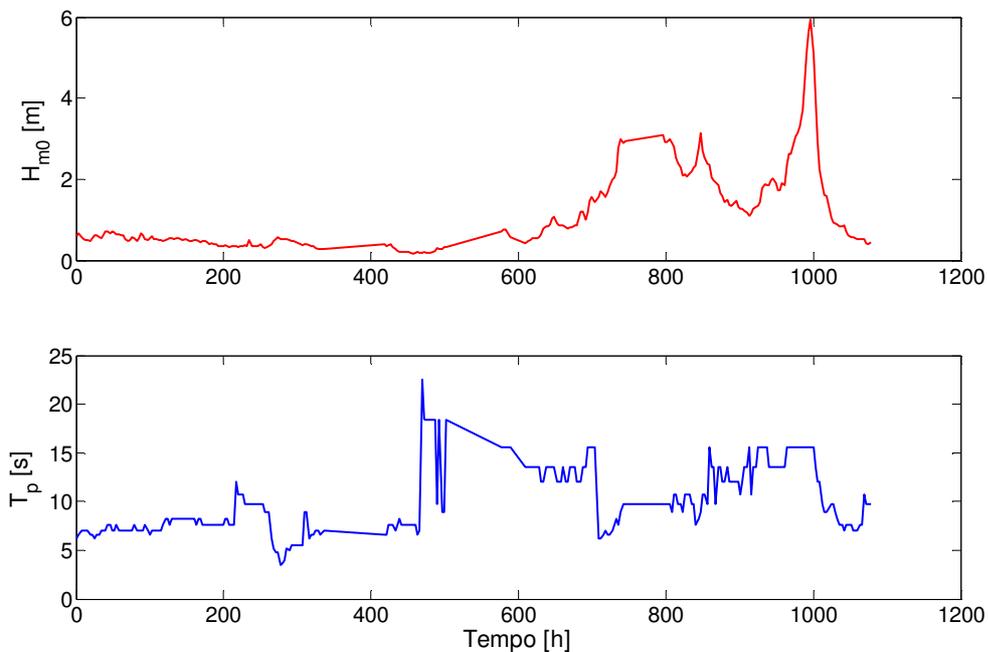


Figura 7.3. Altezza d'onda significativa e periodo di picco registrati dal gauge 3111 tra l'8 agosto e il 21 settembre 2003

Giorni	Istante iniziale	Istante finale	Durata	H_{rms}	θ	T_p	setup	SWL al di sopra di $z=0$
	[h]	[h]	[s]	[m]	[°]	[s]	[m]	[m]
15/09/2003	1.00	4.00	10800	0.785	-20.000	15.6	0	-0.044
	4.00	7.00	21600	0.820	-12.000	10.7	0	0.470
	7.00	10.00	32400	0.905	-32.000	13.6	0	0.827
	10.00	13.00	43200	0.941	-32.000	13.6	0	0.408
	13.00	16.00	54000	0.948	-38.000	15.6	0	0.004
	16.00	19.00	64800	1.011	-36.000	15.6	0	0.300
	19.00	22.00	75600	1.252	-30.000	15.6	0	0.609
16/09/2003	22.00	1.00	86400	1.322	-30.000	15.6	0	0.280
	1.00	4.00	97200	1.301	-30.000	15.6	0	0.006
	4.00	7.00	108000	1.315	-28.000	13.6	0	0.404
	7.00	10.00	118800	1.400	-30.000	13.6	0	0.859
	10.00	13.00	129600	1.429	-28.000	13.6	0	0.604
	13.00	16.00	140400	1.344	-26.000	13.6	0	0.167
	16.00	19.00	151200	1.223	-28.000	13.6	0	0.259
17/09/2003	19.00	22.00	162000	1.223	-26.000	13.6	0	0.606
	22.00	1.00	172800	1.344	-28.000	13.6	0	0.451
	1.00	4.00	183600	1.301	-28.000	13.6	0	0.132
	4.00	7.00	194400	1.662	-28.000	15.6	0	0.322
	7.00	10.00	205200	1.860	-32.000	15.6	0	0.824
	10.00	13.00	216000	1.853	-28.000	15.6	0	0.754
	13.00	16.00	226800	2.037	-32.000	15.6	0	0.356
18/09/2003	16.00	19.00	237600	2.164	-32.000	15.6	0	0.322
	19.00	22.00	248400	2.221	-32.000	15.6	0	0.696
	22.00	1.00	259200	2.341	-32.000	15.6	0	0.772
	1.00	4.00	270000	2.631	-30.000	15.6	0	0.625
	4.00	7.00	280800	3.112	-32.000	15.6	0	0.992
	7.00	10.00	291600	3.614	-18.000	15.6	0	1.734
	10.00	13.00	302400	3.975	-16.000	15.6	0	1.835
19/09/2003	13.00	16.00	313200	4.208	-4.000	15.6	0	0.859
	16.00	19.00	324000	3.586	2.000	15.6	0	0.183
	19.00	22.00	334800	2.815	-10.000	13.6	0	0.177
	22.00	1.00	345600	2.072	-14.000	12	0	0.303
	1.00	4.00	356400	1.584	-6.000	12	0	0.110
	4.00	7.00	367200	1.308	2.000	9.7	0	0.026
	7.00	10.00	378000	1.139	4.000	8.9	0	0.394
20/09/2003	10.00	13.00	388800	1.117	-12.000	8.9	0	0.688
	13.00	16.00	399600	0.743	-10.000	9.7	0	0.461
	16.00	19.00	410400	0.658	-12.000	9.7	0	0.078
	19.00	22.00	421200	0.644	12.000	9.7	0	0.202
	22.00	1.00	432000	0.622	6.000	8.9	0	0.504
20/09/2003	1.00	4.00	442800	0.587	6.000	8.2	0	0.360
	4.00	7.00	453600	0.587	10.000	7.6	0	0.069
	7.00	10.00	464400	0.601	12.000	7.6	0	0.269
	10.00	13.00	475200	0.509	-6.000	7	0	0.660
	13.00	16.00	486000	0.438	8.000	7.6	0	0.589
	16.00	19.00	496800	0.410	-30.000	7.6	0	0.137

Tabella 7.2.a. Dati di input del modello CSHORE per il caso dell'uragano Isabel. Valori caratteristici dell'andamento della superficie marina e del moto ondoso per intervalli temporali di 3 ore

Giorni	Istante iniziale	Istante finale	Durata	H_{rms}	θ	T_p	setup	SWL al di sopra di $z=0$
	[h]	[h]	[s]	[m]	[°]	[s]	[m]	[m]
20/09/2003	19.00	22.00	507600	0.403	12.000	7.6	0	0.113
	22.00	1.00	518400	0.382	-32.000	7	0	0.460
21/09/2003	1.00	4.00	529200	0.368	-32.000	7	0	0.464
	4.00	7.00	540000	0.361	-32.000	7	0	0.093
	7.00	10.00	550800	0.375	8.000	7.6	0	0.129
	10.00	13.00	561600	0.361	-18.000	7.6	0	0.601
	13.00	16.00	572400	0.304	-10.000	10.7	0	0.742
	16.00	19.00	583200	0.290	-10.000	9.7	0	0.308
	19.00	22.00	594000	0.311	-8.000	9.7	0	0.086
	22.00	1.00	604800	0.368	-8.000	9.7	0	0.105

Tabella 7.2.b. Dati di input del modello CSHORE per il caso dell'uragano Isabel. Valori caratteristici dell'andamento della superficie marina e del moto ondoso per intervalli temporali di 3 ore

Giorni	Istante iniziale	Istante finale	Durata	θ_w	W_{10}
	[h]	[h]	[s]	[°]	[m/s]
15/09/2003	1.00	4.00	10800	-74	2.39
	4.00	7.00	21600	-78	3.11
	7.00	10.00	32400	-75.6	2.84
	10.00	13.00	43200	-113.2	1.87
	13.00	16.00	54000	-177.4	2.69
	16.00	19.00	64800	39.8	2.62
	19.00	22.00	75600	33.2	1.80
	22.00	1.00	86400	-105.6	1.18
16/09/2003	1.00	4.00	97200	-138.8	2.82
	4.00	7.00	108000	-283.2	8.60
	7.00	10.00	118800	-7.8	9.64
	10.00	13.00	129600	60.4	9.80
	13.00	16.00	140400	53.6	8.45
	16.00	19.00	151200	39.2	5.87
	19.00	22.00	162000	51.2	6.44
	22.00	1.00	172800	46.8	7.67
17/09/2003	1.00	4.00	183600	51.2	9.82
	4.00	7.00	194400	43.7	10.44
	7.00	10.00	205200	43	9.82
	10.00	13.00	216000	43.2	10.25
	13.00	16.00	226800	51.8	11.71
	16.00	19.00	237600	49.6	12.69
	19.00	22.00	248400	46.2	12.29
	22.00	1.00	259200	47.4	12.67
18/09/2003	1.00	4.00	270000	42.4	14.80
	4.00	7.00	280800	43.2	18.16
	7.00	10.00	291600	18.6	20.25
	10.00	13.00	302400	-7.6	23.67
	13.00	16.00	313200	-49	27.65
	16.00	19.00	324000	-79	24.69
	19.00	22.00	334800	-99	18.18
	22.00	1.00	345600	-113	14.00
19/09/2003	1.00	4.00	356400	-109	12.85
	4.00	7.00	367200	-111	9.85
	7.00	10.00	378000	-122.2	6.56
	10.00	13.00	388800	-134.4	6.33
	13.00	16.00	399600	-127	5.47
	16.00	19.00	410400	-110	5.60
	19.00	22.00	421200	-117	4.76
	22.00	1.00	432000	-128	3.25
20/09/2003	1.00	4.00	442800	-160	2.33
	4.00	7.00	453600	-166	2.62
	7.00	10.00	464400	-186	1.44
	10.00	13.00	475200	-33	1.67
	13.00	16.00	486000	-48	2.80

Tabella 7.3.a. Dati di input del modello CSHORE. Dati di vento per intervalli temporali di 3 ore

Giorni	Tempo iniziale	Tempo finale	Intervallo temporale	θ_w	W_{10}
	[h]	[h]	[s]	[°]	[m/s]
20/09/2003	16.00	19.00	496800	-70	3.64
	19.00	22.00	507600	-41	2.44
	22.00	1.00	518400	-33	1.85
21/09/2003	1.00	4.00	529200	-47	1.36
	4.00	7.00	540000	-3	1.27
	7.00	10.00	550800	14	2.00
	10.00	13.00	561600	3	2.73
	13.00	16.00	572400	-4	3.27
	16.00	19.00	583200	1	4.09
	19.00	22.00	594000	-22	4.55
22.00	1.00	604800	-36	5.45	

Tabella 7.3.b. Dati di input del modello CSHORE. Dati di vento per intervalli temporali di 3 ore

7.2. Taratura del parametro di frangimento

Il parametro di frangimento, γ , nel caso dell'urgano Isabel, è stata tarato effettuando un raffronto tra i valori della deviazione standard relativa all'andamento della superficie marina, σ_η , misurata dal gauge 625 dell'FRF con quella calcolata dal modello alla stessa distanza cross-shore (233 m) dove il gauge è posizionato. La stima di σ_η è stata fatta utilizzando valori di γ pari 0.7, come suggerito da Kobayashi et al. 2006, e 0.6. I valori registrati e calcolati sono riportati in Fig. 7.4. L'utilizzo del parametro di frangimento pari a 0.6 migliora l'adattamento dei dati calcolati a quelli misurati. Il motivo di ciò è legato al fatto che la riduzione di γ provoca il frangimento delle onde ad una distanza offshore maggiore rispetto al caso di $\gamma=0.7$. Questo fa sì che il modello registri, in corrispondenza del punto in cui è posizionato il gauge 625, un valore di σ_η minore. Nel prosieguo dello studio, tutti i risultati ottenuti si riferiscono al valore di γ pari a 0.6.

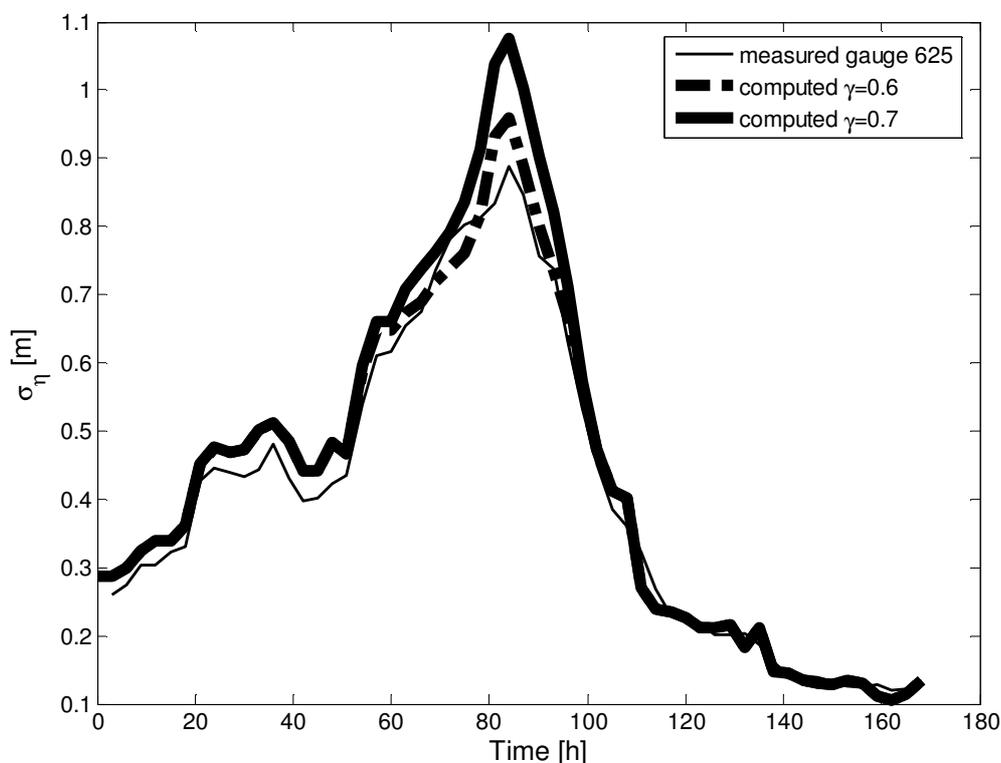


Figura 7.4. Valori della deviazione standard dell'andamento della superficie marina, η , misurati dal gauge 625 e calcolati dal modello utilizzando diversi valori del parametri di frangimento

7.3. Trasporto medio dei sedimenti

Nel caso dell'uragano Isabel non si dispone di misure dirette relative alla quantità di materiale trasportato in direzione long-shore e/o cross-shore. Per questo motivo i grafici ottenuti dalla simulazione del modello sono utilizzati, esclusivamente, per effettuare un'analisi qualitativa delle grandezze. Avendo, inoltre, ipotizzato una uniformità, in direzione long-shore, delle modifiche indotte dall'impatto dell'uragano sui profili di spiaggia, si può ritenere che i valori relativi alle varie quantità determinate utilizzando il modello siano ben rappresentate dai loro valori medi ottenuti come media delle quantità stimate per ogni profilo sottoposto ad analisi. I grafici ricavati per ogni profilo sono riportate in Appendice D.

In Fig. 7.5 si riporta l'andamento del valore medio della quantità netta, q_x , di materiale trasportato in direzione cross-shore e delle relative componenti sul fondo, q_{bx} , e in sospensione, q_{sx} .

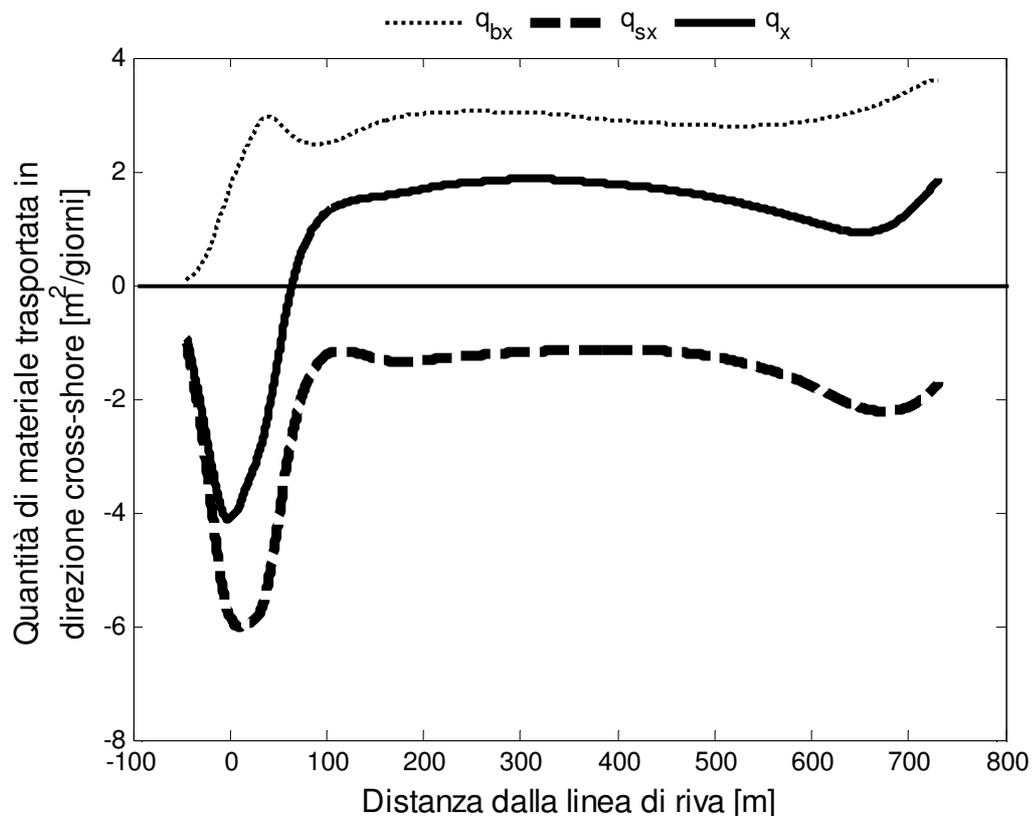


Figura 7.5. Variazione della quantità media netta di materiale trasportato in direzione cross-shore, $q_x = q_{bx} + q_{sx}$, e relative componenti sul fondo, q_{bx} , e in sospensione, q_{sx}

La quantità di materiale trasportata in sospensione risulta negativa poiché tale processo è governato dalle correnti di ritorno, dirette cioè da riva verso largo, e quindi di segno opposto rispetto alla convenzione positiva adottata in precedenza. Il suo valore piccolo al largo, tende progressivamente ad aumentare man mano che ci si avvicina alla zona dei frangenti. Analogo andamento caratterizza la quantità di materiale trasportata sul fondo anche se in questo caso l'incremento di q_{sx} avviene in maniera molto più graduale.

La quantità netta di materiale trasportato, q_x , è governato, al largo dalla componente di trasporto sul fondo, mentre in corrispondenza della zona dei frangenti è governato dal trasporto in superficie.

La Fig. 7.6 mostra la variazione media, in direzione cross-shore, della quantità netta di materiale trasportato in direzione long-shore, q_y , e delle relative componenti sul fondo, q_{by} , e in sospensione, q_{sy} .

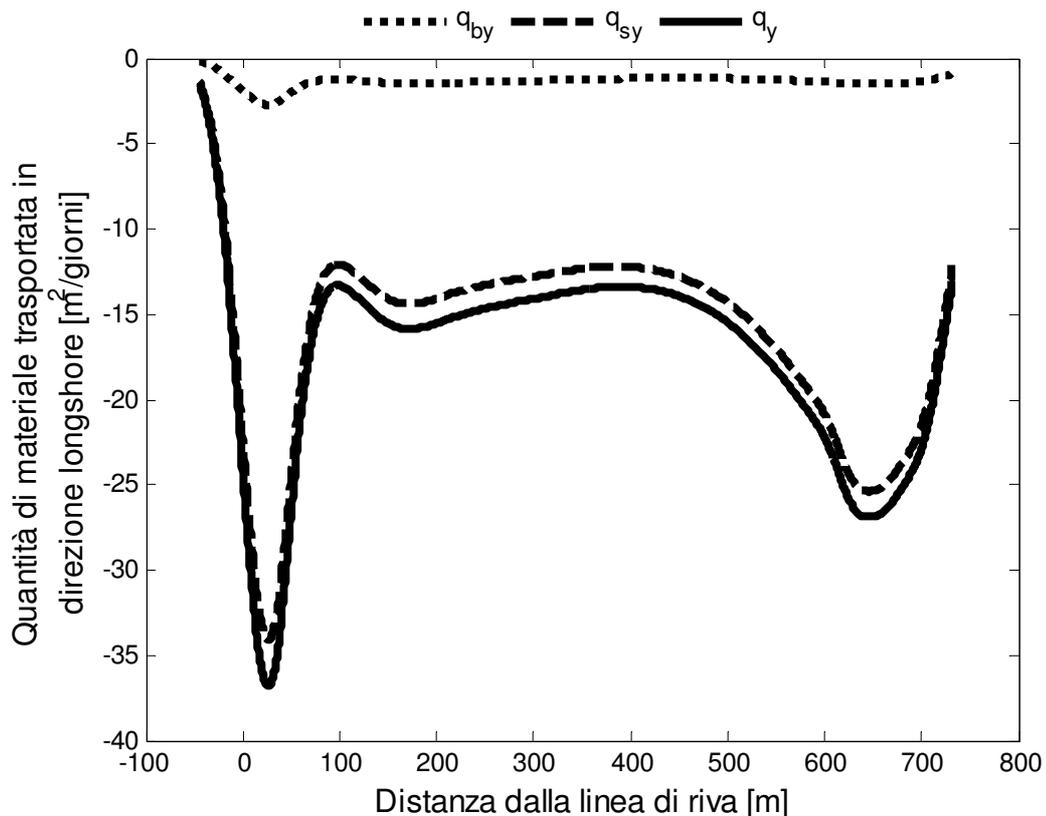


Figura 7.6. Variazione, in direzione cross-shore, della quantità media netta di materiale trasportato in direzione long-shore, q_y , e relative componenti sul fondo, q_{by} , e in sospensione, q_{sy} ,

In generale, la quantità di materiale trasportata in direzione long-shore è superiore rispetto a quella trasportata in direzione cross-shore. La quantità di materiale trasportata sul fondo, q_{by} , è molto piccola se comparata con i valori trasportati in sospensione, q_{sy} . Questa ultima, in particolare, presenta due picchi: uno posto in corrispondenza della linea dei frangenti l'altro collocato al largo ad una distanza dalla linea di riva compresa tra i 600 e 700 m. La presenza di questi doppi picchi è dovuta al fatto che le onde subiscono un doppio frangimento, il primo al largo il secondo presso la linea di riva.

7.4. Confronto tra i profili di spiaggia misurati e calcolati

La verifica dell'applicabilità del modello ha avuto come principale obiettivo quello di valutare le sue capacità di prevedere le modifiche prodotte ai profili di spiaggia in direzione cross-shore e alle dune nel caso di eventi reali estremi. Il tutto è stato ottenuto effettuando un raffronto tra il profilo di spiaggia post Isabel misurato e calcolato utilizzando CSHORE (Fig. 7.7). Anche in questo caso ci si è riferiti ai profili medi.

In riferimento al grafico, risulta come il modello determina in modo appena sufficiente le modifiche subite dai profili di spiaggia. In particolare, mentre la quantità di duna erosa viene leggermente sovrastimata dal modello, l'erosione del profilo sommerso è sottostimata, soprattutto a partire da una distanza dalla linea di riva di circa 100 m. Da questo punto in poi, infatti, il modello considera trascurabile l'azione del moto ondoso in disaccordo con quanto viene misurato.

L'incapacità previsionale del modello nel caso di dati di campo caratterizzati da eventi ondosi così estremi può essere spiegata considerando diversi fattori. In primo luogo, il processo di propagazione del moto ondoso da largo verso riva è stato studiato riferendosi a quelle che sono le equazioni classiche dell'idraulica marittima che non riescono a riprodurre i fenomeni che intervengono in un evento ondoso così estremo. In secondo luogo, i parametri empirici presenti all'interno delle equazioni che regolano il trasporto solido necessitano di una maggiore taratura. Inoltre, non meno importante, l'ipotesi di omogeneità, in direzione long-shore, delle modifiche subite dai profili di spiaggia per effetto del moto ondoso, su cui il modello si basa, risulta poco veritiera nel caso di dati di campo.

Sulla base di queste considerazioni ci si rende conto che il modello necessita di ulteriori tarature da effettuare, prevalentemente, utilizzando sia dati di laboratorio in larga scala che dati di campo, qualora disponibili.

Inoltre, occorre ulteriormente sviluppare il modello numerico al fine di introdurre in esso l'ipotesi di variazioni graduali delle componenti del trasporto solido in direzione long-shore, secondo quanto si registra in situazioni reali.

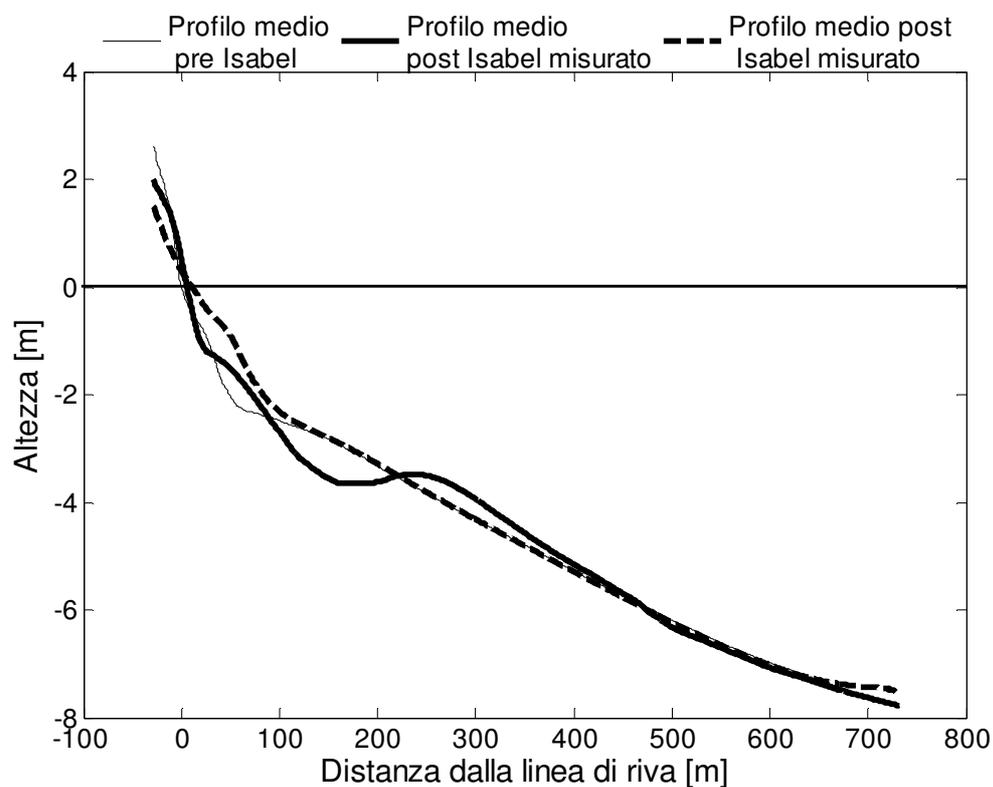


Figura 7.7. Profilo di spiaggia medio misurato (pre e post Isabel) calcolato (post Isabel)

7.5. Influenza dei dati di vento

La taratura del modello CSHORE utilizzando dati reali di campo permette di valutare gli effetti indotti dalla presenza del vento sulle modifiche subite dai profili di spiaggia e sulla quantità di materiale trasportato sia in direzione cross-shore che long-shore.

In Fig. 7.8 si riporta l'andamento del profilo di spiaggia medio pre e post Isabel misurato e calcolato tenendo in conto o meno della presenza del vento. I valori relativi alla velocità e alla direzione del vento utilizzati per la simulazione sono sempre quelli sintetizzati nelle Tab.7.3a e b. Dal grafico si evince come la differenza delle modifiche indotte su profili di spiaggia utilizzando l'una o l'altra ipotesi sia minima.

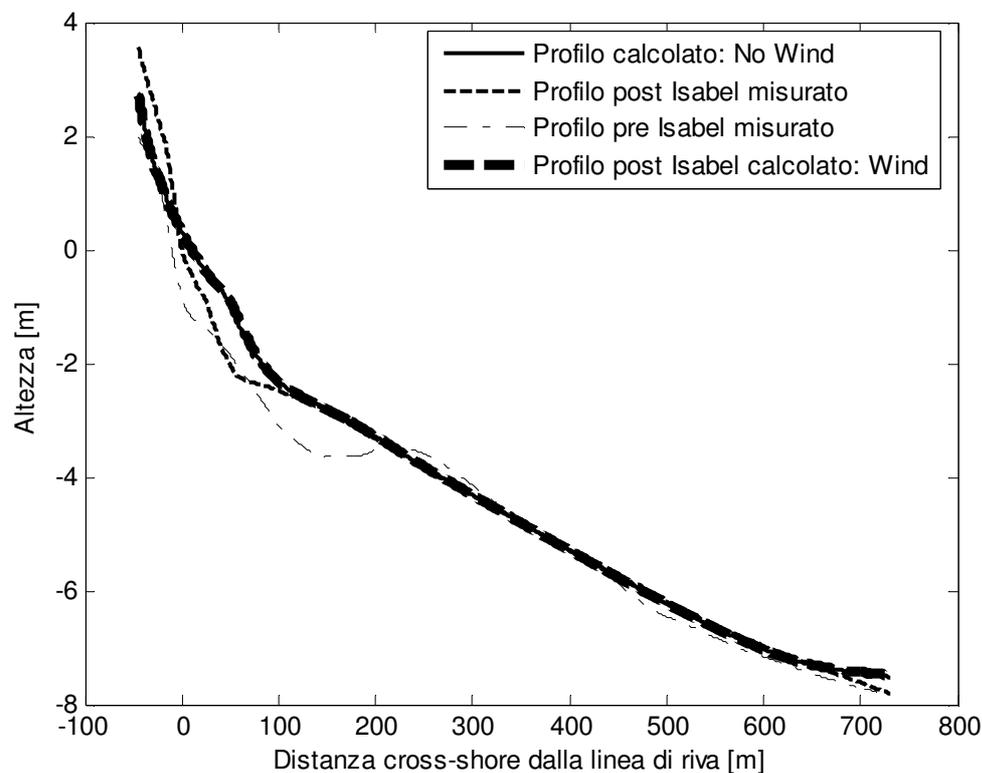


Figura 7.8. Profilo di spiaggia medio misurato (pre e post Isabel) e calcolato dal modello (post Isabel) con e senza la presenza del vento

Diverso è il discorso per quanto concerne, invece, la quantità media di sedimenti trasportati (Fig. 7.9). In particolare, la presenza del vento induce un incremento della quantità di sedimenti trasportati in sospensione in direzione long-shore, e

conseguentemente anche di quella netta. L'incremento si registra lungo tutta direzione cross-shore ed il valore massimo si osserva in corrispondenza dei punti in cui si verifica il picco del trasporto, in corrispondenza, cioè, del frangimento.

I risultati ricavati sono in accordo con quanto ottenuto da Feddersen e Guza (1998) secondo i quali la presenza del vento porta ad un incremento delle forze in corrispondenza della zona dei frangenti. In particolare, lo studio da essi condotto, utilizzando proprio dati reali di campo relativi ai profili di spiaggia e alle informazioni idrodinamiche fornite dall'FRF, ha dimostrato come la presenza del vento contribuisce per un terzo a quelle che sono le componenti totali di forze agenti in corrispondenza della zona dei frangenti. Lo studio citato fa riferimento a condizioni ondometriche normali. E' ragionevole supporre che nel caso di eventi ondosi estremi, ed in particolare, per il caso di un uragano, in cui il vento può raggiungere picchi di velocità notevoli, il tutto possa essere ulteriormente incrementato.

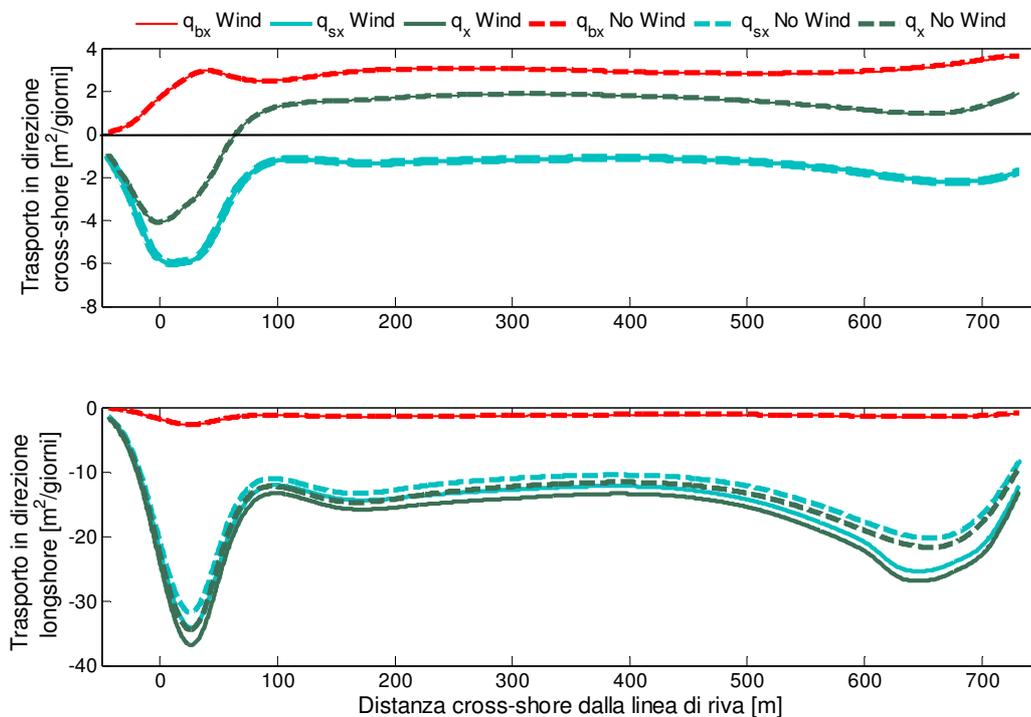


Figura 7.9. Quantità media di sedimenti trasportati in direzione cross-shore e long-shore con e senza vento

CAPITOLO 8

CONCLUSIONI

Il lavoro svolto ha riguardato l'analisi delle modifiche subite dai profili di spiaggia emersi (dune) e sommersi in conseguenza ad attacchi ondosi più o meno intensi. Lo studio nasce dall'esigenza sempre crescente di giungere a definire un modello di riferimento grazie al quale riuscire a descrivere in maniera univoca quelli che sono i processi che interessano le aree costiere soprattutto nel caso di eventi ondosi estremi. In particolare, negli ultimi anni l'attenzione è stata rivolta allo studio dei fenomeni che coinvolgono le dune da spiaggia, in relazione alla crescente importanza da queste assunte in seno alla difesa della costa.

Studi sull'argomento sono, ad oggi, molto limitati a causa sia delle difficoltà incontrate nel definire in maniera univoca i termini che intervengono sul trasporto dei sedimenti in direzione cross-shore, sia per la mancanza di dati di campo da utilizzare per effettuare un'analisi realistica del problema.

Il lavoro svolto è stato eseguito in due fasi distinte.

Da un lato, è stata effettuata un'analisi qualitativa e quantitativa delle modifiche subite dai profili di spiaggia e dalle dune lungo le coste di Outer Banks, in North Carolina, a

seguito dell'impatto dell'uragano Isabel (18 Settembre 2003). Lo studio ha riguardato, in prima analisi, la descrizione delle caratteristiche meteorologiche che hanno accompagnato l'impatto dell'uragano Isabel sulla terra ferma in termini di valori di altezza d'onda significativa, H_{mo} , periodo di picco, T_p , direzione del moto ondoso registrate, velocità e direzione del vento, e di incremento del livello medio mare prodotto.

Successivamente, l'attenzione è stata rivolta allo studio dell'erosione subita dalle sole dune da spiaggia utilizzando i rilievi, pre e post uragano, effettuati dal sistema satellitare LIDAR lungo le coste di Outer Banks. E' stato così possibile definire l'area di duna erosa, pari a 20 m^2 , in accordo con quanto ricavabile utilizzando l'espressione empirica proposta da Hallermayer e Rhodes (1989), nonché la variazione verticale subita dalle stesse individuando quelle che tra loro hanno subito overwash (altezza della duna successiva all'impatto dell'uragano inferiore/uguale a 3 m). Dall'analisi effettuata è risultato come l'erosione subita dalle dune sia funzione della distanza esistente tra i vari profili considerati e il punto in cui l'uragano ha toccato terra nonché di quella che è l'altezza della duna prima dell'impatto dell'uragano.

Successivamente, l'analisi è stata estesa anche ai profili di spiaggia sommersi utilizzando i rilievi di campo effettuati presso l'osservatorio internazionale del Field Research Facility (FRF) giungendo, anche in questo caso, alla stima dell'area erosa, pari mediamente a 150 m^2 , e della variazione verticale subita dai profili di spiaggia. In questo caso, la variabilità dei parametri è stata analizzata in funzione della distanza rispetto al pontile dell'FRF giungendo a dimostrare l'uniformità delle modifiche subite dai profili di spiaggia in direzione long-shore a seguito dell'impatto dell'uragano.

Nella seconda fase dello studio, si è proceduto ad applicare, tarare e verificare il modello numerico CSHORE (Kobayashi et al. 2006). Si tratta di un modello time-averaged composto da un modulo per la stima dei processi di interazione onda-corrente, che caratterizzano il moto ondoso nel suo propagarsi da largo verso riva, accoppiato ad un modulo per la stima delle componenti del trasporto solido in direzione cross-shore e long-shore. Il modello si basa sulle ipotesi di spiaggia rettilinea e modifiche uniformi in direzione long-shore subite dai profili di spiaggia in conseguenti ad attacchi ondosi.

Il modello, già testato in precedenza utilizzando dati di laboratorio in piccola e larga scala nonché dati reali, è stato, nello studio svolto, ulteriormente tarato utilizzando, da un lato, ulteriori dati di laboratorio in larga scala e, dall'altro, dati di campo relative alle situazioni estreme registrate lungo le coste di Outer Banks a seguito dell'impatto di Isabel. Questa ultima analisi rappresenta una novità assoluta, mai in precedenza il modello era stato tarato per condizioni ondamiche così estreme.

I dati di laboratorio in larga scala utilizzati sono quelli ottenuti da esperimenti eseguiti presso l'università di Hannover nel 1998 riproducenti condizioni di spiaggia tipiche Italiane. Si è fatto, in particolare, riferimento al caso di una spiaggia artificiale presso Cavallino Venezia caratterizzata da un diametro medio dei sedimenti di 0.35 mm.

La necessità di effettuare la taratura del modello utilizzando ulteriori dati di laboratorio è stata dettata, da un lato, dall'esigenza di valutare meglio le capacità previsionali del modello numerico, ottenendo risultati più facilmente comparabili, dal punto di vista dell'ordine di grandezza, con quelle che sono situazioni reali di campo, e, dall'altro, dallo scopo di valutare l'accuratezza dei valori assegnati ai parametri empirici presenti all'interno delle equazioni del trasporto solido.

Gli esperimenti condotti sono stati eseguiti considerando eventi ondometrici con caratteristiche e durate diverse. I risultati ottenuti hanno permesso di:

- ✓ Tarare il valore del parametro di frangimento, γ , attraverso il raffronto tra i valori di altezza d'onda significativa, H_{mo} , misurati dai vari gauges, dislocati lungo il canale di sperimentazione a diverse distanze in direzione cross-shore, e quanto ricavato dal modello alle stesse distanze a cui i gauges sono collocati ($\gamma = 0.8$);
- ✓ Valutare l'accuratezza delle previsioni effettuate dal modello circa le modifiche subite dai profili di spiaggia e dalle dune in conseguenza ai vari attacchi ondosi, effettuando un raffronto tra i profili di spiaggia finali misurati e stimati dal modello, giungendo a dimostrare l'ottima capacità previsionale di CSHORE nel caso oggetto di studio ;

- ✓ Analizzare qualitativamente le caratteristiche del trasporto dei sedimenti in direzione cross-shore, presentando, le onde generate, direzioni ortogonali alla linea di riva.

La taratura del modello CSHORE per il caso dell'uragano Isabel è stata condotta utilizzando i profili di spiaggia dell'FRF. L'analisi è stata condotta con riferimento ad un arco temporale di 168 ore che comprende i tre giorni antecedenti e susseguenti l'impatto dell'uragano sulla costa. Le informazioni relative ai parametri caratteristici di moto ondoso, dell'andamento della superficie marina e della velocità e direzione del vento sono fornite dagli strumenti di misura del Field Research Facility. Anche in questo caso, i risultati ottenuti dall'applicazione del modello sono stati utilizzati per:

- ✓ Tarare il valore del parametro di frangimento, γ , effettuando un raffronto tra i valori della deviazione standard dell'andamento della superficie marina, σ_{η} , misurati dal gauge dell'FRF attaccato al pontile dell'osservatorio con quanto calcolato dal modello alla stessa distanza in direzione cross-shore a cui il gauge è posto ($\gamma = 0.6$);
- ✓ Valutare le capacità previsionali del modello circa le modifiche subite dai profili di spiaggia in conseguenza all'impatto dell'uragano, effettuando, anche in questo caso un raffronto tra i profili post Isabel misurati e stimati dal modello;
- ✓ Analizzare qualitativamente le caratteristiche del trasportato dei sedimenti sia in direzione cross-shore che long-shore, avendo le onde direzione di propagazione obliqua rispetto alla linea di riva. In particolare, si è dimostrato come il trasporto di sedimenti in direzione long-shore sia maggiore rispetto a quello cross-shore. Entrambi però, registrano il valore massimo in corrispondenza della zona dei frangenti;
- ✓ Valutare, trattandosi di dati reali di campo, gli effetti dovuti alla presenza del vento sulle modifiche subite dai profili di spiaggia e sulla quantità di materiale trasportato. In particolare, dai risultati ottenuti si evince come la presenza del vento non comporta sostanziali modifiche circa le previsioni fatte dal modello per quanto concerne l'erosione subita dai profili di spiaggia.

Diverso è il discorso, invece, per quanto concerne la quantità di sedimenti trasportati, che a causa della presenza del vento subisce un incremento soprattutto per quanto riguarda la sua componente long-shore.

I risultati ottenuti dall'applicazione del modello CSHORE per il caso dell'uragano Isabel, hanno messo in luce come le capacità del modello di prevedere le modifiche subite dai profili di spiaggia risulti appena sufficiente. In particolare, se l'erosione delle dune è sovrastimata, quella del profilo sommerso è sottostimata.

L'incapacità previsionale del modello, per questo caso specifico, può essere spiegata considerando diversi fattori.

In primo luogo, il processo di propagazione del moto ondoso, da largo verso riva, è stato studiato riferendosi a quelle che sono le equazioni classiche dell'idraulica marittima che non riescono a riprodurre i fenomeni che intervengono in un evento ondoso così estremo.

In secondo luogo, probabilmente i parametri empirici che compaiono all'interno delle equazioni per la stima del trasporto solido richiedono di maggiore taratura per il caso di dati reali di campo.

I terzo luogo, trattandosi di profili di spiaggia reali l'ipotesi fatta circa l'omogeneità del diametro dei sedimenti costituenti i profili di spiaggia presenta delle limitazioni

Infine, non ultimo, l'ipotesi fatte circa l'omogeneità delle modifiche subite dai profili di spiaggia in direzione long-shore in seguito ad attacchi ondosi risultano poco veritiera se si opera con dati reali di campo.

Ciò nonostante, l'applicazione del modello ha permesso, di valutare per la prima volta, l'influenza esercitata dalla presenza del vento sia sulle componenti del trasporto solido che sulle modifiche indotte ai profili di spiaggia, giungendo a dimostrare il contributo positivo dato dal vento al trasporto dei sedimenti come del resto testimoniato da altri studi sull'argomento (Feddersen e Guza, 1998).

Sulla base di queste considerazioni si capisce l'importanza di estendere la taratura del modello utilizzando altri dati di laboratorio e se disponibili, dati reali di campo.

Sviluppi futuri del modello prevedono, in primo luogo, il tenere in conto delle variazioni in direzione long-shore subite dai valori di altezza d'onda significativa, periodo di picco e andamento della superficie marina, da valutare magari utilizzando programmi numerici quali ADCIRC , STWAVE o SWAM, e successivamente il modificare il modello numerico al fine di introdurre in esso l'ipotesi di variazioni graduali delle componenti del trasporto solido in direzione long-shore, secondo quanto si registra in situazioni reali.

APPENDICE A

PROFILI LIDAR PRE E POST ISABE

A-1. Area Souther Shores

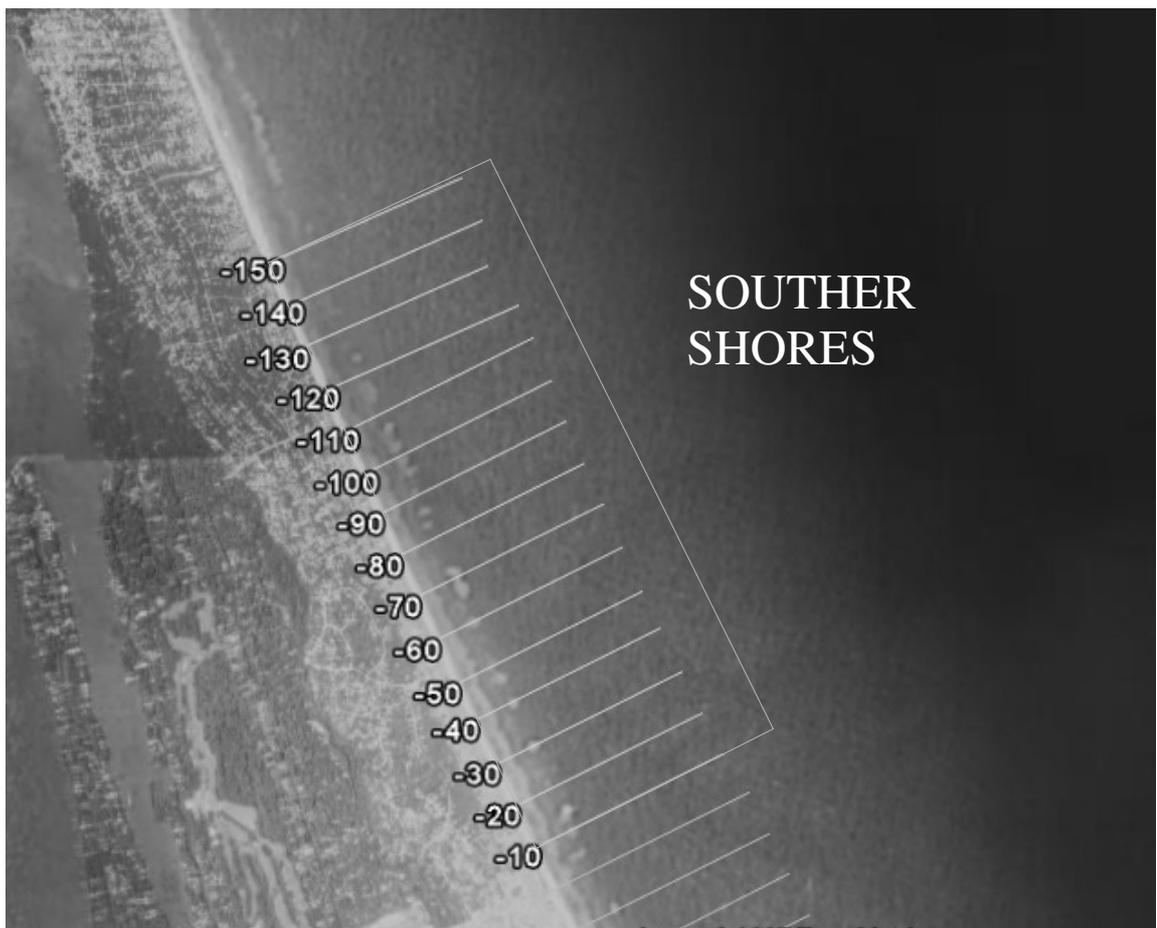


Figura A-1.1. Vista dall'alto dei profili LIDAR per l'area di Souther Shores (Immagine da Google Earth)

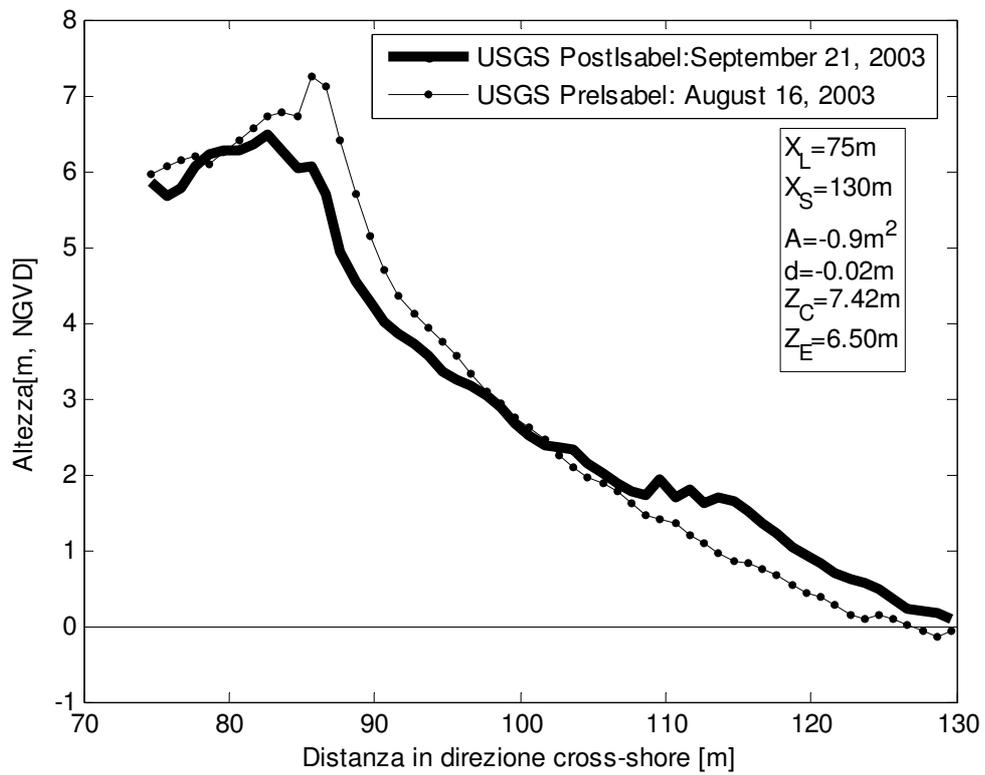


Figura A-1.2. Souther Shores: profilo -150

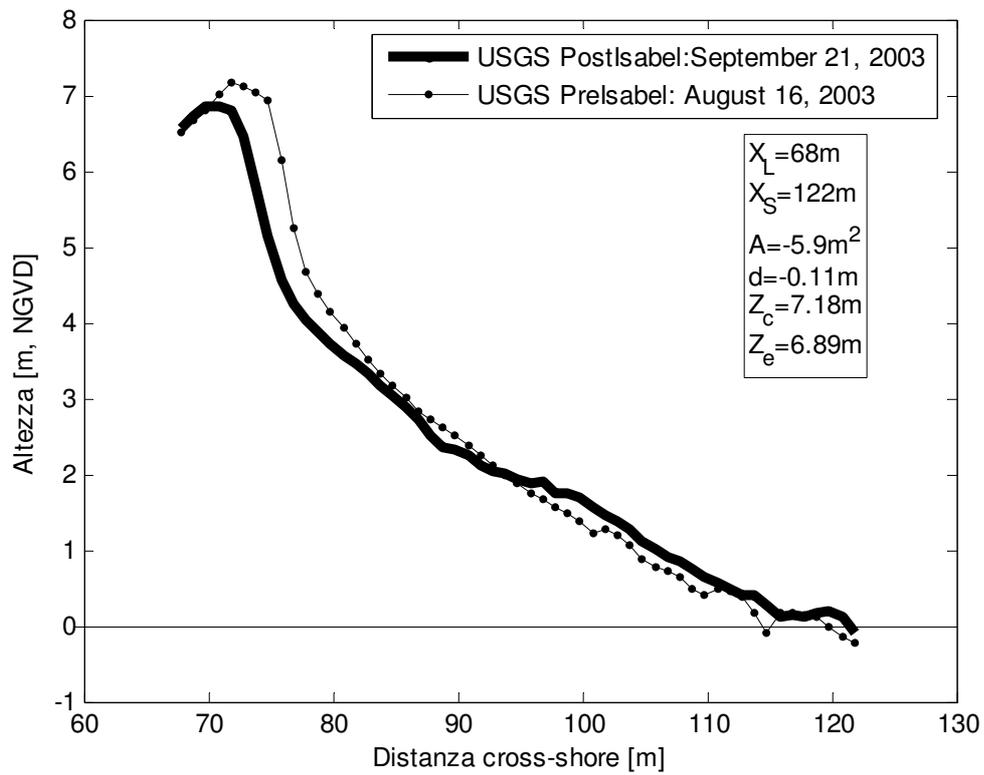


Figura A-1.3. Souther Shores: profilo -140

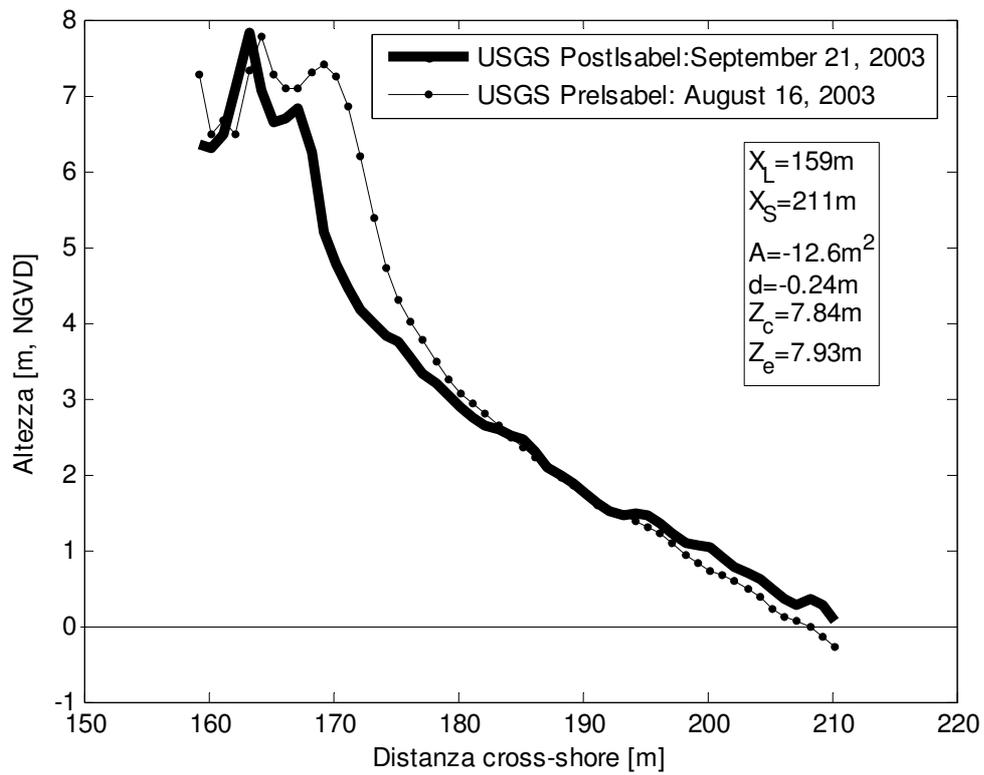


Figura A-1.4. Souther Shores: profilo -130

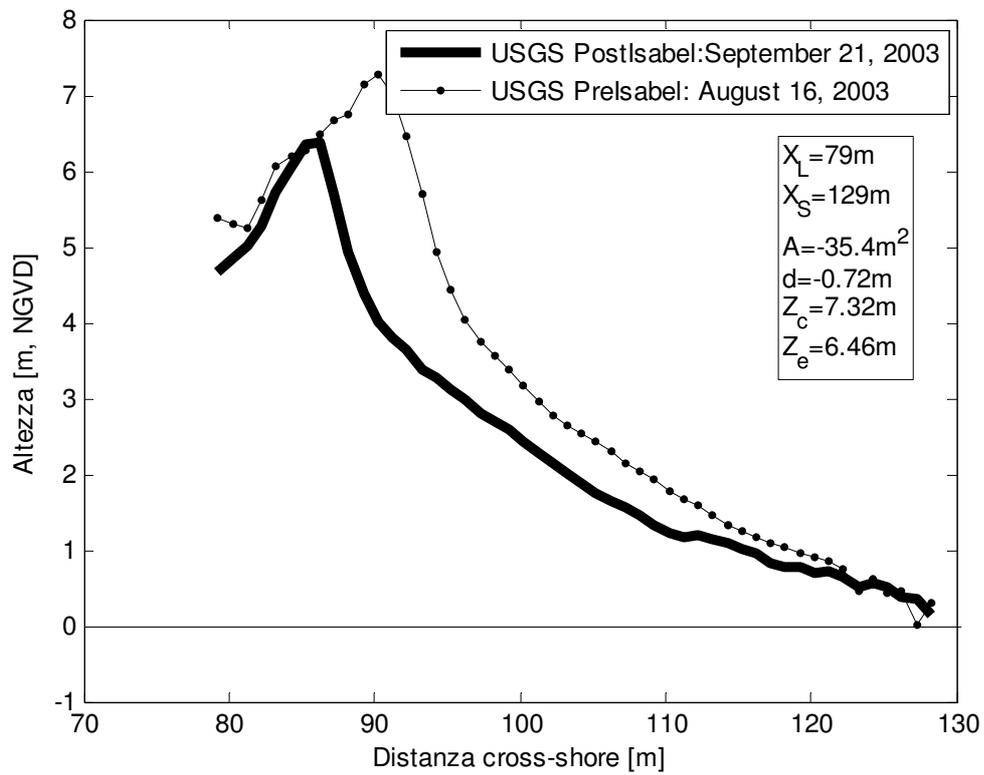


Figura A-1.5. Souther Shores: profilo -120

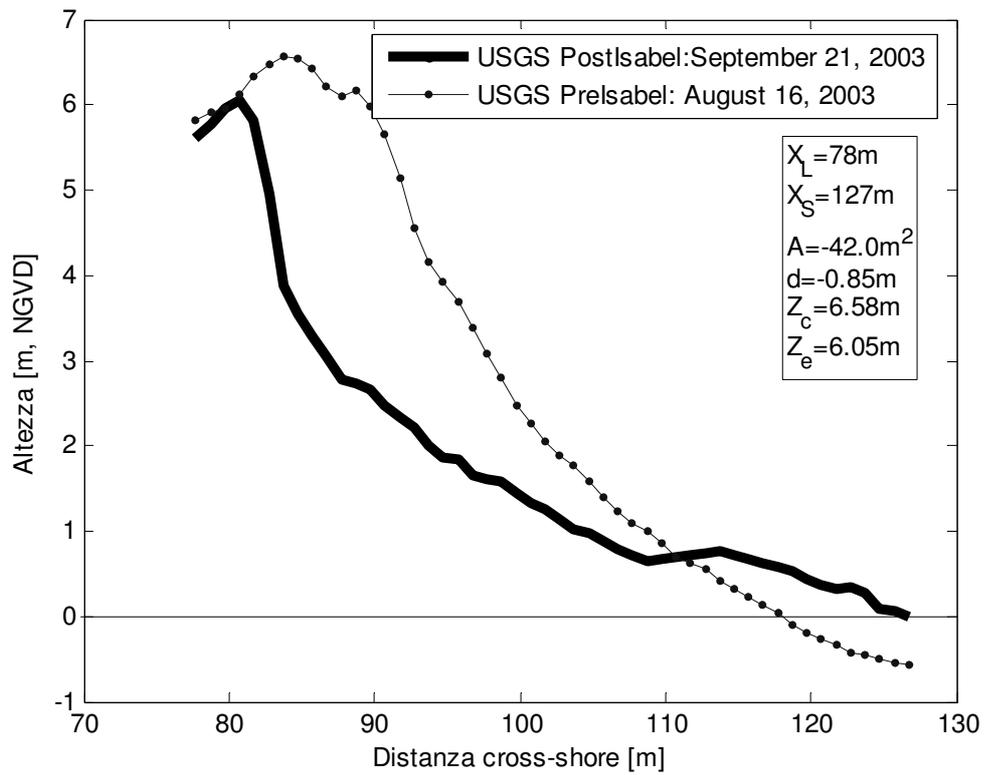


Figura A-1.6. Souther Shores: profilo -110

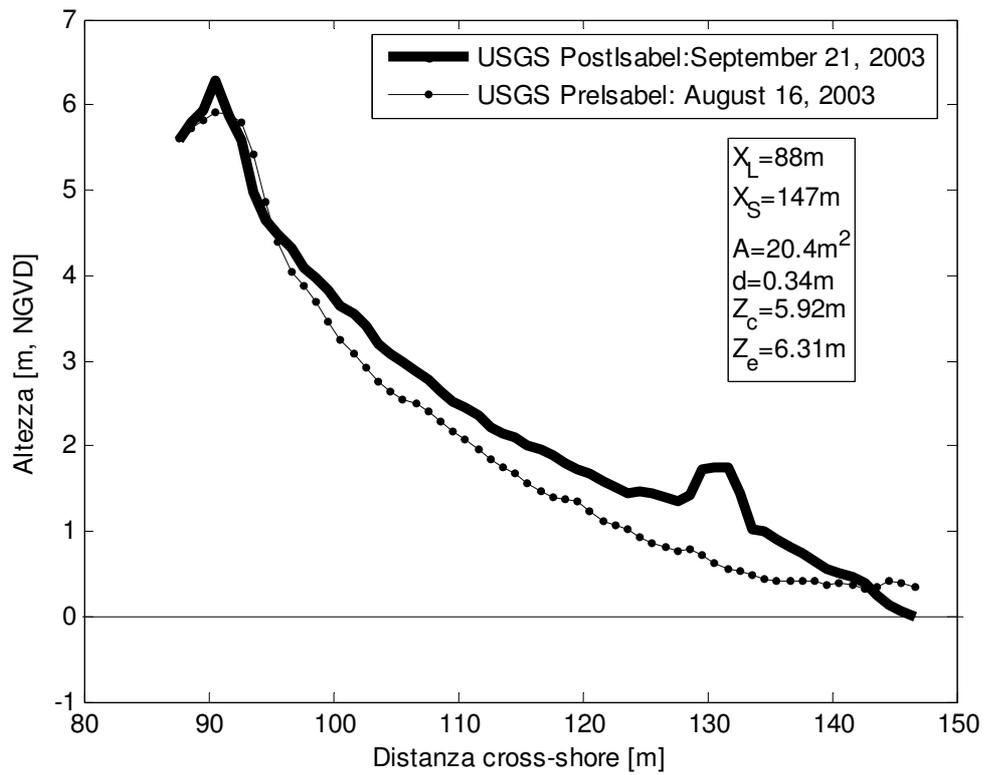


Figura A-1.7. Souther Shores: profilo -100

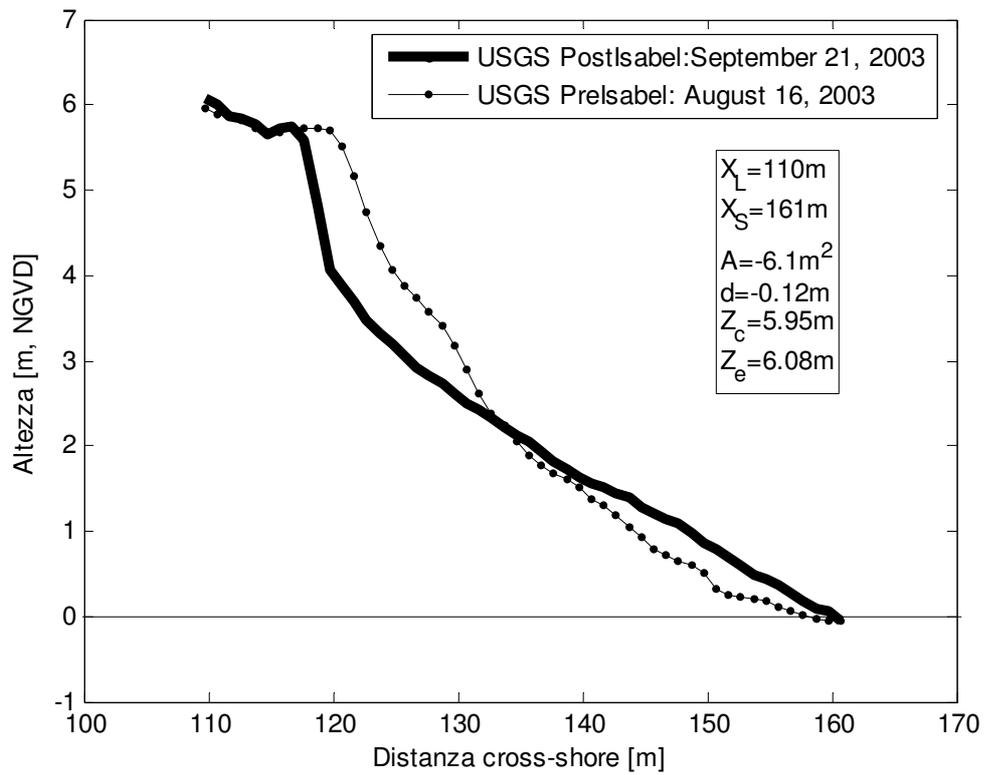


Figura A-1.8. Souther Shores: profilo -90

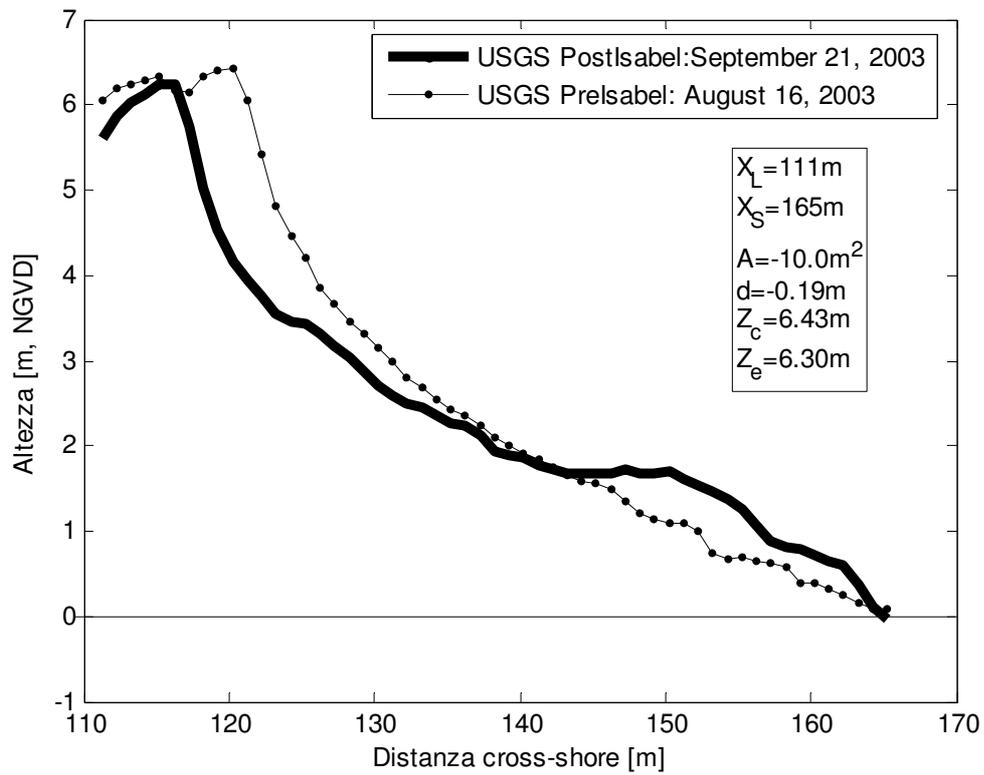


Figura A-1.9. Souther Shores: profilo -80

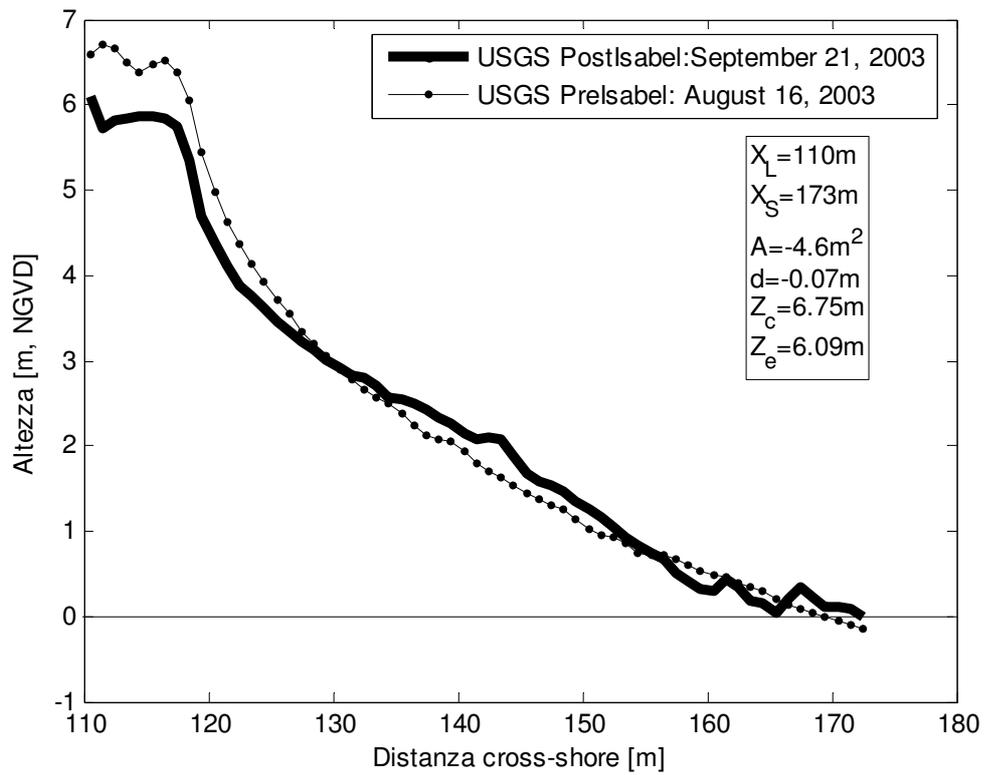


Figura A-1.10. Souther Shores: profilo -70

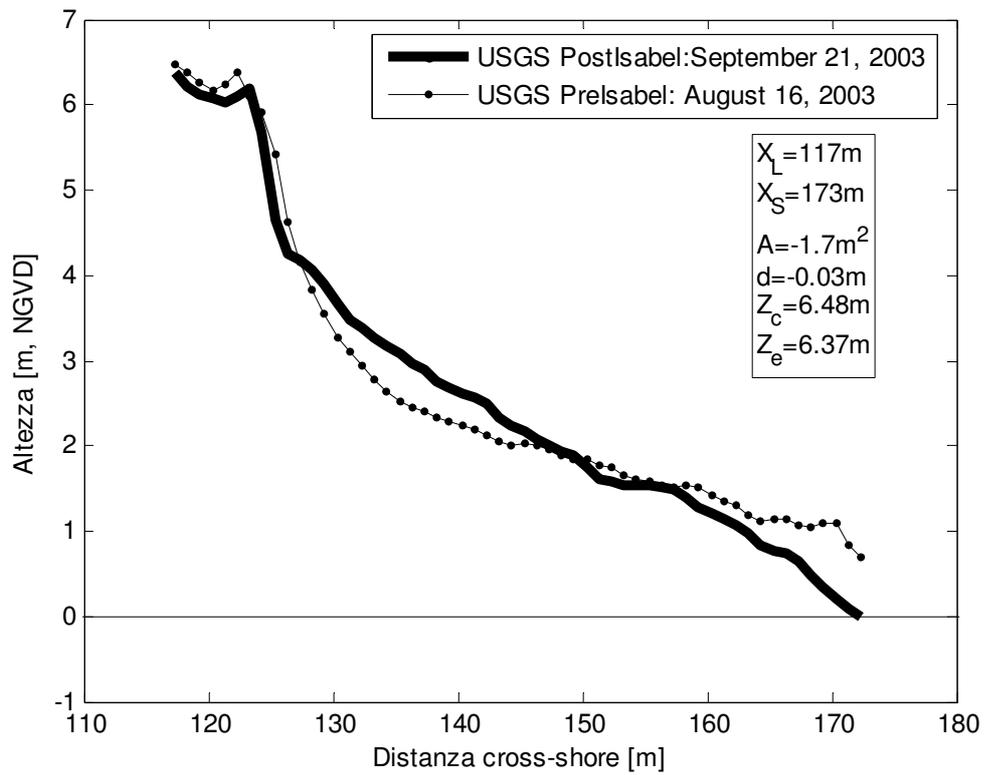


Figura A-1.11. Souther Shores: profilo -60

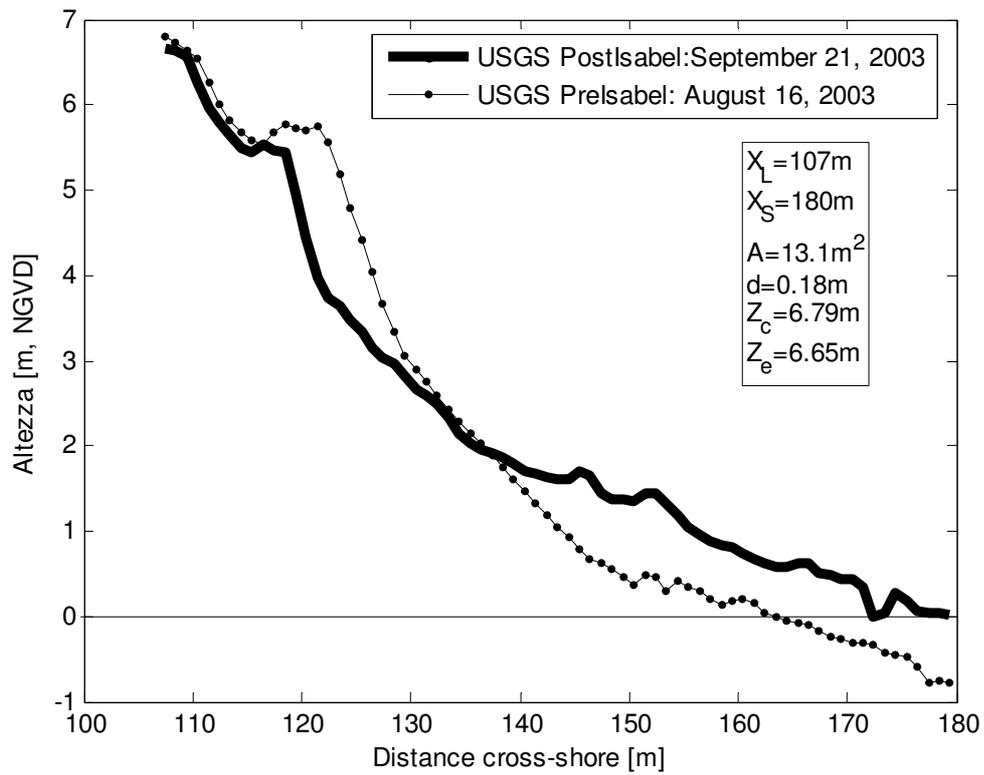


Figura A-1.12. Souther Shores: profilo -50

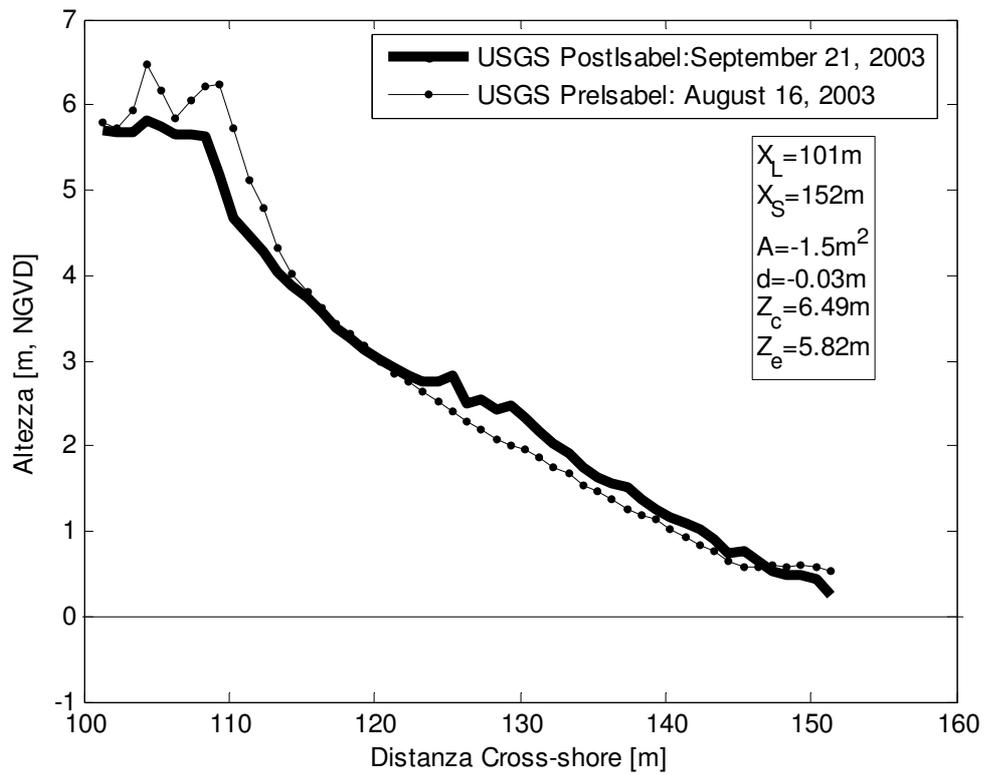


Figura A-1.13. Souther Shores: profilo -40

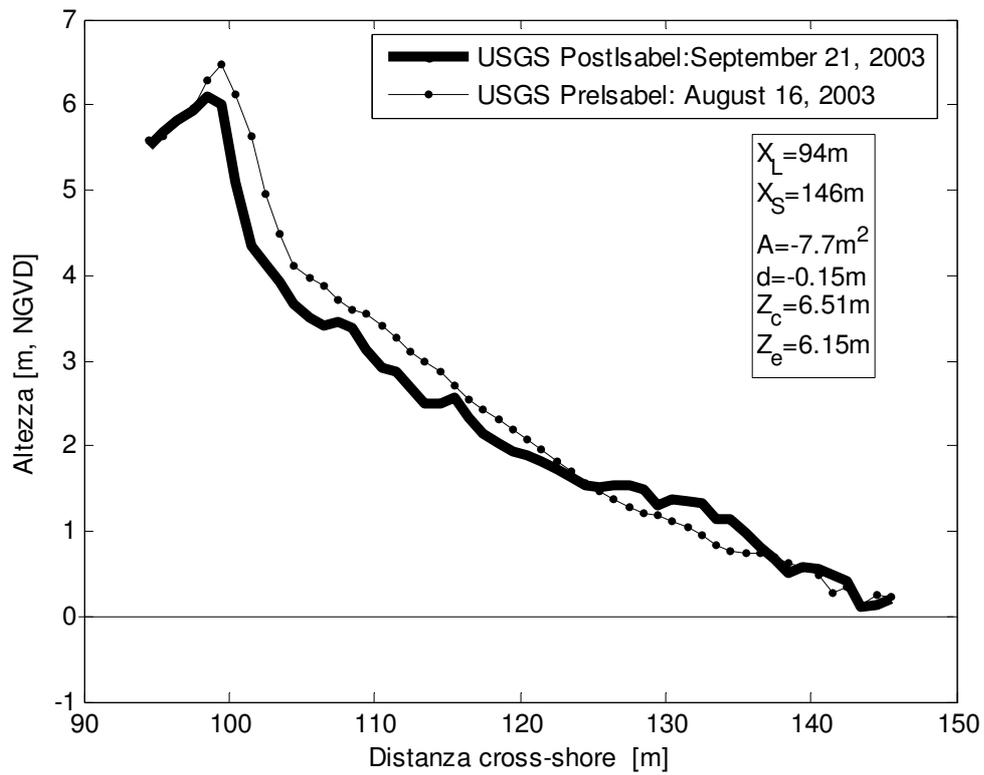


Figura A-1.14. Souther Shores: profilo -30

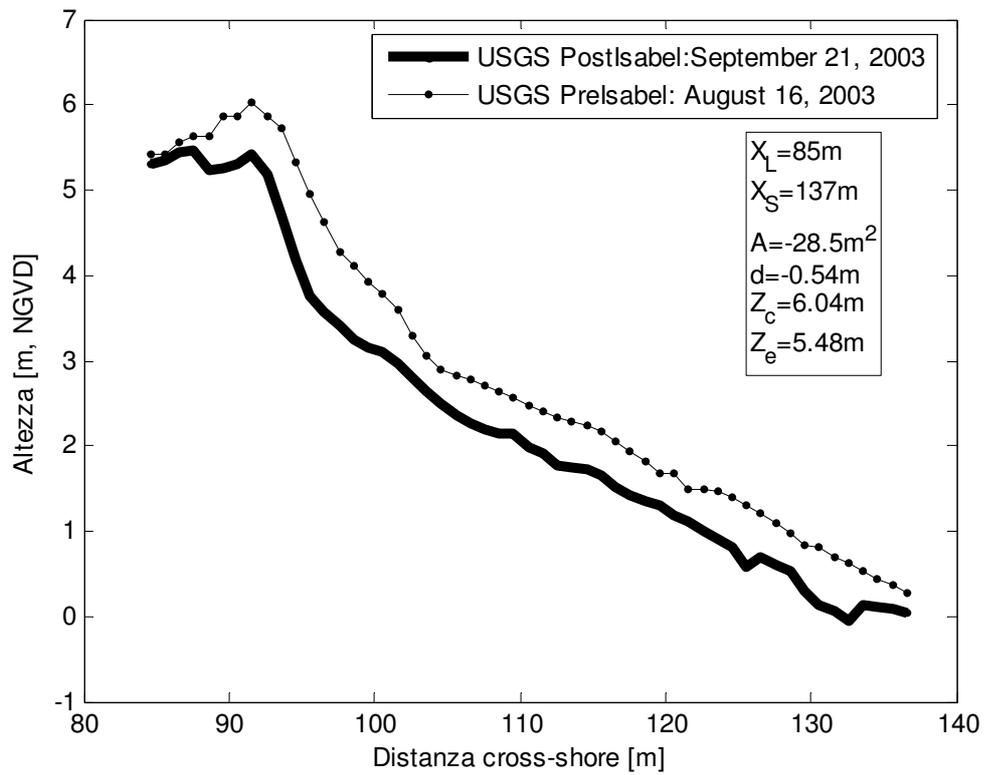


Figura A-1. 15. Souther Shores: profilo -20

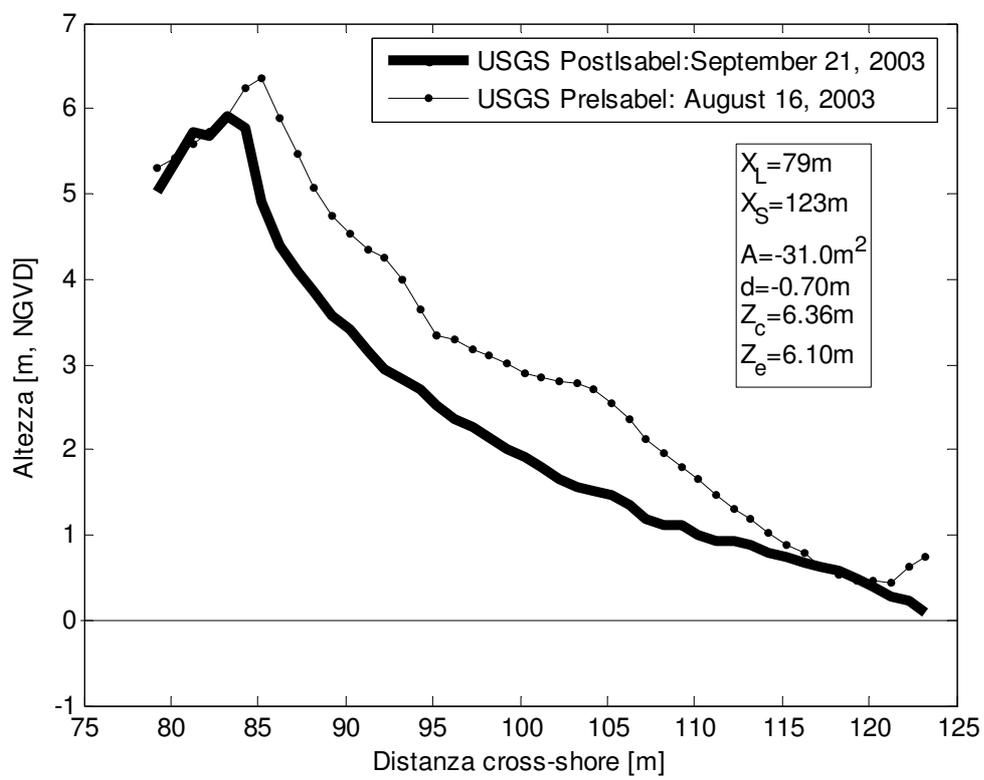


Figura A-1.16. Souther Shores: profilo -10

A-2. Area Kitty Hawk

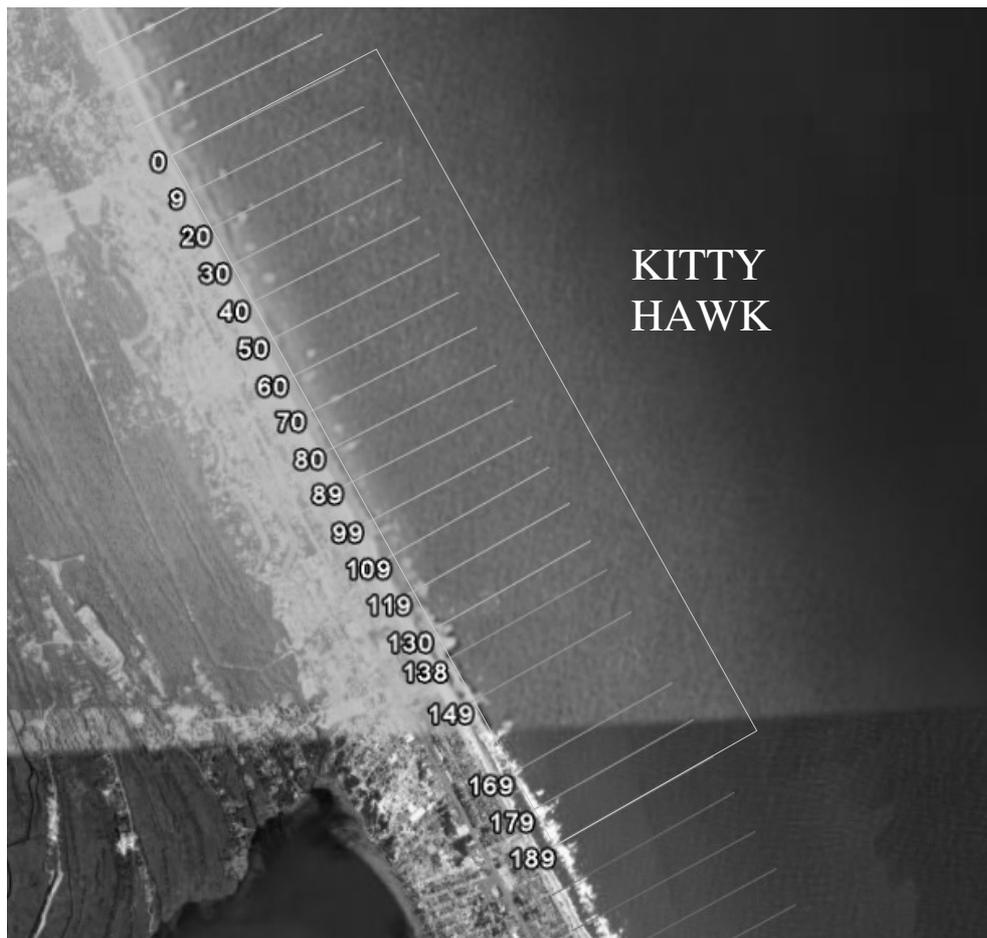


Figura A-2.1. Vista dall'alto dei profili LIDAR per l'area di Kitty Hawk (Immagine da Google Earth)

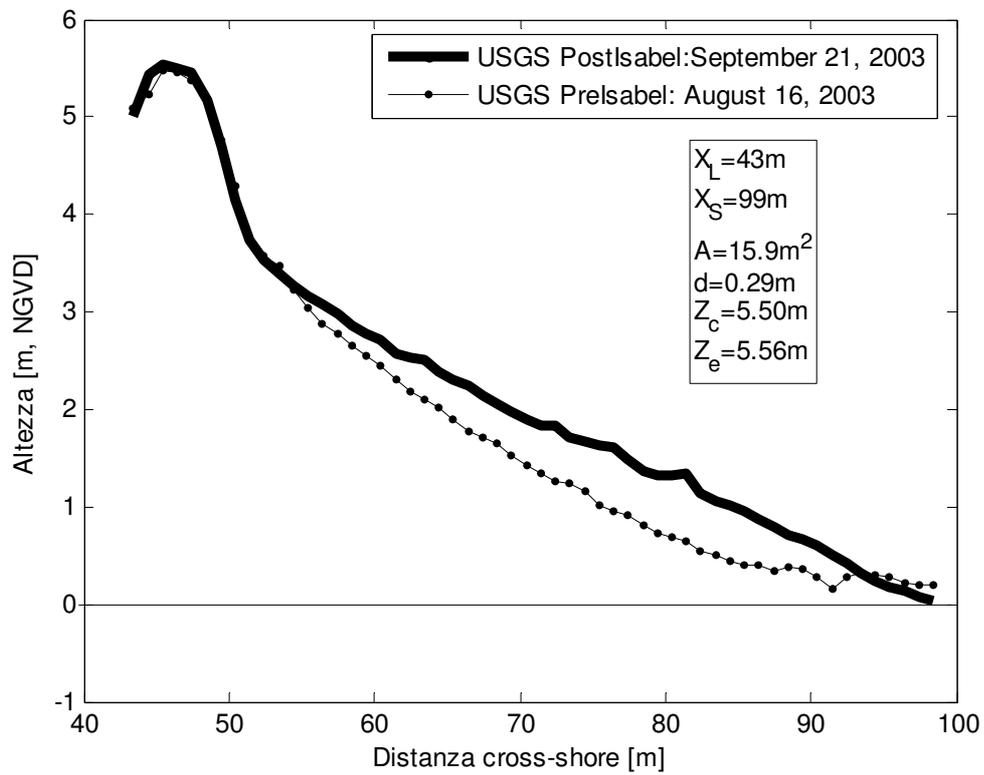


Figura A-2.2. Kitty Hawk: profilo 0

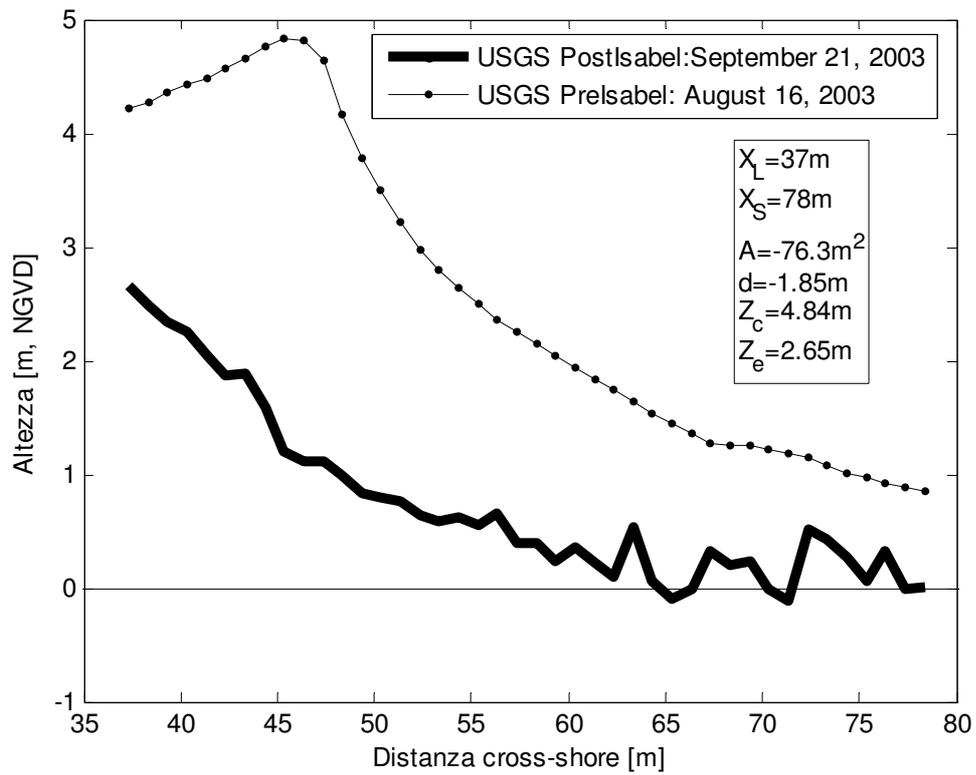


Figura A-2.3. Kitty Hawk: profilo 9

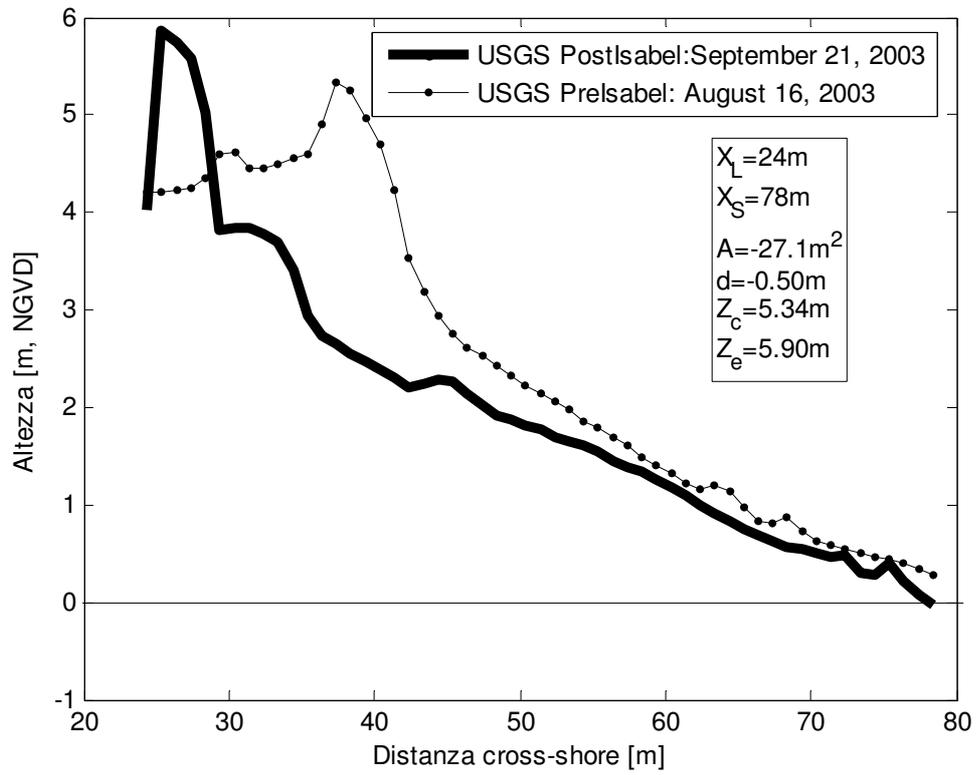


Figura A-2.4. Kitty Hawk: profilo 20

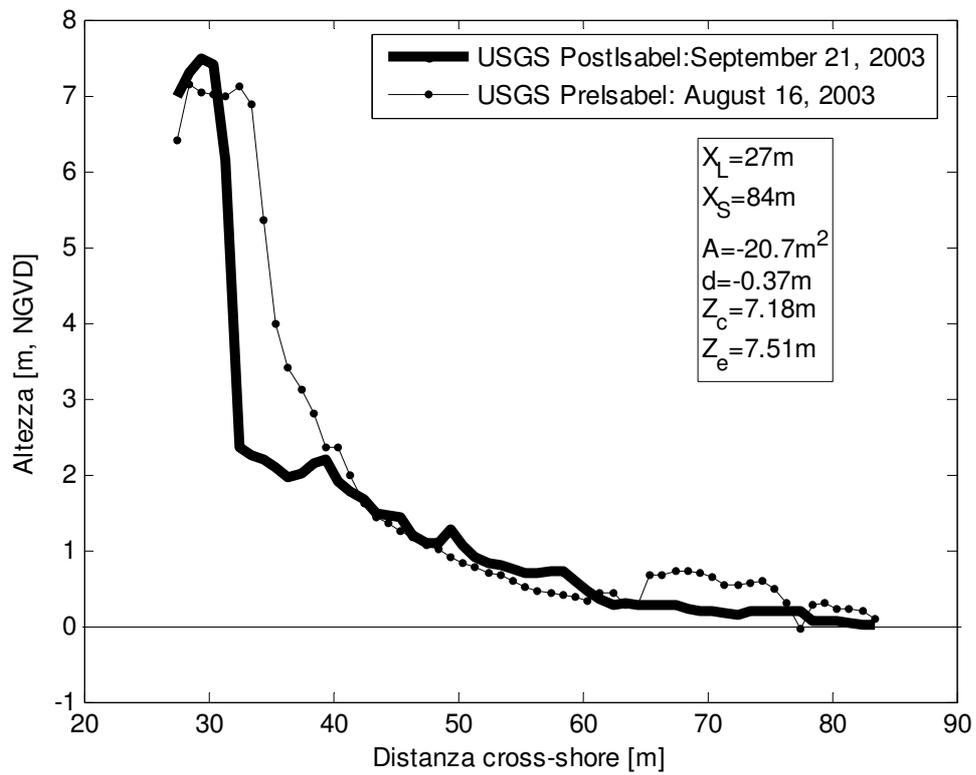


Figura A-2.5. Kitty Hawk: profilo 30

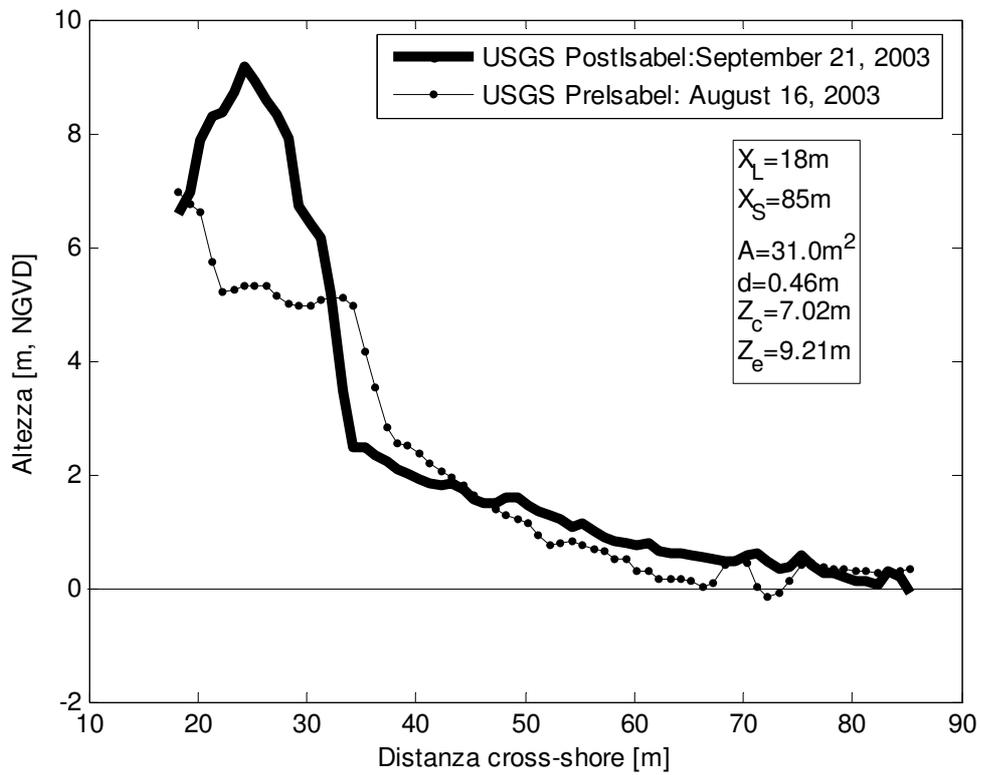


Figura A-2.6. Kitty Hawk: profilo 40

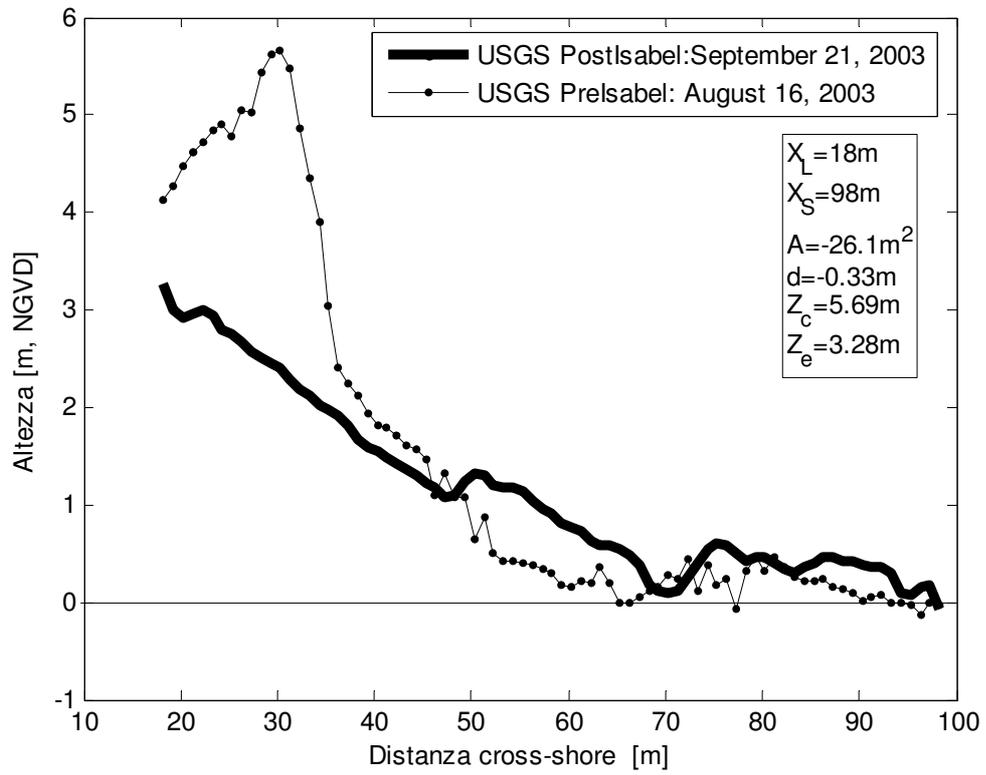


Figura A-2.7. Kitty Hawk: profilo 50

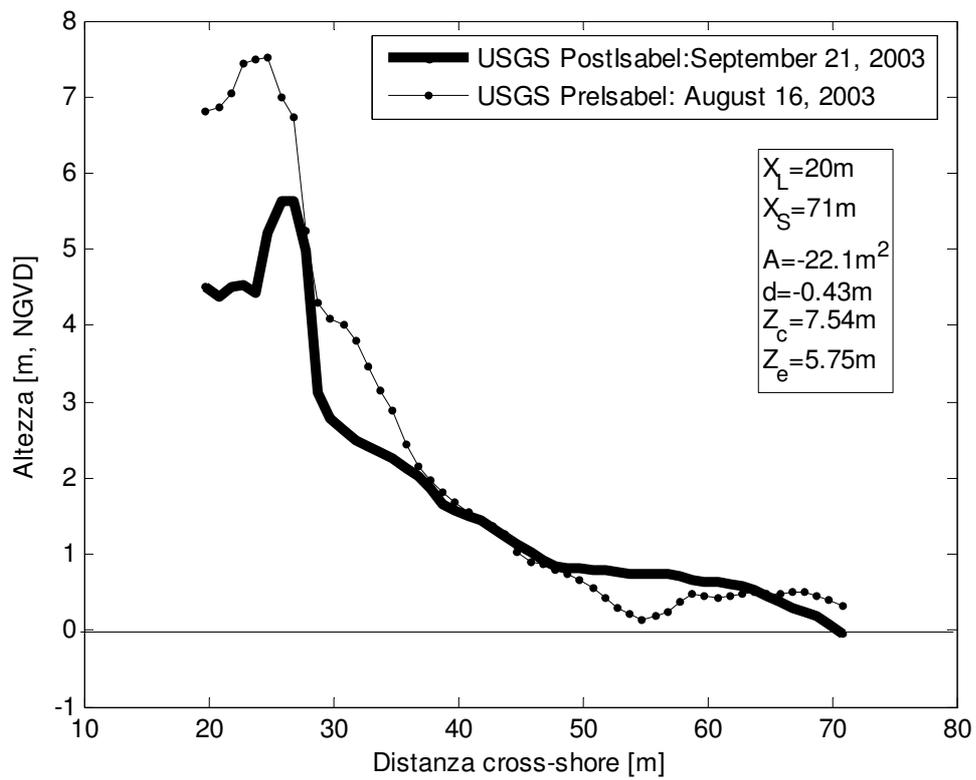


Figura A-2.8. Kitty Hawk: profilo 60

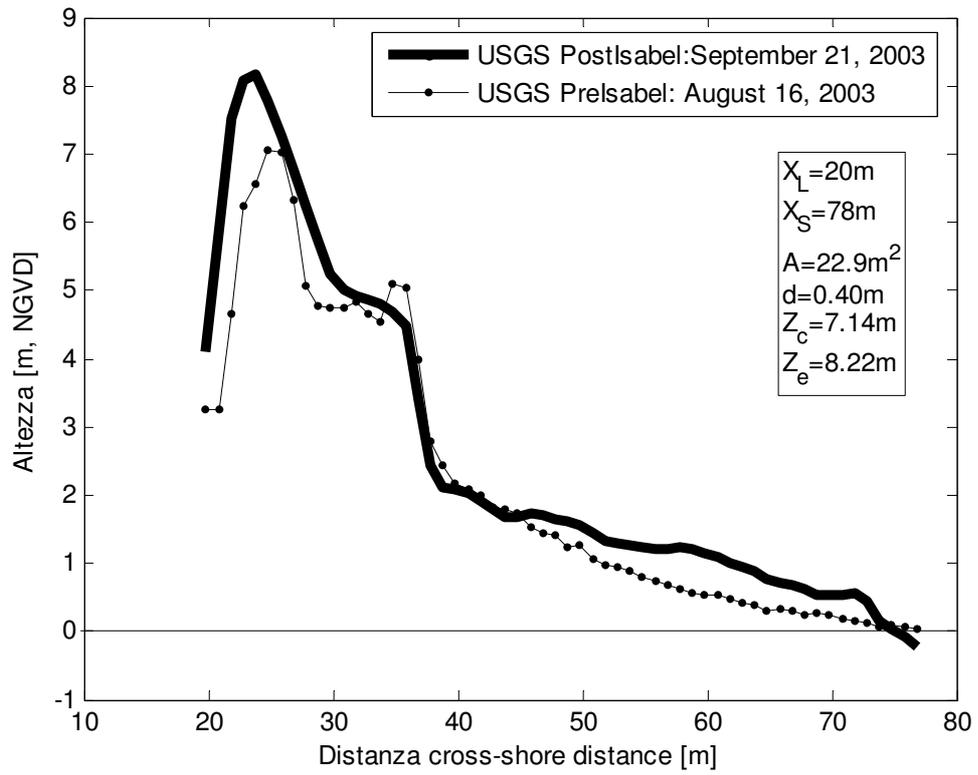


Figura A-2.9. Kitty Hawk: profilo 70

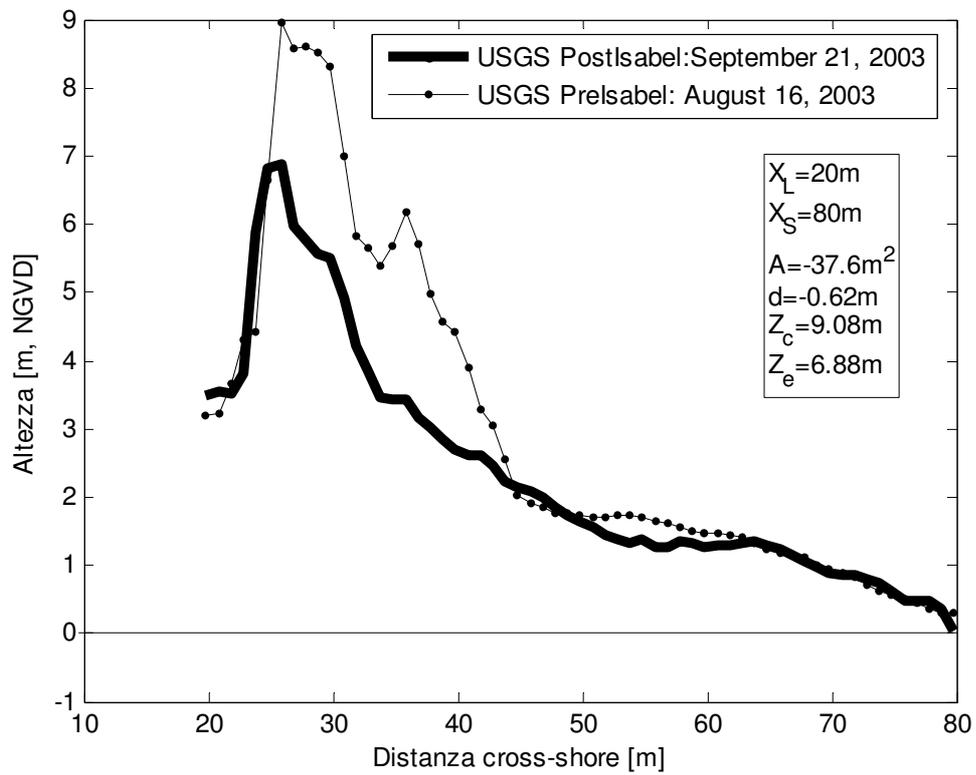


Figura A-2.10. Kitty Hawk: profilo 80

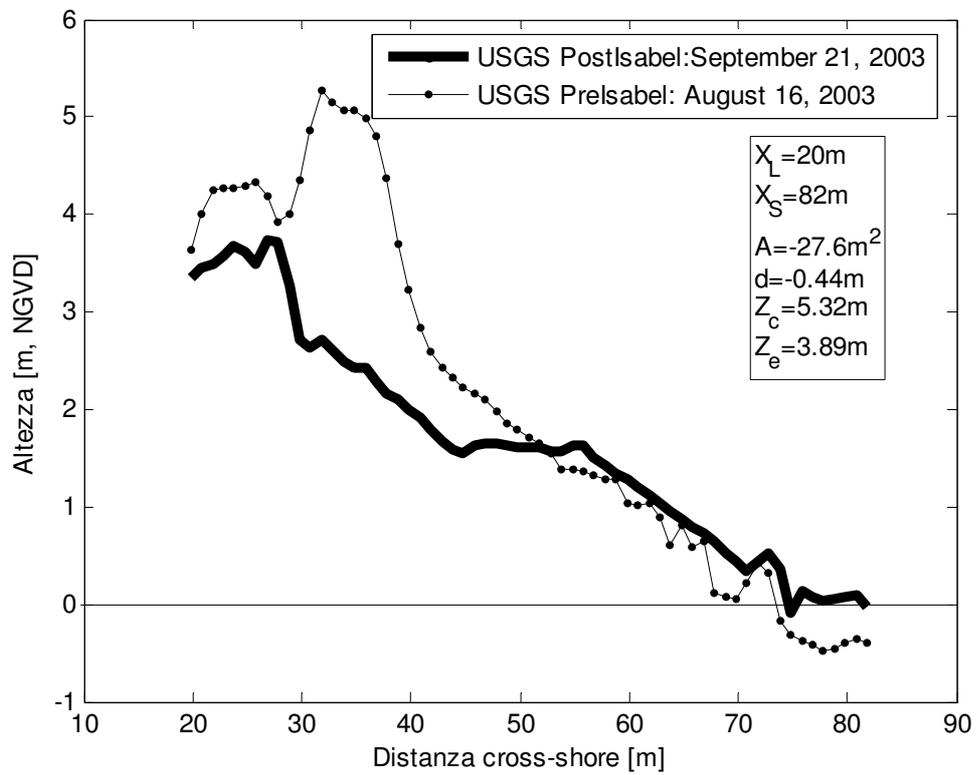


Figura A-2.11. Kitty Hawk: profilo 89

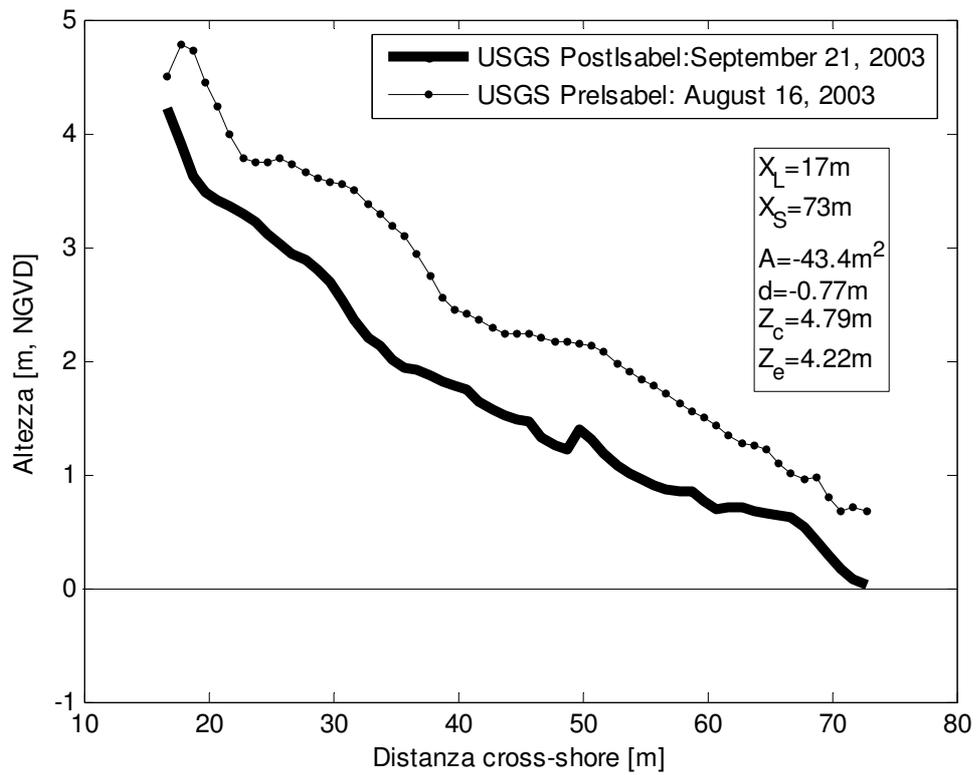


Figura A-2.12. Kitty Hawk: profilo 99

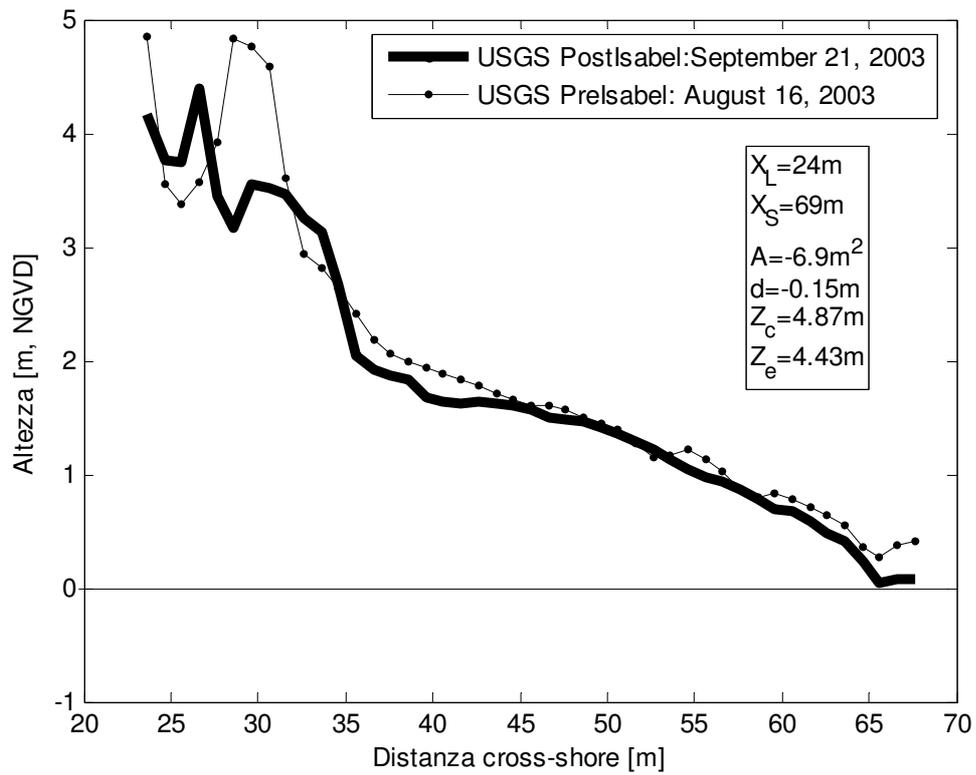


Figura A-2.13. Kitty Hawk: profilo 109

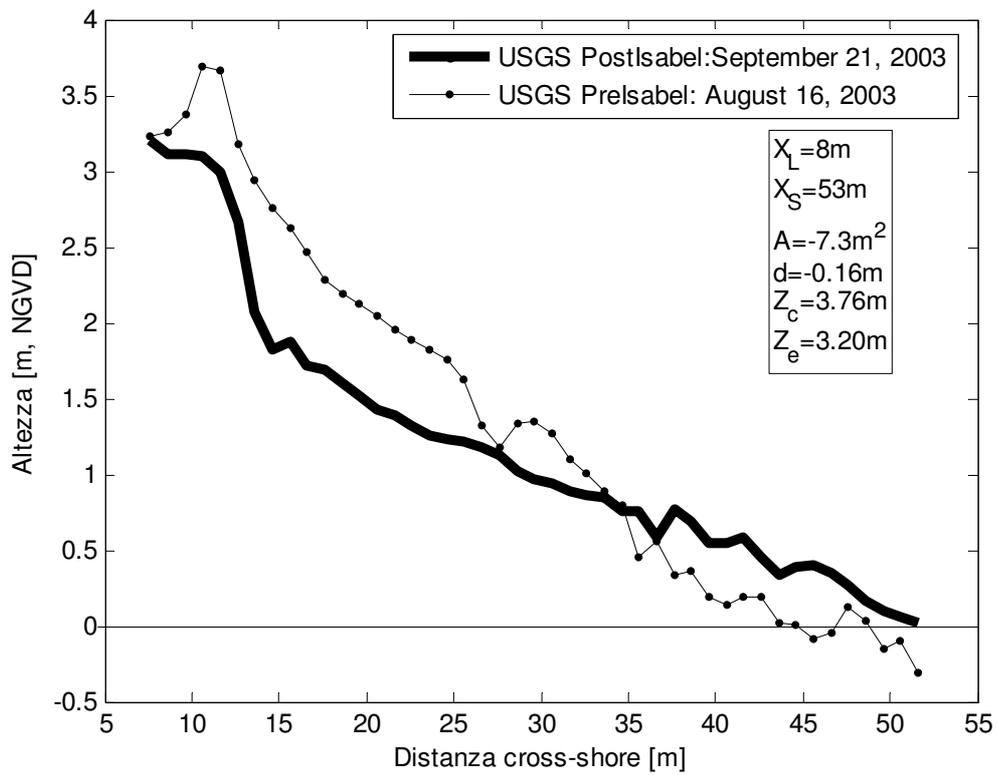


Figura A-2.14. Kitty Hawk: profilo 119

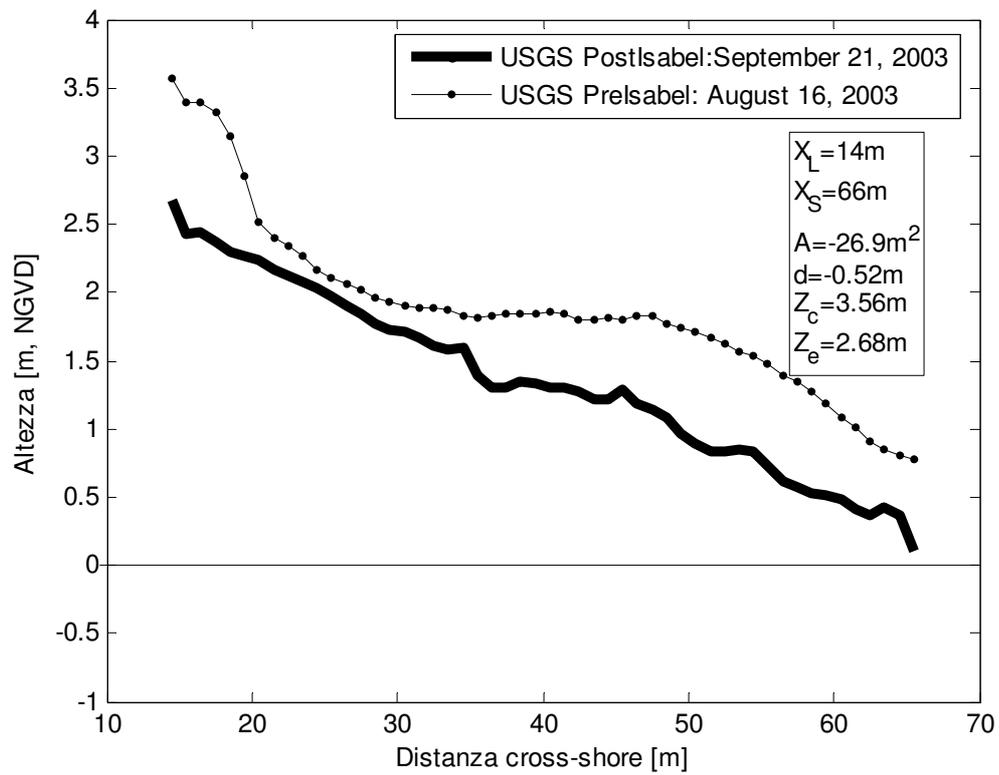


Figura A-2.15. Kitty Hawk: profilo 130

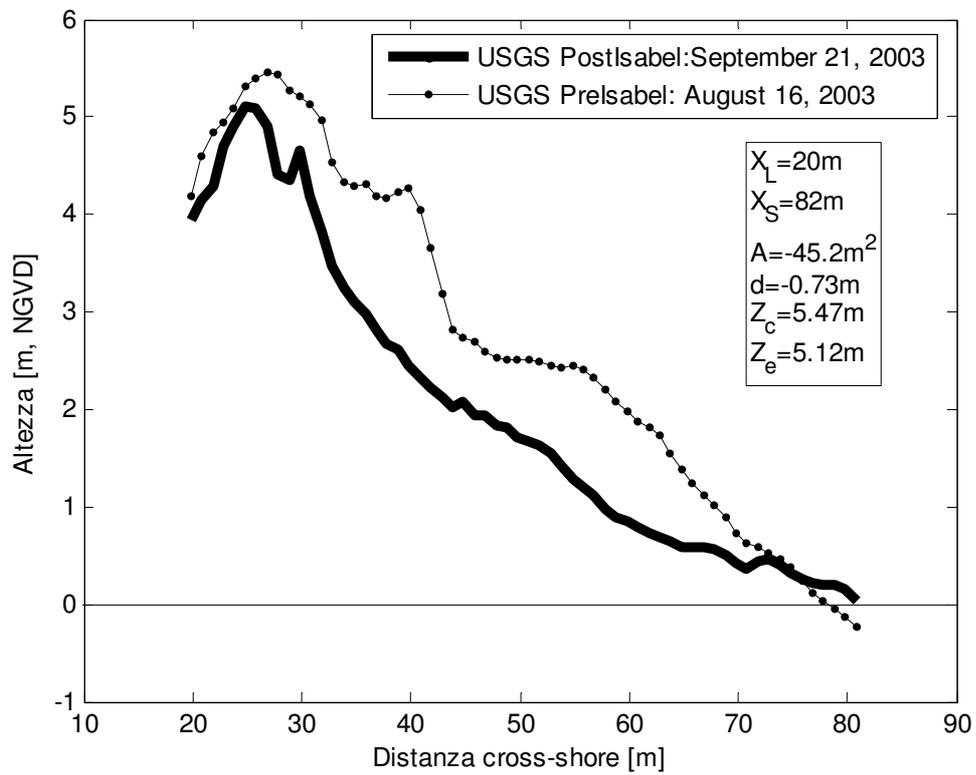


Figura A-2.16. Kitty Hawk: profilo 138

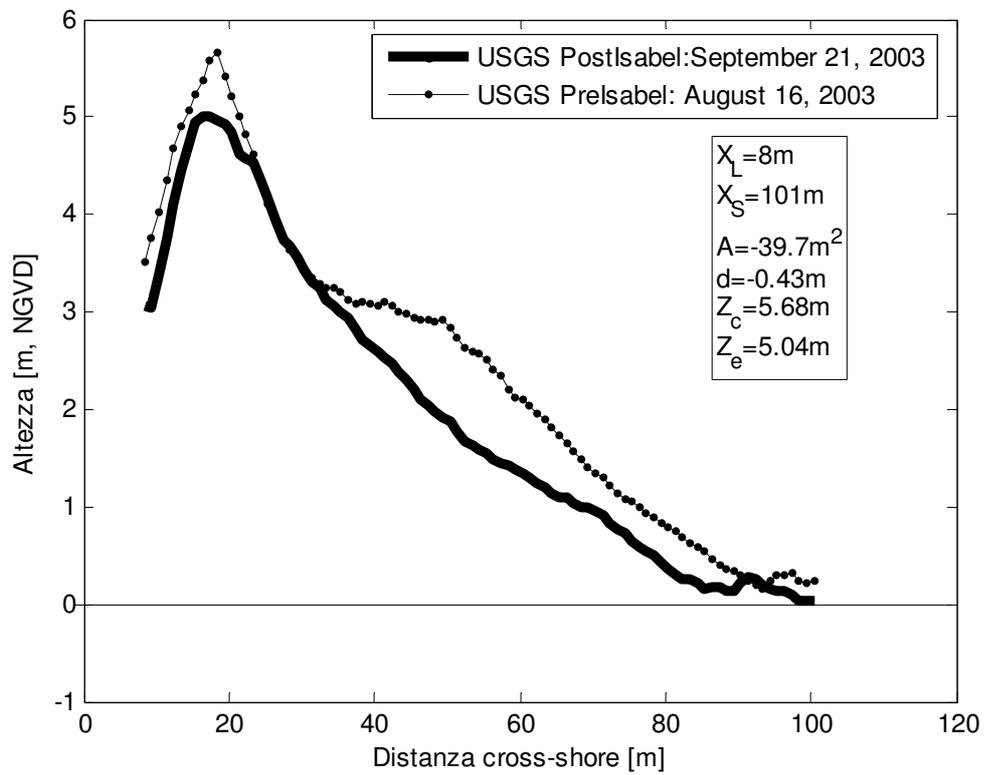


Figura A-2.17. Kitty Hawk: profilo 149

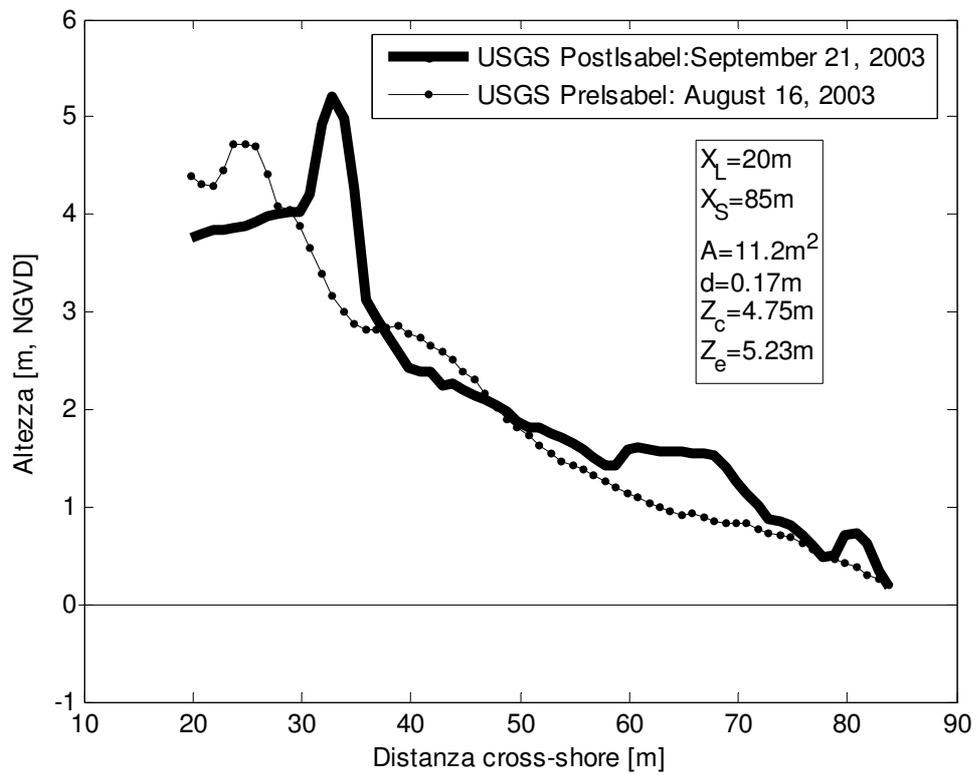


Figura A-2.18. Kitty Hawk: profilo 169

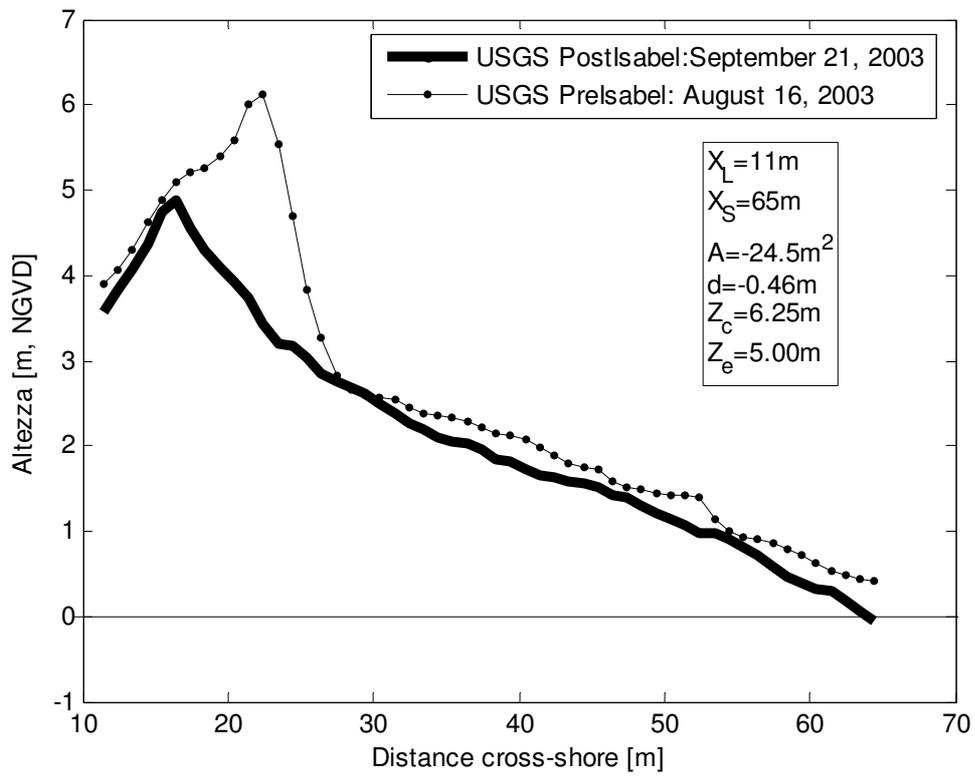


Figura A-2.19. Kitty Hawk: profilo 179

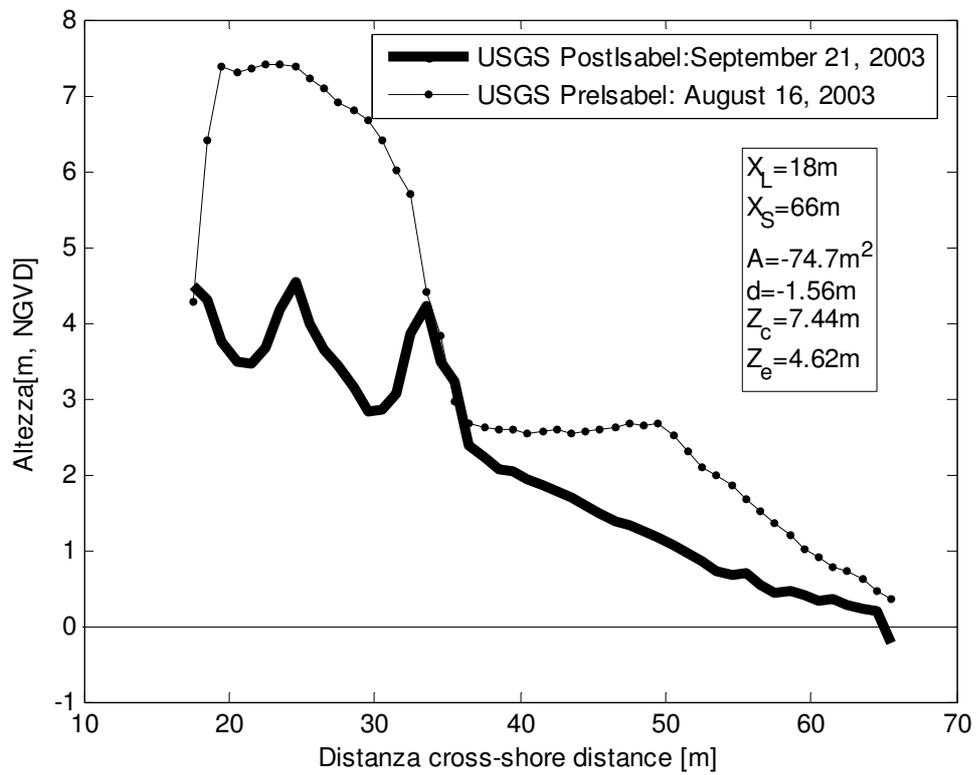


Figura A-2.20. Kitty Hawk: profilo 189

A-3. Area Kill Devis Hill

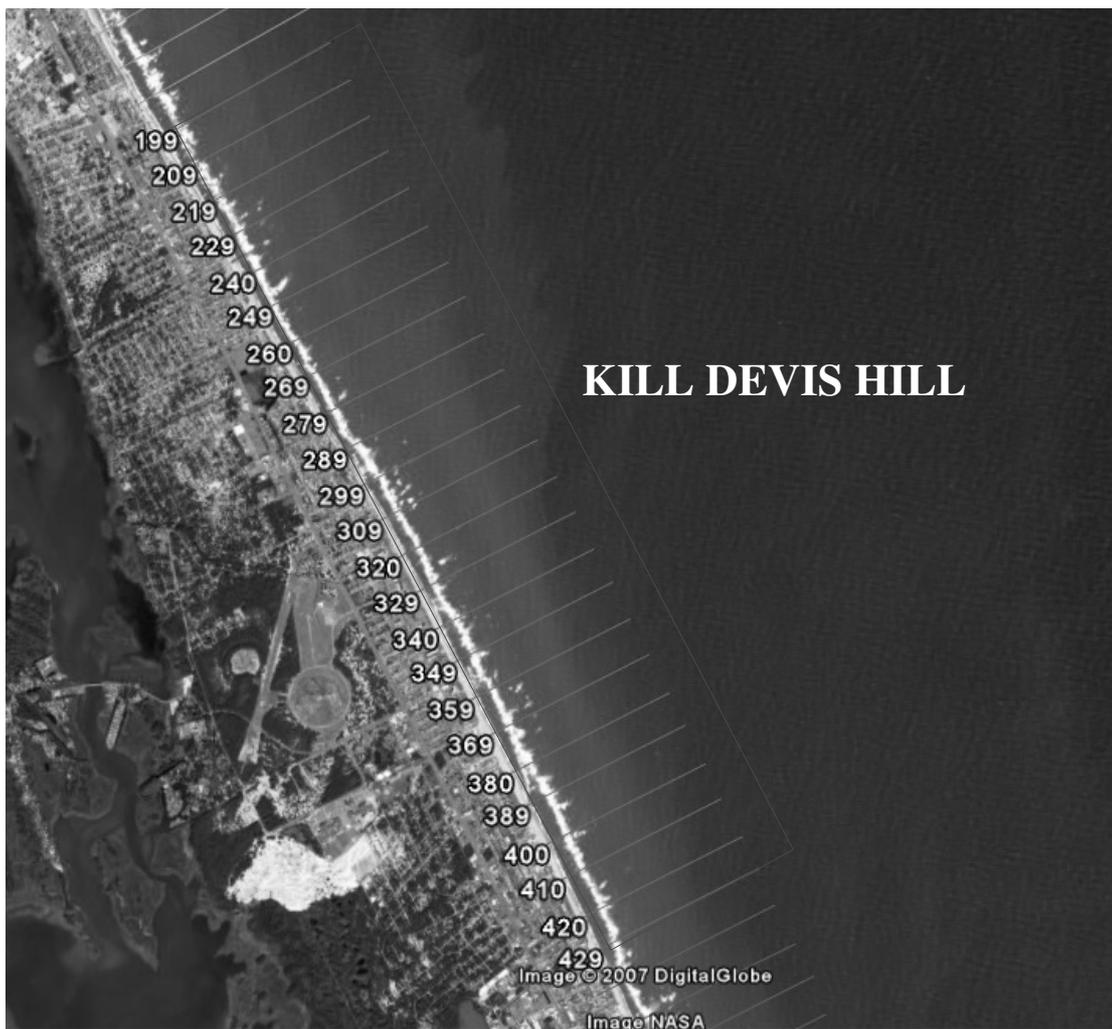


Figura A-3.1. Vista dall'alto dei profili LIDAR per l'area di Kill Devis Hill (Immagine da Google Earth)

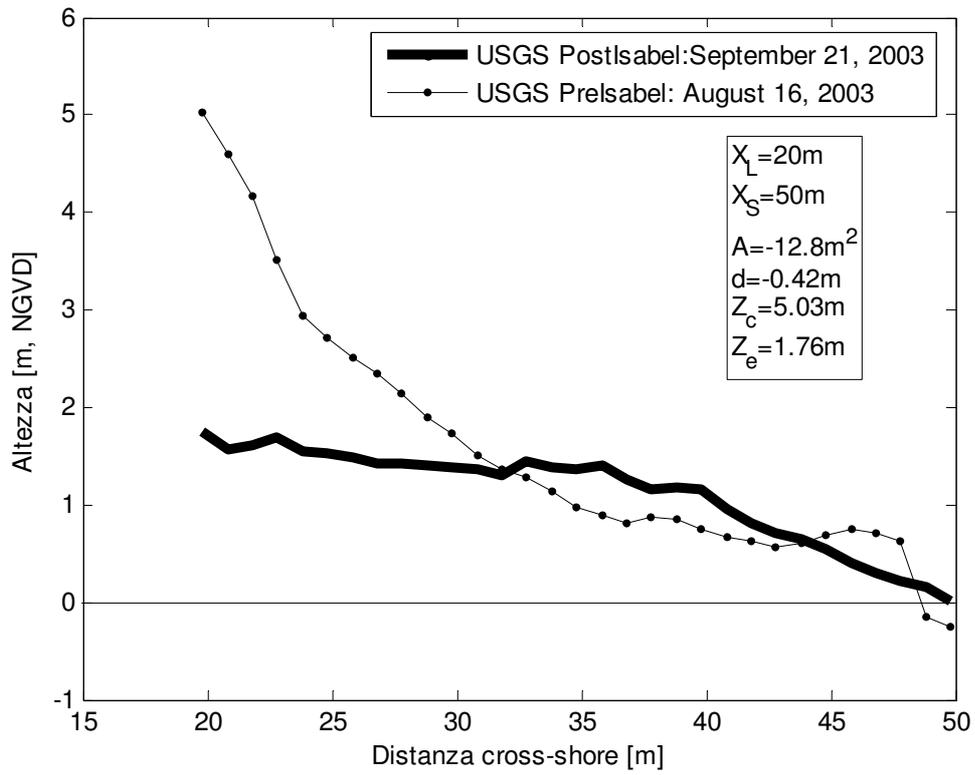


Figura A-3.2. Kill Devis: profilo 199

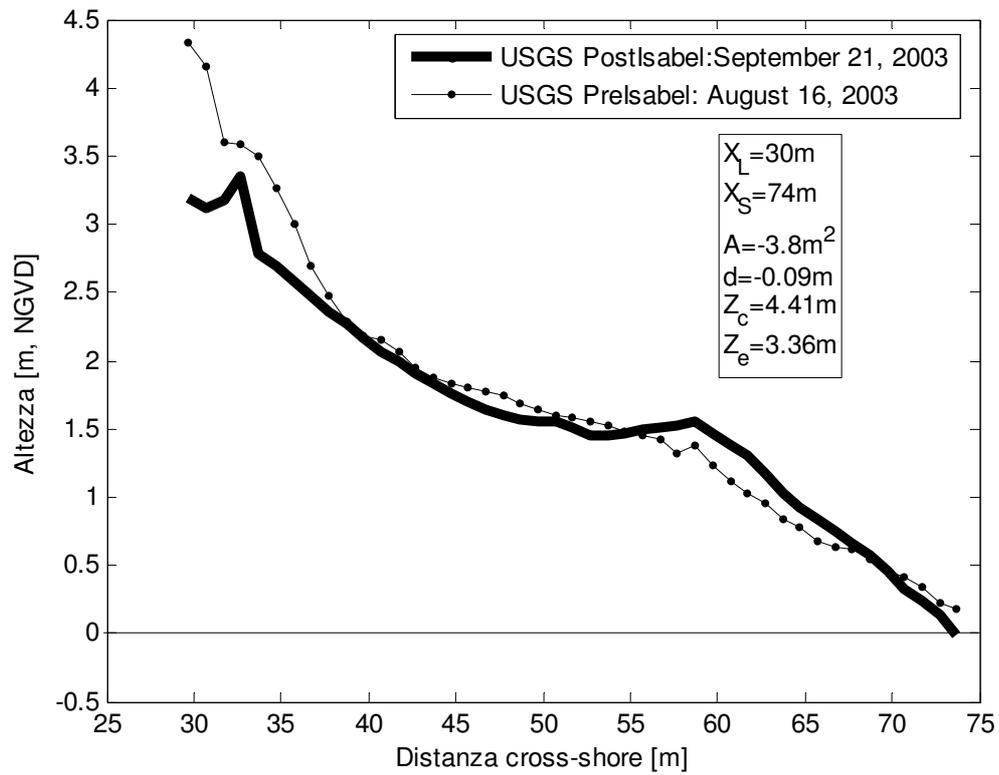


Figura A-3.3. Kill Devis: profilo 209

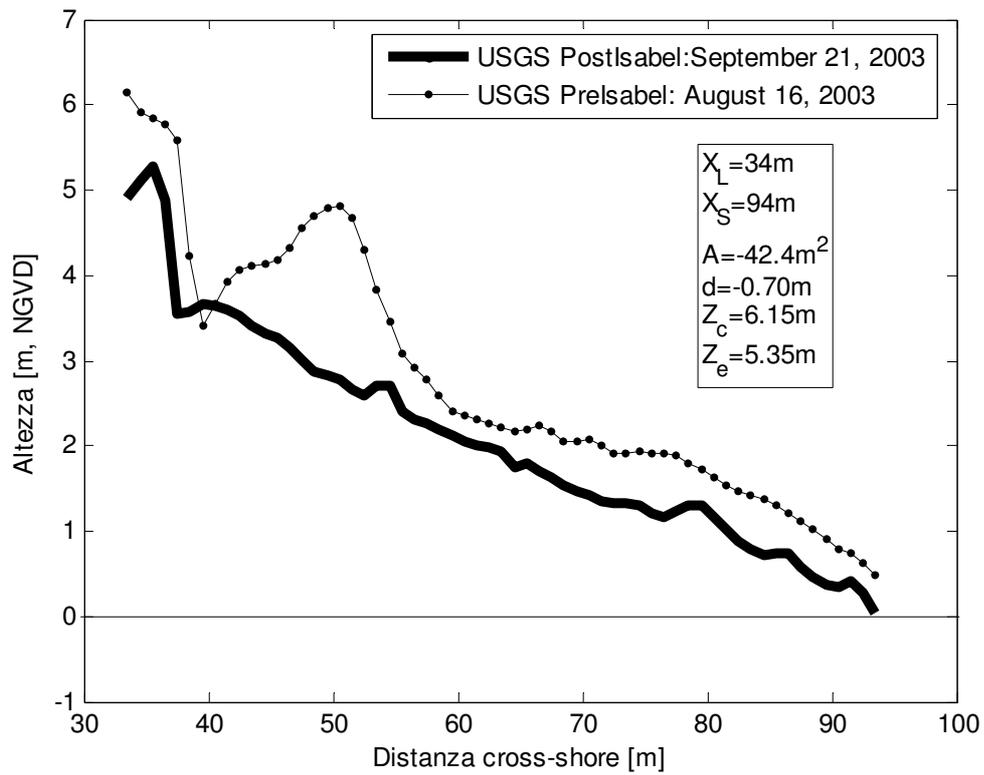


Figura A-3.4. Kill Devis: profilo 219

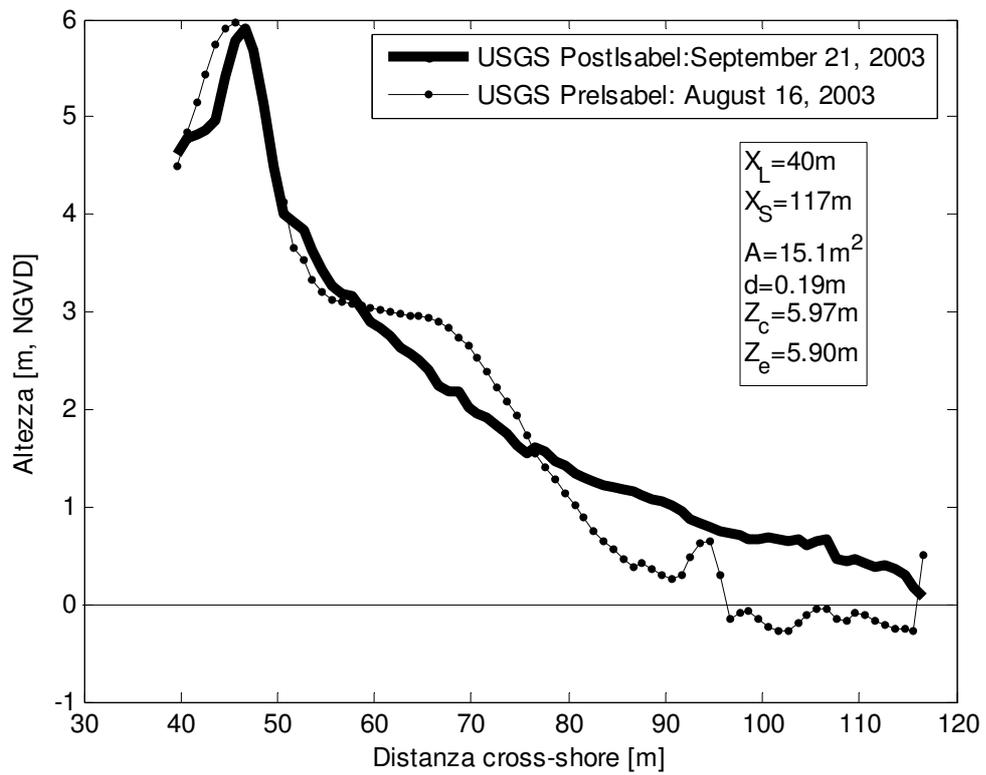


Figura A-3.5. Kill Devis: profilo 229

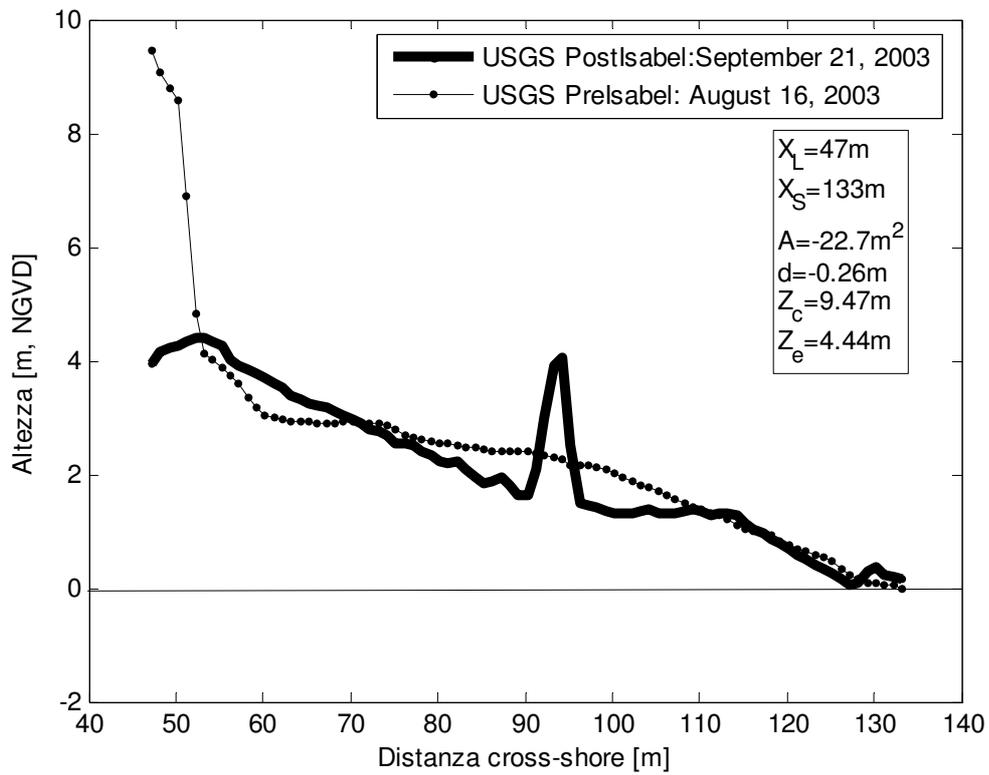


Figura A-3.6. Kill Devis: profilo 240

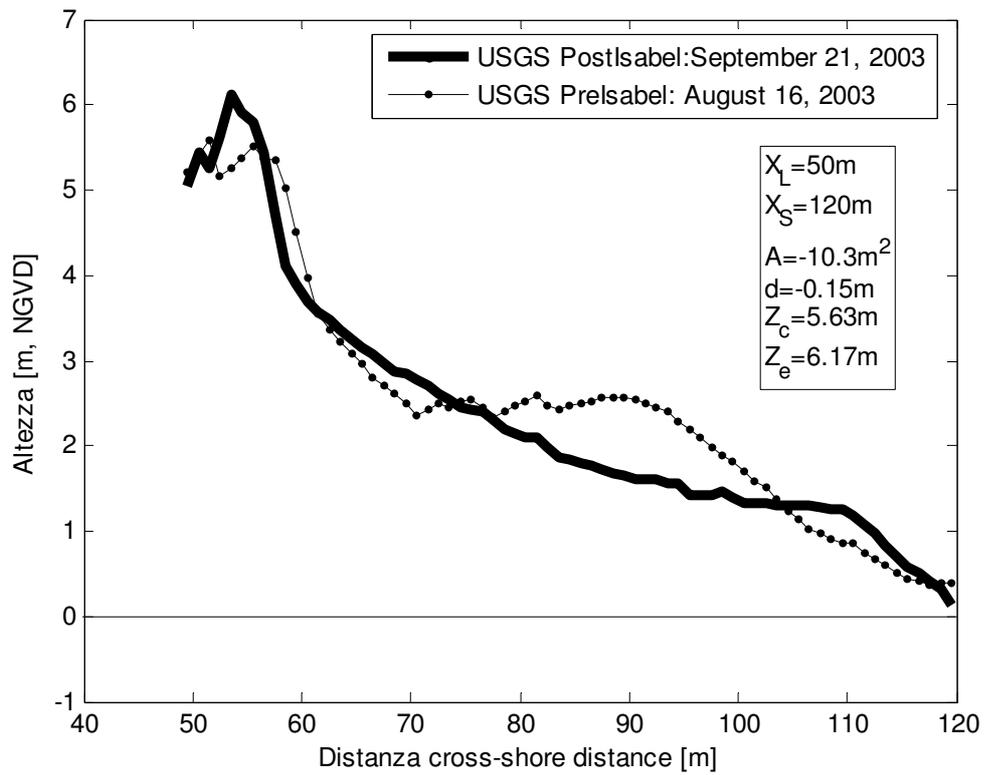


Figura A-3.7. Kill Devis: profilo 249

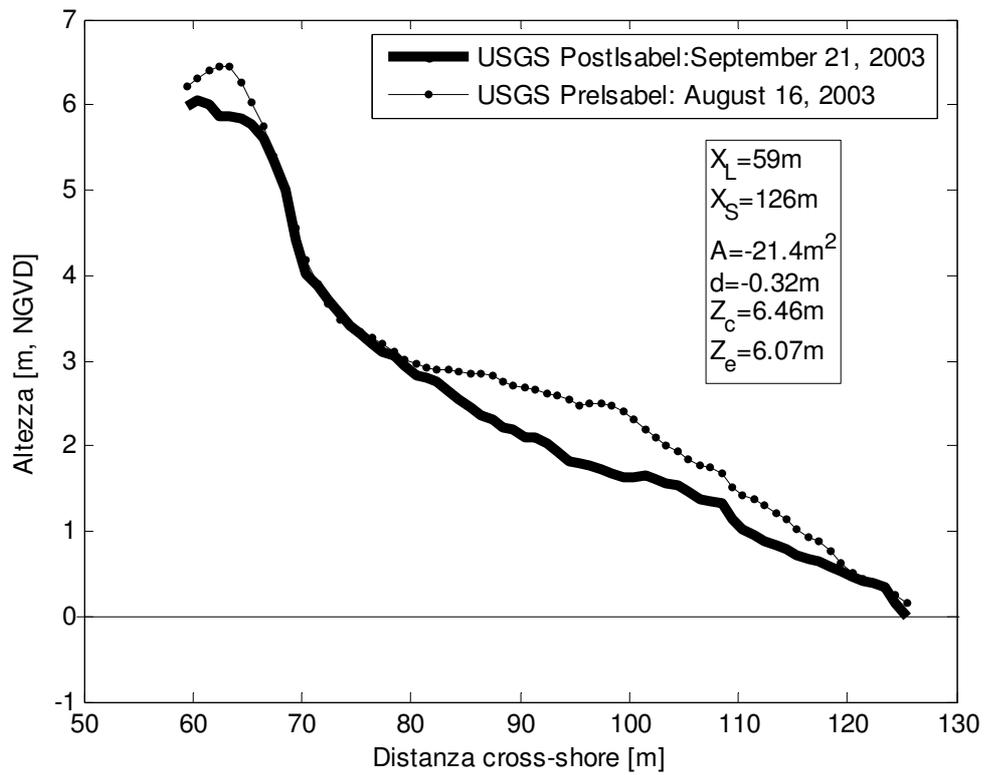


Figura A-3.8. Kill Devis: profilo 260

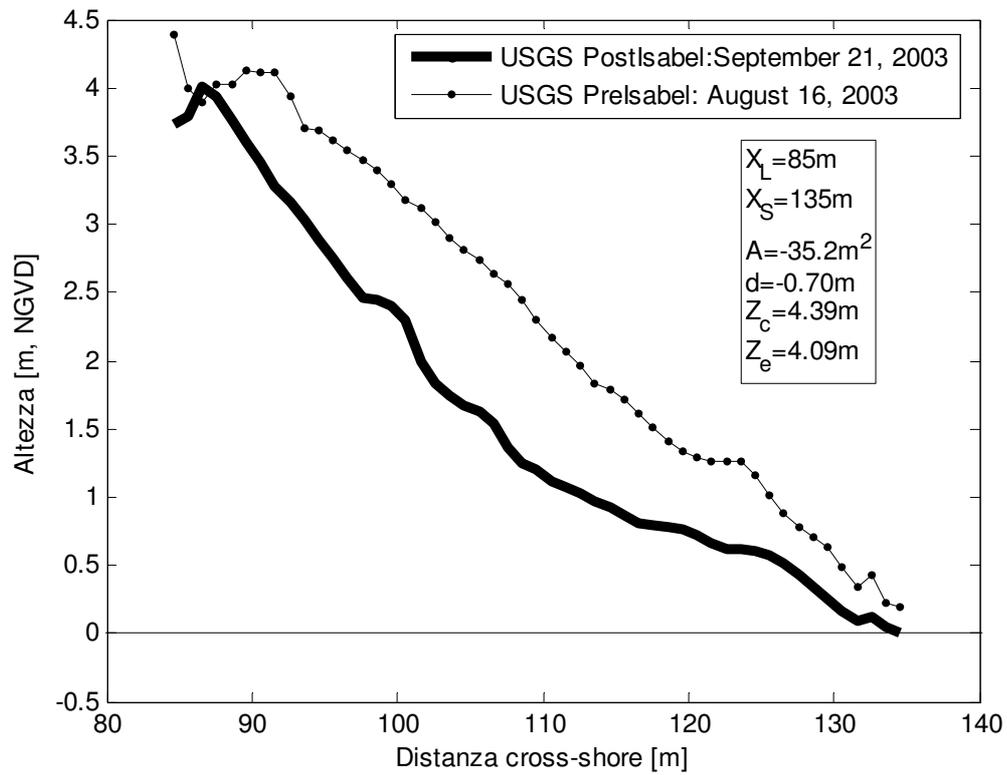


Figura A-3.9. Kill Devis: profilo 269

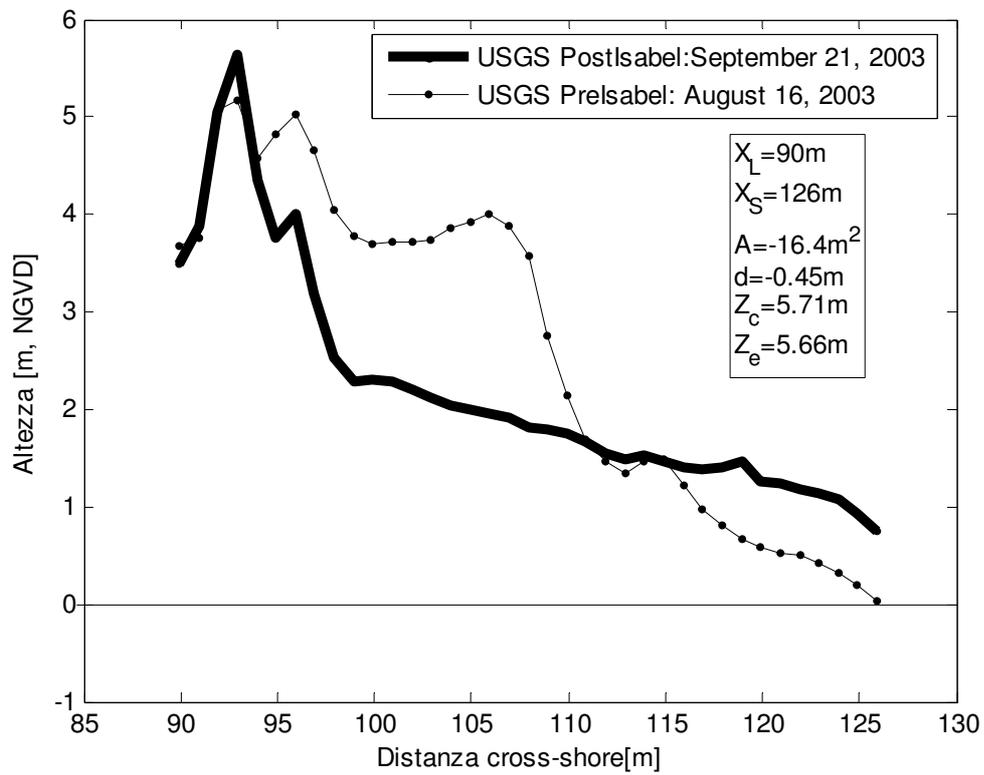


Figura A-3.10. Kill Devis: profilo 279

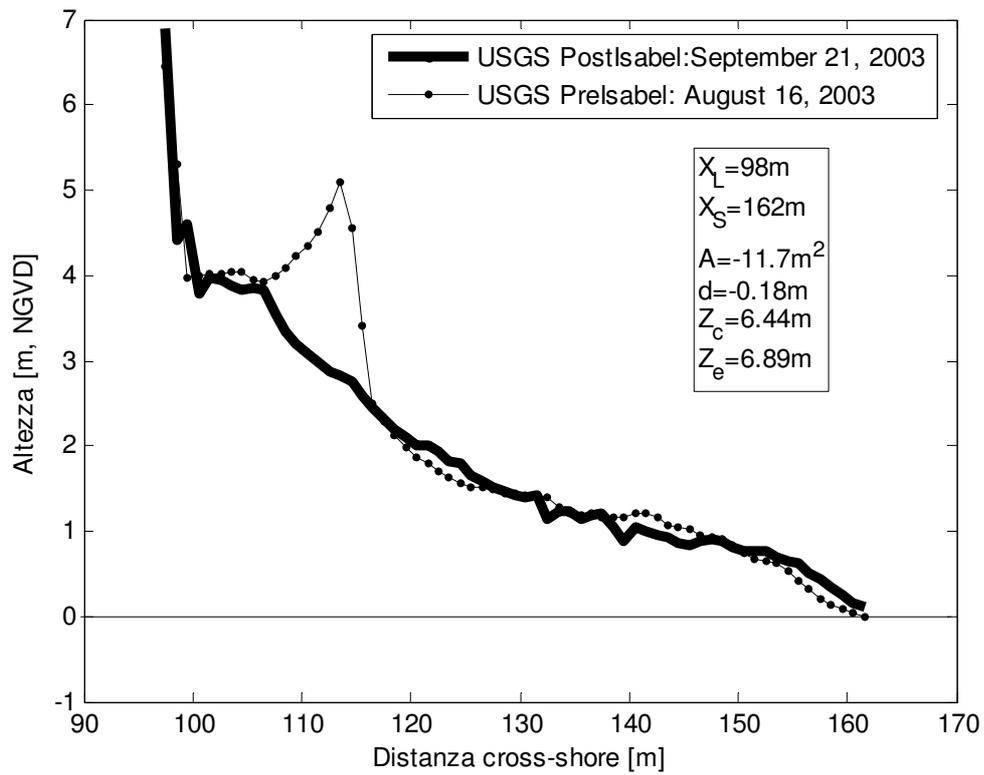


Figura A-3.11. Kill Devis: profilo 289

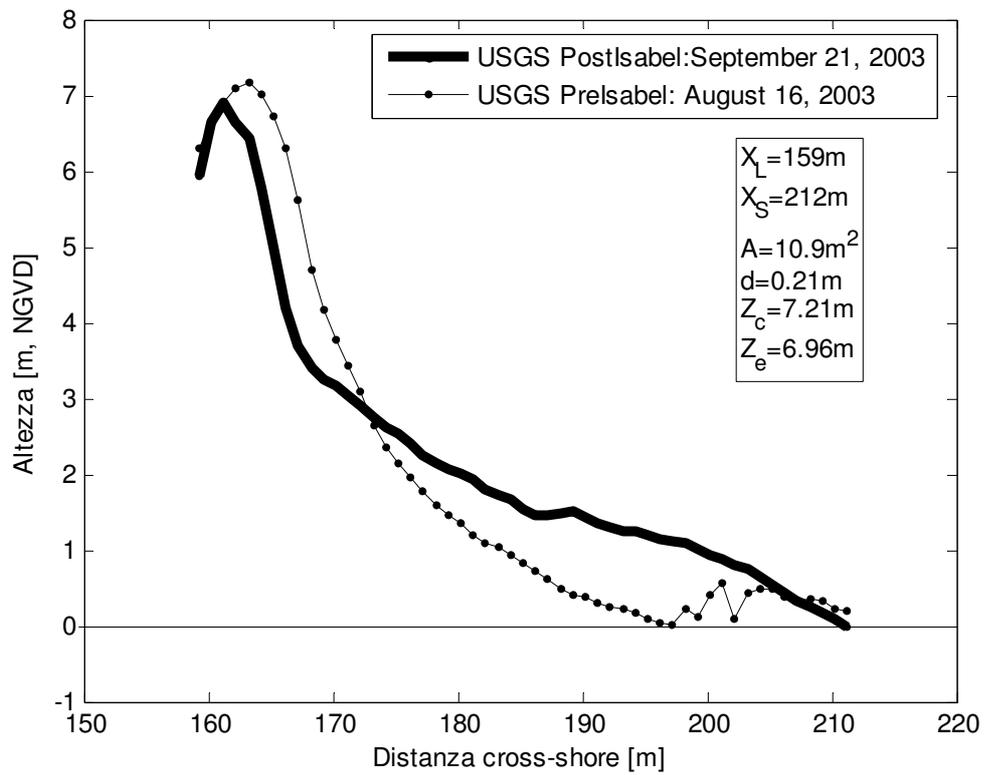


Figura A-3.12. Kill Devis: profilo 299

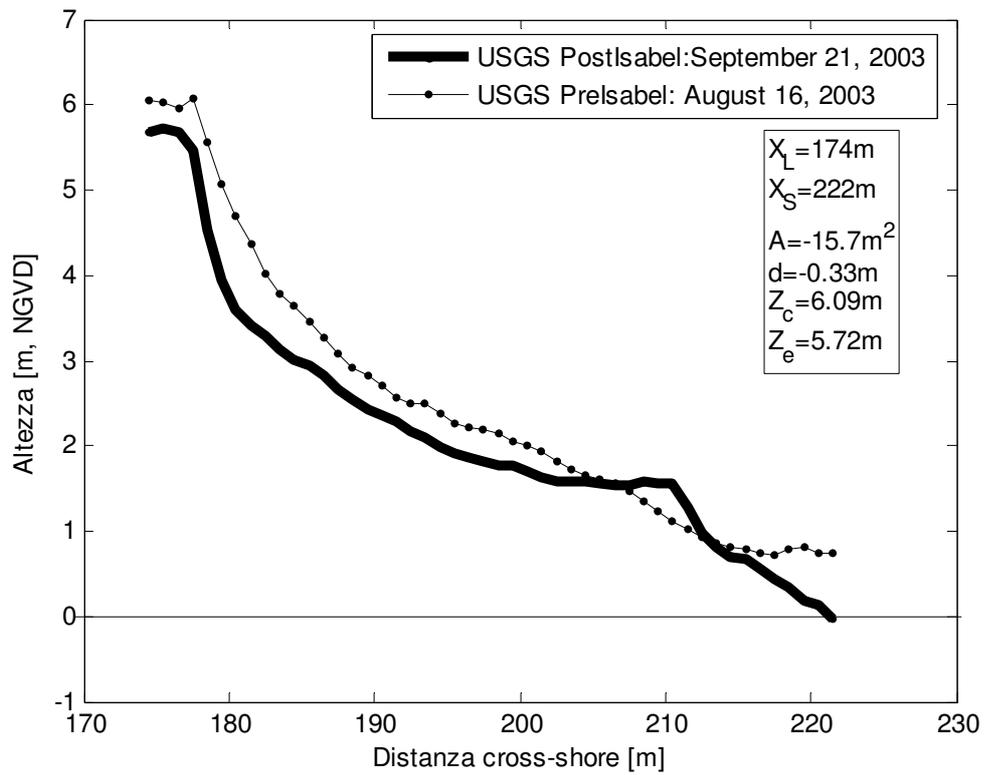


Figura A-3.13. Kill Devis: profilo 309

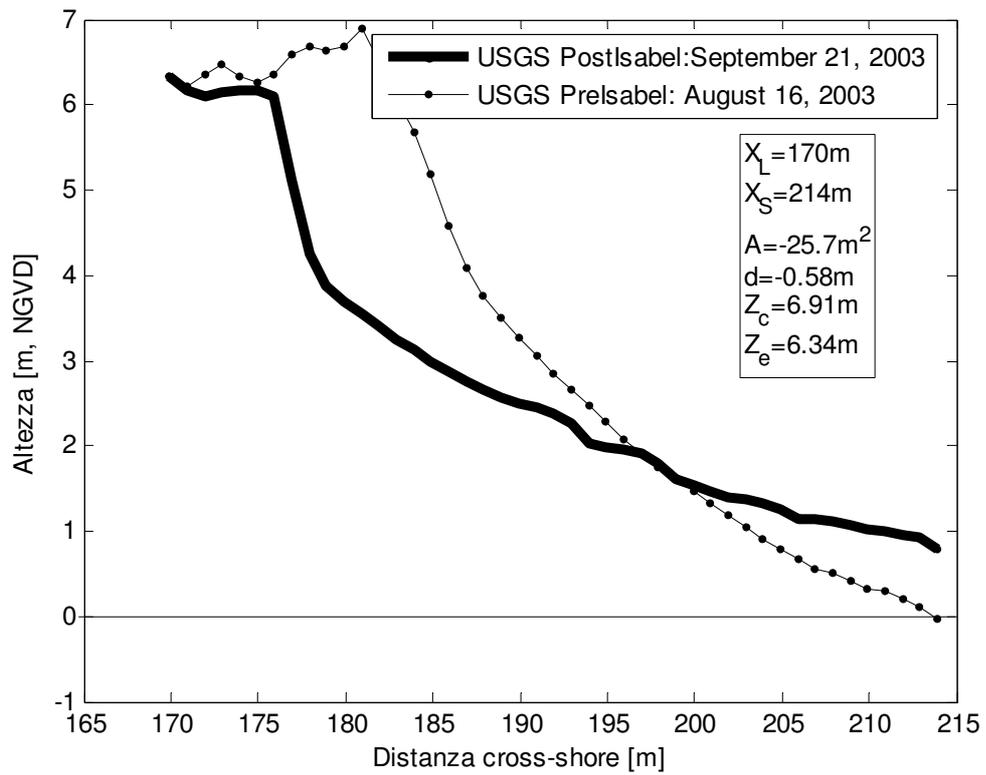


Figura A-3.14. Kill Devis: profilo 320

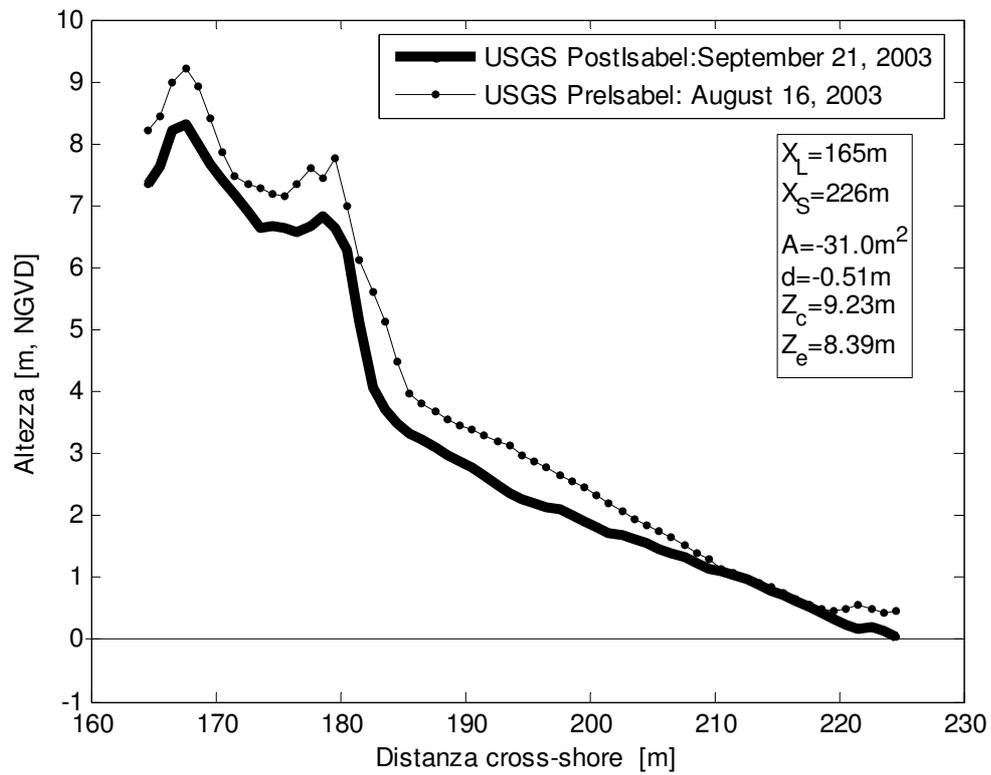


Figura A-3.15. Kill Devis: profilo 329

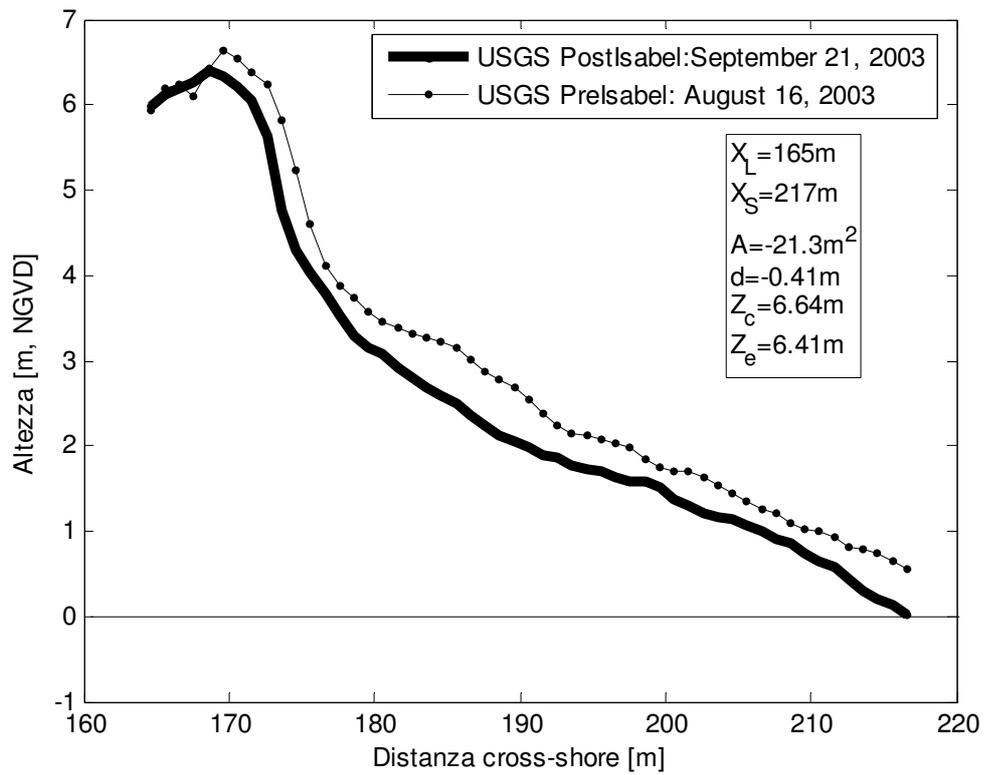


Figura A-3.16. Kill Devis: profilo 340

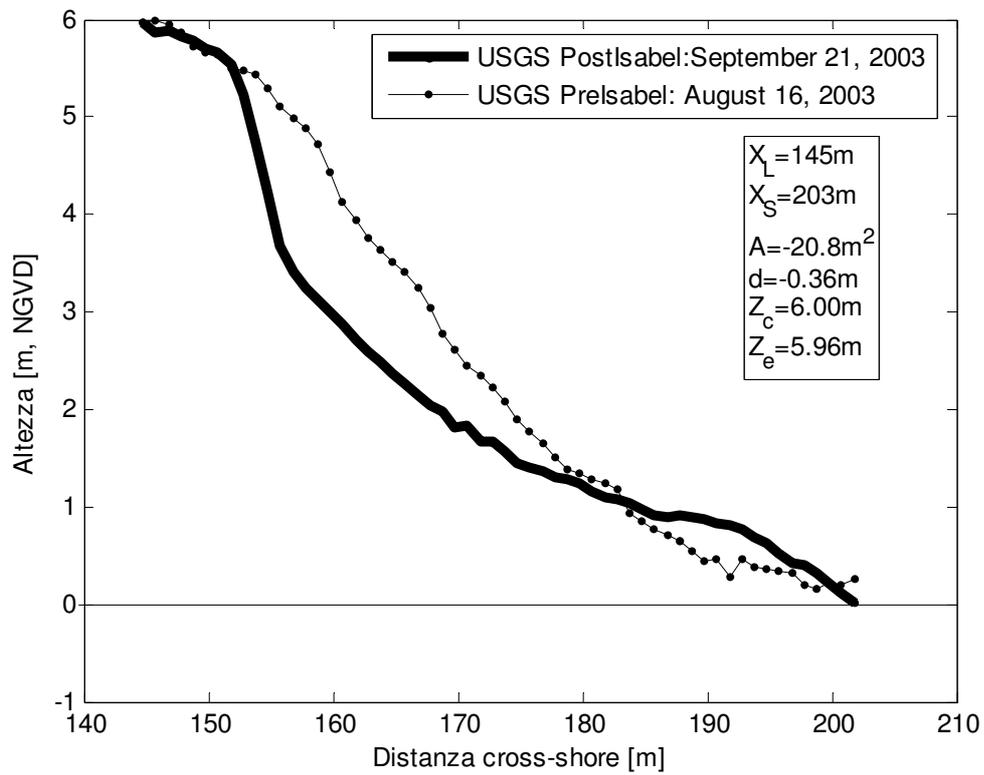


Figura A-3.17. Kill Devis: profilo 349

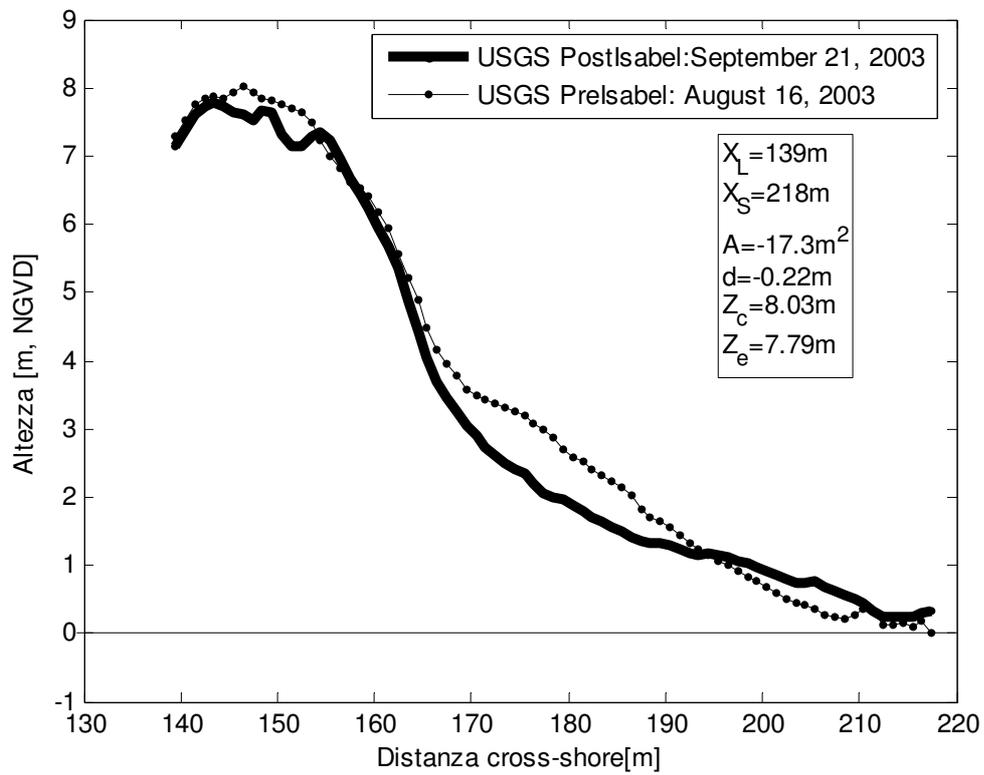


Figura A-3.18. Kill Devis: profilo 359

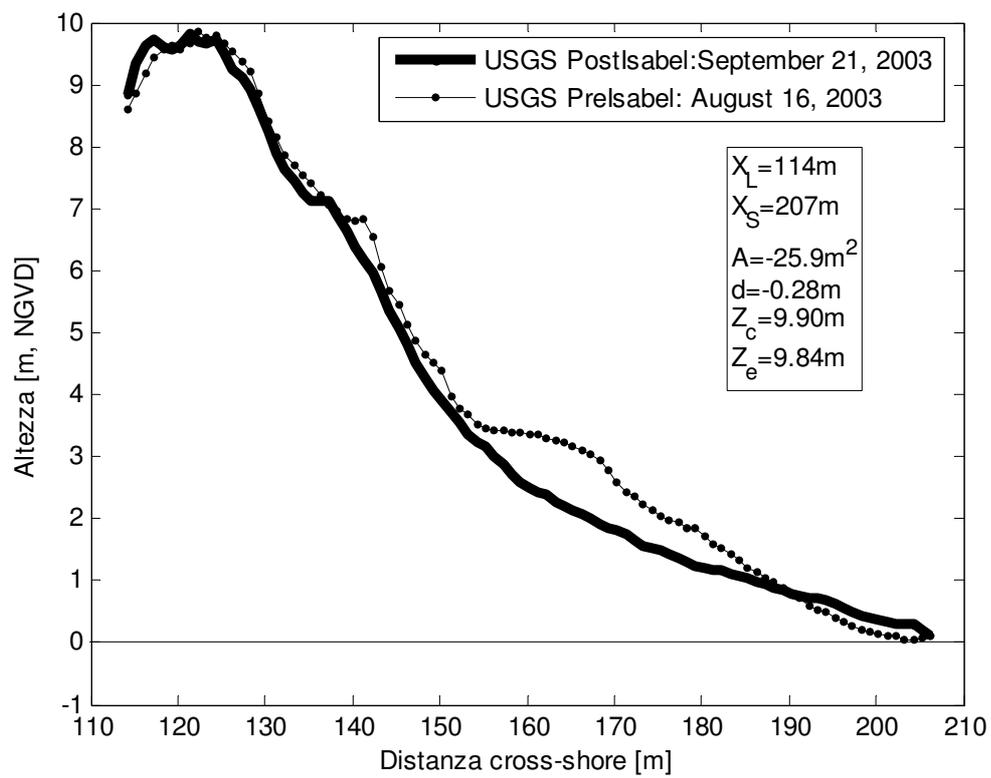


Figura A-3.19. Kill Devis: profilo 369

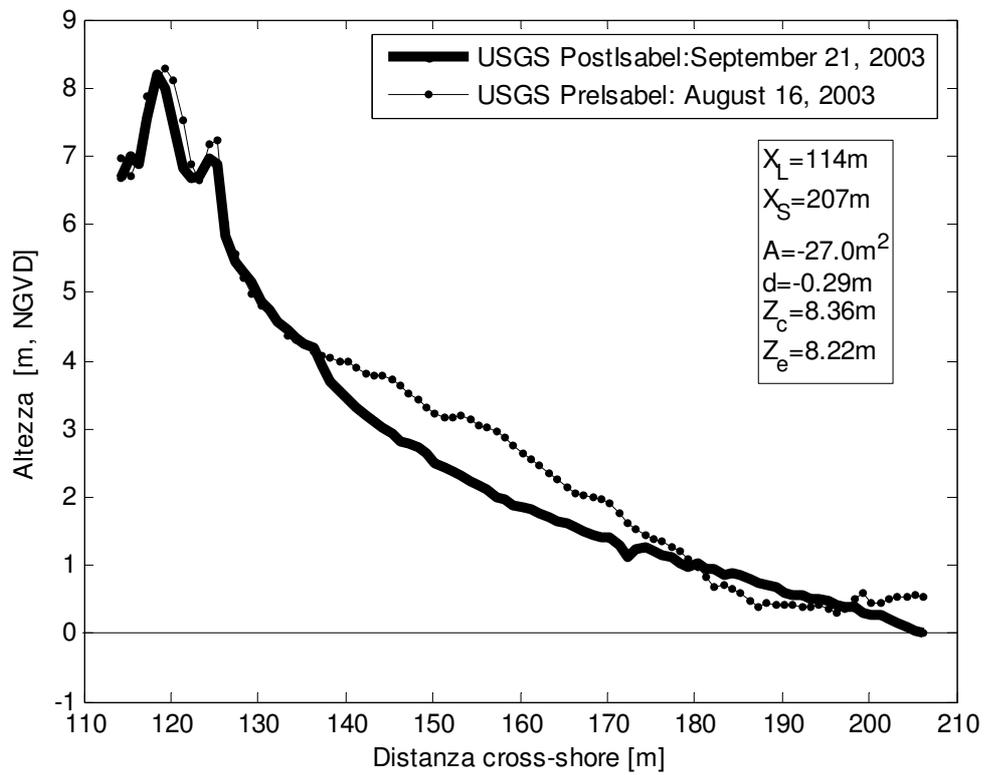


Figura A-3.20. Kill Devis: profilo 380

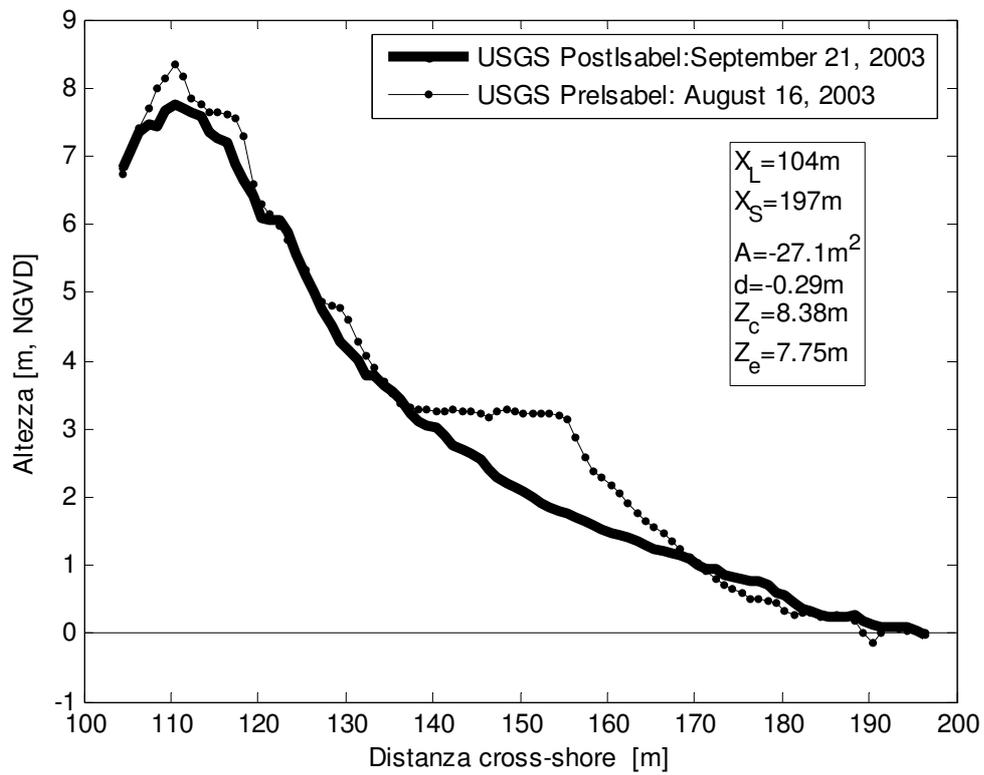


Figura A-3.21. Kill Devis: profilo 400

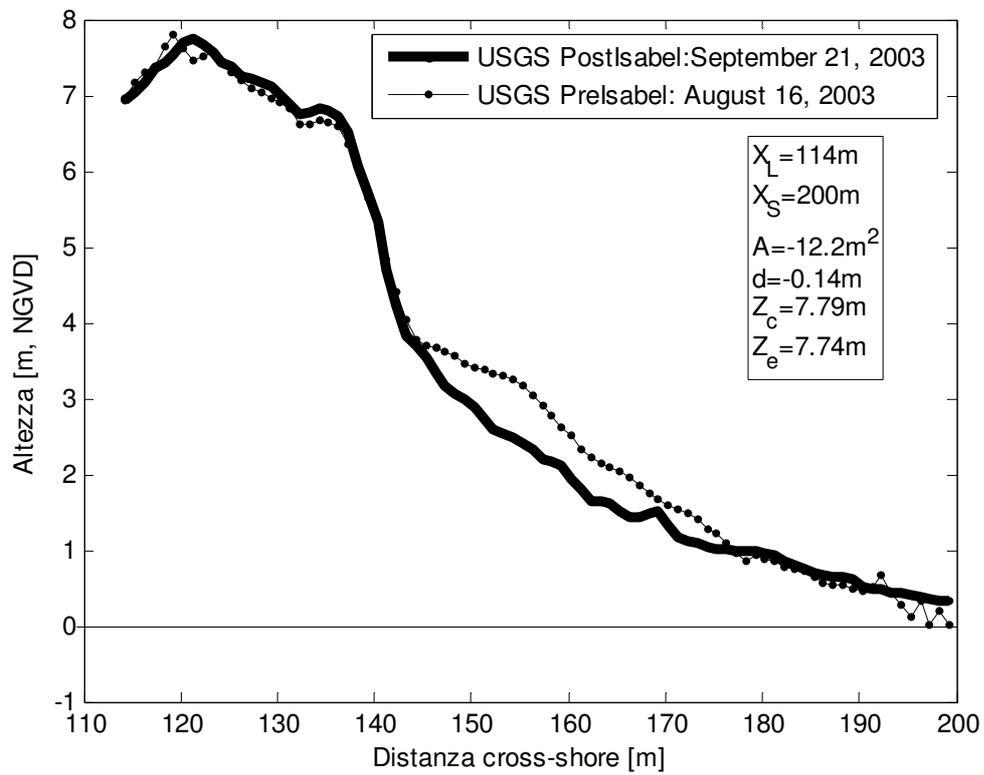


Figura A-3.22. Kill Devis: profilo 410

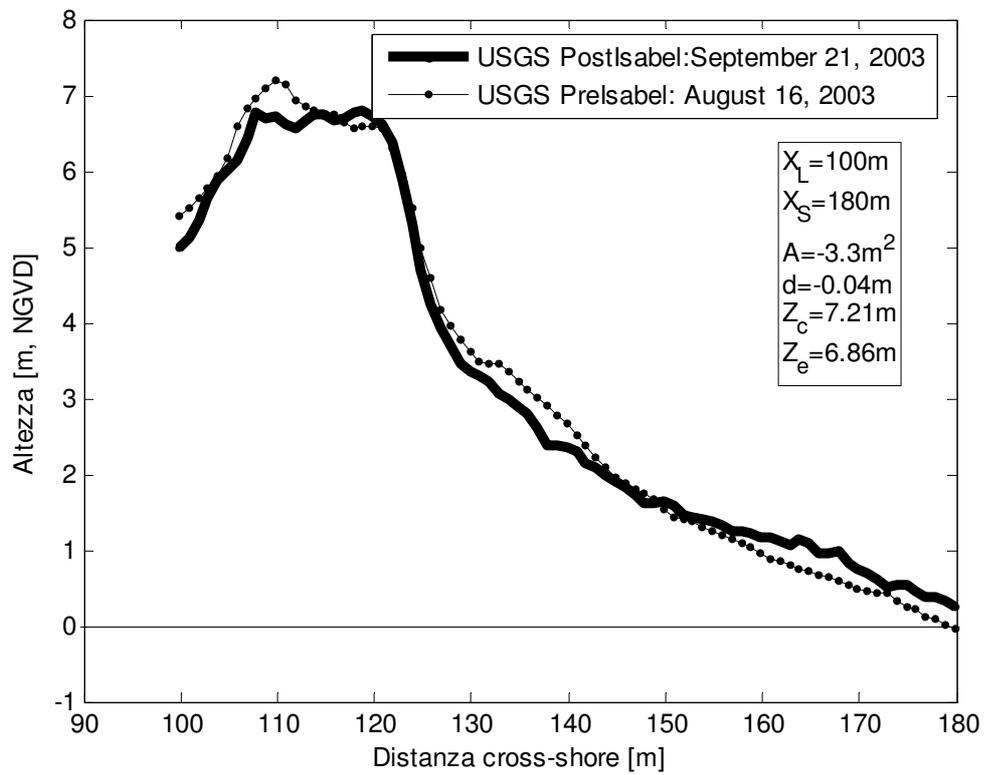


Figura A-3.23. Kill Devis: profilo 420

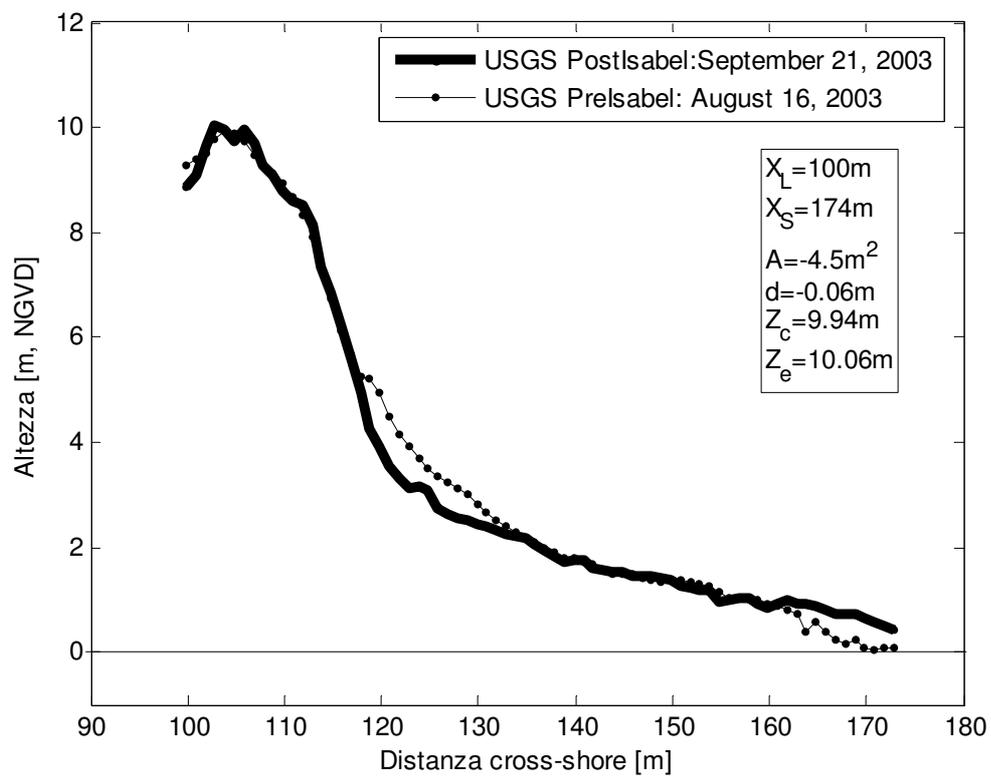


Figura A-3.24. Kill Devis: profilo 429

A-4. Area Nags Head Nord

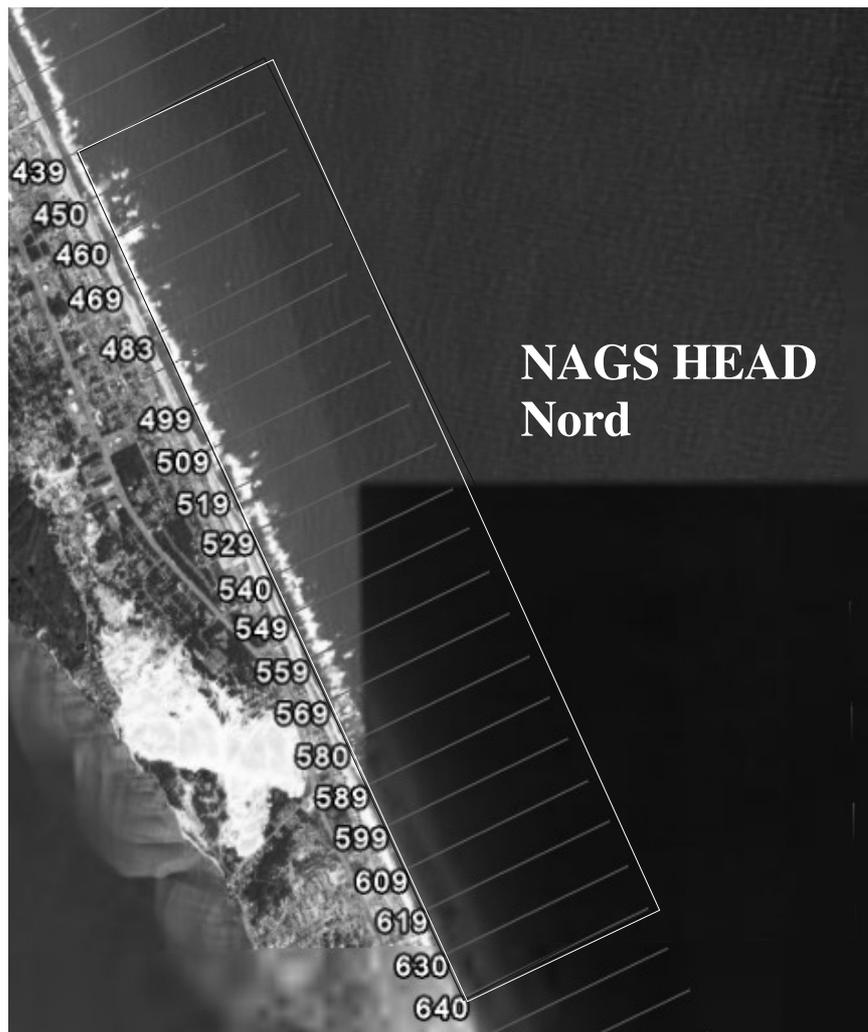


Figura A-4.1. Vista dall'alto dei profili LIDAR per l'area di Nags Head Nord (Immagine da Google Earth)

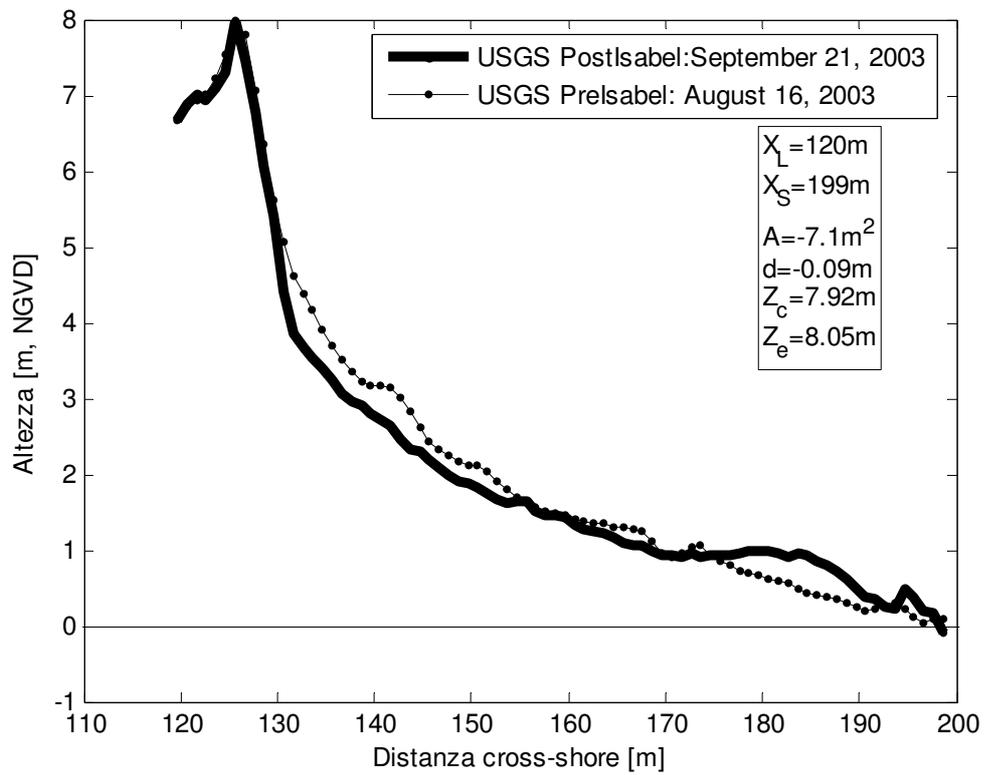


Figura A-4.2. Nags Head Nord: profilo 439

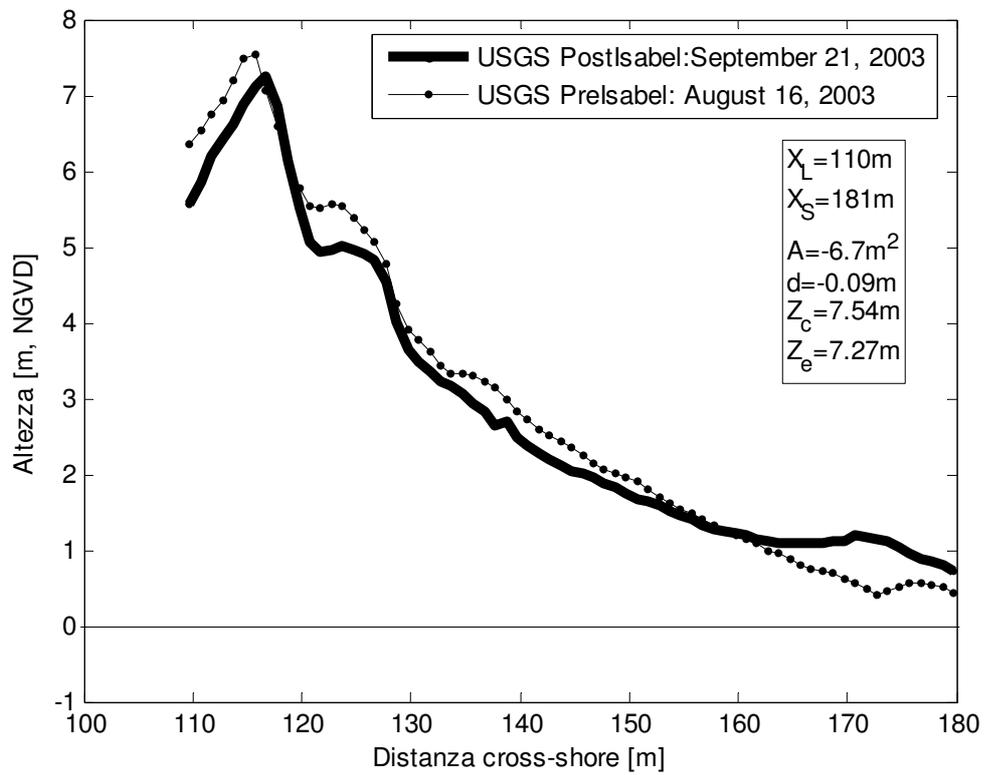


Figura A-4.3. Nags Head Nord: profilo 450

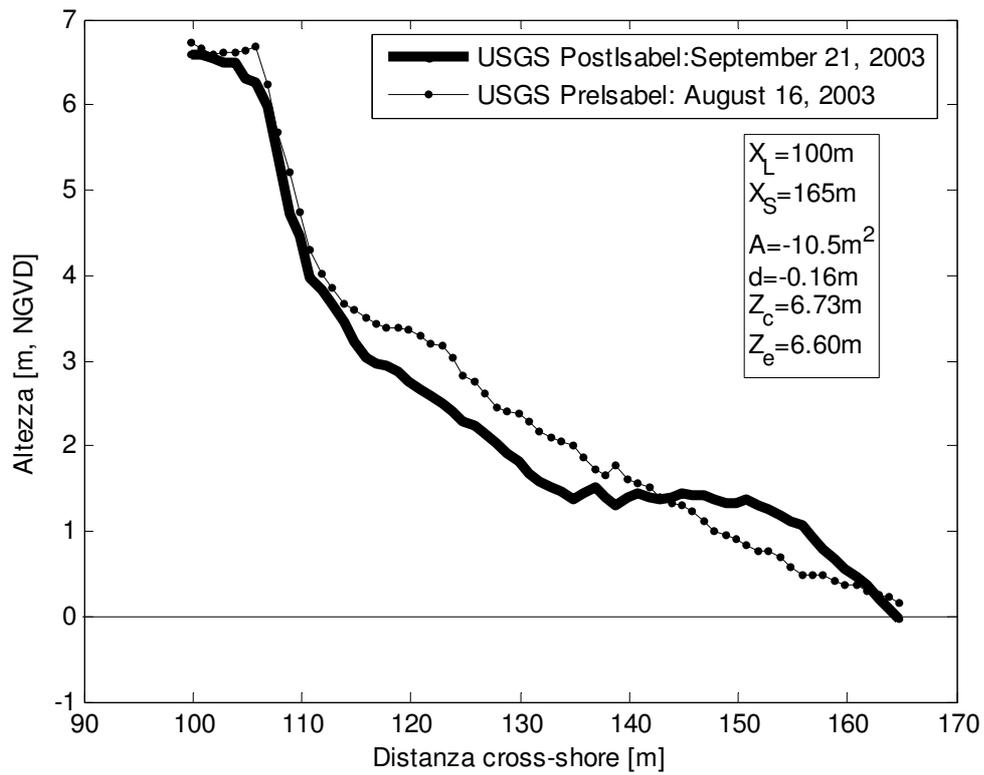


Figura A-4.4. Nags Head Nord: profilo 460

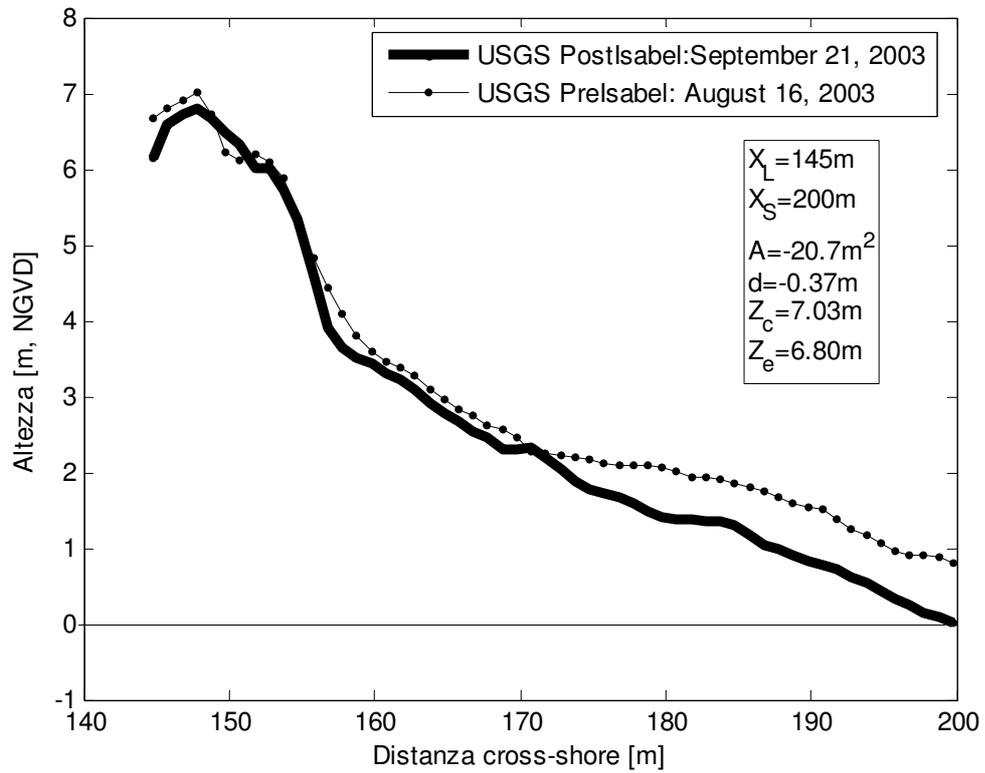


Figura A-4.5. Nags Head Nord: profilo 469

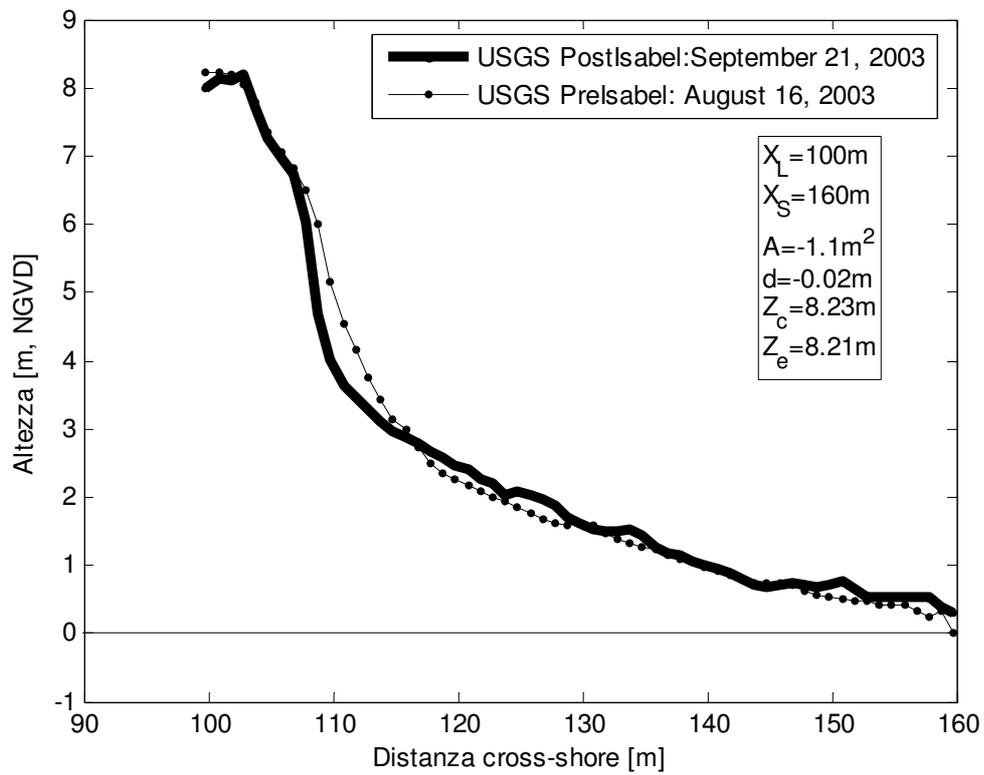


Figura A-4.6. Nags Head Nord: profilo 483

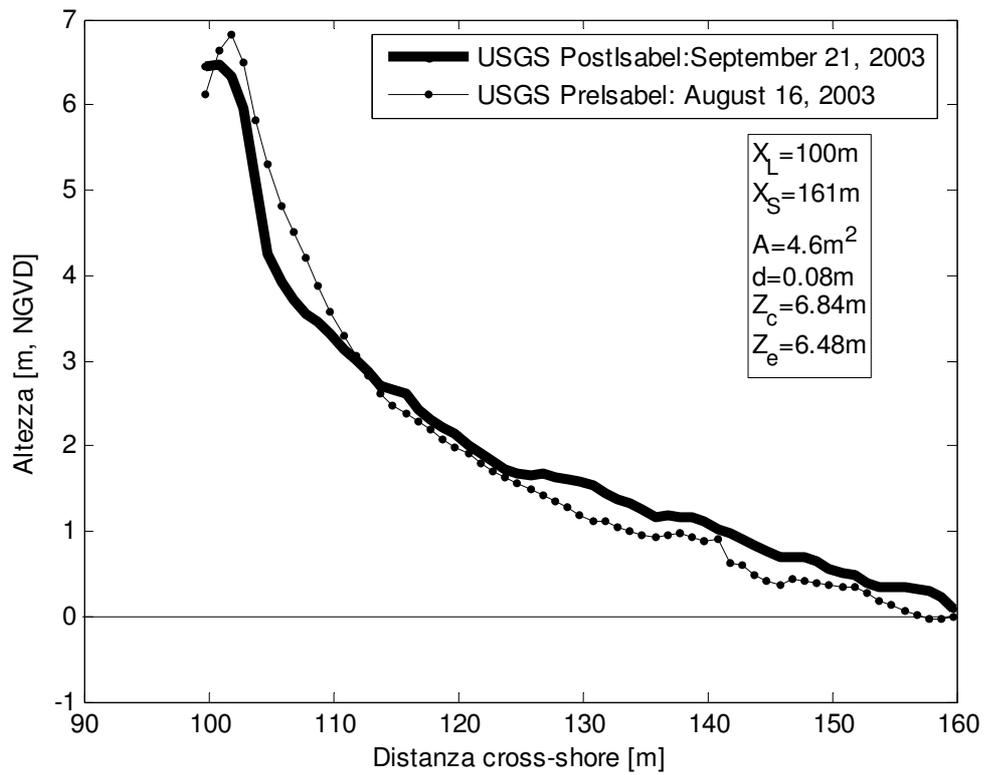


Figura A-4.7. Nags Head Nord: profilo 489

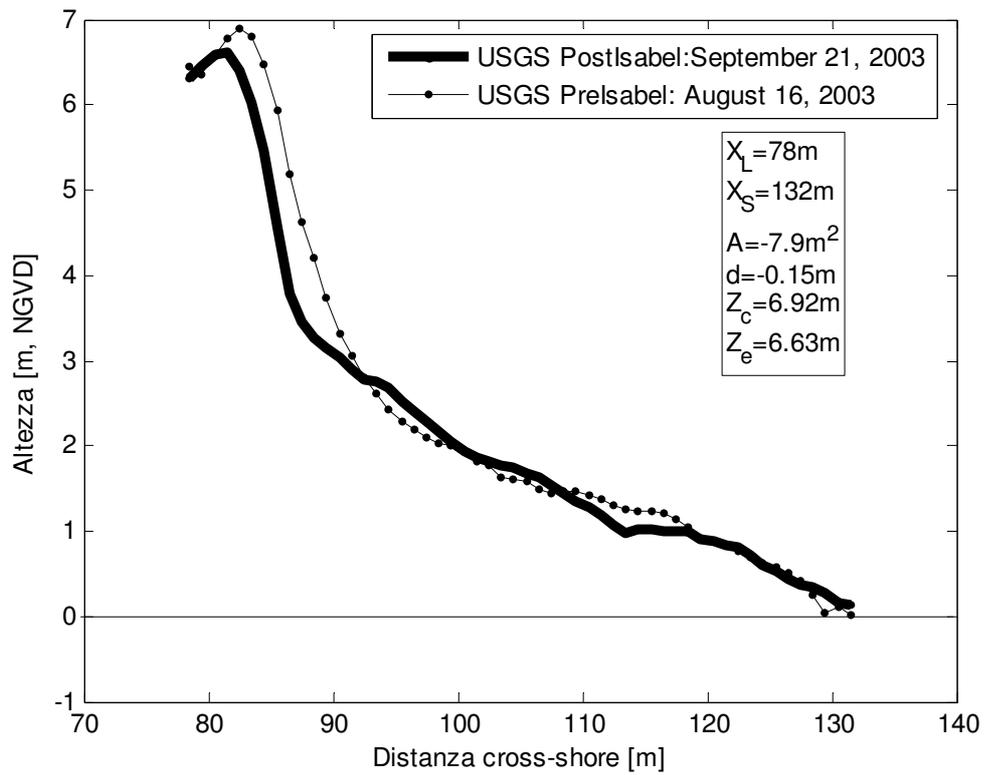


Figura A-4.8. Nags Head Nord: profilo 499

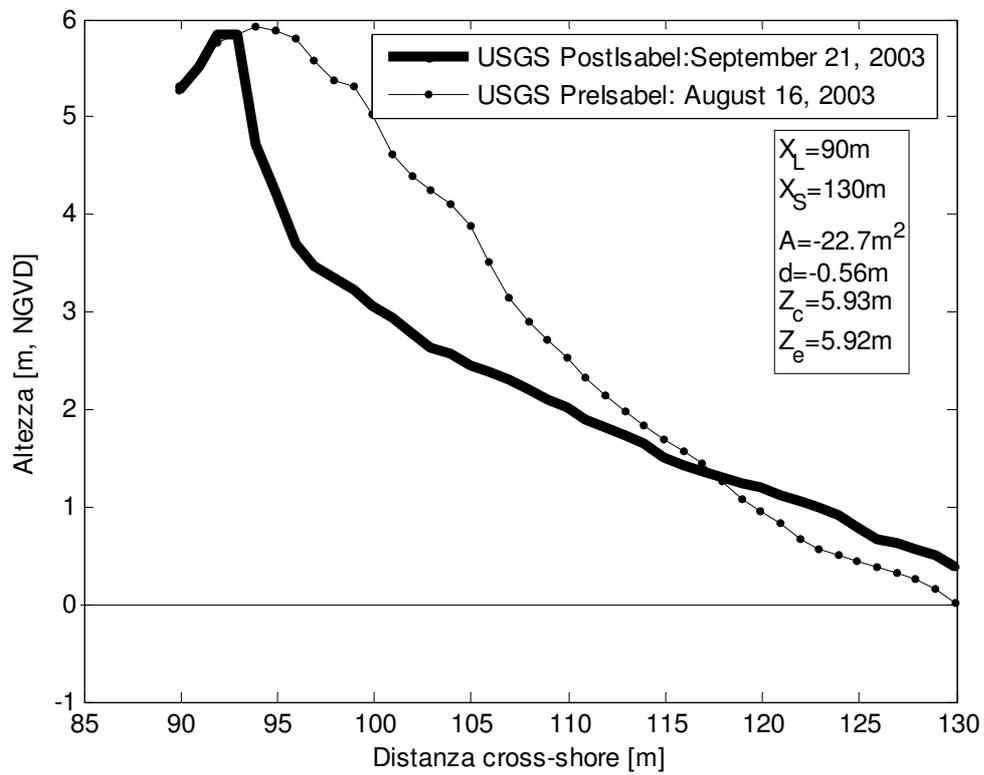


Figura A-4.9. Nags Head Nord: profilo 509

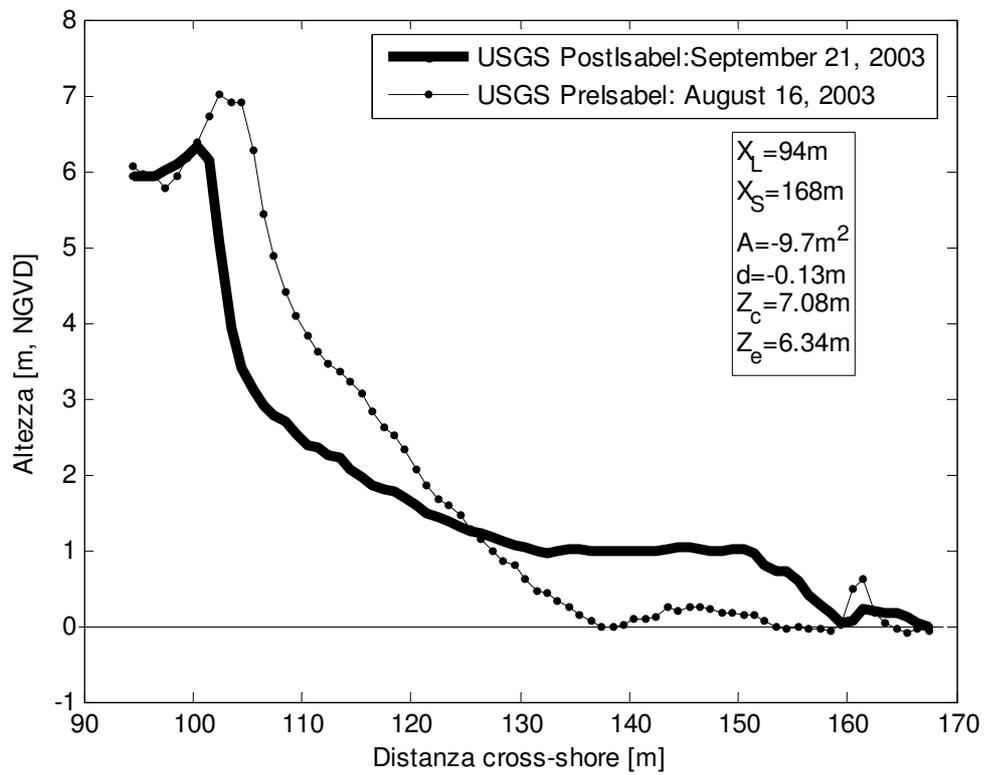


Figura A-4.10. Nags Head Nord: profilo 519

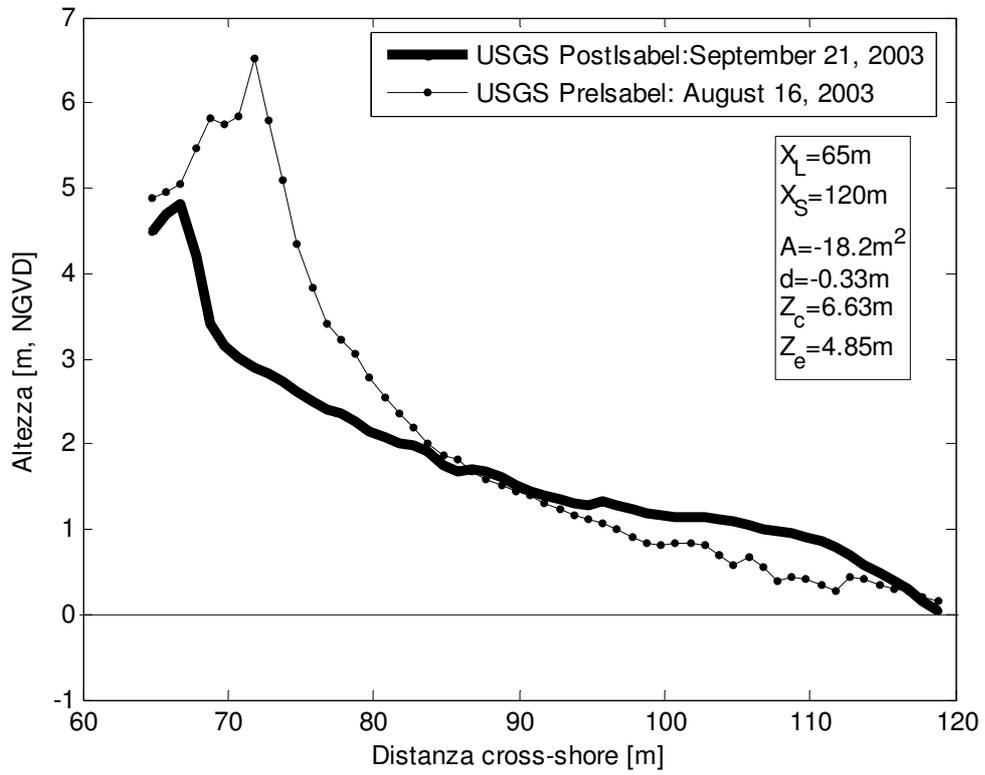


Figura A-4.11. Nags Head Nord: profilo 529

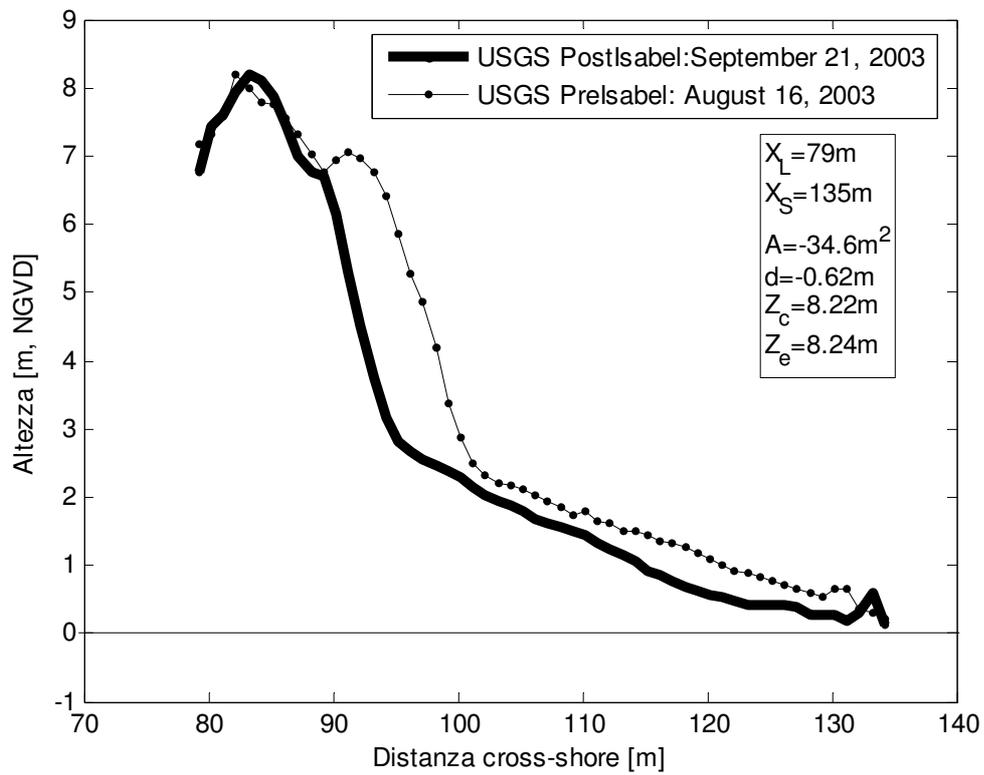


Figura A-4.12. Nags Head Nord: profilo 540

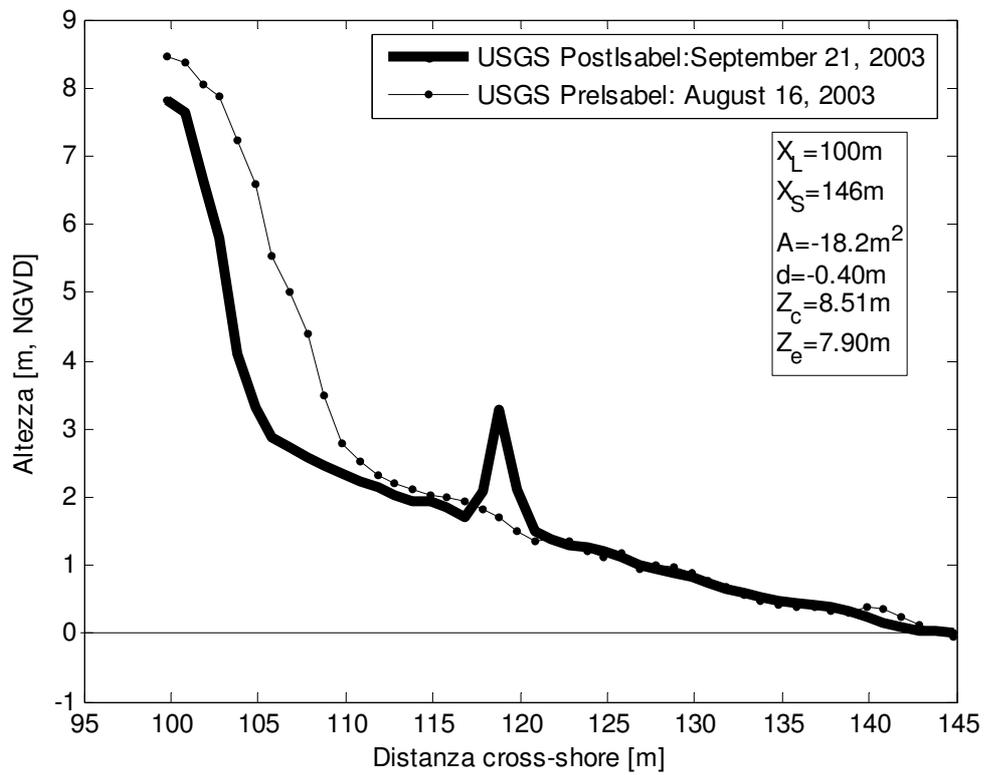


Figura A-4.13. Nags Head Nord: profilo 549

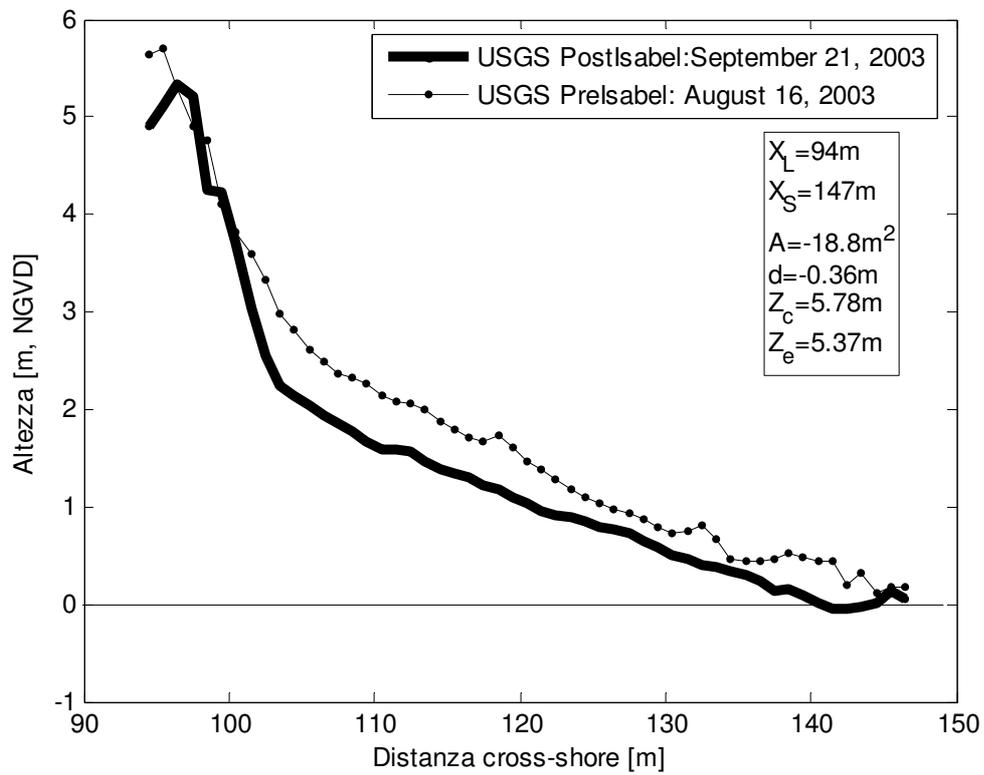


Figura A-4.14. Nags Head Nord: profilo 559

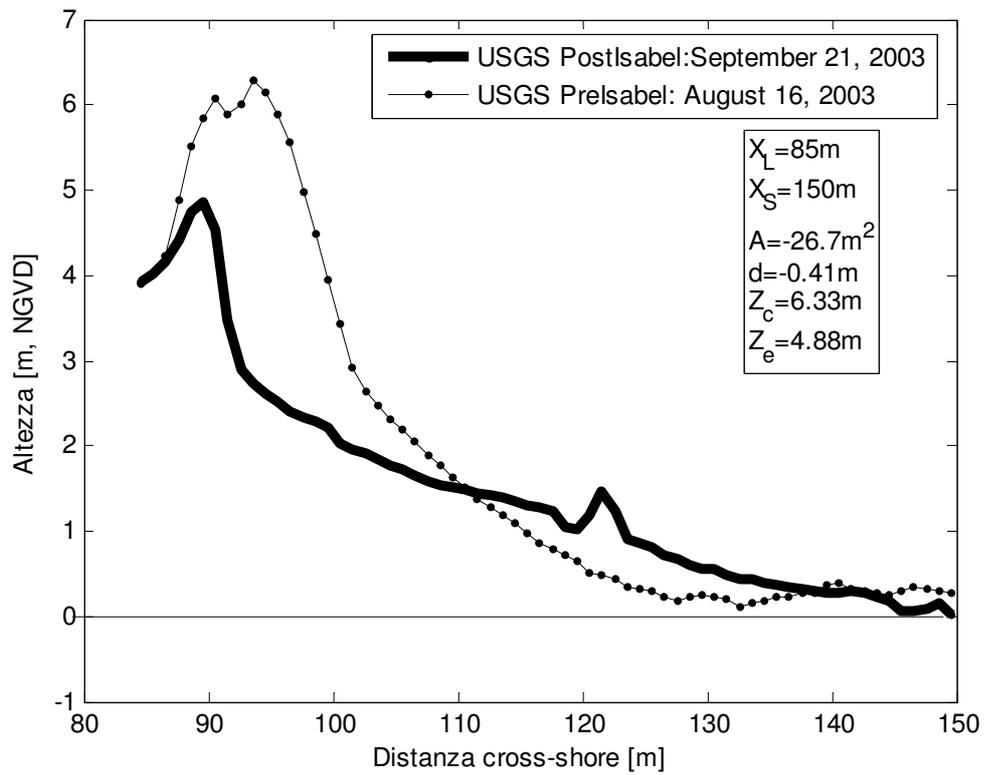


Figura A-4.15. Nags Head Nord: profilo 569

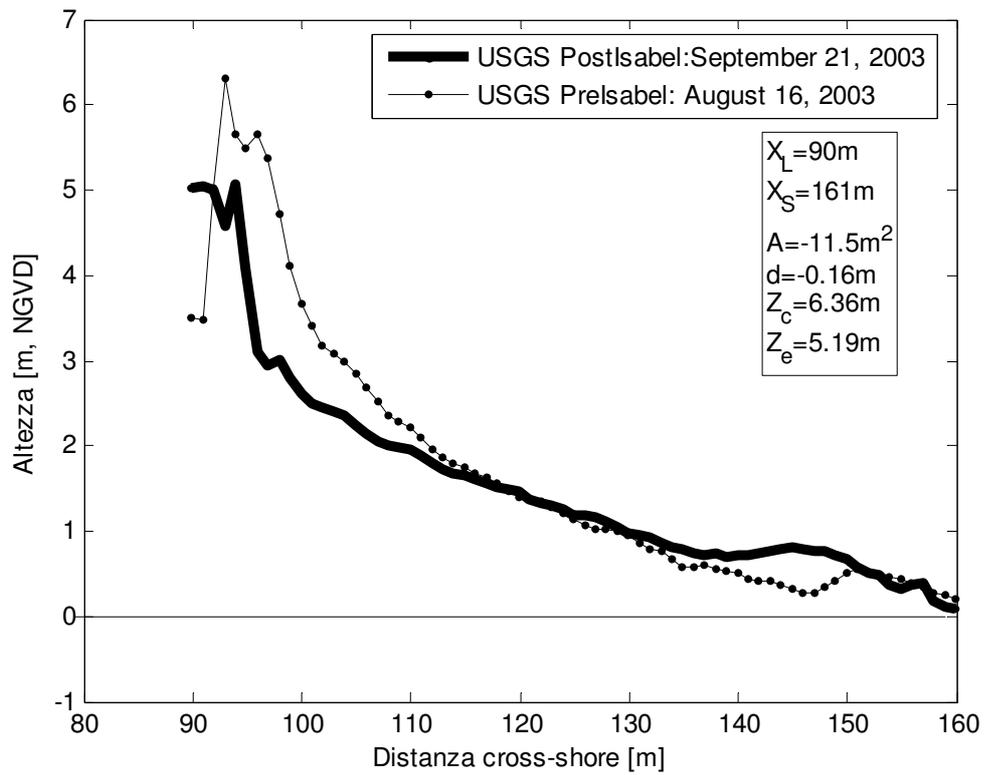


Figura A-4.16. Nags Head Nord: profilo 580

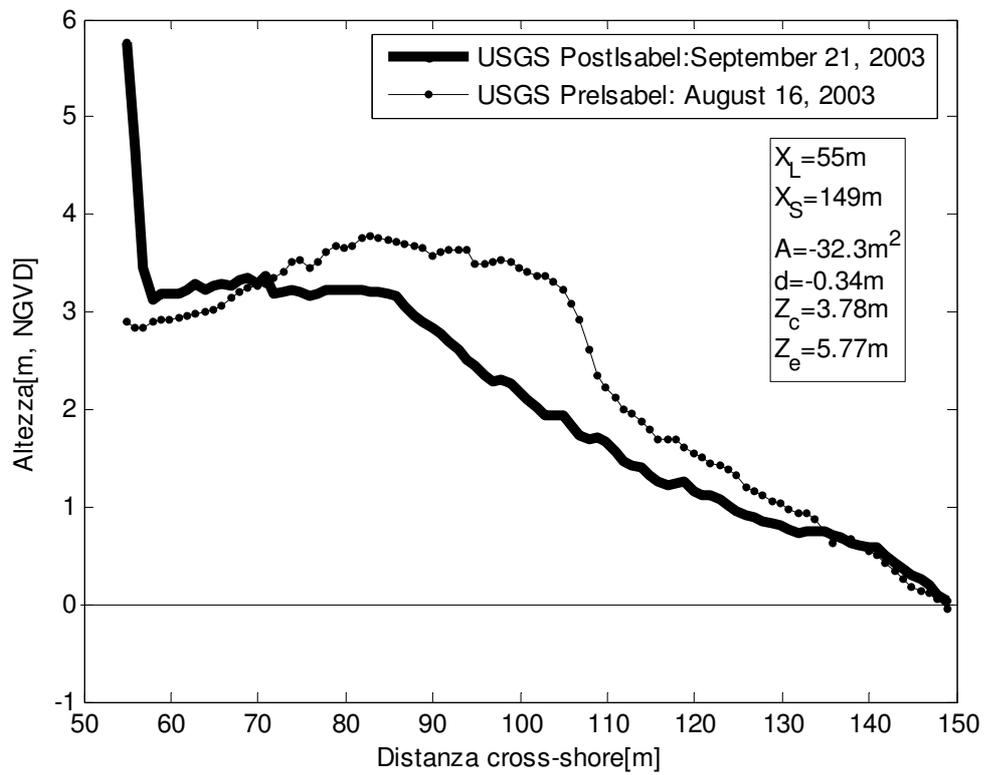


Figura A-4.17. Nags Head Nord: profilo 589

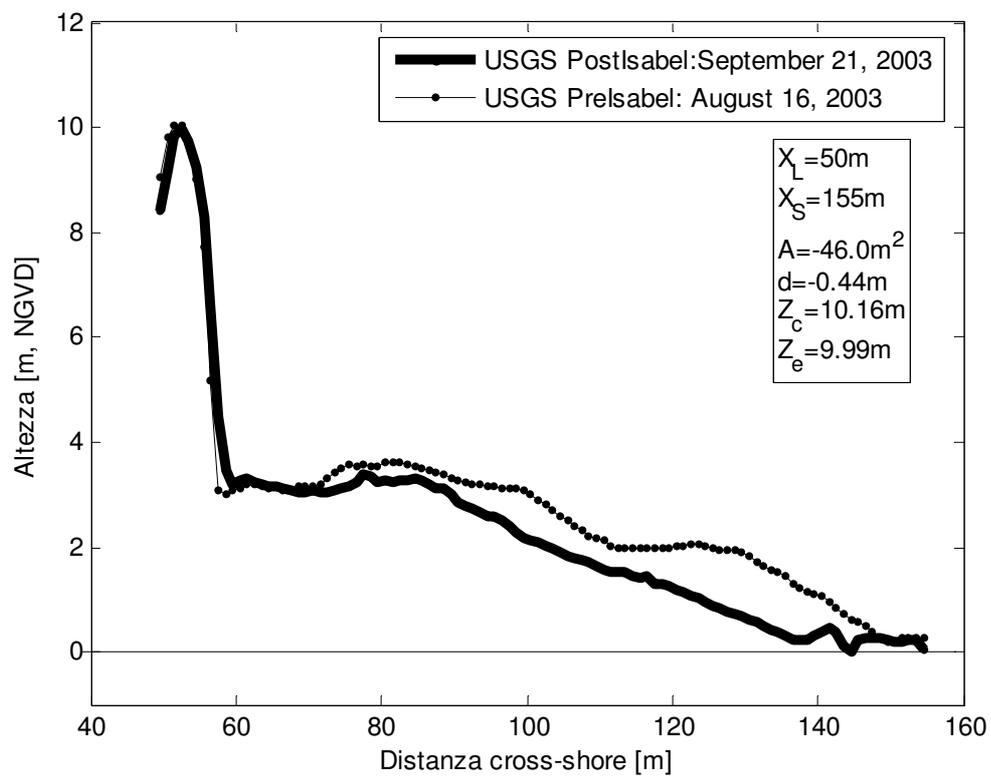


Figura A-4.18. Nags Head Nord: profilo 599

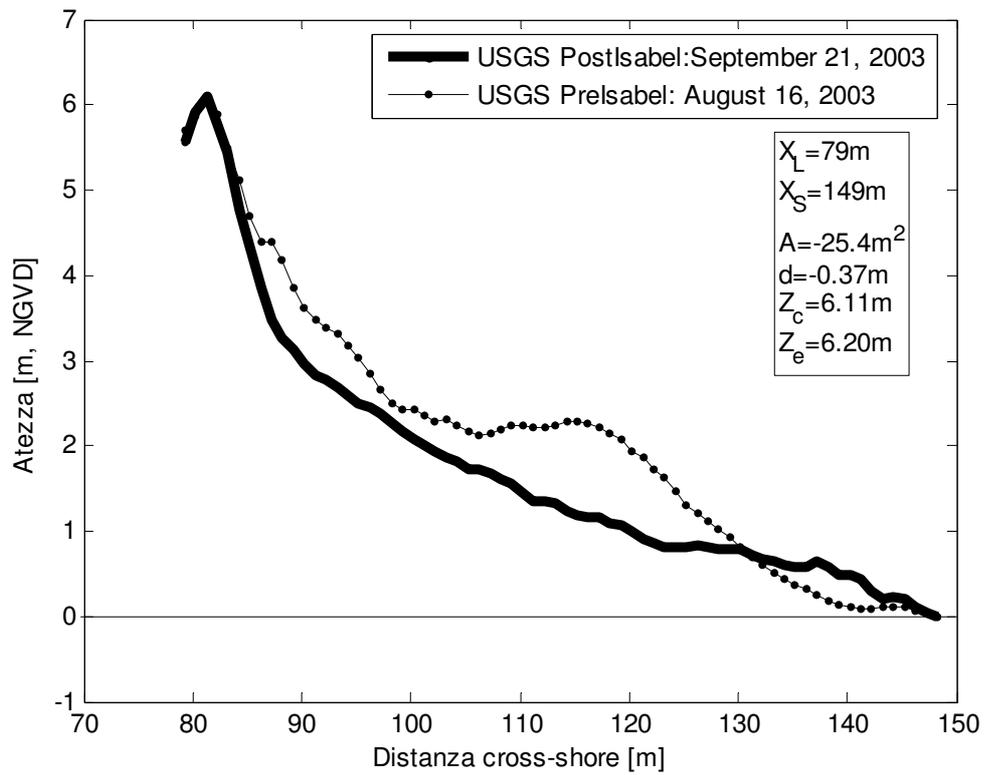


Figura A-4.19. Nags Head Nord: profilo 609

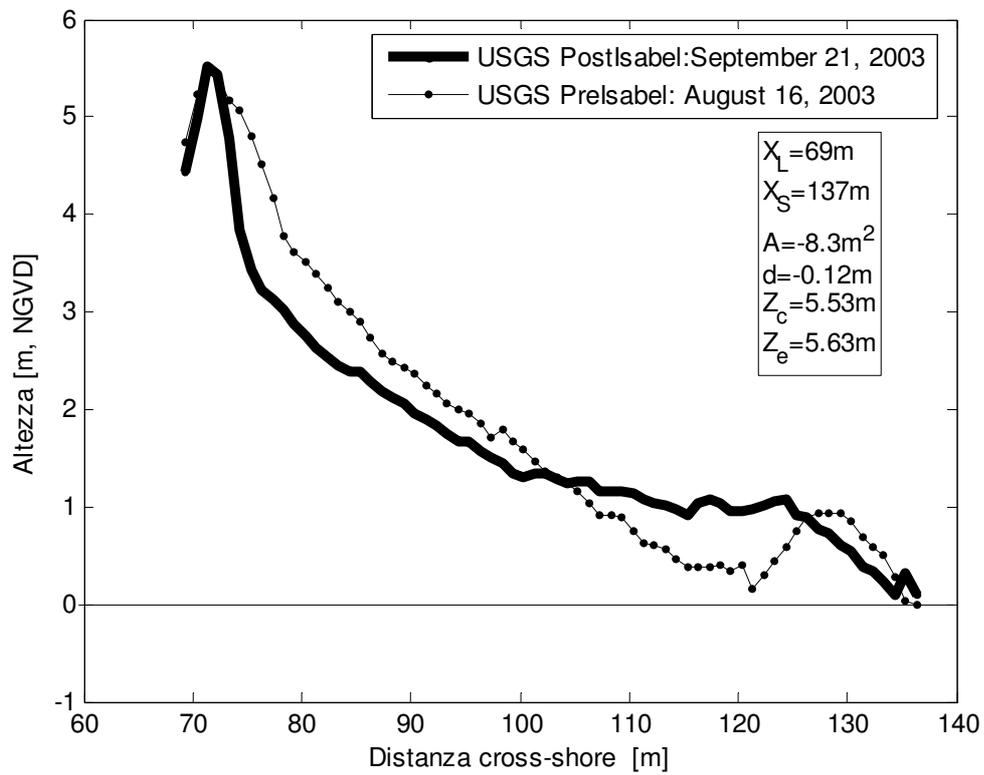


Figura A-4.20. Nags Head Nord: profilo 619

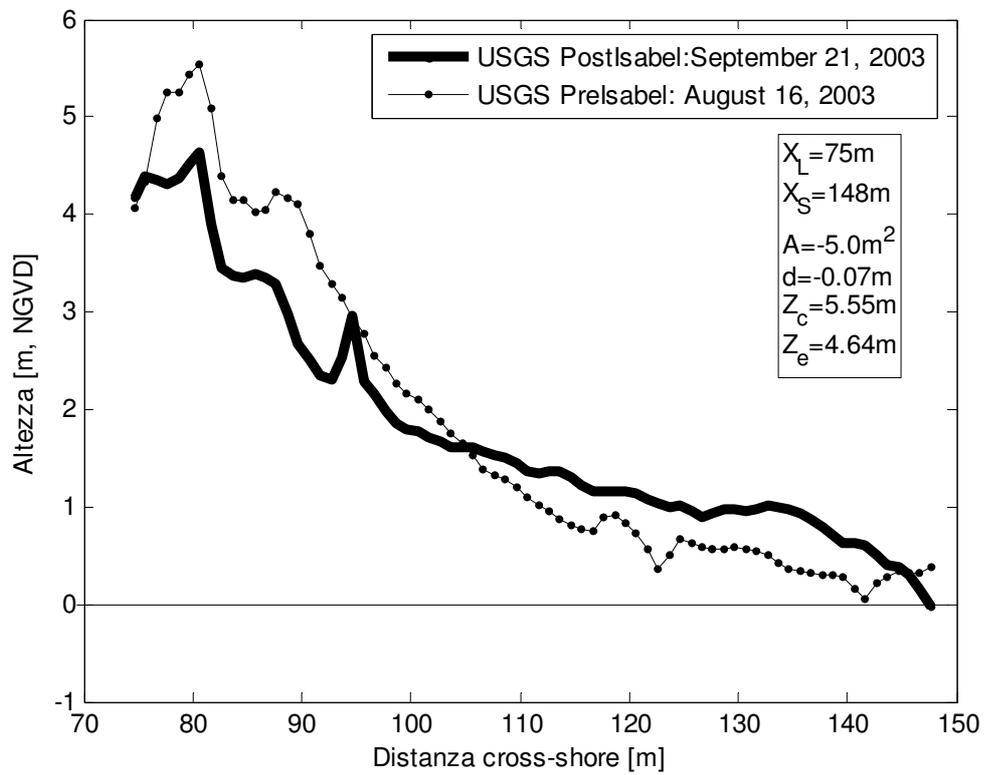


Figura A-4.21. Nags Head Nord: profilo 630

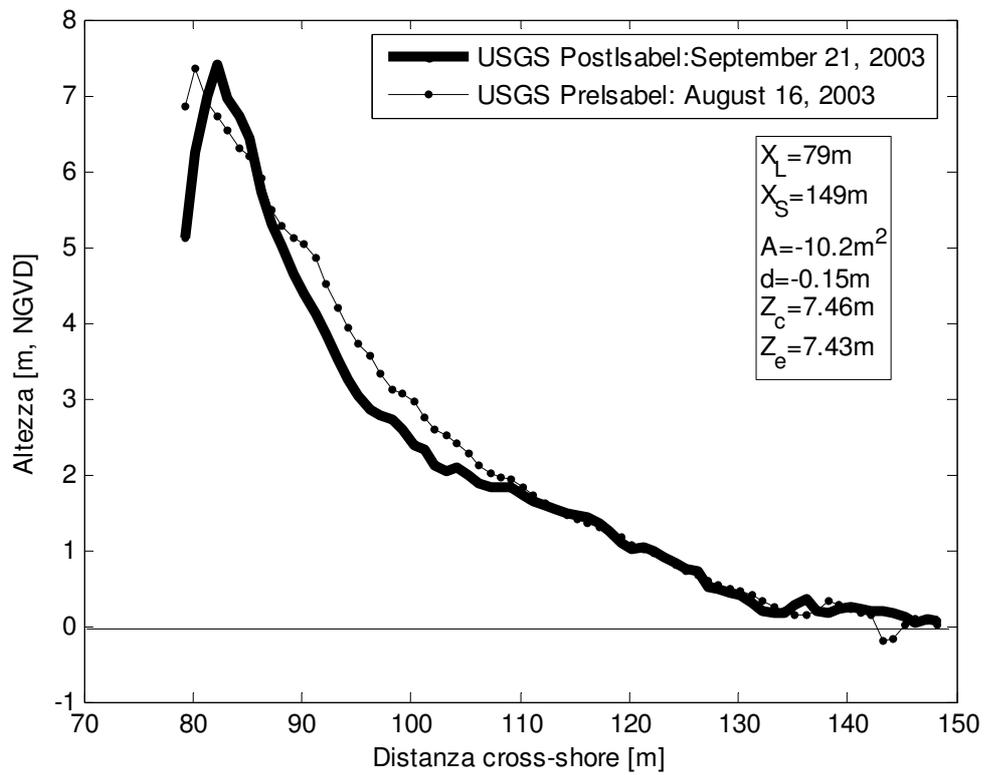


Figura A-4.22. Nags Head Nord: profilo 640

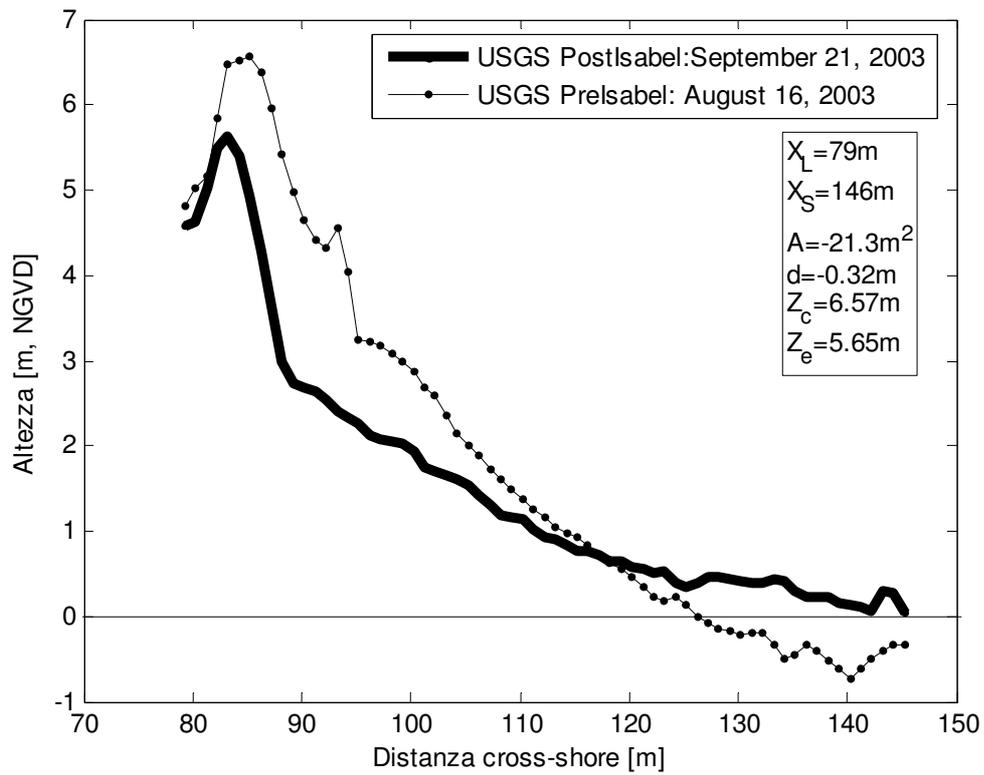


Figura A-4.23. Nags Head Nord: profilo 649

A-5. Area Nags Head Centro



Figura A-5.1. Vista dall'alto dei profili LIDAR per l'area di Nags Head Centro (Immagine da Google Earth)

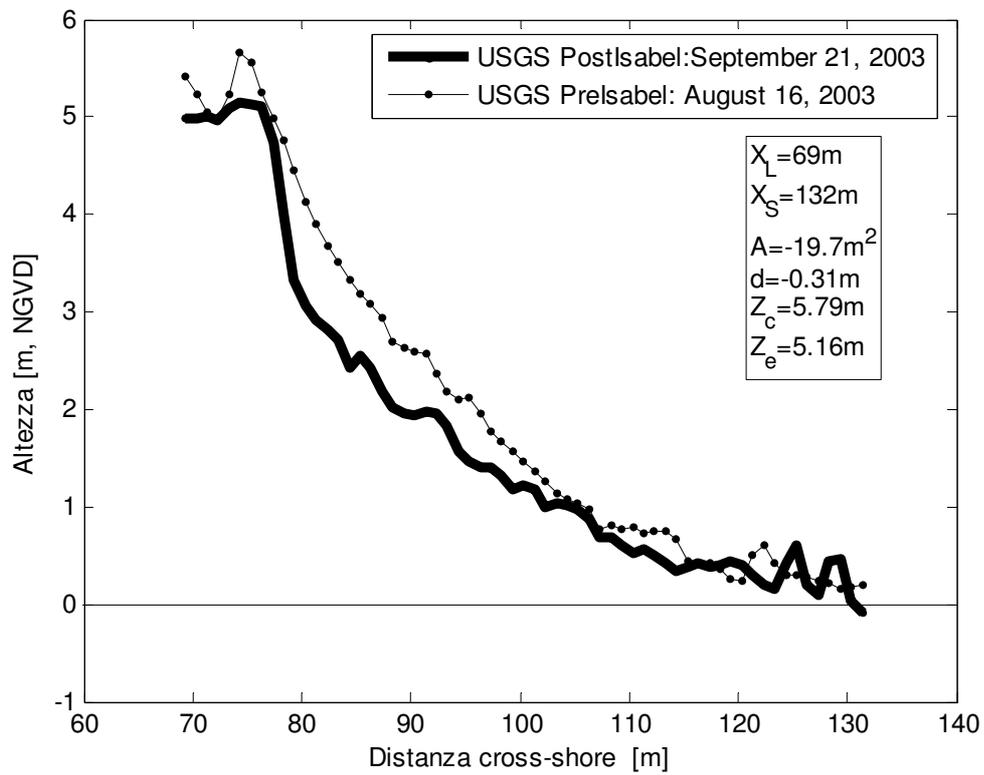


Figura A-5.2. Nags Head Centro: profilo 659

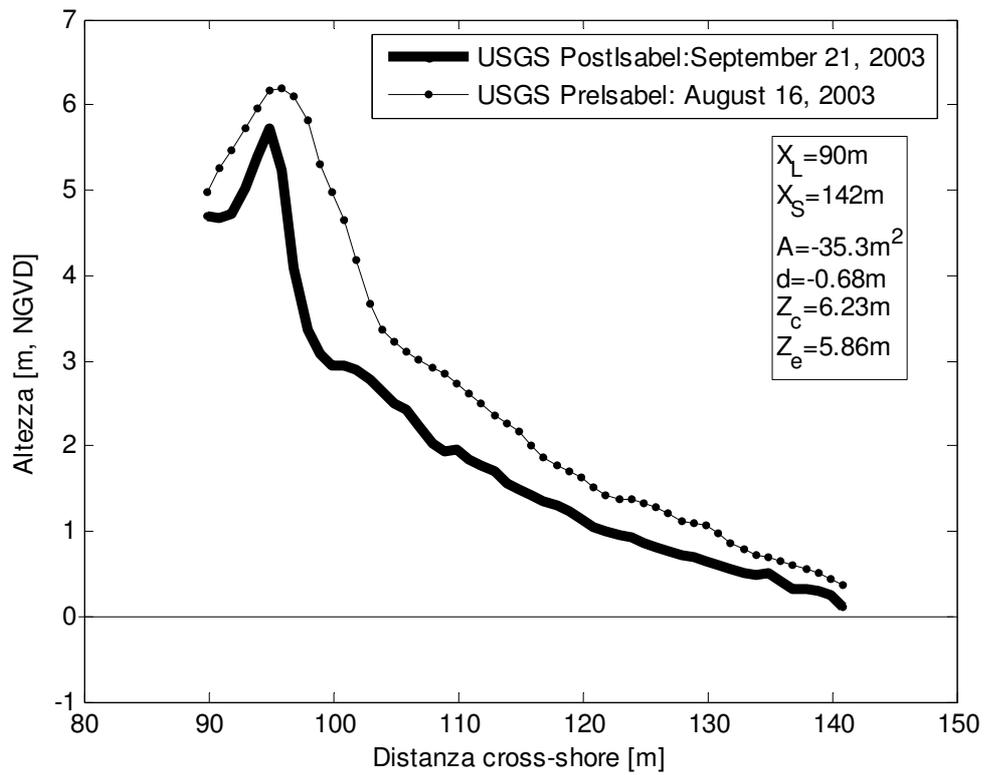


Figura A-5.3. Nags Head Centro: profilo 670

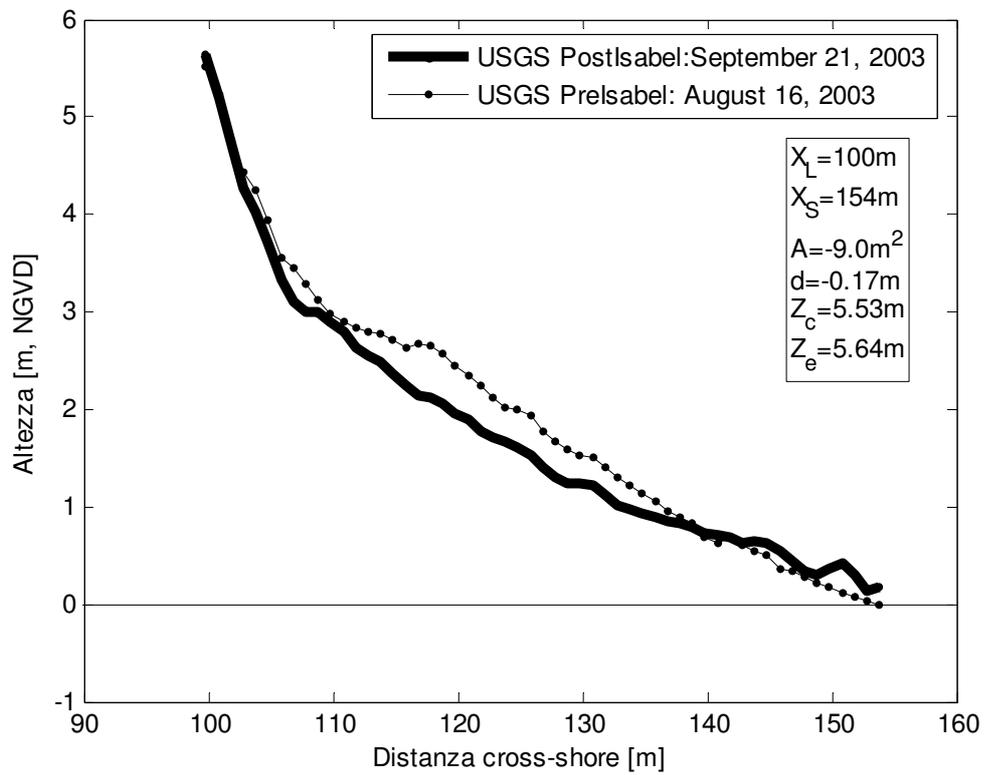


Figura A-5.4. Nags Head Centro: profilo 679

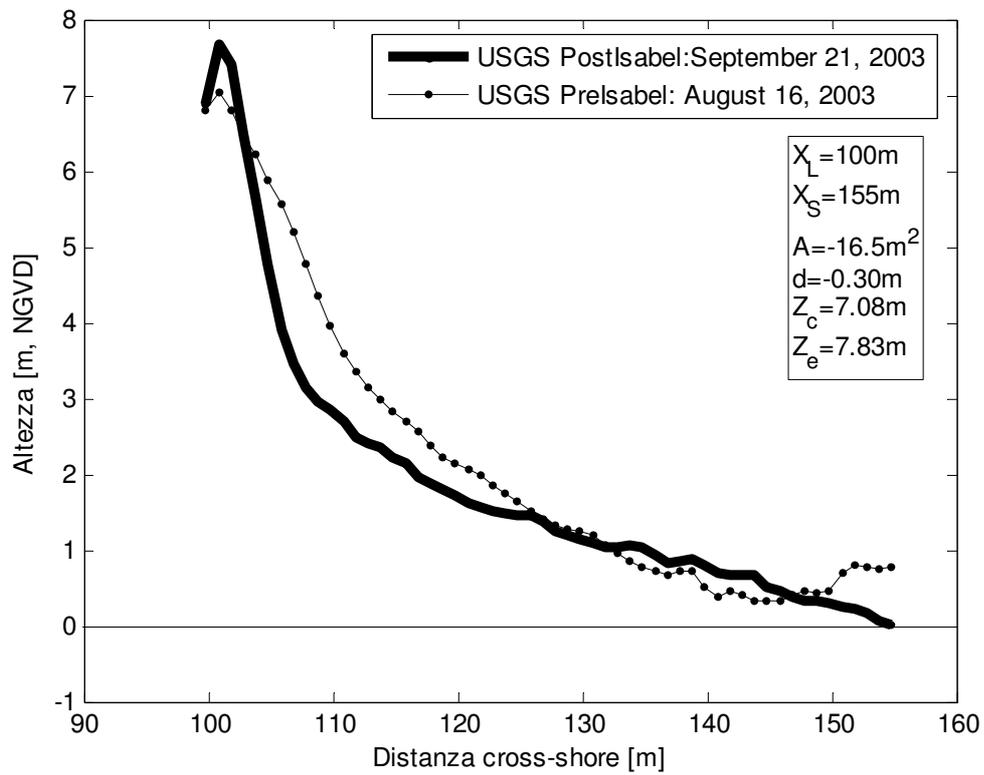


Figura A-5.5. Nags Head Centro: profilo 689

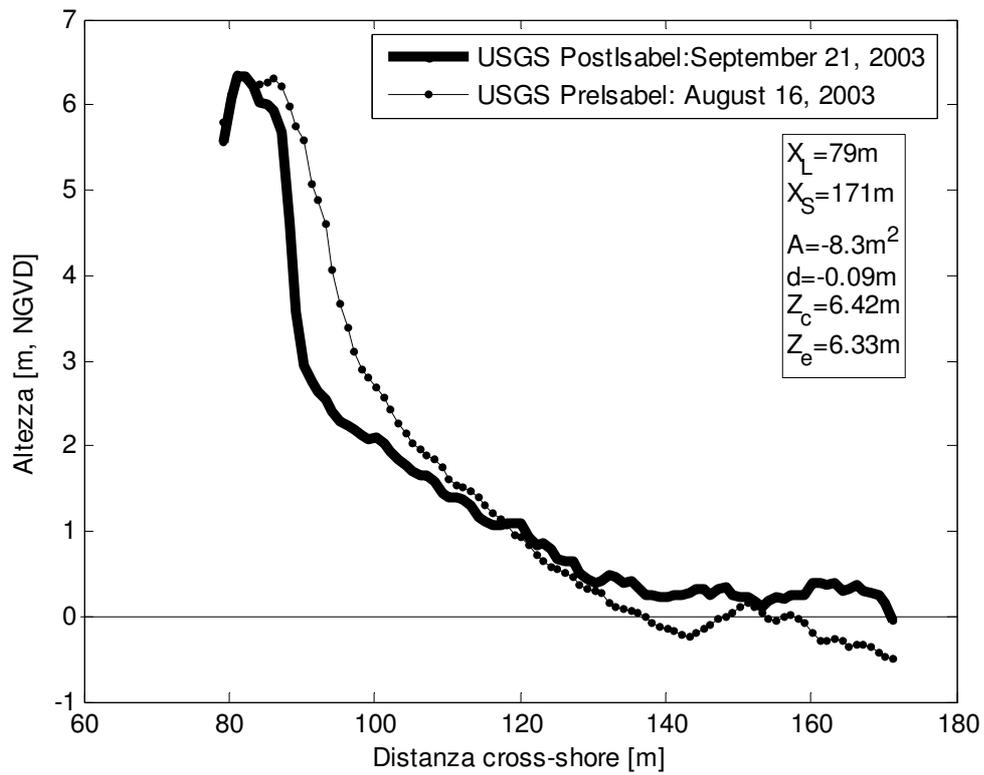


Figura A-5.6. Nags Head Centro: profilo 700

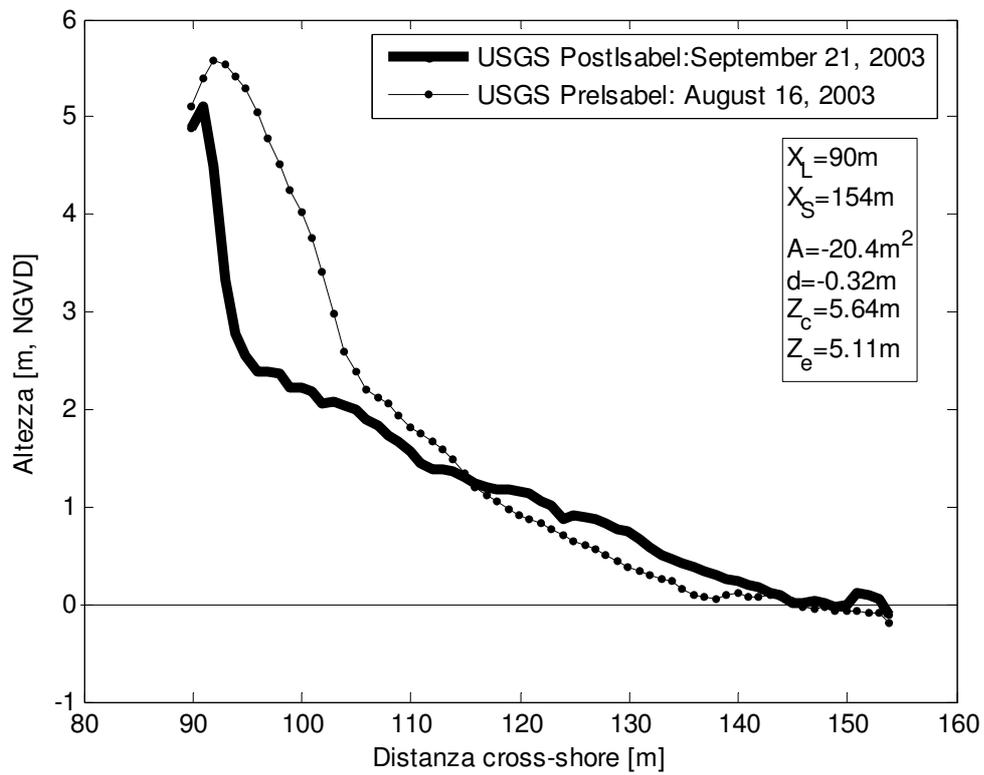


Figura A-5.7. Nags Head Centro: profilo 709

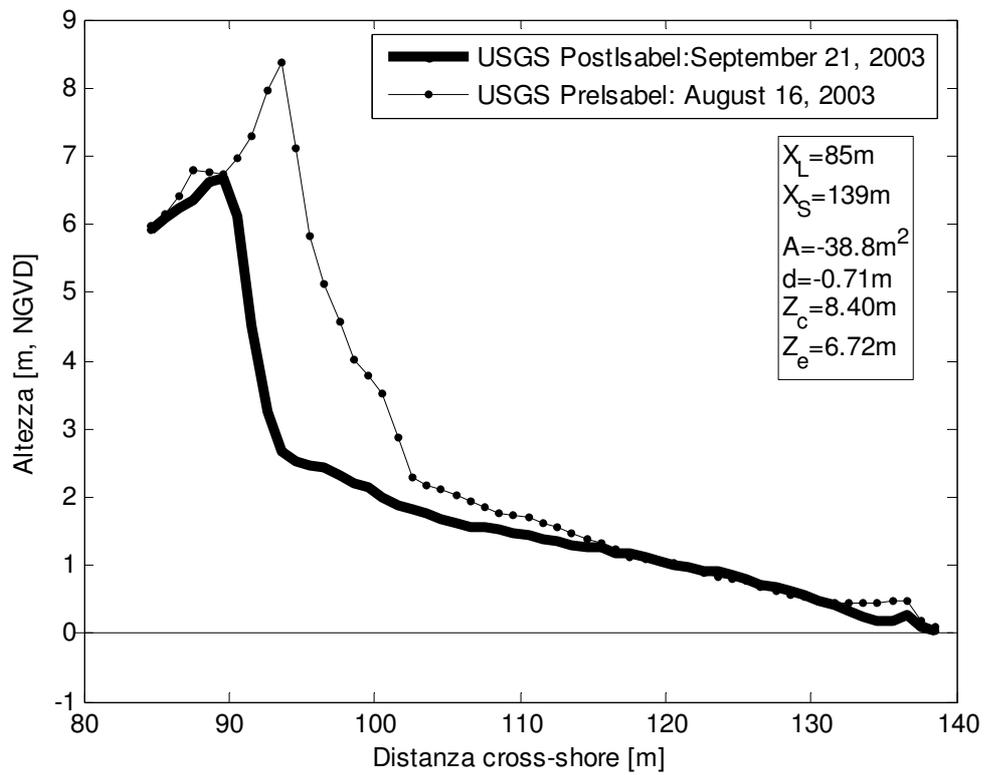


Figura A-5.8. Nags Head Centro: profilo 719

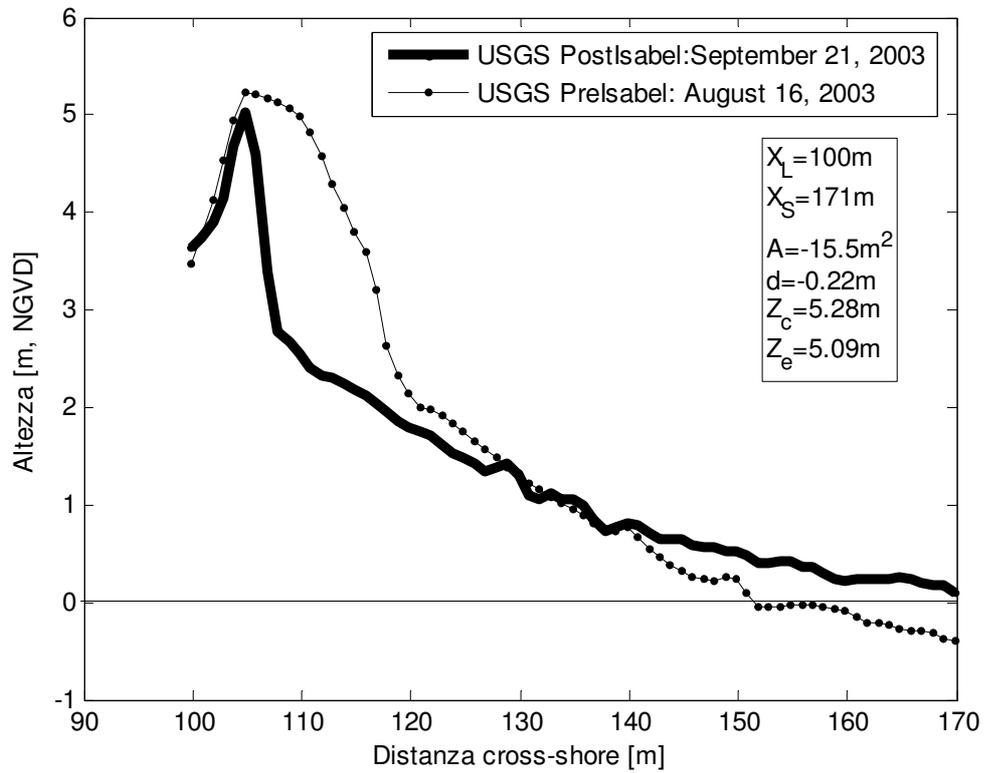


Figura A-5.9. Nags Head Centro: profilo 729

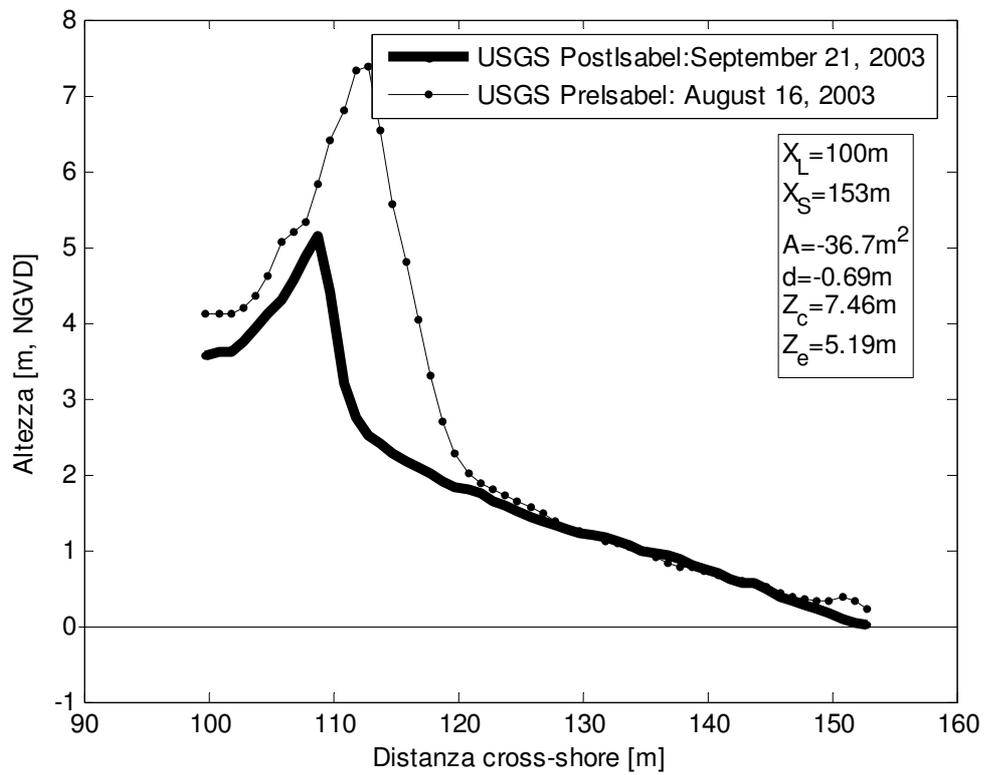


Figura A-5.10 Nags Head Centro: profilo 739

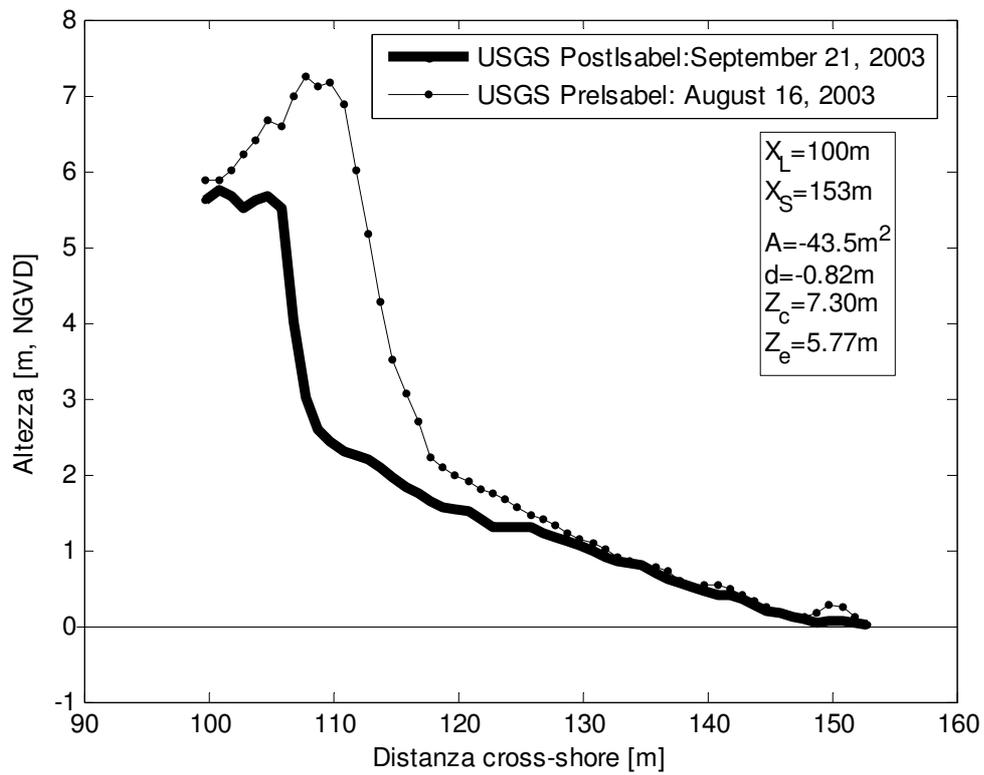


Figura A-5.11 Nags Head Centro: profilo 749

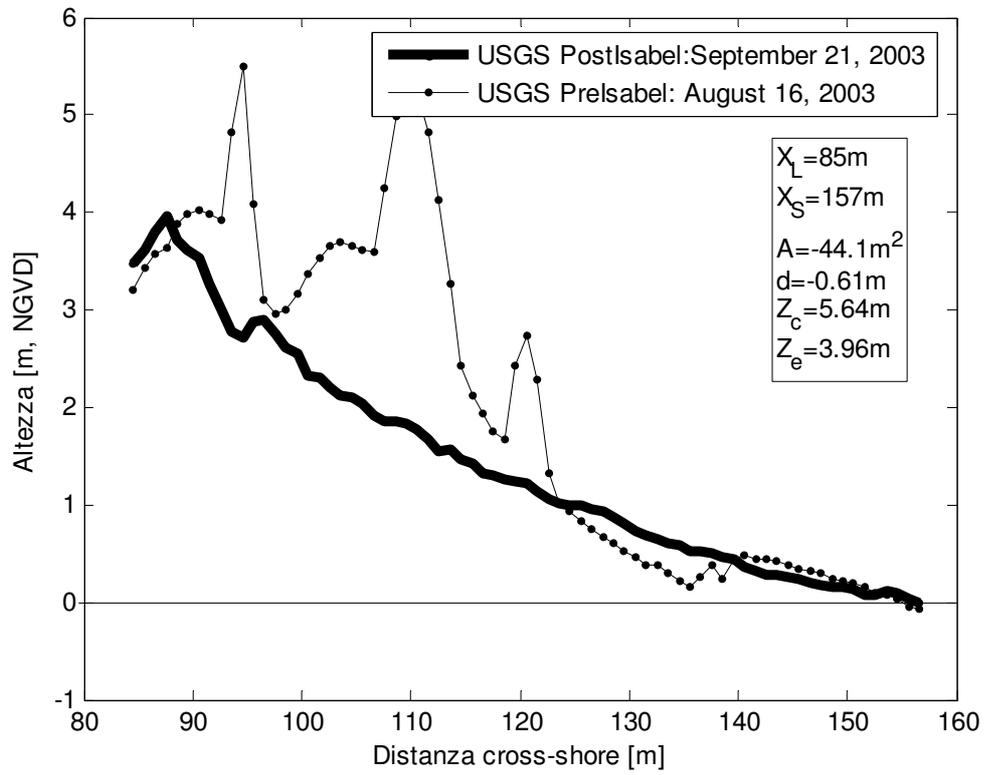


Figura A-5.12 Nags Head Centro: profilo 759

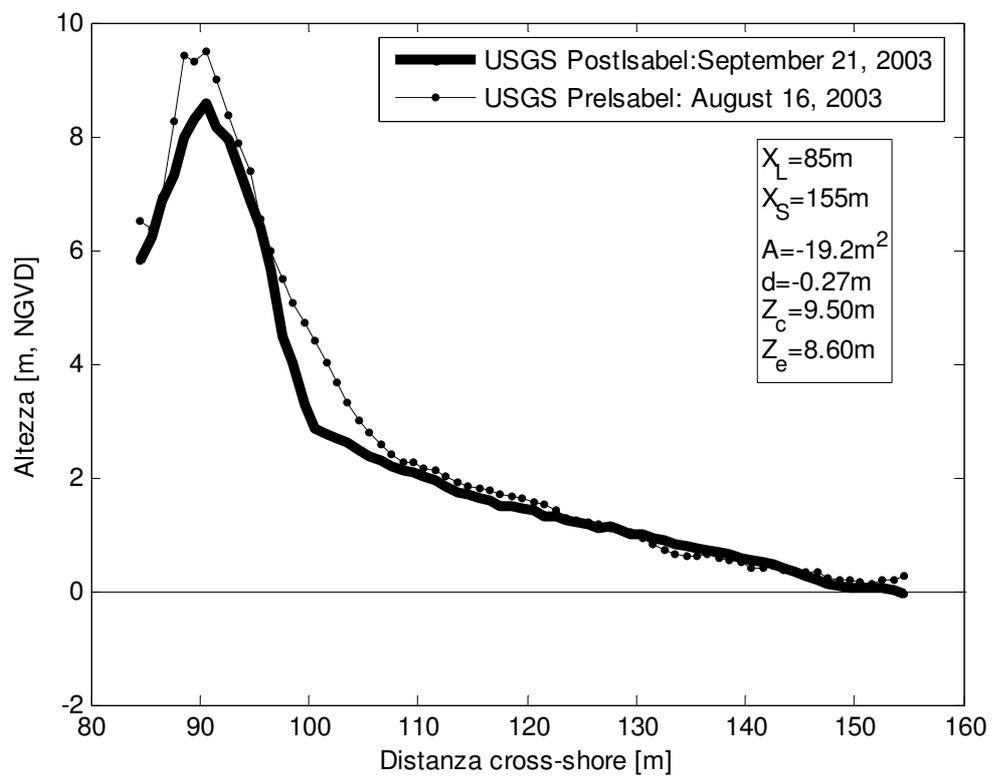


Figura A-5.13. Nags Head Centro: profilo 771

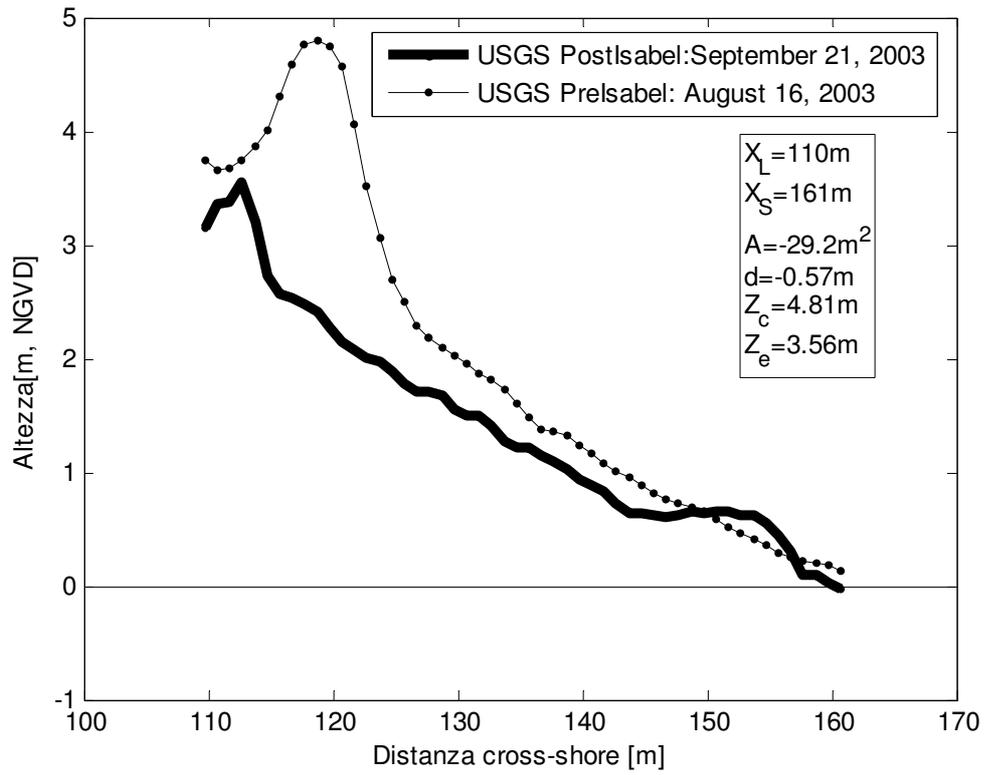


Figura A-5.14. Nags Head Centro: profilo 779

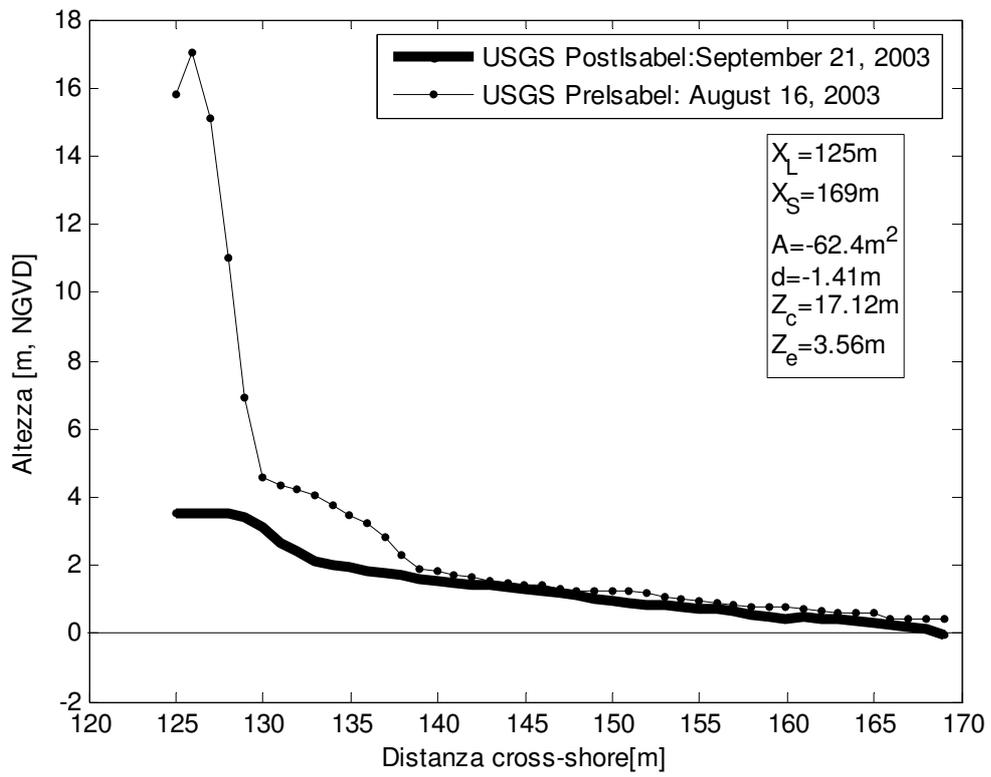


Figura A-5.15. Nags Head Centro: profilo 789

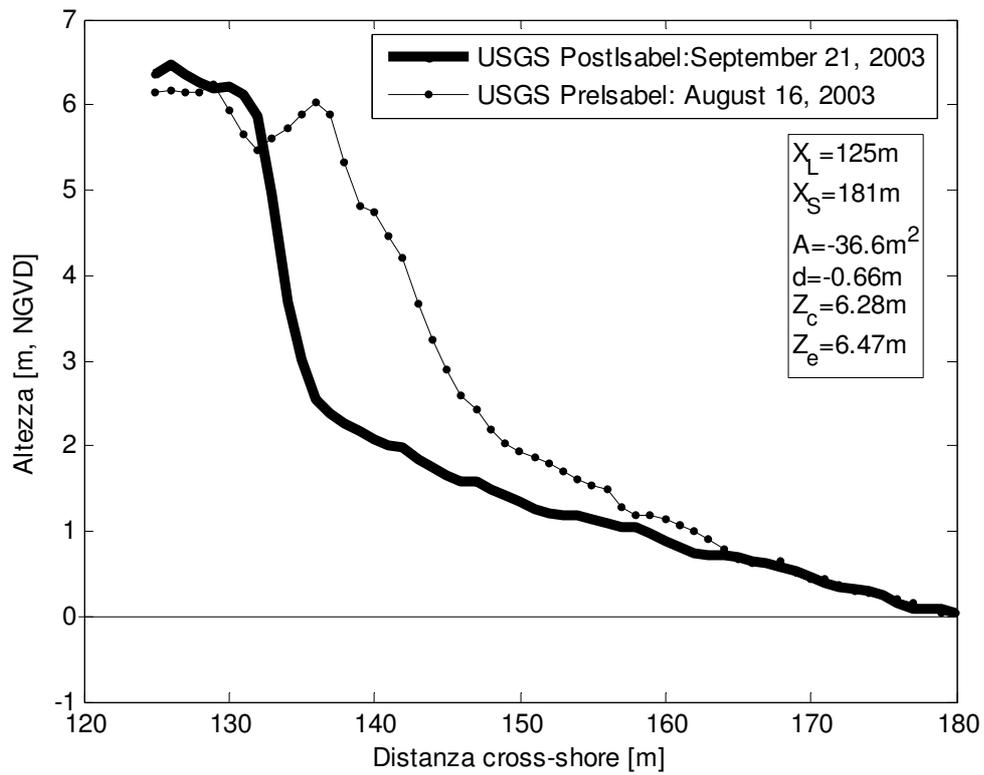


Figura A-5.16. Nags Head Centro: profilo 800

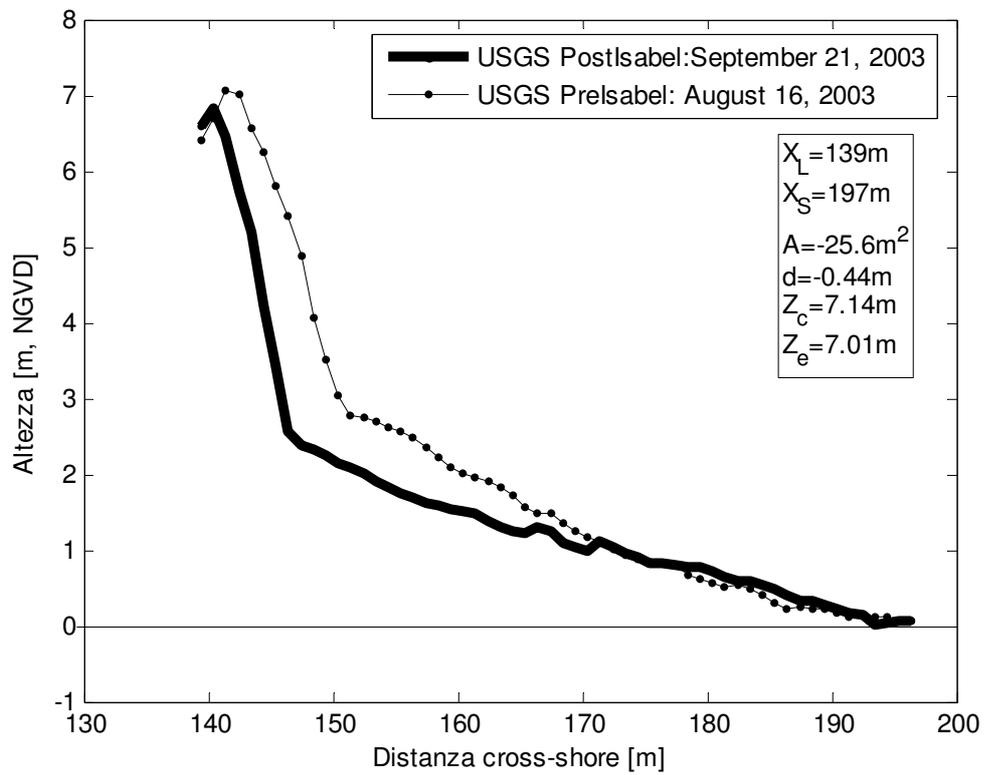


Figura A-5.17. Nags Head Centro: profilo 809

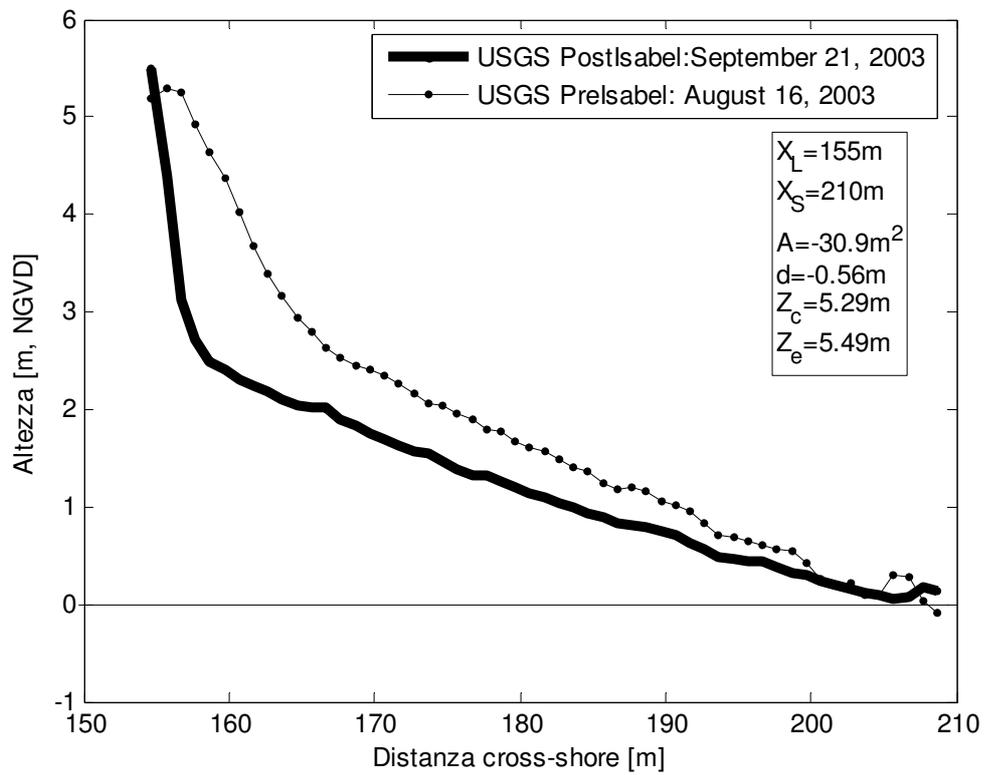


Figura A-5.18. Nags Head Centro: profilo 819

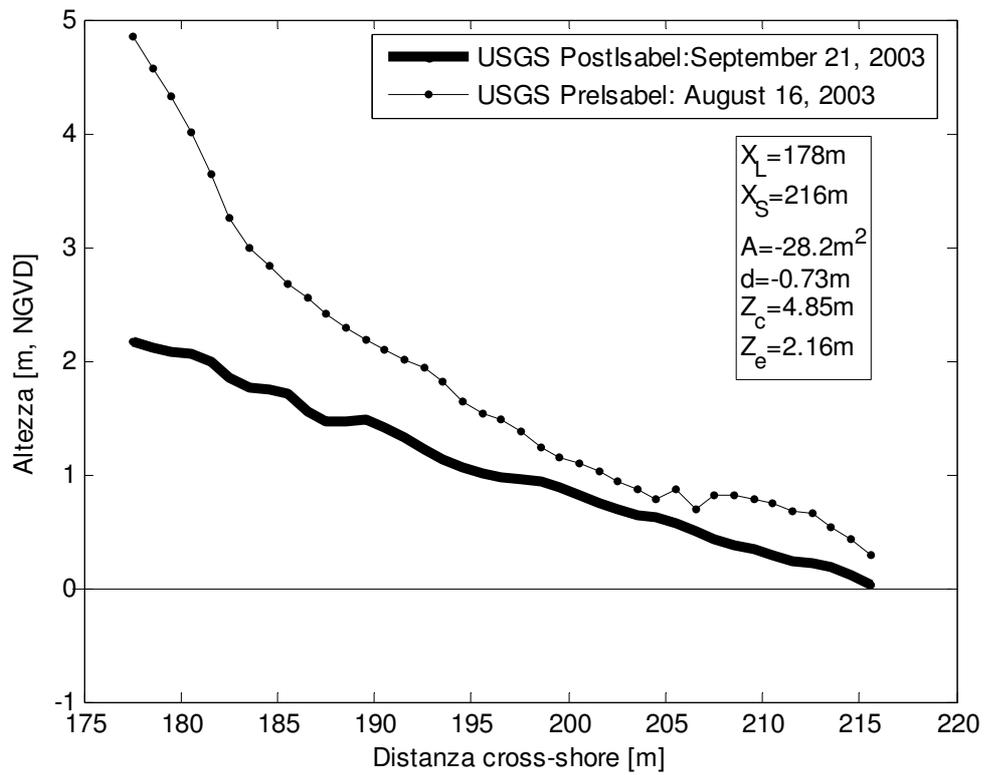


Figura A-5.19. Nags Head Centro: profilo 829

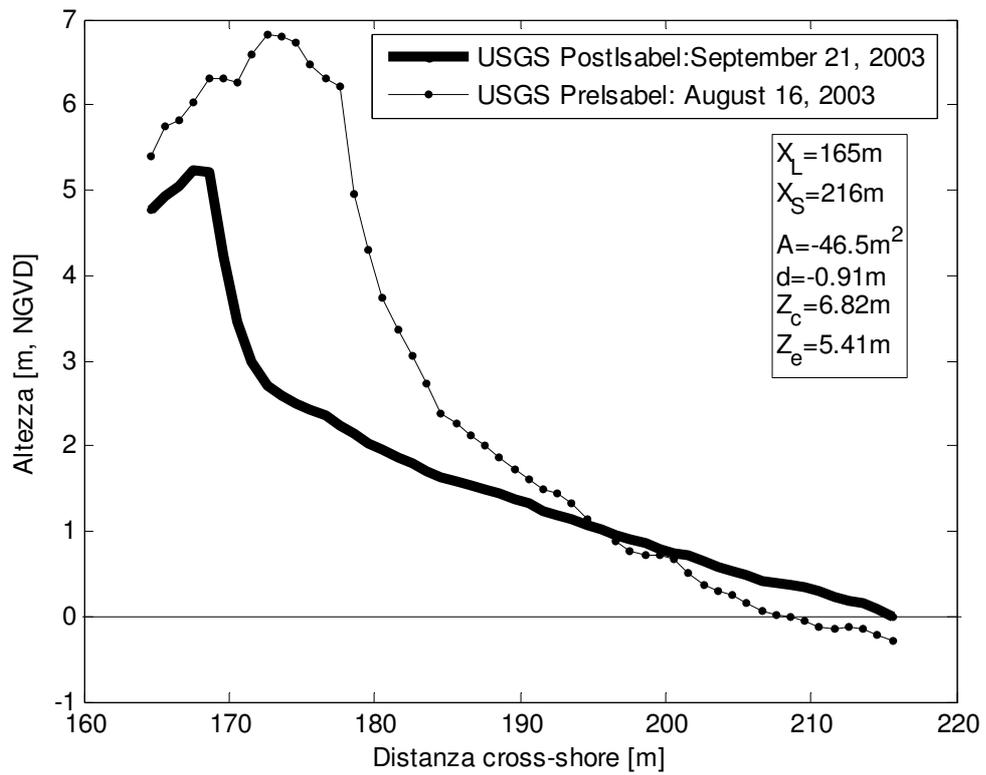


Figura A-5.20. Nags Head Centro: profilo 839

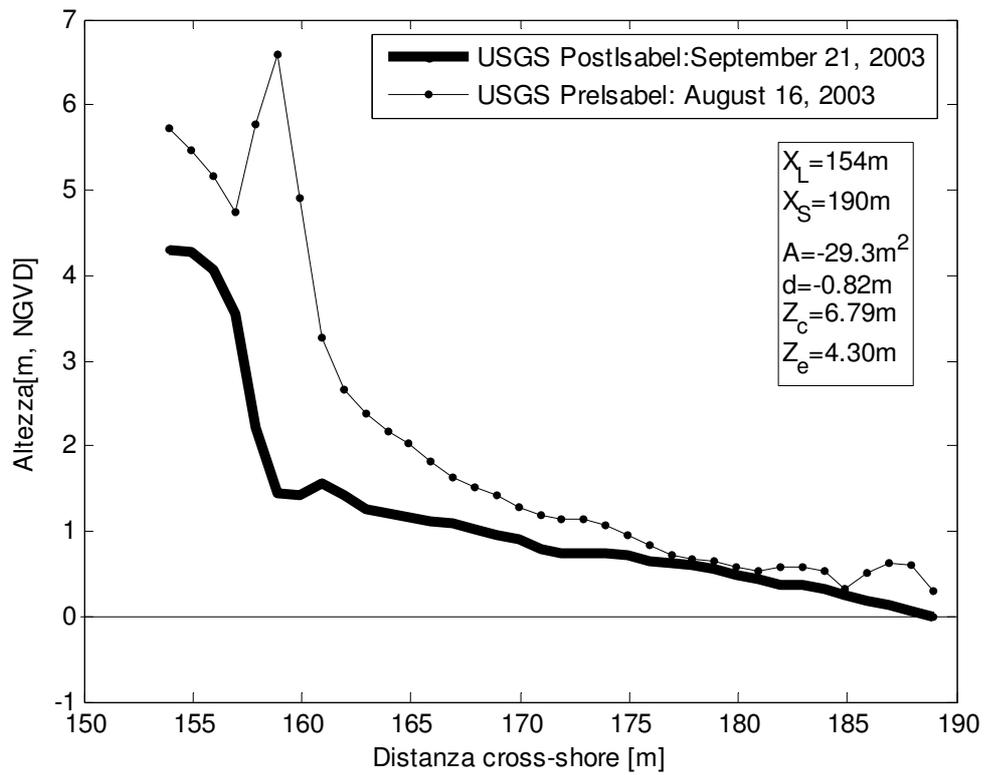


Figura A-5.21. Nags Head Centro: profilo 850

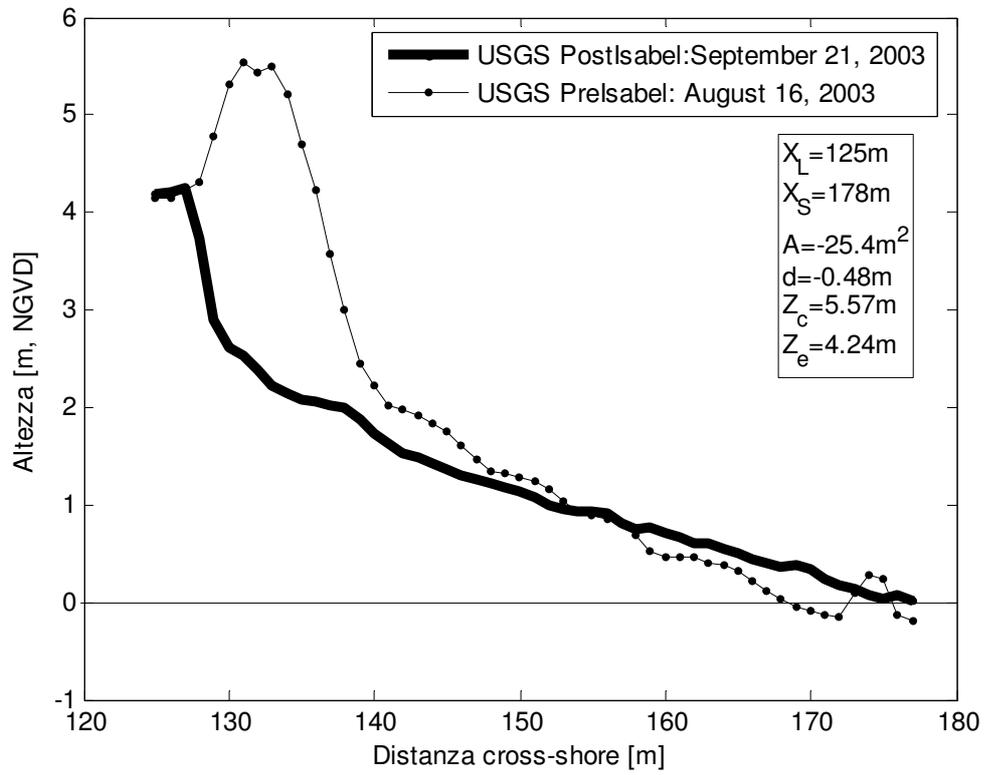


Figura A-5.22. Nags Head Centro: profilo 859

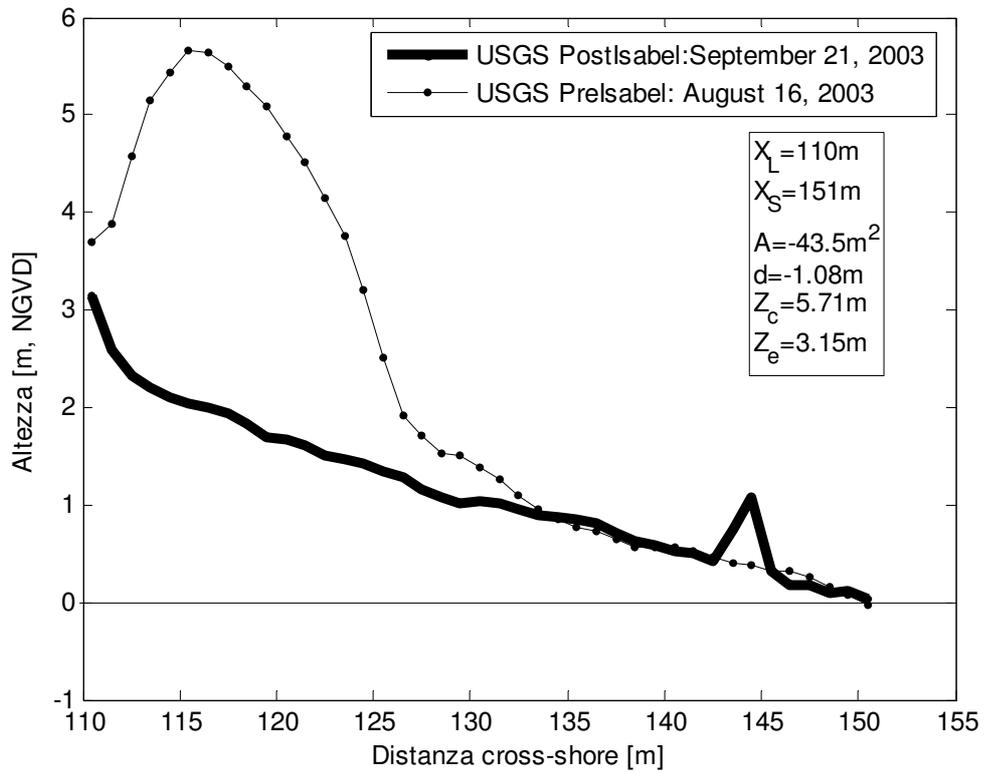


Figura A-5.23. Nags Head Centro: profilo 869

A-6. Aree Nags Head Sud e Cape Hatterras

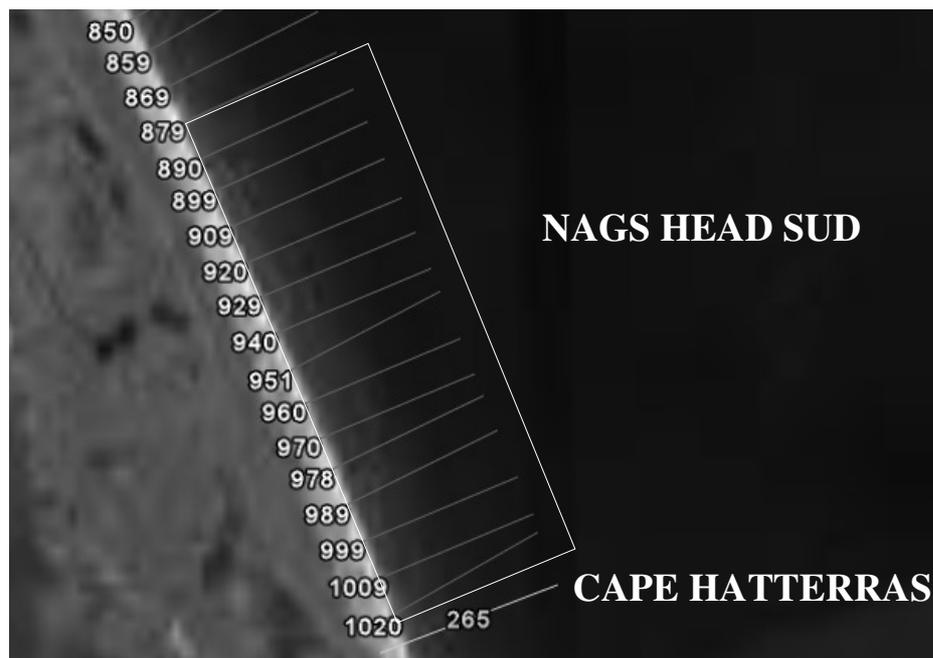


Figura A-6.1. Vista dall'alto dei profili LIDAR per le aree di Nags Head Sud e Cape Hatterras (Immagini da Google Earth)

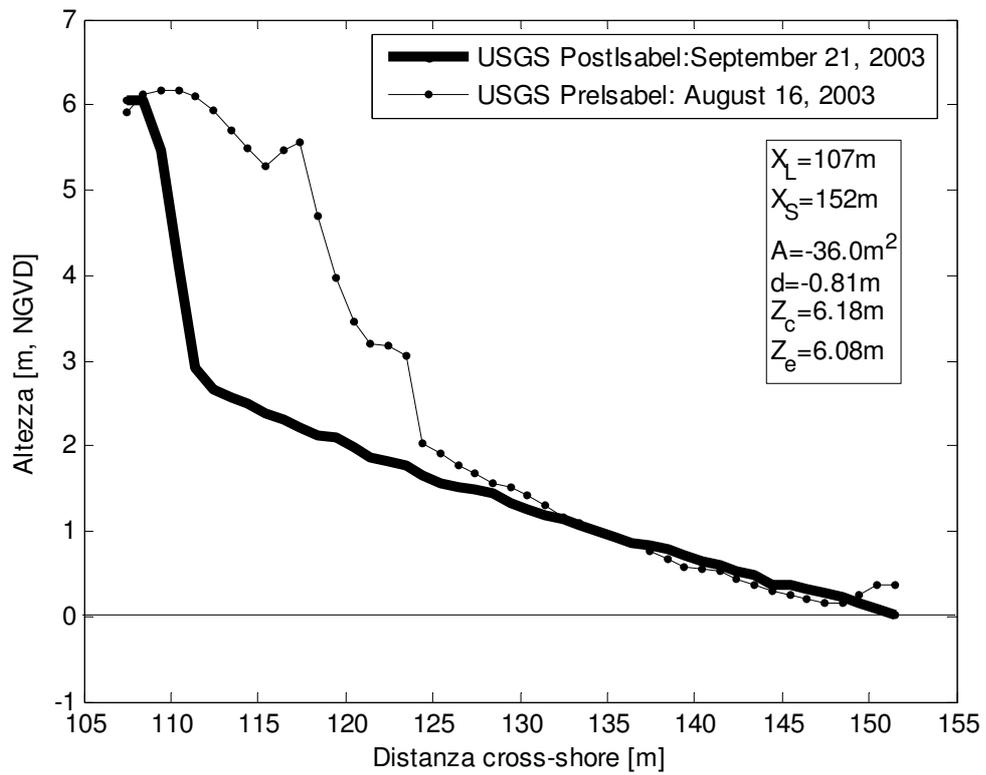


Figura A-6.2. Nags Head Sud: profilo 879

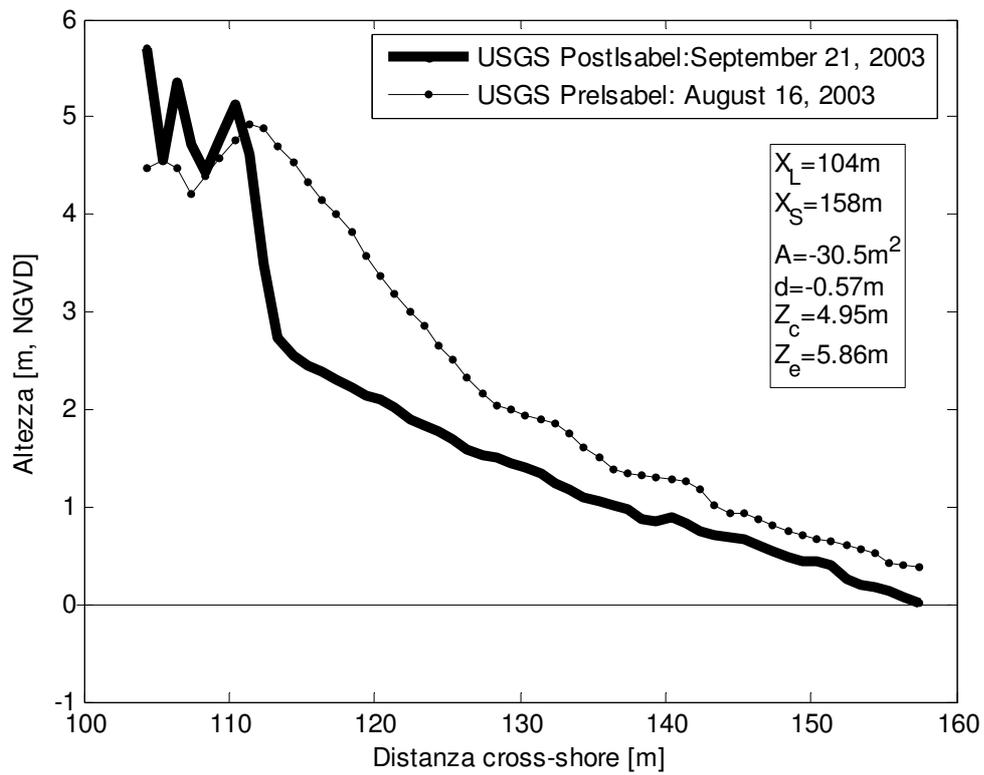


Figura A-6.3. Nags Head Sud: profilo 890

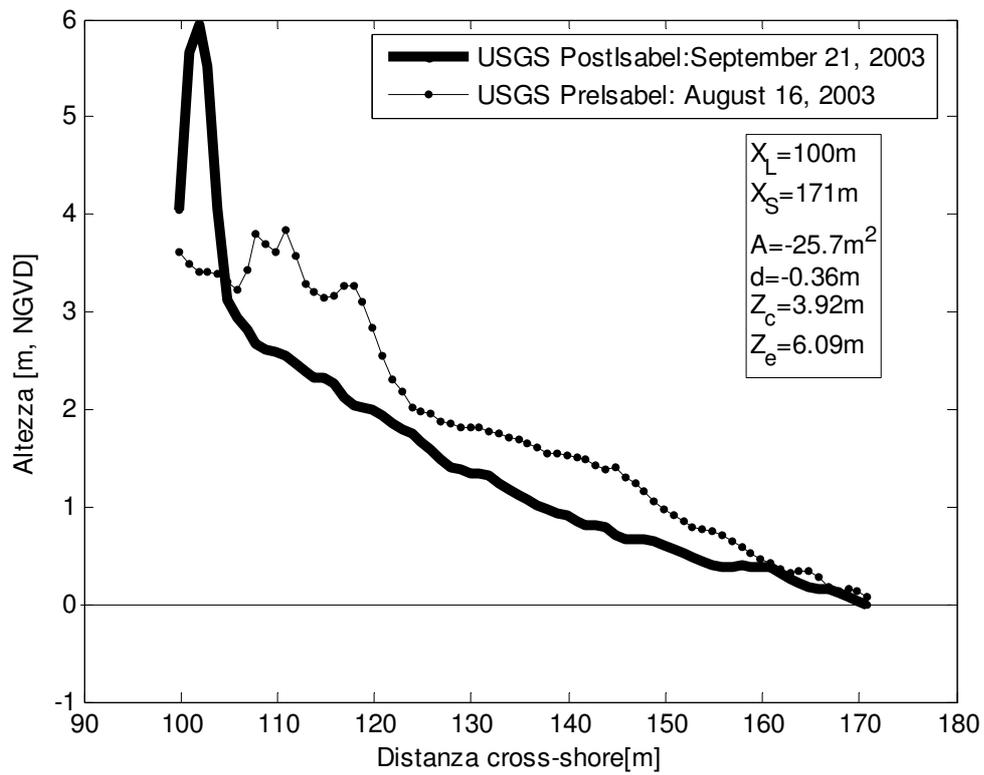


Figura A-6.4. Nags Head Sud: profilo 899

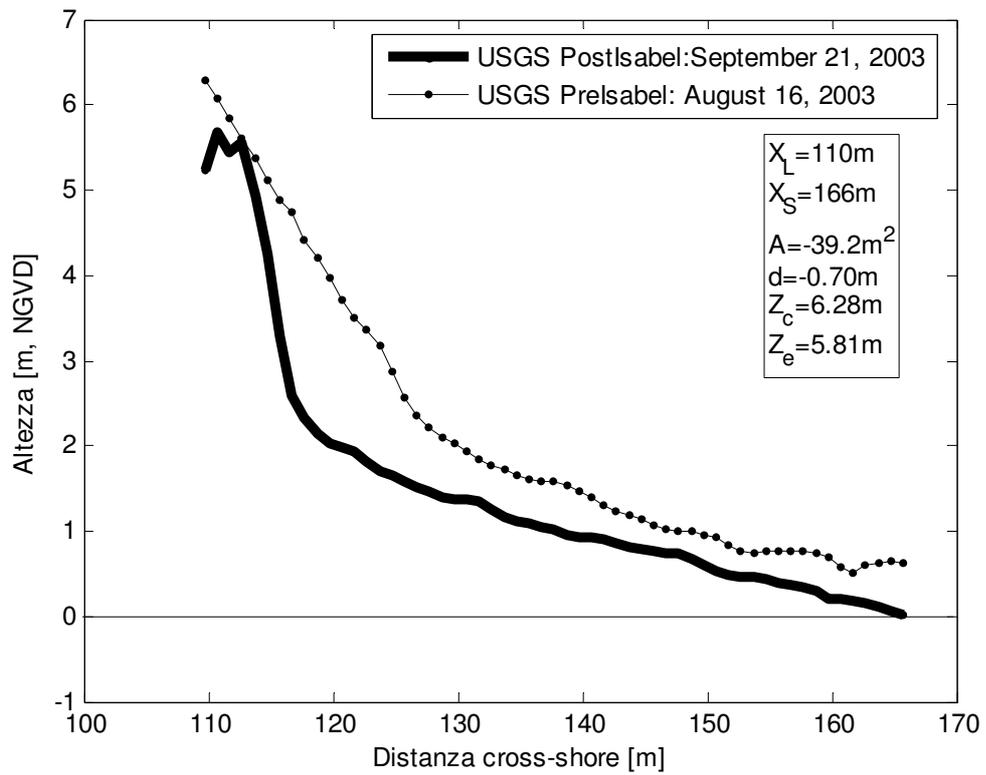


Figura A-6.5. Nags Head Sud: profilo 909

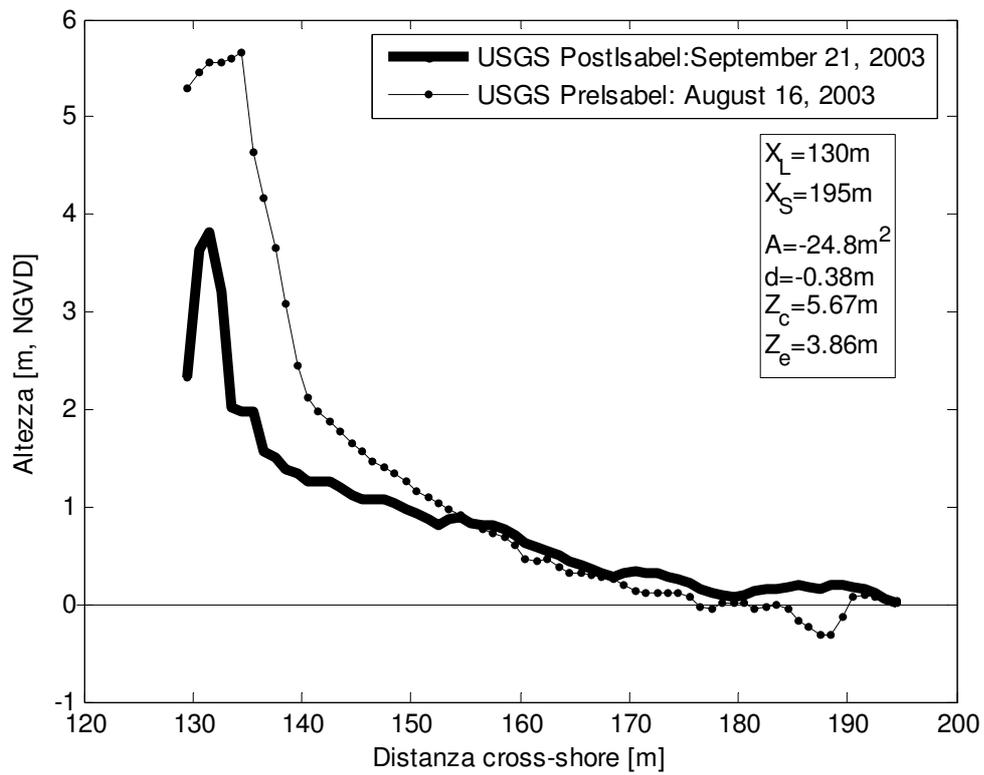


Figura A-6.6. Nags Head Sud: profilo 920

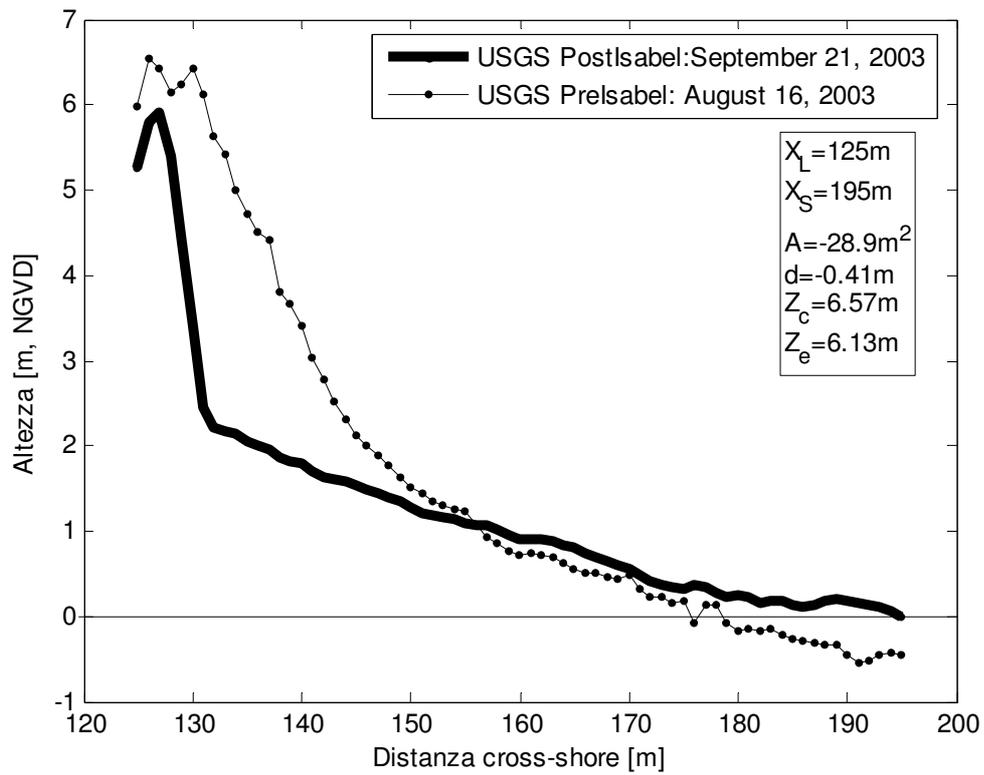


Figura A-6.7. Nags Head Sud: profilo 929

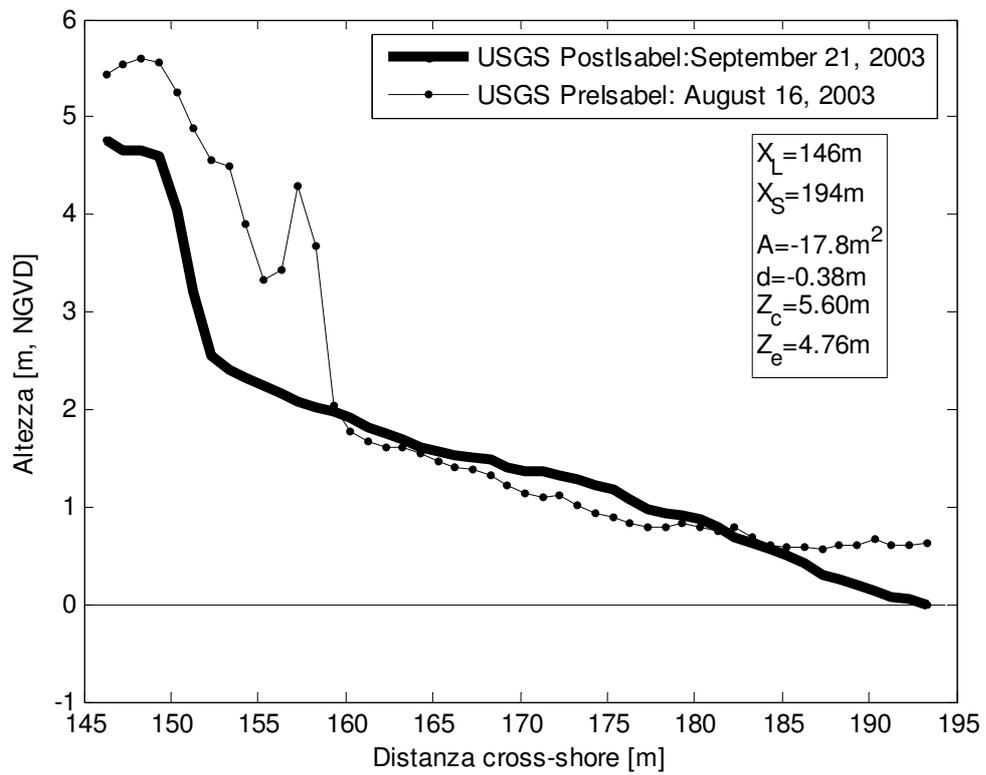


Figura A-6.8. Nags Head Sud: profilo 940

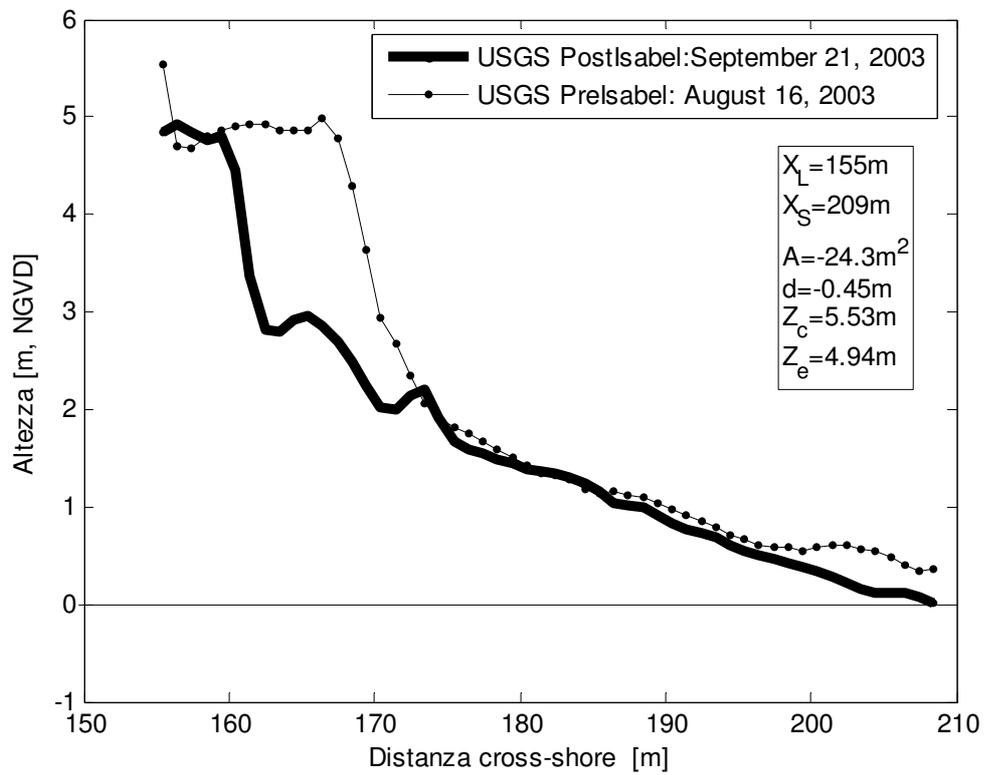


Figura A-6.9. Nags Head Sud: profilo 951

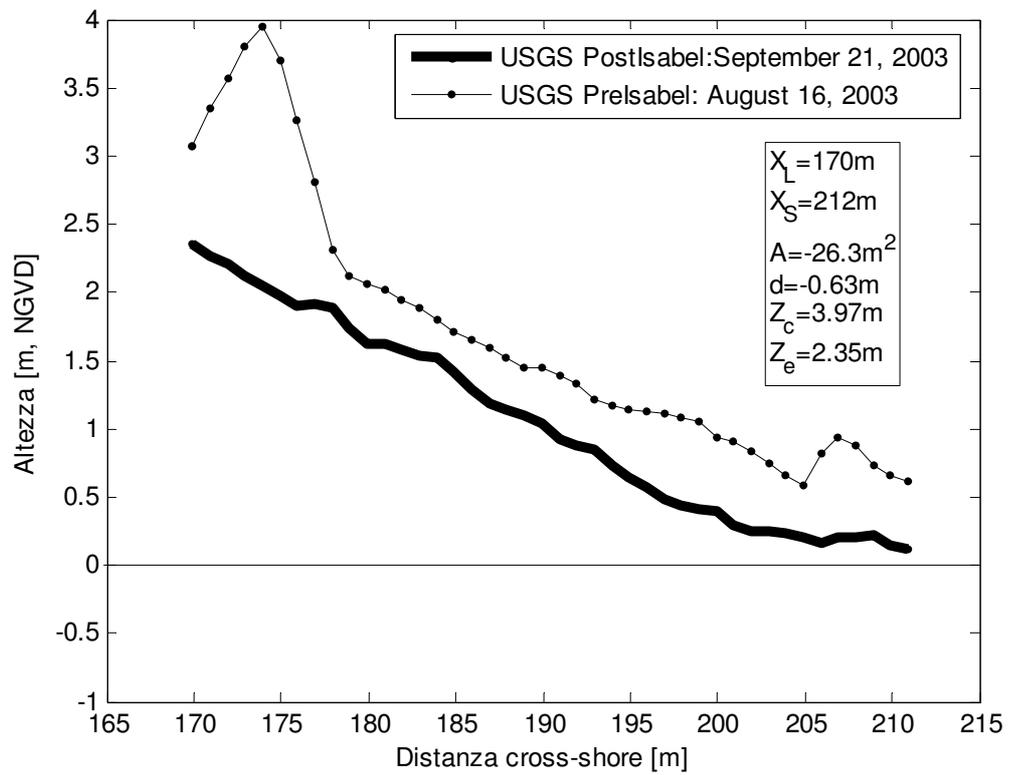


Figura A-6.10. Nags Head Sud: profilo 960

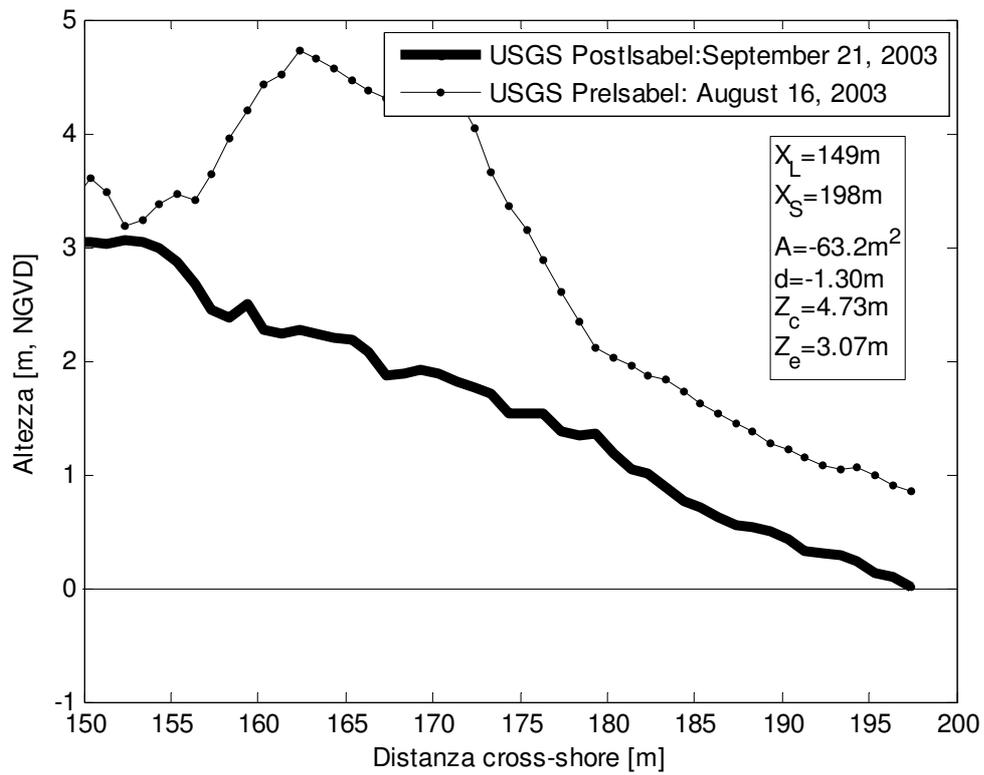


Figura A-6.11. Nags Head Sud: profilo 970

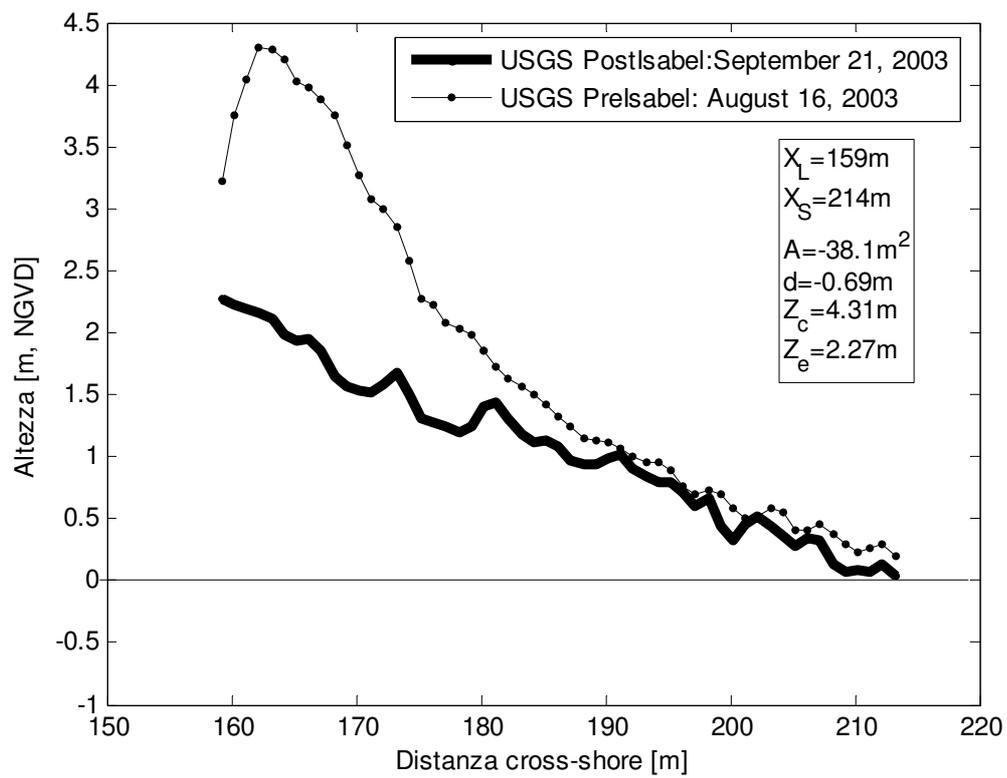


Figura A-6.12. Nags Head Sud: profilo 978

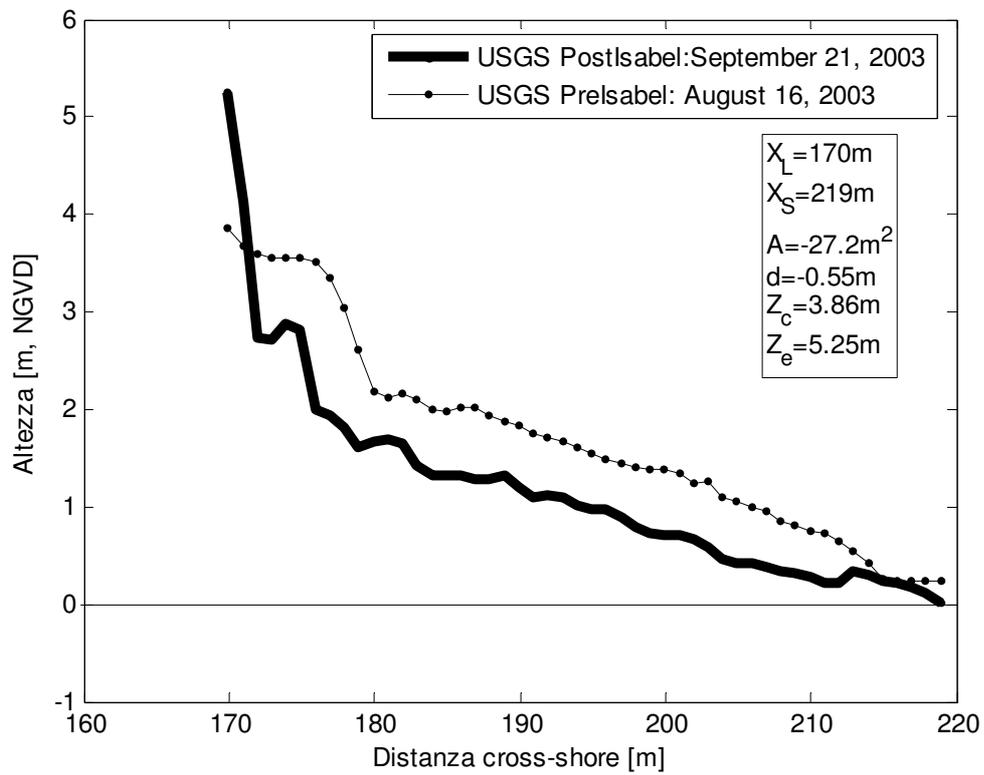


Figura A-6.13. Nags Head Sud: profilo 989

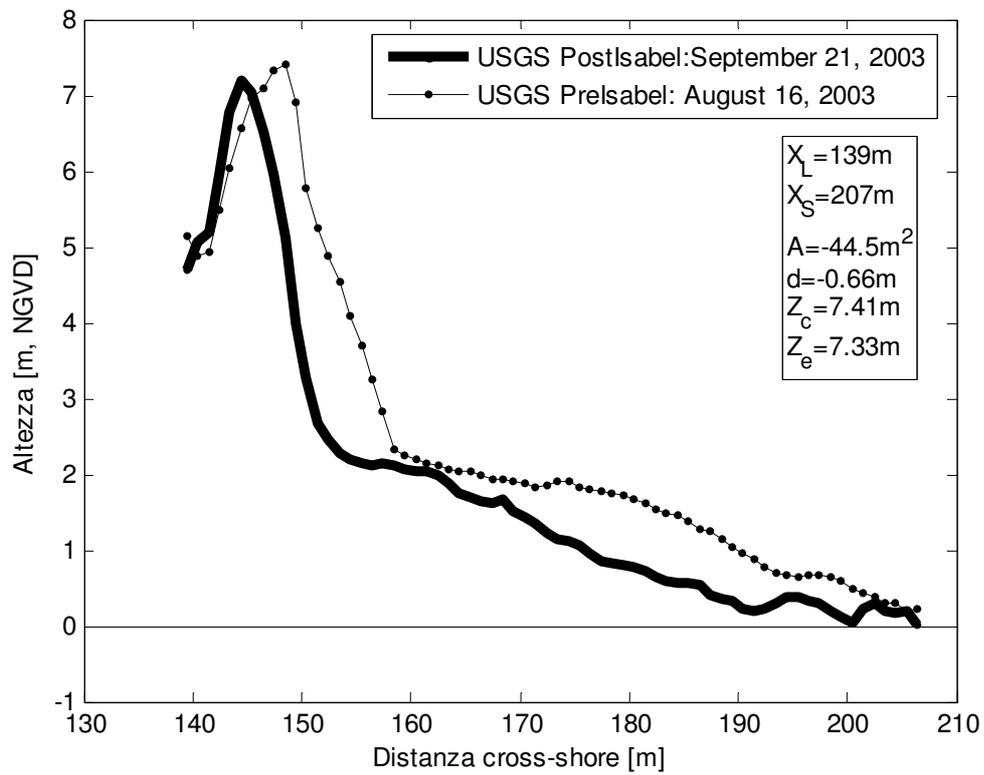


Figura A-6.14. Nags Head Sud: profilo 999

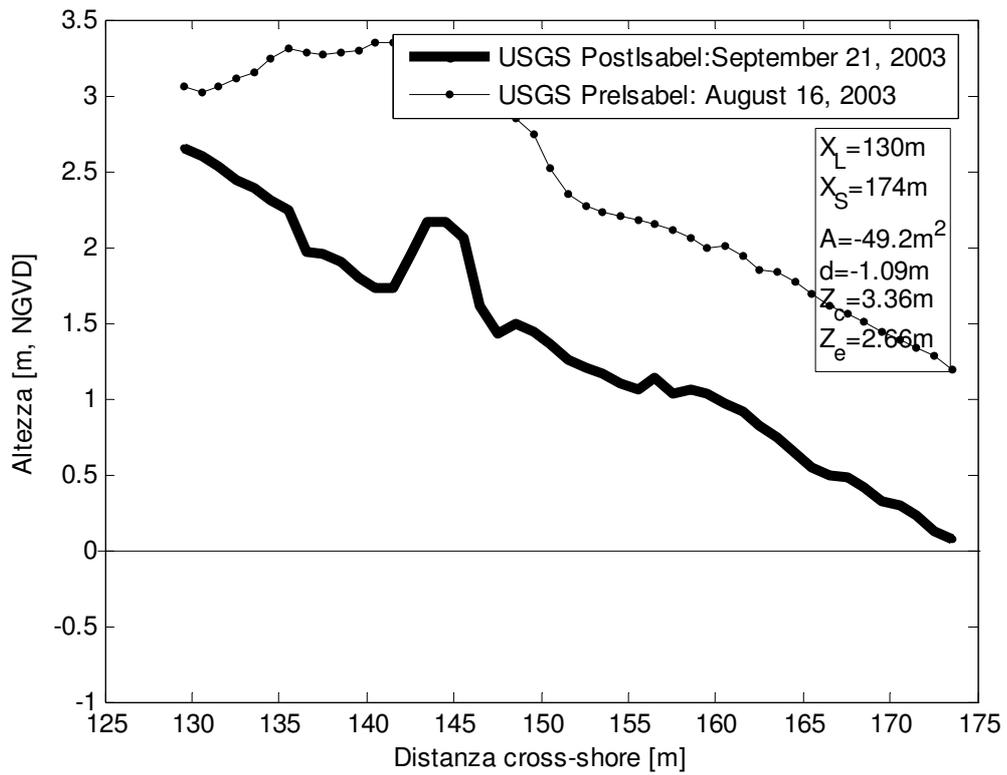


Figura A-6.15. Nags Head Sud: profilo 1009

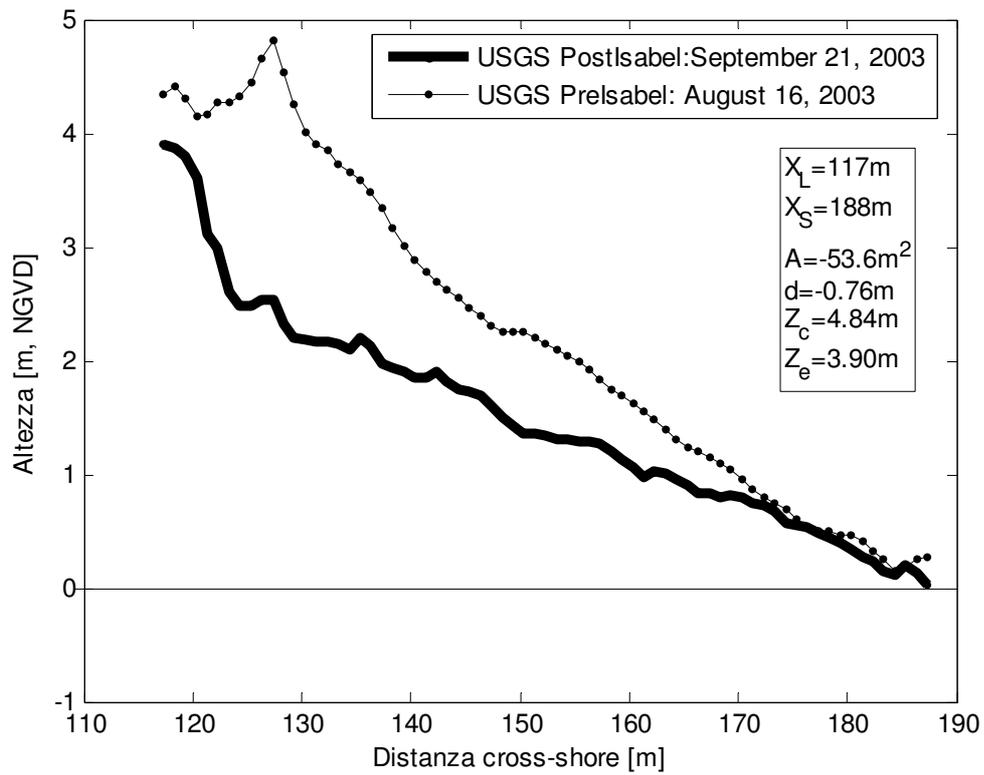


Figura A-6.16. Nags Head Sud: profilo 1020

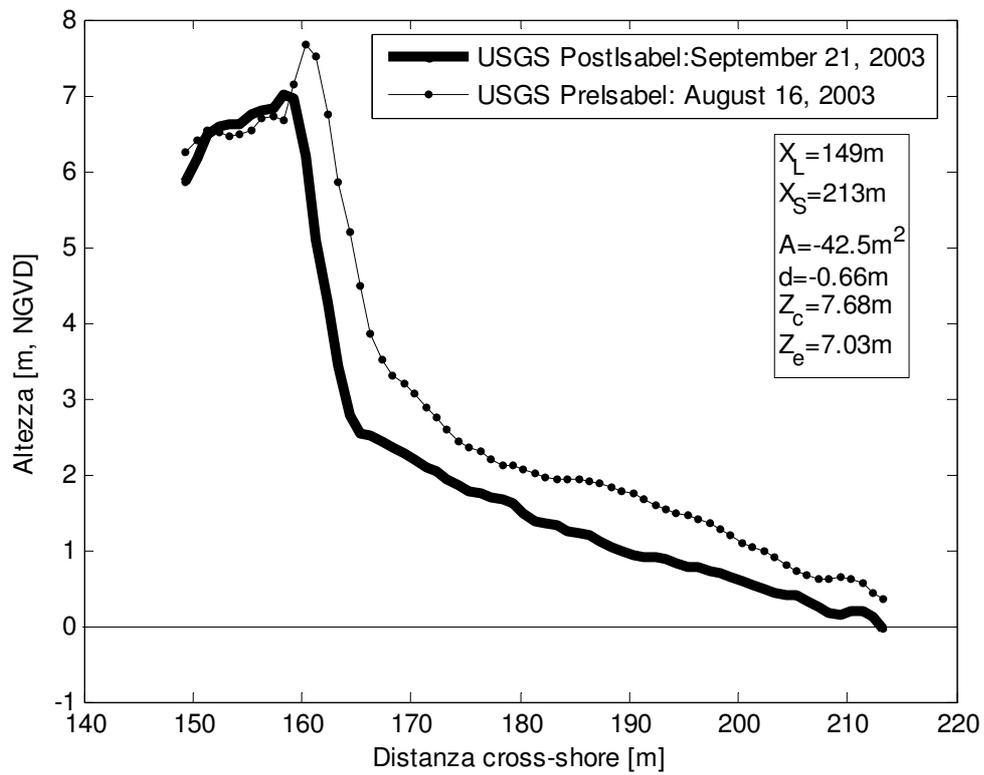


Figura A-6.17. Cape Hatterras: profilo 265

APPENDICE B

PROFILI FRF PRE E POST ISABEL

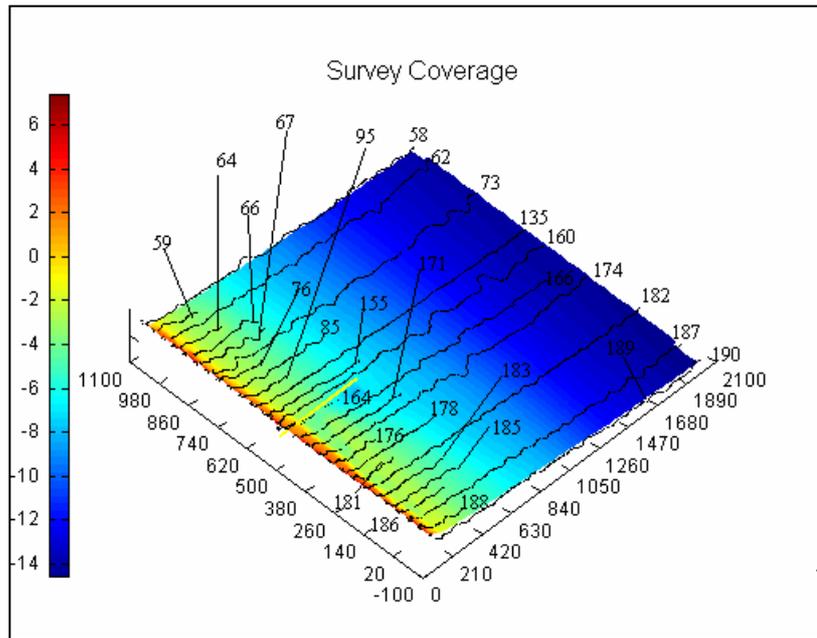
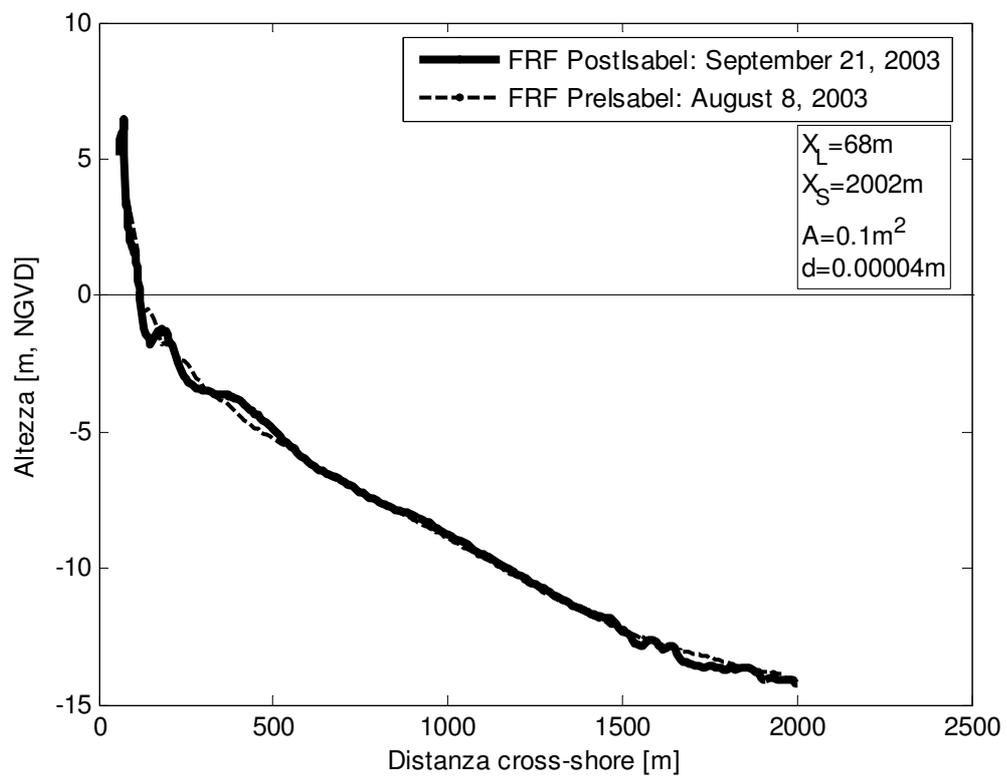
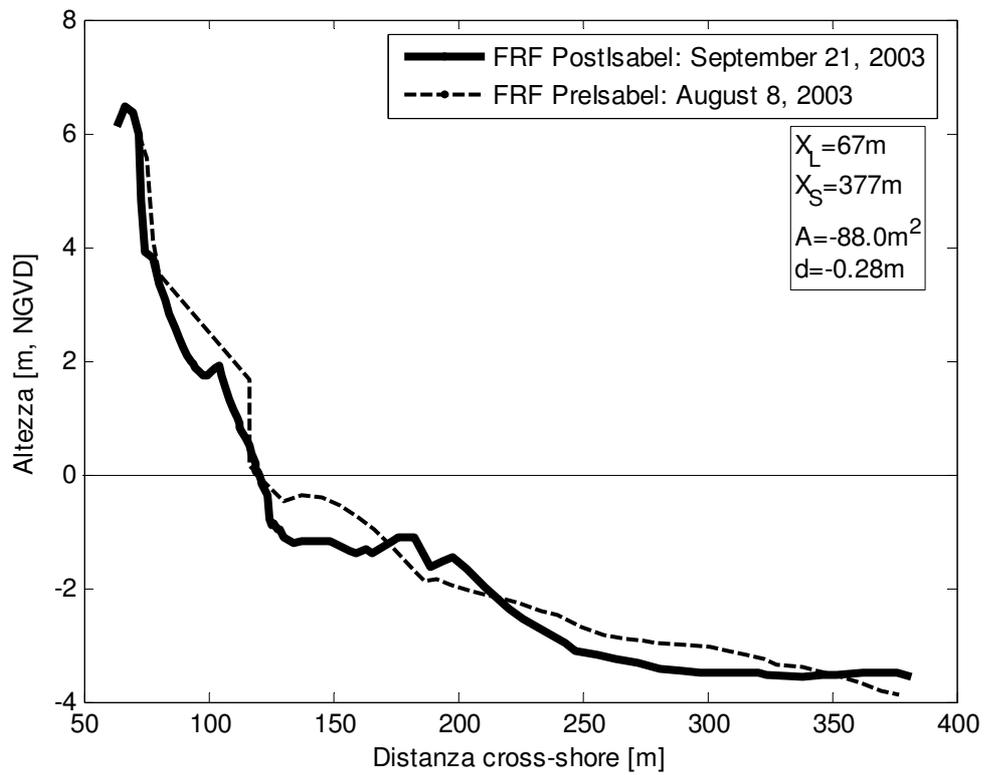
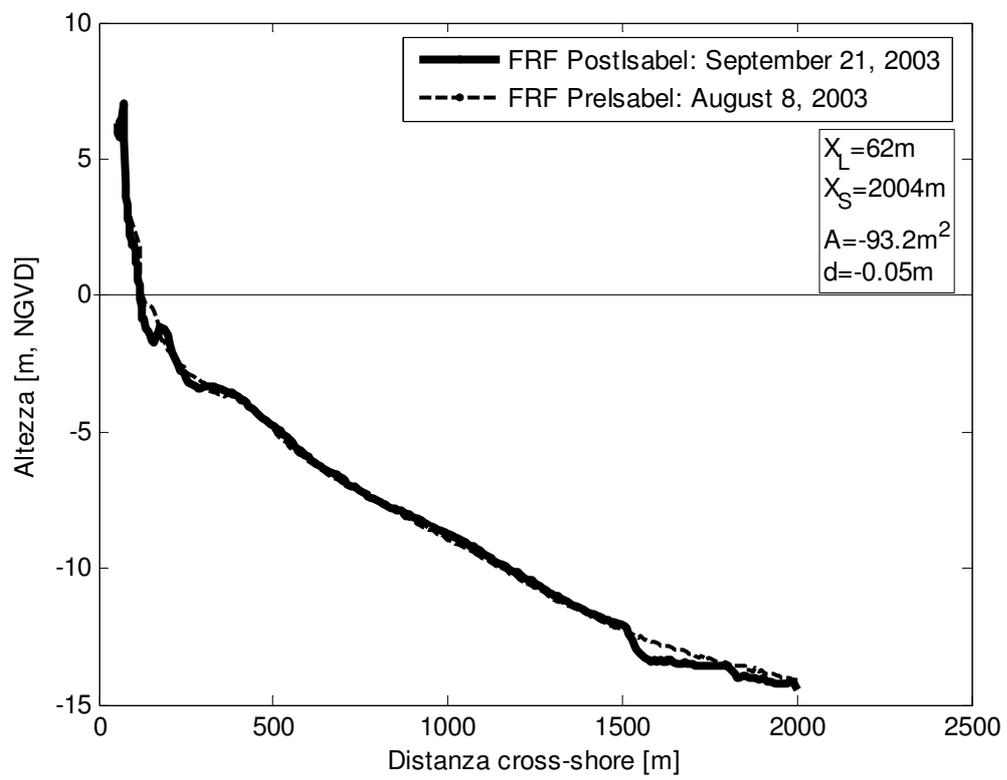
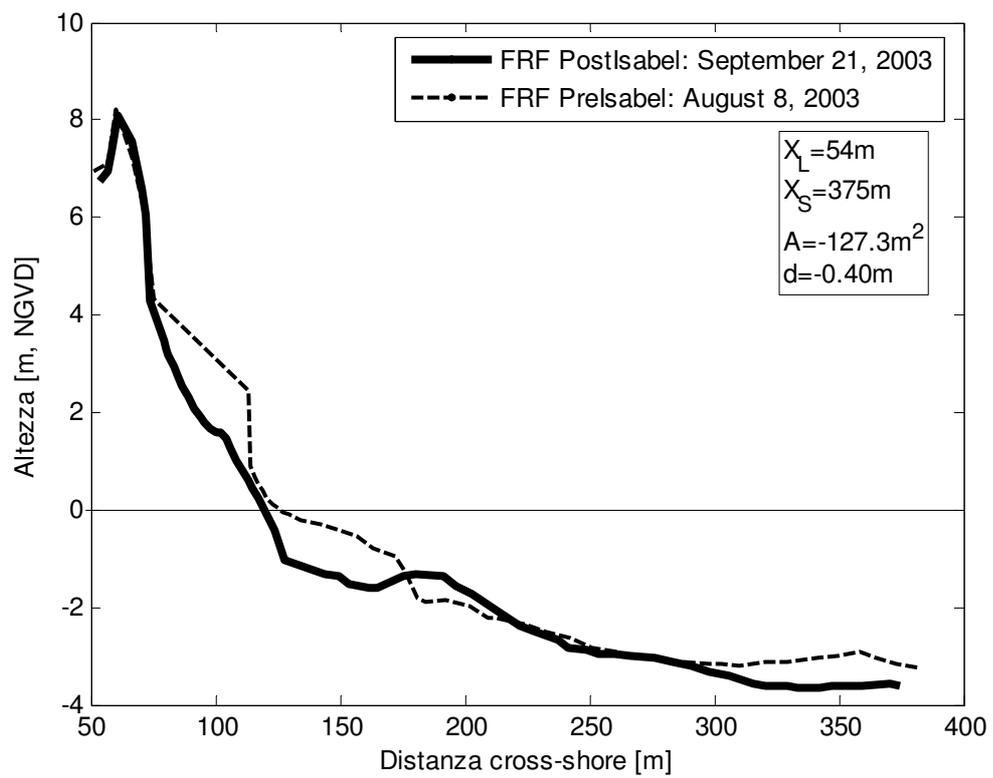


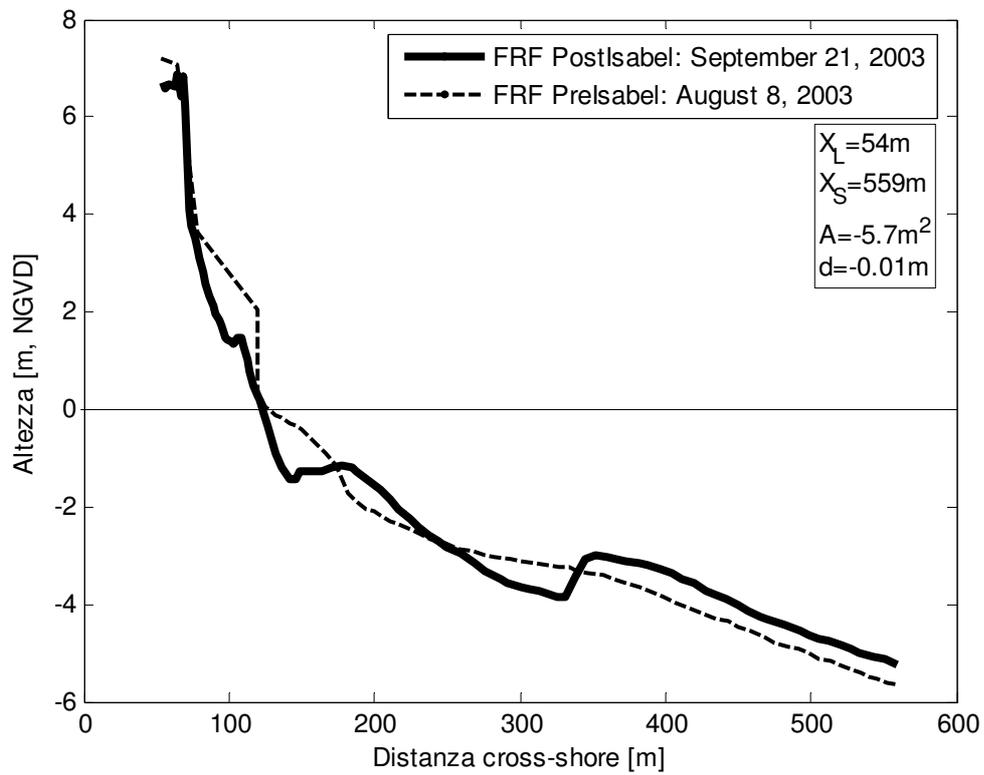
Figura B-1. Profili FRF: vista dall'alto

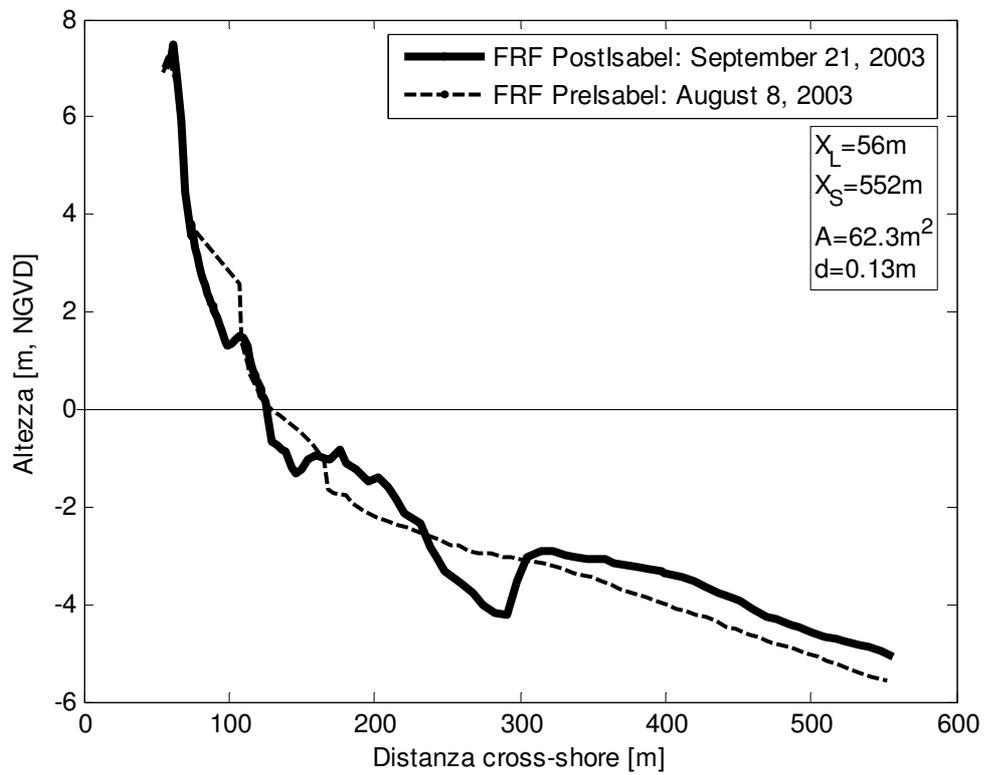
**Figura B-2.** Profilo 58

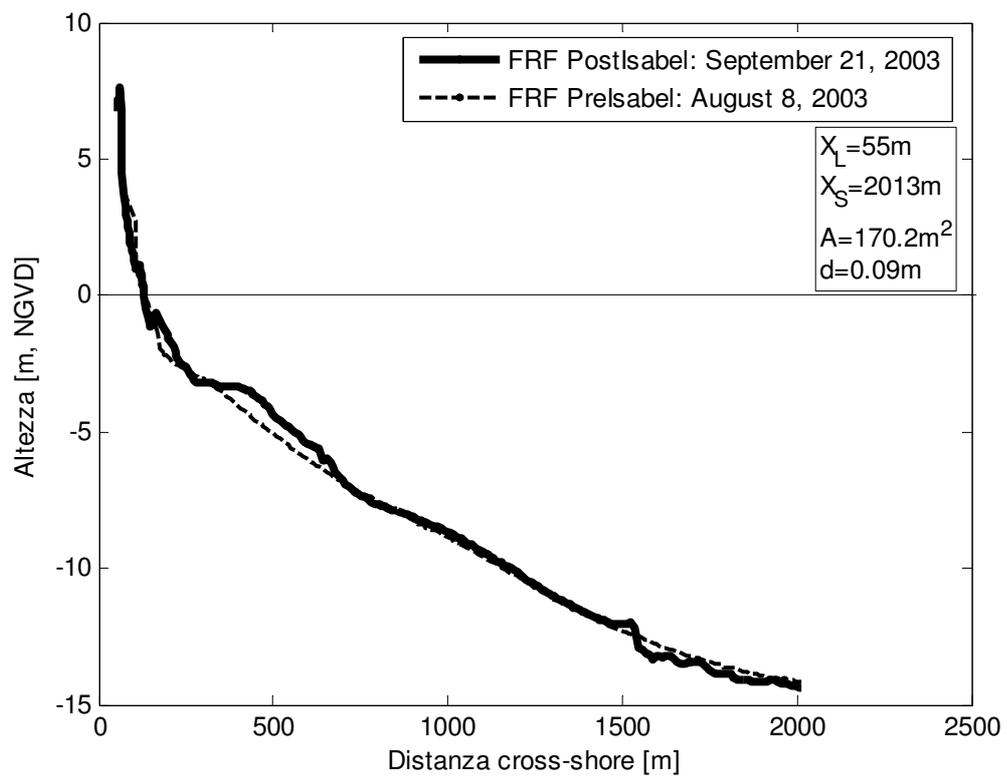
**Figura B-3.** Profilo 59

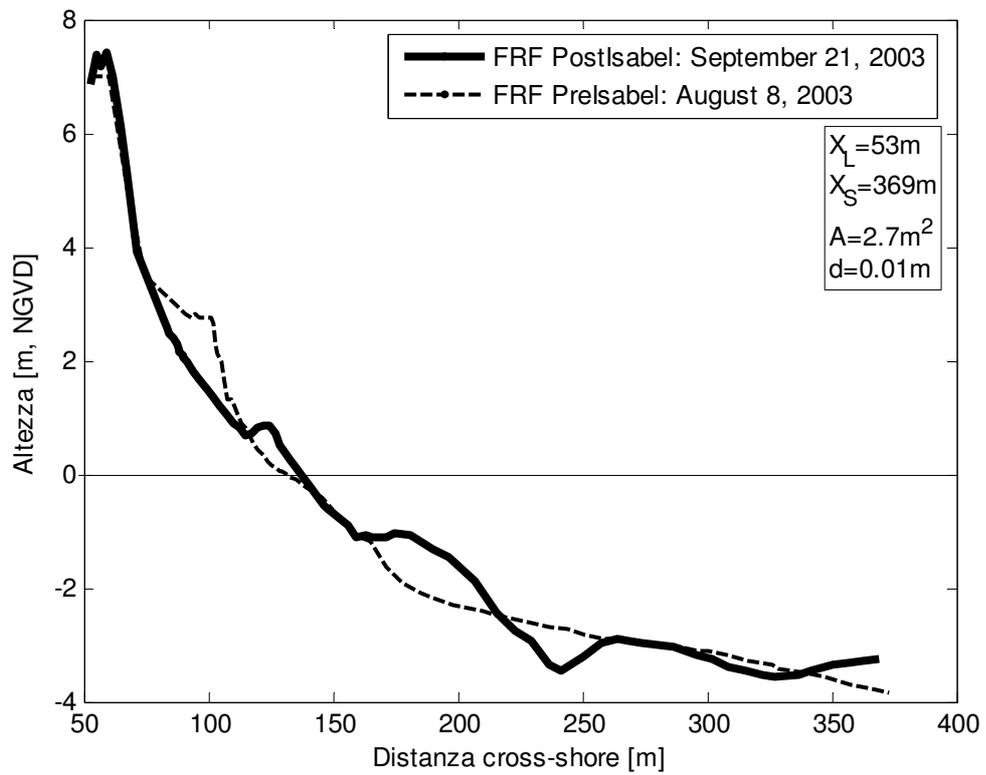
**Figura B-4.** Profilo 62

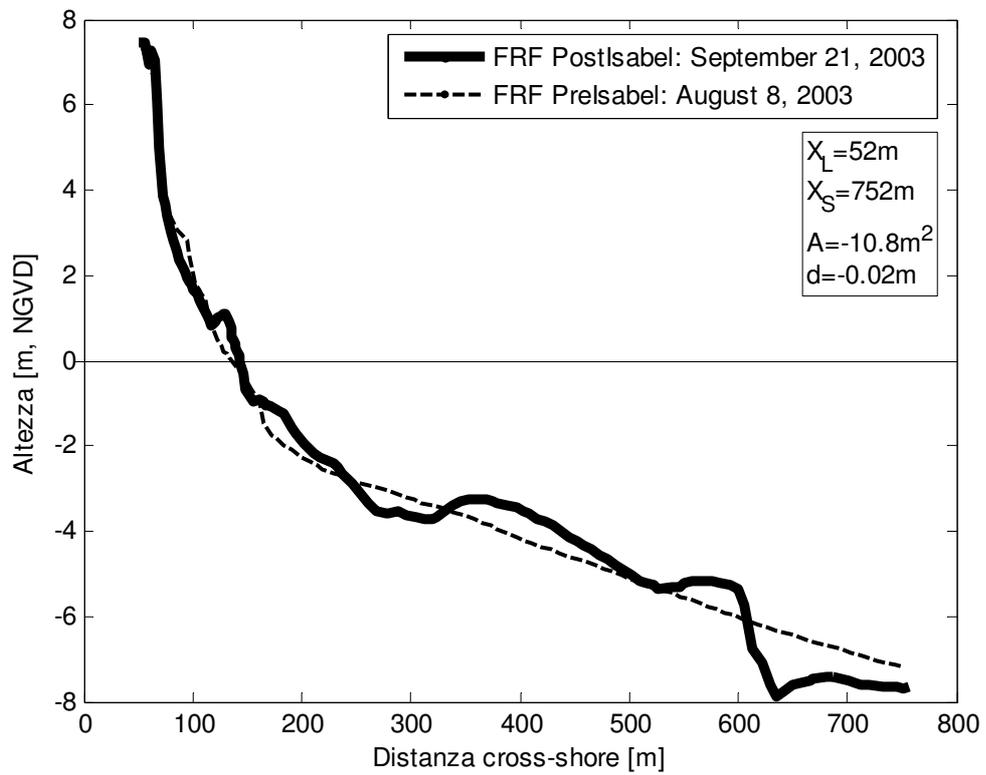
**Figura B-5.** Profilo 64

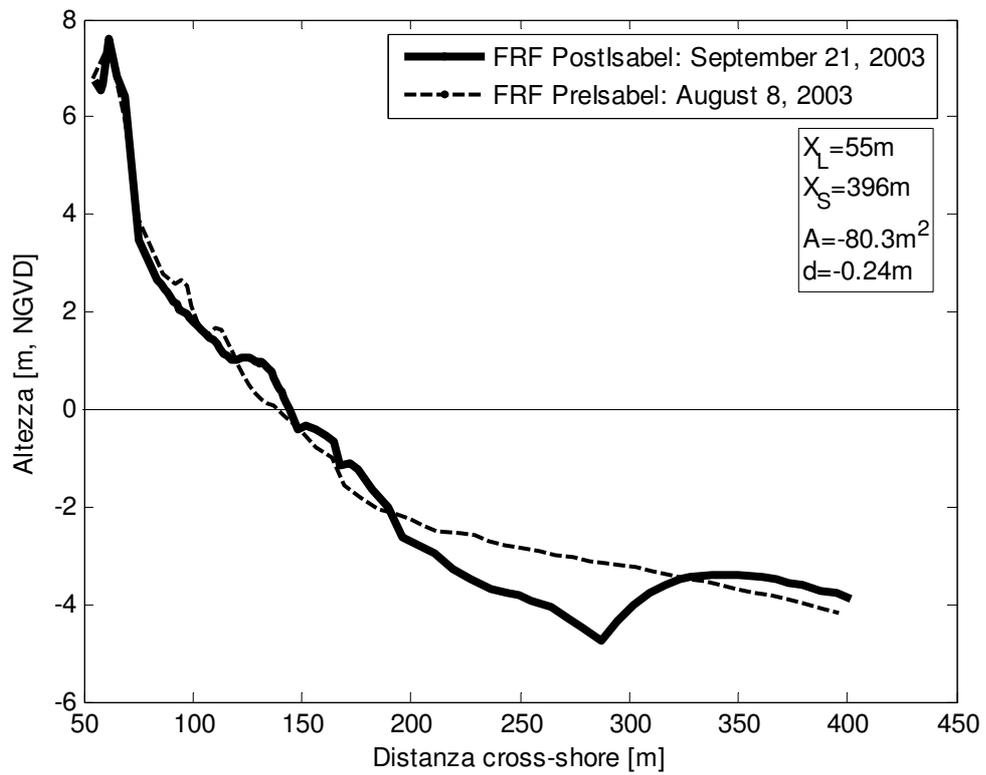
**Figura B-6.** Profilo 66

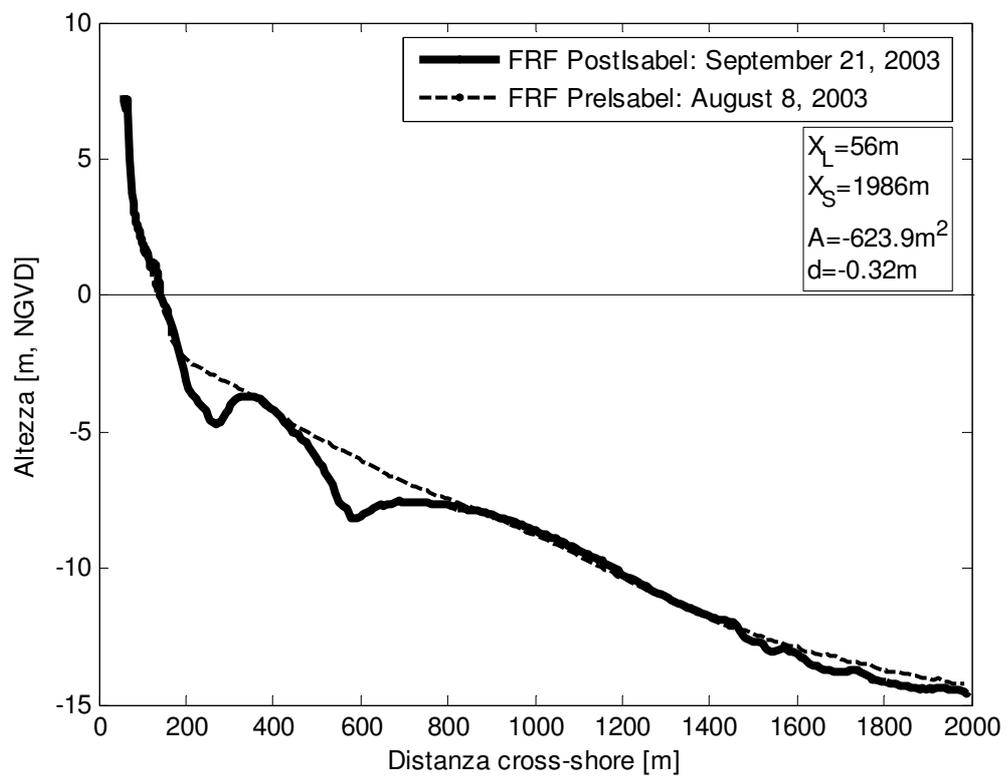
**Figura B-7.** Profilo 67

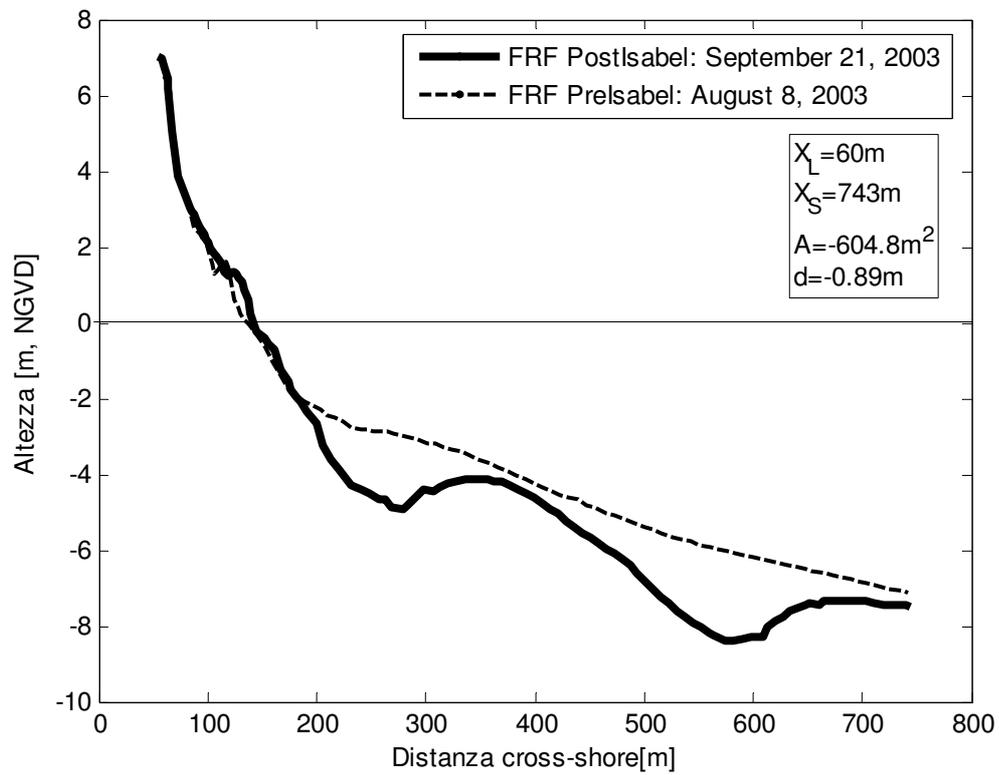
**Figura B-8.** Profilo 73

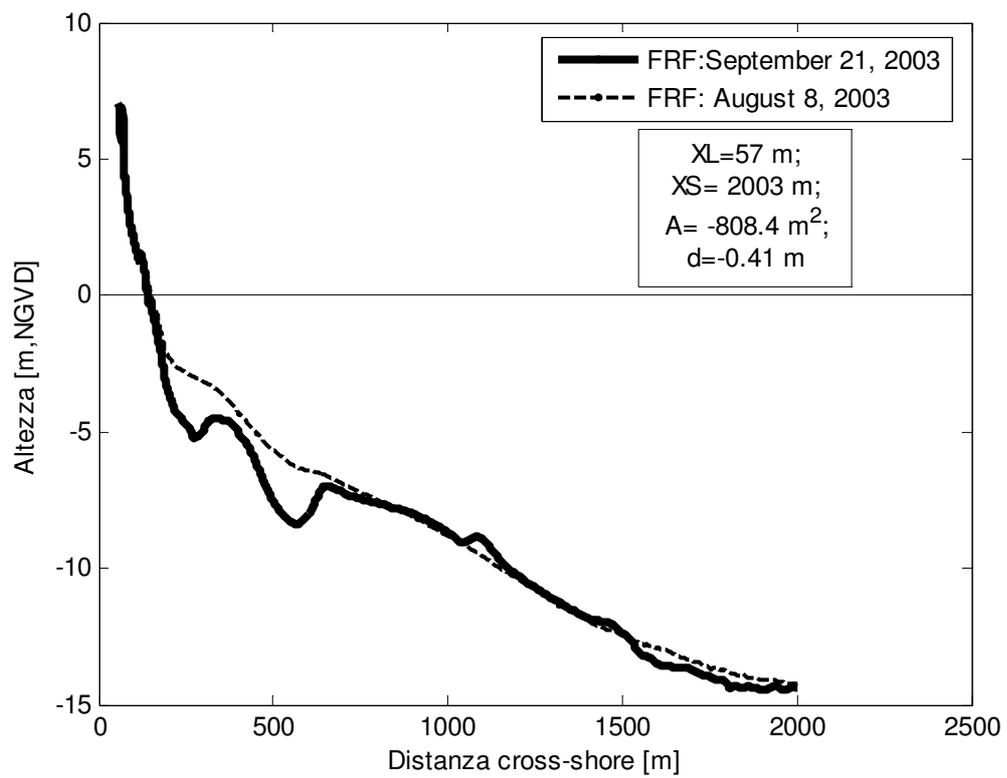
**Figura B-9.** Profilo 76

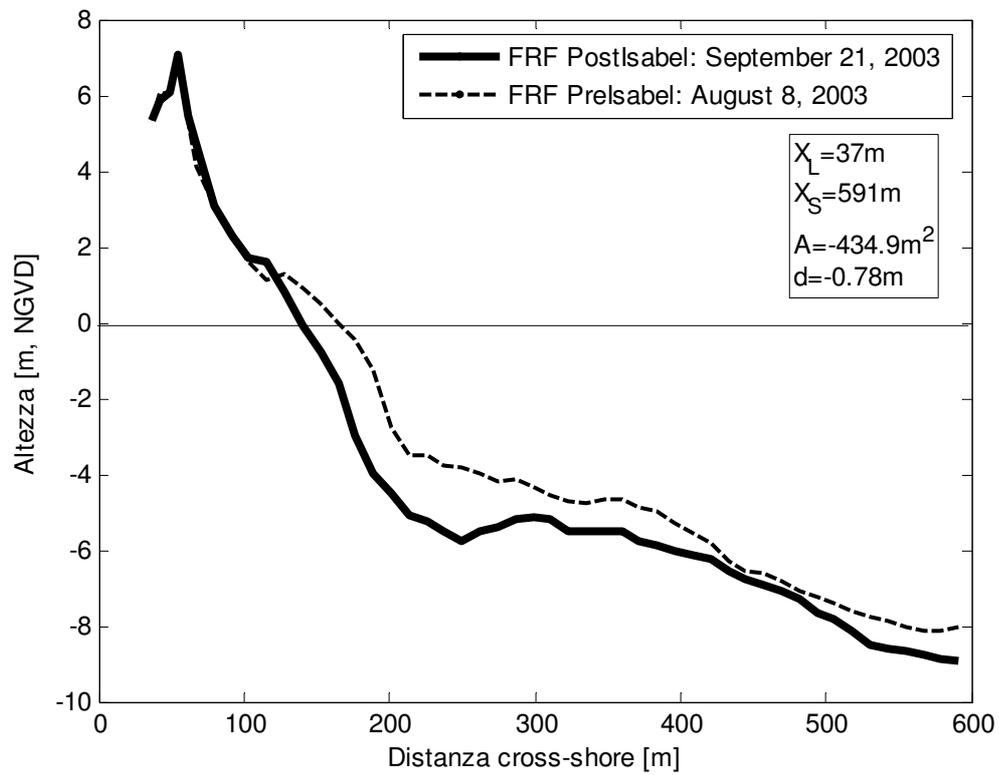
**Figura B-10.** Profilo 85

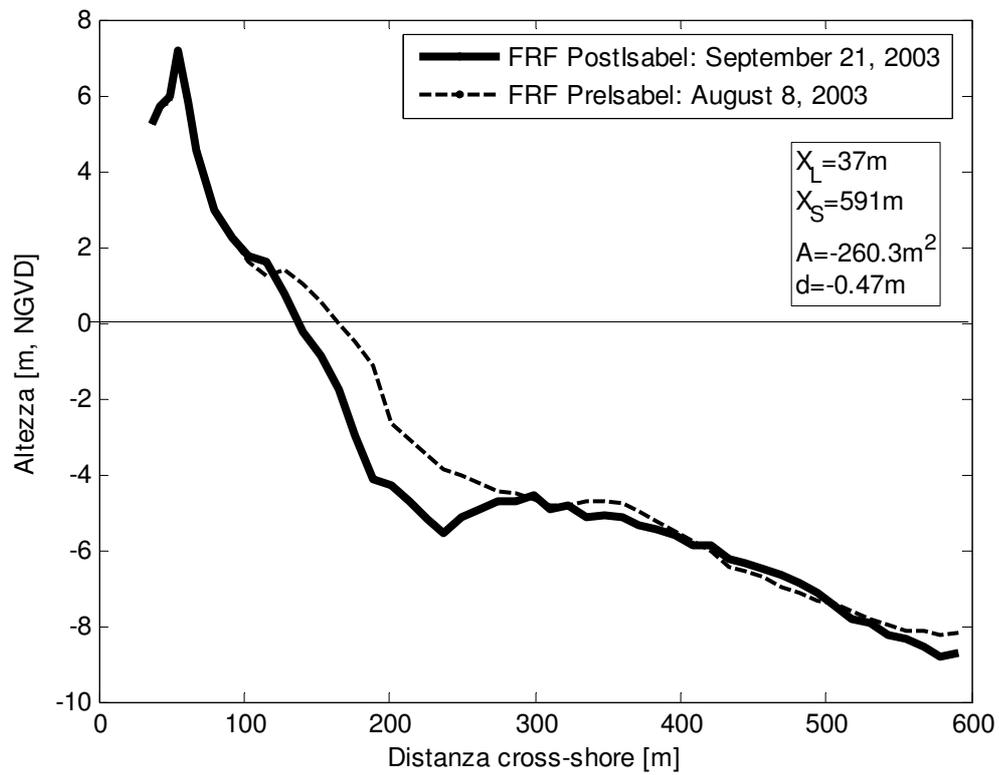
**Figura B-11.** Profilo 95

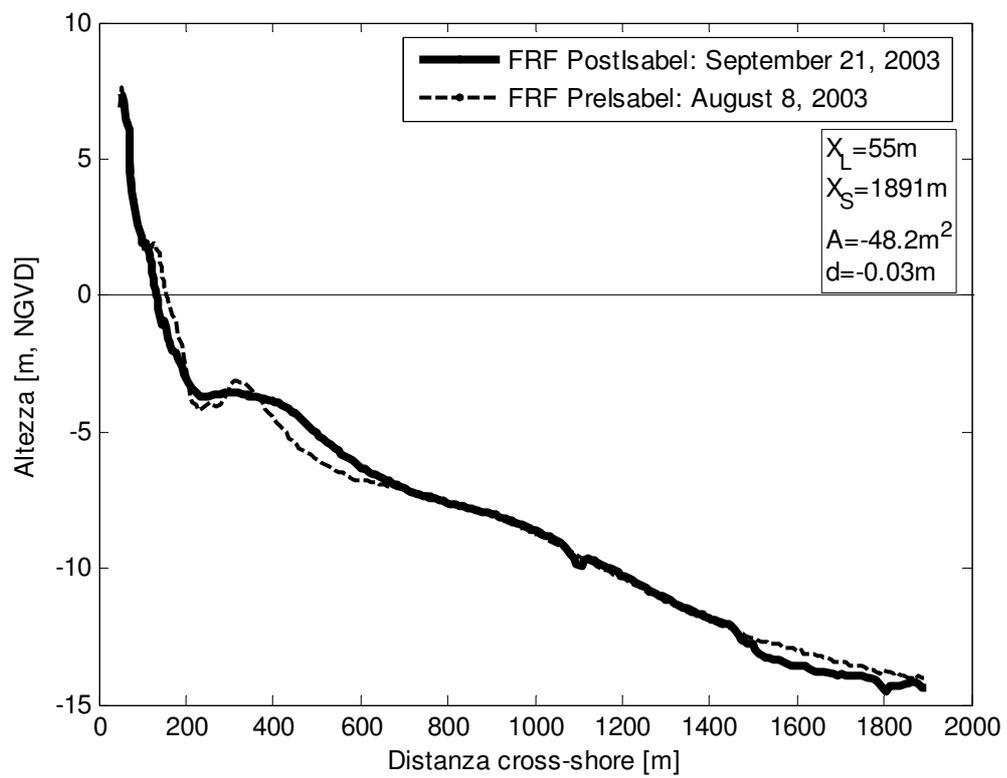
**Figura B-12.** Profilo135

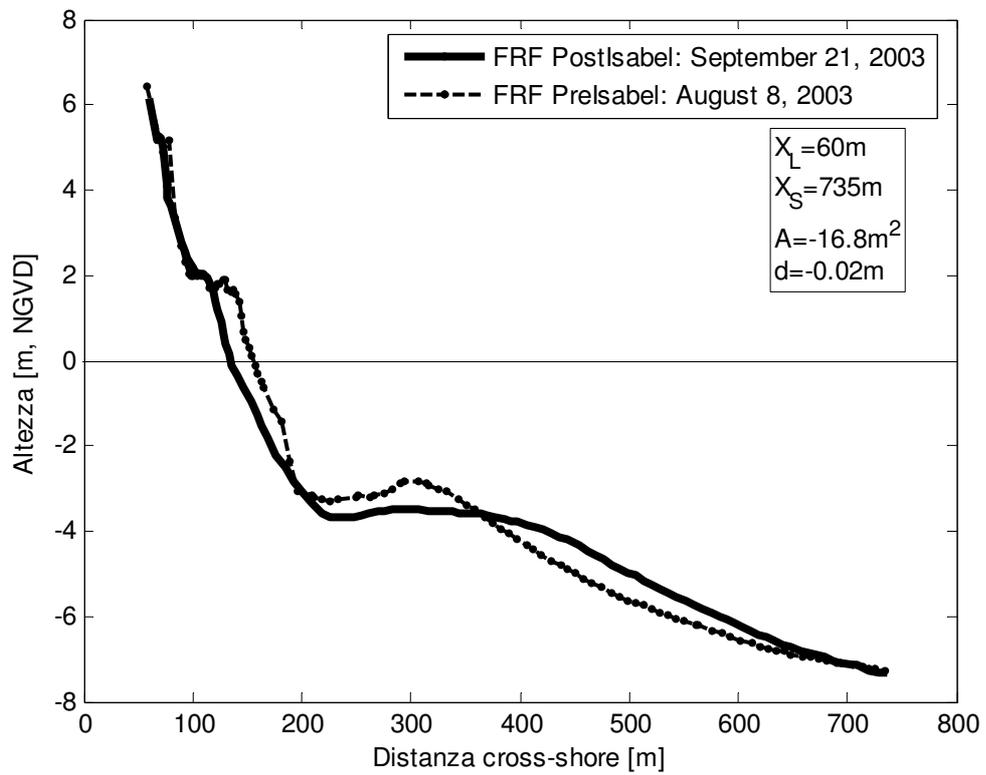
**Figura B-13.** Profilo155

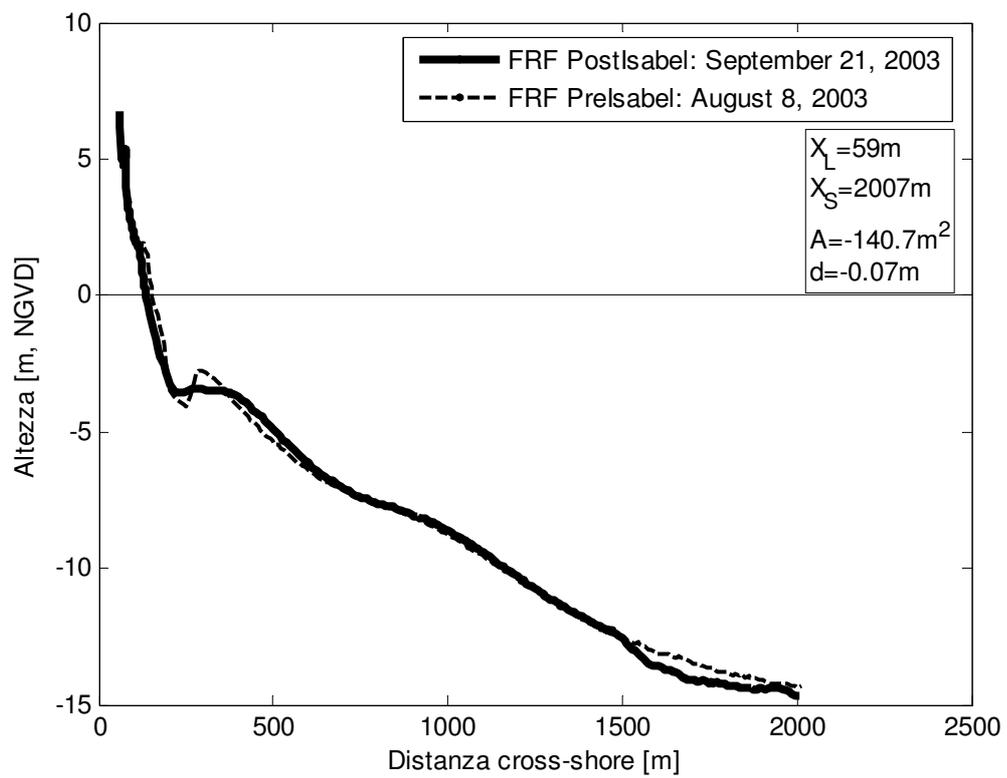
**Figura B-14.** Profilo160

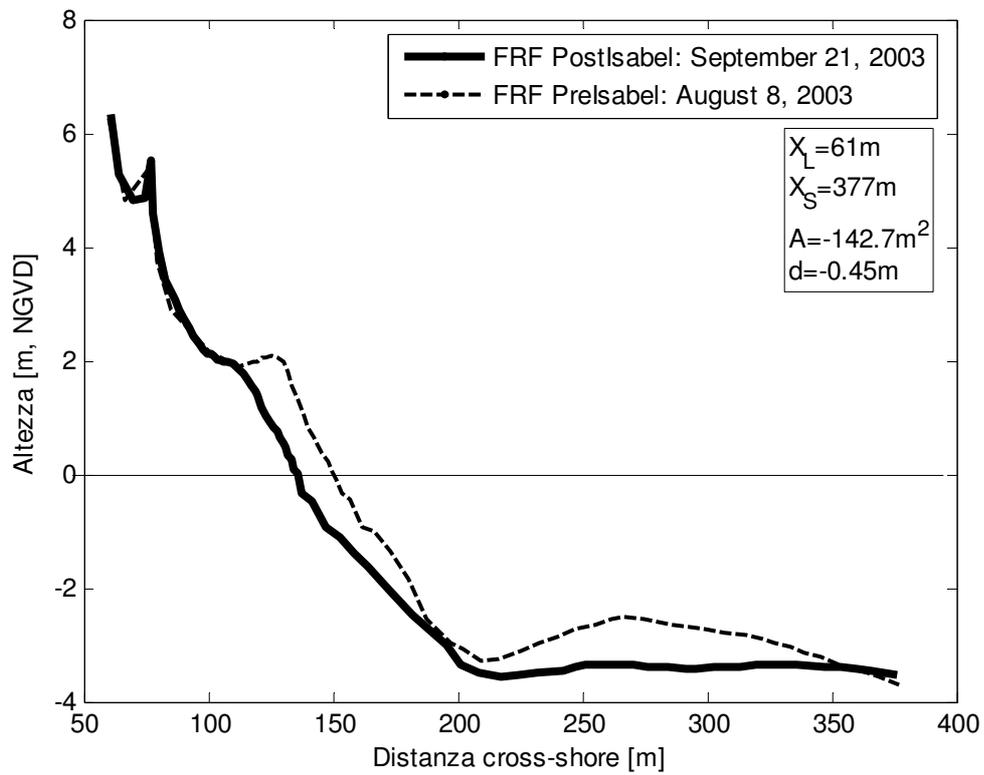
**Figura B-15.** Profilo164

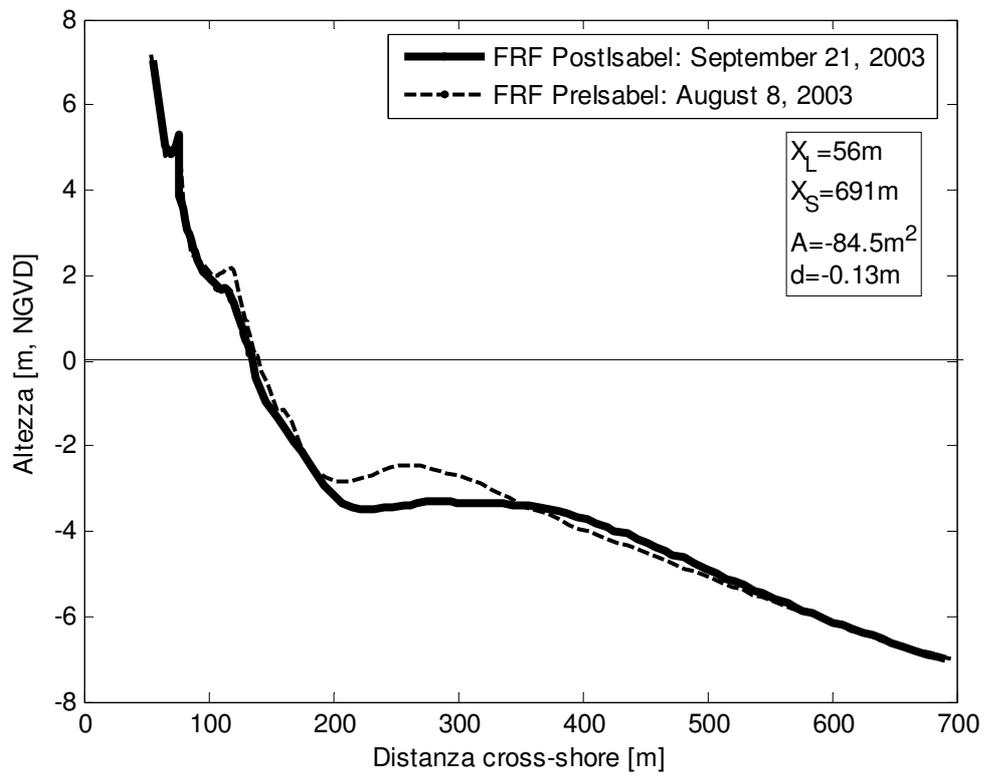
**Figura B-16.** Profilo166

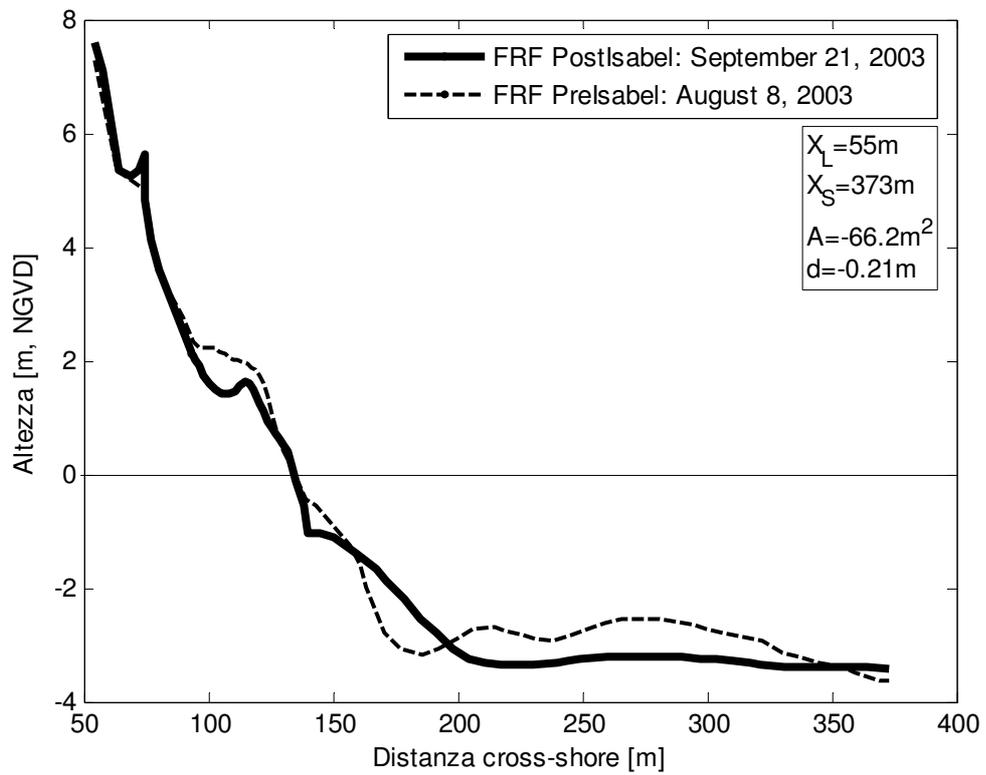
**Figura B-17.** Profilo171

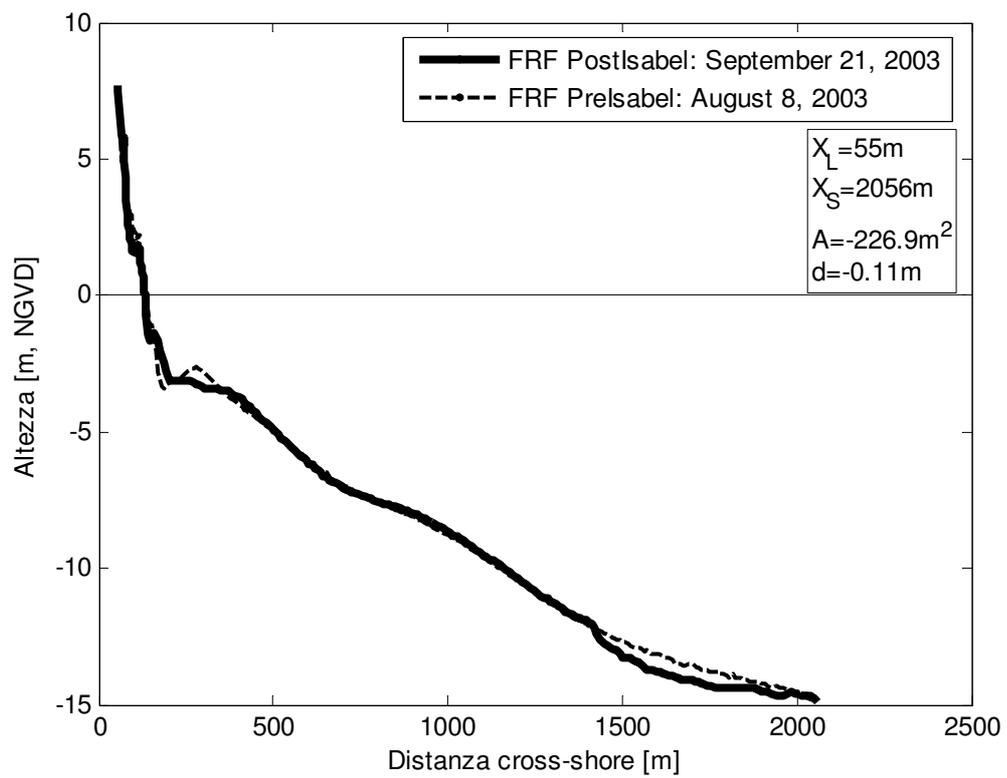
**Figura B-18.** Profilo174

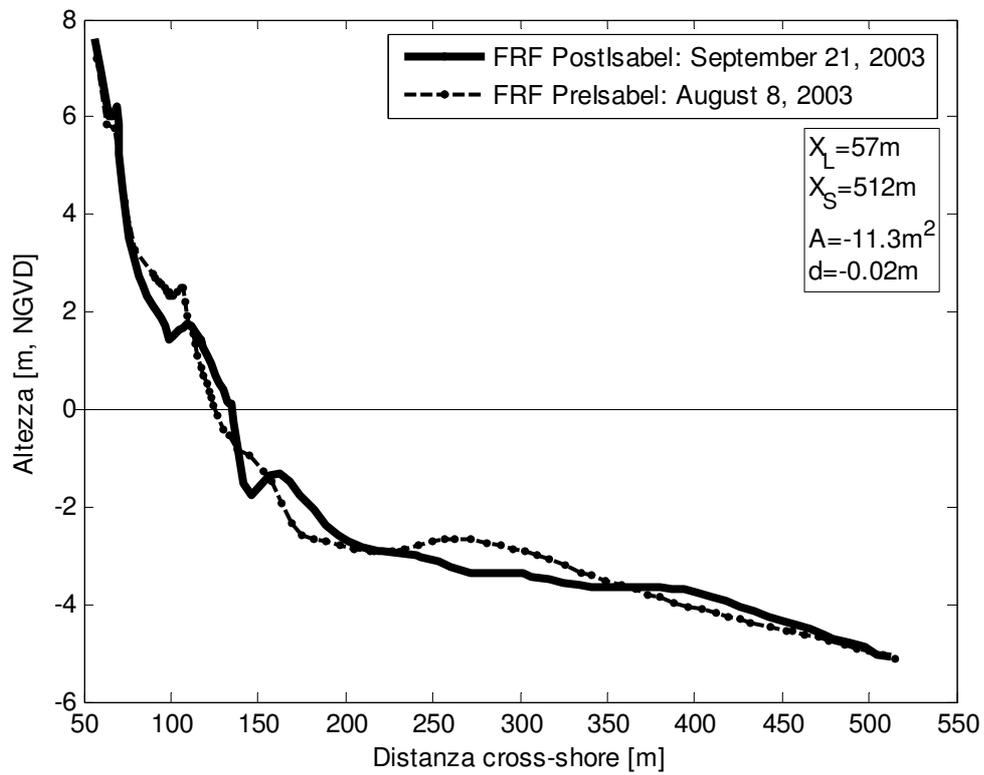
**Figura B-19.** Profilo176

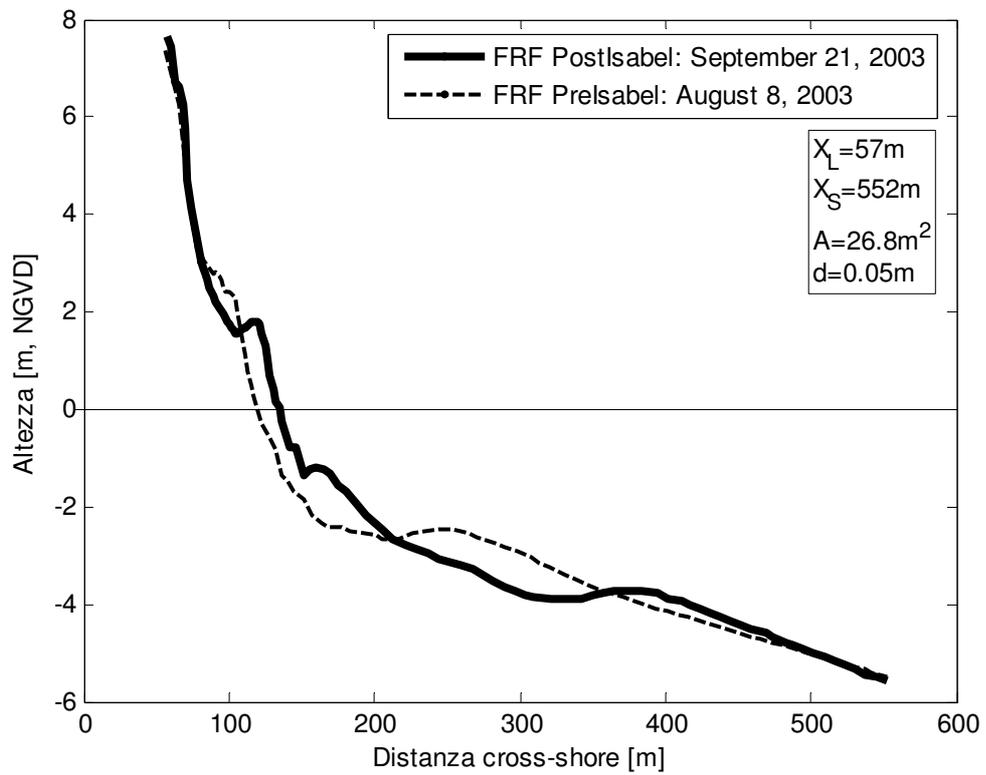
**Figura B-19.** Profilo178

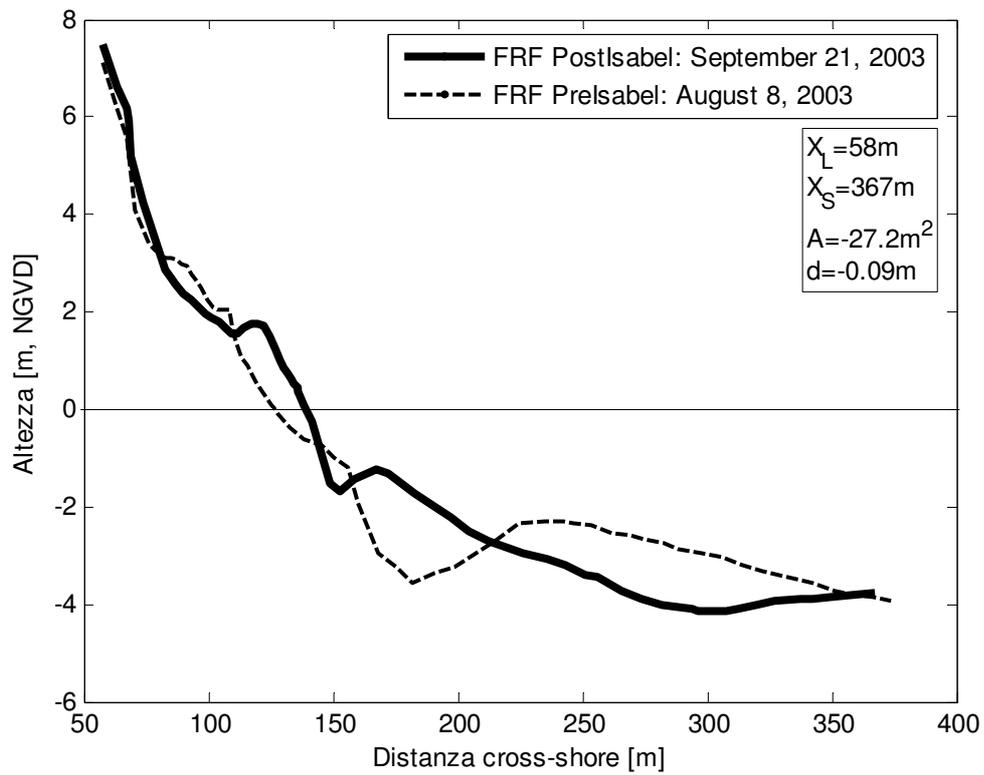
**Figura B-20.** Profilo181

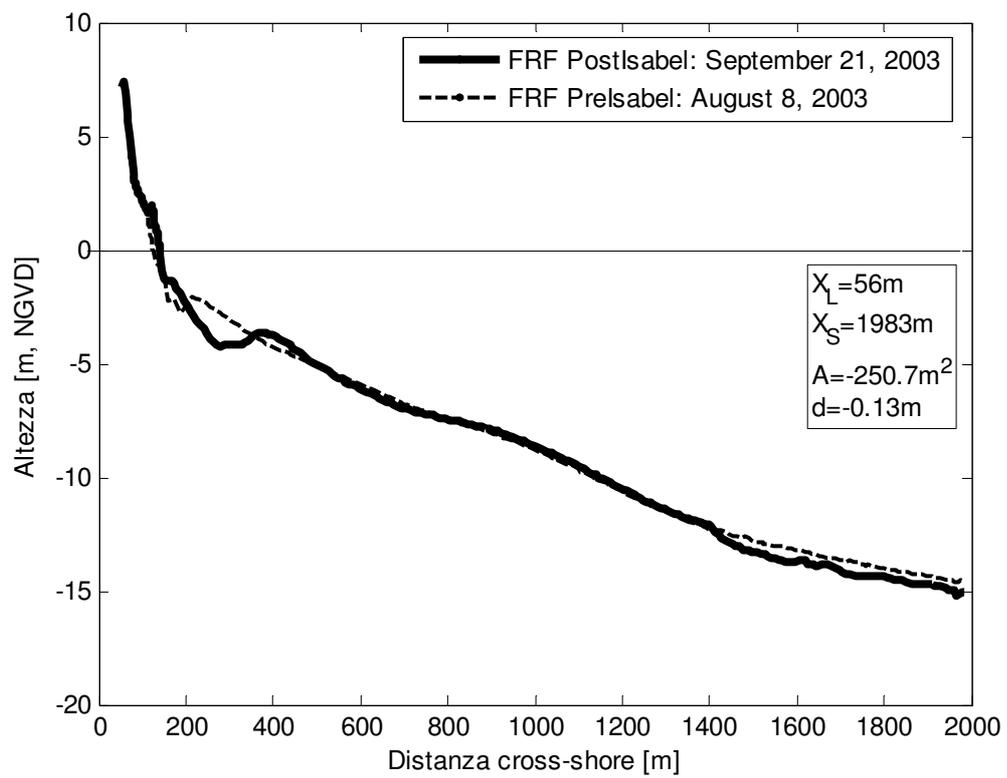
**Figura B-21.** Profilo182

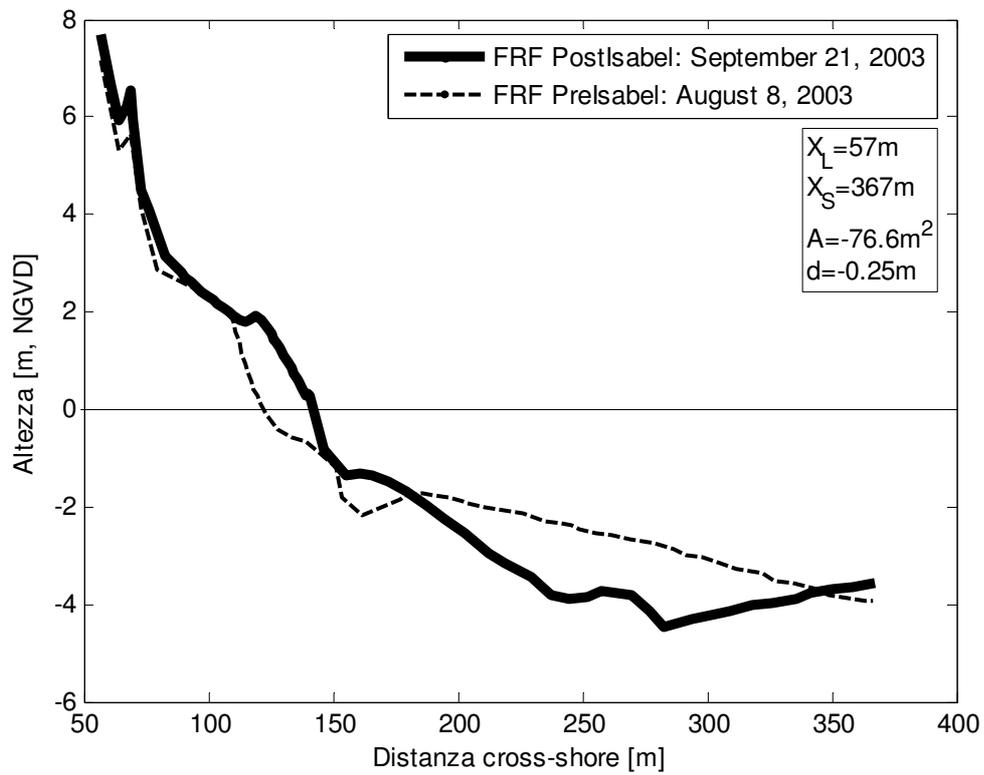
**Figura B-22.** Profilo183

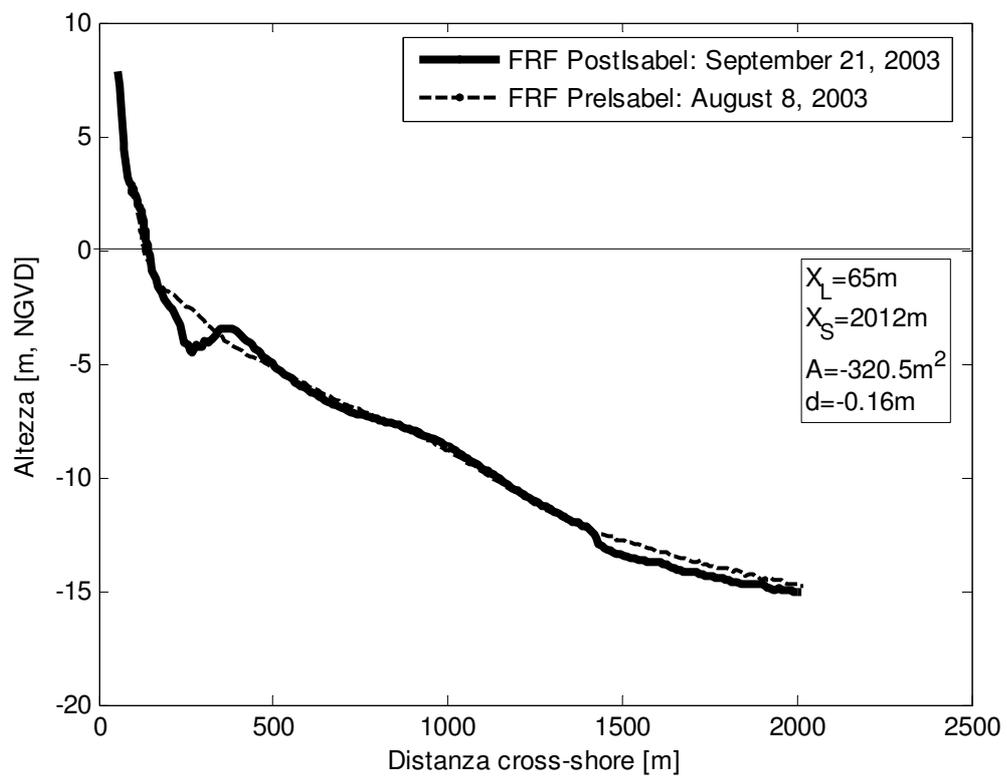
**Figura B-23.** Profilo185

**Figura B-24.** Profilo186

**Figura B-25.** Profilo187

**Figura B-26.** Profilo188

**Figura B-27.** Profilo189

**Figura B-28.** Profilo190

APPENDICE C

ESTENSIONE DEI PROFILI FRF

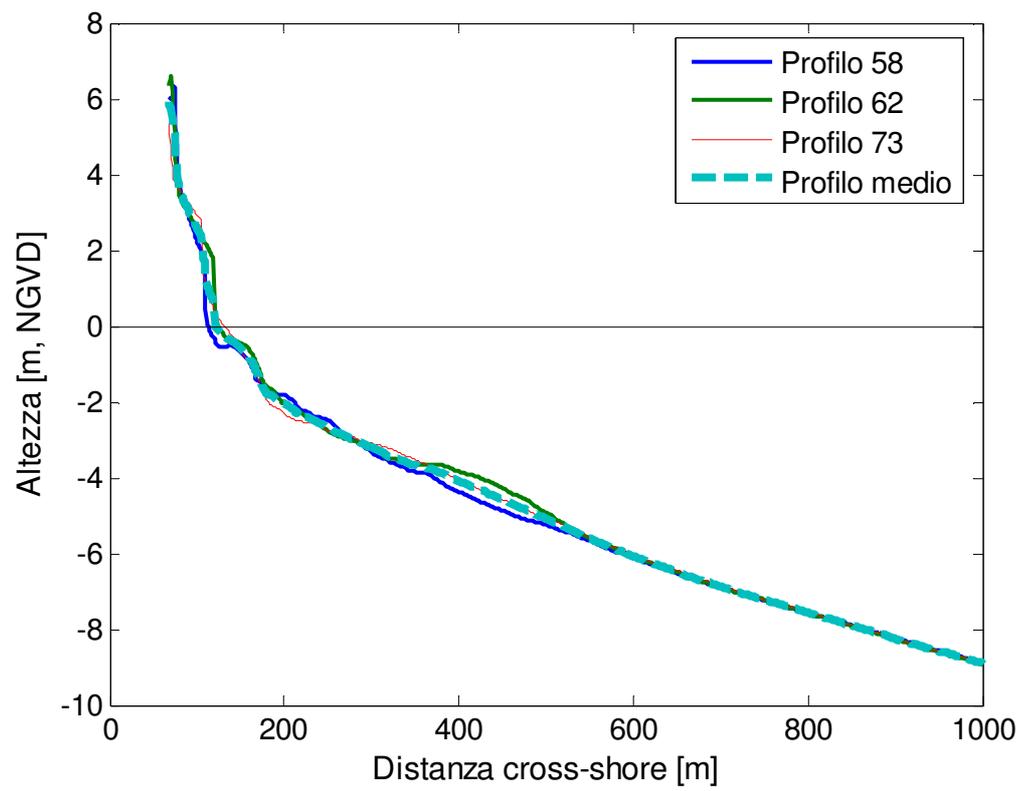


Figura C.1. Profili 58, 62 e 73 e profilo medio

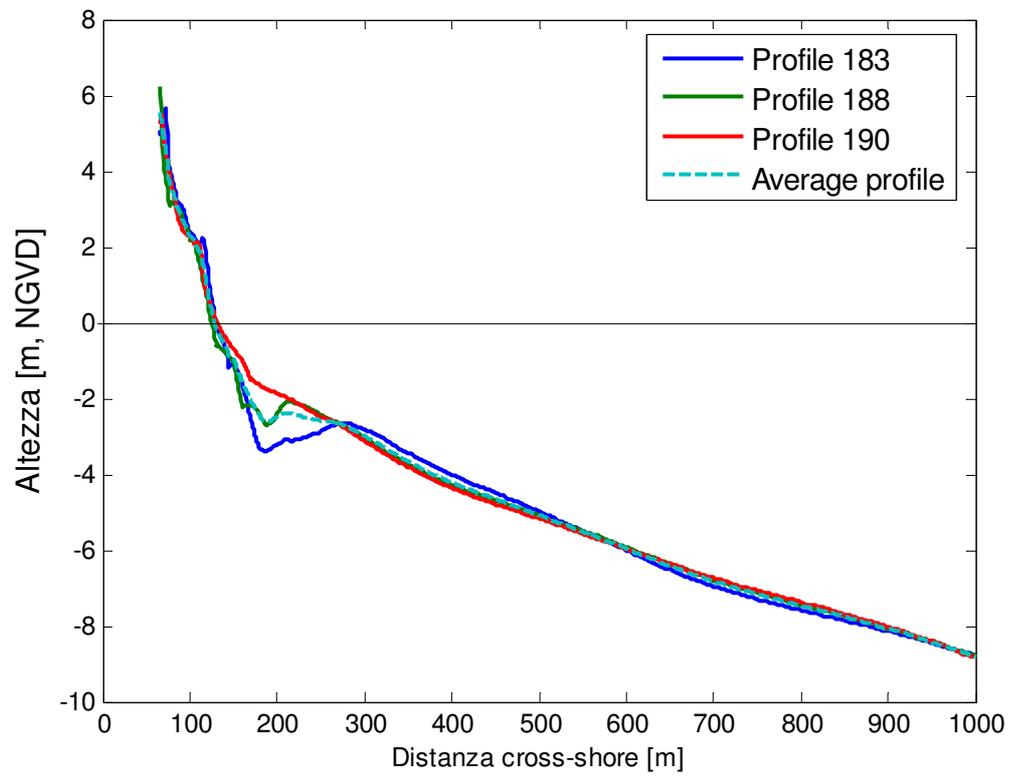


Figura C.2. Profili 183, 188, 190 e profilo medio

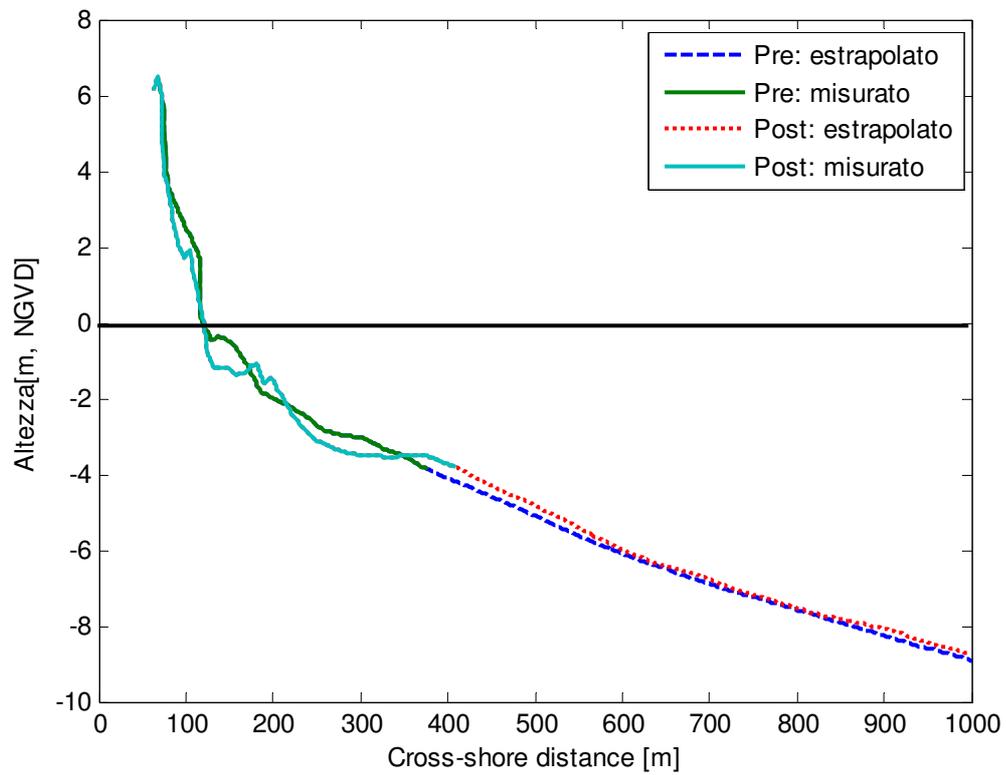


Figura C.3. FRF 59: profilo pre e post Isabel misurato ed estrapolato come media dei profili 58, 62 e 73

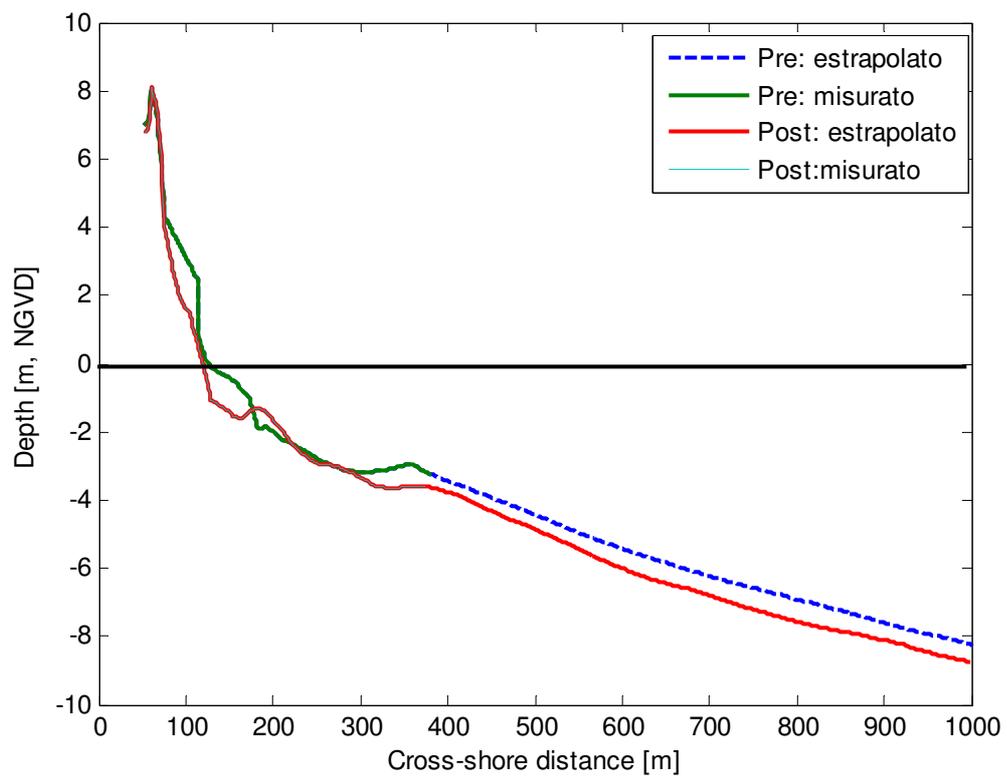


Figura C.4. FRF 64: profilo pre e post Isabel misurato ed estrapolato come media dei profili 58, 62 e 73

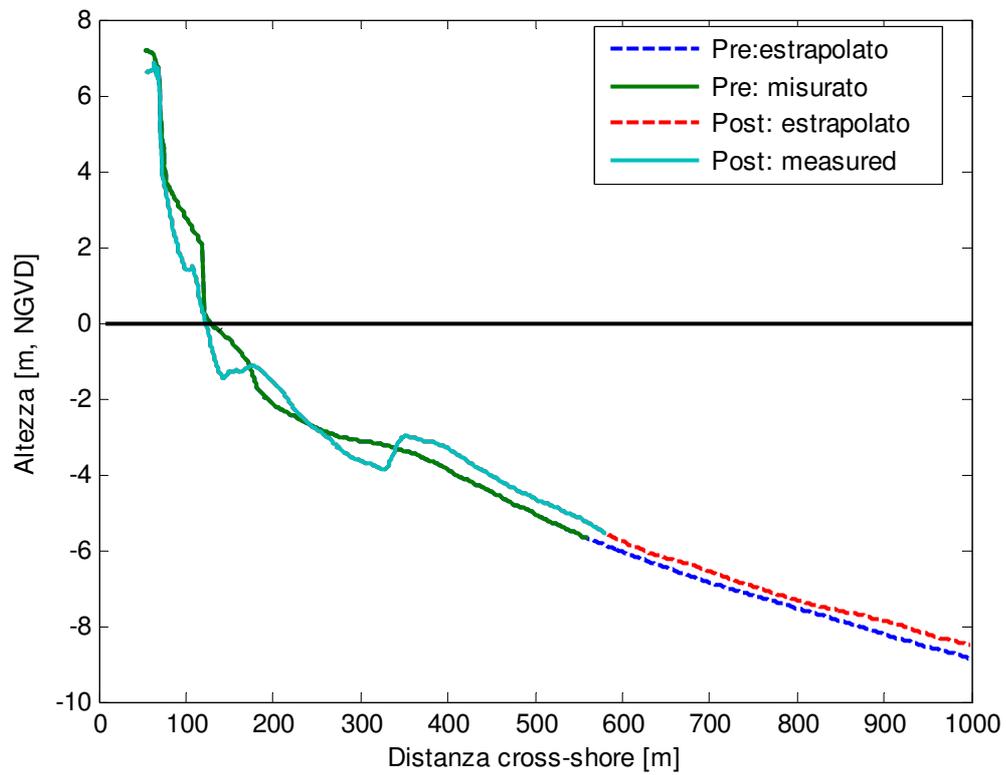


Figura C.5. FRF 66: profilo pre e post Isabel misurato ed estrapolato come media dei profili 58, 62 e 73

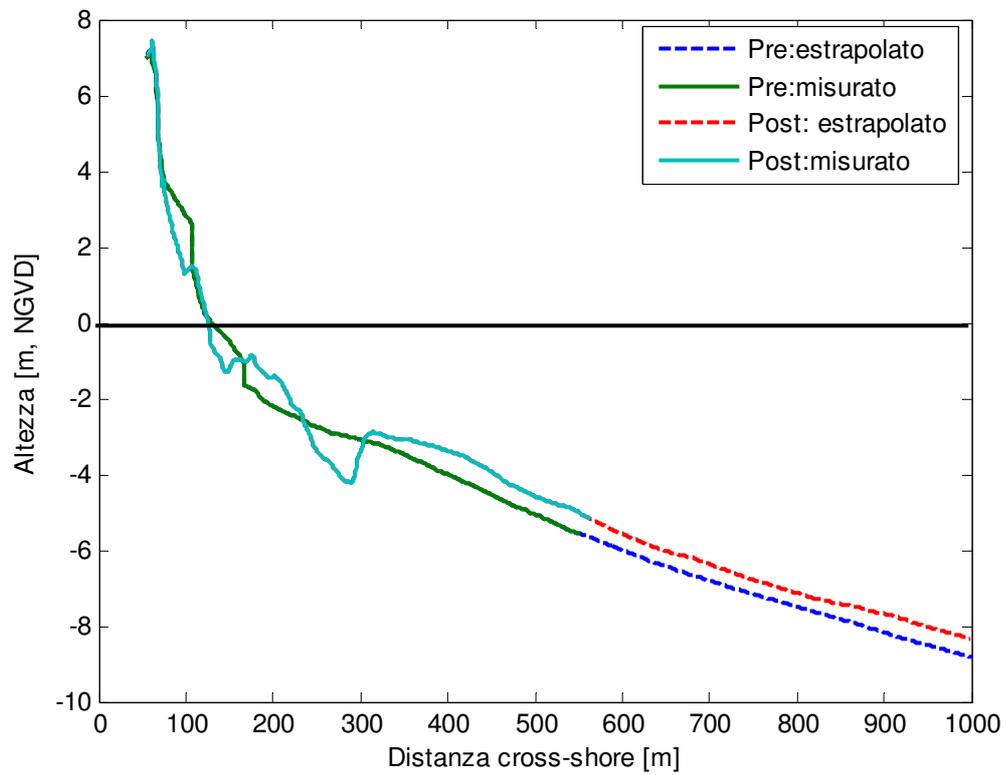


Figura C.6. FRF 67: profilo pre e post Isabel misurato ed estrapolato come valore medio dei profili 58, 62 e 73

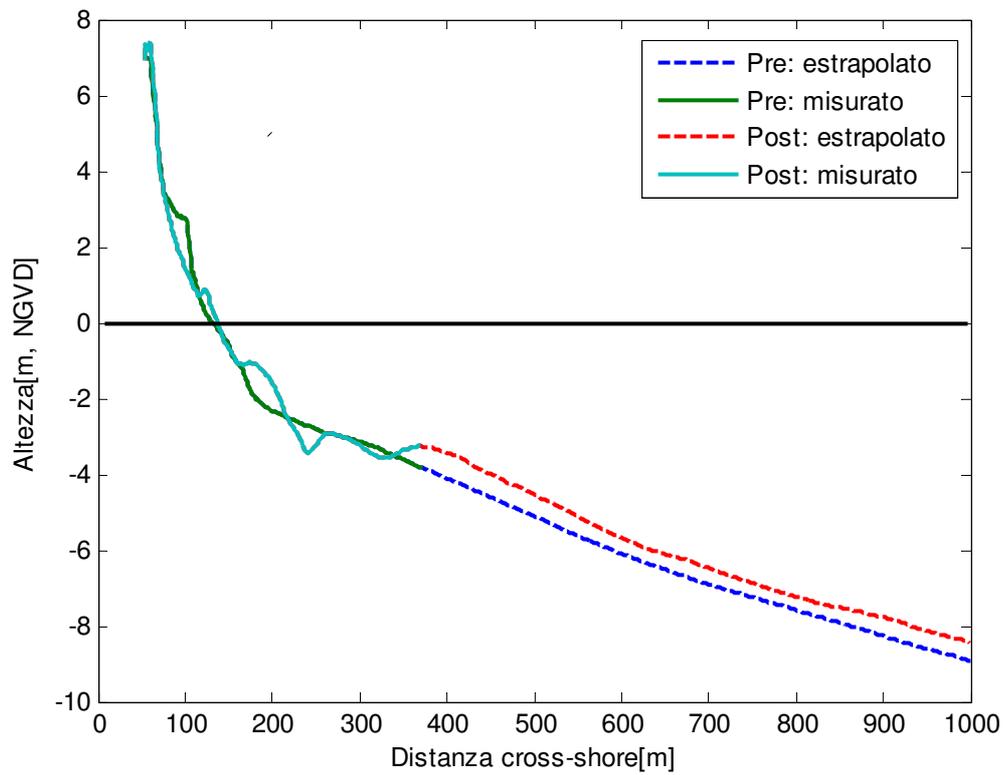


Figura C.7. FRF 76: profilo pre e post Isabel misurato ed estrapolato come media dei profili 58, 62 e 73

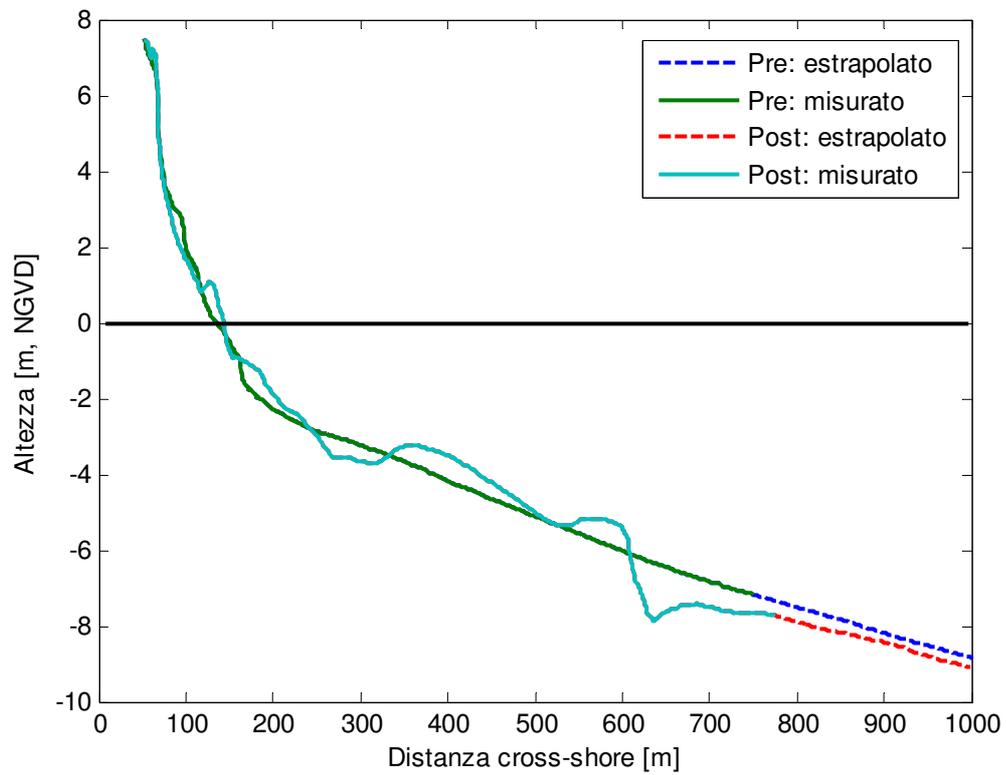


Figura C.8. FRF 85: profilo pre e post Isabel misurato ed estrapolato come media dei profili 58, 62 e 73

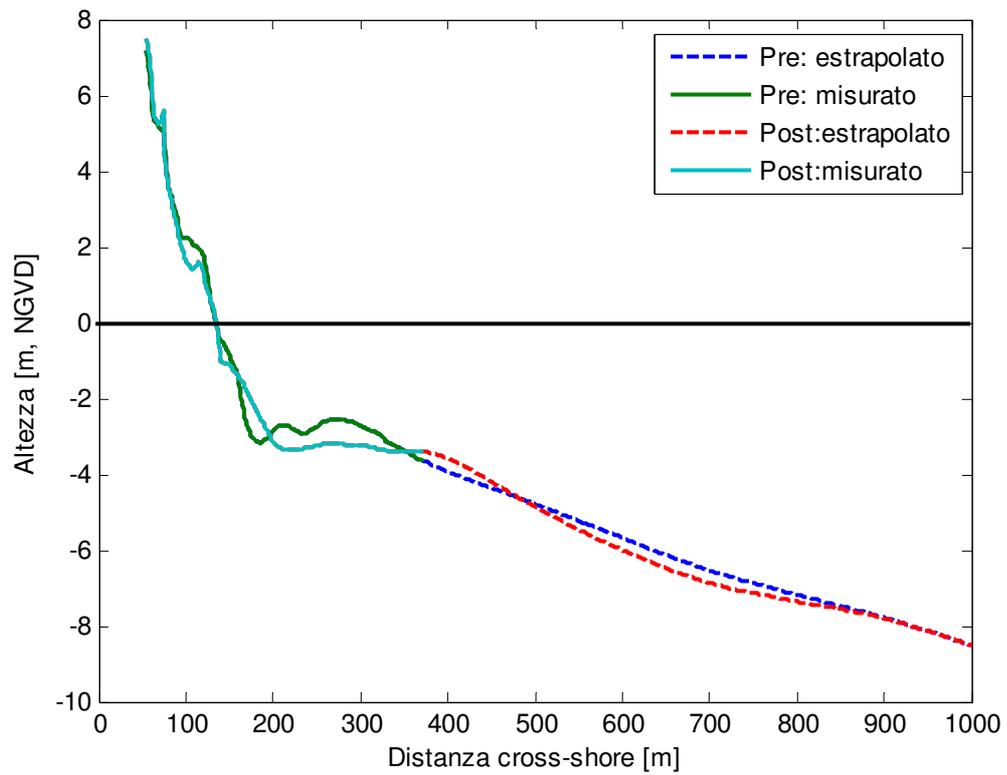


Figura C.9. FRF 182: profilo pre e post Isabel misurato ed estrapolato come media dei profili 183, 188 e 190

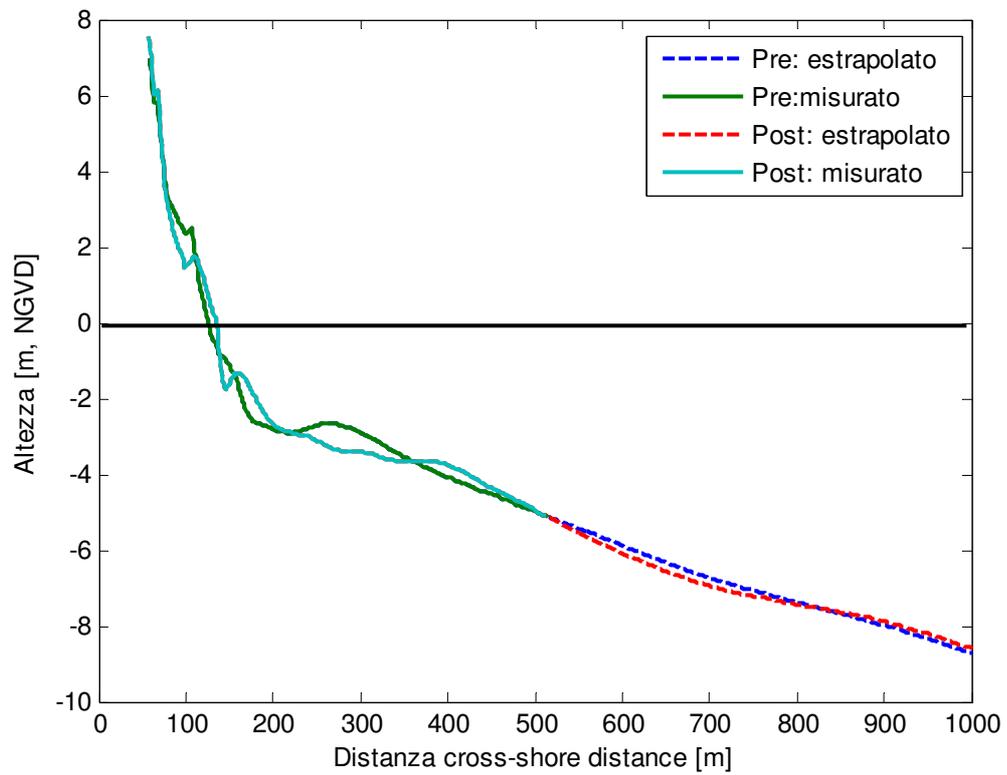


Figura C.10. FRF profilo 185: profilo pre e post Isabel misurato ed estrapolato come media dei profili 183, 188 e 190

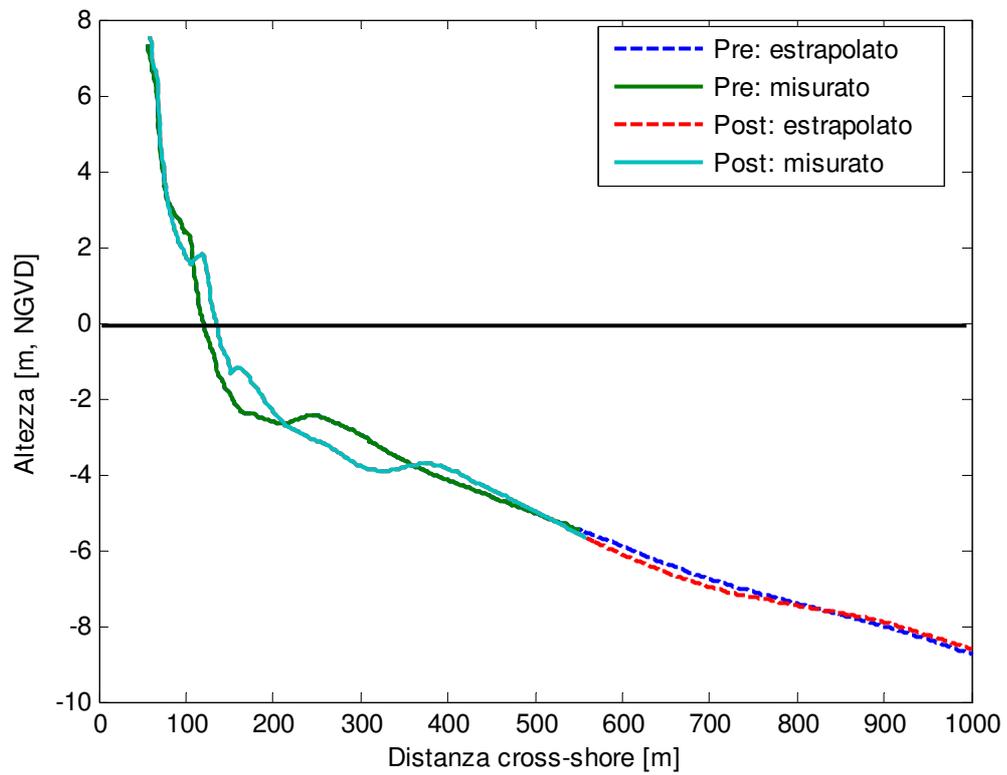


Figura C.11. FRF 186: profilo pre e post Isabel misurato ed estrapolato come media dei profili 183, 188 e 190

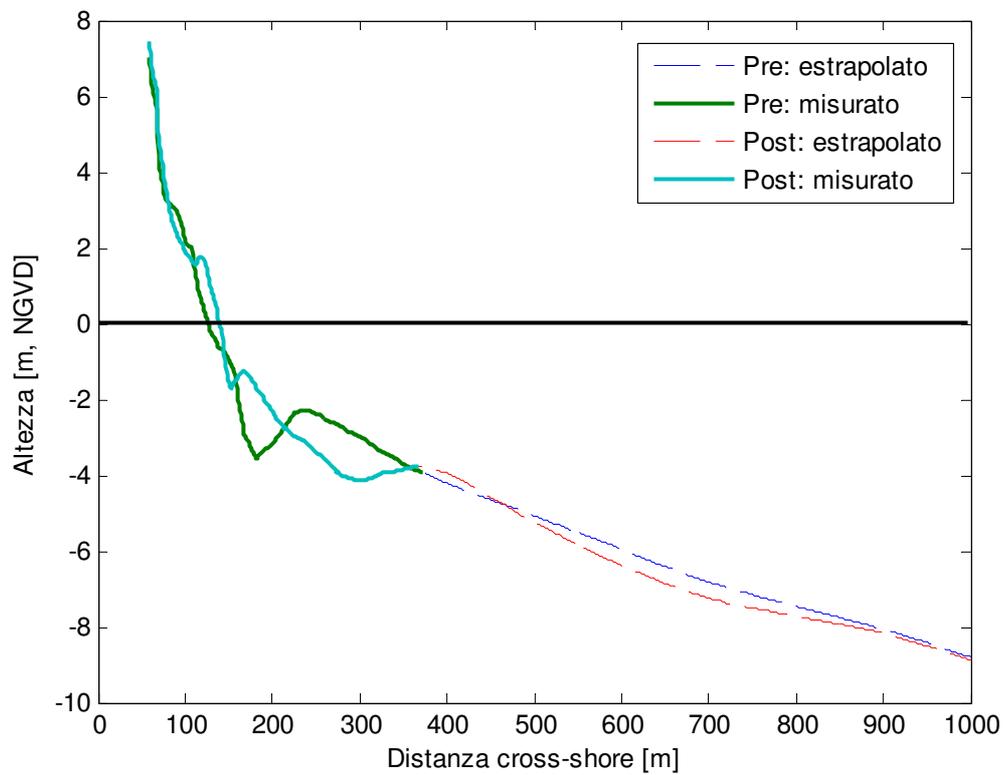


Figura C.12. FRF 187: profilo pre e post Isabel misurato ed estrapolato come media dei profili 183, 188 e 190

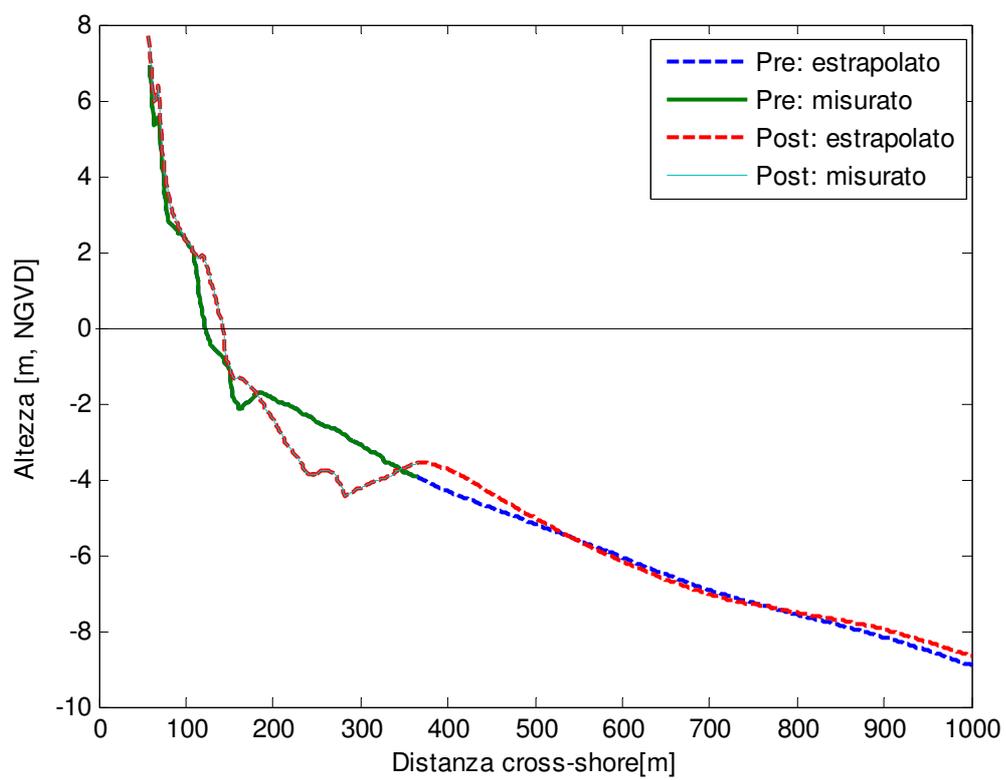


Figura C.13. FRF 189: profilo pre e post Isabel misurato ed estrapolato come mdia dei profili 183, 188 e 190

APPENDICE D

APPLICAZIONE DEL MODELLO CSHORE AI PROFILI FRF

D.1. TRASPORTO DEI SEDIMENTI IN DIREZIONE CROSS-SHORE E LONG-SHORE

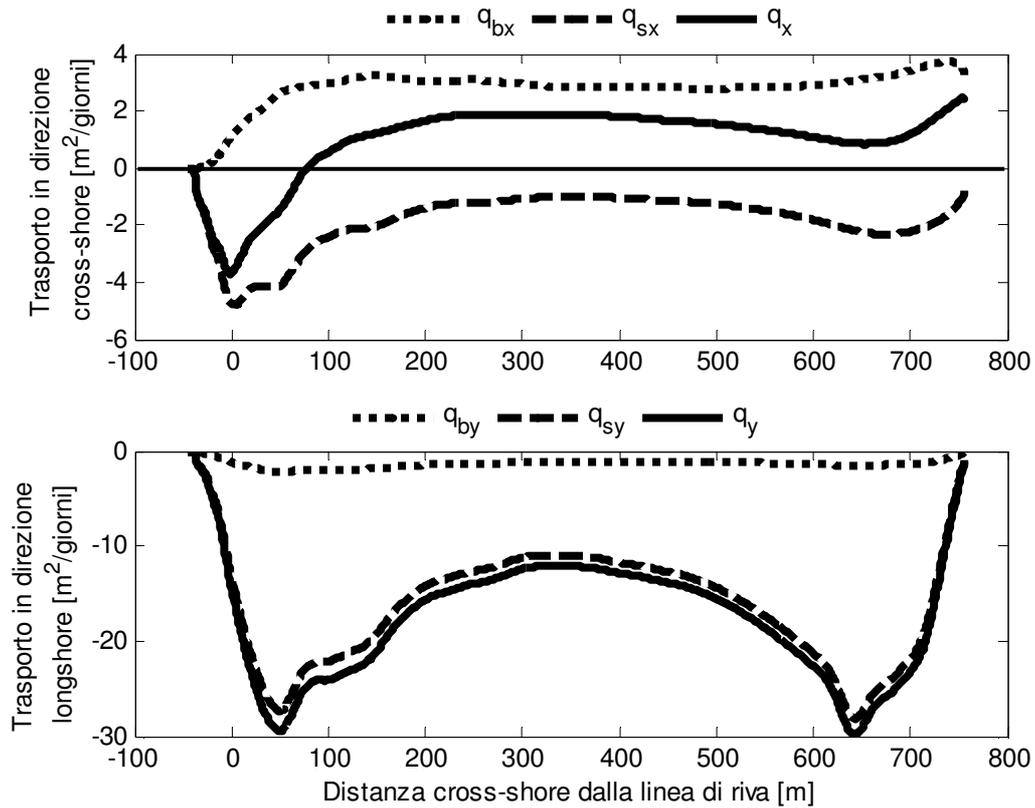


Figura D.1.1. Profilo 58: distribuzione della quantità di materiale trasportata sul fondo, q_{bx} e q_{by} , in sospensione, q_{sx} e q_{sy} , e totale, $q_x = q_{bx} + q_{sx}$ e $q_y = q_{by} + q_{sy}$, in direzione cross-shore e long-shore, rispettivamente

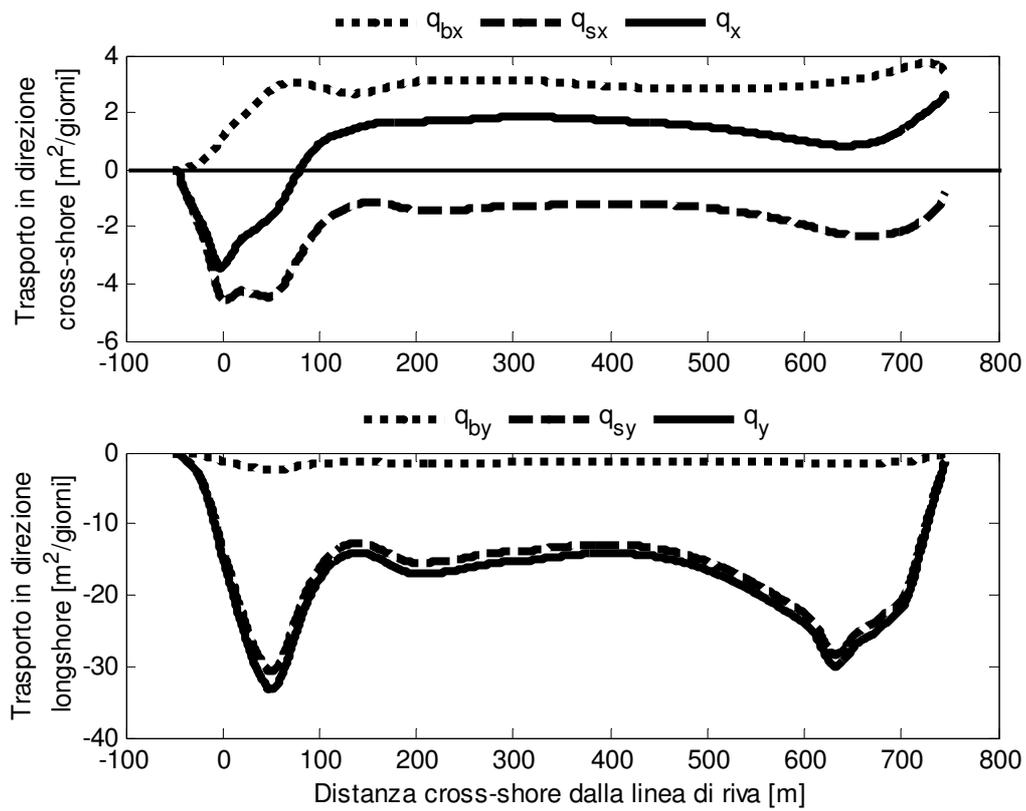


Figura D.1.2. Profilo 59: distribuzione della quantità di materiale trasportata sul fondo, q_{bx} e q_{by} , in sospensione, q_{sx} e q_{sy} , e totale, $q_x = q_{bx} + q_{sx}$ e $q_y = q_{by} + q_{sy}$, in direzione cross-shore e longshore, rispettivamente

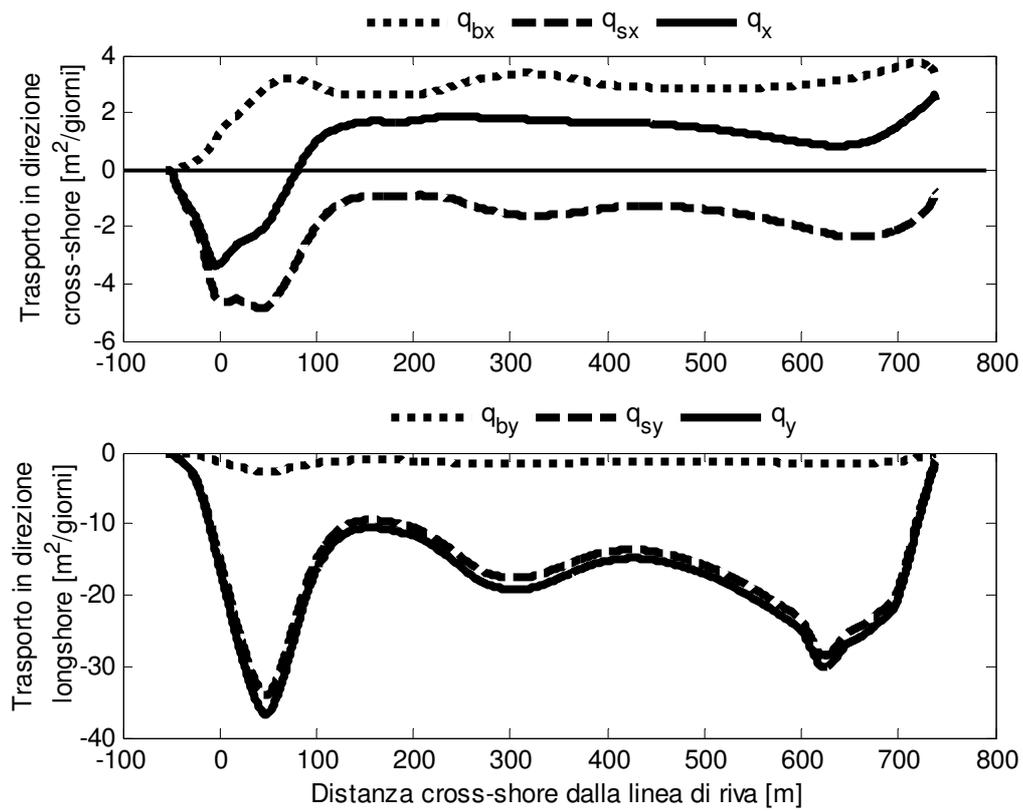


Figura D.1.3. Profilo 62: distribuzione della quantità di materiale trasportata sul fondo, q_{bx} e q_{by} , in sospensione, q_{sx} e q_{sy} , e totale, $q_x = q_{bx} + q_{sx}$ e $q_y = q_{by} + q_{sy}$, in direzione cross-shore e long-shore rispettivamente

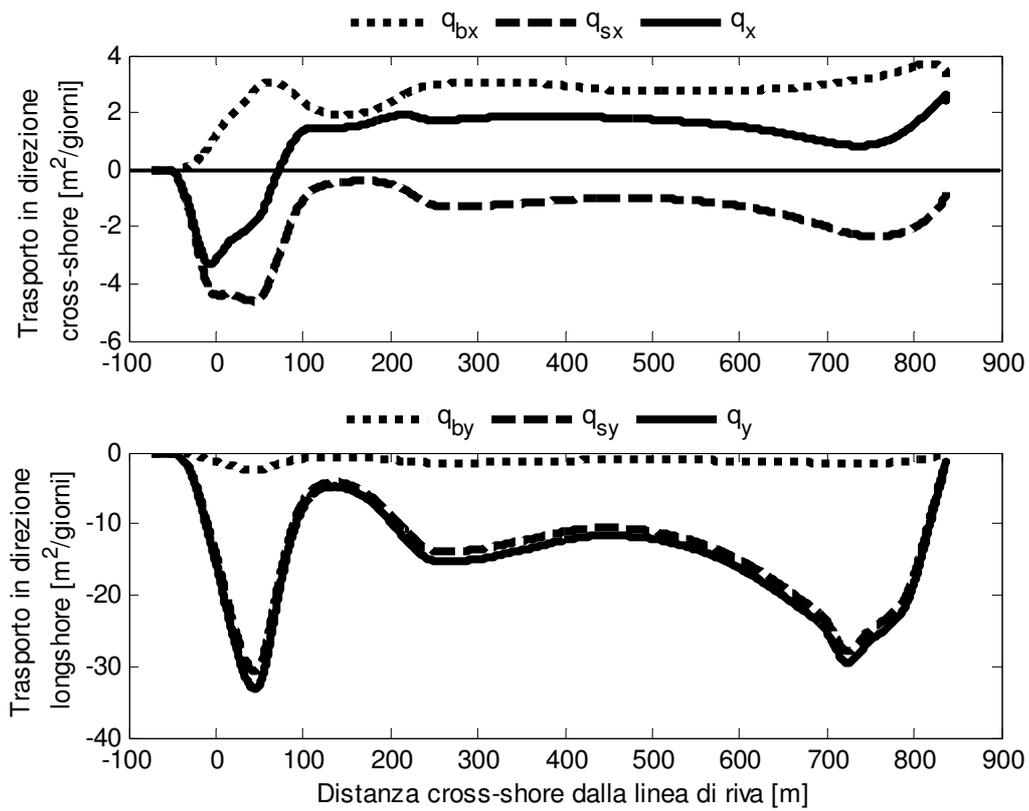


Figura D.1.4. Profilo 64: distribuzione della quantità di materiale trasportata sul fondo, q_{bx} e q_{by} , in sospensione, q_{sx} e q_{sy} , e totale, $q_x = q_{bx} + q_{sx}$ e $q_y = q_{by} + q_{sy}$, in direzione cross-shore e long-shore rispettivamente

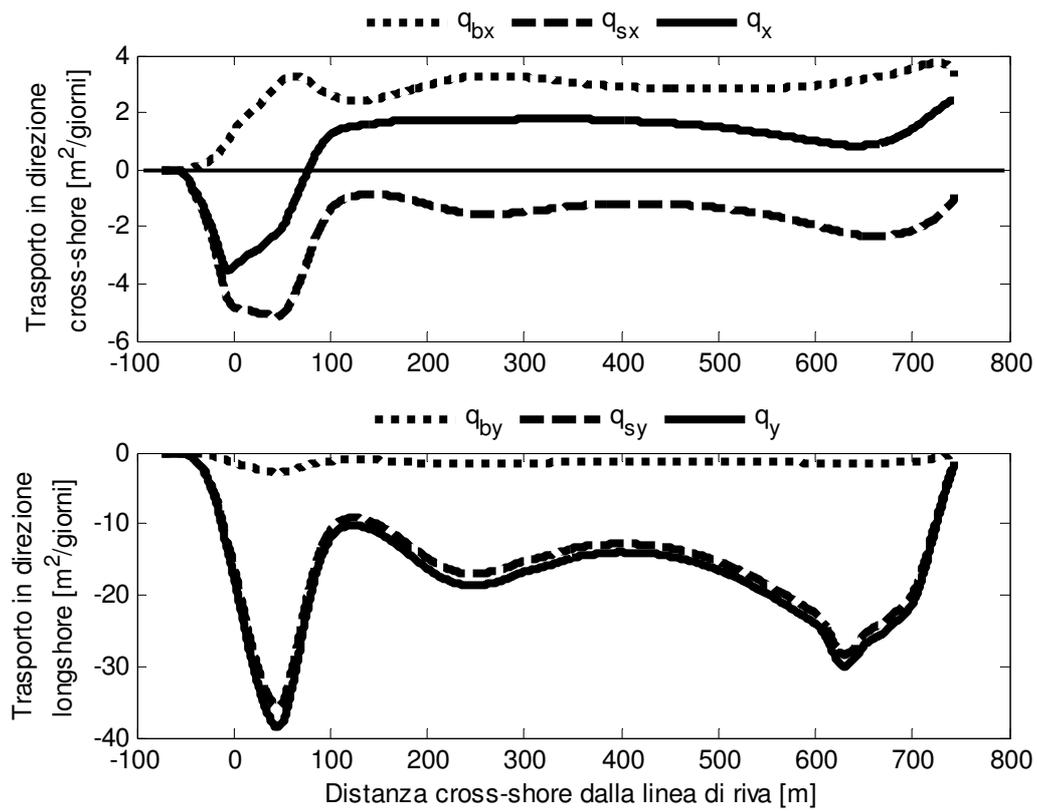


Figura D.1.5. Profilo 66: distribuzione della quantità di materiale trasportata sul fondo, q_{bx} e q_{by} , in sospensione, q_{sx} e q_{sy} , e totale, $q_x = q_{bx} + q_{sx}$ e $q_y = q_{by} + q_{sy}$, in direzione cross-shore e long-shore rispettivamente

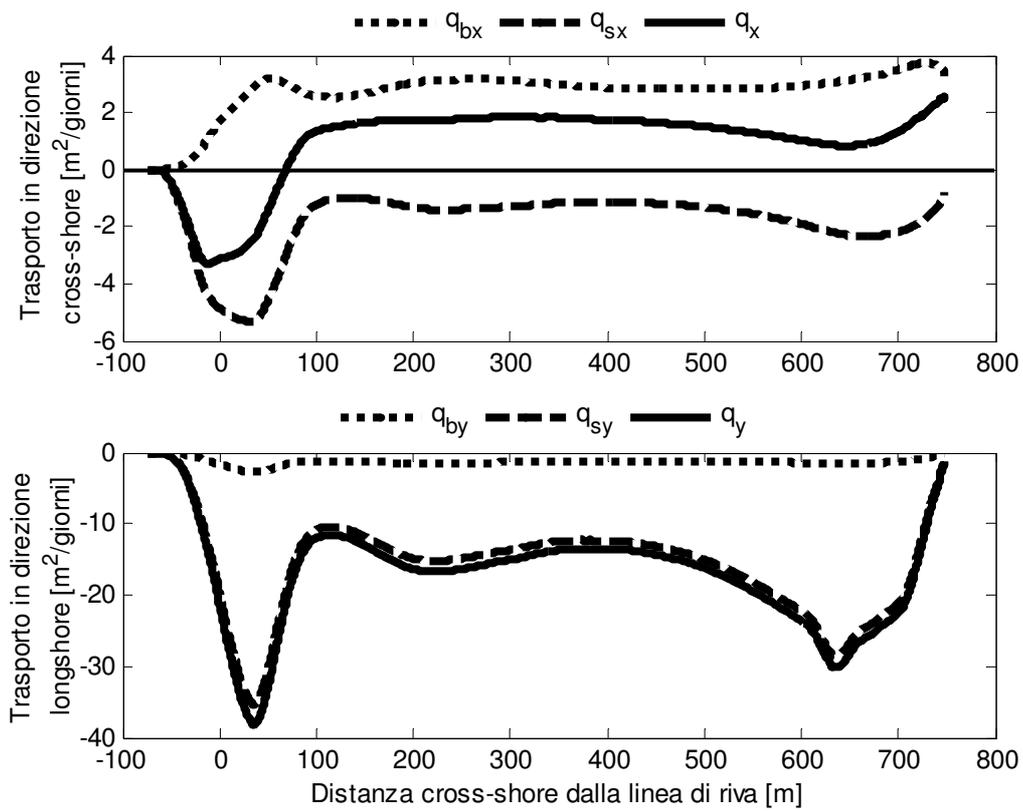


Figura D.1.6. Profilo 67: distribuzione della quantità di materiale trasportata sul fondo, q_{bx} e q_{by} , in sospensione, q_{sx} e q_{sy} , e totale, $q_x = q_{bx} + q_{sx}$ e $q_y = q_{by} + q_{sy}$, in direzione cross-shore e long-shore rispettivamente

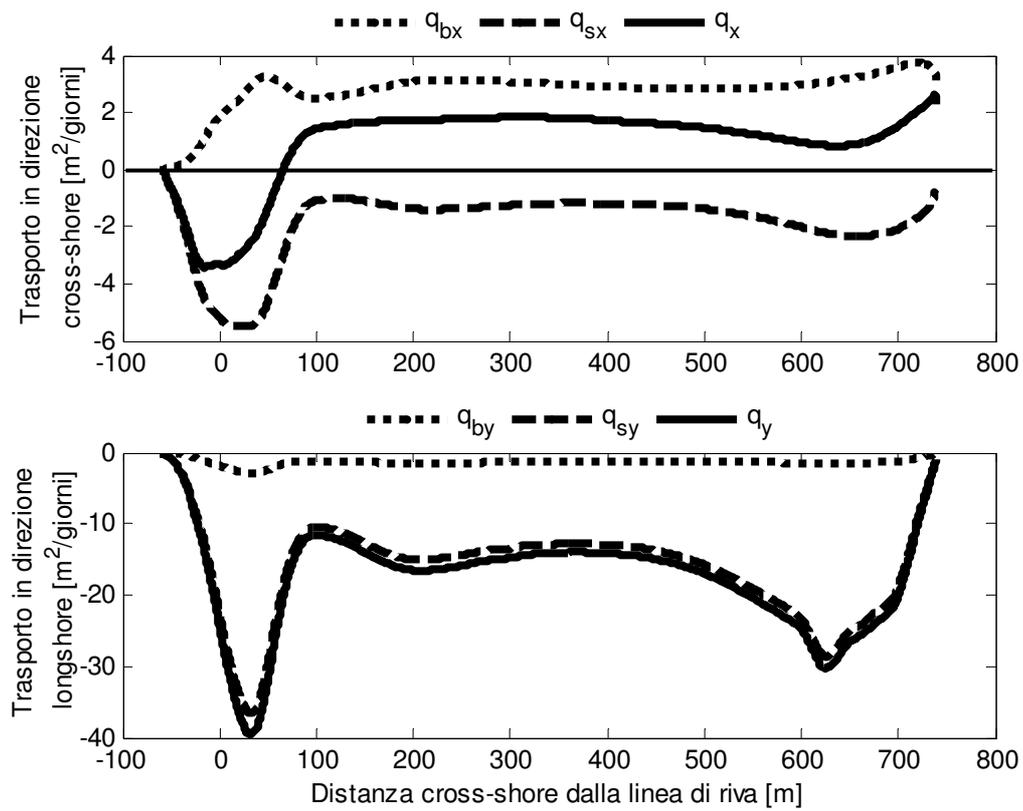


Figura D.1.7. Profilo 73: distribuzione della quantità di materiale trasportata sul fondo, q_{bx} e q_{by} , in sospensione, q_{sx} e q_{sy} , e totale, $q_x = q_{bx} + q_{sx}$ e $q_y = q_{by} + q_{sy}$, in direzione cross-shore e long-shore rispettivamente

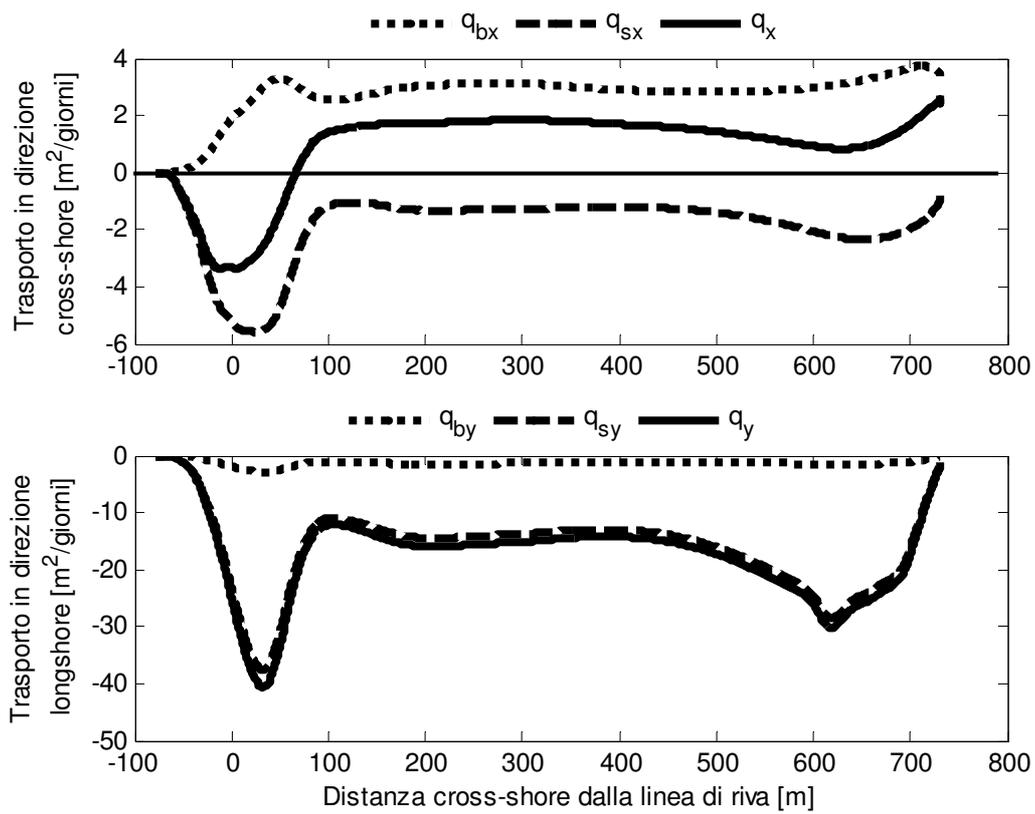


Figura D.1.8. Profilo 76: distribuzione della quantità di materiale trasportata sul fondo, q_{bx} e q_{by} , in sospensione, q_{sx} e q_{sy} , e totale, $q_x = q_{bx} + q_{sx}$ e $q_y = q_{by} + q_{sy}$, in direzione cross-shore e long-shore rispettivamente

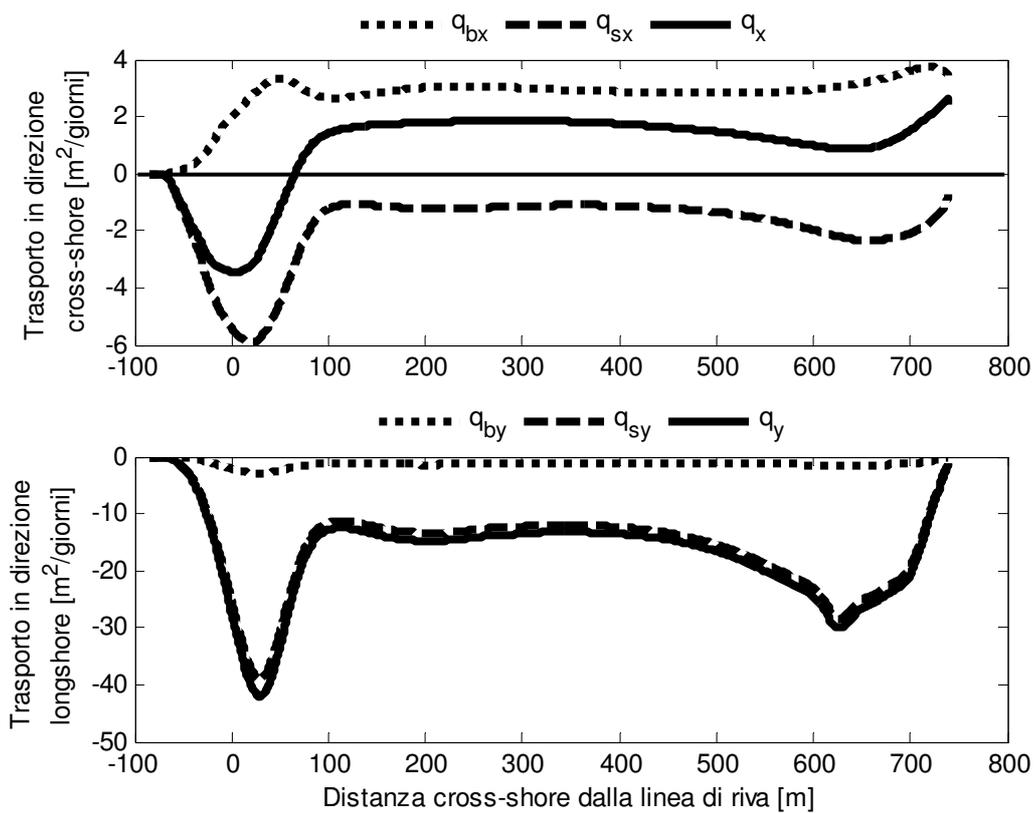


Figura D.1.9. Profilo 85: distribuzione della quantità di materiale trasportata sul fondo, q_{bx} e q_{by} , in sospensione, q_{sx} e q_{sy} , e totale, $q_x = q_{bx} + q_{sx}$ e $q_y = q_{by} + q_{sy}$, in direzione cross-shore e long-shore rispettivamente

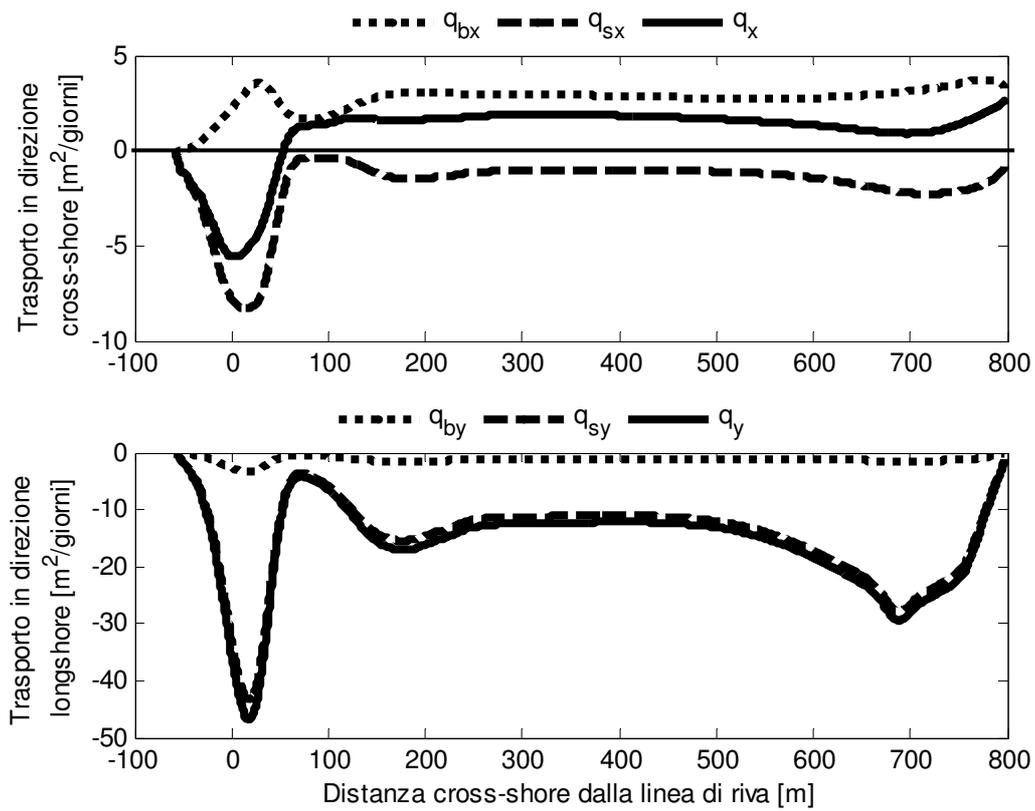


Figura D.1.10. Profilo 182: distribuzione della quantità di materiale trasportata sul fondo, q_{bx} e q_{by} , in sospensione, q_{sx} e q_{sy} , e totale, $q_x = q_{bx} + q_{sx}$ e $q_y = q_{by} + q_{sy}$, in direzione cross-shore e long-shore rispettivamente

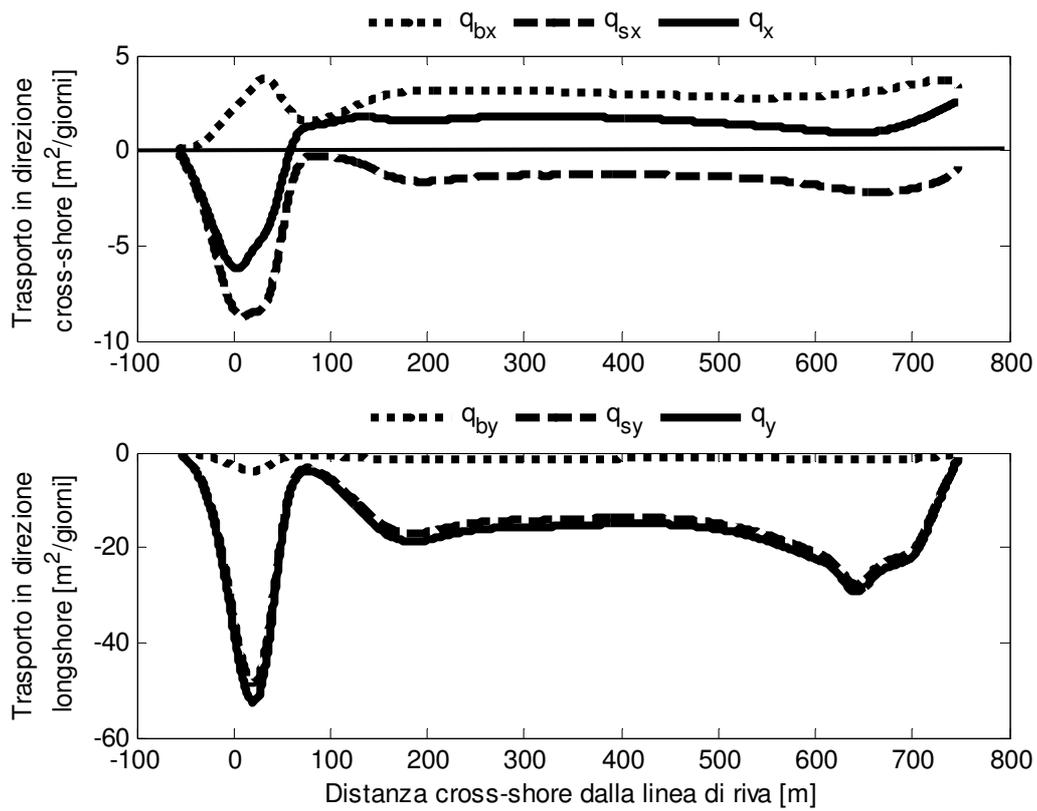


Figura D.1.11. Profilo 183: distribuzione della quantità di materiale trasportata sul fondo, q_{bx} e q_{by} , in sospensione, q_{sx} e q_{sy} , e totale, $q_x = q_{bx} + q_{sx}$ e $q_y = q_{by} + q_{sy}$, in direzione cross-shore e long-shore rispettivamente

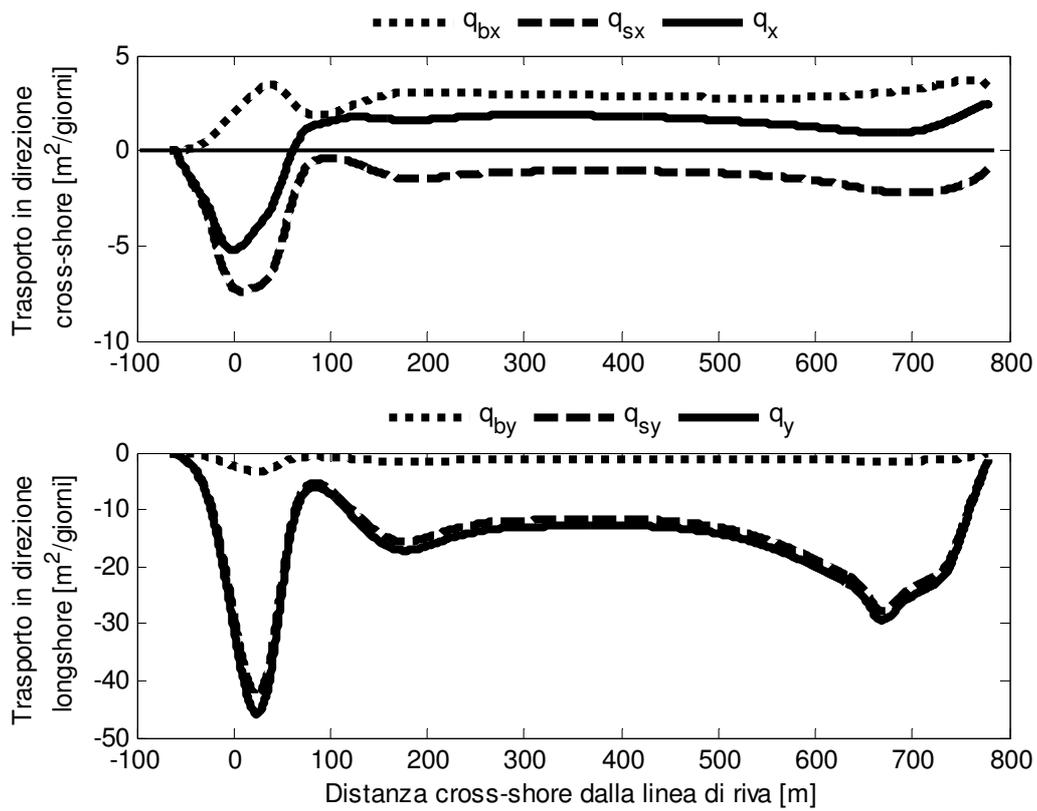


Figura D.1.12. Profilo 185: distribuzione della quantità di materiale trasportata sul fondo, q_{bx} e q_{by} , in sospensione, q_{sx} e q_{sy} , e totale, $q_x = q_{bx} + q_{sx}$ e $q_y = q_{by} + q_{sy}$, in direzione cross-shore e long-shore rispettivamente

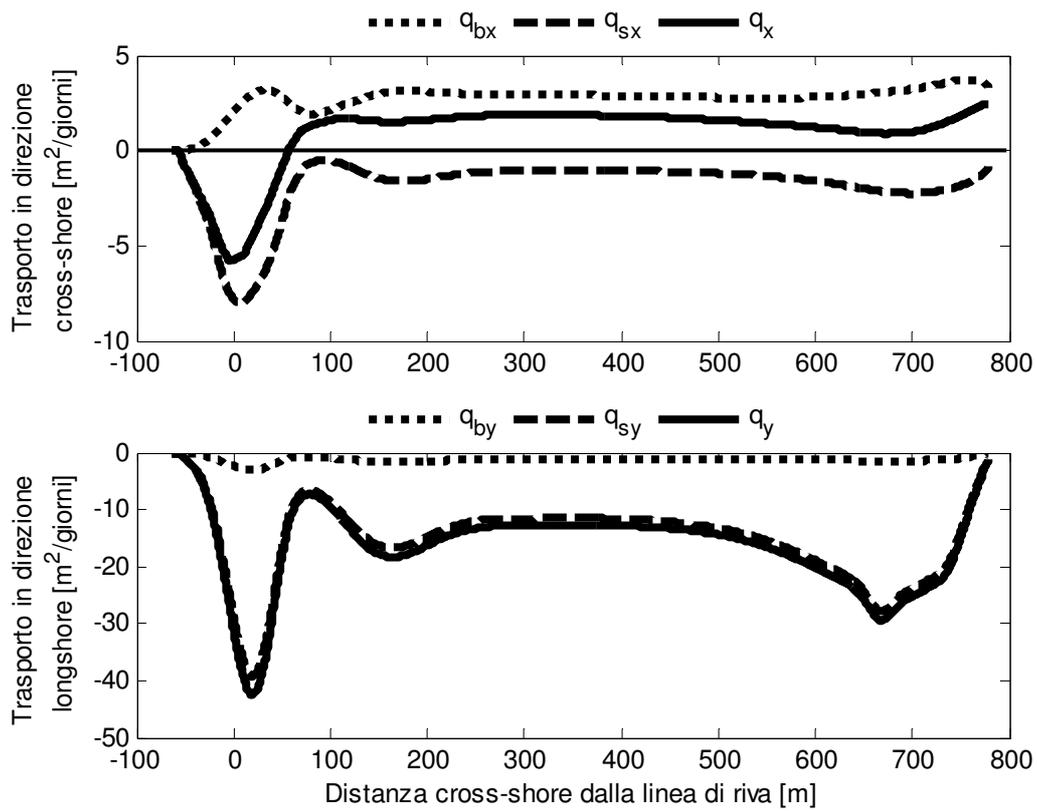


Figura D.1.13. Profilo 186: distribuzione della quantità di materiale trasportata sul fondo, q_{bx} e q_{by} , in sospensione, q_{sx} e q_{sy} , e totale, $q_x = q_{bx} + q_{sx}$ e $q_y = q_{by} + q_{sy}$, in direzione cross-shore e long-shore rispettivamente

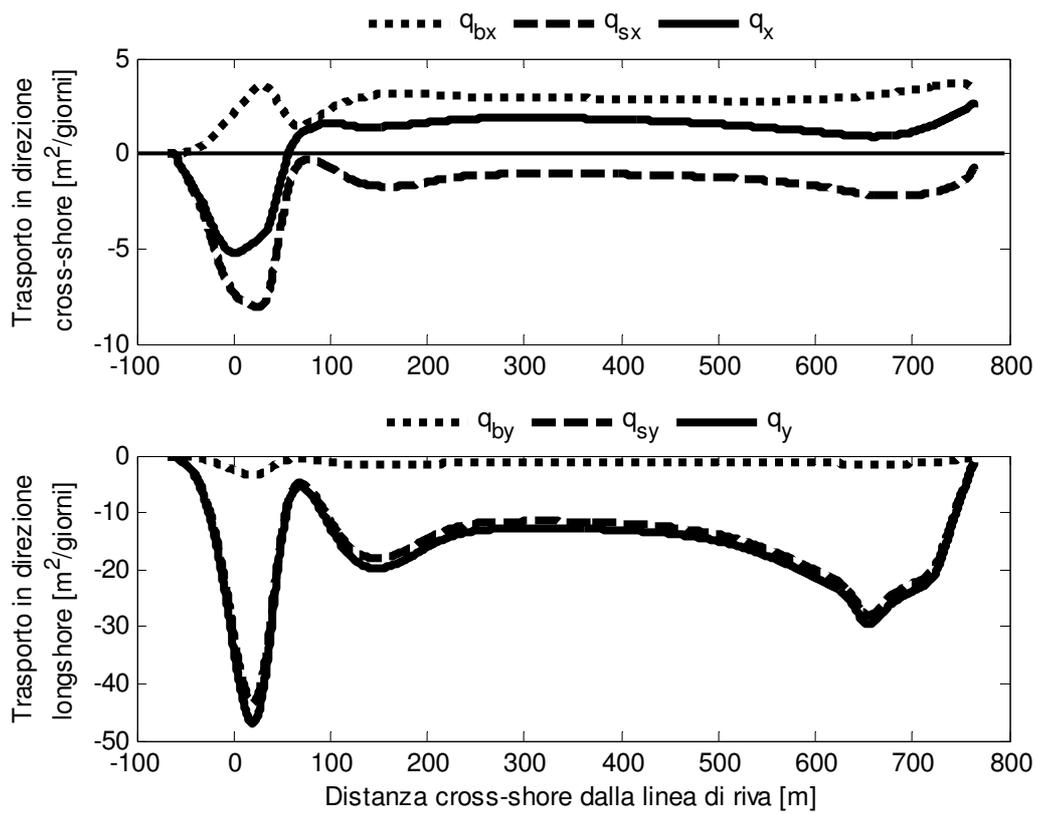


Figura D.1.14. Profilo 187: distribuzione della quantità di materiale trasportata sul fondo, q_{bx} e q_{by} , in sospensione, q_{sx} e q_{sy} , e totale, $q_x = q_{bx} + q_{sx}$ e $q_y = q_{by} + q_{sy}$, in direzione cross-shore e long-shore rispettivamente

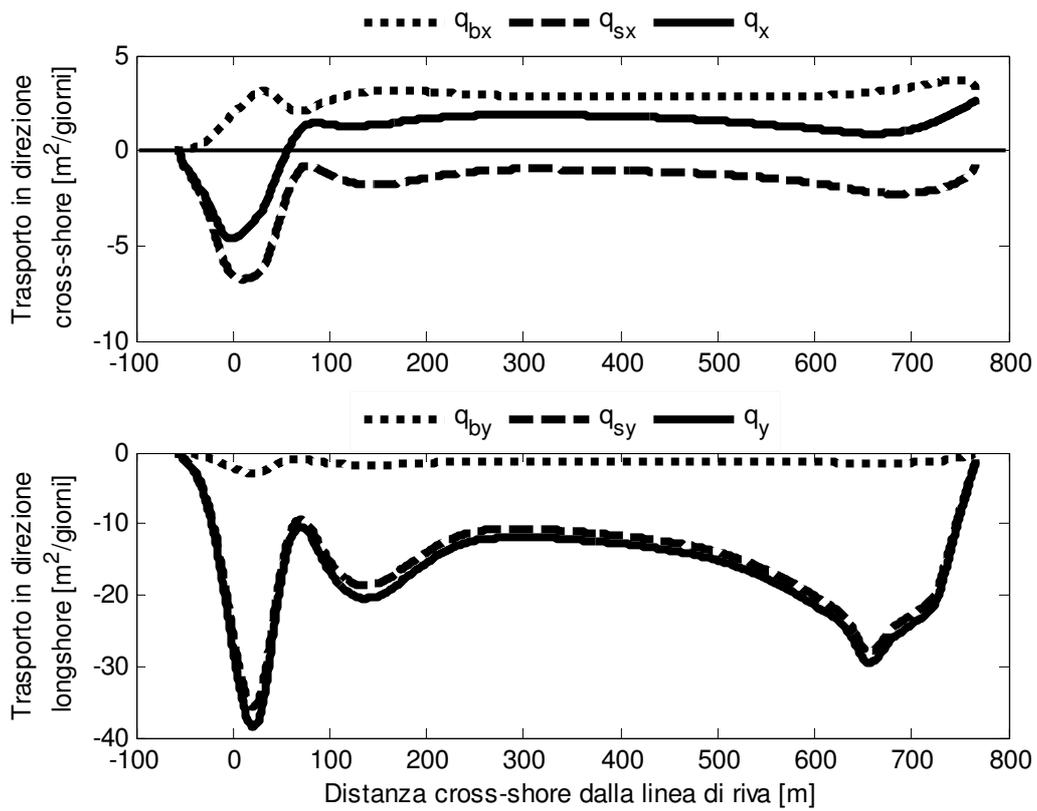


Figura D.1.15. Profilo 188: distribuzione della quantità di materiale trasportata sul fondo, q_{bx} e q_{by} , in sospensione, q_{sx} e q_{sy} , e totale, $q_x = q_{bx} + q_{sx}$ e $q_y = q_{by} + q_{sy}$, in direzione cross-shore e long-shore rispettivamente

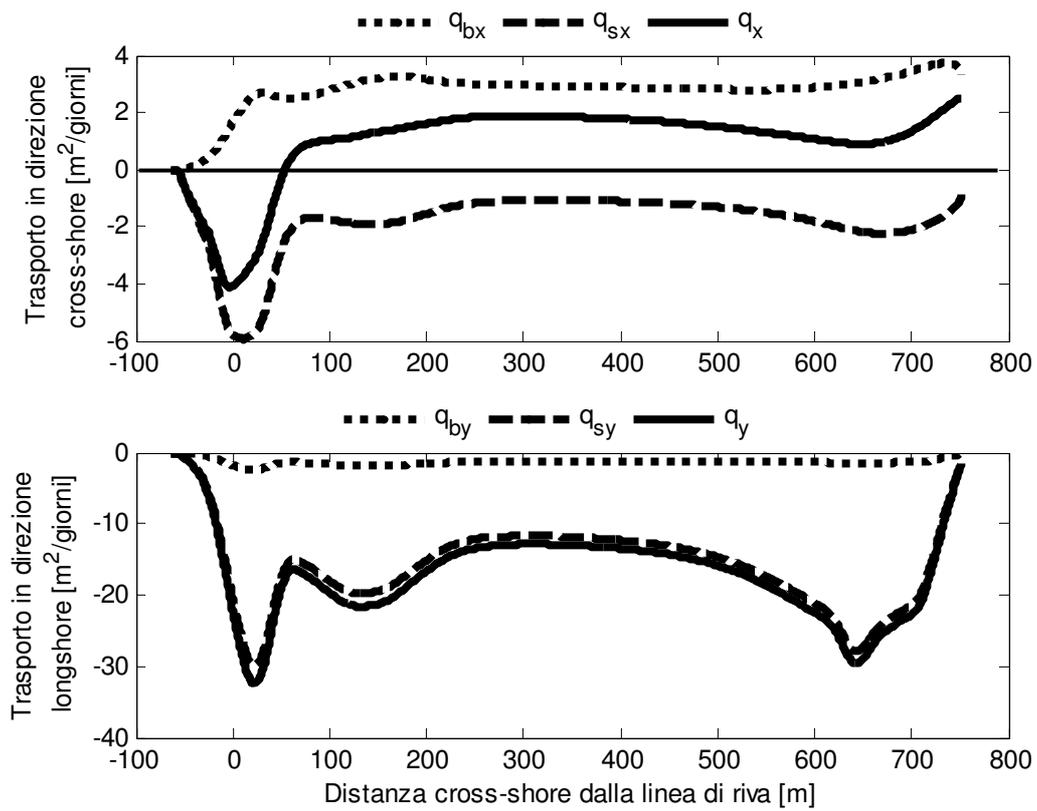


Figura D.1.16. Profilo 189: distribuzione della quantità di materiale trasportata sul fondo, q_{bx} e q_{by} , in sospensione, q_{sx} e q_{sy} , e totale, $q_x = q_{bx} + q_{sx}$ e $q_y = q_{by} + q_{sy}$, in direzione cross-shore e long-shore rispettivamente

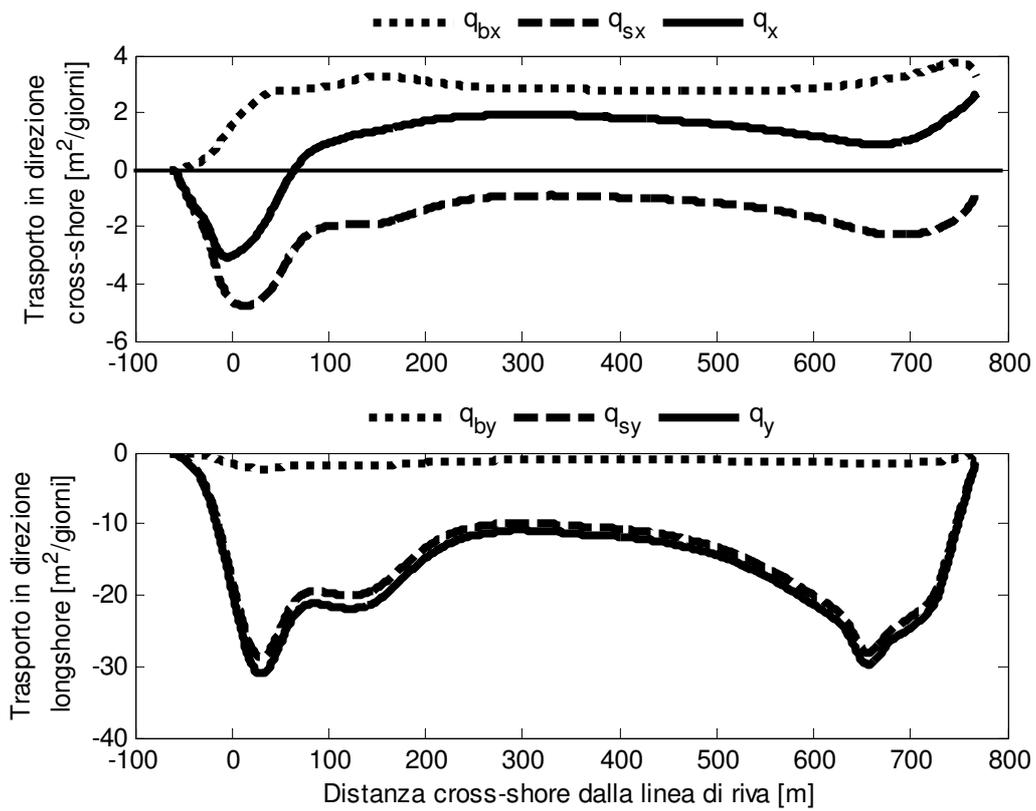


Figura D.1.17. Profilo 190: distribuzione della quantità di materiale trasportata sul fondo, q_{bx} e q_{by} , in sospensione, q_{sx} e q_{sy} , e totale, $q_x = q_{bx} + q_{sx}$ e $q_y = q_{by} + q_{sy}$, in direzione cross-shore e long-shore rispettivamente

D.2.PROFILI DI SPIAGGIA

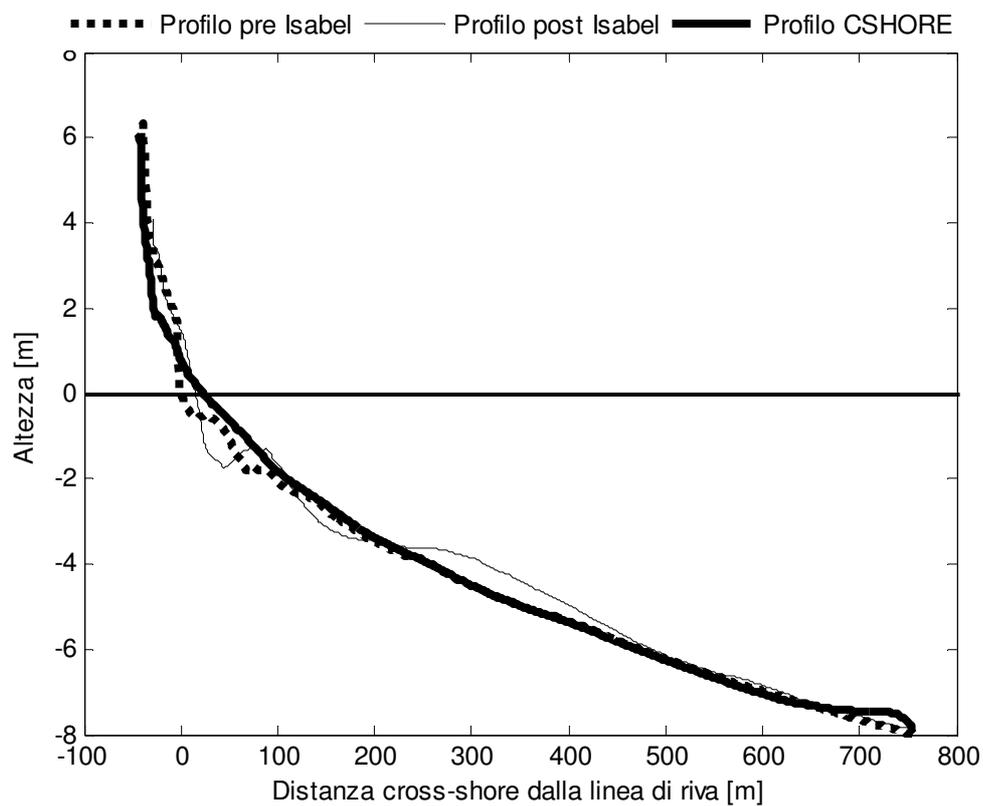


Figura D.2.1. FRF: profilo 58. Profilo di spiaggia pre e post Isabel misurato e calcolato dal modello CSHORE

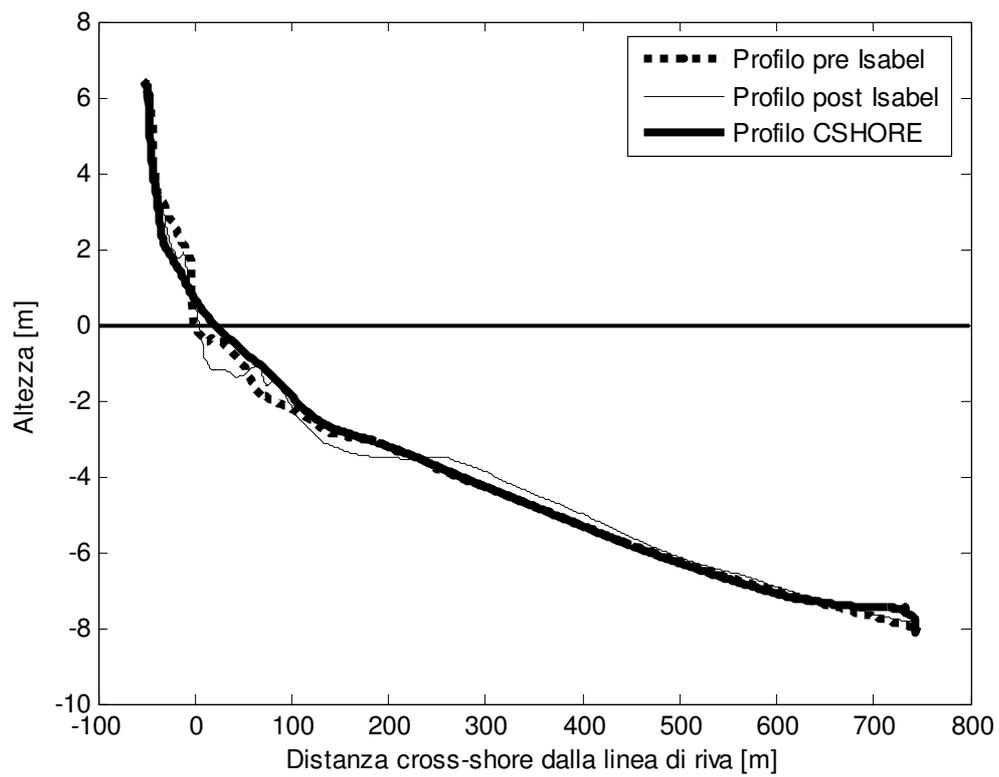


Figura D.2.2. FRF: profilo 59. Profilo di spiaggia pre e post Isabel misurato e calcolato dal modello CSHORE

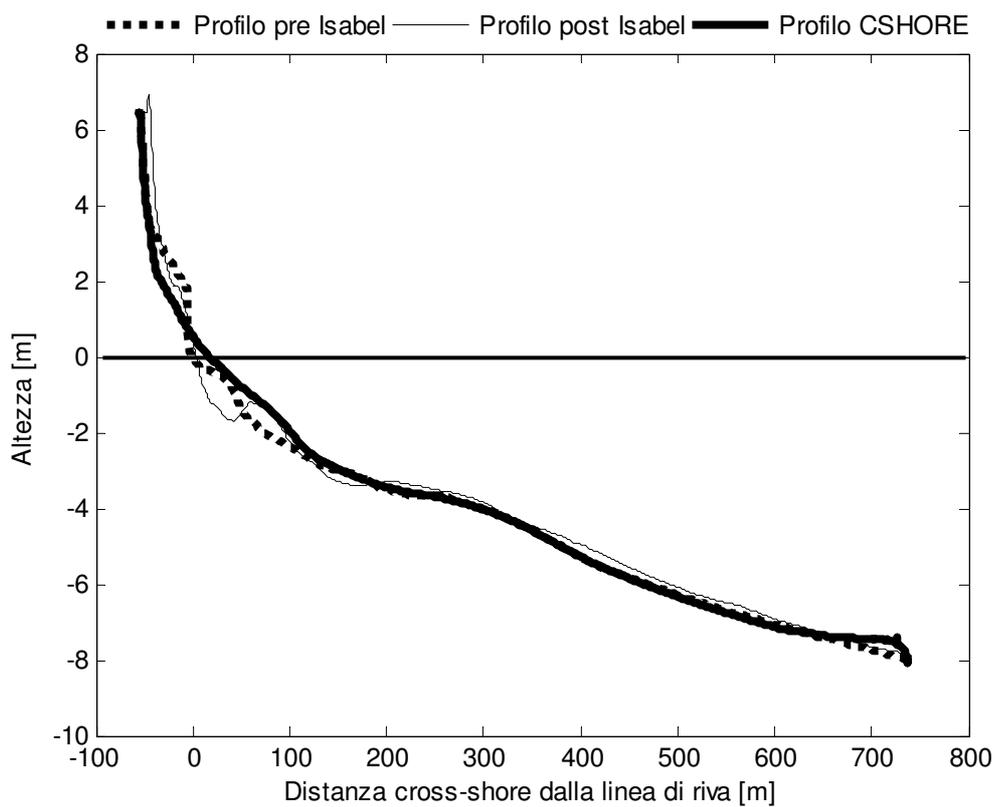


Figura D.2.3. FRF: profilo 62. Profilo di spiaggia pre e post Isabel misurato e calcolato dal modello CSHORE

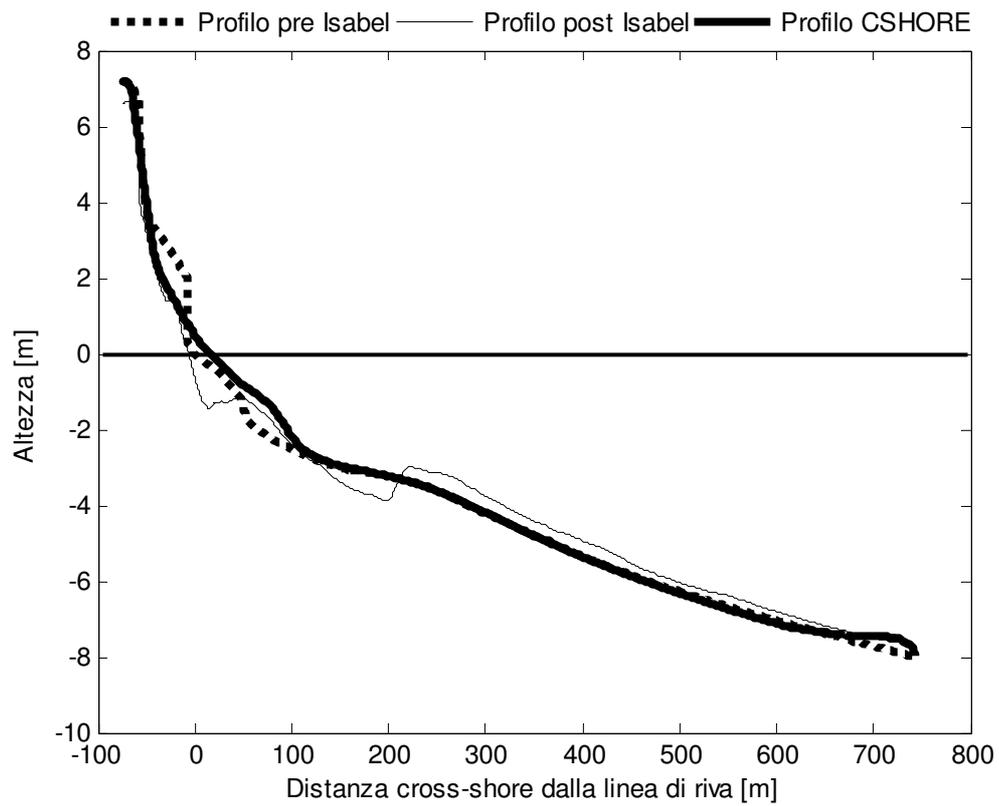


Figura D.2.5. FRF: profilo 66. Profilo di spiaggia pre e post Isabel misurato e calcolato dal modello CSHORE

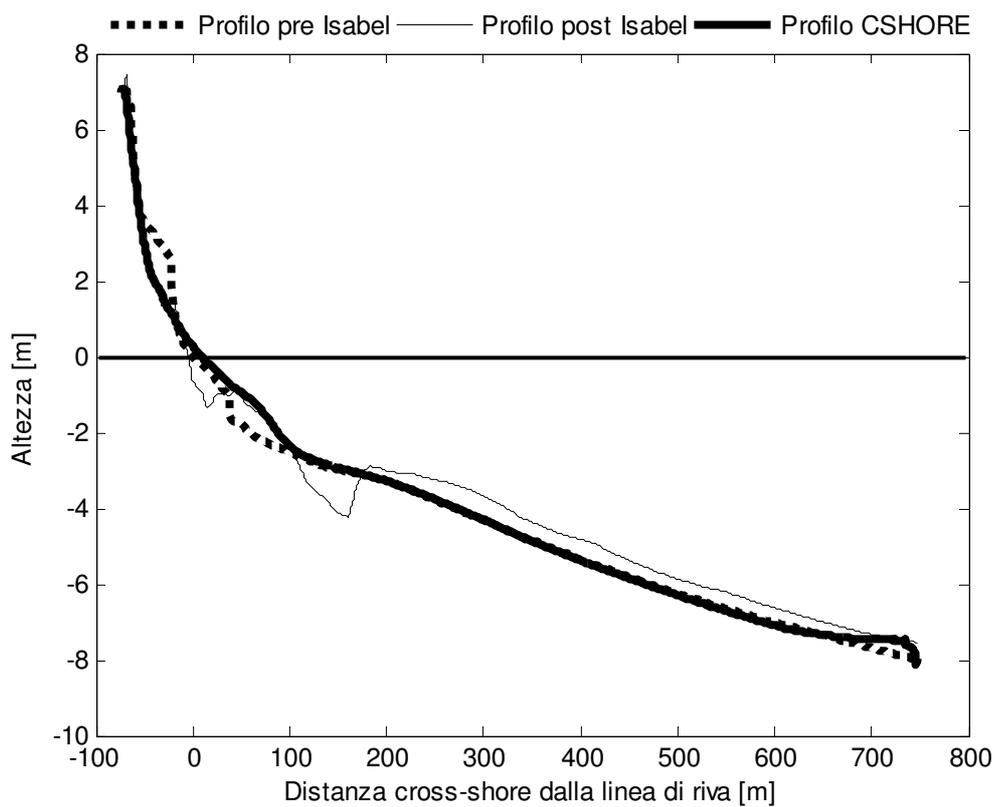


Figura D.2.6. FRF: profilo 67. Profilo di spiaggia pre e post Isabel misurato e calcolato dal modello CSHORE

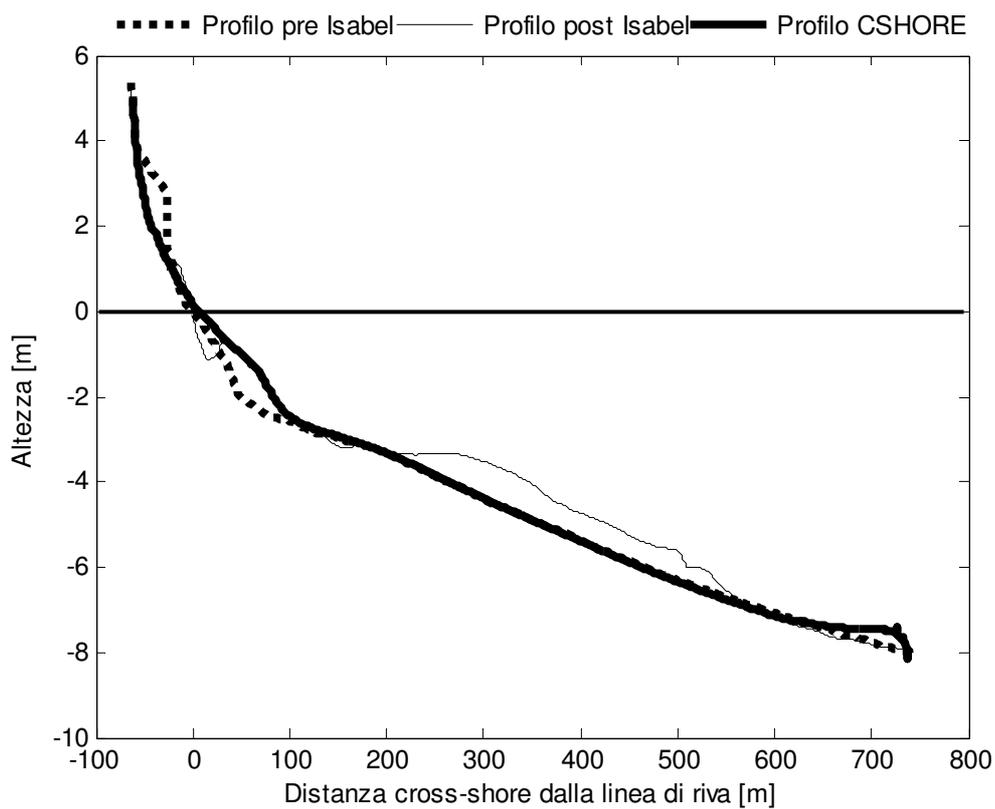


Figura D.2.7. FRF: profilo 73. Profilo di spiaggia pre e post Isabel misurato e calcolato dal modello CSHORE

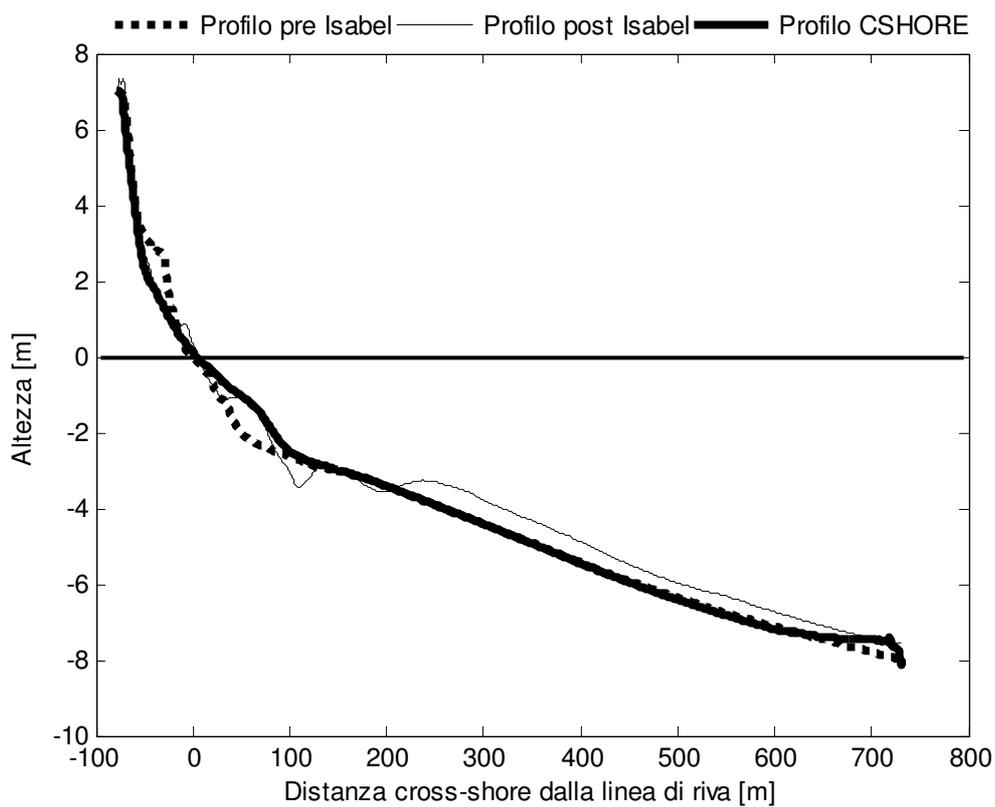


Figura D.2.8. FRF: profilo 76 Profilo di spiaggia pre e post Isabel misurato e calcolato dal modello CSHORE

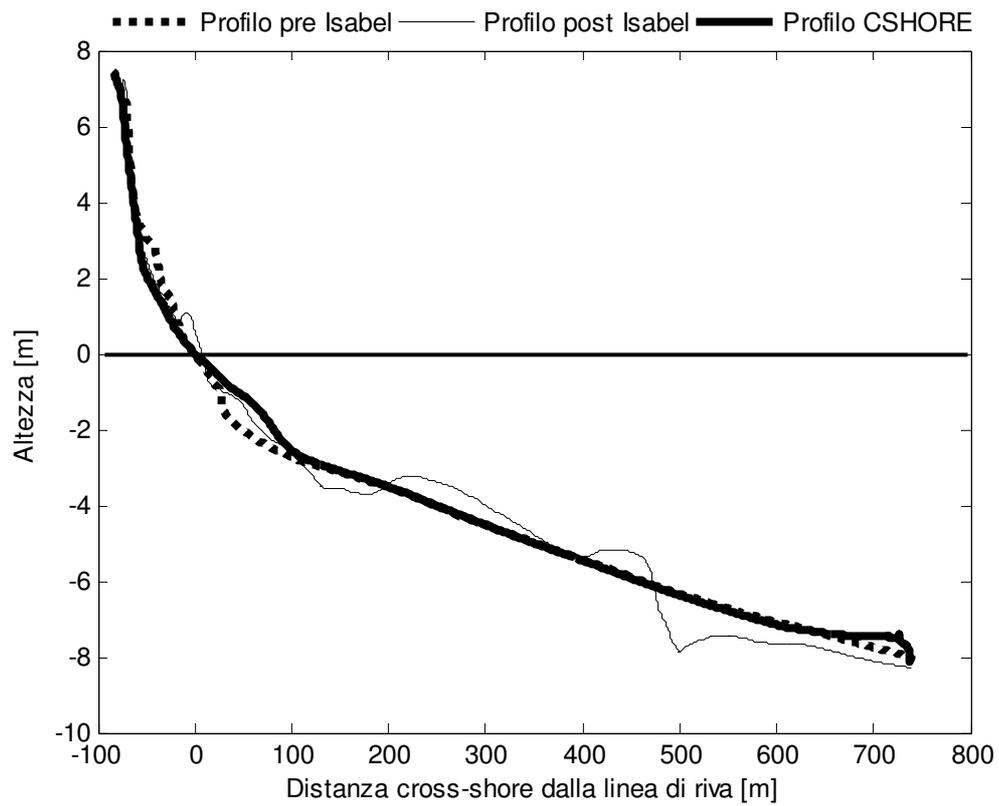


Figura D.2.9. FRF: profilo 85. Profilo di spiaggia pre e post Isabel misurato e calcolato dal modello CSHORE

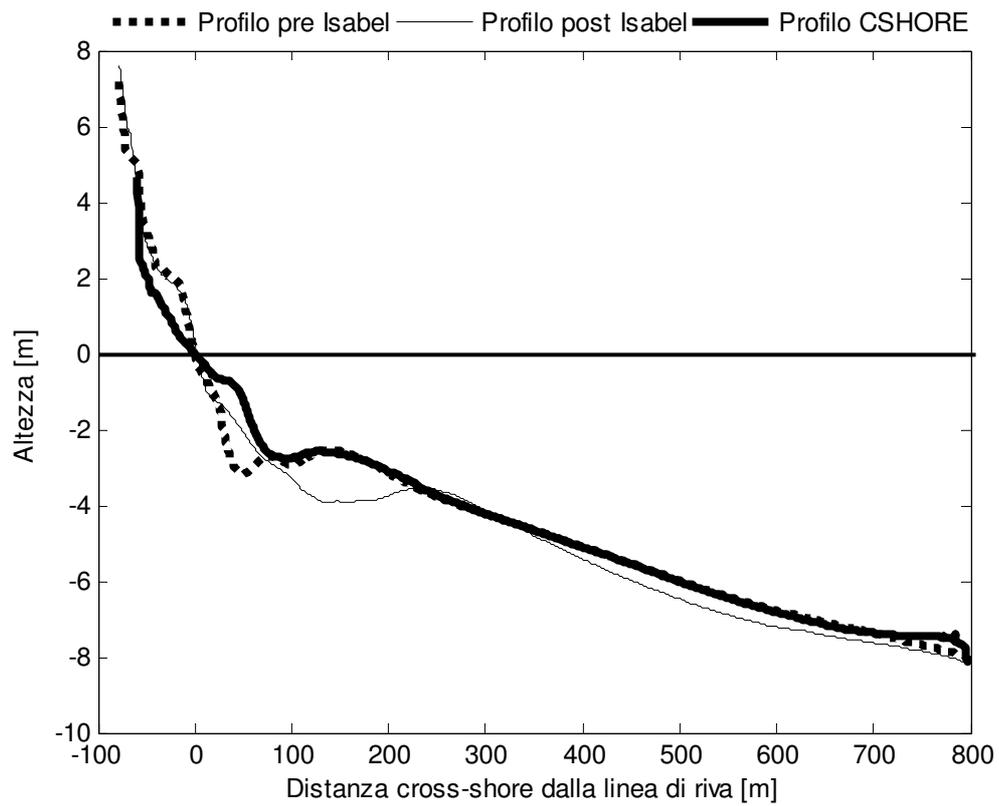


Figura D.2.10. FRF: profilo 182. Profilo di spiaggia pre e post Isabel misurato e calcolato dal modello CSHORE

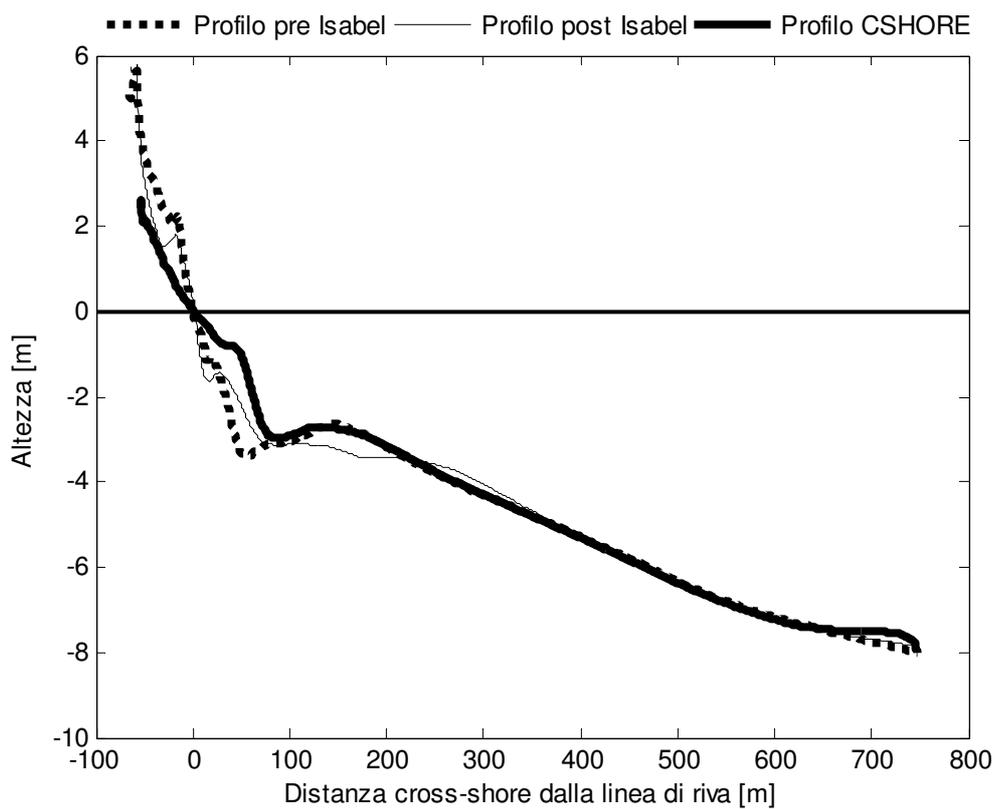


Figura D.2.11. FRF: profilo 183. Profilo di spiaggia pre e post Isabel misurato e calcolato dal modello CSHORE

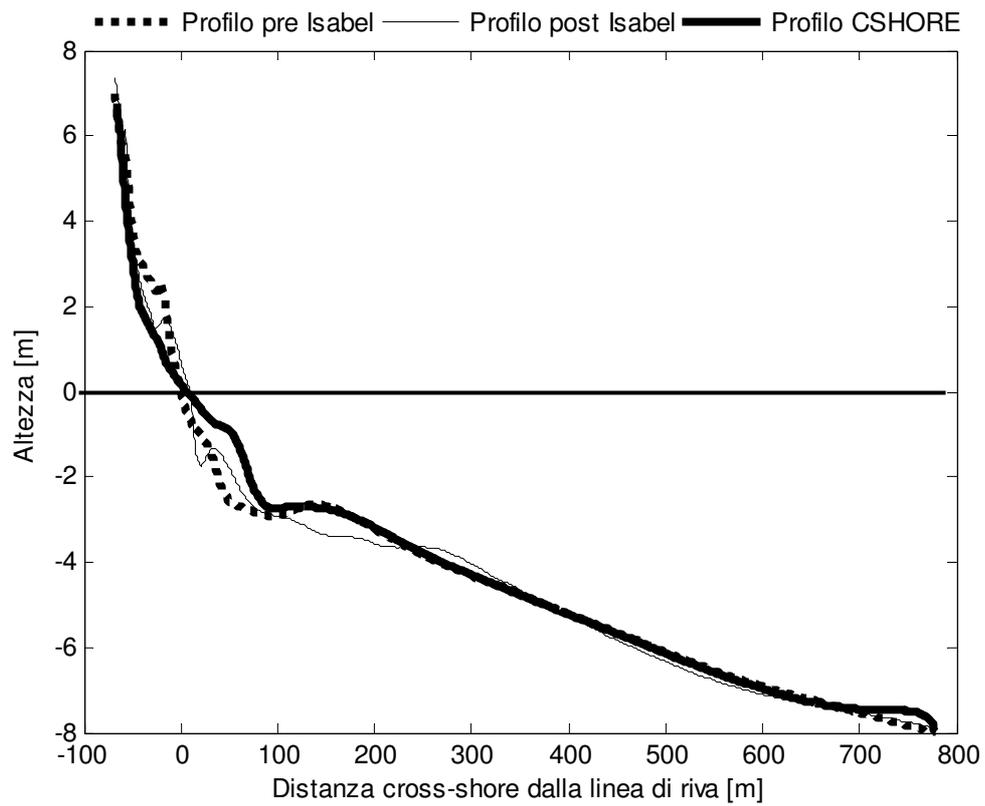


Figura D.2.12. FRF: profilo 185. Profilo di spiaggia pre e post Isabel misurato e calcolato dal modello CSHORE

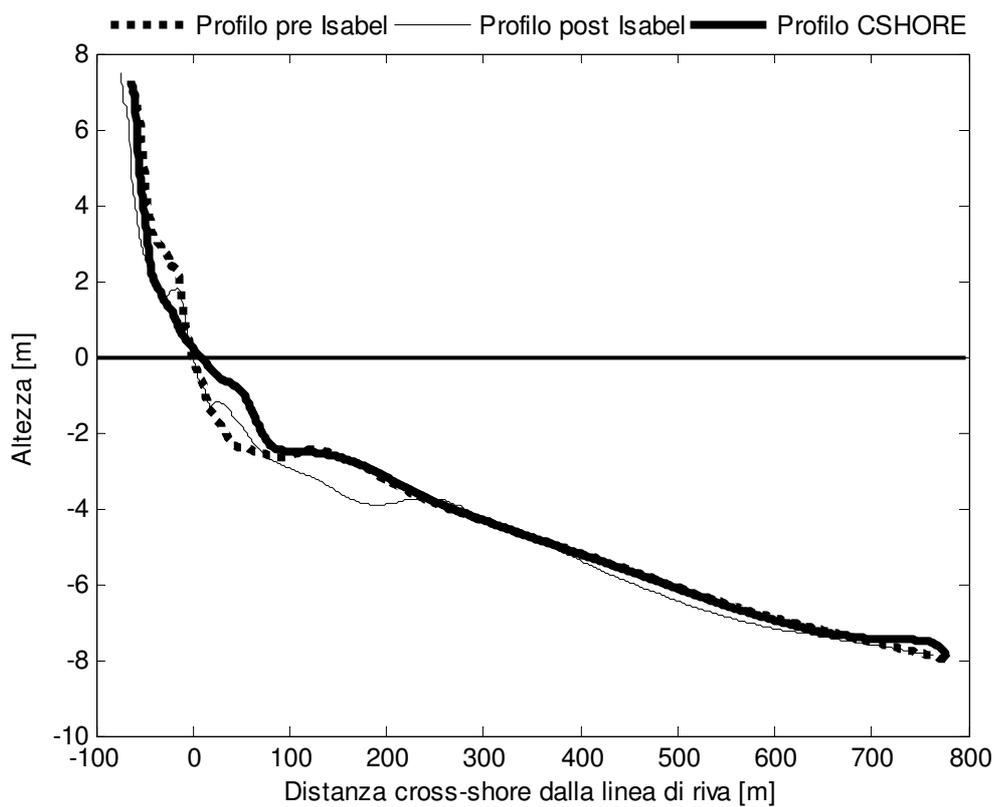


Figura D.2.13. FRF: profilo 186. Profilo di spiaggia pre e post Isabel misurato e calcolato dal modello CSHORE

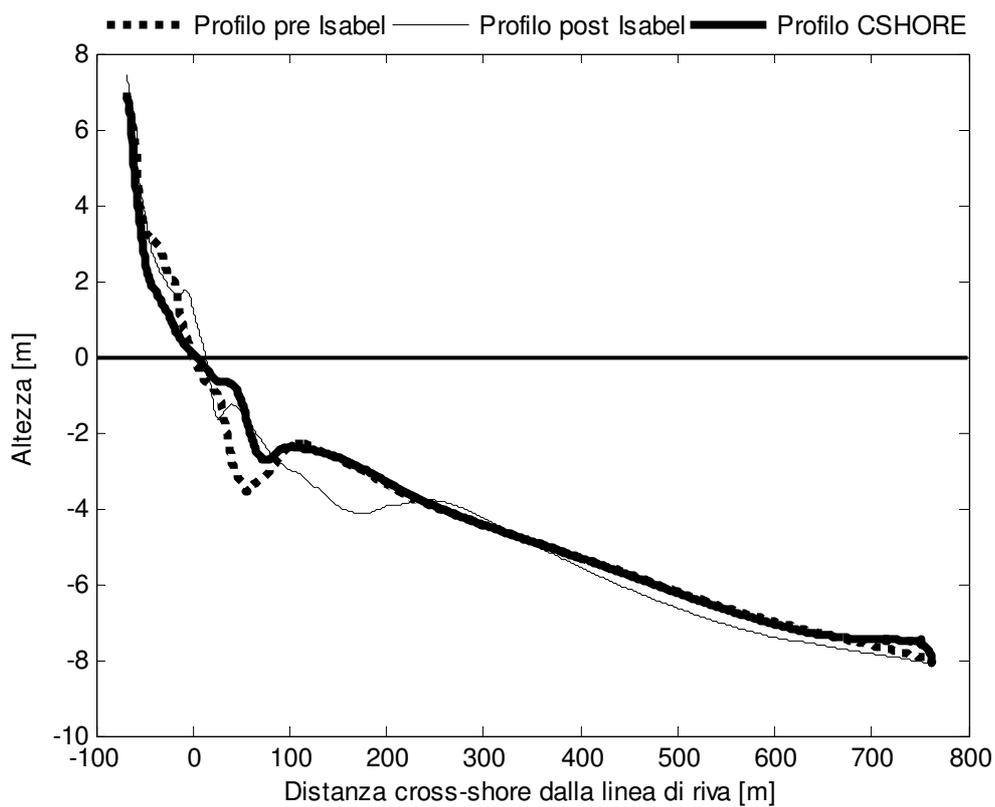


Figura D.2.14. FRF: profilo 187. Profilo di spiaggia pre e post Isabel misurato e calcolato dal modello CSHORE

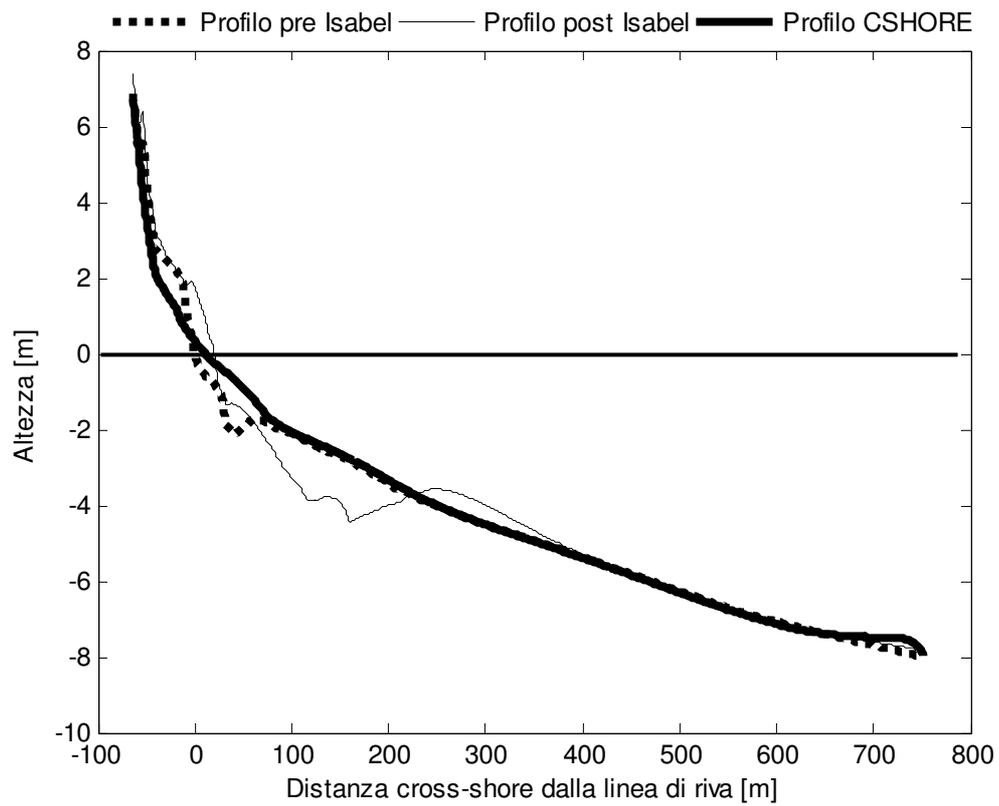


Figura D.2.16. FRF: profilo 189. Profilo di spiaggia pre e post Isabel misurato e calcolato dal modello CSHORE

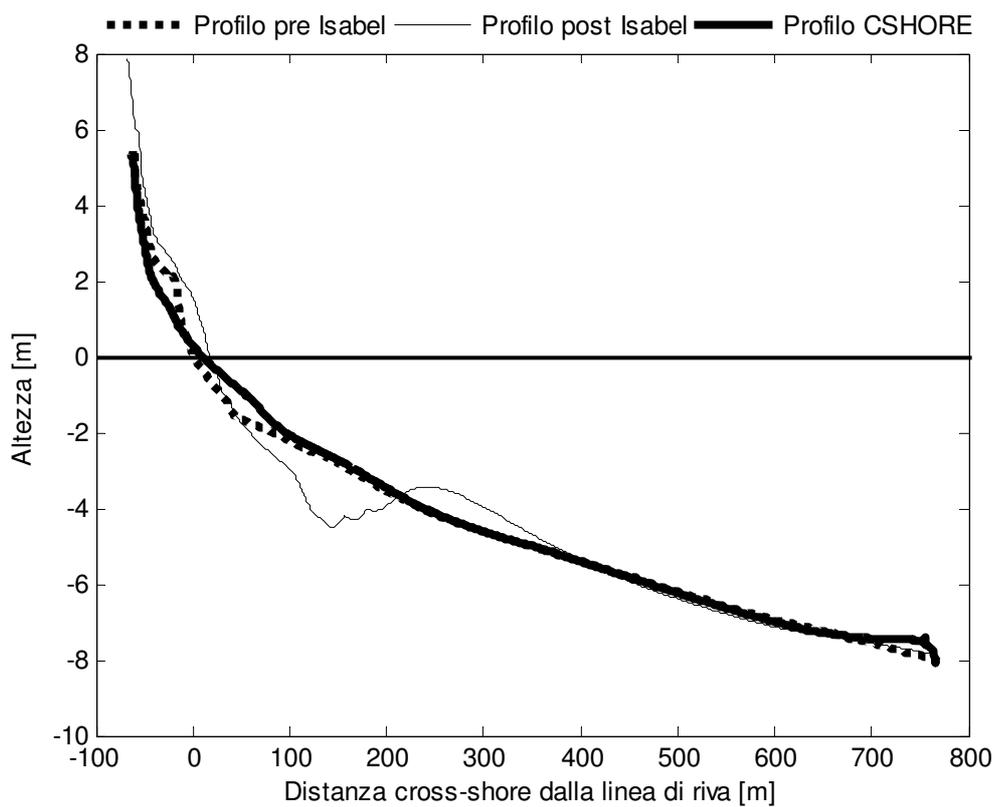


Figura D.2.17. FRF: profilo 190. Profilo di spiaggia pre e post Isabel misurato e calcolato dal modello CSHORE

BIBLIOGRAFIA

- Agarwal, A., Kobayashi, N. (2005). "Time-averaged model for long-shore current and sediment transport in surf and swash zones". Technical Report Res. Rep, CACR-05-07, Center for Applied Coastal Research, Univ. of Delaware, Newark, DE.
- Agarwal, A., Kobayashi, N., Johnson, B.D. (2006). "Long-shore suspended sediment transport in surf and swash zone." *Coastal Engineering 2006, Proc. 30th Coastal Engineering Conf.*, World Scientific, Singapore.
- Bagnold, R. A. (1966). "An approach to the sediment transport problem from general physics." U.S. Geol. Surv., Prof. Paper, 422-I.
- Bailard, J.A. (1981). "An energetics total load sediment transport model for a plane slope beach." *J. Geophys. Res.*, 86(C11), 10, 938-10,954.
- Battjes, J.A., Stive, M.J.F. (1985). "Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves." *J. Geophys. Res.*, 90(C5), 9159-9167.
- Buck, M., Kobayashi, N., Payo, A., Johnson, B.D. (2007f). "Experiments and numerical model for berm and dune erosion." Research Rep. No. CACR-07-03, Center for Applied Coastal Research, Univ. of Delaware, Newark, DE.
- Brunn, P. (1962). "Sea-level rise as a cause of shore erosion." *J. Waterw. Harbors Div., Am. Soc., Civ. Eng.*, 88(1), 117-130.
- Cox, D.T., Kobayashi, N., Okayasu, A. (1996). "Bottom shear stress in the surf zone". *J. Geophys. Res.*, 101, 14337-14348.

- Cox, D.T., Kobayashi, N. (2000). "Identification of intense, intermitted coherent motions under shoaling and breaking waves." *J. Geophys. Res.*, 105(C6), 14223-14236.
- Davis, A.M. (1987). "On extracting current profiles from vertically integrated numerical models." *Coastal Engineering*, 11, 445-477.
- Dean, R.G., Dalrymple, R.A. (1984). *Water Waves Mechanism for Engineers and Scientist*. Word Scientific, Singapore.
- Dean, R.G. (1977). "Equilibrium beach profiles: U.S. and Atlantic Gulf Coast." *Ocean Engineering Rep. No 12*, Dep. of Civil Eng., University of Delaware, Newark, DE.
- Dean, R.G. (1991). "Equilibrium beach profiles: Characteristics an applications." *J. Geophys. Res.*, 7(1), 53-84.
- Dean, R.G, Work, P.A. (1993). "Interaction of Navigational Entrance With Adjacent Shoreline." *Special Issue 18, Journal of Coastal Res.*, 91-110.
- Dean, R.G. (2006). "Beach nourishment for coastal protection". 2nd International Course and Workshop on Coastal Processes and Port Engineering, May 29th-June 1st, 2006-Univeristy of Calabria, Italy. Nuova Edizione Bios, 2007, 15-60.
- De Vriend, H.J., Stive, M.J.F. (1987). "Quasi-3d modelling of nearshore currents
- Dohmen-Janssen, C.M., Hanes, D.H. (2002). "Sheet flow dynamics under monochromatic nonbreaking waves." *J. Geophys. Res.*, 107(C10), 3149.
- Donnelly, C., Kraus, N., Larson, M. (2006). "State of knowledge on measurement and modelling of coastal overwash". *J. Coastal Res.*, 22(4), 965-991.
- De Vriend, H.J., Stive, M.J.F. (1987). "Quasi-3d modelling of nearshore currents." *Coastal Engineering*, 11, 565-601.
- Edelman, T. (1962). "Dune erosion during storm conditions." *Proc. 11th Int, Conf. on Coastal Engineering*, ASCE, New York, 719-722.

- Feddersen, F., Guza, R.T., Elgar, S., Herbes, T.H. (1998). "Along-shore momentum balances in the nearshore." *J. Geophys. Res.*, 103(C8), 15,667-15,676.
- Feddersen, F., Guza, R.T., Ekgar, S., Herbes, T.H.C. (2000). "Velocity moments in along-shore bottom stress parameterization." *J.Geophys.Res.*, 105(C4), 8673-8686.
- Feddersen, F., Gallagher, E.L., Guza, R.T., Elgar, S. (2003). "The drag coefficient, bottom roughness, and wave-breaking in the nearshore." *Coastal Eng.*, 48, 189-195.
- Furford, E.T. (1982). "Distribution of Longshore Sediment Transport Across the Surf Zone." M.S. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Delaware, Newark, DE, Settembre 1982.
- Furford, E.T. (1987). " Distribution of Sediment Trasnpport Across the Surf Zone." *Coastal Sediments'87*, American Society of Civil Engineers.
- Gencarelli, R., Kobayashi, N., Johnson, B.D, Tomasicchio, G.R. (2007). "Dune erosion and breaching." *Atti Inter. Confe. Coastal Structures 2007 Venezia, 2007* (In stampa)
- Hallermeier, R.J., Rhodes, P.E. (1988). "Generic treatment of dune erosion for 100-year event". *Proc., 21st Inter. Conf. on Coastal Eng., ASCE, New York*, 1197-1211.
- Jimenez, J.A., Sànchez-Arcilla, A., (2004). "A long term (decadal) evolution model for microtidal barrier system." *Coastal Eng.*, 51, 749-764.
- Judge, E.K., Overton, M.F., Fisher, J.S. (2003). "Vulnerability indicator for Coastal Dunes." *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, 270-278
- Kobayashi, N. (1987). "Analytical solution for dune erosion by storm." *J. Waterway, Port, Costal, Ocean Eng.*, 113(4), 296-306.
- Kobayashi, N., Wurjanto, A. (1990). "Numerical model for waves on rough permeable slopes." *Journal Coast. Res.*, SI(7), 149-166

- Kobayashi, N., Tega, Y., Hancock, M.W. (1996). "Wave reflection and overwash of dunes." *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, 122(3), 150-153.
- Kobayashi, N., Johnson, B.D. (1998). "Computer program CSHORE for predicting cross-shore transformation of irregular breaking waves". Technical Report Res. Rep, CACR-98-04, Center for Applied Coastal Research, Univ. of Delaware, Newark, DE.
- Kobayashi, N., Johnson, B.D. (2001). "Sand suspension, storage, advection and settling in surf and swash zones." *J. Geophys. Res.*, 106(C5), 9363-9376.
- Kobayashi, N., Tega, Y. (2002). "Sand suspension and transport on equilibrium beach." *J. Waterw. Port, Coastal, Ocean Eng.*, 128(6), 234-248.
- Kobayashi, N., Pozueta, B., Melby, J.A. (2003). "Performance of coastal structures against Sequences of Hurricane." *J. Waterw., Port, Coastal , Ocean Eng.*, DOI: 10.1061/0733-950X(2003)129:5(219)
- Kobayashi, N., Zhao, H., Tega, Y. (2005). "Suspended sand transport in surf zones." *J. Geophys. Res.*, 110, C12009, doi: 10.1029/2004JC002853.
- Kobayashi, N., Meigs, L.E., Ota, T., Melby, J.A. (2007a). "Irregular breaking wave transmission over submerged porous breakwater." *J. Waterw., Port, Coastal, Ocean Eng.*, 133(2), 104-116.
- Kobayashi, N., de los Santos, F.J., Kerney, P.G. (2007b). "Time-averaged probabilistic model for irregular wave runup on permeable slopes." *J. Waterw., Port, Coastal, Ocean Eng.*, (in stampa).
- Kobayashi, N., de los Santos, F.J. (2007 c). " Irregular waves seepage and overtopping of permeable slopes". *J. Waterw., Port, Coastal, Ocean Eng.*, 133(4), 245-254.
- Kobayashi, N., Agarwal, A., Johnson, B.D. (2007d). " Long-shore current and sediment transport on beaches". *J. Waterw., Port, Coastal, Ocean Eng.*, 133(4), 296-304.

- Kobayashi, N., Payo, A., Schmied, L.D. (2007e). "Cross-shore suspended sand and bedload transport on beaches". J. Geophys. Res. (in stampa).
- Kobayashi, N., Payo, A., Jonhson, B.D. (2007). "Suspended sand and bedload transport on the beach." Word Scientific Reviw. (in stampa)
- Komar, P.D. (1976). "Longshore Currents and Sand Transport on Beaches." Ocean Eng. III, America Society of Civil Engineering, 333-354.
- Kriebel, D.L., Dean, R.G. (1985). "Numerical simulation of time-dependent beach and dune erosion". Coastal Eng., 9, 221-245.
- Kriebel, D.L. (1991). " Advances in numerical modeling of dune erosion." Proc. 22nd Int. Conf. on Coastal Engineering, ASCE, New York, 2305-2317.
- Larson, M., Kraus, N. (1989). "SBEACH: Numerical model for simulating storm-induced beach change. Report 1- Empirical foundation and model development." Technical Rep. CACR-89-9, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, Miss.
- Madsen, O.S., Grant, W.D. (1976). "Quantitative description of sediment transport by waves." Coastal Engineering 1976, Proc. 15th Coastal Engineering Conf., Am. Soc. Of Civ. Eng., Reston, Va.
- Madsen, P.A., Murray, R., Sørensen, O.R.(1991). "A new formof the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics." Coast. Eng., 15, 371-388.
- Mann, M.E., Emanuel, K.A. (2006). "Atlantic Hurricane trends linked to climate Change". EOS, Vol. 87, No 24, 13 June, 233.244.
- Nwogu, O. (1993). "Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation." Journal Waterw., Port, Coastal, Ocean Eng., 119, 618-638.

- Payo, A., Kobayashi, N., Kim, K. (2006). "Beach nourishment strategies." Coastal Engineering 2006, Proc. 30th Coastal Engineering Conf., Word Scientific, Singapore, 4129-4140.
- Peregrine, D.H. (1983). "Breaking waves on beaches." Ann. Rev. Fluid Mech., 15, 149-178.
- Reniers, A.J.H.M., Battjes, J.A. (1997). " A laboratory study of long-shore currents over barred and non-barred beaches." Coastal Eng., 30, 1-21.
- Report (1998). "Morphological changes of beach cross-shore profile under the attack of difference sequences of sea-states". European Community-HCM Program (ERBCHGECT). Università Roma "La Sapienza"-D.I.T.S.
- Ribberink, J.S., and Al-Salem, A.A. (1994). "Sediment transport in oscillatory boundary layers in cases of rippled beds and sheet flow." J. Geophys. Res., 99(C6), 12, 707-12,727.
- Ruessink, B.G, Miles, J.R., Feddersen, F., Guza, R.T., Elgar, S. (2001). "Modeling the along-shore current on barred beaches". J. Geophys. Res., 106(C10), 22, 451-22, 463.
- Sawaragi, T., Deguchi, I. (1978). "Distribution of Sand Transport Rate Across a Surf Zone". Proceedings 16th International Conference on Coastal Engineering, Hamburg.
- Schmied, L., Kobayashi, N., Puleo, J., Payo, A. (2006). "Cross-shore suspended sand transport on beaches." Coastal Engineering 2006, Proc. 30th Coastal Engineering Conf., Word Scientific, Singapore, 2511-2523.
- Stive, M.J.F, DeVried, H.J. (1994). Shear stress and mean flow in shoalinh and breaking waves." Coastal Enginnering 1999, Proc. 24th Coastal Engineering Conference. Reston, Va. Am. Soc. of Civ. Eng.

- Svendsen, I.A., Lorenz, R.S.(1989). “ Velocities in combined undertow and longshore currents.” *Coastal Engineering*, 13, 55-79.
- Tega, Y., Kobayashi, N. (1999). “Numerical modelling of overwashed dune profiles.” *Coastal Engineering 1999, Proc. 24th Coastal Engineering Conference*. Reston, Va. Am. Soc. of Civ. Eng.
- Thorton, E.B. (1968). “ A Field Investigation of Sand Transport in the Surf Zone”. *Proceeding 11th International Conference of Coastal Engineering*, American Society of Civil Eng., London, pp 335-351
- Thornton, E., Humiston, R.T., Birkeimer, W. (1996). “Bar/trough generation on natural beach.” *J. Geophys. Res.*, 101(C5), 12097-12110.
- Tomasicchio, G.R., Brunone, B. (1998). “ Cinematica dei modelli tipo-Boussinesq per onde propagatesi in acque intermedie.” *Atti XXVI Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, CUECM, Catania, Vol. 1*, 211-221.
- Tomasicchio, G.R., Aristodemo, F. (2005). “ Modelling of undertow profiles at beaches.”, *Proc. Waves '05, Madrid, ASCE*.
- Wang, P., Ebersole, B.A., Smith, E.R., Johnson, B.D. (2002). “Temporal and spatial variation of surf-zone currents and suspended sediment concentration.” *Coastal Eng.*, 46, 175-211.
- Wang, P., Kirby, J.H., Haber, J.D., Horwitz, M.H., Knorr, P.O., Krock, J.R. (2006). “Morphological and Sedimentological Impacts of Hurricane Ivan and Immediate Poststorm Beach Recovery along the Northwestern Florida Barrier-Island Coast.” *J. Coastal Res.*, 22(6), 1382-1402.
- Van Gent, M.R.A., Coeved, E.M., Walstra, D.J.R., van de Graaff, J., Steetzel, H.J., Boers, M. (2006). “Dune erosion tests t study the influence of wave period.”. *Coatal Engineering 2006, Proc. 30th Costal Engineering Conf.*, Word Scientific, Singapore, 2779-2791.

- Van Rijn, L., Walstra, D.J.R., Gramsmejer, B., Sutherland, J., Pan, S., Sierra, J.P.(2003). "The predictability of storms and seasons using processes-based profile models." *Coastal Eng.*, 47, 295-327.
- Thieler, E.R., Young, R.S.(1991). "Quantitative evaluation of coastal geomorphic change in South Carolina After Hurricane Hugo." In: Finkl, C.W., Pilkey, O.H.: *Impact of Hurricane Hugo: September 10-22, 1989*, *J. Coast. Res.*, 8, 187-200.
- Zhao, H., Kobayashi, N. (2005). "Suspended sand transport in surf zones on equilibrium beaches." Technical Report Res. Rep, CACR-05-01, Center for Applied Coastal Research, Univ. of Delaware, Newark, DE.