

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE



S.O. OPERE CIVILI

PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA

LINEA COSENZA – PAOLA / S. LUCIDO

NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA

RADDOPPIO COSENZA – PAOLA/ S. LUCIDO

STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE

Relazione

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.

RC1C 03 R 09 RG ID0002 001 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	EMISSIONE ESECUTIVA	R. Belloni A. Cappelli	giugno 2022	A. Cappelli	giugno 2022	I. D'Amore	giugno 2022	A. Vittozzi giugno 2022

ITALFERR S.p.A.  
Ufficio Operative Civili e Gestione delle varianti  
Ing. A. Vittozzi  
Dott. Ing. Angelo Vittozzi  
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma  
N° 420783

File: RC1C03R09RGID0002001A.doc

n. Tab.:



## INDICE

1.	INTRODUZIONE .....	4
1.1	OBIETTIVI E CONTENUTI DELLO STUDIO .....	4
1.2	METODOLOGIA DI LAVORO .....	4
1.3	NORMATIVA DI RIFERIMENTO .....	5
1.4	DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO .....	8
2.	CARATTERISTICHE DELL'AREA DI STUDIO .....	9
2.1	INQUADRAMENTO TERRITORIALE DELL'INTERVENTO .....	9
2.2	AREE A PERICOLOSITÀ GEOMORFOLOGICA .....	12
2.3	CARATTERISTICHE AMBIENTALI E PAESISTICHE DELLA REGIONE FLUVIALE .....	15
2.4	ASSETTO GEOMORFOLOGICO DEI CORSI D'ACQUA .....	15
2.4.1	<i>Assetto dei bacini</i> .....	15
2.4.2	<i>Assetto dei versanti e propensione al dissesto</i> .....	19
2.4.3	<i>Metodologia per l'individuazione dei punti di prelievo del materiale d'alveo</i> .....	22
2.4.4	<i>Caratteristiche granulometriche dei corsi d'acqua</i> .....	24
2.4.5	<i>Indice di Dinamica Morfologica (IDM)</i> .....	26
2.4.5.1	<i>Metodo IDRAIM</i> .....	26
2.4.5.2	<i>Applicazione al caso di studio</i> .....	29
2.5	APPORTO DI SEDIMENTI AL TRATTO DI STUDIO .....	30
2.5.1	<i>Considerazioni generali</i> .....	30
2.6	ANDAMENTO DELLE PORTATE LIQUIDE (DI MEDIO PERIODO) .....	30
3.	VALUTAZIONE DEL TRASPORTO SOLIDO .....	32
3.1	MODELLI MATEMATICI PER IL TRASPORTO SOLIDO .....	32
3.1.1	<i>La teoria di Shields per il moto incipiente</i> .....	32

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>NUOVA LINEA AV SALERNO - REGGIO CALABRIA          RADDOPPIO COSENZA – PAOLA/ S. LUCIDO</b>					
	<b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA</b>					
<b>STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE –          RELAZIONE</b>	COMMESSA RC1C	LOTTO 03 R 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A	FOGLIO 2 di 62

3.1.4	<i>Formule di Trasporto solido e campo di applicabilità.....</i>	39
3.2	MODELLO DI CALCOLO IDRAULICO A FONDO MOBILE.....	46
3.2.1	<i>HEC-RAS, modulo per il trasporto dei sedimenti.....</i>	46
3.2.1.1	<i>Cenni generali.....</i>	46
3.2.1.2	<i>Funzionamento del programma.....</i>	47
3.2.2	<i>Schematizzazione idraulica adottata.....</i>	49
3.2.2.1	<i>Geometria del modello.....</i>	49
3.2.2.2	<i>Scabrezza idraulica.....</i>	49
3.2.2.3	<i>Condizioni al contorno.....</i>	50
3.2.2.4	<i>Limiti del fondo erodibile.....</i>	52
3.2.2.5	<i>Caratteristiche del cambiamento del fondo alveo.....</i>	53
3.2.2.6	<i>Formula di trasporto solido.....</i>	53
3.2.2.7	<i>Caratterizzazione del mescolamento del fondo alveo.....</i>	54
3.2.2.8	<i>Granulometria del fondo alveo.....</i>	54
3.3	MODALITÀ EVOLUTIVE DELL'ALVEO.....	55
3.3.1	<i>Tendenza all'erosione e alla deposizione.....</i>	55
4.	CONCLUSIONI.....	56
4.1	ANALISI DEL RAPPORTO CON L'OPERA IN PROGETTO.....	56

## INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 2-1:	INQUADRAMENTO TERRITORIALE DELLA TRATTA IN PROGETTO SU STREET MAP.....	11
FIGURA 2-2:	AREE A PERICOLOSITÀ GEOMORFOLOGICA BACINO T. SETTIMO (FONTE PAI UoM CALABRIA E UoM LAO 2015 AGGIORNAMENTO 2020) .....	13
FIGURA 2-3:	AREE A PERICOLOSITÀ GEOMORFOLOGICA BACINI COSTIERI (FONTE PAI UoM CALABRIA E UoM LAO 2015 AGGIORNAMENTO 2020).....	14
FIGURA 2-4:	LEGENDA DELLE AREE A PERICOLOSITÀ GEOMORFOLOGICA.....	14
FIGURA 2-5:	DISTRIBUZIONE TEORICA DELLA GRANULOMETRIA DEI SEDIMENTI IN UNA FORMA DI DEPOSITO.....	23
FIGURA 2-6 –	SCHEMA GENERALE DELLA STRUTTURA DEL METODO IDRAIM.....	27
FIGURA 3-1:	SCHEMA DELLE FORZE AGENTI SU UNA PARTICELLA SOLIDA AL FONDO DI UN CORSO D'ACQUA.....	32
FIGURA 3-2:	DIAGRAMMA DI SHIELDS.....	34
FIGURA 3-3:	BILANCIO DI MASSA DEI SEDIMENTI NEL VOLUME DI CONTROLLO.....	36
FIGURA 3-4:	ESEMPIO DELL'INSERIMENTO DEI LIMITI DEL FONDO MOBILE COINCIDENTI CON I LIMITI DEL CANALE PRINCIPALE.....	52
FIGURA 3-5:	ESEMPIO DELL'INSERIMENTO DELLA MASSIMA PROFONDITÀ ERODIBILE.....	53
FIGURA 3-6:	SCHEMA DEL METODO DI MESCOLAMENTO DEL FONDO ALVEO.....	54

## INDICE DELLE TABELLE

TABELLA 2.4-1:	CARATTERISTICHE GRANULOMETRICHE DEI CORSI D'ACQUA IN ESAME.....	25
----------------	---	----

TABELLA 2.4-2 – LISTA DEGLI INDICATORI PER LA VALUTAZIONE DELL'IDM.....	29
TABELLA 2.4-3 – INDICE E CLASSE DI DINAMICA MORFOLOGICA DEI CORSI D'ACQUA OGGETTO DI STUDIO. L'APPLICAZIONE EFFETTUATA COSTITUISCE UN PRIMO TENTATIVO DI DETERMINARE TALE INDICE E NON VUOLE SOSTITUIRE ALCUNA ALTRA APPLICAZIONE UFFICIALE SVOLTA IN REGIONE CALABRIA DAGLI ENTI PREPOSTI.....	30
TABELLA 2.6-1: VALORI DI PORTATA MEDIA ADOTTATI .....	31
TABELLA 3.1-1: LIMITI DI APPLICABILITÀ DELLE FORMULE DI TRASPORTO SOLIDO .....	40
TABELLA 3.2-1: VALORI DI SCABREZZA ADOTTATI .....	50
TABELLA 3.2-2: VALORI DI PORTATA MODALE SIMULATI.....	50
TABELLA 3.3-1: STIMA DELLA TENDENZA EVOLUTIVA.....	55
TABELLA 4.1-1 – VALORI DELL'INDICE LAM = LIVELLO DI ATTENZIONE PER INTERVENTI DI MANUTENZIONE PROGRAMMATA .....	57
TABELLA 4.1-2 – VALORI DELL'INDICE LAM = LIVELLO DI ATTENZIONE PER INTERVENTI DI MANUTENZIONE PROGRAMMATA .....	57
TABELLA 4.1-3: LIVELLO DI ATTENZIONE PER INTERVENTI DI MANUTENZIONE PROGRAMMATA PER I CORSI D'ACQUA IN ESAME .....	58

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p><b>NUOVA LINEA AV SALERNO - REGGIO CALABRIA RADDOPPIO COSENZA – PAOLA/ S. LUCIDO</b></p> <p><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA</b></p>					
<p><b>STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE</b></p>	<p>COMMESSA RC1C</p>	<p>LOTTO 03 R 09</p>	<p>CODIFICA RG</p>	<p>DOCUMENTO ID0002 001</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 4 di 62</p>

## 1. INTRODUZIONE

### 1.1 Obiettivi e contenuti dello Studio

La presente Relazione riferisce in merito all'analisi di geomorfologia fluviale relativa ai corsi d'acqua interessati dal progetto di fattibilità tecnica ed economica della nuova linea AV Salerno – Reggio Calabria raddoppio Cosenza – Paola/S. Lucido. Lo studio geomorfologico viene condotto con l'obiettivo di valutare la tendenza evolutiva dei corsi d'acqua, in termini di possibili naturali variazioni morfologiche dell'alveo che evidenzino erosioni o deposizioni diffuse con mobilitazione dei sedimenti e conseguente possibile rischio di interrimento delle opere di attraversamento. La deposizione del materiale d'alveo, trasportato dalla corrente idrica, viene infatti presa in considerazione per il dimensionamento delle nuove opere di attraversamento, in quanto la luce libera di sottotrave può ridursi appunto a causa dell'interrimento. Tuttavia i sedimenti naturalmente depositi dalla corrente idrica possono essere rimobilizzati dalle piene, per cui l'analisi del trasporto solido fluviale ha l'obiettivo di indicare appunto la tendenza evolutiva, al fine di programmare le conseguenti attività di manutenzione, finalizzate al monitoraggio della dinamica morfologica del corso d'acqua.

### 1.2 Metodologia di lavoro

La metodologia da seguire per valutare la tendenza evolutiva di un corso d'acqua si può articolare, come svolto nell'ambito del presente studio, sulla combinazione di analisi quali-quantitative basate sui seguenti approcci:

- Caratterizzazione geomorfologica del bacino idrografico, con particolare attenzione ai processi legati alla dinamica fluviale, in particolare per valutare l'entità (anche qualitativamente) dell'apporto di sedimenti dai versanti e dai tratti di monte;
- Caratterizzazione del corso d'acqua di interesse, in base ai seguenti aspetti:
  - Granulometria del materiale d'alveo, con attenzione ai sedimenti movimentabili dalle piene;
  - Valutazione della portata media di riferimento per le analisi di trasporto solido;

- Individuazione delle caratteristiche di dinamica morfologica, secondo le specifiche della metodologia IDRAIM elaborata da ISPRA (Rinaldi et al., 2015), descritta nel seguito al paragrafo 2.5;
- Valutazione del trasporto solido mediante individuazione della formula parametrica di trasporto solido adatta al caso in esame e conseguente implementazione di un modello di calcolo idraulico a fondo mobile (per il presente studio si adotta il noto HEC-RAS versione 5.0.7, attivando l'opportuno modulo per l'analisi dei sedimenti); in particolare, i risultati del modello idraulico a fondo mobile consentono di verificare le opere di attraversamento secondo il seguente schema concettuale:
  - Tendenza all'erosione ⇒ progettazione di opere di protezione dall'erosione, dimensionate con il criterio di impedire lo scalzamento;
  - Tendenza alla deposizione ⇒ progettazione dell'opera di attraversamento in modo che sia garantita l'ufficiosa idraulica (franco di progetto maggiore del minimo richiesto dalla Normativa);  
  
individuazione delle azioni necessarie al mantenimento del franco idraulico di progetto (interventi di manutenzione);
- Definizione del Livello di Attenzione per interventi di manutenzione programmata (LAm), sulla base dei risultati ottenuti tramite la metodologia IDRAIM e la modellazione idraulica a fondo mobile (conclusioni riportate al paragrafo 4.1).

### 1.3 Normativa di riferimento

Ai fini del presente studio sono stati consultati i seguenti strumenti normativi:

- Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico della Regione Calabria;
- Sistema di valutazione geomorfologica, analisi e monitoraggio dei corsi d'acqua – Metodo IDRAIM (ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale)

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>NUOVA LINEA AV SALERNO - REGGIO CALABRIA          RADDOPPIO COSENZA – PAOLA/ S. LUCIDO</b>					
	<b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA</b>					
<b>STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE –          RELAZIONE</b>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RC1C	03 R 09	RG	ID0002 001	A	6 di 62

### **Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico**

La disamina delle Norme del P.A.I., per quanto attiene agli aspetti geomorfologici, è riportata nella Relazione geologica, geomorfologica, idrogeologica e sismica RC1C03R69RGGE0001001

### **Piano di gestione dei sedimenti**

Allo stato attuale la Regione Calabria si è dotata, in attuazione alla Direttiva per la gestione dei sedimenti, approvata nell'aprile 2006, con Decreto del Ministero dell'Ambiente n° 173/2016 (G.U. n. 208 06.09.2016 - Suppl. Ord. n. 40) di un REGOLAMENTO che detta le modalità e i criteri tecnici per l'autorizzazione (di cui all'articolo 109, comma 2, del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152) all'esecuzione dei seguenti interventi:

- A. Escavo/dragaggio di sedimenti marini (fluviali) finalizzato a:
- A.1 immersione deliberata in mare;
  - A.2 ripascimento strutturale;
  - A.3 immersione in ambiente conterminato;

### **Sistema di valutazione geomorfologica, analisi e monitoraggio dei corsi d'acqua – Metodo IDRAIM (ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale)**

Il sistema di valutazione idromorfologica, analisi e monitoraggio dei corsi d'acqua, denominato IDRAIM, è stato realizzato con l'obiettivo di sviluppare una metodologia complessiva di analisi e di supporto alla gestione dei processi geomorfologici nei corsi d'acqua, tenendo conto in maniera integrata di obiettivi di qualità e di sicurezza, ai sensi della Direttiva Quadro Acque 2000/60/CE (Water Framework Directive o WFD) e della Direttiva Alluvioni 2007/60/CE (Floods Directive o FD). Il metodo sviluppato intende costituire una procedura sistematica e strutturata su come affrontare i vari aspetti geomorfologici, a integrazione di altre componenti (quali, ad es., gli aspetti idraulici ed ecologici), per poter giungere a fornire il supporto scientifico e conoscitivo per una gestione integrata dei corsi d'acqua.



 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>NUOVA LINEA AV SALERNO - REGGIO CALABRIA          RADDOPPIO COSENZA – PAOLA/ S. LUCIDO</b>					
	<b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA</b>					
<b>STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE –          RELAZIONE</b>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RC1C	03 R 09	RG	ID0002 001	A	7 di 62

Seppure costruito su basi scientifiche solide, è da tener presente che si tratta di una metodologia applicativa, tale da poter essere utilizzabile da parte degli enti responsabili dell'implementazione delle Direttive e dei piani di gestione e della gestione dei corsi d'acqua.

Uno degli obiettivi di tale metodologia è la definizione dell'Indice di Qualità Morfologica (IQM) e dell'Indice di Dinamica Morfologica (IDM) il quali rappresentano uno strumento per valutare lo scostamento rispetto a condizioni indisturbate del corso d'acqua che rappresentano le condizioni di riferimento. Nella definizione delle condizioni di riferimento si tiene conto della traiettoria di evoluzione del corso d'acqua, dei requisiti richiesti dalla WFD e del contesto specifico dei corsi d'acqua italiani, i quali sono stati interessati da fattori antropici per un lungo periodo di tempo. In accordo con la WFD, lo stato di riferimento deve corrispondere a condizioni "indisturbate", caratterizzate da assenza o impatti antropici molto limitati. Conseguentemente, le condizioni di riferimento sono definite in maniera tale da misurare lo scostamento rispetto a condizioni geomorfologiche indisturbate o solo lievemente disturbate.

Le condizioni di riferimento per un dato tratto sono definite considerando tre componenti, vale a dire:

- funzionalità geomorfologica (forme e processi del corso d'acqua);
- artificialità;
- variazioni morfologiche (instabilità).

Riguardo la prima componente, le condizioni di riferimento sono date dalla forma e dai processi che sono attesi per la tipologia morfologica esaminata. Per l'artificialità, la condizione di riferimento è data da assenza o presenza molto ridotta di interventi antropici (regolazione delle portate liquide e solide, strutture idrauliche e attività di gestione). Se esistono elementi antropici, essi dovrebbero produrre effetti trascurabili sulla morfologia dell'alveo e sui processi. Riguardo alla terza componente, un alveo deve essere stabile o in "equilibrio dinamico", vale a dire che non si sono verificate importanti variazioni morfologiche dovute a fattori antropici nel corso del "recente" passato (ovvero negli ultimi 100 anni circa).

Riassumendo, le condizioni di riferimento consistono in un tratto di corso d'acqua in equilibrio dinamico, dove il fiume svolge quei processi geomorfologici che sono attesi per una specifica tipologia, e dove l'artificialità è assente o non altera significativamente la dinamica del corso d'acqua a scala di bacino e di tratto.

Nell'ambito del presente studio, è stata applicata, in modo semplificato e in via preliminare, la metodologia per la determinazione dell'IDM (Indice di Dinamica Morfologica).

#### 1.4 Documentazione di riferimento

La documentazione di riferimento è la seguente:

Relazione geologica, geomorfologica, idrogeologica e sismica	RC1C03R69RGGE0001001
Carta geologica con elementi di geomorfologia	RC1C03R69N4GE0001001
Carta di sintesi dello studio geomorfologico	RC1C03R09G5ID0002001A RC1C03R09G5ID0002002A

## 2. CARATTERISTICHE DELL'AREA DI STUDIO

### 2.1 Inquadramento territoriale dell'intervento

Il tracciato ferroviario in progetto che, per un lungo tratto si sviluppa in galleria, presenta nei due tratti allo scoperto, a monte ed a valle della galleria suddetta, diverse interferenze con il reticolo idrografico. La Figura 2-1 mostra l'inquadramento dell'area di intervento

In particolare, lato Cosenza l'opera interferisce con:

- Il torrente Settimo, un affluente in sponda sinistra del Crati ed il corso d'acqua interferito di maggiore importanza;
- Un affluente dello stesso torrente Settimo, in corrispondenza della stazione di Rende;
- Alcuni piccoli fossi afferenti al fiume Crati che intercettano il tracciato a sud dello scavalco dell'autostrada A3, andando verso Cosenza.

In prossimità della costa tirrenica (lato Paola - San Lucido), invece, la linea interferisce, da nord a sud, con:

- Torrente Zio Petruzzo;
- Torrente Licciardo;
- Fosso Scorza;
- Fosso Siviglia;
- Torrente Varco Le Chianche

	SITO	WBS	pk
Area costiera	Torrente Zio Petruzzo	VI07	2+808.97
	Torrente Licciardo	VI06	2+576.00
	Deviazione fosso Scorza	IN08	2+305.00
	Fosso Siviglia	VI03	20+030.00
	Torrente Varco Le Chianche	VI05	20+551.00
	Tombino di trasparenza	IN05	20+330.00
	Tombino di trasparenza	IN06	2+686.00
	Tombino di trasparenza	IN07	2+938.00

	SITO	WBS	pk
Area interna	Torrente Settimo	VI02	1+858.00
	Fosso stazione di Rende	IN04	4+345.00
		IN01	0+365.00
		IN02	0+865.00
		IN09	0+660.00
		IN10	1+495.00

Si precisa che le piccole interferenze (IN01, IN02, IN05, IN06, IN07, IN09 e IN10), così come il Fosso Scorza e il Fosso della stazione di Rende, sono stati esclusi dalle analisi di geomorfologia fluviale. Le piccole interferenze sottendono infatti solo delle piccole aree scolanti e sono state considerate nel progetto come semplici tombini di trasparenza ottenuti dal prolungamento di quelli esistenti; la deviazione nello stato di progetto del Fosso Scorza e del Fosso della Stazione Rende verranno realizzate con sezioni rivestite e quindi, non avendo apporto solido da monte, si ritiene che non vi saranno fenomeni di trasporto solido che possano modificare la morfologia dell'alveo di progetto.



Figura 2-1: Inquadramento territoriale della tratta in progetto su Street Map

	<b>NUOVA LINEA AV SALERNO - REGGIO CALABRIA RADDOPPIO COSENZA – PAOLA/ S. LUCIDO</b>					
	<b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA</b>					
<b>STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE</b>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RC1C	03 R 09	RG	ID0002 001	A	12 di 62

## 2.2 Aree a pericolosità geomorfologica

La carta della Pericolosità e del rischio geomorfologico del Piano di Assetto Idrogeologico della Regione Calabria (PAI UoM Calabria e UoM Lao 2015 aggiornamento 2020) riporta areali di pericolosità idrogeologica connessi con la stabilità di versante nell'area di studio. Le seguenti Figura 2-2 e Figura 2-3 mostrano la distribuzione di tali aree nell'ambito di studio preso in considerazione in questa sede. La disamina delle Norme del PAI è riportata nella relazione geologica RC1C03R69RGGE0001001.

In particolare, il settore di intervento compreso tra le km 0+000 e 9+000 e tra le km 11+200 e 20+727, non presenta interferenza con alcuna area di pericolosità geomorfologica censita nelle cartografie del PAI. Mentre, nel settore centro orientale le cartografie ufficiali riportano la presenza di diversi areali di pericolosità molto elevata P4, alta P3 e media P2. Tali fenomeni lambiscono o intercettano in superficie il tracciato ferroviario tra le km 9+000 e 11+000. In questo tratto le opere sono rappresentate da una galleria naturale. Nell'area dei bacini costieri sono invece assenti areali di pericolosità geomorfologica, eccetto per un'area di pericolosità P2 interna al bacino idrografico del Torrente Licciardo, ma di tipo inattivo (colamento inattivo).

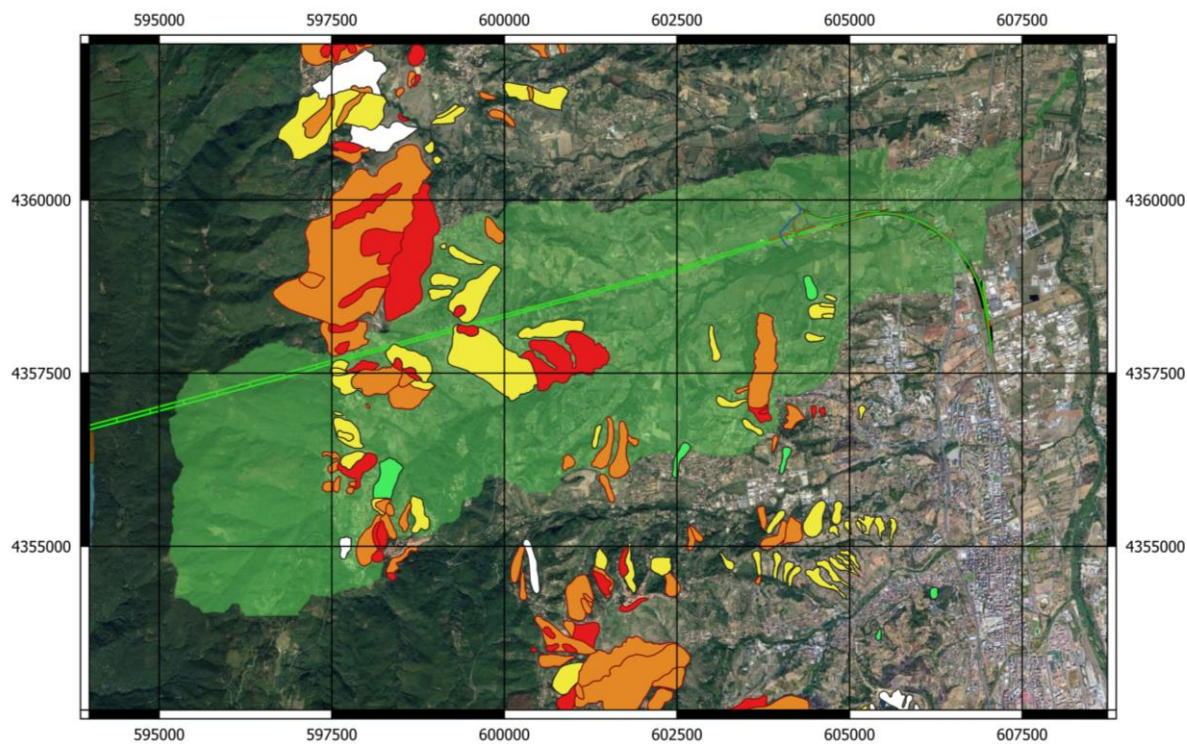


Figura 2-2: Aree a Pericolosità geomorfologica Bacino T. Settimo (fonte PAI UoM Calabria e UoM Lao 2015 aggiornamento 2020)



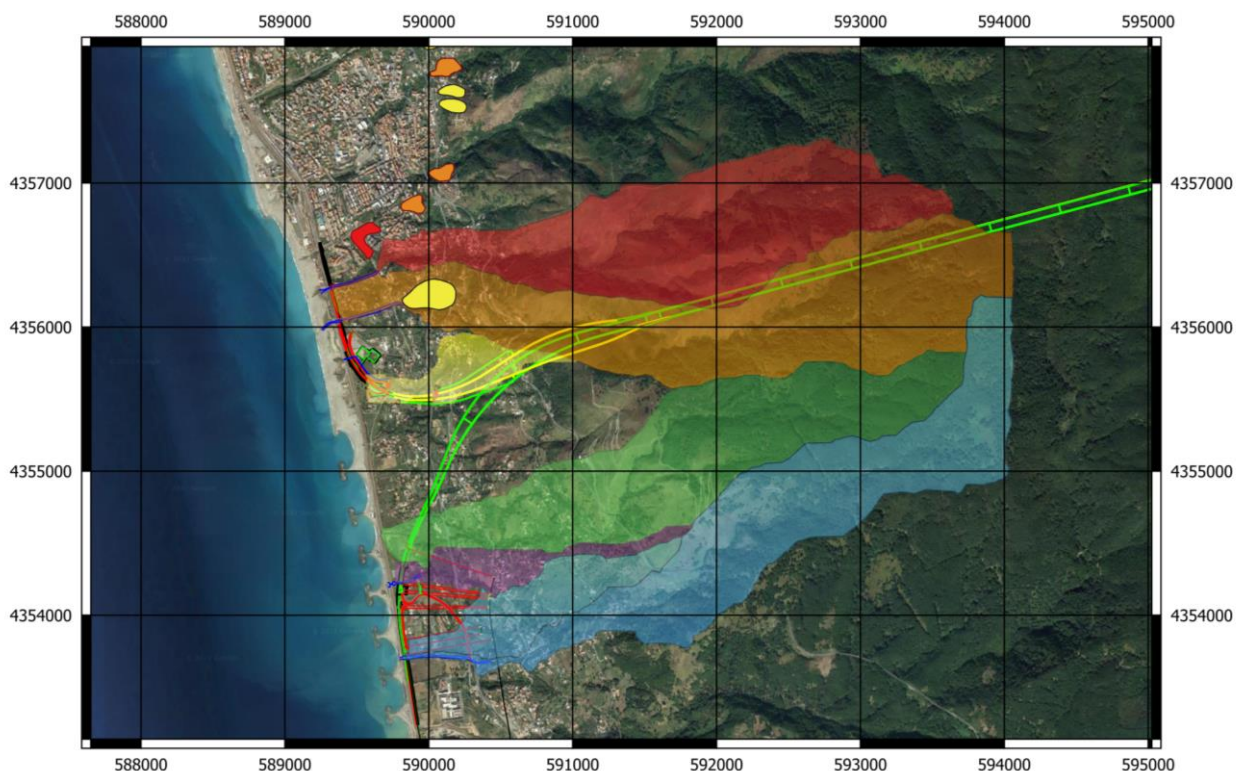


Figura 2-3: Aree a Pericolosità geomorfologica Bacini Costieri (fonte PAI UoM Calabria e UoM Lao 2015 aggiornamento 2020)

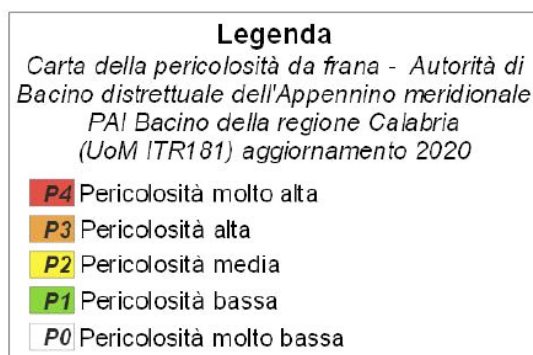


Figura 2-4: Legenda delle aree a Pericolosità geomorfologica



 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>NUOVA LINEA AV SALERNO - REGGIO CALABRIA          RADDOPPIO COSENZA – PAOLA/ S. LUCIDO</b>					
	<b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA</b>					
<b>STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE –          RELAZIONE</b>	COMMESSA RC1C	LOTTO 03 R 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A	FOGLIO 15 di 62

### 2.3 Caratteristiche ambientali e paesistiche della Regione fluviale

Per quel che riguarda gli aspetti ambientali e paesistici, essi non sono rilevanti ai fini del presente studio. Si rimanda allo Studio di Impatto Ambientale per la valutazione di tali aspetti.

### 2.4 Assetto geomorfologico dei corsi d'acqua

#### 2.4.1 Assetto dei bacini

L'assetto geomorfologico dei bacini dei corsi d'acqua interferiti dalla linea ferroviaria in progetto è desunto dalla caratterizzazione geomorfologica effettuata per il progetto in esame, riportata nell'elaborato RC1C03R69RGGE0001001 di cui di seguito si riportano gli estratti significativi per lo scopo del presente documento.

L'area di studio ricade nel settore centrale della Regione Calabria e, più precisamente, lungo il margine occidentale dell'Appennino Calabro, nella porzione di territorio compresa tra la costa tirrenica a sud di Paola ed il fondovalle del F. Crati a nord di Rende. Tale areale ricade interamente nella provincia di Cosenza e interessa parte dei territori comunali di Montalto Uffugo, Paola, Rende, San Fili, San Lucido e San Vincenzo la Costa. Dal punto di vista morfologico, il settore di studio è caratterizzato da un territorio con caratteristiche estremamente variabili ed eterogenee. Il settore occidentale, infatti, ricade nella parte centrale della Catena Costiera ed è caratterizzato da una morfologia tipicamente montuosa, con rilievi piuttosto acclivi ed estesi posti a quote variabili tra i 600 ed i 1255 m circa s.l.m.. La continuità del paesaggio è interrotta, molto spesso, da strette valli di incisione fluviale che tagliano tutti i rilievi secondo allineamenti ben evidenti che ricalcano l'assetto strutturale dell'area. Il settore orientale, invece, si colloca nella fascia di territorio compresa tra il margine orientale della Catena Costiera ed il fondovalle del F. Crati. Si tratta di un territorio tipicamente collinare, caratterizzato da rilievi generalmente poco accentuati ed estesi interrotti, di frequente, da valli fluviali e incisioni torrentizie drenanti mediamente verso i settori più orientali. Inoltre, il settore occidentale, si colloca tra il margine occidentale della Catena Costiera e la costa Tirrenica. Si tratta di una porzione di territorio caratterizzata da rilievi collinari posti immediatamente a ridosso di una piana costiera arealmente molto limitata e frequentemente incisi da valli fluviali e torrenti. I principali corsi d'acqua dell'area sono rappresentati dal Fiume Crati, che scorre in direzione circa meridiana nei settori più orientali dell'area di studio, e dai Torrenti Settimo e Mavigliano, suoi affluenti in sinistra idrografica. Ad essi si aggiungono una serie di corsi d'acqua secondari, a

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>NUOVA LINEA AV SALERNO - REGGIO CALABRIA          RADDOPPIO COSENZA – PAOLA/ S. LUCIDO</b>					
	<b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA</b>					
<b>STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE –          RELAZIONE</b>	COMMESSA RC1C	LOTTO 03 R 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A	FOGLIO 16 di 62

carattere generalmente stagionale e/o torrentizio, e numerosi solchi da ruscellamento concentrato, attivi solo in concomitanza con eventi meteorici particolarmente intensi e severi.

Il territorio in esame è ricco di corsi d'acqua con bacini molto estesi e ramificati, drenanti sia verso il litorale tirrenico che in direzione del fondovalle del Fiume Crati. Tali bacini sono caratterizzati da un assetto morfologico piuttosto articolato, connesso sia all'azione geodinamica della Catena Costiera che alla natura litologica delle diverse unità affioranti. Nei settori di affioramento di termini litologici prevalentemente lapidei, il reticolo idrografico presenta un *pattern* per lo più angolato, soggetto ad un forte controllo strutturale per l'influenza combinata dei vari sistemi di dislocazione e di discontinuità (Tansi 1993; Tansi et al. 2016). Nell'area di affioramento dei termini litologici prevalentemente terrigeni, al contrario, l'idrografia superficiale mostra un *pattern* sub-dendritico, che mette in evidenza i frequenti adattamenti strutturali dei corsi d'acqua ed i locali fenomeni di "cattura" (Tansi 1993). Le aste fluviali sono generalmente fitte e con una marcata tendenza all'approfondimento (Sorriso-Valvo et al. 1996), essenzialmente a causa dell'intenso sollevamento quaternario dell'area (Tansi 1993). In virtù di tale condizione, il reticolo principale risulta generalmente sovrainposto nelle aree di affioramento dei depositi sedimentari, mentre è adattato strutturalmente nelle zone montane, salvo locali fenomeni di precedenza rispetto alle faglie N-S (Sorriso-Valvo et al. 1996).

I settori montuosi della Catena Costiera e quelli collinari o sub-pianeggianti del Bacino del Crati presentano delle caratteristiche geomorfologiche ed idrografiche profondamente differenti tra loro. Tali caratteristiche sono dovute, essenzialmente, alla forte influenza esercitata dall'assetto geologico-strutturale dell'area e dalla sua evoluzione geomorfologica sul reticolo idrografico locale. Nei settori collinari del Bacino del Crati, infatti, il reticolo idrografico locale presenta uno sviluppo molto articolato ed un *pattern* per lo più sub-dendritico, che segue almeno in parte le direttrici tettoniche principali. Nei settori montuosi della Catena Costiera, al contrario, il reticolo idrografico mostra uno sviluppo più regolare e meno articolato, con un *pattern* generalmente angolato o sub-angolato che ricalca, in maniera piuttosto evidente, le principali direttrici strutturali dell'area. La struttura della rete idrografica, pertanto, risulta fortemente condizionata sia dalla natura litologica del substrato che dagli elementi strutturali che lo hanno interessato. Il reticolo idrografico, infatti, si presenta più esteso ed articolato nei settori di affioramento di litotipi a dominante pelitica mentre è meno articolato, con andamento subrettilineo, nelle aree di affioramento di termini litologici prevalentemente litoidi. Nei settori orientali dell'area di studio, la principale linea di deflusso idrico superficiale è rappresentata dal Fiume Crati, un importante corso

d'acqua a carattere perenne che scorre nell'ampia depressione strutturale posta tra i rilievi montuosi della Sila e della Catena Costiera. Il Fiume Crati nasce ai piedi della Sila dal Timpone Bruno (1742 m s.l.m.), nel comune di Aprigliano, e si sviluppa per circa 91 km in direzione prima verso Nord e, quindi, verso NE. Dopo aver ricevuto la confluenza del Fiume Coscile, nella piana di Sibari, sfocia nel Golfo di Taranto all'altezza di Corigliano Calabro. Il Torrente Settimo, invece, ha origine dai rilievi più orientali della Catena Costiera e si estende per circa 18 km in direzione WSW-ENE, fino alla confluenza col Fiume Crati. Ai suddetti elementi idrografici, che costituiscono i principali assi di drenaggio superficiale del Bacino del Crati, si aggiungono diversi corsi d'acqua secondari, a carattere marcatamente stagionale e/o torrentizio, e numerosi solchi da ruscellamento concentrato attivi solo in concomitanza con eventi meteorici particolarmente intensi e severi. Nei settori occidentali dell'area di studio, grossomodo corrispondenti alla fascia litoranea a sud di Paola ed ai rilievi montuosi della Catena Costiera, non sono invece presenti elementi idrografici di particolare importanza ed estensione. Il reticolo idrografico superficiale, pertanto, è caratterizzato unicamente da corsi d'acqua secondari con regime marcatamente stagionale e/o torrentizio, con portate estremamente variabile e fortemente condizionate da regime delle piogge. Gli alvei presentano un andamento grossomodo ortogonale a quello della Catena Costiera, mentre l'unico recapito delle acque superficiali è rappresentato dal Mar Tirreno. Ad essi si aggiungono, inoltre, frequenti vallecole e solchi di erosione concentrata, generalmente ortogonali alle principali aree impluviali e attivi solo in concomitanza con gli eventi meteorici più importanti.

Nell'intera area esaminata, le principali forme di accumulo connesse al deflusso idrico superficiale derivano, essenzialmente, dai processi deposizionali dei principali sistemi fluviali presenti, come il Fiume Crati ed i Torrenti Settimo e Mavigliano. In particolare, nei settori più orientali dell'area di studio tali meccanismi deposizionali risultano preponderanti sugli altri processi morfologici e conferiscono quindi, a tutto al territorio, una morfologia blandamente ondulata e piuttosto regolare, caratterizzata da diverse superfici terrazzate e numerose aree impluviali poco accentuate. I depositi alluvionali si distribuiscono generalmente su superfici sub-pianeggianti o blandamente ondulate, spesso strutturate secondo diversi ordini di terrazzi posti a differenti quote sui fondovalle attuali. Tali depositi presentano una granulometria mediamente grossolana, sabbiosa e ghiaioso-sabbiosa, anche se mostrano al loro interno vistose variazioni sedimentologiche e tessiturali dovute alle frequenti intercalazioni argillose e limoso-argillose. Allo sbocco delle principali aste torrentizie nelle aree pianeggianti, si rinvengono inoltre frequenti conoidi alluvionali, di estensione ed importanza variabile. Verso la costa, questi sistemi deposizionali sono riferiti

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>NUOVA LINEA AV SALERNO - REGGIO CALABRIA          RADDOPPIO COSENZA – PAOLA/ S. LUCIDO</b>					
	<b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA</b>					
<b>STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE –          RELAZIONE</b>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RC1C	03 R 09	RG	ID0002 001	A	18 di 62

a due differenti cicli sedimentari e risultano interdigitati, almeno localmente, ai depositi marini recenti e terrazzati.

In corrispondenza dei corsi d'acqua principali, e secondariamente lungo gli alvei dei loro affluenti maggiori, si rinvencono vistose scarpate di genesi fluviale e zone di erosione laterale delle sponde. Gli alvei secondari mostrano, in generale, una marcata tendenza all'approfondimento, mentre gli alvei più importanti sono caratterizzati da prevalenti meccanismi deposizionali. Ulteriori scarpate fluviali, ormai inattive e fortemente degradate, sono presenti in corrispondenza dei margini esterni dei terrazzi alluvionali più estesi, posti a quote variabili dal fondovalle attuale.

In prossimità dell'alveo del Torrente Settimo, inoltre, sono presenti tracce degli antichi corsi fluviali, spesso caratterizzati da depositi fini in facies di lago di meandro o canale in fase di abbandono. Tali elementi presentano, in generale, larghezza piuttosto contenuta e sono localmente sede di zone paludose o acquitrini di scarsa importanza. Attualmente i canali abbandonati sono difficilmente distinguibili e cartografabili a causa dell'intensa antropizzazione subita dall'area nel corso degli ultimi decenni.

Nella zona centrale dell'area di studio, lungo il margine occidentale del Bacino del Crati, sono presenti anche forme di erosione di tipo calanchivo. Tali elementi si impostano prevalentemente sui termini argilloso-marnosi dei cicli plio-pleistocenici e, generalmente, risultano strettamente connesse a movimenti franosi. superficiali o ad alvei con evidente tendenza all'approfondimento. La maggior parte delle zone calanchive si rinvencono in prossimità del centro abitato di San Vincenzo la Costa, dove l'affioramento di termini pelitici del substrato, la presenza di versanti piuttosto acclivi e la forte azione erosiva delle acque correnti superficiali hanno prodotto le condizioni favorevoli allo sviluppo di queste fenomenologie di dissesto. Infine, in tutta l'area di studio si rinvencono evidenti fenomeni erosivi, sia areali che lineari, connessi al deflusso non regimato delle acque correnti superficiali. Tali fenomeni generano, ovviamente, forme caratteristiche quali solchi di erosione concentrata e vallecicole a V o a fondo concavo, particolarmente frequenti nelle porzioni mediobasse dei rilievi e nelle zone con le coperture detritico-colluviali più spesse.

Dal punto di vista geomorfologico, non si rilevano elementi di particolare rilevanza per le opere in progetto, per l'assetto generalmente sub-pianeggiante dell'area. L'unico elemento potenzialmente interferente col tracciato ferroviario è rappresentato, quindi, dall'alveo del T. Settimo, spesso soggetto a

	<b>NUOVA LINEA AV SALERNO - REGGIO CALABRIA RADDOPPIO COSENZA – PAOLA/ S. LUCIDO</b>  <b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA</b>					
<b>STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE</b>	COMMESSA RC1C	LOTTO 03 R 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A	FOGLIO 19 di 62

importanti fenomeni di alluvionamento e generalmente caratterizzato da evidenti fenomeni di erosione laterale delle sponde.

#### **2.4.2 Assetto dei versanti e propensione al dissesto**

Nell'attuale contesto morfoclimatico, i fenomeni gravitativi di versante rappresentano un fattore morfoevolutivo di particolare importanza, in quanto fortemente influenti sul modellamento dei rilievi e sull'evoluzione geomorfologica del territorio in esame. Nello specifico, questi fenomeni risultano particolarmente diffusi nei settori più esterni della Catena Costiera e lungo il margine occidentale del Bacino del Crati, in corrispondenza dei rilievi alto collinari di raccordo con la fascia montuosa.

L'area di studio si caratterizza, infatti, per un elevato numero di movimenti di versante (deformazioni gravitative e frane s.s.) originati dall'azione congiunta di vari fattori quali elementi tettonici, caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali, dinamica delle acque superficiali e sotterranee e attuale utilizzo del territorio. In un tale contesto geologico-strutturale, pertanto, le fenomenologie di dissesto seguono canali e orientazioni preferenziali dettate, in massima parte, dalla tettonica e dai fenomeni erosivi connessi al deflusso delle acque correnti superficiali. In particolare, quest'ultimo rappresenta uno dei maggiori fattori predisponenti e/o scatenanti al verificarsi di movimenti franosi, che risultano pertanto generalmente distribuiti in corrispondenza di solchi di erosione o alvei in approfondimento.

I settori di affioramento dei depositi marini post-orogenici sono caratterizzati, in generale, da un elevato numero di movimenti franosi, essenzialmente riconducibili a colamenti, scivolamenti e frane complesse in terra (sensu Varnes 1978 e Hungr et al. 2014). Lo stato è generalmente attivo o quiescente, raramente stabilizzato (sensu WP/WLI 1993), mentre la distribuzione di attività è per lo più retrogressiva o multidirezionale, raramente costante. Le velocità dei fenomeni sono mediamente piuttosto basse (sensu WP/WLI 1995), mentre le superfici di rottura si attestano, nella maggioranza dei casi, a profondità comprese tra 2 e 6 m circa dal p.c..

In particolare, nell'area compresa tra il bordo orientale della Catena Costiera ed il centro abitato di San Vincenzo la Costa, sono presenti un gran numero di movimenti franosi, spesso caratterizzati da estensione e profondità decisamente superiori a quelli che generalmente interessano i depositi marini post-orogenici. Tale situazione è dovuta, ovviamente, sia agli importanti fenomeni erosivi che interessano le aree impluviale che alla presenza della faglia attiva di "S.Fili-Cerzeto-S.Marco Argentano".

Tale struttura, infatti, oltre a causare eventi sismici di particolare rilevanza, determina un marcato scadimento delle caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni e degli ammassi rocciosi nelle zone più tettonizzate, favorendo quindi l'evoluzione dei versanti attraverso fenomeni gravitativi di particolare importanza.

In questi settori, inoltre, in associazione ai movimenti franosi s.s., sono presenti estesi fenomeni di deformazione viscosa delle coltri (creep e/o soliflusso). Questi processi interessano per lo più le coltri di copertura e le porzioni più superficiali ed alterate del substrato geologico dell'area e sono caratterizzati da ridotti tassi di deformazione, nell'ordine di alcuni millimetri/anno.

Nelle aree di affioramento dei termini cristallino-metamorfici del basamento paleozoico, invece, sono presenti locali fenomeni di dissesto (Foto 23) generalmente riconducibili a crolli s.l., scivolamenti e frane complesse in roccia (sensu Varnes 1978 e Hungr et al. 2014). Lo stato è variabile dall'attivo allo stabilizzato (sensu WP/WLI 1993), mentre la distribuzione di attività è per lo più costante, e solo raramente retrogressiva o multidirezionale. Le velocità dei fenomeni sono mediamente piuttosto elevate (sensu WP/WLI 1995), soprattutto per le frane di crollo s.l., mentre le profondità delle superfici di rottura risultano estremamente variabili in relazione al locale assetto geologico-strutturale.

Infine, in corrispondenza dei rilievi più occidentali della Catena Costiera, sono presenti fenomeni di Deformazione Gravitativa Profonda di Versante (DGPV), fondamentalmente riconducibili a dei sackung (sensu Zischinsky 1966; Hutchinson 1988; Discenza & Esposito 2021). Tali fenomeni sono caratterizzati da velocità di deformazione in genere estremamente lente e, in linea di massima, interessano gli ammassi rocciosi metamorfici per spessori di diverse decine o centinaia di metri.

Sotto il profilo geomorfologico, l'intera area di studio è caratterizzata dalla presenza di un elevato numero di movimenti di versante (frane s.s. e soliflussi/creep) ed estesi fenomeni di erosione superficiale, essenzialmente connessi all'assetto geologico-strutturale dell'area e all'evoluzione geomorfologica di questo settore di catena. Ad essi si aggiungono numerosi elementi geomorfologici connessi con l'attività antropica, col deflusso delle acque correnti superficiali e con l'azione marina, oltre a forme e processi di genesi strutturale e poligenica.

Nei settori di affioramento dei depositi marini post-orogenici, i fenomeni franosi sono per lo più classificabili come colamenti, scivolamenti e frane complesse in terra (sensu Varnes 1978 e Hungr et al. 2014). Lo stato è generalmente attivo o quiescente, raramente stabilizzato (sensu WP/WLI 1993), mentre la distribuzione di attività è per lo più retrogressiva o multidirezionale, raramente costante. Le

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>NUOVA LINEA AV SALERNO - REGGIO CALABRIA          RADDOPPIO COSENZA – PAOLA/ S. LUCIDO</b>					
	<b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA</b>					
<b>STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE –          RELAZIONE</b>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RC1C	03 R 09	RG	ID0002 001	A	21 di 62

velocità dei fenomeni sono mediamente piuttosto basse (*sensu* WP/WLI 1995), mentre le superfici di rottura si attestano, nella maggioranza dei casi, a profondità comprese tra 2 e 6 m circa dal p.c.. Ad essi si aggiungono estesi fenomeni di deformazione viscosa delle coltri (*creep* e/o soliflusso) con ridotti tassi di deformazione.

Nelle aree di affioramento dei termini cristallino-metamorfici del basamento paleozoico, invece, i fenomeni franosi sono generalmente classificabili come crolli *s.l.*, scivolamenti e frane complesse in roccia (*sensu* Varnes 1978 e Hungr et al. 2014). Lo stato è variabile dall'attivo allo stabilizzato (*sensu* WP/WLI 1993), mentre la distribuzione di attività è per lo più costante, e solo raramente retrogressiva o multidirezionale. Le velocità dei fenomeni sono mediamente piuttosto elevate (*sensu* WP/WLI 1995), soprattutto per le frane di crollo *s.l.*, mentre le profondità delle superfici di rottura risultano estremamente variabili in relazione al locale assetto geologico-strutturale.

Infine, in corrispondenza dei rilievi più occidentali della Catena Costiera, sono presenti fenomeni di Deformazione Gravitativa Profonda di Versante (DGPV), fondamentalmente riconducibili a dei *sackung* (*sensu* Zischinsky 1966; Hutchinson 1988; Discenza & Esposito 2021). Tali fenomeni sono caratterizzati da velocità di deformazione in genere estremamente lente e, in linea di massima, interessano gli ammassi rocciosi metamorfici per spessori di diverse decine o centinaia di metri.

Le opere in sotterraneo interessano alcuni settori caratterizzati da un elevato numero di movimenti franosi, come ad esempio il margine occidentale del *Graben* del Crati. La galleria in progetto presenta quasi ovunque notevoli coperture, nell'ordine di alcune centinaia di metri, e pertanto non risulta interferente con i movimenti franosi individuati in superficie. Nelle zone a minore copertura, invece, non sono presenti frane o fenomeni di dissesto e, quindi, non sussistono condizioni di potenziale criticità per l'opera.

I settori di imbocco della galleria e della relativa interconnessione ricadono anch'essi in settori stabili e privi di elementi geomorfologici di potenziale criticità. In particolare, l'imbocco lato Cosenza si colloca in un settore di piana alluvionale, in prossimità di un terrazzo elevato di pochi metri sul fondovalle attuale, ed è pertanto privo di qualunque forma erosiva o dissesto. L'imbocco lato Paola, invece, ricade a valle del terrazzo marino più basso, in corrispondenza di coperture eluvio-colluviali stabili e prive di movimenti franosi.

L'imbocco dell'interconnessione ricade in corrispondenza della piana costiera tirrenica, a breve distanza dal terrazzo marino più basso. L'area risulta stabile e priva di movimenti franosi o fenomeni

	<b>NUOVA LINEA AV SALERNO - REGGIO CALABRIA RADDOPPIO COSENZA – PAOLA/ S. LUCIDO</b>					
	<b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA</b>					
<b>STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE</b>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RC1C	03 R 09	RG	ID0002 001	A	22 di 62

erosivi di una certa rilevanza. Le scarpate in degradazione che interessano il margine del terrazzo in prossimità della linea esistente risultano piuttosto lontane dall'imbocco in progetto e, pertanto, non interferenti con lo stesso. L'unico elemento geomorfologico di una certa rilevanza è la conoide alluvionale formatasi in corrispondenza dello sbocco di un canale nella piana costiera recente. Tale conoide è comunque attualmente quiescente e priva di una evidente evoluzione geomorfologica, anche grazie alle opere di regimazione del canale. Inoltre, il rilevato ferroviario esistente taglia la parte bassa della conoide, dividendo il settore di potenziale alimentazione dall'imbocco dell'interconnessione.

Per quanto concerne le opere all'aperto, tutti i settori di territorio interessati presentano un assetto geomorfologico regolare e sub-pianeggiante, privo di movimenti franosi e fenomeni di erosione potenzialmente interferenti con il tracciato di progetto. Le conoidi alluvionali e gli alvei localmente intercettati dalle opere risultano inattivi o comunque privi di una evidente evoluzione geomorfologica. Solo in prossimità del tratto all'aperto vicino all'imbocco lato Paola della galleria principale (tra il km 19+850 e il km 20+300) sono presenti due movimenti franosi quiescenti di modeste dimensioni. Questi fenomeni interessano il margine del terrazzo marino più basso e sono posti a distanze variabili tra i 50 ed i 130 m circa.

L'analisi dell'assetto geomorfologico dei bacini di interesse mostra che i dissesti, presenti sui versanti e sui bacini delle incisioni, non alimentano il trasporto solido dei corsi d'acqua.

### **2.4.3 Metodologia per l'individuazione dei punti di prelievo del materiale d'alveo**

L'individuazione del punto di prelievo del materiale d'alveo rappresenta un'attività di fondamentale importanza per la caratterizzazione dei fenomeni di geomorfologia fluviale che si intende studiare, in quanto la granulometria dei sedimenti presenti nell'alveo e sulle sponde può essere talmente varia e articolata da dover richiedere, per una rappresentazione completa, più punti di prelievo lungo una stessa sezione. Ovviamente le caratteristiche granulometriche cambiano anche lungo lo sviluppo longitudinale del corso d'acqua, per cui devono opportunamente essere scelte le sezioni di indagine, al fine di rappresentare la variabilità longitudinale del materiale d'alveo, che è la caratteristica maggiormente rappresentativa dei fenomeni che si vogliono studiare in questa sede e che viene anche preliminarmente verificata durante i sopralluoghi tecnici propedeutici all'individuazione dei punti di prelievo. La seguente



	<b>NUOVA LINEA AV SALERNO - REGGIO CALABRIA RADDOPPIO COSENZA – PAOLA/ S. LUCIDO</b>					
	<b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA</b>					
<b>STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE</b>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RC1C	03 R 09	RG	ID0002 001	A	23 di 62

figura rappresenta la distribuzione teorica della granulometria dei sedimenti in una forma di deposito (barra longitudinale).

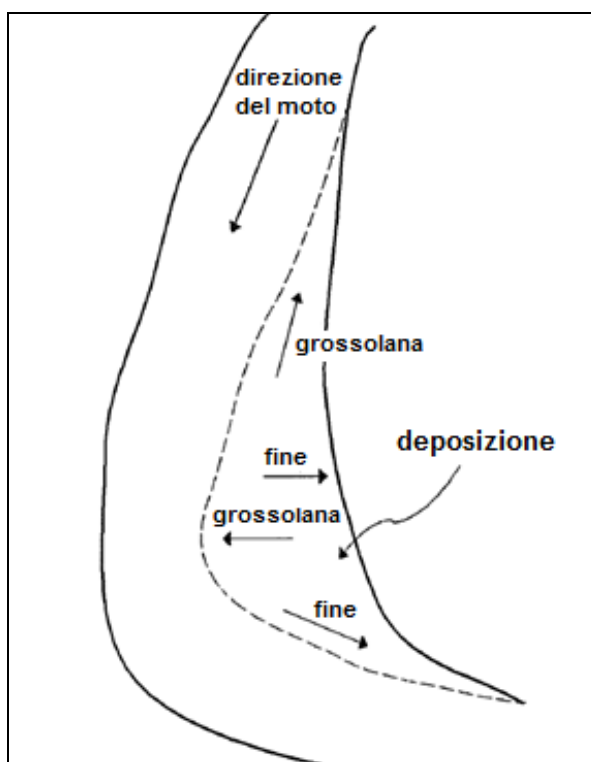


Figura 2-5: distribuzione teorica della granulometria dei sedimenti in una forma di deposito

I fenomeni di trasporto solido presi in considerazione vengono indagati, tra l'altro, con una schematizzazione di calcolo idraulico, descritta nel successivo paragrafo 3.2, nella quale le sezioni vengono considerate omogenee dal punto di vista granulometrico (nessuna variabilità trasversale della granulometria), di conseguenza, poiché il campione di materiale d'alveo deve essere rappresentativo di ciò che può essere movimentato anche dalle basse portate, si possono individuare le seguenti condizioni per la scelta del punto di prelievo.

- Esame visivo della sezione:
  - o Sedimenti depositi a valle di ostacoli naturali in alveo (es.: grandi massi o vegetazione, oppure strutture)

	<b>NUOVA LINEA AV SALERNO - REGGIO CALABRIA RADDOPPIO COSENZA – PAOLA/ S. LUCIDO</b>					
	<b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA</b>					
<b>STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE</b>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RC1C	03 R 09	RG	ID0002 001	A	24 di 62

- Deposito rappresentativo della variabilità trasversale della sezione
- Deposito rappresentativo di ciò che si può movimentare con le piene ordinarie
- Punto prossimo all'alveo bagnato, ma situato all'asciutto
- Modalità di prelievo:
  - Traguardare il punto con un oggetto riconoscibile (es. picchetto bianco/rosso o simile)
  - Ripresa fotografica del punto di prelievo:
    - Foto dall'alto
    - Foto del transetto
    - Foto del punto guardando verso valle
  - Scartare eventuali ciottoli di dimensioni maggiori di 10 cm
    - Foto dall'alto
  - Prelevare con pala a mano almeno 2Kg di materiale da collocare in sacchetto da campionamento
  - Classificare il campione in base al codice dell'individuazione del transetto

#### **2.4.4 Caratteristiche granulometriche dei corsi d'acqua**

Data la mancanza di campioni prelevati secondo la metodologia descritta nel precedente paragrafo 2.4.3, per lo svolgimento degli studi di geomorfologia fluviale, sono stati utilizzati i dati della campagna di indagini geognostiche condotte in fase di PFTE e di quelle condotte per l'attuale fase di progettazione. I campioni prelevati nel corso dei sondaggi geognostici sono stati analizzati in laboratorio per la determinazione della curva granulometrica, riportata nelle schede di campionamento (elaborato RC1C03R69PRGE0005001) e sintetizzate nella seguente Tabella 2.4-1, in cui è riportato il diametro caratteristico  $D_{50}$ . Nella tabella sono riportati i diametri caratteristici  $D_{50}$  riferiti esclusivamente ai sondaggi prossimi ai corsi d'acqua oggetto di studio e quindi maggiormente rappresentativi delle caratteristiche granulometriche di questi. I corsi d'acqua indagati sono caratterizzati da materiale appartenente alla classe granulometrica del limo sabbioso, per quanto riguarda i sondaggi relativi

all'area del Torrente Settimo, e delle ghiaie e sabbie per quanto riguarda il sondaggio rappresentativo dell'area dei bacini costieri.

*Tabella 2.4-1: Caratteristiche granulometriche dei corsi d'acqua in esame*

Corso d'acqua / Codice bacino	Codice punto di prelievo	Profondità (m)	D <sub>50</sub> (mm)
Torrente Settimo	SVI03	10,20 – 10,80	0,25
Torrente Zio Petruzzo	SVI05	7,00 – 7,50	1
Torrente Licciardo			
Fosso Siviglia			
Torrente Varco Le Chianche			

	<b>NUOVA LINEA AV SALERNO - REGGIO CALABRIA RADDOPPIO COSENZA – PAOLA/ S. LUCIDO</b>					
	<b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA</b>					
<b>STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE</b>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RC1C	03 R 09	RG	ID0002 001	A	26 di 62

## 2.4.5 *Indice di Dinamica Morfologica (IDM)*

### 2.4.5.1 Metodo IDRAIM

Il “Sistema di valutazione **idromorfologica**, **analisi** e **monitoraggio** dei corsi d’acqua”, denominato IDRAIM, costituisce un quadro metodologico complessivo di analisi, valutazione post-monitoraggio e di definizione delle misure di mitigazione degli impatti ai fini della pianificazione integrata prevista dalle Direttive 2000/60/CE (Acque) e 2007/60/CE (Alluvioni).

La metodologia IDRAIM prende in considerazione i processi legati alle variazioni del fondo alveo, alla mobilità laterale, alla presenza di opere e a tutte quelle componenti che vanno a determinare la dinamica morfologica di un fiume. Tali valutazioni, opportunamente integrate con le metodologie tradizionalmente impiegate per le analisi idrauliche, forniscono un quadro completo e dettagliato degli elementi che caratterizzano un corso d’acqua. Il metodo IDRAIM tenendo conto in maniera integrata di obiettivi di qualità ambientale e di mitigazione dei rischi legati ai processi di dinamica fluviale, si pone quindi come sistema a supporto della gestione dei corsi d’acqua e dei processi geomorfologici.

La struttura complessiva del metodo IDRAIM si articola in 4 fasi che possono essere riassunte come riportato in Figura 2-6. Si sottolinea che si tratta di uno strumento metodologico flessibile a seconda delle finalità per le quali viene impiegato, in cui ogni componente può essere affrontata per livelli di approfondimento crescenti, tenendo conto degli obiettivi e delle esigenze specifiche. I metodi utilizzati per la valutazione della qualità e della **dinamica morfologica** presentano un’analogia e coerente impostazione. Essi possono essere utilizzati insieme o anche separatamente, secondo l’esigenza di analizzare entrambi gli aspetti o uno solo di essi. Infine, i due aspetti di qualità morfologica e pericolosità da dinamica morfologica sono tenuti concettualmente separati, ma una delle finalità del metodo è di fare emergere le conflittualità e individuare le possibili azioni per tenere conto dei diversi obiettivi.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>NUOVA LINEA AV SALERNO - REGGIO CALABRIA          RADDOPPIO COSENZA – PAOLA/ S. LUCIDO</b>					
	<b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA</b>					
<b>STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE –          RELAZIONE</b>	COMMESSA RC1C	LOTTO 03 R 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A	FOGLIO 27 di 62

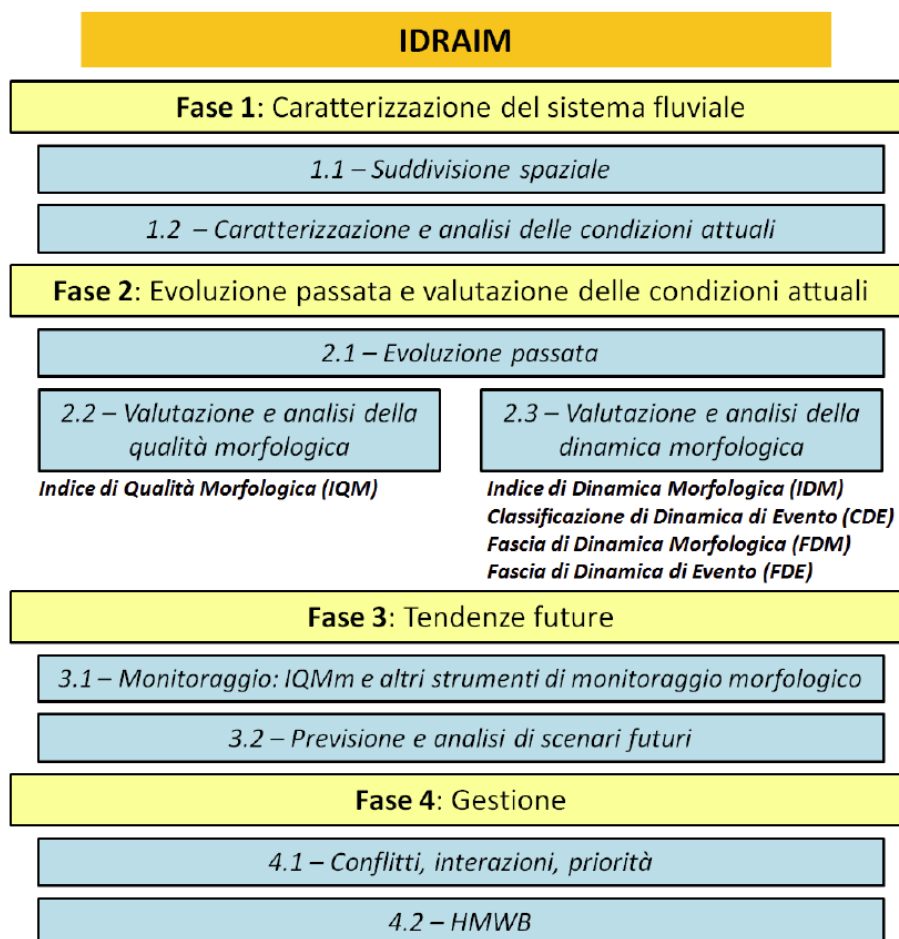


Figura 2-6 – Schema generale della struttura del metodo IDRAIM.

Nell’ambito del presente studio è stata applicata, in via preliminare, la procedura per la valutazione dell’Indice di Dinamica Morfologica (IDM) basata sulle seguenti componenti:

- 1) **Morfologia e processi:** riguarda le caratteristiche dell’alveo, del fondo, delle sponde, i processi e le tendenze attuali (localizzate e distribuite) manifestate ad una scala temporale degli ultimi 10 – 15 anni.
- 2) **Artificialità:** considera nel dettaglio le opere che maggiormente condizionano i processi di dinamica morfologica.

- 3) Variazioni morfologiche. si basano sull'analisi delle variazioni avvenute negli ultimi decenni, le quali condizionano la propensione o meno ai vari tipi di pericolosità.

La valutazione complessiva viene effettuata attraverso l'ausilio di apposite schede di valutazione, per mezzo delle quali si effettua un'analisi attraverso l'impiego integrato di immagini telerilevate e rilevamenti sul terreno. Le schede si basano sull'utilizzo di una serie di indicatori, per ognuno dei quali sono fornite una serie di possibili risposte (in numero variabile). Gli indicatori sono basati su una o più variabili quantitative o qualitative: in genere si tratta della percentuale rispetto alla lunghezza totale del tratto lungo la quale si osservano determinate caratteristiche o processi.

Ogni componente viene valutata attraverso una serie di indicatori, che sono:

- All. [1] **Indicatori di morfologia e processi.** Essi partono da aspetti di carattere generale (tipologia d'alveo, materiale che costituisce le sponde ed il fondo); successivamente si prendono in esame i processi di arretramento delle sponde; infine si vanno ad esaminare le tendenze (alla scala degli ultimi 10 – 15 anni) di tipo distribuito della larghezza e del fondo. Alcuni indicatori di morfologia e processi includono l'esame degli elementi di artificialità, considerati ad esempio tra i tipi di materiale costituenti il fondo e le sponde.
- All. [2] **Indicatori di artificialità.** Essi prendono in esame in maniera più specifica gli elementi artificiali, analizzandoli dal punto di vista dei loro potenziali effetti sui processi (es. difese di sponda come impedimento dei processi di arretramento delle sponde). Si precisa che il metodo non prevede una valutazione puntuale sullo stato delle opere: quando esse sono presenti all'interno o nelle immediate vicinanze dell'alveo attuale, in assenza di informazioni a riguardo, esse vengono assunte come interferenti con la dinamica morfologica. Esse vengono invece escluse qualora si accerti che non esplicano più la loro funzione di protezione delle sponde o del fondo.
- All. [3] **Indicatori di variazioni morfologiche.** Le variazioni morfologiche durante gli ultimi decenni sono valutate come indicatori di instabilità, pertanto di dinamica morfologica. Tale instabilità infatti può ancora manifestarsi, con la possibilità che, durante eventi di piena di una certa intensità, possano verificarsi delle modifiche morfologiche verso precedenti configurazioni (ad es., rimodellamento di superfici abbandonate per restringimento dell'alveo). **Nel caso specifico, trattandosi di una applicazione semplificata del metodo, la valutazione degli indicatori di tale componente si è basata su quanto osservato in campo e non sulla base di una analisi storica di dettaglio.**

Ogni indicatore viene attribuito, a seconda dei suoi effetti prevalenti, ad una delle due componenti che costituiscono la dinamica morfologica: (1) dinamica verticale; (2) dinamica laterale. La dinamica verticale riguarda tutti gli aspetti connessi con la dinamica morfologica del fondo (erodibilità del fondo, processi di fondo localizzati, tendenze altimetriche, opere di rivestimento o consolidamento, ecc.). La dinamica laterale è invece relativa a tutti gli aspetti connessi con l'arretramento delle sponde e le variazioni di larghezza (erodibilità delle sponde, tendenze di larghezza, difese di sponda, ecc.).

#### 2.4.5.2 Applicazione al caso di studio

Come riportato al paragrafo precedente, la valutazione dell'Indice di Dinamica Morfologica si basa sulla valutazione della morfologia e processi in alveo e nelle sponde, dell'artificialità e delle variazioni morfologiche; ognuna di queste componenti viene valutata attraverso indicatori riportati in Tabella 2.4-2.

Si precisa che nel caso di studio trattato in questa sede, trattandosi di una applicazione semplificata del metodo, la valutazione degli indicatori della componente "variazioni morfologiche" si è basata su quanto osservato in campo e non sulla base di una analisi storica di dettaglio.

Tabella 2.4-2 – Lista degli indicatori per la valutazione dell'IDM

SIGLA	INDICATORE
<b>Morfologia e Processi</b>	
M1	Tipologia d'alveo
M2	Erodibilità delle sponde
M3	Erodibilità del fondo
M4	Processi di arretramento delle sponde
M5	Tendenze di larghezza
M6	Tendenze altimetriche
<b>Artificialità</b>	
A1	Difese di sponda
A2	Opere di rivestimento o consolidamento del fondo
<b>Variazioni morfologiche</b>	
V1	Variazione della configurazione morfologica
V2	Variazioni di larghezza
V3	Variazioni altimetriche

Il risultato dell'applicazione viene riportato in Tabella 2.4-3, precisando che l'applicazione effettuata costituisce un primo tentativo di determinare tale indice e non vuole sostituire alcuna altra applicazione ufficiale svolta in Regione Calabria dagli Enti preposti (ARPA).

*Tabella 2.4-3 – Indice e Classe di Dinamica Morfologica dei corsi d'acqua oggetto di studio. L'applicazione effettuata costituisce un primo tentativo di determinare tale indice e non vuole sostituire alcuna altra applicazione ufficiale svolta in Regione Calabria dagli Enti preposti.*

Codice Bacino	Classe di Dinamica Morfologica				
	Molto bassa	Bassa	Media	Elevata	Molto elevata
Torrente Settimo				Elevata	
Torrente Zio Petruzzo		Bassa			
Torrente Licciardo				Elevata	
Fosso Siviglia			Media		
Torrente Varco Le Chianche				Elevata	

## 2.5 Apporto di sedimenti al tratto di studio

### 2.5.1 Considerazioni generali

Sulla base delle analisi condotte ed illustrate nei paragrafi precedenti è possibile correlare, seppur in maniera qualitativa, le dinamiche di versante e del corso d'acqua (IDM semplificato) con le litologie presenti nel bacino, al fine di valutare la dinamica di trasporto solido dei corsi d'acqua oggetto di studio, come meglio descritto nel seguito al capitolo 3. Il Torrente Settimo ed i bacini costieri sono caratterizzati da una dinamica morfologica elevata e media, dovuta alla presenza di sponde alluvionali e fondo erodibili per buona parte dei tratti in esame. I bacini non sono caratterizzati dalla presenza di dissesti attivi, si può, quindi, ritenere che non vi sia apporto di sedimento ai tratti di studio.

## 2.6 Andamento delle portate liquide (di medio periodo)

La valutazione del trasporto solido di un corso d'acqua richiede particolare attenzione anche nella scelta dei valori di portata liquida da studiare, ai quali associare la corrispondente portata solida. Durante gli eventi di piena vi è sempre una fase di formazione dell'idrogramma in cui la portata cresce



abbastanza rapidamente fino al valore al colmo, tuttavia nei modelli a fondo mobile bisogna considerare che vi sarà trasporto di sedimenti già dall'inizio della fase di crescita dell'idrogramma, con conseguente riassortimento della granulometria rispetto alle condizioni in cui i campioni sono stati prelevati (generalmente durante i periodi di magra, come indicato nel precedente paragrafo 2.4.3). Risulta quindi più opportuno, prima di simulare il trasporto solido al passaggio di un'onda di piena, studiare il comportamento del fiume per le basse portate. Nel presente studio si è deciso di adottare il valore della portata modale con una durata costante pari a 24 ore, valida quest'ultima solamente ai fini delle simulazioni a fondo mobile più avanti descritte. La seguente Tabella 2.6-1 riporta i valori adottati.

*Tabella 2.6-1: Valori di portata media adottati*

<b>ID Bacino</b>	<b>Area del bacino (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Portata modale (m<sup>3</sup>/s)</b>
Torrente Settimo	43,93	20,26
Torrente Zio Petruzzo	2,26	1,82
Torrente Licciardo	2,73	0,04
Fosso Siviglia	0,31	0,03
Torrente Varco Le Chianche	2,08	0,610

### 3. VALUTAZIONE DEL TRASPORTO SOLIDO

#### 3.1 Modelli matematici per il trasporto solido

##### 3.1.1 La teoria di Shields per il moto incipiente

La prima interpretazione del fenomeno di inizio del trasporto al fondo, comunemente noto come *moto incipiente* o condizione critica per il fondo, si deve a Shields (1936), che individuò la relazione tra il valore della tensione al contorno  $\tau_0$  che pone in movimento il materiale di fondo di densità  $\rho_s$  e diametro  $d_s$  e le proprietà del fluido,  $\mu$  e  $\rho$ . Nella formulazione più semplice tale relazione si deduce come segue.

In alveo rettangolare molto largo il raggio idraulico si confonde con la profondità  $h$  e la tensione al fondo  $\tau_0$  si può esprimere come

$$\tau_0 = \rho g h j \quad 3.1$$

Con riferimento alla Figura 3-1, in condizioni critiche la resistenza al moto,  $R$ , dei granuli di diametro  $d_s$  e peso specifico  $\gamma_s$ , uguaglia la forza di trascinamento al fondo all'inizio del trasporto,  $A$ .

$$R \propto (\gamma_s - \gamma) d_s^3 \quad 3.2$$

$$A \propto C_R \tau_{cr} d_s^2 \quad 3.3$$

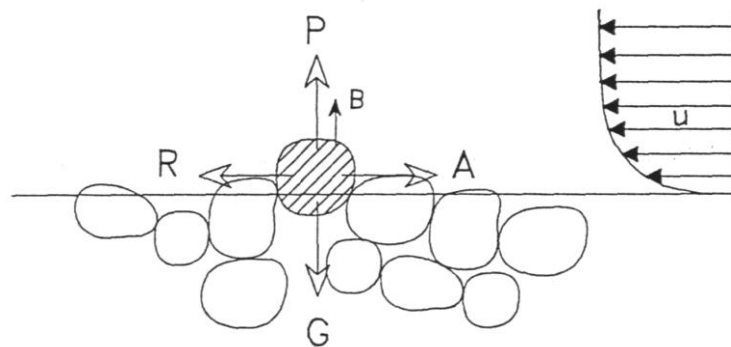


Figura 3-1: Schema delle forze agenti su una particella solida al fondo di un corso d'acqua

Il coefficiente  $C_R$  è funzione, a parità di forma dei sedimenti, del numero di Reynolds del sedimento, costruito con le grandezze caratteristiche del moto attorno al granulo:

- la velocità di attrito  $u_* = \sqrt{\tau_0 / \rho}$
- il diametro del granulo  $d_s$
- la viscosità cinematica del fluido  $\nu = \mu / \rho$

ossia dal numero

$$Re_* = \frac{u_* d_s}{\nu} \quad 3.4$$

Si ha in definitiva

$$\frac{\tau_{cr}}{(\gamma_s - \gamma) d_s} = f\left(\frac{u_* d_s}{\nu}\right) \quad 3.5$$

Il primo membro della (3.5), indicato spesso anche come  $\theta_{cr}$ , prende il nome di *parametro di stabilità* o di mobilità di Shields

$$\theta_{cr} = \frac{u_*^2}{g \frac{\rho_s - \rho}{\rho} d} = \frac{u_*^2}{g \Delta d} = \frac{\tau_{cr}}{g(\rho_s - \rho) d} \quad 3.6$$

Avendo indicato con  $\Delta = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$  la densità relativa del grano immerso.

La dipendenza funzionale da  $Re_*$  di  $\theta_{cr}$  è rappresentata dalla *curva di Shields*.

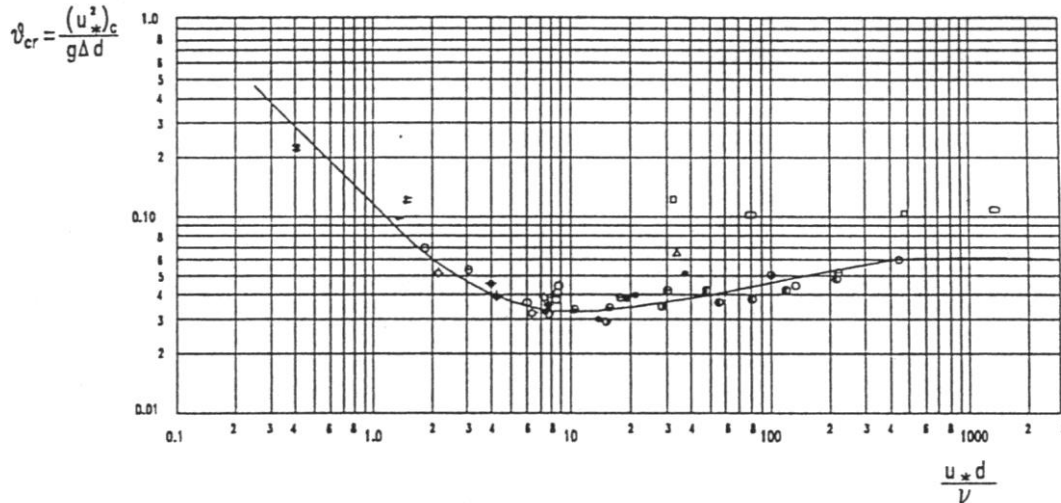


Figura 3-2: Diagramma di Shields

Questa curva separa la zona di mobilità delle particelle da quella di immobilità: per i punti che giacciono sotto la curva, il moto dell'acqua non è in grado di provocare il moto delle particelle ( $\theta \leq \theta_{cr}$ ), i punti che giacciono al di sopra della curva rappresentano invece condizioni di movimento dei sedimenti.

La curva che rappresenta il movimento incipiente delle particelle ( $\theta = \theta_{cr}$ ) può essere divisa in tre parti:

- una prima parte che nel diagramma bilogaritmico ( $Re_* \leq 2$ ) è rappresentata da un segmento di retta;
- una seconda parte ( $2 \leq Re_* \leq 200$ ) ad andamento curvilineo con un valore di minimo relativo;
- una terza zona ( $Re_* \geq 200$ ) nuovamente ad andamento rettilineo.

Il primo tratto è descritto da un'equazione del tipo:

$$\frac{(u_*)_{cr}^2}{g \Delta d} \propto \left[ \frac{(u_*)_{cr} d}{\nu} \right]^{-1} = \frac{\nu}{(u_*)_{cr} d} \quad 3.7$$

cioè:

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>NUOVA LINEA AV SALERNO - REGGIO CALABRIA          RADDOPPIO COSENZA – PAOLA/ S. LUCIDO</b>					
	<b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA</b>					
<b>STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE –          RELAZIONE</b>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RC1C	03 R 09	RG	ID0002 001	A	35 di 62

$$(u_*)_{cr}^3 \propto g \Delta v \quad 3.8$$

Da questa equazione si vede che, nel primo tratto, la velocità critica delle particelle è indipendente dal diametro delle particelle stesse, mentre dipende dalla viscosità del fluido.

Nel tratto intermedio la condizione di mobilità dipende sia dalla dimensione del grano sia dalla viscosità del fluido. In questo tratto inoltre la curva presenta il suo valore minimo  $(\theta_{cr})_{\min} \approx 0.03 \div 0.04$

per  $\frac{u_* d}{\nu} \approx 8 \div 10$ .

Nel terzo tratto, il parametro di mobilità assume valori pressoché costanti:

$$\theta_{cr} = \frac{(u_*)_{cr}^2}{g \Delta d} \approx 0.047 \quad 3.9$$

con 0.047 valore proposto da Zeller. In questo caso le condizioni di mobilità del grano sono indipendenti dalla viscosità del fluido; il regime è simile a quello del moto turbolento in corrispondenza di una parete idraulicamente scabra.

### 3.1.2 L'equazione di Exner

L'equazione di bilancio di massa dei sedimenti si ottiene considerando come volume di controllo un tronco infinitesimo di corrente  $dx$  largo  $B$  ed imponendo che la variazione nel tempo della sua massa di materiale solido sia pari alla differenza tra la portata solida entrante e quella uscente.

Applicando il bilancio della massa dei sedimenti si ottiene:

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + \frac{\partial C \sigma}{\partial t} = -(1-p) \frac{\partial z_f}{\partial t} B \quad 3.10$$

dove  $p$  (compreso tra 0 ed 1) è la porosità del materiale d'alveo, cioè la frazione del volume dei sedimenti riempita dall'acqua;  $C = \frac{\int_A c d\sigma}{\sigma}$  è la concentrazione di volume mediata sulla sezione

trasversale  $\sigma$  ( $c$  è la concentrazione locale);  $Q_s = \int_A u c d\sigma$  è la portata solida;  $z_f$  è la quota del fondo rispetto ad un piano di riferimento.

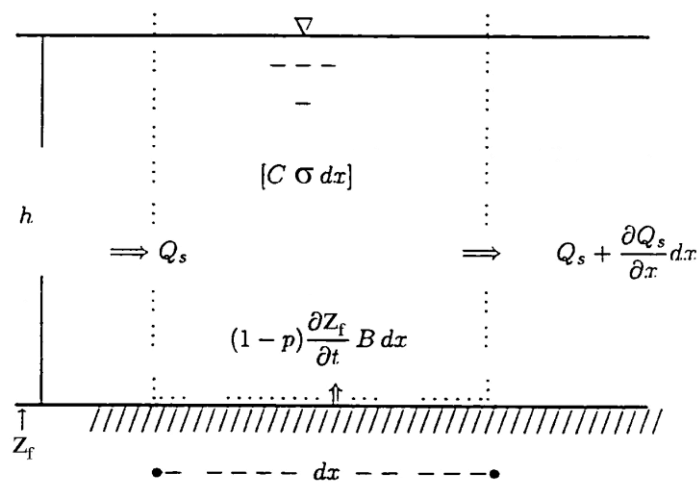


Figura 3-3: Bilancio di massa dei sedimenti nel volume di controllo

Introducendo il *coefficiente di ragguaglio delle concentrazioni*  $\left( \alpha_c = \frac{\sigma \int_{\sigma} c u d\sigma}{\int_{\sigma} u d\sigma \int_{\sigma} c d\sigma} \right)$ , la portata solida può essere espressa in funzione della concentrazione dei sedimenti:

$$Q_s = \alpha_c U \sigma C \quad 3.11$$

Inoltre il termine  $1-p$ , relativo alla porosità del materiale, viene spesso inglobato nella portata solida. L'equazione 3.10 diventa:

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{Q_s}{\alpha_c U} \right) = - \frac{\partial z_f}{\partial t} B \quad 3.12$$

Il secondo termine a primo membro solitamente è trascurabile rispetto al primo: questa ipotesi è tanto più vera quanto maggiore è la portata solida di fondo rispetto a quella in sospensione.

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} = - \frac{\partial z_f}{\partial t} B \quad 3.13$$

La 3.13 è nota come *equazione di Exner*. Essa è di facile interpretazione fisica:

quando $\frac{\partial Q_s}{\partial x} > 0$	$\Rightarrow$	la portata solida aumenta	$\Rightarrow$	$\frac{\partial z_f}{\partial t} < 0$
quando $\frac{\partial Q_s}{\partial x} < 0$	$\Rightarrow$	la portata solida diminuisce	$\Rightarrow$	$\frac{\partial z_f}{\partial t} > 0$

### 3.1.3 Accoppiamento acqua-sedimenti

In condizioni di moto vario la portata solida  $Q_s$  varia nello spazio e nel tempo, quindi nello stesso alveo si possono avere sia zone di sedimentazione sia di erosione.

Utilizzando uno schema monodimensionale, ipotizzando che i grani siano tutti della stessa grandezza e supponendo che le variazioni spaziali delle grandezze considerate siano graduali, si può ottenere un modello che descrive l'evoluzione della corrente e del fondo.

Le variabili dipendenti da considerare sono tre:

- la velocità o la portata;
- il tirante idrico;

- la quota del fondo.

Quindi si ha bisogno di tre equazioni:

- conservazione della massa;
- bilancio della quantità di moto;
- bilancio della portata di materiale solido trasportata sul fondo.

Le equazioni da considerare sono quindi la 3.13 e le equazioni del moto dell'acqua (equazioni di de Saint Venant):

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad 3.14$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{\sigma} \right) + g \sigma \frac{\partial}{\partial x} (h + z_f) = -g \sigma j \quad 3.15$$

dove  $Q$  è la portata liquida,  $h$  il tirante idrico e  $j$  la cadente della linea dell'energia.

Tenendo conto che l'area  $\sigma$  e la larghezza  $B$  possono essere espresse in funzione del tirante idrico, il sistema delle tre equazioni contiene ancora le seguenti variabili indipendenti:  $Q_s$ ,  $C$ ,  $Q$ ,  $h$ ,  $z_f$ ,  $j$ .

Per poter essere risolto, il sistema necessita quindi, oltre che delle condizioni iniziali e al contorno, di altre tre equazioni che sono fornite dall'ipotesi di condizioni di equilibrio locale:

- La cadente della linea dell'energia viene calcolata come se localmente valesse la formula di Chezy per il moto uniforme:

$$j = \frac{U^2}{\chi^2 \mathfrak{R}} \quad 3.16$$

- La portata solida viene calcolata come se localmente essa fosse pari alla capacità di trasporto e quindi attraverso un'opportuna formula di trasporto solido:



$$Q_s = f_s(U, h, u_*, d, \dots) \quad 3.17$$

- o La stessa ipotesi viene fatta per quanto riguarda la concentrazione  $C$  del materiale:

$$C = f_s(U, h, u_*, d, \dots) \quad 3.18$$

Nell'ipotesi semplificativa che la sezione sia di forma rettangolare larga, le equazioni (trascurando il secondo termine nell'equazione 3.15) divengono:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial U h}{\partial x} = 0 \quad 3.19$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{\partial z_f}{\partial x} = -g j \quad 3.20$$

$$\frac{\partial q_s}{\partial x} + \frac{\partial z_f}{\partial t} = 0 \quad 3.21$$

dove  $q_s = Q_s/B$  è la portata solida per unità di larghezza.

Questo modello è valido per sedimenti omogenei. Se il sedimento è assortito si può sempre utilizzare la 3.21 ponendo però  $q_s = \sum_{i=1}^{N_d} f_i q_i$ , dove  $f_i$  rappresenta la frazione, di diametro  $d_i$ , della quantità totale di portata solida in volume trasportata, e le  $q_i$  sono espresse da un'equazione di trasporto solido per materiale uniforme.

### 3.1.4 Formule di Trasporto solido e campo di applicabilità

Il trasporto solido viene valutato in base alla portata solida, espressa ad esempio in kg/s, in termini di quantità di sedimenti movimentati in funzione della corrispondente portata liquida. Le formule che forniscono il valore di portata solida sono di tipo parametrico e, a partire dalla teoria di Shields sul moto incipiente, mettono in relazione le caratteristiche granulometriche con quelle idrodinamiche. Le varie formule disponibili in letteratura sono state sviluppate a partire da esperienze in laboratorio ed in situ,

quindi hanno dei limiti di applicabilità in dipendenza dei risultati ricavati dai vari autori. Il codice di calcolo a fondo mobile utilizzato in questa sede, il cui impiego è descritto nel successivo paragrafo 3.2, consente di scegliere tra alcune delle più note formule, che vengono di seguito presentate. I limiti di applicabilità di ciascuna formula sono sintetizzati nella Tabella 3.1-1, di conseguenza, noto il diametro caratteristico del corso d'acqua oggetto di studio e le relative grandezze idrodinamiche, è possibile scegliere la formula più adatta. Il diametro caratteristico è ricavabile dalle curve granulometriche, mentre le grandezze idrodinamiche sono dedotte dal modello idraulico impiegato a fondo fisso.

Tabella 3.1-1: limiti di applicabilità delle formule di trasporto solido

Autore	d <sub>50</sub> [mm]	pendenza fondo	Froude	Rapporto tra larghezza e tirante B / h	Tirante idrico h [m]
Meyer-Peter e Muller trasporto di fondo	0.4 ÷ 30	4·10 <sup>-4</sup> ÷ 2·10 <sup>-2</sup>			0.01 ÷ 1.2
Toffaletti trasporto totale	0.062 ÷ 16				> 3
Ackers-White trasporto totale	0.04 ÷ 4.9		< 0.8		<0.4
	0.1 ÷ 68		< 0.8	9 ÷ 60	
Yang trasporto di fondo	0.137 ÷ 1.35				0.022 ÷ 0.86

### Formula di Meyer-Peter e Müller (1948)

La formula trovata da Meyer-Peter e Müller nel 1948 è la seguente:

$$q_s = \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \left\{ \frac{(Q_B/Q)(K_B/K_G)^{3/2} h j - 0.047[(\gamma_s - \gamma)/\gamma]d}{(0.25/\gamma)(\gamma/g)^{1/3}} \right\} \frac{1}{\rho_s}$$

con:

$$K_B = \frac{u}{h^{2/3} \sqrt{j}} \quad \text{e} \quad K_G = \frac{26}{d_{90}^{1/6}}$$

Nel caso di sedimenti ben assortiti, Meyer-Peter e Müller suggerirono di utilizzare un singolo diametro per caratterizzare il campione:  $\sum_i d_i P_i / 100 \approx d_{50}$  con  $P_i$  frazione in peso della  $i$ -esima classe granulometrica  $d_i$ .

Nell'equazione sono presenti due fattori di riduzione,  $Q_B/Q$  e  $K_B/K_G$ ; il primo serve per tenere conto del fatto che solo una parte ( $Q_B$ ) della portata totale ( $Q$ ) agisce sul fondo ed è quindi responsabile del movimento del trasporto di fondo; il secondo per tenere conto della presenza della resistenza di formiche riduce lo sforzo di taglio che è disponibile per il trasporto di fondo. Meyer-Peter e Müller assunsero che  $Q_B/Q=1$  per i letti dei fiumi piatti e che  $K_B/K_G=1$  per i canali larghi. Nel caso di dati di laboratorio, si può porre  $Q_B/Q = 1 - h/B$  con  $B$  larghezza del canale. Il diametro nella formula è in m.

### Formula di Toffaleti (1968)

Il metodo di Toffaleti è basato sui concetti di Einstein con tre differenze:

- la distribuzione della velocità sulla verticale è ottenuta da un'espressione diversa da quella usata da Einstein;
- alcuni dei fattori correttivi di Einstein sono modificati e combinati;
- lo spessore della zona di trasporto di fondo è cambiata rispetto a quella di Einstein (due diametri).

Questa formula calcola il trasporto totale.

Toffaleti esprime il parametro di Einstein  $\Psi$  (intensità della corrente) come:

$$\Psi = \frac{T A}{U^2} 10^4 d$$

con  $T$  (dimensioni  $[L/T^2]$ ) parametro che include le costanti e quelle componenti della forza di taglio che sono funzioni della temperatura dell'acqua,  $A$  fattore di correzione adimensionale per sostituire i fattori di correzione di Einstein per i sedimenti non omogenei,  $U$   $[L/T]$  è la velocità media della corrente e  $d$   $[L]$  è il diametro dei granuli.

Egli divide l'altezza della corrente in tre zone:

- la zona inferiore dove la profondità della corrente è minore di  $\mathfrak{R}/11.24$  (con  $\mathfrak{R}$  raggio idraulico);
- la zona intermedia con profondità compresa tra  $\mathfrak{R}/2.5$  e  $\mathfrak{R}/11.25$ ;
- la zona superiore dove la profondità è inferiore a  $\mathfrak{R}/2.5$ .

Toffaletti inoltre stabilisce che  $L_F$  o trasporto del nucleo espresso in U.S. tons/giorno per 1 piede di larghezza nella zona inferiore (assumendo che il fondo sia composto interamente da una sola granulometria di sabbia), può essere rappresentato da:

$$L_F = \frac{0.06}{\left(\frac{TA}{U^2}\right)^{5/3} \left(\frac{d}{0.00058}\right)^{5/3}}$$

che per la sabbia molto fine ( $d < 1$  mm) diventa:

$$L_F = \frac{1.905}{\left(\frac{TA}{U^2}\right)^{5/3}}$$

La distribuzione della concentrazione dei sedimenti è espressa da:

$$C_y = C_a \left(\frac{y}{\mathfrak{R}}\right)^z$$

nella quale  $C_y$  è la concentrazione dei sedimenti alla quota  $y$  dal fondo e  $C_a$  è la concentrazione alla quota  $a$ .

Per la zona centrale:

$$z = \frac{U w_s}{C_z j \mathfrak{R}}$$

nella quale  $w_s$  è la velocità di sedimentazione della particella in piedi/s e  $C_z$  è un fattore correttivo per la temperatura che vale  $260.67 - 0.667T$  (con  $T$  in °F). L'esponente  $z$  della distribuzione della

concentrazione dei sedimenti nella zona inferiore ed in quella superiore sono, rispettivamente, 0.756 e 1.5 volte quello della zona centrale.

Dopo aver determinato  $L_F$  e la distribuzione della concentrazione dei sedimenti nella zona inferiore, si può procedere col determinare la concentrazione al bordo superiore di questa zona, poi calcolare la distribuzione ed il trasporto totale dei sedimenti nella zona centrale ed infine ottenere il trasporto totale di sedimenti nella zona superiore. La somma del trasporto totale di sedimenti nelle tre zone è il trasporto totale riferito all'intera altezza della sezione.

### Formula di Ackers-White (1973)

Ackers e White postularono che solo una parte dello sforzo di taglio agente sul letto del fiume causa il movimento dei sedimenti grossolani, mentre nel caso di quelli fini predomina il trasporto in sospensione per il quale l'intero sforzo di taglio causa il movimento.

Questa formula valuta il trasporto totale, considerato come la somma del trasporto di fondo e di quello in sospensione.

La portata solida in volume  $q_s$  ha come unità di misura il  $m^3/(m\ s)$ , ed esprime il volume del sedimento trasportato per ogni secondo per l'unità di larghezza dell'alveo.

La formula è la seguente:

$$q_s = G_{gr} g u \left( \frac{u}{u_*} \right)^n d_{gr}$$

con  $u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \sqrt{g h i}$  velocità di attrito e con i parametri adimensionali  $G_{gr}$  (trasporto dei sedimenti),  $F_{gr}$  (mobilità delle particelle) e  $d_{gr}$  (granulometria):

$$G_{gr} = C \left( \frac{F_{gr}}{A} - 1 \right)^m$$

$$F_{gr} = \frac{u_*^n}{[gd(\gamma_s - 1)]^{1/2}} \left[ \frac{u}{5.66 \log(10 D/d)} \right]^{(1-n)}$$

$$d_{gr} = d \left[ g(\gamma_s - 1) / \nu^2 \right]^{1/3}$$

I quattro parametri  $n$ ,  $A$ ,  $m$  e  $C$  sono stati ricavati in base agli esperimenti:

per  $1 \leq d_{gr} \leq 60$

$$n = 1 - 0.5 \log d_{gr}$$

$$A = \left( \frac{0.23}{d_{gr}^{1/2}} \right) + 0.14$$

$$m = \left( \frac{9.66}{d_{gr}} \right) + 1.34$$

$$C = 10^{[2.86 \log d_{gr} - (\log d_{gr})^2 - 3.53]}$$

per  $d_{gr} > 60$

$$n = 0.0$$

$$A = 0.170$$

$$m = 1.50$$

$$C = 0.025$$

Nella formula  $d$  è espresso in metri.

### Formula di Yang (1973)

Questa formula considera il fiume come una macchina: il lavoro necessario per mantenere il trasporto dei sedimenti è pari al prodotto della forza per la velocità.

Il trasporto di fondo è dato da:

$$\rho_s \left( \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) q_f \tan \alpha = \omega e_f$$

con  $\tan \alpha$  coefficiente di attrito dinamico,  $q_f$  trasporto di fondo pari alla massa per la velocità della particella sul fondo,  $e_f$  efficienza della potenza (approssimativamente 0.15) e  $\omega = \tau_0 u$  potenza della corrente.

Il trasporto in sospensione è dato da:

$$\rho_s \left( \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) q_{ss} \frac{w_s}{u_s} = \omega e_s (1 - e_f)$$

con  $q_s$  trasporto in sospensione pari alla massa per la velocità della particella in sospensione, che può approssimarsi con quella della corrente  $u$ ,  $w_s$  velocità di sedimentazione,  $e_s$  efficienza della potenza pari a 0.015 ed il rapporto  $w_s/u_s$  equivalente al coefficiente di attrito dinamico.

Il trasporto totale in  $[m^3/(m s)]$  è dato dalla somma dei due termini precedenti:

$$q_s = q_f + q_{ss} = \omega \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \left( \frac{e_f}{\tan \alpha} + 0.01 \frac{u_s}{w_s} \right) \frac{1}{\rho_s}$$

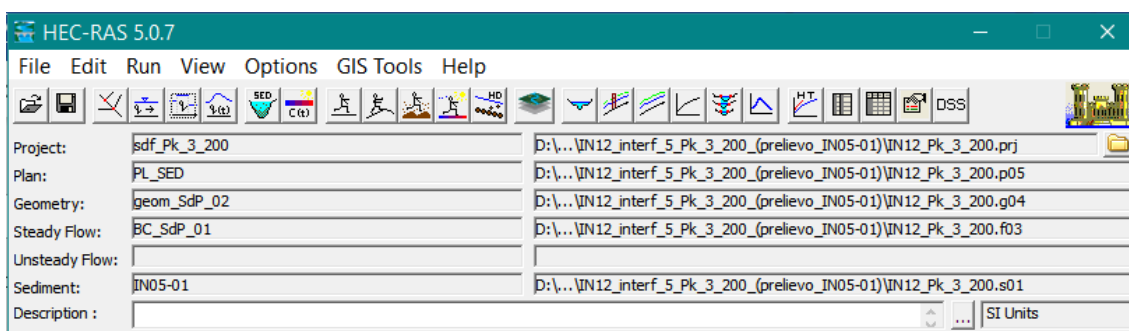
 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>NUOVA LINEA AV SALERNO - REGGIO CALABRIA          RADDOPPIO COSENZA – PAOLA/ S. LUCIDO</b>					
	<b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA</b>					
<b>STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE –          RELAZIONE</b>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RC1C	03 R 09	RG	ID0002 001	A	46 di 62

## 3.2 Modello di calcolo idraulico a fondo mobile

### 3.2.1 HEC-RAS, modulo per il trasporto dei sedimenti

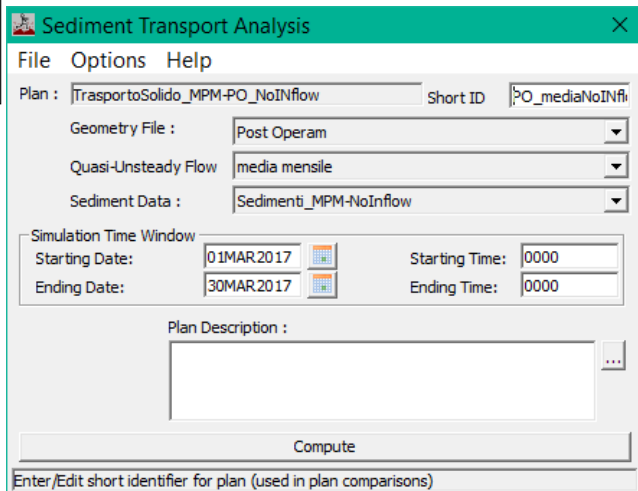
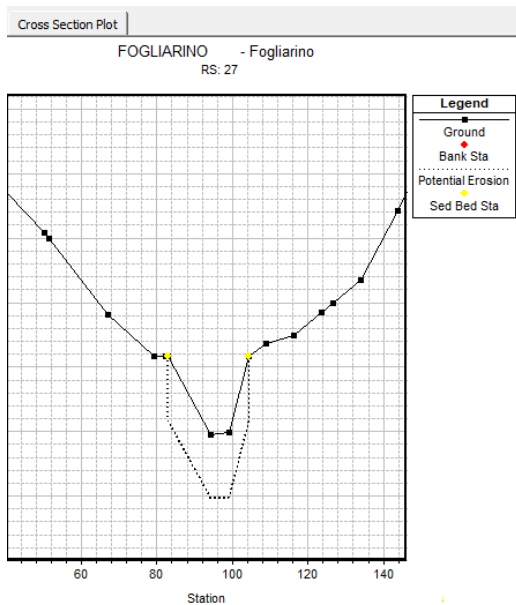
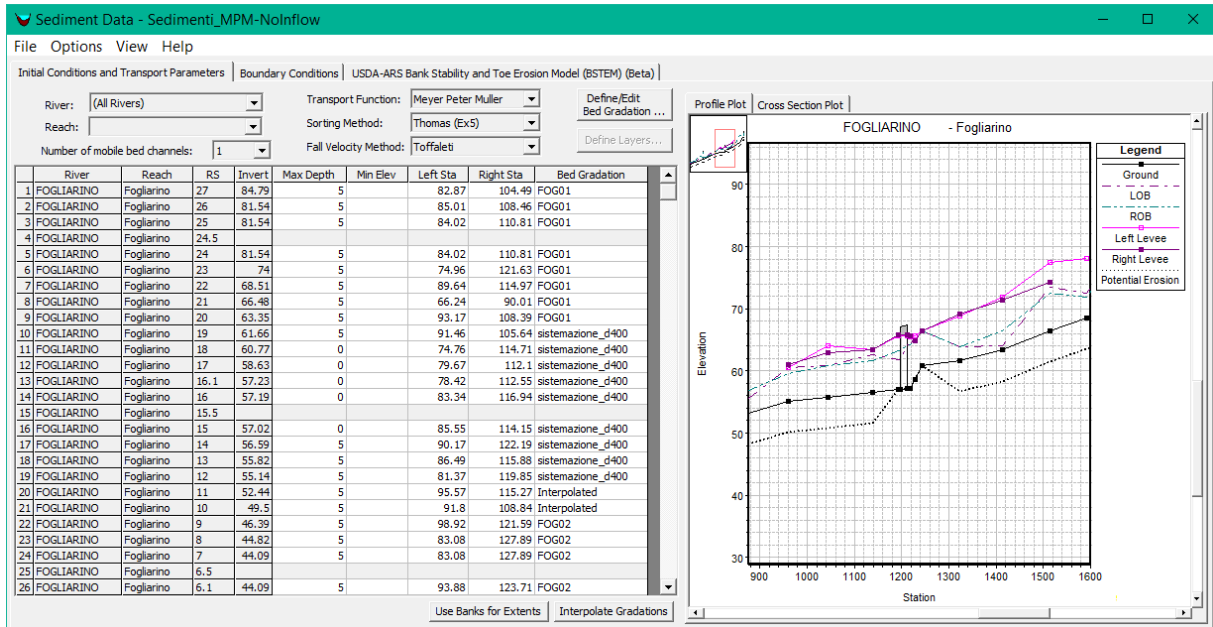
#### 3.2.1.1 Cenni generali

HEC-RAS<sup>1</sup> è un noto codice di calcolo per il moto di correnti idriche in simulazione monodimensionale di una rete di canali naturali e/o artificiali, messo a punto dal Corpo degli Ingegneri dell'Esercito Americano. La versione 4.0.x del codice ha incluso la possibilità di svolgere analisi sul trasporto di sedimenti, basate sulla metodologia già in uso nel vecchio codice HEC-6<sup>2</sup> e disponibili anche nella versione 5.0.7 del marzo 2019 utilizzata nel presente studio.



1 HEC-RAS, Hydrologic Engineering Center – River Analysis System, US Army Corps of Engineers  
 2 HEC-6 “Scour and deposition in Rivers and Reservoirs” (HEC 1991)





### 3.2.1.2 Funzionamento del programma

Il modulo per il trasporto dei sedimenti è stato creato per simulare e predire i cambiamenti nei profili dei fiumi derivanti dall'erosione e/o dalla deposizione.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>NUOVA LINEA AV SALERNO - REGGIO CALABRIA          RADDOPPIO COSENZA – PAOLA/ S. LUCIDO</b>					
	<b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA</b>					
<b>STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE –          RELAZIONE</b>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RC1C	03 R 09	RG	ID0002 001	A	48 di 62

L'idrogramma viene suddiviso in una serie di moti stazionari di portate e durate variabili. Per ogni passo è calcolato il profilo della superficie dell'acqua e da questo si ricava la pendenza piezometrica, la velocità, la profondità in ogni sezione. Da questi viene poi calcolato, per ogni sezione e per ogni classe granulometrica, il trasporto potenziale di sedimenti, che combinato con la durata della corrente, permette di ricavare il trasporto dei sedimenti associato ad ogni portata.

Il trasporto dei sedimenti è calcolato per ogni portata e per ogni classe granulometrica in questo modo:

- calcolo del trasporto potenziale per ogni classe granulometrica presente nel letto del fiume come se essa costituisse la totalità dei sedimenti presenti;
- il trasporto potenziale così ottenuto, viene poi moltiplicato per la frazione di quella stessa classe realmente presente in quel passo temporale; in questo modo si determina la capacità di trasporto per questa granulometria.

Le percentuali delle diverse classi granulometriche presenti sul fondo, possono cambiare significativamente durante il passo temporale; quindi si utilizzano delle iterazioni per poter prendere in considerazione questi cambiamenti; il numero delle iterazioni all'interno del passo temporale può essere fissato dall'utilizzatore.

L'equazione di continuità dei sedimenti deve essere applicata su un volume di controllo, che va da metà della distanza fra la sezione a monte di quella attuale a metà della distanza da quella a valle. La larghezza di questo volume di controllo generalmente coincide con quella del letto mobile, e la sua profondità va dalla superficie libera fino al terreno non erodibile (strato di roccia).

Il programma utilizza come equazione di continuità quella di Exner:

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + B_0 \frac{\partial Y_s}{\partial t} = 0 \quad 3.1$$

con  $Q_s$  portata media dei sedimenti (in  $m^3/s$ ) durante l'intervallo  $\Delta t$ .

Questa equazione può essere espressa in termini di differenze finite:

$$\frac{Q_{sd} - Q_{su}}{0.5(L_d - L_d)} + \frac{B_{0p} (Y'_{sp} - Y_{sp})}{\Delta t} = 0 \quad 3.2$$

con:

$B_{0p}$	larghezza del letto mobile al punto P;
$Q_{su}$	carichi di sedimenti alla sezione di monte;
$Q_{sd}$	carichi di sedimenti alla sezione di valle;
$L_u$	lunghezza del tratto di monte tra le sezioni;
$L_d$	lunghezza del tratto di valle tra le sezioni;
$Y_{sp}$	profondità dei sedimenti all'inizio dello step nel punto P;
$Y'_{sp}$	profondità dei sedimenti alla fine dello step nel punto P;
$\Delta t$	Passo temporale

Si rimanda al manuale ed alla documentazione di riferimento di HEC-RAS per una trattazione completa delle assunzioni teoriche circa il calcolo numerico del trasporto di sedimenti.

### **3.2.2 Schematizzazione idraulica adottata**

#### **3.2.2.1 Geometria del modello**

La geometria del modello di calcolo a fondo mobile è costruita a partire dai rilievi topografici appositamente eseguiti per il Progetto in esame. Ricordiamo che la geometria del modello di calcolo è costituita dalle sezioni trasversali, dalle opere eventualmente presenti e dalle caratteristiche idrauliche delle sezioni stesse. L'ubicazione delle sezioni di studio è riportata nelle tavole RC1C03R09G5ID0002001A e RC1C03R09G5ID0002002A.

#### **3.2.2.2 Scabrezza idraulica**

I valori di scabrezza adottati sono riportati nella seguente tabella.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>NUOVA LINEA AV SALERNO - REGGIO CALABRIA          RADDOPPIO COSENZA – PAOLA/ S. LUCIDO</b>					
	<b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA</b>					
<b>STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE –          RELAZIONE</b>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RC1C	03 R 09	RG	ID0002 001	A	50 di 62

Tabella 3.2-1: valori di scabrezza adottati

golena sinistra	canale principale	golena destra
0,05	0,03	0,05

La scabrezza idraulica può anche variare in base alla dinamica del trasporto solido, in quanto i sedimenti in movimento offrono una minore resistenza al moto dell'acqua (USACE-HEC, 1982). È quindi possibile far calcolare al codice di calcolo il valore della cosiddetta "scabrezza di grano", scegliendo tra le formulazioni proposte da Limerinos (1970), Brownlie (1983) e Van Rijn (1984).

### 3.2.2.3 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno nel modello a fondo mobile riguardano sia la componente acqua, sia quella sedimenti e sono sinteticamente descritte di seguito.

#### **Portate simulate**

Le portate simulate per la valutazione delle tendenze evolutive dell'alveo sono quelle modali, ricavate come illustrato nel precedente paragrafo 2.6 e riportate nella seguente Tabella 3.2-2. Nel codice di calcolo il valore di portata costante della durata complessiva di 24 ore è stato suddiviso in incrementi computazionali di durata pari a 1 ora.

Tabella 3.2-2: valori di portata modale simulati

ID Bacino	Portata modale (m <sup>3</sup> /s)
Torrente Settimo	20,26
Torrente Zio Petruzzo	1,82
Torrente Licciardo	0,04
Fosso Siviglia	0,03

ID Bacino	Portata modale (m <sup>3</sup> /s)
Torrente Varco Le Chianche	0,610

### Livello idrico di valle

Il livello idrico di valle deve essere assegnato per ogni intervallo temporale con cui viene discretizzato l'idrogramma di calcolo e può essere calcolato dal programma assegnando la scala di deflusso della sezione di valle. Nel caso di portata costante per tutta la durata della simulazione, è sufficiente fornire un unico valore di livello idrico, che è stato posto pari all'altezza di moto uniforme.

### Carico solido entrante

La condizione al contorno relativa ai sedimenti riguarda l'apporto di materiale solido al tratto di studio. Nel caso in esame, in base alle informazioni ricavate dalla caratterizzazione geomorfologica del bacino, è stato possibile valutare in via preliminare se il carico entrante da monte nel modello di calcolo è significativo ai fini delle valutazioni sulla tendenza evolutiva. Se la sezione di monte del modello è sufficientemente lontana dal tratto di interesse<sup>3</sup>, si può anche assumere un carico entrante nullo, in modo che siano proprio le prime sezioni di monte a costituire un serbatoio di sedimenti per il modello a fondo mobile. Qualora, però, ci si trovi in condizioni di forte apporto solido dai versanti (in caso di fenomeni franosi attivi, ad esempio), è necessario stimare tale apporto ed introdurlo come condizione al contorno. In alternativa, è anche possibile estrarre dai risultati del codice di calcolo il carico solido uscente dalla sezione di valle e inserirlo come carico entrante in una successiva simulazione. Questa procedura richiede di simulare più valori di portata.

Il codice di calcolo è anche in grado di determinare automaticamente il carico di equilibrio, che corrisponde alla capacità di trasporto per quella sezione in ogni passo temporale e per ogni classe granulometrica. Per i casi in esame è stata adottata la condizione di *carico entrante nullo*.

<sup>3</sup> La valutazione della tendenza evolutiva riguarda principalmente, in questa sede, il tratto interessato dall'attraversamento in progetto.

### 3.2.2.4 Limiti del fondo erodibile

La caratteristica principale del modello a fondo mobile è proprio rappresentata dai limiti della porzione erodibile delle sezioni. È possibile indicare le coordinate dei nodi di ogni sezione che possono essere alzati o abbassati in funzione dell'erosione o della deposizione calcolata, nonché la massima profondità di erosione.

Nel caso in esame sono state individuate in via preliminare le seguenti condizioni:

- limiti del fondo mobile in ogni sezione coincidenti con i limiti del canale principale;
- massima profondità di erosione pari a 5 m (10 m per il T. Settimo).

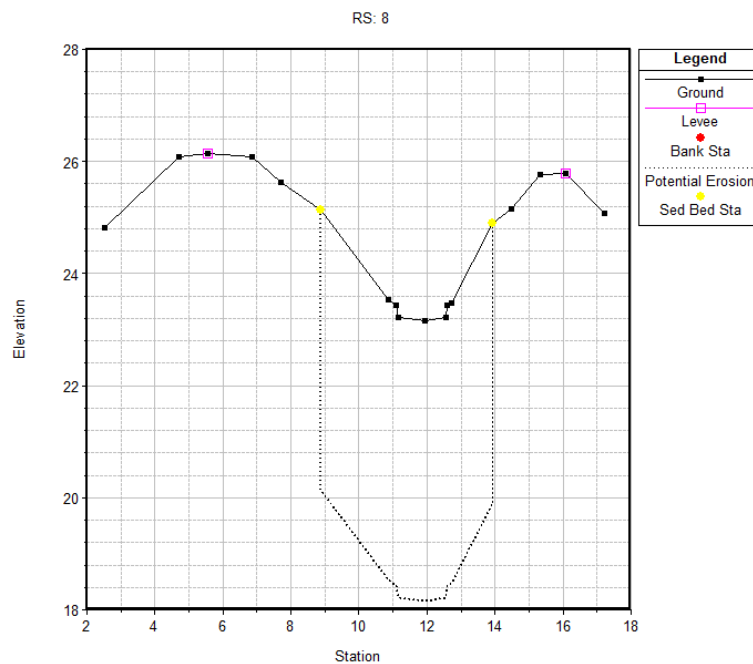


Figura 3-4: esempio dell'inserimento dei limiti del fondo mobile coincidenti con i limiti del canale principale

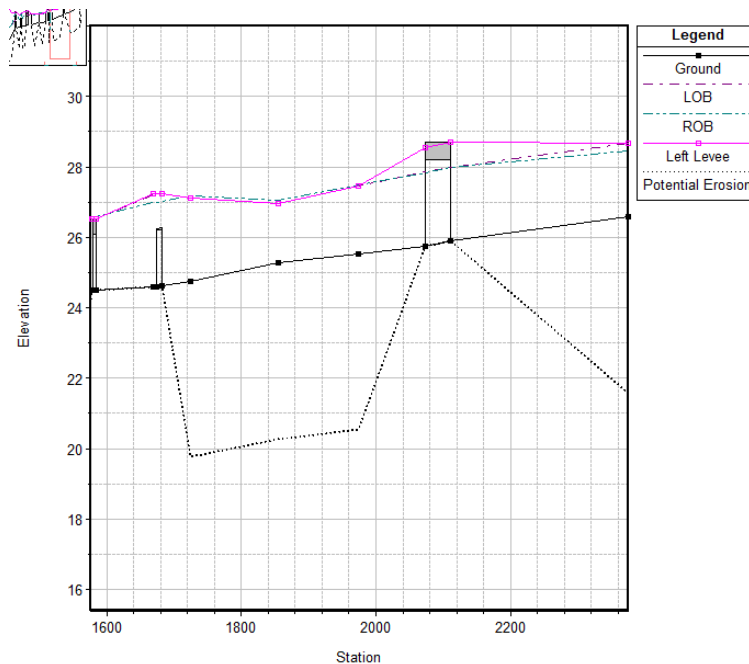


Figura 3-5: esempio dell'inserimento della massima profondità erodibile

### 3.2.2.5 Caratteristiche del cambiamento del fondo alveo

La morfologia del corso d'acqua in esame può essere tale da giustificare una mobilità del fondo alveo uniforme lungo la verticale, il che corrisponde all'opzione di default del codice di calcolo che non prevede erosione né deposizione al di fuori dei limiti del fondo mobile. Tuttavia, è possibile selezionare l'opzione corrispondente alla *deposizione al di fuori del fondo mobile*, qualora siano da attendersi livelli idrici superiori alla quota dei limiti del fondo erodibile.

### 3.2.2.6 Formula di trasporto solido

La scelta della formula di trasporto solido da adottare per i casi in esame, condotta secondo quanto indicato nel precedente paragrafo 3.1.4, ha portato ad individuare quella di Ackers&White come la più adatta in base alle granulometrie rilevate.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>NUOVA LINEA AV SALERNO - REGGIO CALABRIA          RADDOPPIO COSENZA – PAOLA/ S. LUCIDO</b>					
	<b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA</b>					
<b>STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE –          RELAZIONE</b>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RC1C	03 R 09	RG	ID0002 001	A	54 di 62

### 3.2.2.7 Caratterizzazione del mescolamento del fondo alveo

Le formule di trasporto solido calcolano il trasporto potenziale senza considerare la reale disponibilità di materiale solido movimentabile, la quale dipende dalle caratteristiche granulometriche che influenzano il fenomeno del rimescolamento del fondo con conseguente possibile corazzamento dello stesso (*armoring*). Il codice di calcolo consente quindi di selezionare l'opzione più adatta per rappresentare questo fenomeno e nei casi in esame è stata adottata in prima approssimazione quella di default, che corrisponde al cosiddetto metodo "Exner 5" in cui si considera un modello di fondo alveo a tre strati in cui si forma uno strato corazzato che limita lo scambio di materiale dagli altri due strati.

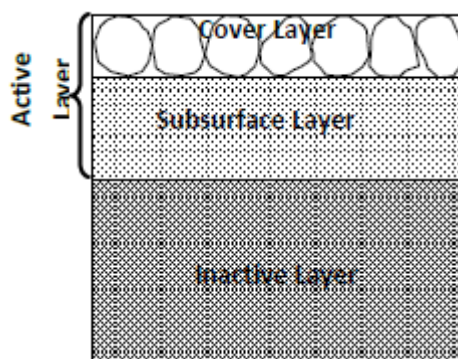


Figura 3-6: schema del metodo di mescolamento del fondo alveo

### 3.2.2.8 Granulometria del fondo alveo

La granulometria dei sedimenti di cui è costituito il fondo alveo viene rappresentata con le curve granulometriche dei campioni assunti come rappresentativi del materiale d'alveo. Poiché nel codice di calcolo è possibile associare una sola curva granulometrica per ogni sezione, la scelta del punto di prelievo è di fondamentale importanza affinché esso sia rappresentativo dell'intera variabilità granulometrica osservata, tenendo anche conto che lo studio condotto in questa sede volge l'attenzione ai fenomeni di medio periodo, quindi i campioni devono essere rappresentativi di ciò che si può mobilitare durante tali eventi.

L'ubicazione dei punti di prelievo è riportata nelle Tavole RC1C03R09G5ID0002001A e RC1C03R09G5ID0002002A e le relative curve granulometriche sono



 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>NUOVA LINEA AV SALERNO - REGGIO CALABRIA          RADDOPPIO COSENZA – PAOLA/ S. LUCIDO</b>					
	<b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA</b>					
<b>STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE –          RELAZIONE</b>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RC1C	03 R 09	RG	ID0002 001	A	55 di 62

state associate ai tratti di studio per i quali si è osservato che le caratteristiche morfologiche sono uniformi.

### 3.3 Modalità evolutive dell'alveo

#### 3.3.1 *Tendenza all'erosione e alla deposizione*

Le modalità evolutive dell'alveo dei corsi d'acqua oggetto di studio, per il tratto in esame in questa sede, vengono sinteticamente valutate in base alla possibile tendenza all'erosione o alla deposizione, stimata a sua volta mediante l'applicazione del modello idraulico a fondo mobile descritto nel precedente paragrafo 3.2.

I risultati delle simulazioni sono riportati nelle figure seguenti, che rappresentano il profilo del fondo alveo al termine del periodo di simulazione (24 ore a portata costante, pari alla portata modale), in confronto con il profilo di fondo alveo ad inizio simulazione. La seguente Tabella 3.3-1 riporta in sintesi le condizioni di simulazione ed i risultati ottenuti in termini di tendenza all'erosione o alla deposizione.

Tabella 3.3-1: *Stima della tendenza evolutiva*

<b>Codice bacino / WBS</b>	<b>Portata modale (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Apporto di sedimenti</b>	<b>Tendenza evolutiva</b>
Torrente Settimo	20,26	nullo	erosione
Torrente Zio Petruzzo	1,82	nullo	deposizione
Torrente Licciardo	0,04	nullo	deposizione
Fosso Siviglia	0,03	nullo	deposizione
Torrente Varco Le Chianche	0,610	nullo	deposizione

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>NUOVA LINEA AV SALERNO - REGGIO CALABRIA          RADDOPPIO COSENZA – PAOLA/ S. LUCIDO</b>					
	<b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA</b>					
<b>STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE –          RELAZIONE</b>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RC1C	03 R 09	RG	ID0002 001	A	56 di 62

## 4. CONCLUSIONI

### 4.1 Analisi del rapporto con l'opera in progetto

La valutazione della tendenza all'erosione o alla deposizione, oppure la condizione di stabilità dell'alveo, consente di analizzare il rapporto delle opere di attraversamento in progetto con le dinamiche fluviali studiate in questa sede.

Le simulazioni di calcolo idraulico a fondo mobile hanno consentito di simulare anche gli interventi di sistemazione idraulica connessi alle opere in progetto, rendendo possibile il confronto con la condizione ante operam, fornendo di conseguenza un'utilissima indicazione per verificare che le modalità evolutive dei corsi d'acqua di interesse non interferiscano con la sicurezza dell'opera e, al contempo, che gli interventi in progetto non alterino significativamente tali modalità, in modo da non causare al territorio problemi connessi con le dinamiche morfologiche.

L'insieme delle valutazioni effettuate sulla dinamica morfologica dei corsi d'acqua (IDM) e le applicazioni modellistiche (HEC-RAS) hanno quindi avuto come obiettivo principale quello di fornire una prima indicazione sul livello di attenzione che si dovrebbe applicare ai fini della manutenzione delle opere di attraversamento in progetto.

Incrociando i dati relativi all'Indice di Dinamica Morfologica con i risultati sulla tendenza evolutiva del corso d'acqua, ricavata dalle applicazioni modellistiche, è possibile definire **un probabile Livello di Attenzione per manutenzione programmata (LAm)**, così come riportato in Tabella 4.1-1.

Ad ogni valore di *LAm* è possibile associare una indicazione di "frequenza suggerita" per ispezioni manutentive (Tabella 4.1-2), finalizzate a:

- verifica del mantenimento della luce libera di progetto
- contestuale esame del bilancio di sedimenti, con gestione da concordare con gli Enti preposti (Regione, ARPA, Provincia, Comune e Genio Civile).

La frequenza suggerita per le ispezioni manutentive è basata sulla stagionalità delle portate simulate e sulla periodicità del ciclo idrologico da cui sono stati ricavati i valori medi mensili.

La sintesi di queste valutazioni è riportata negli elaborati che costituiscono la "Carta di sintesi dello studio geomorfologico" del presente progetto.

Tabella 4.1-1 – Valori dell'indice LAm = Livello di Attenzione per interventi di manutenzione programmata

IDM	Tendenza evolutiva (risultati modellazione HecRas)		
	<i>stabilità</i>	<i>erosione</i>	<i>deposizione</i>
<i>bassa</i>	LAm basso	LAm basso	LAm medio
<i>media</i>	LAm basso	LAm medio	LAm alto
<i>alta</i>	LAm medio	LAm alto	LAm alto

Tabella 4.1-2 – Valori dell'indice LAm = Livello di Attenzione per interventi di manutenzione programmata

	<i>frequenza suggerita per le ispezioni manutentive</i>
LAm basso	ogni 2-3 anni
LAm medio	ogni 1,5-2 anni
LAm alto	ogni 6-9 mesi

Tabella 4.1-3: Livello di Attenzione per interventi di manutenzione programmata per i corsi d'acqua in esame

Codice bacino / WBS	Portata modale (m <sup>3</sup> /s)	Apporto di sedimenti	Tendenza evolutiva	Indice di Dinamica Morfologica IDM	Livello di attenzione per manutenzione LAm
Torrente Settimo	20,26	nullo	erosione	Alta	alto
Torrente Zio Petruzzo	1,82	nullo	deposizione	Bassa	medio
Torrente Licciardo	0,04	nullo	deposizione	Alta	alto
Fosso Siviglia	0,03	nullo	deposizione	Media	alto
Torrente Varco Le Chianche	0,610	nullo	deposizione	Alta	alto

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>NUOVA LINEA AV SALERNO - REGGIO CALABRIA          RADDOPPIO COSENZA – PAOLA/ S. LUCIDO</b>					
	<b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA</b>					
<b>STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE –          RELAZIONE</b>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RC1C	03 R 09	RG	ID0002 001	A	59 di 62

## 5. Riferimenti bibliografici

- Armanini A. – *Sistemazione dei bacini idrografici*, Università degli Studi di Trento
- Armanini A. – *Principi di Idraulica fluviale*, ed. BIOS
- Branca S., Coltelli M., Groppelli G. & Pasquarè G. (2009) - *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000. Foglio 625 Acireale*. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale.
- Brunner, Gary W. (2016), HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual
- Brunner, Gary W. (2016), HEC-RAS, River Analysis System User's Manual
- Bull W.B. (1964a). *Geomorphology of segmented alluvial fans in western Fresno County, California*. United States Geological Professional Paper 352E,128.
- Castiglioni G. B. – *Geomorfologia*, ed. UTET
- Catalano S., De Guidi G. (2003) – *Late Quaternary uplift of northeastern Sicily: relation with the active normal faulting deformation*. Journal of Geodynamics, **36**, 445-467.
- Ceriani, M., Crosta, G., Frattini, P., & Quattrini, S. (2000). *Evaluation of hydrogeological hazard on alluvial fans*. In International Symposium INTERPRAEVENT 2000, pp.213-225.
- De Scally F.A. & Owens I.F. (2004). *Morphometric controls and Geomorphic responses on fans in the Southern Alps, New Zealand*. Earth Surface Processes and Landforms, **29**,311– 322.
- Drew F. (1873). *Alluvial and lacustrine deposits and glacial records of the Upper Indus Basin*: Geological Society of London Quarterly Journal, **29**, 441-471.
- Garde R. J. – Ranga Raju K. G. – *Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems*, ed. WILEY EASTERN LTD
- Graf W. H. – *Fluvial Hydraulics* – LRH Lausanne
- Graf W. H. – *Hydraulics of Sediment Transport*, ed. MCGRAW-HILL
- Guzzetti F., Carrara A., Cardinali M., Reichenbach P. (1999). *Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy*. Geomorphology **31**, 181-216.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>NUOVA LINEA AV SALERNO - REGGIO CALABRIA          RADDOPPIO COSENZA – PAOLA/ S. LUCIDO</b>					
	<b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA</b>					
<b>STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE –          RELAZIONE</b>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RC1C	03 R 09	RG	ID0002 001	A	60 di 62

Harvey AM. (1997). *The role of alluvial fans in arid zone fluvial-systems*. In: Thomas D.S.G. (ed), *Arid Zone Geomorphology: Process, Form and Change in Drylands*. Wiley & Sons: Chichester, 231–259.

HEC– *River Hydraulics*, USACE

HEC – *Sediment Transport Mechanics*, USACE

Hooke R. LeB. (1968). *Steady-state relationships of arid-region alluvial fans in closed basins*. *American Journal of Science*, **266**, 609-629.

Marchi L., Pasuto A., Tecca P.R. (1993). *Flow processes on alluvial fans in the Eastern Italian Alps*. *Z. Geomorph.* **4**, 447-458.

Marchi L. & Tecca P.R. (1996). *Magnitudo delle colate detritiche nelle Alpi Orientali italiane*. *GEAM*, **33** (2-3), p. 79-86.

Melton M.A.(1965). *The geomorphic and paleoclimatic significance of alluvial deposits in southern Arizona*. *Journal of Geology*, **73**, 1-38.

Ricci Lucchi F. – *Sedimentologia*, ed. CLUEB

Rinaldi M., Surian N., Comiti F., Bussettini M. (2016): *IDRAIM – Sistema di valutazione idromorfologica, analisi e monitoraggio dei corsi d'acqua – ISPRA – Manuali e Linee Guida 131/2016*. Roma

Marchi E. – Rubatta A. – *Meccanica dei fluidi*, ed. UTET

Moisello U. – *Idrologia tecnica*, ed. LA GOLIARDICA PAVESE

Varnes D.J. (1978) – *Slope movement types and processes*. Special Report 176, National Academy of Sciences, Washington.