



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E FORESTALI

Dottorato di ricerca in Scienze Agrarie, Forestali e Ambientali

*Curriculum:* Tutela del Territorio e Valorizzazione delle Produzioni AgroAlimentari  
SSD AGR/08

**STUDIO SPERIMENTALE SULLE RESISTENZE  
AL MOTO DI CORRENTI NEI RILL**

IL DOTTORE  
VINCENZO PALMERI

IL COORDINATORE DEL DOTTORATO  
CHIAMO PROF. VINCENZO BAGARELLO

IL TUTOR  
PROF.SSA COSTANZA DI STEFANO

IL CO TUTOR  
ING. VINCENZO PAMPALONE

CICLO XXX- ANNO CONSEGUIMENTO TITOLO 2018

DOTTORATO



*“Palermo non mi piaceva, per questo  
ho imparato ad amarla. Perché il  
vero amore consiste nell'amare ciò  
che non ci piace per poterlo  
cambiare.”*

**PAOLO BORSELLINO**

## INDICE

<b>SOMMARIO ESTESO</b>	<b>i</b>
<b>1. GENERALITÀ</b>	<b>1</b>
<b>2. LA COMPUTER VISION E L'APPROCCIO SFM</b>	<b>14</b>
2.1. Introduzione	14
2.2. La campagna fotografica	17
2.3. Applicazioni della tecnica SfM per la misura dell'erosione canalizzata	19
<b>3. LEGGE DI RESISTENZA AL MOTO PER LE CORRENTI NEI RILL</b>	<b>25</b>
3.1. Generalità	25
3.2. Determinazione teorica del profilo di velocità e della legge di resistenza al moto	31
<b>4. MATERIALI E METODI</b>	<b>35</b>
4.1. ISTALLAZIONE SPERIMENTALE	35
4.2. Rilievo e misura dei rill	36
4.3. Misura delle caratteristiche idrauliche della corrente	37
<b>5. RISULTATI</b>	<b>42</b>
5.1 <i>Grain-resistance</i>	42
5.2 <i>Morphological (step-pool)-resistance</i>	47
<b>6. CONCLUSIONI</b>	<b>53</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>55</b>
<b>RINGRAZIAMENTI</b>	<b>68</b>

## SOMMARIO ESTESO

La perdita di suolo dovuta all'erosione è un fenomeno naturale e inevitabile, ma può assumere caratteri parossistici, e quindi divenire intollerabile, in situazioni particolari e soprattutto a causa di fattori antropici (Di Stefano e Ferro, 2016).

L'erosione idrica genera, oltre alla riduzione dello spessore del suolo utile per le radici delle piante, la diminuzione negli orizzonti superficiali della quantità di sostanza organica, di argilla e di nutrienti. Inoltre, provoca l'inquinamento delle acque e fenomeni di interrimento dei serbatoi dovuti al trasporto solido della corrente idrica.

Allo stato attuale delle conoscenze è ampiamente riconosciuta la suddivisione del “contributo areale” del processo erosivo nella componente *interrill* e in quella *rill*. La prima rappresenta il fenomeno fisico di distacco di particelle solide di terreno per effetto della precipitazione e del trasporto delle stesse ad opera di una corrente di tipo *overland*; la componente *rill* fa riferimento, invece, al trasporto operato dalla corrente che muove entro ben definiti canali di deflusso o solchi, delle particelle solide distaccate dalle aree *interrill* ed eventualmente dalle stesse pareti dei *rill* (Ferro et al., 2005).

L'erosione *rill* è considerata uno dei più importanti processi di degradazione che interessano il suolo, a causa della grande quantità di perdita del suolo che genera (Wirtz et al., 2010). Nelle aree coltivate, le vie preferenziali che si originano con le varie operazioni colturali possono evolvere in una rete di piccoli canali. Tuttavia, anche sulle pendici naturali, non coltivate, il deflusso superficiale avviene attraverso la formazione di rivoli anche se, in questo caso, è possibile che non si formino incisioni ben definite (Bagarello e Ferro, 2006).

In presenza di eventi piovosi particolarmente intensi, cioè quelli per i quali si hanno maggiori probabilità di formazione dei solchi, è stato verificato (Di Stefano et al., 2013; Rejman et al., 2005) che il contributo dato dall'erosione *rill* all'erosione totale risulta sempre prevalente e in molti casi la perdita di suolo per erosione *interrill* è comparativamente trascurabile.

Attualmente, lo studio dell'erosione per solchi è rivolto all'approfondimento dei meccanismi che regolano il processo erosivo e alla messa a punto di modelli matematici per il calcolo dei volumi erosi.

La modellazione dell'erosione *rill* richiede che la corrente in moto nei *rill* debba essere adeguatamente modellata (Abrahams et al., 1996); a tal fine risulta indispensabile condurre indagini sperimentali sull'idraulica dei *rill* (Gilley et al., 1990, Govers, 1992, Abrahams et al 2006). Ai fini della modellazione, oltre alla portata  $Q$ , è necessario stimare altre grandezze

idrauliche del solco che condizionano i processi di distacco e trasporto delle particelle di suolo, quali la larghezza in superficie  $w$ , il tirante idrico medio  $h$ , il coefficiente di scabrezza e la velocità media della corrente,  $V$ .

Uno degli approcci disponibili per la stima della velocità,  $V$ , fa riferimento allo studio del moto uniforme delle correnti liquide a pelo libero. Il suddetto studio si basa sulla determinazione teorica della legge di resistenza al moto per integrazione di una nota distribuzione della velocità nella sezione trasversale (Ferro, 1997; 2003).

Nella presente tesi sono stati riportati i risultati teorici-sperimentali di una indagine che ha avuto come obiettivo la determinazione teorica della legge di resistenza al moto nei rill considerando sia i processi dissipativi di tipo *grain*, in cui la resistenza al moto è dovuta alla dimensione caratteristica del materiale di fondo, sia quelli di tipo *morphological* dovuti alla presenza in alveo di forme di fondo, come per esempio gli *step-pool*.

L'analisi dimensionale (Barenblatt, 1993; Ferro, 1997) e l'ipotesi di autosimilarità (Ferro e Pecoraro, 2000; Di Stefano et al., 2017b; Ferro, 2017) hanno permesso, di dedurre la legge di resistenza al moto per integrazione della distribuzione potenziale della velocità. Nella suddetta legge di resistenza figura la funzione  $\Gamma$  da determinare sperimentalmente.

Per quanto concerne la parte sperimentale, le misure di campo, e in particolare della velocità della corrente, del tirante, dell'area e del contorno bagnato della sezione trasversale e della pendenza del canale sono state eseguite in tratti di rill realizzati artificialmente su parcelle sperimentali contraddistinte da valori di pendenza,  $sp$ , pari a 9, 14 e 22%. La scelta di utilizzare parcelle con differente pendenza ha avuto l'obiettivo di verificare se la velocità della corrente in rill erodibili è indipendente dalla pendenza media dell'alveo come sostenuto da Govers (1992), Nearing et al. (1997), Takken et al. (1998), Hessel et al. (2003) e Gimenez e Govers (2001). Le variabili geometriche dei canali sono state determinate utilizzando modelli 3D dei solchi, ottenuti con la tecnica *Structure from Motion* (SfM). La SfM, la cui applicabilità è stata ampiamente verificata in letteratura, è risultata poco costosa, automatizzata e la fase di acquisizione dei dati è stata relativamente rapida.

Utilizzando le misure relative ai rill con  $sp=14\%$  (106 tratti), per il caso di resistenze di tipo *grain*, è stata calibrata la funzione per la stima di  $\Gamma$  della legge di resistenza. In accordo alla relazione ottenuta,  $\Gamma$  dipende dal numero di Reynolds  $Re$ , dal numero di Froude  $F$ , e dalla pendenza  $s$  del tratto di rill.

La relazione per la stima di  $\Gamma$  è stata validata utilizzando sia il dataset relativo alle misure condotte nelle parcelle con  $sp$  pari a 9% e 22% (79 tratti) sia dati reperiti in letteratura (Strohmeier et al., 2014; Peng et al., 2015).

Con riferimento al database relativo alla presente indagine, la legge di resistenza teorica ottenuta è risultata applicabile poiché, fornisce valori dell'indice di Darcy-Weisbach,  $f$ , caratterizzati da errori di stima relativamente bassi. Tuttavia, con riferimento ai dati di letteratura, i valori di  $f$  sono stati sistematicamente sottostimati. Quest'ultimo risultato è stato spiegato dalla differente tessitura del suolo che contraddistingue le misure di letteratura.

Infine, l'espressione proposta ha confermato l'ipotesi di Govers (1992) di indipendenza della velocità dalla pendenza del rill.

Per quanto concerne le prove di tipo *morphological-resistance*, l'analisi della morfologia dei rill ha suggerito che le correnti con portate  $Q$  più basse ( $Q \leq 0,18 \text{ L s}^{-1}$ ) non hanno modificato la morfologia del profilo longitudinale iniziale caratterizzata dalla presenza di *step-pool* formatisi nella fase di premodellamento, mentre le correnti con valori di portata più elevati ( $Q = 0,20 - 0,30 \text{ L s}^{-1}$ ), hanno modificato la morfologia dei rill da quella iniziale a *step-pool* a quella finale di tipo antidune.

La relazione per la stima dell'indice di Darcy-Weisbach  $f$  per il caso delle resistenze di tipo *morphological* è risultata applicabile in quanto caratterizzata da bassi errori di stima. I valori di  $f$  misurati nei rill caratterizzati dalla presenza degli *step-pool*, risultano, in media, più elevati di quelli misurati nei rill in assenza di *step-pool*. Questo risultato è stato spiegato dalla circostanza che, nei primi, le resistenze al moto complessive sono imputabili sia al contributo *grain* sia a quello *morphological* e, pertanto, sono maggiori delle sole resistenze di tipo *grain* presenti nei secondi. La legge di resistenza al moto proposta fornisce valori di  $V$  crescenti con la pendenza.

In conclusione, i risultati hanno dimostrato che la legge di resistenza al moto teorica è applicabile sia nel caso di resistenze di tipo *grain* sia nel caso di resistenze di tipo *morphological* posto che la funzione  $\Gamma$  sia stimata con la relazione specifica per il tipo di resistenza.

## **1. GENERALITÀ**

La tutela ambientale è diventata, nel corso degli anni, argomento centrale di molti dibattiti politici. L'attenzione al tema ambientale, oltre a stimolare la ricerca di molti studiosi e l'azione di molti politici, sottende ed abbraccia singolari punti di riflessione, interessi economici e coinvolgimenti sociali. La percezione delle risorse ambientali nella pubblica opinione e nelle comunità scientifiche è sentita in maniera diversa soffermandosi soprattutto sulle risorse acqua ed aria. Il degrado o la limitazione della loro disponibilità viene percepita come una minaccia alla sopravvivenza dell'umanità, mentre appare sorprendente che la risorsa suolo venga considerata come un bene inesauribile ed immodificabile nel tempo.

In realtà, sin dall'inizio del secolo scorso ci si è resi conto che il suolo, per la ridotta e lenta capacità di autorigenerazione, non è inesauribile e che un uso inappropriato avrebbe potuto determinare, sia nel breve che nel lungo periodo, una progressiva perdita di funzioni produttive ed ambientali. Questo cambiamento di pensiero ha, quindi, imposto l'uso sostenibile della risorsa suolo con lo scopo di contenere i fenomeni di degradazione.

La degradazione del suolo, processo in cui le capacità attuali o potenziali del suolo diminuiscono progressivamente, ha ripercussioni dirette sulla qualità delle acque e dell'aria, sulla biodiversità e sulla sicurezza alimentare. Secondo stime FAO i suoli del pianeta, riconosciuti come degradati, sono passati dal 15% all'attuale 33%. Tra le tante cause di degradazione, la principale a scala mondiale, è l'erosione idrica che colpisce circa un milione di ettari cioè, un terzo della superficie coltivata nel pianeta.

In Europa vengono mediamente persi ogni anno a causa del fenomeno dell'erosione idrica, a fronte di un tasso medio di formazione del suolo di soli  $1,4 \text{ t ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$ ,  $2,46 \text{ t ha}^{-1}$  di suolo e tale perdita interessa principalmente i suoli agricoli (68,3%). L'Italia con una media di  $8,46 \text{ t ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$  di perdita di suolo, è in Europa il paese con la maggiore perdita di suolo, seguita da Slovenia e Austria con un valore medio annuo, rispettivamente, di  $7,43$  e  $7,19 \text{ t ha}^{-1}$  (Panagos et al., 2015). La perdita di suolo dovuta all'erosione è un fenomeno naturale e inevitabile, ma può assumere caratteri parossistici, e quindi divenire intollerabile, in situazioni particolari e soprattutto a causa di fattori antropici (Di Stefano e Ferro, 2016).

L'erosione idrica genera, oltre alla riduzione dello spessore del suolo utile per le radici delle piante, la diminuzione negli orizzonti superficiali della quantità di sostanza organica, di argilla e di nutrienti. Inoltre, provoca l'inquinamento delle acque e fenomeni di interrimento dei serbatoi dovuti al trasporto solido della corrente idrica.

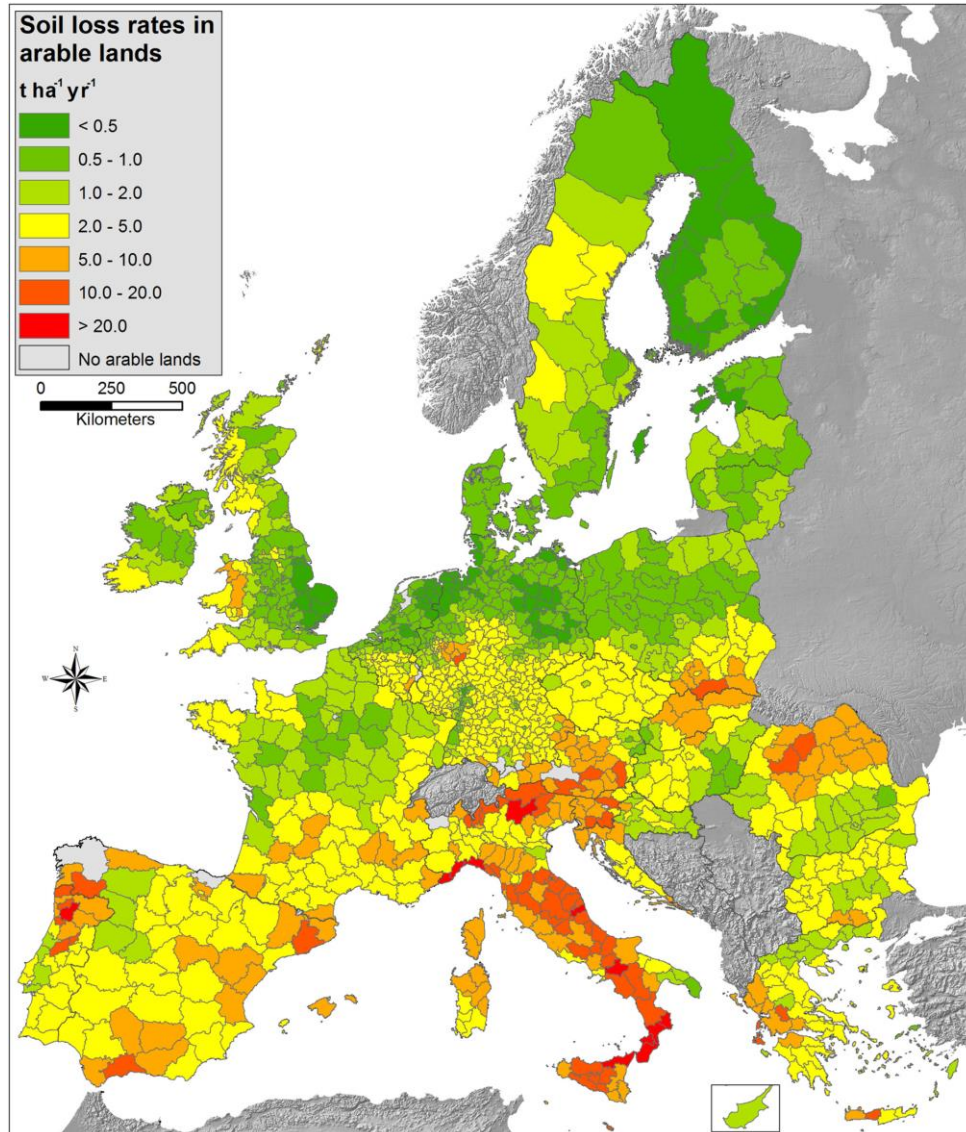
Proprio all'interno delle problematiche evidenziate, si collocano i recenti provvedimenti politici emanati dall'UE, con lo scopo principale di mitigare i fenomeni di dissesto idrogeologico e tutelare le risorse idriche. In particolare, i programmi di sviluppo rurale (PSR) attuati a livello regionale, stanno incentivando le iniziative di carattere agricolo e forestale proposte da imprenditori agricoli ed enti pubblici che, tramite le conversioni colturali, l'imboschimento o la realizzazione di opere di difesa del suolo, riducono l'erosione idrica dei suoli in aree particolarmente suscettibili.

Panagos et al., (2015) sostengono che le recenti azioni di Bruxelles per un'agricoltura sostenibile, come per esempio le norme relative al mantenimento dei terreni in buone condizioni agronomiche e ambientali hanno, nell'ultimo decennio, contribuito a ridurre la perdita di suolo del 9,5% nel complesso e del 20% per le terre coltivabili. Nonostante l'impegno messo in atto, però, ancor oggi il 12,7% delle terre coltivate in Europa presentano tassi di perdita del suolo superiori a  $5 \text{ t ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$ . Con particolare riferimento alla Sicilia, dalla mappa di figura 1 si evince che le aree coltivate presentano valori di perdita di suolo media annua sempre superiori a  $5 \text{ t ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$  con aree con valori maggiori di  $20 \text{ t ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$ . Questo è dovuto sia all'elevato indice di aggressività della pioggia nel periodo autunno-inverno (Panagos et al., 2017) sia alla frequente presenza, soprattutto nelle zone interne della Regione, di versanti ripidi privi di copertura o destinati a seminativi.

In definitiva, diventa urgente approfondire la conoscenza sui meccanismi che regolano il fenomeno dell'erosione idrica dei suoli, perché solo una migliore conoscenza dei processi permette di mettere a punto idonei strumenti di valutazione e quindi di adottare opportune strategie di programmazione e di mitigazione del fenomeno.

Lo strumento analitico certamente più noto e utilizzato è la *Universal Soil Loss Equation* (USLE) di Wischmeier e Smith (1978), in cui il fenomeno erosivo è semplicemente quantificato mediante una serie di fattori che descrivono i singoli processi e le loro interazioni. Tale modello, concepito per valutazioni a scala parcellare, mediante un approccio spaziale di tipo distribuito può essere applicato a scala di bacino. A scala di bacino, accoppiando il modello di previsione USLE che tiene conto solo dei fenomeni di distacco e di trasporto di particelle di suolo, con un operatore matematico che esprime l'efficienza del trasporto delle particelle lungo i versanti, è possibile stimare la produzione di sedimenti, ovvero la quantità di materiale eroso nell'area che, in un fissato arco temporale attraversa la sezione di chiusura di un bacino.





**Fig. 1** - Perdita di suolo media annua nelle aree coltivate dell'Unione Europea (Panagos et al., 2015)

Allo stato attuale delle conoscenze è ampiamente riconosciuta la suddivisione del “contributo areale” del processo erosivo nella componente *interrill* ed in quella *rill*. La prima rappresenta il fenomeno fisico di distacco di particelle solide di terreno per effetto della precipitazione e del trasporto delle stesse ad opera di una corrente di tipo *overland*; la componente *rill* fa riferimento, invece, al trasporto operato dalla corrente che muove entro ben definiti canali di deflusso o solchi, delle particelle solide distaccate dalle aree *interrill* ed eventualmente dalle stesse pareti dei *rill* (Ferro et al., 2005).

Il ruscellamento viene frequentemente concepito come il moto di una corrente idrica (*overland flow*) che muove diffusamente sulla superficie del suolo. In realtà, il deflusso tende a concentrarsi in numerosi rivoli, denominati solchi o rills (Bagarello e Ferro, 2006).

La corrente idrica nei rills, rispetto ad una corrente di tipo *overland*, è caratterizzata da una maggiore energia e quindi, poichè il distacco e il trasporto delle particelle di suolo risulta più efficiente, i tassi di erosione sono notevolmente maggiori.

L'erosione rill è considerata uno dei più importanti processi di degradazione che interessano il suolo, a causa della grande quantità di perdita del suolo che genera (Wirtz et al., 2010). Nelle aree coltivate, le vie preferenziali che si originano con le varie operazioni colturali possono evolvere in una rete di piccoli canali. Tuttavia, anche sulle pendici naturali, non coltivate, il deflusso superficiale avviene attraverso la formazione di rivoli pur se, in questo caso, è possibile che non si formino incisioni ben definite (Bagarello e Ferro, 2006).

In presenza di eventi piovosi particolarmente intensi, cioè quelli per i quali si hanno maggiori probabilità di formazione dei solchi, è stato verificato (Di Stefano et al. 2013; Rejman et al., 2005) che il contributo dato dall'erosione rill all'erosione totale risulta sempre prevalente e in molti casi la perdita di suolo per erosione interrill è comparativamente trascurabile.

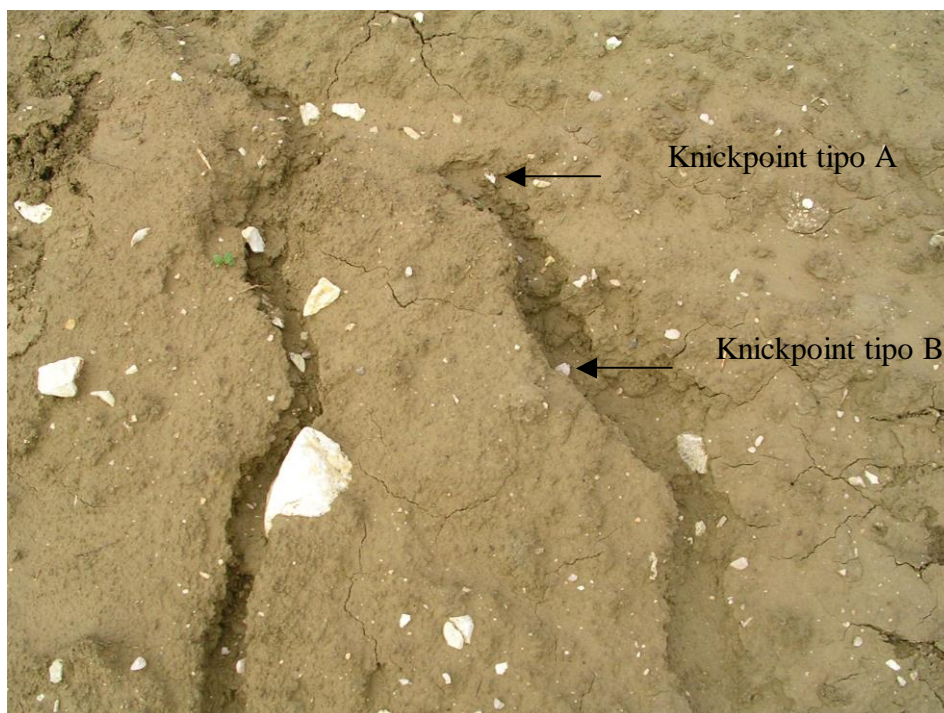
Seguendo l'impostazione hortoniana, lo sviluppo iniziale dei rill dipende dalle caratteristiche idrauliche della corrente; in altre parole il verificarsi dell'incisione viene messo in relazione con la velocità della corrente (Slattery e Bryan, 1992), il numero di Froude (Savat e De Ploey, 1982) e la tensione tangenziale, e l'innescio del fenomeno viene considerato dipendente dal superamento di un dato valore soglia della variabile idrologica prescelta e dalla resistenza del materiale di fondo.

Da un punto di vista morfologico la nascita di un rill si manifesta con la formazione di un salto di testa denominato *knickpoint* a seguito della concentrazione del deflusso e del relativo aumento del tirante idrico della corrente e della velocità.

A partire dal *knickpoint* formato il solco si sviluppa verso monte con l'arretramento della testata. In queste condizioni, quindi, l'incisione della testata rappresenta lo stadio iniziale dell'evoluzione del rill, anche se non tutti i *knickpoint* evolvono in solchi (Merz e Bryan 1993).

Sono stati riconosciuti due tipi di *knickpoint*, denominati A e B (Bryan e Poesen, 1989). Il primo si forma su pendici poco inclinate e si origina dalla convergenza delle linee di flusso nel punto di incisione; quello di tipo B, invece, si sviluppa su rill già stabili. In ogni caso, i *knickpoint* migrano verso monte per effetto dell'erosione rimontante, e mai verso valle (Fig. 2).

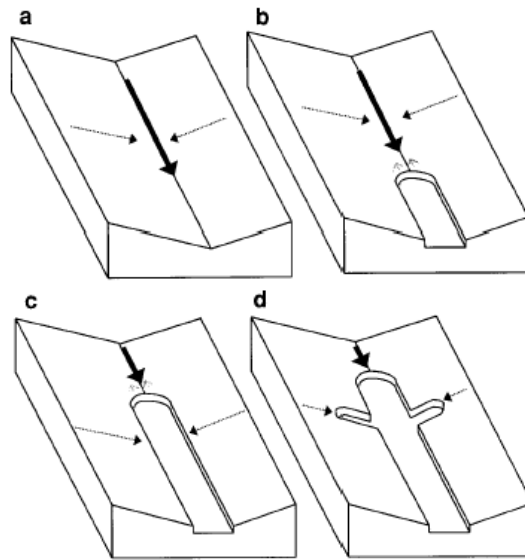
Anche l'eventuale sviluppo di una rete di affluenti del solco è controllato dall'esistenza del *knickpoint*. Quando la testata del solco principale, arretrando, incontra i punti in cui convergono le correnti *overland* dalle aree *interrill*, la variazione di quota, derivante dalla presenza del fondo del solco principale, determina un aumento della pendenza dell'area *interrill* e quindi un incremento locale della velocità della corrente *interrill*. Il superamento del valore soglia della velocità per l'inizio del moto delle particelle determina la formazione di *knickpoint* laterali che migrano verso monte e che danno vita a *rill* affluenti, mentre il salto di testa del canale principale continua a migrare verso monte (Fig. 3).



**Fig. 2** - Vista dei knickpoint testate di tipo A e di tipo B in un rill

La conformazione dei solchi si modifica nel corso di un evento di pioggia. Con riferimento ad alcuni suoli sabbiosi in Kenya, Dunne e Aubry (1986) hanno descritto fenomeni di espansione e contrazione dell'incisione in relazione all'importanza assunta dai processi di erosione rill e interrill. In occasione di piogge di intensità bassa o moderata, la produzione di sedimenti nelle aree interrill è maggiore della capacità di trasporto della corrente concentrata nei solchi. Conseguentemente, nei solchi avvengono fenomeni di deposito e le sezioni si riducono. Nel caso di eventi lunghi o molto intensi, la capacità di trasporto della corrente incanalata è maggiore della produzione di sedimenti delle aree interrill e pertanto avvengono fenomeni erosivi che determinano l'allargamento del fosso.

Recentemente, Shen et al. (2015) hanno condotto delle indagini sperimentali su una parcella di laboratorio utilizzando delle piogge simulate di diversa intensità. Gli Autori sostengono che all'aumentare dell'intensità della pioggia aumenta la lunghezza media dei solchi. In particolare, gli Autori suggeriscono che gli effetti dell'intensità della pioggia sulla lunghezza dei rill si hanno principalmente nella fase iniziale dell'erosione del suolo, quando lo sviluppo della rete di rill è attivo e l'erosione verso monte (arretramento della testata) ha un ruolo dominante. Inoltre, gli stessi Autori suggeriscono che l'intensità delle piogge ha effetti sulla larghezza e profondità dei solchi, ma questi effetti diminuiscono gradualmente con la durata della pioggia in quanto lo sviluppo della rete tendenzialmente raggiunge la maturità.



**Fig. 3** - Sviluppo di una rete di solchi secondo Brunton e Bryan (2000)

Attualmente, lo studio dell'erosione per solchi è rivolto all'approfondimento dei meccanismi che regolano il processo erosivo e alla messa a punto di modelli matematici per il calcolo dei volumi erosi.

I modelli matematici sino ad ora sviluppati hanno seguito sia un approccio puramente empirico, ma completo, come quello della USLE (Wischmeier e Smith, 1978; Renard et al., 1994), sia un approccio di tipo “*process-oriented*” (Nearing et al., 1989) che simula i singoli processi elementari (interrill, rill, gully).

La modellazione dell'erosione rill richiede la modellazione della corrente in moto nei rill (Abrahams et al., 1996); a tal fine risulta indispensabile condurre indagini sperimentali sull'idraulica dei rill (Gilley et al., 1990; Govers, 1992).

Le principali sperimentazioni fino ad ora eseguite sono riconducibili ad esperienze di laboratorio, svolte su suoli erodibili e con precipitazione simulata, che hanno avuto come obiettivo la semplice osservazione della formazione della rete di rill e la definizione della condizione iniziale per la formazione dei solchi, lo studio dell'evoluzione morfologica delle testate, la valutazione delle principali grandezze idrauliche (velocità e sforzi tangenziali) all'interno del solco.

In letteratura sono disponibili diverse relazioni che descrivono i processi di distacco e l'idraulica dei rill. Queste relazioni sono state messe a punto per i corsi d'acqua naturali e vengono correntemente applicate nell'idraulica dei rill (Gilley et al., 1990; Abrahams et al., 1996). Un esempio è la legge di resistenza al moto espressa dall'equazione di Chezy:

$$V = C\sqrt{R s} \quad (1)$$

in cui  $V$  ( $\text{m s}^{-1}$ ) è la velocità media della corrente in condizioni di moto uniforme,  $C$  ( $\text{m}^{1/2} \text{s}^{-1}$ ) è il coefficiente di Chezy,  $R$  (m) è il raggio idraulico e  $s$  ( $\text{m m}^{-1}$ ) è la pendenza del fondo dell'alveo.

Le leggi di resistenza al moto per le correnti a pelo libero sono utilizzabili per ottenere, note le caratteristiche geometriche dell'alveo e dell'indice di scabrezza, una previsione del tirante idrico corrispondente a una determinata portata o per dedurre il valore di quest'ultima in funzione del tirante. La legge di resistenza può essere dedotta per via teorica per alcuni casi relativi a prestabilite forme della sezione trasversale dell'alveo in cui sono ben definite le condizioni al contorno. Tuttavia, le difficoltà insite nella determinazione del contorno bagnato, rendono l'applicazione della formulazione teorica alquanto incerta.

Recenti contributi (Ferro e Pecoraro, 2000; Di Stefano et al., 2017b; Ferro, 2017), basati sull'ipotesi dell'autosimilarità incompleta, hanno però dimostrato che la legge di resistenza al moto può essere dedotta per via teorica anche per condizioni geometriche più complesse, tipiche degli alvei naturali.

Nella valutazione delle resistenze al moto negli alvei naturali, in assenza di movimento del materiale solido sul fondo e trascurando gli effetti che il carico solido in sospensione esercita sulla turbolenza della corrente stessa, bisogna tenere conto di due diversi processi dissipativi: uno legato alla forma, alla dimensione e alla disposizione degli elementi che costituiscono la scabrezza (*grain-resistance*), l'altro imputabile alla presenza in alveo di forme di fondo come per esempio gli step-pool (*morphological-resistance*).

Gli *step-pool* presentano un profilo longitudinale a gradinata che consiste in una successione di sequenze di salti (*step*) e pozze (*pool*). Le dissipazioni energetiche sono di tipo localizzato e avvengono nelle pozze.

I rill e i corsi d'acqua presentano significative differenze. I rill evolvono morfologicamente in tempi molto brevi ed essendo il deflusso generalmente caratterizzato da tiranti bassi (da diversi millimetri a qualche centimetro), le caratteristiche idrauliche della corrente risentono in modo significativo della morfologia del fondo dell'alveo (Di Stefano et al., 2017c). Inoltre, i rill si manifestano su pendici molto pendenti e presentano sponde molto irregolari nella forma (Peng et al., 2015).

Per quanto concerne i fiumi, invece, i deflussi sono solitamente caratterizzati da tiranti molto più grandi della dimensione caratteristica della scabrezza e l'evoluzione morfologica dell'alveo è relativamente lenta.

Alla luce di quanto detto, risulta legittimo chiedersi se i concetti sviluppati per i fiumi possano essere applicati direttamente ai rills.

Diversi modelli di erosione come EUROSEM (Morgan et al., 1998), GUEST (Hairsine and Rose, 1992a,b), LISEM (De Roo et al., 1994) e CREAMS (Foster et al., 1984), per descrivere le relazioni tra  $V$  e la geometria del canale ricorrono all'equazione di Manning :

$$V = \frac{R^{2/3} s^{1/2}}{n} \quad (2)$$

dove  $n$  ( $m^{-1/3} s$ ) è il coefficiente di Manning. Il coefficiente  $n$ , ottenuto da indagini sperimentali, si assume generalmente indipendente dalle condizioni del deflusso (Gilley et al., 1990).

Le indagini sperimentali sull'idraulica dei rill permettono di verificare in che misura le equazioni utilizzate nei modelli descrivono i processi erosivi (Govers et al., 2007).

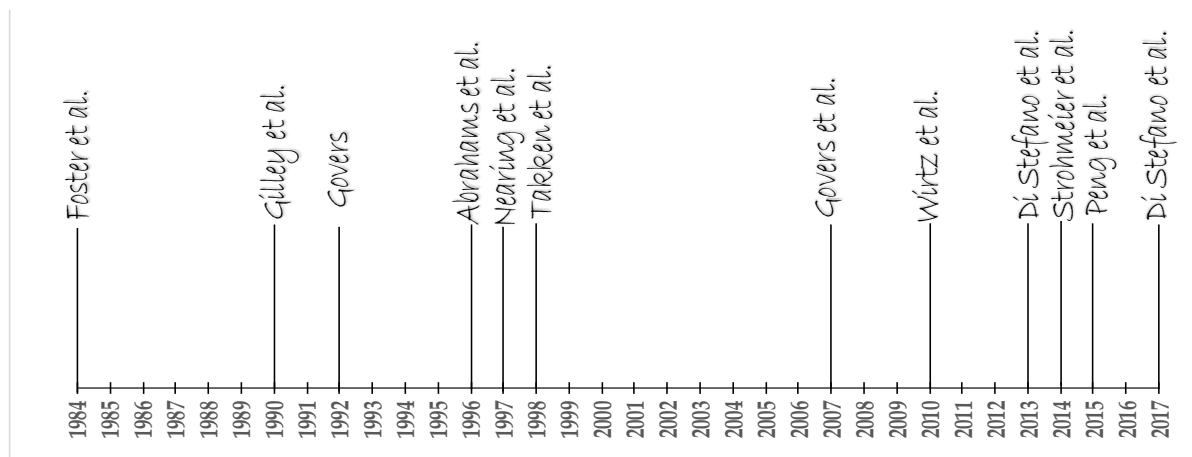
Secondo Wirtz et al.(2010, 2012), sono necessarie misure precise e ripetibili dei processi erosivi sia per la comprensione dei processi sia per la realizzazione di un corretto modello di erosione rill.

Il complesso dei lavori sull'idraulica dei rill, con riferimento al periodo compreso tra il 1984 e il 2017 (Fig. 4), è numericamente limitato, sia per le difficoltà teoriche che per l'onerosità della sperimentazione.

I dati disponibili in letteratura, relativi alle misure di perdita di suolo per erosione rill, spesso sono difficilmente confrontabili a causa delle differenti tecniche di rilievo adottate e sono

generalmente relativi ad aree di modesta estensione e a brevi intervalli temporali (Casali et al., 1999).

Le misure di erosione rill possono essere effettuate sia in laboratorio che in pieno campo (Bruno et al., 2008).



**Fig. 4** - Distribuzione temporale dei lavori pubblicati sull'idraulica dei rill

Nel primo caso l'obiettivo della sperimentazione è sostanzialmente l'approfondimento delle conoscenze sui meccanismi di formazione e sviluppo dell'incisione mentre nel secondo caso la misura mira a quantificare il volume dei solchi ed il relativo peso del materiale eroso.

La misura dei solchi può essere effettuata a partire da rilievi diretti in campo o con metodi indiretti che fanno uso di tecniche *image-based* e *laser scanner*.

Il rilievo diretto presuppone la misura della lunghezza del percorso, l'individuazione ed il rilievo della geometria di alcune sezioni trasversali e la misura della quota di fondo, in asse al solco, per il calcolo delle pendenze. Le misure dirette, vengono effettuate predisponendo dei *transect*, in modo che ogni solco venga suddiviso in diversi tratti di cui viene misurata la lunghezza con l'ausilio di un nastro metrico e la sezione trasversale in ogni punto di intersezione del rill con il transect. Il rilievo delle sezioni trasversali viene effettuato utilizzando un profilometro (Bruno et al., 2008), appositamente realizzato con delle aste cilindriche in alluminio montate su una barra, anch'essa di alluminio, che ne permette l'abbassamento fino a lambire il perimetro della sezione. La quota di ogni punto della sezione viene stabilita misurando l'abbassamento di ciascuna asta rispetto alla barra orizzontale. Inoltre, l'andamento plano-altimetrico della rete di solchi può essere rilevato con una stazione totale.

Il metodo diretto richiede un notevole dispendio di risorse in termini di tempo e presuppone l'alterazione dello stato dei luoghi. Pertanto, recentemente sono state utilizzate tecniche

alternative basate su rilievi indiretti che permettono di superare i suddetti problemi e forniscono una misura più accurata e standardizzabile.

I metodi di rilievo indiretti fanno generalmente riferimento all'uso di Laser Scanner Terrestri, TLS, (Vinci et. al., 2015) o a tecniche *image-based* (Carollo et al., 2015; Di Stefano et al., 2017a-b) che risultano meno onerose delle tecniche TLS e restituiscono modelli digitali 3D di pari accuratezza e precisione. A partire dai modelli 3D o 2,5D (DEM) ottenuti dalle tecniche *image-based* e *laser scanner* è possibile estrarre i profili longitudinali dei solchi, i profili delle sezioni trasversali e stimare il volume eroso.

Nel caso di rilievi multi-temporali, è possibile inoltre indagare sui cambiamenti volumetrici dei solchi e ottenere direttamente i volumi di perdita di suolo prescindendo dalle misure delle singole sezioni trasversali. Tale tecnica, denominata *geomorphic change detection* (GCD) permette di calcolare i volumi di suolo eroso dalla differenza tra due DEM della stessa area relativi a periodi differenti. In particolare l'algoritmo GCD fornisce misure quantitative basandosi su un confronto *cell-by-cell* (James et al., 2012) a partire da un DEM di riferimento e un DEM post-evento. Inoltre, la tecnica restituisce un modello raster, denominato *DEMs of difference* (DoD) che permette di calcolare localmente l'entità del fenomeno erosivo nonché di discriminare le aree con deposito di sedimento e quelle erose.

L'esigenza di convertire in termini ponderali le misure di volume di terreno eroso, richiede il campionamento dei suoli nell'area indagata, con lo scopo di determinarne la densità apparente. Per tenere conto della variabilità temporale e spaziale della massa volumica apparente è opportuno effettuare un prelievo, in corrispondenza dell'evento da monitorare, di un numero di campioni congruo per costruire una distribuzione di frequenza della densità apparente e pervenire al valore rappresentativo della variabile.

La disponibilità di un rilievo di dettaglio, come quello effettuato mediante un *laser scanner* terrestre o tecnica *image-based*, consente utilizzando il relativo DEM, l'identificazione e l'estrazione dei rill. Notoriamente, l'estrazione automatica di un reticolo idrografico si fonda sulla individuazione dell'area soglia, definita come quella sottesa dal punto di inizio (*channel head*) di un canale di ordine uno in un reticolo ordinato secondo il criterio di Horton-Strahler.

Nel caso del DEM il valore del parametro "area soglia" individua il numero minimo di celle "versante" che debbono convogliare deflussi all'interno di un'altra cella affinché questa possa considerarsi "sorgente", cioè estremità di monte del percorso idraulico di un canale del primo ordine.



Per determinare la soglia di estrazione del reticolo più idonea, Broscoc (1959) ha formulato la teoria del *mean stream drop*. La suddetta teoria si fonda sull'ipotesi che all'aumentare dell'ordine  $w$  dei canali che costituiscono un reticolo idrografico, diminuisce la pendenza  $S_w$  del loro thalweg e aumenta la loro lunghezza  $L_w$ .

Broscoc (1959) ha definito *drop* il salto di quota esistente tra i due punti estremi di un canale (dalla sorgente alla confluenza per un canale di primo ordine, tra due successive confluenze per le aste di ordine superiore).

Secondo la teoria di Broscoc (1959) il valore dell'area soglia è quello per cui la media dei drop,  $\mu(H_w)$ , delle aste di tutti gli ordini  $w$  presenti nel reticolo è costante. Pertanto, il suddetto valore soglia è quello che soddisfa la seguente relazione:

$$\mu(H_w) = \mu(H_{w+1}) = k \quad (3)$$

in cui  $\mu(H_w)$  e  $\mu(H_{w+1})$  sono la media dei drop delle aste di ordine  $w$  e  $w+1$ , rispettivamente, e  $k$  è una costante.

L'eq.(3) può anche essere così riscritta:

$$\mu(H_w) = \mu(S_w)L_w = \mu(S_{w+1})L_{w+1} = k \quad (4)$$

avendo indicato con  $\mu(S_w)$  la media della pendenza delle aste di ordine  $w$ , con  $L_w$  la lunghezza delle aste di ordine  $w$ , con  $\mu(S_{w+1})$  la media della pendenza delle aste di ordine  $w+1$ , con  $L_{w+1}$  la lunghezza delle aste di ordine  $w+1$ .

Successivamente, sulla base sia di evidenze di campo sia di deduzioni teoriche, Montgomery e Dietrich (1992) e Dietrich et al. (1993) hanno evidenziato l'esistenza di una soglia dell'area contribuente, richiesta per determinare la formazione della testata di un canale, dipendente dalla pendenza.

Carollo et. al., (2015) hanno confermato che, con riferimento alla individuazione dei percorsi planimetrici dei rill, il criterio di Broscoc fornisce risultati confrontabili con quelli ottenuti dai rilievi diretti in campo.

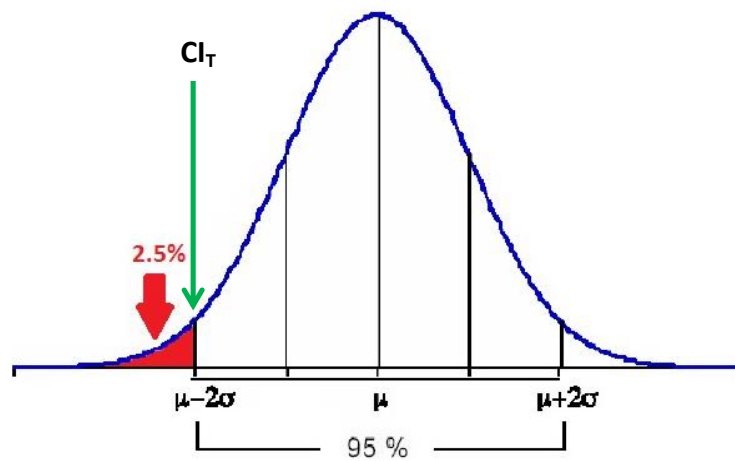
I modelli digitali del terreno, grazie all'evoluzione degli strumenti di acquisizione ed elaborazione, presentano livelli di accuratezza sempre maggiori. Non sempre però un modello digitale del terreno molto accurato restituisce carte derivate (rete idrografica, aree di drenaggio), con livelli di precisione accettabili. Questa circostanza è dovuta al tipo di algoritmo che si utilizza per derivare la grandezza prescelta.

Recentemente, per l'estrazione della rete idrografica si tende ad utilizzare algoritmi che oltre all'accumulo del deflusso tengono conto delle caratteristiche morfometriche del terreno. A tal fine, recenti indagini sperimentali (Thommeret et al., 2010; Sofia et al., 2011) hanno indagato sulla possibilità di utilizzo di alcuni indici morfologici, e in particolare l'indice di convergenza, CI, e gli indici di curvatura, per la determinazione della rete idrografica. Come per gli algoritmi classici di accumulo del deflusso (*flow accumulation*), anche gli indici morfometrici restituiscono prodotti che necessariamente bisogna sogliare. Thommeret et al., (2010) al fine di rendere oggettiva la determinazione della soglia, suggeriscono di utilizzare un valore dedotto da un'analisi statistica. In particolare, secondo gli Autori generalmente la distribuzione di frequenza dei valori di indice di convergenza, CI, o di indici di curvatura del DEM in esame, è di tipo Gaussiana e quindi il 95% dei valori ricadono nell'intervallo  $[\mu-2\sigma; \mu+2\sigma]$  in cui  $\mu$  è la media e  $\sigma$  la deviazione standard. A partire da questa ipotesi e considerato che solo i pixel con valori negativi dell'indice rappresentano aree convergenti (incisione nella superficie), gli Autori hanno considerato la rete rappresentata soltanto dai pixel per i quali il relativo valore di CI ricade nell'intervallo  $[\mu-2\sigma; 0]$  (Fig. 5).

La ricerca descritta nella presente Tesi ha avuto come obiettivo generale lo studio delle leggi di resistenza al moto nei rill considerando sia i processi dissipativi di tipo “*grain*” sia quelli di tipo “*morphological*”. In particolare, per la determinazione della legge di resistenza al moto per le correnti nei rill, è stata condotta sia un'indagine teorica sia un'indagine sperimentale.

Lo studio teorico, basato sull'analisi dimensionale (Barenblatt, 1993; Ferro, 1997) e sull'ipotesi di autosimilarità incompleta (ISS) (Ferro e Pecoraro, 2000; Di Stefano et al., 2017b; Ferro, 2017) ha permesso, di dedurre teoricamente la legge di resistenza al moto per integrazione di una nota distribuzione della velocità nella sezione trasversale.

Per quanto concerne la parte sperimentale, sono state condotte delle prove in campo sia su rill caratterizzati da una scabrezza del fondo di tipo “*grain-resistance*” sia su rill a profilo *step-pool*. Le misure di campo, e in particolare della velocità della corrente, del tirante, dell'area e del contorno bagnato della sezione trasversale e della pendenza del canale sono state eseguite in tratti di rill realizzati artificialmente su parcelle sperimentali con differente pendenza. La scelta di utilizzare parcelle con differente pendenza ha avuto l'obiettivo di verificare se la velocità della corrente è indipendente dalla pendenza media dell'alveo come sostenuto da Govers (1992), Nearing et al. (1997), Takken et al. (1998), Hessel et al. (2003) e Gimenez e Govers (2001).



**Fig. 5** - Distribuzione di frequenza dei valori dell'indice di convergenza

Le variabili geometriche dei solchi sono state determinate con l'applicazione di tecniche *image-based*. In particolare, a partire da un rilievo fotogrammetrico da terra, e utilizzando la tecnica *Structure from Motion* (SfM) è stato realizzato un modello 3D di elevato dettaglio da cui sono stati estratti i profili delle sezioni trasversali e i profili longitudinali dei rill oggetto di indagine.

## 2. LA COMPUTER VISION E L'APPROCCIO SfM

### 2.1. Introduzione

La *computer vision*, CV, è una scienza che ha come scopo principale quello di ricostruire la forma, l'illuminazione e la distribuzione del colore in un dato oggetto o scena reale rappresentati in una o più immagini (Szeliski, 2011). Gli algoritmi finalizzati al raggiungimento di tale scopo hanno subito e tuttora subiscono sviluppi e continue modifiche.

La CV trova svariate applicazioni in vari settori:

- riconoscimento ottico dei caratteri (OCR) per la lettura dei codici postali
- controllo di macchine in campo aeronautico
- diagnostica per immagini in campo medico
- rilevazione di ostacoli inaspettati nell'ambito della sicurezza automobilistica
- costruzione di modelli 3D con elevata accuratezza (con l'integrazione di tecniche fotogrammetriche) in maniera completamente automatica.

Negli ultimi anni quest'ultima applicazione si è diffusa notevolmente suscitando l'interesse di diversi studiosi nel campo dei beni culturali e in quello delle geoscienze.

La generazione di un modello 3D dell'oggetto di interesse, tramite l'approccio CV fa riferimento all'algoritmo, denominato *Structure from Motion*, SfM.

La tecnica SfM è molto simile alla fotogrammetria convenzionale, con la differenza principale che invece di utilizzare una coppia stereo di fotogrammi viene utilizzata un numero elevato di fotografie della stessa scena acquisite da più punti di vista (Frankl et al., 2014). Fondamentalmente, la tecnica SfM permette la creazione di una struttura 3D in maniera totalmente automatica, richiedendo come input solo le fotografie. Non vi è, quindi, la necessità di specificare *a priori* target o punti notevoli presenti nelle immagini acquisite, che, invece, vengono individuati e risolti automaticamente dal software. L'acquisizione delle immagini si basa su una campagna fotografica composta da prese multiple in cui i fotogrammi presentano un elevato grado di sovrapposizione, tale da permettere una ricostruzione tridimensionale completa della scena.

I primi studi sulla SfM sono stati effettuati nei primi anni '80 (Ullman, 1979; Longuet-Higgins, 1981). Negli anni '90 invece sono state apportate importanti innovazioni nella SfM tra le quali lo sviluppo di una ricostruzione proiettiva che non richiede alcuna conoscenza della

calibrazione della camera (Faugeras 1992) e l'implementazione della tecnica denominata *bundle adjustment*. Quest'ultima, utilizzata nel campo fotogrammetrico a partire dagli anni '50 (Taylor et al., 1991; Szeliski e Kang 1994; Azarbayejani e Pentland 1995; Triggs et al., 1999), consente di ricostruire in maniera accurata la posizione delle camere tramite la minimizzazione robusta non lineare dell'errore di retro-proiezione (Szeliski, 2011). Nello stesso periodo si sono avuti avanzamenti sugli algoritmi di ricostruzione della nuvola densa (*dense stereo correspondence algorithms*), tra i quali i più utilizzati e studiati sono i *multi-view stereo (MVS) algorithms*, (Dyer e Seitz 1999; Kutulakos e Seitz 2000; Seitz et al., 2006).

La metodologia di ricostruzione 3D della CV, combina la SfM con algoritmi definiti di *dense image matching* i quali, tramite una comparazione approfondita, a coppia o multipla nel caso del MVS, delle prese fotografiche, estrapolano una nuvola densa di punti (*dense cloud*) in cui, ad ogni punto è associato un vettore normale che definisce l'orientamento e una terna di valori *Red, Green e Blue* (RGB). L'uso combinato (SfM-MVS) è alquanto innovativo e recente ed è implementato in diversi software *open-source* o commerciali.

I sistemi *Structure from Motion* operano secondo la seguente serie di fasi in cui intervengono differenti algoritmi:

1. individuazione nelle immagini dei punti di interesse (*features*), ossia dei punti caratterizzati da valori RGB simili, tramite appositi algoritmi denominati operatori di interesse;
2. *matching*, ovvero, accoppiamento di immagini che contengono le medesime *features*;
3. orientamento, mediante l'applicazione del *bundle adjustment*, e determinazione dei parametri di calibrazione;
4. realizzazione di una nuvola di punti rada costituita dalle *features* e dalle posizioni delle prese fotografiche.

La prima fase di calcolo fa riferimento all'operatore di interesse denominato *Scale-invariant feature transform*, SIFT, (Lowe, 2004). Attraverso questo operatore vengono dapprima individuati i punti di interesse presenti negli scatti e successivamente, mediante l'utilizzo di descrittori di immagine, vengono scelti, fra i punti omologhi individuati, quelli che si differenziano meno. I punti di interesse vengono ricercati all'interno di particolari aree della scena inquadrata, come gli angoli e le aree dove sono presenti discontinuità. A differenza di altri algoritmi di *feature detection*, SIFT è in grado di riconoscere le stesse *features* su immagini con scale differenti, cioè riconosce *features* invarianti per cambi di scala.

Il successo dell'algoritmo SIFT si deve a vari fattori fra cui l'affidabilità e la robustezza dei descrittori di *feature* da esso creati. Un descrittore è un vettore che descrive un intorno di una data *feature* in un modo che è indipendente dal sistema di riferimento e che permette di riconoscere, se presenti, stesse *features* in immagini differenti.

Individuati i punti omologhi, attraverso il *matching*, le foto vengono accoppiate in base alle *features* in comune. In questa fase è fondamentale valutare la somiglianza tra vari punti individuati definendo i vincoli geometrici che legano i punti omologhi individuati negli scatti raffiguranti la stessa scena. Le *features* individuate su materiali riflettenti o trasparenti (es., acqua) possono essere presenti soltanto in una singola presa in quanto il cambio di punto di vista fa sì che cambino anche gli elementi univoci sulle superfici e quindi non vengono prese in considerazione per la fase successiva.

Nella fase successiva si procede all'individuazione dei parametri di orientamento interno della camera utilizzata per la presa. In questa fase il controllo e la limitazione degli errori avviene tramite il *bundle adjustment* (Szeliski, 2011). I parametri di orientamento interno della camera durante l'allineamento della foto vengono stimati utilizzando solo le informazioni derivate dalle immagini e questo può portare ad errori nelle stime finali. Tuttavia, alcuni software commerciali permettono, attraverso l'inserimento manuale di Ground Control Points (GCPs) di coordinate note, di ottimizzare i parametri di orientamento riducendo gli errori di stima e quindi le deformazioni del modello finale. Questa fase specifica è indispensabile se il modello finale deve essere utilizzato per qualsiasi tipo di misurazione (Agisoft PhotoScan Professional Edition, *Version 1.2 User Manual*).

L'ultima fase della SfM consiste nella creazione di un modello discreto costituito da una nuvola di punti spazialmente relazionata alle posizioni e agli orientamenti delle prese fotografiche. Tali punti sono le *features* individuate e posizionate rispetto alle prese fotografiche e ad esse sono associate, oltre alle coordinate spaziali, i dati cromatici derivati dalle fotografie utilizzate.

Concluse le fasi appena descritte, interviene l'algoritmo di *dense image matching* (MVS), per la creazione di una nuvola più densa (*dense cloud*) rispetto al modello di partenza ottenuto con la SfM. A partire dalla *dense cloud*, attraverso algoritmi denominati di *meshing* viene generato un modello 3D poligonale, in cui l'area in oggetto è rappresentata mediante una serie connessa di triangoli di dimensione variabile, disposti irregolarmente nello spazio. L'algoritmo maggiormente implementato nei software di ricostruzione 3D è basato sulla ricostruzione di Poisson (Kazhdan et al., 2006). L'algoritmo, connette i punti relativi alla *dense cloud* utilizzando

come informazione il vettore, associato ad ogni punto nella fase di *dense image matching*. In altre parole, la connessione dei singoli punti, rappresentati in realtà da piccoli piani, avviene sulla base dei vettori che stabiliscono l'orientamento delle singole superfici. Vista l'importanza dell'orientamento è bene porre attenzione, durante la conversione e il salvataggio della *dense cloud*, a selezionare l'opzione per la memorizzazione delle normali.

Infine, il modello poligonale può essere mappato con una *texture* ottenuta da una o molteplici prese fotografiche.

In Tabella 1, viene mostrato lo schema rappresentativo del *workflow* “tipo” della tecnica di foto-ricostruzione 3D tramite SfM-MVS.

**Tab. 1** - Schematizzazione del *workflow* SfM-MVS

	<b>Processo</b>		<b>Prodotto</b>
<b>Fieldwork</b>	1) posizionamento target (GCP)		JPG o RAW  txt-file con dati xyz
	2) acquisizione immagini (terrestri o aeree)		
	3) rilievo dei GCP (dGPS o Stazione totale)		
<b>PC laboratory</b>	4) identificazione dei GCP nelle immagini		
	5) Structure from motion	caricamento immagini ricerca delle features  matching delle immagini bundle adjustment	Nuvola di punti sparsa
	6) Multi-View Stereo	comparazione multipla delle immagini	Nuvola di punti densa
	7) ricostruzione di Poisson	generazione mesh triangolare	Modello TIN
	9) testurizzazione del modello TIN		Modello TIN testurizzato
	8) generazione ortofoto e DEM		Raster TIFF

## 2.2. La campagna fotografica

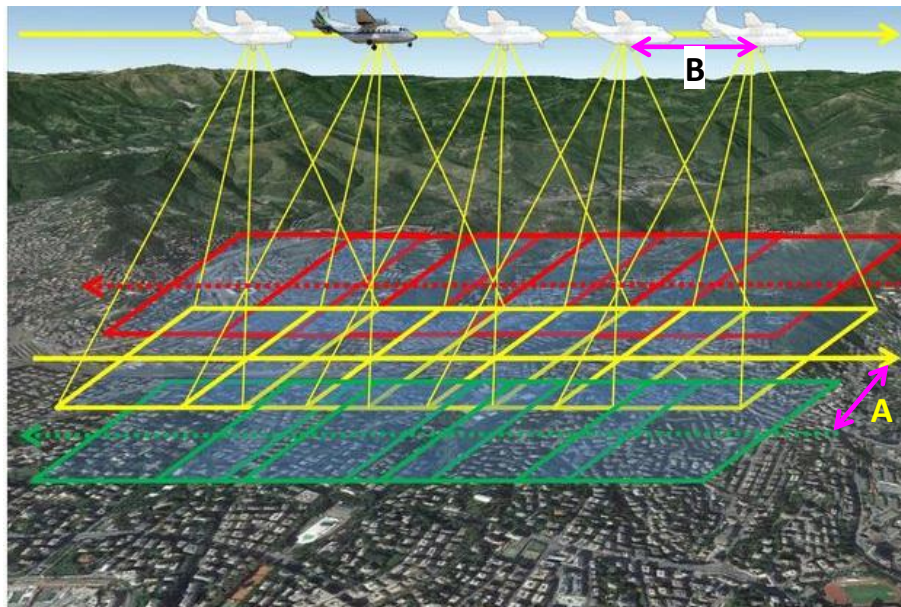
La pianificazione delle campagne fotografiche finalizzate alla restituzione di modelli 3D mediante tecnica SfM, è una fase molto importante, in quanto da essa dipende l'accuratezza del

modello finale. La pianificazione deve tenere conto della distribuzione delle prese fotografiche e della loro sovrapposizione, dell'illuminazione e della distanza di presa.

Il rilievo fotografico può essere del tipo aereo ad alta quota, aereo a bassa quota e terrestre.

Nel rilievo aereo a bassa quota (altezza di volo = 10-40 m) o ad alta quota (altezza di volo >1 km), l'acquisizione delle immagini avviene generalmente in posizione nadirale. Inoltre, il rilievo convenzionale viene effettuato previa impostazione di un piano di volo caratterizzato da uno schema a strisciate (Fig. 6). L'impostazione del piano di volo consiste nella scelta della quota di volo e della velocità di avanzamento dell'aeromobile,  $V_a$ , nel calcolo dell'interasse tra le strisciate  $A$ , e della base di avanzamento,  $B$ , ovvero della distanza percorsa dall'aeromobile tra due scatti successivi, ed infine nell'impostazione dello *shutter time* della camera,  $t$ , che è l'intervallo di tempo tra due scatti successivi. Generalmente, per la tecnica SfM,  $B$  è calcolato considerando una sovrapposizione longitudinale dei fotogrammi (*overlap*) dell'80% e  $A$  considerando un sovrapposizione trasversale dei fotogrammi (*overside*) del 60% (Eltner et al., 2015).

Il rilievo terrestre, invece, è caratterizzato da una distanza di presa relativamente bassa e variabile e inoltre, l'orientamento delle prese è obliquo rispetto alla scena ripresa. Per quanto concerne lo schema di acquisizione, bisogna acquisire ogni punto della scena da almeno tre punti di vista differenti.



**Fig. 6** - Schematizzazione di piano di volo per l'acquisizione fotogrammetrica da aereomobile



Durante le riprese fotografiche sia da terra che da aereomobile, le condizioni di luce devono rimanere quanto più possibile costanti. Tuttavia, l'algoritmo SIFT nella fase di *matching* riesce ad allineare anche le foto che presentano piccole variazioni di luminosità.

Uno dei parametri più importanti da stabilire nella fase di pianificazione del rilievo fotogrammetrico è la distanza media di presa dei fotogrammi,  $H$ , in quanto influenza la risoluzione del modello finale.

La scelta della risoluzione del modello finale (ortofoto o DEM), si basa principalmente sulle finalità d'uso e in particolare sulle dimensioni degli elementi da investigare. La risoluzione viene espressa tramite il GSD (Ground Sample Distance), che rappresenta la dimensione di un pixel della foto a terra. In altre parole, il GSD indica la quantità di superficie della scena osservata che viene rappresentata in un pixel della foto ed è funzione delle caratteristiche della camera, e in particolare della distanza focale,  $f_d$ , della dimensione del pixel del sensore,  $p_s$ , e della distanza di presa dei fotogrammi,  $H$ .

$$GSD = p_s \left( \frac{H}{f_d} \right) \quad (5)$$

In accordo con l'eq. (5), per fissato valore di risoluzione del modello in output e note le caratteristiche della camera in uso, la distanza di presa  $H$  è univocamente determinata.

### 2.3. Applicazioni della tecnica SfM per la misura dell'erosione canalizzata

L'applicazione della fotogrammetria SfM nelle geoscienze si è rivelata particolarmente interessante per lo studio dei processi erosivi e, in particolare, per la misura dell'erosione idrica canalizzata (Eltner et al., 2016). Tuttavia, il numero di lavori disponibili in letteratura è veramente limitato, sia perché la tecnica è abbastanza recente sia per le difficoltà di disporre di hardware relativamente potenti che riescano ad eseguire l'insieme di calcoli che compongono l'algoritmo.

Uno dei primi lavori in cui viene applicata la tecnica SfM per lo studio dell'erosione canalizzata del suolo risale al 2012. Gli Autori (Castillo et al., 2012) hanno misurato l'erosione gully utilizzando quattro metodi di rilievo in campo: LIDAR, foto-ricostruzione terrestre SfM, profilometro e stazione totale. Il confronto dei quattro metodi ha mostrato chiaramente che la tecnica fotogrammetrica produce risultati confrontabili con quelli ottenuti dal rilievo laser

scanner, mentre il profilometro e la stazione totale tendono sistematicamente a sottostimare il volume di suolo eroso. Tuttavia, l'accuratezza della tecnica fotogrammetrica è, a differenza del LIDAR, fortemente influenzata dalla presenza di vegetazione sulla superficie da rilevare (Lane et al., 2000). Cook et al. (2017), confrontando la nuvola di punti creata a partire da un rilievo fotogrammetrico e la nuvola di punti originata da rilievo TLS, riconoscono che le differenze maggiori nei modelli si riscontrano in corrispondenza di aree vegetate. In particolare, in presenza di vegetazione sparsa, come piccoli cespugli isolati, la tecnica SfM ricostruisce fedelmente sia la superficie del terreno sia il contorno della vegetazione, mentre in presenza di vegetazione densa nessuna delle due superfici è rappresentata accuratamente (Messinger et al., 2016).

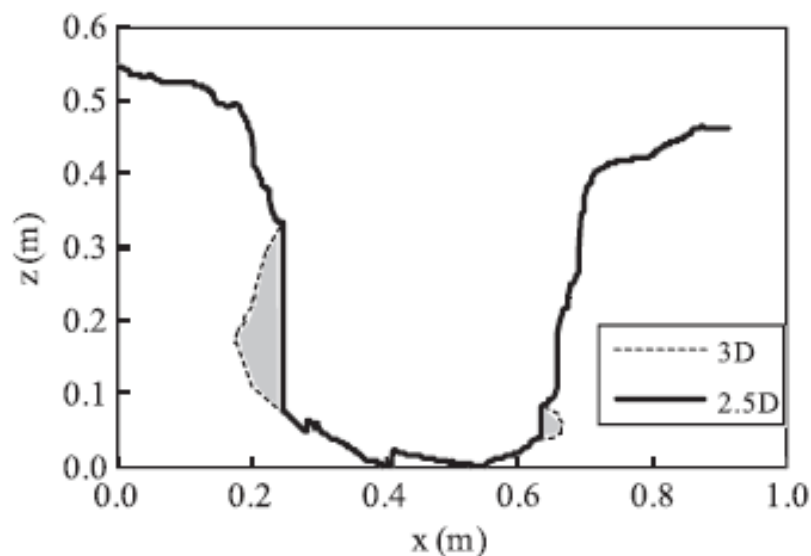
Nella seconda parte dell'indagine condotta da Castillo et al. (2012) viene riportata un'analisi relativa ai costi e ai tempi di esecuzione del rilievo e dell'elaborazione dei dati relativi a 100 metri di canale. In particolare, lo studio mostra che il metodo LIDAR risulta molto oneroso dal momento che, i costi sono 10 volte superiori a quelli sostenuti con la fotoricostituzione 3D, con il profilometro o con la stazione totale. Considerando sia l'accuratezza che i tempi e i costi del rilievo, i metodi 2D (profilometro e stazione totale) risultano validi per studi su larga scala (Castillo et al 2012). In conclusione, gli Autori riconoscono che la fotoricostituzione SfM è una tecnica *remote sensing* promettente per lo studio dei processi erosivi.

Quest'ultima conclusione è stata successivamente confermata da Gómez-Gutiérrez et al. (2014), i quali hanno condotto un'indagine per la verifica di applicabilità della tecnica SfM nel rilievo di alcune testate di gully. La ricostruzione del modello 3D a partire da fotografie terrestri è stata effettuata utilizzando un software "free" scaricabile da internet. Il modello ottenuto è stato confrontato con la nuvola di punti ottenuta con un rilievo TLS rispetto al quale non è risultato affetto da deformazioni lineari o da errori sistematici.

Di Stefano et al. (2017a) hanno condotto il rilievo di un ephemeral gully nell'area sperimentale di Sparacia. L'obiettivo iniziale dell'indagine è stato quello di verificare l'applicabilità della tecnica SfM per la misura di un canale in terra e, successivamente, quello di confrontare le misure relative a un gully naturale ottenute a partire da un rilievo fotografico terrestre, con quelle ottenute sia dal modello 2,5D derivato dal modello tridimensionale sia con un profilometro. Per la verifica di applicabilità della tecnica SfM, sono stati realizzati due canali artificiali in terra e dopo aver effettuato il rilievo fotografico terrestre per la realizzazione dei relativi modelli 3D è stato misurato il volume effettivo dei due canali riempiendoli con un volume noto di acqua. Il confronto tra i volumi reali e i volumi misurati dai rispettivi modelli 3D ha mostrato un'eccellente corrispondenza essendo le misure condotte con il modello 3D affette

da un errore inferiore a 0,5%. La seconda parte dell'indagine, ha mostrato che, con riferimento a prefissate sezioni trasversali, sia il modello 2,5D sia il profilometro forniscono, rispetto al metodo di riferimento (modello 3D), valori delle grandezze geometriche (area, profondità massima, larghezza) caratterizzati da errori sempre inferiori al  $\pm 10\%$ . Inoltre, i tre differenti metodi conducono alla stessa relazione lunghezza del tratto,  $L$  – volume del tratto,  $V$ , anche se è stata riscontrata una leggera sottostima del volume misurato con il modello 2,5D.

Quest'ultimo risultato, in accordo a Frankl et al. (2015), è attribuibile alla circostanza che, il modello 2,5D, rappresentando la superficie da una prospettiva verticale, non è in grado di rappresentare sezioni trasversali in cui ad una coppia di coordinate (x,y) corrispondono differenti valori di elevazione  $z$ . Pertanto, l'area della sezione trasversale viene sottostimata e conseguentemente anche il volume di suolo eroso (Fig 7). Tuttavia, i modelli 2.5D, rispetto ai modelli 3D, sono più facilmente gestibili dai comuni PC e dai software in commercio, e pertanto rimangono sempre un utile strumento per le analisi digitali finalizzate allo studio dei processi geomorfologici.



**Fig.7** - Confronto dei profili derivati dal modello 3D e dal modello 2,5D; in grigio le aree non rappresentate dal modello 2,5D (Di Stefano et al., 2017a)

Frankl et al. (2015) hanno effettuato dei rilievi fotogrammetrici da terra di testate di gully per ricostruirne i rispettivi modelli 3D da cui derivare anche i modelli 2.5D. Dai modelli 3D e 2.5D Frankl et al. (2015) hanno estratto e confrontato i profili di alcune sezioni trasversali. I risultati confermano la sottostima dell'area della sezione misurata a partire dal modello 2.5D, con conseguente sottostima del volume.

Di Stefano et al. (2017b) per testare l'accuratezza del modello 3D ottenuto dal rilievo fotogrammetrico terrestre di alcuni rill incisi su una parcella, hanno realizzato il calco in gesso di un rill lungo 6 m. In particolare, il test è stato condotto confrontando le grandezze geometriche di alcune sezioni trasversali misurate con il modello 3D con quelle effettive del canale misurate mediante il calco. Il risultato del test è stato che i valori misurati a partire dal modello 3D sono praticamente coincidenti con i valori effettivi. Nella seconda parte dell'indagine, gli Autori hanno confrontato i volumi di perdita di suolo misurati a partire dai modelli 3D con i volumi di perdita di suolo misurati in maniera diretta. In particolare, è stato confrontato il volume di sedimento prodotto a seguito del passaggio di una corrente limpida su alcuni solchi preventivamente modellati, e raccolto nella vasca di accumulo posta a valle della parcella, con il volume di suolo eroso misurato come differenza tra il modello 3D antecedente al passaggio della corrente e quello successivo al passaggio della corrente. Le misure di perdita di suolo ottenute dai modelli 3D sono risultate affette da errori variabili da -6,4% a 16,8% rispetto al volume effettivo del sedimentato in vasca.

Nella foto-ricostruzione 3D con approccio SfM, di aree vaste e/o difficilmente accessibili, tra le fasi di campo più onerose in termini di costi e tempo si colloca la materializzazione e la successiva acquisizione delle coordinate x, y e z, dei punti di controlli (GCP). L'onerosità delle suddette fasi aumenta proporzionalmente con il numero di GCP, scelto in accordo alle dimensioni e alla complessità morfologica dell'area investigata.

Kaiser et al. (2014) hanno dimostrato che, per la misura del volume di suolo eroso nei gully e nei rill, l'approccio SfM "non-GCP", che non fa uso di GCP, può ridurre notevolmente i tempi del rilievo mantenendo livelli di accuratezza accettabili. In particolare, gli Autori, introducendo nell'area da rilevare oggetti di dimensioni note, riuscivano a scalare il modello 3D senza far uso di punti di controllo. L'accuratezza dell'approccio "non-GCP" è stata positivamente valutata effettuando un confronto con il rilievo TLS effettuato nella medesima area.

Tuttavia, in accordo con le finalità delle indagini, oltre alla misura dei volumi di suolo eroso, spesso, è anche opportuna l'estrazione dal modello 3D, sia del profilo longitudinale del solco, per la determinazione, ad esempio, della pendenza del thalweg, sia del profilo relativo a prestabilite sezioni trasversali, per la determinazione della sezione idraulica e delle relative variabili geometriche (larghezza, profondità massima, contorno bagnato e area). La determinazione delle suddette grandezze, presuppone che il modello 3D sia, oltre che scalato, privo di deformazioni e opportunamente orientato in accordo alla situazione reale. Pertanto, risulta indispensabile l'acquisizione, tramite strumenti topografici ad elevata accuratezza (stazione totale, dGPS) di

GCP opportunamente materializzati a terra con l'uso di picchetti in cui sono affissi dei target che facilitano l'individuazione a video.

Il rilievo fotografico terrestre per la ricostruzione 3D della superficie, si rivela uno strumento idoneo per studi su aree di estensione compresa tra 10 e 100 m (James e Robson, 2012).

I SAPR (*Sistemi a pilotaggio remoto*) o UAV (*Unmanned Aerial Vehicles*) per applicazioni fotogrammetriche sono, invece, una valida soluzione per il rilievo di aree relativamente estese. Glendell et al. (2017) hanno monitorato, tra il 2014 e il 2015, 39 gully effettuando per ogni canale sia un rilievo TLS sia un rilievo fotogrammetrico da terra (GP) e da drone (UAV). Gli Autori, assumendo il TLS come metodo di riferimento, concludono che sia GP che UAV danno risultati soddisfacenti. L'analisi costi-benefici condotta, evidenzia che con riferimento al singolo sito, la fase di acquisizione dei dati con GP è meno costosa di UAV e TLS, mentre la fase di elaborazione dei dati GP risulta più laboriosa rispetto agli altri due metodi poiché la quantità di dati acquisiti per metro quadro di superficie è nettamente superiore. Gli Autori sostengono inoltre che gli UAV sono un valido sistema di acquisizione per aree con un'estensione superiore a 0,2 ha, anche se la presenza di vento o in generale di condizioni climatiche avverse possono limitarne l'applicabilità.

Stoker et al. (2015) hanno indagato sull'efficacia della combinazione GP-UAV nel rilievo di alcune testate di gully. Lo studio ha avuto lo scopo di verificare le differenze dei modelli 3D ottenuti con i due differenti metodi (GP e UAV) e di verificare se la combinazione dei due modelli produce miglioramenti significativi nelle stime volumetriche di perdita di suolo. Gli Autori affermano, in conclusione, che la combinazione dei dati UAV con i dati GP, rispetto all'elaborazione di una sola tipologia di dati, produce un significativo miglioramento della ricostruzione 3D dei gully. Inoltre, nello studio è dimostrata la scarsa accuratezza dei modelli ottenuti da UAV in corrispondenza di pareti ripide e con pendenze superiori a 50-60°, la cui ricostruzione può essere migliorata integrando i dati terrestri con quelli UAV.

In definitiva, dall'analisi della letteratura disponibile, si evince che la tecnica SfM è stata ampiamente verificata utilizzando diverse piattaforme di acquisizione (GP e UAV) e diverse scale (rill, ephemeral-gully e gully). I risultati confermano l'affidabilità della tecnica, in quanto è poco costosa ed automatizzata, la fase di acquisizione è relativamente rapida ed i risultati sono accurati.

In alcune circostanze, però, la tecnica SfM presenta i seguenti limiti:

- gli oggetti spigolosi tendono ad avere gli angoli smussati, soprattutto se la distanza di acquisizione delle immagini è elevata (Cook et al. 2017);

- in corrispondenza di superfici prive di discontinuità l'algoritmo SIFT nella fase di *matching* non rileva punti omologhi tra differenti immagini;
- nelle aree vegetate la superficie non è ben ricostruita (Messinger et al., 2016);
- nel modello finale, soprattutto per i rilievi terrestri, sono presenti aree con differenti livelli di accuratezza, poiché la distanza di acquisizione non è rigorosamente costante (differente GSD).

### 3. LEGGE DI RESISTENZA AL MOTO PER LE CORRENTI NEI RILLS

#### 3.1. Generalità

Uno dei problemi più rilevanti, e di indubbio interesse applicativo, nel campo dell'idraulica delle correnti a superficie libera è <<to estimate the velocity of a river of which one knows the width, the depth and the slope>> (Du Buat, 1786). Ben 230 anni dopo questa affermazione, la definizione delle caratteristiche geometriche della scabrezza e l'individuazione delle variabili idrauliche che intervengono nella valutazione delle resistenze al moto sono tematiche di studio corrente (Ferro e Porto, 2016).

L'intensità del fenomeno erosivo di tipo rill dipende dalle caratteristiche idrauliche della corrente che muove all'interno del solco (Foster et al. 1984). La messa a punto di modelli di previsione dell'erosione rill o il miglioramento di quelli esistenti, richiede informazioni che descrivono l'idraulica dei rill tenendo conto anche della variazione locale dei parametri idraulici (Foster et al., 1984).

Ai fini della modellazione, oltre la portata,  $Q$ , è necessario identificare le altre grandezze idrauliche che condizionano i processi di distacco e trasporto delle particelle di suolo quali la larghezza in superficie  $W$ , il tirante idrico medio  $h_m$ , il coefficiente di scabrezza e la velocità media della corrente,  $V$ .

La stima della velocità media della corrente,  $V$ , nei rills può essere condotta utilizzando i seguenti due approcci:

- relazioni di geometria idraulica (Leopold e Maddock, Teoria del Regime, 1953);
- leggi di resistenza al moto.

In accordo a Leopold e Maddock (1953), la geometria idraulica dei rill può essere descritta mediante tre equazioni potenziali che legano  $V$ ,  $W$  ed  $h_m$  alla portata  $Q$

$$V = k_o Q^m \quad (6)$$

$$W = a Q^b \quad (7)$$

$$h_m = c Q^e \quad (8)$$

in cui  $k_o$ ,  $m$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $e$  sono coefficienti che soddisfano le condizioni  $ack_o = 1$  e  $b + e + m = 1$ . Le misure condotte da Govers (1992) ( $k_o = 3,52$ ,  $m = 0,294$ ), Abrahams et al. (1996) ( $k_o = 2,22$ ,  $m = 0,334$ ) e Govers et al. (2000) ( $k_o = 4,19$ ,  $m = 0,344$ ) hanno evidenziato la tendenza

dell'esponente  $m$  ad assumere valori prossimi a 0,3. Differenti studi (Gilley et al., 1990; Abrahams et al., 1996) hanno stabilito che il valore del coefficiente  $b$  dell'eq.(7) è pari a 0,3. Pertanto, assumendo  $m = b = 0,3$ , risulta  $e = 0,4$ . Le differenze nelle relazioni  $Q$ - $V$  calibrate da differenti Autori sono principalmente riconducibili ai valori di  $k_o$  e sono spiegabili con la differente scabrezza del fondo dei rill (suolo nudo (Govers, 1992); suolo con frammenti di roccia (Govers et al., 2000) e con la presenza di elementi in ghiaia (Abrahams et al., 1996)).

Foster et al. (1984) hanno condotto una sperimentazione di laboratorio utilizzando tre rill a fondo fisso con valori della pendenza media  $s$  pari a 3%, 6% e 9%, ottenendo che la velocità  $V$  ( $m\ s^{-1}$ ) dipende sia dalla portata  $Q$  ( $m^3\ s^{-1}$ ) sia dalla pendenza del rill, in accordo alla seguente equazione:

$$V = 16 Q^{0.28} s^{0.48} \quad (9)$$

Di Stefano et al. (2013), utilizzando i rilievi dei rill formatisi nelle parcelle dell'area sperimentale di Sparacia con pendenza del 14,9% del 22% e del 26 %, hanno testato l'applicabilità della (9).

Nell'indagine condotta da Di Stefano et al. (2013) il rilievo è effettuato sull'impronta dei rill alla fine dell'evento e, pertanto, i rill rilevati sono il risultato finale dell'evoluzione morfologica avvenuta durante il processo erosivo. I rill rilevati nell'indagine di Di Stefano et al. (2013) vanno, pertanto, considerati come canali a fondo fisso, in cui è attesa la dipendenza di  $V$  dalla pendenza. Infatti, Di Stefano et al. (2013), mediante regressione multipla non lineare delle misure, hanno ottenuto la seguente relazione:

$$V = 8.5 Q^{0.26} s^{0.37} \quad (10)$$

Govers (1992) ha osservato che, a differenza dei rill a fondo fisso, per i rill a fondo mobile, nei quali la corrente incanalata può variarne la morfologia, la velocità risulta indipendente dalla pendenza. Questo risultato è stato confermato da Nearing et al. (1997), Takken et al. (1998), Hessel et al. (2003) e Gimenez e Govers (2001). Gimenez e Govers (2001) hanno giustificato l'assenza di un effetto della pendenza del rill sulla velocità osservando che al crescere della pendenza aumenta la velocità ma contemporaneamente cresce, per effetto dei fenomeni erosivi,



anche la scabrezza del fondo che determina una riduzione di velocità controbilanciando il primo effetto.

Govers (1992), sulla base di 409 misure di velocità effettuate da differenti Autori su solchi erodibili, ha determinato la seguente relazione empirica:

$$V = 3.52 Q^{0.294} \quad (11)$$

Takken et al. (1998) sono pervenuti alla conclusione che la velocità della corrente è adeguatamente stimata con la (11) se la combinazione corrente-condizioni del suolo è tale che la corrente può liberamente adeguare la geometria del fondo alle sue condizioni idrauliche. La generalità di questa conclusione è stata messa in dubbio da Abrahams et al. (1996) che, sulla base di misure condotte su rill con fondo parzialmente rivestito in ghiaia, hanno invece osservato che la velocità dipende anche dalla pendenza del rill e dalla scabrezza del fondo.

In definitiva, i risultati delle suddette sperimentazioni segnalano sia effetti discordanti per quanto concerne l'effetto della pendenza sulla velocità media della corrente, sia che non è possibile utilizzare un'unica equazione  $Q$ - $V$  per differenti condizioni di scabrezza del rill.

Giménez e Govers (2001) per spiegare l'effetto feedback della geometria dell'alveo sull'idraulica della corrente incanalata propongono il seguente meccanismo:

- a) piccole variazioni locali del tirante idrico, della velocità e dell'erodibilità del suolo producono erosione localizzata e quindi la formazione di una piccola depressione nell'alveo;
- b) questa depressione provoca un risalto idraulico in cui la dissipazione energetica produce ulteriore erosione formando una pozza (*pool*);
- c) all'interno della pozza la corrente è lenta;
- d) la corrente accelera nella direzione del moto (verso valle) diventando veloce;
- e) il fondo si presenta come una successione di sequenze di salti (*step*), in cui la corrente è veloce, e pozze (*pool*) dove la corrente è lenta.

Il profilo longitudinale a morfologia “*step-pool*”, generalmente creato dal passaggio di correnti con un elevato trasporto solido, è comune nei canali ripidi e stretti (Chin e Wohl, 2005; Curran e Wilcock, 2005; Church e Zimmermann, 2007; Comiti et al., 2009; Waters e Curran, 2012). Il passaggio di correnti idriche con elevata portata e con un carico solido non significativo può mobilitare gli *step* (Rosport, 1994). In particolare, gli *step-pool* possono migrare verso valle o essere erosi più velocemente quando non migrano (Waters e Curran, 2012; Turowski et al.,

2009). La stabilità della sequenza di *step* è associata al mantenimento dell'interdistanza fra di essi nel tempo e si verifica quando la spazatura corrisponde alla configurazione di massima resistenza al moto (Abrahamas et al., 1996). Le resistenze al moto negli alvei a profilo *step-pool* sono principalmente di tipo morfologico (*morphological-resistance*), mentre, la componente “*grain*” risulta meno rilevante (Canovaro et al., 2004; Church e Zimmermann, 2007; D'Agostino e Michelini, 2015).

Il secondo approccio per la stima della velocità  $V$  fa invece riferimento allo studio del moto uniforme delle correnti a pelo libero. Negli alvei naturali difficilmente le correnti in moto sono rigorosamente uniformi; tuttavia esse possono essere considerate uniformi poiché si riscontrano frequentemente tratti, anche abbastanza lunghi, in cui il profilo longitudinale, il profilo delle sezioni trasversali e la velocità sono soggetti a variazioni trascurabili (De Marchi et al., 1977).

Lo studio del moto uniforme si basa sulla determinazione teorica della legge di resistenza al moto per integrazione di una nota distribuzione della velocità nella sezione trasversale (Ferro, 1997; 2003). La suddetta legge è stata sviluppata per via teorica, in maniera piuttosto agevole, per quelle sezioni in cui, in virtù della simmetria (circolare, rettangolare molto larga), e con ben definite condizioni al contorno, è stato possibile dedurre la legge di distribuzione delle velocità.

La portata di una corrente a superficie libera può essere calcolata se una distribuzione teorica può essere applicata ai profili di velocità misurati in differenti verticali della sezione trasversale (Ferro e Baiamonte, 1994) e possono essere determinate le relazioni che stabiliscono come i coefficienti della distribuzione teorica (logaritmica, potenza, Dean-Finley) (Baiamonte et al., 1995; Ferro, 2003) variano da una verticale all'altra (Ferro e Giordano, 1993).

Notoriamente, sia per la sezione circolare sia per quella rettangolare molto larga, il ricorso alla teoria del moto turbolento di Prandtl-von Karman conduce alla deduzione della legge logaritmica di distribuzione delle velocità (Ferro, 2005). Mediante un'operazione di integrazione è possibile poi valutare la velocità media,  $V$ , e definire, conseguentemente, la legge di resistenza al moto che nel caso di regime puramente turbolento ed in condizioni di *microscabrezza* ha la seguente forma:

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = A_o + B_o \log \left( \frac{R}{k_s} \right) \quad (12)$$

in cui  $f$  è l'indice di resistenza di Darcy-Weisbach,  $A_o$  e  $B_o$  sono due coefficienti numerici e  $k_s$  una grandezza proporzionale alla scabrezza assoluta.

Le resistenze al moto crescono all'aumentare della concentrazione degli elementi grossolani fino a quando il comportamento degli elementi stessi ai fini della dissipazione energetica è a *funzionamento singolo*. Superato il valore di concentrazione discriminante questo tipo di comportamento, a partire dal quale hanno inizio interferenze idrodinamiche tra gli elementi, le resistenze al moto decrescono all'aumentare della concentrazione.

Come osservato da differenti Autori (Marchand et al., 1984; Bathurst, 1988; Ferro, Baiamonte, 1994; Ferro e Pecoraro, 2000) il profilo di velocità presenta una forma a S con velocità in prossimità della superficie libera marcatamente più elevate di quelle in prossimità del fondo.

Studi precedenti (Bathurst et al, 1981; Ferro, Giordano, 1991; Powell, 2014) hanno suggerito che, in condizioni di *macroscabrezza*, le resistenze al moto sono principalmente imputabili alla disposizione degli elementi di scabrezza sul fondo alveo e la legge di resistenza del tipo potenza si è rivelata, sperimentalmente, la più appropriata (Ferro e Giordano, 1993).

Nell'ipotesi di moto uniforme, la legge di resistenza è comunemente espressa dall'equazione di Chezy, che, nella forma di Darcy-Weisbach, è espressa dalla seguente relazione:

$$V = \sqrt{\frac{8 g R s}{f}} \quad (13)$$

che può essere riscritta nella seguente forma:

$$\frac{V}{u^*} = \sqrt{\frac{8}{f}} \quad (14)$$

essendo  $u^* = \sqrt{gRs}$  la velocità d'attrito e  $g$  l'accelerazione di gravità.

Se l'ipotesi di indipendenza della velocità della corrente nei rill formulata da Govers (1992) è corretta, l'assunzione di un indice di Darcy-Weisbach indipendente da  $s$  nella (13) condurrebbe alla conclusione che la (13) è inappropriata per le correnti in moto in rill erodibili. Infatti, l'indipendenza dalla pendenza della velocità  $V$  nella (13) può ottenersi solo se l'indice di Darcy-Weisbach può crescere con la pendenza  $s$ .

Le formulazioni classiche, delle leggi di resistenza, che si basano su una resistenza di tipo *grain*, non descrivono accuratamente la resistenza al moto nei canali con profilo a *step-pool* (Aberle e Smart, 2003; Church e Zimmermann, 2007). In particolare Aberle e Smart (2003) hanno criticato l'uso della dimensione delle particelle che costituiscono il fondo dell'alveo per

rappresentare la scabrezza assoluta del canale in quanto, in questo caso la scabrezza del fondo che dipende dalla presenza di strutture originate dall'aggregazione di particelle, non risulta trascurabile.

Nella valutazione delle resistenze al moto di una corrente in un rill occorre, quindi, tenere conto sia della resistenza imputabile alla natura della superficie con la quale la corrente viene a contatto (*grain-resistance*), sia di quella dovuta alla forma degli elementi di scabrezza (*drag-resistance*) sia, infine, alla resistenza dovuta alla presenza di forme di fondo come gli *step-pool* (Giménez, Govers, 2001; Giménez et al., 2004).

La distribuzione di velocità può essere espressa mediante un legame funzionale che rappresenta il processo fisico; pertanto, l'analisi dimensionale può essere utilmente impiegata per l'inquadramento analitico del problema (Barenblatt, 1993; Ferro, 1997).

In accordo con il Teorema di Buckingham dell'analisi dimensionale (Barenblatt, 1979; 1987) se nel legame funzionale rappresentativo di un fenomeno fisico compaiono  $n$  variabili dimensionali che coinvolgono  $k$  quantità fisiche fondamentali (ad esempio, massa, lunghezza e tempo), lo stesso processo può essere rappresentato con un legame funzionale nel quale figurano  $n-k$  gruppi adimensionali,  $\Pi_i$  ( $i = 1, \dots, n - k$ ).

Per determinare l'esatta forma matematica del legame funzionale che rappresenta il processo fisico può essere applicata la teoria dell'autosimilarità (Barenblatt, 1979; 1987).

Un fenomeno è definito autosimile in un dato gruppo adimensionale  $\Pi_n$  quando la relazione funzionale che esprime il fenomeno fisico  $\Pi_1 = \phi(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_n)$ , in cui  $\phi$  è un simbolo funzionale, è indipendente da  $\Pi_n$ . Le soluzioni autosimili di un problema devono essere ricercate in corrispondenza delle condizioni al contorno, ossia studiando il comportamento della funzione  $\phi$  quando  $\Pi_n \rightarrow 0$  e  $\Pi_n \rightarrow \infty$ .

Quando la funzione  $\phi$  ha un limite finito diverso da zero, il fenomeno non è influenzato da  $\Pi_n$  ed è espresso dalla relazione funzionale  $\Pi_1 = \phi_1(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-1})$ , e la autosimilarità è denominata *completa* (CSS) nel raggruppamento adimensionale  $\Pi_n$ .

Quando la funzione  $\phi$  ha un limite finito e eguale a zero o tende a infinito, il fenomeno è espresso dal seguente legame funzionale:

$$\Pi_1 = \dots \Pi_n^\beta \phi_2(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-1}) \quad (15)$$

in cui  $\phi$  è un simbolo funzionale e  $\beta$  è una costante numerica. Questa condizione è denominata autosimilarità incompleta (ISS) nel raggruppamento  $\Pi_n$  (Barenblatt 1979; 1987). L'ipotesi di autosimilarità incompleta (ISS) permette la deduzione della distribuzione potenziale della velocità  $v$ , per integrazione, la determinazione teorica della legge di resistenza al moto (Barenblatt e Prostokishin, 1993; Ferro e Pecoraro, 2000).

### **3.2. Determinazione teorica del profilo di velocità e della legge di resistenza al moto**

Barenblatt (1993) ha evidenziato che sia la legge logaritmica di distribuzione delle velocità (Ferro, 2005) che la legge di tipo potenza, sono indifferentemente utilizzate per descrivere la distribuzione della velocità locale  $v(y)$ , in cui  $y$  è la distanza dal fondo, nonostante le derivazioni delle due leggi si basano su ipotesi completamente diverse.

Per le correnti a superficie libera, in moto uniforme e in regime turbolento, la distribuzione della velocità locale  $v(y)$ , lungo una determinata verticale è espressa dal seguente legame funzionale (Barenblatt 1987; 1993; Ferro, 1997):

$$\varphi\left(\frac{dv}{dy}, y, h, d, u_*, \rho, \mu\right) = 0 \quad (16)$$

in cui  $\varphi$  è un simbolo funzionale,  $h$  è il tirante idrico,  $d$  è una misura della scabrezza,  $u_*$  è la velocità d'attrito,  $\rho$  è la densità dell'acqua e  $\mu$  è la viscosità dell'acqua.

In accordo con il Teorema di Buckingham dell'analisi dimensionale (Barenblatt, 1979; 1987) la (16) può essere espressa in termini adimensionali:

$$\Pi_1 = \phi_3(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4) \quad (17)$$

dove  $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4$  sono quattro gruppi adimensionali e  $\phi_3$  è un simbolo funzionale.

Scelte come grandezze dimensionalmente indipendenti  $y, u_*$  e  $\mu$ , il gruppo adimensionale  $\Pi_1$  assume la seguente espressione:

$$\Pi_1 = \frac{dv}{dy} y^a u_*^b \mu^c \quad (18)$$

dove  $a, b$  e  $c$  sono costanti numeriche. Sostituendo nell'equazione (18) le unità di misura di ogni singola variabile si ottiene la seguente equazione:

$$\Pi_1 = L T^{-1} L^{-1} L^a L^b T^{-b} F^c T^c L^{-2c} \quad (19)$$

in cui  $F$  = forza,  $T$  = tempo e  $L$  = lunghezza.

Poiché il raggruppamento  $\Pi_1$  è adimensionale, i valori numerici delle costanti  $a$ ,  $b$  e  $c$  sono deducibili risolvendo il seguente sistema di tre equazioni che deriva dalla (19):

$$0 = 1 - 1 + a + b - 2c \quad (20a)$$

$$0 = -1 - b + c \quad (20b)$$

$$0 = c \quad (20c)$$

Introducendo la terna di coefficienti  $a = 1$ ,  $b = -1$  and  $c = 0$  soluzione del sistema (20) nella (18) il raggruppamento  $\Pi_1$  è espresso dalla seguente relazione:

$$\Pi_1 = \frac{y}{u_*} \frac{dv}{dy} \quad (21)$$

Ripetendo la procedura per tutti i raggruppamenti adimensionali si ottiene:

$$\Pi_2 = \frac{h}{y} \quad (22)$$

$$\Pi_3 = \frac{d}{y} \quad (23)$$

$$\Pi_4 = \frac{u_* y}{v_k} \quad (24)$$

Barenblatt (1987) inoltre ha suggerito di combinare i gruppi adimensionali originari per ottenere nuovi raggruppamenti  $\Pi$ .

Dall' eq.(22) e (23) si deduce:

$$\Pi_{2,3} = \frac{\Pi_2}{\Pi_3} = \frac{h}{y} \frac{y}{d} = \frac{h}{d} \quad (25)$$

Dall' eq. (24), (23) e (25) si ottiene:

$$\Pi_{4,3,2} = \Pi_4 \Pi_3 \Pi_{2,3} = \frac{u_* y}{v_k} \frac{d}{y} \frac{h}{d} = \frac{u_* h}{v_k} \quad (26)$$

In definitiva il legame funzionale (17) può essere riscritto nella seguente forma esplicita:

$$\Pi_1 = \phi_4(\Pi_4, \Pi_{4,3,2}, \Pi_{2,3}) \quad (27)$$

in cui  $\phi_4$  è un simbolo funzionale.

Introducendo nell'eq. (27) l'espressione di ogni gruppo adimensionale, il legame funzionale può essere riscritto:

$$\frac{y}{u_*} \frac{dv}{dy} = \phi_4 \left( \frac{u_* y}{\nu_k}, \frac{u_* h}{\nu_k}, \frac{h}{d} \right) \quad (28)$$

Assumendo la ISS in  $u_* y / \nu_k$ , e integrando l'eq.(28) si ottiene la seguente distribuzione potenziale della velocità (Barenblatt e Monin, 1979; Ferro and Pecoraro, 2000):

$$\frac{v}{u_*} = \Gamma \left( \frac{u_* y}{\nu_k} \right)^\delta \quad (29)$$

in cui  $\Gamma$  è da stimare utilizzando le misure di velocità (Barenblatt e Prostokishin, 1993; Ferro e Pecoraro, 2000).

L'esponente  $\delta$ , viene determinato applicando la seguente relazione (Castaing et al., 1990; Barenblatt, 1991):

$$\delta = \frac{1.5}{\ln Re} \quad (30)$$

Integrando la distribuzione potenziale della velocità (29) (Barenblatt, 1993) si ottiene la seguente espressione per il calcolo del coefficiente di Darcy-Weisbach (Ferro e Pecoraro, 2000):

$$f = 8 \left[ \frac{2^{1-\delta} \Gamma Re^\delta}{(\delta+1)(\delta+2)} \right]^{-2/(1+\delta)} \quad (31)$$

Considerando che  $(f/8)^{1/2} = Re_*/Re$ , in cui  $Re_* = u_* h / \nu_k$  è il numero di Reynolds calcolato con la velocità d'attrito, dall'eq. (31) si ottiene:

$$\Gamma = \frac{(\delta+1)(\delta+2) Re}{2^{1-\delta} Re_*^{1+\delta}} \quad (32)$$

Ponendo nell'eq. (29)  $y = \alpha h$  la distanza  $y$  dal fondo in cui la velocità locale è pari al valore medio  $V$ , si deduce:

$$\Gamma = \frac{V}{u_* \left( \frac{u_* \alpha h}{\nu_k} \right)^\delta} \quad (33)$$

in cui il coefficiente  $\alpha$ , che è inferiore a 1, tiene conto sia che si considera un profilo di velocità unico per tutta la sezione trasversale, sia che la velocità  $V$  è localizzata al di sotto della superficie libera.



## **4. MATERIALI E METODI**

### **4.1. Installazione sperimentale**

Le prove sperimentali, condotte presso le parcelle del campo sperimentale di idraulica del Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Forestali (Fig. 8), hanno riguardato misure idrauliche su correnti in moto nei rill e misure della geometria di alcune sezioni trasversali dei solchi. Lungo la linea di massima pendenza delle parcelle sono stati incisi dei solchi rettilinei di lunghezza pari a circa 6 metri in cui è stata immessa una corrente idrica limpida di nota portata (Fig. 9).



**Fig. 8** - Vista delle parcelle utilizzate per la sperimentazione

Le due parcelle, aventi dimensioni  $2 \times 7 \text{ m}^2$ , realizzate in rilevato rispetto al piano di campagna, sono delimitate su tre lati da pareti in cemento armato e poggiate su una base realizzata con gabbioni metallici. Il suolo nelle parcelle è a tessitura argillosa (73% argilla, 22,5% limo e 4,5% sabbia) e, in base al grado di riempimento, la pendenza può raggiungere un valore massimo pari al 26% per una parcella e al 15% dipendentemente dalla parcella .

Lungo le pareti esterne di ciascuna parcella è fissata una passerella perimetrale in legno e metallo posta a 1,20 dal piano campagna.

All'estremità di valle di ciascuna delle due parcelle è localizzata una vasca di accumulo dei deflussi di circa 500 litri realizzata in lamierino zincato di spessore pari a 3 mm.

Ciascuna delle due vasche, avente larghezza pari a quella della parcella è dotata di uno scarico di fondo di diametro pari a 2 pollici.

Perimetralmente alle parcelle sono stati fissati dei target (due nell'estremità di valle, due nell'estremità di monte e due nella parte intermedia), che sono stati rilevati con stazione totale e utilizzati come punti di controllo a terra (Ground Control Point, GCP) per i rilievi fotogrammetrici, (Fig. 10).



**Fig. 9** - Modellamento dei solchi con una corrente idrica limpida (a) e vista dei solchi incisi nella parcella sperimentale (b)

#### 4.2. Rilievo e misura dei rill

La misura delle grandezze geometriche dei canali è stata effettuata mediante tecniche *image based* basate su un rilievo fotogrammetrico terrestre, eseguito alla fine di ogni serie di prove, che prevede l'acquisizione, con una camera digitale (Samsung PL210 – 14,2 Mpx), di 70 fotogrammi. Successivamente, le immagini sono state elaborate dal software Agisoft Photoscan Professional che, tramite algoritmi di foto-ricostruzione 3D (SfM ed MVS), crea il modello 3D della scena acquisita (Fig.10). Considerando sia la distanza media di presa dei fotogrammi,  $H$  (2 metri), sia le caratteristiche tecniche della camera ( $f_d=4,9$  mm e  $p_s=0,0015$  mm/pix), in accordo con l'eq.5, la risoluzione,  $GSD$ , del modello finale è pari a 0,6 mm/pix.



**Fig. 10** - Modello 3D della parcella sperimentale ed individuazione a video dei GCP (a) e vista 3D di una porzione di rill

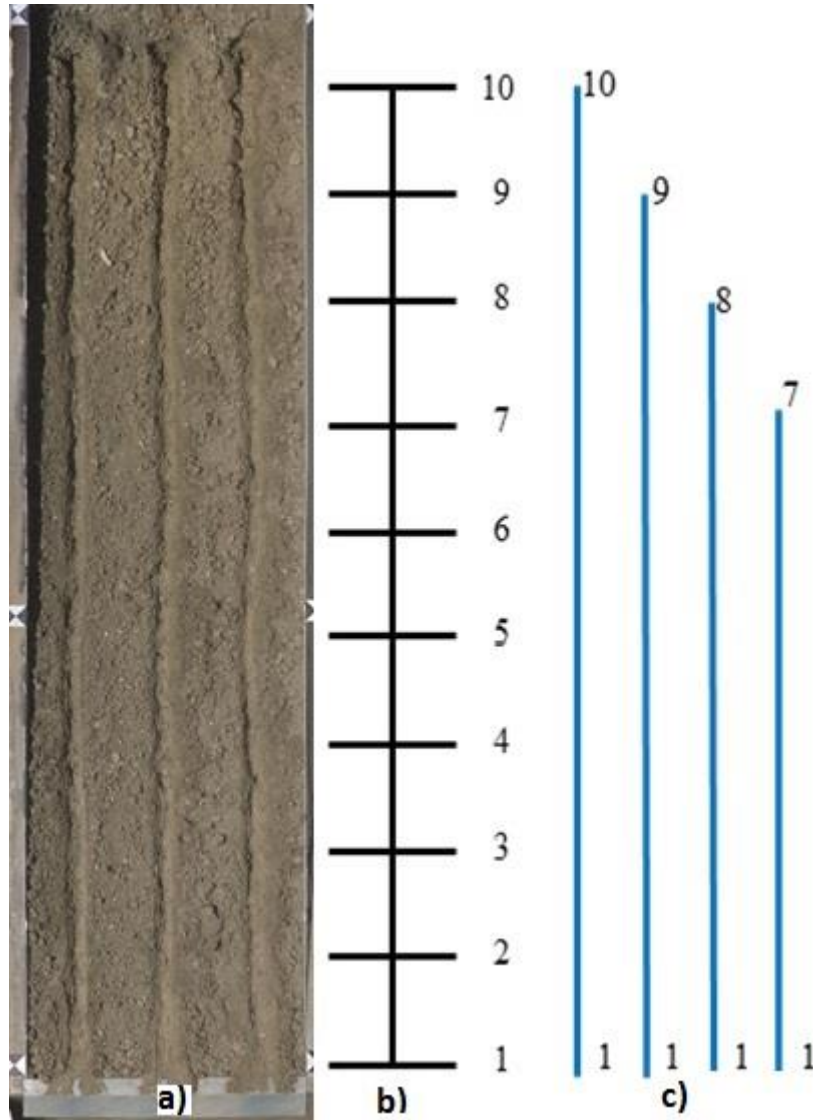
Come si evince dalla figura 10, nel modello 3D sono individuati a video i GCP a cui, nella fase di *bundle adjustment* si assegnano le coordinate  $x,y,z$ , preventivamente determinate in campo tramite stazione totale. L'attribuzione ad ogni GCP di coordinate locali, ha permesso sia di scalare ed orientare il modello 3D, sia di perfezionare il calcolo dei parametri di calibrazione della camera per migliorarne l'accuratezza nella fase di *bundle adjustment* della SfM.

Ottenuto il modello 3D, tramite il software CloudCompare, sono stati estratti, per ogni rill, i profili di 10 prestabilite sezioni trasversali, caratterizzate da una distanza longitudinale costante pari a 0,624 m. I profili ottenuti sono stati infine importati su CAD per effettuare le misure delle variabili geometriche.

#### 4.3. Misura delle caratteristiche idrauliche della corrente in moto

Le misure idrauliche delle correnti in moto nei rill sono state condotte su rill preventivamente modellati dal passaggio, per tre minuti, di una corrente idrica limpida caratterizzata da una portata,  $Q$ , pari a  $0,1 \text{ L s}^{-1}$ . Questa fase di pre-modellamento ha prodotto rill a profilo *step-pool*.

Per ogni solco sono state stabilite 10 sezioni trasversali e 9 tratti, ciascuno corrispondenti alla porzione di rill compresa tra una sezione di misura e quella finale a valle del solco (Fig. 11). Pertanto, ogni tratto includeva un numero di segmenti variabile da 1 a 9.



**Fig.11** - Vista planimetrica di una parcella (a) e rappresentazione schematica delle sezioni, dei segmenti (b) e dei tratti (c)

Per ogni prova, all'estremità di monte del solco è stata immessa una corrente con portata costante (da  $0,1$  a  $1 \text{ L s}^{-1}$ ) misurata con il metodo volumetrico. Al fine di evitare fenomeni erosivi localizzati, nel punto di immissione della corrente è stato posto un dispositivo di alimentazione realizzato con una rete a maglie metalliche con lo scopo di frangere il getto (Fig. 12).

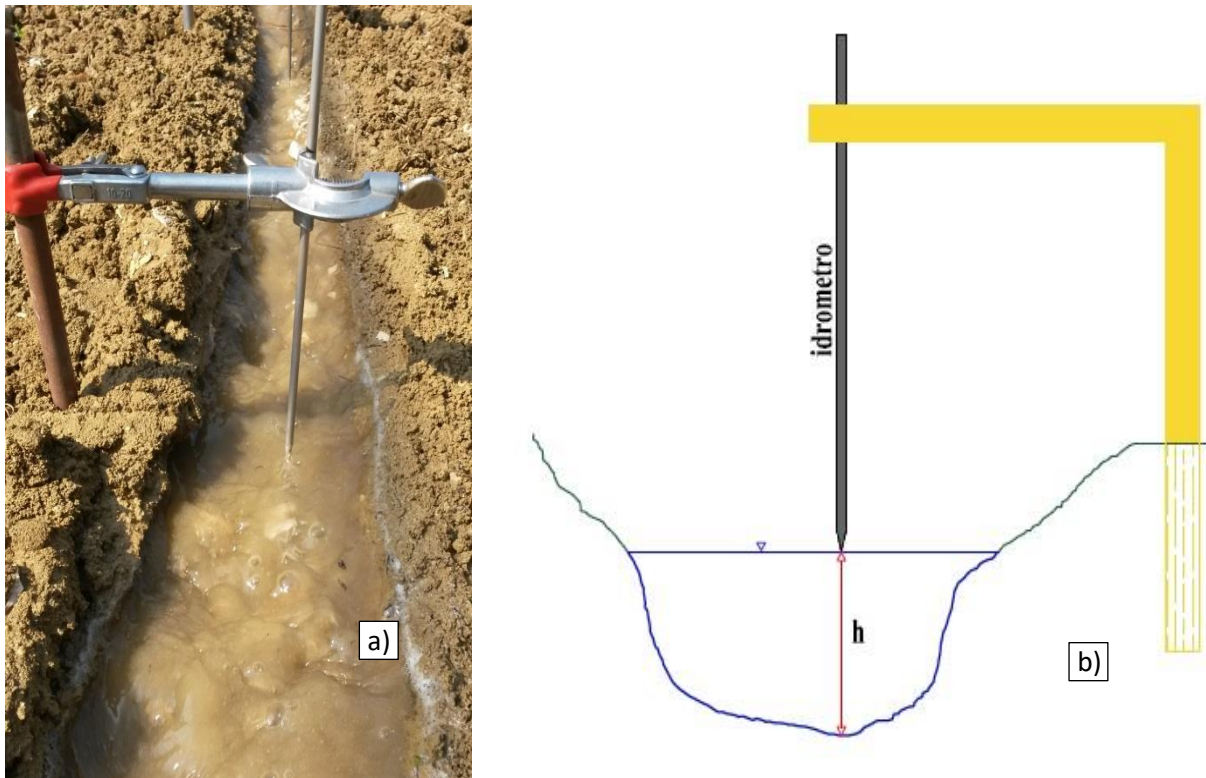


**Fig. 12** - Dispositivo per l'immissione della corrente nel rill

Poco prima della fine di ogni prova, è stata misurata la portata in uscita con il metodo volumetrico. Con riferimento a tutte le prove condotte, il confronto tra la portata in ingresso e quella in uscita ha evidenziato differenze trascurabili, dovute sia alla bassa permeabilità del suolo argilloso sia alla condizione di saturazione del suolo raggiunta nella fase di modellamento iniziale.

Le misure di velocità sono state condotte mediante il metodo della scia (Line e Meyer, 1988; Govers, 1992; Abrahams et al., 1996). In particolare, sulla corrente idrica in moto, in corrispondenza di ogni sezione trasversale, è stata iniettata una piccola quantità di blu di metilene. Il rapporto tra la lunghezza del tratto e il tempo di percorrenza ha permesso di misurare la velocità superficiale  $V_s$  della corrente. La velocità media della corrente,  $V$ , è stata calcolata come prodotto di un fattore di riduzione  $\alpha_v$  per  $V_s$  (Zhang et al., 2010). In accordo a Emmett (1970) e Li e Abrahams (1997), nella presente indagine è stato utilizzato un valore costante di  $\alpha_v$  pari a 0,8.

In ogni prova, è stato inoltre misurato, il tirante idrico della corrente in corrispondenza delle 10 sezioni trasversali. In particolare, la misura è stata effettuata con un micro-idrometro in corrispondenza del *thalweg* di ogni sezione (Fig. 13).



**Fig.13** - Vista dell'idrometro durante la misura del tirante (a) e schema di misura del tirante per la determinazione della sezione idraulica (blu) (b)

Noti i profili e i valori di  $h$  delle singole sezioni trasversali, sono state determinate le corrispondenti sezioni idrauliche, da cui sono state misurate l'area,  $\sigma$ , il contorno bagnato,  $C$ , e il raggio idraulico,  $R$ . La pendenza  $s$  di ciascun segmento è stata infine determinata dal modello 3D. I valori delle variabili  $h$ ,  $\sigma$ ,  $C$ ,  $R$ , ed  $s$  di ogni tratto sono stati calcolati mediando i valori misurati nel tratto considerato.

Ulteriori determinazioni hanno riguardato il calcolo di alcune grandezze idrauliche e in particolare:

- indice di Darcy-Weisbach,  $f_m$  (eq.13);
- numero di Froude,  $F = V / \sqrt{gh}$ ;
- numero di Reynolds,  $Re = Vh / \nu_k$ , essendo  $\nu_k$  la viscosità cinematica dell'acqua;
- velocità d'attrito  $u_*$ ;
- numero di Reynolds riferito alla velocità d'attrito  $Re_* = u_* h / \nu_k$ .

In accordo agli scopi dell'indagine sperimentale, le prove sono state condotte su rill caratterizzati da differenti scabrezze del fondo e differenti valori di pendenza media del *thalweg*. In particolare, le prove sono state condotte per le due condizioni di seguito specificate:

1. correnti in moto nei rill con scabrezza del fondo di tipo “*grain resistance*”;
2. correnti in moto nei rill a profilo *step-pool* (“*morphological resistance*”)

Durante le prove in campo è stato osservato che il passaggio di correnti con valori di portata maggiori di  $0,30 \text{ L s}^{-1}$  determinava l'erosione degli *step-pool* formatisi nella fase di pre-modellamento ( $Q= 0,1 \text{ L s}^{-1}$ ). La suddetta osservazione è stata confermata esaminando i profili longitudinali dei singoli solchi estratti dal modello 3D. Pertanto, per il “*grain resistance*” sono state utilizzate le misure condotte con valori di portata compresi tra  $0,36$  e  $1 \text{ L s}^{-1}$ , mentre per il caso “*morphological-resistance*”, sono state utilizzate le misure contraddistinte da valori di portata compresi tra  $0,1$  e  $0,28 \text{ L s}^{-1}$ .

In particolare, le prove “*grain resistance*” sono state condotte utilizzando 3 differenti valori di pendenza della parcella, *sp*, pari a 9, 14 e 22%. Le misure condotte nella parcella con *sp* pari al 14% sono relative a 9 rill in terra e altri 4 rill ricoperti con un numero variabile *N* di elementi ghiaiosi per segmento. Sono stati utilizzati valori di *N* pari a 10, 20, 40 e la condizione di copertura totale del rill (*TC*). Le suddette misure, relative a 106 tratti, sono state utilizzate per calibrare la funzione  $\Gamma$  della legge di resistenza (eq. 31). Le misure effettuate sulle parcelle con *sp* pari a 9 e 22% sono state invece utilizzate per validare l'espressione per la stima di  $\Gamma$ .

Per quanto concerne le prove “*morphological resistance*”, invece, è stato utilizzato un unico valore di pendenza della parcella, *sp*, pari a 14% e le misure hanno riguardato 6 rill (49 tratti) in terra. La tabella 2 mostra i campi di variazione delle grandezze misurate, distinti per valori di *sp*.

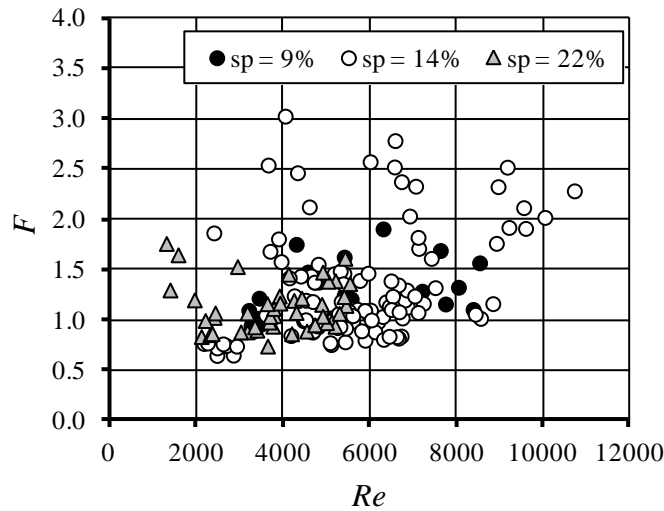
**Tab. 2** – Dati caratteristici delle prove sperimentali

<i>grain resistance</i>						
<i>sp</i> (%)	<i>Q</i> ( $\text{l s}^{-1}$ )	<i>h</i> (m)	<i>s</i> ( $\text{m m}^{-1}$ )	<i>V</i> ( $\text{m s}^{-1}$ )	<i>f<sub>m</sub></i>	<i>Re</i>
9	0.36-0.98	0.010-0.021	0.073-0.131	0.32-0.659	0.174-0.573	3209-8537
14	0.36-1	0.007-0.023	0.071-0.193	0.235-0.899	0.056-1.626	2169-10723
22	0.35-1	0.005-0.017	0.092-0.259	0.264-0.561	0.390-1.628	1306-5539
<i>morphological resistance</i>						
14	0.1-0.3	0.009-0.020	0.097-0.165	0.178-0.379	0.449-2.525	1596-5688

## 5. RISULTATI

### 5.1. Grain-resistance

In figura 14, vengono mostrati i valori delle coppie sperimentali  $Re-F$ , dai quali si evince che le prove sono state condotte utilizzando sia correnti veloci sia correnti lente in regime di moto turbolento. Questo risultato è in contrasto con quanto ottenuto da Gimenez e Govers (2001) i quali sostengono che, per i rill a fondo mobile, il meccanismo di feedback determina un valore di  $F$  medio costante e prossimo al valore critico ( $F=1$ ).



**Fig. 14** - Coppie sperimentali ( $Re, F$ ) relative alle misure condotte

Eguagliando la (32) e la (33) si ottiene la seguente equazione:

$$\frac{(\delta + 1)(\delta + 2)}{2^{1-\delta}} \frac{Re}{Re_*} \frac{1}{Re_*^\delta} = \frac{Re}{Re_*} \frac{1}{\alpha^\delta Re_*^\delta} \quad (34)$$

che risulta rispetto ad  $\alpha$ , conduce alla seguente espressione:

$$\alpha = \left[ \frac{2^{1-\delta}}{(\delta + 1)(\delta + 2)} \right]^{1/\delta} \quad (35)$$

Per  $2000 < Re < 10000$  che è il campo sperimentale testato, i valori di  $\alpha$  calcolati con la (35) e la (30) sono poco variabili e, pertanto, può essere utilizzato il valore medio  $\alpha=0,124$ . Pertanto dalla (33) si ottiene la seguente stima  $\Gamma_v$  della funzione  $\Gamma$ :



$$\Gamma_v = \frac{V}{u_* \left( \frac{u_* 0.124 h}{v_k} \right)^{(1.5 / \ln Re)}} \quad (36)$$

L'analisi ha dimostrato che i valori di  $\Gamma$  calcolati con la (36) sono quasi uguali ai valori  $\Gamma$ , denominati  $\Gamma_f$  e calcolati con la (32), che corrispondono ai valori misurati dell'indice  $f_m$  di Darcy-Weisbach. In altre parole, quando è soddisfatta la condizione  $f=f_m$ , si verifica che  $\Gamma_v=\Gamma_f$ . Pertanto, la legge di resistenza al moto è coerente con la distribuzione di velocità applicata in cui  $\Gamma$  è stimato con la (36).

Il dataset completo è stato suddiviso nel dataset di calibrazione, costituito dalle misure relative alla parcella con  $sp$  pari a 14% (106 tratti), e in quello di validazione, relativo alle misure effettuate nelle parcelle con  $sp$  pari a 9 e 22% (73 tratti).

Utilizzando il dataset di calibrazione, con una analisi di regressione multipla non lineare, è stata determinata la seguente espressione:

$$\Gamma_v = \frac{0.4856 F^{1.1131}}{s^{0.537}} \quad (37)$$

che è caratterizzata da un coefficiente di determinazione pari a 0,99 ed è applicabile per valori del numero di Reynolds variabili tra 2169 e 10723 e per valori di pendenza  $s$  variabili tra 7% e 19,3%. La figura 15, che mostra il confronto tra i valori di  $\Gamma_v$  calcolati con la (36) e quelli calcolati con la (37), conferma l'applicabilità della (37).

A partire dalla (31), in cui  $\delta$  è stato calcolato con la (30) e  $\Gamma_v$  con la (37), è stata ottenuta la seguente relazione:

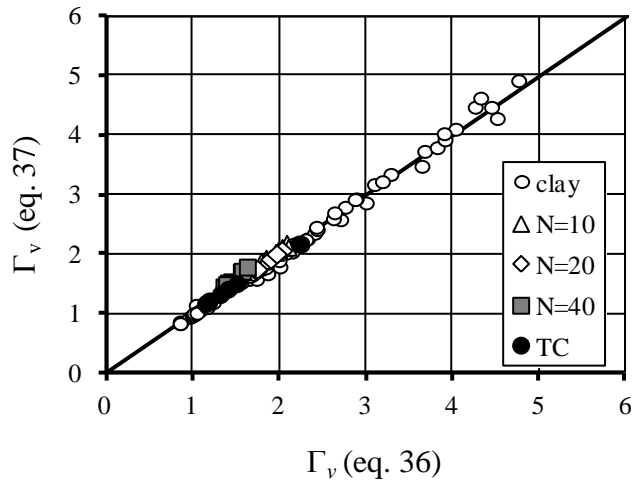
$$f = 8 \left[ \frac{\left( \frac{1.5}{\ln Re} + 1 \right) \left( \frac{1.5}{\ln Re} + 2 \right) s^{0.537}}{2^{1 - \frac{1.5}{\ln Re}} 0.4856 F^{1.1131} Re^{\frac{1.5}{\ln Re}}} \right]^{1 + \frac{1.5}{\ln Re}} \quad (38)$$

Per un dato valore di  $Re$ , la (38) stabilisce che il coefficiente di resistenza al moto  $f$  di Darcy-Weisbach aumenta all'aumentare della pendenza,  $s$ , e diminuisce all'aumentare del numero di Froude  $F$ .

Considerando che  $Re^\delta$  è pari a 4,4817, la (38) può essere riscritta nella seguente forma:

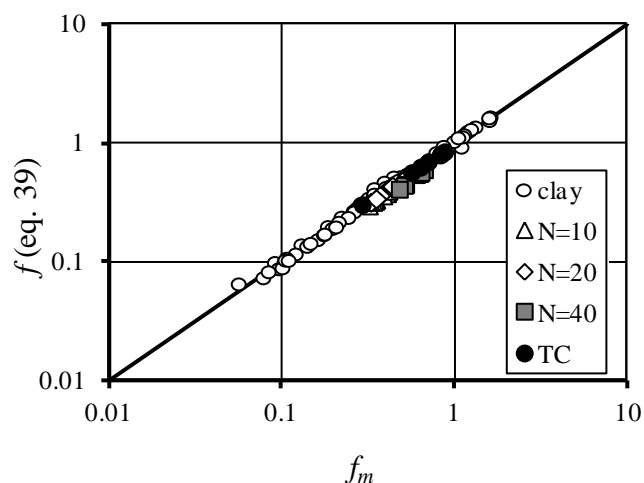
$$f = 8 \left[ \frac{(\delta + 1)(\delta + 2)}{2^{1-\delta} \cdot 2.1763} \right]^{\frac{2}{1+\delta}} \left[ \frac{s^{0.537}}{F^{1.1131}} \right]^{\frac{2}{1+\delta}} \quad (39)$$

La figura 16, che mostra il confronto tra i valori di  $f_m$  misurati e quelli calcolati con la (39), conferma l'applicabilità della (39) per la stima dell'indice di Darcy-Weisbach,  $f$ .



**Fig. 15** – Confronto tra i valori di  $\Gamma_v$  calcolati con la (36) e quelli calcolati con la (37)

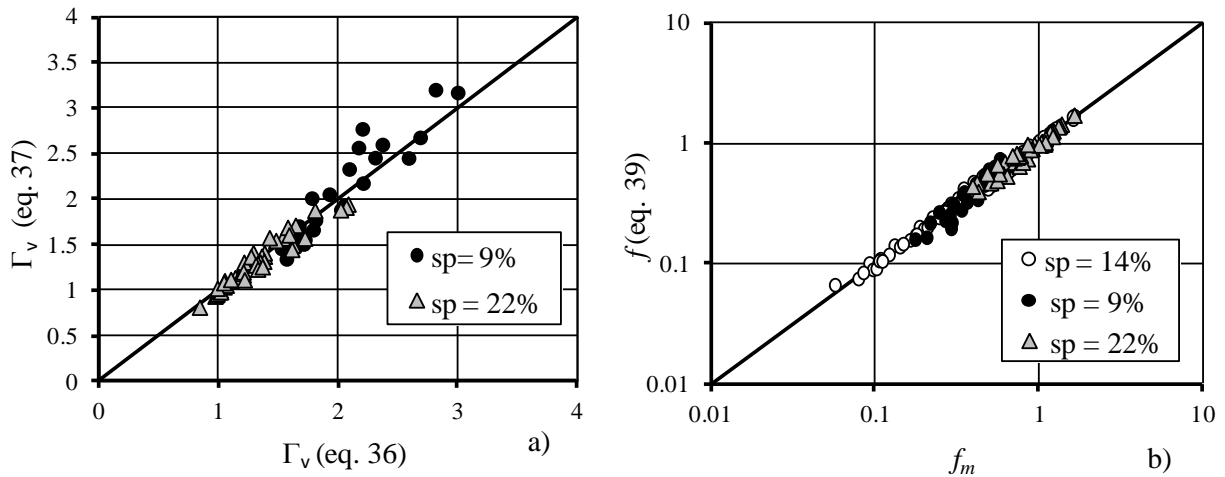
La **figura 17a** mostra, con riferimento al dataset di validazione, il confronto tra i valori di  $\Gamma_v$  calcolati con la (36) e quelli calcolati con la (37). Dalla figura si evince che i punti, tendono a disporsi lungo la retta di perfetto accordo.



**Fig. 16** – Confronto tra i valori di  $f_m$  misurati e quelli calcolati con la (39)

Infine, l'applicabilità della (39) con  $\Gamma_v$  calcolato con la (37), è stata positivamente testata utilizzando il data base completo (179 tratti) (Fig. 17b). La stima di  $f$  con la (39) è caratterizzata da un valore di RMSE, radice quadrata dello scarto quadratico medio, pari a 0,044.

Inoltre, gli errori di stima di  $f$  con la (39) sono minori o uguali al  $\pm 20\%$  nel 95,6% dei casi, e minori o uguali al  $\pm 10\%$  nel 75,1% dei casi.



**Fig. 17** – Confronto, per il database di validazione, tra i valori di  $\Gamma_v$  calcolati con la (36) e quelli calcolati con la (37) (a), e confronto, per il database completo tra i valori di  $f_m$  misurati e quelli calcolati con la (39)

Considerando che nella presente indagine i valori di  $\delta$ , variano in un intervallo molto ristretto (0,162-0,209), utilizzando il valore medio che è pari a 0,1787, la (39) può essere riscritta nella seguente forma:

$$f = 4.02 \frac{s^{0.91}}{F^{1.89}} \quad (40)$$

L'equazione (40) mette in evidenza che l'indice di Darcy-Weisbach,  $f$ , cresce quasi proporzionalmente con la pendenza.

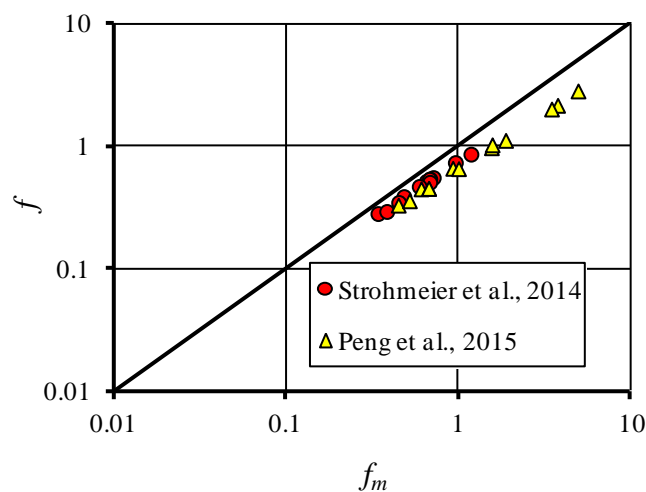
Questo risultato, in accordo con Govers (1992), conferma l'ipotesi di indipendenza della velocità della corrente dalla pendenza del solco. Pertanto, l'equazione (13), in cui  $f$  è stimato con la (40), risulta appropriata per le correnti in moto in rill erodibili. In altre parole, l'applicabilità dell'equazione (13) è legata alla proprietà dei rill di modificare la propria geometria (contorno bagnato e scabrezza del fondo) che influisce sui valori dell'indice resistenza di Darcy-Weisbach.

In accordo con Hessel et al. (2003) questo risultato può essere giustificato anche da un punto di vista energetico. Dal momento che il processo erosivo di tipo rill diventa più rilevante con l'aumento della pendenza, per alti valori di  $s$  la corrente in moto utilizza, per il distacco e il trasporto delle particelle, un'aliquota dell'energia totale maggiore riducendo pertanto l'energia disponibile per aumentare la velocità. I processi di erosione e trasporto interagiscono con le caratteristiche idrauliche della corrente che controllano il modellamento del solco, il movimento delle particelle erose e la velocità della corrente.

Infine, l'applicabilità della (39) è stata testata utilizzando i dati di letteratura di Strohmeier et al. (2014) e di Peng et al. (2015). In particolare, Strohmeier et al. (2014) hanno condotto un'indagine con un suolo a tessitura limosa, utilizzando una canaletta lunga 1,95 m, larga 0,6 m, alta 0,35m, con una pendenza pari al 10% . Le misure sono state condotte sia in condizione di corrente lenta sia in condizione di corrente veloce ( $0,74 \leq F \leq 1,28$ ), in regime di transizione ( $1129 \leq Re \leq 2405$ ).

Peng et al., (2015) hanno condotto anch'essi una indagine con un suolo limoso utilizzando una canaletta lunga 5,5m, larga 0,5 m e alta 0,7 m. Le prove sono state condotte utilizzando valori di pendenza  $s$  compresi tra 10,5 e 21,3%, sia in condizioni di corrente lenta sia in condizione di corrente veloci ( $0,46 \leq F \leq 1,17$ ) in regime di transizione ( $1154 \leq Re \leq 2639$ ).

La figura 18 mostra il confronto tra i valori di  $f_m$  disponibili in letteratura e quelli calcolati con la (39). Dalla suddetta figura si evince che i valori di  $f$  calcolati con la (39) sono sistematicamente sottostimati.



**Fig. 18** - Confronto tra i valori del coefficiente di resistenza  $f_m$  misurati da Strohmeier et al. (2014) e di Peng et al. (2015) e quelli calcolati con la (39)

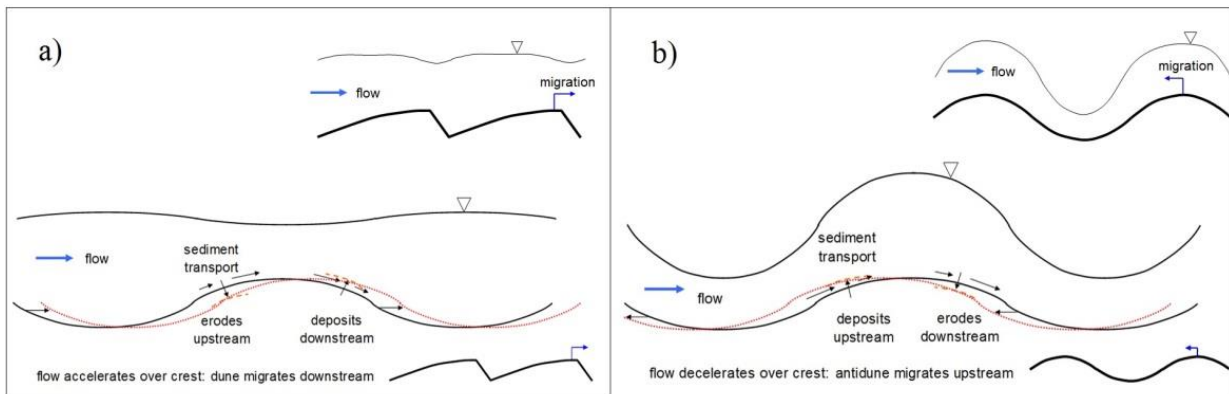
In particolare, gli errori risultano minori o uguali al 30% per l'80% delle misure. L'inapplicabilità della (39) alle misure di letteratura potrebbe essere spiegata dalla circostanza che queste ultime sono state condotte con suoli limosi mentre la (39) è stata ottenuta sulla base di misure condotte su un suolo argilloso.

## 5.2 Morphological (*step-pool*) -resistance

Diversi autori che hanno condotto indagini sia in canaletta (Whittaker e Jäeggi, 1982; Rosport e Dittrich, 1995) sia in campo (Chin, 1999; Chartrand e Whiting, 2000; 2001) attribuiscono la morfologia a *step-pool* al corazzamento di antidune.

Le antidune sono forme di fondo che solitamente si verificano quando la corrente in moto presenta elevati valori del numero di Froude  $F$  (ma non necessariamente superiori all'unità).

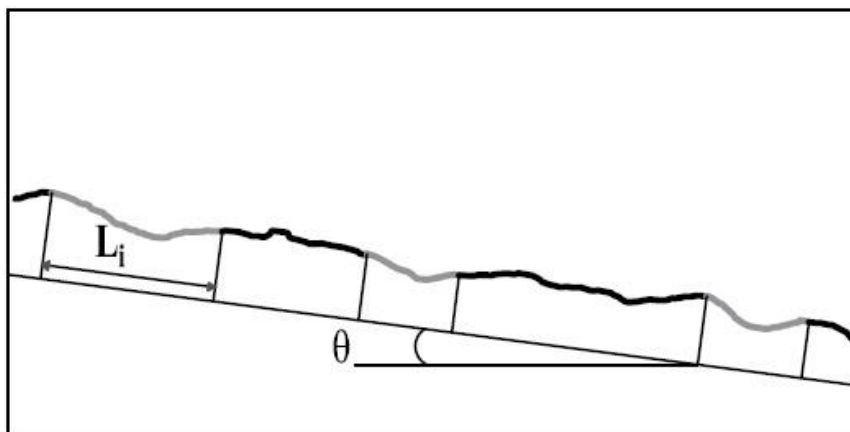
Le antidune, a differenza delle dune, migrano verso monte e presentano una piccola asimmetria (Fig. 19). Inoltre, la presenza di antidune genera treni d'onda sulla superficie libera.



**Fig. 19** - Rappresentazione della morfologia a dune (a) e ad antidune (b), (Parker, 2005)

I risultati della teoria sulle antidune, originariamente ottenuti da Kennedy (1963) per i fiumi con alveo in sabbia, sono stati sintetizzati in un grafico dove il numero di Froude della corrente viene messo in relazione con il prodotto tra il numero d'onda  $K = 2\pi/L$ , dove  $L$  è la lunghezza media degli *step* relativi all'alveo indagato, e il tirante idrico medio,  $h$ , della corrente.

In figura 20 viene riportato, a titolo di esempio, il profilo longitudinale, estratto da un modello tridimensionale, di un tratto di rill con presenza di sequenze *step-pool*. Nella suddetta figura sono mostrati i punti di inizio (*step*) e di fine (*pool*) della sequenza *step-pool* determinati per misurarne la lunghezza  $L_i$ . I suddetti punti sono stati posizionati in corrispondenza dei punti in cui era presente una brusca variazione di pendenza.



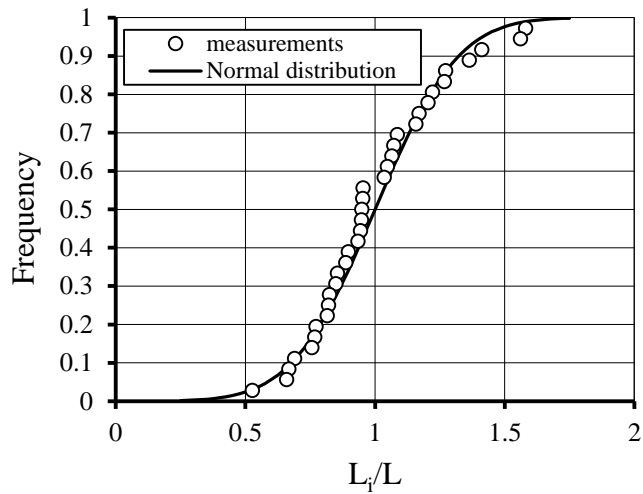
**Fig. 20** – Esempio di profilo longitudinale con morfologia a *step-pool* e definizione della lunghezza della sequenza *step-pool*,  $L_i$

In tabella 3 vengono riportati, per ogni valore di portata  $Q$  e quindi per ogni rill, il numero di *step-pool* rilevati,  $N_{sp}$ , la lunghezza media degli *step-pool*,  $L$ , i corrispondenti valori di lunghezza minima  $L_{min}$  e massima  $L_{max}$ , e il coefficiente di variazione  $CV(L_i)$ .

**Tab. 3** – Dati caratteristici delle prove sperimentali

$Q$ [l/s]	$N_{sp}$	$L$ [m]	$L_{min}$ [m]	$L_{max}$ [m]	$CV$
0.1	5	0.0683	0.036	0.1066	0.413
0.12	4	0.101875	0.0782	0.1389	0.271
0.18	11	0.092136	0.0608	0.1301	0.247
0.2	4	0.11585	0.0896	0.1396	0.184
0.22	5	0.09332	0.0761	0.1188	0.178
0.3	6	0.1032	0.0851	0.1632	0.289

La rappresentatività del valore medio  $L$  è stata accertata con un'analisi statistica. In particolare, per ogni *step-pool* è stato calcolato il rapporto  $L_i/L$  e tutti i valori ottenuti hanno costituito un singolo campione il cui valore medio  $m(L_i/L)$  è risultato paria pari a 1 e la cui deviazione standard  $sd(L_i/L)$  è risultata pari a 0,2519. La figura 21 mostra il confronto tra la distribuzione di frequenza dei valori misurati  $L_i/L$  e la distribuzione normale avente media pari a 1 e deviazione standard pari a 0,2519. Poichè, la variabile  $L_i/L$  è normalmente distribuita e la media è pari a 1 il valore medio  $L$  può essere considerato rappresentativo della lunghezza dello *step-pool* per ogni rill.



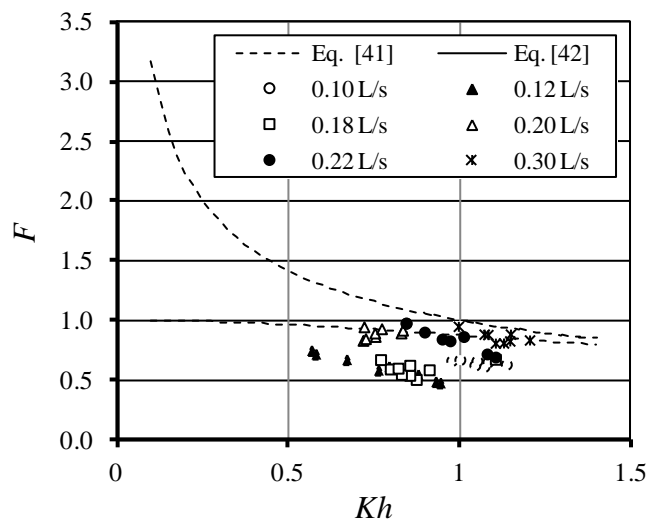
**Fig. 21** – Confronto tra la distribuzione empirica di  $L_i/L$  e la distribuzione normale

Nel grafico di figura 22, la regione relativa alle antidune è delimitata da due curve che sono descritte dalle seguenti equazioni:

$$F = \frac{1}{\sqrt{Kh}} \quad (41)$$

$$F = \sqrt{\frac{\tanh Kh}{Kh}} \quad (42)$$

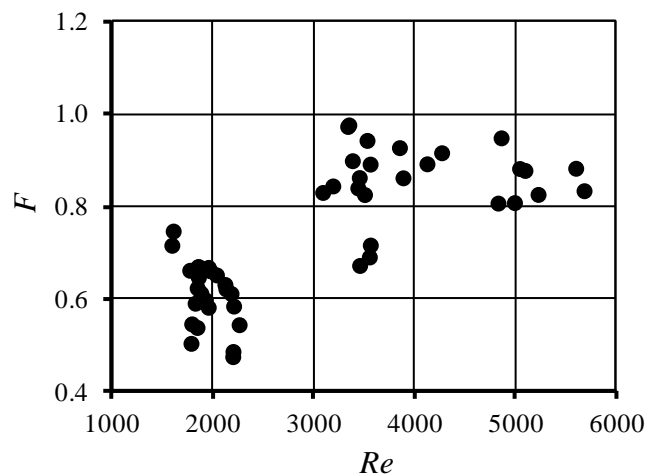
in cui  $\tanh$  è la funzione tangente iperbolica.



**Fig. 22** – Relazione tra il numero di Froude,  $F$ , e il prodotto tra il numero d'onda,  $K$ , e il tirante idrico medio,  $h$

La figura 22 mostra che i punti relativi alla presente indagine ricadono al di sotto o in prossimità della curva di eq.(42). I punti che ricadono sotto la curva sono relativi alle misure a cui corrispondono valori di  $F$  variabili tra 0,4 e 0,8, generalmente corrispondenti a valori di portata inferiori o uguali a  $0,18 \text{ L s}^{-1}$ . In altre parole, le correnti caratterizzate da portate basse ( $\leq 0,18 \text{ L s}^{-1}$ ) non modificano la morfologia del profilo longitudinale iniziale caratterizzata dalla presenza di *step-pool* formati nella fase di premodellamento ( $0,1 \text{ L s}^{-1}$ ). Per valori di portata più elevati ( $0,20 - 0,30 \text{ L s}^{-1}$ ) invece, la morfologia *step-pool* iniziale evolve verso le formazioni antidune. La presente indagine, in accordo con Whittaker e Jäeggi (1982) e Abrahamas et al. (1996), stabilisce che un profilo a *step-pool*, che massimizza la resistenza al moto può riscontrarsi anche in alvei in cui la corrente è caratterizzata da numeri di Froude,  $F$ , inferiori a quelli relativi alle antidune. In altre parole, è stato confermato che il modello di massima resistenza al moto (Abrahamas et al. 1996) è, rispetto al modello antidune, meno restrittivo in termini di caratteristiche idrauliche della corrente richieste per assicurare *step-pool* stabili.

La figura 23 mostra i valori delle coppie sperimentali  $Re-F$ , da cui si evince che le prove sono state condotte nella condizione di corrente lenta in regime sia di transizione sia turbolento.



**Fig. 23** - Coppie sperimentali ( $Re$ ,  $F$ ) relative alle misure condotte su rill in presenza di *step-pool*

Conducendo un'analisi di regressione multipla sul dataset di misure relativo ai 49 tratti di rill, è stata determinata la seguente espressione:

$$\Gamma_v = \frac{0.23 F^{0.9675}}{s^{0.9275}} \quad (43)$$

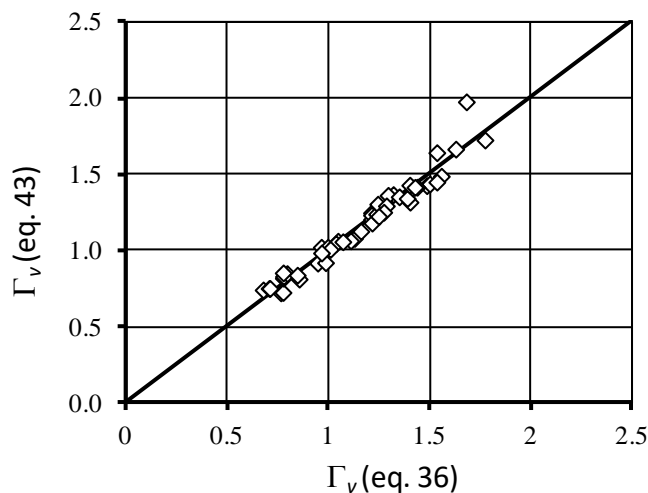


La (43) è caratterizzata da un coefficiente di determinazione pari a 0,964 ed è applicabile per valori del numero di Reynolds compresi tra 1566 e 5688 e per valori di pendenza  $s$  variabili tra 9% e 16,5%. La figura 24, che mostra il confronto tra i valori di  $\Gamma_v$  calcolati con la (36) e quelli calcolati con la (43), conferma l'applicabilità della (43).

A partire dalla (31), in cui  $\delta$  è stato calcolato con la (30) e  $\Gamma_v$  con la (43), è stata ottenuta la seguente relazione:

$$f = 8 \left[ \frac{\left( \frac{1.5}{\ln Re} + 1 \right) \left( \frac{1.5}{\ln Re} + 2 \right) s^{0.9275}}{2^{1-\frac{1.5}{\ln Re}} 0.23 F^{0.9675} Re^{\frac{1.5}{\ln Re}}} \right]^{\frac{2}{1+\frac{1.5}{\ln Re}}} \quad (44)$$

Per un dato valore di  $Re$ , la (44), come la (38) relativa al caso di resistenze al moto esclusivamente di tipo “*grain*”, stabilisce che l'indice di resistenza  $f$  di Darcy-Weisbach aumenta all'aumentare della pendenza,  $s$ , e diminuisce all'aumentare del numero di Froude  $F$ .



**Fig.24** - Confronto tra i valori di  $\Gamma_v$  calcolati con la (36) e quelli calcolati con la (43)

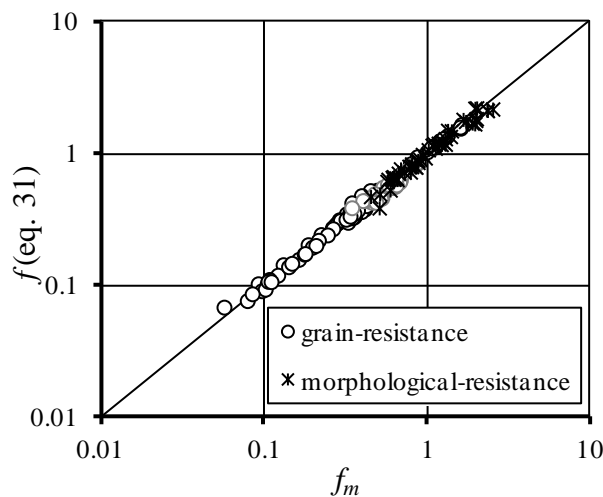
Poichè  $Re^\delta$  è pari a 4,4817, la (44) può essere riscritta nella seguente forma:

$$f = 8 \left[ \frac{(\delta + 1)(\delta + 2)}{2^{1-\delta} 1.03} \right]^{\frac{2}{1+\delta}} \left[ \frac{s^{0.927}}{F^{0.9675}} \right]^{\frac{2}{1+\delta}} \quad (45)$$

La figura 25 mostra il confronto tra i valori di  $f_m$  misurati e quelli calcolati con la (31). Nella figura sono distinte le coppie  $f_m-f$  relative alle prove di tipo “*grain-resistance*” e quelle relative

alle prove di tipo “*morphological (step-pool)-resistance*”. La funzione  $\Gamma_v$  nella (31) è stimata con la (37) per le prove di tipo “*grain-resistance*” e con la (43) per le prove di tipo “*morphological (step-pool)-resistance*”. I valori di  $f_m$  relativi ai rill caratterizzati dalla presenza degli step-pool ( $0,45 \leq f_m \leq 2,52$ ) sono, in media, più elevati di quelli relativi ai rill senza step-pool ( $0,06 \leq f_m \leq 1,63$ ). Questo risultato è spiegato dalla circostanza che, nei rill caratterizzati da un profilo longitudinale di tipo *step-pool*, le resistenze al moto complessive sono imputabili sia al contributo *grain* che a quello *morphological* e, pertanto, sono maggiori delle sole resistenze di tipo *grain* presenti nei rill privi di *step*. La figura 25 mostra inoltre, il buon accordo tra i valori di  $f_m$  e quelli,  $f$ , calcolati con la (31).

La stima di  $f$  con la (45) è caratterizzata da un valore di RMSE pari a 0,115. I valori di  $f$  calcolati con la (45) sono caratterizzati da errori di stima minori o uguali a  $\pm 15\%$  per il 98% dei casi e minori o uguali a  $\pm 10\%$  per l’81,6% dei casi.



**Fig. 25** - Confronto tra i valori di  $f$  misurati,  $f_m$ , e quelli calcolati con la (31)

Considerando che nella presente indagine i valori di  $\delta$ , ottenuti dalla (30), sono variabili in un intervallo molto ristretto (0,173-0,203), utilizzando il valore medio che è pari a 0.1893, la (45) può essere riscritta nella seguente forma:

$$f = 14.79 \frac{s^{1.56}}{F^{1.63}} \quad (46)$$

Infine, introducendo la (46) nella legge di resistenza espressa nella forma di Darcy-Weisbach (eq. 13), la velocità media della corrente in moto in un rill con profilo a *step-pool* risulta crescente con la pendenza.

## 6. CONCLUSIONI

La modellazione dell'erosione rill richiede specifiche indagini sperimentali sull'idraulica dei rill, finalizzate, per esempio, alla stima della velocità media della corrente defluente.

In letteratura sono disponibili differenti espressioni che descrivono l'idraulica dei rill. In molti casi, queste relazioni sono state messe a punto per i corsi d'acqua naturali ma vengono anche applicate ai rill.

Nella valutazione delle resistenze al moto negli alvei naturali, generalmente, bisogna tenere conto di due diversi processi dissipativi: uno legato alla forma, alla dimensione e alla disposizione degli elementi che costituiscono la scabrezza (*grain resistance*), l'altro imputabile alla presenza in alveo di forme di fondo come per esempio gli *step-pool* (*morphological-resistance*).

L'indagine sperimentale condotta nell'ambito del Corso di Dottorato di Ricerca, ha avuto come obiettivo la determinazione teorico-sperimentale della legge di resistenza al moto di correnti nei rill considerando sia i processi dissipativi di tipo "*grain*" sia quelli di tipo "*morphological*".

Utilizzando l'analisi dimensionale e l'ipotesi di autosimilarità incompleta è stata dedotta la distribuzione di velocità di tipo potenziale, dalla cui integrazione è stata dedotta la legge di resistenza al moto in cui compaiono la funzione  $\Gamma$  e l'esponente  $\delta$  del profilo di velocità.

Per la stima dell'esponente  $\delta$  è stata utilizzata la (30) già disponibile in letteratura, mentre per la determinazione della funzione  $\Gamma$ , è stato fatto ricorso alle misure sperimentali.

Le prove sono state condotte sia su rill caratterizzati da una scabrezza del fondo di tipo "*grain resistance*" sia su rill a profilo *step-pool*. Le misure idrauliche e geometriche sono state effettuate in tratti di rill realizzati artificialmente su parcelle sperimentali con differente pendenza. La scelta di utilizzare parcelle con differente pendenza ha avuto l'obiettivo di verificare se la velocità della corrente è indipendente dalla pendenza media del solco come indicato in letteratura per i rill a fondo mobile.

Le variabili geometriche dei canali sono state determinate utilizzando modelli 3D dei solchi, ottenuti con la tecnica Structure from Motion (SfM). La SfM, la cui applicabilità è stata ampiamente verificata da diversi Autori, è poco costosa, automatizzata, la fase di acquisizione dei dati è relativamente rapida, e i risultati sono accurati.

Utilizzando le misure relative ai rill con *sp* 14%, è stata calibrata la (37) per la stima di  $\Gamma$  per il caso di resistenze di tipo "*grain*". In accordo alla suddetta relazione,  $\Gamma$  dipende da  $Re$ ,  $F$  e  $s$ .

La (37) è stata validata utilizzando il dataset relativo alle misure condotte nelle parcelle con  $sp$  pari a 9% e 22%. L'indice di resistenza  $f$  può essere accuratamente determinato utilizzando la (39) dal momento che, con riferimento al database completo, gli errori di stima sono minori o uguali al  $\pm 20\%$  per il 95,6% dei casi e minori o uguali al  $\pm 10\%$  per il 75,1% dei casi. Infine, l'espressione proposta ha confermato l'ipotesi di Govers (1992) di indipendenza della velocità dalla pendenza del rill.

L'applicabilità della (39) è stata ulteriormente testata utilizzando dati reperiti in letteratura. La sistematica sottostima dei valori dell'indice di Darcy-Weisbach ottenuta con la (39) potrebbe essere spiegata dalla differente tessitura del suolo che contraddistingue le misure di letteratura. Per quanto concerne le prove di tipo “*morphological-resistance*”, nel grafico  $F-Kh$  solo i punti corrispondenti ai valori di portata inferiori o uguali a  $0,18 \text{ L s}^{-1}$  ( $0,4 \leq F \leq 0,8$ ) ricadono sotto la regione delle antidune suggerendo che le correnti con portate più basse non hanno modificato la morfologia del profilo longitudinale iniziale caratterizzato dalla presenza di *step-pool* formati nella fase di premodellamento ( $0,1 \text{ L s}^{-1}$ ), mentre le correnti con valori di portata più elevati ( $0,20 - 0,30 \text{ L s}^{-1}$ ), hanno modificato la morfologia dei rill da quella iniziale a *step-pool* a quella finale di tipo antidune. Pertanto, una sequenza di *step-pool* stabili che, in accordo con Whittaker e Jäeggli (1982) e Abrahamas et al. (1996), massimizza la resistenza al moto, si può verificare per valori del numero di Froude della corrente inferiori a quelli che caratterizzano le formazioni antidune.

La relazione (45) per la stima dell'indice di Darcy-Weisbach  $f$  per il caso delle resistenze di tipo “*morphological*” è risultata applicabile, in quanto caratterizzata da errori di stima minori o uguali al  $\pm 15\%$  per il 98% dei casi e minori o uguali al  $\pm 10\%$  per il 81,6% dei casi. I valori di  $f$  misurati nei rill caratterizzati dalla presenza degli *step-pool*, risultano, in media, più elevati di quelli misurati nei rill in assenza di *step-pool*. Questo risultato è spiegato dalla circostanza che, nei primi, le resistenze al moto complessive sono imputabili sia al contributo *grain* sia a quello *morphological* e, pertanto, sono maggiori delle sole resistenze di tipo *grain* presenti nei secondi. La legge di resistenza al moto (13), in cui  $f$  è stimato con la relazione proposta, fornisce valori di  $V$  crescenti con la pendenza.

In conclusione, la legge di resistenza al moto teorica è applicabile sia nel caso di resistenze di tipo *grain* sia nel caso di resistenze di tipo *morphological* posto che la funzione  $\Gamma$  sia stimata con la relazione specifica per il tipo di resistenza.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Aberle J, Smart GM. 2003. The influence of roughness structure on flow resistance on steep slopes. *Journal of Hydraulic Research* 41: 259-269.
- Abrahams AD, Gang LI, Parsons AJ. 1996. Rill hydraulics on a semiarid hillslope, southern Arizona. *Earth Surface Processes and Landforms* 21: 35-47.
- Alewell, C. 2015. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science and Policy*, 54, pp. 438-447.
- Azarbayejani A. and Pentland A. P. 1995. Recursive estimation of motion, structure, and focal length. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 17(6) pp. 562–575.
- Bagarello V., Ferro V. 2006: *Erosione e conservazione del suolo*. McGraw-Hill, Milano, 539 pp.
- Baiamonte G, Ferro V, Giordano G. 1995. Advances on velocity profile and flow resistance law in gravel bed rivers. *Excerpta* 9: 41-89.
- Barenblatt GI. 1979. Similarity, self-similarity and intermediate asymptotics. Consultants Bureau, New York, N.Y.,.
- Barenblatt GI. 1987. Dimensional analysis. Gordon & Breach, Science Publishers Inc., Amsterdam.
- Barenblatt GI. 1991. On the scaling laws (incomplete self-similarity with respect to Reynolds numbers) for the developed turbulent flows in tubes. *C. R. Acad. Sci., Ser. II* 313: 307-312.
- Barenblatt GI. 1993. Scaling laws for fully developed turbulent shear flows, part 1, Basic hypothesis and analysis. *Journal of Fluid Mechanics* 248: 513-520.
- Barenblatt GI., Monin AS. 1979. Similarity laws for turbulent stratified flows. *Arch. Ration. Mech. Anal.* 70: 307-317.
- Barenblatt GI., Prostokishin VM. 1993. Scaling laws for fully developed turbulent shear flows, part 2. Processing of experimental data, *J. Fluid Mech.*, 248, 521-529.

- Bathurst JC. 1988. Flow resistance estimation in mountain rivers – closure. *Journal of Hydraulic Engineering* 113(6): 822–824.
- Bathurst JC., Li RM., Simons DB., 1981. Resistance equation for large-scale roughness, *Journal of Hydraulic Engineering*, 107(12), 1593-1613.
- Broscoe AJ. 1959. Quantitative analysis of longitudinal stream profiles of small watersheds, Technical Report 389-042, Department of Geology, Columbia University, New York
- Bruno C, Di Stefano C, Ferro V. 2008. Field investigation on rilling in the experimental Sparacia area, South Italy. *Earth Surface Processes and Landforms* 33: 263- 279.
- Bryan R.B., Poesen J. 1989: Laboratory experiment on the influence of slope length on runoff, percolation and rill development. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 14, 211-231.
- Canovaro F, Paris E, Solari L. 2004. Influence of macro-roughness arrangement on flow regime. In *River Flow 2004*, Ed. M. Greco, A. Caravetta and R. Della Morte, 287-293, Taylor & Francis, Philadelphia, Pa
- Canovaro F, Solari L. 2007. Dissipative analogies between a schematic macro-roughness arrangement and step-pool morphology. *Earth Surface Processes and Landforms* 32: 1628-1640.
- Carollo, F. G., Di Stefano, C., Ferro, V., & Pampalone, V. 2015. Measuring rill erosion at plot scale by a drone-based technology. *Hydrological Processes*, 29, 3802–3811.
- Casalì J, López JJ, Giràldez JV. 1999. Ephemeral gully erosion in southern Navarra (Spain). *Catena* 36: 65–84.
- Castaing B, Gagne Y, Hopfinger EJ. 1990. Velocity probability density functions of high Reynolds number turbulence. *Physica D* 46: 177-200.
- Castillo, C., Pérez, R., James, M. R., Quinton, J. N., Taguas, E. V., & Gómez, J. A. 2012. Comparing the Accuracy of Several Field Methods for Measuring Gully Erosion. *Soil Science Society of America Journal*, 76(4), 1319. <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0390>.

- Chartrand SM, Whiting PJ. 2000. Alluvial architecture in headwater streams with special emphasis on step-pool topography. *Earth Surface Processes and Landforms* 25: 583–600.
- Chin A, Wohl E. 2005. Toward a theory for step pools in stream channels. *Progress in Physical Geography* 29 (3): 275-296.
- Chin A. 1999. The morphologic structure of step-pools in mountain streams. *Geomorphology* 27(3/4): 191–204.
- Church M, Zimmermann A. 2007. Form and stability of step-pool channels: Research progress. *Water Resources Research* 43: W03415.
- Comiti F, Cadol D, Wohl E. 2009. Flow regimes, bed morphology, and flow resistance in self-formed step-pool channels. *Water Resources Research* 45: W04421, 1-18.
- Comiti F, Mao L, Wilcox A, Wohl E, Lenzi MA. 2007. Field-derived relationships for flow velocity and resistance in high-gradient streams. *Journal of Hydrology* 340: 48-62.
- Cook, K. L. 2017. An evaluation of the effectiveness of low-cost UAVs and structure from motion for geomorphic change detection. *Geomorphology*, 278, 195–208.
- Curran J, Wilcock PR. 2005. Characteristic dimensions of the step-pool bed configuration: an experimental study. *Water Resources Research* 41: W02030, 1-11
- D'Agostino V, Michelini T. 2015. On kinematics and flow velocity prediction in step-pool channels. *Water Resources Research* 51: 4650-4667.
- De Roo, A. P. J. D. E., Wesseling, C. G., and Ritsema, C. J. 1996a. LISEM: A single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: Theory, input and output, *Hydrol. Process.*, 10, 1107–1117,.
- De Roo, A. P. J., Offermans, R. J. E., and Cremers, N. H. D. T. 1996b. LISEM: A single-event, physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. II: Sensitivity analysis, validation and application, *Hydrol. Process.*, 10, 1119– 1126, doi:10.1002/(sici)1099-1085(199608)10:8<1119::aid-hyp416>3.0.co;2-v,.

- Di Stefano C, Ferro V, Palmeri V, Pampalone V, Agnello, F. 2017a. Testing the use of an image-based technique to measure gully erosion at Sparacia experimental area. In press on *Hydrological Processes* 31: 573-585
- Di Stefano C, Ferro V, Palmeri V, Pampalone V. 2017b. Measuring rill erosion using structure from motion: A plot experiment. *Catena*, 153, 383-392
- Di Stefano C, Ferro V, Palmeri V, Pampalone V. 2017c. Flow resistance equation for rills. *Hydrological Processes*, 31: 2793-2801, DOI: 10.1002/hyp.11221
- Di Stefano C, Ferro V, Pampalone V, Sanzone F. 2013. Field investigation of rill and ephemeral gully erosion in the Sparacia experimental area, South Italy. *Catena* 101: 226-234.
- Di Stefano, C., Ferro, V. 2016. Establishing soil loss tolerance: An overview. *Journal of Agricultural Engineering*, 47 (3), art. no. 560, pp. 127-133
- Dietrich WE, Dunne T. 1993. The channel head. In *Channel Network Hydrology*, Bevan K, Kirkby MJ (eds). Wiley: Chichester; 175–219.
- Dunne, T. and Aubry, B.F., 1986. Evaluation of Horton's theory of sheetwash and rill erosion on the basis of field experiments. In: A.D. Abrahams (Editor), *Hillslope Processes*. Allen and Unwin, Boston, pp. 31-53.
- Dyer C. M. e Seitz S. M., 1999. Photorealistic scene reconstruction by voxel coloring. *International Journal of Computer Vision*, 35(2), pp. 151–173.
- Eltner, A., Baumgart, P., Maas, H. G., & Faust, D. 2015. Multi-temporal UAV data for automatic measurement of rill and interrill erosion on loess soil. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(6), 741–755.
- Eltner, A., Kaiser, A., Castillo, C., Rock, G., Neugirg, F., & Abellàn, A. 2016. Image-based surface reconstruction in geomorphometry—merits, limits and developments. *Earth Surface Dynamics*, 4(2), 359–389. <https://doi.org/10.5194/esurf-4-359-2016>



- Emmett WW. 1970. The hydraulics of overland flow on hillslopes. U.S. Geological Survey Professional Papers 622-A.
- Faugeras, O.D., Luong, Q.-T., and Maybank, S.J. 1992. Camera selfcalibration: theory and experiments. Proc. 2nd Europ. Conf. Comput. Vis., Lecture Notes in Computer Science 588:321–334. Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg, New York.
- Ferro V, Baiamonte G. 1994. Flow velocity profiles in gravel bed rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 120: 60-80.
- Ferro V, Giordano G. 1993. Velocity profile and flow resistance in gravel bed rivers. *Excerpta 7*: 99-144.
- Ferro V, Pecoraro R. 2000. Incomplete self-similarity and flow velocity in gravel bed channels. *Water Resources Research* 36: 2761-2770.
- Ferro V. 1997. Applying hypothesis of self-similarity for flow-resistance law of small-diameter plastic pipes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE 123: 175-179
- Ferro V. 2003. ADV measurements of velocity distribution in a gravel bed flume. *Earth Surface Processes and Landforms* 28: 707-722.
- Ferro V. 2017. New flow resistance law for steep mountain streams based on velocity profile. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE 143: 04017024, 1-6, DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001208.
- Ferro V., Bagarello V., Di Stefano C., Di Piazza G.V., Geraci L. 2005. Monitoraggio ed azioni di lotta contro la desertificazione nella regione mediterranea europea - Attività di ricerca, monitoraggio e modellazione dei processi erosivi nell'area pilota di Sparacia - Rapporto finale sulla attività di ricerca. Edizioni Anteprema s.r.l., Palermo, 99 pp.
- Ferro V., Giordano G. 1991. Experimental study of flow resistance in gravel bed rivers, *J. Hydraul. Eng.*, 117(10), 1239-1246.

- Ferro V., Giordano G. 1993. Velocity profile and flow resistance in gravel bed rivers, *Excerpta*, 7, 99-144.
- Ferro, V., Pecoraro, R. 2000. Incomplete self-similarity and flow velocity in gravel bed channels. *Water Resources Research*, 36, 2761-2769.
- Ferro, V., Porto, P. 2016. Contributo sperimentale alla valutazione della legge di resistenza al moto in alcuni corsi d'acqua calabresi. *Quaderni di idronomia montana*, 34, 165-176.
- Foster GR, Huggins LF, Meyer LD. 1984. A laboratory study of rill hydraulics: I. Velocity relationships. *Transactions of the ASAE* 27: 790-796.
- Frankl A, Stal C, Abraha A, Nyssen J, Rieke-Zapp D, De Wulf A, Poesen J. 2015. Detailed recording of gully morphology in 3D through image-based modelling. *Catena* 127: 92-101.
- Gary Parker. 1D Sediment Transport Morphodynamics with Applications to Rivers and Turbidity Currents. University of Illinois, Mahomet, Illinois, 2005.
- Gilley, J.E., Kottwitz, E.R., Simanton, J.R. 1990. Hydraulics characteristics of rills. *Trans. ASAE* 27, 797-804.
- Giménez R, Govers G. 2001. Interaction between bed roughness and flow hydraulics in eroding rills. *Water Resources Research*, 37: 791-799.
- Giménez R, Planchon O, Silvera N, Govers G. 2004. Longitudinal velocity patterns and bed morphology interaction in a rill. *Earth Surface Processes and Landforms* 29: 105-114.
- Glendell, M., McShane, G., Farrow, L., James, M. R., Quinton, J., Anderson, K., Brazier, R. E. 2017. Testing the utility of structure-from-motion photogrammetry reconstructions using small unmanned aerial vehicles and ground photography to estimate the extent of upland soil erosion. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(12), 1860–1871. <https://doi.org/10.1002/esp.4142>.
- Gómez-Gutiérrez A, Schnabel S, Berenguer-Sempere F, Lavado-Contador F, Rubio-Delgado J. 2014. Using 3D photo-reconstruction methods to estimate gully headcut erosion. *Catena* 120: 91-101.

- Govers G. 1990. Empirical relationships for the transport capacity of overland flow. *Erosion, Transport and Deposition Processes (Proceedings of the Jerusalem Workshop, March-April 1987)*. IAHS Publ. no. 189, 45-63.
- Govers G. 1992. Relationship between discharge, velocity and flow area for rills eroding loose, non-layered materials. *Earth Surface Processes and Landforms* 17: 515-528.
- Govers G., Gimenez R, Oost KV. 2007. Rill erosion: exploring the relationship between experiments, modeling and field observations. *Earth Science Reviews* 83: 87-102.
- Hairsine, P.B., Rose, C.W., 1992. Modeling water erosion due to overland flow using physical principles 2: rill flow. *Water Resour. Res.* 28, 245–250.
- Hessel R, Jetten V, Guanghui Z. 2003. Estimating Manning's n for steep slopes. *Catena* 54: 77-91.
- James, M.R., Robson, S., 2012. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: accuracy and geoscience application. *J. Geophys. Res.* 117, F03017. <http://dx.doi.org/10.1029/2011jf002289>.
- Javernick L, Brasington J, Caruso B. 2014. Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry. *Geomorphology* 213: 166-182.
- Kaiser, A., Neugirg, F., Rock, G., Müller, C., Haas, F., Ries, J., & Schmidt, J. 2014. Small-scale surface reconstruction and volume calculation of soil erosion in complex moroccan Gully morphology using structure from motion. *Remote Sensing*, 6(8), 7050–7080.
- Kazhdan, M., Bolitho, M., Hoppe, H. 2006. Poisson surface reconstruction. *Proceedings of the fourth Eurographics symposium on Geometry processing*, pp. 61–70.
- Kennedy, J. F. (1963), The mechanics of dunes and antidunes in erodible- bed channels, *J. Fluid Mech.*, 16(4), 521–544.
- Kutulakos K. N. e Seitz S. M. 2000. A theory of shape by space carving. *International Journal of Computer Vision*, 38(3), pp. 199–218.

- Lane, S.N., James, T.D., Crowell, M.D. 2000. Application of digital photogrammetry to complex topography for geomorphological research. *The Photogrammetric Record* 16, 793–821.
- Leopold, L. B. and Maddock, Jr., T. 1953. *The Hydraulic Geometry of Stream Channels and some Physiographic Implications*. US. Geological Survey, Professional Paper, 252
- Li G, Abrahamas AD. 1997. Effect of salting sediment load on the determination of the mean velocity of overland flow. *Water Resources Research* 33: 341-347.
- Line DE, Meyer LD. 1988. Flow velocities of concentrated runoff along cropland furrows. *Transactions of the ASAE* 31: 1435-1439.
- Longuet-Higgins H. C. 1981. A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections. *Nature* 293: 133–135.
- Lowe D. 2004. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60(2), pp. 91-110.
- Marchand JP, Jarrett RD, Jones LL. 1984. Velocity Profile, Water-Surface Slope, and Bed-Material Size for Selected Streams in Colorado, USGS Open File Report 416, 84–733.
- Merz W., Bryan R.B. 1993. Critical conditions for rill initiation on sandy loam Brunisols: laboratory and field experiments in southern Ontario, Canada. *Geoderma*, Vol. 57, 357-385.
- Messinger, M., Asner, G. P., & Silman, M. 2016. Rapid assessments of amazon forest structure and biomass using small unmanned aerial systems. *Remote Sensing*, 8(8), 1–15. <https://doi.org/10.3390/rs8080615>.
- Montgomery DR, Dietrich WE. 1992. Channel initiation and the problem of landscape scale. *Science* 255: 826–830.
- Morgan, R.P., Quilton, J.N., Smith, R.E., Govers, G., Poesen, J.W., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D., Stycaen, M.E. 1998. The European soil erosion model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms* 23 (6), 527–544.

- Nearing M.A., Foster G.R., Lane L.J., Finkner S.C. 1989: A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, Vol. 32, 1587-1593.
- Nearing MA, Norton LD, Bulgakov DA, Larionov GA, West LT, Dontsova KM. 1997. Hydraulics and erosion in eroding rills. *Water Resources Research* 33: 865-876.
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Yu, B., Klik, A., Lim, K.J., Yang, J.E., Ni, J., Miao, C., Chattopadhyay, N., Sadeghi, S.H., Hazbavi, Z., Zabihi, M., Larionov, G.A., Krasnov, S.F., Gorobets, A.V., Levi, Y., Erpul, G., Birkel, C., Hoyos, N., Naipal, V., Oliveira, P.T.S., Bonilla, C.A., Meddi, M., Nel, W., Al Dashti, H., Boni, M., Diodato, N., Van Oost, K., Nearing, M., Ballabio, C. 2017. Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. *Scientific Reports*, 7 (1), art. no. 4175.
- Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., Montanarella, L., Peng W, Zhang Z, Zhang K. 2015. Hydrodynamic characteristics of rill flow on steep slopes. *Hydrological Processes* 29: 3677-3686.
- Powell DM. 2014. Flow resistance in gravel-bed rivers: Progress in research. *Earth-Science Reviews* 136: 301-338.
- Rejman, J, Brodowski R. 2005. Rill characteristics and sediment transport as a function of slope length during a storm event on loess soil. *Earth Surface Processes and Landforms* 30: 231–239.
- Renard K.G., Foster, G.R., Yoder, D.C., McCool, D.K. 1994: RUSLE revisited: status, questions, answers and the future. *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 49, 213-220.
- Rosport M, Dittrich A. 1995. Step pool formation and stability – a flume study. In *Proceedings of the Sixth International Symposium on River Sedimentation*, Nov 1995. New Delhi: India; 525–532.
- Rosport M. 1994. Stability of torrent beds characterized by step pool textures. *Int. J. Sediment Research* 9: 123-132.

- Savat J., De Ploey J. 1982: Sheetwash and rill development by surface flow. In Bryan R.B., and Yair A., (Eds), *Badland Geomorphology and Piping*, Geobooks, Norwich, 113-126.
- Seiz SM, Curless B, Diebel J, Scharstein D, Szeliski R. 2006. A comparison an evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms. *IEEE Conference on Computer Vision ad Pattern recognition*. IEEE Computer Society, New York.
- Shen, H.O., Zheng, F.L., Wen, L.L., Lu, J., Jiang, Y.L., 2015. An experimental study of rill erosion and morphology. *Geomorphology* 23, 193–201.
- Slattery M.C., Bryan R.B. 1992: Hydraulic conditions for rill incision under simulated rainfall: a laboratory experiment. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 17, 127-146.
- Sofia, G., Tarolli, P., Cazorzi, F., & Dalla Fontana, G. 2011. An objective approach for feature extraction: Distribution analysis and statistical descriptors for scale choice and channel network identification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1387–1402. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1387-2011>
- Stöcker, C., Eltner, A., and Karrasch, P., 2015. Measuring gullies by synergetic application of UAV and close range photogrammetry –A case study from Andalusia, Spain. *Catena* 132, pp.1-11.
- Strohmeier SM., Nouwakpo SK., Huang CH., Klik A., 2014. Flume experimental evaluation of the effect of rill flow path tortuosity on rill roughness based on the Manning-Strickler equation, *Catena*, 118, 226-233,.
- Szeliski R. e Kang S. B. 1994. Recovering 3D shape and motion from image streams using nonlinear least squares. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 5(1), pp. 10–28. Szeliski R., 2011. *Computer Vision: Algorithms and Application*. Springer, Londra.
- Szeliski R., 2011. *Computer Vision: Algorithms and Application*. Springer, Londra.

- Takken I, Govers G, Ciesiolka CAA, Silburn DM, Loch RJ. 1998. Factors influencing the velocity-discharge relationship in rills. Modelling soil erosion, sediment transport and closely related hydrological processes, IAHS Publ. N. 249, 63-69.
- Taylor C. J., Kriegman D. J. e Anandan P. 1991. Structure and motion in two dimensions from multiple images: A least squares approach. IEEE Workshop on Visual Motion, Princeton, New Jersey, pp. 242–248
- Thommeret, N., Bailly, J. S., & Puech, C. 2010. Extraction of thalweg networks from DTMs: Application to badlands. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(8), 1527–1536. <https://doi.org/10.5194/hess-14-1527-2010>
- Triggs B., McLauchlan P. F., Hartley R. I. e Fitzgibbon A. W. 1999. Bundle adjustment- a modern synthesis. International Workshop on Vision Algorithms, Kerkyra, Greece, pp. 298–372.
- Turowski JM, Yager EM, Badoux A, Rickenmann D, Molnar P. 2009. The impact of exceptional events on erosion, bedload transport and channel stability in a step-pool channel. *Earth Surface Processes and Landforms* 34: 1661-1673.
- Ullman, S. 1979. The interpretation of structure from motion, *P. R. Soc. B*, 203, 405–426.
- Vinci, A., Brigante, R., Todisco, F., Mannocchi, F., & Radicioni, F. 2015. Measuring rill erosion by laser scanning. *Catena*, 124, 97–108. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.09.003>
- Waters KA, Curran JC. 2012. Investigating step-pool sequence stability. *Water Resources Research* 48: W07505, 1-20
- Westoby MJ, Brasington J, Glasser NF, Hambrey MJ, Reynolds JM. 2012. ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179: 300-314.
- Whittaker J, Jaeggi M. 1982. Origin of step pool system in mountain streams. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE* 108: 758–773.

- Wirtz S, Seeger M, Ries JB. 2010. The rill experiment as a method to approach a quantification of rill erosion process activity. *Zeitschrift für Geomorphologie* 54: 47-64.
- Wirtz S, Seeger M, Ries JB. 2012. Field experiment for 481 understanding and quantification of rill erosion processes. *Catena* 91: 21-34.
- Wischneier W. H., Smith D.D. 1978: Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. USDA Agriculture Handbook No.282.
- Yang MY, Walling DE, Tian JL, Liu PL. 2006. Partitioning the contributions of sheet and rill erosion using beryllium-7 and cesium-137. *Soil Science Society American Journal* 70: 1579-1590.
- Zhang G, Luo R, Cao Y, Shen R, Zhang XC. 2010. Correction factor to dye-measured flow velocity under varying water and sediment discharges. *Journal of Hydrology* 389: 205-213.



## **RINGRAZIAMENTI**

*Al termine di questi tre anni di Dottorato, è mio dovere ringraziare le persone che a vario titolo mi hanno accompagnato durante questo bellissimo periodo della mia vita anche se sarà difficile ricordarle in poche righe.*

*Desidero, innanzitutto ringraziare sia il mio Tutor Prof.ssa C. Di Stefano sia il mio Co tutor Ing. V. Pampalone che mi hanno indirizzato nella sperimentazione e assistito nella stesura dell'elaborato finale, oltre ad essere stati una preziosa guida durante tutto il percorso di Dottorato.*

*Desidero anche ringraziare il Prof. Vito Ferro per essersi sempre dimostrato disponibile a offrirmi suggerimenti di tipo teorico e metodologico durante tutte le fasi del mio lavoro di ricerca e per essersi sempre prodigato a far sì che potessi fare esperienze costruttive e utili alla mia crescita come dottore di ricerca.*

*Non possono mancare i ringraziamenti rivolti a tutti i ragazzi del “gruppo di Idraulica” Maria Angela, Nathalie, Vincenzo e Giuseppe con i quali ho trascorso momenti incancellabili, instaurando una sincera e bellissima amicizia.*

*Un particolare ringraziamento è indirizzato al Coordinatore del Corso di Dottorato, Prof. V. Bagarello che mi ha incoraggiato ed invogliato ad intraprendere questo percorso formativo.*

*Un immenso GRAZIE va alla mia famiglia ed ai miei genitori con la speranza di averli ripagati, per quanto possibile, dei sacrifici fatti per farmi essere qui oggi. A loro dedico questa Tesi.*

*Un ringraziamento finale è rivolto alla “mia donna” Ilaria. Con Lei ho condiviso preoccupazioni e difficoltà, oltre a idee e soddisfazioni. A Lei, che a breve giurerò amore eterno, darò la mia vita intera e tutto il mondo che mi appartiene.*

**GRAZIE!**