

Strumenti per la modellazione di colate detritiche e la mappatura del pericolo: sviluppo di una SDI con servizi di elaborazione, basata sul modello numerico TRENT2D

Nadia Zorzi (*), Alessandro Rizzi (**), Daniel Zugliani (***),
Stefano Piffer (****), Giorgio Rosatti (*****)

(* ,***,*****) Centro Universitario per la Difesa Idrologica nell'Ambiente Montano (CUDAM)
Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica (DICAM) – Università di Trento
Via Mesiano, 77, 38123 Trento, 0461-282621
nadia.zorzi@unitn.it, daniel.zugliani@unitn.it, giorgio.rosatti@unitn.it
(** ,****) Trilogis Srl, Via Fortunato Zeni, 8, 38068 Rovereto (TN), 0461-1788032
alessandro.rizzi@trilogis.it, stefano.piffer@trilogis.it

Riassunto

I fenomeni alluvionali che avvengono in ambiente montano producono forti modificazioni morfologiche, con conseguenze spesso disastrose. Per un'efficace difesa e salvaguardia del territorio da questi fenomeni sono necessari strategie, tecnologie e strumenti numerici avanzati, che presentano però costi computazionali elevati. Inoltre, a causa della loro origine di ricerca, generalmente questi strumenti non sono di facile utilizzo. Il presente lavoro illustra una possibile soluzione per superare questi significativi inconvenienti, proponendo l'integrazione tra lo strumento modellistico *TRENT2D* e la tecnologia *WebGIS* del *client Terra3*. L'innovativo ambiente di lavoro sviluppato permette di visualizzare, gestire e analizzare in modo facile ed intuitivo i dati di *input* e di *output* del modello matematico e, attraverso l'uso di un *server* dedicato, consente di ridurre i costi computazionali. In questo modo i tempi di lavoro risultano notevolmente ridotti rispetto ad un approccio non integrato, portando quindi ad un abbattimento complessivo dei costi di produzione di studi e progetti. L'obiettivo ultimo di questo lavoro è quello di favorire la diffusione tra i professionisti e gli enti pubblici di approcci avanzati, affidabili, fisicamente basati e coerenti con lo stato dell'arte della ricerca, finalizzati alla ricostruzione di fenomeni torrentizi, alla mappatura del pericolo e alla progettazione idraulica delle opere di mitigazione.

Abstract

Mountain regions are naturally exposed to extreme floods, causing strong morphological variations of the land surface and considerable damages. Effective and incisive safeguard actions against these phenomena should appeal to cutting-edge strategy, technology and numerical tools. However, this approach introduces high computational burden and requires not user-friendly tools, often developed in the field of research. This work proposes a possible solution to overcome these important drawbacks, presenting the integration between the model *TRENT2D* and the *WebGIS* technology of the client *Terra3*. The newly developed working environment allows model input and output data to be displayed, organised and analysed easily and intuitively. Moreover, this solution transfers the whole computational cost on a server. In this way, lead time is lower, in comparison with lead time in non-integrated working environments, and the production cost of studies and surveys is considerably reduced. The general purpose of this contribution is to facilitate the diffusion of advanced, reliable, physically-based and state-of-the-art approaches, suitable for event back-analyses, hazard mapping and mitigation-measures planning.

1 Introduzione

Il territorio alpino e, più in generale, quello nazionale sono sensibilmente esposti a fenomeni alluvionali dalle potenzialità distruttive anche elevate (Trigila, Iadanza, 2015). In tale contesto lo sviluppo di strategie di prevenzione e difesa efficaci e incisive è dunque una priorità. Un utile contributo in questa direzione è dato dalla crescente diffusione dei modelli numerico-matematici per la simulazione dei fenomeni alluvionali. Con questo tipo di strumenti, infatti, è possibile ricostruire, prevedere ed analizzare diversi scenari di inondazione, mapparne la pericolosità ed individuare gli interventi di protezione e mitigazione più idonei. Tuttavia non tutti i modelli hanno le stesse caratteristiche e la scelta del modello più adatto da utilizzare è spesso cruciale. Un'utile indicazione in tal senso è contenuta nell'art. 18 della Direttiva 2007/60/CE, secondo cui tutte le azioni di salvaguardia del territorio dovrebbero prevedere l'utilizzo di metodi scientifici avanzati e delle migliori tecnologie disponibili.

Nel corso degli anni la ricerca ha prodotto modelli sempre più sofisticati ed affidabili, che rispettano i vincoli della Direttiva, descrivendo in modo robusto anche i processi fisici più complessi. Uno di questi modelli è il *TRENT2D* (Rosatti, Begnudelli, 2013a), che permette di simulare fenomeni torrentizi, ovvero fenomeni alluvionali particolarmente violenti, tipici dei contesti montani e che coinvolgono notevoli quantità di materiale solido. Fenomeni di questo tipo sono caratterizzati da processi di erosione e deposito marcati e diffusi, che alterano in modo significativo la morfologia delle aree in cui avvengono. Per tenere correttamente in considerazione questi complicati processi, *TRENT2D* propone un avanzato approccio bifase su "fondo mobile", che permette di riprodurre in modo fisicamente basato sia il comportamento della parte liquida sia della componente solida del fenomeno, nonché le variazioni morfologiche del terreno. Tale approccio richiede però la risoluzione di un sistema di equazioni assai complesse e marcatamente non lineari, con costi computazionali piuttosto elevati. Questo aspetto, comune a tutti i modelli di ultima generazione, e il loro carattere scarsamente *user-friendly* hanno limitato fortemente la diffusione di tali strumenti in ambito professionale e nella pubblica amministrazione. Di conseguenza, nella pratica comune vengono spesso preferiti strumenti o metodi più semplici e speditivi, ma meno efficaci ed affidabili, che possono anche compromettere il buon esito degli interventi di prevenzione e protezione. Il miglioramento e l'efficacia delle pratiche di salvaguardia territoriale dipende dunque anche dal superamento della complessità e dell'onerosità degli strumenti computazionali.

Per questo è nato il progetto di collaborazione tra il Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica (DICAM) dell'Università di Trento e Trilogis SRL, volto allo sviluppo di una *SDI* (*Spatial Data Infrastructure*) con servizi di elaborazione, che integra tecnologie per la gestione e la visualizzazione delle informazioni geografiche (*WebGIS Terra3*) e il modello di simulazione di fenomeni torrentizi *TRENT2D*. L'innovativo ambiente di lavoro sviluppato permette una facile ed intuitiva gestione, visualizzazione ed analisi quantitativa dei dati di *input* e di *output* del modello matematico e supera il problema del costo computazionale attraverso l'uso di un server dedicato.

2 La modellazione matematica come elemento chiave nella valutazione del pericolo

L'efficacia delle strategie di prevenzione e protezione dai fenomeni alluvionali dipende in larga parte dall'attendibilità con cui viene valutata la pericolosità dei fenomeni stessi. Spesso nella pratica comune le aree soggette ad inondazione vengono delimitate sulla base della sola memoria storica degli eventi o del catasto dei dissesti. Tuttavia questo approccio non permette di descrivere adeguatamente la pericolosità e di valutare l'impatto di eventuali interventi di difesa o mitigazione. In altri casi lo studio degli scenari di pericolo viene condotto ricorrendo alla modellazione fisica in scala, ma anche l'applicazione sistematica di questa metodologia presenta alcuni limiti, di natura sia pratica sia economica. Una procedura speditiva spesso utilizzata per valutare la pericolosità dei fenomeni alluvionali prevede l'impiego di *check-list* per individuare e classificare le situazioni di pericolo potenziale. Tuttavia anche questo approccio non consente un'analisi approfondita di tutte le variabili rappresentative del fenomeno e porta a mappare la pericolosità in modo assai approssimativo. L'alternativa più idonea, completa e versatile per la valutazione del pericolo è

costituita dalla modellazione numerico-matematica fisicamente basata, che permette di simulare in modo esaustivo molteplici scenari e soluzioni progettuali, a partire da dati facilmente accessibili, come ad esempio i *DTM* e il regime pluviometrico dell'area di studio.

Un modello matematico è costituito da un sistema di equazioni differenziali assai complesse, spesso caratterizzate da termini non lineari. Tali equazioni vengono integrate nel tempo e nello spazio con tecniche piuttosto elaborate e onerose, che, una volta implementate, consentono però di applicare il modello a qualsiasi scenario. Un modello può essere utilizzato sia per riprodurre eventi reali già osservati in passato sia per prevedere l'effetto di eventi futuri. Inoltre, esso permette di verificare l'efficacia di eventuali opere di difesa o di possibili strategie urbanistiche. Simulando in modo fisicamente basato eventi statisticamente rappresentativi, un modello consente anche di produrre mappe della pericolosità particolarmente attendibili e funzionali ad un'efficace difesa del territorio. Generalmente i dati da fornire in ingresso ad un modello sono in buona parte di natura territoriale. Queste informazioni vengono utilizzate nell'integrazione delle equazioni con cui il modello descrive l'evoluzione temporale e spaziale del fenomeno. Anche i risultati prodotti dalla modellazione hanno prevalentemente carattere territoriale: il ricorso a funzionalità *GIS* per la loro gestione e visualizzazione è quindi indispensabile. Tuttavia i modelli in grado di gestire in modo integrato tutti gli *input* e gli *output* delle simulazioni sono ancora pochi e presentano funzionalità estremamente limitate. Di conseguenza è frequente il ricorso a strumenti *GIS* indipendenti dal modello, che però moltiplicano il numero di ambienti di lavoro in cui l'utente si trova ad operare, con conseguenti svantaggi. Spesso l'utilizzo contemporaneo di più strumenti richiede anche la conversione dei dati tra diversi formati, aumentando così il numero di elaborazioni necessarie, la frammentazione delle operazioni e le possibilità d'errore. Questo aspetto penalizza notevolmente l'impiego della modellazione per la valutazione della pericolosità, vanificandone di fatto le enormi potenzialità.

2.1 I fenomeni torrentizi: le alluvioni in ambiente montano

Le aree urbanizzate delle regioni montane italiane sorgono spesso su conoidi e in prossimità di torrenti. La vicinanza degli insediamenti a corsi d'acqua di piccole e medie dimensioni espone la popolazione a fenomeni alluvionali in cui vengono trasportate quantità notevoli di sedimenti, con conseguenti danni a edifici e infrastrutture. Questi fenomeni, detti fenomeni torrentizi, si originano per effetto di piogge intense e movimentano gli ammassi di detriti generati dalla disgregazione dei versanti. Per questo motivo vengono indicati anche come fenomeni di trasporto solido intenso e, nel caso in cui la componente solida sia particolarmente rilevante, come colate di detriti. Si noti che, soprattutto nel secondo caso, questi fenomeni vengono erroneamente classificati e trattati come frane, nonostante essi abbiano caratteristiche prettamente fluide.

Le piogge che scatenano i fenomeni torrentizi generano un deflusso liquido che mette in movimento i depositi detritici presenti nella parte alta del bacino e attiva importanti processi erosivi lungo l'asta torrentizia. In corrispondenza dei conoidi di deiezione, dove sorgono i centri abitati, la pendenza si riduce e il materiale trasportato si deposita, con forti modificazioni morfologiche del territorio, sia in alveo sia fuori alveo, e con danni anche ingenti. La portata distruttiva di questi fenomeni è molto elevata proprio a causa della grande quantità di materiale solido trasportato dalla piena.

Negli ultimi anni l'interesse attorno a questa tipologia di fenomeni è aumentato notevolmente, soprattutto per due ragioni: la recente urbanizzazione ed i cambiamenti climatici. L'urbanizzazione dei conoidi ha portato a costruire in zone potenzialmente soggette a fenomeni di trasporto solido intenso, di cui non si abbia però memoria storica. In aggiunta, i cambiamenti climatici hanno aumentato la frequenza con cui si manifestano questi fenomeni. Di conseguenza è sempre più importante intervenire per mitigare le conseguenze catastrofiche di questi fenomeni.

Il supporto fornito in tal senso dagli strumenti modellistici è potenzialmente enorme. Tuttavia non tutti i modelli presentano lo stesso livello di affidabilità. Molti di essi approssimano notevolmente, o addirittura trascurano, gli importanti processi di erosione e deposito, responsabili delle forti modificazioni morfologiche e degli ingenti danni al territorio (si vedano ad esempio Brunner, 2010

e O'Brien et al., 1993): dunque l'uso di questi modelli va evitato, a favore di modelli fisicamente basati, benché più complessi.

2.2 **TRENT2D: lo stato dell'arte della modellistica**

TRENT2D (Armanini et al., 2009 e Rosatti, Begnudelli, 2013a) è un modello matematico bidimensionale sviluppato dal CUDAM (Centro Universitario per la Difesa idrogeologica dell'Ambiente Montano) del Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica (Università di Trento) per simulare fenomeni torrentizi. Esso descrive la miscela acqua-sedimenti con un approccio bifase, che permette di trattare separatamente le componenti liquida e solida della miscela. Inoltre, *TRENT2D* considera che il fondo su cui scorre la miscela è mobile, ovvero ammette che quota della superficie del terreno vari per effetto dei processi di erosione e di deposito associati al moto. Grazie a questo approccio, il modello è in grado di simulare anche il processo di segregazione della fase liquida, che prosegue verso valle, da quella solida, che si deposita e dà luogo ai tipici cumuli di materiale che si possono notare dopo un evento calamitoso.

Il sistema di equazioni su cui si basa il modello si compone di quattro equazioni alle derivate parziali, fortemente non lineari. Il sistema viene risolto con un metodo ai volumi finiti esplicito con flussi alla Godunov (Rosatti, Begnudelli, 2013b). La complessità delle equazioni e delle tecniche di integrazione introduce costi computazionali considerevoli, che vanno supportati da *hardware* adeguati e non sempre disponibili in ambito professionale.

L'applicazione del modello richiede in ingresso due tipologie di informazioni: dati territoriali e dati idrologici. Per quanto riguarda i dati territoriali, l'informazione indispensabile è costituita dai quadri *DTM* del rilievo *LIDAR* della zona di studio. In aggiunta, risultano molto utili anche la cartografia di base e le carte tecniche, che consentono di dettagliare in modo più accurato l'area d'interesse. Con riferimento alla seconda tipologia di dati, il modello richiede una forzante idrologica, da definire con l'ausilio di appositi modelli afflussi-deflussi, che trasformano le altezze di precipitazione in portate defluenti. L'andamento temporale delle portate viene descritto dall'idrogramma liquido, da cui si ricavano le condizioni al contorno del modello. In particolare, a partire dall'idrogramma liquido è possibile determinare la quantità di miscela immessa nell'area di studio. Con questi dati di *input* il modello simula il fenomeno considerato e crea in *output* numerose mappe, che riproducono l'evoluzione temporale di diverse grandezze d'interesse come il tirante e la velocità della miscela, le profondità di scavo, le altezze dei depositi. Il carattere territoriale dei dati in ingresso e in uscita dal modello richiede quindi l'uso di strumenti *GIS* per la loro gestione e visualizzazione.

2.3 **La mappatura della pericolosità: l'approccio BUWAL e il ruolo della modellazione**

La modellazione può essere utilizzata non solo per analizzare eventi passati o verificare l'efficacia degli interventi di difesa, ma anche per mappare la pericolosità dei fenomeni torrentizi. Una mappa della pericolosità individua e classifica le zone potenzialmente interessate dal fenomeno, in funzione della sua intensità e della sua probabilità di accadimento. Una metodologia di mappatura molto efficace ed ampiamente diffusa a livello internazionale è quella di *BUWAL* (Heinimann et al., 1998), che mappa il pericolo a partire da tre diversi scenari, ciascuno con la propria probabilità di accadimento e i propri livelli d'intensità. Si noti che la metodologia non considera dunque singoli eventi passati, ma privilegia un approccio probabilistico, in cui la rappresentatività degli scenari viene definita in ottica previsionale.

L'approccio *BUWAL*, recepito anche dalle Province Autonome di Trento e Bolzano, si è rivelato particolarmente efficace se affiancato dall'utilizzo di uno strumento modellistico bidimensionale e fisicamente basato (Rosatti et al., 2015) per la simulazione dei diversi scenari di pericolosità. Infatti, la modellazione fornisce una descrizione completa di tutte le grandezze fisiche rilevanti per il fenomeno considerato: i dati territoriali in *output* dal modello costituiscono quindi l'*input* alla procedura di mappatura, che a sua volta porta alla definizione di nuove mappe. Una buona

mappatura della pericolosità richiede dunque l'utilizzo di un modello per la caratterizzazione dei diversi scenari e di strumenti *GIS* per una corretta gestione dei dati utilizzati e prodotti.

3 Le potenzialità del *WebGIS* per la modellazione dei fenomeni torrentizi in ambiente *GIS*

L'integrazione tra modelli, procedure di mappatura e strumenti *GIS* rappresenta una delle possibili strategie per superare molti dei limiti alla diffusione di una modellazione avanzata. Una delle soluzioni tecnologiche che permette tale integrazione e che ben soddisfa le esigenze di flessibilità e semplicità di utilizzo è il *WebGIS*.

Un *WebGIS* è un applicativo *web*, che consente la gestione di cartografie territoriali, geografiche ed economiche (Plewe, 1997). Grazie alle moderne tecnologie, un *WebGIS* può fornire potenti strumenti di elaborazione, permettendo anche ad utenti non specialisti di visualizzare, processare e interagire con le informazioni geografiche in modo semplice e intuitivo.

Un *WebGIS* può ospitare funzionalità specifiche anche complesse e può essere adattato a varie esigenze: per tale ragione esso ben si presta all'integrazione con altri strumenti. Proprio questa caratteristica ha favorito la recente diffusione dei *WebGIS* come piattaforme a supporto delle politiche di pianificazione e gestione del rischio (Andrienko, Andrienko, 2002) e come *database* degli eventi storici di inondazione (Miller, Han, 2009). Tuttavia sono ancora rare le soluzioni in campo modellistico, benché le potenzialità di questa tecnologia siano estremamente elevate (De Amicis et al., 2009) e l'integrazione tra strumenti modellistici e *WebGIS* consenta di superare molte delle problematiche legate all'utilizzo di modelli in forma di applicazioni *desktop*.

Innanzitutto, l'utente di un *WebGIS* non deve disporre di *hardware* particolarmente performanti, in quanto tutta la capacità di calcolo risiede sul *server*: questo consente di utilizzare l'applicativo e gli eventuali modelli in esso integrati indipendentemente dalla potenza computazionale del dispositivo con cui viene effettuato l'accesso. Dunque non sono necessari particolari investimenti *hardware* che potrebbero scoraggiare, tra i professionisti, il ricorso ad un approccio modellistico avanzato. Inoltre, impiegando *server* con buone caratteristiche, i tempi di calcolo risultano piuttosto contenuti, anche in caso di elaborazioni complesse. Anche l'archiviazione dei dati è interamente supportata dal *server*, escludendo così il rischio di danni fisici, *black-out* o *virus*.

In secondo luogo, un *WebGIS* non necessita di alcun tipo di installazione o configurazione, ma solo di una connessione internet. L'accesso viene effettuato tramite *browser*, indipendentemente dal sistema operativo e dalle caratteristiche del dispositivo impiegato. In tal modo l'utente può accedere all'applicativo e ai dati ovunque e da qualsiasi dispositivo, attraverso un semplice *login*.

Oltre all'accessibilità e alla flessibilità, un *WebGIS* presenta anche il vantaggio di una manutenzione centralizzata: infatti, tutte le operazioni di aggiornamento vengono svolte solamente sul *server* centrale, senza rilasci di *file* per risolvere eventuali errori, effettuare aggiornamenti o aggiungere nuove funzionalità. Con questo approccio l'utente ha sempre a disposizione, in modo automatico, la versione più aggiornata del servizio.

L'integrazione tra strumenti modellistici e *WebGIS* rappresenta dunque una potenziale soluzione a molte delle problematiche precedentemente elencate e un utile mezzo per la diffusione di buone strategie di difesa del territorio.

4. Interfacciamento tra il *WebGIS Terra3* e *TRENT2D*

Alla luce dei numerosi vantaggi offerti dalla tecnologia *WebGIS*, il modello *TRENT2D* e la procedura *BUWAL* per la mappatura della pericolosità sono stati interfacciati con il *WebGIS Terra3* sviluppato da Trilogis SRL, secondo l'approccio *SaaS* (*Software as a Service*), realizzando così un ambiente di lavoro completo e versatile.

Terra3 è un *client internet* di semplice utilizzo e personalizzazione, in grado di accedere ad un'ampia varietà di dati geografici, secondo gli standard interoperabili dell'*OGC*© - *Open Geospatial Consortium*. Il sistema è progettato per essere utilizzato da tecnici, professionisti, funzionari pubblici o da chiunque debba accedere ed interagire, in modo semplice e *user-friendly*, con dati geografici disponibili sul *web*. *Terra3* è stato sviluppato con le moderne tecnologie

HTML5, *CSS3* e *Javascript*, ha una struttura *software* modulare e supporta un'ampia varietà di *standard OCG*, come il *WMS (Web Map Service, 1.1.0 e 1.3.0)* ed il *WFS (Web Feature Service)*. Esso offre una visualizzazione integrata *3D* che sfrutta il motore grafico *java-based NASA World Wind*. Inoltre, *Terra3* è compatibile con i più diffusi *browser internet (Internet Explorer 8+, Mozilla Firefox, Google Chrome, Safari)*.

Le ampie possibilità di personalizzazione di *Terra3* e la sua versatilità hanno permesso un interfacciamento appropriato con il modello *TRENT2D*, migliorandone notevolmente la facilità di utilizzo e di accesso. Di fatto, il sistema integrato *TRENT2D+Terra3* permette all'utente di simulare fenomeni torrentizi e di visualizzare ed analizzare i risultati della modellazione in un unico ambiente, superando così sia la frammentazione sia i limiti computazionali legati all'utilizzo di applicazioni *desktop*.

Accanto alle funzionalità di visualizzazione e gestione dei dati territoriali, già ampiamente presenti in *Terra3*, l'interfacciamento ha richiesto l'introduzione di nuove funzionalità, dedicate interamente all'integrazione tra *TRENT2D* e *WebGIS*. Tali funzionalità riguardano principalmente le fasi di *pre-processing* e *post-processing* dei dati in ingresso e in uscita dal modello.

L'applicazione del modello inizialmente richiede che venga effettuato l'*upload* dei quadri *DTM* dell'area di studio, in formato *ASCII GRID*, con la possibilità di effettuare il *merging* di più *DTM*. Oltre al *DTM*, le nuove personalizzazioni consentono di caricare anche degli *shapefiles*, per arricchire l'informazione territoriale a disposizione dell'utente e, se necessario, modificare opportunamente i *DTM*, mediante gli attributi delle geometrie contenute nello *shapefile*. Questa seconda possibilità è funzionale allo studio di scenari molteplici e alla verifica di eventuali opere di difesa, non presenti nel *DTM* originale. Infatti, in presenza di *shapefile* con l'attributo "altezza", il *server* consente di modificare localmente la quota delle celle del *DTM* in corrispondenza della geometria *shape*, in modo da riprodurre adeguatamente l'ingombro e l'effetto di ostacoli e manufatti. Inoltre, il sistema permette la modifica puntuale (ovvero cella per cella) delle quote del *DTM*, attraverso una doppia visualizzazione *2D/3D*. Una volta completate le operazioni su *DTM*, l'interfaccia consente all'utente di specificare il dominio di calcolo, ovvero la zona in cui applicare il modello, e la sua risoluzione. Il modello richiede inoltre che vengano indicate le sezioni in cui introdurre le condizioni al contorno: a tale scopo vengono utilizzati il servizio *WFS*, per selezionare le geometrie sul bordo del dominio di calcolo, e il servizio *WMS*, per la loro visualizzazione. Le caratteristiche geometriche così definite costituiscono buona parte degli *input* al *TRENT2D*. Le informazioni mancanti sono rappresentate dalle condizioni al contorno e dai valori da attribuire ai parametri del modello, che l'utente fornisce attraverso un'apposita procedura guidata, ideata per agevolare la preparazione delle simulazioni e perfettamente integrata nell'ambiente *WebGIS*.

In seguito all'applicazione del modello, il sistema consente l'esposizione dei risultati delle simulazioni, archiviati in un *layer* dedicato. La visualizzazione e l'analisi degli *output* della simulazione è possibile in tre diverse modalità, ciascuna con una diversa finalità:

- a. la visualizzazione *2D* in coordinate locali (ovvero nel sistema di coordinate utilizzato dal modello per le proprie elaborazioni) consente un'analisi di dettaglio, anche attraverso l'estrazione di sezioni e profili nei punti di particolare interesse.
- b. la visualizzazione *2D* georeferenziata agevola la visione d'insieme (si veda l'esempio in Figura 1) e contestualizza l'evoluzione spaziale e temporale del fenomeno, anche grazie alle funzionalità di animazione.
- c. la visualizzazione *3D*, realizzata con le più moderne ed adeguate tecnologie *web* senza l'installazione e l'utilizzo di *plugin* aggiuntivi, ammette l'utilizzo di *layer WMS* e fornisce una visione più realistica del fenomeno.

Infine, tutti i dati territoriali prodotti dalle simulazioni possono essere scaricati dall'utente.

Il sistema integrato propone anche altre funzionalità, interamente dedicate alla mappatura della pericolosità secondo l'approccio *BUWAL*, applicato a partire dai risultati prodotti dal modello *TRENT2D*. In tal modo l'intera catena modellistica è disponibile in un unico ambiente di lavoro, con evidenti vantaggi per l'utente.

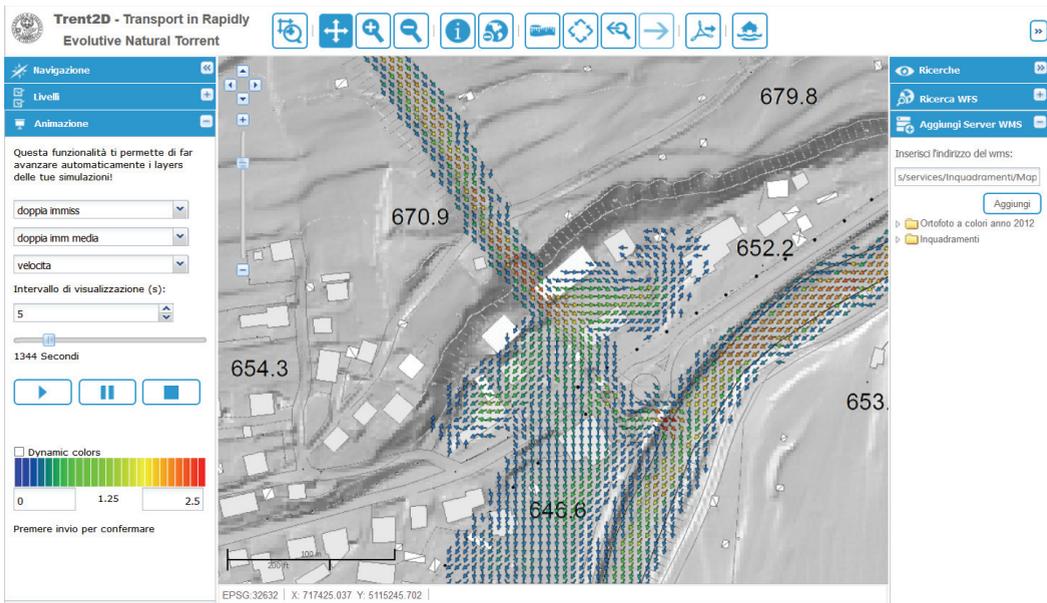


Figura 1 - Esempio di visualizzazione 2D georeferenziata della mappa delle velocità.

5.1 Architettura generale della SDI

Per la realizzazione della infrastruttura è stata utilizzata un'architettura *multi-tier* (o multi-strato – Figura 2), in cui le varie funzionalità sono logicamente separate ovvero suddivise su più strati o livelli *software* differenti, in comunicazione tra loro. Nel caso di applicazioni *web*, i livelli sono tre e riguardano la logica di presentazione, l'elaborazione dei processi e la gestione della persistenza dei dati:

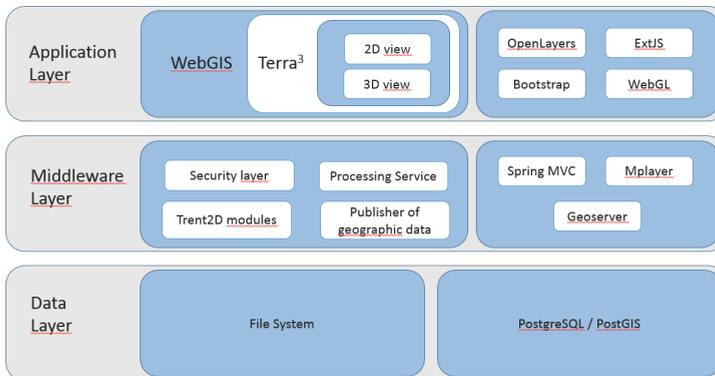


Figura 2 - Schema dell'architettura multi-tier del sistema integrato TREN2D+Terra3.

1. **Livello applicativo** (o *Application Layer*): è il livello che si occupa di mostrare le informazioni all'utente finale.
2. **Livello intermedio** (o *Middleware Layer*): in genere fornisce funzionalità ad un'applicazione, eseguendo elaborazioni dettagliate. Nel presente progetto contiene la conversione a servizio del modello *TREN2D* e l'affiancamento a questo di moduli per l'esposizione dei dati, basati su soluzione *GeoServer*.

3. **Livello dati** (o *Data Layer*): è costituito dai componenti *software* per l'archiviazione dei dati. In questo livello le informazioni vengono memorizzate e recuperate, mantenendo i dati neutrali e indipendenti da applicazioni *server* o da logica di *business*. Inoltre, fornendo informazioni del proprio livello, migliora la scalabilità e le prestazioni. Per la gestione dei dati geografici è stata utilizzata una soluzione *DBMS* (*Database Management System*). Inoltre, vista la natura stessa dei dati, sono stati adottati moduli che gestiscono i dati direttamente su *File System*.

5. Conclusioni

Il sistema integrato TRENT2D+Terra3 rappresenta una risposta all'esigenza di disporre di strumenti modellistici avanzati in ambienti di lavoro facilmente gestibili, in modo da superare gli attuali limiti alla diffusione di buone pratiche di difesa e salvaguardia del territorio. Grazie alla sua architettura, il sistema permetterà un continuo e sistematico trasferimento tecnologico dal mondo della ricerca al mondo dei professionisti e degli enti pubblici, facilitando l'uso e la diffusione delle "migliori pratiche e migliori tecnologie disponibili", come richiesto dalla Direttiva 2007/60/CE e senza introdurre costi eccessivi. L'integrazione tra il modello *TRENT2D* per fenomeni torrentizi e il *WebGIS Terra3* ha portato alla creazione di uno strumento versatile, comprensivo di gran parte delle funzionalità *GIS* necessarie per la visualizzazione efficace, la gestione agevole e l'analisi approfondita dei dati territoriali utilizzati e prodotti dal modello. Il sistema inoltre rilassa i requisiti *hardware* normalmente necessari per l'applicazione di modelli complessi e sofisticati come *TRENT2D*. Infatti, lo spostamento degli oneri computazionali lato *server* introduce notevoli vantaggi, anche in termini di accessibilità e di manutenzione. Infine, l'utilizzo di un sistema integrato come quello presentato riduce notevolmente i tempi di elaborazione e la frammentazione delle operazioni, limitando anche gli oneri di apprendimento.

Grazie alle caratteristiche del nuovo sistema, in futuro sarà possibile sfruttare l'architettura versatile e flessibile del *WebGIS* per l'integrazione anche con altri modelli, come quelli idrologici, quelli per i fenomeni valanghivi e quelli per gli incendi boschivi.

Bibliografia

- Andrienko N., Andrienko G. (2002), "Intelligent support for geographic data analysis and decision making", *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 5(2): 115-128
- Armanini A., Fraccarollo L., Rosatti G. (2009), "Two-dimensional simulation of debris flows in erodible channels", *Computers & Geosciences*, 35(5): 993-1006
- Brunner G.W. (2010), *HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual (Version 4.1)*, Hydrologic Engineering Center, Davis
- De Amicis R., Conti G., Piffer S., Simões B. (2009), "Open challenges and protection of the environment", *GeoSpatial Visual Analytics*, 265-286
- Heinimann H., Hollenstein K., Kienholz H., Krummenacher B., Mani P. (1998), "Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren", *Umwelt-Materialien*, 85
- O'Brien J.S., Julien P.Y., Fullerton W.T. (1993), "Two-dimensional water flood and mudflow simulation", *Journal of Hydraulic Engineering*, 119: 244-261
- Miller H.J., Han J. (2009), *Geographic data mining and knowledge discovery*, CRC Press, Bristol
- Plewe B. (1997), *GIS Online: information retrieval, mapping and the Internet*, OnWord Press
- Rosatti G., Begnudelli L. (2013a), "Two-dimensional simulation of debris over mobile bed: Enhancing the TRENT2D model by using a well-balanced Generalized Roe-type solver", *Computers & Fluids*, 71: 179-195
- Rosatti G., Begnudelli L. (2013b), "A closure-independent Generalized Roe solver for free-surface, two-phase flows over mobile bed", *Journal of Computational Physics*, 255: 362-383
- Rosatti G., Zorzi N., Begnudelli L., Armanini A. (2015), "Evaluation of the TRENT2D model capabilities to reproduce and forecast debris-flow deposition patterns through a back analysis of a real event", *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 2*, 1629-1633
- Trigila A., Iadanza C. (2015), *Rapporto di sintesi sul dissesto idrogeologico in Italia 2014*, ISPRA