

STUDIO DI UN EVENTO ALLUVIONALE CON L'IMPIEGO DI UN MODELLO DIGITALE DEL TERRENO

Fabio Luino (*), Franco Godone (*), Marco Baldo (*), Andrea Zamperone ()**

(*) CNR IRPI, Str. delle Cacce 73, 10135 Torino, Italia, franco.godone@irpi.cnr.it

(**) Iskander Engineering Group, Via Repubblica 43, 13900 Biella, a.zamperone@libero.it

Riassunto

Il CNR-IRPI di Torino nel 2004, nell'ambito del Progetto Europeo DAMAGE, è stato incaricato dalla Regione Lombardia di effettuare uno studio che avesse come obiettivo primario quello di fornire agli Enti che si occupano di Protezione Civile una comune metodologia di valutazione dei danni conseguenti ad un evento calamitoso. L'area campione che l'IRPI ha studiato in maniera approfondita è la Valcuvia (VA), interessata nel maggio del 2002 dall'esondazione del T. Boesio.

La necessità di conoscere in dettaglio la situazione morfologica del territorio preso in esame, ha motivato la formazione di un modello digitale del terreno (DTM) con l'impiego di fotogrammi aerei appositamente realizzati ed elaborati utilizzando la tecnica della fotogrammetria digitale. I punti di appoggio a terra sono stati determinati con tecniche di geodesia satellitare facendo riferimento ai capisaldi della rete regionale di raffittimento. Nella fase di restituzione sono stati rilevati i principali elementi caratteristici del terreno come fondo del corso d'acqua e sommità delle sponde fluviali, base e sommità dei rilevati ferroviari e stradali, i volumi edificati presenti nella zona in studio e numerosi punti quotati utili alla descrizione geometrica del territorio.

Il rilevamento ha interessato una zona con l'estensione di 107 ha e complessivamente sono stati rilevati 10000 punti. I dati geometrici del terreno sono stati in seguito inseriti in un modello matematico che ha prodotto una simulazione della propagazione dell'esondazione del T. Boesio.

Abstract

Within the framework of the European DAMAGE project, the Italian National Research Council – Turin section (CNR-IRPI) was commissioned by the Region of Lombardy in 2004 to carry out a study that would provide civil defense agencies with a standardized methodology to evaluate post-disaster damage. The study area the CNR-IRPI Turin selected was the Valcuvia (Varese province) which had been struck by floods along the Boesio River in May 2002. To gain a better understanding of the area's morphology, a digital terrain model (DTM) was constructed using aerial photographs that were then processed by digital photogrammetry. Ground reference benchmarks were identified with satellite geodesy linked to the regional geodetic network. During the interpretation and restituting phases, the area's principle morphologic features (riverbeds, riverbanks, road and railroads embankments, building volumes) were defined and numerous altimetric points were identified as useful for describing its geometry. The study site comprised an estimated area of 1.07 sq. km., and 10,000 topographic points were surveyed. The dataset was entered into a mathematical model that generated a simulation of Boesio overflow propagation.

Introduzione

Il CNR-IRPI nel 2004, nell'ambito del Progetto Europeo DAMAGE, è stato incaricato dall'Unità Operativa della Protezione Civile della Regione Lombardia di effettuare uno studio che avesse come obiettivo primario quello di fornire agli Enti che in Europa si occupano di Protezione Civile

una comune metodologia di valutazione dei danni conseguenti ad un evento calamitoso. E' stato utilizzato un approccio multi-disciplinare che includesse gli aspetti economici, ambientali, sociali ed infrastrutturali.

L'area indagata

L'area campione che l'IRPI di Torino ha studiato in maniera approfondita è la Valcuvia, in provincia di Varese. In particolare l'attenzione si è concentrata sul tratto terminale della vallata fra i centri abitati di Cittiglio e di Laveno Mombello.

La scelta è stata condizionata da:

- ✓ le limitate dimensioni del bacino (45 km²);
- ✓ il gran numero di dati disponibili (storici e territoriali);
- ✓ la rilevante pressione antropica;
- ✓ l'accadimento recente di un evento alluvionale (maggio 2002), ben documentato da un punto di vista dei danni.

Finalità del rilevamento

La necessità di conoscere in dettaglio la situazione morfologica del territorio del Comune di Cittiglio (VA) interessato da un evento alluvionale avvenuto nel maggio del 2002, ha motivato la formazione di un modello digitale del terreno (DTM) con l'impiego di fotogrammi aerei appositamente realizzati ed elaborati utilizzando la tecnica della fotogrammetria digitale.

La descrizione geometrica del territorio rappresentata dal modello digitale è stata utilizzata all'interno di un modello matematico che ha analizzato gli aspetti idrologici dell'evento alluvionale e la propagazione della piena del T. Boesio.

Descrizione della tecnica impiegata

Il rilevamento delle caratteristiche geometriche del terreno da utilizzare per l'attività qui descritta richiedeva una precisione plano-altimetrica di tipo decimetrico pertanto, è stata scelta la metodologia aerofotogrammetrica.

Il rilievo topografico tradizionale infatti, considerata l'estensione di 107 ha della zona da rilevare e la presenza di numerosi fabbricati, avrebbe richiesto l'impiego di due unità di personale per almeno 15 giorni di lavoro sul terreno con i relativi costi. Il rilevamento da foto aerea ha consentito invece un notevole risparmio di tempo e di costi mantenendo il livello di precisione nelle tolleranze previste e una accurata descrizione del territorio.

La ripresa aerea è stata pianificata fissando la quota di volo a circa 1000 m e la direzione delle strisciate in base alle esigenze del rilevamento, l'incarico è stato affidato alla Ditta Alifoto di Torino; il volo è stato regolarmente realizzato in data 13 aprile 2005 in assenza di copertura fogliare dovuta alla fase di riposo vegetativo invernale e con ombre molto limitate.

I fotogrammi sono stati analizzati e su quelli scelti per la restituzione sono stati individuati 24 punti di appoggio a terra la cui determinazione verrà descritta nel paragrafo successivo; in questa fase sono state realizzate anche le monografie dei punti da rilevare composte da una fotografia e un estratto dalla cartografia tecnica regionale alla scala 1:10000.

Le diapositive a colori delle foto aeree sono state scannerizzate tramite scanner Umax formato A3 con una densità di scansione di 800 DPI, in questa fase vengono generati anche alcuni parametri di calibrazione dello scanner ottenuti dalla scansione di una apposita griglia di controllo riprodotta su un supporto dimensionalmente stabile. Questi parametri, impiegati nella successiva attività di orientamento dei fotogrammi aerei, sono indispensabili per la correzione di eventuali distorsioni provocate da derive termiche e dimensionali dell'apparecchiatura di scansione.

Descrizione del rilievo dei punti di appoggio a terra

La posizione plano-altimetrica dei punti scelti è stata determinata con tecniche di geodesia satellitare. Le misure sono state eseguite in modalità statica con l'impiego di due sensori GPS Leica SR-520 L1/L2. I vertici di emanazione delle *baselines* appartengono alla rete di raffittimento della Regione Lombardia. Tutti i punti di nuova istituzione sono stati occupati per periodi non inferiori a 1 ora con un *rate* di acquisizione di 5 sec. Successivamente, nella fase di post-elaborazione, le coordinate rilevate dai ricevitori satellitari sono state elaborate, compensate e convertite dal sistema di coordinate WGS 84, proprio del sistema GPS, al sistema Gauss-Boaga Roma 40 utilizzato per i rilievi eseguiti nell'ambito del Progetto "Damage".

Le coordinate dei punti di appoggio, determinate con la modalità sopradescritta, sono caratterizzate per la maggioranza dei punti da una precisione centimetrica; il riferimento altimetrico del rilievo è stato riferito alla quota ortometrica del caposaldo 031603 della rete regionale ubicato a Cittiglio; nel corso del rilievo è stato rilevato, per controllo, anche il caposaldo regionale n. 031602 ubicato nella località Sasso Sciseno nel Comune di Castelvecchio, su questo punto la differenza fra la quota del caposaldo e quella rilevata è risultata di 0.039 m, dunque ampiamente rispondente alla tolleranza richiesta per questo rilievo. Occorre notare che le monografie dei due capisaldi, appartenenti alla rete di raffittimento della Regione Lombardia, sono state reperite con molta facilità sul sito Internet del Servizio Cartografico regionale lombardo che mette a disposizione gratuitamente questi importanti elementi geodetici indispensabili per il corretto svolgimento dei rilevamenti sul territorio.

Post-processamento e compensazione delle misure:

Tutte le elaborazioni, i post-processamenti e le strategie di compensazione sono state effettuate con software SKI-PRO secondo il criterio dei minimi quadrati (*least square method*).

Il collaudo è stato confrontato con software TRIMBLE GEOMATICS OFFICE, MOVE3, GPSurvey, e GEOGENIUS 2000.

Le orbite GPS (effemeridi) utilizzate sono le "*precise ephemerides*", rese disponibili dalla stazione permanente del Politecnico di Torino (TORI) di cui si illustrano le principali caratteristiche:

Effemeridi	Accuratezza orbita [cm]	Accuratezza orologio [ns]	Latenza	Aggiornamento	Intervallo di campionamento
Precise (Finali)	< 5	< 0.1	15 giorni	settimanale	15 ^m – 5 ^m (orologio)

In funzione della variabilità della lunghezza delle *baselines*, non eccedente mai i 10 km, sono stati utilizzati modelli troposferici Saastamoinen e/o computati sulla base delle osservazioni, mentre i modelli ionosferici sono computati secondo il modello Klobuchar.

Il set di coordinate compensato, in componente ellissoidica WGS 84, risulta verificato con un livello di affidabilità centimetrico, funzione del $\sigma_p \leq 5$ cm nelle tre componenti spaziali X,Y,Z dichiarati per i vertici della rete geodetica IGM 95.

I set di coordinate sono stati successivamente ricondotti nel sistema cartografico ROMA 40 in quota ortometrica utilizzando software certificato IGM Verto 2.

L'affidabilità del modello di ondulazione (ITALGEO 99 – emanazione del GEOTRAV), ha un'affidabilità stimata di +/- 15 cm (s.q.m.) mentre il passaggio al ROMA 40 porta ad una stima dell'affidabilità delle componenti planimetriche in circa +/- 10 cm, valore tendente a circa 20 cm lungo i bordi delle griglie di ondulazione.

Descrizione del rilievo aerofotogrammetrico

Il rilievo del territorio viene eseguito mediante tecniche di aerofotogrammetria digitale con l'impiego del software DVP versione 5.3 provvisto per l'osservazione stereoscopica tridimensionale di uno schermo polarizzato attivo e di occhiali polarizzati passivi per l'operatore. L'estensione della

zona da rilevare ha richiesto l'impiego di 8 fotogrammi aerei organizzati in 7 coppie stereoscopiche gestite nel loro insieme dal software DVP in un unico modello stereoscopico tridimensionale.

I fotogrammi aerei sono stati poi orientati per coppie stereoscopiche con gli orientamenti interno, relativo e assoluto. Per l'orientamento interno sono stati utilizzati i parametri di calibrazione dello scanner e i parametri di calibrazione della camera fotografica aerea forniti dalla Ditta esecutrice, l'orientamento relativo è stato eseguito utilizzando 8 punti di controllo in luogo dei 6 normalmente usati, per l'orientamento assoluto o esterno sono state impiegate le coordinate Est Nord e quota di 6 punti di appoggio a terra. Al termine della fase di orientamento è seguita la fase di restituzione nella quale l'approssimazione delle misure eseguite, tenendo conto dei vari parametri come quota di volo, focale della camera aerea, densità di scansione, è risultata essere di 0.10 m in planimetria e 0.14 in altimetria.

Gli elementi caratteristici del terreno da rilevare sono di seguito elencati: fabbricati, strade e ferrovie, rilevati stradali e ferroviari, sezioni trasversali del T. Boesio distanziate fra loro di 40 m nei tratti rettilinei e di 20 m nei tratti con curve, ponti e opere idrauliche. Le varie componenti del territorio suddivise per piani e caratterizzate da colori diversi sono state rilevate per punti così come richiesto dall'Ing A. Zamperone (collaboratore esterno del Progetto) che ha curato la generazione del modello idrologico, complessivamente sono stati rilevati circa 10000 punti.

A termine delle fase di restituzione il modello digitale del terreno è stato trasferito dal software DVP al software grafico Autocad mediante il formato di scambio DXF, all'interno di questo programma elaborativo sono state eseguiti editing grafico e la preparazione degli elaborati grafici e informatici da consegnare al collaboratore esterno.

Morfologia dell'area di indagine

Per poter studiare il comportamento del T. Boesio in occasione di eventi alluvionali e per poter prefigurare scenari di piena è di fondamentale importanza poter disporre di una adeguata base topografica, che sia in grado di definire la morfologia non solo dell'alveo, ma anche delle aree più prossime al corso d'acqua stesso. Poiché il tratto in esame, in corrispondenza dell'abitato di Cittiglio (VA), risulta fortemente antropizzato, si è preferito acquisire i dati geometrici attraverso la restituzione fotogrammetrica ottenuta da fotografie aeree, eseguite lungo l'asta del T. Boesio nel corso dell'aprile 2005.

La restituzione fotogrammetrica ha consentito di ricostruire con sufficiente precisione l'intorno del corso d'acqua, rilevando, in particolare, la presenza di infrastrutture di pubblico interesse (strade, ferrovie, Ospedale), le abitazioni private e le attività commerciali, le opere idrauliche (difese spondali, quali muri in c.a. e scogliere, i salti di fondo...). Risultato finale di questa prima fase è stata quindi la realizzazione di un DEM (*Digital Elevation Model*) a maglia irregolare (coordinate utilizzate: Gauss -Boaga, quote ortometriche). La fase successiva del lavoro ha consentito di passare dal modello digitale del terreno ad una rappresentazione piano – altimetrica dell'area in esame, giungendo alla definizione di una planimetria per punti quotati e curve di livello ed al tracciamento di 237 sezioni trasversali del corso d'acqua e delle aree limitrofe. A tale scopo, i punti tridimensionali ricavati dalla restituzione fotogrammetrica e memorizzati in formato Cad (.dxf 3D) sono stati importati nel *software* Leonardo SH. Attraverso questo *software* è stato possibile effettuare un'interpolazione "ragionata" dei punti quotati ed ottenere una rappresentazione tridimensionale dell'area di studio, mediante la generazione di curve di livello con un intervallo di 0,50 m. Affinché il *software* effettui correttamente l'interpolazione tra i punti quotati, è necessario introdurre le cosiddette *breaklines*, ovvero le linee di discontinuità del terreno. Sono state pertanto individuate le linee rappresentative del fondo alveo, della base ed del ciglio delle scarpate, delle scogliere, dei muri spondali, di strade, ferrovie ed abitazioni. Ultimata l'interpolazione dei punti e definite le curve di livello rappresentative della morfologia del terreno, sempre mediante il *software* Leonardo SH, è stato possibile tracciare le sezioni trasversali del corso d'acqua, che, nelle fasi successive dello studio, sono state utilizzate per effettuare la verifica idraulica del torrente. Il tracciamento delle sezioni è stato effettuato in modo tale che queste risultino perpendicolari non

solo all'alveo, ma anche alle scarpate ed ai rilevati ferroviari e stradali. A tale scopo, in alcuni casi, si è fatto ricorso a delle linee spezzate. Per poter meglio rappresentare l'andamento del corso d'acqua, l'interasse tra le sezioni è stato mediamente pari a 20 – 30 metri. In ogni caso le sezioni sono state definite a valle e a monte di un attraversamento, all'inizio ed al termine delle curve del corso d'acqua, in presenza di difese spondali longitudinali (muri e scogliere), a valle e a monte di confluenze con rii minori. Poiché l'obiettivo dello studio è stato la definizione delle aree a rischio di inondazione, le sezioni non si sono limitate all'alveo attivo, bensì sono state estese a tutta la piana alluvionale, fino alla prima variazione di quota importante (rilevato stradale o ferroviario, versante montano). Per la successiva immissione delle sezioni nel *software* di modellazione idraulica, queste sono state definite a partire da valle verso monte; ogni sezione, inoltre, è stata tracciata dalla sponda in sinistra orografica verso quella in destra (ovvero vista da monte verso valle).

Analisi idrologica

Nel presente studio è stata effettuata un'analisi idrologica ed idraulica del bacino del T. Boesio nel tratto ubicato nei Comuni di Cittiglio e Brenta, al fine di comprendere il comportamento del corso d'acqua durante eventi alluvionali. L'analisi idrologica è di fondamentale importanza per poter definire in modo corretto un modello afflussi – deflussi dell'area in esame. Sono stati calcolati valori di portata di piena relativi a tempi di ritorno pari a 20, 100 e 200 anni, utilizzando il metodo della corrivazione. In prima istanza sono state definite le curve di possibilità pluviometrica, partendo dai dati di precipitazione intensa delle stazioni di misura ubicate al di fuori del bacino del T. Boesio. Si è passati quindi ad un'analisi spaziale delle precipitazioni, interpolando con il metodo *kriging* i dati puntuali registrati dai pluviografi. Questa analisi è stata effettuata sia comprendendo e sia escludendo le stazioni di Unchio e Candoglia (sponda piemontese del lago Maggiore), ottenendo risultati sensibilmente differenti. I coefficienti a ed n della curva di possibilità climatica sono stati ragguagliati alla superficie del bacino mediante la formulazione di Colombo e utilizzati successivamente per la stima delle portate. I tempi di corrivazione sono stati calcolati con diverse relazioni empiriche presenti in letteratura; per ogni sotto – bacino è stato preso in considerazione il valore di τ_c più piccolo a cui corrisponde il valore più alto di portata di piena. La portata quindi è stata calcolata per i diversi tempi di ritorno con due metodologie. La prima è il metodo razionale, con cui è possibile determinare la portata al colmo a partire dai valori di precipitazione intensa ragguagliati al bacino, dalle caratteristiche morfologiche del bacino idrografico, dal tempo di corrivazione e dal coefficiente di deflusso. La seconda metodologia utilizzata è stata quella predisposta dal *Soil Conservation Service* (SCS). Tale metodo stima la portata in funzione del coefficiente di deflusso, valutato tramite il parametro CN, del tempo di corrivazione e dei parametri a ed n , anche in questo caso ragguagliati al bacino. I valori di portata di piena ottenuti attraverso l'applicazione dei due metodi sono risultati essere sensibilmente differenti. Per poter valutare quale delle procedure potesse descrivere meglio il comportamento idraulico del T. Boesio si è pertanto ricorso al confronto con i valori di portata ottenuti dall'analisi dell'evento alluvionale 2 - 5 maggio 2002, per il quale erano disponibili le misure di precipitazione intensa presso la stazione Campo dei Fiori. Il metodo razionale è risultato sovrastimare le portate dell'evento alluvionale, mentre il metodo SCS è stato in grado di ben ricostruire la dinamica dell'esondazione dei giorni dal 2 al 5 maggio (tempo di ritorno 25 – 30 anni). L'analisi idraulica è stata effettuata con particolare dettaglio in un tratto critico del T. Boesio, presso l'abitato di Cittiglio, compreso tra il ponte della S.S. a monte e la confluenza con il T. S. Giulio a valle. Grazie al confronto tra le aree inondate determinate con il modello afflussi – deflussi e la ricostruzione delle aree inondate effettuata mediante le fotografie aeree, i dati relativi ai danni accorsi alle strutture e le testimonianze dirette, raccolte in sito, è possibile affermare che il modello sviluppato in questo studio è in grado di ben rappresentare il comportamento del T. Boesio, in caso di evento alluvionale. Il tempo di ritorno limitato dell'evento alluvionale del 2 – 5 maggio 2002 pone il centro abitato di Cittiglio in una grave condizione di rischio inondazione. Aree residenziali di recente costruzione, attività commerciali (in particolare una falegnameria), ma soprattutto l'Ospedale e le sue aree pertinenziali,

sono stati interessati dall'ultimo evento alluvionale. Tali infrastrutture sarebbero, in ogni caso, a rischio di inondazione anche in occasione di eventi con TR inferiore a 20 anni. Lo scenario alluvionale determinato attraverso il calcolo di una portata di massima piena con TR pari a 20 anni si presenta del tutto simile a quello dell'alluvione 2002. Nell'ipotesi di un evento di piena con TR 100 anni si verificherebbe, invece, un'ulteriore estensione delle aree inondate. Gli effetti della piena andrebbero ad interessare porzioni di territorio più estese in particolare in sponda sinistra in corrispondenza della stazione ferroviaria, e, sempre lungo la sponda sinistra, a monte del ponte della S.S. ed in corrispondenza delle aree occupate dai complessi residenziali di recente costruzione. La sponda destra lungo tutto questo tratto si troverebbe, invece, in condizioni di maggiore sicurezza per la presenza del rilevato della S.S.

Conclusioni

Le modalità operative descritte in questo rapporto riguardano lo studio di un evento pregresso e la loro attendibilità può trovare immediato riscontro dalle tracce lasciate sul territorio analizzato. Il metodo offre la possibilità di applicazione per zone in cui si presentino condizioni morfologiche analoghe a quelle presentate e potrebbero subire eventuali danni da futuri eventi di piena.

I modelli digitali del terreno descrivono con dettaglio le evidenze morfologiche del territorio; l'ausilio di specifiche elaborazioni di tipo geometrico e idraulico, consentono inoltre di valutare preventivamente sia l'ubicazione delle zone potenzialmente soggette a danni da esondazione sia di quantificare i potenziali danni subiti dal territorio.

Bibliografia

Surfer® 8 (2002), *User's guide*, Golden Software, Denver, U.S.A.

Cina A. (2001), *GPS Principi, modalità e tecniche di posizionamento*, Celid, Torino

Falchi E., Sanna G., Surace L. (1999), "Verifica dei parametri di trasformazione da WGS84 al sistema nazionale (Roma40-Gauss Boaga)", *Bollettino SIFET*, 3: 55,64

Barzaghi R., Guzzetti F., Pinto L. (1998), "Problemi connessi all'utilizzo di reti GPS per l'inquadramento altimetrico della cartografia a grande scala", *Bollettino SIFET*, 1: 17,36

Cambursano C. (1997), *Cartografia Numerica*, Editrice Esculapio, Bologna, 267-310

Barzaghi R., Brovelli M.A., Sona G. (1996), "The new italian quasigeoid: ITALGEO95", *Bollettino di geodesia e scienze affini*, 1: 57,72

Inghilleri G. (1974), *Topografia Generale*. Scienze UTET, Torino