

METODO SHORTCUT PER LA STIMA DELLE CONSEGUENZE INCIDENTALI

**Andreis F.(*), Baldacci S.(°), Lombardi A.(*), Marotta F.(°), Mossa Verre M.(°)
Ricchiuti A.(#), Capponi G.(#)**

() Dipartimento ARPAT– Via Marradi, 114 Livorno*

(°) Dipartimento ARPAT – Via Vittorio Veneto, 27 Pisa

(#) APAT – Via Brancati, 48 ROMA

SOMMARIO

Il “Metodo Shortcut” è uno strumento per la stima delle conseguenze di incidenti rilevanti basato su una serie di modelli semplificati che permettono di ottenere le distanze di danno in caso di incidenti rilevanti in maniera semplice e veloce. Sono stati sviluppati due tipici eventi incidentali, rappresentativi di molte condizioni impiantistico-gestionali: il primo è caratterizzato da probabilità relativamente alta e magnitudo contenuta, ma comunque rilevante; il secondo è associato a probabilità di accadimento più remote e condizioni di rilascio di media gravità, tipico di eventi incidentali rilevanti, ma pur sempre credibili. Entrambi gli eventi incidentali sono stati sviluppati nelle categorie di stabilità atmosferica D5 e F2, nel caso di presenza o assenza di bacino di contenimento e per diverse modalità di detenzione (serbatoio atmosferico, pressurizzato, criogenico). Le distanze di danno corrispondono alle soglie standard dell’evento modellato (elevata letalità, inizio letalità ecc.). Analoghi incidenti sono stati sviluppati per il trasporto con autobotti, ferrocisterne, condotte e navi.

Il “Metodo Shortcut” fornisce i risultati per 250 sostanze pericolose ma può essere utilizzato anche per sostanze non presenti negli elenchi, partendo dalle loro proprietà chimico fisiche. I modelli sono stati ottenuti applicando l’analisi multivariata a modelli più complessi; i modelli hanno mostrato un ottimo accordo con i risultati delle simulazioni ottenute con il software Phast 6.1 della DNV Tecnica.

Il lavoro ha permesso di verificare la validità dei criteri di classificazione delle sostanze infiammabili utilizzati nelle precedenti versioni del Metodo Speditivo mentre ha evidenziato delle criticità relativamente agli analoghi criteri di classificazione utilizzati per le sostanze tossiche. Le sostanze tossiche sono state quindi classificate sulla base dei loro effetti.

Il “Metodo Shortcut” può essere utilizzato quale supporto durante l’attività di verifica dei Rapporti di Sicurezza, costituendo una risorsa alternativa ai pacchetti software commerciali.

Il “Metodo Shortcut” è disponibile sia in versione cartacea che informatica.

1. INTRODUZIONE

Il “Metodo Shortcut” qui esposto, di seguito Metodo, è finalizzato alla stima speditiva delle conseguenze derivanti da eventi incidentali rilevanti connessi allo stoccaggio, movimentazione e trasporto (autobotte, ferrocisterna, condotta, nave) di sostanze pericolose.

L’applicazione del Metodo fornisce la stima delle distanze di danno per due tipologie di eventi incidentali, rappresentative di elevati livelli di sicurezza impiantistico-gestionali così definite:

- ipotesi più probabile, caratterizzata da probabilità relativamente alta e magnitudo contenuta, ma comunque rilevante;
- ipotesi media, associata a probabilità di accadimento più remote e termini di sorgente di media gravità, tipica di eventi incidentali rilevanti ma pur sempre credibili.

Per ciascuna ipotesi incidentale sono fornite le distanze di danno alle soglie standard dell’evento modellato (elevata letalità, inizio letalità, lesioni irreversibili, lesioni reversibili) nelle condizioni meteorologiche 5/D e 2/F.

Il Metodo si basa sull’applicazione dello schema caratteristico dell’analisi delle conseguenze. I termini di sorgente sono desunti da dati tipici di impianto che costituiscono i parametri di input dei modelli di simulazione.

I risultati forniti dal metodo proposto devono essere assunti come valori indicativi di riferimento; dovrà essere tenuta presente l'incertezza insita nella stima delle distanze di danno.

2. CRITERI DI CLASSIFICAZIONE DELLE SOSTANZE

2.1 Criteri di classificazione per le sostanze infiammabili

I risultati delle simulazioni effettuate hanno confermato la bontà dei criteri di classificazione delle sostanze infiammabili basati sulle loro caratteristiche di pericolosità generalmente significative ai fini della valutazione delle conseguenze. Pertanto il Metodo Shortcut, analogamente alle precedenti versioni del Metodo Speditivo, classifica le sostanze infiammabili secondo i criteri riportati nella tabella seguente:

Tabella 1 : Criteri di classificazione delle sostanze infiammabili

Classe			Tipo di sostanza	Caratteristiche	Ulteriori caratteristiche
1	1.1	1.1.1	Liquidi infiammabili	$P_v < 0.3$ bar a 20°C	$T_{\text{inf}} > 20^\circ\text{C}$
		1.1.2			$T_{\text{inf}} < 20^\circ\text{C}$
	1.2	-		$P_v > 0.3$ bar a 20°C	/
2	2.1	2.1.1	Gas infiammabili	Liquefatti per compressione	$T_{\text{eb}} > -8^\circ\text{C}$
		2.1.2			$T_{\text{eb}} < -8^\circ\text{C}$
	2.2	-		Liquefatti per refrigerazione	/
	2.3	-		Semplicemente compressi	/

2.2 Criteri di classificazione delle sostanze tossiche

Diversamente da quanto ottenuto per le sostanze infiammabili, i risultati derivanti dalle simulazioni effettuate per le sostanze tossiche appartenenti alla medesima classe di pericolosità (definita con le modalità di classificazione indicate nelle precedenti versioni del Metodo speditivo) hanno mostrato una notevole variabilità all'interno di ciascuna classe (spesso la distribuzione è apparsa multimodale), con oscillazioni anche superiori a due ordini di grandezza. Inoltre, a parità di condizioni di stoccaggio (atmosferico o criogenico od in pressione, con o senza bacino di contenimento) e di termini sorgente la distribuzione dei risultati ha manifestato spesso un andamento diverso al variare del valore di soglia (LC_{50} o IDLH) o delle condizioni meteo (D5 o F2), con differente posizionamento relativo delle sostanze in ragione delle rispettive distanze di danno. L'andamento della dispersione dei risultati è sembrato, in prima approssimazione, avere caratteristiche casuali.

Occorre infine ricordare che in alcuni casi, anche il peso relativo tra le classi (in termini di tossicità) non è risultato congruente con quanto ottenuto dalle simulazioni.

I problemi sopra evidenziati sembrano dovuti, almeno in parte, all'incoerenza dei rapporti $LC50$ 4 h ratto / $LC50$ 30min uomo e $LC50$ 30min uomo/ IDLH, oltre che, probabilmente, ad altri fattori non individuati.

È stato pertanto necessario abbandonare, per le sostanze tossiche, il metodo di classificazione impiegato nelle precedenti versioni del metodo speditivo, adottando una metodologia che, partendo dai risultati delle simulazioni, giungesse direttamente – all'interno di macro-classi rappresentanti la tipologia di detenzione – alla individuazione di nuovi criteri di classificazione (pseudo-classi).

Pertanto, nel Metodo è definita una macroclassificazione delle sostanze tossiche sulla base delle modalità di detenzione o di formazione delle stesse, secondo quanto riportato nella tabella seguente:

Tabella 2 : Criteri di classificazione delle sostanze tossiche

Classe	Tipo di sostanza	
4	Liquidi tossici	
5.1	Gas tossici	liquefatti per compressione
5.2		liquefatti per refrigerazione
5.3		compressi

Le sostanze tossiche appartenenti alle classi 4, 5.1, 5.2, 5.3 sono state quindi ulteriormente classificate sulla base dei loro effetti, attraverso correlazioni tra i risultati delle simulazioni e le proprietà chimico-fisiche e tossicologiche di seguito specificate.

Tabella 3 : Proprietà chimico fisiche utilizzate nelle correlazioni

Classe	Tossici	Proprietà chimico-fisiche
4	Liquidi	LC ₅₀ , IDLH, P _v , PM, T _{eb} , c _p , ΔH _{vap} , ρ _l
5.1	Gas liquefatti per compressione	LC ₅₀ , IDLH, P _v , PM, T _{eb} , c _p , ΔH _{vap} , T _{critica}
5.2	Gas liquefatti per refrigerazione	LC ₅₀ , IDLH, P _v , PM, T _{eb} , c _p , ΔH _{vap} , T _{critica}
5.3	Gas compressi	LC ₅₀ , IDLH, P _{stocc.} , PM, T _{eb} , c _p , ΔH _{vap} , T _{critica}

La metodologia, descritta in dettaglio più avanti (§ 6), prevede la costruzione, attraverso i risultati delle simulazioni, di matrici dei coefficienti delle correlazioni (i micro-modelli) tra i raggi di danno e le principali proprietà chimico-fisiche di ogni sostanza.

3. MODALITÀ DI DETENZIONE

Il Metodo prende in considerazione le seguenti modalità di detenzione:

- stoccaggio con bacino di contenimento;
- stoccaggio senza bacino di contenimento;
- trasporto per mezzo di Autobotti o Ferrocisterne (ATB/FC);
- trasporto tramite nave;
- trasporto mediante condotta.

Circa il trasporto tramite nave, ritenendo probabilisticamente più significativo l'incidente nella fase di carico e scarico rispetto a quello connesso con la movimentazione del vettore, questa tipologia di incidente è assimilata ad un incidente in stoccaggio senza bacino di contenimento (punto b), fatti salvi i propri parametri di sorgente.

4. IPOTESI INCIDENTALI E RELATIVI SCENARI

Partendo dalle tipologie impiantistiche o di trasporto più comuni per le sostanze pericolose esaminate e dalle rotture tipiche attese (dimensione della rottura e durata del rilascio, come prescritto in alcune norme tecniche specifiche per elevati livelli di sicurezza impiantistica e gestionale, o riportate in letteratura), sono stati individuati i termini di sorgente da introdurre nei modelli di simulazione per le due condizioni meteorologiche D5 e F2.

Tutti gli eventi sono ricondotti ad una perdita ed al conseguente rilascio nell'ambiente circostante di sostanze pericolose. L'evento incidentale può evolvere secondo uno dei seguenti scenari canonici:

- radiazione termica stazionaria (POOL FIRE);
- radiazione termica istantanea (FLASH-FIRE);

- sovrappressione da esplosione parzialmente confinata (VCE);
- rilascio tossico.

5. VALORI DI SOGLIA

Ai fini dell'applicazione del Metodo il danno è correlato all'effetto fisico mediante il criterio di vulnerabilità rappresentato dal superamento di un valore di soglia. I valori di soglia di riferimento sono rappresentati nella tabella seguente.

Tabella 4 : Valori di soglia di riferimento

Scenario incidentale	Elevata letalità	Inizio letalità	Lesioni irreversibili	Lesioni reversibili
Incendio (radiazione termica stazionaria)	12,5 kW/m ²	7 kW/m ²	5 kW/m ²	3 kW/m ²
BLEVE/Fireball (radiazione termica variabile)	Raggio fireball	350 kJ/m ²	200 kJ/m ²	125 kJ/m ²
Flash-fire (radiazione termica istantanea)	LFL	1/2 LFL		
VCE - UVCE (sovrappressione di picco)	0,3 bar (0,6 bar per spazi aperti)	0,14 bar	0,07 bar	0,03 bar
Rilascio tossico (dose assorbita)	LC ₅₀ (30', hmn)		IDLH	

6. METODO STATISTICO IMPIEGATO PER LA COSTRUZIONE DELLE CORRELAZIONI (MICRO-MODELLI) PER LE SOSTANZE TOSSICHE: REGRESSIONI MULTIPLE LINEARI/NON LINEARI LINEARIZZABILI IN R

Come precedentemente indicato, per le sostanze tossiche sono stati sviluppati alcuni modelli semplificati (correlazioni) che permettono di ottenere le distanze di danno in tutte le condizioni sopra descritte. I modelli semplificati correlano le distanze di danno ottenute, utilizzando il software commerciale Phast 6.1 della DNV Technica, per sostanze appartenenti alla medesima classe a parità di termini sorgente. I modelli sono stati ottenuti applicando l'analisi multivariata a modelli più complessi reperibili in letteratura; essi sono stati validati per decine di sostanze e mostrano un ottimo accordo con i risultati delle simulazioni. Per correlare i risultati delle simulazioni si è fatto uso del metodo Stepwise generalizzato¹, considerando come variabili (V) forme lineari e non lineari dei parametri chimico fisici: V, 1/V, lnV, V-2/3.

6.1 Indici di performance delle correlazioni

Per misurare la bontà di ciascuna correlazione si sono utilizzati i seguenti indici di performance:

- R_2 , rapporto tra la varianza spiegata dalla correlazione e quella totale;
- $\sqrt{\text{MSE}}$, radice del rapporto tra la somma dei quadrati degli errori (SSE) e la differenza tra il numero di dati e il numero dei parametri della correlazione;
- Residui normalizzati, rapporto tra l'errore dell'iesimo punto ($y_{i,\text{calc}} - y_{i,\text{corr}}$) e $\sqrt{\text{MSE}}$.

¹ Per una trattazione approfondita del metodo stepwise si rimanda a:

Draper, N., and H. Smith, Applied Regression Analysis, Second Edition, John Wiley and Sons, Inc., 198,1 pp. 307-312.

6.2 Utilizzo delle correlazioni per la classificazione

I risultati delle correlazioni e delle simulazioni sono stati rappresentati in un diagramma diagonale come genericamente rappresentato nella figura seguente.

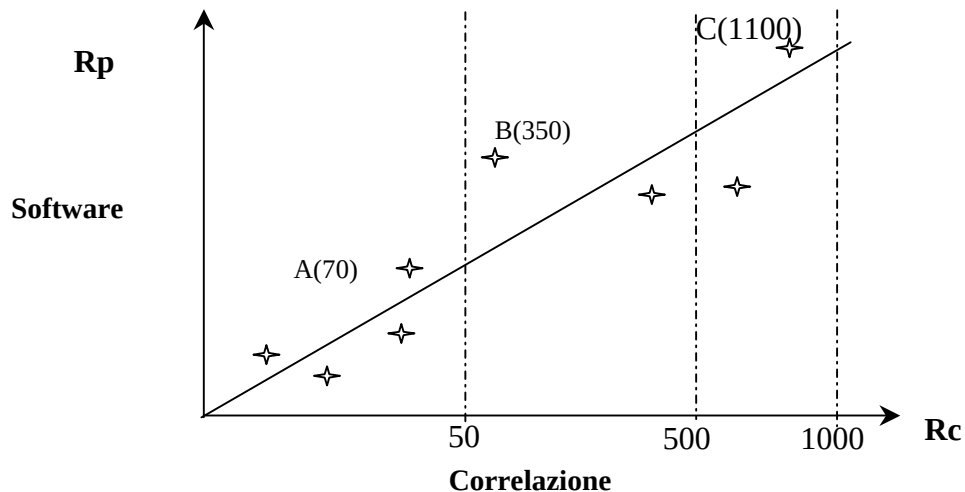


Figura 1. Grafico diagonale

Successivamente sono stati effettuati dei tagli che rappresentano le sottoclassi, cui viene assegnato un raggio di danno pari al massimo dei valori restituiti dal software commerciale per tutte le sostanze simulate presenti nella sottoclasse stessa.

Con riferimento all'esempio grafico sopra riportato risulta che:

- il numero di sottoclassi è quattro (pari al numero dei tagli più uno);
- le sostanze appartenenti alla prima sottoclasse sono rappresentate da un raggio di danno pari a 70 m (pari all'ordinata del punto A);
- le sostanze appartenenti alla seconda zona sono rappresentate da un raggio di danno pari a 350 m (pari all'ordinata del punto B).
- ecc.

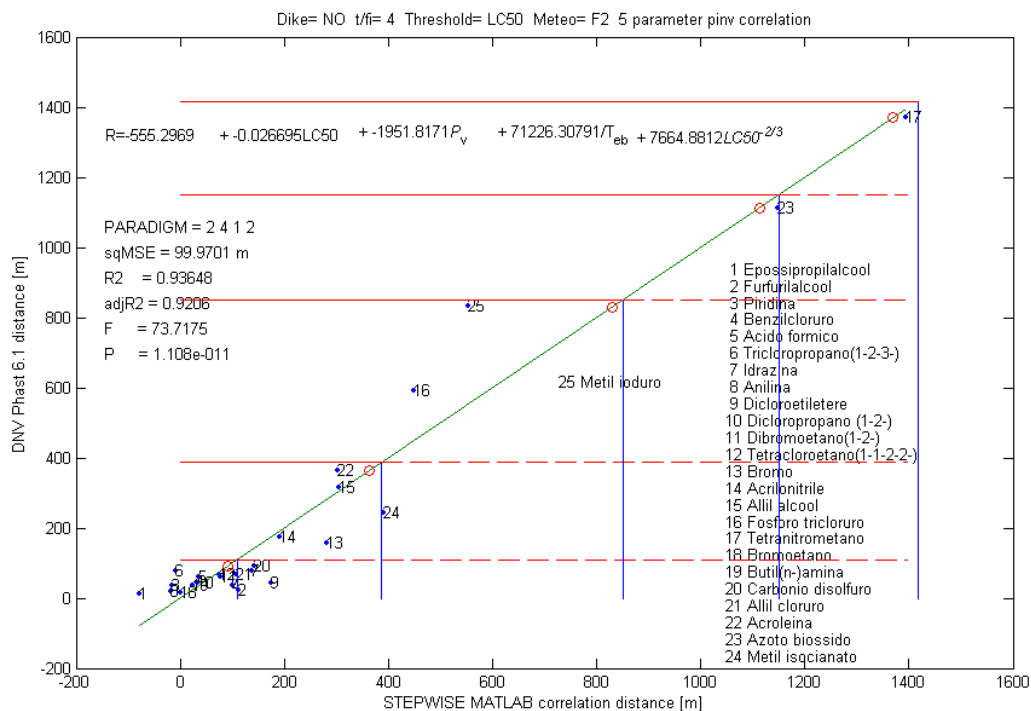
Occorre osservare che la stessa sostanza, nel caso di diversi termini sorgente, può appartenere a sottoclassi diverse, in quanto la classificazione non è effettuata sull'insieme delle sostanze, bensì sull'insieme degli effetti (distanze di danno).

La suddivisione in sottoclassi è sempre effettuata:

- individuando 5 sottoclassi, di cui l'ultima generalmente con estremo superiore aperto;
- cercando di massimizzare il valore dei parametri che definiscono la bontà della correlazione;
- assumendo come valore rappresentativo della sottoclasse il valore massimo tra tutte le distanze di danno fornite dal codice di calcolo per le sostanze comprese nella zona;
- contenendo la variabilità delle distanze di danno all'interno della sottoclasse a meno di un ordine di grandezza.

Una sottoclasse può essere individuata anche in una zona priva di sostanze simulate; in questo caso viene assegnato a quella sottoclasse il valore massimo della correlazione.

Si riporta di seguito una rappresentazione grafica tratta da quelle realmente ottenute.



7. IL SOFTWARE MESH® PER LA STIMA DELLE CONSEGUENZE DI INCIDENTI RILEVANTI

ARPAT ha realizzato il programma MESH® per stimare le conseguenze di incidenti rilevanti in maniera semplice e veloce. L'obiettivo di questo software è quello di fornire un supporto durante l'attività di verifica dei Rapporti di Sicurezza. Il software rappresenta la versione informatica del Metodo sopra descritto.

Partendo dal numero CAS della singola sostanza o, in alternativa dal nome o dalla classe della sostanza, dalla modalità di trasporto o di detenzione e, in relazione al diametro della condotta o la capacità del serbatoio, si ottengono i raggi di danno per le diverse soglie, per le due condizioni meteorologiche D5 e F2. Il software fornisce anche la possibilità di visualizzare i raggi di danno su una mappa.

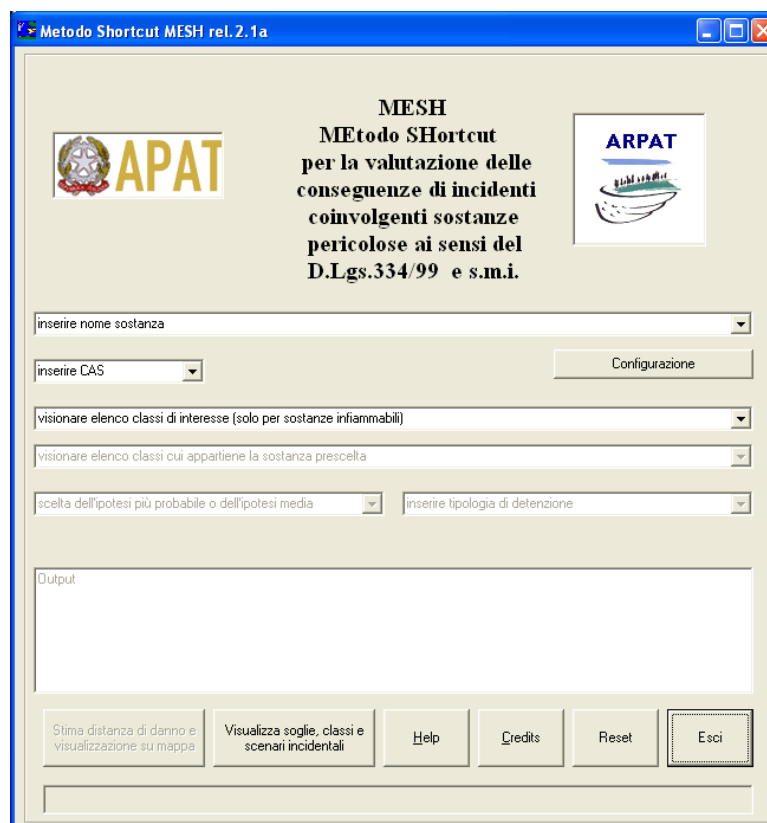


Figura 2. MESH® 2.1

Nella versione MESH 2.1 del software è possibile salvare un report contenente la descrizione delle ipotesi alla base del calcolo: il nome della sostanza, la classe di appartenenza, le modalità di detenzione, i quantitativi in gioco, le soglie di interesse e le condizioni meteorologiche. È inoltre possibile salvare il report in formato .txt ed inviare in stampa la visualizzazione su mappa dei raggi di danno.

La funzione "map re-scaling" permette di impostare la scala della mappa con precisione se si conosce una distanza specifica all'interno della mappa stessa.

Un help in linea guida l'utente in ogni passo che deve compiere ed è inoltre disponibile in linea tutta la documentazione alla base dello sviluppo del metodo: il manuale utente (diviso in due parti) e l'elenco delle sostanze presenti nel metodo in ordine alfabetico e suddivise nelle singole classi.

Il software è distribuito gratuitamente dall'APAT.

Di seguito sono riportati due esempi dell'applicazione del software. Come si può notare dal confronto tra i risultati ottenuti con il Metodo Shortcut e il Phast 6.1 della DNV Tecnica, i risultati che si ottengono per l'ammoniaca, così come generalmente quelli ottenibili per tutte le sostanze tossiche, sono generalmente migliori rispetto a quelli ottenuti in caso di sostanze infiammabili. Questo è dovuto al fatto che i micromodelli sono stati utilizzati solo nel caso di sostanze tossiche per le quali è stato necessario rivedere i criteri di classificazione. Nelle versioni successive del metodo i micromodelli potranno essere applicati anche a queste classi di sostanze.

Caso Studio #1:

Sostanza: Ammoniaca
 Serbatoio di stoccaggio con bacino di contenimento
 Quantità: 100t
 Gas liquefatto per compressione
 Scenario: rilascio tossico

Table 5: Confronto tra i risultati ottenuti con il software Phast 6.1 della DNV Technica e il Software MESH di ARPAT per l'ammoniaca.

Raggi di danno [m]			
		ARPAT MESH	DNV Phast 6.1
5/D	LC50	120	123
5/D	IDLH	410	415
2/F	LC50	140	142
2/F	IDLH	1350	1353

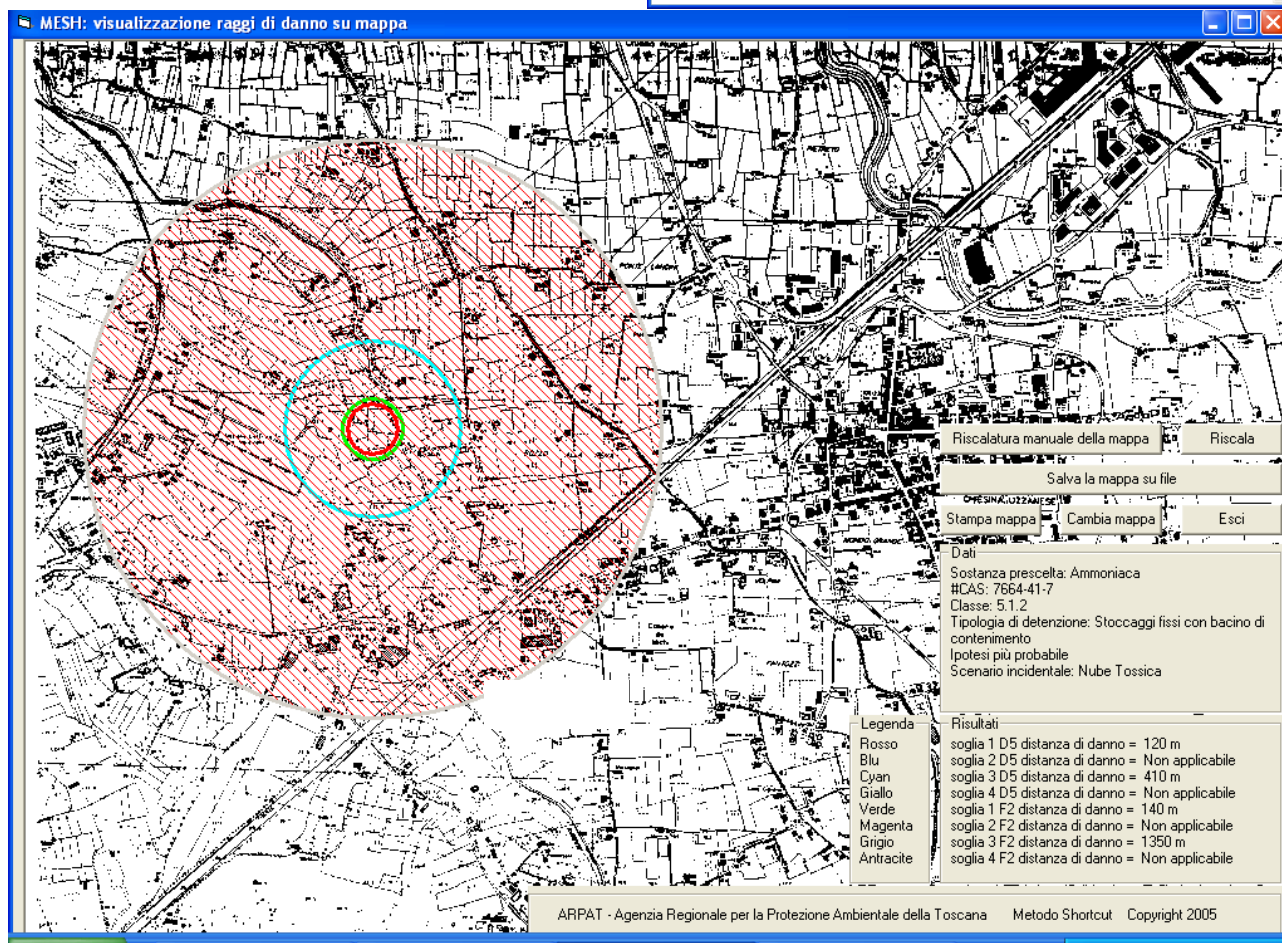
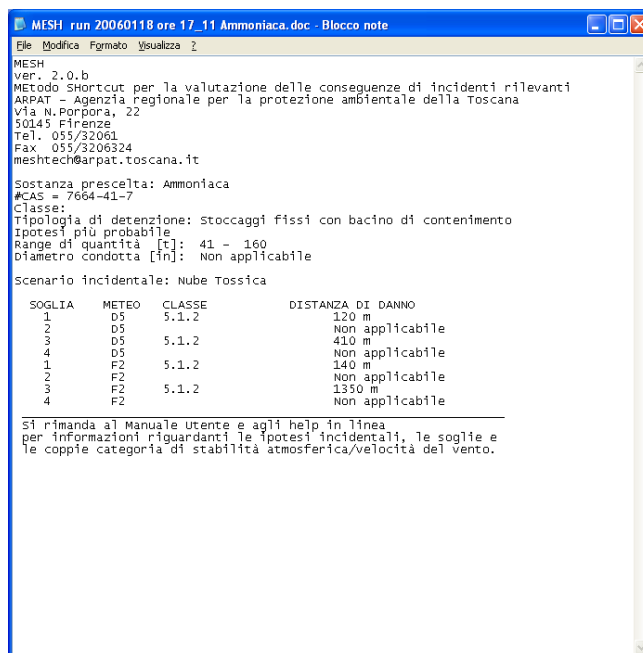


Figure 2. Caso Studio #1: Ammoniaca - Raggi di danno riportati su mappa

Caso Studio #2: Propano

ATB

Gas infiammabile liquefatto per compressione

GoogleEarth map

Scenario: VCE

VCE - UVCE

(Picchi di sovrappressione)

0,3 bar - 0,14 bar - 0,07 bar - 0,03 bar

Table 6: Confronto tra i risultati ottenuti con il software Phast 6.1 della DNV Technica e il Software MESH di ARPAT per il propano

Raggi di danno [m]			
	Bar	ARPAT MESH	DNV Phast 6.1
5/D	0.3	490	264
5/D	0.14	550	306
5/D	0.07	650	371
5/D	0.03	920	543
2/F	0.3	630	399
2/F	0.14	710	465
2/F	0.07	810	566
2/F	0.03	1150	837

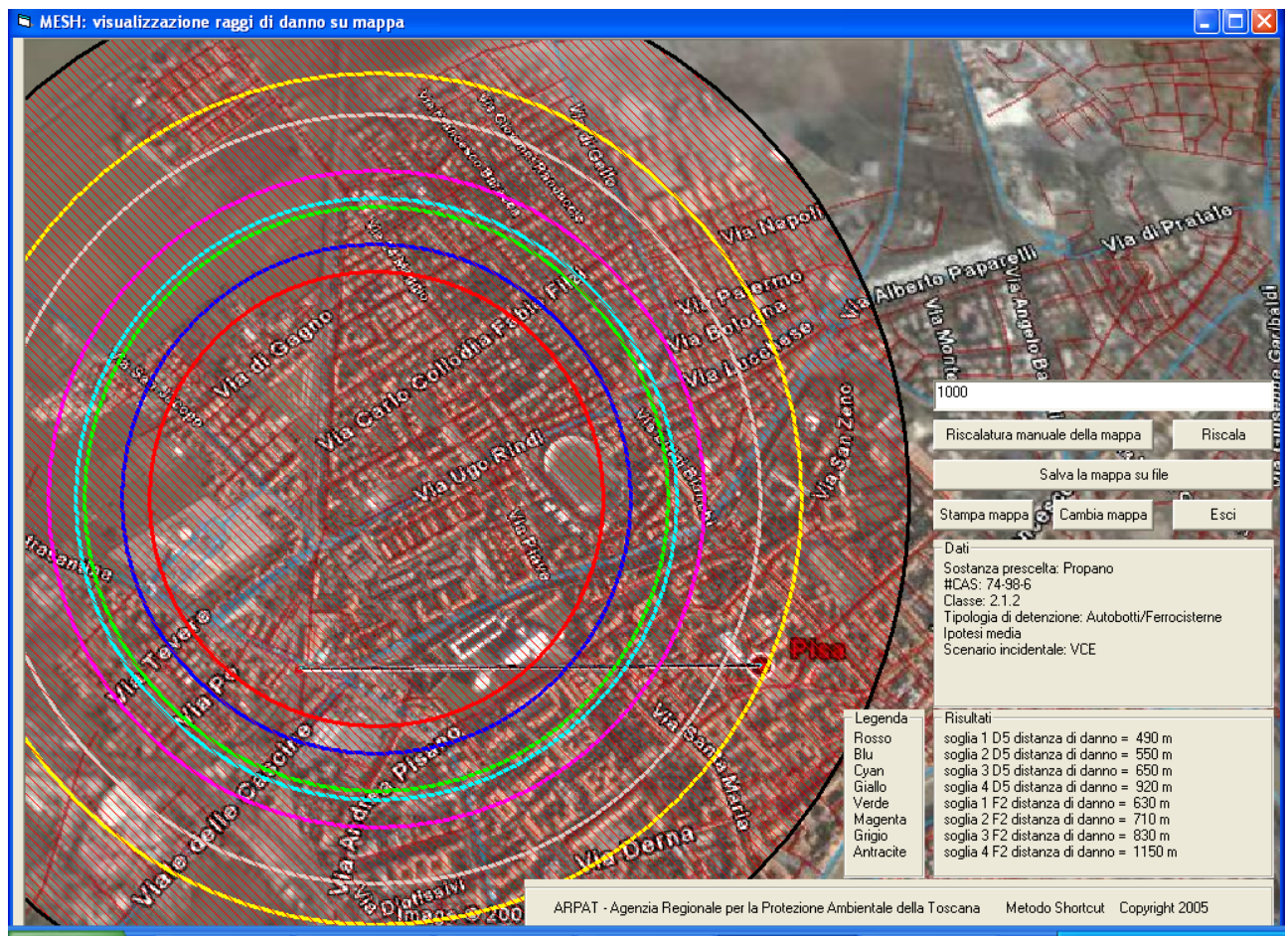
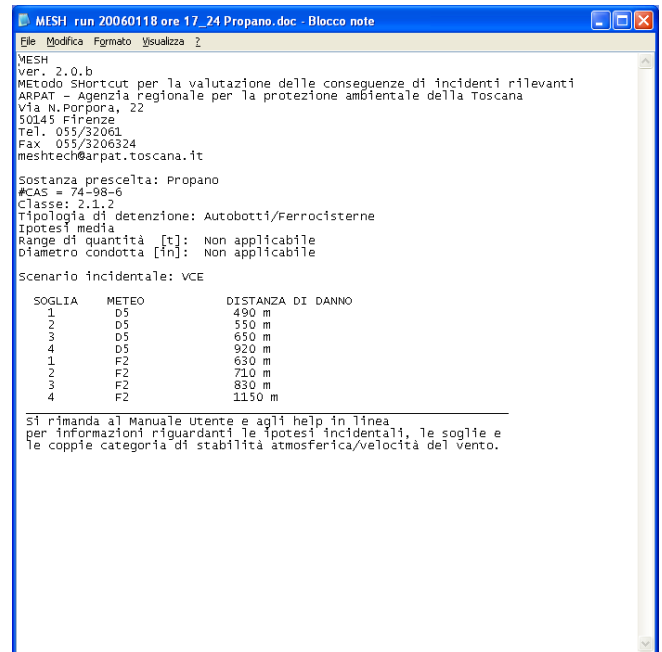


Figure 3. Caso studio #2: Propano - Raggi di danno riportati su mappa

8. CONCLUSIONI

Il Metodo che è stato esposto, finalizzato alla stima speditiva delle conseguenze derivanti da eventi incidentali rilevanti connessi allo stoccaggio, movimentazione e trasporto di sostanze pericolose, si basa sull'applicazione dello schema caratteristico dell'analisi delle conseguenze. Da dati tipici di impianto e da condizioni meteorologiche più rappresentative sono desunti i termini di sorgente che costituiscono i parametri di input dei modelli di simulazione. Correlando i risultati a criteri di vulnerabilità sono stimate le distanze di danno.

Il Metodo in questione vuole essere un rapido strumento, ad uso del valutatore pubblico, finalizzato alla verifica della correttezza dei risultati presenti nel Rapporto di Sicurezza, ottenuti dal gestore per altra via.

È opportuno tener presente che le distanze di danno fornite dal Metodo non sono numericamente le maggiori, in assoluto, dell'insieme delle soluzioni possibili e non è quindi corretto considerarle sempre cautelative.

Occorre altresì considerare l'incertezza insita nelle stime fornite dal Metodo. È noto che esercizi di benchmarking hanno evidenziato scostamenti relativi, nella stima delle conseguenze, anche di diversi ordini di grandezza, pur partendo dallo stesso caso in studio. I risultati forniti dal Metodo proposto sono pertanto da assumersi come valori indicativi di riferimento.

RIFERIMENTI

- Linee guida per la pianificazione di emergenza esterna per impianti industriali a rischio di incidente rilevante, Dipartimento della Protezione Civile - Presidenza del Consiglio dei Ministri, 18 gennaio 1994;
- Memorie del "Convegno nazionale valutazione e gestione del rischio negli insediamenti civili ed industriali" VGR 2004. "Modelli semplificati sorgente-diffusione-esplosione di nubi di vapore in ambienti industriali semiconfinati" S. Baldacci, M. Mossa Verre, F. Fineschi;
- D.Lgs.334/99, "Attuazione della direttiva 96/82/CE relativa al controllo dei pericoli di incidenti rilevanti connessi con determinate sostanze pericolose";
- Guide to Hazardous Industrial Activities, Ministry of the Interior, Crisis Management and Fire Directorate, The Netherlands, September 1988;
- Manual for the classification and prioritization of risks due to major accidents in process and related industries, IAEA-TECDOC-727, Vienna 1993.