

VALUTAZIONE DEL RISCHIO NEL TRASPORTO DI SOSTANZE PERICOLOSE: IL SOFTWARE TRHAZ

Roberto Bubbico¹, Sergio Di Cave, Giacomo Dore², Barbara Mazzarotta

Dipartimento di Ingegneria Chimica, Università di Roma «La Sapienza», Via Eudossiana 18, 00184, Roma

¹ Gruppo Nazionale Difesa dai Rischi Chimico-Industriali ed Ecologici, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Via Tiburtina 770, 00159, Roma

² Attualmente presso Ecos Engineering srl., Viale del Castello della Magliana 38, 00148, Roma

RIASSUNTO

Il verificarsi di gravi incidenti durante il trasporto di prodotti pericolosi ha posto l'esigenza di poter quantificare il rischio relativo per valutarne l'accettabilità, confrontare soluzioni di trasporto alternative, ecc. L'analisi del rischio per un caso di trasporto è però resa complicata dal fatto che non è possibile prevedere a priori la localizzazione dell'incidente lungo il percorso né le sue modalità, per cui il numero dei casi da considerare si moltiplica per tener conto delle variazioni di incidentalità, popolazione, condizioni meteorologiche, ecc.

Il software TrHaz (Transportation Hazard) è stato sviluppato al fine di velocizzare la procedura di calcolo e pervenire rapidamente ad una stima affidabile del rischio associato al trasporto di prodotti pericolosi per strada e ferrovia. A tal fine i parametri di interesse sono stati preliminarmente raggruppati in opportune categorie, guidando la scelta dell'operatore; inoltre, il programma è dotato di una banca dati, organizzata per prodotto, che contiene le probabilità di accadimento dei possibili scenari incidentali e degli eventi finali da essi originati, e le conseguenze di questi ultimi, calcolate a parte utilizzando un software apposito. Il programma TrHaz determina il rischio sociale, mostrato con le usuali curve F-N, e l'andamento del rischio individuale in funzione della distanza dal percorso; inoltre, esso si presta a valutare in modo semplice e rapido anche gli effetti di variazioni di percorso o di altri fattori mitigativi che possono andare a influenzare le probabilità o l'entità del rilascio.

1. INTRODUZIONE

Nell'opinione pubblica c'è una crescente preoccupazione nei confronti della pericolosità delle varie attività che coinvolgono sostanze pericolose, sia in seno ad insediamenti industriali che in fase di trasporto. Il compito di stabilire soglie di accettabilità per i rischi subiti dalla popolazione per effetto di queste attività spetta, ovviamente, al legislatore, una volta che siano disponibili metodologie consolidate per valutare l'entità di questo pericolo. A tal fine si utilizzano tecniche di analisi di rischio, sviluppate da alcune decine di anni, che richiedono la valutazione sia della probabilità che possa aver luogo un certo evento potenzialmente pericoloso che dell'entità del danno derivante da questo evento.

Per quantificare il rischio si possono utilizzare varie «misure» dipendentemente dall'obiettivo dell'analisi: tra quelle maggiormente utilizzate sono il rischio individuale in funzione della posizione geografica, da cui originano le curve iso-rischio, ed il rischio sociale, generalmente espresso mediante le cosiddette curve F-N (frequenza/numero decessi). Dipendentemente dalla «misura» utilizzata è possibile fissare delle soglie per il rischio, che sono solitamente due: un livello più basso, al di sotto del quale il rischio si può ritenere «accettabile» ed uno più alto, oltre il quale il rischio è da ritenersi «inaccettabile». La zona intermedia tra le due soglie, spesso piuttosto ampia, è definita come quella in cui occorre intervenire per ridurre il rischio «per quanto ragionevolmente possibile» (As Low As Reasonably Possible: ALARP). Quanto finora esposto costituisce il tipo di approccio suggerito nella letteratura scientifica e tecnica, nonché adottato nel Regno Unito e nei Paesi Bassi, che sono i soli Paesi che hanno fissato quantitativamente le soglie di rischio; va tuttavia evidenziato che i valori scelti sono significativamente diversi sia tra i due Paesi che, nell'ambito dello stesso Paese, a seconda che si tratti di impianti esistenti o di nuova installazione e di attività industriali fisse o di trasporto. Pur con tutte le incertezze sui valori di rischio «tollerabile», quella della valutazione quantitativa del rischio individuale e sociale sembra essere comunque la via da percorrere per pervenire ad una stima oggettiva della pericolosità delle varie attività.

Le metodologie di quantificazione del rischio (Quantitative Risk Assessment: QRA) a cui si è accennato in precedenza sono state sviluppate e messe a punto con riferimento ad impianti fissi: l'estensione di queste tecniche al caso di trasporto di sostanze pericolose, anche se concettualmente semplice, comporta però notevoli difficoltà pratiche. Infatti, per un'installazione industriale è possibile avere informazioni dettagliate sulle lavorazioni effettuate, sul layout delle apparecchiature, sui mezzi a disposizione per fronteggiare le emergenze, come pure sulle condizioni meteorologiche prevalenti, la distribuzione della popolazione nei dintorni dell'impianto, ecc. Nel caso del trasporto di una sostanza pericolosa, invece, la situazione cambia continuamente lungo il percorso: ciò richiede da un lato l'acquisizione di un numero assai maggiore di informazioni, che spesso è assai difficile ottenere con il dettaglio che sarebbe necessario, e dall'altro l'esecuzione di un numero enorme di calcoli per tener conto di come variano lungo il percorso le combinazioni dei parametri rilevanti.

Per mantenere a livelli ragionevoli lo sforzo di calcolo, tenuto anche conto che assai spesso i dati necessari non sono disponibili con il dettaglio o la significatività statistica richiesti, si ricorre ad ipotesi semplificative, che tuttavia portano a valutazioni meno precise del livello del rischio. Occorre quindi tenere molto bene a mente quello che è lo scopo finale dell'analisi: in alcuni casi può interessare uno studio molto dettagliato riferito ad un caso specifico, di cui sono a disposizione informazioni numerose ed accurate, mentre in altri può essere richiesto di stabilire, in modo rapido ma attendibile, il grado di pericolosità, in modo da poter valutare preliminarmente se il caso in esame presenti un rischio accettabile, inaccettabile o meriti un supplemento di indagine.

Il software TrHaz ha lo scopo di consentire una valutazione rapida e sufficientemente precisa del rischio individuale e del rischio sociale nel trasporto stradale e ferroviario: esso si basa, da un lato sulla suddivisione dei parametri di interesse in categorie omogenee, e dall'altro sull'utilizzo di una banca dati di prodotti (TrHazDat) che contiene le informazioni relative agli scenari incidentali ed alle conseguenze di questi scenari. Ciò consente di avere a disposizione informazioni accurate, basate sull'utilizzo di software specialistici, senza subire la penalizzazione rappresentata dai lunghi tempi necessari per esaminare in dettaglio i vari eventi incidentali ed ottenere i relativi risultati, poiché ciò viene effettuato separatamente.

Nel presente lavoro vengono esposti i presupposti teorici che hanno portato allo sviluppo del software e sono mostrati alcuni esempi applicativi.

2. MISURE DI RISCHIO NEL TRASPORTO DI SOSTANZE PERICOLOSE

2.1 Rischio individuale

Analogamente al caso degli impianti fissi, la misura del rischio nel caso di trasporto di sostanze pericolose può esser fatta sia con riferimento al rischio individuale che al rischio sociale.

Il rischio individuale, definito come la probabilità che un individuo muoia se esposto alle conseguenze di una situazione potenzialmente pericolosa per un certo periodo di tempo, fornisce una misura indiretta del grado di pericolosità della fonte di rischio in esame. Molto spesso si fa riferimento al rischio individuale per l'individuo che si trovi in una certa posizione geografica, caratterizzata da coordinate x, y : questa misura prescinde dalla effettiva presenza di individui esposti al pericolo.

Riferendosi al rischio rappresentato dal trasporto di sostanze pericolose il rischio totale di morte per un individuo che si trovi in una specifica posizione geografica, $IR_{x,y}$, in numero di eventi per anno, si può valutare tramite la relazione:

$$IR_{x,y} = T \cdot A \cdot \sum_{i=1}^n R_i \cdot \sum_{j=1}^m L_{i,j} \cdot W_j \cdot \sum_{k=1}^{S_i} P_{i,j,k} \quad (1)$$

proposta dal CCPS [1], dove T è il numero di viaggi all'anno, A il tasso di incidentalità per chilometro, R_i la probabilità che si verifichi l' i -esimo scenario di rilascio, $L_{i,j}$ la lunghezza della j -esima zona di rilascio, W_j la probabilità che il vento soffi nella direzione di interesse e $P_{i,j,k}$ la probabilità che le conseguenze dell'evento accidentale finale k siano fatali per un individuo che si trovi nella posizione geografica x, y .

L'eq.(1) consente di determinare l'andamento del rischio in funzione della distanza dall'itinerario e quindi di tracciare le curve iso-rischio.

2.2 Rischio sociale

Il rischio sociale costituisce una misura dell'impatto di attività potenzialmente pericolose sulla popolazione: esso viene generalmente espresso mediante le curve F-N, dove sono riportati su scale logaritmiche la frequenza cumulativa F di tutti i possibili incidenti in grado di originare un numero N di decessi. I dati necessari alla costruzione della curva F-N possono essere valutati mediante l'eq.(1), una volta che sia nota la distribuzione della popolazione sul territorio.

Occorre peraltro evidenziare che nella formulazione dell'eq.(1) viene fatta l'ipotesi che il tasso di incidentalità sia costante lungo l'intero itinerario, condizione che si verifica assai raramente nella pratica. Allo scopo di contemperare le opposte esigenze di tener conto di ogni variazione significativa nei valori dei parametri di interesse e, al tempo stesso, di contenere a livelli accettabili lo sforzo di calcolo, viene utilizzato assai spesso il criterio di suddividere il percorso in un certo numero di segmenti. L'estensione di ogni segmento va fissata in modo che, al suo interno, si possano ragionevolmente ritenere costanti i valori di tutti i parametri di interesse (tasso di incidentalità, densità di popolazione, ecc.). Una volta che sia stata compiuta la segmentazione del percorso sia le frequenze di accadimento che le conseguenze degli eventi incidentali si possono calcolare per ogni segmento utilizzando la relazione precedente.

Per quanto riguarda il rischio sociale, la frequenza $F_{g,i,k}$ dell'evento accidentale finale k , originato dal rilascio

di tipologia i sul segmento g -esimo si può valutare dalla:

$$F_{g,i,k} = T \cdot A \cdot R_i \cdot L_g P_{i,k} \quad (2)$$

mentre il numero di fatalità corrispondente, $N_{g,i,k}$ si può stimare dalla:

$$N_{g,i,k} = CA_{i,k} \cdot PD_g \cdot PF_{i,k} \quad (3)$$

dove $CA_{i,k}$ è l'ampiezza della superficie su cui si estendono le conseguenze dell'evento incidentale finale k , P è la densità di popolazione relativa al segmento g e $PF_{i,k}$ è la probabilità di avere un decesso.

3. INFORMAZIONI NECESSARIE PER L'ESECUZIONE DI UN'ANALISI DI RISCHIO PER IL TRASPORTO DI SOSTANZE PERICOLOSE

Sulla base delle espressioni del rischio individuale e sociale riportate in precedenza è possibile analizzare quali siano le informazioni necessarie per elaborare un'analisi di rischio quantitativa per un caso di trasporto (Transportation Risk Analysis: TRA). Anzitutto, occorrono informazioni affidabili riguardo il tasso di incidentalità, le probabilità di ogni scenario di rilascio e di ognuno degli eventi incidentali finali che da essi possono scaturire e le densità di popolazione. Occorre poi fissare un certo numero di condizioni meteorologiche rappresentative della situazione lungo il percorso nelle stagioni in cui viene svolto il trasporto e quindi stimare le conseguenze di ognuno degli eventi incidentali finali relativi agli scenari di rilascio previsti. Sia la fase di acquisizione dei dati necessari che quella di calcolo delle conseguenze, effettuata generalmente utilizzando software specialistici piuttosto sofisticati, richiedono tempi abbastanza lunghi; inoltre, ulteriori approfondimenti, quali quelli riguardo i possibili benefici derivanti da cambiamenti di percorso o di mezzo di trasporto richiedono un impegno non di molto inferiore a quella di una nuova analisi.

Un altro aspetto importante è rappresentato dalla quantità e qualità dei dati disponibili, poiché l'affidabilità dei risultati dipende fortemente dai valori dei parametri utilizzati: esso verrà ora analizzato per ognuno dei parametri di interesse, facendo riferimento principalmente al caso di trasporto stradale.

Il tasso di incidentalità, espresso come numero di incidenti per veicolo e per km percorso, è un dato che richiede la conoscenza sia dell'incidentalità (incidenti/km anno) che del flusso di traffico (veicoli/anno). Il primo tipo di dati è disponibile da rilevazioni annuali ACI [2] per le strade statali e le autostrade riferita a tratti di lunghezza pari a 1 km. Il secondo si può ottenere dall'AISCAT [3], relativamente alle autostrade e limitatamente alle tratte principali di lunghezza di qualche centinaio di chilometri, mentre non sono disponibili analoghi dati sufficientemente recenti per le strade statali. I dati di cui sopra assai spesso non discriminano i veicoli in base alla loro tipologia e non sono comunque disponibili dati riferiti ai veicoli che trasportano merci pericolose. Questa osservazione è importante, dato che sia i veicoli che gli autisti adibiti a questo tipo di servizio sono sottoposti a maggiori controlli, per cui si potrebbe ipotizzare per il trasporto di sostanze pericolose un tasso di incidentalità minore di quello medio della relativa categoria di veicoli.

Analoghi problemi sorgono per quanto riguarda gli scenari incidentali e le loro possibili evoluzioni negli eventi incidentali finali. Infatti, poiché, fortunatamente, gli incidenti che coinvolgono una certa sostanza trasportata secondo determinate modalità sono assai limitati, non si hanno generalmente a disposizione dati storici sufficientemente numerosi da consentire un'analisi statistica; inoltre, nella maggior parte dei casi la descrizione dell'incidente è piuttosto sommaria e non sono riportate informazioni importanti quali il quantitativo di prodotto fuoriuscito, il tempo trascorso tra incidente ed intervento dei soccorsi, ecc. La carenza di dati affidabili è ancora maggiore per quanto riguarda l'evoluzione degli scenari incidentali, da cui dipendono le conseguenze attese. Ad esempio, nel caso di rilascio di una sostanza infiammabile, l'eventualità di un'esplosione è assai più pericolosa rispetto a quella di un incendio da pozza, per cui risulta assai delicato fissare valori delle relative probabilità in assenza di informazioni statisticamente significative. A tal riguardo esistono anche dati, come l'OSH-ROM [4], che raccolgono dati relativi ad incidenti, sia su impianti fissi che nel corso del trasporto, per vari Paesi: da queste raccolte si ottengono dati più numerosi, ma, tuttavia, non omogenei tra loro, date le differenze, anche notevoli, di infrastrutture, condizioni climatiche e morfologia del territorio tra i vari Stati. Per quanto riguarda dati relativi alla situazione nazionale la fonte più affidabile è costituita dai verbali di intervento dei Vigili del Fuoco, in cui, pur con tutte le limitazioni dell'attuale scheda di raccolta dati (che spesso non viene neppure compilata interamente), sono contenute informazioni piuttosto dettagliate sia sulle probabili cause degli incidenti che sulle loro conseguenze: l'accesso a questi dati è però di fatto soggetto a notevoli restrizioni.

Per quanto riguarda la popolazione residente nei pressi del percorso, la principale fonte di informazioni è costituita dai dati censuari, assai precisi anche se relativi alla situazione particolare di una certa giornata di un certo anno. A titolo di esempio, i dati più recenti disponibili sono stati rilevati il 20 ottobre 1991 [5]: ne consegue da un lato che i dati potrebbero non rispecchiare la situazione attuale in certe zone, e dall'altro che essi non

tengono conto dei flussi di popolazione giornalieri, settimanali o stagionali, dovuti a pendolarismo a breve e lungo raggio o durante i periodi di vacanze.

Un altro problema riguarda la superficie a cui riferire la popolazione: a titolo di esempio, ogni comune comprende una o più località abitate, di cui è nota la popolazione ma, generalmente, non la superficie, insieme a zone meno densamente abitate; anche in queste zone tuttavia, è assai probabile che la popolazione si concentri in prossimità delle vie di comunicazione. Infatti, la densità di popolazione va valutata in prossimità della strada, di cui occorre quindi conoscere la posizione esatta rispetto alle zone censuarie: d'altra parte, dato che le possibili conseguenze dell'evento incidentale possono arrivare anche a chilometri di distanza, occorre in qualche modo definire una fascia di interesse su cui valutare la densità di popolazione.

I dati meteorologici sono disponibili sulla base delle rilevazioni delle 31 stazioni meteorologiche poste sul territorio nazionale e comprendono temperatura massima, minima e media giornaliera, umidità relativa, direzione e velocità del vento: esistono raccolte [6] relative a più anni che forniscono medie mensili di questi valori. Sulla base dei dati di temperatura, umidità e velocità del vento è possibile individuare le categorie di stabilità atmosferica, secondo la classificazione di Pasquill. Queste informazioni vengono utilizzate per la valutazione delle conseguenze del rilascio, ossia l'estensione della zona a rischio: infatti, l'entità del rilascio può dipendere dalla temperatura (specie nel caso di gas liquefatti), mentre temperatura, umidità, velocità del vento e classe di stabilità atmosferica influenzano l'eventuale evaporazione del prodotto sversato e la dispersione di gas o vapori.

L'analisi delle conseguenze viene normalmente eseguita utilizzando uno dei software commerciali disponibili, quali, ad esempio, Trace della SAFER, SuperChems Professional della A.D. Little, Effects2 e Damage del TNO, Sigem-Simma dei Vigili del Fuoco. Indipendentemente dal programma di calcolo utilizzato, note le caratteristiche chimico-fisiche del prodotto trasportato, le condizioni fisiche nel corso del trasporto, le dimensioni del contenitore e le condizioni ambiente, viene dapprima simulato lo scenario di rilascio, tenendo conto di eventuali flussi bifasici e del possibile flash di gas liquefatti. Successivamente è possibile simulare i vari eventi incidentali: assumendo che venga rilasciato un liquido infiammabile, si potrebbe avere un'accensione immediata, con formazione di un «dardo» di fuoco (jet-fire) oppure il prodotto potrebbe accumularsi a formare una pozza. Le dimensioni della pozza vengono valutate in funzione del tasso di rilascio e di quello di evaporazione, tenendo conto anche della possibile formazione di aerosol, con trascinarsi di goccioline di liquido da parte del vapore che si libera. Se la pozza viene innescata si ha l'incendio da pozza (pool fire); in caso contrario occorre valutare la dispersione dei vapori infiammabili nell'atmosfera. Questa dipende anzitutto dalla densità dei vapori della sostanza in esame, che può essere inferiore o superiore a quella dell'aria, e quindi dalle condizioni meteorologiche. La modellizzazione risulta soggetta a maggiori incertezze nel caso di gas densi, ossia di sostanze più pesanti dell'aria o di formazione di aerosol: in ogni caso la simulazione è generalmente in grado di prevedere l'andamento dei profili di concentrazione lungo l'asse della direzione del vento, quello ad essa trasversale e l'asse verticale. E' quindi possibile valutare l'estensione della nube di vapori in aria i cui valori di concentrazione siano compresi nell'intervallo di infiammabilità, che, se innescata, può incendiarsi (flash fire) oppure dar luogo ad un'esplosione (UVCE). Una casistica più completa dei possibili eventi incidentali comprende anche la possibilità di formazione di una sfera di fuoco (fireball), nel caso di rilascio pressoché istantaneo di un gas liquefatto infiammabile, l'esplosione fisica del contenitore e la formazione di una nube tossica.

E' infine possibile fissare le soglie di letalità in caso di esposizione ad una sostanza tossica, ad irraggiamento termico e a sovrappressione ed ottenere quindi sia l'estensione delle zone in cui le conseguenze degli eventi incidentali possono essere letali, come distanza dal punto di rilascio e/o superficie interessata, nonché valutare l'angolo secondo cui essi si esplicano, importante per eventi quali il jet-fire e per tutti quelli sensibili alla direzione del vento (flash fire, nube tossica).

L'analisi delle conseguenze viene generalmente effettuata da specialisti, in grado di valutare come meglio simulare lo scenario incidentale in esame e consapevoli delle ipotesi che sono alla base dei vari software disponibili, in modo da assicurare la correttezza dell'analisi e da sfruttare al meglio le potenzialità dei programmi di calcolo. Va infine rimarcato che i tempi richiesti sono piuttosto lunghi (dell'ordine di qualche ora per simulare uno scenario incidentale completo in una condizione meteorologica) non tanto per l'esecuzione dei calcoli quanto per l'inserimento dei dati, e che questi software sono generalmente piuttosto costosi.

4. METOLOGIA DI ANALISI DI RISCHIO ALLA BASE DEL SOFTWARE TRHAZ

Per semplificare l'analisi di rischio nel caso di trasporto di una sostanza pericolosa, tenuto conto anche delle difficoltà nella valutazione di valori precisi dei parametri coinvolti, si può pensare di raggruppare preliminarmente questi parametri in un certo numero di classi, caratterizzate sulla base delle variabili che maggiormente ne influenzano il valore. A titolo di esempio, sembra ragionevole mettere in relazione il tasso di incidentalità con la tipologia della strada, la densità di popolazione con il grado di urbanizzazione, le condizioni meteorologiche con la stagione e la latitudine, ecc. Si può procedere in modo analogo anche per quanto riguarda gli scenari di rilascio, che possono essere posti in dipendenza dal quantitativo di prodotto rilasciato o della

probabile dimensione del foro, e per quanto concerne le probabilità che si verifichino i vari eventi incidentali che possono scaturire da ogni scenario incidentale, che può essere posta in relazione con lo scenario incidentale stesso, con le caratteristiche della sostanza e con le modalità di trasporto. I valori assunti dai parametri in seno alle classi di riferimento vanno determinati attraverso un'analisi statistica dei dati disponibili.

L'utilizzo di valori di riferimento per i vari parametri utilizzati nell'analisi di rischio porta certamente ad una semplificazione, poiché facilita l'operazione di suddivisione del percorso in tratte omogenee e riduce considerevolmente il tempo necessario alla definizione dei parametri relativi ad ognuno di essi. Tuttavia anche l'adozione di questo accorgimento non consentirebbe, da sola, di velocizzare in modo sostanziale il processo di analisi di rischio. Infatti, la gran parte dei calcoli richiesti riguarda l'analisi delle conseguenze, ossia la valutazione dell'estensione delle zone in cui le conseguenze dei vari eventi incidentali si possono rivelare fatali per la popolazione esposta. A tal fine va però tenuto presente che ciò che realmente occorre per la valutazione del rischio, non è la conoscenza di tutte le informazioni che l'analisi delle conseguenze rende disponibili (tasso di rilascio, grado di flash, dimensioni della pozza, ecc.) ma più semplicemente la conoscenza delle distanze dal punto di rilascio entro le quali ci si deve attendere la morte degli individui esposti, e quella delle superfici e degli angoli relativi alla direzione prevalente dell'evento incidentale.

Si è quindi pensato di disgiungere il momento in cui viene effettuata l'analisi delle conseguenze da quello in cui si applicano i suoi risultati per la valutazione del rischio nel trasporto. Ciò richiede di effettuare preliminarmente e secondo le modalità usuali la prima, per tutti gli scenari di rilascio e le condizioni meteorologiche di riferimento, e di inserire quindi i risultati nella banca dati utilizzata dalla seconda. L'analisi di rischio viene quindi velocizzata in modo sostanziale, ma senza compromessi per quanto riguarda la precisione delle simulazioni delle conseguenze dei rilasci.

5. PROGRAMMA TRHAZ PER L'ANALISI DEL RISCHIO NEL TRASPORTO DI SOSTANZE PERICOLOSE

Il software TrHaz, basato sulla procedura descritta nel paragrafo precedente, è in grado di eseguire l'analisi di rischio per il trasporto di sostanze pericolose per strada e ferrovia: esso è stato sviluppato nell'ambito di un progetto di ricerca di interesse del Dipartimento di Protezione Civile.

La gran parte del lavoro preliminare è stato dedicato alla raccolta dei dati relativi ai parametri di interesse per l'analisi di rischio, ed alla definizione delle classi in cui raggrupparli e dei valori di riferimento per ogni classe. Per i dati si è fatto riferimento, ogni volta che ciò è stato possibile, alla specifica situazione italiana; quando le informazioni erano in numero insufficiente, sono state integrate con altre relative a Paesi dell'Unione Europea o agli Stati Uniti.

Contemporaneamente si è proceduto allo sviluppo dei casi di analisi delle conseguenze per un certo numero di sostanze, scelte tra quelle infiammabile e/o tossiche maggiormente coinvolte in incidenti nel corso degli ultimi anni: i risultati ottenuti sono stati organizzati nella banca dati TrHazDat che attualmente contiene quindici sostanze.

Saranno ora brevemente descritti, per ogni parametro, i criteri seguiti per la scelta delle classi e dei valori di riferimento.

5.1 Tasso di incidentalità

Per quanto riguarda l'incidentalità stradale come principale fonte dei dati è stata assunta una pubblicazione annuale dell'ACI [2] che riporta un'analisi dell'incidentalità stradale a livello nazionale e regionale. In particolare sono stati utilizzati i dati relativi al numero di incidenti che si verificano ogni 100 km di strada, suddivisi in base alla tipologia di quest'ultima (autostrada, statale, provinciale, urbana), le informazioni relative all'estesa stradale ed il numero di incidenti riferito a 10000 veicoli circolanti. Queste informazioni sono state opportunamente manipolate, introducendo un fattore di sicurezza e confrontate con altre di diversa fonte, fino a giungere alla classificazione ed ai valori riportati in Tabella 1. Va notato che i dati attualmente disponibili non consentono di pervenire a valori specifici per il trasporto merci e tanto meno riferiti al trasporto di sostanze pericolose.

Tabella 1. Tassi di incidentalità utilizzati in TrHaz

Tipo di percorso	Tasso di incidentalità (#/km anno / veicolo/anno)
Autostrada	$1.5 \cdot 10^{-7}$
Strada statale	$4 \cdot 10^{-8}$
Strada provinciale	$9 \cdot 10^{-9}$
Strada urbana	$5 \cdot 10^{-7}$
Ferrovia	$6.6 \cdot 10^{-8}$

Per quanto riguarda l'incidentalità ferroviaria i valori disponibili sono piuttosto scarsi e non consentono al momento di operare delle differenziazioni basate sulle caratteristiche della linea o del convoglio: si è quindi utilizzato un unico valore medio, pure riportato in Tabella 1.

5.2 Densità di popolazione

I valori delle classi di densità di popolazione sono stati individuati basandosi sui dati dell'ultimo censimento disponibile [5] opportunamente riferiti alla superficie dell'area di interesse. I dati, su base comunale, forniscono l'estensione ed il numero di abitanti nel territorio comunale, e la popolazione residente nella località sede del comune. Basandosi sui dati relativi ad oltre cinquanta tra città e paesi, per i quali è stata stimata l'estensione di territorio occupata dal centro abitato, è stata preliminarmente ricavata una correlazione tra numero di residenti ed estensione dell'abitato, da cui si ottiene la relativa densità di popolazione. Per le zone rimanenti si è ipotizzato che gli abitanti, pari al totale del comune meno quelli residenti nelle località abitate, siano uniformemente distribuiti sulla parte rimanente del territorio comunale.

Si è quindi proceduto, planimetrie alla mano, a determinare le densità di popolazione lungo tratti di lunghezza pari a 1 km di varie strade ed autostrade: tali dati sono stati quindi analizzati ed accorpati in funzione del grado di urbanizzazione, ottenendo le classi di riferimento riportate in Tabella 2.

Tabella 2. Classi di densità di popolazione utilizzate in TrHaz

Tipologia di zona	Densità di popolazione (#/km ²)
Aperta campagna	10
Case sparse	200
Sobborghi	1500
Centro abitato	10000

5.3 Condizioni meteorologiche

Le condizioni meteorologiche di riferimento sono state individuate basandosi sui dati statistici disponibili [6] che coprono tutto il territorio nazionale per un periodo di 8 anni. I valori di temperatura media diurna e notturna, tasso di umidità e velocità del vento sono stati prima esaminati su base stagionale e quindi su base geografica, in modo da accorparli in modo ottimale. Ciò ha portato ad identificare 6 condizioni meteorologiche di riferimento, sulla base di tre diversi valori della temperatura e di due velocità del vento: queste condizioni sono in grado di approssimare in modo ragionevole le variazioni climatiche tra inverno, primavera/autunno ed estate nell'Italia Settentrionale, Centrale e Meridionale. La Tabella 3 riporta anche i valori di irraggiamento e di classe di stabilità atmosferica selezionati: per quest'ultima si è assunta la condizione di neutralità (classe D), in quanto ragionevolmente conservativa, pur senza essere eccessivamente penalizzante.

Tabella 3. Condizioni meteorologiche utilizzate in TrHaz

Condizione meteorologica (#)	1	2	3	4	5	6
Temperatura (°C)	5	5	14	14	26	26
Velocità del vento (m/s)	3	6	3	6	3	6
Umidità (%)	77	77	71	71	68	68
Radiazione solare	200	200	400	400	800	800
Classe di stabilità atmosferica	D	D	D	D	D	D

5.4 Scenari incidentali

I dati che riguardano gli scenari che seguono un incidente nel trasporto di sostanze pericolose sono stati estratti principalmente dalle schede dei Vigili del Fuoco, disponibili per il periodo 1984-91, integrati da altre informazioni ottenute dalla consultazione di banche dati più estese e continuamente aggiornate [4]. Dall'analisi di questi dati emerge una casistica che si può così riassumere: l'incidente può causare danni limitati al veicolo, senza rilascio del prodotto trasportato, può causare un rilascio molto modesto (per esempio un trafileamento da

una valvola danneggiata), un rilascio più consistente in grado di svuotare parzialmente il contenitore, o danni più gravi, con rilascio di tutto il prodotto trasportato. Dal punto di vista dei quantitativi di prodotto rilasciati, si osserva che nella quasi totalità dei rilasci lievi essi sono talmente modesti da non causare nella pratica alcun evento incidentale. Si è quindi assunto che da questa tipologia di scenario incidentale non scaturiscano eventi pericolosi, accorpandoli ai fini dell'analisi di rischio con i casi in cui non si ha nessun rilascio. Gli scenari incidentali in cui si ha rilascio del prodotto sono stati invece schematizzati come segue: rilascio modesto, di durata pari a 15 min, da un foro del diametro di 15 mm posto sul fondo del contenitore, da cui consegue uno svuotamento parziale; rilascio grave, da un foro del diametro di 220 mm, posto sempre sul fondo del contenitore, che lo svuota completamente.

La Tabella 4 riporta le probabilità degli scenari incidentali per il trasporto stradale e ferroviario.

Tabella 4. Probabilità degli scenari incidentali utilizzati da TrHaz

Scenario incidentale	Probabilità per il trasporto stradale (%)	Probabilità per il trasporto ferroviario (%)
Nessun rilascio di prodotto	40	44
Rilascio parziale del prodotto	43	41
Rilascio totale del prodotto	17	15

5.5 Banca dati dei prodotti e delle conseguenze TrHazDat

L'evoluzione degli scenari incidentali di cui al paragrafo precedente è stata studiata per i quindici prodotti infiammabili e/o tossici, elencati in Tabella 5. Anche in questo caso l'analisi è stata basata sulle raccolte di dati storici (schede dei Vigili del Fuoco e Banca Dati OSH-ROM [4]) confrontando i risultati con dati medi suggeriti nella letteratura tecnica recente [1]. I valori di probabilità attribuiti ad ognuno degli eventi in cui può evolvere lo scenario incidentale dipendono sia dalle caratteristiche del prodotto, quali lo stato fisico (gas, liquido, liquido pressurizzato, ecc.), la pericolosità (campo di infiammabilità, ecc.), che dal quantitativo di prodotto rilasciato. Per questa ragione si è preferito introdurre questi dati direttamente all'interno della banca dati prodotti TrHazDat, senza lasciare la scelta tra valori di default: l'operatore può comunque modificare manualmente questi valori, nel momento in cui sono utilizzati dal programma.

Tabella 5. Sostanze attualmente contenute nella banca dati TrHazDat

Sostanza
Acetaldeide
Acido cianidrico
Acido cloridrico
Acido fluoridrico
Alcool etilico
Ammoniaca anidra
Anidride solforosa
Benzina
Cicloesano
Cloro
Cloruro di vinile
GPL
Metilacrilato
Ossido di etilene
Tricloroetano

La banca dati contiene anche le informazioni relative alle conseguenze dei singoli eventi incidentali in cui può evolvere lo scenario incidentale esaminato, valutati per tutte le 6 condizioni meteorologiche di riferimento definite in precedenza (vedi Tabella 3). Lo sviluppo dell'analisi delle conseguenze è stato effettuato utilizzando il software Trace 8.0 della SAFER [7], ipotizzando che il contenitore per il trasporto stradale abbia un volume utile di 35 m³ e che sia pieno per l'85%; per l'analogo contenitore per il trasporto ferroviario si è ipotizzata una capacità di 70 m³ ed un grado di riempimento ancora dell'85%.

Per quanto riguarda le soglie di mortalità si è fatto riferimento ai seguenti valori: la concentrazione di tossicità

acuta per l'esposizione ad una sostanza tossica, una radiazione termica di 10 kW/m^2 per l'esposizione al fuoco ed una sovrappressione di 5 kPa nel caso di esplosione, assumendo che il danno sia causato dalla proiezione di schegge di vetro. Nella banca dati sono contenute anche le informazioni relative alla concentrazione di tossicità acuta utilizzata nei calcoli, nonché ai limiti di infiammabilità ed allo stato fisico assunto nel corso del trasporto.

I risultati dell'analisi delle conseguenze espressi come distanza dal punto di rilascio entro cui si possono risentire conseguenze letali, superficie interessata ed eventuale angolo di azione del fenomeno, sono anch'essi inseriti nella banca dati.

5.6 Procedura operativa

Il programma TrHaz è stato predisposto utilizzando il linguaggio Visual Basic, e può essere installato su qualsiasi PC dotato del sistema operativo Windows 95. La parte grafica e di testo è stata curata in modo da renderne gradevole e semplice l'utilizzo: i dati necessari sono richiesti in sequenza su pagine successive, che è possibile sfogliare per controllarli o correggerli, e una funzione di aiuto è disponibile su ogni pagina. Il programma praticamente non necessita di un manuale di istruzioni: l'operatore infatti deve soltanto inserire i seguenti dati di input, che definiscono il caso di trasporto di sostanza pericolosa in analisi:

- prodotto trasportato;
- tipologia di trasporto (strada/ferrovia);
- numero di viaggi effettuati per ognuna delle condizioni meteorologiche di riferimento;
- lunghezza di ognuno dei segmenti in cui si può considerare suddiviso il percorso e scelta dei parametri (tasso di incidentalità e densità di popolazione) tra le categorie disponibili.

A questo punto la procedura di inserimento dei dati è terminata: è possibile consultare i dati relativi alle probabilità degli eventi incidentali in cui può evolvere ogni scenario incidentale e, eventualmente, modificarli, oppure procedere direttamente alla scelta della misura del rischio desiderata (individuale, sociale o entrambe). Il programma esegue i calcoli richiesti in poche decine di secondi e mostra in forma grafica le relative misure del rischio. Nei risultati sono anche indicati, in forma grafica o nella legenda, i valori limite di rischio accettabile e inaccettabile previsti dalla normativa del Regno Unito [8]. Infatti, anche se la normativa italiana non quantifica al momento i valori di rischio accettabile e inaccettabile, i limiti anzidetti costituiscono comunque un utile riferimento per la valutazione della pericolosità del caso di trasporto in esame. Si ricorda che, nella normativa britannica, questi valori sono pari rispettivamente a $1 \cdot 10^{-6}$ e $1 \cdot 10^{-4}$ eventi/anno per il rischio individuale e le curve con equazione $F \cdot N = \text{costante}$ attraverso i punti $N = 500$, $F = 2 \cdot 10^{-4}$ eventi/anno e $N = 500$, $F = 2 \cdot 10^{-7}$ eventi/anno per il rischio sociale. Occorre pure rimarcare che la normativa dei Paesi Bassi prevede altri valori per il rischio individuale e curve limite diverse sia come pendenza che come intercetta [9], risultando complessivamente più restrittiva.

Terminato l'esame del caso di trasporto è possibile stampare i risultati, salvare l'intero caso per richiamarlo in un momento successivo, modificare i dati di input, per esempio per confrontare il trasporto stradale e quello ferroviario, oppure per valutare gli effetti di cambiamenti del percorso.

6. CONFRONTO TRA I RISULTATI OTTENUTI CON TRHAZ E CON UN'ANALISI PIU' DETTAGLIATA

Per validare il programma TrHaz lo si è utilizzato per analizzare un caso di trasporto che era stato oggetto di uno studio piuttosto approfondito, recentemente pubblicato in letteratura [10]. Si trattava del trasporto stradale di 7500 t/anno di ossido di etilene lungo un itinerario di 195 km che si svolgeva in Italia Meridionale, coinvolgendo strade urbane, statali e autostrade ed attraversando zone assai variamente popolate. Le caratteristiche di infiammabilità (concentrazioni limite inferiore e superiore 2.6 e 100%) e la tossicità (concentrazione letale dopo 10 s pari a 12500 ppm) rendono l'ossido di etilene piuttosto pericoloso: dato il valore del punto di ebollizione normale (10.8°C) e la tendenza a decomporsi in presenza di impurezze il prodotto è trasportato sotto pressione di azoto a circa 1 MPa .

L'analisi del percorso per l'inserimento dei dati in TrHaz portava a suddividerlo in 4 segmenti (contro una segmentazione in 8 parti effettuata nello studio approfondito) ed a scegliere 2 condizioni meteorologiche di riferimento (rispettivamente 14°C con vento debole nei mesi invernali e 26°C e vento forte in quelli estivi).

La Figura 1 mostra i risultati ottenuti con TrHaz per quanto riguarda il rischio individuale, rappresentato in funzione della distanza dal percorso per le tre tipologie di strada su cui si effettua il trasporto.

Si nota come i profili del rischio individuale non varino nella loro forma e risultino semplicemente traslati in funzione dei diversi tassi di incidentalità per le varie tipologie di strade percorse; il rischio individuale in una localizzazione geografica prescinde infatti dalla effettiva presenza di persone nelle zone potenzialmente pericolose.

Il confronto tra i dati determinati con TrHaz e quelli valutati dall'analisi dettagliata è mostrato con riferimento al rischio sociale in Figura 2.

Figura 1. Rischio individuale in funzione della distanza dalla strada calcolato con TrHaz

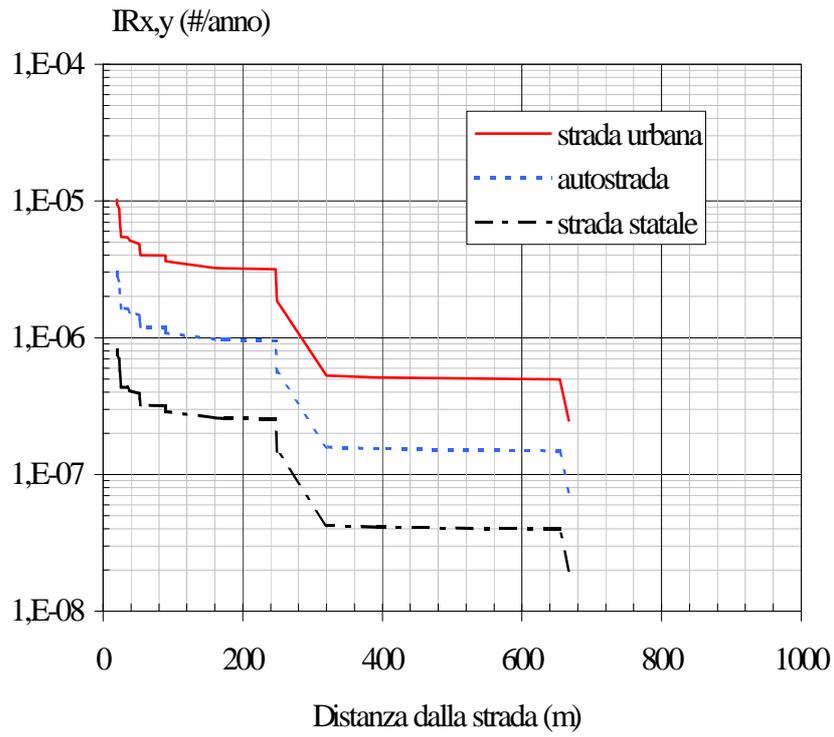
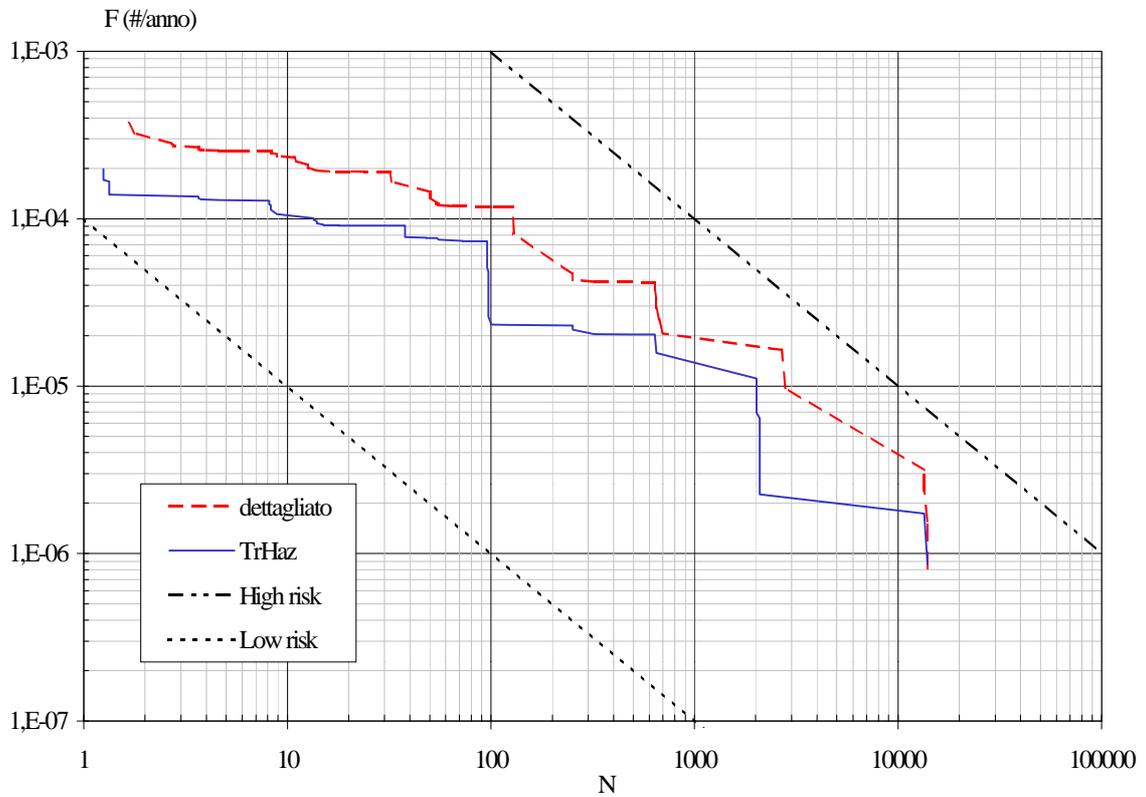


Figura 2 Confronto tra i valori del rischio valutati dall'analisi con TrHaz e derivati dall'analisi dettagliata



Si nota anzitutto che le due curve sono assai prossime tra loro, anche se quella calcolata con TrHaz è posta al di sotto di quella derivata dall'analisi dettagliata, indicando che, per il caso in esame, il programma sottostima leggermente il rischio. E' comunque evidente che il software sviluppato fornisce una valutazione realistica del livello di rischio e che l'utilizzo di valori di riferimento per i parametri anziché la loro valutazione puntuale per ogni segmento comporta un errore modesto ed accettabile.

In particolare, gran parte delle differenze osservate per il caso di trasporto in oggetto dipendono dai valori dei tassi di incidentalità, in cui le medie sul territorio nazionale, utilizzate da TrHaz sono diverse dai valori locali sulle strade effettivamente utilizzate per realizzare il trasporto.

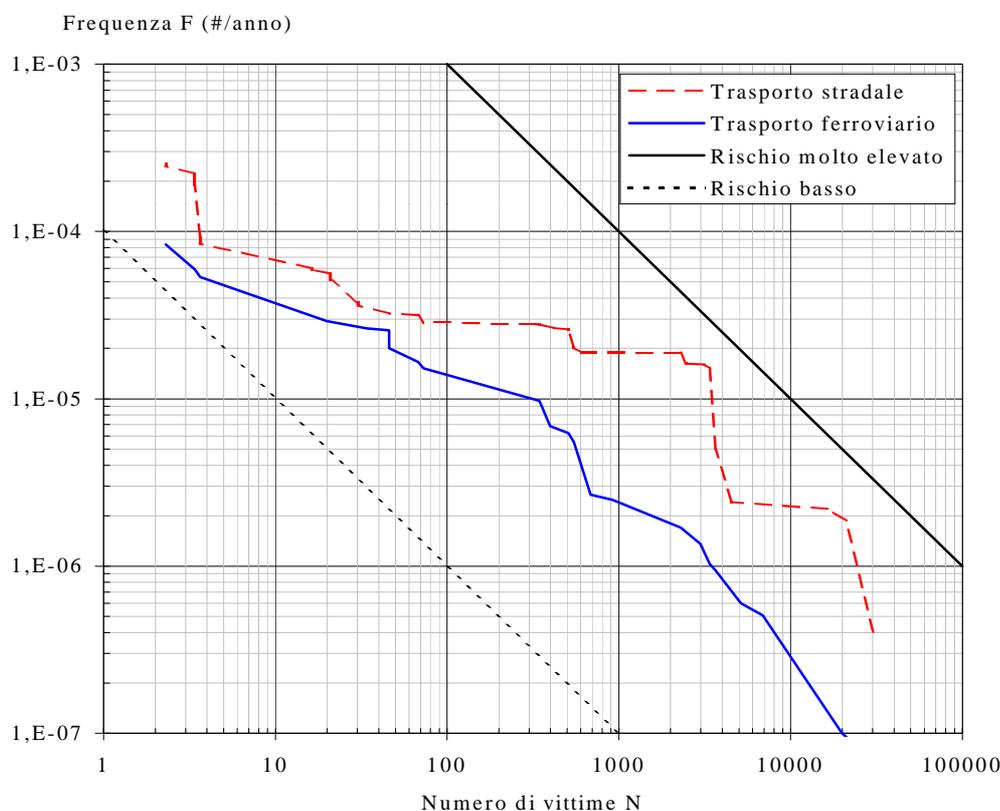
7. UTILIZZAZIONE DI TRHAZ PER INDIVIDUARE MODALITA' DI TRASPORTO MENO RISCHIOSE

In alcuni casi è possibile effettuare il trasporto di una sostanza pericolosa utilizzando diverse alternative, sia dal punto di vista della tipologia del trasporto (ad esempio stradale o ferroviario) che da quello della scelta del percorso. In generale non è affatto immediato stabilire quale sia la modalità di trasporto meno pericolosa: ad esempio, infatti, anche se il trasporto ferroviario presenta un tasso di incidentalità inferiore a quello stradale e necessita di un numero di viaggi inferiore, data la maggiore capacità dei contenitori ferroviari, i maggiori quantitativi trasportati possono dare origine ad incidenti più gravi.

Analogamente, l'utilizzo di una tipologia di strada caratterizzata da minore tasso di incidentalità, ad esempio una provinciale, non comporta necessariamente un minore rischio data la più bassa incidentalità, in quanto il suo utilizzo può portare all'attraversamento di un certo numero di centri abitati, caratterizzati da un'elevata densità di popolazione; l'attraversamento dei centri abitati si evita utilizzando un'autostrada, che però presenta un tasso di incidentalità nettamente superiore e quindi la soluzione ottimale varia da caso a caso.

A titolo di esempio si è analizzato un caso di trasporto di cloro, lungo un percorso di circa 400 km, che si snoda nell'Italia settentrionale e Centrale. Si è ipotizzato che siano trasportati circa 12.000 m³ di cloro, nello stato fisico di gas liquefatto, per un totale di 400 viaggi/anno, se si utilizza una autocisterna o di 200 viaggi/anno utilizzando una ferrocisterna. I risultati del calcolo effettuato con TrHaz per queste due modalità di trasporto, espressi in termini di rischio sociale sono mostrati nella Figura 3.

Figura 3. Confronto tra i valori del rischio sociale per il caso di cloro per strada e ferrovia



Per il caso in esame si nota come il trasporto ferroviario sia effettivamente meno pericoloso di quello stradale, anche se le differenze sono assai meno marcate di quello che ci si sarebbe potuti attendere basandosi unicamente sui rispettivi tassi di incidentalità. Nel confronto tra le due modalità di trasporto risulta particolarmente significativa la pendenza presentata dalle curve, poiché una maggiore pendenza comporta una rapida diminuzione della frequenza di eventi incidentali in grado di provocare la morte di un gran numero di persone.

8. SVILUPPI FUTURI

Le implementazioni previste per il programma TrHaz si muovono secondo due direttrici principali. La prima è quella di estendere la banca dati delle conseguenze ad un numero sempre maggiore di prodotti, il che richiede un notevole dispendio di tempo per effettuare l'analisi delle conseguenze per tutti gli eventi incidentali, tenendo conto dei vari scenari di rilascio e delle diverse condizioni meteorologiche, nonché il reperimento di dati affidabili riguardo alle probabilità di accadimento di ognuno di essi. Il secondo, e più ambizioso, obiettivo è quello di poter eseguire con TrHaz anche analisi di rischio dettagliate, accoppiandolo ad un programma di mappatura, basato su un sistema di georeferenziazione dei dati (GIS) ed utilizzando dati di tassi di incidentalità e di densità di popolazione valutati suddividendo il percorso in tratti della lunghezza di 1 km. Dopo aver selezionato il percorso direttamente sulla mappa, le informazioni andrebbero trasmesse al software TrHaz che, eseguita l'analisi di rischio, la renderebbe disponibile per la visualizzazione diretta del rischio sul territorio. Il programma di mappatura, denominato MapRisk, è stato già sviluppato nelle sue linee principali e contiene attualmente informazioni riguardo a incidentalità e densità di popolazione lungo strade statali e autostrade dell'Italia centro-settentrionale, mentre si sta lavorando per valutare la procedura ottimale con cui trasferire le informazioni tra questo software e TrHaz.

9. CONCLUSIONI

Lo sviluppo del software TrHaz mette a disposizione di chi si occupa di analisi di rischio nel trasporto di sostanze pericolose un mezzo semplice ed efficace per pervenire in tempo molto breve e con uno sforzo di analisi del percorso piuttosto limitato ad una valutazione quantitativa del rischio individuale e sociale. Il programma si presta ad essere modificato, in caso l'utente lo ritenga opportuno, includendo nuove categorie di parametri o variandone i valori di riferimento. Punto di forza del software è l'utilizzo di dati assai precisi per quanto riguarda l'analisi delle conseguenze, senza però costringere l'utente a svolgere l'analisi stessa. Il programma si presta sia a fornire indicazioni relative alla pericolosità di un caso di trasporto di una sostanza pericolosa, che ad esaminare quantitativamente i possibili effetti mitigativi legati alla scelta di un differente mezzo di trasporto od al cambiamento del percorso.

RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è stato sviluppato nell'ambito del progetto di ricerca 97.00795.PF37 finanziato da C.N.R., Gruppo Nazionale per la Difesa dai Rischi Chimico-Industriali ed Ecologici.

BIBLIOGRAFIA

- [1] CCPS, *Guidelines for Chemical Transportation Risk Analysis*, AIChE, New York, 1995.
- [2] ACI, *Analisi dell'incidentalità stradale a livello nazionale e regionale*, 1997
- [3] AISCAT, *Informazioni*, notiziario trimestrale a cura dell'Associazione Italiana Società Concessionarie Autostrade e Trafori.
- [4] OSH-ROM, *HSELINE, C15DOL, MHIDAS, NIOSHTIC*, Silver Platter, London, 1998.
- [5] ISTAT, *13° Censimento Generale della Popolazione e delle Abitazioni*, Roma, 1992.
- [6] ISTAT, *Statistiche Meteorologiche anni 1984-1991*, Annuario n.25, Roma, 1994.
- [7] DuPont Safer System, *TRACE 8 User Guide*, Westlake Village, 1996.
- [8] Health & Safety Commission, *Major Hazard Aspects of the Transport of Dangerous Substances*, HMSO, London, 1991.
- [9] Ministerie & W en Ministerie VROM, *Risk criteria for the transport of hazardous substances*, The Hague, Feb. 1996.
- [10] R. Bubbico, S. Di Cave and B. Mazzarotta, *J.Loss Prev. Proc. Ind.*, **11**, pp.49-54, (1998).