

DEFINIZIONE DI UN INDICE DI RISCHIO PER IL TRASPORTO DI MERCI PERICOLOSE

Barbara Mazzarotta¹, Roberto Bubbico¹, Sarah Bonvicini², Gigliola Spadoni²

¹Dipartimento di Ingegneria Chimica, Università di Roma “La Sapienza”, Via Eudossiana 18, 00184, Roma.

²Dipartimento di Ingegneria Chimica, Mineraria e delle Tecnologie Ambientali, Università di Bologna, Viale Risorgimento 2, 40136, Bologna
mazzarot@ingchim.ing.uniroma1.it

SOMMARIO

Il presente lavoro propone una metodologia atta a definire il rischio potenziale dovuto al trasporto di merci pericolose, ossia una variabile predittiva che rappresenta il rischio per la popolazione in prossimità della rete qualora su di essa venga trasferito un predefinito vettore di merce pericolosa e, come tale, non richiede la conoscenza dei quantitativi effettivamente trasportati. A tal fine è stato introdotto un indice di rischio, ottenuto come combinazione di un indice di pericolosità, di un indice di incidentalità, e di un indice di vulnerabilità. L'indice di pericolosità è associato unicamente alla merce ed alla modalità di trasporto; l'indice di incidentalità è funzione delle caratteristiche della rete; l'indice di vulnerabilità dipende dalle caratteristiche del territorio (popolazione a rischio) e dalla estensione dell'area di impatto degli scenari incidentali, funzione della merce trasportata. La conoscenza dell'indice di rischio, visualizzabile anche su GIS, consente di individuare immediatamente le tratte a maggior rischio per il tipo di trasporto della merce in esame.

1 INTRODUZIONE

Il tema della sicurezza del trasporto di merci pericolose attraverso vettori diversi (stradali, ferroviari e navali) è da tempo all'attenzione della comunità internazionale: organismi pubblici e associazioni di compagnie private hanno provveduto a dotarsi di regole gestionali e tecniche, gli uni attraverso l'emanazione di norme, gli altri attraverso l'adozione ed il rispetto di accordi, al fine di garantire alla collettività un elevato grado di sicurezza a prevenzione e protezione dai possibili eventi incidentali. Al trasporto di merci pericolose si associa un livello di rischio la cui entità può essere valutata con un metodo semi-quantitativo, definendo e valutando un indice di rischio, ovvero con una procedura totalmente quantitativa, calcolando vere e proprie misure di rischio, individuale o sociale [1]. Il primo approccio meglio si presta ad una indagine preliminare del livello di rischio globalmente presentato dalle attività di trasporto di merci pericolose su vaste estensioni di territorio (ad esempio, la rete stradale o ferroviaria), mentre il secondo è più adatto all'analisi di dettaglio di aree territoriali di riferimento per le quali si vogliano studiare soluzioni specifiche. In entrambi i casi la quantificazione del rischio deve tenere conto dei fattori che contribuiscono alla frequenza di accadimento ed alle conseguenze degli eventi incidentali che possono verificarsi nel trasporto, quali: gli scenari incidentali tipici della merce pericolosa trasportata, il flusso di trasporto della merce, l'incidentalità, la popolazione esposta, fattori ambientali (ad esempio, la meteorologia), ecc.

La possibilità di reperire tali informazioni e la loro accuratezza pongono spesso le maggiori limitazioni alle indagini sul rischio nel trasporto di merci pericolose [2,3]: in particolare, possono risultare molto lacunosi i dati sui flussi di tali merci (punti di origine e destino, percorso seguito e quantitativi trasportati). Assai utile risulta in questi casi, e non soltanto in questi, la definizione di un indice di rischio che prescindendo dai flussi della merce pericolosa, e fornisca, per ogni merce e tipologia di trasporto considerata, una indicazione del “rischio potenziale” lungo la rete di trasporto, tenuto conto della pericolosità della merce, della probabilità che si verifichi un evento incidentale e della vulnerabilità del territorio circostante, indipendentemente dai quantitativi di merce effettivamente trasportati sulla rete.

Il presente lavoro propone quindi una metodologia atta a definire il rischio potenziale lungo una rete di trasporto utilizzata per il trasferimento di merci pericolose attraverso un indice di rischio apposito, mostrando un esempio applicativo.

2 METODOLOGIA

L'indice di rischio proposto vuole caratterizzare la pericolosità del trasporto di una certa merce pericolosa, in un contenitore con determinate caratteristiche, sulle varie tratte che compongono una rete di trasporto. Data la natura di questo indice, che viene associato a porzioni della rete di trasporto, risulta opportuno rappresentarlo utilizzando una piattaforma georeferenziata di tipo GIS (Geographic Information

System). L'indice di rischio proposto tiene conto delle varie componenti del rischio attraverso un indice di pericolosità, caratteristico della merce e delle modalità di trasporto considerata, un indice di incidentalità, ed un indice di vulnerabilità, che tiene conto dell'entità delle conseguenze degli eventi incidentali.

L'indice di pericolosità è associato unicamente alla merce, alla modalità di trasporto ed alle dimensioni del contenitore, mentre è indipendente dalle caratteristiche territoriali. Esso tiene conto della probabilità che, a valle di un incidente, si verifichino i vari possibili scenari incidentali e dell'area di impatto associata ad ognuno di essi.

L'indice di incidentalità è associato alle varie tratte della rete di trasporto considerata e ha lo scopo di confrontare la probabilità che si verifichi un incidente, definita in termini di incidenti/veicolo-km, presentata da ognuna di esse; tale indice è indipendente dalle caratteristiche della merce trasportata.

L'indice di vulnerabilità è associato alle varie tratte della rete di trasporto, ma dipende anche dalle caratteristiche della merce trasportata e dalle dimensioni del contenitore utilizzato. Questo indice tiene conto della distribuzione locale dei recettori del rischio e, in particolare, dell'antropizzazione del territorio, valutando l'entità della popolazione che ricade entro la distanza di effetto degli scenari incidentali. Poiché le varie merci pericolose presentano diverse distanze di effetto, l'indice di vulnerabilità è funzione anche della tipologia del prodotto e degli scenari incidentali che esso presenta.

L'indice di rischio è quindi definito come:

$$IR_{m,t,c,r} = IP_{m,t,c} \cdot II_r \cdot IV_{m,t,c,r} \quad (1)$$

dove $IR_{m,t,c,r}$ è l'indice di rischio relativo al trasporto della m -esima merce pericolosa, con la t -esima modalità di trasporto, nel contenitore di c -esime dimensioni, sull' r -esimo tratto della rete, $IP_{m,t,c}$ è l'indice di pericolosità relativo al trasporto della merce pericolosa, II_r è l'indice di incidentalità della tratta, $IV_{m,t,c,r}$ è l'indice di vulnerabilità associato al trasporto della merce pericolosa sulla tratta. Sia l'indice di rischio che quelli di pericolosità, incidentalità e vulnerabilità sono adimensionali, ossia valutati come rapporto tra i valori delle variabili di interesse per il caso in esame ed opportuni valori di riferimento. Infatti, lo scopo di tali indici è quello di fornire informazioni quantitative di tipo "relativo" e non "assoluto". In altre parole essi consentono di confrontare agevolmente il livello di rischio insito nel trasporto delle varie merci su una rete di trasporto, come pure di individuare quali siano i fattori più critici che contribuiscono al rischio stesso, ma non permettono valutazioni atte a discriminare, per esempio, riguardo all'accettabilità del rischio.

2.1 Indice di pericolosità

L'indice di pericolosità viene associato alla tipologia di merce pericolosa, alla modalità di trasporto ed alle dimensioni del contenitore in cui viene effettuato il trasporto: il suo scopo è quello di potere confrontare la pericolosità relativa di diverse sostanze/modalità di trasporto/dimensioni dei contenitori.

La pericolosità $P_{m,t,c}$ relativa alla m -esima merce pericolosa, alla t -esima modalità di trasporto e alle c -esime dimensioni del contenitore di trasporto, viene definita come:

$$P_{m,t,c} = PS_{m,t,c} \cdot \sum_k PF_{m,t,c,k} \cdot \sum_i (PE_{m,t,c,k,i} \cdot A_{m,t,c,k,i}) \quad (2)$$

in cui $PS_{m,t,c}$ rappresenta la probabilità di sversamento della merce pericolosa a seguito di incidente, $PF_{m,t,c,k}$ la probabilità che lo sversamento avvenga attraverso il foro di k -esima dimensione, $PE_{m,t,c,k,i}$ probabilità che a valle dello sversamento della merce dal foro di k -esima dimensione si verifichi l' i -esimo scenario incidentale (incendio, esplosione o nube tossica), e $A_{m,t,c,k,i}$ area di impatto relativa a tale scenario.

La determinazione della pericolosità richiede quindi di stimare, per ogni merce pericolosa di interesse, e per ogni modalità di trasporto (stradale, ferroviaria e intermodale) considerata, nonché per le note dimensioni del contenitore, la probabilità di sversamento della sostanza nell'ambiente a seguito di incidente, la probabilità che il foro equivalente da cui il prodotto fuoriesce abbia specifiche dimensioni, la probabilità che il rilascio evolva in uno dei possibili scenari incidentali (incendio, esplosione, nube tossica) e l'area di impatto di ogni scenario. Nella valutazione delle probabilità ci si può basare sulle informazioni riportate in banche dati di incidenti, oppure applicare tecniche quali l'albero dei guasti; le aree di impatto possono invece essere stimate applicando l'analisi delle conseguenze [4].

La pericolosità così definita costituisce una sorta di superficie **media** attesa di danno ed aumenta all'aumentare del pericolo presentato dalla sostanza, inteso come combinazione della probabilità degli scenari in cui possono evolvere gli incidenti ed ampiezza dell'area di impatto degli eventi finali stessi.

L'indice di pericolosità viene quindi ottenuto come rapporto tra la pericolosità associata ad una data merce, modalità di trasporto e dimensione del contenitore, rispetto o a quella di una merce pericolosa di riferimento. Scegliendo quest'ultima come quella che, tra le merci di interesse, presenta il valore di

pericolosità più basso si ottiene un indice di pericolosità che varia tra un minimo, pari ad uno, ed un massimo che identifica immediatamente la pericolosità relativa della merce.

2.2 Indice di incidentalità

L'indice di incidentalità viene associato ad ogni tratta della rete di trasporto considerata: il suo scopo è quello di confrontare la pericolosità, in termini di probabilità di incidente, per un periodo temporale predefinito, per veicolo in transito e lunghezza unitaria della tratta, per le varie tratte che compongono la rete.

L'incidentalità, I_r , espressa come incidenti/ veicolo-km per la tratta r , è stimabile come:

$$I_r = \frac{NI_r}{TV_r \cdot LT_r} \quad (3)$$

dove NI_r è il numero di incidenti verificatisi sulla tratta r nel periodo di riferimento, TV_r è il traffico veicolare (veicoli/periodo di riferimento) sulla medesima tratta, LT_r è la lunghezza della tratta (km).

Per valutare l'incidentalità risulta conveniente partire da una rappresentazione della rete, suddivisa in tratte più o meno ampie, quali quelle rese disponibili da basi di dati GIS. Tali rappresentazioni comprendono, di norma [5], la rete ferroviaria e quella stradale, dove il dettaglio di quest'ultima arriva alla viabilità secondaria ed alle principali vie di attraversamento dei centri urbani; le dimensioni delle tratte considerate vanno da poche decine di metri a qualche chilometro.

Una valutazione di dettaglio dell'incidentalità, espressa in incidenti /veicolo-km, per una tratta richiede di conoscere informazioni dettagliate relativamente all'incidentalità sulla tratta, espressa come numero di incidenti/anno, ed al traffico sulla medesima tratta, espresso in veicoli/km. Tali informazioni sono di difficile reperibilità, non risultando disponibili per la rete ferroviaria, né per tutta la viabilità secondaria; inoltre, le informazioni relative al traffico sono di norma riferite a tratte molto lunghe e non consentono di scendere in dettagli. La scarsità dei dati disponibili si può tradurre da un lato nella difficoltà di differenziare l'incidentalità delle diverse tratte, come accade per la rete ferroviaria e per la rete viaria secondaria, ovvero in una notevole incertezza sui valori assoluti da attribuire all'incidentalità alle singole tratte, come accade per la rete viaria principale. Per quanto riguarda la rete viaria, sono tuttavia disponibili informazioni di tipo statistico più generale per varie tipologie di tratte (autostrade, statali, provinciali, comunali extraurbane e urbane) differenziate su base regionale [6], che si prestano a definire un indice di incidentalità.

Tale grandezza, adimensionale, è quindi definita come rapporto tra l'incidentalità della tratta considerata rispetto ad una delle altre tratte della rete, considerata come riferimento fisso. A titolo di esempio, si può pensare di associare ad ogni tipologia di tratta della rete il valore medio di incidentalità, e quindi ottenere l'indice di incidentalità utilizzando come riferimento il valore medio di incidentalità più basso.

2.3 Indice di vulnerabilità

Come vulnerabilità si intende la presenza di popolazione a rischio all'interno della distanza di effetto dei possibili scenari incidentali conseguenti al rilascio della sostanza pericolosa nell'ambiente. Tali distanze di effetto sono funzione della merce considerata e della dimensione del contenitore e, per ogni prodotto, delle varie tipologie dei possibili scenari (getto incendiato, incendio da pozza, incendio di una nube infiammabile, ecc.) e delle condizioni ambientali (meteorologia, distribuzioni delle fonti di innesco, ecc.).

Si può quindi definire una vulnerabilità $V_{m,t,c,r}$ per la m -esima merce pericolosa, trasportata con la t -esima modalità di trasporto in un contenitore di dimensione c -esima lungo la r -esima tratta della rete di trasporto:

$$V_{m,t,c,r} = \frac{\sum_k PF_{m,t,c,k} \cdot \sum_i (PE_{m,t,c,k,i} \cdot A_{m,t,c,k,i} \cdot DP_d)}{\sum_k PF_{m,t,c,k} \cdot \sum_i (PE_{m,t,c,k,i} \cdot A_{m,t,c,k,i})} \quad (4)$$

dove $PF_{m,t,c,k}$ la probabilità che lo sversamento avvenga attraverso il foro di k -esima dimensione, $PE_{m,t,c,k,i}$ probabilità che a valle dello sversamento della merce dal foro di k -esima dimensione si verifichi l' i -esimo evento finale (incendio, esplosione o nube tossica), $A_{m,t,c,k,i}$ l'estensione della superficie di impatto relativa a detto evento finale e DP_d densità di popolazione all'interno della d -esima distanza di effetto, relativa a detto scenario.

La vulnerabilità così definita ha quindi le dimensioni di una densità di popolazione, rappresentativa del valore medio tenuto conto della diversa area di danno degli scenari, e quindi della distanza cui giunge l'effetto, e delle rispettive probabilità di accadimento. Se le distanze di effetto degli eventi finali (incendi, esplosioni, nubi tossiche) in cui possono evolvere gli scenari incidentali originati dallo sversamento della sostanza nell'ambiente variano in un intervallo limitato, la valutazione della vulnerabilità può essere

notevolmente semplificata, considerandola semplicemente pari alla densità di popolazione che si trova all'interno di una fascia posta a distanza prefissata rispetto alla tratta considerata. Tenuto conto del livello di accuratezza con cui sono disponibili le informazioni relative alla distribuzione della popolazione, si può anche utilizzare un approccio più semplificato, valutando la densità di popolazione all'interno di un certo numero di fasce, poste a distanza prefissata dalla tratta considerata, ed andando a considerare la vulnerabilità associata ad ogni merce pericolosa, modalità di trasporto e dimensione del contenitore, come pari alla densità di popolazione della fascia entro cui ricadono le distanze di effetto dei rispettivi eventi finali.

Anche in questo caso, l'indice di vulnerabilità si ottiene riferendo il valore di vulnerabilità relativo alla tratta ad un valore di vulnerabilità di riferimento (ad esempio, il minimo o il massimo tra quelli ottenuti).

3 VALUTAZIONE DELL'INDICE DI RISCHIO

La metodologia proposta è stata applicata, a titolo di esempio, per valutare l'indice di rischio nel trasporto ferroviario di alcune tipologie di merci pericolose comunemente trasportate: ammoniaca, benzene, cloro e propano. Come rappresentazione della rete di trasporto si è utilizzato un database GIS commerciale (RoadNet di TeleAtlas [5]) che suddivide l'estensione della rete ferroviaria, pari a circa 20.000 km, in tratte di lunghezza media intorno a 700 m. Come modalità di trasporto si è considerato l'utilizzo di ferrocisterne e di container: le prime hanno un volume maggiore, assunto mediamente pari a circa 70 m³, rispetto ai secondi, la cui capacità è stata considerata pari a 35 m³. Per entrambe le tipologie di contenitore si è assunto un grado di riempimento dell'85%.

3.1 Indice di pericolosità

La valutazione dell'indice di pericolosità richiede che siano determinate, per ognuna delle sostanze in esame:

- la probabilità di sversamento del prodotto a valle di un incidente;
- la probabilità che la fuoriuscita avvenga da un foro di certe dimensioni;
- la probabilità che lo scenario incidentale che si verifica a valle della fuoriuscita evolva in ognuno dei possibili eventi finali (incendi, esplosioni, nubi tossiche);
- l'area di impatto di ognuno dei possibili eventi finali.

3.1.1 Probabilità di sversamento del prodotto a valle di un incidente

In accordo con quanto riportato in letteratura [1] le probabilità di rilascio nell'ambiente della merce pericolosa a seguito di un incidente si possono assumere come dipendenti dalle caratteristiche del contenitore e, in particolare, della pressione di progetto dello stesso. Infatti, dato lo spessore maggiore presentato dai contenitori che lavorano in pressione essi, in caso di urto, presentano una maggiore resistenza meccanica rispetto a quelli che lavorano a pressione atmosferica. La diversa tipologia del contenitore (ferrocisterna o container), non sembra invece in grado di influenzare la probabilità di fuoriuscita del prodotto, purché le condizioni di trasporto e, in particolare, la pressione di progetto, siano le stesse [1,7].

Sulla base delle informazioni riportate in letteratura [8, 3] la probabilità di fuoriuscita del prodotto a seguito di un incidente appare tripla per i contenitori che lavorano a pressione atmosferica rispetto a quella presentata dai contenitori che lavorano in pressione: si è quindi assegnato il valore 1 alla probabilità di sversamento da contenitori pressurizzati e 3 a quella da contenitori non pressurizzati, indipendentemente dal tipo di contenitore (ferrocisterna o container). Si rimarca come, ai fini della determinazione dell'indice di pericolosità, non sia necessario stabilire il valore esatto della probabilità di sversamento per le varie tipologie di contenitori, ma solo il valore dei loro rapporti.

La Tabella 1 riporta la probabilità di sversamento a valle di incidente per le merci pericolose considerate, tenuto conto della pressione di progetto dei rispettivi contenitori (pressurizzati/non pressurizzati).

Tabella 1: Probabilità di sversamento a seguito di incidente per le merci pericolose considerate

Sostanza	Tipo di contenitore	PS
Ammoniaca	Pressurizzato	1
Benzene	Non pressurizzato	3
Cloro	Pressurizzato	1
GPL	Pressurizzato	1

3.1.2 Probabilità di dimensioni del foro

Quando un incidente origina uno sversamento del prodotto trasportato nell'ambiente, la dimensione dell'apertura attraverso cui si ha la fuoriuscita può essere assai variabile, dipendentemente dalla tipologia dell'urto e dalla zona del contenitore interessata. Quando l'incidente è lieve, difficilmente si verifica la rottura del contenitore ed eventuali perdite sono associate al danneggiamento dei suoi accessori (valvola di fondo, bocchelli, ecc.). In questo caso la dimensione del foro da cui fuoriesce il prodotto è piccola e si ha una perdita parziale del carico. Quando invece l'incidente presenta una certa gravità (ribaltamento, deragliamento, ecc.) si può verificare una fessurazione del contenitore con fuoriuscita massiccia del prodotto trasportato, che, nei casi peggiori, può portare molto rapidamente alla perdita totale del carico.

Esaminando una raccolta degli interventi effettuati dai Vigili del Fuoco per incidenti nel trasporto stradale e ferroviario di merci pericolose si evince che, quando si era in presenza di uno sversamento del prodotto, esso risultava di entità modesta in circa il 70% dei casi e più massiccio nel rimanente 30% [8]: le schede tuttavia non riportano alcuna indicazione sulla dimensione delle sezioni delle rotture. Per caratterizzare le dimensioni tipiche delle rotture sono sovente utilizzate sezioni corrispondenti a tre ipotesi di rilascio (lieve, medio e catastrofico) cui si associano diametri diversi [9]. Nel presente lavoro, assumendo di limitare le tipologie di sversamento a due, moderata e grave, sono state suggerite [10] le seguenti dimensioni dei fori: diametro equivalente pari a 25 mm per il caso medio e diametro equivalente pari a 220 mm per quello grave. Nel primo caso la durata dello sversamento è assunta pari a 15 minuti, corrispondente ad una perdita parziale del carico; nel secondo caso si ha lo svuotamento completo del contenitore in pochi minuti [11]. Come dimensioni dei fori si sono quindi assunte 25 mm, con probabilità pari al 70%, e 220 mm, con probabilità pari al 30%.

3.1.3 Probabilità dell'evento finale o scenario incidentale

A seguito dello sversamento di una sostanza pericolosa nell'ambiente, il rilascio può potenzialmente evolvere in un certo numero di eventi finali (incendi, esplosioni, nubi tossiche) dipendentemente da numerosi fattori, quali: le caratteristiche chimico-fisiche, di infiammabilità e di tossicità del prodotto, lo stato fisico della sostanza durante il trasporto (liquido, gas liquefatto, ecc.) e le condizioni (P,T) a cui è effettuato il trasporto stesso, le modalità di sversamento e la sua durata, le caratteristiche dell'ambiente circostante (presenza di fonti di innesco, condizioni meteorologiche, presenza di confinamento, ecc.).

In particolare, gli eventi finali che possono verificarsi a seguito dello sversamento di una merce pericolosa, infiammabile o tossica, nell'ambiente ricadono nelle seguenti tipologie [3]:

- Jet fire (getto incendiato);
- Pool fire (incendio da pozza);
- Flash fire (incendio di una nube di vapori);
- VCE (Vapor Cloud Explosion; esplosione di una nube di vapori);
- BLEVE/Fireball (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion; esplosione in presenza di un liquido bollente ed un vapore che si va espandendo/Palla di fuoco);
- Nube tossica: si verifica quando un prodotto tossico, fuoriuscito dal contenitore in forma gassosa o liquida, origina una nube di gas/vapori tossici che si disperde nell'ambiente.

Quando una merce pericolosa fuoriesce dal contenitore a seguito di un incidente, non sono prevedibili le caratteristiche dell'ambiente in cui ciò avverrà: risulta quindi impossibile applicare in maniera dettagliata tecniche consolidate, quali l'albero degli eventi (ETA: Event Tree Analysis), per stabilire quale possa essere l'evoluzione dello scenario incidentale, e quali probabilità assegnare ad ognuno dei possibili eventi finali. Di fatto, nelle applicazioni dell'analisi di rischio a casi di trasporto di merci pericolose, queste probabilità vengono generalmente desunte dall'analisi di banche dati di incidenti.

Va rimarcato che questa maniera di procedere, pur essendo al momento l'unica praticabile, non è esente da problemi per la scarsità e l'imprecisione delle informazioni riportate nelle banche dati. Infatti, le banche dati riportano solo dati relativi ad incidenti di una certa gravità, il numero dei casi disponibili riferiti ad un singolo prodotto è generalmente limitato, le informazioni relative agli eventi finali sono in molti casi generiche (ad esempio: incendio, senza specificarne la tipologia), quelle relative ai quantitativi sversati sono spesso assenti, rendendo di fatto impossibile legare la probabilità dell'evento finale alla dimensione del foro da cui avviene la fuoriuscita.

In Tabella 2 sono riportati i valori di probabilità degli eventi finali relativi alle merci pericolose considerate, ottenute dall'analisi della banca dati MHIDAS, Major Hazard Incident Data Service [10].

Alcune delle sostanze in esame sono infiammabili (benzene, GPL), altre tossiche (cloro) o infiammabili e tossiche (ammoniaca): va rimarcato come il benzene, di cui pure è nota la tossicità per esposizioni a medio-lungo termine, non sia stato considerato in questo caso come "tossico", dati i brevi tempi di esposizione attesi a valle di un evento incidentale.

Tabella 2: Probabilità degli scenari incidentali per le merci pericolose considerate.

Probabilità evento finale	Ammoniaca	Benzene	Cloro	GPL
Jet fire	0.05	0.1	-	0.20
Pool fire	0.05	0.1	-	-
Flash fire	0.02	0.05	-	0.25
VCE	0.01	0.01	-	0.25
BLEVE/Fireball	-	-	-	0.15
Nube tossica	0.87	-	1	-

3.1.4 Aree di impatto degli scenari incidentali

L'area di impatto di un evento finale è definita come l'estensione della superficie all'interno della quale gli effetti dell'evento finale, in termini di radiazione termica, onda d'urto, concentrazione di sostanza tossica, siano in grado di provocare conseguenze alla popolazione esposta. Da questo punto di vista, la tipologia di danno generalmente considerato è la morte ed occorre quindi fissare opportune soglie di letalità per gli effetti dei vari eventi finali. Esse sono state assunte come segue [9]:

- Jet fire e Pool fire: area in cui la radiazione termica generata è superiore a 10 kW/m²;
- Flash fire: area sottesa dalla porzione della nube di gas/vapori in cui la concentrazione di prodotto infiammabile si trova all'interno dei limiti di infiammabilità;
- VCE: area in cui la sovrappressione generata dall'esplosione è superiore a 5 kPa;
- Fireball: area in cui la radiazione termica generata è superiore a 160 kJ/m²;
- Nube tossica: area in cui la concentrazione di sostanza tossica è superiore all'IDLH, concentrazione Immediately Dangerous for Life or Health.

Gli andamenti nel tempo e nello spazio dei campi di concentrazione, radiazione termica e sovrappressione relativi all'evento finale vengono valutati applicando la tecnica di analisi delle conseguenze [4], che prevede la modellizzazione matematica dello scenario incidentale, a partire dalla fuoriuscita del prodotto dal foro, attraverso la sua dispersione nell'ambiente e l'eventuale innesco. I risultati della simulazione sono funzione delle caratteristiche assunte per l'ambiente, sia in termini di condizioni meteorologiche (temperatura, velocità del vento, classe di stabilità atmosferica, ecc.) che di tipologia del terreno (superficie su cui avviene lo sversamento, rugosità media, grado di confinamento, ecc.) e condizioni al contorno (tipologia e distribuzione delle fonti di innesco, ecc.).

Per tutti questi parametri, nel presente studio si sono assunte condizioni ragionevolmente rappresentative di una situazione ambientale "media": in particolare, per quanto riguarda la meteorologia si è assunta una temperatura di 14°C, una velocità del vento di 3 m/s e la classe di stabilità atmosferica di Pasquill D (neutra).

Il calcolo delle aree di impatto per i possibili eventi incidentali relativi alle merci considerate è stato quindi effettuato, per le due tipologie di sversamento (foro da 25 e 220 mm) e le due modalità di trasporto (ferrocisterna/container) assunte in precedenza, utilizzando il software specialistico di analisi delle conseguenze Trace 8.b [13].

3.1.5 Indice di pericolosità per le merci considerate

Poiché l'indagine in esame è limitata al trasporto ferroviario, e tenuto conto delle ipotesi fatte relativamente alle probabilità di sversamento e di dimensione del foro (assunte indipendenti dalla tipologia del contenitore) ed alle probabilità degli eventi finali (assunte indipendenti dalle dimensioni del foro) l'equazione (2), relativa al calcolo della pericolosità, si semplifica come segue:

$$P_{m,c} = PS_m \cdot \sum_k PF_{m,k} \cdot \sum_i (PE_m \cdot A_{m,c,k,i}) \quad (5)$$

Sono stati quindi valutati i valori della pericolosità associata alle varie merci considerate, per le due tipologie di contenitori assunte (ferrocisterna e container): il valore minimo è stato ottenuto per il trasporto di benzene all'interno di container. Si è quindi proceduto al calcolo dell'indice di pericolosità dividendo i valori ottenuti per la pericolosità delle merci pericolose considerate, in corrispondenza delle tipologie di trasporto in ferrocisterna ed in container, per il valore di pericolosità relativo al trasporto di benzene in container, ottenendo i valori dell'indice di pericolosità sono riportati in Tabella 3.

Tabella 3: Indice di pericolosità per le merci pericolose considerate.

Sostanza	Contenitore	IP _{m,c}
Ammoniaca	Container	38.4
	Ferrocisterna	54.5
Benzene	Container	1.0
	Ferrocisterna	1.9
Cloro	Container	242.1
	Ferrocisterna	336.9
GPL	Container	7.1
	Ferrocisterna	10.9

Esaminando i valori riportati nella Tabella 3, si nota come l'indice risulti più elevato per il trasporto di sostanze tossiche (cloro e ammoniaca) che per quelle infiammabili (GPL e benzene): ciò deriva essenzialmente dai valori più elevati delle aree di impatto associate alle prime, funzione della maggiore distanza di effetto. Tra le sostanze tossiche, risulta più pericoloso il cloro, che origina nubi di dimensioni maggiori rispetto all'ammoniaca, e, tra quelle infiammabili, il GPL, che essendo trasportato come gas liquefatto a pressione, dà luogo a nubi infiammabili di dimensioni maggiori. L'effetto dell'aumento della dimensione del contenitore, passando dal container alla ferrocisterna, comporta un aumento dell'indice di pericolosità, quantificabile attorno al 40% per i gas liquefatti (ammoniaca, cloro GPL), e pari a quasi il 100% per il benzene, in conseguenza delle maggiori dimensioni della pozza da cui evapora il liquido in quest'ultimo caso.

3.2 Indice di incidentalità

Per quanto riguarda la rete ferroviaria, non sono disponibili informazioni di dettaglio relative all'incidentalità locale delle singole tratte, ma solo un valore medio, che si può assumere valido per l'intera rete nazionale. Quindi, nel caso in esame, l'indice di incidentalità assume un valore unitario per tutte le tratte della rete di trasporto considerata.

3.3 Indice di vulnerabilità

La determinazione dell'indice di vulnerabilità per le varie tratte della rete di trasporto in esame richiede di valutare la popolazione che ricade all'interno delle aree di impatto per gli eventi incidentali associati alla merce pericolosa ed alla tipologia di trasporto considerata. Per evitare di moltiplicare a dismisura il numero della fasce entro cui valutare, per ognuna delle tratte, la popolazione a rischio, si sono preliminarmente individuate, sulla base delle tipologie dei possibili eventi finali, quattro valori di distanza tipici:

- 150 m: associata agli eventi finali di jet fire e pool-fire;
- 500 m: associata agli eventi finali di flash fire, VCE e BLEVE/fireball;
- 1500 m: associata a nubi tossiche;
- 5000 m: associata a grandi nubi tossiche.

Sulla base delle simulazioni effettuate in precedenza si è quindi associata ad ogni merce pericolosa una distanza di effetto "tipica", come mostra la Tabella 4.

Tabella 4: Distanza di effetto tipica per le merci pericolose considerate.

Prodotto	Distanza di effetto
Ammoniaca	1500 m
Cloro	5000 m
GPL	500 m
Benzene	150 m

Si è quindi valutata la densità della popolazione residente all'interno di una fascia collocata su entrambi i lati di ogni tratta della rete di trasporto, e di ampiezza pari alla distanza di effetto su ognuno dei lati della tratta. I valori della densità di popolazione sono stati valutati a partire dai dati Istat del censimento della popolazione residente [14]: in particolare, si sono utilizzate le informazioni relative a livello delle località abitate (tutti i comuni italiani e le loro frazioni) che comprendono, oltre al numero di abitanti, una rappresentazione georeferenziata del poligono rappresentativo della località. Da tali dati si è preliminarmente

calcolata la densità di popolazione (abitanti/km²) di ogni località. Si sono quindi identificate, per ogni tratta della rete di trasporto, le quattro fasce entro cui valutare la densità di popolazione, e le loro intersezioni con i poligoni delle località abitate (vedi Figura 1). La densità di popolazione DP_d relativa ad ogni fascia di interesse, collocata a distanza d su entrambi i lati della tratta considerata è stata quindi calcolata come:

$$DP_d = \frac{\sum_l DP_l \cdot A_{l,d}}{A_d} \quad (6)$$

dove DP_l è la densità di popolazione dell' l -esima località abitata ricadente, parzialmente o totalmente, all'interno della distanza d , $A_{l,d}$ è la superficie dell'intersezione tra il poligono relativo alla località abitata e la fascia di semi-ampiezza d , e A_d è la superficie di quest'ultima fascia.

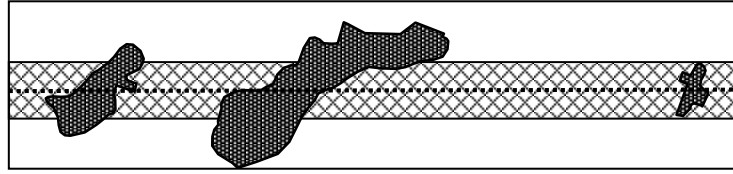


Figura 1: Valutazione della densità di popolazione all'interno di una fascia a distanza d dalla tratta.

Questa procedura è stata ripetuta per tutte le tratte della rete di trasporto, determinando la densità di popolazione relativa alle quattro fasce poste a 150, 500, 1500 e 5000 m di distanza da ognuna di esse. La Figura 2 mostra, a titolo di esempio, la distribuzione della popolazione nelle fasce considerate, espressa in funzione del percento cumulativo delle tratte: si nota come circa il 20% delle tratte presenti una densità di popolazione inferiore a 100 abitanti/km², che circa 2/3 si trovano al di sotto di 1000 abitanti/km² e che solo il 5-10% delle tratte supera i 5000 abitanti/km².

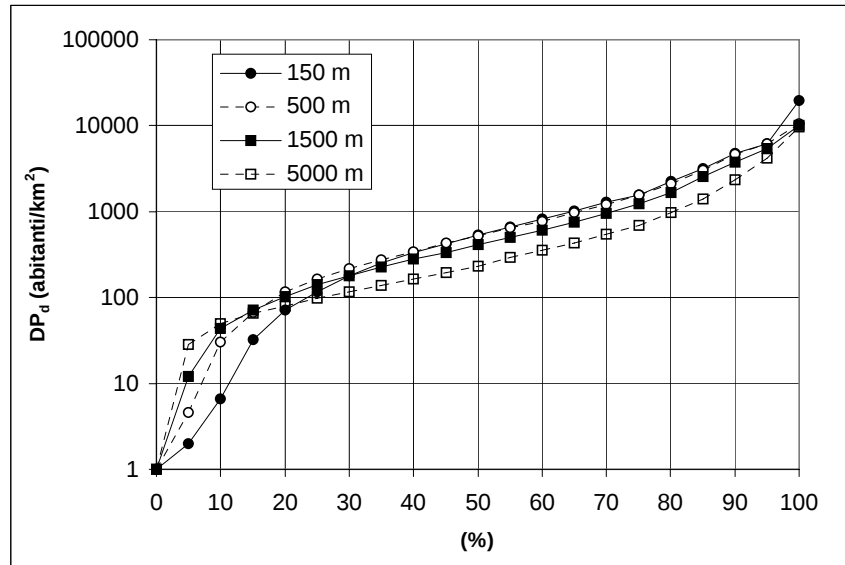


Figura 2: Distribuzione della popolazione per le quattro fasce di distanza dalla rete ferroviaria.

Poiché si è considerato un unico valore della distanza tipica per ogni merce pericolosa, indipendentemente dalle dimensioni del foro e dallo scenario finale, la vulnerabilità, espressa dall'equazione (4) viene a coincidere con la densità di popolazione, valutata per ogni tratta e merce pericolosa di interesse tramite l'equazione (6). Data la procedura di calcolo utilizzata, per i tratti della rete lontani da centri abitati la densità di popolazione risulta pari a zero: pertanto, in questo caso, l'indice di vulnerabilità è stato calcolato assumendo come valore di riferimento il massimo tra quelli ottenuti per le varie fasce di distanza.

3.3.1 Calcolo dell'indice di rischio

Una volta valutati gli indici di pericolosità, di incidentalità e di vulnerabilità, come descritto nei paragrafi precedenti, si è utilizzata l'equazione (1) per determinare l'indice di rischio potenziale per ogni tratta della rete di trasporto, associato alle varie merci pericolose e tipologie di contenitori considerate. Per confrontare più agevolmente i valori di questo indice per le varie sostanze, esso è stato normalizzato al valore di 100, assegnato alla tratta a maggior rischio (relativa al trasporto di cloro in ferrocisterna), riferendo il rischio di tutte le altre tratte a quest'ultima.

4 RISULTATI E DISCUSSIONE

Le Figure 3 e 4 mostrano i valori dell'indice di rischio ottenuti, rispettivamente per il trasporto in container e in ferrocisterne per le merci pericolose considerate, in funzione della percentuale cumulativa delle tratte.

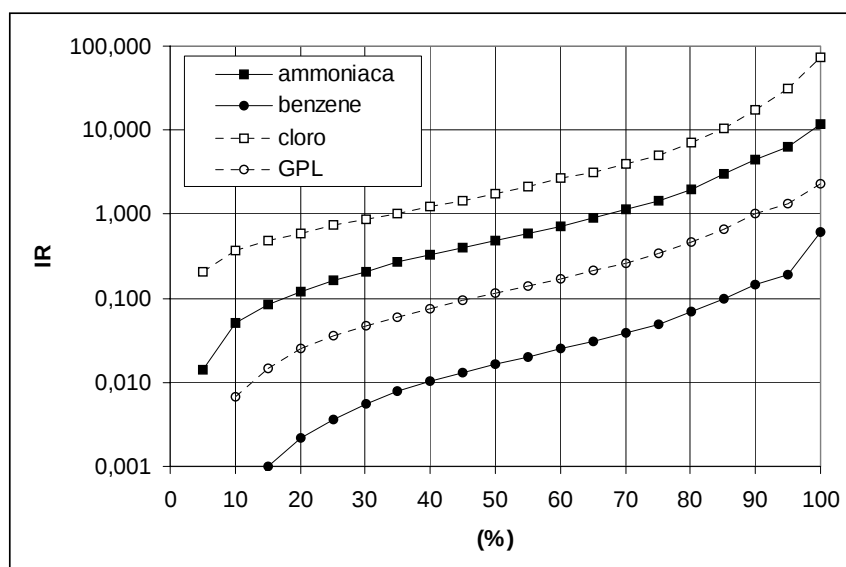


Figura 3: Distribuzione dell'indice di rischio per le varie tratte (trasporto in container).

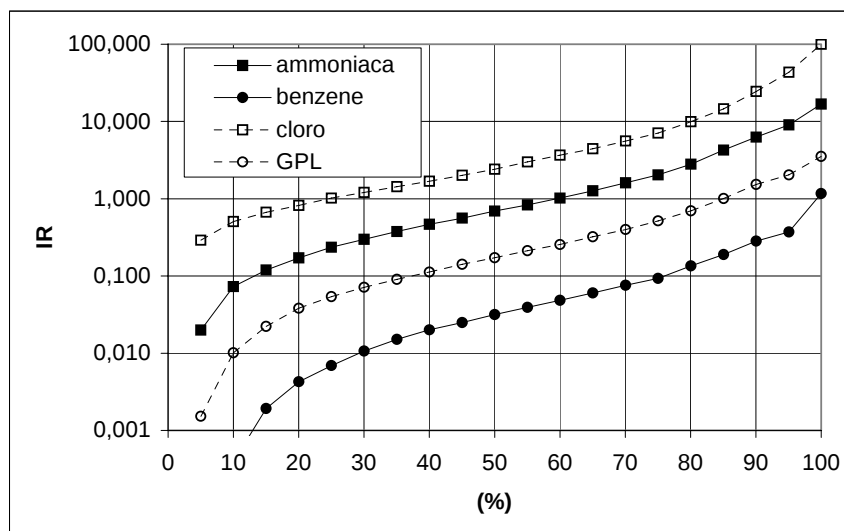


Figura 4: Distribuzione dell'indice di rischio per le varie tratte (trasporto in ferrocisterne).

Si può notare immediatamente come la diversa pericolosità dei prodotti e delle modalità di trasporto sia il parametro che ha maggiormente inciso sull'indice di rischio: infatti, le curve relative al cloro presentano rischio superiore a tutte le altre, seguite dall'ammoniaca, dal GPL e dal benzene, in quest'ordine; inoltre, le

curve relative al trasporto in ferrocisterna presentano sempre valori di indice di rischio superiore rispetto a quelle relative al trasporto in container. Nel caso in esame, infatti, l'indice di pericolosità risulta il parametro che presenta variazioni più sensibili tra i vari casi (vedi Tabella 3); l'indice di incidentalità è stato assunto costante e la vulnerabilità non varia sensibilmente con le diverse fasce di distanza adottate per i vari prodotti (vedi Figura 2). Quindi, i valori dell'indice di pericolosità si dimostrano uno strumento assai utile per valutare rapidamente la pericolosità relativa presentata dalle diverse merci pericolose tenuto conto delle rispettive modalità di trasporto. Dall'esame della Tabella 3 si evince, ad esempio, che trasportare cloro in ferrocisterna è potenzialmente 6 volte più pericoloso rispetto all'ammoniaca, sempre in ferrocisterna. Nella lettura della Tabella 3 occorre comunque prestare attenzione: infatti, nonostante i valori dell'indice di pericolosità siano più alti per il trasporto in ferrocisterna che in container, la prima tipologia di trasporto può risultare meno rischiosa, tenuto conto che la maggiore dimensione della ferrocisterna consente di ridurre di molto il numero dei viaggi. Questa considerazione a favore della scelta della ferrocisterna rispetto al container vale per tutti i prodotti considerati, ma diviene marginale per il benzene e, probabilmente, più in generale, per la categoria dei liquidi infiammabili.

L'utilizzo dell'applicativo GIS consente inoltre di visualizzare direttamente su una mappa l'indice di rischio potenziale associato al trasporto di un singolo vettore sulle diverse tratte della rete, per esempio, utilizzando gradazioni di colore, per ogni tipologia di merce pericolosa e modalità di trasporto. La figura 5 mostra, a titolo di esempio, l'indice di rischio per il trasporto del cloro in ferrocisterna su una porzione della rete.

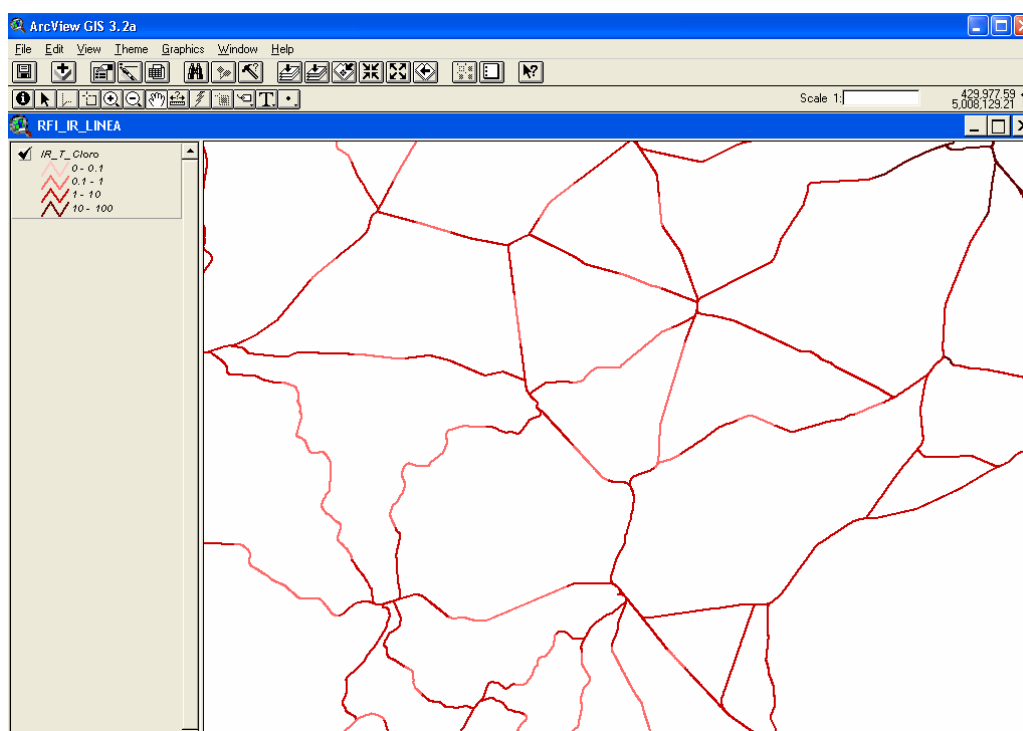


Figura 5: Indice di rischio per il trasporto di cloro in ferrocisterna

Al variare della merce pericolosa e delle modalità di trasporto, la situazione, per quanto riguarda le tratte a maggior rischio, si modifica solo di poco: infatti, l'incidentalità è stata assunta costante per tutta la rete di trasporto e la vulnerabilità, determinata dalla distribuzione della popolazione a rischio non varia in modo sostanziale al variare della fascia di distanza considerata per i singoli prodotti (vedi Figura 2). Questa osservazione si può quasi certamente estendere anche al caso di trasporto stradale, in cui si hanno significative variazioni di incidentalità in funzione della tipologia di strada, ma non variazioni di incidentalità legate alla merce pericolosa oggetto del trasporto.

La mappa territoriale dell'indice di rischio è quindi immediatamente utilizzabile per localizzare i cosiddetti "punti neri" ossia i segmenti a maggior rischio (nel caso in esame, semplicemente, quelli che attraversano zone a maggiore densità di popolazione), ed anche per visualizzare il rischio complessivo presentato da possibili itinerari alternativi, una volta noti i flussi di traffico. Questo tipo di informazione risulta particolarmente utile in sede di programmazione delle attività di trasporto e per la loro ripartizione tra i possibili itinerari. Inoltre, nell'ottica dell'effettuazione di un'analisi di rischio "classica" la conoscenza delle

tratte a maggior rischio consente poi di focalizzare l'attenzione su queste ultime, facendole oggetto di una indagine maggiormente approfondita.

5 CONCLUSIONI

La metodologia presentata consente di valutare in modo rapido il rischio presentato dal trasporto di qualsivoglia merce pericolosa su una qualunque rete di trasporto, tenendo conto della pericolosità intrinseca del prodotto e della modalità di trasporto e delle caratteristiche locali di incidentalità e vulnerabilità della rete. I risultati ottenuti, riferiti al trasporto ferroviario di alcune merci pericolose, mostrano come sia possibile pianificare le attività di trasporto tenendo anche conto del rischio presentato dalle diverse modalità di trasporto e dai vari itinerari, come pure di individuare i punti critici della rete cui dedicare maggiori attenzioni nell'esecuzione dell'analisi di rischio.

6 RINGRAZIAMENTI

L'indice di rischio oggetto della memoria è stato predisposto ed utilizzato nell'ambito di un progetto di ricerca finanziato da Rete Ferroviaria Italiana.

7 ELENCO DEI SIMBOLI

A_d	superficie della fascia di semi-ampiezza d , centrata sulla tratta (km^2);
$A_{m,t,c,k,i}$	area di impatto relativa all' i -esimo evento finale (incendio, esplosione o nube tossica) che si verifica a valle dello sversamento della m -esima merce pericolosa, con la t -esima modalità di trasporto, nel contenitore di c -esime dimensioni, dal foro di k -esima dimensione;
$A_{l,d}$	superficie dell'intersezione tra il poligono relativo alla l -esima località abitata e la fascia di semi-ampiezza d (km^2);
DP_d	densità di popolazione all'interno della d -esima distanza di effetto;
DP_l	densità di popolazione dell' l -esima località abitata ($\text{abitanti}/\text{km}^2$);
I_r	incidentalità della r -esima tratta ($\text{incidenti}/\text{veicolo km}$);
II_r	è l'indice di incidentalità della r -esima tratta;
$IP_{m,t,c}$	indice di pericolosità relativo al trasporto della m -esima merce pericolosa, con la t -esima modalità di trasporto, nel contenitore di c -esime dimensioni;
$IR_{m,t,c,r}$	indice di rischio relativo al trasporto della m -esima merce pericolosa, con la t -esima modalità di trasporto, nel contenitore di c -esime dimensioni, sull' r -esimo tratto della rete;
$IV_{m,t,c,r}$	indice di vulnerabilità associato al trasporto della m -esima merce pericolosa, con la t -esima modalità di trasporto, nel contenitore di c -esime dimensioni, sull' r -esimo tratto della rete;
LT_r	lunghezza della r -esima tratta (km);
NI_r	numero di incidenti verificatisi sulla r -esima tratto della rete nel periodo di riferimento ($\text{incidenti}/\text{anno}$);
$P_{m,t,c}$	pericolosità associata al trasporto della m -esima merce pericolosa, con la t -esima modalità di trasporto, nel contenitore di c -esime dimensioni;
$PE_{m,t,c,k,i}$	probabilità che a valle dello sversamento della m -esima merce pericolosa, con la t -esima modalità di trasporto, nel contenitore di c -esime dimensioni, dal foro di k -esima dimensione si verifichi l' i -esimo evento finale (incendio, esplosione o nube tossica);
$PF_{m,t,c,k}$	probabilità che lo sversamento della m -esima merce pericolosa, con la t -esima modalità di trasporto, nel contenitore di c -esime dimensioni, avvenga attraverso il foro di k -esima dimensione,
TV_r	traffico veicolare sulla r -esima tratta ($\text{veicoli}/\text{anno}$);
$V_{m,t,c}$	vulnerabilità associata al trasporto della m -esima merce pericolosa, con la t -esima modalità di trasporto, nel contenitore di c -esime dimensioni, sull' r -esimo tratto della rete.

8 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] CCPS, Center for Chemical Process Safety, *Guidelines for Chemical Transportation Risk Analysis*, AIChE, New York (1995).
- [2] R.Bubbico, M.Conforti, S.Di Cave, B.Mazzarotta, Accuracy of territorial information in transportation risk analysis, Safety & Reliability, E. Zio, M. Demichela, N.Piccinini Eds. Vol. 2, pp.791-798, Torino, (2001).

- [3] V. Cozzani, S. Bonvicini, L. Vanni, G. Spadoni, S. Zanelli, *"Trasporto merci pericolose. Parte seconda: incertezze nei dati storici di incidente"*, La Chimica E L'industria, anno 83, n. 10, pp. 64-69 (2001).
- [4] CCPS, Center for Chemical Process Safety, *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*, 2nd Ed., AIChE, New York (2000).
- [5] TeleAtlas, RoadNet for Arc/Info, TeleAtlas BV (1996).
- [6] ACI, *Analisi dell'incidentalità stradale a livello nazionale e regionale, provinciale e nei comuni con oltre 250.000 abitanti*, Roma (2000).
- [7] B. Mazzarotta, Risk reduction when transporting dangerous goods: road or rail?, *Risk Decision and Policy*, 7, pp.45-56 (2002).
- [8] V. Cozzani, S. Bonvicini, L. Vanni, G. Spadoni, S. Zanelli, *Analisi comparativa delle frequenze di incidente e di rilascio nel trasporto stradale e ferroviario di sostanze pericolose*, VGR2k, Sessione 5/030, Pisa, October 24-26 (2000).
- [9] S. Bonvicini, G. Spadoni *"Effects of different incident characterisations in hazardous materials transportation risk analysis"*, Proceedings di RISK ANALYSIS 2000 (Bologna, 11-13 ottobre) a cura di C.A. Brebbia pp. 115-124, Wit Press, Wessex UK, 2000.
- [10] C. Cannalire, S. Di Cave, B. Mazzarotta, P. Spagnesi, Risk analysis for the transport of LPG by road and rail, *Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industry*, vol.II, Ed. J.J.Mewis, H.J.Pasman and E.E. De Rademaeker, pp.611-622, Elsevier Science B.V., Amsterdam, (1995).
- [11] R. Bubbico, S. Di Cave, B. Mazzarotta, A GIS supported transportation risk analysis approach, *Risk, Reliability and Security*, pp. 361- 374, CCPS, Jacksonville, 8-11/10 (2002).
- [12] OSH-ROM, HSELINE, C15DOL, MHIDAS, NIOSHTIC, London, Silver Platter (2001).
- [13] Safer System LLC, TRACE 8.b User Guide, Westlake Village (2000).
- [14] ISTAT, *13° Censimento generale della popolazione e delle abitazioni*, Roma (1992).