

ROUTHAZ: ROUTING DI MINIMO RISCHIO NEL TRASPORTO STRADALE DI SOSTANZE PERICOLOSE

Sergio Di Cave, Angela Di Stefano, Antonio Guerrieri, Barbara Mazzarotta

Dipartimento di Ingegneria Chimica, Università di Roma "La Sapienza"
Via Eudossiana 18, 00184, Roma, Italy

Questo lavoro presenta una metodologia che consente di individuare il percorso a minimo rischio per il trasporto stradale di sostanze pericolose. Essa si basa sulla combinazione di un applicativo GIS (Geographic Information System) che contiene le informazioni su strade, incidentalità, meteorologia e popolazione residente all'interno di varie fasce poste a diversa distanza dalla strada, e di una banca dati relativa alla pericolosità delle sostanze trasportate. Si è definito un indice di rischio stradale che tiene conto del numero di persone potenzialmente a rischio sulla base dell'area di impatto degli eventi pericolosi legati agli scenari incidentali e della frequenza attesa per gli eventi pericolosi in questione. La selezione del percorso più sicuro si basa sulla minimizzazione di questo indice di rischio e tiene conto anche delle condizioni meteorologiche, compresa la direzione del vento, attese per ogni tratto di percorso sulla base del giorno e l'ora in cui viene effettuato il trasporto.

INTRODUZIONE

Le problematiche relative al trasporto stradale di sostanze pericolose stanno diventando sempre più attuali, anche per il recente verificarsi di alcuni incidenti, con conseguenze drammatiche, come nel caso dell'incendio sotto il tunnel del Monte Bianco, o più lievi, come nel caso del ribaltamento della autocisterna di GPL nel tratto appenninico dell'Autostrada del Sole, che hanno scosso la pubblica opinione. Per meglio comprendere l'entità del problema basta considerare che nel 1998 in Italia è stato movimentato su strada il 53% circa dei 157 milioni di tonnellate di merci pericolose, valore in cui non sono incluse 80 milioni di tonnellate di rifiuti [1]. Al di là di un'auspicabile aumento della quota di merci pericolose che viaggiano per ferrovia, attualmente ferma al 2% circa del totale [1], è chiaro che ancora per molti anni a venire il trasporto su strada costituirà il mezzo largamente prevalente di movimentazione via terra di questi prodotti. La valutazione del rischio che ciò comporta per la popolazione può essere effettuata utilizzando le tecniche di analisi di rischio, inizialmente sviluppate per gli impianti fissi, anche se l'estensione di queste tecniche a casi di trasporto non è priva di complicazioni, dato che la fonte del rischio si sposta continuamente incontrando situazioni ambientali molto diverse lungo il percorso.

Approcci sviluppati recentemente abbinano le potenzialità dei GIS nella manipolazione delle informazioni di tipo territoriale con quelle di banche dati prodotti contenenti informazioni sugli scenari incidentali e le relative aree di impatto [2], appaiono molto interessanti, sia per la facilità d'uso che per l'accuratezza e la rapidità delle risposte. La quantificazione del rischio attraverso queste tecniche porta solitamente alle misure del rischio individuale e sociale che si prestano a scopi di previsione, per valutare se l'attività di trasporto in questione sia compatibile con standard di sicurezza assegnati, per confrontare tra loro rischi della stessa natura (altra modalità di trasporto) o di natura diversa (per esempio altre attività industriali), come accade negli studi del rischio d'area. Anche se questo approccio si presta al confronto del rischio di itinerari diversi, esso presuppone che tali itinerari siano preventivamente identificati per poi effettuare la valutazione, mentre non consente di individuare immediatamente quale tra tutti i possibili percorsi tra località assegnate presenti il rischio più basso. Peraltro, la scelta del percorso da parte di chi effettua il trasporto si basa solitamente su considerazioni volte a minimizzare i tempi di percorrenza o la spesa complessiva, mentre l'individuazione della pericolosità di un certo percorso non è né agevole né rapida, poiché dipende dalla combinazione di molti parametri, legati sia all'itinerario che alle caratteristiche del prodotto oggetto del trasporto.

Il presente lavoro propone una metodologia per l'individuazione del percorso meno rischioso nel trasporto stradale di prodotti pericolosi che si basa sull'utilizzo di un programma di "routing" commerciale, di un applicativo GIS appositamente predisposto e di una banca dati contenente le necessarie informazioni relative alla pericolosità delle sostanze.

INDICE DI RISCHIO PER IL TRASPORTO STRADALE DI SOSTANZE PERICOLOSE

Per pervenire alla individuazione del percorso meno rischioso per il trasporto di un prodotto pericoloso tra località di origine e destinazione assegnate occorre preliminarmente definire un "indice di rischio" che costituirà la funzione obiettivo da minimizzare. Il rischio in questione è quello che scaturisce dalla pericolosità della sostanza trasportata e che si esplica nel momento in cui essa viene accidentalmente dispersa nell'ambiente.

Questo indice di rischio dovrà tener conto della probabilità che nel corso del viaggio si verifichi un rilascio della sostanza nell'ambiente, degli eventi pericolosi originati da tale rilascio (incendio, esplosione, nube tossica) e delle conseguenze che questi eventi pericolosi potranno avere per la popolazione esposta.

Occorre quindi preliminarmente definire alcuni *scenari incidentali iniziali*, legati alle modalità di fuoriuscita del prodotto pericoloso dal contenitore utilizzato per il trasporto. Gli scenari incidentali iniziali possono originare da varie cause (sfiato da una valvola, rottura del contenitore a seguito di ribaltamento, ecc.) e presentarsi sotto varia forma, dipendentemente dalle dimensioni e dalla posizione dell'apertura da cui fuoriesce il prodotto, dallo stato fisico di quest'ultimo, dalle condizioni di pressione e temperatura a cui viene effettuato il trasporto, e della temperatura ambiente. Occorre poi stimare la probabilità di accadimento di ognuno degli scenari incidentali iniziali considerati, in condizioni di marcia normale o a seguito di incidente. Sia la definizione degli scenari incidentali iniziali che quella delle loro probabilità di accadimento viene generalmente effettuata sulla base di dati di letteratura [3] e dall'analisi statistica di raccolte di dati relativi ad incidenti verificatisi in passato [4-5].

Ogni scenario incidentale iniziale individuato può quindi evolvere in modo più o meno pericoloso, dando origine ad un ventaglio di *eventi incidentali finali*. Le tipologie di questi eventi incidentali finali dipendono dalle caratteristiche di pericolosità della sostanza (infiammabile, tossica), dal quantitativo sversato e dal suo stato fisico al momento della dispersione nell'ambiente (gas, miscela bifasica gas-liquido, ecc.) e dalle condizioni ambientali (temperatura, velocità del vento, presenza di fonti di innesco, tipologia del terreno, ecc.) [6]. Ad esempio, nel caso di liquidi infiammabili gli eventi incidentali finali includeranno il *jet-fire*, in caso di innesco immediato della perdita, l'incendio da pozza (*pool fire*) o l'incendio della nube di vapori che da essa si sviluppa (*flash fire*) in caso di innesco successivo della perdita. Altri eventi incidentali finali possibili sono l'esplosione della nube di vapori (*UVCE: unconfined vapor cloud explosion*), la formazione di una "sfera di fuoco" (*fireball*), fenomenologia tipica dei gas infiammabili liquefatti, l'*esplosione fisica* del contenitore e la formazione di una *nube tossica*. Per ogni prodotto considerato e per ogni scenario incidentale iniziale occorre quindi valutare quale probabilità ci sono che si verifichi ognuno dei possibili eventi incidentali finali: come, per gli scenari incidentali iniziali, basandosi su dati di letteratura [3] e sull'analisi statistica di dati storici [4-5]. Va rimarcato che occorre particolare attenzione per ricavare informazione utili da tali raccolte di dati, in quanto il numero di quelli disponibili per ogni prodotto può essere anche molto modesto, ed essi possono essere riferiti a situazioni molto eterogenee, soprattutto riguardo alle diverse caratteristiche della circolazione stradale nei vari Paesi al passare degli anni.

I vari eventi incidentali finali estrinsecano la propria pericolosità attraverso la generazione di campi di radiazione termica, sovrappressione, concentrazione di sostanze tossiche o lancio di frammenti; in letteratura sono disponibili modelli matematici, detti di analisi delle conseguenze, per valutare gli andamenti nel tempo e nello spazio di tali campi, nonché relazioni che indicano le soglie di letalità per ognuno di essi [6]. L'ampiezza massima della zona entro cui ci si attende che un certo evento incidentale finale possa dar luogo a conseguenze letali per la popolazione esposta prende il nome di *zona di impatto*. L'area di impatto può presentare una forma pressoché circolare, come accade per il pool fire, il fireball, la UVCE o l'esplosione fisica, oppure presentare una direzione preferenziale, casuale, come accade per il jet-fire, o legata alla direzione del vento, come accade per il flash fire e la nube tossica. La Figura 1 mostra una rappresentazione schematica delle aree di impatto, per vari eventi incidentali e per due tipologie di scenari incidentali iniziali.

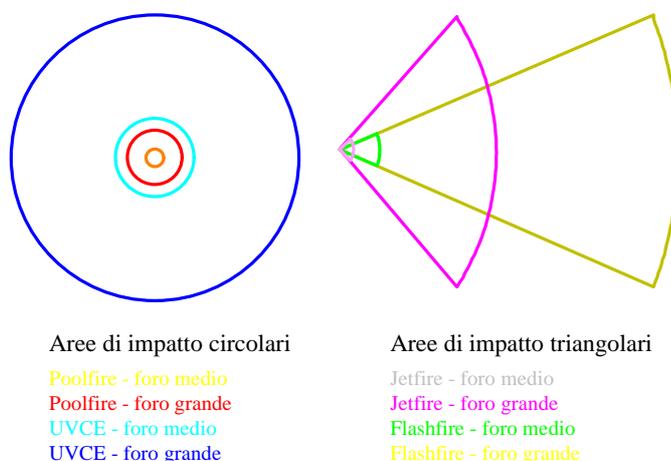


Figura 1: Aree di impatto "circolari" e "triangolari" per vari eventi incidentali finali originati da due diversi scenari incidentali iniziali di rilascio di acetaldeide

L'ampiezza della zona di impatto dipende dalle modalità di dispersione del prodotto nell'ambiente e, quindi, dalle condizioni meteorologiche: particolarmente importanti sono la temperatura, da cui dipende, ad esempio, il tasso di evaporazione del liquido, e la velocità del vento, che influenza la dispersione delle nubi tossiche e infiammabili.

Combinando le frequenze incidentali di ogni punto posto sul percorso con le probabilità che a seguito dell'incidente si verifichino i vari scenari incidentali iniziali e con quelle che ognuno di essi evolva nei possibili eventi incidentali finali si ottiene la frequenza attesa per ognuno di essi in ogni punto del percorso. Per quanto riguarda le conseguenze per la popolazione esposta occorrerà, invece, valutare l'area di impatto per ogni evento incidentale finale e la popolazione che si trova all'interno dell'area di impatto. Poiché non è, ovviamente, possibile reperire i dati necessari per ogni punto lungo il percorso, si farà riferimento ad una suddivisione del percorso in segmenti finiti, la cui lunghezza deve essere la più breve possibile. D'altra parte, anche la distribuzione della popolazione che ricade all'interno della zona di impatto varia con la distanza dalla strada, e dipende dalla direzione secondo cui si misura tale distanza: è quindi opportuno considerare la popolazione residente all'interno di "fasce" di varia ampiezza, misurata a partire dall'asse della strada lungo alcune direzioni (ad esempio 8 sfalsate di 45°).

Le informazioni di incidentalità e popolazione appaiono strettamente legate al tratto stradale considerato, mentre quelle relative alle probabilità degli scenari incidentali iniziali, degli eventi incidentali finali ed alle aree di impatto dipendono principalmente dalle caratteristiche della sostanza trasportata. Infine, le condizioni meteorologiche, che influenzano l'ampiezza dell'area di impatto, ma anche la popolazione a rischio, ove l'evento pericoloso sia influenzato dalla direzione del vento (vedi Figura 2), dipendono sia dalla località in cui ci si trova (ossia dal tratto stradale considerato) sia dall'orario e dal periodo dell'anno in cui si svolge in trasporto.

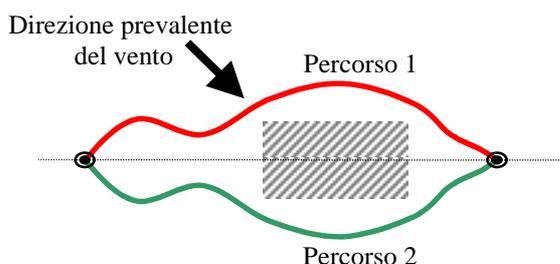


Figura 2: Influenza della direzione del vento sulla popolazione a rischio.

Si può quindi definire per ogni tratto di strada un *indice di rischio* relativo al trasporto stradale di un certo prodotto pericoloso, funzione dell'incidentalità, delle condizioni meteorologiche, della probabilità che si verifichino gli eventi pericolosi finali conseguenti ai possibili scenari incidentali iniziali, e della popolazione che si trova entro l'area di impatto di questi ultimi:

$$IR_i = I_i \cdot L_i \cdot \sum_j [\sum_k (Ef_k \cdot A_k) \cdot DP_j] \quad (1)$$

dove IR_i è l'incidentalità del i -esimo tratto di strada, L_i la sua lunghezza, Ef_k la probabilità che si verifichi il k -esimo evento pericoloso finale, A_k l'area d'impatto di quest'ultimo e DP_j la densità di popolazione entro la j -esima fascia, misurata secondo la direzione di interesse. Sommando tra loro gli indici di rischio relativi ai vari tratti di cui è composto l'itinerario si perviene all'indice di rischio globale del percorso: esso è rappresentativo sia del numero delle persone esposte al rischio che della probabilità che esse subiscano le conseguenze di detto rischio.

Per valutare l'indice di rischio sopra definito occorre, tuttavia, che per ogni tratto di strada che costituisce il percorso siano note l'incidentalità e la popolazione residente all'interno delle fasce poste a varia distanza dalla strada lungo le diverse direzioni, le condizioni meteorologiche (incluse la direzione del vento) prevalenti nell'orario e nel periodo dell'anno in cui si effettua il trasporto, le probabilità degli scenari incidentali iniziali e degli eventi incidentali finali per il prodotto trasportato e l'ampiezza dell'area di impatto di questi ultimi, valutate con riferimento alle condizioni meteorologiche sopra definite.

VALUTAZIONE DELL'INDICE DI RISCHIO

Appare subito evidente che il reperimento dei dati e l'esecuzione dei calcoli necessari alla valutazione dell'indice di rischio da associare ai vari tratti stradali rappresenta un onere insostenibile; poiché, d'altra parte, ogni eventuale semplificazione apportata implica una riduzione dell'accuratezza occorre trovare un

opportuno bilanciamento tra queste opposte esigenze. A tal fine si è preliminarmente pensato di manipolare separatamente le variabili legate al percorso, quali ad esempio l'incidentalità e la popolazione, e quelle relative al prodotto, quali le probabilità degli scenari incidentali iniziali e degli eventi pericolosi finali e la determinazione delle aree di impatto. Tuttavia, anche utilizzando questa schematizzazione, rimangono da considerare le condizioni meteorologiche, che sono funzioni sia di parametri esterni relativi al caso in esame, quali l'ora ed il periodo dell'anno in cui si effettua il trasporto, sia della posizione del mezzo lungo il percorso; d'altra parte, esse influenzano anche l'area di impatto degli eventi pericolosi finali. Per ovviare a questo problema si sono preliminarmente individuate alcune condizioni meteorologiche di riferimento e si è proceduto a valutare le corrispondenti aree di impatto per i vari eventi pericolosi finali; quindi sono state valutate le condizioni meteorologiche dei singoli tratti di strada, nei vari periodi dell'anno ed orari della giornata, assimilando infine ognuna di esse alla condizione meteorologica di riferimento più vicina.

Database dei prodotti trasportati

La banca dati contenente le informazioni necessarie relativamente ai prodotti trasportati è stata predisposta in precedenza [7] come supporto ad un programma di valutazione del rischio individuale e sociale nel trasporto stradale e ferroviario di sostanze pericolose. Al momento essa comprende una trentina di sostanze infiammabili e/o tossiche, scelte tra quelle più diffuse e maggiormente oggetto di trasporto. Per ogni prodotto presente nella banca dati sono disponibili le seguenti informazioni:

- probabilità che, a seguito di incidente, si verifichino 2 scenari incidentali iniziali di riferimento (grave e catastrofico), derivate dall'analisi statistica di dati di letteratura e storici [3-5];
- le probabilità che gli scenari incidentali iniziali evolvano in ognuno dei possibili eventi incidentali finali (jet fire, pool fire, flash fire, fireball, UVCE, nube tossica, esplosione fisica), anch'esse derivate dall'analisi statistica di dati di letteratura e storici [3-5];
- i valori della distanza e dell'eventuale angolo caratteristico atti a definire l'area di impatto per ognuno degli eventi incidentali finali di cui sopra, calcolati in corrispondenza di 6 condizioni meteorologiche di riferimento.

Le condizioni meteorologiche di riferimento sono state individuate basandosi sui dati meteorologici medi stagionali misurati in tutte le principali stazioni di rilevamento situate in Italia [8]. Tali dati sono stati analizzati ed accorpati pervenendo alla definizione di tre valori di temperatura media e due valori di velocità del vento, come mostra la Tabella 1. Per la stabilità atmosferica è stata assunta la classe D di Pasquill D (atmosfera neutra) in quanto rappresentativa di condizioni conservative, ma al tempo stesso, non eccessivamente penalizzanti.

Tabella 1: Condizioni meteorologiche di riferimento utilizzate nella valutazione dell'area di impatto

Condizione meteorologica di riferimento	DF	FF	DM	FM	DC	FC
Temperatura (°C)	5	5	14	14	26	26
Velocità del vento (m/s)	3	6	3	6	3	6

La valutazione dell'area di impatto per ogni evento pericoloso finale derivante da ogni scenario incidentale finale e per ogni condizione meteorologica di riferimento è stata effettuata utilizzando un software commerciale per la valutazione delle conseguenze [9] che consente di stimare i campi di radiazione termica, sovrappressione e concentrazione di prodotto tossico simulando l'evoluzione dello scenario incidentale a partire dal rilascio del prodotto nell'ambiente. Dal confronto dei valori assunti dalle variabili di interesse nel tempo e nello spazio con opportune soglie di letalità, si è quindi valutata l'area di impatto per ogni evento pericoloso e condizione meteorologica di riferimento.

Dati territoriali

Le informazioni territoriali necessarie all'analisi sono state reperite e quindi manipolate mediante un software GIS (ArcView 3.1). I dati utilizzati sono raggruppati secondo tre tematismi principali, relativi alle strade, alla popolazione residente ed alla meteorologia.

Per quanto riguarda la rappresentazione delle strade si è utilizzato un prodotto commerciale (RoadNet Connect di TeleAtlas) che costituisce, al momento la copertura più accurata disponibile, comprendendo, nella versione da noi utilizzata, tutte le strade di collegamento extra urbane e parte di quelle urbane. Le strade sono segmentate in tratte, a volte lunghe solo pochi metri, in modo da seguire in dettaglio il loro percorso, anche se tortuoso, ed identificarne tutti gli elementi, compresi, ad esempio, gli svincoli. Per ogni strada è

disponibile la denominazione corrente, quella ufficiale (ad esempio: Aurelia, SS1) ed una serie di campi che ne specificano l'importanza, correlata al flusso di traffico ed alle zone collegate, e la tipologia.

Per quanto riguarda la popolazione sono stati utilizzati i dati ISTAT [10] rilevati nel censimento del 1991 relativi alle singole località abitate. La copertura è suddivisa per provincia e le 71274 località abitate sono rappresentate da poligoni, ciascuno con il numero di abitanti, l'altitudine ed una serie di codici ISTAT. I dati sono relativi alla proiezione UTM32 per le regioni dell'Italia orientale, e la UTM33 per le restanti: è stato quindi necessario effettuare il passaggio di coordinate da un fuso UTM all'altro in modo da riunire tutte le provincie in un'unica copertura.

Per quanto riguarda la meteorologia si è fatto riferimento ai dati forniti dalle stazioni meteorologiche dell'Aeronautica Militare Italiana. Per ogni stazione sono stati riportate le seguenti informazioni:

- codice, nominativo stazione, localizzazione geografica;
- velocità media del vento (m/s) per ogni mese;
- temperature minime medie per ogni mese;
- temperature massime medie per ogni mese;
- frequenza media annua del vento in otto direzioni.

A partire da queste coperture si è quindi predisposto un applicativo GIS in modo da accoppiare ad ogni segmento di strada i valori di incidentalità, di densità di popolazione nelle varie fasce e direzioni di interesse, e le condizioni meteorologiche di riferimento nei vari periodi dell'anno ed orari della giornata in modo da pervenire alla valutazione dell'indice di rischio. Tale applicativo è stato per ora predisposto limitatamente alla regione Lazio, ma verrà esteso a tutto il territorio nazionale.

Predisposizione dell'applicativo

Preliminarmente sono stati estratti dal grafo Teleatlas i 42243 record relativi alle strade del Lazio e, per consentire la sovrapposizione con la copertura ISTAT, i dati sono stati riproiettati in UTM33, mantenendo la suddivisione stradale già presente. A partire dalla copertura meteorologica si è poi predisposto un tema puntuale relativo alle stazioni meteorologiche e un tema lineare, creato manualmente, che fornisce la posizione dello spartiacque appenninico. Si sono infine selezionate dai dati ISTAT le provincie del Lazio e quelle di Toscana, Umbria, Marche, Abruzzo, Molise e Campania confinanti con il Lazio. Poiché, per i prodotti presenti nella banca dati, le aree di impatto degli eventi pericolosi finali si estendono al massimo di una decina di chilometri, sono state considerate, oltre a tutte le località del Lazio, quelle nelle regioni limitrofe che cadono entro una fascia di 30 km dal confine.

L'insieme delle coperture utilizzate è rappresentato in Figura 3.

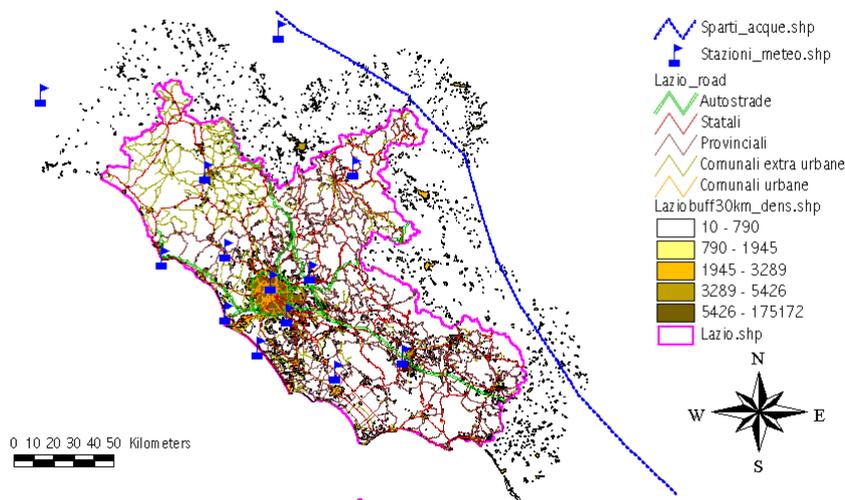


Figura 3: Insieme delle coperture utilizzate

Si è quindi proceduto ad abbinare ad ogni tratto di strada le condizioni meteorologiche. Inizialmente si sono considerate 36 situazioni annuali (tre per ogni mese) rappresentative delle ore più calde, più fredde e di quelle intermedie della giornata. A tal fine ci si è basati sulle informazioni meteorologiche delle singole stazioni, pesate sulla base del quadrato della distanza tra la stazione meteorologica ed il tratto di strada considerato, trascurando quelle che si trovano nell'altro versante appenninico. In tal modo si sono ottenuti valori di velocità media mensile del vento e di temperatura massima, minima e media mensile. Confrontando

questi valori con quelli delle sei condizioni meteorologiche di riferimento si seleziona quella più vicina ad ognuna delle 36 situazioni annuali considerate e si memorizzano nella tabella associata alla strada. In questa tabella sono pure memorizzati i valori della frequenza del vento nelle 8 direzioni principali individuate dalla rosa dei venti, determinate come media annuale.

Successivamente, si è notato come la variazione delle condizioni meteorologiche abbia effetti piuttosto modesti sulla selezione del percorso a minor rischio, che è maggiormente influenzata da altri parametri, quali la pericolosità della sostanza, l'incidentalità e la popolazione. Constatato che aver considerato un dettaglio mensile per le condizioni meteorologiche comportava un notevole appesantimento dei calcoli senza benefici sostanziali in termini di accuratezza si è passati a considerare la meteorologia su base stagionale, sempre mantenendo tre diverse condizioni nell'arco della giornata: in tal modo le situazioni annuali prese in esame si riducono a 12, con un notevole snellimento delle tabelle relative.

I dati di incidentalità stradale, espressi in numero di incidenti per veicolo e per km, non sono attualmente disponibili. Tale informazione si può ottenere analizzando i dati di incidentalità, espressi come numero di incidenti per km e per anno, ed i flussi veicolari: i primi sono noti per le strade statali e le autostrade [11], i secondi, al momento, solo per tratte autostradali. Non potendo procedere con lo stesso dettaglio per tutte le strade, i dati di incidentalità media sono stati ricavati da dati ACI [12] accorpati in base alla tipologia di strada: autostrada, statale, provinciale, comunale extra urbana ed urbana, definendo queste ultime come quelle che attraversano centri abitati con alta densità abitativa.

Per quanto riguarda la valutazione popolazione a rischio occorre preliminarmente definire l'ampiezza delle fasce ed il numero delle direzioni di interesse lungo cui effettuare le stime. Per motivi di praticità si è stabilito di non legare l'ampiezza delle fasce al particolare prodotto oggetto del trasporto, ma di mantenere fissa l'ampiezza delle fasce stesse per tutti i prodotti. Sono state quindi analizzati i valori della massima estensione raggiunta dalle aree di impatto per tutti gli eventi pericolosi finali presenti nella banca dati sostanze ed è stato stabilito di utilizzare 10 fasce poste a distanza variabile tra 40 m e 20 km dalla strada.

Nel successivo utilizzo del programma si è però constatato che era utile un maggior grado di dettaglio nella definizione della popolazione, poiché questa variabile influenza considerevolmente la scelta del percorso più sicuro. Si è quindi aumentato il numero della fasce a 14, fissandone la distanza dalla strada come indicato in Tabella 2.

Tabella 2: Valori dell'ampiezza delle fasce utilizzate per valutare la popolazione a rischio

Fascia	Distanza dalla strada (m)	Fascia	Distanza dalla strada (m)
1	50	8	800
2	70	9	1200
3	100	10	2000
4	140	11	3000
5	200	12	5000
6	300	13	10000
7	500	14	20000

L'ampiezza delle fasce va aumentando all'aumentare della distanza dalla strada in modo da consentire un maggior dettaglio per i numerosi eventi pericolosi (legati soprattutto all'infiammabilità dei vari prodotti) le cui conseguenze non si estendono a grandi distanze dal luogo del rilascio. L'ampiezza della fascia massima (20 km) eccede di parecchio la massima distanza raggiunta dall'area di impatto di tutti gli eventi pericolosi attualmente presenti nella banca dati.

Va inoltre tenuto conto che esistono eventi pericolosi finali la cui area di impatto presenta una forma pressoché circolare (pool fire, fireball, UVCE ed esplosione fisica), oppure una direzione preferenziale (jet-fire, flash fire e nube tossica): per questa ragione si sono considerate fasce di forma differente, circolare, e "triangolare". In particolare, per queste ultime si sono considerati 8 settori circolari con il vertice nel punto di rilascio e sfalsati di 45°, orientati nelle 8 direzioni principali della rosa dei venti. Ciò ha consentito di valutare anche l'influenza della probabilità che il vento spiri in una certa direzione per quegli eventi, come il flash fire e la nube tossica, influenzati da questa variabile.

Il calcolo della densità di popolazione entro ogni fascia circolare è stato fatto tenendo conto della densità dei poligoni della copertura ISTAT intersecati dalla fascia, della porzione di area in comune tra poligono e fascia e dell'area totale della fascia (vedi Figura 4). Per le 8 fasce "triangolari" si ripete la procedura per ognuno dei settori circolari e si sommano i valori trovati moltiplicando ognuno di essi per la frequenza del vento associata alla direzione considerata.

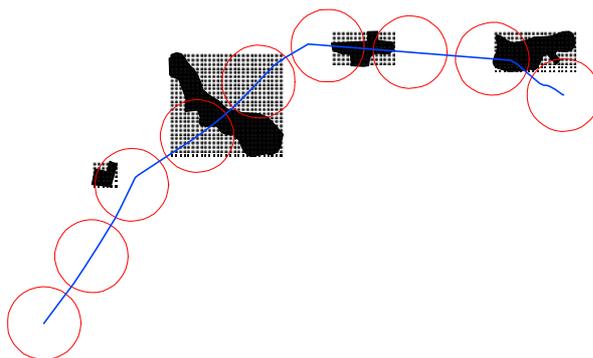


Figura 4: Determinazione della densità di popolazione all'interno di una fascia

Questi valori di densità di popolazione, relativi ad ognuna delle 14 fasce considerate, sono stati quindi calcolati per ognuno dei 42243 segmenti in cui sono suddivise le strade del Lazio: l'esecuzione ha richiesto tempi di calcoli molto lunghi, sia per la mole dei dati da trattare, sia per limitazioni intrinseche del linguaggio di programmazione disponibile nel GIS (Avenue).

Sulla base delle informazioni contenute nella banca dati relativa ai prodotti trasportati sono state create delle tabelle dove, per ogni sostanza, sono riportati i seguenti dati:

- probabilità dei singoli eventi incidentali finali, tenuto conto di quelle degli scenari incidentali iniziali che li generano;
- aree di impatto dei singoli eventi incidentali finali;
- aree di impatto accorpate per tipo di scenario (circolare/triangolare) e fascia di distanza entro cui ricadono.

A questo punto è stata creata per ogni prodotto una tabella che contiene, per ogni tratto di strada il valore del prodotto tra area di impatto e densità di popolazione nella fascia di competenza, per ciascuno dei 12 periodi dell'anno presi in considerazione. Moltiplicando questi valori per la lunghezza e l'incidentalità del tratto di strada in esame si ottengono i 12 valori dell'indice di rischio per quella sostanza e per quel tratto di strada nei vari orari della giornata e periodi dell'anno, che sono memorizzati in una tabella.

Calcolo del percorso meno rischioso

Per individuare il percorso meno rischioso tra due o più punti assegnati si è utilizzata un'estensione del software ArcView denominata Network Analyst. Questo programma può essere applicato alla copertura che rappresenta la rete stradale: esso crea un grafo e calcola il percorso che minimizza la sommatoria dei valori di determinati campi. Solitamente questi campi rappresentano la lunghezza della strada, il tempo di percorrenza (calcolato considerando una velocità media per ogni tipologia di strada), il consumo di carburante, ecc. Applicando questo programma è possibile trovare il percorso tra due o più punti che minimizzi la funzione obiettivo prescelta, come pure ricercare da quale, tra una serie di punti assegnati, sia più rapido, o più agevole, raggiungerne un altro, ecc., e visualizzare sulla mappa i percorsi calcolati.

Preliminarmente si è trasformata la copertura stradale del Lazio in un formato utilizzabile con il Network Analyst ed è stato creato un campo in cui viene calcolato il tempo di percorrenza della strada, sulla base di valori di riferimento delle velocità medie dei mezzi che trasportano merci pericolose, riportati in Tabella 3.

Tabella 3: Velocità medie considerate per i mezzi che trasportano merci pericolose su vari tipi di strade

Tipo di strada	Velocità media (km/h)
Autostrada	90
Statale	70
Provinciale	60
Comunale extra urbana	40
Comunale urbana	30

Una volta eseguite queste operazioni il programma consente di trovare immediatamente sia il percorso più breve che quello più veloce tra punti assegnati. Per determinare il percorso meno rischioso occorre invece preliminarmente selezionare il prodotto trasportato, quindi la stagione ed il periodo del giorno in cui si vuole

effettuare il trasporto: su questa base viene selezionata la tabella dell'indice di rischio stradale relativa alla sostanza trasportata ed il campo relativo alla condizione meteorologica da considerare nella minimizzazione

Il programma per la valutazione del percorso meno rischioso nel trasporto stradale di sostanze pericolose, denominato RouTrHaz, è di utilizzazione assai semplice. Il primo passo è rappresentato dalla selezione del punto di partenza e del punto (o dei punti) di destinazione. Quindi si attiva la procedura appena descritta e si effettua la scelta della sostanza trasportata, del mese e del periodo del giorno in cui si effettua il trasporto (vedi Figura 5).

APPLICAZIONI DI ROUHAZ

Individuazione del percorso meno rischioso tra località assegnate

Il primo caso esaminato è quello relativo al trasporto di alcune sostanze pericolose infiammabili e/o tossiche di varia pericolosità lungo un ipotetico breve percorso tra una località a sud di Roma ed una a nord-ovest di Viterbo. I prodotti presi in esame sono: cloruro di vinile, acido cianidrico, acido fluoridrico, acetaldeide, ossido di etilene. La Figura 6 confronta il percorso più breve, quello più veloce e quello più sicuro per i cinque prodotti in esame: si nota che per nessuno di essi il percorso più sicuro coincide con quello più veloce o più breve.

I percorsi più sicuri per il trasporto dei cinque prodotti sono, inoltre, piuttosto diversi tra loro: tutti i percorsi meno rischiosi evitano l'attraversamento della città di Roma e sono più lunghi, anche di molto, rispetto a quelli diretti. Particolarmente tortuosi risultano quelli per l'acetaldeide e l'ossido di etilene, prodotti certamente pericolosi, ma con area di impatto meno estesa rispetto agli altri oggetto dell'indagine. Ripetendo per vari percorsi, vari prodotti e diversi periodi dell'anno il confronto tra percorsi più brevi, più veloci e meno rischiosi, si sono tratte alcune considerazioni generali:

- il percorso meno rischioso non coincide quasi mai con quello più breve o con quello più veloce;
- il percorso meno rischioso non è univoco ma dipende dalle caratteristiche del prodotto trasportato, con variazioni anche notevoli tra una sostanza ed un'altra;
- il percorso meno rischioso per un certo prodotto generalmente non cambia al variare del periodo dell'anno o del giorno in cui si effettua il trasporto.

Va rimarcato che, al contrario di quanto suggerito dall'intuizione, all'aumentare della pericolosità del prodotto il percorso meno rischioso risulta più vicino a quello più breve. Ciò è dovuto al fatto che gli eventi pericolosi raggiungono distanze maggiori, per cui l'area di impatto raggiunge comunque qualche località densamente abitata ed a poco giova allungare il percorso in modo da limitare l'attraversamento dei centri abitati principali. Questa opzione risulta invece conveniente per i prodotti meno pericolosi, per i quali l'area di impatto si mantiene nelle immediate vicinanze della strada.

RouTrHaz può anche valutare il percorso meno rischioso tra un punto di partenza assegnato ed un certo numero di destinazioni: la Figura 7 mostra i risultati ottenuti per un ipotetico percorso di un'autocisterna di una ditta fornitrice di carburanti e combustibili ai propri clienti nella zona di Frosinone. Anche in questo caso si sono considerati più prodotti (GPL e benzina) ed i percorsi ottenuti sono diversi tra i due prodotti.

Un'altra utile opzione prevista dal programma è la possibilità di valutare l'indice di rischio "locale" relativo ai vari tratti del percorso: ciò consente immediatamente di individuare i punti "critici", ossia quelli per i quali la combinazione di incidentalità e densità di popolazione nell'area di impatto risulta particolarmente penalizzante.

Gestione delle emergenze nel trasporto stradale di sostanze pericolose

L'utilizzo del GIS e la disponibilità delle zone di impatto per i vari eventi pericolosi in cui possono sfociare incidenti nel trasporto di sostanze pericolose consentono, peraltro, anche di utilizzare le informazioni disponibili in modo diverso, ad esempio visualizzando le aree di impatto direttamente sul luogo dove è avvenuto un incidente.

Una volta identificato il luogo dell'incidente sulla mappa, e selezionata la sostanza ed il periodo della giornata e dell'anno in modo analogo a quanto mostrato in Figura 5, occorre scegliere lo scenario incidentale iniziale e fissare la direzione di provenienza del vento: le aree di impatto relative ai vari eventi pericolosi che possono scaturire dallo scenario incidentale prescelto sono immediatamente visualizzati sulla mappa (vedi Figura 8).

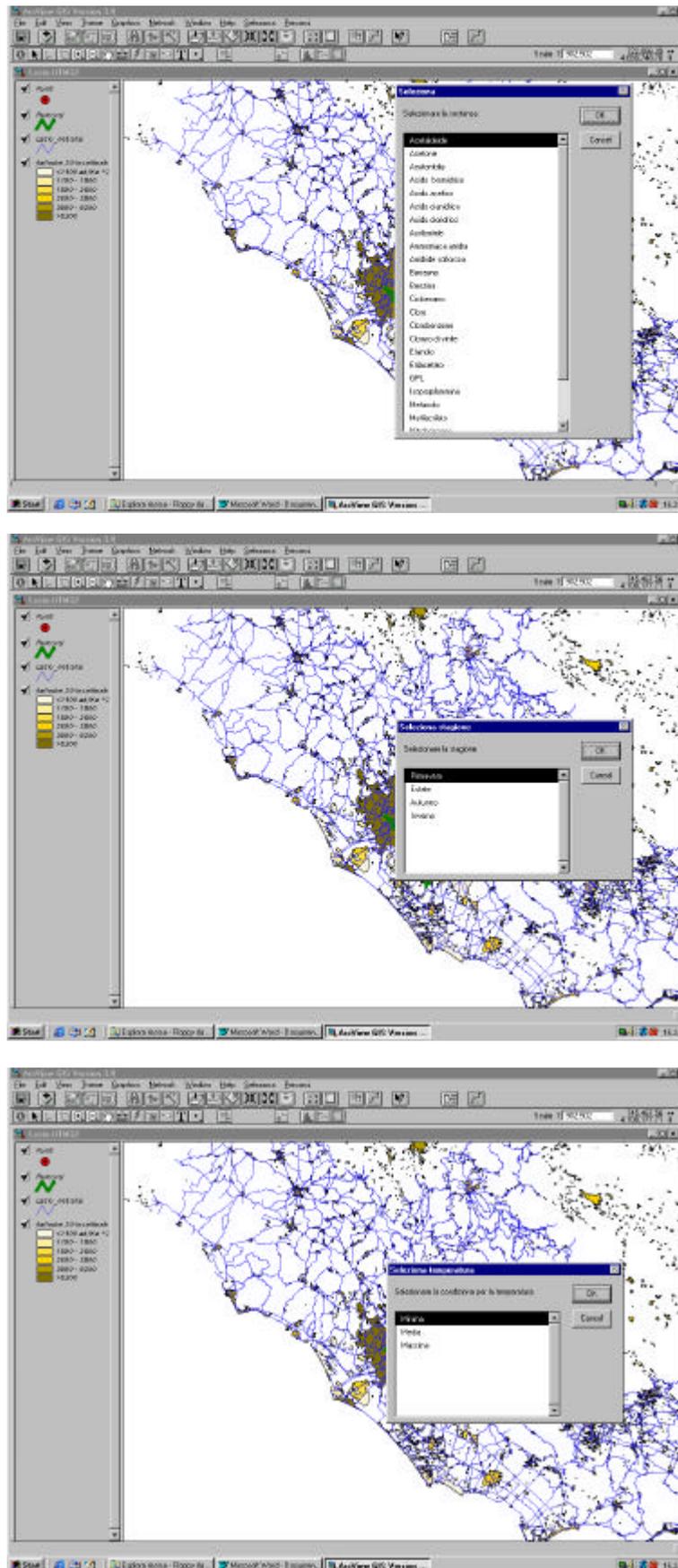


Figura 5: Scelta del prodotto trasportato e del periodo in cui si effettua il trasporto

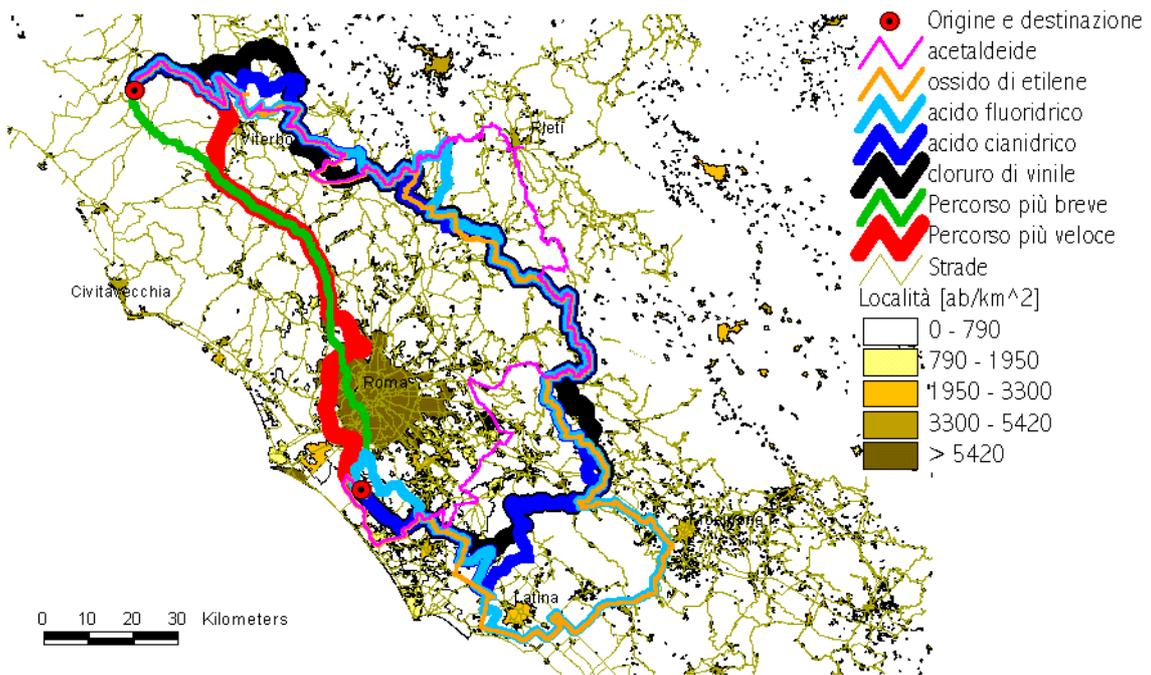


Figura 6: Percorso più breve, più veloce e meno rischioso per alcune sostanze pericolose

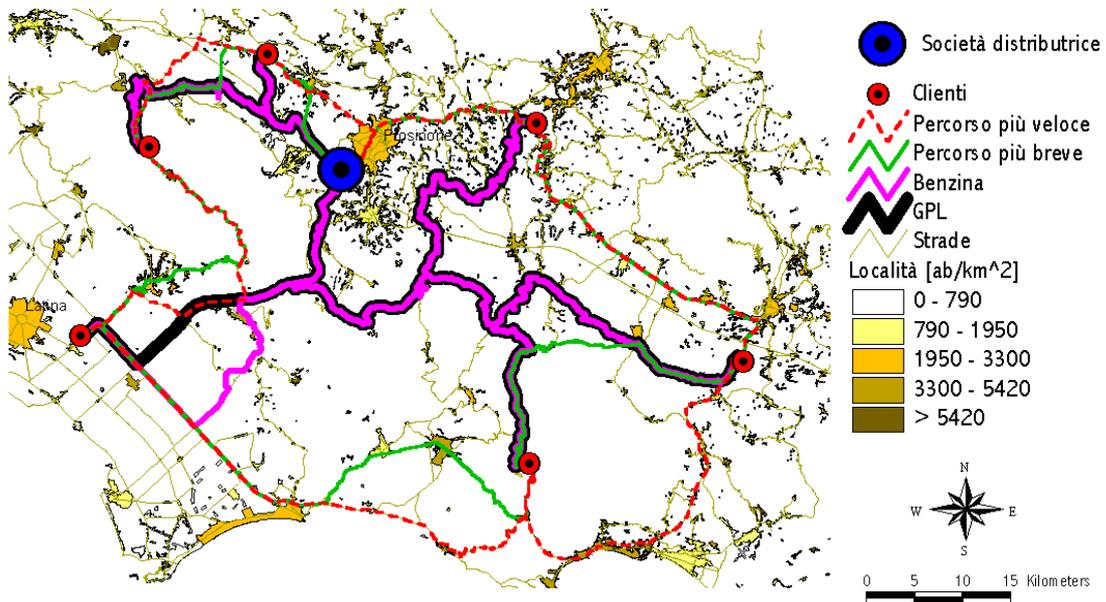


Figura 7: Percorsi più breve, più veloce e meno rischioso per la distribuzione di benzina e GPL

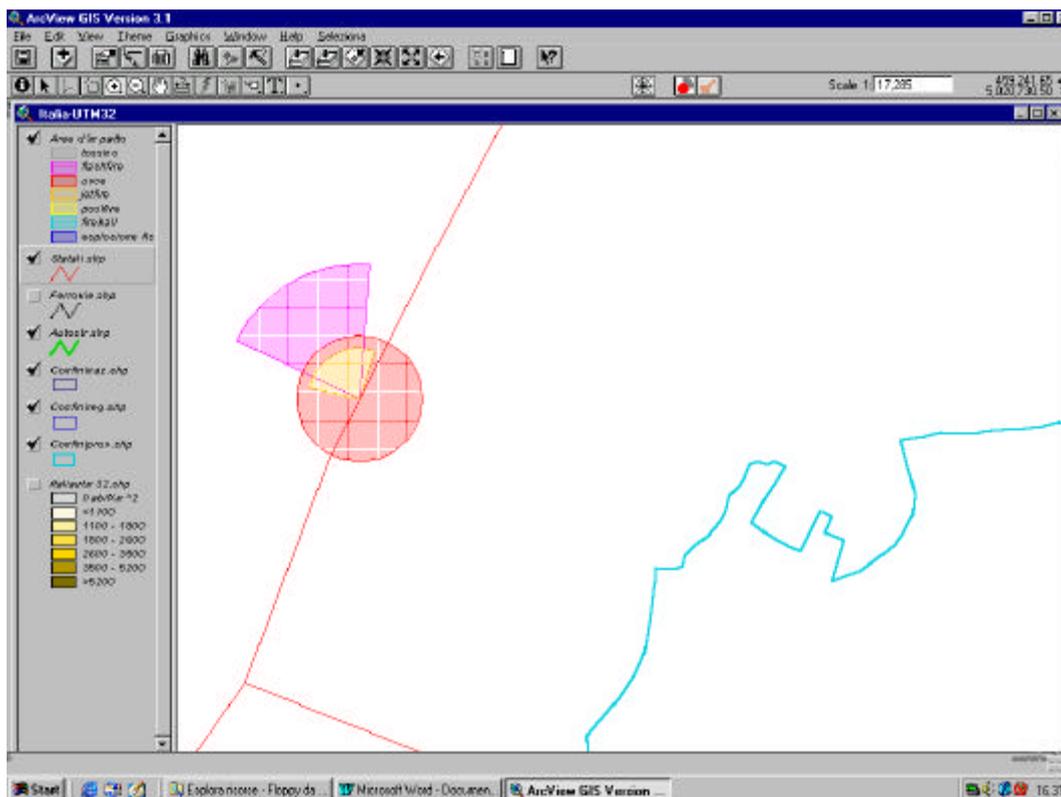


Figura 8: Visualizzazione dell'area di impatto degli eventi pericolosi conseguenti un rilascio di GPL

Ciò consente di identificare zone da evacuare, vie di accesso, strade da bloccare, ecc. Inoltre, sfruttando la capacità del programma di trovare la via più breve o più veloce tra più punti, è possibile anche identificare la caserma dei vigili del fuoco o il presidio sanitario più vicino, posto che la localizzazione di questi servizi di emergenza sia presente nella copertura utilizzata.

Sempre nell'ambito della gestione delle emergenze, l'utilizzo di RouTrHaz in una centrale operativa in contatto con i mezzi che trasportano merci pericolosi, localizzati mediante GPS, può consentire di indirizzare il mezzo, in tempo reale, lungo percorsi alternativi a basso rischio, in caso di ostacolo alla circolazione o di incidente ad altro mezzo adibito al trasporto di merci pericolose lungo il percorso inizialmente preventivato.

CONCLUSIONI

La metodologia messa a punto consente di individuare in modo semplice e rapido il percorso a minor rischio per il trasporto stradale di sostanze pericolose: essa può essere agevolmente estesa ad altre zone territoriali, tipologie di trasporto e sostanze trasportate posto che siano disponibili i dati necessari. Il percorso più sicuro risulta molto spesso più lungo e meno rapido, e quindi meno economico, di quello diretto: poiché ciò può comportare evidenti difficoltà dal punto di vista pratico, si intende modificare il programma in modo da includere anche questi parametri al fine di fornire indicazioni non solo corrette da un punto di vista teorico, ma anche applicabili realisticamente.

Le applicazioni vanno dalla pianificazione dei trasporti, alla predisposizione in tempo reale di percorsi variabili su base giornaliera, alla gestione di emergenze più o meno gravi. Infatti, utilizzando il software in una centrale operativa si possono individuare immediatamente le zone a rischio in caso di incidente di cui eventualmente effettuare l'evacuazione, attivare le forze di emergenza più vicine al luogo dell'incidente o in grado di raggiungerlo più agevolmente, identificare le strade da bloccare, ecc. Inoltre, localizzando mediante tecnologia GPS il mezzo che trasporta merci pericolose, è possibile deviarne il percorso secondo l'itinerario a minor rischio, in caso di ostacoli alla circolazione sul percorso originario.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il Dipartimento della Protezione Civile ed il C.N.R. Gruppo Nazionale Difesa Rischi Chimico-Industriali ed Ecologici per il supporto finanziario fornito ad alcune fasi di questo lavoro, ed il

progetto H.E.L.I.O.S. e, in particolare l'ing. A. Fiduccia, per la disponibilità ed il supporto fornito nell'utilizzazione del programma ArcView Network Analyst.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A.Cienciulli, Italia isolata in Europa per trasporti a rischio, il lunedì di Repubblica, p.41, 3 aprile 2000
- [2] R.Bubbico, M.Conforti, B.Mazzarotta, TrHazGis: metodologia GIS di analisi di rischio per il trasporto stradale di sostanze pericolose, Convegno VGR2000, Pisa 2-26 ottobre 2000.
- [3] CCPS, Guidelines for chemical transportation risk analysis, New York, AIChE, (1995).
- [4] Banca Dati Incidenti VV. F., Roma, (1993).
- [5] OSH-ROM, HSELINE, C15DOL, MHIDAS, NIOSHTIC, London, Silver Platter (1998).
- [6] CCPS, Guidelines for chemical process quantitative risk analysis, New York, AIChE, (1989).
- [7] R. Bubbico, S. Di Cave and B. Mazzarotta, TrHaz: a quantified risk assessment tool for road transport of dangerous goods in Italy, Proceeding SRA 1998 Annual Conference "Risk analysis: opening the process", vol. 2, pp.665-676, (1998).
- [8] ISTAT, Statistiche meteorologiche anni 1984-1991, Ann. n.25. Roma (1994).
- [9] Safer System LLC, TRACE 8.b User Guide. Westlake Village (1998).
- [10] ISTAT, 13° Censimento generale della popolazione e delle abitazioni, Roma (1992).
- [11] ACI-ISTAT, Atti 52° Conf. del traffico e della circolazione, Stresa (1996).
- [12] ACI, Analisi dell'incidentalità stradale a livello nazionale e regionale, provinciale e nei comuni con oltre 250.000 abitanti, Roma (1997).