

UN GIS PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO PER IL TRASPORTO STRADALE DI MERCI PERICOLOSE E PER L'INDIVIDUAZIONE DEGLI INTERVENTI DI PREVENZIONE E MITIGAZIONE

Dott. Ing. Filippo Colombrita – Dottore di ricerca in ingegneria delle infrastrutture viarie – via Balduino, 43 – 95128 Catania – e-mail: filippo@colombrita.it

Dott. Ing. Angelo Sgroi – Dipartimento dei VV F. del Soccorso Pubblico e della Difesa Civile – Comando Provinciale Catania – via C. Beccaria, 31 – 95100 Catania

SOMMARIO

I notevoli passi avanti compiuti dalla società in campo industriale e tecnologico hanno prodotto, oltre a evidenti benefici, anche rilevanti problemi ambientali e crescenti pericoli per la popolazione.

Uno dei maggiori rischi legati a tale sviluppo è rappresentato dai processi di produzione, distribuzione e stoccaggio di particolari materie prime, prodotti di prima lavorazione, prodotti finiti e risulze, che, in caso di dispersione accidentale, possono causare gravi danni all'uomo e all'ambiente.

Eventi catastrofici come quello di Seveso nel 1976 o di Chernobyl nel 1986, le cui conseguenze sono tuttora davvero incalcolabili, così come le responsabilità umane, hanno sensibilizzato notevolmente l'opinione pubblica e ciò ha comportato l'introduzione in quasi tutti i Paesi industrializzati di numerosi provvedimenti e restrizioni atti a garantire esigue possibilità di accadimento di simili tragedie.

Purtroppo in quasi tutti i casi l'attenzione è stata incentrata quasi esclusivamente sul rischio legato agli stabilimenti industriali, mentre è stato trascurato quasi del tutto il rischio del trasporto di merci pericolose (hazmat). In tal senso a poco sono serviti dati eloquenti, raccolti ed elaborati negli anni ottanta e novanta da studiosi del settore, che mostrano percentuali intorno al 40% di incidenti legati alla movimentazione di sostanze pericolose rispetto alla totalità degli eventi.

Lo studio del rischio, inteso come prodotto tra la probabilità che si verifichi l'evento sfavorevole e la gravità delle sue conseguenze, assume una notevole importanza nell'ambito del trasporto di merci pericolose per la determinazione dei percorsi meno pericolosi e per la scelta dei sistemi di prevenzione degli incidenti e mitigazione delle conseguenze.

Nel presente lavoro viene presentato ed implementato in un sistema informativo territoriale (Geographic Information System, GIS) un modello di caratterizzazione e valutazione del rischio, da porre alla base di un sistema di supporto alle decisioni (DSS), che consente di pianificare adeguatamente il trasporto stradale di merci pericolose, individuando i percorsi di minore rischio e i tratti in cui intervenire con opere di prevenzione o mitigazione.

Il modello proposto è stato sviluppato utilizzando sia relazioni sperimentali per la valutazione della probabilità di incidente e di rilascio di sostanze pericolose che particolari tecniche informatiche basate sull'utilizzo dei GIS per la determinazione delle conseguenze dell'evento sull'uomo e sull'ambiente.

La complessità dei modelli, la quantità e tipologia dei dati da elaborare ha determinato la necessità di elaborare un software specifico per la gestione del problema nei suoi diversi aspetti, al variare della sostanza pericolosa analizzata e del tipo di evento che può scaturire dal rilascio accidentale della sostanza (incendio, esplosione, dispersione atmosferica di gas, filtrazione o percolamento di liquidi nel terreno o in corsi d'acqua).

L'applicazione a casi concreti di viabilità extraurbana siciliana ha consentito di mettere in evidenza le potenzialità del software.

1. L'IMPORTANZA DEL PROBLEMA

Dall'analisi delle statistiche sui flussi di traffico condotte annualmente dall'ISTAT [1] emerge come in Italia una quota non trascurabile (15-20%) e sempre crescente dell'intero movimento merceologico su strada sia costituita da particolari materie prime, prodotti di prima lavorazione, prodotti finiti e risulze, che, se rilasciati a seguito di un incidente o di un difetto di imballaggio, possono causare gravi danni sia all'uomo che all'ambiente [1].

Il nostro Paese occupa inoltre il secondo posto in Europa in termini di distanze coperte dai veicoli trasportanti sostanze pericolose [2, 3].

A testimonianza della pericolosità del trasporto di hazmat occorre ricordare che, anche nel settore del trasporto, possono accadere eventi di proporzioni catastrofiche, come quelli già verificatisi, ad esempio, nell'accampamento di San Carlos in Spagna, nel 1978, in cui morirono più di 200 persone per un'esplosione causata dal rilascio di 22 tonnellate di propilene, a Mississagua nell'Ontario in Canada, nel 1979, in cui 217.000 persone dovettero migrare a seguito di un ingente rilascio di propano, toluolo, stirolo e cloro, o al recente disastro del Tauerntunnel in Austria (1999) in cui il bilancio finale scaturito dal tamponamento di

un'autovettura con un camion che trasportava vernici è stato di 2 morti, 50 feriti e un'importante galleria resa a lungo inutilizzabile.

Per cercare di quantificare il potenziale di questo problema sono state avviate varie ricerche a livello internazionale [4, 5, 6] che sono sfociate nello sviluppo di modelli basati su una metodologia da seguire per l'accertamento del livello di rischio, per la scelta dei sistemi di prevenzione, per la stima delle conseguenze e per la determinazione dei percorsi meno pericolosi per i mezzi di trasporto.

In realtà però, in Europa e in Italia, i diversi studi di ricerca compiuti sull'argomento, basati sulla valutazione probabilistica del rischio, e le soluzioni proposte sono stati raramente messi in atto ed applicati dagli enti preposti, anche a seguito della carenza di leggi specifiche, facendo sì che ancora oggi il trasporto su strada di merci pericolose continui ad essere regolato secondo un approccio deterministico.

Bisogna però riconoscere che i notevoli cambiamenti legislativi in materia nell'ultimo decennio (D.M. 30 dicembre 1992, n. 571, in recepimento della Direttiva CEE n. 89/684 [7], il Nuovo Codice della Strada del 1992 [8], la nuova stesura dell'A.D.R. [9], datata 1 gennaio 1997, il D.Lgs. 4 febbraio 2000, n. 40, in recepimento della Direttiva CE n. 96/35 relativa alla designazione e alla qualificazione professionale dei consulenti per la sicurezza dei trasporti su strada, per ferrovia o per via navigabile di merci pericolose [10]) rappresentano dei segnali evidenti della crescita di interesse verso il problema da parte degli organi decisori.

2. CARATTERIZZAZIONE DEL RISCHIO DEL TRASPORTO DI HAZMAT

Il rischio del trasporto di merci pericolose si può esprimere come prodotto tra la pericolosità (F), espressa dal numero di eventi per un'unità di lunghezza, e la magnitudo (M), che rappresenta le conseguenze derivanti dal verificarsi dell'evento:

$$R = F \times M \quad (1)$$

Il valore così determinato può essere considerato in senso assoluto o rappresentare un termine di confronto tra diverse alternative sia per valutare se il rischio risulta più o meno tollerabile che per confrontare diverse soluzioni, ipotizzando nella rete stradale analizzata vari percorsi di collegamento tra due punti fissati e valutando per ognuno il valore del rischio [11].

L'importanza della problematica ai fini della salvaguardia della salute umana e dell'ambiente e gli elevati costi connessi alla realizzazione degli interventi per la riduzione del rischio, rende indispensabile una valutazione preliminare dei livelli di rischio presenti nei vari rami della rete stradale interessata dal trasporto di hazmat. A tal fine appare indispensabile definire una procedura di valutazione dei diversi fattori che concorrono alla definizione del rischio. Sulla base delle conoscenze acquisite in altri studi condotti negli ultimi 15 anni è stata elaborata un'originale metodologia basata su un'applicazione GIS [12], che consente di:

- ❑ tracciare per una qualunque strada, suddivisa in più tratti con caratteristiche omogenee, un diagramma di rischio, in modo da individuare i tronchi stradali più pericolosi per la popolazione e per l'ambiente, sui quali eventualmente intervenire con sistemi di prevenzione o di mitigazione del danno;
- ❑ quantificare per ogni itinerario un valore globale di rischio, ottenuto dalla somma dei valori parziali calcolati per i singoli tratti;
- ❑ individuare il percorso di minimo rischio per il trasporto di una determinata sostanza o classe di sostanze, mediante confronto tra i valori globali di rischio ottenuti per vari itinerari alternativi che colleghino sulla rete stradale un determinato luogo di origine (ad esempio un'industria che produce scarti di lavorazione tossici) ad un ben definito luogo di destinazione (ad esempio il porto nel quale tali scarti vengono stoccati temporaneamente e caricati sui container);
- ❑ reiterare il procedimento per le altre classi di sostanze che vengono movimentate all'interno del contesto territoriale esaminato;
- ❑ pianificare opportunamente gli itinerari di movimentazione territoriale di hazmat sulla rete stradale disponibile.

Nella procedura il rischio sarà sempre inteso in senso relativo e non assoluto; quindi il valore globale di rischio legato al trasporto di hazmat determinato su una strada sarà suscettibile di confronto con quello valutato per la stessa tipologia di sostanza per altri rami, ma non potrà essere confrontato con quello relativo a trasporti con caratteristiche differenti (in termini di carichi trasportati o di mezzo di trasporto), né tantomeno si può pensare di confrontare direttamente questo tipo di rischio con altri di natura differente.

La metodologia è stata testata nell'ambito di alcune applicazioni specifiche, ed in particolare:

- per la valutazione del rischio per il trasporto di cloro sulla strada statale SS194 (tratto Catania-Vizzini lungo 40 km) [12];
- per la valutazione del rischio per il trasporto di cloro sulla autostrada A18 (tratto Catania-Fiumefreddo lungo 35 km) [13];

- secondo uno schema semplificato per un'analisi di massima della problematica nel territorio della Provincia di Catania [14], al fine di individuare tratti particolarmente critici in termini di rischio e definire gli interventi più opportuni da mettere in atto.

2.1 Acquisizione dei dati ed implementazione nel GIS

Per applicare il modello è stato necessario acquisire preventivamente le seguenti informazioni caratterizzanti le infrastrutture esaminate:

- andamento plano-altimetrico del tracciato, mediante rilievo con strumentazione GPS in modalità cinematica e ricostruzione degli elementi geometrici con metodi grafici e numerici [15];
- caratteristiche della sezione trasversale (pendenza trasversale, larghezza della corsia e della banchina) e degli altri elementi della sede stradale, mediante rilievi con Total Station, metrici diretti e fotografici;
- dati sui flussi di traffico, determinati con rilievi diretti dei flussi veicolari e della percentuale di veicoli pesanti;
- velocità dell'85° percentile, valutate in funzione del grado di curvatura del tracciato;
- dati sugli incidenti nel periodo 1995-99, acquisiti dalla polizia stradale e dall'ISTAT (figura 1);

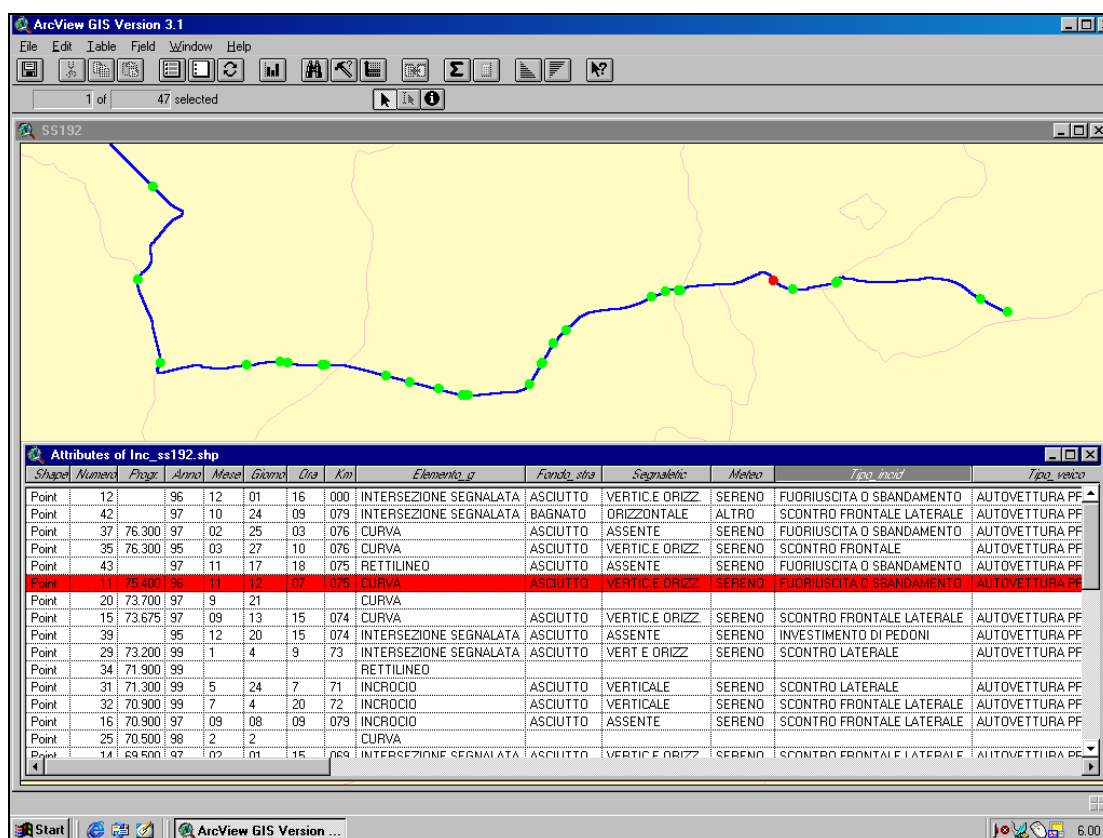


Figura 1 – Archivio di informazioni sugli incidenti stradali introdotte nel GIS

La suddivisione delle strade esaminate in tratti è stata effettuata a partire dagli elementi dell'asse planimetrico (rettifili e archi di circonferenza) e ad ognuno di essi sono state associate mediante il GIS tutte le informazioni rilevate (figura 2).

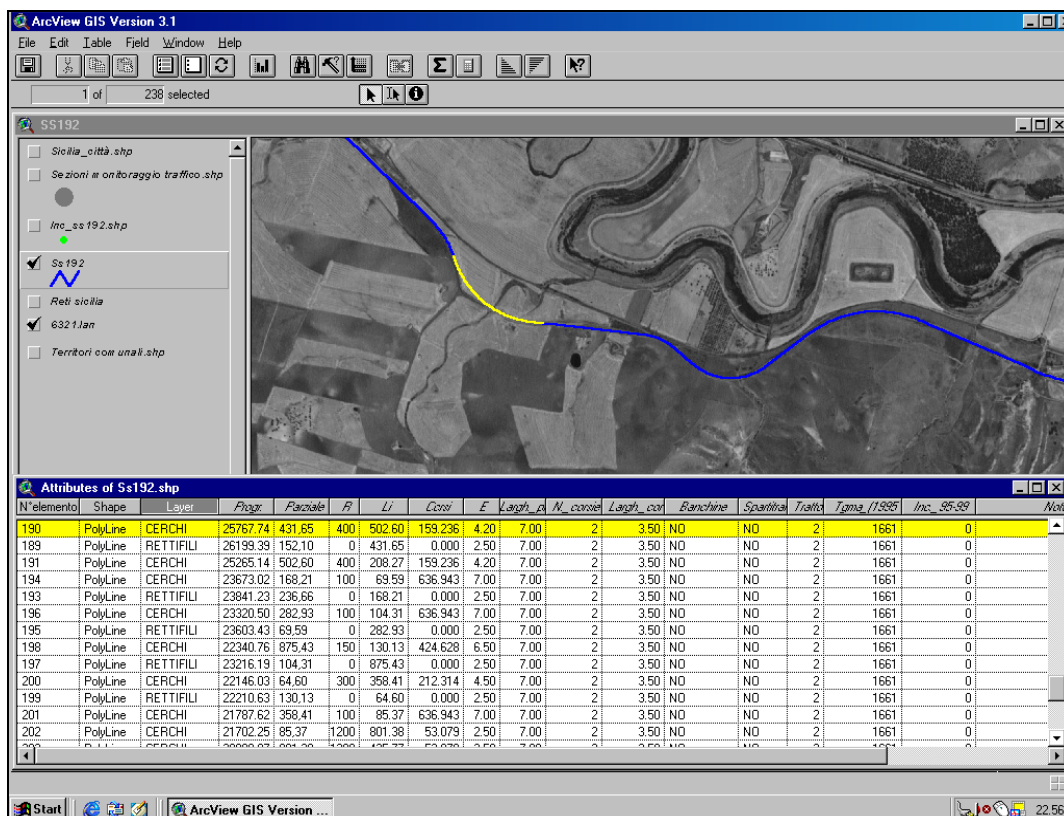


Figura 2 – Suddivisione del percorso in tronchi omogenei ed associazione di attributi alfanumerici nel GIS

2.2 Determinazione del numero di eventi per unità di lunghezza (F)

Nella metodologia la pericolosità F è intesa come il numero di eventi (incidenti con rilascio di sostanza) per unità di lunghezza (1 km), in un intervallo temporale T ben definito (per esempio 20 anni). Essa viene espressa con la seguente formula:

$$F = P_i \cdot P_{HAZ} \cdot P_R \quad (2)$$

dove:

- P_i = numero di incidenti con morti e/o feriti per km attesi nel periodo T;
- P_{HAZ} = percentuale di incidenti in cui è coinvolto un mezzo pesante che trasporta hazmat;
- P_R = percentuale di incidenti con rilascio di sostanza.

Il numero atteso di incidenti P_i è definito dal prodotto tra il tasso di incidentalità i (incidenti su 10^6 veicoli per km), il traffico annuale medio TGMA (10^6 veicoli/anno), ed il numero di anni del periodo di indagine T:

$$P_i = i \cdot TGMA \cdot T \quad (3)$$

Nel caso in cui si dispongano dati certi di incidentalità e di traffico sull'infrastruttura stradale per l'intervallo di tempo considerato, si possono ricavare immediatamente i valori di i e TGMA, in caso contrario si può fare riferimento a valori medi attesi, scelti in funzione delle caratteristiche funzionali, geometriche e ambientali della strada [3, 16, 17].

La probabilità P_{HAZ} che venga coinvolto nell'incidente un mezzo trasportante hazmat può essere ottenuta dal prodotto tra la percentuale ($\%_{HAZ}$) dei veicoli adibiti al trasporto di merci pericolose rispetto alla totalità di mezzi pesanti ($\%_p$) per la probabilità (γ) che in un incidente venga coinvolto un veicolo pesante.

$$P_{HAZ} = \%_{HAZ} \cdot \%_p \cdot \gamma \quad (4)$$

Il valore di $\%_{HAZ}$ dovrebbe essere determinato effettuando dei rilievi diretti sul tratto stradale esaminato; in assenza di dati sicuri tale valore va stimato, considerando che nel complesso di tutti i mezzi trasportanti hazmat, essa generalmente varia tra l'8% e il 20%.

Il termine γ risulta fortemente influenzato dalle caratteristiche plano-altimetriche del tratto. In particolare si è osservata una forte relazione tra il tasso di incidentalità dei mezzi pesanti e la riduzione della velocità dovuta alla pendenza del tratto stradale considerato (figura 3) [18].

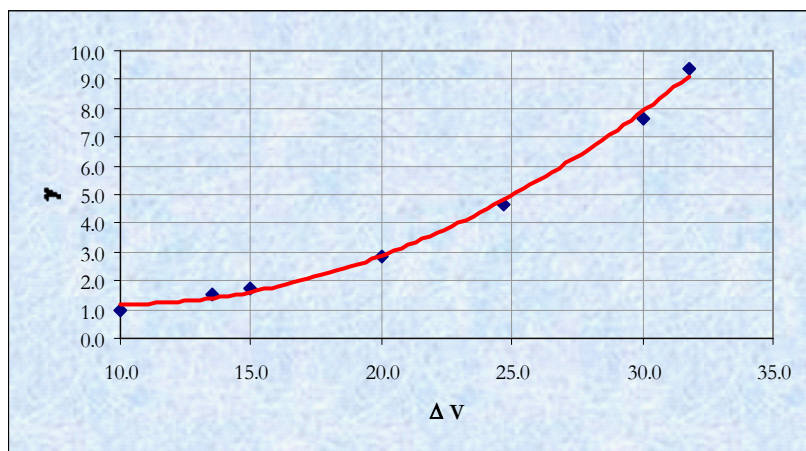


Figura 3 – Determinazione del coefficiente γ

La probabilità di rilascio P_R dipende da vari fattori: classe di strada di cui fa parte il tratto esaminato, tipo di sostanza trasportata, tipo di mezzo di trasporto, quantità di sostanza trasportata, velocità e massa delle parti impattanti nel caso di rilascio prodotto da un incidente.

Nella metodologia proposta la probabilità di rilascio viene messa in relazione alla velocità operativa V_{85} del tronco esaminato, al tipo di materia trasportata e al mezzo di trasporto, mediante la relazione empirica [12] (figura 4):

$$P_R = [0.015 \alpha + 0.00118 V_{85}] \cdot \beta \quad (5)$$

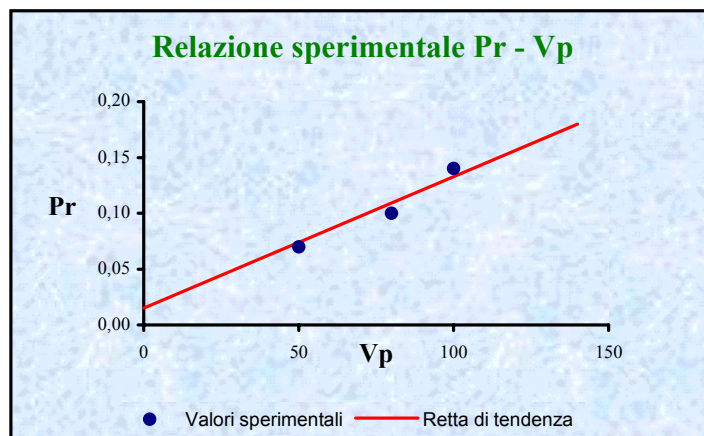


Figura 4 – Probabilità di rilascio al variare della velocità operativa

Con α e β tabellati (tabelle 1 e 2) in funzione rispettivamente della classe A.D.R. di appartenenza della sostanza e del tipo di mezzo di trasporto (serbatoio in pressione, recipiente in alluminio sottile, qualunque altro mezzo).

α	Classi di materie
1.20	1
1.10	3
1.05	4.1, 4.2, 4.3, 5.1, 5.2, 9
1.00	2, 6.1, 6.2, 7, 8

β	Mezzo di trasporto
0	non carico
0.60	serbatoio in pressione
1.00	recipiente in alluminio sottile
1.25	qualunque altro mezzo

Tabelle 1 e 2 – Valori delle costanti α e β in funzione della classe della materia e del mezzo di trasporto

In figura 5 sono mostrati i risultati ottenuti per la valutazione del parametro F relativo al trasporto di cloro sulla SS194.

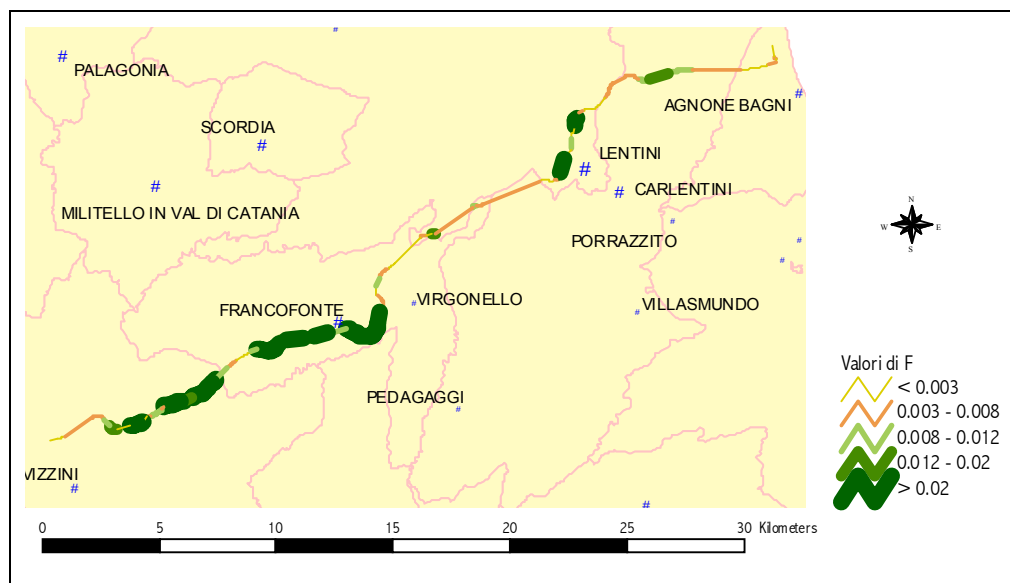


Figura 5 – SS194: andamento della pericolosità F

2.3 Intensità delle conseguenze dell'evento (M)

Le conseguenze di una possibile dispersione di sostanze pericolose nell'ambiente o di un incidente riguardante veicoli trasportanti hazmat sono generalmente stimate in termini di:

- ☐ popolazione esposta (eventuali evacuazioni di persone);
- ☐ possibili feriti e/o morti;
- ☐ danni alle proprietà;
- ☐ ettari di aree ecologicamente sensibili colpite irreversibilmente o reversibilmente;
- ☐ perdite di produzione.

Per quantificare il parametro M non si può prescindere dal tipo di evento considerato, dipendente dalle caratteristiche fisico-chimiche della sostanza rilasciata, ma anche dallo scenario in cui si verifica l'incidente. Gli eventi pericolosi per la popolazione e per l'ambiente, che si possono verificare a seguito di un sinistro coinvolgente un veicolo che trasporta hazmat, possono essere raggruppati in 4 categorie: dispersione atmosferica di gas pericolosi, incendio, esplosione, dispersione di liquidi pericolosi sulla piattaforma stradale, nel sottosuolo o in ricettori idrici.

Per simulare l'evoluzione di ciascun incidente, dall'istante del rilascio o dell'innesco fino all'esaurimento del fenomeno, vengono utilizzati opportuni modelli. Questi sistemi combinano generalmente le informazioni sulle caratteristiche chimiche delle sostanze rilasciate e sulle caratteristiche del sito con le condizioni meteorologiche previste nel momento in cui avviene un incidente che coinvolge veicoli trasportanti hazmat, in modo da poter prevedere mediante nubi o superfici di diffusione quale sarà l'area colpita.

L'uso dei GIS può valorizzare questo approccio estendendo la capacità di analisi attraverso elaborazioni in grado definire le superfici interessate dal pennacchio di dispersione e valutare le interferenze con la distribuzione della popolazione nel territorio, con l'ambiente circostante e la rete stradale, in modo da stimare le conseguenze in maniera più efficiente.

Il modello da adottare varia in funzione sia del tipo di ambiente interessato (aria, acqua, terra) che della fenomenologia del rilascio. Esistono in letteratura modelli di dispersione di gas pesanti (idrodinamici a tre dimensioni, di similitudine, a scatola per rilasci istantanei o continui), di diffusione di gas leggeri (gaussiani per sorgenti continue puntiformi, per sorgenti continue geometriche, per emissioni istantanee), per incendi (a sorgente puntiforme, a fiamma solida) e per esplosioni.

Nella metodologia proposta la seconda componente del rischio M è messa in relazione alla vulnerabilità dell'area esaminata e all'esposizione all'evento [12].

La vulnerabilità dell'area dipende da:

- ☐ tipologia e caratteristiche fisiche dell'ambiente in cui le sostanze vengono emesse;

- ❑ quantità di materia rilasciata, generalmente in funzione del tipo di mezzo di trasporto e di incidente e della velocità dei veicoli in collisione nel momento in cui avviene il sinistro;
- ❑ grado di pericolosità della sostanza emessa in relazione allo stato fisico-chimico durante la permanenza nell'ambiente e alle sue proprietà specifiche;
- ❑ condizioni meteorologiche (temperatura, direzione e velocità U del vento, umidità relativa, classe di stabilità dell'atmosfera);
- ❑ distanza dal punto in cui avviene il rilascio;
- ❑ tempo di esposizione alla materia rilasciata;
- ❑ presenza nella zona colpita dall'evento di sistemi di attenuazione delle conseguenze dello stesso [19, 20].
L'esposizione all'evento è determinata invece da:
- ❑ numero di persone esposte e, quindi, distribuzione e densità di popolazione nelle vicinanze del punto in cui accade l'evento.

Per valutare la vulnerabilità è indispensabile scomporre l'area d'impatto potenziale A in n settori A_i con caratteristiche di omogeneità nei confronti della propria vulnerabilità potenziale allo specifico evento (V_i); in seguito un'ulteriore suddivisione di ciascuna A_i in m aree A_{ij} omogenee in quanto ad esposizione (E_{ij}) all'evento consente una puntuale quantificazione del danno M_{ij} relativo all'area A_{ij} , e la valutazione di quello complessivo:

$$M = \sum_{ij} M_{ij} = \sum_i (V_i \times \sum_j E_{ij}) \quad (6)$$

2.3.1 Dispersione atmosferica di gas

Un gas o un liquido che fuoriescono da un serbatoio possono dare origine, evaporando, ad una nube di gas che si diffonde nell'atmosfera seguendo le leggi chimico-fisiche della gasdinamica tridimensionale.

I fattori in gioco sono numerosissimi e rendono complessa la determinazione di un modello descrittivo dei fenomeni di dispersione; entrano in causa infatti: i parametri fisici intrinseci del gas stesso (temperatura di ebollizione normale, densità, massa molare) e quelli relativi alle sue condizioni di trasporto (pressione e temperatura di trasporto); i parametri ambientali (umidità relativa dell'aria, gradiente di temperatura, direzione e velocità del vento).

A seconda dello scenario configurato non solo da questi parametri, ma anche dall'orografia dell'area interessata dalla dispersione, la nube assume una forma piuttosto che un'altra espandendosi preferenzialmente nella direzione sottovento. A seguito però di questo spandimento e dell'afflusso d'aria, che si mescola continuamente con il gas disperso, la concentrazione della sostanza va diminuendo.

A seconda della tossicità della materia rilasciata l'area di pericolo per la salute dell'uomo è più o meno grande.

Utilizzando come parametro indicatore il numero potenziale di persone che subiscono danni fisici di qualunque tipo (al limite la morte), le operazioni da eseguire in questo caso al fine di quantificare M , sono:

- ❑ individuare i settori o elementi A_i con densità G_i di popolazione costante. Oltre a questi settori (poligoni di esposizione) occorre considerare anche i punti rappresentativi dei centri di popolazione aggregata (CAP), nei quali si verifica un addensamento di popolazione a rischio (ospedali, scuole, chiese, centri di pubblico interesse, ecc.) e le linee di esposizione rappresentative della popolazione presente sulla rete stradale.
- ❑ suddividere le singole A_i in A_{ij} in funzione della vulnerabilità legata alla diffusione dell'inquinante; ad esempio, per ciascuna A_i possono essere delimitate 3 aree in rapporto alla concentrazione C della sostanza considerata (indici di tossicità [21, 22]):
 - area A_{i1} , $C > LC_{50}$;
 - area A_{i2} , $I.D.L.H. < C < LC_{50}$;
 - area A_{i3} , $C < I.D.L.H.$;

Con:

- LC_{50} = concentrazione minima che risulta letale per inalazione nel 50% dei soggetti esposti per 30 minuti (Letal Concentratio);
- $I.D.L.H.$ = concentrazione che pone a rischio la salute dei soggetti esposti per tempi superiori a 30 minuti (Immediately Dangerous for Life and Health);

Utilizzando il modello gaussiano per sorgenti continue puntiformi per gas neutri o leggeri [23], si possono individuare le aree ai lati del tratto stradale considerato, nelle quali è presente una determinata concentrazione della sostanza pericolosa rilasciata.

Partendo dalla relazione:

$$C = \frac{Q}{\pi \cdot \sigma_z \cdot \sigma_y \cdot U} \cdot \exp\left(\frac{-Y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-H^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (7)$$

Con:

- C = livello di concentrazione limite considerato in g/m³ (LC₅₀ o I.D.L.H.);
- U = velocità del vento (i valori vanno scelti in funzione dell'intensità, frequenza e direzione forniti dalla stazione meteorologica più vicina);
- Q = portata dell'emissione in g/s;
- σ_z e σ_y = parametri di dispersione nelle direzioni y e z in funzione della distanza sottovento rispetto alla sorgente e della classe di stabilità atmosferica;
- H = altezza della sorgente rispetto al suolo.

Facendo opportune ipotesi sulla portata dell'emissione e sulla classe di stabilità dell'atmosfera, l'ampiezza delle strisce nella direzione prevalente del vento viene determinata con la formula:

$$X'_{MAX} = X_{MAX} \cdot \sin\alpha = \left(\frac{2165373.38}{C \cdot U}\right)^{0.5410} \cdot \sin\alpha \quad (8)$$

Con:

- α = angolo formato tra la direzione del vento e la direzione della strada.

Introducendo nella (10) gli indici di tossicità per il cloro (LC₅₀ = 2 g/m³, IDLH = 0,073 g/m³) e facendo riferimento ai dati meteorologici dell'Aeroporto "Fontanarossa" di Catania e allo scenario di vulnerabilità associato al vento nella direzione di maggior frequenza (OVEST: U = 4.21 m/s e P_v = 0.3014), si è trovato ad esempio per la SS194 (figura 6):

$$X_{MAX} (LC_{50}) = 845.141 \text{ m} \quad X_{MAX} (IDLH) = 5066.744 \text{ m}$$

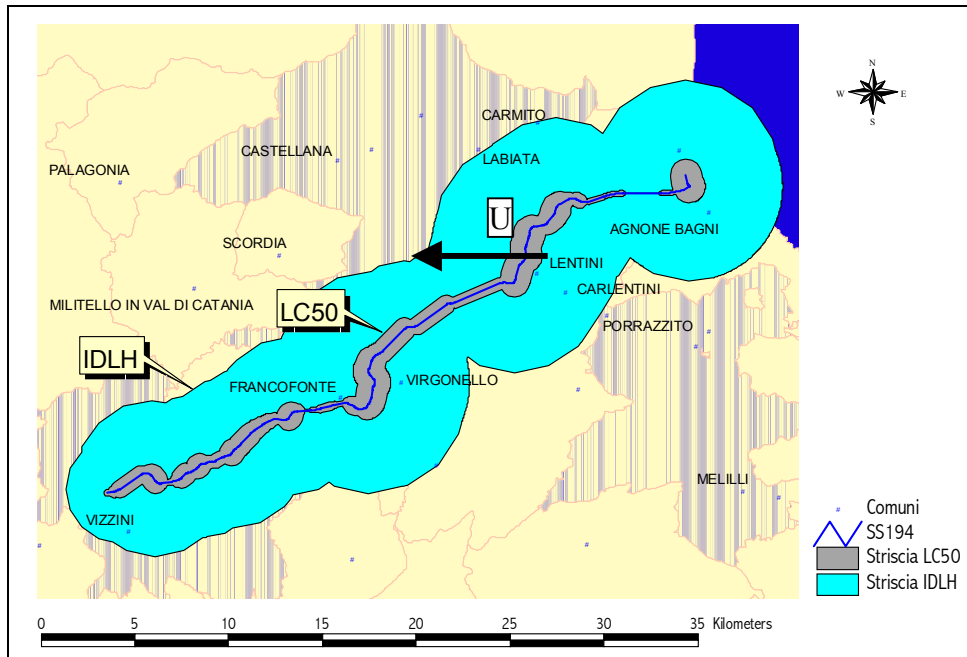


Figura 6 – Strisce d'impatto, ottenute dalle componenti ortogonali all'asse stradale delle distanze massime di dispersione sottovento (SS194 Catania-Vizzini)

- sovrapporre il piano di vulnerabilità, in cui sono riportate le strisce d'impatto, al piano di esposizione, nel quale è ben definita la distribuzione della popolazione (figura 7), valutando per ciascuna delle 3 strisce individuate il danno M_j con la formula:

$$M_j = F_j \cdot \left[\sum_{i=1}^{n_p} A_{ij} \cdot G_i \cdot \mu_{p_i} + \sum_{i=1}^{n_l} L_{ij} \cdot Q_i \cdot \mu_{l_i} + \sum_{i=1}^{n_c} N_i \cdot \mu_{c_i} \right] \quad (9)$$

con:

- M_j = danno potenziale associato alla j-esima striscia d'impatto;
- F_j = fattore di vulnerabilità proporzionale al livello di concentrazione limite della sostanza (LC_{50} o IDLH) relativo alla striscia j-esima;
- n_p, n_l, n_c = numero dei poligoni, delle linee e dei centri di popolazione aggregata interni alla striscia;
- A_{ij} = superficie in km^2 dell'i-esima porzione di poligono interna alla striscia j-esima (figura 8);
- L_{ij} = lunghezza in km dell'i-esima porzione di linea inclusa nella striscia j-esima;
- G_i = densità della popolazione in pers/ km^2 dell'i-esimo poligono;
- Q_i = popolazione presente in pers/km nell'i-esima linea (strada) durante l'evoluzione del fenomeno;
- N_i = numero di persone aggregate nell'i-esimo CAP;
- $\mu_{pi}, \mu_{li}, \mu_{ci}$ = fattore di mitigazione relativo all'i-esimo poligono o linea o CAP (vale 1 se non esistono opere di mitigazione delle conseguenze dell'evento, altrimenti assume un valore inferiore a 1 dipendente dall'efficacia dell'opera nell'abbattimento degli effetti).

Il danno globale relativo al tratto stradale esaminato si può esprimere con la seguente formula:

$$M = P_v \sum_{j=1}^2 M_j \quad (10)$$

con:

- P_v = probabilità che il vento soffi nella direzione stabilita.

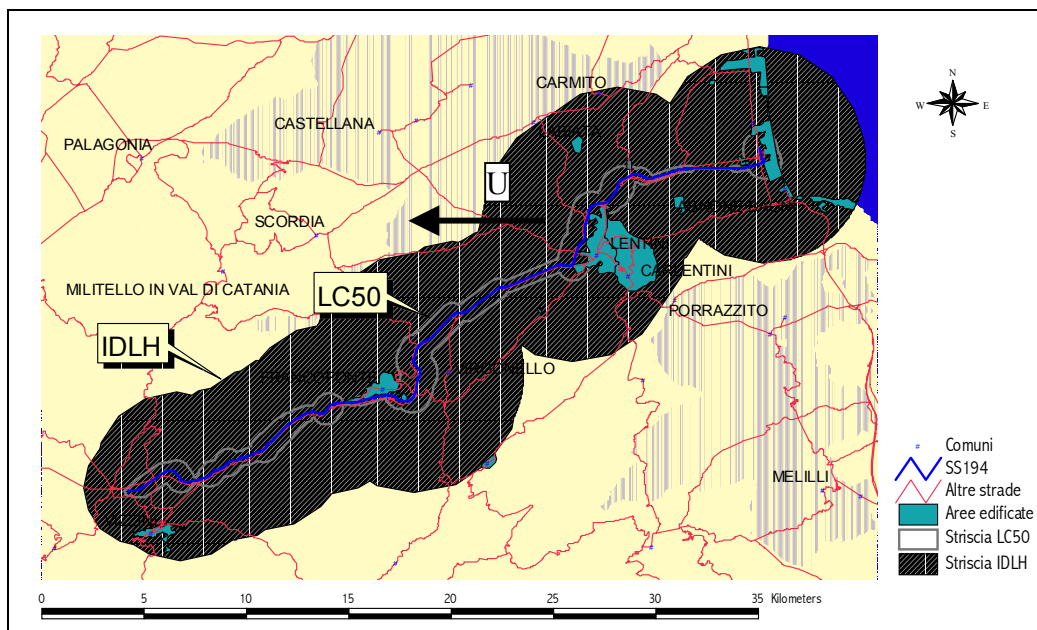


Figura 7 – Sovrapposizione dei piani di esposizione e vulnerabilità per la SS194



Figura 8 – Delimitazione delle aree edificate: Vizzini

Nel caso della SS194, ad esempio, fissando i fattori di vulnerabilità pari a $F_1=1$ per la prima striscia ($C \geq LC_{50}$) e $F_2=0.0365$ (rapporto tra i valori di concentrazione limite IDLH e LC_{50}) per la seconda ($IDLH \leq C < LC_{50}$) ed applicando la (9) sono stati calcolati i valori di danno per ogni tratto (figura 9).

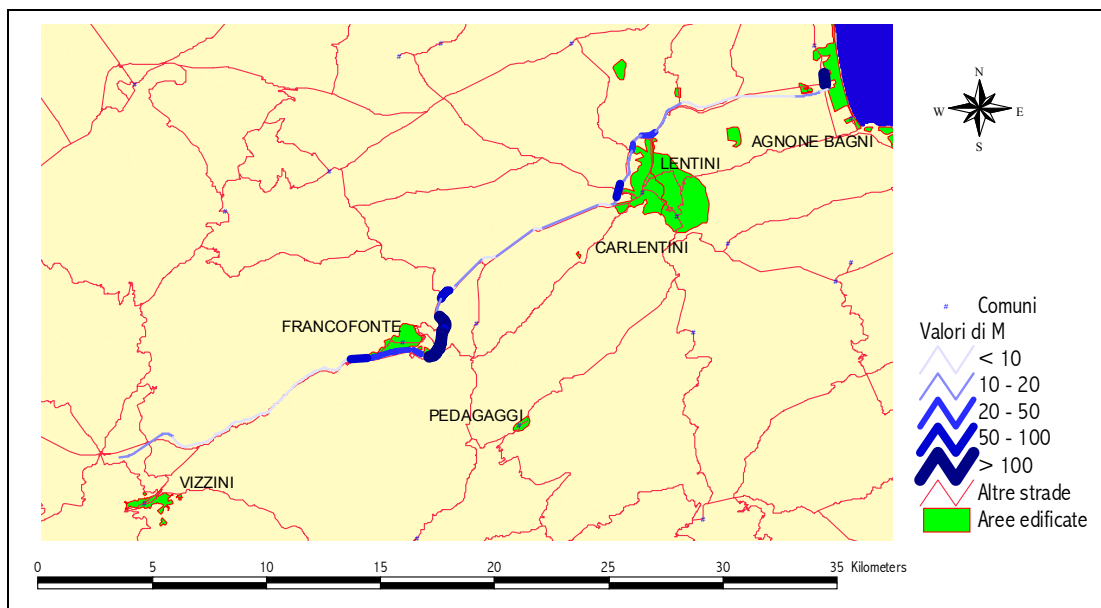


Figura 9 – SS194: andamento della magnitudo M

2.3.2 Incendi ed esplosioni

Gli incendi di interesse nella valutazione del rischio legato al trasporto di sostanze pericolose si possono suddividere in: incendi di pozze e serbatoi di liquidi infiammabili (pool fire); incendi di getti di vapore o gas infiammabili prodotti da perdite in serbatoi pressurizzati (jet fire); incendi di nubi di vapore (flash); sfere di fuoco (fireball).

Nell'ambito delle esplosioni occorre distinguere tra le seguenti diverse fenomenologie: esplosioni non confinate di nubi di vapori (UVCE), che avvengono solo se la miscela raggiunge concentrazioni che rientrano nei limiti di infiammabilità ed in presenza di un innesco di opportuna energia; esplosioni confinate (VCE), che si verificano quando un fluido in pressione viene rilasciato improvvisamente a causa del cedimento e della rottura catastrofica del suo contenitore; esplosioni di polveri che hanno luogo in seguito alla formazione di nubi esplosive di sostanze finemente disperse nell'atmosfera o in contenitori di grande volume.

Per ciascuno degli scenari associati a queste tipologie di evento esistono in letteratura diversi modelli di simulazione; in particolare il Supplemento ordinario alla "Gazzetta Ufficiale" n. 111 del 14 maggio 1994 riporta la descrizione e i criteri di applicabilità di alcuni tra questi modelli (generalmente a mezzo di diagrammi effetto-distanza di danno), anche se unicamente con riferimento alle installazioni industriali fisse e non al trasporto di hazmat [24].

Quando l'incidente che coinvolge un veicolo trasportante hazmat avviene in un tratto in galleria, le conseguenze che possono scaturire sono catastrofiche e decisamente maggiori rispetto al caso in cui l'incendio o l'esplosione avviene in un tratto "a cielo aperto" [18]. Appare allora opportuno effettuare specifiche verifiche legate all'eventuale passaggio di hazmat all'interno delle gallerie, assumendo come scenari di riferimento proprio sinistri o rilasci che evolvono in incendi o esplosioni.

Viceversa in un'analisi globale di pianificazione della movimentazione stradale, in ambito extraurbano, di merci pericolose l'analisi di tali scenari nei tratti "a cielo aperto" conduce a valutazioni di rischio ridotte rispetto all'analisi di quelli determinati da dispersione di gas o versamento di liquidi, in quanto l'incendio o l'esplosione generata da un mezzo di trasporto si può ritenere un fenomeno localizzato e puntuale, che generalmente colpisce solo gli utenti della strada.

2.3.3 Sversamento di liquidi

Gli effetti dell'inquinamento temporaneo acuto prodotto da uno sversamento accidentale di liquidi pericolosi hanno conseguenze nocive sull'ecosistema idrico, sulla vita vegetale, animale e sull'uomo, che si risentono in aree anche molto lontane dal luogo sorgente dell'inquinamento stesso.

Tali conseguenze sono sostanzialmente variabili in funzione del prodotto versato e delle caratteristiche dell'ambiente ricettore. I processi di infiltrazione verticale, con impregnazione di una consistente massa di terreno e con possibilità di inquinamento della falda idrica sotterranea, sono legati alla natura del terreno (elevata permeabilità o terreni fessurati producono una rapida e spesso incontrollabile diffusione dell'agente inquinante), al grado di saturazione del terreno, alla natura del prodotto versato e al grado di reattività del prodotto con le componenti reattive del suolo.

La diffusione dei prodotti nei corpi idrici superficiali, proprio in quanto le modalità dell'intervento sono spesso incompatibili con la capacità di recupero del corso d'acqua, comporta il più delle volte la distruzione totale o parziale in una vasta zona, estesa finanche una decina di km, di flora e fauna fluviale, con ulteriori evidenti gravi rischi nel caso in cui il corpo idrico è sede di prelievi per scopi potabili e industriali.

Nell'ambito di questo scenario il parametro indicatore è rappresentato dal danno arrecato all'intero ecosistema e non solo all'uomo. Per stimare tale danno sono stati definiti, mediante sovrapposizione di carte tematiche, degli indici d'impatto proporzionali alla sensibilità all'evento dei ricettori (aree coltivate, aree protette, bacini idrici, aree urbane, foreste, acquiferi, fiumi, acquedotti a pelo libero, pozzi e sorgenti).

Tenendo conto delle caratteristiche della sede stradale il rischio di sversamento di liquidi nocivi è stato valutato ipotizzando quattro possibili scenari [23] (sezione in rilevato, a mezza costa, in trincea o in galleria).

3. RISULTATI OTTENUTI

Moltiplicando tratto per tratto i valori di F e di M si determina infine l'andamento del rischio lungo le strade esaminate (figura 10).

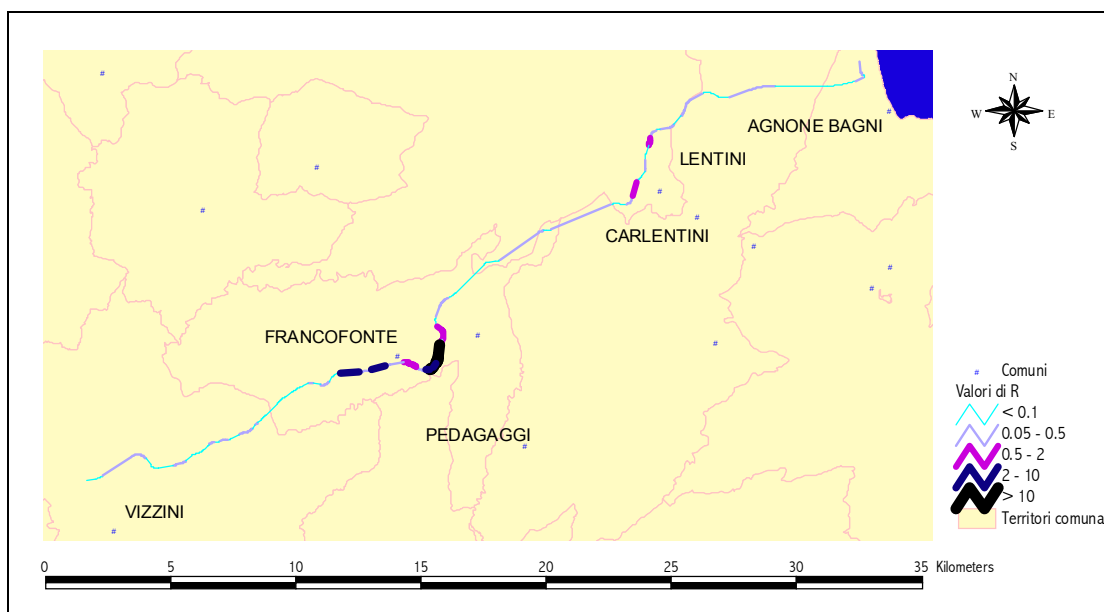


Figura 10 – SS194: valutazione del rischio R

Per lo scenario ipotizzato, la simulazione GIS mette in evidenza le variazioni del rischio lungo il tratto stradale esaminato. In particolare per la SS194 le zone di maggior rischio si hanno in prossimità del centro urbano di Francofonte dove si ha una elevata pericolosità legata ai valori assunti da P_{HAZ} e una forte magnitudo dovuta alla concentrazione di popolazione sotto vento.

4. CONCLUSIONI

Nella nota viene presentato un modello di analisi del rischio del trasporto stradale di hazmat, implementato in un sistema informativo territoriale applicato ad alcune strade della rete stradale siciliana, che consente un'analisi della problematica nei suoi più svariati aspetti.

I risultati ottenuti su specifici scenari hanno messo in evidenza le potenzialità della metodologia nell'individuare lungo la strada le variazioni del livello di rischio, date dalle complesse interrelazioni tra gli elementi dell'infrastruttura che influiscono sulla pericolosità e gli aspetti territoriali e ambientali connessi all'intensità delle conseguenze dell'evento.

Noti i livelli di rischio presenti nei vari rami della rete stradale esaminata è possibile pertanto pianificare gli spostamenti dei vettori di hazmat e definire i tratti sui quali eventualmente intervenire con sistemi di prevenzione o mitigazione del danno [19, 20].

L'applicazione a casi concreti di viabilità extraurbana siciliana ha anche evidenziato i problemi derivanti dalla carenza di informazioni sul sistema stradale tipica della situazione italiana, che rende particolarmente onerosa l'estensione della procedura a tutta la rete di interesse.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ISTAT. "Trasporto merci su strada" - 1995-96.
- [2] P. Haastrup, L. Brockhoff. "Severity of accidents with hazardous materials" - "J. Loss Prev. Process Ind.", vol. 3, ottobre 1990.
- [3] P. Haastrup. "Overview of problems of risk management of accidents with dangerous chemicals in Europe" - giugno 1993.
- [4] Lars H. Brockhoff. "A risk management model for transport of dangerous goods" - Commission of the European Communities, Joint Research Centre, Institute for Systems Engineering and Informatics; EUR 14675 EN, 1992.
- [5] S. Lassarre, K. Fedra, E. Weigkricht. "Computer-assisted routing of dangerous goods for Haute-Normandie" - "Journal of Transportation Engineering", vol. 119, No.2, marzo/aprile 1993.
- [6] M. Lepofsky, M. Abkowitz, P. Cheng. "Transportation hazard analysis in integrated GIS environment" - "Journal of Transportation Engineering", vol. 119, No.2, marzo/aprile 1993.
- [7] D.M. 30 dicembre 1992, n. 571.
- [8] D.L. 30/04/1992, n.285. "Nuovo Codice della Strada" - 1992.
- [9] Romeo Tasselli. "Il trasporto di merci pericolose" - ed. Buffetti, 1998.
- [10] D.Lgs. 4 febbraio 2000, n. 40.
- [11] F. Colombrita. "Un Sistema Informativo Territoriale per la valutazione del rischio e la determinazione dei percorsi più sicuri per il trasporto su strada di merci pericolose". Intervento al Seminario Assindustria - FAI "Sicurezza nei trasporti di merce pericolosa per consulente aziendale". Catania, 5 e 6 maggio 2001.
- [12] S. Cafiso, F. Colombrita. "Un modello di valutazione del rischio per il trasporto su strada di merci pericolose" - XI Convegno S.I.I.V. - Verona, 28-30 novembre 2001.
- [13] F. Colombrita. "Il trasporto su strada di merci pericolose. Un modello di valutazione del rischio con applicazione ai S.I.T." - Tesi di laurea, ottobre 1998.
- [14] A. D'Andrea, S. Cafiso, R. Colombrita, G. Mussumeci, F. Colombrita, A. Condorelli. "Valutazione delle funzioni strategiche e della vulnerabilità della rete infrastrutturale dei trasporti". "Programma Provinciale di Previsione e Prevenzione ai fini di Protezione Civile" della Provincia Regionale di Catania - 1998-1999.
- [15] F. Colombrita. "Criteri e metodologie per la classificazione e l'analisi funzionale delle strade extraurbane esistenti ai fini del miglioramento della sicurezza di esercizio" - Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria delle Infrastrutture Viarie - dicembre 2001.
- [16] Douglas W. Harwood, John G. Viner e Eugene R. Russel. "Procedure for developing truck accident and release rates for hazmat routing" - "Journal of Transportation Engineering", vol. 119, No.2, marzo/aprile 1993.
- [17] Antoine G. Hobeika, Sigon Kim e Raja Sethuraman. "Characteristics of hazardous-material accidents in Pennsylvania" - "Journal of Transportation Engineering", vol. 119, No.2, marzo/aprile 1993.
- [18] AASHTO. "A Policy on Geometric Design of Highway and Streets" - 1994.
- [19] S. Cafiso, F. Colombrita. "Interventi per la riduzione del rischio nel trasporto stradale di merci pericolose. I parte: incidenti nelle sezioni a cielo aperto" - "Strade e Autostrade" Vol. 6 - Novembre/Dicembre 1999.
- [20] S. Cafiso, F. Colombrita. "Interventi per la riduzione del rischio nel trasporto stradale di merci pericolose. II parte: incidenti in galleria" - "Strade e Autostrade" Vol. 2 - Marzo/Aprile 2000.
- [21] "R&D Strategy for toxic substances and hazardous and solid waste" - www.whitehouse.gov, 1997.
- [22] G. Bressa. "Valutazione del rischio di impatto ambientale conseguente a dispersione accidentale di sostanze tossiche" - 1995.
- [23] G. Boscaino, S. Cafiso, G. Pulvirenti. "Il G.I.S. per il rischio industriale e l'affidabilità delle infrastrutture viarie" - Collana di Ingegneria delle Infrastrutture Viarie n. 2 "Infrastrutture e Territorio" - maggio 1996.
- [24] "Criteri di analisi e valutazione dei rapporti di sicurezza relativi ai depositi di gas di petrolio liquefatto ai sensi dell'art. 12 del decreto del Presidente della Repubblica 17 maggio 1988, n.175"; Supplemento ordinario alla "Gazzetta Ufficiale", n.111 del 14 maggio 1994.