

PROGETTO DESTINATION

Un modello per la gerarchizzazione del territorio
mediante l'utilizzo di indicatori di sintesi.

Applicazione alla Regione Lombardia

ANTONIO DAVIDE GIUDICE
FABIO.BORGHETTI@POLIMI.IT

PAOLO GANDINI
ROBERTO MAJA

di Antonio Davide Giudice, Fabio Borghetti, Paolo Gandini e Roberto Maja

POLITECNICO DI MILANO

Il lavoro di ricerca, che si inserisce all'interno del Progetto Strategico Interreg Italia - Svizzera DESTINATION, già affrontato in GEOmedia 2 2014, propone un modello per la gerarchizzazione di un territorio mediante l'utilizzo di indicatori in grado di rappresentare le zone interessate dalle criticità associate a un evento incidentale che coinvolge veicoli trasportanti merci pericolose.

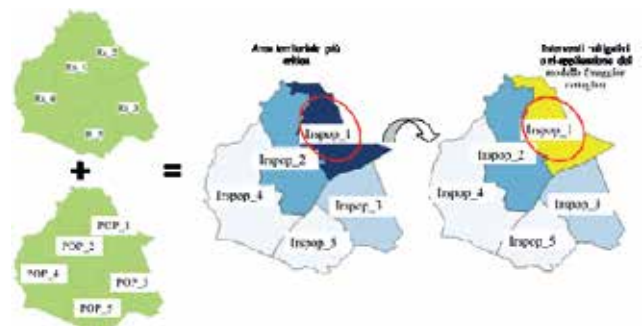


Fig. 1 - Esempio di applicazione del modello di gerarchizzazione, noti rischio sociale (Rs) e popolazione residente (POP).

L'obiettivo del lavoro di ricerca consiste nell'implementazione di un modello in grado di gerarchizzare un territorio considerando il rischio associato al *TMP* su strada utilizzando indicatori di sintesi. La definizione di indicatori di sintesi consente la restituzione di informazioni di tipo grafico e/o numerico associate alle caratteristiche territoriali, attraverso le quali identificare eventuali azioni mitigative in funzione del tipo di utente che effettua l'analisi. Gli indicatori di sintesi sono caratterizzati da parametri che relazionano il rischio sociale e ambientale (o elementi parziali che compongono il rischio stesso) alle caratteristiche territoriali di tipo antropico, ambientale o infrastrutturale.

Il modello è destinato a tutti i soggetti coinvolti nel processo decisionale della sicurezza relativo a questa tipologia di trasporto come ad esempio i pianificatori territoriali, gli addetti al *TMP*, i decisori politici, i gestori delle infrastrutture, gli addetti alle emergenze e i gestori delle Aziende a Rischio Incidente Rilevante - *ARIR*. Il modello, utilizzabile come strumento di supporto alle decisioni consente quindi di identificare e pianificare interventi mitigativi di carattere gestionale e/o infrastrutturale da applicare

in modo prioritario su specifiche porzioni di territorio. Tra le peculiarità del modello è possibile annoverare la scalabilità, la replicabilità e la versatilità. La scalabilità consente di eseguire analisi a qualsiasi scala, per esempio da quella nazionale a quella regionale o quella comunale; la replicabilità è associata alla possibilità di utilizzare il modello in qualsiasi territorio con differenti caratteristiche; infine, la versatilità consente di personalizzare il modello in funzione del contesto in cui si effettua l'analisi.

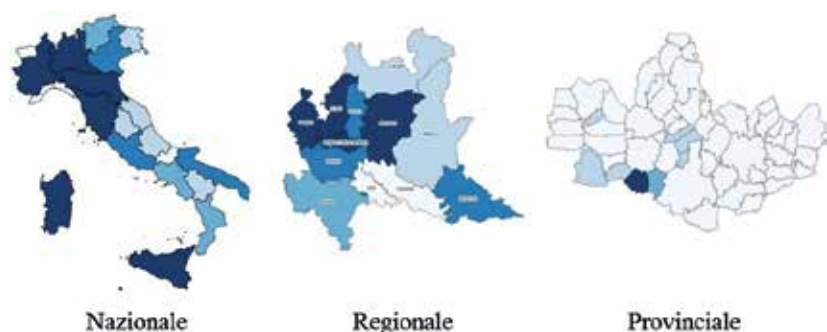


Fig. 2 - Esempi dei livelli di scala cui è applicabile il modello.



Fig. 3 - Incidente stradale con coinvolgimento di sostanza pericolosa. (Direzione Regionale Vigili del Fuoco Lombardia).

Il trasporto delle merci pericolose su strada

La valutazione e gestione del rischio connesso al trasporto di merci pericolose risulta ad oggi un problema di interesse strategico in quanto il danno sociale, comunque presente in caso di incidente tra veicoli, viene ulteriormente aggravato dalla pericolosità della merce trasportata, con potenziali conseguenze per persone, cose, flora e fauna, nonché possibili effetti di contaminazione dell'aria, delle falde, del suolo e sottosuolo.

Tali eventi poi, sono caratterizzati oltre che dalle conseguenze immediate, quali le potenziali perdite di vite umane nell'area circoscritta l'incidente, anche da effetti su vasta scala e prolungati nel tempo, sia sull'uomo sia sull'ambiente. Si pensi, ad esempio, a un rilascio di sostanza inquinante nel sottosuolo in una zona di ricarica di una falda sotterranea o di approvvigionamento idrico (anche non potabile). Gli effetti di tale evento possono essere riscontrati anche a diverse centinaia di chilometri. Emerge pertanto l'esigenza di avere strumenti operativi in grado supportare processi decisionali integrati di sicurezza.

Indicatori di sintesi implementati

Gli indicatori di sintesi sono stati implementati in funzione di parametri associati da un lato al rischio *TMP*, o alle sue componenti, e dall'altro a specifici elementi territoriali.

All'interno del progetto *DESTINATION* è stato sviluppato un modello analitico di rischio associato al *TMP* che consente due formulazioni: rischio sociale R_s (espresso in morti/km/anno) e rischio ambientale

(m^2 equivalenti con danni/anno).

Le formulazioni elaborate, sia per l'ambito sociale sia per quello ambientale, sono conformi all'espressione classica del rischio che relaziona probabilità, esposizione e vulnerabilità.

Il valore di rischio è stato stimato per ogni arco *i-esimo* avente lunghezza omogenea della rete stradale come segue:

$$R_i = P_{is,i} * \sum_j P_{ADR,ij} * (\sum_k P_{sc,ijk} * (\sum_m F_{p,m} * E_{ikm} * S_{km} * (1 - C_{f,ikm})))$$

dove:

R_i = rischio per la collettività (sociale/ambientale) riferito all'arco *i-esimo* [morti/arco/anno][m2eq con danni/arco/anno]

$P_{is,i}$ = pericolosità intrinseca della strada riferita all'arco *i-esimo*

[veicoli circolanti incidentati/arco/anno]

$P_{ADR,ij}$ = probabilità che un incidente stradale coinvolga la *j-esima* sostanza ADR riferita all'arco *i-esimo* [veicoli ADR incidentati/veicoli circolanti incidentati]

$P_{sc,ijk}$ = probabilità del *k-esimo* scenario incidentale con soglia e area di danno note che coinvolge la sostanza *j-esima* riferito all'arco *i-esimo* [eventi incidentali/veicoli ADR incidentati]

$F_{p,m}$ = fattore di presenza/pesatura dell'*m-esimo* bersaglio potenzialmente esposto [AE presenti/AE esposti][m2eq/m2 esposti]

E_{ikm} = *m-esimo* bersaglio potenzialmente esposto al *k-esimo* scenario incidentale con soglia e area di danno note (che coinvolge la sostanza *j-esima*) riferito all'arco *i-esimo* [AE esposti/evento incidentale][m2 esposti/evento incidentale]

S_{km} = suscettibilità dell'*m-esimo* bersaglio potenzialmente presente al *k-esimo* scenario incidentale con area e soglia di danno note (che coinvolge la sostanza *j-esima*) [morti/AE presenti][m2eq con danni/m2eq]

$C_{f,ikm}$ = capacità di far fronte relativa all'*m-esimo* bersaglio potenzialmente esposto al *k-esimo* scenario incidentale con area e soglia di danno note (che coinvolge la sostanza *j-esima*) riferito all'arco *i-esimo*.

Dove AE rappresenta gli Abitanti Equivalenti e veicoli ADR sono i veicoli che trasportano merci pericolose.

RISCHIO	FORMULAZIONI PARZIALI	ELEMENTI TERRITORIALI
	Probabilità incidentale P_{INC}	Popolazione residente - POP
Sociale - R_s	Danni sociali D_{SOC}	Estensione superficiale - SUP
Ambientale - R_A	Danni ambientali D_{AMB}	Rete stradale - ROAD
	Bersagli umani potenzialmente esposti E	Aziende a rischio incidente rilevante - ARIR

Tab. 1 - Informazioni utilizzate per la definizione degli indicatori di sintesi.

A partire dalla formula di valutazione del rischio, sono stati indentificati all'interno del progetto 18 indicatori di sintesi, relazionando le informazioni riportate in Tabella 1. Gli indicatori si riferiscono a uno specifico ambito contestuale (es. Comune, Provincia, Regione) sul quale si intende eseguire l'analisi. Di seguito sono illustrati

e descritti alcuni degli indicatori implementati associati al valore di rischio (sociale e ambientale) e alle relative formulazioni parziali.

Rischio sociale e ambientale

In Tabella 2 sono riportati alcuni indicatori implementati a partire dal valore di rischio sociale e ambientale.

Formulazioni parziali del rischio

Da una formulazione parziale del modello di analisi del rischio è possibile estrarre la componente probabilistica alla quale si associano alcuni indicatori riportati in Tabella 3. Un'altra formulazione parziale del rischio permette di stimare i danni sociali e ambientali, derivanti da incidenti che coinvolgono i veicoli che trasportano merci pericolose, con riferimento alle diverse caratteristiche territoriali. La Tabella 4 contiene la descrizione degli indicatori associati al danno sociale e ambientale atteso, a seguito di un evento incidentale coinvolgente sostanze pericolose.

FORMULAZIONE ANALITICA	DESCRIZIONE	OBIETTIVO
$I_{RSPOP} = \frac{\sum_i R_{S,i}}{POP}$	L'indicatore di sintesi mette in relazione il valore di rischio sociale ($R_{S,i}$) stimato per ogni arco stradale e la popolazione (POP) presente in un territorio. In particolare, dopo aver definito l'ambito territoriale oggetto dello studio (es. comune o provincia) viene determinato il valore di rischio sociale (R_S) come somma di tutti gli archi stradali che ricadono all'interno dell'area di studio.	L'indicatore I_{RSPOP} gerarchizza un'area di studio quantificando i decessi in rapporto all'intera popolazione di un territorio a seguito di eventuali incidenti rilevanti che coinvolgono veicoli adibiti al trasporto di sostanze pericolose.
$I_S = \frac{\sum_i R_{S,i}}{ROAD \cdot ARIR}$	L'indicatore di sintesi è dato dal rapporto tra il rischio sociale ($R_{S,i}$) e la rete stradale (ROAD) e il numero di ARIR presenti. Calcolato il rischio sociale (R_S), come la somma dei valori stimati per ogni arco della rete stradale ottenendo un valore unico per ogni area di studio, si mette in relazione con l'estensione della rete stradale (ROAD) e il numero delle ARIR presenti nella stessa area.	L'indicatore I_S permette di gerarchizzare il territorio quantificando il numero dei decessi annuali in rapporto all'estensione della rete stradale e alle ARIR, a seguito di eventi incidentali di veicoli trasportanti merci pericolose, così da associare l'informazione del rischio sociale alla fonte del rischio e alle aziende, poli attrattori/generatori di veicoli ADR.
$I_{RASUP} = \frac{\sum_i R_{A,i}}{SUP}$	L'indicatore di sintesi mette in relazione il rischio ambientale ($R_{A,i}$) per ogni arco <i>i-esimo</i> con l'estensione territoriale (SUP) espressa in m ² . Una volta suddiviso il territorio omogeneamente, per ogni porzione si calcola il rischio ambientale (R_A), sommando i valori associati ad ogni arco stradale dell'area di studio, per poi rapportarlo all'estensione territoriale.	L'indicatore I_{RASUP} permette di gerarchizzare il territorio secondo l'estensione della superficie territoriale danneggiabile da eventuali incidenti dei veicoli trasportanti merci pericolose rispetto all'intera estensione territoriale in cui avviene il trasporto.
$I_A = \frac{\sum_i R_{A,i}}{ROAD \cdot ARIR}$	L'indicatore di sintesi mette in relazione il rischio ambientale ($R_{A,i}$) all'estensione della rete stradale (ROAD) e al numero di ARIR presenti in un territorio. Inizialmente, viene calcolato il rischio ambientale (R_A) per ogni porzione di territorio, come la somma dei valori associati ad ogni arco stradale <i>i-esimo</i> .	L'indicatore I_A permette di gerarchizzare il territorio, associando la superficie territoriale danneggiata da eventuali incidenti che coinvolgono veicoli trasportanti merci pericolose all'estensione della rete stradale e alle ARIR presenti sul territorio da analizzare.

Tab. 2 - Indicatori di sintesi associati al rischio sociale e ambientale.

FORMULAZIONE ANALITICA	DESCRIZIONE	OBIETTIVO
$I_{PIROAR} = \frac{\sum_i P_{inc,i}}{ROAD \cdot ARIR}$	L'indicatore di sintesi mette in relazione la probabilità incidentale ($P_{inc,i}$) con l'estensione stradale (ROAD) ed il numero di ARIR presenti nell'area di studio. Definito l'ambito territoriale cui applicare l'indicatore di sintesi, viene calcolata la probabilità incidentale P_{inc} , come la somma della probabilità stimata per ogni arco <i>i-esimo</i> , questa viene rapportata all'estensione della rete stradale e alle ARIR presenti nello stesso territorio.	L'indicatore I_{PIROAR} permette di gerarchizzare il territorio e conoscere per ogni porzione di esso in cui è stato suddiviso quale è la probabilità che un incidente coinvolga veicoli trasportanti merci pericolose associando questa informazione all'estensione della rete stradale e al numero delle ARIR presenti.

Tab. 3 - Indicatore associato alla probabilità incidentale.

FORMULAZIONE ANALITICA	DESCRIZIONE	OBIETTIVO
$I_{DSPOP} = \frac{\sum_i D_{S,i}}{POP}$	L'indicatore di sintesi associa il danno sociale ($D_{S,i}$) stimato per ogni arco <i>i-esimo</i> alla popolazione residente in un determinato territorio. Calcolato il danno sociale (D_S) per ogni porzione di territorio (ad es. provincia, comune ecc.), come la somma dei valori associati ad ogni arco stradale che ricade all'interno del territorio, questo viene rapportato alla popolazione residente nell'area di studio identificata.	L'indicatore I_{DSPOP} permette di gerarchizzare il territorio in funzione del numero di decessi a seguito di un evento incidentale che coinvolge i veicoli trasportanti merci pericolose in rapporto alla popolazione residente in un territorio.
$I_{DAROAD} = \frac{\sum_i D_{A,i}}{ROAD}$	L'indicatore di sintesi associa il danno ambientale ($D_{A,i}$) stimato per ogni arco stradale <i>i-esimo</i> alla rete stradale in cui avviene il trasporto delle merci pericolose. Calcolato il danno ambientale (D_A), come la somma dei valori stimati per ogni arco <i>i-esimo</i> per la porzione del territorio individuato (provincia, comune ecc.) è possibile rapportare tale valore all'estensione della rete stradale che ricade all'interno dell'area di studio identificata.	L'indicatore I_{DAROAD} permette di gerarchizzare il territorio in funzione della superficie territoriale danneggiata da eventi incidentali che coinvolgono i veicoli trasportanti merci pericolose associando questa informazione ad ogni chilometro di rete stradale dell'area di studio.

Tab. 4 - Indicatori associati al danno sociale e ambientale atteso.

Applicazione del modello alla Regione Lombardia

Il modello di gerarchizzazione del territorio è stato applicato al contesto della Regione Lombardia al fine di valutarne validità e affidabilità dei risultati. Sulla rete stradale lombarda transitano ogni giorno importanti quantità e tipologie di sostanze pericolose anche in relazione al fatto che sul territorio regionale sono presenti oltre 280 aziende a rischio di incidente rilevante che possono essere considerate nodi in cui il traffico merci pericolose viene generato e attratto.

Gli indicatori di sintesi esposti nel precedente paragrafo sono stati applicati, permettendo la gerarchizzazione delle dodici province lombarde. Una seconda fase dell'applicazione ha previsto l'analisi di dettaglio del territorio provinciale caratterizzato da indicatori quantitativamente elevati, al fine di ripetere l'analisi per una gerarchizzazione del territorio su base comunale per poter identificare eventuali misure di mitigazione. Di seguito sono riportate le mappe tematiche relative ad alcuni degli indicatori implementati e le province che presentano il valore più elevato.

Rischio sociale e ambientale – caso studio

Il calcolo degli indicatori è stato condotto considerando l'involuppo di tutti gli scenari incidentali associati alle sostanze pericolose rappresentative del modello di analisi di rischio.

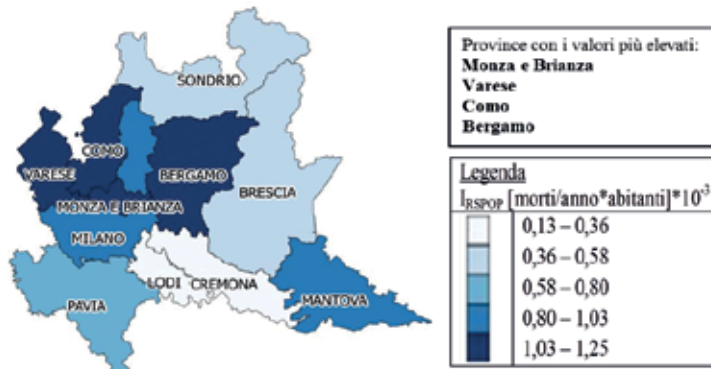


Fig. 4 – Rappresentazione dell'indicatore di sintesi I_{RSPOP} .

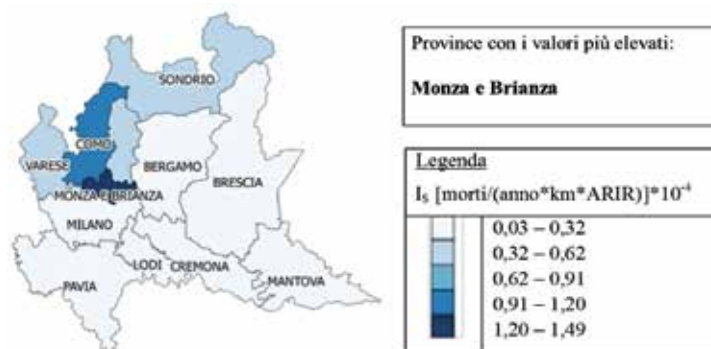


Fig. 5 – Rappresentazione dell'indicatore di sintesi I_S .

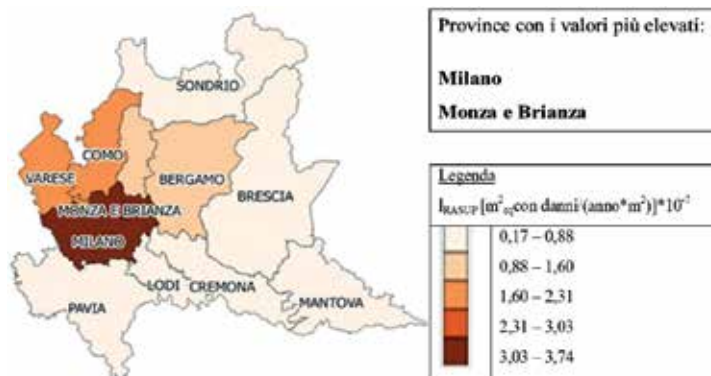


Fig. 6 – Rappresentazione dell'indicatore di sintesi I_{RASUP} .

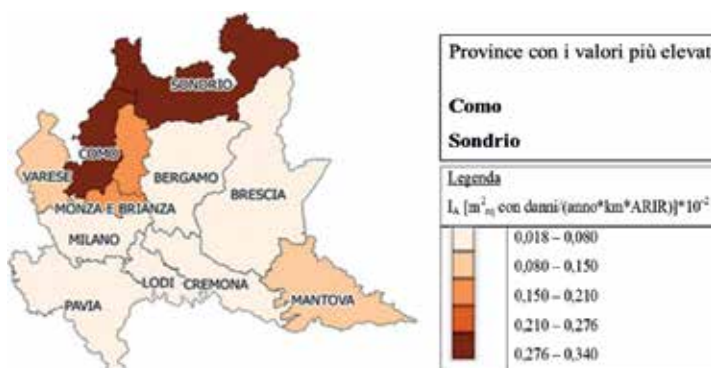


Fig. 7 - Rappresentazione dell'indicatore di sintesi I_A .

Formulazioni parziali del rischio: probabilità incidentale – caso studio

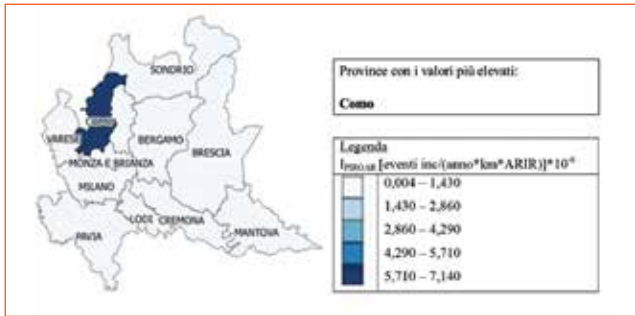


Fig. 8 - Rappresentazione dell'indicatore di sintesi I_{PIROAR}



Fig. 9 - Rappresentazione dell'indicatore di sintesi $I_{DSOP_GASOLIO}$

Formulazioni parziali del rischio: danno sociale e ambientale atteso – caso studio

Per la stima del danno sociale e ambientale, gli indicatori sono stati determinati considerando due sostanze, gasolio e ossido di etilene, significative per la tipologia di scenari incidentali che possono determinare.

Come si evince in Figura 13, l'applicazione degli indicatori di sintesi al contesto lombardo ha evidenziato che la provincia di Monza e Brianza presenta dieci indicatori aventi i valori massimi: per analizzare le possibili cause di questo risultato è possibile riapplicare il modello alla sola provincia brianzola, ottenendo anche una gerarchia a livello comunale che può orientare le priorità di intervento.

A seguito dei risultati ottenuti e rappresentati nel precedente istogramma, a titolo esemplificativo è stata condotta un'analisi all'interno della provincia di Monza e Brianza applicando solo l'indicatore di sintesi I_{RSROAD} . Come si osserva nell'istogramma di Figura 14, il modello ha evidenziato che il comune di Nova Milanese

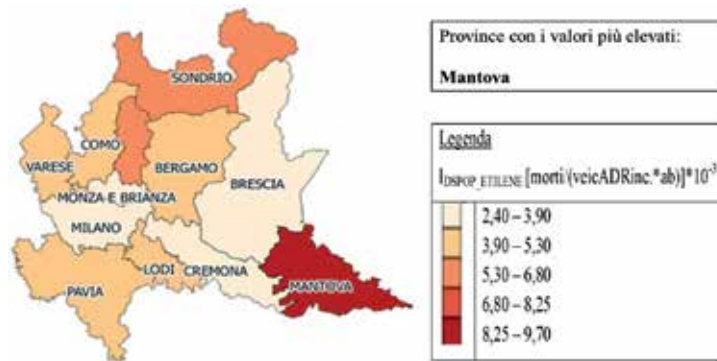


Fig. 10 - Rappresentazione dell'indicatore di sintesi $I_{DSOP_ETILENE}$



Fig. 11 - Rappresentazione dell'indicatore di sintesi $I_{DA_ROAD_GASOLIO}$



Fig. 12 - Rappresentazione dell'indicatore di sintesi $I_{DA_ROAD_ETILENE}$

presenta il valore maggiore per quest'indicatore, di circa un ordine di grandezza in più rispetto alla media di tutti gli altri comuni. Per identificare, pianificare ed eventualmente attuare interventi mitigativi sul territorio è stata effettuata un'ulteriore analisi finalizzata alla conoscenza delle possibili cause che determinano valori dell'indicatore I_{RSROAD} così elevati.

In Figura 15 si osserva la mappa tematica relativa all'indicatore I_{RSROAD} applicato a livello regionale, provinciale e comunale in grado di restituire in modo semplice e immediato le criticità sul territorio.

Relativamente al territorio del comune di Nova Milanese sono state analizzate presenza e tipologia dei bersagli antropici, ovvero il parametro E del modello di rischio con particolare riferimento a popolazione residente, addetti delle aree industriali, addetti dei centri commerciali e utenti delle strutture scolastiche.

In Figura 16 sono illustrate in rosso le quattro tipologie di esposti umani, ricadenti nel territorio comunale di Nova Milanese che concorrono alla determinazione del Rischio Sociale - R_S utilizzato all'interno dell'indicatore I_{RSROAD} .



Fig. 13 – Istogramma riportante le province ed il relativo numero di indicatori con i valori massimi.

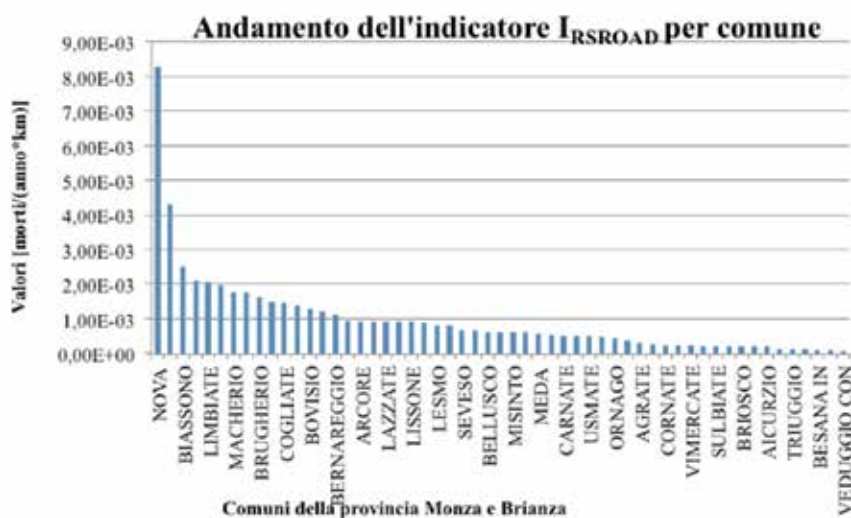


Fig. 14 – Istogramma con i valori dell'indicatore di sintesi I_{RSROAD} per i comuni della provincia di Monza e Brianza.

Conclusioni

Il modello implementato permette di gerarchizzare un territorio in funzione di indicatori di sintesi che relazionano il rischio sociale e ambientale e/o parametri che lo costituiscono come la componente probabilistica o di

esposizione a caratteristiche del territorio quali il numero di abitanti, l'estensione stradale e l'estensione superficiale. Il modello si configura come uno strumento di supporto alle decisioni versatile e personaliz-



Fig. 15 – Mappa tematica: gerarchizzazione della provincia di Monza e Brianza tramite l'indicatore I_{RSROAD} .



Fig. 16 – Distribuzione delle tipologie di bersagli umani sul comune di Nova Milanese.

zabile dall'analista in funzione di specifiche esigenze e può, inoltre, essere applicato a diverse scale. I risultati del modello consistono in mappe tematiche affiancate da istogrammi in grado di fornire indicazioni semplici e immediate circa le eventuali criticità. L'utilizzo del modello, indipendentemente dalla scala di applicazione, consente di orientare le risorse disponibili per identificare, pianificare e attuare interventi di carattere gestionale e/o infrastrutturale finalizzati alla mitigazione del rischio associato al trasporto di sostanze pericolose su strada. Al fine di verificarne la validità e l'affidabilità, il modello è stato applicato alla contesto territoriale della Regione Lombardia. Il caso studio ha permesso di individuare la provincia di Monza e Brianza come il territorio in cui è presente il maggior numero di indicatori aventi valori elevati e dove è quindi consigliabile procedere con una analisi di dettaglio che consiste nella ri-applicazione del modello a scala provinciale. In questo modo è stato possibile conoscere le possibili cause, in termini di esposizione antropica, che provocano un valore di rischio sociale elevato e di conseguenza anche dell'indicatore ad esso associato.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano il gruppo di lavoro di Progetto costituito da Regione Lombardia, Regione Piemonte, Regione Valle d'Aosta, Provincia Autonoma di Bolzano

BIBLIOGRAFIA

- [1] Giudice A.D., Tesi di Laurea magistrale, *Trasporto Merci Pericolose su strada, un modello per la gerarchizzazione del territorio mediante l'utilizzo di indicatori di sintesi. Applicazione alla regione Lombardia.*, Politecnico di Milano, Milano, Aprile 2015.
- [2] Carrara R., Fanelli R., *Guida al trasporto di sostanze pericolose – come prevenire e gestire le emergenze nel trasporto su strada*, Fondazione Lombardia per l'Ambiente, Milano, TSP 1999.
- [3] Autori Vari, *Progetto Destination, Conoscere il trasporto delle merci pericolose come strumento di tutela del territorio*, Torino, 2014.
- [4] Maja R., Appunti del corso di *Tecnica ed economia dei trasporti*, Politecnico di Milano, Milano, 2013.
- [5] Sironi F., Tesi di Laurea magistrale, *Valutazione del rischio nel trasporto delle merci pericolose: il caso delle gallerie lecchesi*, Politecnico di Milano, Milano, Anno Accademico 2011/2012.
- [6] ADR 2013 e ADR 2015.
- [7] Gandini P., Tesi di Laurea Magistrale, *Modello di mitigazione del rischio associato al trasporto delle merci pericolose attraverso la gestione degli accessi alle gallerie*, Politecnico di Milano, Milano, Anno accademico 2008/2009.
- [8] Maja R., Marchionni G., Saia, Studer L., Vescia, Vaghi. *Progetto TRAMP*, Telecontrollo del Rischio

e Canton Ticino per il prezioso contributo alle attività svolte per la disponibilità dimostrata. Un ulteriore ringraziamento è rivolto a Lombardia Informatica, CSI Piemonte e 5T S.r.l.

- nell'Autotrasporto di Merci Pericolose, Politecnico di Milano, Milano, 2002.
- [9] Maja R., *Mappatura del Rischio*, Politecnico di Milano, Milano.
 - [10] Arpa Veneto, *Progetto SIMAGE, Sistema Integrato per il Monitoraggio Ambientale e la Gestione delle Emergenze*, giugno 2007.
 - [11] *Progetto SECTRAM – Sicurezza nel Trasporto Merci*, Programma Alcotra 2007/2013.