



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Corso di Dottorato in Infrastrutture e Trasporti XXVI Ciclo

Curriculum in Ingegneria Ferroviaria

ANALISI DI VULNERABILITÀ DELLA RETE
FERROVIARIA:

un modello di accessibilità delle tratte a cielo aperto
per i soccorsi in emergenza

Dottorando: Dott. Ing. Fabio Borghetti

Tutore: Prof. Ing. Gabriele Malavasi

Cotutore: Prof. Ing. Roberto Maja

Triennio Accademico 2010 - 2013

*La scienza intera
non è altro che un modo più sofisticato
del pensare quotidiano.*

A. Einstein

RINGRAZIAMENTI

Al termine di questo lavoro di ricerca desidero innanzitutto ringraziare il Professor Gabriele Malavasi per aver creduto in questa ricerca, per la disponibilità dimostrata e per avermi accompagnato in questo lungo *percorso*, talvolta difficile, indicandomi la strada e motivandomi ad andare avanti.

Ringrazio il Professor Roberto Maja, responsabile del Laboratorio Mobilità e Trasporti del Politecnico di Milano cui afferisco, per avermi offerto la possibilità di intraprendere questa esperienza di crescita professionale in un ambito, quello della sicurezza ferroviaria, certamente molto importante ed interessante al tempo stesso.

Ringrazio *RFI – Rete Ferroviaria Italiana* e in particolare l'Ing. Gian Piero Pavirani per l'interesse dimostrato all'attività di ricerca e per avermi fornito il materiale utile alla stesura dell'elaborato.

Ringrazio Regione Lombardia e Lombardia Informatica per avermi fornito materiale, dati e *assistenza tecnica* utili all'implementazione del lavoro di ricerca.

Ringrazio la Direzione Regionale Vigili del Fuoco Lombardia e in particolare il Dott. Ing. Antonio Monaco, per l'interesse dimostrato nella ricerca ma soprattutto per i *preziosi* suggerimenti, utili al conseguimento degli obiettivi, provenienti da un *punto di vista operativo* complementare al mio.

Ringrazio l'Ing. Riccardo Rigacci, Direttore del 2° tronco di Autostrade per l'Italia, che, pur non occupandosi di sicurezza in ambito ferroviario, ha dimostrato disponibilità e interesse all'argomento suggerendomi alcuni *spunti* interessanti.

Ringrazio il Prof. Renato Rota per avermi fornito *indicazioni* utili circa i possibili sviluppi e impieghi dello strumento proposto.

Un ultimo ringraziamento è rivolto ai colleghi e amici del Laboratorio, Luca, Giovanna, Marco, Paolo e Rosanna per avermi *sopportato* in questi anni, per essermi stati vicini nei momenti difficili, in cui la *fine* sembrava lontana, e felici ma soprattutto avermi fornito consiglio e supporto nella *risoluzione tecnica* di problemi oltre ai consigli per le elaborazioni con gli strumenti *GIS*.

INDICE

Ringraziamenti	5
Indice delle figure	9
Indice delle tabelle	13
Abstract	15
1 Introduzione	16
1.1 Obiettivo della ricerca	17
1.2 Struttura del lavoro di tesi	18
1.3 Il sistema ferroviario dei trasporti: caratteristiche generali	20
1.4 Gestione dell'emergenza ferroviaria e accessibilità dei soccorsi	21
1.4.1 I piani di emergenza	24
1.4.2 Principali eventi incidentali	26
2 Stato dell'arte	53
2.1 Ricerche per il Dipartimento della Protezione Civile Nazionale	54
2.2 Definizione di <i>rischio</i>	54
2.2.1 Il rischio trasporti	57
2.2.2 La vulnerabilità delle reti di trasporto.....	59
2.2.2.1 Vulnerabilità fisica	60
2.2.2.2 Vulnerabilità funzionale	61
2.2.2.3 Vulnerabilità organizzativa	62
2.2.2.4 Vulnerabilità sistemica.....	63
2.2.2.5 Vulnerabilità topologica	64
2.2.3 L'esposizione nelle reti di trasporto	65
2.3 Procedura HSIM - AV High Speed Interactive Maps - RFI	66
2.4 Mappatura accessi sede ferroviaria – RFI	68
2.5 Manuale Operativo per la Gestione delle anomalie rilevanti o incidenti di esercizio - RFI	70
2.6 Mitigazione del rischio	70
2.7 Servizio Nazionale della Protezione Civile	73
2.8 La Ricerca Operativa e gli Strumenti di Supporto alle Decisioni – SSD	75
2.8.1 Cos'è e di cosa si occupa la Ricerca Operativa	75
2.8.2 Come affrontare un processo decisionale	76
2.8.3 Modelli decisionali o di ottimizzazione.....	78
2.9 L'impianto normativo	81
2.9.1 Direttiva 2004/49/CE relativa alla sicurezza delle ferrovie comunitarie.....	81

2.9.2	Decreto Ministeriale 28 ottobre 2005 - Sicurezza nelle gallerie ferroviarie	82
2.9.3	Direttiva Presidenza del Consiglio dei Ministri del 2 maggio 2006: indicazioni per il coordinamento operativo di emergenze	84
2.10	I veicoli antincendio ferroviari	87
2.10.1	Treno di spegnimento e salvataggio.....	87
2.10.2	Veicoli antincendio bimodali strada - rotaia	89
2.10.3	Veicoli stradali antincendio trasportati su carri ferroviari	90
3	Il metodo di analisi e la formulazione dell'Indice di Accessibilità	92
3.1	Introduzione al metodo.....	93
3.1.1	La formulazione degli indici nei Sistemi di Supporto alle Decisioni.....	93
3.2	I soggetti, gli ambiti e le assunzioni	94
3.2.1	I soggetti destinatari	95
3.2.2	Gli ambiti di possibile uso.....	96
3.2.3	Le assunzioni e ipotesi semplificative	96
3.2.3.1	Ambito territoriale	97
3.2.3.2	Eventi critici e probabilità di accadimento	98
3.3	Il processo di definizione dell'indice di accessibilità	100
3.3.1	L'approccio archi - buffer - celle	102
3.3.2	L'individuazione dei parametri e l'aggregazione in <i>indicatori</i>	105
3.3.2.1	IPL _i - presenza di un passaggio a livello	112
3.3.2.2	ISF _i - presenza di una stazione/fermata.....	113
3.3.2.3	IEST _i - presenza ed estensione di una rete stradale carrabile.....	114
3.3.2.4	IPI _i - presenza di un piazzale di emergenza.....	115
3.3.2.5	ILI _i - presenza di limiti di massa e sagoma al transito dei veicoli	116
3.3.2.6	IBV _i presenza di barriere o cancellate di protezione della sede ferroviaria valicabili o removibili	117
3.3.2.7	IBI _i - presenza di barriere o cancellate di protezione invalicabili o non removibili	119
3.3.2.8	IUS _i - destinazione di uso del suolo	121
3.3.2.9	IARR _i - tempo di arrivo dei Vigili del Fuoco	125
3.3.3	I modelli di calcolo dei parametri e degli indicatori	127
3.3.3.1	Le funzioni di utilità degli indicatori.....	128
3.3.3.2	IPL _i - Passaggio a livello	130
3.3.3.3	ISF _i - Stazioni o fermate	135
3.3.3.4	IEST _i - Estensione rete stradale carrabile.....	140
3.3.3.5	IUS _i - Uso del suolo	152
3.3.3.6	IARR _i - Tempo di arrivo dei Vigili del Fuoco	169
3.4	Un modello semplificato per la stima della probabilità di incidente	183
4	Un caso applicativo: la linea Torino – Milano	187

4.1	La linea ferroviaria storica Milano - Torino	188
4.2	Strumenti utilizzati per la ricerca	189
4.3	I dati utilizzati	190
4.3.1	GeoPortale della Lombardia.....	190
4.3.2	Ortofoto Regione Lombardia	191
4.3.3	DUSAF 2	191
4.3.4	Grafo ferroviario.....	194
4.3.5	Grafo stradale.....	194
4.3.6	Localizzazione stazioni e fermate ferroviarie	195
4.3.7	Localizzazione dei passaggi a livello.....	196
4.3.8	Localizzazione comandi e distaccamenti Vigili del Fuoco	197
4.4	Determinazione dell'indice di accessibilità	199
4.4.1	Le elaborazioni in GIS	199
4.4.2	Il foglio di elaborazione dati.....	203
4.5	Stima della probabilità di incidente	204
4.6	Rappresentazione dei risultati	207
4.6.1	Probabilità incidentale	207
4.6.2	Indici di accessibilità	209
4.6.2.1	Risultato rappresentativo A	210
4.6.2.2	Risultato rappresentativo B	211
4.6.2.3	Risultato rappresentativo C	212
4.6.2.4	Risultato rappresentativo D	213
5	Conclusioni e possibili sviluppi	215
5.1	Conclusioni	215
5.1.1	Corrispondenza del modello con la realtà	216
5.1.2	Possibilità di rappresentazioni globali e parziali del modello.....	216
5.1.3	Metodo replicabile in altri contesti	217
5.2	Possibili sviluppi	217
5.2.1	Parametri e indicatori non considerati nel presente studio.....	217
5.2.2	Ambiti contestuali	217
5.2.3	Modello di stima della probabilità di accadimento eventi incidentali	218
5.2.4	Effetti delle condizioni meteorologiche.....	218
5.2.5	Verifica pesi, coefficienti e assunzioni	219
5.2.6	Proposta interventi migliorativi ai fini dell'accessibilità	219
5.2.7	Automazione del processo di calcolo	220
6	Bibliografia e sitografia	221

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 - Schema dello Strumento di Supporto alle Decisioni - SSD.....	18
Figura 2 - Contestualizzazione di una linea ferroviaria che influenza l'accessibilità in emergenza.....	22
Figura 3 - Struttura generale di un piano di gestione dell'emergenza.....	26
Figura 4 – Attività delle squadre di soccorso sul luogo dell'evento.....	27
Figura 5 - Scenario di incidente.....	28
Figura 6 - Scenario dell'evento incidentale.....	30
Figura 7 - Attività delle squadre di soccorso.....	30
Figura 8 - Utilizzo di appositi carrelli ferroviari per il trasporto dei feriti.....	31
Figura 9 – Squadre di soccorso attraverso il fiume.....	31
Figura 10 – Attività delle squadre di soccorso sul luogo dell'evento.....	32
Figura 11 – Soccorso di una vettura passeggeri caduta dal viadotto.....	33
Figura 12 – Scenario incidentale: deragliamento delle vetture a seguito della collisione.....	34
Figura 13 – Squadre di soccorso sul luogo dell'evento.....	34
Figura 14 – Scenario dell'evento incidentale.....	36
Figura 15 – Sversamento di sostanze pericolose nel fiume e attività di protezione.....	36
Figura 16 – Scenario incidentale.....	37
Figura 17 – Avvicinamento dei soccorsi al punto dell'incidente.....	38
Figura 18 – Attività di estinzione dell'incendio.....	38
Figura 19 - Scenario dell'incidente e attività di estinzione incendio.....	39
Figura 20 - Sede ferroviaria (a destra) e stradale (a sinistra) e punto in cui è avvenuta l'esplosione.....	40
Figura 21 - Effetto dell'esplosione di una ferro cisterna contenente greggio.....	40
Figura 22 – Scenario dell'incidente.....	41
Figura 23 – Disposizione di veicoli e attrezzature per il soccorso.....	42
Figura 24 – Squadre di soccorso durante le fasi dell'emergenza.....	42
Figura 25 – Scenario dell'incidente.....	43
Figura 26 – Presenza di una strada carrabile per l'avvicinamento alla ferrovia.....	43
Figura 27 – Squadre di soccorso e attrezzature.....	44
Figura 28 – Veicoli di soccorso a margine della ferrovia nel luogo dell'evento.....	44
Figura 29 - Scenario dell'incidente.....	45
Figura 30 – Veicoli di soccorso (a sinistra).....	45
Figura 31 – Squadre e attrezzature di soccorso.....	46
Figura 32 - Scenario dell'evento incidentale.....	47
Figura 33 - Attività delle squadre di soccorso.....	47
Figura 34 - Operazioni di rimozione del convoglio.....	48
Figura 35 - Scenario incidentale.....	49
Figura 36 - Squadre di soccorso nel luogo dell'evento.....	49
Figura 37 – Collisione tra i due convogli passeggeri.....	51
Figura 38 – Operazioni di soccorso.....	52
Figura 39 – Scenario dell'incidente.....	52
Figura 40 – Relazione tra sicurezza e risorse impegnate.....	55
Figura 41 – Componenti del rischio.....	55
Figura 42 – Definizione matematica del rischio: utilizzo della teoria degli insiemi. Fonte: Linee Guida ANAS 2009.....	56
Figura 43 – Evento di rischio attivo: incidente che coinvolge in trasporto di sostanze pericolose (Stazione Viareggio 2009).....	58

Figura 44 - Evento di rischio passivo: interruzione di una linea ferroviaria a seguito di un'alluvione (Ferrovia del Brennero 2012).....	58
Figura 45 - Eventi di rischio passivo e attivo.	59
Figura 46 - Componenti della vulnerabilità delle reti di trasporto.	60
Figura 47 – Vulnerabilità fisica: a causa di un evento critico una linea ferroviaria risulta interrotta.	61
Figura 48 - Vulnerabilità funzionale: a seguito di un evento rilevante uno dei due binari risulta danneggiato riducendo la capacità della linea.	62
Figura 49 – Inquadramento dell'analisi dell'accessibilità in emergenza.	65
Figura 50 - Interfaccia grafica dell'applicazione AV – HSIM: schermata principale.....	66
Figura 51 - AV – HSIM: vista laterale.	67
figura 52 - av – hsim: vista centrale.	67
Figura 53 - AV – HSIM: vista linea di contatto.	67
Figura 54 - Esempio di interfaccia grafica del programma.	69
Figura 55 - Processo iterativo di valutazione e mitigazione del rischio.	71
Figura 56 - Trend di curve isorischio ($R_2 > R_1$).	72
Figura 57 – Esempio di soglia di accettabilità del rischio.	72
Figura 58 - Trend di una curva di rischio (in nero) con riportate le attività di protezione (in viola), prevenzione (in verde) e mitigazione (in giallo).	73
Figura 59 - Diagramma di flusso di un processo decisionale.	77
Figura 60 - Elementi del Sistema Galleria.	83
Figura 61 – Flusso informativo dal luogo dell'evento alle forze istituzionali di pubblica utilità.....	85
Figura 62 - Flusso informativo dal luogo dell'evento alla sala operativa di FS.....	86
Figura 63 - Principali informazioni trasmesse in caso di evento.....	86
Figura 64 - Treno TSS 08 impiegato dalle ferrovie elvetiche.	87
Figura 65 – Treno TSS 08: carro serbatoio.	88
Figura 66 - Treno TSS 08: carro salvataggio per il soccorso di persone.	88
Figura 67 - Veicolo di soccorso bimodale in dotazione al Corpo Nazionale VVF.....	90
Figura 68 - APS collocato su pianale ferroviario.	90
Figura 69 - Utilizzo di APS su pianale ferroviario.	91
Figura 70 - Carro serbatoio per l'approvvigionamento idrico.....	91
Figura 71 - Processo di realizzazione degli indici.....	94
Figura 72 - Schema per la definizione dell'Indice di Accessibilità.	95
Figura 73 - Eventi critici di rischio attivo (in verde) e passivo (in rosso).....	98
Figura 74 – Struttura del diagramma a farfalla.	99
Figura 75 - Indici di accessibilità elaborati dal modello.	101
Figura 76 – Fasi per la formulazione dell'indice di accessibilità.	102
Figura 77 – Sistema spaziale bidimensionale archi buffer celle.....	103
Figura 78 – Rappresentazione di archi ferroviari e buffer.	103
Figura 79 – Rappresentazione di archi ferroviari, buffer e celle.	104
Figura 80 – Esempio numerico di archi ferroviari, buffer e celle.	105
Figura 81 – Esempio di rappresentazione di buffer e celle – caso A.	110
Figura 82 – Esempio di rappresentazione di buffer e celle – caso B.	110
Figura 83 - Esempio di rappresentazione di buffer e celle – caso C.	111
Figura 84 – Passaggio a livello.....	112
Figura 85 - Stazione ferroviaria di Vittuone - Arluno.....	113
Figura 86 – Rappresentazione dell'estensione rete stradale, in colore rosso, a lato della ferrovia.....	114

Figura 87 – Piazzale situato a lato della ferrovia.....	115
Figura 88 – Limiti di massa e sagoma al transito dei veicoli stradali.....	116
Figura 89 – Barriera ferroviaria valicabile.....	117
Figura 90 - Esempio di rimozione parziale di barriera ferroviaria.....	118
Figura 91 – Barriera fono assorbente non valicabile.....	119
Figura 92 - Uscite di sicurezza stradali fono assorbenti.....	120
Figura 93 - Uso del suolo agricolo.....	121
Figura 94 – Veicolo VSAF 3300M su MB UNIMOG U5000.....	122
Figura 95 – Terreno agricolo situato a lato della ferrovia.....	122
Figura 96 - Presenza di piantumazioni ai lati della ferrovia.....	123
Figura 97 – Uso del suolo non transitabile – risaia1.....	123
Figura 98 – Uso del suolo non transitabile – risaia 2.....	124
Figura 99 – Edifici/strutture situate a lato della ferrovia.....	124
Figura 100 - Calcolo del tempo di intervento dei Vigili del Fuoco.....	126
Figura 101 – Rappresentazione di archi e buffer.....	129
Figura 102 – Rappresentazione del parametro PL_i per ogni arco.....	130
Figura 103 –Intervallo di variabilità di IPL_i	131
Figura 104 – Esempio numerico di rappresentazione dei passaggi a livello sugli archi ferroviari.....	132
Figura 105 – Andamento funzione di utilità – arco i	133
Figura 106 – Esempio numerico di intervalli di variabilità di IPL_i	133
Figura 107 – Rappresentazione del parametro SF_i per ogni arco.....	135
Figura 108 –Intervallo di variabilità di ISF_i	136
Figura 109 – Esempio numerico di rappresentazione di stazioni o fermate sugli archi ferroviari.....	137
Figura 110 – Andamento funzione di utilità – arco i	138
Figura 111 – Esempio numerico di intervalli di variabilità di ISF_i	138
Figura 112 – Rappresentazione del parametro EST per ogni cella.....	140
Figura 113 – Rappresentazione del parametro $SEST_i$ (b $sx+b$ dx).....	141
Figura 114 - Intervalli di variabilità di IES_i (b $sx+b$ dx).....	142
Figura 115 – Rappresentazione di $SMINO$, $SMAX$ e SM	143
Figura 116 - Rappresentazione di IES_i e $IES_{i,b}$	144
Figura 117 – Valori di estensione stradale EST nei buffer e nelle celle.....	144
Figura 118 - Esempio di calcolo del parametro $SEST_i$ (b $sx+b$ dx).....	145
Figura 119 - Rappresentazione numerica di $SEST_i$ (b $sx+b$ dx).....	145
Figura 120 - Esempio numerico di intervalli di variabilità di $IES_{i,b}$ $sx+b$ dx	146
Figura 121 - Esempio numerico di calcolo di $SMINO$, $SMAX$ e SM	146
Figura 122 – Andamento funzione di utilità – buffer 1.....	147
Figura 123 – Andamento funzione di utilità - buffer 2.....	148
Figura 124 - Andamento funzione di utilità - buffer 3.....	148
Figura 125 - Andamento funzione di utilità - buffer 4.....	149
Figura 126 - Andamento funzione di utilità - buffer 5.....	149
Figura 127 - Andamento funzione di utilità - buffer 6.....	150
Figura 128 – Esempio di calcolo di $IES_{i,b}$ e IES_i	150
Figura 129 - Rappresentazione di US_{i,b sx,s e US_{i,b dx,s	152
Figura 130 – Esempio di classi di suolo diverse presenti nella stessa cella.....	154
Figura 131 - Rappresentazione di EUS_{i,b sx,s e EUS_{i,b dx,s	155
Figura 132 - Rappresentazione di IUS_{1,b sx,s e $IUS_{1,(b-1$ $dx),s$	156

Figura 133 - Rappresentazione di $IUS_{1,(b\ s_x+b\ dx),s}$ e $IUS_{i,(1\ s_x+1\ dx),s}$	157
Figura 134 - Intervalli di variabilità di $IFUS_{i,(b\ s_x+b\ dx),s}$	158
Figura 135 – Rappresentazione di $UMINO$, $UMAX$ e UM	159
Figura 136 - Rappresentazione di $IFUS_{i,b}$ e IUS_i	159
Figura 137 – Esempio numerico di rappresentazione di valori $US_{i,b\ s_x,s}$ e $US_{i,b\ dx,s}$	160
Figura 138 - Esempio numerico di $EUS_{i,b\ s_x,s}$ e $EUS_{i,b\ dx,s}$	160
Figura 139 - Esempio numerico di calcolo di $IUS_{1,3\ s_x,s}$ e $IUS_{1,2\ s_x,s}$	161
Figura 140 - Rappresentazione dei valori di $IUS_{i,b\ s_x,s}$ e $IUS_{i,b,dx,s}$	162
Figura 141 - Rappresentazione numerica delle coppie di valori $IUS_{1,b\ s_x} - IUS_{1,b\ dx}$ e $IUS_{i,1\ s_x} - IUS_{i,1\ dx}$	162
Figura 142 - Rappresentazione numerica di $IUS_{i,(b\ s_x+b\ dx),s}$	163
Figura 143 - Esempio numerico di intervalli di variabilità di $IFUS_{i,(b\ s_x+b\ dx),s}$	163
Figura 144 - Esempio di calcolo di $UMINO$, $UMAX$ e UM	164
Figura 145 – Andamento funzione di utilità – buffer 1	165
Figura 146 – Andamento funzione di utilità - buffer 2	165
Figura 147 - Andamento funzione di utilità - buffer 3	166
Figura 148 - Andamento funzione di utilità - buffer 4	166
Figura 149 - Andamento funzione di utilità - buffer 5	167
Figura 150 - Andamento funzione di utilità - buffer 6	167
Figura 151 – Esempio di calcolo di $IFUS_{i,b}$ (in alto) e IUS_i (in basso)	168
Figura 152 – Rappresentazione dei punti di partenza O_p e arrivo $D_{i,b\ s_x}$ e $D_{i,b\ dx}$ dei soccorsi	169
Figura 153 – Rappresentazione dei tempi di arrivo del buffer 1, b e B	171
Figura 154 – Rappresentazione dei tempi di arrivo minimi dei buffer 1, b e B relativi all'arco 1	172
Figura 155 - Intervalli di variabilità di $IARR_{i,b\ s_x/dx}$	173
Figura 156 – Rappresentazione di $TMINO$, $TMAX$ e TM	173
Figura 157 - Rappresentazione di $IARR_i$ e $IARR_{i,b}$	174
Figura 158 - Esempio numerico di calcolo dei tempi di arrivo $T_{i,b\ s_x}$ e $T_{i,b\ dx}$	175
Figura 159 - Esempio numerico di calcolo di $T_{i,b\ s_x/dx}$	175
Figura 160 - Rappresentazione sintetica di $T_{i,b\ s_x/dx}$	176
Figura 161 - Esempio numerico di intervalli di variabilità di $IARR_{i,b\ s_x/dx}$	176
Figura 162 – Esempio numerico di calcolo di $TMINO$, $TMAX$ e TM	177
Figura 163 – Andamento funzione di utilità – buffer 1	178
Figura 164 – Andamento funzione di utilità - buffer 2	178
Figura 165 - Andamento funzione di utilità - buffer 3	179
Figura 166 - Andamento funzione di utilità - buffer 4	179
Figura 167 - Andamento funzione di utilità - buffer 5	180
Figura 168 - Andamento funzione di utilità - buffer 6	180
Figura 169 – Esempio di calcolo di $IARR_{i,b}$ e $IARR_i$	181
Figura 170 - Esempio di percorrenze sulle tratte ferroviarie	186
Figura 171 - Tracciato ferroviario della linea storica Torino – Milano	188
Figura 172 – Tracciato ferroviario (in giallo) della linea storica Torino – Milano: da Milano al confine regionale (fiume Ticino)	188
Figura 173 - Ortofoto Regione Lombardia	191
Figura 174 - Rappresentazione delle classi di uso $DUSAF\ 3.0$ ai margini della ferrovia (in rosso)	192
Figura 175 - Grafo ferroviario Regione Lombardia	194
Figura 176 - Grafo stradale Regione Lombardia	195
Figura 177 - Stazioni o fermate (SF) presenti sulla linea ferroviaria TO-MI	196

Figura 178 - Dettaglio di una SF.....	196
Figura 179 - Passaggi a livello (PL) presenti sulla linea ferroviaria TO-MI.....	197
Figura 180 - Dettaglio di un PL.....	197
Figura 181 - Dislocazione sul territorio di comandi e distaccamenti VVF provincia Milano.....	198
Figura 182 – Comandi e distaccamenti VVF situati in prossimità della linea ferroviaria TO-MI.....	198
Figura 183 - Dettaglio di un distaccamento VVF.....	199
Figura 184 – Elaborazioni con strumento GIS: principali funzioni utilizzate.....	200
Figura 185 – Segmentazione della ferrovia in archi di lunghezza pari a 100 metri.....	200
Figura 186 - Estensione dell'area di studio.....	201
Figura 187 - Calcolo dell'estensione stradale all'interno di una cella.....	202
Figura 188 - Punto baricentro (destinazione) della rete stradale all'interno di una cella.....	202
Figura 189 - Calcolo del tempo di arrivo dei Vigili del Fuoco sul luogo dell'incidente (itinerario in blu).....	203
Figura 190 – Esempio del foglio di calcolo per elaborazione degli indicatori e degli indici di accessibilità.....	203
Figura 191 - Mappa tematica relativa alla probabilità di accadimento degli eventi critici.....	207
Figura 192 – Legenda probabilità di accadimento eventi incidentali.....	208
Figura 193 - Mappa tematica relativa agli indici di accessibilità IAS e IAC.....	209
Figura 194 - Risultato rappresentativo A.....	210
Figura 195 - Risultato rappresentativo B.....	211
Figura 196 - Risultato rappresentativo C.....	212
Figura 197 - Risultato rappresentativo D.....	214

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 – Elenco degli eventi critici e delle cause ai sensi del DM 28 ottobre 2005.....	100
Tabella 2 - Parametri del modello di accessibilità.....	106
Tabella 3 – Indicatori del modello di accessibilità.....	107
Tabella 4 – Pesi di importanza relativa degli indicatori.....	127
Tabella 5 – Valori di sintesi dell'indicatore IPL_i	134
Tabella 6 – Valori di sintesi dell'indicatore ISF_i	139
Tabella 7 – Esempio di calcolo di SM	147
Tabella 8 – Valori di sintesi dell'indicatore IES_i	151
Tabella 9 - Esempio di calcolo di UM	164
Tabella 10 – Valori di sintesi dell'indicatore IUS_i	168
Tabella 11 – Esempio di matrice origine – destinazione con tempi di percorrenza buffer 1 sx.....	170
Tabella 12 - Esempio di calcolo di TM	177
Tabella 13 – Valori di sintesi dell'indicatore $IARR_i$	181
Tabella 14 – Numero di incidenti ferroviari avvenuti nel periodo 2005-2010 sulla rete nazionale. Fonte ANSF.....	184
Tabella 15 – Sintesi degli eventi critici avvenuti sulla rete nazionale anni 2005-2010.....	185
Tabella 16 - Media aritmetica degli eventi critici avvenuti sulla rete nazionale anni 2005-2010.....	185
Tabella 17 - Classi di uso del suolo (DUSAF 2) e coefficiente di accessibilità.....	193
Tabella 18 - Eventi critici avvenuti sulla rete nazionale anni 2005-2010.....	204
Tabella 19 - Tratte omogenee e treni km anno espressi in miliardi.....	205
Tabella 20 - Tratte omogenee e numero di eventi critici annui per tratta.....	206
Tabella 21 – Valori di probabilità di accadimento annui per ciascuno degli eventi considerati.....	208
Tabella 22 – Legenda indici di accessibilità.....	209

Tabella 23 - Indici e indicatori relativi al risultato rappresentativo A.....	211
Tabella 24 - Indici e indicatori relativi al risultato rappresentativo B.....	212
Tabella 25 - Indici e indicatori relativi al risultato rappresentativo C.....	213
Tabella 26 – Indici e indicatori relativi al risultato rappresentativo D.....	214

ABSTRACT

Nel presente lavoro di ricerca si propone un modello per il *calcolo* dell'accessibilità delle tratte a cielo aperto di una linea ferroviaria in condizioni di emergenza utilizzando il sistema stradale.

Accade spesso, infatti, che una tratta ferroviaria sia collocata in un contesto poco antropizzato dove le *vie di accesso* possono talvolta risultare impraticabili per alcune tipologie di veicoli di soccorso.

L'obiettivo consiste nell'implementare uno strumento innovativo di Supporto alle Decisioni utile per conoscere gli archi di una rete caratterizzati da limitata o nulla accessibilità al fine di identificare interventi di carattere gestionale e/o infrastrutturale finalizzati al miglioramento dell'accessibilità stessa.

Gli ambiti di utilizzo dello strumento riguardano una fase *pre-evento* e una *post-evento*: nella prima è possibile pianificare e programmare gli interventi mentre la seconda riguarda la gestione congiunta dell'emergenza in cui è richiesto l'arrivo delle squadre di soccorso nel minor tempo possibile.

Tra i Soggetti individuati come *potenziali utenti* dello strumento ci sono, ad esempio, i Gestori dell'Infrastruttura Ferroviaria, le Imprese Ferroviarie, i Servizi di Pronto Intervento, la Protezione Civile e le Prefetture.

Il metodo analizza le caratteristiche territoriali e contestuali in cui si trova la linea identificando in primo luogo quei parametri che concorrono all'implementazione dell'Indice di Accessibilità per ogni arco ferroviario. Il secondo passo consiste nell'aggregazione dei parametri in Indicatori i quali mediante l'impiego di pesi di importanza relativa concorrono alla determinazione dell'Indice.

L'analisi si basa su un approccio comparativo che mette in relazione il valore di accessibilità tra gli archi identificando le priorità e stabilendo quindi una gerarchia degli interventi. La valutazione fornita dall'Indice di Accessibilità consiste in un *giudizio* numerico – adimensionale per ogni arco, rappresentato mediante specifiche mappe tematiche in grado di restituire un'immediata visualizzazione delle criticità.

Al fine di valutare la validità e la consistenza della metodologia proposta, lo strumento è stato applicato alla linea storica Torino – Milano: l'applicazione ha dimostrato una buona corrispondenza tra il modello proposto e il *livello di accessibilità* atteso.

1 INTRODUZIONE

“I trasporti sono essenziali per la competitività economica e per gli scambi commerciali, economici e culturali. Questo settore economico rappresenta circa 1000 miliardi di euro, ossia più del 10 % del prodotto interno lordo dell’Unione e da lavoro a 10 milioni di persone. I trasporti contribuiscono anche a ravvicinare i cittadini europei e, come politica comune, costituiscono un fondamento del progetto europeo”. Loyola de Palacio - LIBRO BIANCO COMMISSIONE EUROPEA - La politica europea dei trasporti fino al 2010: il momento delle scelte.

Il sistema dei trasporti di un territorio ne costituisce l’ossatura in quanto permette lo spostamento di persone e di beni. Quando si verifica un evento rilevante di qualunque natura, la rete stradale e quella ferroviaria sono soggette a danni e inconvenienti di vario tipo che in molti casi arrivano a comprometterne la funzionalità.

Le reti di trasporto vengono utilizzate quotidianamente dalla totalità della popolazione e hanno quindi un certo livello di esposizione al rischio, definito anche dal numero degli utenti della rete che possono subire un danno durante le eventuali situazioni anomale.

La Politica dei trasporti a livello comunitario è da diversi anni al centro di confronti e dibattiti sui costi che la collettività deve sostenere al fine di garantire un adeguato livello di sicurezza nelle diverse modalità di trasporto - stradale, ferroviario, navale, aereo.

Seppur l’ambito ferroviario, a differenza di quello stradale, sia caratterizzato da un numero di fatalità decisamente inferiore, rimane comunque la necessità di ridurre i *potenziali effetti* in termini di possibile danno al verificarsi di un evento rilevante ¹.

Se da un lato il sistema ferroviario è caratterizzato da basse probabilità di accadimento di un evento², dall’altro è necessario considerare che il potenziale danno in termini di esposizione umana - utenti - non è affatto trascurabile soprattutto se si considerano i convogli passeggeri che possono arrivare ad avere una capacità superiore agli 800 posti³.

¹ Rapporto sull’incidentalità nei trasporti; Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2009

² I livelli di sicurezza del sistema ferroviario comunitario sono generalmente elevati, in particolare rispetto a quelli del trasporto su strada; Direttiva 2004/49/CE del Parlamento Europeo e del consiglio del 29 aprile 2004 relativa alla sicurezza delle ferrovie comunitarie.

³ Una composizione di un treno Alta Capacità con carrozze a due piani formato da semipilota + 4 carrozze + locomotiva ha una capienza massima di 842 persone; Trenitalia: “Le nuove Carrozze a due piani per i Treni ad Alta Capacità - Vivalto”.

1.1 OBIETTIVO DELLA RICERCA

L'obiettivo della ricerca consiste nell'implementazione di uno Strumento di Supporto alle Decisioni – SSD⁴ in grado di valutare la vulnerabilità delle reti ferroviarie a seguito di eventi rilevanti, in termini di accessibilità utilizzando il sistema stradale.

Lo strumento è in grado di stimare valori di probabilità di accadimento di un evento rilevante in ambito ferroviario e il livello di accessibilità della rete stessa utilizzando quella stradale come misura di mitigazione delle potenziali conseguenze (danno atteso).

Il risultato delle elaborazioni consiste nell'implementazione di mappe tematiche in grado di rappresentare il valore di probabilità di accadimento di un evento critico e un valore di accessibilità, entrambi associati al generico elemento lineare ferroviario (arco).

L'utilizzo dello strumento, indipendentemente dal soggetto che esegue l'analisi - Gestore dell'Infrastruttura o Servizi di Pronto Intervento - permette di pianificare interventi di carattere gestionale e/o infrastrutturale finalizzati al miglioramento dell'accessibilità della rete ferroviaria.

Dall'osservazione e valutazione di tale mappe è possibile stabilire una gerarchia degli interventi da effettuare definendo eventualmente delle priorità.

Il metodo che sta alla base dello strumento di supporto prevede quindi lo sviluppo di due modelli. Il primo riguarda l'analisi dell'incidentalità ferroviaria in relazione a specifici eventi (interni ed esterni al sistema ferroviario), il secondo la stima del livello di connessione e quindi accessibilità tra rete ferroviaria e rete stradale evidenziando i *punti di contatto* - tra i due sistemi di trasporto - in cui è possibile accedere dal sistema a quello ferroviario.

Per quanto riguarda il calcolo della probabilità di eventi incidentali critici è stato implementato un sotto modello di calcolo che a partire da dati, statistiche e serie storiche è in grado di fornire elementi utili per la stima delle frequenze di accadimento di alcuni eventi critici.

Il *livello* di accessibilità è invece costituito da un Indice di Accessibilità - IA, che determina quindi il grado di vulnerabilità di una linea ferroviaria⁵. La struttura del modello di calcolo è caratterizzata da un approccio comparativo in quanto il valore adimensionale dell'IA determinato, non presenta un significato assoluto rilevante, ma deve essere

⁴ I SSD sono descritti nel paragrafo 2.8.

⁵ Per linea ferroviaria si intende un'infrastruttura atta a far viaggiare treni o altri convogli ferroviari tra due località di servizio. Le linee possono essere: a semplice binario, a doppio binario o avere più di due binari. La linea ferroviaria è composta dalla sede ferroviaria, dalle infrastrutture tecnologiche e da impianti funzionali per servizi merci e viaggiatori.

opportunamente confrontato al fine di determinare gli archi o le tratte della rete su cui effettuare analisi di dettaglio e concentrare le risorse per migliorare l'accessibilità.

Lo Strumento è stato implementato seguendo una logica flessibile e modulare con la possibilità di personalizzare e modificare alcuni valori dei parametri in funzione delle specifiche esigenze dell'analista o addirittura aggiungerne altri in futuro.

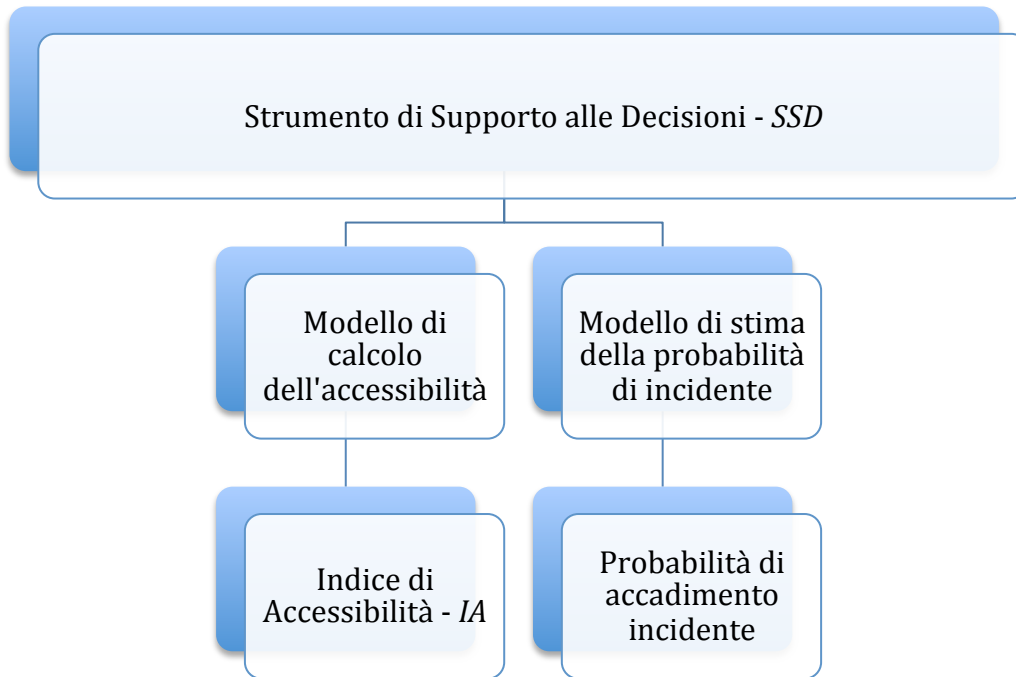


Figura 1 - Schema dello Strumento di Supporto alle Decisioni - SSD.

1.2 STRUTTURA DEL LAVORO DI TESI

L'analisi di vulnerabilità di una rete di trasporto è una procedura tanto più complessa quanto più sono le variabili e i parametri considerati.

In condizioni di emergenza, l'accessibilità di un sistema di trasporto, intesa come sotto insieme della vulnerabilità, può essere valutata considerando l'impiego di diversi sistemi di trasporto per raggiungere il punto in cui si è verificato l'evento critico.

In alcuni casi, quando possibile, si utilizza la stessa rete ferroviaria con specifici veicoli adibiti al Pronto Intervento (cfr. paragrafo 2.10).

Talvolta, quando l'evento presenta criticità importanti e le condizioni ambientali e territoriali lo consentono, possono essere impiegati elicotteri⁶. In ogni caso quest'ultima modalità di intervento è quasi sempre finalizzata all'assistenza a feriti – persone coinvolte

⁶ L'elisoccorso è l'attività di soccorso sanitario effettuata mediante l'impiego di elicotteri dedicati. Lo scopo principale dei servizi di elisoccorso è duplice:

- garantire un'assistenza sanitaria ad alto livello di intensività con tempi di intervento molto rapidi, specie in località isolate o remote;
- permettere una veloce ospedalizzazione della vittima alla struttura ospedaliera idonea, anche se questa è distante dal luogo dell'evento.

– e non alla messa in sicurezza dell' area interessata. Si pensi ad esempio a una collisione tra convogli che presenta anche un principio d'incendio: in questo caso sarà necessario garantire sul posto mezzi estinguenti e attrezzature specifiche per il taglio delle lamiere.

La rete stradale, infine, costituisce spesso la soluzione più pratica ed efficace poiché permette di *organizzare* il soccorso impiegando idonei veicoli stradali. È evidente che il buon esito delle operazioni dipende anche dalla possibilità di poter sopraggiungere sul luogo dell'incidente o quantomeno avvicinarsi il più possibile con veicoli stradali per poi procedere eventualmente a piedi con le attrezzature necessarie.

Per tali ragioni nel presente lavoro si concentra l'attenzione su questo ultimo caso, in cui l'accessibilità della rete ferroviaria viene valutata considerando la presenza di punti di contatto con quella stradale.

Infine si anticipa che in tale lavoro sono state effettuate alcune scelte e ipotesi che ne hanno permesso lo sviluppo, ampiamente illustrate nei prossimi capitoli. Il presente lavoro di tesi si struttura nelle seguenti parti:

Stato dell'arte: descrizione dei riferimenti presenti in letteratura scientifica in merito alla definizione di rischio trasporti e misure di mitigazione. Illustrazioni dei presupposti e delle motivazioni alla base del presente studio. Analisi dell'impianto normativo ed eventuali carenze. Descrizione dei principali strumenti di pianificazione e gestione dell'emergenza in ambito ferroviario.

Metodo di analisi: presentazione dei principi generali alla base dei Sistemi di Supporto alle Decisioni. Individuazione dei possibili soggetti destinatari, ambiti di applicazione e assunzioni per il metodo proposto. Analisi delle peculiarità che caratterizzano il sistema ferroviario.

Formulazione del modello di calcolo: individuazione dei parametri e degli indicatori. Presentazione del sistema di valutazione e ponderazione degli indicatori. Struttura dell'Indice di Accessibilità.

Caso studio: Applicazione del modello alla linea ferroviaria storica Milano - Torino. Analisi critica dei risultati ottenuti e validazione del metodo.

Conclusioni e possibili sviluppi: proposte di approfondimenti da effettuare su specifici elementi del modello.

1.3 IL SISTEMA FERROVIARIO DEI TRASPORTI: CARATTERISTICHE GENERALI

Con *sistema di trasporto* si intende genericamente l'insieme degli elementi e delle loro reciproche interazioni fisiche e organizzative che permettono di realizzare il trasporto stesso. Nel caso più generale, per effettuare un trasporto occorrono un *mezzo di trasporto*, più propriamente denominato veicolo, e *una via di trasporto* ⁷.

La generica attività di trasporto si manifesta con il traffico, costituito dal movimento dei veicoli sulla *via*.

Il concetto elementare di *via* può essere generalizzato in quello più complesso di *infrastruttura di trasporto* composta da elementi lineari, cioè la *via* vera e propria, e da elementi puntuali, i nodi: l'insieme di vie e di nodi viene spesso denominato rete infrastrutturale o rete di trasporto.

I veicoli ferroviari sono appoggiati all'infrastruttura fissa mediante ruote e circolano su di essa con guida vincolata grazie alla presenza di due guide metalliche - rotaie - che impediscono la traslazione laterale delle ruote e pertanto vincolano rigidamente il veicolo permettendogli solamente lo spostamento longitudinale.

La *via* guidata conferisce al modo ferroviario alcuni vantaggi che ne hanno permesso l'affermazione e lo sviluppo, perdurante tuttora, ma anche un forte limite alla versatilità di impiego, che lo ha reso vulnerabile di fronte alla concorrenza del modo stradale.

Un primo vantaggio è dato dal contenimento dell'attrito (ruota – rotaia) entro limiti ridottissimi: questa circostanza ha permesso di sfruttare la potenza della macchina a vapore, di per sé scarsa a causa del suo limitato rendimento, per trasportare masse ragguardevoli a velocità altrettanto apprezzabili.

L'aumento della massa rimorchiabile e della velocità verso valori irraggiungibili da altri modi terrestri, dell'ordine del migliaio di tonnellate a oltre 300 km/h, è stato attuabile grazie al secondo vantaggio offerto dal vincolo: la possibilità di captare energia elettrica a bordo del veicolo in movimento e quindi di sfruttare la trazione elettrica, capace di rendimenti molto elevati e di *potenze specifiche* altissime. Questo elemento fa del modo ferroviario il sistema di trasporto rapido di massa per eccellenza (in ambito terrestre).

Un terzo vantaggio è rappresentato dalla possibilità di ridurre al minimo gli ingombri trasversali della via. Esso è però controbilanciato dalla necessità di realizzare terminali e

⁷ Dispensa del Corso Tecnica ed Economia e Trasporti, R. Maja, 2010.

impianti nodali caratterizzati da un notevole sviluppo longitudinale (anche qualche centinaio di metri), a causa dell'elevata lunghezza dei treni e del ridotto angolo di incidenza dei raccordi che permettono il loro trasferimento da una via all'altra⁸.

Infine, l'olonomia del vincolo⁹ rende possibile, con un grado di complessità tecnologica tutto sommato accettabile, la realizzazione di sistemi completamente automatici, nei quali i veicoli, privi di conducenti, sono *manovrati* da impianti fissi e sono solamente supervisionati da personale stanziato a terra situato nelle centrali operative di controllo. Si tratta di un traguardo utilizzabile con convenienza solamente in alcune situazioni di estensione limitata, cioè le ferrovie metropolitane urbane, ma anche la sola possibilità di ottenere questo risultato apre comunque la strada a soluzioni tecnologiche che rendono fortemente controllata la circolazione a vantaggio soprattutto della sicurezza.

L'elemento stesso, la via, che offre tutti i vantaggi sopra accennati contiene in sé un fattore sfavorevole che da solo rappresenta anche il limite di tutto il sistema ferroviario. La guida vincolata tra veicolo e via, infatti, impedisce in pratica l'accesso all'infrastruttura da parte di veicoli condotti direttamente dagli utenti del servizio (come invece avviene nel trasporto stradale).

In sostanza *manca* al modo ferroviario la possibilità di costituire l'evoluzione tecnologica del trasporto individuale elementare, cioè del singolo individuo che si muove autonomamente sotto la propria autodeterminazione e la propria responsabilità, in quanto la complessità del sistema impone la presenza di impianti e infrastrutture non direttamente utilizzabili dagli utenti ma solamente per il tramite di personale specializzato.

Circostanza questa, che fa del trasporto ferroviario un modo collettivo nel quale i veicoli sono condotti da persone appositamente incaricate e istruite, la via è accessibile solamente in alcuni punti predisposti e il servizio è programmato nel tempo.

1.4 GESTIONE DELL'EMERGENZA FERROVIARIA E ACCESSIBILITÀ DEI SOCCORSI

Le limitazioni di accessibilità¹⁰ al sistema ferroviario, descritte nel paragrafo precedente, si riferiscono alla componente trasportistica del sistema in condizioni di normale esercizio.

⁸ I raggi di curvatura di una linea ferroviaria dipendono anche dalla velocità di percorrenza dei convogli: per una velocità di 140 km/h il raggio è pari a circa 2000 m.

⁹ La guida vincolata consente solo alcuni movimenti del veicolo definiti dal tracciato (binari).

¹⁰ Il concetto di accessibilità viene descritto nel capitolo 2.

Tuttavia è necessario precisare che le peculiarità e le limitazioni del sistema descritte, possono provocare *complicazioni* anche in condizioni di traffico perturbato e più nello specifico in condizioni di emergenza.



Figura 2 - Contestualizzazione di una linea ferroviaria che influenza l'accessibilità in emergenza.

A seguito di un evento rilevante che interessa il sistema ferroviario, l'attività di primo soccorso, caratterizzata dall'impiego immediato sul luogo dell'evento delle risorse disponibili sul territorio, può presentare delle criticità legate alla scarsa razionalizzazione degli interventi e al ritardo nel garantire l'assistenza alla popolazione direttamente o non direttamente coinvolta.

Nel caso in cui l'evento calamitoso sia un *incidente*, che ha caratteristiche di non prevedibilità e di casualità di accadimento sul territorio, bisogna necessariamente tener conto di una serie di fattori che condizionano ulteriormente le modalità di intervento e che potrebbero, se trascurati, amplificare le criticità. Tali fattori possono essere:

- difficile accessibilità al luogo dell'incidente da parte dei veicoli di soccorso;
- necessità di impiego di veicoli e attrezzature speciali;
- presenza sul luogo dell'incidente di un elevato numero di operatori e di non addetti ai lavori;
- estensione ridotta della zona interessata dall'incidente, cui corrisponde la massima concentrazione delle attività finalizzate alla ricerca e al soccorso di feriti e vittime, alla quale si contrappone, nella maggior parte dei casi, un'area di ripercussione anche molto ampia, con il coinvolgimento di un numero elevato di persone che necessitano di assistenza;
- fattori meteo climatici avversi;
- presenza di sorgenti di rischio secondario e derivato – effetto domino.

Ciò implica necessariamente un'attività di coordinamento delle operazioni sul luogo dell'incidente, fin dai primi momenti dell'intervento, che non può essere improvvisata a evento in corso, ma che è necessario pianificare in via preventiva individuando precise figure di responsabilità.

In occasione di un evento calamitoso di qualunque tipo la rete ferroviaria e quella stradale possono quindi essere utilizzate in modo sinergico per soddisfare due esigenze essenziali dei soggetti coinvolti nella gestione dell'emergenza:

- realizzare e garantire le condizioni che permettono alle squadre di soccorso di raggiungere con tutti i mezzi necessari (e disponibili) il luogo dell'evento,
- permettere l'evacuazione in sicurezza delle persone coinvolte - utenti e personale di servizio.

Per le motivazioni viste nei paragrafi precedenti è evidente che lo studio dell'accessibilità alla rete ferroviaria in condizioni di emergenza costituisce un elemento essenziale di un piano.

Nell'ipotesi di un incidente di qualsivoglia natura, infatti, il *successo* delle operazioni di soccorso è legato essenzialmente a due fattori:

- tempo di intervento;
- efficacia del soccorso.

Entrambi i fattori sono funzione del livello di accessibilità della ferrovia, in quanto sia il tempo di arrivo - intervento - delle squadre di soccorso, sia i mezzi con cui sarà possibile sopraggiungere sul luogo dell'evento – efficacia – dipendono dalla possibilità o meno di *avvicinarsi* alla ferrovia.

L'analisi della vulnerabilità¹¹, e quindi accessibilità, della rete ferroviaria è oggi prevalentemente orientata verso la valutazione del rischio connesso alle gallerie a partire dalle indicazioni fornite nel Decreto Ministeriale 25 ottobre 2005 - "Sicurezza nelle gallerie ferroviarie" del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti.

Per quanto riguarda invece le tratte a cielo aperto non esiste attualmente un impianto normativo in grado di fornire indicazioni circa le modalità di valutazione dell'accessibilità della tratta ferroviaria a seguito di un evento rilevante utilizzando il sistema stradale.

¹¹ La definizione di vulnerabilità è riportata nel capitolo 2.

A tal fine l'analisi dell'accessibilità della rete ferroviaria è finalizzata allo studio delle caratteristiche dell'intero sistema ferroviario che, come descritto in precedenza, comprende:

- l'infrastruttura;
- il veicolo;
- l'organizzazione,

e dall'ambito territoriale e contestuale costituito anche dal sistema stradale che rappresenta una valida *via di accesso o avvicinamento* al sedime ferroviario in caso di necessità.

L'utilizzo del sistema stradale permette, dove possibile, l'arrivo dei Servizi di Pronto Intervento nel più breve tempo possibile sul luogo in cui si è verificato l'evento critico valutando inoltre la possibilità di poter usufruire di spazi adeguati e attrezzati per il posizionamento dei mezzi e delle attrezzature.

1.4.1 I PIANI DI EMERGENZA

Una corretta gestione delle emergenze, a seguito di eventi rilevanti avvenuti sulla rete ferroviaria, richiede quindi la redazione di specifici piani di emergenza finalizzati a raggiungere un adeguato livello di sicurezza.

In linea generale un piano di emergenza è l'insieme delle procedure operative di intervento per fronteggiare una qualsiasi calamità attesa in un determinato territorio.

Il piano d'emergenza recepisce il programma di previsione e prevenzione ed è lo strumento che consente alle autorità di predisporre e coordinare gli interventi di soccorso a tutela della popolazione e dei beni in un'area *potenzialmente* soggetta a specifici rischi. e psicologici.

Obiettivi del piano

Il principale obiettivo è quello di garantire con ogni mezzo il mantenimento del livello di vita *civile* messo in crisi da una situazione che comporta gravi disagi fisici. Un piano per le operazioni di emergenza è un documento che:

- assegna la responsabilità alle organizzazioni e agli individui per fare azioni specifiche, progettate nei tempi e nei luoghi, in un'emergenza che supera la capacità di risposta o la competenza di una singola organizzazione;
- descrive come vengono coordinate le azioni e le relazioni fra organizzazioni;

- descrive in che modo proteggere le persone e la proprietà in situazioni di emergenza e di disastri;
- identifica il personale, l'equipaggiamento, le competenze, i fondi e altre risorse disponibili da utilizzare durante le operazioni di risposta;
- identifica le iniziative da mettere in atto per migliorare le condizioni di vita degli eventuali evacuati dalle loro abitazioni.

Struttura e contenuti del piano

Il piano è un documento in continuo aggiornamento, che deve tener conto dell'evoluzione dell'assetto territoriale e delle variazioni negli scenari attesi. Anche le esercitazioni contribuiscono all'aggiornamento del piano perché ne convalidano i contenuti e valutano le capacità operative e gestionali del personale. La formazione aiuta, infatti, il personale che sarà impiegato in emergenza a familiarizzare con le responsabilità e le mansioni che deve svolgere in emergenza.

Un piano deve essere sufficientemente flessibile per essere utilizzato in tutte le emergenze, incluse quelle impreviste, e semplice in modo da divenire rapidamente operativo. Il piano si articola in tre parti fondamentali:

- Parte generale: raccoglie tutte le informazioni sulle caratteristiche e sulla struttura del territorio;
- Lineamenti della pianificazione: stabiliscono gli obiettivi da conseguire per dare un'adeguata risposta di protezione civile ad una qualsiasi situazione d'emergenza, e le competenze dei vari operatori;
- Modello d'intervento: assegna le responsabilità decisionali ai vari livelli di comando e controllo, utilizza le risorse in maniera razionale, definisce un sistema di comunicazione che consente uno scambio costante di informazioni.

Il piano di emergenza è quindi un valido strumento che permette di pianificare le operazioni di soccorso da attuare in funzione dell'evento considerato (Figura 3).

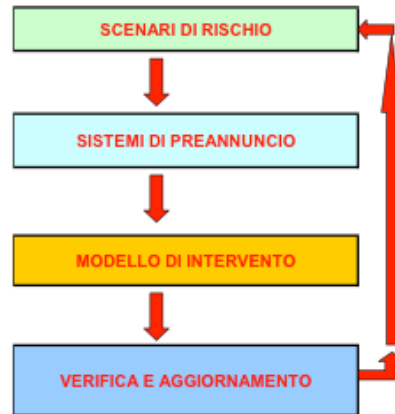


Figura 3 - Struttura generale di un piano di gestione dell'emergenza.

1.4.2 PRINCIPALI EVENTI INCIDENTALI

Negli ultimi anni la cronaca nazionale e internazionale ha confermato quanto gli incidenti in ambito ferroviario siano, talvolta, caratterizzati da una evidente difficoltà nella gestione dell'emergenza.

I principali eventi evidenziano come l'accessibilità al sistema ferroviario utilizzando veicoli di soccorso stradali non sia sempre garantita sull'intera linea per la presenza di *condizioni al contorno* che limitano o talvolta non permettono il passaggio di persone, veicoli e attrezzature.

Di seguito si riporta una breve rassegna dei principali incidenti ferroviari avvenuti negli ultimi anni in ambito nazionale e internazionale che hanno evidenziato l'importanza dell'accessibilità sul luogo dell'evento da parte delle squadre di soccorso.

Nella maggior parte dei casi, infatti, l'analisi tecnica dell'evento incidentale conferma come la risoluzione dello stesso sia stata complicata dalla difficoltà di poter sopraggiungere sul punto dell'incidente mettendo in sicurezza l'area ed evacuando le persone coinvolte.

Italia Linea Verona – Brennero

Il 13 dicembre 2006 si è verificato un tamponamento tra due convogli merci sulla linea del Brennero al confine fra il Trentino e il Veneto nei pressi di Avio.

Dai rilievi effettuati sulla dinamica di incidente risulterebbe che l'impatto possa essere stato causato da un errore umano.

In particolare, secondo l'ipotesi investigativa, il conducente di uno dei due treni merci non avrebbe rispettato un segnale di via impedita, *tamponando* qualche chilometro più avanti l'altro convoglio merci a sua volta fermo a un segnale di via impedita.

Il bilancio della collisione è stato di due decessi: i macchinisti del convoglio che ha tamponato.

A seguito del violento impatto i Vigili del Fuoco hanno dovuto estrarre faticosamente dalle lamiere i corpi delle vittime.

L'aggravante principale di questo evento ha riguardato la presenza di sostanze pericolose: il Difenilmetano Diisocianato, meglio noto come MDI, utilizzato per produrre il poliuretano.

In Figura 4 e Figura 5 sono riportate alcune immagini dello scenario incidentale, delle attività di gestione dell'emergenza e soprattutto dell'importanza del sistema stradale come utile viabilità per garantire l'accesso alla ferrovia delle squadre di soccorso.



Figura 4 – Attività delle squadre di soccorso sul luogo dell'evento.



Figura 5 - Scenario di incidente.

Italia – Laces Val Venosta

L'incidente ferroviario di Laces è un disastro avvenuto il 12 aprile 2010 sulla ferrovia della Val Venosta tra le stazioni di Laces e Castelbello a una trentina di chilometri da Merano.

Il deragliamento di un convoglio con 39 passeggeri a bordo è avvenuto a causa di una frana superficiale di circa 400 metri cubi di terra e larga 10-15 metri che si è staccata probabilmente per una infiltrazione d'acqua dovuta alla rottura di un tubo per l'irrigazione dei campi.

Tutti i passeggeri a bordo del convoglio sono rimasti coinvolti in modo più o meno grave, nessun incolme. Il bilancio dell'incidente è stato, infatti, drammatico: 9 morti e 28 feriti di cui alcuni in gravi condizioni.

A seguito dell'impatto il treno ha rischiato di *scivolare* nel fiume Adige ma fortunatamente è stato trattenuto da alcuni alberi. Le squadre di soccorso, composte da Vigili del Fuoco, medici, infermieri, psicologi, ambulanze ed elicotteri sono state attivate immediatamente e per raggiungere il punto dell'impatto si sono *arrampicate* lungo le reti paramassi, salendo dal greto del torrente. Inoltre la strada attigua alla linea ferroviaria, la statale 38 dello Stelvio è stata chiusa al traffico per consentire l'afflusso dei veicoli di soccorso.

Dall'osservazione di Figura 6, Figura 7, Figura 8, relative allo scenario incidentale, si evince la difficoltà per le squadre di soccorso nel raggiungere il punto dell'evento. Di particolare rilievo è la presenza della strada statale parallela che ha permesso l'avvicinamento e l'accesso alla sede ferroviaria per le operazioni di soccorso ed evacuazione delle persone.

L'analisi tecnica dell'evento conferma l'utilizzo di dispositivi, quali i carrelli ferroviari, utilizzati per il trasporto dei materiali e dei feriti dal momento che anche in questo caso non è stato possibile accedere con i veicoli di soccorso stradali comunemente impiegati.



Figura 6 - Scenario dell'evento incidentale.



Figura 7 - Attività delle squadre di soccorso.



Figura 8 - Utilizzo di appositi carrelli ferroviari per il trasporto dei feriti.



Figura 9 – Squadre di soccorso attraverso il fiume.

Cina – Wenzhou

L'incidente ferroviario è avvenuto il 23 giugno 2011 sulla rete ad alta velocità Cinese nella provincia di Zhejiang.

La collisione (*tamponamento*) tra i due treni che procedevano nella stessa direzione, sarebbe stata causata da *un grave difetto tecnico di progettazione*.

Secondo la ricostruzione dell'evento, infatti, il primo treno sarebbe rimasto senza alimentazione elettrica dopo essere stato colpito da un fulmine, arrestandosi in corrispondenza di un viadotto. Il secondo treno che sopraggiungeva, causa di un probabile guasto tecnico all'impianto di segnalamento, non è riuscito ad arrestarsi in tempo evitando l'impatto.

A seguito del tamponamento due carrozze del primo convoglio sono *cadute* nel fiume sottostante il viadotto e altre quattro del secondo sono deragliate.

A bordo dei due treni viaggiavano circa 1400 passeggeri, 600 dei quali nelle sei vetture coinvolte. Il tragico bilancio dell'evento consiste in più di 40 decessi e oltre 200 feriti.

Le autorità cinesi hanno lamentato un'errata gestione dei soccorsi e una scarsa informazione fornita nelle ore successive alla collisione.

Anche in questo caso le immagini di Figura 10 e Figura 11 riportano le attività di soccorso in un contesto, quello del viadotto, particolarmente difficoltoso in termini di accessibilità delle squadre via terra.



Figura 10 – Attività delle squadre di soccorso sul luogo dell'evento.



Figura 11 – Soccorso di una vettura passeggeri caduta dal viadotto.

Polonia – Szczekociny

Il 3 marzo 2012 si è verificata una collisione frontale tra due convogli passeggeri sulla linea ferroviaria fra Varsavia e Cracovia. Un treno costituito da sei vetture si è scontrato frontalmente sullo stesso binario con un altro formato da quattro che viaggiava in direzione opposta. Le cause del disastro sono probabilmente attribuibili a un errore umano.

A momento dell’impatto a bordo dei due convogli vi erano circa 350 passeggeri. Il tragico bilancio consiste in 16 decessi e circa 60 feriti di cui alcuni in gravi condizioni. Sono state riscontrate da parte delle squadre di soccorso difficoltà nell’estrazione delle vittime dalle lamiere.

In Figura 12 e Figura 13 sono riportate due immagini relative alle fasi di soccorso con particolare rilevanza all’*accessibilità* della sede ferroviaria per quanto riguarda il trasporto di dispositivi e apparecchiature di pronto intervento e soccorso.



Figura 12 – Scenario incidentale: deragliamentone delle vetture a seguito della collisione.



Figura 13 – Squadre di soccorso sul luogo dell'evento.

Stati Uniti - New Jersey

Il 1 dicembre 2012, nel sud dello stato americano del New Jersey si è verificato un incidente che ha coinvolto un treno merci: quattro ferro cisterne che trasportavano sostanze pericolose sono deragliate finendo nel canale nei pressi del fiume Delaware a Paulsboro.

Le cause del deragliamento sono imputabili al cedimento strutturale del ponte ferroviario proprio nel momento in cui transitava il convoglio.

Il contenuto delle ferro cisterne era, infatti, cloruro di vinile, composto estremamente infiammabile in grado di creare una miscela esplosiva con l'aria: nella combustione emette sostanze tossiche irritanti che lo rendono un potente veleno con effetti cancerogeni e mutageni sull'uomo.

Il bilancio dell'evento, oltre all'ingente danno ambientale legato allo sversamento in acqua della sostanza, è stato di 18 persone intossicate che hanno lamentato problemi respiratori e sono state trasportate in ospedale per precauzione.

In Figura 14 e Figura 15 sono riportate due immagini che descrivono la gravità dell'evento. Seppur non vi siano state vittime, i soccorsi hanno dovuto impiegare le misure e i dispositivi finalizzati a mitigare le conseguenze a seguito del rilascio della sostanza nel fiume.

Anche in questo evento si nota come l'accessibilità al punto dell'evento sia stata difficoltosa per due motivi: da un lato la presenza di un fiume e dall'altro la presenza di una ponte ferroviario interrotto: entrambi non hanno facilmente permesso l'avvicinamento dei veicoli stradali di soccorso.

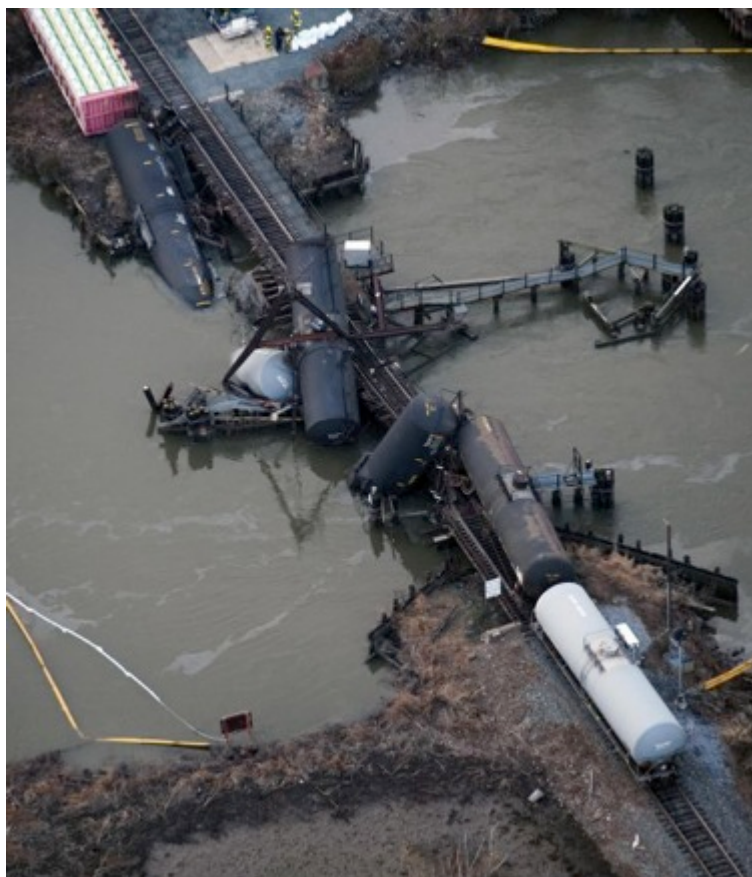


Figura 14 – Scenario dell'evento incidentale.

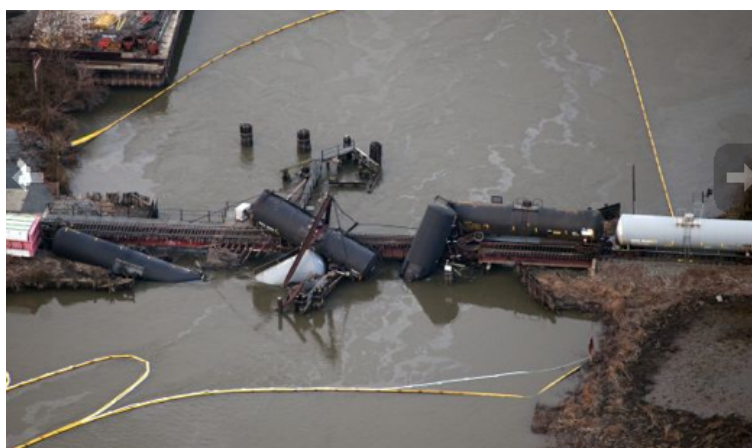


Figura 15 – Sversamento di sostanze pericolose nel fiume e attività di protezione.

Belgio – Gand (Schellebelle e Wetteren)

Il 4 maggio 2013 si è verificato un incidente che ha coinvolto un treno merci, composto da 13 ferro cisterne, nella zona del porto di Gand in Belgio.

Le cause dell'evento sono probabilmente attribuibili al superamento del limite di velocità, nei pressi di un tunnel ferroviario, a seguito del quale sei carri del convoglio sono deragliati e tre di essi si sono incendiati, provocando una serie di esplosioni.

L'esito dell'incidente è stato di 2 decessi e diverse decine di feriti anche gravi.

Un'aggravante dell'incidente consiste nel contenuto trasportato all'interno delle ferro cisterne: acrilonitrile, un composto chimico utilizzato nella sintesi delle materie plastiche.

Tale sostanza, tossica e altamente infiammabile, bruciando libera acido cianidrico e ossidi di azoto.

I Vigili del Fuoco sono riusciti a controllare l'incendio lasciando anche bruciare la sostanza per evitare la dispersione di gas pericolosi nell'area circostante ma diverse centinaia di persone che abitano nella zona sono state evacuate per precauzione.

In Figura 18, Figura 16 e Figura 17 sono riportate delle immagini rappresentative dell'evento incidentale in cui si evince il problema dell'avvicinamento da parte delle squadre di soccorso al punto dello svio. In particolare si nota come i veicoli dei Vigili del Fuoco abbiano utilizzato strade adibite a uso agricolo e addirittura siano transitati su terreni agricoli.



Figura 16 – Scenario incidentale.



Figura 17 – Avvicinamento dei soccorsi al punto dell'incidente.



Figura 18 – Attività di estinzione dell'incendio.

Canada – Lac Megantic (Quebec)

Il 6 luglio 2013 un convoglio che trasportava greggio, costituito da 73 ferro cisterne, è deragliato nella città di Lac Megantic, nel Quebec canadese a 250 chilometri a est di Montreal.

A seguito del deragliamento 4 ferro cisterne, ognuna con capacità pari a circa 113.000 litri, hanno preso fuoco provocando violente esplosioni. Il vasto incendio propagato in un'ampia area della cittadina ha distrutto diversi edifici provocando anche decine di vittime e feriti gravi. Non è trascurabile il danno ambientale causato dallo sversamento del greggio nel vicino fiume Saint-Laurent.

Tra le possibili cause dell'evento ci sarebbe il non corretto stazionamento del convoglio in una zona collinare sovrastante la cittadina che, a causa di una lieve pendenza, si sarebbe messo in movimento senza la presenza di personale a bordo che ne potesse interrompere la marcia.

In Figura 19 e Figura 20 sono riportate le attività di spegnimento dell'incendio. In questo particolare ambito si nota come l'accessibilità alla rete ferroviaria utilizzando quella stradale (vicinanza) ha permesso l'avvicinamento delle squadre di soccorso (Vigili del Fuoco).



Figura 19 - Scenario dell'incidente e attività di estinzione incendio.



Figura 20 - Sede ferroviaria (a destra) e stradale (a sinistra) e punto in cui è avvenuta l'esplosione.

In Figura 21 è illustrato l'effetto *fireball*¹² associato all'esplosione di una ferro cisterna.



Figura 21 - Effetto dell'esplosione di una ferro cisterna contenente greggio.

¹² Fireball: letteralmente *palla di fuoco*. è lo scenario che presuppone un'elevata concentrazione, in aria, di sostanze infiammabili, il cui innesco determina la formazione di una sfera di fuoco accompagnata da significativi effetti di irraggiamento nell'area circostante.

Spagna – Santiago di Compostela

Il 24 luglio 2013 un treno ad alta velocità con a bordo più di 200 passeggeri è sviato nei pressi della stazione di Santiago di Compostela.

La causa del tragico evento è attribuibile a un errore umano: la velocità del convoglio nel punto dell'incidente era quasi il doppio di quella consentita. Inoltre sul quel tratto di linea non era presente alcun dispositivo di controllo della marcia del treno in grado di intervenire automaticamente e limitare (frenando) la velocità.

A seguito dello svio alcune vetture si sono capovolte e si sono incendiate, altre hanno violentemente urtato un muro situato ai margini dei binari (ferrovia) come illustrato in Figura 22.

Dall'osservazione di Figura 22, Figura 23, Figura 24 si evince che il punto in cui è avvenuto l'incidente presenta alcune criticità in termini accessibilità da parte dei Servizi di Pronto Intervento.

La sede ferroviaria, infatti, è in trincea, a una quota inferiore rispetto al piano campagna, rendendo più difficili le operazioni di avvicinamento di persone, mezzi e attrezzature.



Figura 22 – Scenario dell'incidente.



Figura 23 – Disposizione di veicoli e attrezzature per il soccorso.

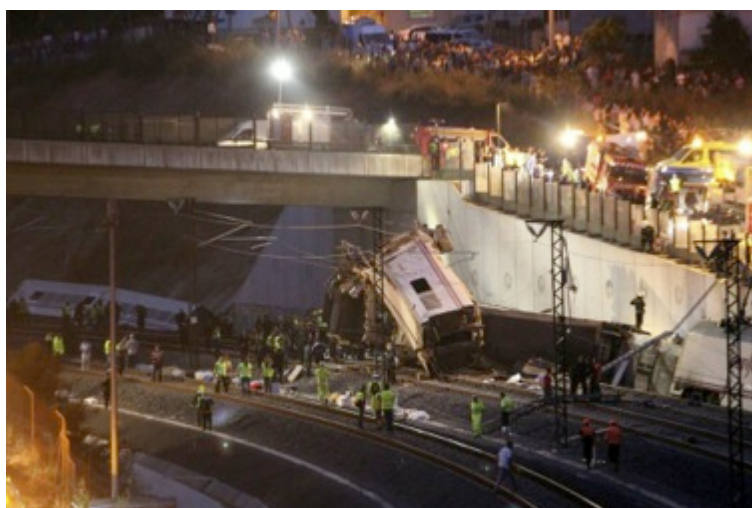


Figura 24 – Squadre di soccorso durante le fasi dell'emergenza.

Svizzera – Granges-près-Marnand (Cantone Vaud)

Il 29 luglio 2013 si è verificato un grave incidente ferroviario che ha coinvolto due treni passeggeri in una violenta collisione frontale nei pressi della stazione di Granges-près-Marnand, nel cantone Vaud (Ovest della Svizzera).

Tra le cause dell'impatto, attualmente non ancora accertate, ci sarebbe il mancato rispetto della segnaletica luminosa utilizzata per la regolazione (distanziamento) del traffico ferroviario.

L'esito dell'incidente è di 1 decesso, uno dei due macchinisti, e 44 feriti di cui alcuni in gravi condizioni.



Figura 25 – Scenario dell'incidente.

In Figura 26, Figura 27 e Figura 28 è possibile osservare le operazioni di soccorso da parte delle squadre di intervento.



Figura 26 – Presenza di una strada carrabile per l'avvicinamento alla ferrovia.

In particolare, si nota come la presenza di una strada carrabile a margine della ferrovia abbia permesso l'avvicinamento di persone, mezzi, attrezzature e ambulanze per il trasporto dei feriti nonostante la limitata differenza di quota tra strada e ferrovia.



Figura 27 – Squadre di soccorso e attrezzature.



Figura 28 – Veicoli di soccorso a margine della ferrovia nel luogo dell'evento.

Stati Uniti – New York

Il 1 dicembre 2013 un convoglio passeggeri della Metro-North Railroad è deragliato in prossimità di una curva sulla Hudson Line. Diverse vetture si sono rovesciate provocando 4 vittime e oltre 60 feriti di cui una decina in gravi condizioni.

Le cause del grave incidente sono probabilmente attribuibili all'elevata velocità del convoglio nel punto dell'evento e alla scarsa manutenzione effettuata.

Come si evince dalla Figura 29 il luogo dell'incidente è caratterizzato da un contesto territoriale-ambientale complesso dove la presenza del fiume Hudson e Harlem River hanno reso difficili le operazioni di soccorso.



Figura 29 - Scenario dell'incidente.

Dall'osservazione di Figura 30 e Figura 31 si nota come l'accessibilità dei soccorsi sia stata limitata dalla mancanza di rete stradale ma soprattutto dalla presenza alberature che hanno reso difficile il transito di veicoli stradali.

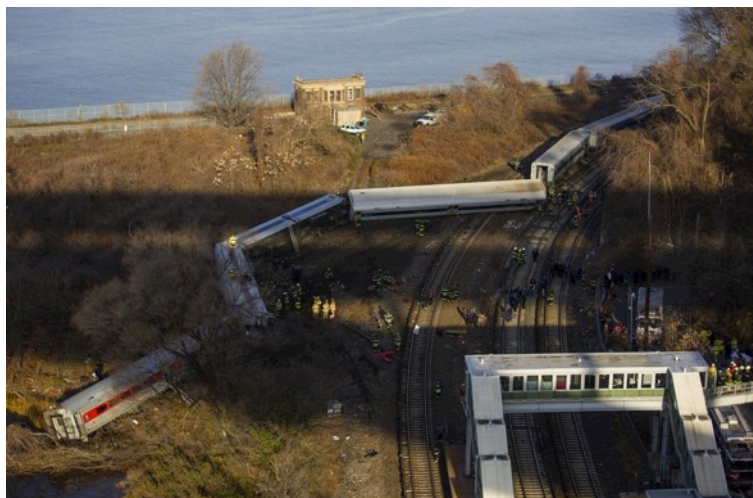


Figura 30 – Veicoli di soccorso (a sinistra).



Figura 31 – Squadre e attrezzature di soccorso.

Italia – Imperia

Il 17 gennaio 2014 sulla linea a binario unico Genova – Ventimiglia un convoglio con a bordo circa 200 passeggeri è sviato a causa di una frana provocata da condizioni meteo-climatiche avverse. La locomotiva, in testa al treno, e la prima vettura hanno quindi impattato con il materiale terroso franato dal versante provocando il ferimento lieve dei due macchinisti.



Figura 32 - Scenario dell'evento incidentale.

Fortunatamente nessun dei passeggeri è rimasto ferito ma fin da subito la gestione dell'emergenza ha confermato la difficoltà dei soccorsi nel sopraggiungere nel luogo dell'evento come si evince dall'osservazione di Figura 33.



Figura 33 - Attività delle squadre di soccorso.

Non essendo presenti vie d'accesso *alternative* al luogo dell'incidente si è fatto uso di attrezzature e mezzi *trasportati* attraverso la stessa ferrovia. La rimozione del convoglio è invece avvenuta *via mare* mediante l'impiego di una chiatta con a bordo due autogrù aventi il compito di sollevare locomotiva e carrozza per riposizionarle sui binari. Il costo

totale per la rimozione del convoglio e ripristino della tratta ferroviaria è stato stimato in circa 2.500.000 euro.



Figura 34 - Operazioni di rimozione del convoglio.

Francia – Digne-les-Bains

Sabato 8 febbraio 2014, nelle Alpi dell'Alta Provenza nel sud della Francia, si è verificato un incidente che ha coinvolto un treno regionale con a bordo oltre 30 passeggeri che collegava Nizza a Digne-les-Bains composto da due vetture. Le cause del deragliamento sono imputabili a una collisione con un masso di elevate dimensioni che si sarebbe *sganciato* dal fronte della montagna che costeggia la linea ferroviaria.

L'impatto ha provocato anche il ribaltamento delle vetture causando il decesso di due persone e il ferimento, anche grave, di alcuni passeggeri come illustrato in Figura 35.



Figura 35 - Scenario incidentale.

La gestione dei soccorsi ha previsto l'intervento di oltre 100 Vigili del Fuoco con mezzi, attrezzature e anche 2 elicotteri. Una prima analisi tecnica dell'evento ha evidenziato le difficoltà di intervento delle squadre di soccorso a causa delle forti nevicate che hanno interessato la zona.



Figura 36 - Squadre di soccorso nel luogo dell'evento.

Nonostante le condizioni meteo avverse, anche in questo caso come avvenne nel 2006 in Val Venosta, la presenza di una strada parallela posta a poca distanza della ferrovia ha comunque permesso l'avvicinamento dei soccorritori che hanno potuto mettere in sicurezza il convoglio e procedere con le operazioni di estricazione delle persone rimaste incastrate nelle lamiere.

Italia – Catanzaro

L'incidente si è verificato il 6 marzo 2014 lungo la linea Catanzaro-Cosenza tra due convogli passeggeri delle Ferrovie della Calabria.

La collisione frontale ha interessato due convogli, composti da un locomotore e da un locomotore con vettura, che si trovavano su un tratto della ferrovia a binario unico come riportato in Figura 37.



Figura 37 – Collisione tra i due convogli passeggeri.

Attualmente non sono note le cause e la dinamica dell'evento e resta da stabilire se si sia trattato di un errore umano o di un mal funzionamento dei segnali di protezione che regolano la circolazione ferroviaria.

Le condizioni meteo climatiche avverse, pioggia intensa, hanno reso difficoltoso l'intervento di polizia, carabinieri e vigili del fuoco che, data la particolare orografia del territorio, hanno chiesto l'intervento del personale del nucleo speleo alpino fluviale provinciale dei vigili del fuoco con diversi uomini e mezzi di soccorso.

In Figura 38 sono illustrate le operazioni di soccorso dei Vigili del Fuoco che hanno reso necessario il *taglio delle lamiere* mentre in Figura 39 si osserva lo scenario incidentale: nei pressi della ferrovia sono presenti strade carrabili (es. parallele situate poca distanza) che hanno permesso l'avvicinamento dei veicoli di soccorso.



Figura 38 – Operazioni di soccorso.



Figura 39 – Scenario dell'incidente.

2 STATO DELL'ARTE

Seppur indissolubilmente associati al benessere generale e individuale, i trasporti sono sempre più spesso visti, ormai, come un *potenziale pericolo*¹³.

Se da un lato le statistiche di sicurezza confermano che il *treno* è più sicuro della strada, negli ultimi anni si sono verificati alcuni incidenti ferroviari drammatici che hanno richiamato l'attenzione dell'opinione pubblica e delle autorità sulla sicurezza del trasporto ferroviario.

La sicurezza nei trasporti non è quindi solo un obiettivo ambizioso da raggiungere bensì un requisito essenziale per il funzionamento del sistema transeuropeo.

Il sistema dei trasporti transeuropeo funziona se è garantita l'interoperabilità agendo simultaneamente su due livelli. Il primo, tecnico, stabilisce norme per ogni componente del sistema ferroviario - armamento, materiale rotabile, segnalamento, procedure operative ecc.-. Il secondo, amministrativo, fissa i doveri e le responsabilità di tutti i soggetti interessati: Gestori dell'Infrastruttura, Imprese Ferroviarie, autorità nazionali e autorità comunitarie.

¹³ Libro Bianco Commissione Europea - La politica europea dei trasporti fino al 2010: il momento delle scelte.

2.1 RICERCHE PER IL DIPARTIMENTO DELLA PROTEZIONE CIVILE NAZIONALE

Il Laboratorio Mobilità e Trasporti del Politecnico di Milano, cui attualmente afferisco, è stato designato nel 2005 Centro di Competenza per la Gestione e Sicurezza dei Trasporti del Dipartimento della Protezione Civile Nazionale. A oggi sono attive convenzioni di ricerca pluriennali con il Dipartimento tra cui alcune finalizzate allo studio della vulnerabilità delle reti di trasporto in seguito a eventi rilevanti.

Uno degli obiettivi più rilevanti della ricerca consiste nella definizione di un metodo e di una procedura operativa finalizzati a stimare le criticità di una rete stradale nei confronti di eventi calamitosi e incidentali rilevanti di origine naturale o antropica.

La conoscenza degli elementi e delle funzioni critiche permette, a sua volta, di generare i cosiddetti *scenari di rischio* e quindi di pianificare gli interventi di prevenzione del rischio e di difesa delle infrastrutture viarie secondo una scala di priorità al fine di non disperdere le risorse economiche disponibili, sempre più scarse.

2.2 DEFINIZIONE DI RISCHIO

Il concetto di *rischio*, nel linguaggio comune, è strettamente collegato a quello di *sicurezza* che nella dizione anglosassone assume due significati ben distinti:

- *security*, sicurezza relativa ad atti criminosi;
- *safety*, sicurezza relativa a eventi accidentali - calamità naturali, catastrofi, incidenti, ecc.

Della *security* si occupa la Forza Pubblica, mentre della *safety* si occupano le strutture dello Stato che concorrono alla formazione dell'apparato della *Protezione Civile* e i Gestori delle Infrastrutture nella misura di loro competenza.

Nel linguaggio tecnico diverse e molteplici sono le definizioni che vengono comunemente usate per esprimere il significato di sicurezza ma tutte concordano nell'affermare che per sicurezza deve intendersi la condizione di *assenza* di rischio, cioè di *assenza* di possibili eventi negativi.

Il termine di riferimento può essere quindi il *livello* di sicurezza che la collettività reputa necessario raggiungere per una determinata situazione di vita o di lavoro, a fronte dell'esercizio di una determinata attività¹⁴.

¹⁴ Simonetti S., (2002) *Rischio ambientale – Il rischio della civiltà industriale*. Dario Flaccovio Editore.

La sicurezza assoluta può essere intesa come il limite a cui tende asintoticamente il valore della sicurezza reale, sebbene non sia mai raggiungibile in nessuna attività umana, qualunque siano le risorse impegnate per essa (Figura 40).

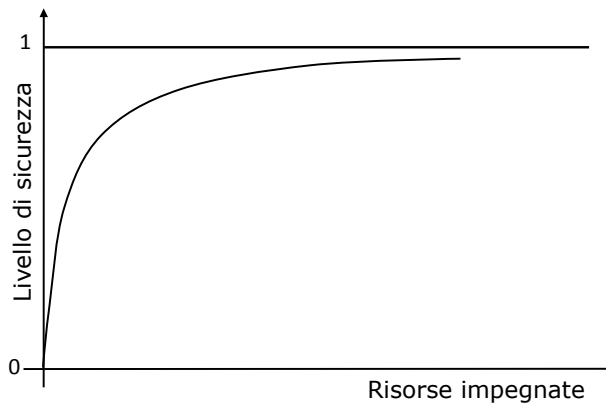


Figura 40 – Relazione tra sicurezza e risorse impegnate.

Dal concetto di sicurezza come *assenza* di rischio deriva quindi che il rischio può essere inteso come *l'elemento complementare* alla sicurezza stessa¹⁵.

Il rischio, inteso come possibilità che in seguito a un evento critico si determini una perdita o un danno su determinati elementi esposti¹⁶, è dato, secondo la definizione ISO¹⁷ dalla combinazione tra la probabilità P e le conseguenze C :

$$R = f(P; C)$$

Più nello specifico, esplicitando le componenti delle conseguenze, è possibile affermare che il rischio è funzione della probabilità, della vulnerabilità e dell'esposizione come riportato in Figura 41,



Figura 41 – Componenti del rischio.

¹⁵ In realtà non esistono attività antropiche o naturali con valori di sicurezza assoluta o rischio nullo. Tuttalpiù, la mitigazione dei rischi permette di ridurre il valore di rischio entro certe soglie di accettabilità sociale rendendolo talvolta trascurabile.

¹⁶ UNDRO, 1979, Natural Disasters and Vulnerability Analysis, Report of Expert Group Meeting 9–12 July 1979, Office of the United Nations Disaster Relief Coordinator, Geneva.

¹⁷ ISO/IEC Guide 51:1999 - Safety aspects - Guidelines for their inclusion in standards.

dove:

- la probabilità P esprime la frequenza con cui un evento critico di intensità data si verifica su un'area;
- la vulnerabilità V rappresenta la predisposizione a subire un danno da parte degli elementi di una rete di trasporto in seguito a un evento critico;
- l'esposizione E è la quantificazione degli elementi che sono sottoposti al rischio e che potenzialmente possono subire un danno.

La combinazione tra la vulnerabilità e l'esposizione permette di definire le *conseguenze* o *magnitudo* dell'evento considerato, cioè la quantificazione dal danno provocato dall'evento stesso in funzione della sua intensità.

Inoltre il rischio, sempre in letteratura scientifica, può essere definito matematicamente utilizzando la teoria degli insiemi. Esso è inteso come funzione tra l'insieme degli eventi pericolosi e l'insieme delle conseguenze¹⁸. Entrambi questi insiemi sono di tipo probabilistico e l'insieme delle conseguenze definisce il potenziale danno associabile a un sistema, sede di eventi pericolosi (Figura 42).

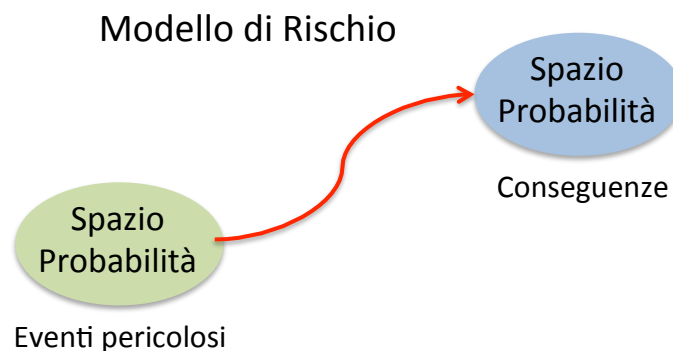


Figura 42 – Definizione matematica del rischio: utilizzo della teoria degli insiemi. Fonte: Linee Guida ANAS 2009.

Nel linguaggio comune può accadere di confondere il rischio con il pericolo e viceversa: è quindi necessario ricordarne la distinzione riportando due possibili definizioni:

- il pericolo può essere interpretato come potenziale che induce un danno;
- il rischio, in un qualunque sistema, è la conversione di un pericolo potenziale in conseguenze fattuali (danno)¹⁹.

¹⁸ Linee Guida per la progettazione della sicurezza nelle Gallerie Stradali secondo la normativa vigente, ANAS S.p.A. 2009.

¹⁹ Si pensi ad esempio a una sostanza infiammabile o esplosiva. Questa, indipendentemente dalla quantità, rappresenta una fonte di pericolo poiché un qualsiasi innesco potrebbe provocare un incendio o un'esplosione. Il rischio associato alla sostanza dipende dal contesto in cui è collocata la sostanza. La presenza o meno di fattori che generano

In linea generale è possibile affermare che il rischio è la conversione di un pericolo potenziale in conseguenze fattuali: questo implica che il rischio non può essere una grandezza fisica *misurabile*.

Un'ulteriore formulazione del rischio²⁰ può essere la seguente:

$$rischio = \frac{pericolo}{salvaguardia}$$

dove con salvaguardia si intende il complesso delle azioni di condizionamento esercitate sul rischio dai seguenti fattori:

- comportamento della popolazione;
- soluzioni strutturali;
- sistemi tecnologici;
- procedure di gestione e controllo.

La formulazione introdotta consente da un lato di asseverare l'impossibilità di rischio nullo per ogni sistema di processo e dall'altro evidenzia l'importanza della salvaguardia intesa come insieme di azioni finalizzate alla mitigazione del rischio. Tra queste vi è ad esempio la redazione di piani di emergenza finalizzati a valutare compiti e responsabilità dei Servizi di Pronto Intervento e garantire l'accessibilità dei soccorsi in ambito ferroviario.

2.2.1 IL RISCHIO TRASPORTI

Nell'introdurre il concetto di rischio all'interno del sistema di trasporti è necessario effettuare specifiche considerazioni. Una possibile definizione del Rischio Trasporti – RT può essere la seguente: *“il RT insorge in relazione ad attività di spostamento sul territorio di persone o cose e può palesarsi nel coinvolgimento diretto degli attori degli spostamenti (incidenti, congestione) o attraverso effetti esterni”*.

Questa definizione permette di affermare che il RT si può manifestare in forma *attiva e/o passiva*.

Il rischio attivo si presenta associato alle attività di trasporto di qualunque natura quali ad esempio collisioni, incendi, svii, incidenti che coinvolgono sostanze pericolose,

un innesco (es. scintille) aumentano o riducono la probabilità che si verifichi l'evento. La distanza da bersagli umani, ambientali, ecc., riduce il danno potenziale.

²⁰ Linee Guida per la progettazione della sicurezza nelle Gallerie Stradali secondo la normativa vigente, ANAS S.p.A. 2009.

che hanno origine dal sistema dei trasporti, quando da tali attività possano insorgere pericoli e/o danni per l'incolumità delle popolazioni, anche non direttamente coinvolte nelle attività di trasporto, per l'ambiente e per il sistema stesso.



Figura 43 – Evento di rischio attivo: incidente che coinvolge in trasporto di sostanze pericolose (Stazione Viareggio 2009)

Il rischio passivo si manifesta invece quando gravi calamità naturali o accidentali, come frane, allagamenti, esondazioni, nevicate, terremoti, ecc. e/o eventi catastrofici, limitano o impediscono la fruibilità della rete di trasporto rendendo localmente impossibili o complesse le attività di trasporto, per cui un'area circoscritta resta isolata o difficilmente raggiungibile.



Figura 44 - Evento di rischio passivo: interruzione di una linea ferroviaria a seguito di un'alluvione (Ferrovia del Brennero 2012).

In Figura 45 sono riportati, a titolo esemplificativo, alcuni eventi associabili al rischio passivo e attivo.

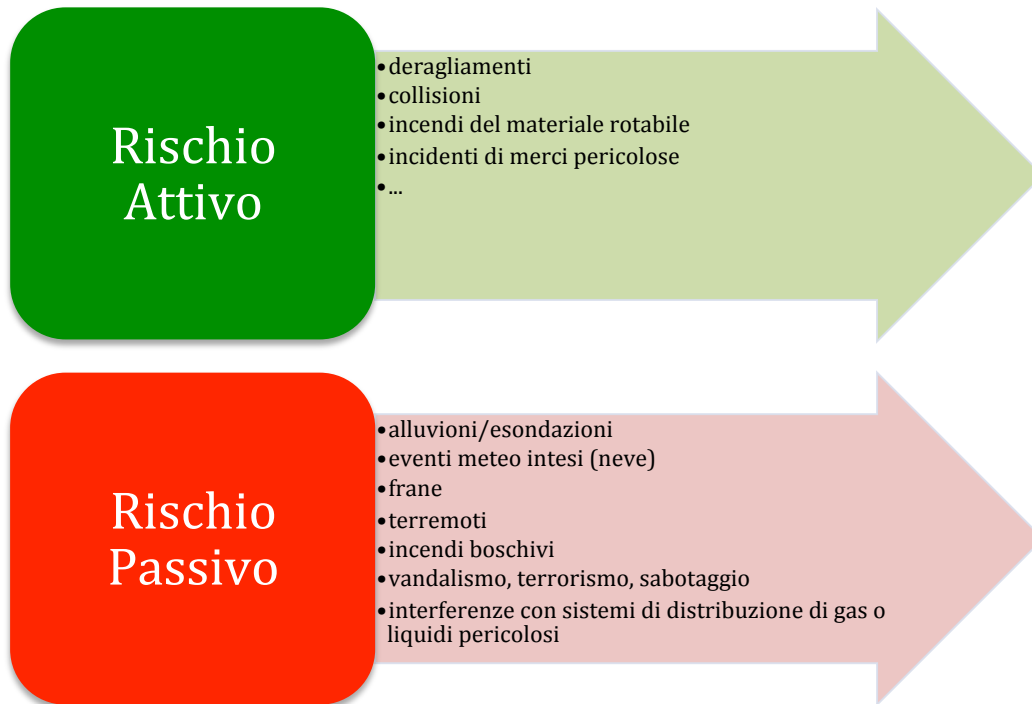


Figura 45 - Eventi di rischio passivo e attivo.

2.2.2 LA VULNERABILITÀ DELLE RETI DI TRASPORTO

Il concetto di vulnerabilità di una rete non è definibile univocamente poiché il termine presenta significati e accezioni che si differenziano fra loro a seconda del contesto cui si riferiscono. In letteratura diversi autori hanno studiato, discusso e analizzato il concetto di vulnerabilità, soprattutto in riferimento all'ambito stradale, come *elemento complementare dell'affidabilità*. Pertanto esistono numerosi articoli accademici e pubblicazioni che trattano l'argomento e oltre a presentare differenti definizioni del termine, propongono metodi alternativi per valutare la vulnerabilità²¹.

Facendo riferimento alla definizione di rischio riportata in precedenza è importante introdurre alcune considerazioni metodologiche relative all'accezione di vulnerabilità. La vulnerabilità di una rete di trasporto rappresenta la propensione di uno o più elementi a subire un danno a seguito di uno specifico evento critico²² e può essere funzione di cinque componenti reciprocamente dipendenti ed espresse ciascuna da specifiche variabili descritte nei paragrafi seguenti²³:

²¹ Tra i più importanti analisti della vulnerabilità in ambito stradale si cita ad esempio Berdica, Cafiso, Taylor, D'Este e Jenelius i quali hanno fornito diverse interpretazioni del concetto di vulnerabilità proponendo talvolta modelli analitici di calcolo.

²² Maja R., Marchionni G., Ponti M. Vulnerabilità delle reti stradali. In *Trasporti e Città – Mobilità e pianificazione urbana*. Egaf. (2014).

²³ Borghetti F., Maja R., Marchionni G., Ponti M., Rainoldi G., Convenzione con il Dipartimento della Protezione Civile Nazionale, progetto "Vulnerabilità e modello d'intervento per la gestione delle reti viarie in seguito a eventi rilevanti": relazione finale della prima annualità, 2007.

- vulnerabilità fisica;
- vulnerabilità funzionale;
- vulnerabilità organizzativa;
- vulnerabilità sistemica;
- vulnerabilità topologica;

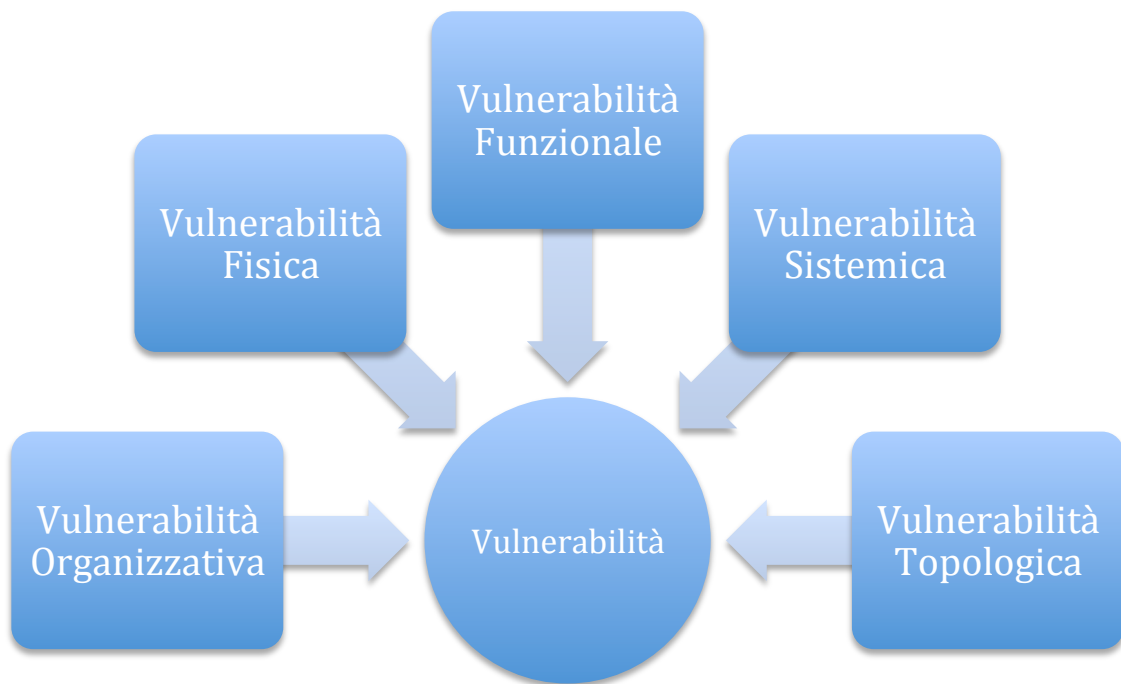


Figura 46 - Componenti della vulnerabilità delle reti di trasporto.

2.2.2.1 VULNERABILITÀ FISICA

La vulnerabilità fisica identifica la suscettibilità a subire un danno strutturale da parte di un'infrastruttura di trasporto sottoposta a un evento calamitoso d'intensità data (o comunque stimata).

Un elemento di una rete è *fisicamente* vulnerabile se, sottoposto a un evento esterno quale ad esempio una frana o un terremoto, diventa parzialmente o totalmente inutilizzabile. Pertanto la vulnerabilità fisica di un'infrastruttura ne condiziona la funzionalità e rappresenta una caratteristica locale.

È importante sottolineare che essa dipende dall'interazione tra il tipo, l'entità e la durata di un evento e le caratteristiche fisico-costruttive degli elementi critici della rete ferroviaria, quali ad esempio ponti, viadotti e gallerie²⁴.

²⁴ Si pensi ad esempio all'evento incendio. Un ponte ferroviario costruito con materiali legnosi sarà più *vulnerabile fisicamente* rispetto a uno costruito in conglomerato cementizio armato.

Da un'analisi e valutazione delle caratteristiche tecniche delle singole infrastrutture risulta possibile, entro certi limiti, prevedere e quantificare i danni potenziali che potrebbero derivare da particolari eventi.



Figura 47 – Vulnerabilità fisica: a causa di un evento critico una linea ferroviaria risulta interrotta.

2.2.2.2 VULNERABILITÀ FUNZIONALE

La vulnerabilità funzionale esprime la predisposizione di un elemento ferroviario a subire limitazioni delle proprie funzionalità in seguito a danni fisici oppure a eventi esterni che non lo danneggiano (*fisicamente*) ma ne riducono o ne annullano l'efficienza.

Un'infrastruttura, per esempio un ponte, può resistere all'impatto di una piena ma risultare impraticabile o parzialmente praticabile se viene sommerso dall'acqua. Nel caso in cui il ponte sia a doppio binario, potrebbe verificarsi la situazione in cui non si avranno danni *fisici* dipendenti dalla rottura di qualche elemento strutturale, bensì perdite di funzionalità (del ponte) legate al fatto che magari sarà percorribile un solo binario. Questo aspetto determina quindi una riduzione temporanea della capacità ferroviaria, dipendente dall'intensità dell'evento a seguito della quale sarà possibile ripristinare la normale circolazione dei convogli.

A differenza della vulnerabilità fisica, quella funzionale dipende quindi dalle caratteristiche funzionali locali dell'infrastruttura quali ad esempio la capacità della linea, la velocità, il numero di binari, il tipo di regolamentazione nella circolazione, ecc.

È importante precisare che la vulnerabilità funzionale presenta normalmente una stretta dipendenza dalla vulnerabilità fisica ma in alcuni casi questa dipendenza può non verificarsi. Per meglio definire la dipendenza tra vulnerabilità fisica e funzionale si possono considerare questi esempi:

- in seguito a un evento idrogeologico una tratta ferroviaria viene invasa parzialmente da detriti che rendono impraticabile una parte della sezione (Figura 48); in questo caso essa presenta una vulnerabilità fisica agli effetti di questo evento, unitamente

a una vulnerabilità funzionale locale che ne penalizza le prestazioni e che può avere ricadute a livello globale (es. riduzione della capacità);

- in seguito a un'alluvione una tratta ferroviaria è sommersa dall'acqua senza subire danni strutturali; in questo caso la sua vulnerabilità fisica risulta trascurabile, tuttavia la presenza dell'acqua la rende impercorribile (almeno in parte), determinando così un livello elevato di vulnerabilità funzionale dipendente dalle caratteristiche fisiche dell'infrastruttura nei confronti dell'evento alluvionale;
- in seguito a una copiosa nevicata le proprietà strutturali di una tratta ferroviaria rimangono generalmente inalterate, pertanto la sua vulnerabilità fisica è pressoché nulla; tuttavia la presenza della neve sui binari la rende parzialmente o totalmente impraticabile, determinando così un livello elevato di vulnerabilità funzionale. In questo caso la perdita di funzionalità non è dovuta alle sole caratteristiche fisiche, bensì a un'organizzazione non efficace degli interventi di difesa dal fenomeno, aspetto che coinvolge la vulnerabilità organizzativa e ha ricadute sull'intera rete.



Figura 48 - Vulnerabilità funzionale: a seguito di un evento rilevante uno dei due binari risulta danneggiato riducendo la capacità della linea.

2.2.2.3 VULNERABILITÀ ORGANIZZATIVA

La vulnerabilità organizzativa considera gli eventuali *difetti* procedurali o tecnologici degli interventi di soccorso e di gestione delle emergenze: questi *difetti* possono provocare danni irreparabili alle persone o alle infrastrutture coinvolte da un evento incidentale o calamitoso.

La componente organizzativa della vulnerabilità può essere stimata studiando le interazioni che si manifestano tra le caratteristiche di un evento, il comportamento degli utenti coinvolti e le azioni compiute dai soccorritori, dai sistemi di sicurezza e di informazione contenute in un piano di emergenza.

Se si considera una generica rete di trasporto possono essere presenti elementi che caratterizzano il livello di vulnerabilità organizzativa quali ad esempio:

- caratteristiche degli impianti e delle dotazioni di sicurezza di un'infrastruttura: per esempio l'impianto di ventilazione di un tunnel, i percorsi di fuga, gli impianti di spegnimento degli incendi, i luoghi di ricovero, l'illuminazione, le informazioni di emergenza;
- comportamento degli utenti durante le emergenze: è importante l'analisi delle azioni che potrebbero compiere autonomamente le persone all'occorrenza di un evento e nelle fasi successive; anche la reazione delle persone in seguito alle informazioni che ricevono è rilevante per la loro salvezza. Questo fenomeno deve essere considerato per garantire l'efficacia dei piani di emergenza e delle dotazioni tecnologiche utilizzate dai soccorritori;
- piani di emergenza, cioè le procedure definite e condivise dai Servizi di Pronto Intervento per gestire e coordinare le operazioni durante l'emergenza;
- ambiente esterno: esso condiziona fortemente la vulnerabilità organizzativa in quanto il contesto in cui è inserita l'infrastruttura potrebbe in taluni casi limitare o rendere più complesse e difficoltose le operazioni di soccorso.

Per valutare la vulnerabilità organizzativa potrebbe risultare necessaria la generazione di scenari di rischio che permette di simulare l'evoluzione degli eventi e dei fenomeni.

Infatti, per alcuni singoli fenomeni sono disponibili modelli di simulazione sufficientemente efficaci, mentre altri fenomeni richiedono un significativo avanzamento della ricerca.

2.2.2.4 VULNERABILITÀ SISTEMICA

La vulnerabilità sistemica individua gli effetti globali che si manifestano su un'intera rete di trasporto in seguito all'occorrenza di un evento rilevante che riduce la funzionalità di alcuni suoi elementi infrastrutturali. Essa può condizionare l'intera mobilità di un'area estesa rappresentando quindi la predisposizione di una rete di trasporto a compromettere le attività, economiche e non, che si svolgono sull'area stessa.

La vulnerabilità sistemica dipende principalmente dalla vulnerabilità topologica e dall'evoluzione subita dai flussi di traffico presenti sulla rete, mentre prescinde dalla tipologia e dall'intensità degli eventi e quindi dai diversi livelli di vulnerabilità funzionale.

La peculiarità più rilevante della vulnerabilità sistemica è data dalle relazioni esistenti tra i diversi elementi di una rete: per esempio, l'impraticabilità di una tratta ferroviaria può renderne inutilizzabili altre. La chiusura (anche temporanea) di un ponte o una galleria, implica la deviazione dei flussi che li percorrono a transitare lungo itinerari alternativi creando talvolta condizioni di congestione sulle tratte già caratterizzate da elevati valori di traffico.

È fondamentale sottolineare che, nell'esempio precedente, la vulnerabilità sistemica del ponte o della galleria (o di un generico elemento ferroviario) non dipende dalla vulnerabilità funzionale: è indipendente anche dagli eventi che possono cagionare l'interruzione della tratta stessa.

La vulnerabilità sistemica riguarda quindi gli effetti che una generica interruzione provoca sull'intera rete anche a distanza dal punto in cui si verifica l'evento ma non si cura delle cause li provocano. Questa caratteristica può apparire come una limitazione anche se in realtà si rivela decisamente utile in quanto permette di valutare la vulnerabilità sistemica derivante da eventi dei quali risulta difficile stimare l'entità, la localizzazione e la vulnerabilità funzionale.

La vulnerabilità sistemica è dunque una vulnerabilità *globale* perché rappresenta l'attitudine di un'infrastruttura a provocare disservizi su tutta la rete in funzione della posizione e della funzione che assume rispetto al sistema di trasporto di cui fa parte.

Pertanto la misura della vulnerabilità sistemica dei diversi elementi di una rete è importante per individuare le tratte che, in caso di perdita della propria funzionalità, possono causare problemi alla circolazione ordinaria, all'invio dei soccorsi o all'evacuazione delle persone esposte al rischio. Si possono così individuare e classificare le tratte a elevata vulnerabilità sistemica e definire dei livelli di priorità di intervento con la finalità di concentrare le azioni di monitoraggio, di pianificazione dei soccorsi e di gestione delle emergenze sugli archi che risultano più critici.

In ambito stradale, ad esempio, se una tratta risulta vulnerabile sistemicamente può essere auspicabile sviluppare un accurato piano di gestione del traffico da attuare in caso di interruzione della tratta stessa a prescindere dall'evento che può causarne l'interruzione (evento meteo, blocco del traffico, incidente, ecc.).

2.2.2.5 VULNERABILITÀ TOPOLOGICA

La vulnerabilità topologica è determinabile in funzione della configurazione di una rete di trasporto, di cui ne costituisce una caratteristica intrinseca e indipendente dagli eventi critici ai quali è soggetta e dal traffico che vi circola.

Un'infrastruttura è topologicamente critica se una sua perdita di funzionalità provoca l'isolamento di una porzione della rete o ne riduce l'accessibilità; pertanto la vulnerabilità topologica di una rete di trasporto dipende dal grado di connessione reciproca tra le infrastrutture che la compongono e costituisce una componente globale della vulnerabilità in quanto influisce direttamente sulla vulnerabilità sistemica²⁵.

Dato che la vulnerabilità topologica riguarda la configurazione della rete, indipendentemente da tutte le altre variabili del rischio, essa fornisce una stima analitica della rilevanza di un'infrastruttura o singolo elemento nel contesto della rete di appartenenza.

A seguito di un evento rilevante il danno subito da una tratta è meno sensibile se essa è inserita in una rete molto *magliata*: in tal caso infatti sono disponibili percorsi alternativi a quello divenuto impraticabile. Al contrario, la chiusura di un tunnel di valico alpino provoca disagi certamente più importanti in quanto implica deviazioni del traffico su itinerari generalmente molto più lunghi.

Nel presente lavoro di ricerca la valutazione dell'accessibilità del sistema ferroviario in emergenza rientra nello studio della vulnerabilità organizzativa come riportato in Figura 49.

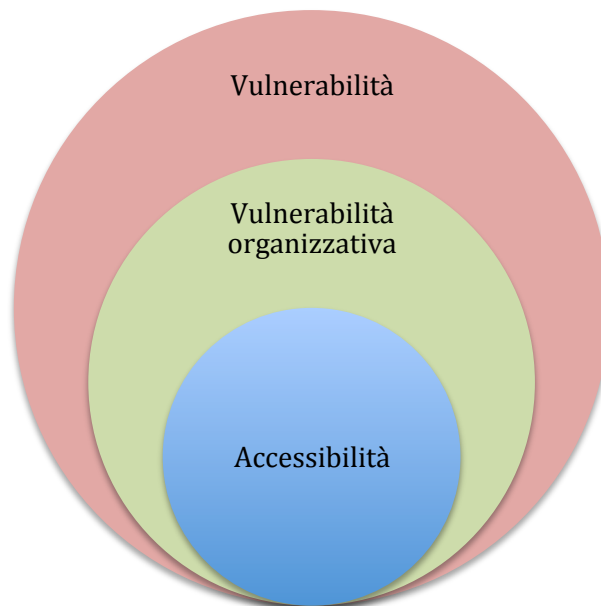


Figura 49 – Inquadramento dell'analisi dell'accessibilità in emergenza.

2.2.3 L'ESPOSIZIONE NELLE RETI DI TRASPORTO

L'esposizione è intesa come l'equivalente valore di persone, cose e infrastrutture che possono subire un danno durante e/o dopo l'evento calamitoso.

²⁵ A tal proposito si rimanda alla *teoria dei grafi* delle reti di trasporto in cui sono descritti gli elementi che costituiscono un grafo e le relative specificità.

Analogamente a quanto riportato per la vulnerabilità, anche l'esposizione può essere funzione di tre componenti:

- esposizione fisica: rappresenta il costo economico di ripristino dell'infrastruttura a seguito dell'evento (es. ripristino armamento, linea aerea, viadotto, ponte, ecc.);
- esposizione funzionale: identifica i veicoli o il flusso di veicoli che transitano sulla tratta interessata dall'evento considerato;
- esposizione sistemica: è il danno economico costituito dalla ripercussione del danno sull'intera rete. A tal proposito si può considerare, per esempio, il maggior tempo (costo) impiegato per raggiungere una destinazione utilizzando un itinerario alternativo a causa dell'impraticabilità di una tratta interessata dall'evento critico.

2.3 PROCEDURA HSIM - AV HIGH SPEED INTERACTIVE MAPS - RFI

AV High Speed Interactive Maps è un'applicazione sviluppata da RFI - Rete Ferroviaria Italiana - per esaminare in modo visivo e interattivo lo stato realizzativo di un determinato punto o tratto delle linee dell'Alta Velocità - AV - italiana.

Attualmente la procedura è attivata per le linee Torino-Milano, Milano-Bologna, Bologna-Firenze, Roma- Napoli con l'obiettivo di estendere a breve termine la copertura a tutta la rete AV nazionale.

L'applicazione consiste in specifiche riprese video effettuate *in linea* mediante l'impiego di idonei veicoli che illustrano la visuale del macchinista del convoglio e dei particolari costruttivi della tratta ferroviaria, come illustrato in Figura 50.

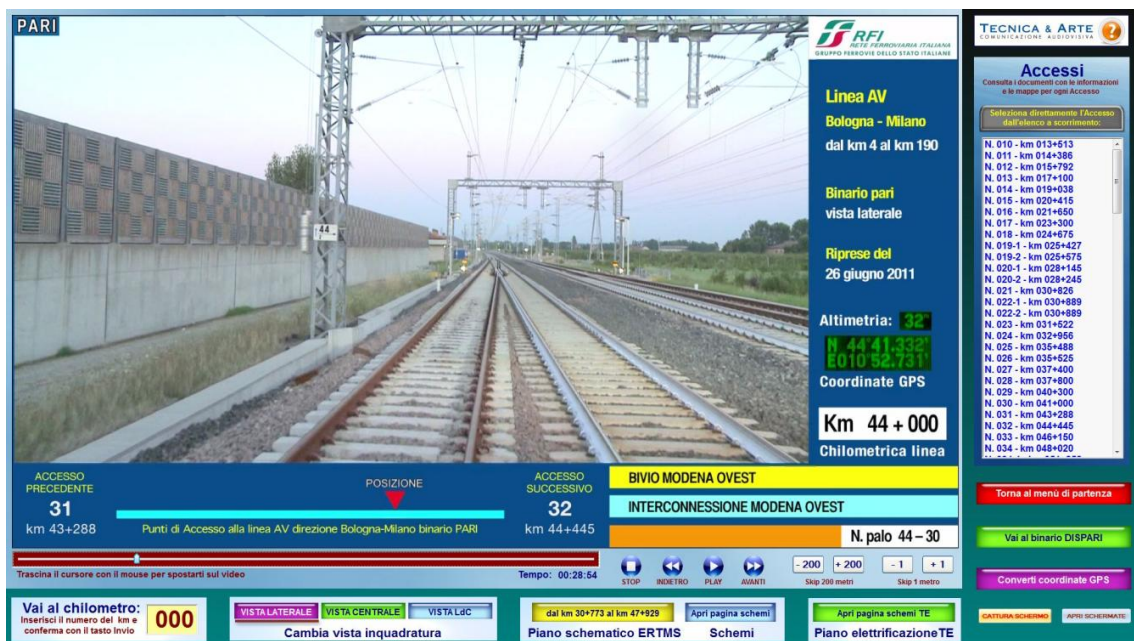


Figura 50 - Interfaccia grafica dell'applicazione AV – HSIM: schermata principale.

Durante lo scorrimento del filmato (e quindi *durante il viaggio*) è possibile scegliere i seguenti punti di vista:

- Laterale, riproduce fedelmente quanto osservabile dalla postazione del Macchinista del convoglio (Figura 51);

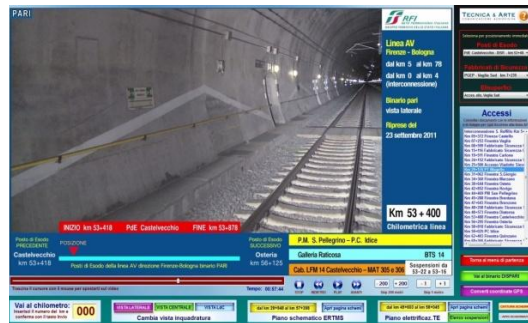


Figura 51 - AV – HSIM: vista laterale.

- Centrale, centrata sull' interbinario, che offre una inquadratura panoramica (figura 52);



figura 52 - av – hsim: vista centrale.

- Linea di Contatto, espressamente studiata per porre in evidenza i componenti della L.d.C. (Figura 53).



Figura 53 - AV – HSIM: vista linea di contatto.

Inoltre è possibile richiamare alcune funzioni di secondo livello che abilitano una finestra separata in sovrapposizione alla schermata principale: ogni finestra è dedicata alla gestione di una particolare funzione ed è liberamente riposizionabile.

La disponibilità di questi dati e informazioni trova impiego nell'ambito della manutenzione, dell'istruzione del personale e, non da ultimo, nella gestione della circolazione perturbata e delle Emergenze.

Manutenzione

L'abbinamento di dati tecnici sincronizzati con le riprese video è di grande importanza per pianificare e programmare piani di manutenzione per i vari sottosistemi che compongono l'infrastruttura. Avendo poi la disponibilità di riprese video effettuate in tempi successivi è possibile anche effettuare un controllo visivo dello stato di degrado dei componenti sotto esame e predisporre interventi manutentivi mirati alla risoluzione dei singoli problemi, aumentando di fatto l'affidabilità dell'intero complesso; è inoltre del tutto evidente l'importanza che riveste un *data base* centralizzato di questo tipo per l'intero sistema Alta Velocità.

Istruzione del Personale

Il consistente aumento dei costi connessi alla formazione del Personale rende un'applicazione come AV Maps particolarmente valida, mettendo a disposizione degli Istruttori uno strumento integrato per la familiarizzazione dei Candidati con l'ambiente operativo che troveranno sul campo. Altro settore che può trarre beneficio da questa procedura è l'abilitazione di Agenti provenienti da altri Operatori Ferroviari, che potranno beneficiare di una prima presa di contatto con le linee sulle quali dovranno poi essere impiegati.

Gestione delle anomalie di circolazione

In questi casi il Dirigente Centrale potrà indicare al Personale di Macchina le operazioni più appropriate per la risoluzione delle anomalie verificatesi basandosi sulla osservazione di dati oggettivi ed immediatamente disponibili, minimizzando in tal modo i tempi di intervento, con un corrispondente aumento degli standard di sicurezza e qualità del servizio.

2.4 MAPPATURA ACCESSI SEDE FERROVIARIA – RFI

All'interno del Master universitario in Ingegneria delle Infrastrutture e dei Sistemi Ferroviari organizzato dall'università Sapienza di Roma è stato svolto uno stage, nell' A.A. 2012/2013, dall'Ing. Alberto Olivieri presso la Direzione Territoriale Produzione di Firenze. L'obiettivo dello stage è consistito nell'implementazione di una procedura di mappatura

dinamica degli accessi di una linea ferroviaria²⁶. Sono quindi stati raccolti tutti i dati necessari per costruire un programma informatico in grado di elaborarli e renderli consultabili agli utenti in modo efficace e intuitivo.

L'attività di mappatura degli accessi ha riguardato la linea Firenze-Roma L514, detta anche *Direttissima*, nella parte Toscana dal PC Bassano al km 76+541 a Firenze Campo Marte al km 257+069.

L'idea alla base è stata quella di fornire delle indicazioni dettagliate a partire da un punto facilmente raggiungibile e riconoscibile, quale la chilometrica di una strada statale, provinciale o regionale, un casello autostradale o una stazione ferroviaria, fino al cancello di accesso alla sede ferroviaria.

È stato quindi sviluppato un programma che mediante un foglio di calcolo è in grado di elaborare i dati raccolti. Sono state inoltre implementate specifiche maschere di interfaccia per supportare l'utente nella ricerca degli accessi alla linea ferroviaria come illustrato in Figura 54.

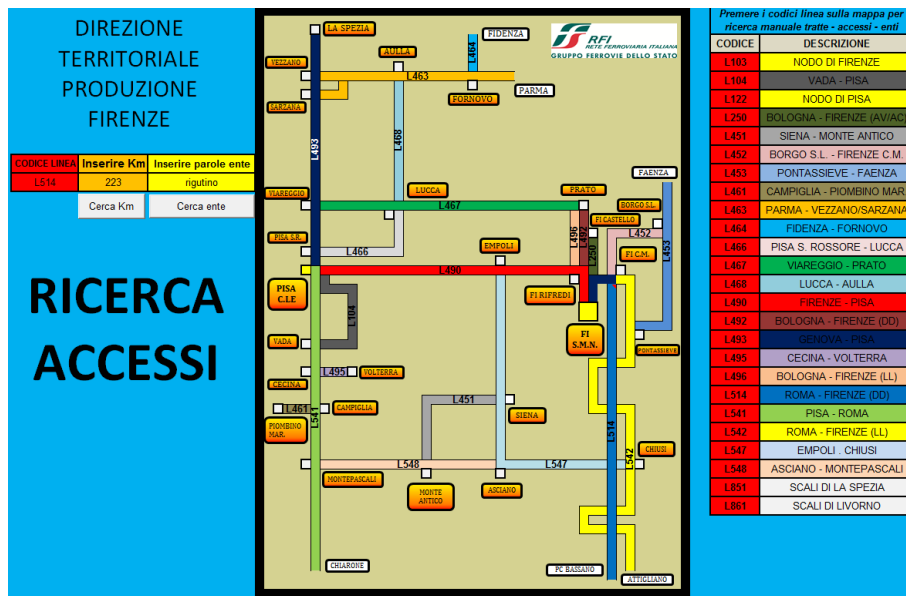


Figura 54 - Esempio di interfaccia grafica del programma.

L'esigenza di una mappatura degli accessi nasce da accordi e protocolli tra Rete Ferroviaria Italiana, in qualità di gestore della rete ferroviaria e gli enti pubblici tra cui, ad esempio, *Regione Toscana-Sistema di emergenza sanitaria territoriale 118*. Tra i compiti di RFI c'è quello di conoscere i punti di accesso alla ferrovia in modo da fornire indicazioni agli enti di soccorso esterni in caso di necessità.

²⁶ Alberto Olivieri. *Mappatura dinamica accessi della sede ferroviaria*. Master universitario di II livello in Ingegneria delle Infrastrutture e dei Sistemi Ferroviari A.A. 2012/2013.

I risultati dell'attività di mappatura e creazione del programma/database sono oggetto di condivisione con i Servizi di Pronto Intervento, tra cui Vigili del Fuoco, Soccorso Medico, Polizia Ferroviaria, Protezione Civile ecc.

2.5 MANUALE OPERATIVO PER LA GESTIONE DELLE ANORMALITÀ RILEVANTI O INCIDENTI DI ESERCIZIO - RFI

La struttura di RFI prevede la dislocazione sul territorio nazionale di Direzioni Territoriali Produzione – DTP deputate alla gestione della rete infrastrutturale, delle stazioni e degli apparati che attengono alla circolazione dei treni e alla manutenzione degli stessi. Inoltre ciascuna DTP ha il compito di elaborare il *manuale operativo per la gestione delle anormalità rilevanti o incidenti di esercizio* con lo scopo di definire modalità operative e responsabilità interne a RFI finalizzate a ottimizzare l'utilizzo dell'infrastruttura ferroviaria in presenza di significativi eventi perturbativi.

All'interno del documento sono classificate le tipologie di eventi perturbativi indicando le rispettive azioni da compiere. Inoltre sono presenti istruzioni relative ai rapporti tra Gestore dell'Infrastruttura e Imprese Ferroviarie oltre alle modalità di primo intervento e coordinamento a seguito di un evento.

2.6 MITIGAZIONE DEL RISCHIO

Dopo aver analizzato le componenti del rischio è necessario identificare quelle attività o azioni finalizzate alla mitigazione o riduzione del rischio stesso. In Figura 55 è illustrato il processo di valutazione e mitigazione del rischio secondo quanto prescritto dalle norme ISO/IEC Guide 51:1999 - Safety aspects - Guidelines for their inclusion in standards.



Figura 55 - Processo iterativo di valutazione e mitigazione del rischio.

Per un *valore* di rischio R è possibile tracciare, su un sistema di coordinate cartesiane frequenza-magnitudo, una curva di *isorischio* che indica la variazione della frequenza al variare della magnitudo e viceversa.

Le curve in Figura 56, rappresentate da iperboli equilateri, evidenziano che lo stesso *valore* di rischio può essere ottenuto da diverse combinazioni di coppie di valori della frequenza e della magnitudo. Eventi rarissimi possono essere associati a livelli di rischio elevato quando la magnitudo è elevatissima e viceversa.

Sempre nel diagramma di Figura 56 sono riportate nel piano M, F (Magnitudo delle conseguenze - Frequenza di accadimento) le iperboli che rappresentano le curve di isorischio R_i (con $R_2 > R_1$).

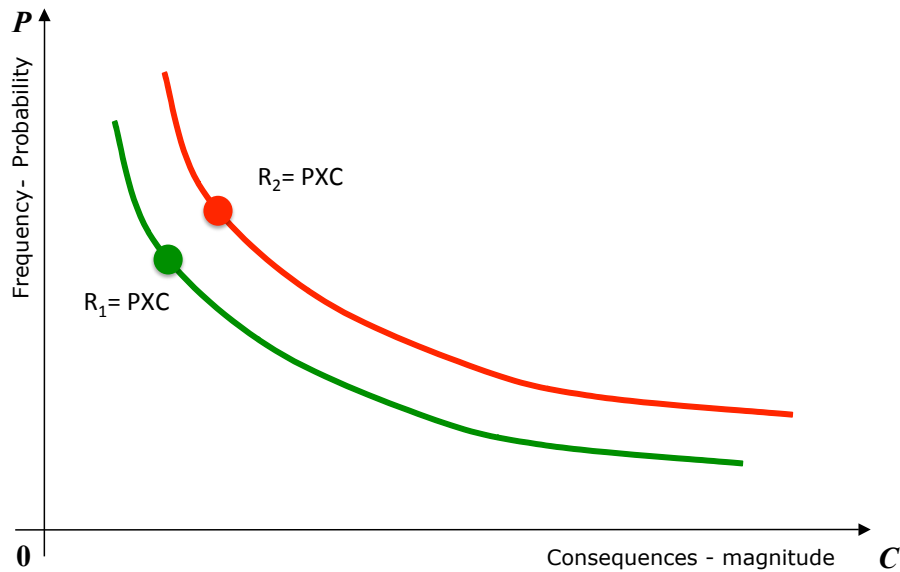


Figura 56 - Trend di curve isorischio ($R_2 > R_1$).

A ogni evento indesiderato si associa un punto del diagramma che si trova sulla curva caratterizzata da un livello di rischio R_i e si verifica che esso sia al di sotto della soglia massima di accettabilità R_s^{27} (Figura 57).

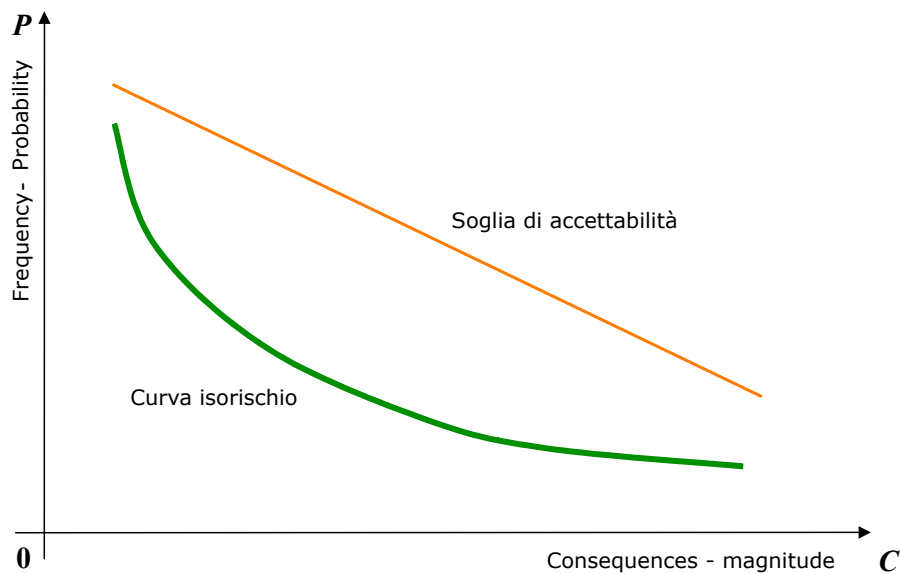


Figura 57 - Esempio di soglia di accettabilità del rischio.

In caso contrario, per riportare il rischio entro i livelli di accettabilità è necessario intervenire sulla frequenza di accadimento con *misure di prevenzione* o sulla magnitudo degli effetti con *misure di protezione* come illustrato in Figura 58.

²⁷ Una delle fasi più delicate del processo di definizione della sicurezza è la determinazione degli standard di riferimento. Nella definizione dei criteri di accettabilità del rischio, diversi in ogni Paese, l'approccio integrato prevede di tenere in considerazione non solo gli aspetti più tecnici ma anche aspetti di natura socio-economica. In questo modo, mediante l'analisi costi benefici è possibile verificare caso per caso le misure di mitigazione più idonee.

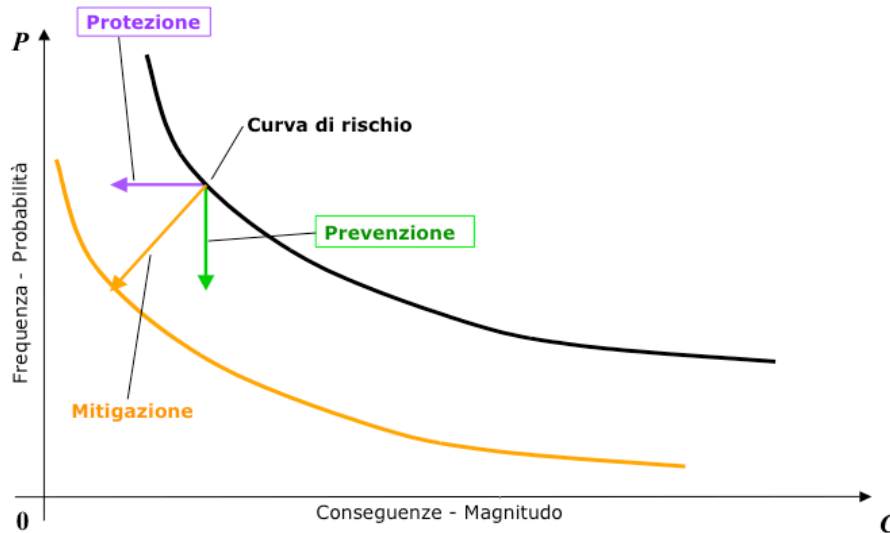


Figura 58 - Trend di una curva di rischio (in nero) con riportate le attività di protezione (in viola), prevenzione (in verde) e mitigazione (in giallo).

In Figura 58 è riportato un generico andamento di curva di rischio dove a elevati valori di probabilità può essere associato un valore contenuto di conseguenze e viceversa.

L'attività di mitigazione del rischio (in giallo) può essere effettuata riducendo il valore di probabilità di accadimento (in verde) e/o riducendo il valore relativo alle conseguenze di un evento (in viola).

L'analisi dell'accessibilità ferroviaria in emergenza rientra tra le attività mitigative di riduzione delle conseguenze. La redazione di piani di emergenza contenenti mappe di accessibilità, riferite a specifiche tratte ferroviarie, permette una migliore organizzazione dell'intervento in termini di tempo di arrivo sul posto dell'evento e qualità delle operazioni (veicoli, attrezzature, ecc).

2.7 SERVIZIO NAZIONALE DELLA PROTEZIONE CIVILE

La prima risposta all'emergenza, qualunque sia la natura e l'estensione dell'evento, deve essere garantita a livello locale a partire dalla struttura comunale ovvero l'istituzione più vicina al cittadino. Il primo responsabile della protezione civile in ogni Comune è quindi il Sindaco. Quando però l'evento non può essere fronteggiato con i mezzi a disposizione del Comune, si mobilitano i livelli superiori attraverso un'azione integrata e coordinata: la Provincia, la Prefettura, la Regione, fino al coinvolgimento dello Stato in caso di emergenza nazionale.

Il Dipartimento Nazionale della Protezione Civile è una struttura afferente alla Presidenza del Consiglio dei Ministri nata nel 1982 per dotare il Paese di un *organismo* capace di mobilitare e coordinare tutte le risorse nazionali utili ad assicurare assistenza alla popolazione in caso di grave emergenza. Il drammatico ritardo dei soccorsi e

l'assenza di coordinamento che avevano caratterizzato la gestione del terremoto in Irpinia nel 1980 avevano, infatti, evidenziato la necessità di istituire una struttura che si occupasse in maniera permanente di Protezione Civile²⁸.

Il Dipartimento, operando nel rispetto del principio di sussidiarietà²⁹ in stretto raccordo con le Regioni e le Province autonome, si occupa di tutte le attività volte alla previsione e alla prevenzione dei rischi (di origine antropica e naturale), al soccorso e all'assistenza delle popolazioni colpite da calamità, al contrasto e al superamento dell'emergenza.

Il *Sistema di Protezione Civile* è quindi l'insieme delle attività messe in campo per tutelare l'integrità della vita, i beni, gli insediamenti e l'ambiente dai danni o dal pericolo di danni che derivano dalle calamità: previsione e prevenzione dei rischi, soccorso delle popolazioni colpite, contrasto e superamento dell'emergenza e mitigazione dei rischi stessi.

Il Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, le Forze Armate, le Forze di Polizia, il Corpo Forestale dello Stato, la Comunità scientifica, la Croce Rossa Italiana, le strutture del Servizio Sanitario Nazionale, le organizzazioni di volontariato, il Corpo Nazionale di soccorso alpino e speleologico costituiscono le strutture operative sul territorio.

²⁸ Maggiori informazioni relative alle attività svolte dal Dipartimento delle Protezione Civile Nazionale sono reperibili sul sito ufficiale: www.protezionecivile.gov.

²⁹ Le attività amministrative devono essere svolte in via ordinaria dall'entità territoriale amministrativa più vicina ai cittadini (i comuni) mentre i livelli amministrativi territoriali superiori (Stato, Regioni, Province, Città metropolitane, Comunità montane ed isolate e Unioni di comuni) intervengono solo come sussidio (dal latino *subsidium*, aiuto) nei casi in cui il cittadino o l'entità sottostante siano impossibilitati ad agire per conto proprio.

2.8 LA RICERCA OPERATIVA E GLI STRUMENTI DI SUPPORTO ALLE DECISIONI – SSD

La parola Ricerca Operativa ha origine dalla traduzione del termine inglese *Operations Research* coniato all'inizio degli anni '40 per indicare quella disciplina che si occupa della ricerca del modo migliore di condurre le operazioni.

Le operazioni in questione, al momento della sua nascita, erano le operazioni militari legate allo svolgimento della seconda guerra mondiale. A partire dall'immediato dopoguerra tali metodi furono poi estesi in altri contesti quali ad esempio la logistica e la produzione, i trasporti, le telecomunicazioni e la finanza³⁰.

Nei paragrafi seguenti è riportata una descrizione degli Strumenti di Supporto alle Decisioni e dei possibili ambiti di utilizzo utilizzati per la soluzione di problemi decisionali o di ottimizzazione.

2.8.1 COS'È E DI COSA SI OCCUPA LA RICERCA OPERATIVA

La Ricerca Operativa ha come oggetto lo studio e la messa a punto di metodologie e strumenti quantitativi per la soluzione di problemi decisionali o di ottimizzazione ovvero quando sono verificate le seguenti due condizioni:

- esistono diverse alternative o soluzioni del problema;
- è possibile definire almeno un criterio di valutazione o obiettivo che permetta di confrontare le soluzioni rendendone alcune preferibili ad altre.

A differenza di altre discipline scientifiche, dove l'attenzione è rivolta alla descrizione delle soluzioni di un problema e allo studio delle loro proprietà, quali ad esempio l'esistenza e unicità della soluzione, la Ricerca Operativa non ha una finalità descrittiva e non avrebbe motivo di operare nel caso di un problema con un'unica soluzione.

La Ricerca Operativa si occupa invece della risoluzione con metodo scientifico di problemi decisionali e quindi della ricerca della migliore soluzione: per questo sarebbe corretto rinominarla come la "scienza del meglio".

Gli esperti in Ricerca Operativa costituiscono oggi una figura professionale emergente nel nostro Paese, con aree di intervento che vanno dalla pianificazione e

³⁰ Bruglieri M., Colorni C., Ricerca Operativa. Zanichelli, giugno 2012.

controllo della produzione alla gestione delle scorte, alla logistica e ai trasporti, al marketing e finanza, alla medicina e sanità, all'ambiente e infrastrutture³¹.

Si tratta di una figura nata con mansioni specialistiche: in origine esperti in matematica e statistica, in grado di ottimizzare i processi produttivi, ricorrendo a modelli di simulazione. Successivamente gli orizzonti si sono allargati comprendendo competenze in ambienti sempre più multidisciplinari.

Così ora gli esperti di Ricerca Operativa sono richiesti, ad esempio, nel settore delle telecomunicazioni per definire il migliore utilizzo dei satelliti, nel settore del trasporto ferroviario per pianificare orari e percorsi dei viaggiatori, nel settore del trasporto aereo e in quello sanitario per pianificare i turni del personale.

In futuro ci saranno sicuramente nuove applicazioni della Ricerca Operativa in settori di cui ora si ignora l'esistenza poiché l'esigenza di ottimizzare è presente quasi in ogni ambito.

2.8.2 COME AFFRONTARE UN PROCESSO DECISIONALE

Il miglioramento dell'accessibilità ferroviaria può essere conseguito mediante interventi di carattere infrastrutturale e/o gestionale. L'identificazione e la valutazione di tali provvedimenti richiede un'analisi in grado di far emergere costi e benefici di ciascun intervento affinché sia possibile effettuare una scelta (decisione) circa la priorità e la sequenza di attuazione. Un processo decisionale può, in modo schematico, essere decomposto nelle cinque fasi indicate nel diagramma di flusso di Figura 59.

³¹ Lancia G. (2002). Mathematical Programming Approaches for Computational Biology Problems, in Modelli e Algoritmi per l'Ottimizzazione di Sistemi Complessi, Atti della Scuola CIRO 2002, a cura di A. Agnetis e G. Di Pillo, Pitagora Editrice, 265-310.

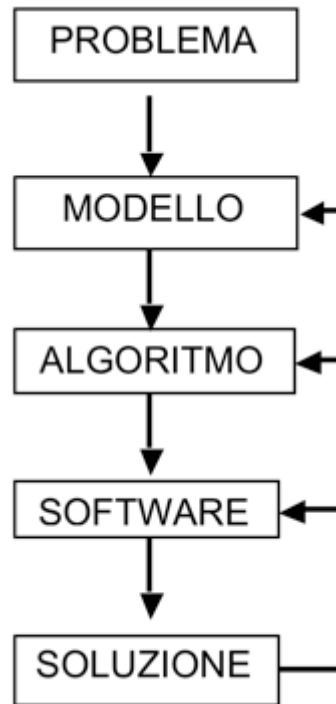


Figura 59 - Diagramma di flusso di un processo decisionale.

La *prima fase*, ossia l'individuazione del problema, richiede un periodo di dialogo con il committente, per capire se si tratta veramente di un problema decisionale, quali sono gli elementi che non possono variare (e quindi attorno a cui non verte nessuna decisione) e quali invece possono variare.

Molto spesso il committente è talmente abituato ad adottare certe strategie di soluzione che ha difficoltà nel distinguere gli elementi che sono veramente fissati e quelli che invece è consuetudine tenere fissati in un certo modo anche se in realtà potrebbero variare. Inoltre il committente ha spesso difficoltà a riferire esattamente tutti i vincoli che regolano il problema e a esplicitare il suo criterio (o i criteri) di preferenza tra le alternative.

Occorre inoltre procedere alla raccolta dei dati: molto spesso non è possibile misurare tutti i dati di interesse perché, ad esempio, legati a fenomeni che devono ancora accadere e bisogna quindi utilizzare stime basate sugli andamenti della serie storica o su previsioni (ad esempio la domanda mensile di un certo bene in un problema di produzione).

La *seconda fase* ossia la costruzione del modello matematico descritta nel paragrafo 3.3 rappresenta la fase più delicata di schematizzazione e parametrizzazione del problema reale dove sono considerate le variabili e i vincoli.

La *terza fase* consiste nella scelta di una procedura di risoluzione del modello matematico, il cosiddetto algoritmo. La parola algoritmo (derivante dal nome arabo

dell'autore di un testo di algebra dell'825 d.C.) indica una procedura computazionale ben definita, ossia una sequenza finita di istruzioni coerenti che trasforma un insieme di dati di ingresso in un insieme di dati di uscita, al fine di *risolvere* un problema.

Non sempre è possibile risolvere all'ottimo un problema decisionale, per una difficoltà intrinseca del problema stesso: in questo caso ci si deve accontentare di un algoritmo euristico, ossia di un algoritmo che non garantisce di trovare la soluzione ottima del problema, ma una *buona* soluzione ammissibile.

Esistono poi algoritmi che garantiscono di trovare comunque soluzioni ammissibili con valori *prossimi* a quello ottimo entro una certa soglia: tali algoritmi sono detti approssimati. Se invece l'algoritmo garantisce l'*ottimalità* della soluzione trovata, viene detto *algoritmo esatto*.

Poiché in quasi tutte le applicazioni reali le istanze del problema hanno dimensioni tali da non potere eseguire l'algoritmo manualmente, occorre implementare l'algoritmo in un opportuno linguaggio di programmazione per ottenere un codice di calcolo che consenta la risoluzione del problema mediante un computer.

La *quarta fase*, come indicato in Figura 59, consiste nell'implementazione di un vero e proprio software di risoluzione che, mediante un'opportuna interfaccia grafica, permetta l'utilizzo del codice anche da chi non lo ha implementato.

Anche la *quinta fase*, ossia l'analisi dei risultati ottenuti, riveste un ruolo molto importante. Le soluzioni potrebbero essere incoerenti rispetto alla realtà, manifestando quindi che il modello matematico creato non rappresenta bene il problema reale o che sono stati commessi degli errori nelle fasi successive (ad esempio un errore di implementazione del software). Come illustrato in Figura 59, in alcuni casi può essere necessario apportare modifiche al modello, basate sul feedback dei risultati, all'algoritmo di risoluzione affinché le soluzioni siano più accurate oppure al codice di calcolo, se si sospetta che l'algoritmo sia valido ma la sua implementazione non sia corretta.

2.8.3 MODELLI DECISIONALI O DI OTTIMIZZAZIONE

Il modello matematico è una *astrazione* che permette di descrivere in termini *matematici* le caratteristiche rilevanti del problema che si vuole studiare e risolvere. I modelli matematici possono essere puramente descrittivi: esempi famosi di modelli di questo tipo sviluppati nel corso dei secoli da alcune discipline scientifiche sono il modello del sistema solare di Copernico, il modello del punto materiale della meccanica classica, il modello dell'atomo di Bohr, il modello di Malthus di crescita della popolazione, il modello macroeconomico di Keynes, il modello di macchina da calcolo di Turing.

Nel presente lavoro di tesi si è fatto riferimento ai modelli decisionali o di ottimizzazione. Questi sono suddivisi a loro volta in due classi principali: modelli di simulazione e modelli analitici.

I modelli di simulazione vengono generalmente impiegati quando la realtà in esame è molto complessa e i dati necessari a studiare il problema non sono noti in modo certo ma influenzati da una grande variabilità.

In tal caso si cerca di riprodurre nel modo più accurato possibile il comportamento del sistema che si vuole studiare per mezzo di relazioni matematiche; si studia quindi, su calcolatore, la risposta a sollecitazioni che vengono realizzate con l'ausilio di generatori di numeri pseudo-casuali, in modo che siano il più possibile simili a quelle reali. I modelli di simulazione vengono impiegati per analisi di scenari, dette anche analisi di tipo *what if*.

Nei modelli analitici invece, tutto il sistema sotto esame è descritto per mezzo di relazioni matematiche (o logiche) tra variabili decisionali che rappresentano gli elementi del sistema. I criteri di scelta che devono essere massimizzati o minimizzati sono espressi mediante funzioni matematiche dette *funzioni obiettivo*.

I modelli vengono a loro volta classificati in base alle caratteristiche del problema decisionale da essi rappresentati e che possono essere fatte emergere *rispondendo*, ad esempio, a queste tre domande:

- chi decide?
- rispetto a quali obiettivi decide?
- con quali informazioni decide?

La *risposta* alla prima domanda definisce il numero dei decisori (uno o molti), la *risposta* alla seconda definisce il numero degli obiettivi (uno o molti), la *risposta* alla terza definisce il tipo di ambiente in cui opera il modello ossia se con informazioni certe (ambiente deterministico) o incerte (ambiente stocastico).

Le possibili combinazioni di queste tre caratteristiche (uno o più decisori, uno o più obiettivi, ambiente deterministico o stocastico) porta alla classificazione di modelli analitici, molti dei quali hanno avuto ampie trattazioni nella letteratura specialistica.

In particolare nel caso in cui vi siano più decisori in competizione tra loro il modello rientra nella teoria dei giochi; nel caso in cui vi siano più criteri di scelta si ha la programmazione a molti obiettivi o analisi a molti criteri; nel caso in cui i dati non sono noti con certezza si ha la programmazione stocastica o la teoria delle decisioni; infine nel caso

più semplice in cui vi sia un solo decisore, un solo criterio di scelta e informazione certa sui dati si ha la programmazione matematica.

2.9 L'IMPIANTO NORMATIVO

Come anticipato in precedenza non esiste attualmente un impianto normativo consolidato finalizzato ad analizzare e regolamentare l'accessibilità della rete ferroviaria in caso di emergenza.

Direttive, leggi e regolamenti sono prevalentemente orientati a garantire l'interoperabilità e a migliorare la sicurezza nelle reti ferroviarie comunitarie. Particolare attenzione viene data alle gallerie ferroviarie dove è necessario analizzarne l'accessibilità per i Soccorsi.

Si riporta di seguito una breve sintesi dei principali riferimenti normativi.

2.9.1 DIRETTIVA 2004/49/CE RELATIVA ALLA SICUREZZA DELLE FERROVIE COMUNITARIE

La Direttiva 2004/49/CE, recepita in Italia con Decreto Legislativo 10 agosto 2007, n. 162 disciplina le condizioni di sicurezza per l'accesso al mercato dei servizi ferroviari e ha come obiettivo il miglioramento della sicurezza del sistema ferroviario italiano, tenendo conto dell'evoluzione della normativa e del progresso tecnico e scientifico.

Il perseguimento di tali obiettivi avviene mediante:

- l'adeguamento e l'armonizzazione della struttura normativa nazionale con quella comunitaria;
- la progressiva adozione degli obiettivi comuni di sicurezza e dei metodi comuni di sicurezza (definiti negli allegati del Decreto);
- l'individuazione di un organismo nazionale preposto alla sicurezza e di un organismo investigativo incaricato di effettuare indagini sugli incidenti e sugli inconvenienti ferroviari;
- l'assegnazione dei compiti e delle competenze ai suddetti organismi e la ripartizione delle responsabilità fra i soggetti interessati.

Il Decreto impone quindi l'adozione di obiettivi comuni di sicurezza - CST - e metodi comuni di sicurezza - CSM - in grado di fornire strumenti di valutazione del livello di sicurezza e delle prestazioni degli operatori a livello comunitario e degli Stati membri.

I primi, CST, rappresentano i livelli minimi di sicurezza che devono almeno essere raggiunti dalle diverse parti del sistema ferroviario (quali il sistema ferroviario convenzionale, il sistema ferroviario ad alta velocità, le gallerie ferroviarie lunghe o le linee adibite unicamente al trasporto di merci) e dal sistema nel suo complesso, espressi in criteri di accettazione del rischio.

I metodi comuni di sicurezza, CSM, sono elaborati per descrivere come valutare i livelli di sicurezza, la realizzazione degli obiettivi di sicurezza e la conformità con gli altri requisiti in materia di sicurezza;

Viene inoltre introdotto e definito il concetto di *sistema di gestione della sicurezza* inteso come *l'organizzazione e i provvedimenti messi in atto da un Gestore dell'Infrastruttura o da un'Impresa Ferroviaria per assicurare la gestione sicura delle operazioni*.

Il sistema di gestione della sicurezza documenta e descrive in tutte le sue parti la ripartizione delle responsabilità in seno all'organizzazione del Gestore dell'Infrastruttura o dell'Impresa Ferroviaria. Fra gli elementi essenziali che costituiscono il sistema di gestione della sicurezza ci sono i piani di intervento, di allarme e informazione in caso di emergenza, concordati con le Autorità competenti.

È evidente che l'implementazione dei piani d'intervento presuppone la conoscenza de territorio circostante e delle *vie d'accesso* al sistema ferroviario da parte dei Servizi di Pronto Intervento.

2.9.2 DECRETO MINISTERIALE 28 OTTOBRE 2005 - SICUREZZA NELLE GALLERIE FERROVIARIE

Il D.M., applicato a tutte le gallerie ferroviarie di lunghezza superiore a 1000 m, in esercizio, in fase di costruzione o allo stato di progettazione, ha come obiettivo il raggiungimento di livelli adeguati di sicurezza nelle gallerie ferroviarie. Tali standard possono essere conseguiti mediante l'adozione di misure di prevenzione e protezione denominate requisiti di sicurezza³².

I requisiti di sicurezza, organizzati su due differenti livelli - minimi e integrativi -, devono essere analizzati considerando sistematicamente tutti gli elementi del sistema galleria costituito da:

- infrastruttura;
- esercizio;
- utenti;
- materiale rotabile.

³² Il Decreto, oltre a definire compiti e responsabilità di ciascun soggetto coinvolto nella sicurezza delle gallerie, impone l'analisi di rischio come strumento utile per dimostrare da un lato il conseguimento degli obiettivi di sicurezza e dall'altro un livello di rischio entro determinate soglie di accettabilità.



Figura 60 - Elementi del Sistema Galleria.

Per quanto riguarda la gestione dell'emergenza, il Decreto fornisce indicazioni circa i requisiti che riguardano l'accessibilità della galleria da parte dei Servizi di Pronto Intervento. In funzione della direzionalità della galleria - singolo o doppio fornice - devono essere previste vie d'accesso, anche carrabili, a interdistanza variabile.

Pozzi e finestre, ad esempio, sono considerati accessi intermedi e possono essere utilizzati sia come vie di esodo per gli utenti sia come vie di accesso per i mezzi (se carrabili) e le Squadre di Soccorso.

Inoltre, per gallerie aventi lunghezza superiore a 5000 m deve essere previsto un piazzale di emergenza, un'area di triage³³ e una piazzola per elisoccorso. Le gallerie non dotate piazzale di emergenza devono avere un collegamento viario percorribile con mezzi di soccorso tra uno dei due ingressi e la viabilità stradale ordinaria.

L'accessibilità in galleria può essere garantita utilizzando un sistema di armamento su piastre di calcestruzzo anziché su ballast³⁴ per permettere il transito ai veicoli stradali delle Squadre di Soccorso.

Infine, particolare rilevanza è data ai Piani di Emergenza e Soccorso redatti dalle autorità locali competenti in accordo con il Gestore dell'Infrastruttura. In tali piani, infatti, sono definiti compiti e responsabilità dei vari Enti coinvolti nelle operazioni di soccorso a

³³ Area destinata al primo soccorso e alle persone coinvolte in un eventuale incidente.

³⁴ Il ballast o massiccata, costituito da pietrisco avente opportune caratteristiche tecnico meccaniche, ha lo scopo di ancorare l'intero binario contro il pericolo di scorrimenti longitudinali e trasversali e di ripartire sul terreno i pesi del convoglio ferroviario.

partire dagli scenari di incidente considerati e delle misure di mitigazione presenti - dotazioni infrastrutturali e impiantistiche - .

La valutazione dell'accessibilità nelle gallerie ferroviarie è stata ampiamente trattata nella tesi di Dottorato dal titolo "IL RISCHIO DI INCENDIO NELLE GALLERIE FERROVIARIE - L'elaborazione di Piani di Emergenza Esterna" dell'Ing. Giovanni Rainoldi³⁵.

2.9.3 DIRETTIVA PRESIDENZA DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI DEL 2 MAGGIO 2006: INDICAZIONI PER IL COORDINAMENTO OPERATIVO DI EMERGENZE

La Direttiva del 2 maggio 2006 definisce una strategia d'intervento unica e adeguata ad affrontare le criticità connesse ad *emergenze da incidenti* raggruppando, laddove possibile, tipologie che prevedono un modello di intervento simile. Sono quindi fornite indicazioni per il coordinamento operativo di emergenze dovute a:

- incidenti ferroviari con convogli passeggeri - Esplosioni o crolli di strutture con coinvolgimento di persone – Incidenti stradali che coinvolgono un gran numero di persone;
- incidenti in mare che coinvolgono un gran numero di persone;
- incidenti aerei;
- incidenti con presenza di sostanze pericolose.

Gli incidenti ferroviari, quelli stradali e le esplosioni o crolli di strutture sono stati raggruppati in un'unica classe, sia perché non esistono di fatto normative cogenti che regolamentano questi settori specifici di intervento, sia perché si tratta di emergenze che richiedono procedure e modalità operative assimilabili. Vi sono tuttavia delle differenze tra alcune componenti specifiche coinvolte (es. Rete Ferroviaria Italiana piuttosto che Autostrade per l'Italia), che in ogni caso hanno un ruolo ben definito e strettamente tecnico nella gestione dell'evento.

La strategia generale, valida per tutte le classi di incidenti prese in considerazione e fatte salve le attuali pianificazioni in vigore, prevede:

1. la definizione del flusso di informazioni tra le sale operative territoriali e centrali per assicurare l'immediata attivazione del *sistema* di protezione civile;

³⁵ Corso di Dottorato in Infrastrutture e Trasporti XXV Ciclo – Università LaSapienza.

2. l'individuazione di un Direttore Tecnico dei Soccorsi per il coordinamento delle attività sul luogo dell'incidente, l'indicazione delle attività prioritarie da porre in essere in caso di emergenza e l'attribuzione dei compiti alle strutture operative che per prime intervengono;
3. l'assegnazione, laddove possibile, al Sindaco delle funzioni relative alla prima assistenza alla popolazione e alla diffusione delle informazioni;
4. l'istituzione di un centro di coordinamento per la gestione *a regime* dell'emergenza.

In caso di incidente ferroviario il *flusso informativo* prevede che la comunicazione dell'evento pervenga dal luogo dell'incidente ad una o più sale operative territoriali delle forze istituzionali preposte al soccorso e/o di pubblica utilità. Parallelamente viene allertata la sala operativa territoriale del Gruppo Ferrovie dello Stato che trasmette immediatamente l'allarme al Comando Provinciale dei Vigili del Fuoco, alle Forze di Polizia e al 118.



Figura 61 – Flusso informativo dal luogo dell'evento alle forze istituzionali di pubblica utilità.

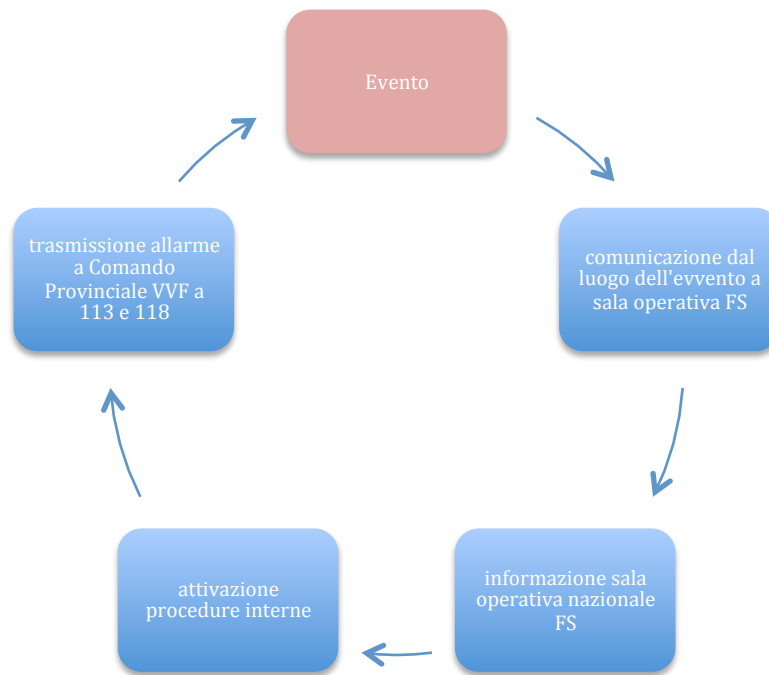


Figura 62 - Flusso informativo dal luogo dell'evento alla sala operativa di FS.

Tra le principali informazioni trasmesse dalla sala operativa delle Ferrovie dello Stato al Comando provinciale dei Vigili del Fuoco, alle Forze di Polizia e al Soccorso Sanitario vi sono quelle riportate in Figura 63.

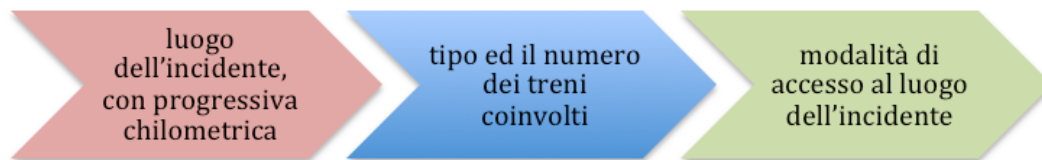


Figura 63 - Principali informazioni trasmesse in caso di evento.

2.10 I VEICOLI ANTINCENDIO FERROVIARI

Per la gestione delle emergenze in ambito ferroviario vengono talvolta impiegati specifici veicoli opportunamente attrezzati. Tali veicoli si distinguono in treni di spegnimento e salvataggio, veicoli bimodali strada – ferrovia e veicoli stradali antincendio trasportati su idonei carri ferroviari. Di seguito viene riportata una rassegna delle tecnologie e dei veicoli impiegati in ambito ferroviario per fronteggiare un'emergenza.

2.10.1 TRENO DI SPEGNIMENTO E SALVATAGGIO

Il veicolo ferroviario semovente TSS 08, illustrato in Figura 64, è un convoglio speciale composto da tre carri (moduli) attualmente utilizzato sulle linee ferroviarie Svizzere del Canton Ticino. Il TSS 08 è impiegato per interventi di spegnimento incendi sulle linee ferroviarie e in prossimità di esse - es. incendi boschivi - e per evacuare i treni viaggiatori o merci in avaria sui viadotti o nelle gallerie³⁶.

Il convoglio, dotato di trazione diesel, ha un peso complessivo di circa 240 tonnellate, una velocità massima di circa 100 km/h ed è in grado di trainare fino a 730 tonnellate su pendenze del ventisette per mille.



Figura 64 - Treno TSS 08 impiegato dalle ferrovie elvetiche.

Il primo modulo, *carro materiale*, situato alla *testa* del convoglio, è provvisto di generatore elettrico e strumenti/attrezzature di pronto intervento - ad esempio per gli interventi in caso di fuoriuscita d'olio e di messa in sicurezza della linea ferroviaria – cui si aggiunge il compressore per l'aria respirabile.

³⁶Ulteriori informazioni circa l'utilizzo del convoglio sono reperibili sul sito delle ferrovie elvetiche: [www.http://m.ffs.ch](http://m.ffs.ch)

Il secondo modulo, *carro di spegnimento* illustrato in Figura 65, è dotato di un serbatoio di 48.000 litri d'acqua e 1.800 litri di schiuma, la cui pompa ha un rendimento di 5.500 litri al minuto. Il cannone ad acqua posto sul tetto è in grado di *sparare* acqua fino a 70 metri di distanza.



Figura 65 – Treno TSS 08: carro serbatoio.

Il terzo e ultimo modulo, *carro salvataggio* illustrato in Figura 66, garantisce protezione dagli agenti tossici esterni a circa 60 persone grazie a un sistema di pressurizzazione: in questo modo è possibile portare in salvo macchinisti, operatori o passeggeri presenti sui treni.



Figura 66 - Treno TSS 08: carro salvataggio per il soccorso di persone.

2.10.2 VEICOLI ANTINCENDIO BIMODALI STRADA - ROTAIA

Il V.A.B. – Veicolo Antincendio Bimodale consente il transito non solo su strada ma anche su rotaia in quanto è dotato di due assi con ruote ferroviarie di tipo e con scartamento idoneo³⁷.

La forza di trazione per il movimento su rotaia è fornita tramite asse motore del veicolo, per mezzo di tamburi di frizione, di adeguato diametro, posti a contatto delle ruote motrici. L'abbassamento e il sollevamento degli assi ferroviari avviene tramite cilindri idraulici dove è presente un dispositivo di emergenza per il sollevamento degli assi ferroviari in caso di guasti.

La sagoma ferroviaria rispetta le prescrizioni vigenti da normativa.

È presente il dispositivo retarder che gestisce l'impianto frenante nelle due modalità di guida. Il veicolo garantisce una marcia bidirezionale con prestazioni simili in entrambe le direzioni con una velocità ferroviaria massima sia in avanti sia in retromarcia pari a 40 km/h.

Il posizionamento sui binari avviene in modo rapido ed è reso agevole dall'adozione di dispositivi luminosi opportunamente indirizzati sugli assi ferroviari e zona sottostante, che favoriscono la visuale all'uomo della squadra d'assistenza al guidatore.

Sono presenti dispositivi d'illuminazione per la marcia su ferrovia anteriori e posteriori a luce bianca e rossa e un avvisatore acustico d'opportuna intensità per il movimento in marcia indietro

L'automezzo di Soccorso Antincendio Bimodale BAI "VAB"³⁸ è dotato di opportuno materiale di caricamento quale manichette, pistola con portata regolabile e lance, miscelatore di linea per gli interventi, lampade portatili antideflagranti, estintori, scala, motogeneratore, motoventilatore, etc. Infine completano il materiale di caricamento le attrezzature di soccorso quali divaricatore e cesoia idraulica, cilindro telescopico divaricatore, motosega, moto troncatore.

³⁷ Nel sito del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, è presente un'area dedicata alla presentazione di veicoli e attrezzature utilizzate nel fronteggiare un'emergenza. www.vigilfuoco.it

³⁸ BAI – Brescia Antincendi International S.r.l. è una società specializzata nella progettazione, produzione e vendita di veicoli antincendio e di soccorso. www.bai.it



Figura 67 - Veicolo di soccorso bimodale in dotazione al Corpo Nazionale VVF.

2.10.3 VEICOLI STRADALI ANTINCENDIO TRASPORTATI SU CARRI FERROVIARI

In alcuni casi vengono adottate soluzioni *ibride* che prevedono l'utilizzo di un veicolo antincendio stradale³⁹ opportunamente collocato su un carro pianale ferroviario come illustrato in Figura 68.

Generalmente l'automezzo utilizzato è l'APS - Auto Pompa Serbatoio: veicolo pesante dotato di un serbatoio di acqua con una pompa per gli incendi, dei respiratori per andare in luoghi con presenza di fumo, scale per raggiungere finestre e balconi ed una serie di attrezzi per effettuare manovre particolari per accedere a locali, spargere schiuma sugli incendi, e altri dispositivi utili in situazioni di emergenza.



Figura 68 - APS collocato su pianale ferroviario.

³⁹ Trieste: esercitazione transfrontaliera di Protezione Civile Karst 2011. <http://www.fsnews.it>

L'adozione di questa soluzione, alternativa a quelle descritte in precedenza, non richiede particolari risorse economiche dedicate all'acquisto di veicoli in quanto è possibile utilizzare pianali standard.

Tuttavia l'aspetto *organizzativo* riveste un ruolo importante: è, infatti, necessario che il veicolo APS sia caricato sul pianale. Questo richiede degli spazi attrezzati, in genere stazioni, che permettano di effettuare la manovra.

Inoltre la composizione del convoglio, che generalmente è costituito da locomotiva a trazione diesel, ferrocisterna con acqua e pianale con APS, può talvolta richiedere un tempo troppo elevato.

Le caratteristiche del sistema *ibrido* dipendono quindi dal tipo di APS utilizzata, dalla dotazione e dalle attrezzature di cui è fornita.



Figura 69 - Utilizzo di APS su pianale ferroviario.



Figura 70 - Carro serbatoio per l'approvvigionamento idrico.

3 IL METODO DI ANALISI E LA FORMULAZIONE DELL'INDICE DI ACCESSIBILITÀ

Gli elementi che entrano in gioco all'interno del processo di definizione dell'accessibilità del sistema ferroviario a seguito di eventi rilevanti sono numerosi.

Come visto nei capitoli precedenti l'impianto normativo nazionale e comunitario risulta abbastanza carente nell'indicare precisi percorsi per la definizione della vulnerabilità e dell'accessibilità di una tratta ferroviaria a cielo aperto. In generale, ciò che è emerso è, da un lato, l'evidente presenza d'infiniti scenari analizzabili, dall'altro, la necessità di scegliere solo quelli ritenuti più significativi. Per fare ciò ci si avvale spesso di strumenti che tengono conto della natura probabilistica delle variabili che influenzano questi scenari o di modelli molto complessi che simulano le dinamiche di un incidente.

Le competenze, i tempi e i costi necessari per questo tipo di analisi sono adeguati in una fase in cui occorre prendere delle decisioni ben mirate ma trovano scarsa efficacia, in termini di costi-benefici, in una fase di pianificazione. Tipicamente in qualsiasi processo progettuale, la fase di pianificazione è caratterizzata dall'immediatezza e dall'evidenza delle considerazioni necessarie per poter poi prendere le scelte *più adeguate*. Il numero di dati che si possono e si vogliono maneggiare deve essere esiguo e di facile reperibilità. Al tempo stesso, le prime decisioni prese, in qualsiasi fase esse siano del *cerchio della sicurezza*, influenzeranno notevolmente il processo decisionale successivo: per tale ragione occorre fornire ai decisori strumenti efficaci, semplici e d'immediato approccio.

3.1 INTRODUZIONE AL METODO

I soggetti incaricati di compiere scelte all'interno di processi decisionali, legati al miglioramento della sicurezza nei trasporti, hanno bisogno di strumenti, al fine di ottimizzare le decisioni, dal punto di vista sociale, ambientale ed economico.

L'utilizzo di adeguati Strumenti di Supporto alle Decisioni – SSD, in generale definiti come algoritmi che operano sulle informazioni effettivamente disponibili (cfr. 2.8), può facilitare notevolmente la messa in atto delle strategie decisionali come la pianificazione e la progettazione della sicurezza nei trasporti.

La forma che i risultati di questi sistemi sono in grado di fornire può essere molto diversa: qualitativa, quantitativa o mista. Tra le possibili scelte, nel caso quantitativo spesso si tratta di modelli basati sull'attribuzione di un punteggio, che corrisponde ad una scala di valori studiata ad hoc per ogni elemento valutato. L'espressione qualitativa dei risultati finali è invece espressa tramite giudizi o rappresentazioni grafiche semplificate.

Spesso capita che l'espressione dei risultati dei sistemi di supporto alle decisioni siano miste, ossia prevedano entrambe le modalità, al fine di risultare comprensibili a diverse categorie di utenti, che possono essere più o meno esperte del sistema e della tecnica di analisi adottata⁴⁰.

La creazione di un SSD deve quindi rispondere ai processi decisionali e alle necessità dell'utente: in tale processo sono coinvolte varie tipologie di decisioni e vari tipi di dati che prevedono distinte modalità di elaborazione. Il SSD deve essere quindi flessibile e dipendente dal caso di studio.

3.1.1 LA FORMULAZIONE DEGLI INDICI NEI SISTEMI DI SUPPORTO ALLE DECISIONI

Il processo metodologico che sta alla base della creazione d'indicatori sintetici e composti si basa su numerose fasi, di cui si riportano solo quelle più significative:

- Sviluppo di una struttura teorica;
- Individuazione delle variabili elementari;
- Verifica, analisi, trasformazione dei dati;
- Ponderazione e aggregazione in indicatori;
- Verifica della validità e della capacità selettiva degli indicatori strutturati;
- Presentazione finale dei risultati in forma d'indice.

⁴⁰ OECD - Handbook on Constructing Composite Indicators. *Methodology and User Guide*. European Commission 2008.

Spesso i termini indice e indicatore sono utilizzati in modo intercambiabile. In realtà i due termini hanno diverso significato: il primo deriva dal termine latino “*index*” che significa “*qualsiasi cosa che è utile a indicare*” mentre il secondo deriva da una parola del tardo latino “*indicator*” che significa “*colui/ciò che indica*”⁴¹. In questi termini anche nel presente lavoro di tesi si distingue tra indice, che è la rappresentazione finale dell’analisi svolta, e indicatore che invece è il termine su cui si costruisce l’indice stesso.

Gli indicatori sono un insieme di singole variabili o parametri che corrispondono ad un aspetto particolare del *concetto* che si vuole studiare.

Nel presente lavoro di ricerca, il *concetto* riguarda l’analisi dell’accessibilità ferroviaria in condizioni di emergenza rappresentato dall’indice, mentre gli indicatori sono il raggruppamento *ragionato* di tutti i parametri che caratterizzano il sistema. Il passaggio logico dal *concetto* all’indice è rappresentato in Figura 71.

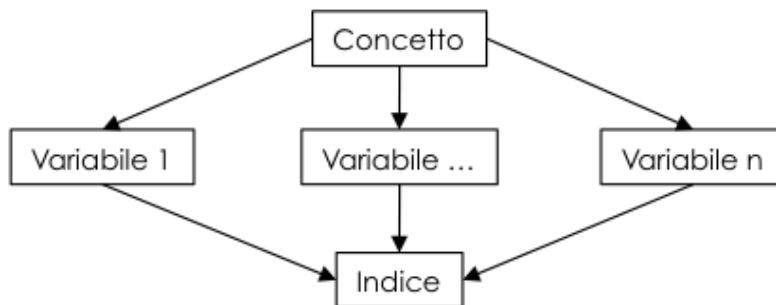


Figura 71 - Processo di realizzazione degli indici.

3.2 I SOGGETTI, GLI AMBITI E LE ASSUNZIONI

L’obiettivo del presente lavoro di ricerca consiste nella formulazione dell’Indice di Accessibilità ferroviaria (IA). Esso può quindi essere inteso come uno Strumento di Supporto alle Decisioni, utilizzabile da soggetti aventi un livello di confidenza variabile con l’infrastruttura o più in generale il sistema ferroviario.

In Figura 72 è riportato lo schema procedurale per la definizione dell’indice in cui sono presenti i soggetti destinatari, gli ambiti di utilizzo e le ipotesi generali descritti nei paragrafi seguenti.

⁴¹ Maggino F. Gli indicatori statistici: concetti, metodi e applicazioni. Università degli Studi di Firenze. (2006).

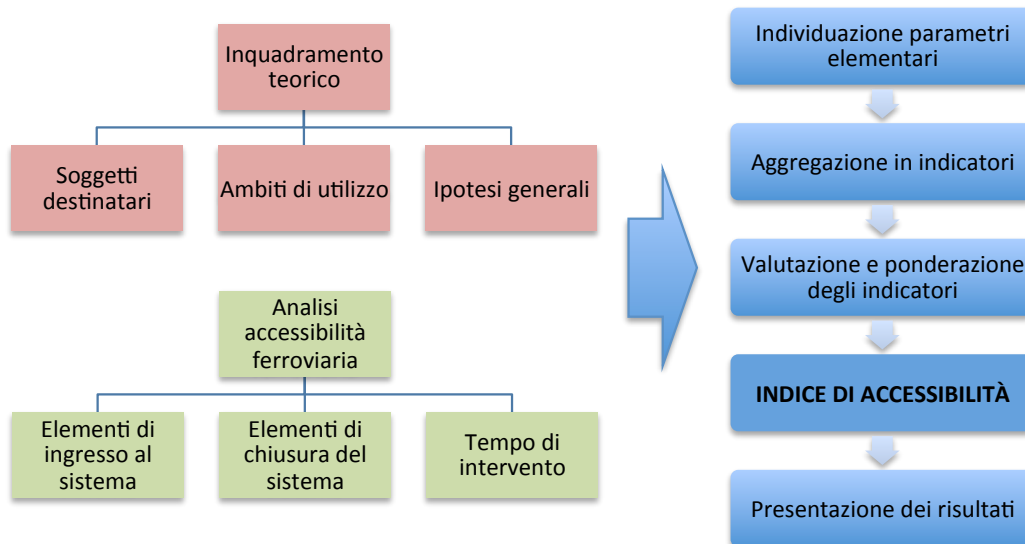


Figura 72 - Schema per la definizione dell'Indice di Accessibilità.

3.2.1 I SOGGETTI DESTINATARI

I soggetti coinvolti nel processo integrato di definizione della sicurezza e più nello specifico dell'accessibilità del sistema ferroviario in emergenza possono, ad esempio, essere classificati in:

- Gestori dell'Infrastruttura;
- Imprese Ferroviarie;
- Servizi di Pronto Intervento;
- Protezione Civile;
- Prefetture;
- ...

Tali soggetti sono *potenziali utenti* di un DSS in grado supportarli nell'elaborazione di studi, piani e programmi finalizzati al miglioramento dell'accessibilità ferroviaria.

I Gestori e le Imprese hanno il ruolo di recepire norme e procedure finalizzate al rispetto della sicurezza dell'infrastruttura ferroviaria garantendo standard minimi per il servizio e per l'utenza finale.

I Servizi di Pronto Intervento, quali Vigili del Fuoco, Soccorso Sanitario e Polizia Ferroviaria, sono preposti all'intervento e alla gestione dell'emergenza in modo sinergico col Gestore in caso di evento rilevante.

Protezione Civile e Prefetture sono Enti deputati alla pianificazione e coordinamento delle operazioni di gestione di una emergenza con particolare riferimento all'attività di redazione e convalida dei piani di emergenza.

3.2.2 GLI AMBITI DI POSSIBILE USO

Il problema della sicurezza è una *questione* che interessa diversi momenti della vita di un'infrastruttura, in maniera ciclica. Le azioni che si compiono a favore dell'incremento di accessibilità a una tratta ferroviaria nascono da un susseguirsi di decisioni che riguardano la prevenzione, la progettazione, la mitigazione, l'intervento e infine la post-assistenza.

Per ogni singola azione che s'intraprende per aumentare la sicurezza, sono chiamati a intervenire alcuni dei soggetti citati nel paragrafo precedente, in funzione delle loro capacità di analisi e d'intervento (competenze).

All'interno di questo quadro è importante evidenziare che i momenti significativi in cui occorre intervenire per garantire l'incolumità degli utenti nel sistema e degli operatori che vi lavorano, sono divisibili in due macro famiglie: il *pre – evento* e il *post – evento*.

Nel *pre - evento* rientra la fase di pianificazione e programmazione degli interventi di carattere gestione e infrastrutturale finalizzati al miglioramento dell'accessibilità ferroviaria.

Il Gestore, infatti, può ad esempio essere interessato a *migliorare* o *costruire* nuove vie di accesso alla ferrovia in quelle zone dove l'accessibilità risulti limitata oppure attuare regolamenti di esercizio (limitazione della velocità) finalizzati alla riduzione della probabilità di accadimento di un evento critico.

I Servizi di Pronto Intervento contribuiscono alla redazione di piani di emergenza (cfr.) nei quali la valutazione dell'accessibilità all'infrastruttura ferroviaria risulta un aspetto rilevante per mitigare le conseguenze di un evento.

Il *post – evento* caratterizza quella fase in cui la gestione congiunta dell'emergenza richiede l'arrivo nel minor tempo possibile delle squadre di soccorso. La conoscenza del *livello di accessibilità* di un arco ferroviario e più in generale dell'ambito territoriale in cui è inserito, garantisce un'elevata qualità delle operazioni anche in termini di mezzi, attrezzature e risorse utilizzabili.

3.2.3 LE ASSUNZIONI E IPOTESI SEMPLIFICATIVE

Ogni modello che cerca di definire un fenomeno reale deve prevedere delle semplificazioni quando le possibili variabili da considerare sono tali da non permettere un'analisi esaustiva.

3.2.3.1 AMBITO TERRITORIALE

Lo studio della vulnerabilità ferroviaria in termini di accessibilità rende necessario effettuare alcune considerazioni preliminari relative agli ambiti territoriali delle tratte per le quali si intende effettuare l'analisi dal momento che l'implementazione di un modello richiede necessariamente alcune ipotesi semplificative che ne permettono la specificazione.

Come già anticipato in precedenza lo strumento implementato è in grado di rappresentare per ogni *i - esimo* arco di una tratta ferroviaria il valore di probabilità di accadimento di incidente e il valore dell'indice di accessibilità.

Una prima ipotesi introdotta nel modello consiste nel fatto che le tratte ferroviarie oggetto del presente studio siano quelle a cielo aperto. Le gallerie, indipendentemente dalla lunghezza, traffico e caratteristiche strutturali e impiantistiche, non vengono considerate poiché richiederebbero uno studio specializzato anche ai sensi del D.M. 28 ottobre 2005 "Sicurezza nelle gallerie ferroviarie"⁴².

Per quanto riguarda le tratte a cielo aperto è possibile distinguere i seguenti contesti ferroviari in cui è possibile che avvenga un evento rilevante:

- Piano campagna;
- Rilevato/trincea;
- Viadotto.

Una seconda ipotesi riguarda quindi i tre ambiti contestuali sopra citati. In questa fase della ricerca sono studiati senza distinzione: in sostanza il modello di calcolo non considera le differenze di quota tra piano del ferro e territorio circostante (es. piano campagna e viadotto).

Una terza ipotesi riguarda le condizioni meteo climatiche. Il modello di calcolo non considera, in questa fase, quei fattori meteo climatici che potrebbero ridurre/ostacolare l'accessibilità. Si pensi ad esempio alla presenza di neve sulle strade o sui terreni vicino alla sede ferroviaria che nelle zone montane potrebbe ritardare o impedire l'avvicinamento dei Servizi di Pronto Intervento.

⁴² L'ambito di applicazione e le finalità del Decreto sono descritte nel paragrafo 2.9.2.

3.2.3.2 EVENTI CRITICI E PROBABILITÀ DI ACCADIMENTO

Un evento critico può essere definito come un fenomeno di origine naturale o antropica⁴³ in grado di arrecare un danno al sistema dei trasporti o all'ambiente circostante nel contesto spazio - temporale di riferimento.

Gli eventi critici possono essere caratterizzati da:

- tipologia: definizione della natura dell'evento, per esempio naturale o antropico, interno o esterno a un sistema di trasporto;
- intensità: misura della severità (attesa o riscontrata).

Analogamente a quanto avviene, ad esempio, nell'analisi quantitativa dei rischi per le gallerie, sono stati identificati i seguenti eventi pericolosi relativi al sistema ferroviario:



Figura 73 - Eventi critici di rischio attivo (in verde) e passivo (in rosso).

Anche nel presente studio sono stati quindi individuati gli eventi critici iniziatori in relazione a quanto prescritto dal D.M. 28/10/2005 che danno origine a specifici scenari di rischio valutabili mediante l'impiego del diagramma a farfalla illustrato in Figura 74:

- deragliamento;
- collisione;
- incendio di materiale rotabile.

⁴³ A tal proposito si faccia riferimento alla definizione di Rischio Attivo e Rischio Passivo riportata nel paragrafo 2.2.

Diagramma a Farfalla

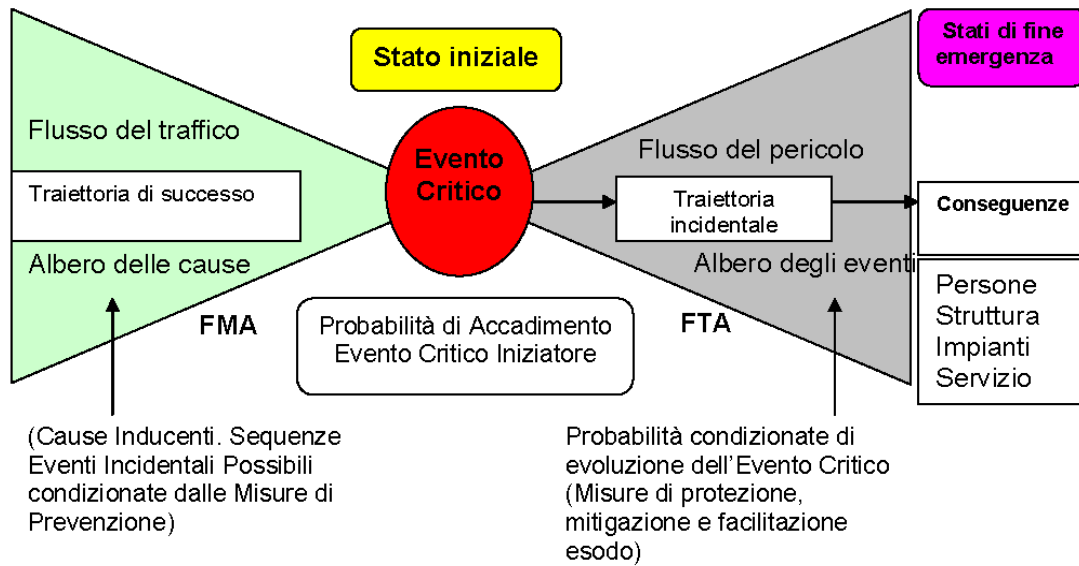


Figura 74 – Struttura del diagramma a farfalla.

Il Diagramma a farfalla è costituito da due porzioni disgiunte in cui sono applicate le tecniche FMA - Failure Modelling Analysis a sinistra e le tecniche ETA - Event Tree Analysis - a destra separate dall'Evento Critico Iniziatore che identifica lo Stato Iniziale della Traiettoria Incidentale.

Per ciascuno dei tre eventi iniziatori sono state stimate le probabilità di accadimento mediante l'implementazione di un modello semplificato descritto nel paragrafo 3.4 che prevede l'utilizzo di banche dati e serie storiche di livello nazionale.

In Tabella 1 sono riportate, per ogni evento critico, le principali cause.

Evento critico			
	Deragliamento	Collisione	Incendio di materiale rotabile
Cause	Gusto o cedimento strutturale del materiale rotabile	Guasto alle logiche di interlocking	Rilascio di sostanze infiammabili, tossiche, pericolose trasportate o esterne
	Cedimento strutturale o deterioramento del tracciato	Prestazioni ridotte dell'impianto frenante	Corto circuito a bordo
	Guasto ai sistemi di controllo della circolazione	Presenza di convoglio non segnalato sulla via	Corto circuito della linea di alimentazione
	Impatto con oggetti sulla linea	Presenza di ostacoli sulla linea	Surriscaldamento organi di rotolamento
	Cedimenti strutturali opere civili	Errato controllo della circolazione dovuto a incompatibilità elettromagnetica	Difetto impianto frenante rotabili
	Esplosione/fuoco a bordo	Perdita dell'impianto frenante per guasti all'elettronica di bordo	Incendio di materiale combustibile in galleria
	Errore umano a bordo	Errore umano a bordo	
	Errore umano al posto centrale	Errore umano al posto centrale (o controllo)	

Tabella 1 – Elenco degli eventi critici e delle cause ai sensi del DM 28 ottobre 2005.

3.3 IL PROCESSO DI DEFINIZIONE DELL'INDICE DI ACCESSIBILITÀ

Una generica linea ferroviaria può essere scomposta in tratte, nella porzione di itinerario compreso, ad esempio, tra due stazioni contigue e successivamente in archi, elementi lineari aventi il medesimo valore di lunghezza.

Si può quindi affermare che la generica linea ferroviaria AB è costituita da:

$$linea\ ferroviaria\ AB = \sum_{t=1}^T tratta_t$$

dove

$$tratta_t = \sum_{i=1}^I arco_i$$

Il modello di calcolo dell'accessibilità alla rete ferroviaria in seguito a eventi rilevanti prevede l'implementazione di un *Indice di Accessibilità IA* calcolato su ogni arco i .

In realtà il modello di calcolo restituisce due diversi *Indici* (Figura 75):

- Indice di Accessibilità Singolo - *IAS*;
- Indice di Accessibilità Combinato - *IAC*.

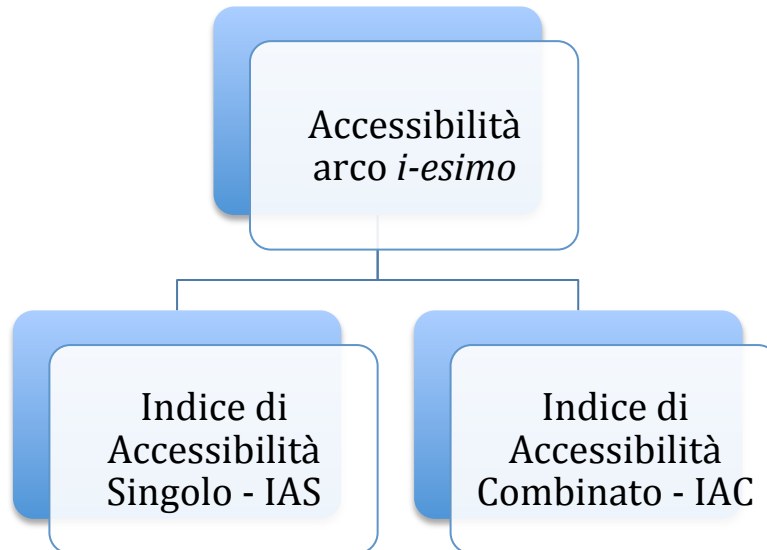


Figura 75 - Indici di accessibilità elaborati dal modello.

Il primo, IAS_i , consiste nel calcolo del valore di accessibilità di ciascun arco i senza considerare le interazioni tra archi contigui. In particolare non si tiene conto del valore di accessibilità degli archi limitrofi. Può accadere, infatti, che un arco presenti un valore limitato o nullo di accessibilità, ma sia interposto tra due archi ad elevata accessibilità: in questo caso l'arco sarà caratterizzato da un contenuto (o nullo) valore di accessibilità indipendentemente dal fatto che i due archi limitrofi siano accessibili e che permettano quindi di accedere anche all'arco in esame.

Nel secondo caso, invece, l'indice di accessibilità combinato - IAC_i - dell'arco i -esimo considera le reciproche interazioni tra archi contigui. La formulazione analitica è quindi:

$$IAC_i = k * IAS_{i-1} + IAS_i + k * IAS_{i+1}$$

dove:

IAC_i = indice di accessibilità combinato dell'arco i – esimo;

k = coefficiente di vicinanza/contiguità. Nel presente studio il valore è pari a 0,5;

IAS_{i-1} = indice di accessibilità singolo dell'arco immediatamente precedente;

IAS_i = indice di accessibilità singolo dell'arco i -esimo;

IAS_{i+1} = indice di accessibilità singolo dell'arco immediatamente successivo.

In questo modo all'interno del modello viene considerata la possibilità che un arco avente accessibilità limitata possa comunque essere raggiunto utilizzando gli archi limitrofi (contigui) con accessibilità maggiore attraverso il coefficiente k . Da questo si deduce che il valore di k è fortemente dipendente dalla lunghezza dell'arco.

È evidente che il calcolo dell'indice di accessibilità combinato - *IAC* - è subordinato al calcolo dell'indice singolo *IAS*.

Il processo di definizione e strutturazione dell'indice di accessibilità - *IA* è stato effettuato a valle della fase teorica d'inquadramento del sistema ferroviario con particolare riferimento all'identificazione di quei parametri specifici del sistema e contestuali, che contribuiscono a garantirne l'accessibilità.

Le fasi che caratterizzano l'implementazione dell'*IA* sono quelle rappresentate nello schema logico riportato in Figura 76.

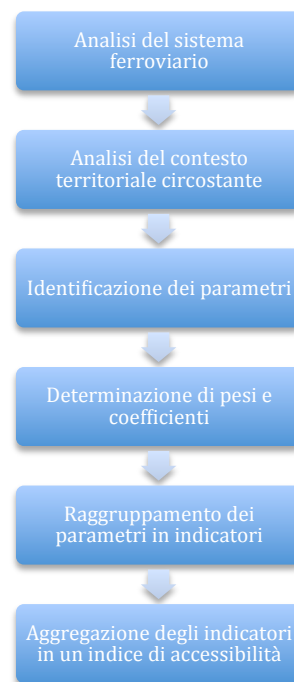


Figura 76 – Fasi per la formulazione dell'indice di accessibilità.

3.3.1 L'APPROCCIO ARCHI - BUFFER - CELLE

L'analisi dell'accessibilità e l'implementazione del modello di calcolo hanno reso necessario definire un sistema spaziale bidimensionale sul quale determinare i parametri e strutturato nei seguenti elementi come illustrato in Figura 77:

- Archi;
- Buffer;
- Celle.

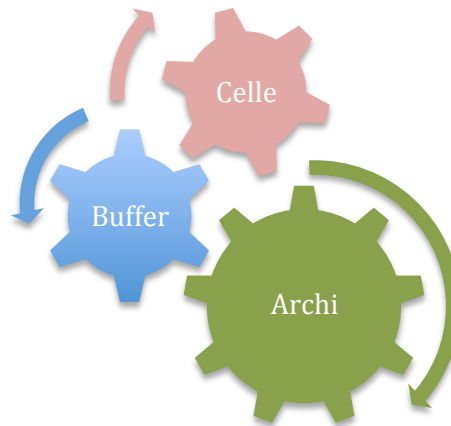


Figura 77 – Sistema spaziale bidimensionale archi buffer celle.

Per valutare i parametri che concorrono al calcolo dell'accessibilità si è fatto uso di un numero B di buffer spaziali intorno alla tratta ferroviaria per ognuno dei due lati, all'interno dei quali si effettuano le elaborazioni di calcolo. Tali buffer sono situati in posizione simmetrica rispetto agli archi ferroviari e possono avere larghezze variabili in funzione del parametro che si vuole studiare.

In Figura 78 è riportata, a titolo esemplificativo, una rappresentazione del sistema spaziale bidimensionale costituito da archi aventi la medesima lunghezza e buffer aventi la medesima larghezza.

I buffer sono situati in posizione destra e sinistra rispetto alla tratta ferroviaria.

Lato sinistro	buffer B sx									
	buffer ... sx									
	buffer b+1 sx									
	buffer b sx									
	buffer b-1 sx									
	buffer ... sx									
	buffer 1 sx									
Ferrovia	arco 1	arco ...	arco ...	arco i-1	arco i	arco i+1	arco ...	arco ...	arco ..	arco l
Lato destro	buffer 1 dx									
	buffer ... dx									
	buffer b-1 dx									
	buffer b dx									
	buffer b+1 dx									
	buffer ... dx									
	buffer B dx									

Figura 78 – Rappresentazione di archi ferroviari e buffer.

Ogni buffer viene suddiviso in celle in funzione del numero di archi presenti sulla tratta. Ad ogni coppia arco – buffer è possibile quindi associare una cella. La generica cella risulta identificabile in modo univoco dall'arco i e dal buffer b_{sx} o b_{dx} ed è costituita da

un rettangolo avente come lati la dimensione (lunghezza) dell'arco i -esimo e la larghezza del b -esimo buffer. Nell'esempio di Figura 79 sono rappresentati i buffer e ognuno è stato suddiviso in celle in funzione del numero di archi; a titolo di esempio cella_{1, 1sx} (in rosso) indica la cella relativa all'arco 1 e a buffer 1 in posizione sinistra rispetto alla ferrovia.

Lato sinistro										
Buffer B	cella 1, B sx			cella i-1, 6sx	cella i, 6sx	cella i+1, 6sx				cella I, 6sx
Buffer ...	cella 1, ...sx			cella i-1, ...sx	cella i, ...sx	cella i+1, ...sx				cella I, ...sx
Buffer b+1	cella 1, b+1 sx			cella i-1, b+1 sx	cella i, b+1 sx	cella i+1, b+1 sx				cella I, b+1 sx
Buffer b	cella 1, b sx			cella i-1, b sx	cella i, b sx	cella i+1, b sx				cella I, b sx
Buffer b-1	cella 1, b-1 sx			cella i-1, b-1 sx	cella i, b-1 sx	cella i+1, b-1 sx				cella I, b-1 sx
Buffer ...	cella 1, ...sx			cella i-1, ...sx	cella i, ...sx	cella i+1, ...sx				cella I, ...sx
Buffer 1	cella 1, 1sx			cella i-1, 1sx	cella i, 1sx	cella i+1, 1sx				cella I, 1sx
Ferrovia	arco 1	arco ...	arco ...	arco i-1	arco i	arco i+1	arco ...	arco ...	arco ..	arco I
Buffer 1	cella 1, 1dx			cella i-1, 1dx	cella i, 1dx	cella i+1, 1dx				cella I, 1dx
Buffer ...	cella 1, ...dx			cella i-1, ...dx	cella i, ...dx	cella i+1, ...dx				cella I, ...dx
Buffer b-1	cella 1, b-1 dx			cella i-1, b-1 dx	cella i, b-1 dx	cella i+1, b-1 dx				cella I, b-1 dx
Buffer b	cella 1, b dx			cella i-1, b dx	cella i, b dx	cella i+1, b dx				cella I, b dx
Buffer b+1	cella 1, b+1 dx			cella i-1, b+1 dx	cella i, b+1 dx	cella i+1, b+1 dx				cella I, b+1 dx
Buffer ...	cella 1, ...dx			cella i-1, ...dx	cella i, ...dx	cella i+1, ...dx				cella I, ...dx
Buffer B	cella 1, B dx			cella i-1, B dx	cella i, B dx	cella i+1, B dx				cella I, B dx
Lato destro										

Figura 79 – Rappresentazione di archi ferroviari, buffer e celle.

A ogni arco è quindi possibile associare un numero di celle pari al doppio del numero dei buffer:

$$\text{numero celle (arco } i) = 2 * B$$

Il numero totale di celle associate a una tratta (area di studio) è invece pari a $2*B*I$ con I pari al numero di archi.

Nell'esempio di Figura 80, in cui sono presenti 6 buffer e 10 archi, il numero di celle associate all' i -esimo arco risulta pari a 12 (6 collocate nella parte destra e sei nella parte sinistra) e il numero totale di celle è pari a 120.

Lato sinistro										
Buffer 6										
Buffer 5										
Buffer 4										
Buffer 3										
Buffer 2										
Buffer 1										
Ferrovia	arco 1	arco 2	arco 3	arco 4	arco 5	arco 6	arco 7	arco 8	arco 9	arco 10
Buffer 1										
Buffer 2										
Buffer 3										
Buffer 4										
Buffer 5										
Buffer 6										
Lato destro										

Figura 80 – Esempio numerico di archi ferroviari, buffer e celle.

3.3.2 L'INDIVIDUAZIONE DEI PARAMETRI E L'AGGREGAZIONE IN INDICATORI

Le variabili elementari prendono il nome di parametri del modello. Come visto all'inizio del presente capitolo, le variabili che devono essere utilizzate sono nel numero minimo ritenuto necessario per la caratterizzazione del sistema nel rispetto dell'obiettivo prefissato dal metodo.

Un singolo parametro non sempre fornisce un'informazione completa ed esaustiva: in alcuni casi, infatti, è necessario correlare tra loro più parametri in indicatori.

La presenza, ad esempio, di un passaggio a livello – *PL* su un arco contribuisce ad aumentarne il valore di accessibilità permettendo l'accesso sulla rete da parte delle squadre di soccorso. Tuttavia la presenza di *PL* non può essere considerata sufficiente per determinare l'accessibilità dell'arco stesso. È infatti necessario considerare anche se su un arco sono presenti più passaggi a livello e in caso affermativo la loro interdistanza⁴⁴. Come illustrato nei paragrafi successivi, l'aggregazione di questi due parametri, numero e interdistanza tra *PL* costituisce un indicatore.

Nel presente lavoro i parametri individuati, riportati in Tabella 2, corrispondono a 15 informazioni da inserire nel modello, le quali vengono successivamente aggregate in 9 indicatori. Questi ultimi contribuiscono alla formulazione dell'indice accessibilità.

⁴⁴ Si pensi ad esempio a un arco sufficientemente lungo: la presenza di due passaggi a livello situati a distanza ravvicinata e in prossimità di una delle estremità dell'arco, potrebbe rendere poco accessibile la restante parte di arco in cui non sono presenti i passaggi a livello. Diverso sarebbe il caso in cui i due passaggi a livello sono distribuiti sull'intera lunghezza dell'arco.

In Tabella 2 sono indicati il nome del parametro e l'appartenenza al gruppo degli elementi che determinano l'accessibilità del sistema ferroviario definiti in Figura 72.

n°	Parametro	Elementi di accessibilità al sistema
1	numero di passaggi a livello	Elementi di ingresso al sistema
2	interdistanza passaggi a livello	Elementi di ingresso al sistema
3	numero stazioni	Elementi di ingresso al sistema
4	interdistanza stazioni	Elementi di ingresso al sistema
5	estensione rete stradale	Elementi di ingresso al sistema
6	distanza dalla ferrovia della rete stradale	Elementi di ingresso al sistema
7	superficie piazzale di emergenza	Elementi di ingresso al sistema
8	distanza dalla ferrovia del piazzale di emergenza	Elementi di ingresso al sistema
9	limiti di massa al transito dei veicoli	Elementi di chiusura del sistema
10	limiti di sagoma al transito dei veicoli	Elementi di chiusura del sistema
11	estensione di barriere o cancellate di protezione valicabili	Elementi di chiusura del sistema
12	estensione di barriere o cancellate di protezione invalicabili	Elementi di chiusura del sistema
13	classe di uso del suolo	Elementi di chiusura del sistema
14	estensione della classe di uso del suolo	Elementi di chiusura del sistema
15	tempo di arrivo dei Vigili del Fuoco	Tempo di intervento

Tabella 2 - Parametri del modello di accessibilità.

L'aggregazione in indicatori dei parametri illustrati in Tabella 2, permette di ottenere un'informazione sufficientemente esaustiva circa gli elementi del sistema ferroviario che concorrono alla formulazione dell'accessibilità.

In Tabella 3 sono riportati i 9 indicatori e i rispettivi parametri che ne permettono il calcolo.

n°	Indicatore	Descrizione	Parametro	
1	IPL	passaggio a livello	1	numero di passaggi a livello
			2	interdistanza passaggi a livello
2	ISF	stazione/fermata	3	numero stazioni/fermate
			4	interdistanza stazioni/fermate
3	IEST	rete stradale carrabile	5	estensione della rete stradale carrabile
			6	distanza dalla ferrovia rete stradale carrabile
4	IPI	piazzale di emergenza	7	superficie piazzale di emergenza
			8	distanza dalla ferrovia del piazzale di emergenza
5	ILI	limiti di massa e sagoma	9	limiti di massa al transito dei veicoli
			10	limiti di sagoma al transito dei veicoli
6	IBV	barriere o cancellate di protezione valicabili	11	estensione di barriere o cancellate di protezione valicabili
7	IBI	barriere o cancellate di protezione invalicabili	12	estensione di barriere o cancellate di protezione invalicabili
8	IUS	uso del suolo	13	classe di uso del suolo
			14	estensione della classe di uso del suolo
9	IARR	tempo di arrivo dei Vigili del Fuoco	15	tempo di arrivo dei Vigili del Fuoco

Tabella 3 – Indicatori del modello di accessibilità.

L'Indice di Accessibilità semplice – IAS del generico arco ferroviario i di lunghezza l consiste nella definizione di un numero adimensionale e viene determinato come funzione linearmente dipendente degli indicatori sopra descritti:

$$IAS_i = f(IPL_i + ISF_i + IEST_i + IPI_i + ILL_i + IBV_i + IBI_i + IUS_i + IARR_i)$$

dove:

- IPL_i è l'indicatore relativo alla presenza di un passaggio a livello;
- ISF_i è l'indicatore relativo la presenza di una stazione/fermata;
- $IEST_i$ è l'indicatore relativo alla presenza ed estensione di una rete stradale carrabile;
- IPI_i è l'indicatore relativo alla presenza di un piazzale di emergenza;
- ILL_i è l'indicatore relativo alla presenza di limiti di massa e sagoma al transito dei veicoli stradali;
- IBV_i è l'indicatore relativo alla presenza di barriere o cancellate di protezione della sede ferroviaria valicabili o removibili;
- IBI_i è l'indicatore relativo alla presenza di barriere o cancellate di protezione invalicabili o non removibili;
- IUS_i è l'indicatore relativo alla destinazione di uso del suolo;
- $IARR_i$ è l'indicatore relativo al tempo di arrivo dei Vigili del Fuoco.

L'approccio comparativo utilizzato nel modello di calcolo è finalizzato a mettere in relazione gli archi ferroviari confrontandone il valore dell'indice di accessibilità indipendentemente che sia semplice o combinato. Ai fini del presente studio non è quindi rilevante il valore assoluto del singolo arco poichè l'obiettivo della ricerca non è quello di identificare l'accessibilità del singolo arco mettendo in luce eventuali criticità confrontabili con soglie minime di accettabilità.

I parametri sono identificati a partire dalle informazioni provenienti dagli archi i e dalle celle j di territorio adiacenti alla linea ferroviaria.

Il territorio circostante la linea ferroviaria viene infatti suddiviso in buffer di ampiezza variabile in funzione del livello di dettaglio e precisione atteso e dell'onere computazionale discretizzando il territorio in elementi.

È evidente che, a parità di estensione laterale - distanza dalla ferrovia -, un elevato numero di buffer ai due lati della ferrovia garantisce da un lato una maggior precisione di

calcolo e dall'altro un elevato onere computazionale poiché i dati da processare e aggregare saranno maggiori (n° di celle).

La lunghezza degli archi e la dimensione dei buffer sono parametri del modello che dipendono dalla scala cui si intende effettuare la valutazione dell'accessibilità. La sensibilità, l'esperienza dell'analista e l'obiettivo per cui si effettua lo studio possono contribuire a una scelta razionale circa le dimensioni di tali elementi.

Non esistono criteri unici, definiti e consolidati per definire la dimensione (larghezza) delle celle, a parità di lunghezza d'arco, in modo opportuno e congruo con le esigenze dello studio in atto. Ci si può tutt'al più attenere ad alcune indicazioni quali ad esempio quella di aumentarne gradualmente la larghezza man mano che ci sia allontana dalla sede ferroviaria in modo da garantire una maggiore precisione nel calcolo dell'accessibilità in prossimità di ogni arco e contenere l'onere computazionale.

Ad ogni arco i sono quindi essere associate $2*B$ celle situate a destra e sinistra a distanze diverse dall'arco stesso in funzione del numero e dell'ampiezza (larghezza) dei buffer.

Questo significa che a ogni arco i saranno associate almeno due celle - una a destra e una a sinistra - aventi le seguenti dimensioni:

- Lunghezza pari a quella dell'arco i ;
- Larghezza pari a quella del buffer b .

A titolo esemplificativo se si considera una estensione laterale di studio pari a 60 metri a destra e sinistra di un arco i avente lunghezza definita, si possono avere diverse configurazioni relative al numero di buffer e quindi celle tra cui:

- caso A: un solo buffer ($b1$) per lato di larghezza pari a 60 metri e di conseguenza due celle per ogni arco, una a destra e una a sinistra come illustrato in Figura 81;

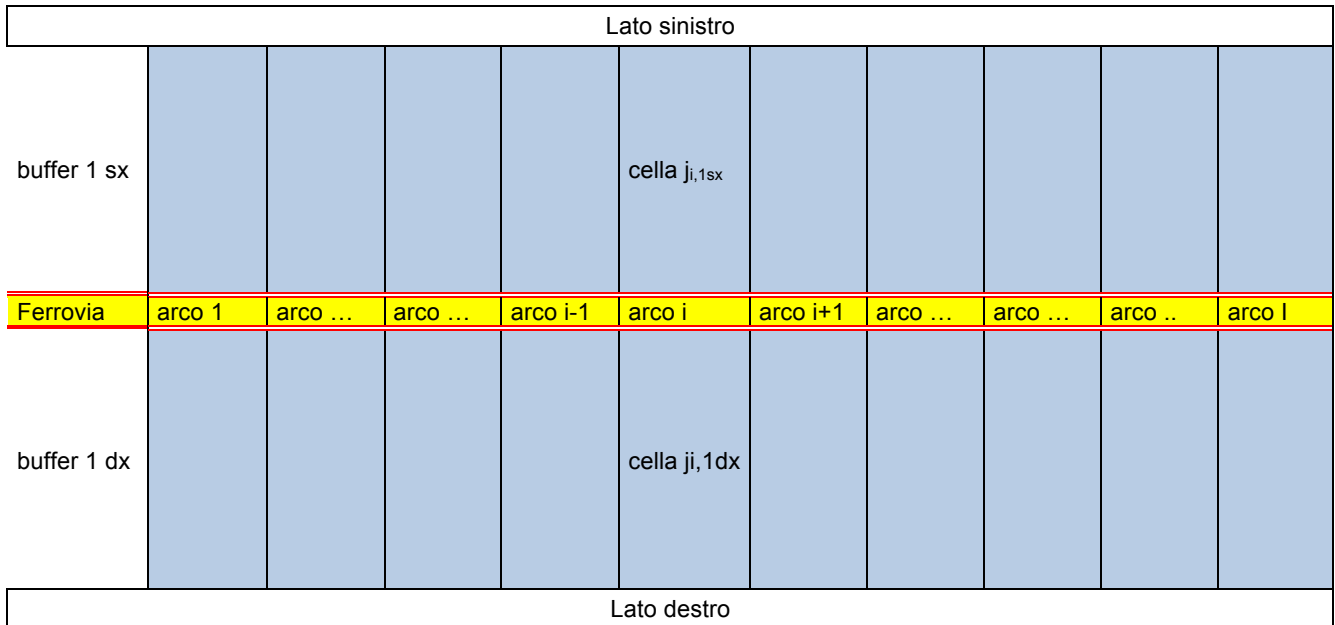


Figura 81 – Esempio di rappresentazione di buffer e celle – caso A.

- Caso B: due buffer ($b1, b2$) per lato aventi la medesima larghezza pari a 30 metri e di conseguenza quattro celle per ogni arco, due a destra e due a sinistra come illustrato in Figura 82;

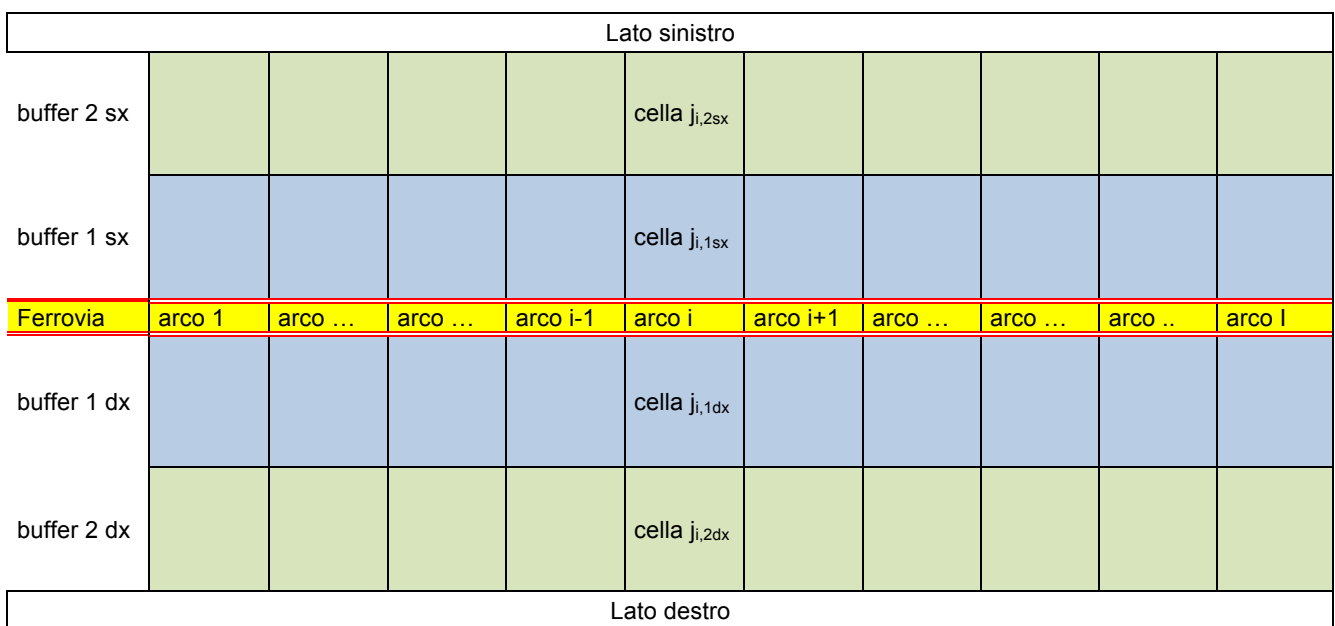


Figura 82 – Esempio di rappresentazione di buffer e celle – caso B.

- Caso C: tre buffer (b_1 , b_2 e b_3) per lato aventi larghezze diverse e pari rispettivamente a 10, 20 e 30 metri e di conseguenza sei celle per ogni arco, tre a destra e tre a sinistra come illustrato in Figura 83.

Lato sinistro										
buffer 3 sx					cella $j_{i,3sx}$					
buffer 2 sx					cella $j_{i,2sx}$					
buffer 1 sx					cella $j_{i,1sx}$					
Ferrovia	arco 1	arco ...	arco ...	arco $i-1$	arco i	arco $i+1$	arco ...	arco ...	arco ..	arco l
buffer 1 dx					cella $j_{i,1dx}$					
buffer 2 dx					cella $j_{i,2dx}$					
buffer 3 dx					cella $j_{i,3dx}$					
Lato destro										

Figura 83 - Esempio di rappresentazione di buffer e celle – caso C.

L'approccio archi-celle permette quindi di effettuare un'analisi bidimensionale del contesto territoriale in cui i parametri riportati in Tabella 2 vengono elaborati, aggregati e associati all'arco i -esimo di riferimento.

Nei paragrafi successivi viene riportata la descrizione degli indicatori identificati illustrandone la struttura e i parametri che li compongono.

3.3.2.1 IPL_i - PRESENZA DI UN PASSAGGIO A LIVELLO

L'indicatore IPL tiene conto della presenza di un passaggio a livello – PL sull'arco ferroviario i -esimo.

La presenza di un PL è considerata un importante *punto di accesso* carrabile alla ferrovia grazie alla possibilità di arrivare sui binari ed eventualmente accedere alla linea con idoneo veicolo bimodale (cfr. paragrafo 2.10.2) o specifici carrelli.

In funzione della lunghezza dell'arco ferroviario è necessario considerare, oltre alla presenza, il numero di passaggi a livello e la loro distribuzione sull'arco ferroviario. In caso di lunghezza elevata dell'arco i , l'interdistanza tra due o più PL assume rilevanza per il calcolo dell'accessibilità dell'arco. Ad esempio, nel caso in cui su un arco siano presenti due passaggi a livello collocati in prossimità di uno degli estremi dell'arco stesso, l'accessibilità risulta diversa dal caso in cui i due PL siano equamente distribuiti garantendo una maggiore accessibilità.



Figura 84 – Passaggio a livello.

3.3.2.2 ISF_i - PRESENZA DI UNA STAZIONE/FERMATA

L'indicatore *ISF* riguarda la presenza di una stazione/fermata ovvero il complesso organico di impianti ferroviari concentrato in un determinato punto della linea ferroviaria e destinato al servizio viaggiatori e/o al servizio merci e a operazioni inerenti l'esercizio della linea⁴⁵.

La principale differenza tra stazioni e fermate consiste nel fatto che nelle prime, avvengono sia le operazioni di gestione della circolazione (precedenze e incroci) sia quelle di movimentazione dei passeggeri (salita e discesa) mentre nelle seconde solo le operazioni di movimentazioni dei passeggeri.

Come nel caso di un passaggio a livello, la stazione rappresenta un punto di accesso all'infrastruttura dal sistema stradale offrendo due contributi ai fini del calcolo dell'accessibilità: il primo riguarda l'accessibilità dell'arco ferroviario in cui è presente la stazione, il secondo la possibilità di accedere alla rete ferroviaria mediante l'utilizzo di apposito veicolo bimodale o soluzioni miste (cfr. paragrafo 2.10).



Figura 85 - Stazione ferroviaria di Vittuone - Arluno.

⁴⁵ Esistono diverse classificazioni di stazione ferroviaria che dipendono da alcuni elementi quali ad esempio: importanza e/o dimensione; posizione nei confronti della rete; specializzazione funzionale; ubicazione o configurazione dei fabbricati viaggiatori; collocazione del piano del ferro; presenziamento. Umberto Cristalli – *Tecnica ed Economia dei Trasporti* a.a. 2004/2005 Roma Tor Vergata.

3.3.2.3 $IEST_1$ - PRESENZA ED ESTENSIONE DI UNA RETE STRADALE CARRABILE

L'indicatore $IEST$ valuta la presenza e l'estensione di una o più strade carrabili situate a lato della sede ferroviaria considerando la distanza dalla ferrovia.

Un'infrastruttura stradale è considerata una *via di accesso* utile e praticabile per consentire l'avvicinamento delle squadre di soccorso alla ferrovia e più nello specifico all'arco *i – esimo*.

In Figura 86 viene riportata in colore rosso, a titolo esemplificativo, la presenza (alla quale è associata l'estensione lineare misurata ad esempio in metri), della rete stradale situata su entrambi i lati della ferrovia rappresentata in giallo, all'interno di un buffer predeterminato.



Figura 86 – Rappresentazione dell'estensione rete stradale, in colore rosso, a lato della ferrovia.

È evidente che tanto più la strada sarà vicina alla ferrovia tanto più è ipotizzabile che le squadre di intervento impiegheranno meno tempo a sopraggiungere e potranno avvicinarsi con veicoli e attrezzature utili alla messa in sicurezza della zona e gestione dell'emergenza.

All'aumentare della distanza dall'arco ferroviario al quale è possibile giungere, è ragionevole supporre che l'intervento richiederà maggiori azioni da parte degli operatori.

Pertanto nella definizione dell'indicatore sarà necessario considerare dei *pesi* in grado di attribuire un livello d'importanza a ciascuna strada in funzione della distanza: tanto più la strada sarà vicina alla ferrovia tanto più il contributo ai fini del calcolo dell'indicatore e quindi dell'accessibilità sarà maggiore.

3.3.2.4 IPI_i - PRESENZA DI UN PIAZZALE DI EMERGENZA

L'indicatore *IPI* valuta la presenza di un piazzale – *PI* utilizzabile in caso di emergenza, posizionato in prossimità della ferrovia, che deve costituire uno spazio adeguato per la sosta degli automezzi di soccorso e per l'impiego delle attrezzature necessarie all'emergenza.

La superficie del piazzale, ritenuto idoneo allo stazionamento dei veicoli, deve essere collegata con la viabilità stradale ordinaria di zona e considerata nel modello in funzione dell'estensione espressa, ad esempio, in metri quadri.

Tanto maggiore è la superficie disponibile, tanto maggiore sarà il contributo del *PI* al fine dell'accessibilità sull'arco *i* – *esimo* e della gestione dell'emergenza.

È evidente che dal piazzale di emergenza deve essere possibile accedere alla sede ferroviaria a piedi o utilizzando la viabilità stradale.

Anche in questo caso è necessario considerare la distanza di un *PI* dalla ferrovia stessa in quanto è ragionevole supporre che la qualità e l'efficacia dell'intervento dipendano anche dalla possibilità di poter organizzare i soccorsi - primo triage⁴⁶ - in idonei spazi.

A ciascun piazzale viene quindi associato un peso in funzione della distanza dalla ferrovia.



Figura 87 – Piazzale situato a lato della ferrovia.

⁴⁶ Il processo del *Triage*, parola francese che significa cernita, smistamento, è usato per dividere i pazienti in categorie di priorità per le cure ed il trasporto in base alla gravità delle lesioni da essi riportate. Il Triage viene eseguito in caso di catastrofe o di incidente con molteplici feriti. La Croce Rossa Internazionale intende per catastrofi tutte quelle situazioni caratterizzate da uno stravolgimento subitaneo della vita quotidiana di fronte al quale i mezzi di soccorso sono insufficienti. C.R.I. - Provincia di Novara Prot.Civile - Definizione e Principi del Triage & Protocollo Maxi Emergenze Sanitari- gennaio 2002.

3.3.2.5 *ILI*, - PRESENZA DI LIMITI DI MASSA E SAGOMA AL TRANSITO DEI VEICOLI

L'indicatore *ILI* riguarda la presenza di limitazioni al transito su alcune tipologie di infrastrutture stradali, di veicoli aventi massa e/o sagoma superiori a quanto indicato nei cartelli di prescrizione come definiti dal Codice della Strada.

Esistono infatti alcune infrastrutture stradali o manufatti quali ad esempio ponti, sovrappassi, sottopassi che per ragioni tecnico-costruttive non consentono il passaggio di alcuni veicoli.

Ai fini del calcolo dell'indicatore, risulta utile conoscere le limitazioni poste sulle vie di accesso alla ferrovia (rete stradale) che possono impedire l'avvicinamento dei veicoli di soccorso aventi massa e sagoma superiori a quella consentita.



Figura 88 – Limiti di massa e sagoma al transito dei veicoli stradali.

3.3.2.6 IBV, PRESENZA DI BARRIERE O CANCELLATE DI PROTEZIONE DELLA SEDE FERROVIARIA VALICABILI O REMOVIBILI

L'indicatore *IBV* riguarda la presenza di barriere o cancellate di protezione situate ai lati della sede ferroviaria.

Per la valutazione dell'accessibilità è quindi necessario indentificare se il tipo di barriera/protezione è rimovibile o meno.

Esistono, infatti, recinzioni tipo quella rappresentata in Figura 89 costituite da colonne e lastre prefabbricate in calcestruzzo vibrocompresso armato con gabbia in ferro elettrosaldato.

Tali cancellate sono comunque abbattibili in tempi rapidi con l'ausilio di veicoli di soccorso o dispositivi adibiti al taglio degli elementi o comunque superabili grazie alle contenute dimensioni di altezza.



Figura 89 – Barriera ferroviaria valicabile.

In Figura 90 si riporta a titolo esemplificato la rimozione parziale della barriera di sicurezza al fine di permettere l'accesso delle squadre di soccorso.



Figura 90 - Esempio di rimozione parziale di barriera ferroviaria.

3.3.2.7 IBI₁ - PRESENZA DI BARRIERE O CANCELLATE DI PROTEZIONE INVALIDICABILI O NON REMOVIBILI

L'indicatore *IBI* considera la presenza di barriere o cancellate di protezione situate a lato della sede ferroviaria che hanno caratteristiche e dimensioni tali da non essere abbattibili e/o superabili.

Alcune barriere con caratteristiche fono assorbenti, come quella rappresentata in Figura 91, sono costituite da un primo elemento in calcestruzzo armato sul quale poggia la struttura modulare. Le caratteristiche costruttive e le dimensioni di questi elementi non permettono l'abbattimento o il superamento delle barriere a meno di interventi che richiedono maggior tempo e soprattutto dispositivi idonei.

In alcuni casi possono essere presenti delle uscite di sicurezza, costituite porte fonoisolanti da opportunamente dimensionate e installate a distanza regolare, dotate di maniglia antipanico in grado di permettere l'evacuazione degli utenti in caso di emergenza come illustrato in Figura 92.



Figura 91 – Barriera fono assorbente non valicabile.



Figura 92 - Uscite di sicurezza stradali fono assorbenti.

3.3.2.8 IUS_i - DESTINAZIONE DI USO DEL SUOLO

L'indicatore *IUS* identifica la destinazione di uso del suolo come parametro utile a determinare l'accessibilità di un arco ferroviario *i*.

Esistono diverse coperture del suolo, suddivise in classi, che possono agevolare, limitare o impedire l'accesso alla sede ferroviaria.

In caso di emergenza, il tempo di avvicinamento delle squadre di soccorso dipende anche dalla copertura del suolo dello spazio compreso tra l'infrastruttura stradale e l'arco ferroviario *i* – *esimo*. In linea generale è possibile affermare che esistono tre casi di uso del suolo che presentano valori di accessibilità diversi,

Il primo caso, come illustrato in Figura 93, riguarda la copertura del suolo adibita ad uso agricolo, relativa all'area compresa tra la ferrovia (in giallo) e la rete stradale più vicina (in rosso).

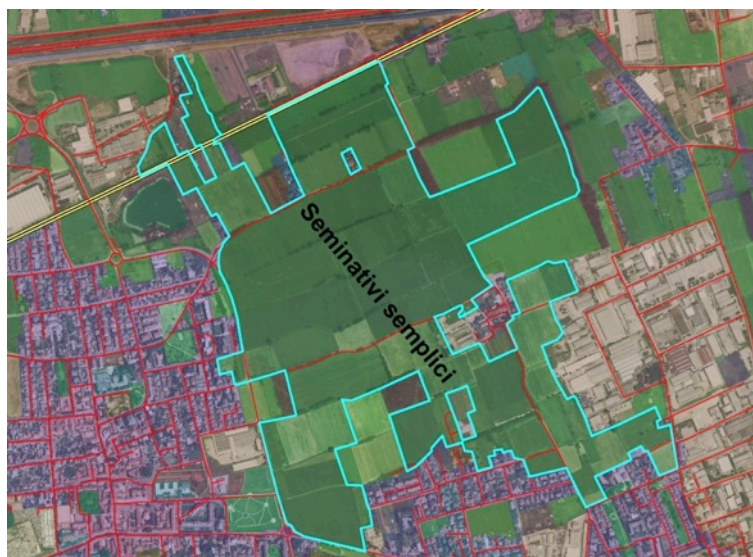


Figura 93 - Uso del suolo agricolo.

In questa configurazione l'indicatore *IUS* presenterà un valore elevato in quanto è ragionevole supporre che le squadre di intervento potranno raggiungere la ferrovia in due modalità diverse in funzione della distanza strada – arco *i*:

- a piedi;
- con veicoli tradizionali;
- con idonei veicoli speciali quali ad esempio pianale rialzato e trazione integrale (Figura 94)⁴⁷.

⁴⁷ Il Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco ha in dotazione dei mezzi speciali impiegati per interventi boschivi (www.vigilfuoco.it).



Figura 94 – Veicolo VSAF 3300M su MB UNIMOG U5000.



Figura 95 – Terreno agricolo situato a lato della ferrovia.

Nel secondo caso, come riportato in Figura 96, a entrambi lati della ferrovia sono presenti classi di uso del suolo caratterizzate da alberature a media o alta densità che non permettono il passaggio dei veicoli di soccorso e rendono comunque difficoltose le operazioni di accesso a piedi da parte degli operatori dall'infrastruttura stradale più vicina (in rosso).

L'indicatore *IUS*, ai fini della valutazione dell'accessibilità, presenterà valori inferiori rispetto al caso precedente.



Figura 96 - Presenza di piantumazioni ai lati della ferrovia.

Al terzo e peggiore caso, infine, appartengono le classi di uso del suolo che non ammettono il transito dei veicoli stradali di soccorso a causa, ad esempio, della presenza di diverse tipologie di coltura, di una densità elevata di alberature (medio/alto fusto) e della presenza di strutture o edifici a ridosso della sede ferroviaria.

In Figura 97 e Figura 98 si riporta a titolo esemplificativo l'immagine di un terreno agricolo adibito alla coltivazione del riso a lato della ferrovia che non consente il transito di veicoli.



Figura 97 – Uso del suolo non transitabile – risaia1.



Figura 98 – Uso del suolo non transitabile – risaia 2.

In Figura 99 è riportata la presenza di un edificio industriale situato a lato della ferrovia che non consente l'avvicinamento e quindi l'accesso alla sede ferroviaria.



Figura 99 – Edifici/strutture situate a lato della ferrovia.

In questo caso, l'indicatore *IUS* presenterà valori nulli, ai fini del calcolo dell'accessibilità.

3.3.2.9 IARR, - TEMPO DI ARRIVO DEI VIGILI DEL FUOCO

L'indicatore *IARR* rappresenta il tempo d'intervento da parte delle squadre di soccorso sull'arco *i-esimo* potenzialmente interessato da un evento critico.

Per la valutazione dell'accessibilità di un arco ferroviario risulta necessario determinare il tempo, espresso ad esempio in minuti, impiegato dai soccorritori per sopraggiungere sul luogo dell'evento a partire dal presidio più vicino disponibile.

L'efficacia delle operazioni di soccorso, condizionata dalla tempestività di intervento, ha effetti sull'evoluzione dell' evento critico e sulla mitigazione delle conseguenze:

- agevolando l'esodo delle persone presenti a bordo del convoglio, soprattutto per le persone con limitata capacità motoria;
- mettendo in sicurezza l'area circostante (esempio di trasporto merci pericolose);
- limitando che si inneschino fenomeni di auto innesco fino alla completa combustione del convoglio in caso di incendio.

Per quanto riguarda il tempo di intervento dei soccorsi è possibile affermare che questo dipende dai seguenti aspetti:

- tempo di attivazione dei soccorsi;
- tempo necessario, per la più vicina squadra di soccorso, per recarsi nel punto dell'evento;
- capacità operativa delle squadre correlata alle dotazioni della squadra stessa.

In questa fase di studio si ritiene utile considerare il tempo necessario per recarsi nel punto dell'evento a partire dai presidi disponibili sul territorio.



Figura 100 - Calcolo del tempo di intervento dei Vigili del Fuoco.

3.3.3 I MODELLI DI CALCOLO DEI PARAMETRI E DEGLI INDICATORI

Nel paragrafo 3.3.2 sono stati illustrati gli indicatori ritenuti utili alla formalizzazione dell'indice di accessibilità di un arco ferroviario i . Tuttavia in questa fase della ricerca si ritiene utile concentrare l'attenzione su alcuni degli indicatori proposti, considerati rappresentativi del problema. Più nello specifico il modello di calcolo è stato implementato in funzione di:

- IPL_i - indicatore relativo alla presenza di un passaggio a livello;
- ISF_i - indicatore relativo la presenza di una stazione/fermata;
- $IEST_i$ - indicatore relativo alla presenza ed estensione di una rete stradale carrabile;
- IUS_i - indicatore relativo alla destinazione di uso del suolo;
- $IARR_i$ - indicatore relativo al tempo di arrivo dei Vigili del Fuoco.

Per il calcolo di ciascun indicatore sono stati implementati dei sotto modelli.

L'indice di accessibilità singolo IAS_i dell'arco i -esimo, che non tiene conto della reciproca interazione con gli archi contigui, è dato quindi dalla somma dei seguenti indicatori moltiplicati per i rispettivi pesi di importanza relativa:

$$IAS_i = \alpha * IPL_i + \beta * ISF_i + \gamma * IEST_i + \delta * IUS_i + \varepsilon * IARR_i$$

con:

Parametro	Importanza	
IPL	α	0,16
ISF	β	0,16
IEST	γ	0,26
IUS	δ	0,23
IARR	ε	0,19
TOTALE		1,00

Tabella 4 – Pesi di importanza relativa degli indicatori.

da cui deriva:

$$IAS_i = 0,16 * IPL_i + 0,16 * ISF_i + 0,26 * IEST_i + 0,23 * IUS_i + 0,19 * IARR_i$$

Come anticipato in precedenza è necessario analizzare l'accessibilità del sistema ferroviario su entrambi i lati poiché gli elementi strutturali, ambientali e contestuali - condizioni al contorno - potrebbero essere diversi sul lato sinistro e destro di una tratta. Potrebbe verificarsi, ad esempio, il caso in cui il lato destro di una tratta sia interamente

costeggiato da un edificio (struttura) mentre il lato sinistro da una strada carrabile parallela a pochi metri dalla ferrovia.

In questa situazione si avrebbe che il valore di accessibilità del lato destro (buffer destro) è pressoché nullo in quanto l'edificio non permette il passaggio di persone, veicoli e attrezzature. Il valore di accessibilità del lato sinistro (buffer sinistro) invece sarebbe elevato in quanto una strada parallela permetterebbe l'accesso delle squadre di soccorso.

L'indice di accessibilità per ciascuna tratta viene quindi determinato come somma dei valori di accessibilità calcolati su entrambi i lati.

In funzione della struttura del modello di calcolo, una tratta ferroviaria risulterà tanto più accessibile quanto maggiore sarà il valore dell'indicatore: è, infatti, evidente che alcuni parametri forniranno un contributo positivo ai fini del calcolo dell'accessibilità mentre altri uno negativo come meglio descritto in seguito.

Ai fini del calcolo dell'*Indicatore* è opportuno specificare che nell'arco *i* di riferimento potrebbero non essere presenti sempre e contemporaneamente tutti i parametri precedentemente illustrati: questo significa che alcuni di essi, potrebbero avere valore nullo e non contribuire al calcolo dell'indicatore stesso.

3.3.3.1 LE FUNZIONI DI UTILITÀ DEGLI INDICATORI

Per procedere alla normalizzazione e poter considerare contestualmente i diversi indicatori sono state definite delle *funzioni di utilità*, che permettono di relazionare i valori assunti da ciascun indicatore con misure di tipo adimensionale.

Il calcolo degli indicatori prevede un'analisi *arco-cella-buffer* descritta nel paragrafo 3.3.1 che restituisce un valore numerico in alcuni casi riferito alla presenza del parametro considerato sull'arco *i* e in altri casi alla presenza del parametro nell'area di studio (buffer).

Ad esempio l'indicatore relativo alla presenza di un passaggio a livello restituisce un valore in relazione al fatto che in un arco *i* siano presenti uno o più *PL*. Al contrario l'indicatore di estensione stradale considera i buffer (celle) a lato della ferrovia: in questo modo è necessario valutare da un lato l'estensione stradale in ciascuna cella e dall'altro la distanza della cella dalla ferrovia stessa.

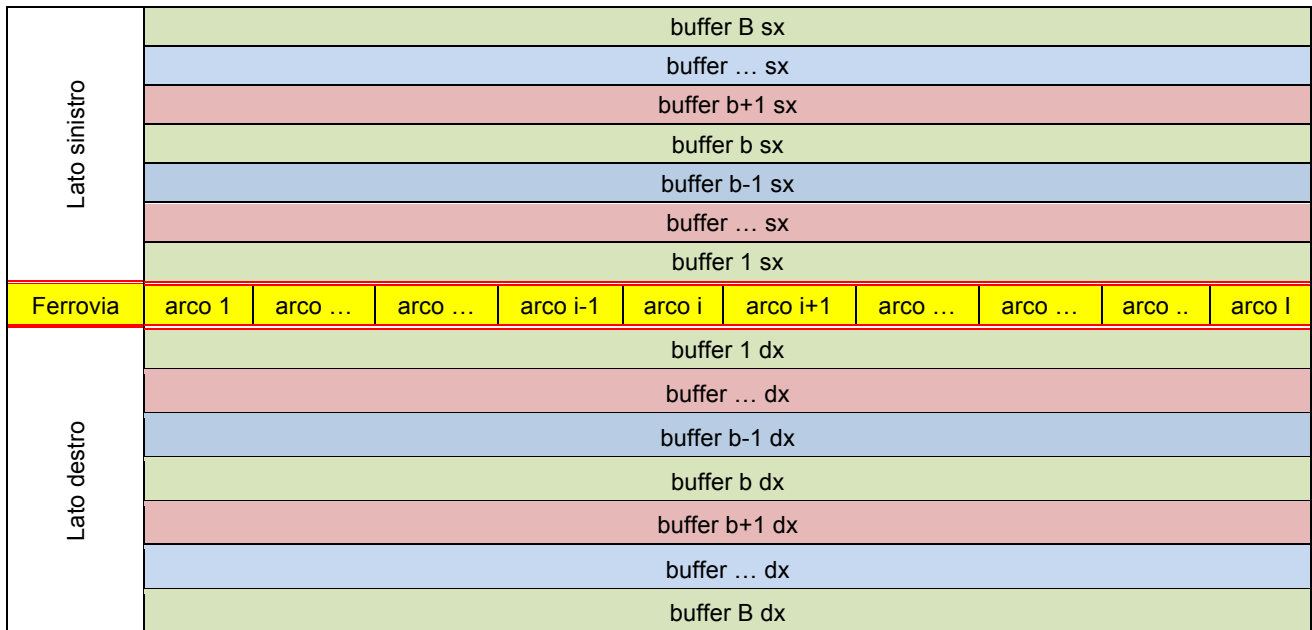


Figura 101 – Rappresentazione di archi e buffer.

Sono state quindi definite per ciascun indicatore delle funzioni di utilità con un intervallo di variabilità tra 0, valore peggiore, e B , valore migliore, dove B rappresenta il numero di buffer presenti a sinistra o destra della ferrovia come illustrato in Figura 101.

La scelta dell'intervallo è quindi correlata al numero di buffer: in questo modo è stato possibile associare un valore di utilità a ciascuna cella considerando da un lato il valore del parametro (es. estensione stradale nella cella) e dall'altro la distanza dalla ferrovia. A parità di valore del parametro, una cella più vicina alla ferrovia avrà un'utilità maggiore rispetto a una più lontana. Nel caso dell'indicatore IPL e ISF in cui non sono considerati i buffer poiché il parametro riguarda l'arco e non l'area di studio, la variabilità è la medesima degli altri indicatori ($0 - B$) con la differenza che non sono previsti valori intermedi correlati alla presenza di buffer ma solo gli estremi (0 e B).

In questo modo è stato possibile normalizzare l'intervallo di valori ammissibili di ciascun indicatore tra 0 e B .

Nei paragrafi seguenti sono illustrate e descritte le funzioni di utilità e i rispettivi intervalli per ciascun indicatore.

3.3.3.2 IPL_i - PASSAGGIO A LIVELLO

Il calcolo dell'indicatore IPL consiste nella valutazione della presenza di uno o più passaggi a livello su un generico arco i . Poiché i PL sono elementi puntuali collocati sull'infrastruttura ferroviaria, l'analisi di questo parametro è relativa al tracciato ferroviario (arco i -esimo) e non al territorio circostante (buffer)

Per la formulazione analitica dell'indicatore è necessario introdurre il parametro PL_i :

$$PL_i = NPL_i * h$$

dove:

- PL_i = parametro relativo alla presenza di passaggi a livello sull'arco i -esimo
- NPL_i = numero di passaggi al livello presenti sull'arco i -esimo
- h = coefficiente che tiene conto dell'interdistanza e della distribuzione tra PL presenti sullo stesso arco i . Nel presente modello il valore è pari a 1.

In Figura 102 è rappresentato il parametro PL_i per ciascun arco ferroviario.

Lato sinistro										
Buffer B										
Buffer ...										
Buffer b+1										
Buffer b										
Buffer b-1										
Buffer ...										
Buffer 1										
Ferrovia	arco 1	arco ...	arco ...	arco i-1	arco i	arco i+1	arco ...	arco ...	arco ...	arco l
PL_i	PL_1	$PL_{...}$	$PL_{...}$	PL_{i-1}	PL_i	PL_{i+1}	$PL_{...}$	$PL_{...}$	$PL_{...}$	PL_l
Buffer 1										
Buffer ...										
Buffer b-1										
Buffer b										
Buffer b+1										
Buffer ...										
Buffer B										
Lato destro										

Figura 102 – Rappresentazione del parametro PL_i per ogni arco.

Dopo aver valutato per ciascun arco i la presenza di uno o più passaggi a livello è necessario normalizzare il valore di PL_i mediante l'utilizzo di una funzione di utilità che consente di determinare per ciascun arco i un valore di IPL_i come segue:

$$IPL_i = f(PL_i)$$

In sostanza si tratta di definire l'intervallo di valori che IPL_i può assumere in funzione della presenza di uno o più passaggi a livello sull'arco i -esimo.

È evidente che se il valore di PL_i è nullo (non sono presenti passaggi a livello), IPL_i avrà valore nullo.

In relazione a quanto illustrato nel paragrafo 3.3.1 l'intervallo di variabilità di IPL_i dipende dal numero di buffer B in cui è suddivisa l'area di studio.

In ogni arco, IPL_i può assumere il valore B o 0 in relazione al fatto che in un arco siano presenti uno o più PL oppure non siano presenti.

Di seguito è riportata a titolo esemplificativo la formulazione analitica della funzione di utilità dell'arco i :

$$IPL_i = \begin{cases} B & \text{se } PL_i \geq 1 \\ 0 & \text{se } PL_i = 0 \end{cases}$$

In Figura 103 sono riportati per ciascun arco gli intervalli di variabilità di IPL_i .

Lato sinistro										
Buffer B										
Buffer ...										
Buffer b+1										
Buffer b										
Buffer b-1										
Buffer ...										
Buffer 1										
Ferrovia	arco 1	arco ...	arco ...	arco i-1	arco i	arco i+1	arco ...	arco ...	arco ..	arco l
IPL_i	B; 0	B; 0	B; 0	B; 0	B; 0	B; 0	B; 0	B; 0	B; 0	B; 0
Buffer 1										
Buffer ...										
Buffer b-1										
Buffer b										
Buffer b+1										
Buffer ...										
Buffer B										
Lato destro										

Figura 103 –Intervallo di variabilità di IPL_i .

Se si considera l'esempio numerico illustrato in Figura 104, si nota che la tratta ferroviaria è costituita da 10 archi e in due di questi, arco 4 e arco 8, è presente almeno un passaggio a livello (cella rossa): sull'arco 4 sono presenti 2 *PL* mentre sull'arco 8 è presente un solo *PL*.

Sono inoltre presenti 6 buffer laterali (6 a sinistra e 6 a destra) che identificano l'area di studio ($B = 6$).

Lato sinistro										
Buffer 6										
Buffer 5										
Buffer 4										
Buffer 3										
Buffer 2										
Buffer 1										
Ferrovia	arco 1	arco 2	arco 3	arco 4 - PL	arco 5	arco 6	arco 7	arco 8 - PL	arco 9	arco 10
PL_i	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0
Buffer 1										
Buffer 2										
Buffer 3										
Buffer 4										
Buffer 5										
Buffer 6										
Lato destro										

Figura 104 – Esempio numerico di rappresentazione dei passaggi a livello sugli archi ferroviari.

Con riferimento all'esempio numerico di Figura 104, si riporta di seguito la formulazione della funzione di utilità e il rispettivo andamento:

$$IPL_i = \begin{cases} 6 & \text{se } PL_i \geq 1 \\ 0 & \text{se } PL_i = 0 \end{cases}$$

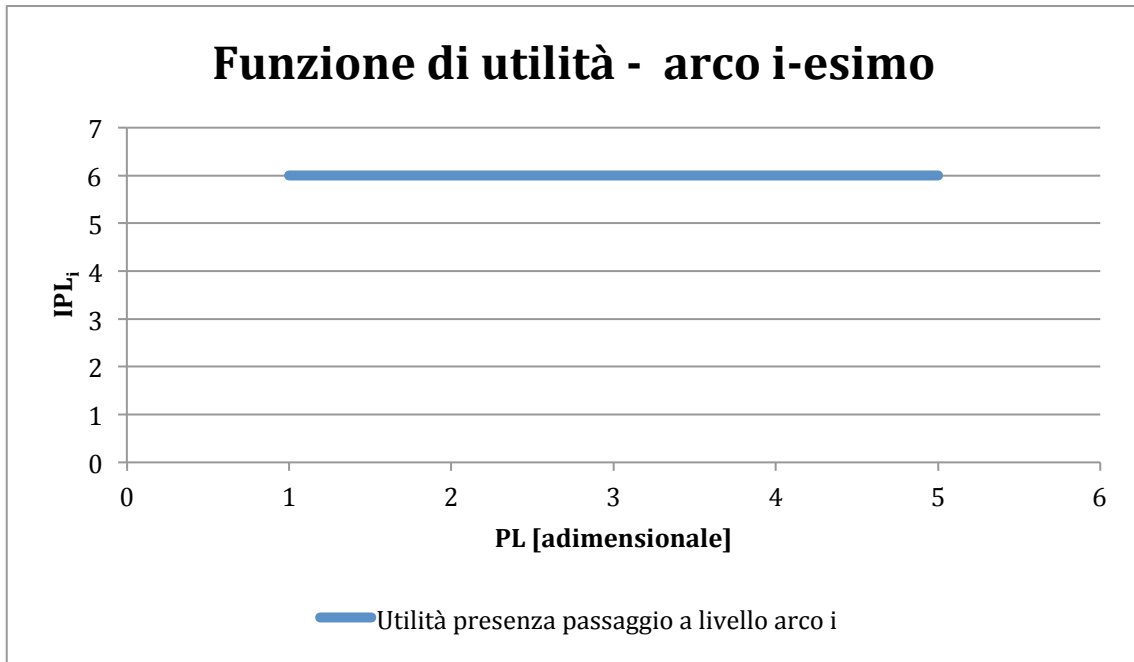


Figura 105 – Andamento funzione di utilità – arco i .

Sempre facendo riferimento all'esempio numerico di Figura 104 si osserva che a ciascuno dei 10 archi sono associati dei valori ammissibili di IPL_i come riportato in Figura 106.

Lato sinistro										
Buffer 6										
Buffer 5										
Buffer 4										
Buffer 3										
Buffer 2										
Buffer 1										
Ferrovia	arco 1	arco 2	arco 3	arco 4 - PL	arco 5	arco 6	arco 7	arco 8 - PL	arco 9	arco 10
IPL_i	0	0	0	6	0	0	0	6	0	0
Buffer 1										
Buffer 2										
Buffer 3										
Buffer 4										
Buffer 5										
Buffer 6										
Lato destro										

Figura 106 – Esempio numerico di intervalli di variabilità di IPL_i .

Nell'esempio di Figura 106 si nota che negli archi 4 e 8 il valore di IPL_i è pari a 6 mentre negli altri archi è nullo (non sono presenti PL).

Con riferimento all'esempio numerico precedente, in Tabella 5 sono riportati i valori di sintesi dell'indicatore IPL_i .

Arco	IPL_i
1	0
2	0
3	0
4	6
5	0
6	0
7	0
8	6
9	0
10	0

Tabella 5 – Valori di sintesi dell'indicatore IPL_i .

3.3.3.3 ISF_i - STAZIONI O FERDATE

Per determinare l'indicatore ISF è necessaria una valutazione della presenza di una o più stazioni/fermate su un generico arco i . Poiché anche in questo caso le stazioni sono elementi puntuali collocate sull'infrastruttura ferroviaria, l'analisi di questo parametro è relativa al tracciato ferroviario (*arco i -esimo*) e non al territorio circostante (buffer).

Per la formulazione analitica dell'indicatore è necessario introdurre il parametro SF_i :

$$SF_i = NSF_i * l$$

dove:

- SF_i = indicatore relativo alla presenza di stazioni o fermate sull'arco *i -esimo*
- NSF_i = numero di stazioni o fermate presenti sull'arco *i -esimo*
- l = coefficiente che tiene conto dell'interdistanza e della distribuzione tra SF presenti sullo stesso arco i . Nel presente modello il valore è pari a 1.

In Figura 107 è rappresentato il parametro SF_i per ciascun arco ferroviario.

Lato sinistro										
Buffer B										
Buffer ...										
Buffer b+1										
Buffer b										
Buffer b-1										
Buffer ...										
Buffer 1										
Ferrovia	arco 1	arco ...	arco ...	arco i-1	arco i	arco i+1	arco ...	arco ...	arco ...	arco l
SF_i	SF_1	$SF_{...}$	$SF_{...}$	SF_{i-1}	SF_i	SF_{i+1}	$SF_{...}$	$SF_{...}$	$SF_{...}$	SF_l
Buffer 1										
Buffer ...										
Buffer b-1										
Buffer b										
Buffer b+1										
Buffer ...										
Buffer B										
Lato destro										

Figura 107 – Rappresentazione del parametro SF_i per ogni arco.

Dopo aver valutato per ciascun arco i la presenza di una o più stazioni, è necessario normalizzare il valore di SF_i mediante l'utilizzo di una funzione di utilità che consente di determinare per ciascun arco i un valore di ISF_i come segue:

$$ISF_i = f(SF_i)$$

In sostanza si tratta di definire l'intervallo di valori che ISF_i può assumere in funzione della presenza di una o più stazioni sull'arco i -esimo.

È evidente che se il valore di SF_i è nullo (non sono presenti stazioni), ISF_i avrà valore nullo.

In relazione a quanto illustrato nel paragrafo 3.3.1 l'intervallo di variabilità di ISF_i dipende dal numero di buffer B in cui è suddivisa l'area di studio.

In ogni arco, ISF_i può assumere il valore B o 0 in relazione al fatto che in un arco siano presenti una più SF oppure non siano presenti.

Di seguito è riportata a titolo esemplificativo la formulazione analitica della funzione di utilità dell'arco i :

$$ISF_i = \begin{cases} B & \text{se } SF_i \geq 1 \\ 0 & \text{se } SF_i = 0 \end{cases}$$

In Figura 108 sono riportati per ciascun arco i gli intervalli di variabilità di ISF_i .

Lato sinistro										
Buffer B										
Buffer ...										
Buffer b+1										
Buffer b										
Buffer b-1										
Buffer ...										
Buffer 1										
Ferrovia	arco 1	arco ...	arco ...	arco i-1	arco i	arco i+1	arco ...	arco ...	arco ..	arco l
ISF _i	B; 0	B; 0	B; 0	B; 0	B; 0	B; 0	B; 0	B; 0	B; 0	B; 0
Buffer 1										
Buffer ...										
Buffer b-1										
Buffer b										
Buffer b+1										
Buffer ...										
Buffer B										
Lato destro										

Figura 108 –Intervallo di variabilità di ISF_i .

Se si considera l'esempio numerico illustrato in Figura 109, si nota che la tratta ferroviaria è costituita da 10 archi e in due di questi, arco 2 e arco 7, è presente almeno una stazione o fermata (cella rossa): sull'arco 2 è presente una SF mentre sull'arco 7 sono presenti due SF.

Sono inoltre presenti 6 buffer laterali (6 a sinistra e 6 a destra) che identificano l'area di studio ($B = 6$).

Lato sinistro										
Buffer 6										
Buffer 5										
Buffer 4										
Buffer 3										
Buffer 2										
Buffer 1										
Ferrovia	arco 1	arco 2 - SF	arco 3	arco 4	arco 5	arco 6	arco 7 - SF	arco 8	arco 9	arco 10
SF _i	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0
Buffer 1										
Buffer 2										
Buffer 3										
Buffer 4										
Buffer 5										
Buffer 6										
Lato destro										

Figura 109 – Esempio numerico di rappresentazione di stazioni o fermate sugli archi ferroviari.

Con riferimento all'esempio numerico di Figura 109, si riporta di seguito la formulazione della funzione e il rispettivo andamento:

$$ISF_i = \begin{cases} 6 & \text{se } SF_i \geq 1 \\ 0 & \text{se } SF_i = 0 \end{cases}$$

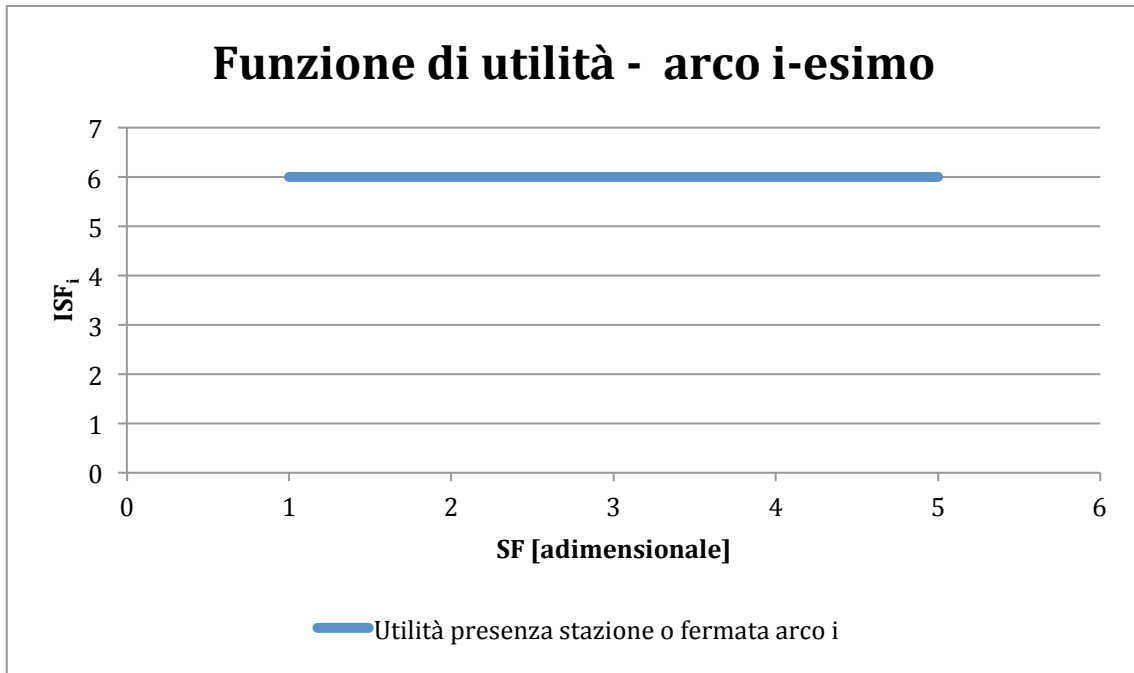


Figura 110 – Andamento funzione di utilità – arco i .

Sempre facendo riferimento all'esempio numerico di Figura 109 si osserva che a ciascuno dei 10 archi sono associati dei valori ammissibili di ISF_i come riportato in Figura 111.

Lato sinistro										
Buffer 6										
Buffer 5										
Buffer 4										
Buffer 3										
Buffer 2										
Buffer 1										
Ferrovia	arco 1	arco 2 - SF	arco 3	arco 4	arco 5	arco 6	arco 7 - SF	arco 8	arco 9	arco 10
ISF_i	0	6	0	0	0	0	6	0	0	0
Buffer 1										
Buffer 2										
Buffer 3										
Buffer 4										
Buffer 5										
Buffer 6										
Lato destro										

Figura 111 – Esempio numerico di intervalli di variabilità di ISF_i .

Nell'esempio di Figura 111 si nota che negli archi 2 e 7 il valore di ISF_i è pari a 6 mentre negli altri archi è nullo (non sono presenti SF).

Con riferimento all'esempio numerico precedente, in Tabella 6 sono riportati i valori di sintesi dell'indicatore ISF_i .

Arco	ISF_i
1	0
2	6
3	0
4	0
5	0
6	0
7	6
8	0
9	0
10	0

Tabella 6 – Valori di sintesi dell'indicatore ISF_i .

3.3.3.4 $IEST_i$ – ESTENSIONE RETE STRADALE CARRABILE

La determinazione dell'indicatore consiste nel valutare la presenza e l'estensione della rete stradale nelle celle situate a una certa distanza (buffer), a destra e sinistra rispetto all'arco ferroviario i .

Per ogni arco i il modello prevede che sia analizzato il contenuto delle celle determinando il valore di estensione stradale (es. metri lineari) per ogni coppia di celle poste alla medesima distanza dall'arco ferroviario i ovvero ricadenti nello stesso buffer. Per poter formulare in modo analitico l'indicatore è necessario specificare alcuni parametri:

- $EST_{i,b dx}$ rappresenta l'estensione della rete stradale nella cella appartenente al buffer b e situata sul lato destro rispetto all'arco ferroviario i .
- $EST_{i,b sx}$ rappresenta l'estensione della rete stradale nella cella appartenente al buffer b e situata sul lato sinistro rispetto all'arco ferroviario i .

Entrambe le celle, riferite all' arco i -esimo, in cui viene determinata l'estensione stradale, sono poste alla stessa distanza (buffer) dalla ferrovia. In Figura 112 sono riportati i buffer situati a destra e sinistra rispetto alla ferrovia e le estensioni della rete stradale nella generica cella.

Lato sinistro										
Buffer B	$EST_{i,B sx}$									$EST_{i,B sx}$
Buffer ...										
Buffer b+1										
Buffer b										
Buffer b-1						$EST_{i+1,b-1 sx}$				
Buffer ...										
Buffer 1	$EST_{i,1 sx}$			$EST_{i-1,1 sx}$	$EST_{i,1 sx}$	$EST_{i+1,1 sx}$				$EST_{i,1 sx}$
Ferrovia	arco 1	arco ...	arco ...	arco i-1	arco i	arco i+1	arco ...	arco ...	arco ..	arco I
Buffer 1	$EST_{i,1 dx}$			$EST_{i-1,1 dx}$	$EST_{i,1 dx}$	$EST_{i+1,1 dx}$				$EST_{i,1 dx}$
Buffer ...										
Buffer b-1										
Buffer b										
Buffer b+1				$EST_{i-1,b+1 dx}$						
Buffer ...										
Buffer B	$EST_{i,B dx}$									$EST_{i,B dx}$
Lato destro										

Figura 112 – Rappresentazione del parametro EST per ogni cella.

Successivamente, per ogni i -esimo arco si determina la somma delle estensioni stradali delle due celle appartenenti all' b -esimo buffer ovvero equidistanti dalla ferrovia:

$$SEST_{i,(b\ sx+b\ dx)} = EST_{i,b\ dx} + EST_{i,b\ sx}$$

In Figura 113 si osserva l'illustrazione di $SEST$ per alcune coppie di celle associate ad taluni archi, dove il valore di $SEST$ per esigenze di rappresentazione viene riportato nella parte sinistra della ferrovia.

Lato sinistro										
Buffer B	$SEST_{i,(B\ x+B\ dx)}$									$SEST_{i,(Bsx+Bdx)}$
Buffer ...										
Buffer b+1										
Buffer b										
Buffer b-1										
Buffer ...										
Buffer 1	$SEST_{i,(1sx+1dx)}$				$SEST_{i,(1sx+1dx)}$					$SEST_{i,(1sx+1dx)}$
Ferrovia	arco 1	arco ...	arco ...	arco i-1	arco i	arco i+1	arco ...	arco ...	arco ..	arco l
Buffer 1										
Buffer ...										
Buffer b-1										
Buffer b										
Buffer b+1										
Buffer ...										
Buffer B										
Lato destro										

Figura 113 – Rappresentazione del parametro $SEST_{i,(b\ sx+b\ dx)}$.

Dopo aver valutato per ciascun buffer il valore di estensione stradale, è necessario considerare la distanza di un buffer (e quindi di una cella) dall'arco ferroviario. Infatti per ogni arco i a parità di estensione stradale, la cella più vicino alla ferrovia fornisce un maggior contributo in termini di accessibilità permettendo così l'avvicinamento dei Servizi di Pronto Intervento.

La funzione di utilità, definita per ogni buffer b , consente di determinare per ciascun arco i un valore di $IES_{i,(bsx+bdx)}$ – Indicatore di Estensione Stradale – a partire dall'estensione stradale del buffer e dalla distanza dall'arco ferroviario come segue:

$$IES_{i,(b\ sx+b\ dx)} = f(SEST_{i,(b\ sx+b\ dx)})$$

In sostanza si tratta di definire degli intervalli di valori che $IES_{i,(b\ sx+b\ dx)}$ può assumere in funzione di:

- estensione stradale;
- distanza dalla ferrovia.

È evidente che se il valore di estensione stradale di una cella è nullo (non sono presenti strade), $IES_{i, (b \text{ sx}+ b \text{ dx})}$ avrà valore nullo indipendentemente dal buffer di appartenenza.

Il numero degli intervalli è quindi pari al numero di buffer B e la variabilità di $IES_{i, (b \text{ sx}+ b \text{ dx})}$ dipende dal buffer in cui si sta effettuando l'analisi. In ogni buffer, tranne quello più vicino alla ferrovia, IES può assumere un valore massimo, minimo o nullo come riportato in Figura 114.

Buffer B	$B-B+2; B-B+1; 0$									
Buffer									
Buffer b+1	$B-(b+1)+2; B-(b+1)+1; 0$									
Buffer b	$B-b+2; B-(b+1)+1; 0$									
Buffer b-1	$B-(b-1)+2; B-(b-1)+1; 0$									
Buffer									
Buffer 1	$B; 0$									
Ferrovia	arco 1	arco ...	arco ...	arco i-1	arco i	arco i+1	arco ...	arco ...	arco ..	arco l

Figura 114 - Intervalli di variabilità di $IES_{i, (b \text{ sx}+ b \text{ dx})}$.

Si tratta di determinare per ogni buffer delle funzioni a gradino definite per valori di $SEST$ maggiori di 0 ad eccezione del buffer 1 dove la funzione è una costante.

Nel buffer 1, infatti, non si ritiene utile diversificare il valore di IES (uno massimo e uno minimo) poiché se è presente una strada, indipendentemente dalla sua estensione darà un contributo all'accessibilità permettendo l'avvicinamento dei soccorsi.

Il discriminante che permette di associare a $IES_{i, (b \text{ sx}+ b \text{ dx})}$ il valore di utilità massimo o minimo della funzione è dato da $SM_{(b \text{ sx}+ b \text{ dx})}$ calcolato come segue:

$$SM_{(b \text{ sx}+ b \text{ dx})} = \text{media}[SMAX_{(b \text{ sx}+ b \text{ dx})}; SMINO_{(b \text{ sx}+ b \text{ dx})}]$$

dove:

- $SMAX_{(b \text{ sx}+ b \text{ dx})}$ rappresenta il valore massimo di $SEST$ in ciascun buffer b ;
- $SMINO_{(b \text{ sx}+ b \text{ dx})}$ rappresenta il valore minimo > 0 di $SEST$ in ciascun buffer b .

In pratica per ciascun buffer si considera il valore massimo di $SEST_{i, (b \text{ sx}+ b \text{ dx})}$ ($SMAX_{(b \text{ sx}+ b \text{ dx})}$ riferito a ogni arco i e il valore minimo maggiore di 0 ($SMINO_{(b \text{ sx}+ b \text{ dx})}$): la media tra questi due valori rappresenta il punto di discontinuità della funzione di utilità.

In Figura 115 sono riportati i parametri *SMINO* (in rosso), *SMAX* (in verde) e *SM* (in arancione) per ciascun buffer *b* tranne per il buffer 1, più vicino alla ferrovia, dove non è necessario definire una funzione a gradino.

Buffer B	SMINO _(B sx+B dx) ; SMAX _(B sx+B dx) ; SM _(B sx+B dx)										
Buffer ...	SMINO...; SMAX...; SM...										
Buffer b+1	SMINO _(b+1 sx+b+1 dx) ; SMAX _(b+1 sx+b+1 dx) ; SM _(b+1 sx+b+1 dx)										
Buffer b	SMINO _(b sx+b dx) ; SMAX _(b sx+b dx) ; SM _(b sx+b dx)										
Buffer b-1	SMINO _(b-1 sx+b-1 dx) ; SMAX _(b-1 sx+b-1 dx) ; SM _(b-1 sx+b-1 dx)										
Buffer ...	SMINO...; SMAX... SM...										
Buffer 1	-										
Ferrovia	arco 1	arco ...	arco ...	arco i-1	arco i	arco i+1	arco ...	arco ...	arco ..	arco l	

Figura 115 – Rappresentazione di *SMINO*, *SMAX* e *SM*.

Con riferimento alla Figura 114 e Figura 115, sono riportate a titolo esemplificativo le formulazioni analitiche delle funzioni di utilità del buffer 1 e buffer *b*:

$$IES_{i,1} = \begin{cases} B & \text{se } SEST_{i,1 \text{ } sx+1 \text{ } dx} > 0 \\ 0 & \text{se } SEST_{i,1 \text{ } sx+1 \text{ } dx} = 0 \end{cases}$$

$$IES_{i,b} = \begin{cases} B - b + 2 & \text{se } SM_{(b \text{ } sx+b \text{ } dx)} \leq SEST_{i,b \text{ } sx+b \text{ } dx} \leq SMAX_{(b \text{ } sx+b \text{ } dx)} \\ B - b + 1 & \text{se } SMINO_{(b \text{ } sx+b \text{ } dx)} \leq SEST_{i,b \text{ } sx+b \text{ } dx} < SM_{(b \text{ } sx+b \text{ } dx)} \\ 0 & \text{se } SEST_{i,b \text{ } sx+b \text{ } dx} = 0 \end{cases}$$

Il calcolo dell'indicatore *IES_i* dell'arco *i-esimo* consiste nel considerare il massimo valore tra gli *IES_{i,b}* precedentemente determinati come segue:

$$IES_i = MAX[IES_{i,1}; IES_{i,b-1}; IES_{i,b}; IES_{i,b+1}; IES_{i,..}; IES_{i,B}]$$

Lato sinistro										
Buffer B	IES _{1,B}			IES _{i-1,B}	IES _{i,B}	IES _{i+1,B}				IES _{i,B}
Buffer ...	IES _{1,...}			IES _{i-1,...}	IES _{i,...}	IES _{i+1,...}				IES _{i,...}
Buffer b+1	IES _{1,b+1}			IES _{i-1,b+1}	IES _{i,b+1}	IES _{i+1,b+1}				IES _{i,b+1}
Buffer b	IES _{1,b}			IES _{i-1,b}	IES _{i,b} sx	IES _{i+1,b}				IES _{i,b}
Buffer b-1	IES _{1,b-1}			IES _{i-1,b-1}	IES _{i,b-1} sx	IES _{i+1,b-1}				IES _{i,b-1}
Buffer ...	IES _{1,...}			IES _{i-1,...}	IES _{i,...}	IES _{i+1,...}				IES _{i,...}
Buffer 1	IES _{1,1}			IES _{i-1,1}	IES _{i,1}	IES _{i+1,1}				IES _{i,1} sx
Ferrovia	arco 1	arco ...	arco ...	arco i-1	arco i	arco i+1	arco ...	arco ...	arco ..	arco I
Indicatore IES _i	MAX IES _{1,b}	MAX IES _{...b}	MAX IES _{...b}	MAX IES _{i-1,b}	MAX IES _{i,b}	MAX IES _{i+1,b}	MAX IES _{...b}	MAX IES _{...b}	MAX IES _{i,b}	MAX IES _{i,b}
Lato destro										

Figura 116 - Rappresentazione di IES_i e IES_{i,b}.

In Figura 117 è illustrato un esempio numerico dove la tratta ferroviaria è costituita da 10 archi aventi la medesima lunghezza e i 6 buffer (area di studio) hanno la medesima estensione. A ogni arco *i* corrispondono una cella sinistra e una cella destra, aventi ciascuna un valore di estensione stradale *EST*.

Lato sinistro										
Buffer 6	32	30	0	0	0	0	0	0	30	93
Buffer 5	0	30	0	0	0	0	0	0	30	59
Buffer 4	55	133	100	153	100	100	188	170	105	41
Buffer 3	48	30	0	121	100	100	29	0	0	0
Buffer 2	0	57	101	49	0	0	0	0	0	0
Buffer 1	40	64	0	0	56	0	0	0	0	53
Ferrovia	arco 1	arco 2	arco 3	arco 4	arco 5	arco 6	arco 7	arco 8	arco 9	arco 10
Buffer 1	13	0	0	0	68	0	0	0	0	42
Buffer 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Buffer 3	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0
Buffer 4	0	0	0	0	0	0	0	31	0	0
Buffer 5	0	0	0	0	0	0	0	31	0	0
Buffer 6	27	0	0	0	0	0	0	31	0	68
Lato destro										

Figura 117 – Valori di estensione stradale *EST* nei buffer e nelle celle.

Con riferimento all'esempio numerico di Figura 117, in Figura 118 si riportano alcuni valori di $SEST_{i, (b\ s_x+b\ d_x)}$ come somma dei valori di EST delle coppie di celle equidistanti dalla ferrovia.

Lato sinistro										
Buffer 6	32+27=59									93+68=161
Buffer 5										
Buffer 4										
Buffer 3										
Buffer 2										
Buffer 1	40+13=53				56+68=124					53+42=95
Ferrovia	arco 1	arco 2	arco 3	arco 4	arco 5	arco 6	arco 7	arco 8	arco 9	arco 10
Buffer 1										
Buffer 2										
Buffer 3										
Buffer 4										
Buffer 5										
Buffer 6										
Lato destro										

Figura 118 - Esempio di calcolo del parametro $SEST_{i, (b\ s_x+b\ d_x)}$.

A ogni arco i -esimo è quindi possibile associare un valore di $SEST_{i, (b\ s_x+b\ d_x)}$ relativo alle estensioni stradali per ogni coppia di celle equidistanti dalla ferrovia (buffer sinistro + buffer destro) come illustrato in Figura 119.

Buffer 6	59	30	0	0	0	0	0	31	30	161
Buffer 5	0	30	0	0	0	0	0	31	30	59
Buffer 4	55	133	100	153	100	100	188	201	105	41
Buffer 3	48	30	0	121	100	100	29	30	0	0
Buffer 2	0	57	101	49	0	0	0	0	0	0
Buffer 1	53	64	0	0	124	0	0	0	0	95
Ferrovia	arco 1	arco 2	arco 3	arco 4	arco 5	arco 6	arco 7	arco 8	arco 9	arco 10

Figura 119 - Rappresentazione numerica di $SEST_{i, (b\ s_x+b\ d_x)}$.

Se si considera l'esempio numerico di Figura 117, si osserva che a ciascuno dei 6 buffer è associato un intervallo di valori ammissibili come riportato nell'esempio di Figura 120.

Buffer 6	2; 1; 0									
Buffer 5	3; 2; 0									
Buffer 4	4; 3; 0									
Buffer 3	5; 4; 0									
Buffer 2	6; 5; 0									
Buffer 1	6; 0									
Ferrovia	arco 1	arco 2	arco 3	arco 4	arco 5	arco 6	arco 7	arco 8	arco 9	arco 10

Figura 120 - Esempio numerico di intervalli di variabilità di $IES_{i,b \text{ sx}+b \text{ dx}}$.

Nell'esempio di Figura 120 si nota che:

- se è presente una strada nel buffer1 (indipendentemente dall'estensione) $IES_{i,1}$ assume valore 6, altrimenti 0;
- il valore di $IES_{i,2}$ del buffer2 può essere 6 o 5 in funzione dell'estensione stradale. In caso di assenza di strade è pari a 0;
- il valore di $IES_{i,3}$ del buffer3 può essere 5 o 4 in funzione dell'estensione stradale. In caso di assenza di strade è pari a 0;
- il valore di $IES_{i,4}$ del buffer4 può essere 4 o 3 in funzione dell'estensione stradale. In caso di assenza di strade è pari a 0;
- il valore di $IES_{i,5}$ del buffer5 può essere 3 o 2 in funzione dell'estensione stradale. In caso di assenza di strade è pari a 0;
- il valore di $IES_{i,6}$ del buffer6 può essere 2 o 1 in funzione dell'estensione stradale. In caso di assenza di strade è pari a 0;

Considerando l'esempio numerico precedente, in Figura 121 sono riportati i valori di estensione stradale $SMINO$ (in rosso), $SMAX$ (in verde) e SM (in arancione) relativi a ciascuno dei 5 buffer. Nel buffer 1 invece non è necessario definire un andamento a gradino.

Buffer 6	30; 31; 31									
Buffer 5	30; 59; 45									
Buffer 4	41; 201; 121									
Buffer 3	29; 121; 75									
Buffer 2	49; 101; 75									
Buffer 1	-									
Ferrovia	arco 1	arco 2	arco 3	arco 4	arco 5	arco 6	arco 7	arco 8	arco 9	arco 10

Figura 121 - Esempio numerico di calcolo di $SMINO$, $SMAX$ e SM .

Facendo riferimento a Figura 121 sono riportati in Tabella 7 i valori di $SMAX$, $SMINO$ e SM per ciascuno dei 5 buffer.

	SMAX	SMINO	SM
Buffer1	-	-	-
Buffer 2	101	49	75
Buffer 3	121	29	75
Buffer 4	201	41	121
Buffer 5	59	30	45
Buffer 6	31	30	31

Tabella 7 – Esempio di calcolo di SM.

Di seguito sono riportate, per ogni buffer, le funzioni di utilità e i rispettivi andamenti:

$$IES_{i,1} = \begin{cases} 6, & SEST_{i,1} > 0 \\ 0, & SEST_{i,1} = 0 \end{cases}$$

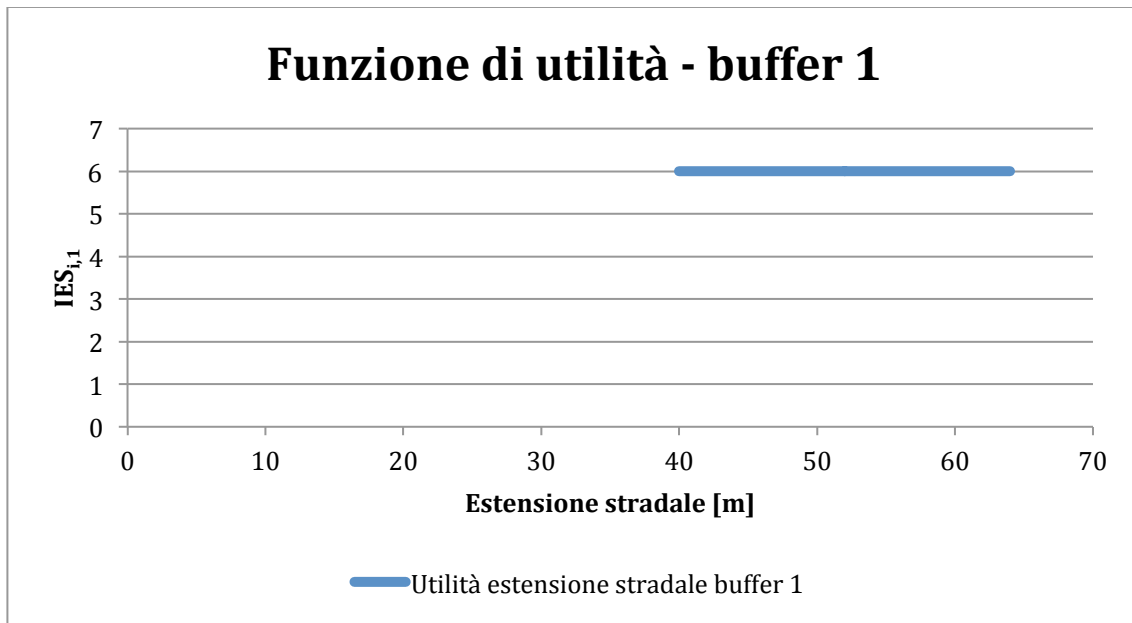


Figura 122 – Andamento funzione di utilità – buffer 1.

$$IES_{i,3} = \begin{cases} 6 & \text{se } 75 \leq SEST_{i,2} \leq 101 \\ 5 & \text{se } 49 \leq SEST_{i,2} < 75 \\ 0 & \text{se } SEST_{i,2} = 0 \end{cases}$$

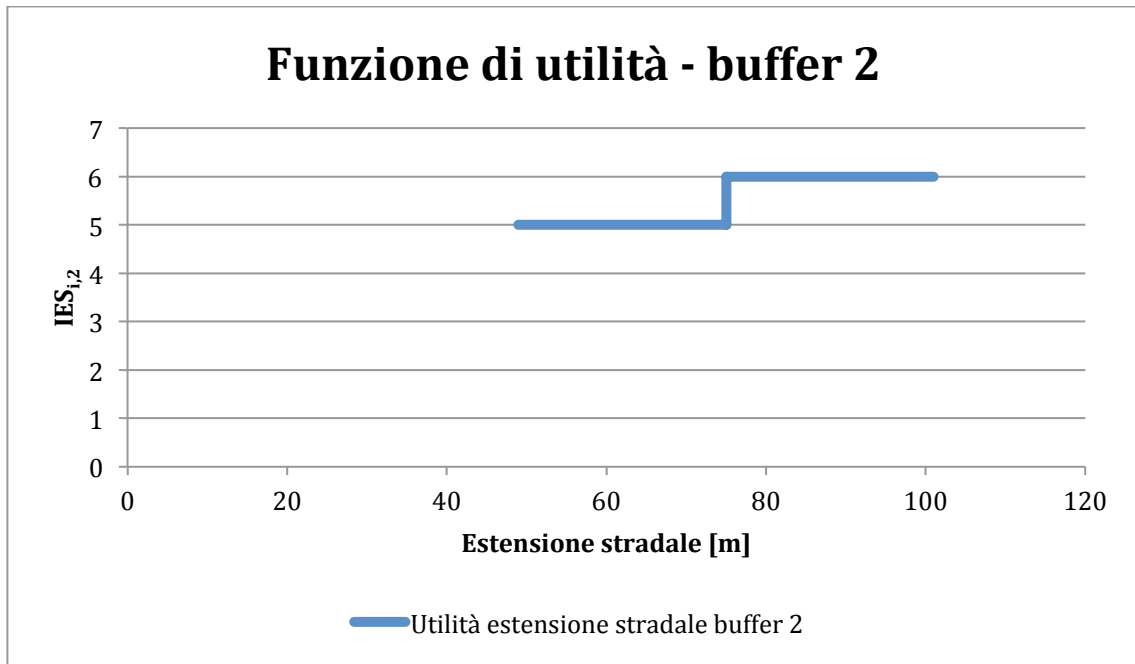


Figura 123 – Andamento funzione di utilità - buffer 2.

$$IES_{i,3} = \begin{cases} 5 & \text{se } 75 \leq SEST_{i,3} \leq 121 \\ 4 & \text{se } 29 \leq SEST_{i,3} < 75 \\ 0 & \text{se } SEST_{i,3} = 0 \end{cases}$$

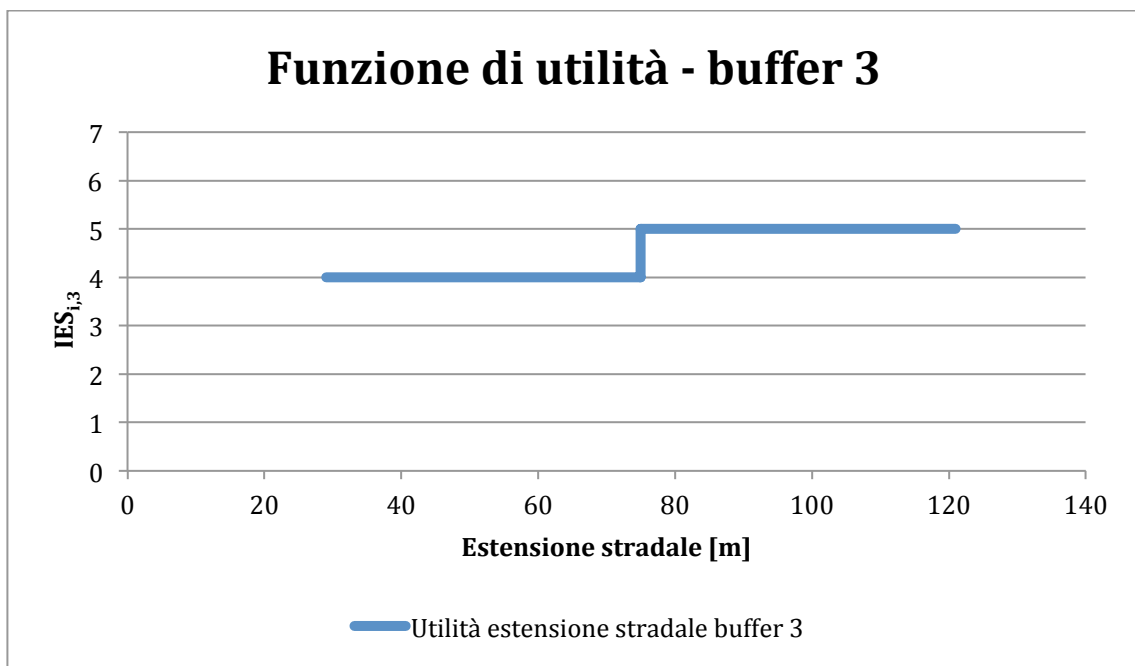


Figura 124 - Andamento funzione di utilità - buffer 3.

$$IES_{i,4} = \begin{cases} 4 & \text{se } 121 \leq SEST_{i,4} \leq 201 \\ 3 & \text{se } 41 \leq SEST_{i,4} < 121 \\ 0 & \text{se } SEST_{i,4} = 0 \end{cases}$$

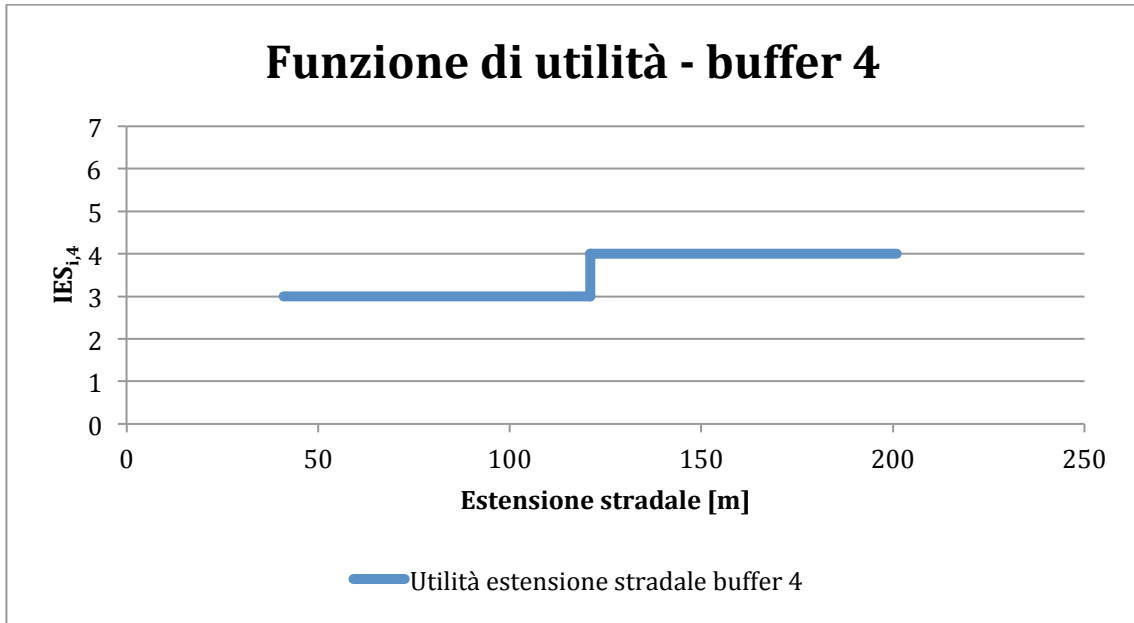


Figura 125 - Andamento funzione di utilità - buffer 4.

$$IES_{i,5} = \begin{cases} 3 & \text{se } 45 \leq SEST_{i,5} \leq 59 \\ 2 & \text{se } 30 \leq SEST_{i,5} < 45 \\ 0 & \text{se } SEST_{i,5} = 0 \end{cases}$$

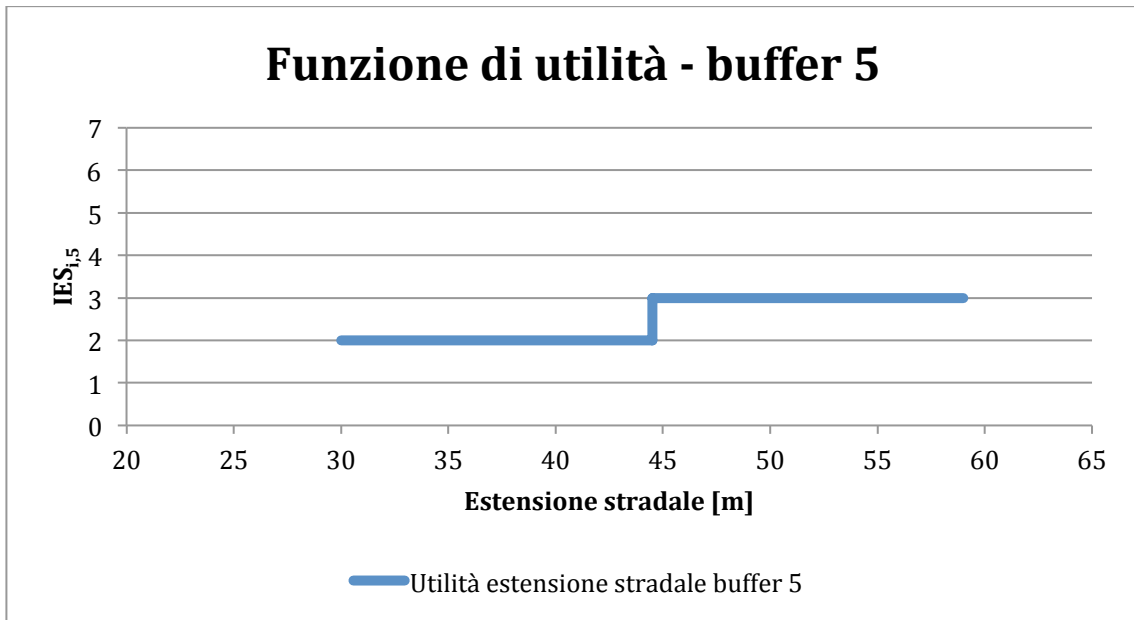


Figura 126 - Andamento funzione di utilità - buffer 5.

$$IES_{i,6} = \begin{cases} 2 & \text{se } 31 \leq SEST_{i,6} \leq 31 \\ 1 & \text{se } 30 \leq SEST_{i,6} < 31 \\ 0 & \text{se } SEST_{i,6} = 0 \end{cases}$$

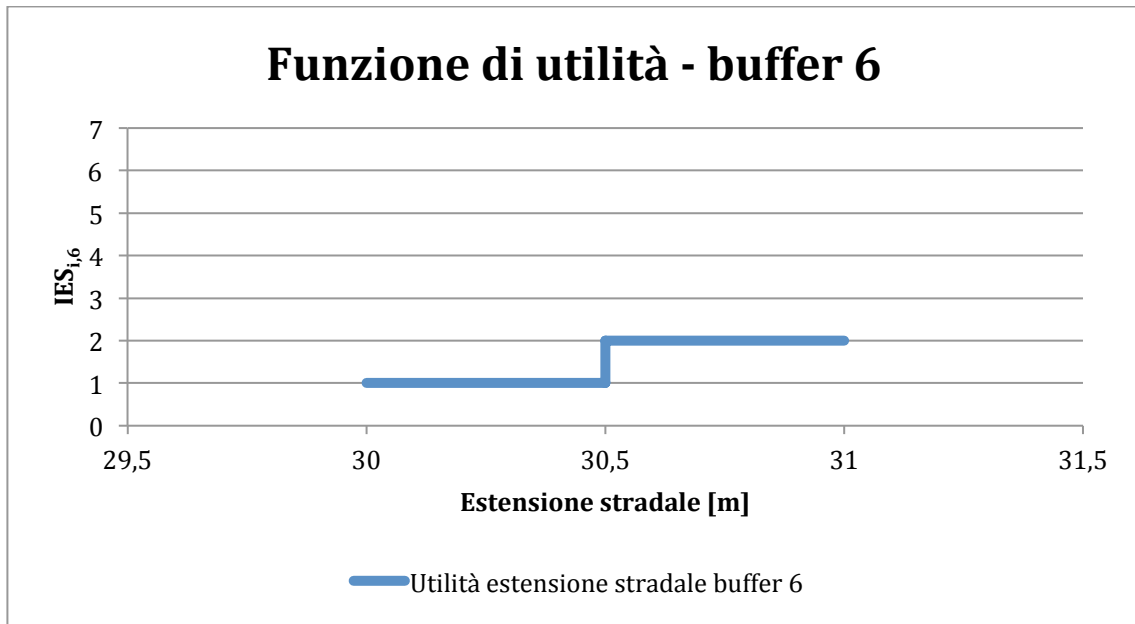


Figura 127 - Andamento funzione di utilità - buffer 6.

Nella parte superiore di Figura 128 sono riportati per ogni arco i 6 valori $IES_{i,b}$ (ognuno per ciascun buffer) e nella parte inferiore i valori dell'indicatore IES_i .

Buffer 6	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0
Buffer 5	0	3	0	0	0	0	0	2	2	2
Buffer 4	3	4	3	4	3	3	4	4	3	3
Buffer 3	4	4	0	4	4	4	4	4	0	0
Buffer 2	0	5	5	5	0	0	0	0	0	0
Buffer 1	6	6	0	0	0	0	0	0	0	0
Ferrovia	arco 1	arco 2	arco 3	arco 4	arco 5	arco 6	arco 7	arco 8	arco 9	arco 10
Indicatore IES_i	6	6								
			5	5						
					4	4	4	4		
									3	3

Figura 128 – Esempio di calcolo di $IES_{i,b}$ e IES_i .

Nell'esempio numerico considerato, in cui sono presenti 6 buffer, si avranno per ogni arco i 6 valori di $IES_{i,b}$, ($IES_{i,1}$; $IES_{i,2}$; $IES_{i,3}$; $IES_{i,4}$; $IES_{i,5}$; $IES_{i,6}$). L'indicatore IES_i risulta quindi pari a:

$$IES_i = \text{MAX}[IES_{i,1}; IES_{i,2}; IES_{i,3}; IES_{i,4}; IES_{i,5}; IES_{i,6}]$$

In Tabella 8 sono riportati i valori di sintesi dell'indicatore IES_i .

Arco	$IES_{i,1}$	$IES_{i,2}$	$IES_{i,3}$	$IES_{i,4}$	$IES_{i,5}$	$IES_{i,6}$	IES_i
1	6	0	4	3	0	0	6
2	6	5	4	4	2	1	6
3	0	5	0	3	0	0	5
4	0	5	4	4	0	0	5
5	0	0	4	3	0	0	4
6	0	0	4	3	0	0	4
7	0	0	4	4	0	0	4
8	0	0	4	4	2	1	4
9	0	0	0	3	2	1	3
10	0	0	0	3	2	0	3

Tabella 8 – Valori di sintesi dell'indicatore IES_i .

3.3.3.5 IUS_i - USO DEL SUOLO

L'indicatore IUS identifica la destinazione di uso del suolo come parametro utile a determinare l'accessibilità di un arco ferroviario *i*.

Per la definizione dell'indicatore IUS_i è necessario introdurre i parametri US_{i,b sx,s} e US_{i,b dx,s} che rappresentano l'estensione di uso del suolo riferiti a ogni arco *i* e buffer *b* come illustrato in Figura 129.

Entrambi i parametri sono determinati mediante la seguente formula:

$$US_{i,b\ sx,s} = \sum (area_{i,b\ sx,s} * p_s)$$

$$US_{i,b\ dx,s} = \sum (area_{i,b\ dx,s} * p_s)$$

dove:

- $area_{i,b,s}$ = identifica l'area, espressa ad esempio in metri quadri, di ciascuna tipologia di uso del suolo all'interno della generica cella;
- p_s = è un coefficiente associato a ciascuna tipologia di uso del suolo in funzione dell'accessibilità.

Lato sinistro										
Buffer B	US _{1,B sx,s}			US _{i-1,B sx,s}	US _{i,B sx,s}	US _{i+1,B sx,s}				US _{i,B sx,s}
Buffer ...										
Buffer b+1										
Buffer b	US _{1,b sx,s}			US _{i-1,b sx,s}	US _{i,b sx,s}	US _{i+1,b sx,s}				US _{i,b sx,s}
Buffer b-1										
Buffer ...										
Buffer 1	US _{1,1 sx,s}			US _{i-1,1 sx,s}	US _{i,1 sx,s}	US _{i+1,1 sx,s}				US _{i,1 sx,s}
Ferrovia	arco 1	arco ...	arco ...	arco i-1	arco i	arco i+1	arco ...	arco ...	arco ..	arco l
Buffer 1	US _{1,1 dx,s}			US _{i-1,1 dx,s}	US _{i,1 dx,s}	US _{i+1,1 dx,s}				US _{i,1 dx,s}
Buffer ...										
Buffer b-1										
Buffer b	US _{1,b dx,s}			US _{i-1,b dx,s}	US _{i,b dx,s}	US _{i+1,b dx,s}				US _{i,b dx,s}
Buffer b+1										
Buffer ...										
Buffer B	US _{1,B dx,s}			US _{i-1,B dx,s}	US _{i,B dx,s}	US _{i+1,B dx,s}				US _{i,B dx,s}
Lato destro										

Figura 129 - Rappresentazione di US_{i,b sx,s} e US_{i,b dx,s}.

In ogni cella possono, infatti, coesistere superfici aventi diversi usi del suolo (classi) quali ad esempio:

- seminativi;
- legnose agrarie;
- prati;
- boschi;
- vegetazione naturale;
- aree sterili;
- aree idriche;
- urbanizzato.

Il coefficiente p_s può variare nell'intervallo 0-1 e ha un valore elevato tanto più la classe di uso del suolo è *accessibile* mentre presenta valori contenuti in caso di classi che non sono considerate accessibili. Nel presente studio il coefficiente p_s può assumere i seguenti valori:

- 0 – accessibilità nulla;
- 0,5 – accessibilità bassa
- 0,7 – accessibilità media
- 1 – accessibilità alta

A una superficie destinata a *prato*, ad esempio, è associato un coefficiente maggiore rispetto a una superficie *boscata* o *urbanizzata* dove è ragionevole ipotizzare che la presenza di edifici o alberi renderanno più difficile il passaggio delle squadre di soccorso in avvicinamento al punto dell'evento.

In Figura 130 viene riportato un esempio in cui nella cella in rosso sono presenti due classi di uso del suolo aventi la stessa superficie ma diverso coefficiente di accessibilità p_s .

Lato sinistro										
Buffer B										
Buffer ...										
Buffer b+1										
Buffer b										
Buffer b-1					$A_{i,b-1,s1} * p_{s1}$	$A_{i,b-1,s2} * p_{s2}$				
Buffer ...										
Buffer 1										
Ferrovia	arco 1	arco ...	arco ...	arco i-1	arco i	arco i+1	arco ...	arco ...	arco ..	arco l
Buffer 1										
Buffer ...										
Buffer b-1										
Buffer b										
Buffer b+1										
Buffer ...										
Buffer B										
Lato destro										

Figura 130 – Esempio di classi di suolo diverse presenti nella stessa cella.

Per ogni arco i e buffer b viene quindi sommata l'area (espressa ad esempio in m^2) di ciascuna classe di uso del suolo moltiplicata per il coefficiente di accessibilità p_s .

Dopo aver determinato il valore di $US_{i,b\ sx,s}$ e $US_{i,b\ dx,s}$ il modello prevede di verificare se all'interno di ogni cella sia presente o meno una rete stradale indipendentemente dall'estensione. In sostanza si tratta di verificare che il parametro $EST_{i,b}$ sia maggiore di 0.

Si procede con il calcolo dei seguenti parametri:

$$EUS_{i,b\ sx,s} = US_{i,b\ sx,s} * k_{i,b\ sx}$$

$$EUS_{i,b\ dx,s} = US_{i,b\ dx,s} * k_{i,b\ dx}$$

dove k è un coefficiente che rappresenta la presenza di una strada nella cella di riferimento in cui si intende determinare il valore di $EUS_{i,b,s}$.

I valori ammissibili di k sono 0 e 1 in relazione al fatto che sia presente un strada nella cella ($EST_{i,b} > 0$)

In Figura 131 viene riportato il parametro $EUS_{i,b\ sx,s}$ e $EUS_{i,b\ dx,s}$.

Lato sinistro										
Buffer B	$EUS_{1,B\ sx,s}$			$EUS_{i-1,B\ sx,s}$	$EUS_{i,B\ sx,s}$	$EUS_{i+1,B\ sx,s}$				$EUS_{i,B\ sx,s}$
Buffer ...										
Buffer b+1										
Buffer b	$EUS_{1,b\ sx,s}$			$EUS_{i-1,b\ sx,s}$	$EUS_{i,b\ sx,s}$	$EUS_{i+1,b\ sx,s}$				$EUS_{i,b\ sx,s}$
Buffer b-1										
Buffer ...										
Buffer 1	$EUS_{1,1\ sx,s}$			$EUS_{i-1,1\ sx,s}$	$EUS_{i,1\ sx,s}$	$EUS_{i+1,1\ sx,s}$				$EUS_{i,1\ sx,s}$
Ferrovia	arco 1	arco ...	arco ...	arco i-1	arco i	arco i+1	arco ...	arco ...	arco ..	arco l
Buffer 1	$EUS_{1,1\ dx,s}$			$EUS_{i-1,1\ dx,s}$	$EUS_{i,1\ dx,s}$	$EUS_{i+1,1\ dx,s}$				$EUS_{i,1\ dx,s}$
Buffer ...										
Buffer b-1										
Buffer b	$EUS_{1,b\ dx,s}$			$EUS_{i-1,b\ dx,s}$	$EUS_{i,b\ dx,s}$	$EUS_{i+1,b\ dx,s}$				$EUS_{i,b\ dx,s}$
Buffer b+1										
Buffer ...										
Buffer B	$EUS_{1,B\ dx,s}$			$EUS_{i-1,B\ dx,s}$	$EUS_{i,B\ dx,s}$	$EUS_{i+1,B\ dx,s}$				$EUS_{i,B\ dx,s}$
Lato destro										

Figura 131 - Rappresentazione di $EUS_{i,b\ sx,s}$ e $EUS_{i,b\ dx,s}$.

Il passo successivo consiste nel calcolo del valore di $IUS_{i,b\ sx,s}$ e $IUS_{i,b\ dx,s}$ a partire dalle celle in cui il valore di $EUS_{i,b\ sx,s}$ e $EUS_{i,b\ dx,s}$ sono maggiori di 0 ovvero è presente una strada come segue:

$$\begin{cases} \text{se } EUS_{i,b,s} > 0; IUS_{i,b,s} = EUS_{i,b,s} + US_{i,(b-1),s} + US_{i,(b-2),s} + US_{i,\dots,s} + US_{i,1,s} \\ \text{se } EUS_{i,b,s} = 0; IUS_{i,b,s} = 0 \end{cases}$$

In Figura 132 è riportato un esempio di calcolo dei parametri $IUS_{1,b\ sx,s}$ e $IUS_{1,(b-1)\ dx,s}$ determinati come segue:

$$IUS_{1,b\ sx,s} = EUS_{1,b\ sx,s} + US_{1,(b-1)\ sx,s} + US_{1,1\ sx,s}$$

$$IUS_{1,(b-1)\ dx,s} = EUS_{1,(b-1)\ dx,s} + US_{1,1\ dx,s}$$

Lato sinistro										
Buffer B										
Buffer ...										
Buffer b+1										
Buffer b	IUS _{1,b sx}									
Buffer b-1	US _{1,b-1 sx}									
Buffer ...	US _{1,... sx}									
Buffer 1	US _{1,1 sx}									
Ferrovia	arco 1	arco ...	arco ...	arco i-1	arco i	arco i+1	arco ...	arco ...	arco ..	arco l
Buffer 1	US _{1,1 dx}									
Buffer ...	US _{1,... dx}									
Buffer b-1	IUS _{1,b-1 dx}									
Buffer b										
Buffer b+1										
Buffer ...										
Buffer B										
Lato destro										

Figura 132 - Rappresentazione di IUS_{1,b sx,s} e IUS_{1,(b-1 dx),s}.

La fase successiva del modello consiste nel determinare, per ogni arco i e ogni buffer b il valore somma tra le coppie di $IUS_{i,b, sx,s}$ e $IUS_{i,b, dx,s}$ posti in posizione simmetrica rispetto alla ferrovia come segue:

$$IUS_{i,(b\ sx+b\ dx),s} = IUS_{i,b\ sx,s} + IUS_{i,b\ dx,s}$$

In caso in cui entrambi i valori di $IUS_{i,b\ sx,s}$ e $IUS_{i,b\ dx,s}$ siano pari a 0, anche $IUS_{i,(b\ sx+b\ dx)}$ presenterà valore nullo.

In Figura 133 si riporta il calcolo di $IUS_{1,(b\ sx+b\ dx),s}$ (celle rosse) e $IUS_{i,(1\ sx+1\ dx),s}$ (celle blu) dove il valore, per esigenze di rappresentazione (convenzione), viene riportato nella parte sinistra della ferrovia.

Lato sinistro										
Buffer B										
Buffer ...										
Buffer b+1										
Buffer b	$IUS_{1,(b\ sx+b\ dx),s}$									
Buffer b-1										
Buffer ...										
Buffer 1					$IUS_{i,(1\ sx+1\ dx),s}$					
Ferrovia	arco 1	arco ...	arco ...	arco i-1	arco i	arco i+1	arco ...	arco ...	arco ..	arco l
Buffer 1										
Buffer ...										
Buffer b-1										
Buffer b										
Buffer b+1										
Buffer ...										
Buffer B										
Lato destro										

Figura 133 - Rappresentazione di $IUS_{1,(b\ sx+b\ dx),s}$ e $IUS_{i,(1\ sx+1\ dx),s}$.

Dopo aver valutato, per ciascun arco i e buffer b , il valore di uso del suolo è necessario considerare la distanza di un buffer dall'arco ferroviario. Infatti, per ogni arco i a parità di tipo di uso del suolo (*più o meno accessibile*), la cella più vicino alla ferrovia fornirà un maggior contributo in termini di accessibilità permettendo così l'avvicinamento dei Servizi di Pronto Intervento.

La funzione di utilità, definita per ogni buffer b , consente di determinare per ciascun arco i un valore di $IFUS_{i,(b\ sx+b\ dx),s}$ a partire dal valore di uso del suolo e dalla distanza dall'arco ferroviario come segue:

$$IFUS_{i,(b\ sx+b\ dx),s} = f(IUS_{i,(b\ sx+b\ dx),s})$$

In sostanza si tratta di definire degli intervalli di valori che $IFUS_{i,(b\ sx+b\ dx),s}$ può assumere in funzione di:

- valore di uso del suolo;
- distanza dalla ferrovia.

È evidente che se il valore di uso del suolo di una cella è nullo, $IFUS_{i,(b\ sx+b\ dx),s}$ avrà valore nullo indipendentemente dal buffer di appartenenza.

Il numero degli intervalli è quindi pari al numero di buffer B e la variabilità di $IFUS_{i,(b\ sx+b\ dx),s}$ dipende dal buffer in cui si sta effettuando l'analisi. In ogni buffer, tranne quello più

vicino alla ferrovia, *IFUS* può assumere un valore massimo, minimo o nullo come riportato in Figura 134.

Buffer B	B-B+2; B-B+1; 0									
Buffer									
Buffer b+1	B-(b+1)+2; B-(b+1)+1; 0									
Buffer b	B-b+2; B-(b+1)+1; 0									
Buffer b-1	B-(b-1)+2; B-(b-1)+1; 0									
Buffer									
Buffer 1	B; 0									
Ferrovia	arco 1	arco ...	arco ...	arco i-1	arco i	arco i+1	arco ...	arco ...	arco ..	arco l

Figura 134 - Intervalli di variabilità di $IFUS_{i,(b \text{ } sx+b \text{ } dx),s}$.

Si tratta di definire per ogni buffer delle funzioni *a gradino* definite per valori di $IUS_{i,b}$ maggiori di 0 ad eccezione del buffer 1 dove la funzione è una costante.

Nel buffer 1, infatti, non si ritiene utile diversificare il valore di *IFUS* (uno massimo e uno minimo) poiché se è presente una strada, indipendentemente dalla sua estensione, il tipo di uso del suolo darà comunque un contributo all'accessibilità permettendo l'avvicinamento dei soccorsi⁴⁸.

Il discriminante che permette di associare a $IFUS_{i,(b \text{ } sx+ b \text{ } dx),s}$ il valore di utilità massimo o minimo della funzione è dato da $UM_{(b \text{ } sx+b \text{ } dx),s}$ calcolato come segue:

$$UM_{(b \text{ } sx+b \text{ } dx),s} = media[UMAX_{(b \text{ } sx+b \text{ } dx),s}; UMINO_{(b \text{ } sx+b \text{ } dx),s}]$$

dove:

- $UMAX_{(b \text{ } sx+b \text{ } dx),s}$ rappresenta il valore massimo di *IUS* in ciascun buffer *b*;
- $UMINO_{(b \text{ } sx+b \text{ } dx),s}$ rappresenta il valore minimo > 0 di *IUS* in ciascun buffer *b*.

In pratica per ciascun buffer si considera il valore massimo di $IUS_{i,b \text{ } sx+b \text{ } dx}$ ($UMAX_{(b \text{ } sx+b \text{ } dx),s}$) riferito a ogni arco *i* e il valore minimo maggiore di 0 ($UMINO_{(b \text{ } sx+b \text{ } dx),s}$): la media tra questi due valori rappresenta il punto di discontinuità della funzione di utilità.

In Figura 135 sono riportati i parametri *UMINO* (in rosso), *UMAX* (in verde) e *UM* (in arancione) per ciascun buffer *b* tranne per il buffer 1, più vicino alla ferrovia, dove non è necessario definire una funzione *a gradino*.

⁴⁸ Il valore di accessibilità dipende comunque dal coefficiente p_s associato a una specifica classe di uso del suolo.

Buffer B	UMINO _{(B sx+B dx),s} ; UMAX _{(B sx+B dx),s} ; UM _{(B sx+B dx),s}										
Buffer ...	UMINO... ; UMAX... ; UM...										
Buffer b+1	UMINO _{(b+1 sx+b+1 dx),s} ; UMAX _{(b+1 sx+b+1 dx),s} ; UM _{(b+1 sx+b+1 dx),s}										
Buffer b	UMINO _{(b sx+b dx),s} ; UMAX _{(b sx+b dx),s} ; UM _{(b sx+b dx),s}										
Buffer b-1	UMINO _{(b-1 sx+b-1 dx),s} ; UMAX _{(b-1 sx+b-1 dx),s} ; UM _{(b-1 sx+b-1 dx),s}										
Buffer ...	UMINO... ; UMAX... ; UM...										
Buffer 1	-										
Ferrovia	arco 1	arco ...	arco ...	arco i-1	arco i	arco i+1	arco ...	arco ...	arco ..	arco l	

Figura 135 – Rappresentazione di UMINO, UMAX e UM

Con riferimento alla Figura 134 e Figura 135, sono riportate a titolo esemplificativo le formulazioni analitiche delle funzioni di utilità del buffer 1 e buffer b:

$$IFUS_{i,1} = \begin{cases} B & \text{se } IUS_{i,1 \text{ sx}+1 \text{ dx}} > 0 \\ 0 & \text{se } IUS_{i,1 \text{ sx}+1 \text{ dx}} = 0 \end{cases}$$

$$IFUS_{i,b} = \begin{cases} B - b + 2 & \text{se } UM_{(b \text{ sx}+b \text{ dx}),s} \leq IUS_{i,b \text{ sx}+b \text{ dx}} \leq UMAX_{(b \text{ sx}+b \text{ dx}),s} \\ B - b + 1 & \text{se } UMIN_{(b \text{ sx}+b \text{ dx}),s} \leq IUS_{i,b \text{ sx}+b \text{ dx}} < UM_{(b \text{ sx}+b \text{ dx}),s} \\ 0 & \text{se } IUS_{i,b \text{ sx}+b \text{ dx}} = 0 \end{cases}$$

Il calcolo dell'indicatore IUS_i dell'arco i -esimo consiste nel considerare il massimo valore tra gli $IFUS_{i,b}$ precedentemente determinati come segue:

$$IUS_i = MAX[IFUS_{i,1}; IFUS_{i,b-1}; IFUS_{i,b}; IFUS_{i,b+1}; IFUS_{i,...}; IFUS_{i,B}]$$

Lato sinistro										
Buffer B	IFUS _{1,B}			IFUS _{i-1,B}	IFUS _{i,B}	IFUS _{i+1,B}				IFUS _{i,B}
Buffer ...	IFUS _{1,...}			IFUS _{i-1,...}	IFUS _{i,...}	IFUS _{i+1,...}				IFUS _{i,...}
Buffer b+1	IFUS _{1,b+1}			IFUS _{i-1,b+1}	IFUS _{i,b+1}	IFUS _{i+1,b+1}				IFUS _{i,b+1}
Buffer b	IFUS _{1,b}			IFUS _{i-1,b}	IFUS _{i,b}	IFUS _{i+1,b}				IFUS _{i,b}
Buffer b-1	IFUS _{1,b-1}			IFUS _{i-1,b-1}	IFUS _{i,b-1}	IFUS _{i+1,b-1}				IFUS _{i,b-1}
Buffer ...	IFUS _{1,...}			IFUS _{i-1,...}	IFUS _{i,...}	IFUS _{i+1,...}				IFUS _{i,...}
Buffer 1	IFUS _{1,1}			IFUS _{i-1,1}	IFUS _{i,1}	IFUS _{i+1,1}				IFUS _{i,1}
Ferrovia	arco 1	arco ...	arco ...	arco i-1	arco i	arco i+1	arco ...	arco ...	arco ..	arco l
Indicatore IUS _i	MAX IFUS _{1,b}	MAX IFUS _{...b}	MAX IFUS _{...b}	MAX IFUS _{i-1,b}	MAX IFUS _{i,b}	MAX IFUS _{i+1,b}	MAX IFUS _{...b}	MAX IFUS _{...b}	MAX IFUS _{i,b}	MAX IFUS _{i,b}
Lato destro										

Figura 136 - Rappresentazione di IFUS_{i,b} e IUS_i.

In Figura 137 è illustrato un esempio numerico dove la tratta ferroviaria è costituita da 10 archi aventi la medesima lunghezza e i 6 buffer (area di studio) hanno la medesima estensione. A ogni arco i corrispondono una cella sinistra e una cella destra, aventi ciascuna un valore di US .

Lato sinistro										
Buffer 6	2320	1896	2164	2252	2532	1500	2683	3138	1727	1717
Buffer 5	2271	1704	2128	2218	2487	1500	2608	3057	1657	1569
Buffer 4	2244	2006	2295	2185	2441	1500	1886	2093	1645	1549
Buffer 3	2270	3042	2515	2150	2387	1500	1550	1963	1631	1530
Buffer 2	1731	2024	1874	1833	1832	1000	1015	1287	1080	1009
Buffer 1	1004	1003	1001	1003	932	500	502	637	538	501
Ferrovia	arco 1	arco 2	arco 3	arco 4	arco 5	arco 6	arco 7	arco 8	arco 9	arco 10
Buffer 1	993	997	999	998	968	658	498	632	536	499
Buffer 2	1862	1976	1991	1978	1962	2000	1770	1721	1730	1704
Buffer 3	2172	2040	2868	2928	2872	3000	2901	2954	2372	1689
Buffer 4	1894	1621	2743	2880	2789	3000	2625	2795	2221	1452
Buffer 5	1931	1574	2575	2826	2704	3000	2453	2797	2210	1432
Buffer 6	2368	1377	2076	2849	2620	3000	2680	2856	2171	1413
Lato destro										

Figura 137 – Esempio numerico di rappresentazione di valori $US_{i,b\ sx,s}$ e $US_{i,b\ dx,s}$.

In Figura 138 sono riportati a titolo esemplificativo i valori numerici del parametro $EUS_{i,b\ sx,s}$ e $EUS_{i,b\ dx,s}$. Il valore 0 identifica una cella in cui non è presente una strada ovvero il parametro k è nullo.

Lato sinistro										
Buffer 6	2320	1896	2164	2252	2532	1500	0	3138	1727	1717
Buffer 5	2271	1704	2128	2218	2487	1500	0	3057	0	0
Buffer 4	2244	2006	2295	2185	2441	0	0	2093	0	0
Buffer 3	2270	0	2515	2150	2387	0	0	1963	1631	0
Buffer 2	0	0	1874	0	1832	0	0	1287	1080	0
Buffer 1	0	0	0	0	932	0	0	637	538	0
Ferrovia	arco 1	arco 2	arco 3	arco 4	arco 5	arco 6	arco 7	arco 8	arco 9	arco 10
Buffer 1	0	0	0	0	968	0	0	632	536	0
Buffer 2	1862	0	0	0	1962	0	0	1721	1730	0
Buffer 3	2172	0	0	0	2872	3000	2901	2954	2372	0
Buffer 4	1894	0	0	0	2789	3000	2625	2795	2221	0
Buffer 5	1931	0	2575	2826	2704	3000	2453	2797	2210	0
Buffer 6	2368	1377	2076	2849	0	3000	2680	2856	2171	1413
Lato destro										

Figura 138 - Esempio numerico di $EUS_{i,b\ sx,s}$ e $EUS_{i,b\ dx,s}$.

In Figura 139 è illustrato un esempio numerico utile per il calcolo di $IUS_{1,3\text{ sx},s}$ (cella rossa) e $IUS_{1,2\text{ dx},s}$ (cella blu) come segue:

$$IUS_{1,3\text{ sx},s} = 2270 + 1731 + 1004 = 5005$$

Analogamente viene calcolato e riportato il valore di $IUS_{1,2\text{ dx},s}$:

$$IUS_{1,2\text{ dx},s} = 1862 + 993 = 2855$$

Lato sinistro										
Buffer 6										
Buffer 5										
Buffer 4										
Buffer 3	2270									
Buffer 2	1731									
Buffer 1	1004									
Ferrovia	arco 1	arco 2	arco 3	arco 4	arco 5	arco 6	arco 7	arco 8	arco 9	arco 10
Buffer 1	993									
Buffer 2	1862									
Buffer 3										
Buffer 4										
Buffer 5										
Buffer 6										
Lato destro										

Figura 139 - Esempio numerico di calcolo di $IUS_{1,3\text{ sx},s}$ e $IUS_{1,2\text{ dx},s}$

Con riferimento all'esempio numerico precedente in Figura 140 sono riportati i valori di $IUS_{i,b,\text{sx},s}$ e $IUS_{i,b,\text{dx},s}$ per ogni arco i e buffer b .

Lato sinistro										
Buffer 6	11840	11674	11976	11641	12612	7500	0	12175	8278	11840
Buffer 5	9520	9778	9812	9390	10080	6000	0	9037	0	9520
Buffer 4	7249	8074	7685	7171	7593	0	0	5980	0	7249
Buffer 3	5005	0	5390	4987	5152	0	0	3887	3249	5005
Buffer 2	0	0	2875	0	2764	0	0	1924	1618	0
Buffer 1	0	0	0	0	932	0	0	637	538	0
Ferrovia	arco 1	arco 2	arco 3	arco 4	arco 5	arco 6	arco 7	arco 8	arco 9	arco 10
Buffer 1	0	0	0	0	968	0	0	632	536	0
Buffer 2	2855	0	0	0	2930	0	0	2353	2266	0
Buffer 3	5027	0	0	0	5802	5658	5169	5307	4637	0
Buffer 4	6922	0	0	0	8591	8658	7793	8101	6858	0
Buffer 5	8852	0	11176	11610	11295	11658	10246	10898	9068	0
Buffer 6	11220	9585	13252	14459	0	14658	12926	13754	11239	8188
Lato destro										

Figura 140 - Rappresentazione dei valori di $IUS_{i,b,sx,s}$ e $IUS_{i,b,dx,s}$.

In Figura 141 sono rappresentate le coppie di valori $IUS_{1,b,sx} - IUS_{1,b,dx}$ (celle rosse) e $IUS_{i,1,sx} - IUS_{i,1,dx}$ (celle blu) posti in posizione simmetrica rispetto alla ferrovia.

Lato sinistro										
Buffer 6	11840	11674	11976	11641	12612	7500	0	12175	8278	11840
Buffer 5	9520	9778	9812	9390	10080	6000	0	9037	0	9520
Buffer 4	7249	8074	7685	7171	7593	0	0	5980	0	7249
Buffer 3	5005	0	5390	4987	5152	0	0	3887	3249	5005
Buffer 2	0	0	2875	0	2764	0	0	1924	1618	0
Buffer 1	0	0	0	0	932	0	0	637	538	0
Ferrovia	arco 1	arco 2	arco 3	arco 4	arco 5	arco 6	arco 7	arco 8	arco 9	arco 10
Buffer 1	0	0	0	0	968	0	0	632	536	0
Buffer 2	2855	0	0	0	2930	0	0	2353	2266	0
Buffer 3	5027	0	0	0	5802	5658	5169	5307	4637	0
Buffer 4	6922	0	0	0	8591	8658	7793	8101	6858	0
Buffer 5	8852	0	11176	11610	11295	11658	10246	10898	9068	0
Buffer 6	11220	9585	13252	14459	0	14658	12926	13754	11239	8188
Lato destro										

Figura 141 - Rappresentazione numerica delle coppie di valori $IUS_{1,b,sx} - IUS_{1,b,dx}$ e $IUS_{i,1,sx} - IUS_{i,1,dx}$.

In Figura 142 sono raffigurati i valori di $IUS_{i,(b,sx+b,dx),s}$ come somma delle celle equidistanti dalla ferrovia: in particolare si nota nella cella rossa il valore $IUS_{1,3}$ e nella cella blu il valore $IUS_{5,1}$ determinati come segue:

$$IUS_{1,3} = 5005 + 5027 = 10032$$

$$IUS_{5,1} = 932 + 968 = 1900$$

Buffer 6	23059	21259	25227	26100	12612	22158	12926	25928	19516	16061
Buffer 5	18372	9778	20988	21000	21375	17658	10246	19935	9068	0
Buffer 4	14171	8074	7685	7171	16184	8658	7793	14081	6858	0
Buffer 3	10032	0	5390	4987	10954	5658	5169	9193	7886	0
Buffer 2	2855	0	2875	0	5694	0	0	4277	3884	0
Buffer 1	0	0	0	0	1900	0	0	1269	1074	0
Ferrovia	arco 1	arco 2	arco 3	arco 4	arco 5	arco 6	arco 7	arco 8	arco 9	arco 10

Figura 142 - Rappresentazione numerica di $IUS_{i,(b\ sx+b\ dx),s}$.

A ogni arco *i-esimo* è quindi possibile associare un valore di $IUS_{i,(b\ sx+b\ dx),s}$ relativo alla classe di uso del suolo per ogni coppia di celle equidistanti dalla ferrovia (buffer sinistro + buffer destro).

Se si considera l'esempio numerico di Figura 142, si osserva che a ciascuno dei 6 buffer è associato un intervallo di valori ammissibili come riportato nell'esempio di Figura 143.

Buffer 6	2; 1; 0									
Buffer 5	3; 2; 0									
Buffer 4	4; 3; 0									
Buffer 3	5; 4; 0									
Buffer 2	6; 5; 0									
Buffer 1	6; 0									
Ferrovia	arco 1	arco 2	arco 3	arco 4	arco 5	arco 6	arco 7	arco 8	arco 9	arco 10

Figura 143 - Esempio numerico di intervalli di variabilità di $IFUS_{i,(b\ sx+b\ dx),s}$.

Nell'esempio di Figura 143 si nota che:

- se nel buffer 1 il valore di uso del suolo è maggiore di 0 e sono presenti strade $IFUS_{i,1}$ assume valore 6, altrimenti 0;
- il valore di $IFUS_{i,2}$ del buffer 2 può essere 6 o 5 in funzione del valore di uso del suolo. In caso di assenza di strade o superficie con accessibilità nulla è pari a 0;
- il valore di $IFUS_{i,3}$ del buffer 3 può essere 5 o 4 in funzione del valore di uso del suolo. In caso di assenza di strade o superficie con accessibilità nulla è pari a 0;
- il valore di $IFUS_{i,4}$ del buffer 4 può essere 4 o 3 in funzione del valore di uso del suolo. In caso di assenza di strade o superficie con accessibilità nulla è pari a 0;

- il valore di $IFUS_{i,5}$ del buffer 5 può essere 3 o 2 in funzione del valore di uso del suolo. In caso di assenza di strade o superficie con accessibilità nulla è pari a 0;
- il valore di $IFUS_{i,6}$ del buffer 6 può essere 2 o 1 in funzione del valore di uso del suolo. In caso di assenza di strade o superficie con accessibilità nulla è pari a 0.

Considerando l'esempio numerico precedente di Figura 142 sono riportati in Figura 144 i valori di $UMIN0$ (in rosso), $UMAX$ (in verde) e UM (in arancione) relativi a ciascuno dei 5 buffer. Nel buffer 1 infatti non è necessario definire un andamento *a gradino* della funzione di utilità.

Buffer 6	12612; 25928; 19356									
Buffer 5	9068; 21375; 15221									
Buffer 4	6858; 16184; 11521									
Buffer 3	4987; 10954; 7979									
Buffer 2	2855; 5694; 4275									
Buffer1	-									
Ferrovia	arco 1	arco 2	arco 3	arco 4	arco 5	arco 6	arco 7	arco 8	arco 9	arco 10

Figura 144 - Esempio di calcolo di $UMIN0$, $UMAX$ e UM .

Facendo riferimento a Figura 144 sono riportati in Tabella 9 i valori di $UMAX$, $UMIN0$ e UM per ciascuno dei 5 buffer.

	UMAX	UMIN0	UM
Buffer1	-	-	-
Buffer 2	5694	2855	4275
Buffer 3	10954	4987	7979
Buffer 4	16184	6858	11521
Buffer 5	21375	9068	15221
Buffer 6	25928	12612	19356

Tabella 9 - Esempio di calcolo di UM .

Di seguito sono riportate, per ognuno dei 6 buffer, le funzioni di utilità e i rispettivi andamenti:

$$IFUS_{i,1} = \begin{cases} 6, & IUS_{i,1} > 0 \\ 0, & IUS_{i,1} = 0 \end{cases}$$

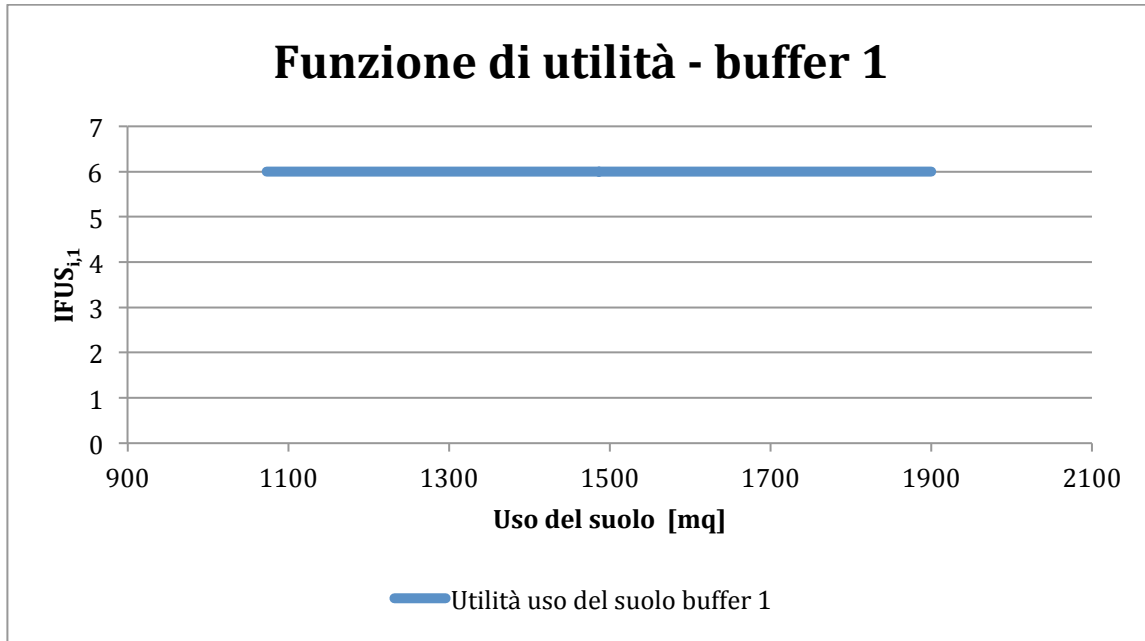


Figura 145 – Andamento funzione di utilità – buffer 1.

$$IFUS_{i,2} = \begin{cases} 6, & 4275 \leq IUS_{i,2} \leq 5694 \\ 5, & 2855 \leq IUS_{i,2} < 4275 \\ 0, & IUS_{i,2} = 0 \end{cases}$$

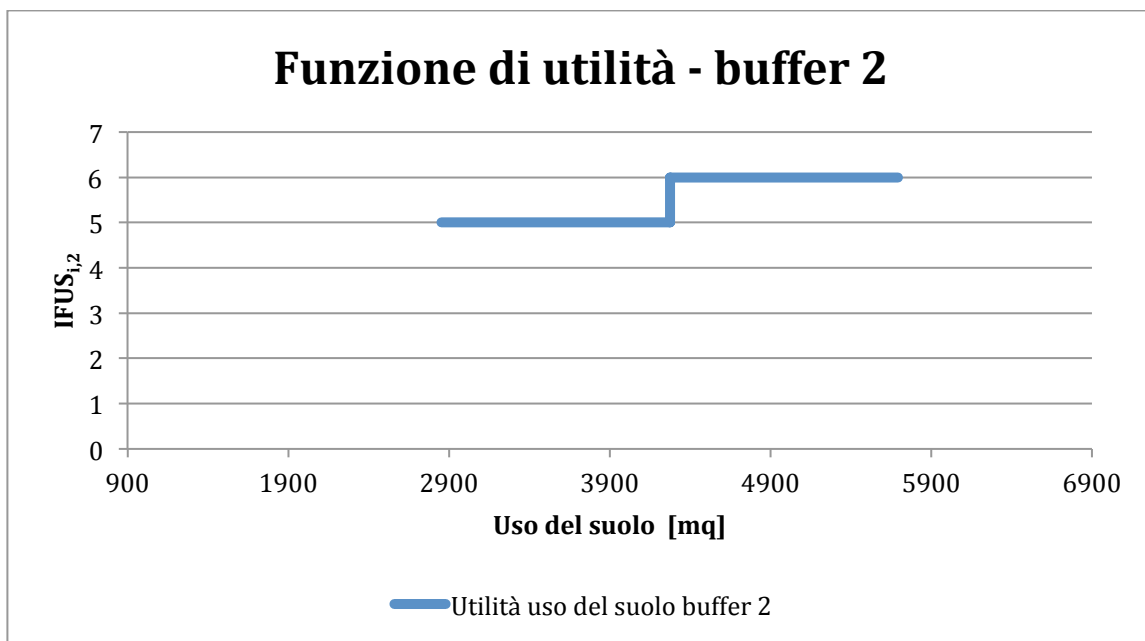


Figura 146 – Andamento funzione di utilità - buffer 2.

$$IFUS_{i,3} = \begin{cases} 5, & 7979 \leq IUS_{i,3} \leq 10954 \\ 4, & 4987 \leq IUS_{i,3} < 7979 \\ 0, & IUS_{i,3} = 0 \end{cases}$$

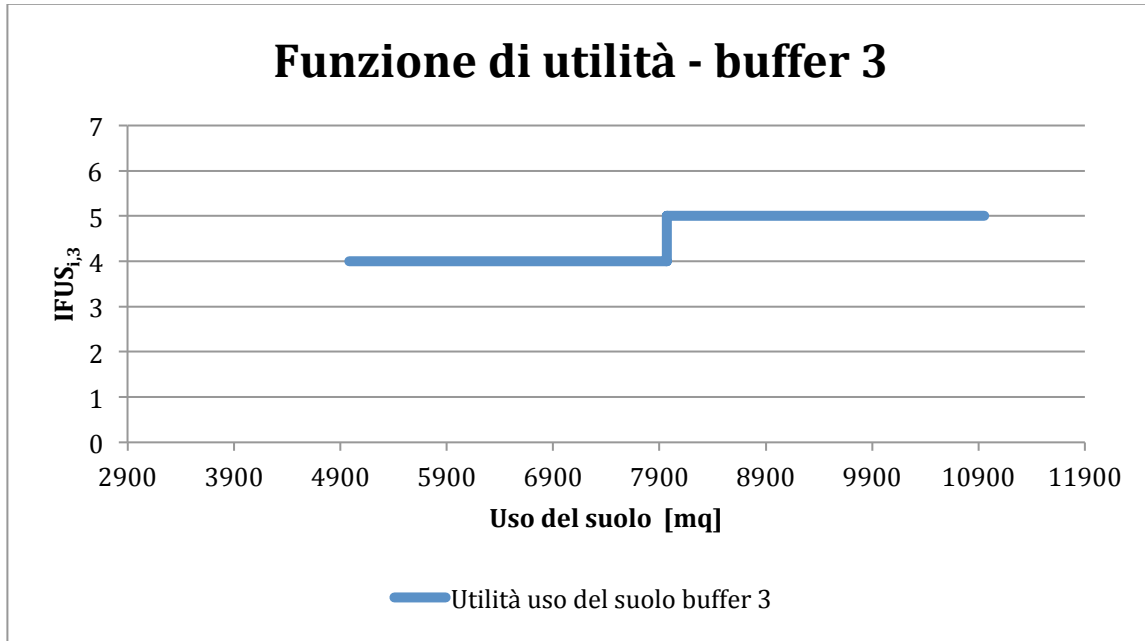


Figura 147 - Andamento funzione di utilità - buffer 3.

$$IFUS_{i,4} = \begin{cases} 4, & 11521 \leq IUS_{i,4} \leq 16184 \\ 3, & 6858 \leq IUS_{i,4} < 11521 \\ 0, & IUS_{i,4} = 0 \end{cases}$$

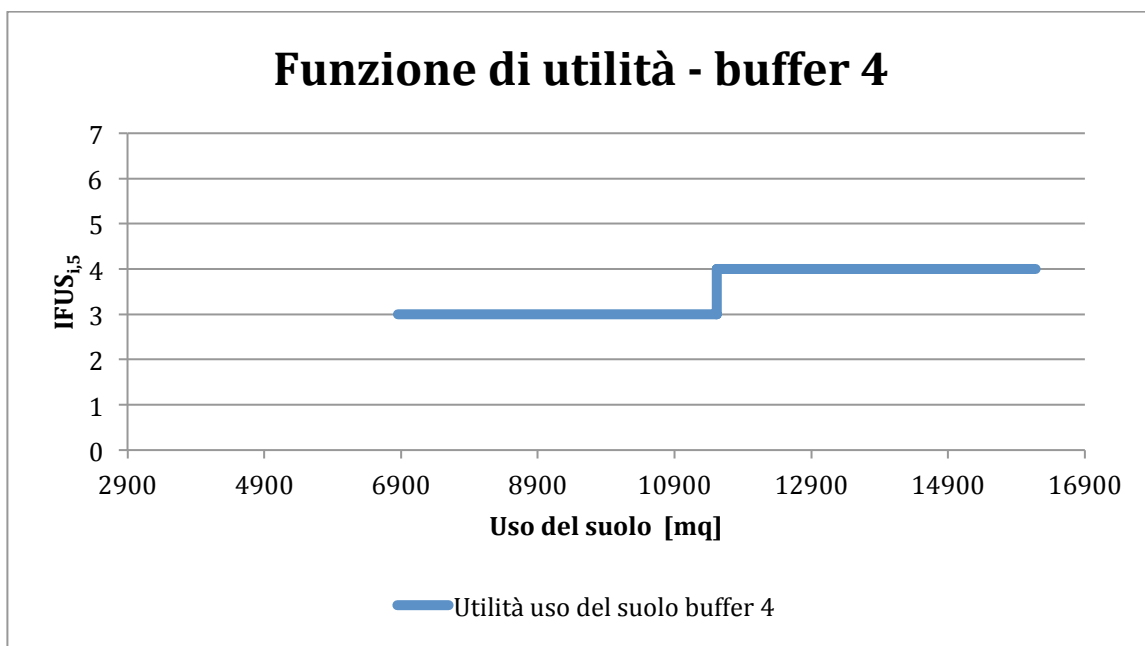


Figura 148 - Andamento funzione di utilità - buffer 4.

$$IFUS_{i,5} = \begin{cases} 3, & 15221 \leq IUS_{i,5} \leq 21375 \\ 2, & 9068 \leq IUS_{i,5} < 15221 \\ 0, & IUS_{i,5} = 0 \end{cases}$$

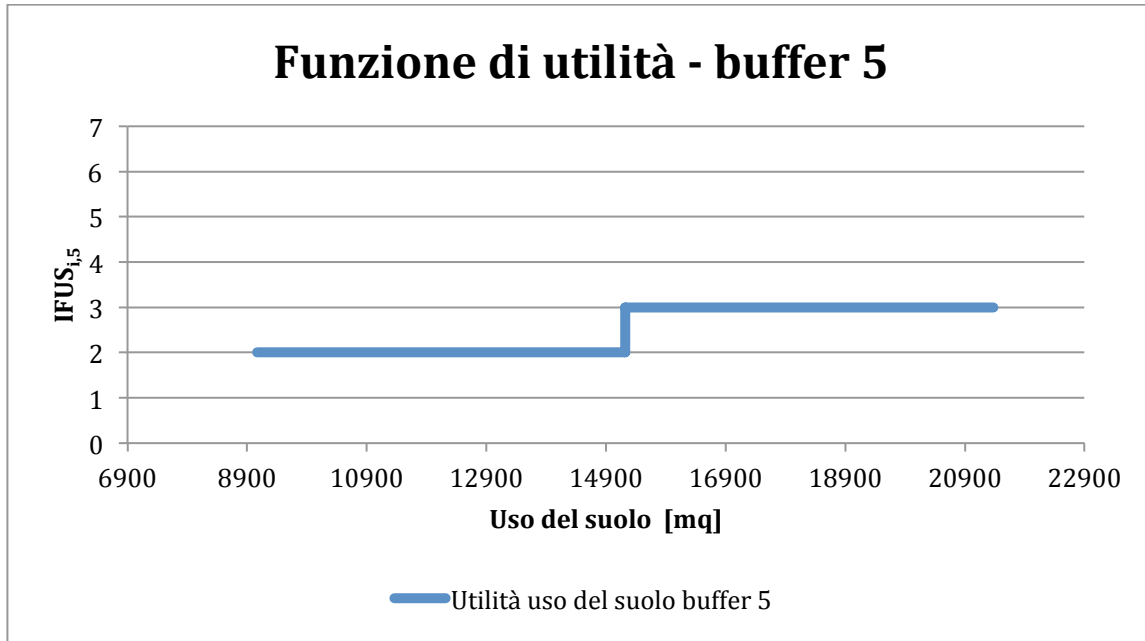


Figura 149 - Andamento funzione di utilità - buffer 5.

$$IFUS_{i,6} = \begin{cases} 2, & 19356 \leq IUS_{i,6} \leq 25928 \\ 1, & 12612 \leq IUS_{i,6} < 19356 \\ 0, & IUS_{i,6} = 0 \end{cases}$$

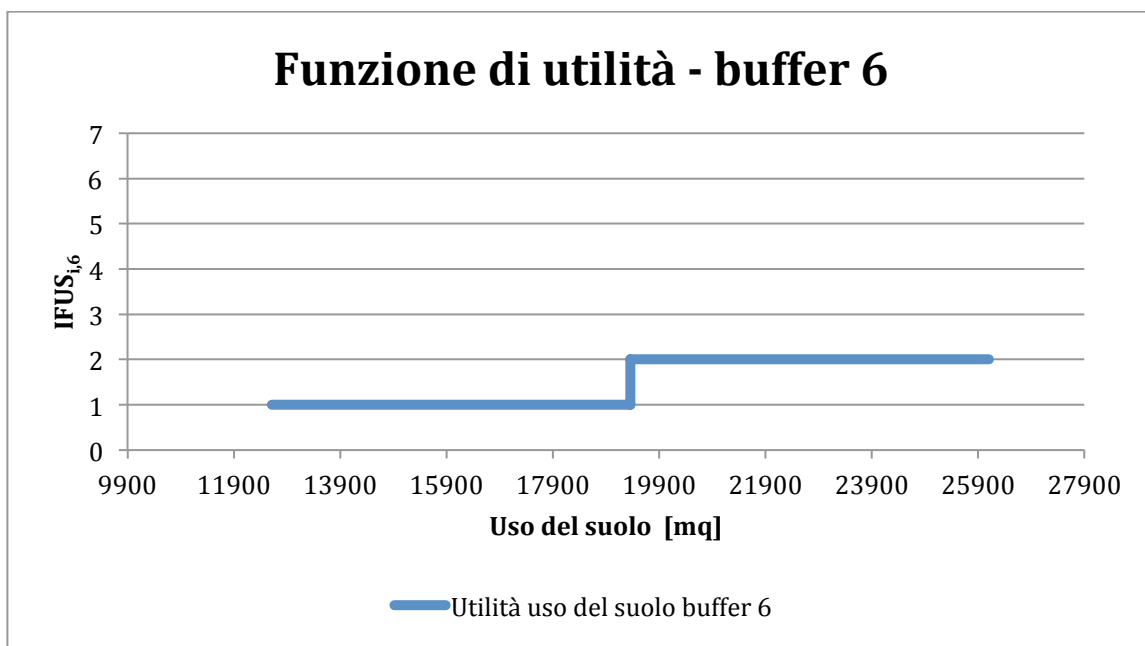


Figura 150 - Andamento funzione di utilità - buffer 6.

Nella parte superiore di Figura 151 sono riportati per ciascuno dei 6 archi i valori di $IFUS_{i,b}$ e nella parte inferiore i valori dell'indicatore IUS_i .

Buffer 6	2	2	2	2	1	2	1	2	2	1
Buffer 5	3	2	3	3	3	3	2	3	2	0
Buffer 4	4	3	3	3	4	3	3	4	3	0
Buffer 3	5	0	4	4	5	4	4	5	5	0
Buffer 2	5	0	5	0	6	0	0	6	6	0
Buffer 1	0	0	0	0	6	0	0	6	6	0
Ferrovia	arco 1	arco 2	arco 3	arco 4	arco 5	arco 6	arco 7	arco 8	arco 9	arco 10
Indicatore IUS_i					6			6	6	
	5		5							
				4		4	4			
		3								
										1

Figura 151 – Esempio di calcolo di $IFUS_{i,b}$ (in alto) e IUS_i (in basso).

Nell'esempio numerico precedente, in cui sono presenti 6 buffer, si avranno per ogni arco i 6 valori di $IFUS_{i,b}$, ($IFUS_{i,1}$; $IFUS_{i,2}$; $IFUS_{i,3}$; $IFUS_{i,4}$; $IFUS_{i,5}$; $IFUS_{i,6}$).

L'indicatore IUS_i risulta quindi pari a:

$$IUS_i = \text{MAX}[IFUS_{i,1}; IFUS_{i,2}; IFUS_{i,3}; IFUS_{i,4}; IFUS_{i,5}; IFUS_{i,6}]$$

In Tabella 10 sono riportati i valori di sintesi dell'indicatore IUS_i .

Arco	$IFUS_{i,1}$	$IFUS_{i,2}$	$IFUS_{i,3}$	$IFUS_{i,4}$	$IFUS_{i,5}$	$IFUS_{i,6}$	IUS_i
1	0	5	5	4	3	2	5
2	0	0	0	3	2	2	3
3	0	5	4	3	3	2	5
4	0	0	4	3	3	2	4
5	6	6	5	4	3	1	6
6	0	0	4	3	3	2	4
7	0	0	4	3	2	1	4
8	6	6	5	4	3	2	6
9	6	6	5	3	2	2	6
10	0	0	0	0	0	1	1

Tabella 10 – Valori di sintesi dell'indicatore IUS_i .

3.3.3.6 IARR_i - TEMPO DI ARRIVO DEI VIGILI DEL FUOCO

L'indicatore IARR_i prevede il calcolo del tempo di arrivo dei Vigili del Fuoco sul punto in cui si è verificato l'evento incidentale utilizzando la rete stradale.

Il sotto modello di calcolo prevede la definizione dei seguenti parametri:

- O_p = punto di partenza – origine dei VVF. Tale punto coincide con la presenza di un presidio/distaccamento sul territorio e può essere presente sia all'interno dell'area di studio - buffer - sia all'esterno;
- $D_{i,b\ sx}$ e $D_{i,b\ dx}$ = punto di arrivo dei soccorsi nei pressi dell'evento incidentale appartenente a una specifica cella. Per ogni arco i e per ogni buffer b è possibile determinare un punto di arrivo se all'interno della cella è presente la rete stradale.

In Figura 152 si riporta un esempio in cui sono rappresentati due presidi O_p e O_{p+1} dei VVF (celle rosse), esterni all'area di studio e i punti di arrivo in ciascuna cella $D_{i,b\ sx}$ e $D_{i,b\ dx}$.

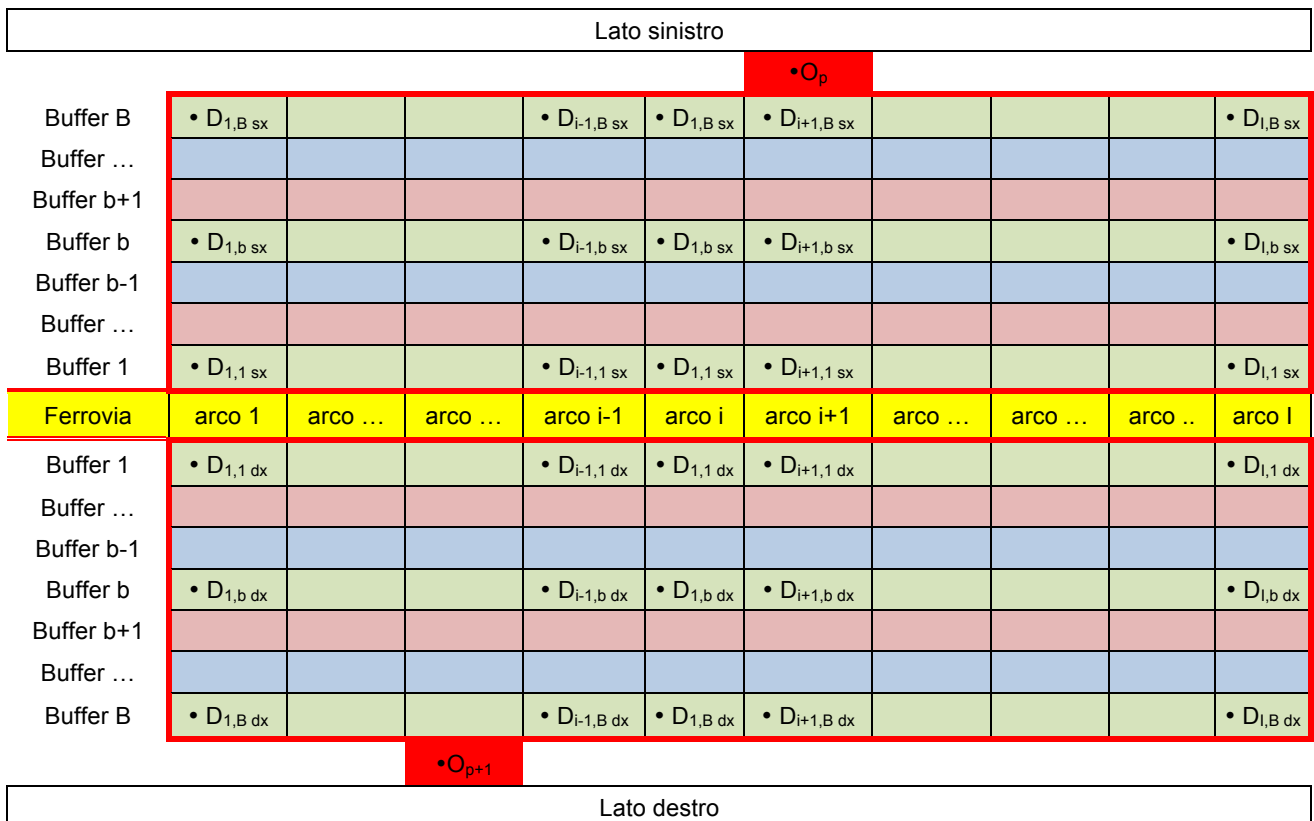


Figura 152 – Rappresentazione dei punti di partenza O_p e arrivo $D_{i,b\ sx}$ e $D_{i,b\ dx}$ dei soccorsi.

È evidente che ciascun presidio può raggiungere più punti/destinazioni sul territorio definendo quindi una matrice origine - destinazione⁴⁹. Se si considera la parte superiore di Figura 152 ipotizzando che il presidio O_p abbia come bacino di utenza i buffer a sinistra della ferrovia (parte superiore nel riquadro rosso) per il generico buffer b si ha la matrice origine destinazione di Tabella 11 in cui è riportato il tempo di percorrenza di ciascun percorso $O_p - D_{i,b\ sx}$.

Nelle colonne sono indicate le celle di destinazione mentre nelle righe le celle di origine.

Matrice Origine destinazione – Buffer b sx										
O/D	• $D_{1,b\ sx}$			• $D_{i-1,b\ sx}$	• $D_{1,b\ sx}$	• $D_{i+1,b\ sx}$				• $D_{l,b\ sx}$
O_p	$T_{1,b\ sx}$			$T_{i-1,b\ sx}$	$T_{i,b\ sx}$	$T_{i+1,b\ sx}$				$T_{l,b\ sx}$

Tabella 11 – Esempio di matrice origine – destinazione con tempi di percorrenza buffer 1 sx.

Il tempo di percorrenza di ciascun percorso, che unisce la generica coppia $O-D$ (Origine Destinazione), viene calcolato mediante l'algoritmo di Dijkstra ampiamente utilizzato per determinare i cammini minimi di un grafo stradale considerando l'itinerario caratterizzato dal minimo tempo di percorrenza.

Nel caso in cui in una cella non sia presente rete stradale il valore di $T_{i,b}$ è pari a 0 in quanto non risulta possibile raggiungere la cella stessa.

In Figura 153 sono riportati i parametri relativi ai tempi di arrivo $T_{i,b\ sx}$ e $T_{i,b\ dx}$ per il buffer 1, b e B .

⁴⁹ La rappresentazione della *domanda di trasporto* avviene con la formulazione di matrici Origine/Destinazione o matrici OD , le quali altro non sono che tabelle aventi tante righe e tante colonne quante sono le zone OD dell'area alla quale si riferiscono. Ogni cella della matrice rappresenta una coppia OD identificata da una zona o di origine, corrispondente alla riga dell'elemento, e da una zona d di destinazione, corrispondente alla colonna dell'elemento, ed esprime il tempo di percorrenza dell'itinerario che collega o e d .

Lato sinistro										
						•O _p				
Buffer B	T _{1,B sx}			T _{i-1,B sx}	T _{1,B sx}	T _{i+1,B sx}				T _{l,B sx}
Buffer ...										
Buffer b+1										
Buffer b	T _{1,b sx}			T _{i-1,b sx}	T _{1,b sx}	T _{i+1,b sx}				T _{l,b sx}
Buffer b-1										
Buffer ...										
Buffer 1	T _{1,1 sx}			T _{i-1,1 sx}	T _{1,1 sx}	T _{i+1,1 sx}				T _{l,1 sx}
Ferrovia	arco 1	arco ...	arco ...	arco i-1	arco i	arco i+1	arco ...	arco ...	arco ..	arco l
Buffer 1	T _{1,1 dx}			T _{i-1,1 dx}	T _{1,1 dx}	T _{i+1,1 dx}				T _{l,1 dx}
Buffer ...										
Buffer b-1										
Buffer b	T _{1,b dx}			T _{i-1,b dx}	T _{1,b dx}	T _{i+1,b dx}				T _{l,b dx}
Buffer b+1										
Buffer ...										
Buffer B	T _{1,b dx}			T _{i-1,b dx}	T _{1,b dx}	T _{i+1,b dx}				T _{l,b dx}
						•O _{p+1}				
Lato destro										

Figura 153 – Rappresentazione dei tempi di arrivo del buffer 1, b e B.

Il passo successivo consiste nel valutare per ogni arco i il tempo minimo di arrivo tra le coppie di celle poste a destra e sinistra della ferrovia appartenenti al medesimo buffer come segue:

$$T_{i,b\ sx/dx} = \min[T_{i,b\ sx}; T_{i,b\ dx}]$$

In Figura 154 sono riportate, a titolo esemplificativo, 3 coppie dei tempi di arrivo relativi all'arco 1 per il buffer 1, b e B. Le celle verdi rappresentano il tempo minimo di arrivo che in alcuni casi è associato a una cella situata a sinistra della ferrovia e in altri a destra. Per il buffer 1 il tempo di arrivo minore è a sinistra mentre per i buffer b e B a destra della ferrovia.

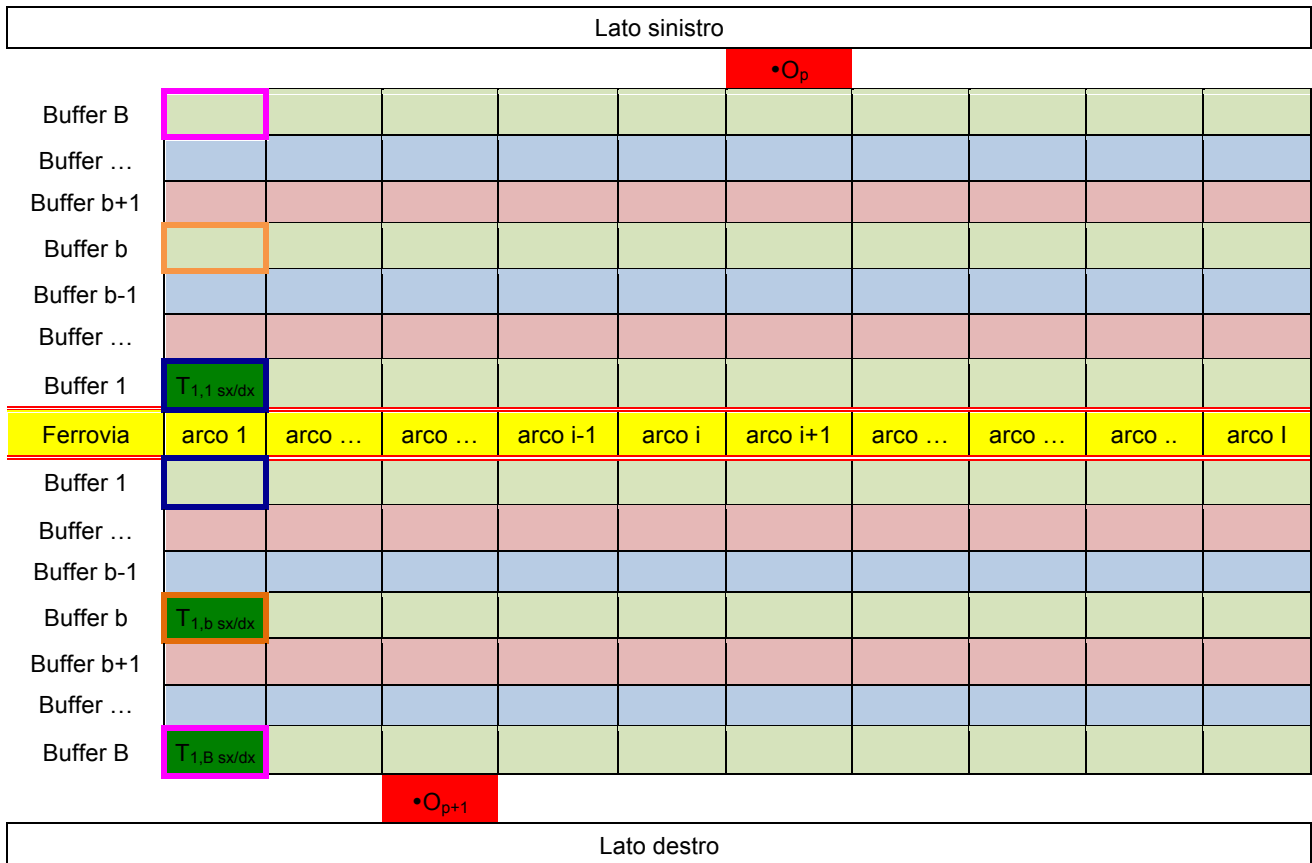


Figura 154 – Rappresentazione dei tempi di arrivo minimi dei buffer 1, b e B relativi all'arco 1.

Dopo aver valutato per ciascun buffer il tempo minimo di arrivo è necessario considerare la distanza di un buffer dall'arco ferroviario. Infatti per ogni arco i a parità di tempo di arrivo, la cella più vicino alla ferrovia fornirà un maggior contributo in termini di accessibilità permettendo così l'avvicinamento dei Servizi di Pronto Intervento.

La funzione di utilità, definita per ogni buffer b , consente di determinare per ciascun arco i un valore di $IARR_{i,b \text{ sx/dx}}$ – Indicatore del tempo di arrivo – a partire dal valore del tempo di arrivo e dalla distanza dall'arco ferroviario come segue:

$$IARR_{i,b \text{ sx/dx}} = f(T_{i,b \text{ sx/dx}})$$

In sostanza si tratta di definire degli intervalli di valori che $T_{i,b \text{ sx/dx}}$ può assumere in funzione di:

- tempo di arrivo dei Vigili del Fuoco;
- distanza dalla ferrovia.

È evidente che se il tempo di arrivo di una cella è nullo (non sono presenti strade), $IARR_{i,b \text{ sx/dx}}$ avrà valore nullo indipendentemente dal buffer di appartenenza.

Il numero degli intervalli è quindi pari al numero di buffer B e la variabilità di $IARR_{i,b \text{ sx/dx}}$ dipende dal buffer in cui si sta effettuando l'analisi. In ogni buffer, tranne quello più

vicino alla ferrovia, $IARR$ può assumere un valore massimo, minimo o nullo come riportato in Figura 155.

Buffer B	$B-B+2; B-B+1; 0$									
Buffer									
Buffer b+1	$B-(b+1)+2; B-(b+1)+1; 0$									
Buffer b	$B-b+2; B-(b+1)+1; 0$									
Buffer b-1	$B-(b-1)+2; B-(b-1)+1; 0$									
Buffer									
Buffer 1	$B; 0$									
Ferrovia	arco 1	arco ...	arco ...	arco i-1	arco i	arco i+1	arco ...	arco ...	arco ..	arco I

Figura 155 - Intervalli di variabilità di $IARR_{i,b \text{ sx/dx}}$.

Si tratta di definire per ogni buffer delle funzioni a gradino definite per valori di $T_{i,b \text{ sx/dx}}$ maggiori di 0 ad eccezione del buffer 1 dove la funzione è una costante.

Il discriminante che permette di associare a $IARR_{i,b \text{ sx/dx}}$ il valore di utilità massimo o minimo della funzione è dato da $TM_{b \text{ sx/dx}}$ calcolato come segue:

$$TM_{b \text{ sx/dx}} = \text{media}[TMAX_{b \text{ sx/dx}}; TMINO_{b \text{ sx/dx}}]$$

dove:

- $TMAX_{b \text{ sx/dx}}$ rappresenta il valore massimo di $T_{b \text{ sx/dx}}$ in ciascun buffer b ;
- $TMINO_{b \text{ sx/dx}}$ rappresenta il valore minimo > 0 di $T_{b \text{ sx/dx}}$ in ciascun buffer b .

In pratica per ciascun buffer si considera il valore massimo di $T_{i,b \text{ sx/dx}}$ ($TMAX_{b \text{ sx/dx}}$) riferito a ogni arco i e il valore minimo maggiore di 0 ($TMINO_{b \text{ sx/dx}}$): la media tra questi due valori rappresenta il punto di discontinuità della funzione di utilità.

In Figura 156 sono riportati i parametri $TMINO$ (in rosso), $TMAX$ (in verde) e TM (in arancione) per ciascun buffer b tranne per il buffer 1, più vicino alla ferrovia, dove non è necessario definire una funzione a gradino.

Buffer B	$TMINO_{B \text{ sx/dx}}; TMAX_{B \text{ sx/dx}}; TM_{B \text{ sx/dx}}$									
Buffer ...	$TMINO_{...}; TMAX_{...}; TM_{...}$									
Buffer b+1	$TMINO_{b+1 \text{ sx/dx}}; TMAX_{b+1 \text{ sx/dx}}; TM_{b+1 \text{ sx/dx}}$									
Buffer b	$TMINO_{b \text{ sx/dx}}; TMAX_{b \text{ sx/dx}}; TM_{b \text{ sx/dx}}$									
Buffer b-1	$TMINO_{b-1 \text{ sx/dx}}; TMAX_{b-1 \text{ sx/dx}}; TM_{b-1 \text{ sx/dx}}$									
Buffer ...	$TMINO_{...}; TMAX_{...}; TM_{...}$									
Buffer 1	-									
Ferrovia	arco 1	arco ...	arco ...	arco i-1	arco i	arco i+1	arco ...	arco ...	arco ..	arco I

Figura 156 – Rappresentazione di $TMINO$, $TMAX$ e TM .

Con riferimento alla Figura 155 e Figura 156, sono riportate a titolo esemplificativo le formulazioni analitiche delle funzioni di utilità del buffer 1 e buffer b :

$$IARR_{i,1} = \begin{cases} B & \text{se } T_{i,1 \text{ sx/dx}} > 0 \\ 0 & \text{se } T_{i,1 \text{ sx/dx}} = 0 \end{cases}$$

$$IARR_{i,b} = \begin{cases} B - b + 2 & \text{se } TMIN_{b \text{ sx/dx}} \leq T_{i,b \text{ sx/dx}} \leq TM_{b \text{ sx/dx}} \\ B - b + 1 & \text{se } TM_{b \text{ sx/dx}} < T_{i,b \text{ sx/dx}} \leq TMAX_{b \text{ sx/dx}} \\ 0 & \text{se } T_{i,b \text{ sx/dx}} = 0 \end{cases}$$

Il calcolo dell'indicatore $IARR_i$ dell'arco i -esimo consiste nel considerare il massimo valore tra gli $IARR_{i,b}$, precedentemente determinati, come segue:

$$IARR_i = MAX[IARR_{i,1}; IARR_{i,b-1}; IARR_{i,b}; IARR_{i,b+1}; IARR_{i,...}; IARR_{i,B}]$$

Lato sinistro										
Buffer B	IARR _{1,B}			IARR _{i-1,B}	IARR _{i,B}	IARR _{i+1,B}				IARR _{i,B}
Buffer ...	IARR _{1,...}			IARR _{i-1,...}	IARR _{i,...}	IARR _{i+1,...}				IARR _{i,...}
Buffer b+1	IARR _{1,b+1}			IARR _{i-1,b+1}	IARR _{i,b+1}	IARR _{i+1,b+1}				IARR _{i,b+1}
Buffer b	IARR _{1,b}			IARR _{i-1,b}	IARR _{i,b sx}	IARR _{i+1,b}				IARR _{i,b}
Buffer b-1	IARR _{1,b-1}			IARR _{i-1,b-1}	IARR _{i,b-1 sx}	IARR _{i+1,b-1}				IARR _{i,b-1}
Buffer ...	IARR _{1,...}			IARR _{i-1,...}	IARR _{i,...}	IARR _{i+1,...}				IARR _{i,...}
Buffer 1	IARR _{1,1}			IARR _{i-1,1}	IARR _{i,1}	IARR _{i+1,1}				IARR _{i,B sx}
Ferrovia	arco 1	arco ...	arco ...	arco i-1	arco i	arco i+1	arco ...	arco ...	arco ..	arco l
Indicatore IARR _i	MAX IARR _{1,b}	MAX IARR _{...,b}	MAX IARR _{...,b}	MAX IARR _{i-1,b}	MAX IARR _{i,b}	MAX IARR _{i+1,b}	MAX IARR _{...,b}	MAX IARR _{...,b}	MAX IARR _{i,b}	MAX IARR _{i,b}
Lato destro										

Figura 157 - Rappresentazione di $IARR_i$ e $IARR_{i,b}$.

In Figura 158 è illustrato un esempio numerico dove la tratta ferroviaria è costituita da 10 archi aventi la medesima lunghezza e i 6 buffer (area di studio) hanno la medesima estensione. Sono inoltre presenti due presidi dei VVF, uno a sinistra O_1 e l'altro a destra O_2 . A ogni arco i corrispondono una cella sinistra e una cella destra, aventi ciascuna un valore di tempo di arrivo dei VVF $T_{i,b \text{ sx}}$ e $T_{i,b \text{ dx}}$, espresso in minuti, considerando il percorso più veloce (minimo costo).

Lato sinistro										
						•O ₁				
Buffer 6	6,1	0,0	0,0	0,0	7,1	5,7	6,8	0,0	0,0	4,7
Buffer 5	6,1	0,0	0,0	0,0	7,2	5,6	6,9	0,0	0,0	4,8
Buffer 4	4,8	0,0	0,0	7,5	7,4	7,3	7,0	7,2	0,0	4,8
Buffer 3	6,3	0,0	0,0	7,5	0,0	7,4	5,4	5,3	0,0	4,9
Buffer 2	4,8	0,0	0,0	7,7	7,8	7,6	7,7	7,9	0,0	4,2
Buffer 1	4,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0
Ferrovia	arco 1	arco 2	arco 3	arco 4	arco 5	arco 6	arco 7	arco 8	arco 9	arco 10
Buffer 1	4,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Buffer 2	4,7	0,0	0,0	0,0	0,0	5,4	4,9	4,9	0,0	0,0
Buffer 3	5,7	0,0	0,0	0,0	0,0	5,4	4,9	0,0	0,0	4,4
Buffer 4	5,2	0,0	0,0	0,0	0,0	5,3	4,7	0,0	0,0	4,3
Buffer 5	5,2	5,3	0,0	4,8	0,0	0,0	4,6	0,0	0,0	4,2
Buffer 6	5,3	5,3	5,0	4,7	5,0	4,9	4,9	0,0	4,0	4,2
			•O ₂							
Lato destro										

Figura 158 - Esempio numerico di calcolo dei tempi di arrivo $T_{i,b\text{ sx}}$ e $T_{i,b\text{ dx}}$.

In Figura 159, con riferimento ai tempi di intervento di Figura 158 viene illustrato per ogni arco i e buffer b il valore di $T_{i,b\text{ sx/dx}}$, espresso in minuti, come valore minimo tra le coppie di celle equidistanti dalla ferrovia $T_{i,b\text{ sx}}$ e $T_{i,b\text{ dx}}$.

Lato sinistro										
						•O ₁				
Buffer 6		0,0	0,0					0,0		
Buffer 5		0,0	0,0		7,2	5,6		0,0	0,0	
Buffer 4	4,8	0,0	0,0	7,5	7,4			7,2	0,0	
Buffer 3		0,0	0,0	7,5	0,0			5,3	0,0	
Buffer 2			0,0	7,7	7,8				0,0	4,2
Buffer 1					0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0
Ferrovia	arco 1	arco 2	arco 3	arco 4	arco 5	arco 6	arco 7	arco 8	arco 9	arco 10
Buffer 1	4,7			0,0						
Buffer 2	4,7					5,4	4,9	4,9		
Buffer 3	5,7					5,4	4,9			4,4
Buffer 4						5,3	4,7			4,3
Buffer 5	5,2	5,3		4,8			4,6			4,2
Buffer 6	5,3	5,3	5,0	4,7	5,0	4,9	4,9		4,0	4,2
			•O ₂							
Lato destro										

Figura 159 - Esempio numerico di calcolo di $T_{i,b\text{ sx/dx}}$.

In Figura 160 sono riportati in modo sintetico i tempi di arrivo minimi per ogni arco e buffer (coppie di celle).

Buffer 6	5,3	5,3	5,0	4,7	5,0	4,9	4,9	0,0	4,0	4,2
Buffer 5	5,2	5,3	0,0	4,8	7,2	5,6	4,6	0,0	0,0	4,2
Buffer 4	4,8	0,0	0,0	7,5	7,4	5,3	4,7	7,2	0,0	4,3
Buffer 3	5,7	0,0	0,0	7,5	0,0	5,4	4,9	5,3	0,0	4,4
Buffer 2	4,7	0,0	0,0	7,7	7,8	5,4	4,9	4,9	0,0	4,2
Buffer 1	4,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0
Ferrovia	arco 1	arco 2	arco 3	arco 4	arco 5	arco 6	arco 7	arco 8	arco 9	arco 10

Figura 160 - Rappresentazione sintetica di $T_{i,b}$ sx/dx .

Se si considera l'esempio numerico di Figura 160 si osserva che a ciascuno dei 6 buffer è associato un intervallo di valori ammissibili come riportato nell'esempio di Figura 161.

Buffer 6	2; 1; 0									
Buffer 5	3; 2; 0									
Buffer 4	4; 3; 0									
Buffer 3	5; 4; 0									
Buffer 2	6; 5; 0									
Buffer 1	6; 0									
Ferrovia	arco 1	arco 2	arco 3	arco 4	arco 5	arco 6	arco 7	arco 8	arco 9	arco 10

Figura 161 - Esempio numerico di intervalli di variabilità di $IARR_{i,b}$ sx/dx .

Nell'esempio di Figura 161 si nota che:

- se è possibile raggiungere la destinazione nel buffer 1 (indipendentemente dal tempo di arrivo dei soccorsi) $IARR_{i,1}$ assume valore 6, altrimenti 0;
- il valore di $IARR_{i,2}$ del buffer 2 può essere 6 o 5 in funzione del tempo di arrivo. In caso di assenza di strade è pari a 0;
- il valore di $IARR_{i,3}$ del buffer 3 può essere 5 o 4 in funzione del tempo di arrivo. In caso di assenza di strade è pari a 0;
- il valore di $IARR_{i,4}$ del buffer 4 può essere 4 o 3 in funzione del tempo di arrivo. In caso di assenza di strade è pari a 0;
- il valore di $IARR_{i,5}$ del buffer 5 può essere 3 o 2 in funzione del tempo di arrivo. In caso di assenza di strade è pari a 0;
- il valore di $IARR_{i,6}$ del buffer 6 può essere 2 o 1 in funzione del tempo di arrivo. In caso di assenza di strade è pari a 0;

Considerando l'esempio numerico precedente di Figura 160 sono riportati in Figura 162 i valori di $TMAX$ (in verde) e $TMINO$ (in rosso) relativi a ciascuno dei 10 archi e 6 buffer.

Buffer 6	4,0; 5,3; 4,7									
Buffer 5	4,2; 7,2; 5,7									
Buffer 4	4,3; 7,5; 5,9									
Buffer 3	4,4; 7,5; 6,0									
Buffer 2	4,2; 7,8; 6,0									
Buffer1	-									
Ferrovia	arco 1	arco 2	arco 3	arco 4	arco 5	arco 6	arco 7	arco 8	arco 9	arco 10

Figura 162 – Esempio numerico di calcolo di $TMINO$, $TMAX$ e TM .

Facendo riferimento a Figura 162 sono riportati in Tabella 12 i valori di $TMAX$, $TMINO$ e TM per ciascuno dei 5 buffer.

	$TMAX$	$TMINO$	TM
Buffer1	-	-	-
Buffer 2	7,8	4,2	6,0
Buffer 3	7,5	4,4	6,0
Buffer 4	7,5	4,3	5,9
Buffer 5	7,2	4,2	5,7
Buffer 6	5,3	4,0	4,7

Tabella 12 - Esempio di calcolo di TM .

Di seguito sono descritte, per ogni buffer, le funzioni di utilità e i rispettivi andamenti:

$$IARR_{i,1} = \begin{cases} 6, & T_{i,1} > 0 \\ 0, & T_{i,1} = 0 \end{cases}$$

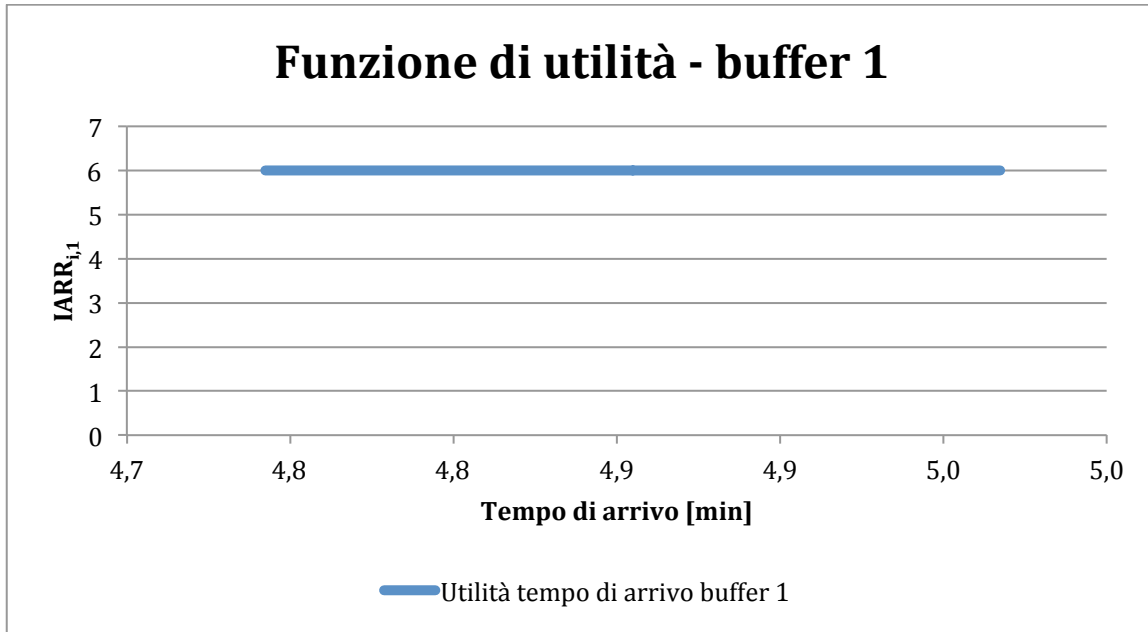


Figura 163 – Andamento funzione di utilità – buffer 1.

$$IARR_{i,2} = \begin{cases} 6, & 4,2 \leq T_{i,2} \leq 6 \\ 5, & 6 < T_{i,2} \leq 7,8 \\ 0, & T_{i,2} = 0 \end{cases}$$

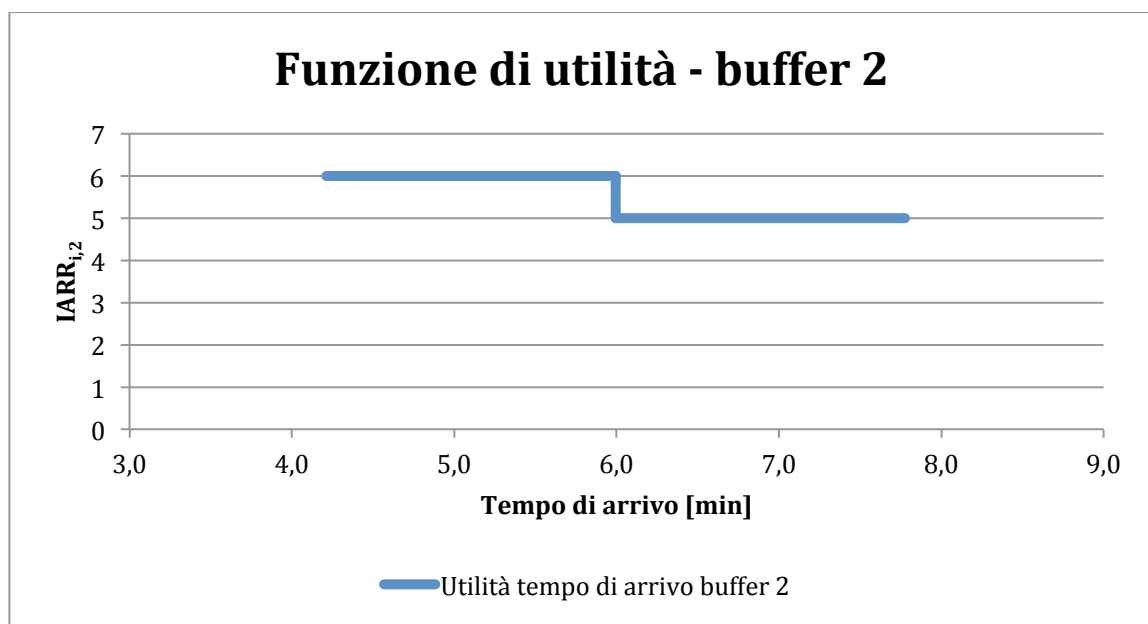


Figura 164 – Andamento funzione di utilità - buffer 2.

$$IARR_{i,3} = \begin{cases} 5, & 4,4 \leq T_{i,3} \leq 6 \\ 4, & 6 < T_{i,3} \leq 7,5 \\ 0, & T_{i,3} = 0 \end{cases}$$

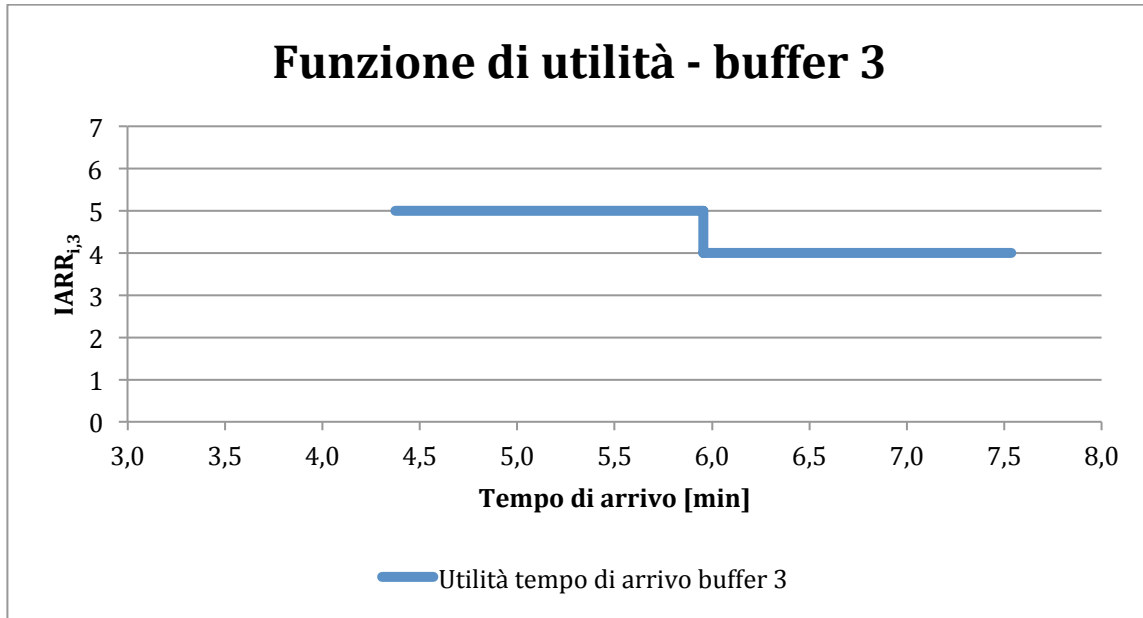


Figura 165 - Andamento funzione di utilità - buffer 3.

$$IARR_{i,4} = \begin{cases} 4, & 4,3 \leq T_{i,4} \leq 5,9 \\ 3, & 5,9 < T_{i,4} \leq 7,5 \\ 0, & T_{i,4} = 0 \end{cases}$$

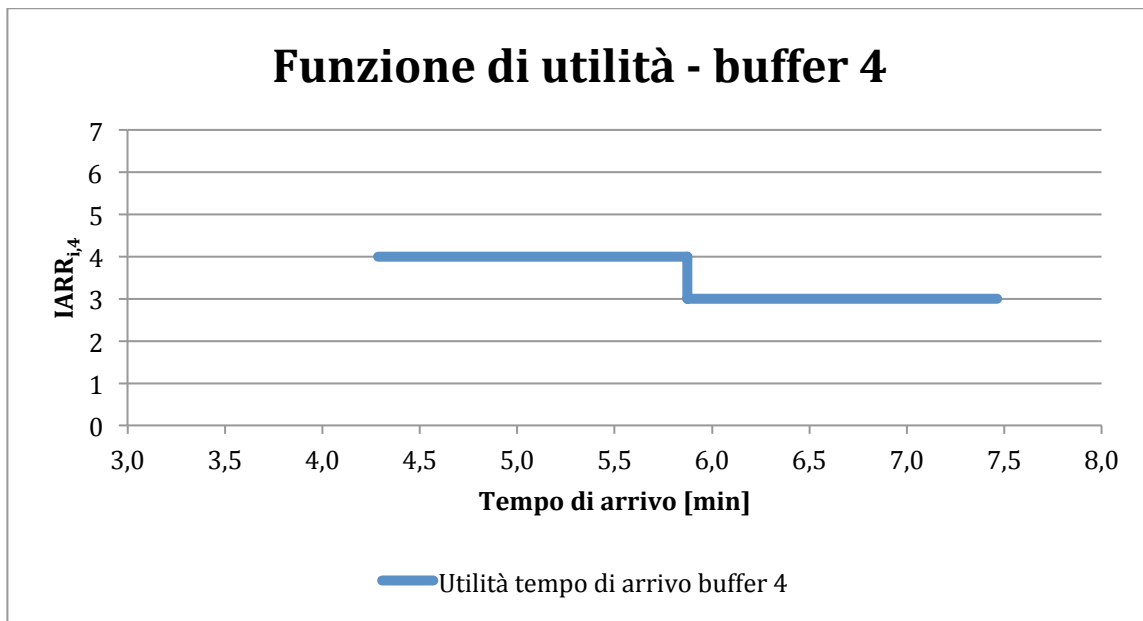


Figura 166 - Andamento funzione di utilità - buffer 4.

$$IARR_{i,5} = \begin{cases} 3, & 4,2 \leq T_{i,5} \leq 5,7 \\ 2, & 5,7 < T_{i,5} \leq 7,2 \\ 0, & T_{i,5} = 0 \end{cases}$$

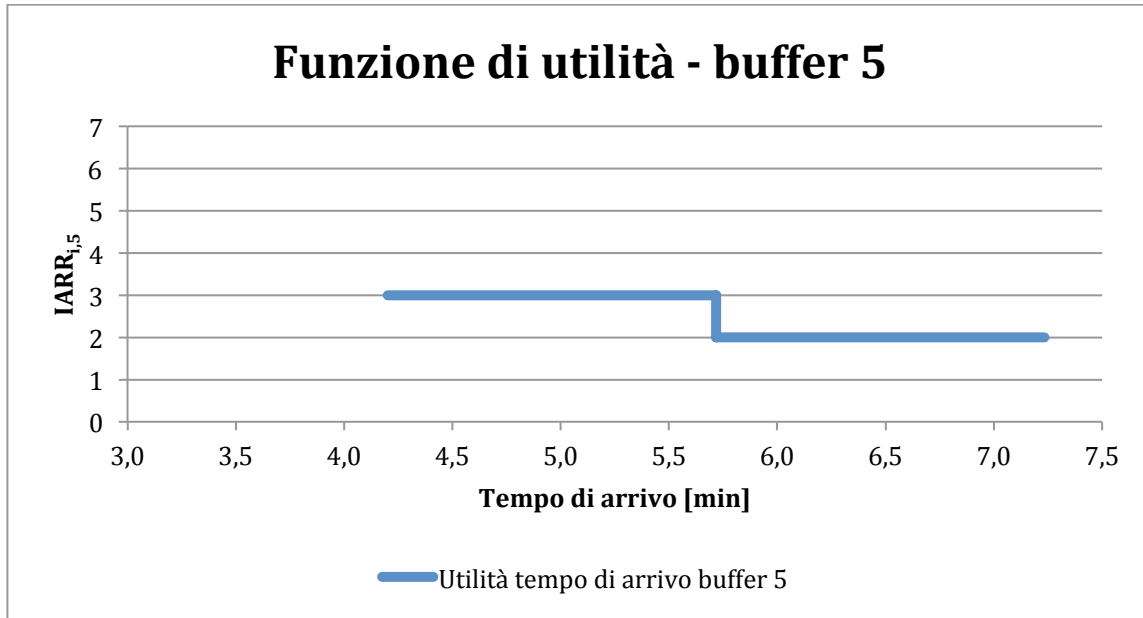


Figura 167 - Andamento funzione di utilità - buffer 5.

$$IARR_{i,6} = \begin{cases} 2, & 4 \leq T_{i,6} \leq 4,7 \\ 1, & 4,7 < T_{i,6} \leq 5,3 \\ 0, & T_{i,6} = 0 \end{cases}$$

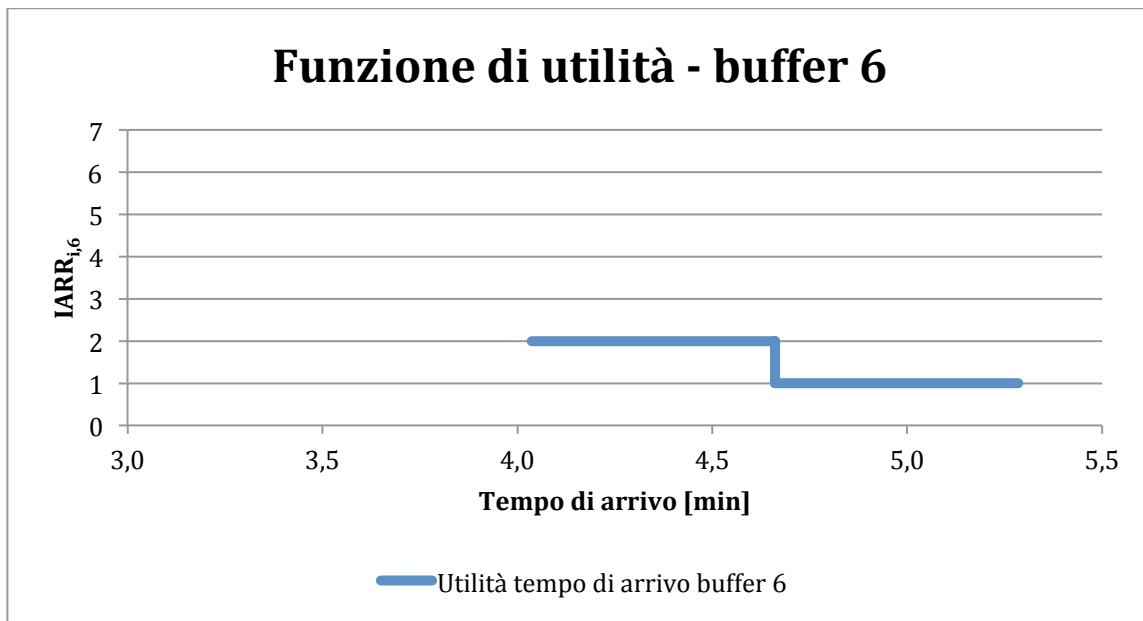


Figura 168 - Andamento funzione di utilità - buffer 6.

Nella parte superiore di Figura 169 sono riportati per ciascun arco i 6 valori $IARR_{i,b}$ e nella parte inferiore i valori dell'indicatore $IARR_i$.

Buffer 6	2	2	2	2	2	2	2	0	2	2
Buffer 5	3	3	0	3	3	3	3	0	0	3
Buffer 4	4	0	0	3	3	3	4	3	0	4
Buffer 3	5	0	0	5	0	5	5	5	0	5
Buffer 2	5	0	0	5	6	5	5	5	0	5
Buffer 1	6	0	0	0	0	0	0	0	0	6
Ferrovia	arco 1	arco 2	arco 3	arco 4	arco 5	arco 6	arco 7	arco 8	arco 9	arco 10
Buffer 1	6									6
Buffer 2				5	6	5	5	5		
Buffer 3										
Buffer 4										
Buffer 5		3								
Buffer 6			2						2	

Figura 169 – Esempio di calcolo di $IARR_{i,b}$ e $IARR_i$.

Nell'esempio numerico precedente, in cui sono presenti 6 buffer, si avranno per ogni arco i 6 valori di $IARR_{i,b}$, ($IARR_{i,1}$; $IARR_{i,2}$; $IARR_{i,3}$; $IARR_{i,4}$; $IARR_{i,5}$; $IARR_{i,6}$). L'indicatore $IARR_i$ risulta quindi pari a:

$$IARR_i = \text{MAX}[IARR_{i,1}; IARR_{i,2}; IARR_{i,3}; IARR_{i,4}; IARR_{i,5}; IARR_{i,6}]$$

In Tabella 13 sono riportati i valori di sintesi dell'indicatore IUS_i .

Arco	$IARR_{i,1}$	$IARR_{i,2}$	$IARR_{i,3}$	$IARR_{i,4}$	$IARR_{i,5}$	$IARR_{i,6}$	$IARR_i$
1	6	5	5	4	3	2	6
2	0	0	0	0	3	2	3
3	0	0	0	0	0	2	2
4	0	5	5	3	3	2	5
5	0	6	0	3	3	2	6
6	0	5	5	3	3	2	5
7	0	5	5	4	3	2	5
8	0	5	5	3	0	0	5
9	0	0	0	0	0	2	2
10	6	5	5	4	3	2	6

Tabella 13 – Valori di sintesi dell'indicatore $IARR_i$.

Secondo quanto riportato in una relazione statistica dal Ministero dell'Interno, i tempi medi d'intervento dei vigili del fuoco sul territorio italiano variano tra i 10 e 12 minuti

(Ministero dell'Interno, 2002). D'altra parte, da anni vi è una proposta di legge da parte del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, che non ha ancora trovato un'attuazione concreta, che prevede la copertura di tutto il territorio italiano entro venti minuti⁵⁰. Questo tempo è stato definito, a fronte di alcuni studi che tengono conto dei costi-benefici di un tale piano d'intervento, come *ragionevole per evitare il peggio*. Indipendentemente dalla reale attuazione sul territorio italiano, si ritiene che questo intervallo sia un ragionevole valore di confronto per il metodo proposto.

⁵⁰ Il progetto, denominato "Soccorso Italia in 20'", nasce nell'anno 2002 allo scopo di dare sviluppo alla componente volontaria del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco. In particolare, ci si è concentrati maggiormente sulla valutazione delle risorse disponibili, umane e non, e la reale situazione del territorio italiano. Obiettivo principale è quello di aumentare il numero di Comuni serviti in tempi massimi ritenuti ragionevoli affinché il servizio di soccorso si possa considerare più efficace. Il tempo fissato è appunto 20 minuti [Nonostante il Disegno di Legge sia stato approvato, ad oggi il Progetto non si può dire portato a termine]. Tratto da: Ministero dell'Interno. (2005). *Soccorso Italia in 20'*. Dipartimento dei Vigili del Fuoco, del Soccorso e della Difesa Civile, Roma.

3.4 UN MODELLO SEMPLIFICATO PER LA STIMA DELLA PROBABILITÀ DI INCIDENTE

Lo strumento di supporto alle decisioni è in grado di fornire, per un arco ferroviario, indicazioni circa la stima dei valori di probabilità di accadimento di un evento rilevante e l'indice di accessibilità.

Come già riportato in precedenza l'impianto normativo nazionale risulta ad oggi carente per quanto concerne metodi e modelli di analisi del rischio trasporti per le tratte a cielo aperto. Se per le gallerie ferroviarie il modello di analisi quantitativo dei rischi risulta ben strutturato e consolidato, per le tratte a cielo aperto non esistono attualmente riferimenti utili all'implementazione della procedura di calcolo.

All'interno del capitolo 3.2.3.2 sono stati descritti i principali eventi critici e le cause correlate indipendentemente dal fatto che siano essi associabili a rischi interni al sistema dei trasporti o esterni ma che hanno ripercussioni sul sistema stesso.

Nel presente lavoro di ricerca viene proposto un metodo semplificato per la valutazione della probabilità di accadimento degli eventi critici incidentali individuati dal DM 28/10/2005 relativo alla sicurezza in galleria:

- Collisioni;
- Deragliamenti
- Incendi di materiale rotabile.

Ai fini del calcolo della probabilità di accadimento di ciascun un evento critico, il dato statistico elementare utilizzato dal modello è il *numero di eventi/treni km*. Tale valore è, infatti, reperibile sul *Rapporto annuale della sicurezza delle ferrovie italiane ricadenti nelle competenze dell'Agenzia Nazionale per la Sicurezza delle Ferrovie*⁵¹ - anno 2010.

La Tabella 14 riporta il numero degli incidenti (eventi), che hanno interessato la rete ferroviaria nazionale nel periodo 2005-2010, in valore assoluto e in rapporto ai volumi di traffico espressi in miliardi di treni km.

⁵¹ L'ANSF – Agenzia Nazionale Sicurezza Ferroviaria, soggetto tecnicamente indipendente rispetto a tutti gli operatori nel campo del trasporto ferroviario, è istituita, con sede in Firenze, sulla base dell'articolo 4 del Decreto legislativo 10 agosto 2007, n. 162 di recepimento della direttiva 2004/49/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 29 aprile 2004 (direttiva relativa alla sicurezza delle ferrovie comunitarie). L'Agenzia è operativa dal 16 giugno 2008 e ha competenza per l'intero sistema ferroviario nazionale e svolge sostanzialmente compiti normativi, autorizzativi e di controllo. <http://www.ansf.it>.

Tabella D.2.1 Numero degli incidenti nel periodo 2005-2010												
INCIDENTI	2005		2006		2007		2008		2009		2010	
	n.	n/ trkm	n.	n/ trkm	n.	n/ trkm	n.	n/ trkm	n.	n/ trkm	n	n/ trkm
collisioni di treni	5	14,77	4	11,56	4	11,67	2	5,89	3	9,29	2	6,17
collisioni di treni contro ostacoli	3	8,86	3	8,67	4	11,67	2	5,89	3	9,29	2	6,17
collisioni tra treni	2	5,9	1	2,89	0	0	0	0	0	0	0	0,00
deragliamenti di treni	6	17,72	11	31,8	8	23,34	8	23,58	5	15,48	3	9,26
incidenti ai passaggi a livello	25	73,85	32	92,51	19	55,44	9	26,53	5	15,48	15	46,30
incidenti alle persone provocati da materiale rotabile in movimento	90	265,87	76	219,72	83	242,19	79	232,9	74	229,1	80	246,95
incendi al materiale rotabile	4	11,81	4	11,56	4	11,67	2	5,89	0	0	0	0,00
Altri incidenti (*)	4	11,81	5	14,45	3	8,75	3	8,84	7	21,67	3	9,26
TOTALE	134	395,85	132	381,62	121	353,07	103	303,65	94	291,02	103	317,94
(*) per "altri incidenti" si intendono tutti gli incidenti non rientranti nelle casistiche precedenti, come ad esempio svii e urti in manovra o di mezzi d'opera												

Tabella 14 – Numero di incidenti ferroviari avvenuti nel periodo 2005-2010 sulla rete nazionale. Fonte ANSF.

Per una generica tratta ferroviaria t , compresa tra due stazioni e formata da archi contigui aventi il medesimo valore di $treni\ km\ anno$, è possibile stimare la probabilità di accadimento di ciascuno dei tre eventi critici annui attesi, utilizzando la seguente formula:

$$P_{t,k} = ev_k * tkm_t$$

dove:

- $P_{t,k}$ è il valore di probabilità di accadimento dell'evento critico k sulla generica tratta t ;
- ev_k rappresenta il numero medio di eventi critici annui avvenuti in ambito nazionale espresso in $\frac{n^\circ\ eventi}{treni*km}$;
- tkm_t rappresenta il volume di traffico ferroviario della tratta omogenea t di riferimento espresso in $\frac{treni*km}{anno}$.

Dall'osservazione di Tabella 14 è possibile estrarre per ogni anno – dal 2005 al 2010 – il numero di eventi come illustrato in Tabella 15.

	2005	2006	2007	2008	2009	2010
	n°eventi/trkm	n°eventi/trkm	n°eventi/trkm	n°eventi/trkm	n°eventi/trkm	n°eventi/trkm
Collisioni	14,77	11,56	11,67	5,89	9,29	6,17
Deragliamenti	17,72	31,8	23,34	23,58	15,48	9,26
Incendi	11,81	11,56	11,67	5,89	0	0

Tabella 15 – Sintesi degli eventi critici avvenuti sulla rete nazionale anni 2005-2010.

Il parametro ev_k viene calcolato, per ogni evento critico, come valore medio degli eventi occorsi nell'orizzonte temporale di riferimento (2005-2010):

$$ev_{collisione} = \frac{14,77 + 11,56 + 11,67 + 5,89 + 9,29 + 6,17}{59,35} = 9,89 \left[\frac{n^\circ \text{ eventi}}{\text{treni} * \text{km}} \right]$$

$$ev_{deragliamento} = \frac{17,72 + 31,8 + 23,34 + 23,58 + 15,48 + 9,26}{121,18} = 20,2 \left[\frac{n^\circ \text{ eventi}}{\text{treni} * \text{km}} \right]$$

$$ev_{incendio} = \frac{11,81 + 11,56 + 11,67 + 5,89 + 0 + 0}{40,93} = 6,2 \left[\frac{n^\circ \text{ eventi}}{\text{treni} * \text{km}} \right]$$

In Tabella 16 sono riportati i valori di ev_k per i tre eventi critici analizzati.

Evento	Anni 2005 - 2010
	ev_k - n° medio eventi nazionali/trkm
Collisioni	9,89
Deragliamenti	20,20
Incendi	6,20

Tabella 16 - Media aritmetica degli eventi critici avvenuti sulla rete nazionale anni 2005-2010.

Le tratte omogenee possono essere porzioni di linee ferroviarie comprese tra stazioni, fermate o più in generale *punti di rottura* in cui la circolazione dei treni non è uniforme in termini di volumi di traffico. Se si considera, infatti, una linea ferroviaria *AE* composta da 4 tratte omogenee, come illustrato in Figura 170, si può verificare il caso in cui alcuni convogli (es. treni locali) potrebbero non percorrere l'intera linea da A ad E ma soltanto alcune tratte *AB* o *DE*. Questo significa che il traffico sulle 4 tratte non è omogeneo ma dipende dall'organizzazione del servizio passeggeri e/o merci. Sulle tratte *AB* e *DE*, ad esempio, oltre a transitare i convogli che uniscono A ed E (itinerario A-E)

transitano anche quelli che servono solo le coppie origine-destinazione *AB* e *DE* aumentandone i transiti (volumi di traffico).

Inoltre si può verificare il caso il cui in alcuni *punti* o stazioni vi siano delle interconnessioni che fanno variare i volumi sulle tratte di una linea ferroviaria.

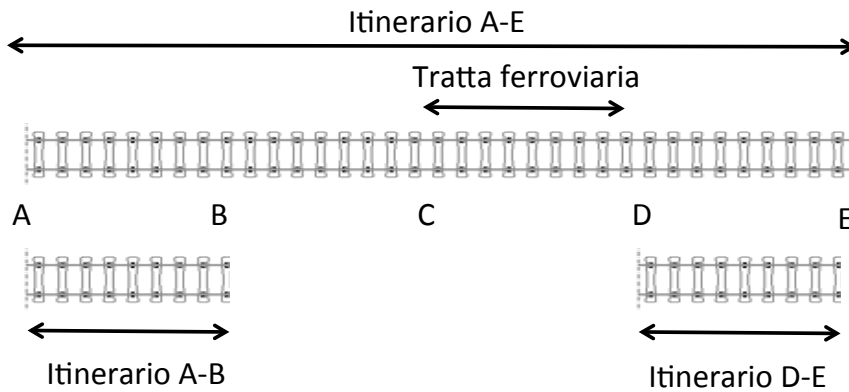


Figura 170 - Esempio di percorrenze sulle tratte ferroviarie.

Il calcolo del parametro tkm_t consiste nell'aggregazione per la generica tratta t dei volumi di traffico ferroviario passeggeri e merci circolanti nelle due direzioni di marcia come segue:

$$tkm_t = tkm_{t,p} + tkm_{t,m}$$

dove:

- $tkm_{t,p}$ rappresenta il numero di $\frac{\text{treni passeggeri} * km}{\text{anno}}$ per le due direzioni di marcia sulla generica tratta t ;
- $tkm_{t,m}$ rappresenta il numero di $\frac{\text{treni merci} * km}{\text{anno}}$ per le due direzioni di marcia sulla generica tratta t .

Se si considera l'esempio di Figura 170, per ciascuno dei tre eventi critici è quindi possibile stimare la probabilità di accadimento della tratta *AB* come segue:

$$P_{AB, \text{collisione}} = ev_{\text{collisione}} \left[\frac{n^\circ \text{ eventi}}{\text{treni} * km} \right] * tkm_{AB} \left[\frac{\text{treni} * km}{\text{anno}} \right] = \frac{n^\circ \text{ collisioni}}{\text{anno}}$$

$$P_{AB, \text{deragliamenti}} = ev_{\text{deragliamenti}} \left[\frac{n^\circ \text{ eventi}}{\text{treni} * km} \right] * tkm_{AB} \left[\frac{\text{treni} * km}{\text{anno}} \right] = \frac{n^\circ \text{ deragliamenti}}{\text{anno}}$$

$$P_{AB, \text{incendio}} = ev_{\text{incendio}} \left[\frac{n^\circ \text{ eventi}}{\text{treni} * km} \right] * tkm_{AB} \left[\frac{\text{treni} * km}{\text{anno}} \right] = \frac{n^\circ \text{ incendi}}{\text{anno}}$$

4 UN CASO APPLICATIVO: LA LINEA TORINO – MILANO

In questo capitolo si illustra un'applicazione del modello implementato alla linea storica ferroviaria Torino – Milano al fine di verificarne la validità e l'affidabilità dei risultati. La scelta di tale linea è stata anche dettata da una conoscenza dell'ambito territoriale e contestuale ritenuto rappresentativo dei parametri e degli indicatori individuati e sviluppati nel modello.

Nella prima parte sono descritti i dati e gli strumenti utilizzati mentre nella seconda sono riportati i risultati in forma grafica - mediante mappe tematiche - e numerica relativi agli indicatori di accessibilità e alla probabilità di accadimento degli eventi incidentali.

Per l'elaborazione dei dati è stato impiegato un *GIS - Geographic Information System* e un foglio di calcolo che ha permesso di effettuare elaborazioni numeriche relative all'implementazione degli indicatori e dell'indice e alla stima della probabilità di accadimento degli eventi critici.

Per quanto riguarda l'illustrazione dei risultati sono stati riportati e descritti quattro casi specifici ritenuti utili e rappresentativi per la validazione del modello di calcolo.

4.1 LA LINEA FERROVIARIA STORICA MILANO - TORINO

La linea ferroviaria storica Torino - Milano è una delle principali ferrovie italiane nonché una delle più trafficate sia dal punto di vista passeggeri sia merci. Lunga 153 km collega due delle più importanti città italiane ossia Torino, in Piemonte, e Milano, in Lombardia.

Tra le principali città attraversate dalla linea ferroviaria ci sono: Torino, Settimo Torinese, Chivasso, Santhià, Vercelli, Novara, Trecate, Magenta, Rho, Milano.

Gestita da *RFI* - Rete Ferroviaria Italiana - è interamente a doppio binario con scartamento ordinario da 1.435 mm ed è elettrificata secondo lo standard italiano in corrente continua da 3.000 volt.

La linea è percorsa da treni merci e passeggeri tra cui regionali e lunga percorrenza di varie categorie e operatori.

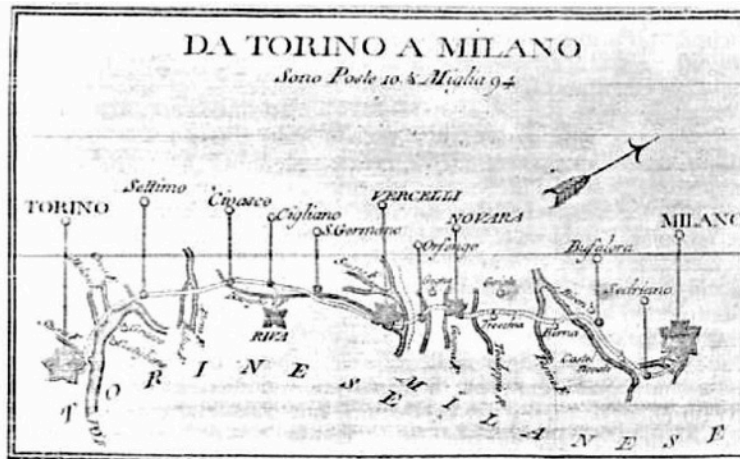


Figura 171 - Tracciato ferroviario della linea storica Torino – Milano.

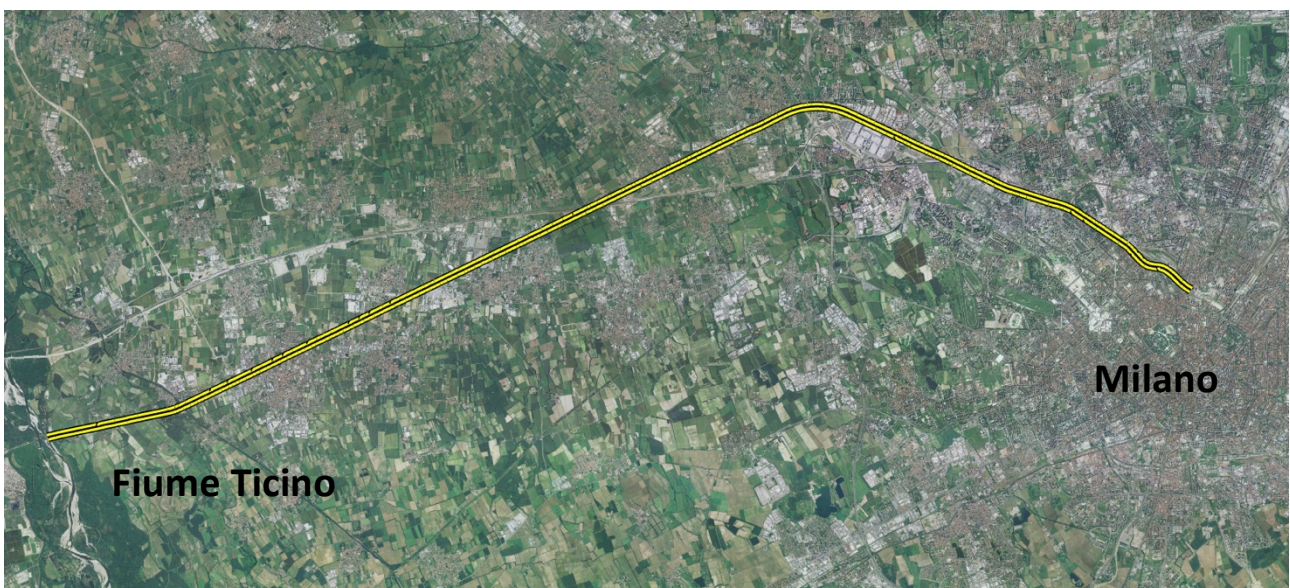


Figura 172 – Tracciato ferroviario (in giallo) della linea storica Torino – Milano: da Milano al confine regionale (fiume Ticino).

4.2 STRUMENTI UTILIZZATI PER LA RICERCA

La ricerca svolta si è valsa essenzialmente dell'ausilio di un software GIS e di un foglio di calcolo per l'elaborazione dei dati numerici *estratti* dal GIS.

Il GIS (o Sistema Informativo Territoriale) è uno strumento *computer-based* che permette di condurre analisi spaziali attraverso la rappresentazione digitale di una area geografica, combinata con una serie di altre informazioni di tipo alfanumerico e non, in dipendenza dallo studio che si vuole condurre.

L'uso del GIS per la realizzazione dell'analisi ambientale di un territorio ha un carattere fortemente innovativo. Qualunque processo di analisi del territorio che mira ad essere recepito a livello politico, sociale ed economico, deve essere infatti supportato da dati e da informazioni utili allo scopo e deve essere sviluppato tenendo conto della territorialità delle grandezze in gioco. Ma la maggiore attrattiva dello strumento GIS è quella di poter restituire rappresentazioni sintetiche visive, tipicamente mappe, di elaborazioni anche molto complesse, facilitando la comunicazione scientifica al pubblico

Il foglio di calcolo elettronico è costituito da un software applicativo nato dall'esigenza di organizzare insiemi di dati tramite tabelle, schemi e grafici. Inoltre consente di effettuare calcoli di natura molto semplice quali totali, statistiche, medie, garantendo l'automazione delle procedure.

4.3 I DATI UTILIZZATI

Nel capitolo 3 è stato descritto il modello di calcolo che permette di determinare gli indicatori e aggregarli in un indice di accessibilità. Affinché sia possibile questa operazione si è resa necessaria una fase preliminare di acquisizione e verifica delle informazioni presso le banche dati disponibili. Alcuni dati indispensabili per l'implementazione degli indicatori non erano disponibili e hanno quindi richiesto un'ulteriore fase di *creazione* del dato - *editing* – a partire dalla digitalizzazione di alcuni parametri mediante l'utilizzo dell'ortofoto di Regione Lombardia.

4.3.1 GEOPORTALE DELLA LOMBARDIA

Come per la costruzione delle infrastrutture di trasporto è necessario un processo costituito da diverse fasi, anche la costruzione dell'Infrastruttura per l'Informazione Territoriale - IIT- si sviluppa tramite un processo che, partendo dall'esigenza dei diversi enti di pianificare e gestire del territorio sulla base di informazioni geografiche organizzate, aggiornate e di facile utilizzo, si pone l'obiettivo di organizzare un sistema di servizi geografici atto a condividere le informazioni prodotte da diversi soggetti e a renderle disponibili in modo facilmente accessibile a tutti gli utenti. L'infrastruttura, coordinata da Regione Lombardia, coinvolge con modalità di partecipazione attiva gli enti locali e tutte le organizzazioni interessate all'approfondimento e alla diffusione dell'informazione geografica del territorio lombardo.

Il GeoPortale lombardo costituisce un *punto privilegiato* di accesso on-line al patrimonio informativo dell'IIT regionale. Nell'ambito di questo strumento vari soggetti partecipanti all'IIT regionale possono pubblicare le informazioni relative a propri dati e servizi geografici e ricercarli ed accedervi dopo che sono stati messi a disposizione da altri Enti, con significative ricadute positive sia in termini operativi che economici.

All'interno sono previste sezioni dedicate a particolari ambiti tematici e a specifiche comunità di utenti (enti pubblici, cittadini, imprese) al fine di orientarne e facilitarne l'utilizzo.

Il GeoPortale mette inoltre a disposizione servizi operativi finalizzati alla pubblicazione e visualizzazione di cartografie, alla elaborazione di dati geografici (ad es. conversione di sistema di riferimento), alla localizzazione, al download di strati informativi.⁵²

⁵² www.cartografia.regione.lombardia.it/geoportale

4.3.2 ORTOFOTO REGIONE LOMBARDIA

L'ortofoto di Regione Lombardia costituisce una delle fondamentali Basi geografiche e cartografiche del patrimonio regionale. E' utilizzata come sfondo del Viewer geografico e resa disponibile ed utilizzabile come servizio di mappa e come servizio WMS. Le immagini a colori nelle 3 bande RGB sono nel sistema di riferimento UTM32N-WGS84, hanno una risoluzione pixel a 50 cm e una scala nominale 1:10.000.

In Figura 173 è illustrata l'ortofoto di regione Lombardia utilizzata nel lavoro di ricerca.



Figura 173 - Ortofoto Regione Lombardia.

4.3.3 DUSAF 2

Il layer utilizzato per la determinazione dello stato attuale del territorio circostante l'area di studio è il *DUSAF 3.0* di Regione Lombardia, una banca dati omogenea su tutto il territorio regionale che fotografa la *Destinazione d'Uso dei Suoli Agricoli e Forestali* e che viene comunemente utilizzata come strumento di analisi e monitoraggio del territorio (Figura 174).

La conoscenza delle dinamiche relative all'uso del suolo è strategica per la pianificazione territoriale in quanto consente di leggere lo stato attuale dei luoghi come risultante delle modificazioni intervenute in passato e di monitorare quelle in atto e di prefigurare quelle future.

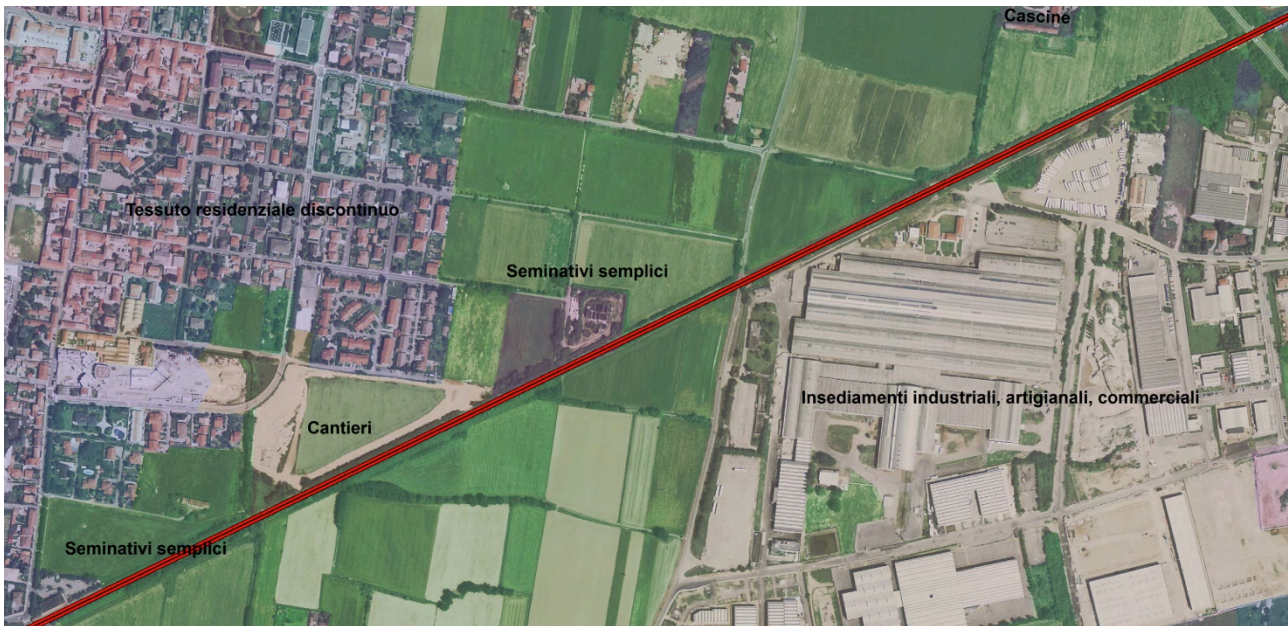


Figura 174 - Rappresentazione delle classi di uso DUSAF 3.0 ai margini della ferrovia (in rosso).

Il Progetto DUSAF è stato realizzato attraverso la fotointerpretazione delle ortofoto digitali a colori; i limiti foto interpretati sono stati digitalizzati e restituiti cartograficamente alla scala 1:10.000 nel sistema cartografico Gauss - Boaga e ricoprono tutto il territorio della regione Lombardia. Nella realizzazione del progetto è stata utilizzata la banca dati DUSAF 3.0 riproiettata nel sistema di riferimento *UTM32N-WGS84*.

La rappresentazione degli elementi areali ha i seguenti limiti:

- per ogni tematismo avente sviluppo areale la soglia dimensionale minima di rappresentabilità corrisponde a 1600 mq, pari ad una superficie cartografica alla scala 1:10.000 di 16 mm²;
- la dimensione lineare minima del poligono è di 20 m, pari ad una lunghezza sulla carta alla scala di lavoro di 2 mm.

La legenda adottata ha avuto come base di partenza progetti analoghi a livello regionale, nazionale e comunitario ed è articolata in classi, che comprendono raggruppamenti omogenei d'uso del suolo, le quali a loro volta si suddividono in sottoclassi. In Tabella 17 sono riportate le classi di uso del suolo identificate dal *DUSAF 2* alle quali è associato il coefficiente di accessibilità P_s utili per determinare l'indicatore *IUS*.

	Classe uso del suolo	Coefficiente Accessibilità – P_s
1	Altre legnose agrarie	0,3
2	Alvei fluviali e corsi d'acqua artificiali	0
3	Aree degradate non utilizzate e non vegetate	0,5
4	Aree verdi incolte	1
5	Bacini idrici artificiali	0
6	Bacini idrici naturali	0
7	Boschi di latifoglie a densità bassa	0,7
8	Boschi di latifoglie a densità media e alta	0,5
9	Cantieri	1
10	Cascine	0,7
11	Cave	1
12	Cespuglieti con presenza significativa di specie arbustive alte ed arboree	0,7
13	Cespuglieti in aree di agricole abbandonate	0,7
14	Cimiteri	0
15	Colture floro-vivaistiche a pieno campo	0,7
16	Formazioni ripariali	0,5
17	Impianti di servizi pubblici e privati	0,5
18	Impianti sportivi	0,5
19	Impianti tecnologici	0,5
20	Insedimenti industriali, artigianali, commerciali	0,5
21	Insedimenti ospedalieri	0
22	Insedimenti produttivi agricoli	1
23	Orti familiari	1
24	Parchi e giardini	1
25	Pioppeti	0,7
26	Prati permanenti con presenza di specie arboree ed arbustive sparse	1
27	Prati permanenti in assenza di specie arboree ed arbustive	1
28	Reti ferroviarie e spazi accessori	1
29	Reti stradali e spazi accessori	1
30	Risaie	0
31	Seminativi semplici	1
32	Seminativi arborati	1
33	Tessuto residenziale continuo mediamente denso	0,5
34	Tessuto residenziale denso	0,5
35	Tessuto residenziale discontinuo	0,7
36	Tessuto residenziale rado e nucleiforme	0,7
37	Tessuto residenziale sparso	1
38	Vegetazione degli argini sopraelevati	0,5
39	Vegetazione delle aree umide interne e delle torbiere	0,5

Tabella 17 - Classi di uso del suolo (DUSAF 2) e coefficiente di accessibilità.

4.3.4 GRAFO FERROVIARIO

Lo strato informativo *rete ferroviaria* presente nelle banche dati di Regione Lombardia è la rete sulla quale vengono espletati i servizi ferroviari di trasporto di persone e merci e copre l'intera estensione regionale (Figura 175).

La geometria del livello è di tipo lineare (arco) e consiste nel segmento di linea che congiunge due località. La sua realtà territoriale è quella del segmento di infrastruttura ferroviaria che unisce due tipologie di località tra quelle definite. In questi termini il modello costituisce un livello informativo comune, valido anche per altre esigenze di classificazione e gestione della rete.

Ad ogni arco sono associati attributi quali, ad esempio, il numero di binari, la tipologia del tracciato (in galleria, naturale ecc.), la tipologica di alimentazione (linea elettrificata o non), il tipo di scartamento dei binari.



Figura 175 - Grafo ferroviario Regione Lombardia.

4.3.5 GRAFO STRADALE

Il grafo stradale utilizzato nel lavoro di ricerca è un grafo commerciale attualmente utilizzato presso il Laboratorio Mobilità e Trasporti del Politecnico di Milano.

Il valore aggiunto dell'utilizzo di un grafo commerciale consiste nel fatto che le banche dati sono costantemente uniformate, formattate e rappresentano quindi una completa e accurata riproduzione digitalizzata dell'attuale rete stradale.

Le fonti primarie utilizzate per la raccolta dei dati sono:

- Fotografie aeree e immagini satellitari;
- Carte geografiche, redatte da istituti geografici nazionali e cartografi;
- Rilevatori sul campo, che verificano, convalidano e mettono a punto le informazioni stradali;
- Mobile Mapping Van, camper attrezzati che percorrono le strade e registrano tutte le caratteristiche del tracciato stradale.

La convergenza di tutte queste fonti e processi si traduce in una geometria reticolare stradale, al cui interno sono presenti attributi utili per il loro impiego all'interno di applicativi GIS.

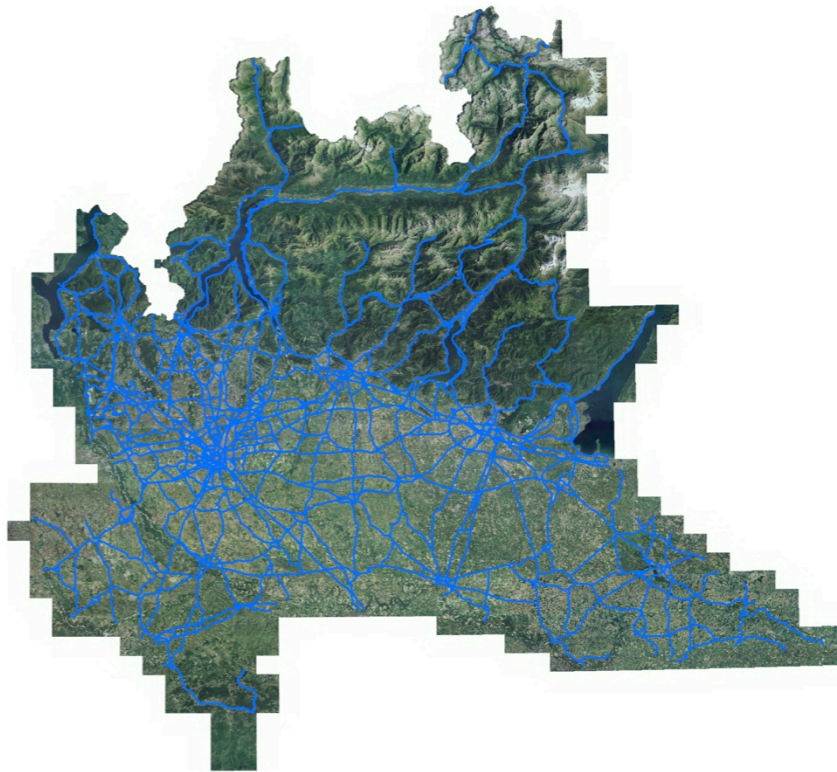


Figura 176 - Grafo stradale Regione Lombardia.

4.3.6 LOCALIZZAZIONE STAZIONI E FERMATE FERROVIARIE

Le stazioni e le fermate ferroviarie sono state digitalizzate con lo strumento GIS creando un nuovo *shapefile* mediante l'utilizzo dell'ortofoto e di un elenco della localizzazione delle stazioni e/o fermate – SF presenti sulla linea ferroviaria Torino – Milano. In Figura 177 e Figura 178 sono riportate le SF digitalizzate e utilizzate nel presente studio.



Figura 177 - Stazioni o fermate (SF) presenti sulla linea ferroviaria TO-MI.



Figura 178 - Dettaglio di una SF.

4.3.7 LOCALIZZAZIONE DEI PASSAGGI A LIVELLO

Attualmente non esiste uno strato informativo contenente posizione e attributi relativi ai passaggi a livello. Anche in questo caso i *PL* sono stati digitalizzati con lo strumento GIS creando un nuovo *shapefile* mediante l'utilizzo dell'ortofoto e di mappe geografiche open source. In Figura 179 e Figura 180 sono riportati i *PL* digitalizzati e utilizzati nel presente studio.



Figura 179 - Passaggi a livello (PL) presenti sulla linea ferroviaria TO-MI.



Figura 180 - Dettaglio di un PL.

4.3.8 LOCALIZZAZIONE COMANDI E DISTACCAMENTI VIGILI DEL FUOCO

I comandi e i distaccamenti dei Vigili del Fuoco sul territorio sono stati digitalizzati con lo strumento GIS creando un nuovo *shapefile* mediante l'utilizzo dell'ortofoto e di un elenco della dislocazione reperibile sul portale dei Vigili del Fuoco (Figura 181).

CORPO NAZIONALE DEI VIGILI DEL FUOCO
Direzione Regionale Vigili del Fuoco Lombardia
Dipartimento dei Vigili del Fuoco, del Soccorso Pubblico e della Difesa Civile

Sei in: [Home](#) > [Dislocazione sul territorio - Regione Lombardia](#) > [Comando Provinciale](#)

Informazioni

Articolazione degli uffici

Dislocazione sul territorio

Lavora con noi

Amministrazione trasparente

Servizi al cittadino

Modulistica

Uffici

Ministero dell'Interno
 Vigili del Fuoco
 Quaderni di Scienza e
 Tecnica
 Obiettivo Sicurezza

Dislocazione sul territorio

Provincia di MILANO

Nome ufficio	Comando Provinciale VV.F. di Milano
Indirizzo	Via Messina, 35/37, 20100 Milano
Telefono	02/31901
Fax	02/33104430
PEC	com.milano@cert.vigilfuoco.it
PEC Uff. Prevenzione Incendi	com.prev.milano@cert.vigilfuoco.it
E-Mail	comando.milano@vigilfuoco.it
Sito Web	Comando Provinciale VV.F. di Milano
Nome ufficio	Distaccamento Cittadino Benedetto Marcello
Indirizzo	Via Marcello, 31, 20100 Milano
Telefono	02/29400752
Fax	02/20421714
Nome ufficio	Distaccamento Cittadino Cuoco
Indirizzo	Via Carabelli, 14, 20100 Milano
Telefono	02/5460260
Fax	02/54189448
Nome ufficio	Distaccamento Cittadino Darwin
Indirizzo	Via Darwin, 5, 20100 Milano
Telefono	02/58101462
Fax	02/89413262
Nome ufficio	Distaccamento Cittadino Sardegna
Indirizzo	Via Sardegna, 8, 20100 Milano
Telefono	02/48006983
Fax	02/48105555

Figura 181 - Dislocazione sul territorio di comandi e distaccamenti VVF provincia Milano.

In Figura 182 e Figura 183 sono riportati i comandi e distaccamenti digitalizzati e utilizzati nel presente studio per il calcolo dell'indicatore *IARR*.

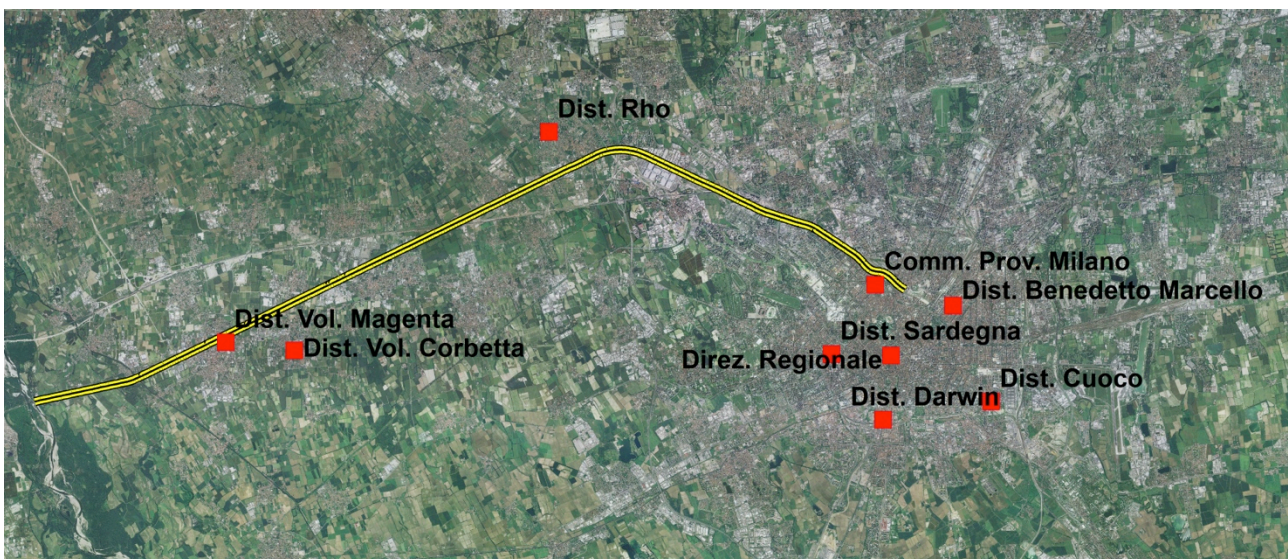


Figura 182 – Comandi e distaccamenti VVF situati in prossimità della linea ferroviaria TO-MI.



Figura 183 - Dettaglio di un distaccamento VVF.

4.4 DETERMINAZIONE DELL'INDICE DI ACCESSIBILITÀ

Dopo la fase di acquisizione e digitalizzazione dei dati mancanti si è passati all'attività di validazione che ha permesso di verificarne la correttezza e l'affidabilità prima di poter procedere con la determinazione dell'indice di accessibilità.

A livello operativo il calcolo dell'indice di accessibilità di ciascun arco ferroviario ha previsto due distinte fasi. La prima riguarda le elaborazioni con strumento GIS con la finalità di ottenere, per ogni arco e indicatore, dei valori numerici relativi ad archi e celle. La seconda fase, mediante l'impiego di un foglio di calcolo, ha permesso di elaborare i dati provenienti dal GIS in funzione delle specifiche del metodo e aggregare gli indicatori determinati nell'indice di accessibilità (*IAS* e *IAC*).

4.4.1 LE ELABORAZIONI IN GIS

Per ciascuno dei cinque indicatori considerati nel modello sono state effettuate delle elaborazioni con strumento GIS ipotizzando una lunghezza dell'arco ferroviario pari a 100 metri. Tale scelta risulta un valido compromesso tra l'onere computazione e il livello di dettaglio raggiunto in termini di risultati.

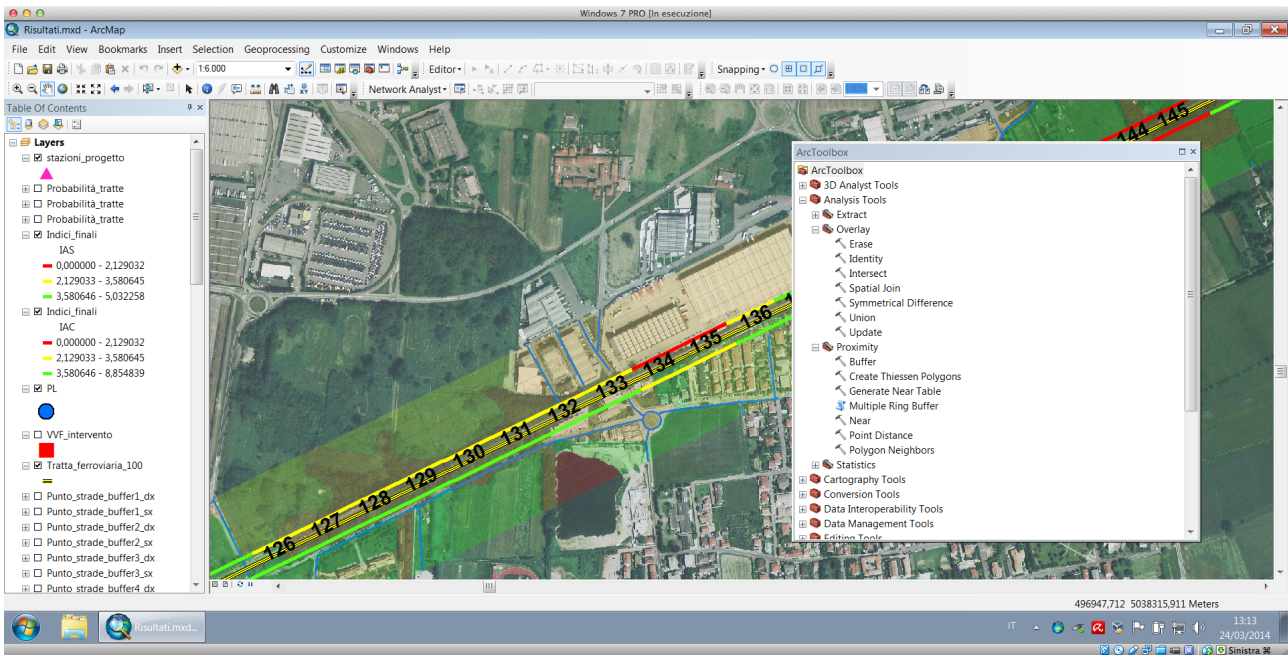


Figura 184 – Elaborazioni con strumento GIS: principali funzioni utilizzate.

La lunghezza di 100 m è ritenuta rappresentativa anche delle diverse tipologie di materiale rotabile che possono circolare sulla linea garantendo quindi l'implementazione di un indice di accessibilità caratteristico degli ambiti contestuali a lato della ferrovia.

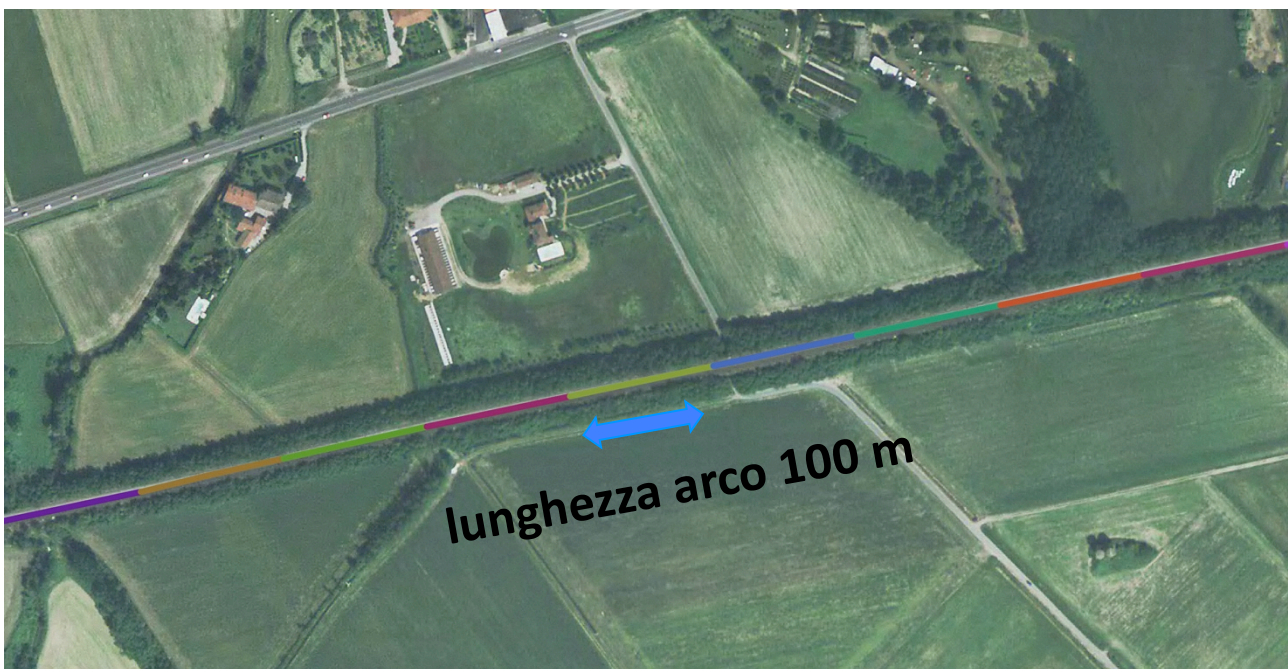


Figura 185 – Segmentazione della ferrovia in archi di lunghezza pari a 100 metri.

L'estensione dell'area di studio si compone di 6 buffer aventi ampiezza variabile per un totale di 150 metri a destra e a sinistra della ferrovia come illustrato in Figura 186. Anche in questo caso la scelta di discretizzare il territorio circostante in 6 buffer è il

risultato di un compromesso tra l'onore computazione e l'affidabilità del modello in termini di precisione di calcolo dell'accessibilità in una cella.

In 6 buffer non hanno ampiezza uguale ma variabile al fine di garantire maggior dettaglio in prossimità della ferrovia (ampiezza inferiore) aumentando progressivamente la larghezza della cella a distanze superiori come si evince dall'osservazione di Figura 186.

Le ampiezze sono:

1. buffer 1: 10 m;
2. buffer 2: 20 m;
3. buffer 3: 30 m;
4. buffer 4: 30 m;
5. buffer 5: 30 m;
6. buffer 6: 30 m.



Figura 186 - Estensione dell'area di studio.

Ai fini della valutazione dell'indicatore *IES*, in Figura 187 è riportato, a titolo esemplificativo, il calcolo di estensione stradale (in rosso) all'interno di una cella dell'area di studio.



Figura 187 - Calcolo dell'estensione stradale all'interno di una cella.

Per quanto riguarda il calcolo dell'indicatore *IARR* si è proceduto in primo luogo a identificare per ogni cella dell'area di studio un *punto baricentrico* appartenente alla rete stradale come punto di arrivo - destinazione dei Servizi di Pronto intervento come (Figura 188).



Figura 188 - Punto baricentro (destinazione) della rete stradale all'interno di una cella.

Per definire l'itinerario utilizzato dalle squadre di soccorso è stata utilizzata una particolare funzione in grado di stimare il percorso che prevede il tempo minimo di percorrenza unendo le origini (presidi/distaccamenti VVF) e destinazioni (punti baricentrici nella celle) come illustrato in Figura 189.

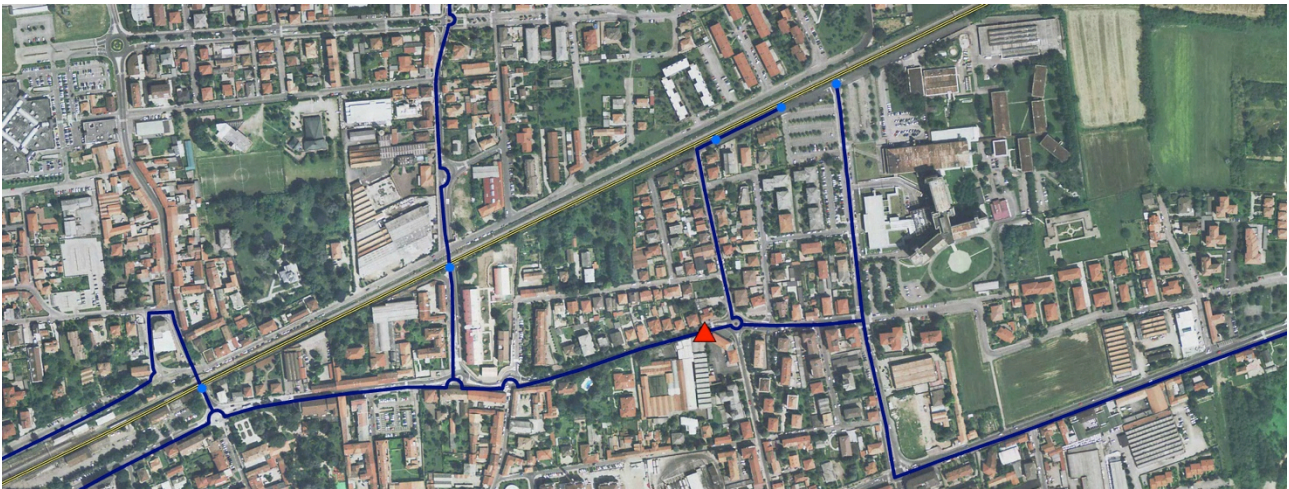


Figura 189 - Calcolo del tempo di arrivo dei Vigili del Fuoco sul luogo dell'incidente (itinerario in blu).

4.4.2 IL FOGLIO DI ELABORAZIONE DATI

Il calcolo numerico degli indicatori e degli indici di accessibilità *IAS* e *IAC* per ogni arco *i* è stato eseguito con l'ausilio di un foglio di calcolo (Figura 190).

All'interno del foglio sono stati elaborati i valori relativi a parametri del modello a partire dagli archi ferroviari e dalle celle di territorio circostante.

Le operazioni automatizzate del foglio di calcolo hanno permesso la gestione di una notevole quantità di dati provenienti da specifiche estrazioni ed esportazioni del software GIS.

Id_Arco	Passaggi a livello Id_PL [1; 2; 3; ...]	PL - Presenza passaggio a livello su arco [0 o 1]	I_PL	Stazione - Fermata Id_SF [1; 2; 3; ...]	SF - Presenza stazione o fermata su arco [0 o 1]	I_SF	EST - Estensione stradale celle [m]												
							1_DX	1_SX	2_DX	2_SX	3_DX	3_SX	4_DX	4_SX	5_DX	5_SX	6_DX	6_SX	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	40	0	0	0	48	0	55	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	64	0	57	0	30	0	133	0	30	0	30
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	101	0	0	0	100	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	49	0	121	0	153	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	100	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	100	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29	0	188	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	31	170	31	0	31	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	105	0	30	0	30
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	41	0	59	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	101	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	98	0	3
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	101
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	99	0	16	0	0	0	0	0	0	132
15	0	0	0	0	0	0	0	10	10	60	20	44	32	59	33	30	33	88	73
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	61	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	10	10	22	21	32	6	32	0	31	0	38	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0	30	0	35	0	36
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	31	0	31	0	31
25	0	0	0	0	0	0	0	10	10	43	21	65	22	18	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0	36	0	36	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 190 – Esempio del foglio di calcolo per elaborazione degli indicatori e degli indici di accessibilità.

4.5 STIMA DELLA PROBABILITÀ DI INCIDENTE

Nel paragrafo 3.4 è stato descritto il modello semplificato per la stima della probabilità incidentale relativa ai tre eventi critici:

- Collisione;
- Deragliamento;
- Incendio del materiale rotabile.

Per ciascuno dei tre eventi critici è stato determinato, nell'orizzonte temporale 2005-2010, il numero medio di eventi nazionali/treni km.

Evento	Anni 2005 - 2010
	n° medio eventi nazionali/trkm
Collisioni	9,89
Deragliamenti	20,20
Incendi di materiale rotabile	6,20

Tabella 18 - Eventi critici avvenuti sulla rete nazionale anni 2005-2010.

Il passo successivo ha riguardato l'analisi dei volumi di traffico, passeggeri e merci, dal confine regionale, in prossimità di Trecate (NO), fino a Milano.

Sono state identificate 11 tratte omogenee per le quali sono stati sommati i volumi di traffico relativi alle seguenti tipologie di treno per entrambe le direzioni:

- regionale;
- lunga percorrenza,
- merci

In Tabella 19 è riportato il calcolo dei treni km anno⁵³ per ciascuna tratta omogenea considerando le tre tipologie di treno.

⁵³ Gli indicatori di offerta descrivono la struttura produttiva di un'Impresa Ferroviaria (a prescindere dal grado di sfruttamento del servizio) e possono essere:

- Treni x km: numero complessivo di chilometri percorsi in un anno da tutti i treni in dotazione. L'indicatore fa riferimento a unità con diversa capacità media in quanto non tiene conto della lunghezza del singolo treno.
- Posti x km: si intende il numero complessivo di posti offerti agli utenti nell'arco dell'anno. E' un indicatore che tiene conto della capacità di carico dei treni. Si ottiene moltiplicando i treni x km per la capacità media (in numero posti) dei treni in dotazione.

Id_Tratta	Nome-Tratta	treni km anno [mld]
1	Tecate - Magenta	0,00068
2	Magenta - Corbetta	0,00019
3	Corbetta - Vittuone	0,00014
4	Vittuone - Pregnana	0,00028
5	Pregnana - DevRho	0,00013
6	DevRho - Rho	0,00017
7	Rho - Rho Fiera	0,00028
8	Rho Fiera - MCertosa	0,00057
9	MCertosa - Mpizzone	0,00014
10	Mpizzone - Ghisolfa	0,00003
11	Ghisolfa - MPGaribaldi	0,00018

Tabella 19 - Tratte omogenee e treni km anno espressi in miliardi.

La stima della probabilità della generica tratta t per ciascun evento critico è stata quindi determinata come segue:

$$P_{t,evento} = \left[\frac{n^{\circ} \text{ eventi}}{\text{treni} * \text{km}} \right] \left[\frac{\text{treni} * \text{km}}{\text{anno}} \right] = \frac{n^{\circ} \text{ eventi}}{\text{anno}}$$

A titolo esemplificativo, se si considera la Tabella 18 e Tabella 19 si hanno i seguenti valori di probabilità per la tratta 1 Trecate – Magenta:

$$P_{trecate-magenta,collisione} = 9,89 \left[\frac{n^{\circ} \text{ eventi}}{\text{treni} * \text{km}} \right] * 0,000677986 \left[\frac{\text{treni} * \text{km}}{\text{anno}} \right] = 0,006706412 \frac{n^{\circ} \text{ collisioni}}{\text{anno}}$$

$$P_{trecate-magenta,deragliamenti} = 20,20 \left[\frac{n^{\circ} \text{ eventi}}{\text{treni} * \text{km}} \right] * 0,000677986 \left[\frac{\text{treni} * \text{km}}{\text{anno}} \right] = 0,013693057 \frac{n^{\circ} \text{ deragliamenti}}{\text{anno}}$$

$$P_{trecate-magenta,incendio} = 6,20 \left[\frac{n^{\circ} \text{ eventi}}{\text{treni} * \text{km}} \right] * 0,000677986 \left[\frac{\text{treni} * \text{km}}{\text{anno}} \right] = 0,004624994 \frac{n^{\circ} \text{ incendi}}{\text{anno}}$$

In Tabella 20 sono riportati per ciascuna tratta i valori di probabilità di accadimento stimati per i tre eventi critici.

Id_Tratta	Nome-Tratta	treni km anno [mld]	Collisioni anno	Deragliamenti anno	Incendi anno
1	Tecate - Magenta	0,00068	0,00671	0,01369	0,00462
2	Magenta - Corbetta	0,00019	0,00183	0,00374	0,00126
3	Corbetta - Vittuone	0,00014	0,00141	0,00288	0,00097
4	Vittuone - Pregnana	0,00028	0,00273	0,00558	0,00189
5	Pregnana - DevRho	0,00013	0,00127	0,00259	0,00087
6	DevRho - Rho	0,00017	0,00167	0,00342	0,00115
7	Rho - Rho Fiera	0,00028	0,00276	0,00563	0,00190
8	Rho Fiera - MCertosa	0,00057	0,00562	0,01148	0,00388
9	MCertosa - Mpizzone	0,00014	0,00139	0,00284	0,00096
10	Mpizzone - Ghisolfa	0,00003	0,00027	0,00056	0,00019
11	Ghisolfa - MPGaribaldi	0,00018	0,00181	0,00370	0,00125

Tabella 20 - Tratte omogenee e numero di eventi critici annui per tratta.

4.6 RAPPRESENTAZIONE DEI RISULTATI

I risultati delle elaborazioni relative alla stima della probabilità di accadimento degli eventi incidentali e agli indicatori di accessibilità sono illustrati e descritti nei seguenti paragrafi. Per facilitarne la comprensione si è ritenuto utile riportare i risultati in due modalità:

- grafica. Mappe tematiche che prevedono l'utilizzo di colori,
- analitica. Tabelle contenenti i valori numerici di indicatori e indici.

In questo modo è possibile per ogni arco valutare la composizione degli indici di accessibilità (singoli o combinati) a partire dal valore degli indicatori che li compongono.

Per ragioni grafiche sono riportati separatamente i risultati relativi alla probabilità incidentale e agli indicatori. La lettura e l'interpretazione delle mappe prevede comunque una sovrapposizione dei risultati finalizzata a confrontare, per ogni arco i , la probabilità di accadimento di uno specifico evento critico con l'accessibilità da parte dei soccorsi.

4.6.1 PROBABILITÀ INCIDENTALE

La stima della probabilità dei accadimento dei tre eventi critici considerati nel modello, (collisione, svio e incendio) è riportata in Figura 191 mediante l'utilizzo di una rappresentazione grafica della linea ferroviaria. Le tre linee colorate, che seguono l'andamento del tracciato, sono associate a ciascuno dei tre eventi critici.

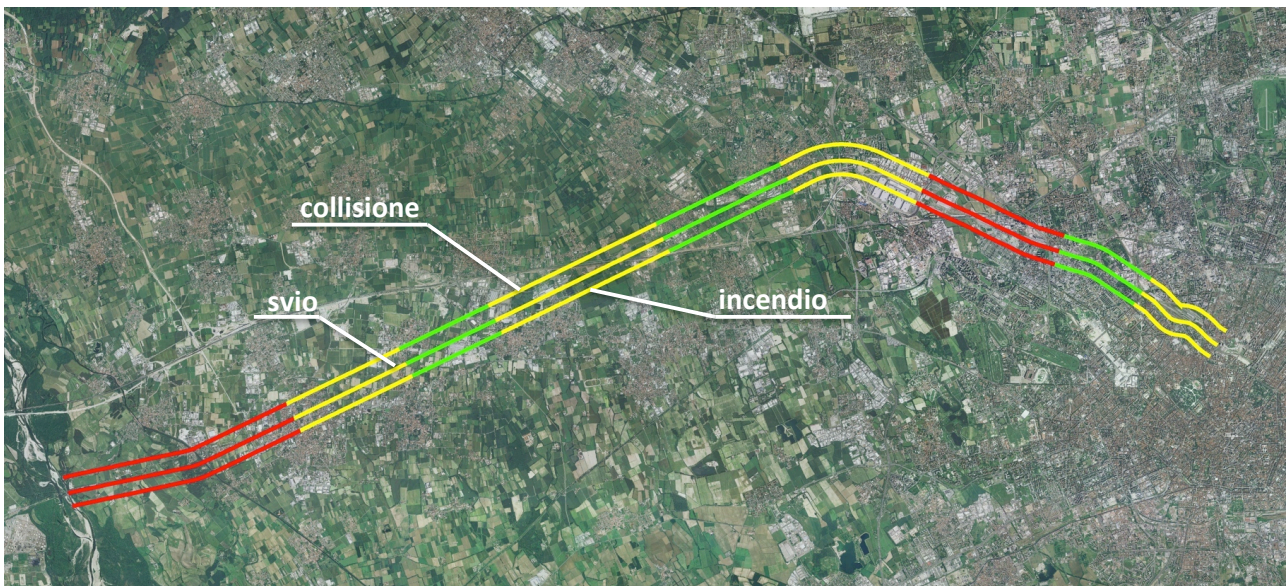


Figura 191 - Mappa tematica relativa alla probabilità di accadimento degli eventi critici.

Le undici tratte identificate sono colorate in funzione del valore di probabilità stimato. In particolare sono stati definiti tre intervalli: il primo, di colore verde, è associato a

una *bassa* probabilità di accadimento, il secondo, giallo, a una *media* probabilità e infine il terzo, rosso, a un'*elevata* probabilità di accadimento.

In Figura 192 è riportata la legenda relativa alla mappa tematica.

Legenda probabilità accadimento evento incidentale [eventi/anno]			
	Collisione	Svio	Incendio
	Bassa [0,000275-0,002419]	Bassa [0,000561-0,004939]	Bassa [0,000190-0,001668]
	Media [0,002420-0,004563]	Media [0,004940-0,009316]	Media [0,001669-0,003147]
	Elevata [0,004564-0,006706]	Elevata [0,009317-0,013693]	Elevata [0,003148-0,004625]

Figura 192 – Legenda probabilità di accadimento eventi incidentali.

In Tabella 21 sono riportati per ogni tratta ferroviaria i valori analitici di probabilità di accadimento per ciascuno dei tre eventi.

Id_Tratta	Nome-Tratta	Collisioni anno	Deragliamenti anno	Incendi anno
1	Trecate - Magenta	0,00671	0,01369	0,00462
2	Magenta - Corbetta	0,00183	0,00374	0,00126
3	Corbetta - Vittuone	0,00141	0,00288	0,00097
4	Vittuone - Pregnana	0,00273	0,00558	0,00189
5	Pregnana - DevRho	0,00127	0,00259	0,00087
6	DevRho - Rho	0,00167	0,00342	0,00115
7	Rho - Rho Fiera	0,00276	0,00563	0,00190
8	Rho Fiera - MCertosa	0,00562	0,01148	0,00388
9	MCertosa - Mpizzone	0,00139	0,00284	0,00096
10	Mpizzone - Ghisolfa	0,00027	0,00056	0,00019
11	Ghisolfa - MPGaribaldi	0,00181	0,00370	0,00125

Tabella 21 – Valori di probabilità di accadimento annui per ciascuno degli eventi considerati.

4.6.2 INDICI DI ACCESSIBILITÀ

Gli indici di accessibilità semplice e combinata – *IAS* e *IAC* – sono rappresentati in forma grafica mediante l'utilizzo di mappe tematiche come in Figura 193.

Anche in questo caso sono state utilizzate due linee cromatiche che seguono il tracciato ferroviario dove la linea *più in alto* è associata per convenzione a *IAS* mentre quella *più in basso* a *IAC*.

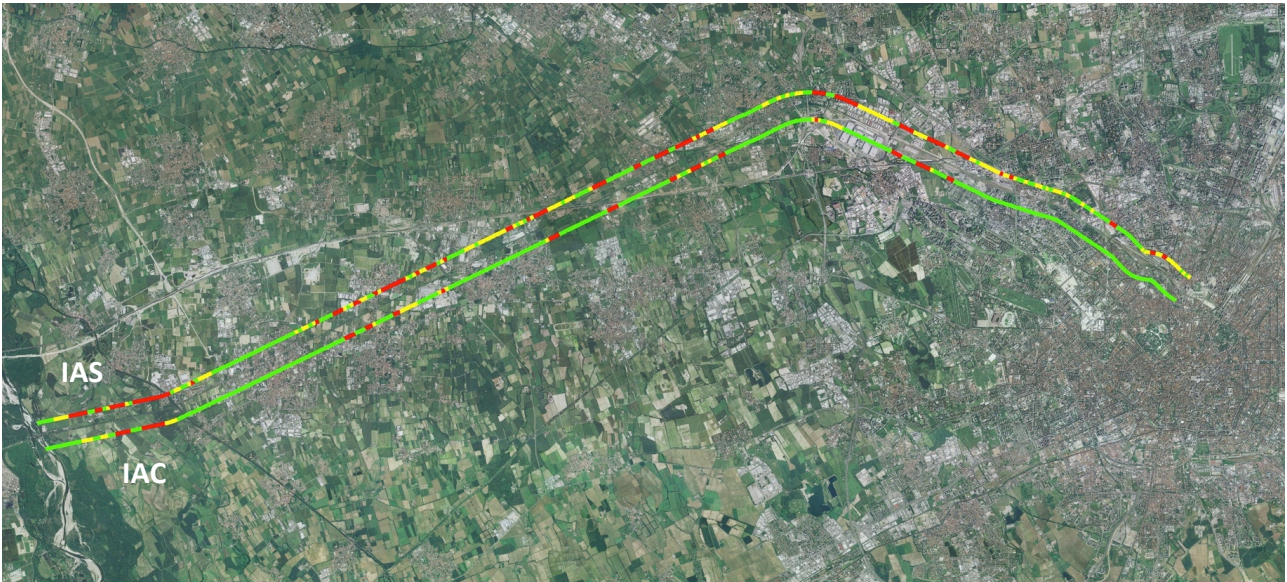


Figura 193 - Mapa tematica relativa agli indici di accessibilità *IAS* e *IAC*.

Ogni *i-esimo* arco, che compone la tratta, è quindi colorato in funzione del valore dell'indice di accessibilità, singolo o combinato in relazione alla legenda di Tabella 22




Legenda [valore indice]	
	Elevata
	Media
	Limitata

Tabella 22 – Legenda indici di accessibilità.

Il colore verde rappresenta un'accessibilità elevata dell'arco ferroviario mentre il rosso identifica una situazione caratterizzata da limitata o assente accessibilità in caso di evento rilevante.

A lato della ferrovia è rappresentata l'area di studio (buffer) di ampiezza pari a 150 metri a destra e sinistra. Anche in questo caso il colore verde rappresenta una classe di uso del suolo contraddistinta da elevata accessibilità mentre il colore rosso indica una situazione di limitata o nulla accessibilità relativa all'indicatore *IUS*.

La validità e l'affidabilità del modello sono validate da alcuni esempi (casi) ritenuti rappresentativi delle elaborazioni ottenibili. Sono stati indentificati 4 casi (A, B, C, D) per i

quali si riporta di seguito la rappresentazione grafica e analitica. In tutti i casi la presenza e la combinazione di alcuni parametri, e il conseguente valore dell'indicatore associato, confermano una buona corrispondenza tra accessibilità determinata dal modello e accessibilità reale visualizzabile da ortofoto.

4.6.2.1 RISULTATO RAPPRESENTATIVO A

Nel caso rappresentativo A di Figura 194 si nota che l'arco 25 è caratterizzato da un colore verde sia per quanto riguarda *IAS* sia *IAC*.

La presenza di una strada carrabile (colore blu) che attraversa la ferrovia (sottopasso) e le classi di uso del suolo costituite da *prati permanenti in assenza di specie arboree ed arbustive* e *seminativi semplici* all'interno del buffer contribuiscono in modo rilevante a garantire l'accessibilità permettendo l'avvicinamento dei soccorsi.



Figura 194 - Risultato rappresentativo A.

Per quanto riguarda *IAC* si analizza una *maggiore* accessibilità fornita anche dal contributo degli archi limitrofi. Se si considera *IAS*, infatti, gli archi 24 e 26 sono rispettivamente contraddistinti da colore giallo e rosso. Se invece si esamina *IAC* il valore dell'indicatore aumenta diventando verde per l'arco 24 e giallo per il 26: in questo caso i due archi *risentono* dell'elevata accessibilità associata all'arco 24.

In Tabella 23 sono riportati i valori degli indicatori che costituiscono gli indici *IAS* e *IAC*. Si nota come l'arco 25 sia contraddistinto da valori massimi, pari a 6⁵⁴, relativi alla presenza di una strada carrabile - *IES*, uso del suolo - *IUS* e tempo di arrivo dei Vigili del Fuoco - *IARR* mentre non sono presenti passaggi a livello - *IPL*- o stazioni/fermate - *ISF*.

⁵⁴ Nella presente caso studio sono stati considerati 6 buffer di ampiezza variabile (B=6) pertanto l'intervallo di variabilità di ciascun indicatore è 0 – 6.

Id_Arco	Indicatori					Indici	
	IPL	ISF	IES	IUS	IARR	IAS	IAC
17	0	0	0	0	0	0,00	1,48
18	0	0	6	6	6	4,06	4,94
19	0	0	4	4	5	2,90	4,12
20	0	0	0	0	0	0,00	0,87
21	0	0	0	0	0	0,00	0,00
22	0	0	0	0	0	0,00	0,00
23	0	0	0	0	0	0,00	0,81
24	0	0	4	4	4	2,71	3,93
25	0	0	6	6	6	4,06	5,49
26	0	0	3	3	3	2,03	3,25
27	0	0	0	0	0	0,00	0,61
28	0	0	0	0	0	0,00	0,00
29	0	0	0	0	0	0,00	0,00

Tabella 23 - Indici e indicatori relativi al risultato rappresentativo A.

4.6.2.2 RISULTATO RAPPRESENTATIVO B

Il risultato rappresentativo B illustrato in Figura 195 evidenzia una situazione caratterizzata da limitata o assente accessibilità alla tratta ferroviaria. In particolare gli archi 30 e 31, colorati in rosso, sono contraddistinti da un valore di *IAS* nullo. Come si evince dall'osservazione dell'ortofoto, infatti, non è presente una rete stradale carrabile e l'uso del suolo è caratterizzato da limitati coefficienti di accessibilità legati alla presenza di *boschi di latifoglie a densità media e alta*.

Il buffer che determina l'area di studio a destra e sinistra della tratta ferroviaria presenta ampie e diffuse colorazioni rosse.

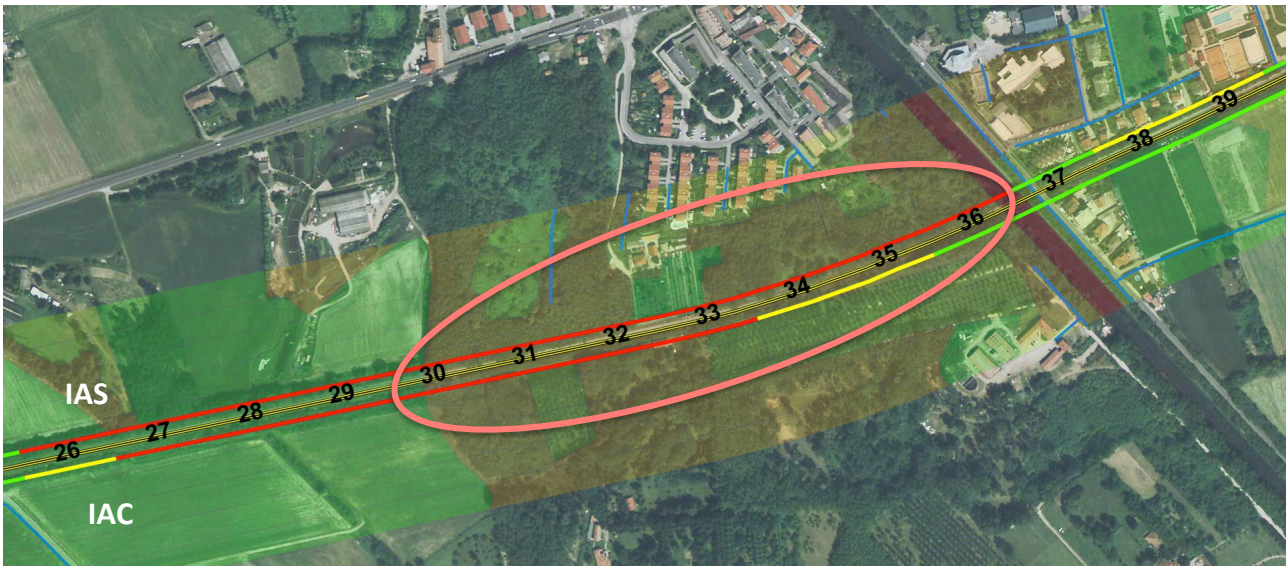


Figura 195 - Risultato rappresentativo B.

Se si analizza *IAC* con particolare riferimento agli archi 34 e 35, si evince una colorazione gialla rispetto a quella rossa associata a *IAS*. Anche in questo caso il contributo dell'arco 36 contraddistinto da una elevata accessibilità (colore verde) viene *ripartito* agli archi contigui facendo aumentare il valore dell'indicatore.

In Tabella 24 sono riportati i valori degli indicatori che costituiscono gli indici *IAS* e *IAC*. Si nota come gli archi 30 e 31 siano contraddistinti da valori nulli relativi alla presenza di una strada carrabile - *IES*, uso del suolo - *IUS*, tempo di arrivo dei Vigili del Fuoco - *IARR*, passaggi a livello - *IPL* e stazioni/fermate - *ISF*.

Id_Arco	Indicatori					Indici	
	IPL	ISF	IES	IUS	IARR	IAS	IAC
30	0	0	0	0	0	0,00	0,00
31	0	0	0	0	0	0,00	0,46
32	0	0	2	2	3	1,55	1,81
33	0	0	1	1	2	0,87	1,80
34	0	0	2	2	3	1,55	2,27
35	0	0	2	2	3	1,55	2,62
36	0	0	3	3	3	2,03	3,72

Tabella 24 - Indici e indicatori relativi al risultato rappresentativo B.

4.6.2.3 RISULTATO RAPPRESENTATIVO C

In Figura 196 è descritto il risultato rappresentativo C che identifica una situazione caratterizzata da limitata accessibilità.

Per quanto riguarda *IAS* gli archi 134 e 135 sono contraddistinti da colore rosso poiché da un lato della ferrovia (parte superiore) è presente un *insediamento industriale, artigianale, commerciale* e dall'altro (parte inferiore) un'area *residenziale discontinua*: entrambe le classi di uso del suolo sono quindi edificate.

Inoltre non sono presenti strade carrabili (in blu) a ridosso della ferrovia ma solo nella parte inferiore è presente una strada a una distanza comunque non inferiore a circa 60 metri.

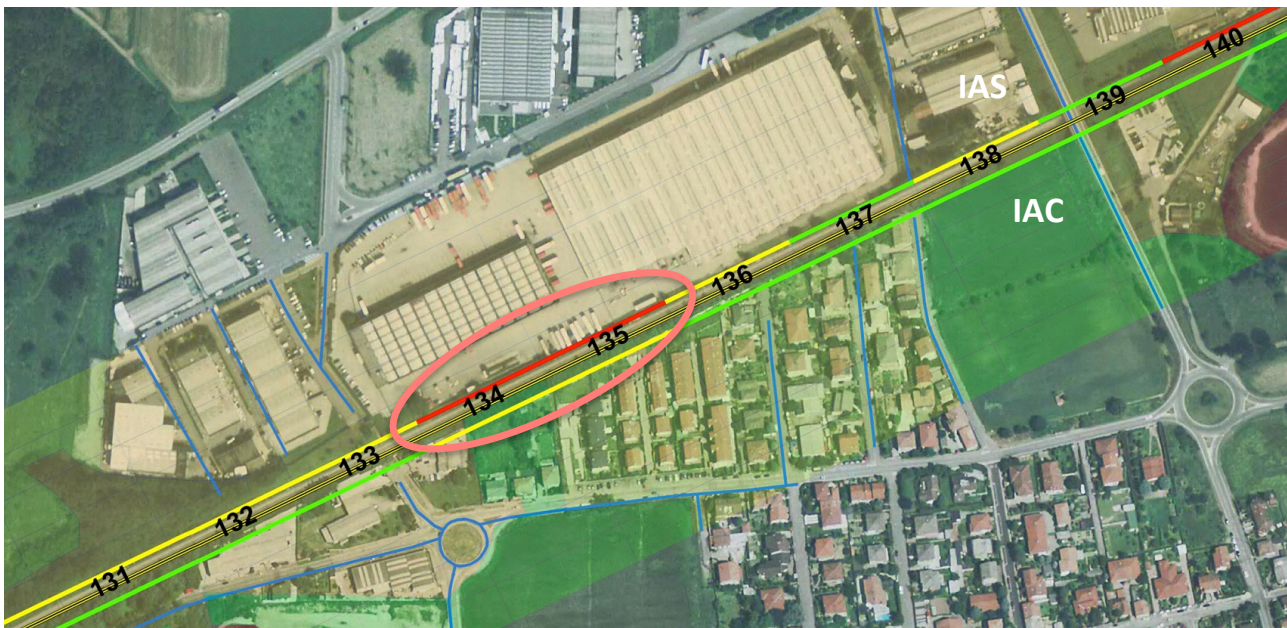


Figura 196 - Risultato rappresentativo C.

Anche in questo caso *IAC* riferito agli archi 134 e 135 presenta valori maggiori rispetto a *IAS*: il colore giallo conferma il contributo in termini di accessibilità fornito dagli archi 133 e 136 contraddistinti da colore verde.

In Tabella 25 sono riportati i valori degli indicatori che determinano gli indici *IAS* e *IAC*. Si nota come gli archi 134 e 135 siano contraddistinti da valori nulli relativi alla presenza di una strada carrabile - *IES*, uso del suolo - *IUS* e tempo di arrivo dei Vigili del Fuoco - *IARR* mentre non sono presenti passaggi a livello - *IPL* o stazioni/fermate - *ISF*.

Id_Arco	Indicatori					Indici	
	IPL	ISF	IES	IUS	IARR	IAS	IAC
132	0	0	5	5	5	3,39	5,22
133	0	0	5	5	5	3,39	5,01
134	0	0	3	3	3	2,03	3,45
135	0	0	2	2	2	1,35	2,78
136	0	0	4	4	4	2,71	4,20
137	0	0	5	6	5	3,61	5,44
138	0	0	5	5	5	3,39	5,69
139	0	0	6	6	6	4,06	5,49

Tabella 25 - Indici e indicatori relativi al risultato rappresentativo C.

4.6.2.4 RISULTATO RAPPRESENTATIVO D

Il risultato rappresentativo D riguarda una situazione contraddistinta da elevati valori di accessibilità: gli archi 82, 83, 88, 94 e 95 sono colorati in verde.

Se si considera *IAS* i 5 archi ferroviari sono infatti attraversati da una strada carrabile (colore blu) e le classi di uso del suolo associate a *reti ferroviarie e spazi accessori, tessuto residenziale discontinuo, impianti sportivi e seminativi semplici*, garantiscono valori elevati di accessibilità.

Sugli archi 94 e 95 sono inoltre presenti rispettivamente un passaggio a livello e una stazione che contribuiscono in modo significativo a determinare i valori di *IAS* e *IAC*.

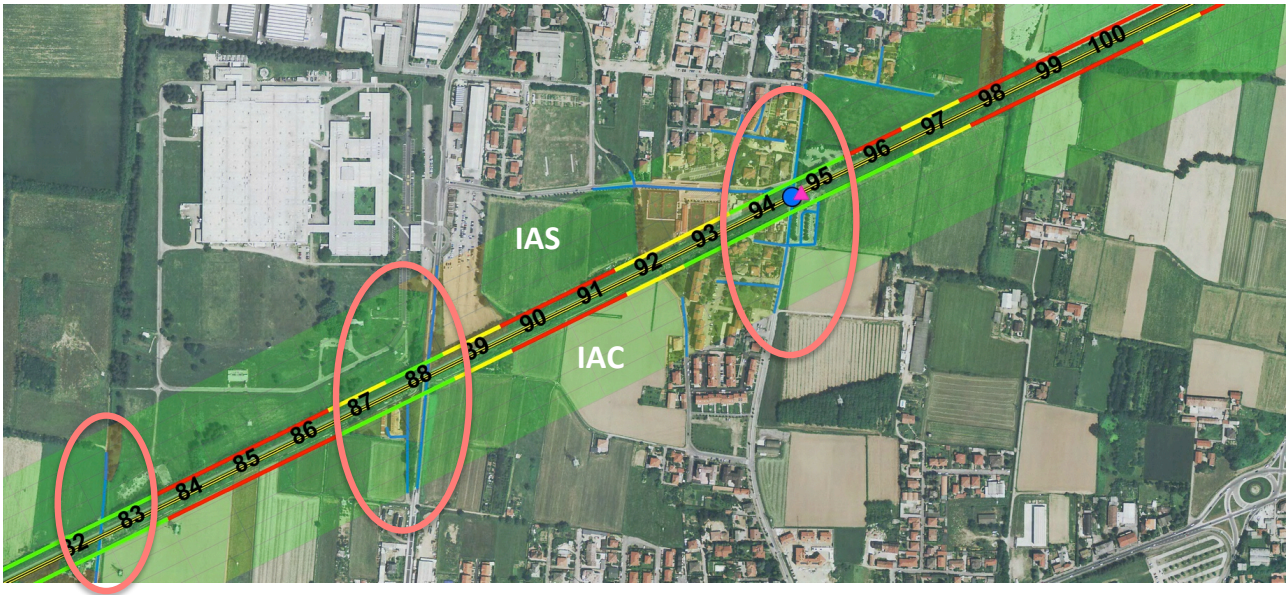


Figura 197 - Risultato rappresentativo D.

Anche in questo caso *IAC* presenta in linea generale valori maggiori rispetto a *IAS*: si nota una sensibile riduzione di archi rossi a favore di una crescente presenza di colore giallo e verde.

In Tabella 26 sono riportati i valori degli indicatori che determinano gli indici *IAS* e *IAC*. In particolare si nota come gli archi 94 e 95 siano contraddistinti da valori massimi relativi alla presenza di una strada carrabile - *IES*, uso del suolo - *IUS* e tempo di arrivo dei Vigili del Fuoco - *IARR* e anche alla presenza di passaggi a livello - *IPL* e stazioni/fermate - *ISF*.

Id_Arco	Indicatori					Indici	
	IPL	ISF	IES	IUS	IARR	IAS	IAC
82	0	0	6	6	6	4,06	6,21
83	0	0	5	5	6	3,58	4,80
84	0	0	0	0	0	0,00	1,07
85	0	0	0	0	0	0,00	0,00
86	0	0	0	0	0	0,00	0,87
87	0	0	4	4	5	2,90	4,12
88	0	0	6	6	6	4,06	5,60
89	0	0	3	3	4	2,23	3,45
90	0	0	0	0	0	0,00	0,67
91	0	0	0	0	0	0,00	0,67
92	0	0	3	3	4	2,23	2,96
93	0	0	3	4	4	2,45	4,63
94	6	0	6	6	6	5,03	7,28
95	0	6	6	6	6	5,03	7,01
96	0	0	2	2	3	1,55	3,93
97	0	0	4	4	5	2,90	3,37
98	0	0	0	0	0	0,00	1,13
99	0	0	1	1	2	0,87	1,13
100	0	0	1	1	2	0,87	1,74

Tabella 26 – Indici e indicatori relativi al risultato rappresentativo D.

5 CONCLUSIONI E POSSIBILI SVILUPPI

Il lavoro di ricerca illustrato ha previsto un'attività di implementazione del metodo di calcolo dell'accessibilità alla rete ferroviaria in emergenza e successivamente, l'applicazione dello stesso alla linea ferroviaria storica Torino – Milano al fine di valutarne la validità e la consistenza. Di seguito sono riportate le conclusioni e i possibili sviluppi.

5.1 CONCLUSIONI

L'accessibilità alla rete ferroviaria in condizioni di emergenza costituisce certamente un requisito essenziale per il *buon* esito delle operazioni di soccorso. I principali eventi incidentali avvenuti in ambito nazionale e comunitario hanno confermato come in alcuni contesti l'accesso a una linea ferroviaria possa talvolta risultare un'operazione complessa provocando quindi un aumento del tempo di intervento.

Accade spesso, infatti, che i Servizi di Pronto Intervento, tra cui ad esempio Vigili del Fuoco e Soccorso Sanitario, utilizzino il sistema stradale, in linea generale più rapido ed efficace rispetto a quello ferroviario, per avvicinarsi al luogo dell'evento con idonei e specifici mezzi e attrezzature. Non sempre poi è possibile raggiungere la sede ferroviaria utilizzando la viabilità ordinaria: può verificarsi la situazione in cui è necessario percorrere *l'ultimo tratto*, che separa la strada dalla ferrovia, a piedi. Da qui l'esigenza di considerare e analizzare non solo il sistema stradale ma anche la tipologia di uso del suolo a ridosso della ferrovia e l'eventuale presenza di *ostacoli e/o impedimenti*.

Conoscere quindi quelle tratte ferroviarie caratterizzate da una limitata accessibilità permette di identificare alcuni interventi di carattere gestionale o infrastrutturale finalizzati al miglioramento dell'accessibilità stessa.

L'obiettivo della ricerca consiste nell'implementazione di uno Strumento di Supporto alle Decisioni – *DSS* – basato su un metodo di calcolo che permette l'elaborazione di specifiche mappe di accessibilità alla rete ferroviaria. Il metodo considera 15 parametri ritenuti rappresentativi dell'accessibilità al sistema ferroviario e li aggrega in 9 indicatori che, opportunamente pesati, costituiscono l'indice di accessibilità di un generico arco ferroviario.

Lo strumento implementato può quindi essere utilizzato nella fase di *pre-evento* in cui è necessario pianificare in modo congiunto la gestione di un'emergenza, oppure nella fase *post-evento* quando il coordinamento tra i Soccorsi richiede la conoscenza dei punti di accesso alla rete ferroviaria in cui far convergere nel minimo tempo possibile personale, mezzi e attrezzature.

5.1.1 CORRISPONDENZA DEL MODELLO CON LA REALTÀ

Il modello di calcolo implementato è stato applicato alla linea ferroviaria storica Torino – Milano al fine di valutare l'efficacia delle elaborazioni e dei risultati. Le mappe di accessibilità descritte nel paragrafo 4.6.2, per i quattro casi ritenuti rappresentativi, hanno confermato un buon livello di corrispondenza con la realtà.

I parametri e gli indicatori analizzati per ogni arco di lunghezza pari a 100 metri e un'area di studio di 150 metri a destra e sinistra della ferrovia, hanno permesso di determinare un indice di accessibilità che, secondo un approccio comparativo, consente il confronto tra gli archi e quindi l'individuazione di quelli *più critici*.

La rappresentazione dei risultati in forma grafica (colore degli archi) e analitica (valore di ogni indicatore che compone l'indice) è stata confrontata con l'ortofoto di Regione Lombardia: nei quattro casi riportati si apprezza che il valore dell'indice e degli indicatori che lo costituiscono riproducono fedelmente lo stato reale in termini di accessibilità alla ferrovia.

5.1.2 POSSIBILITÀ DI RAPPRESENTAZIONI GLOBALI E PARZIALI DEL MODELLO

Tra le principali specificità del modello implementato c'è la possibilità di rappresentare in tutto o in parte gli indicatori che costituiscono l'indice di accessibilità.

In questo modo risulta possibile elaborare delle mappe tematiche relative a un solo indicatore o a più indicatori aggregati in funzione delle specifiche esigenze e necessità dell'utente.

Si pensi ad esempio all'indicatore *IARR* che consiste nel calcolo del tempo di arrivo dei Vigili del Fuoco sul punto in cui si è verificato l'evento incidentale utilizzando la rete stradale. La possibilità di *estrarre* e rappresentare solo questo indicatore potrebbe essere di estrema importanza per i Vigili del Fuoco e non solo, in quanto permette di stimare a priori o in caso di necessità (durante l'emergenza) i tempi di intervento dai presidi e distaccamenti deputati all'intervento. Tale attività si configura quindi come una stima della *resilienza*⁵⁵ del territorio ovvero la capacità di *resistere* e *reagire* in seguito all'accadimento di eventi rilevanti⁵⁶.

⁵⁵ Dal latino *resilio*. Viene spesso proposto un *collegamento* tra il significato originario che identificava anche il gesto di risalire sull'imbarcazione capovolta dalla forza del mare e l'attuale utilizzo.

⁵⁶ E. Galanti (2010). La protezione civile nella pianificazione e gestione delle emergenze sismiche: dal nulla a riferimento su scala mondiale. Potenza 19 novembre 2010.

5.1.3 METODO REPLICABILE IN ALTRI CONTESTI

I parametri, la loro aggregazione in indicatori e l'indice di accessibilità, che sottendono al metodo di analisi e calcolo, sono stati identificati e determinati affinché l'applicazione dello strumento non sia vincolata in uno specifico ambito territoriale e contestuale. Le caratteristiche di flessibilità e modularità consentendo l'utilizzo del metodo in qualsiasi contesto permettendo all'analista, qualora se ne verificasse la necessità, di variare alcuni coefficienti e pesi in funzione del livello di dettaglio atteso. Si pensi, ad esempio, alla lunghezza degli archi ferroviari (in questa ricerca pari a 100 metri), alla larghezza dell'area di studio e alla dimensione delle celle (buffer): la valutazione numerica di tali scelte è il risultato di analisi che comprendono da un lato l'onere computazione atteso e dall'altro la scala cui si effettua l'analisi e l'ambito contestuale. Sarà sufficiente quindi variare alcuni valori (coefficienti e parametri) per meglio contestualizzare e adattare il modello al territorio oggetto dello studio.

5.2 POSSIBILI SVILUPPI

Un modello di calcolo, implementato per riprodurre avvenimenti reali, necessità di ipotesi che permettono la parametrizzazione dei fenomeni che si intende riprodurre. Nel presente lavoro di ricerca sono state descritte le ipotesi effettuate e le scelte metodologiche che hanno permesso il conseguimento dei risultati attesi.

Seppur l'attività svolta abbia portato a risultati concreti e di utilità operativa, di seguito sono riportati alcuni possibili sviluppi della ricerca ritenuti utili per il miglioramento dello strumento proposto.

5.2.1 PARAMETRI E INDICATORI NON CONSIDERATI NEL PRESENTE STUDIO

L'analisi dell'accessibilità al sistema ferroviario ha portato all'identificazione di 15 parametri opportunamente aggregati in 9 indicatori. In questa fase della ricerca si è posta l'attenzione su 5 dei 9 indicatori ritenuti rappresentativi dell'accessibilità. Il proseguimento della ricerca potrebbe essere indirizzato verso l'analisi degli altri 4 indicatori individuati ma non attualmente contemplati nella metodologia o addirittura allo studio di ulteriori parametri che condizionano l'accessibilità dei soccorsi in condizioni di emergenza.

5.2.2 AMBITI CONTESTUALI

In questa fase della ricerca l'analisi è stata condotta per le tratte ferroviarie a cielo aperto in quanto l'accessibilità nelle gallerie è un elemento già normato da uno specifico Decreto Ministeriale (Decreto Ministeriale 28/10/2005 n°. 264. Sicurezza nelle gallerie ferroviarie. G.U. n. 83 del 8-04-2006 - S.O. n. 89).

Per quanto riguarda le tratte a cielo aperto è possibile distinguere, in linea generale, i seguenti contesti ferroviari in cui è possibile che avvenga un evento rilevante:

- Piano campagna;
- Rilevato/trincea;
- Ponte/viadotto.

Il metodo di calcolo valuta i tre contesti sopra elencati senza distinzione, non considerando le differenze di quota tra piano del ferro (binari) e territorio circostante (es. piano campagna e viadotto). Un ulteriore avanzamento della ricerca potrebbe quindi prevedere l'analisi delle quote altimetriche al fine di conoscere meglio l'interazione tra ferrovia e ambiente circostante (territorio) che, oltre certe differenze di quota, potrebbe influenzare le operazioni di soccorso in condizioni di emergenza.

5.2.3 MODELLO DI STIMA DELLA PROBABILITÀ DI ACCADIMENTO EVENTI INCIDENTALI

Il modello di calcolo implementato per stimare la probabilità di accadimento su una tratta considera attualmente i tre eventi critici suggeriti dal Decreto Ministeriale relativo alla sicurezza nelle gallerie ferroviarie:

- Svio;
- Collisione;
- Incendio.

La procedura di calcolo si basa sui volumi di traffico (passeggeri e merci) circolanti e su dati di incidentalità media nazionale per ciascuno dei tre eventi (n° eventi anno/treni km anno). La ricerca potrebbe prevedere un'analisi di dettaglio relativa al sottomodulo di stima della probabilità incidentale considerando ulteriori eventi critici associati, ad esempio, a scenari di rischio passivo (rischi naturali e ambientali): in questo modo risulta possibile sovrapporre specifiche mappe tematiche di rischio alla rete ferroviaria identificando gli archi o le tratte caratterizzati da elevati valori di criticità.

Un ulteriore sviluppo potrebbe considerare le caratteristiche tecniche - infrastruttura e impianti - della tratta ferroviaria che influenzano la probabilità di accadimento di un evento incidentale.

5.2.4 EFFETTI DELLE CONDIZIONI METEOCLIMATICHE

Il modello di calcolo dell'accessibilità alla rete ferroviaria dipende anche dagli indicatori che riguardano la presenza ed estensione di una rete stradale e classe di uso

del suolo a lato della ferrovia. L'avvicinamento delle squadre di soccorso può quindi essere influenzato dalla percorribilità di una strada e del territorio limitrofo. Le condizioni meteorologiche possono talvolta costituire un elemento di riduzione/ostacolo in termini di accessibilità. Si pensi ad esempio alla presenza di neve sulle strade o sui terreni vicino alla sede ferroviaria che nelle zone montane potrebbe ritardare o addirittura impedire l'avvicinamento dei Servizi di Pronto Intervento.

In questa fase della ricerca il metodo implementato non considera i fattori meteorologici che potrebbero essere oggetto di approfondimenti al fine di stimare e valutare l'influenza di tali effetti sull'accessibilità alla rete, utilizzando e sovrapponendo specifiche mappe associate ai rischi naturali.

5.2.5 VERIFICA PESI, COEFFICIENTI E ASSUNZIONI

All'interno del modello di calcolo sono stati introdotti pesi di importanza relativa e coefficienti necessari alla valutazione di ciascun indicatore. A titolo esemplificativo si consideri k , coefficiente di vicinanza/contiguità (cfr. paragrafo 3.3), che permette di relazionare il valore di accessibilità tra archi contigui (in sostanza si tiene conto del fatto che un arco caratterizzato da un indice di accessibilità limitata o nulla, contiguo a uno con indice di accessibilità elevata, risenta degli effetti di quest'ultimo anche in funzione della lunghezza).

L'attribuzione dei valori numerici, quale ad esempio la lunghezza degli archi, è stata effettuata a seguito di specifiche valutazioni giustificando le scelte compiute. Si ritiene comunque necessario, ai fini del proseguimento della ricerca, eseguire delle ulteriori analisi di sensitività di pesi e coefficienti al fine di poterne conoscere la dipendenza del modello e procedere successivamente con un'ulteriore fase di calibrazione del modello stesso.

5.2.6 PROPOSTA INTERVENTI MIGLIORATIVI AI FINI DELL'ACCESSIBILITÀ

L'obiettivo primario della ricerca consiste nell'implementazione di uno strumento di supporto alle decisioni in grado di fornire indicazioni circa gli archi ferroviari caratterizzati da un valore dell'indice di accessibilità limitato o nullo. La possibilità di creare una gerarchia degli interventi sugli archi ritenuti maggiormente critici richiede tuttavia la definizione di soluzioni e interventi finalizzati al miglioramento dell'accessibilità.

Il proseguimento della ricerca potrebbe essere orientato anche verso la definizione di interventi di carattere gestionale o infrastrutturale da attuare a seguito di una *valutazione di massima* relativa alla fattibilità degli stessi (in accordo con il Gestore

dell'Infrastruttura). Tra gli interventi gestionali, ad esempio, potrebbe essere considerato il provvedimento di riduzione della velocità dei convogli come elemento di prevenzione e quindi *diminuzione* della probabilità di accadimento di uno specifico evento incidentale oppure la raccomandazione di mantenere agibile e transitabile un strada (sentiero) che permette l'avvicinamento dei soccorsi alla ferrovia. Gli interventi di carattere infrastrutturale potrebbero invece consistere in misure relative alle *costruzione* o modifica (ad esempio allargamento) di piste/vie d'accesso per le squadre di soccorso in avvicinamento al luogo dell'evento (arco ferroviario).

5.2.7 AUTOMAZIONE DEL PROCESSO DI CALCOLO

Un ulteriore spunto per il proseguimento della ricerca consiste nell'ingegnerizzazione e automazione del processo di calcolo. Il metodo e la procedura implementati, infatti, richiedono attualmente l'attività di un operatore *esperto* che effettui le elaborazioni con strumenti *GIS* e successivamente con fogli di calcolo per la determinazione degli indicatori e degli indici e delle rispettive mappe di accessibilità.

È auspicabile, quindi, una valutazione tecnica che consideri la possibilità di automatizzare il processo di calcolo a partire anche dalla creazione di un applicativo che mediante l'impiego di un'interfaccia grafica (es. maschere) supporti l'utente in tutta la fase dell'analisi, dall'inserimento dei dati all'estrazione e rappresentazione dei risultati ottenuti.

6 BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- ANAS S.p.A. (2009). Linee guida per la progettazione della sicurezza nelle Gallerie Stradali secondo la normativa vigente.
- ANSF (2010). Rapporto Annuale sulla Sicurezza delle ferrovie italiane ricadenti nelle competenze dell'Agazia Nazionale per la Sicurezza delle Ferrovie - ANNO 2010;
- Bignami D., (2010) Protezione civile e riduzione del rischio disastri. Maggioli Editore.
- Borghetti F., Maja R., Marchionni G., Ponti M., Rainoldi G., (2007). Convenzione con il Dipartimento della Protezione Civile Nazione, progetto "*Vulnerabilità e modello d'intervento per la gestione delle reti viarie in seguito a eventi rilevanti*": relazione finale della prima annualità.
- Bruglieri M., Colorni C., (2012). Ricerca Operativa. Zanichelli.
- Commissione Europea (2010). Libro Bianco - La politica europea dei trasporti fino al 2010: il momento delle scelte
- Comunità Europea (2004). Direttiva 2004/49/CE. Direttiva in materia di sicurezza per le ferrovie comunitarie.
- Cristalli Umberto (a.a. 2004/2005). Tecnica ed Economia dei Trasporti. Roma Tor Vergata.
- Decreto Legislativo 5/10/2006 n°. 264. Attuazione della direttiva 2004/54/CE in materia di sicurezza per le gallerie della rete stradale transeuropea. G.U. n. 235 del 9-10-2006 - S.O. n. 195.
- Decreto Ministeriale 28 ottobre 2005 - Sicurezza nelle gallerie ferroviarie. G.U. n. 83 del 8-4-2006 - S.O. n. 89.
- Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri 6 aprile 2006. Coordinamento delle iniziative e delle misure finalizzate a disciplinare gli interventi di soccorso e di assistenza alla popolazione in occasione di incidenti stradali, ferroviari, aerei ed in mare, di esplosioni e crolli di strutture e di incidenti con presenza di sostanze pericolose.
- Galanti E. (2010). La protezione civile nella pianificazione e gestione delle emergenze sismiche: dal nulla a riferimento su scala mondiale. Potenza 19 novembre 2010.
- ISO – IEC (1999). Safety aspects - Guidelines for their inclusion in standards.
- Lancia G. (2002). Mathematical Programming Approaches for Computational Biology Problems, in Modelli e Algoritmi per l'Ottimizzazione di Sistemi Complessi, Atti della Scuola CIRO 2002, a cura di A. Agnetis e G. Di Pillo, Pitagora Editrice, 265-310.

- Maggino F. (2006). Gli indicatori statistici: concetti, metodi e applicazioni. Università degli Studi di Firenze.
- Maja R., Marchionni G., Ponti M. (2014). Vulnerabilità delle reti stradali. In *Trasporti e Città – Mobilità e pianificazione urbana*. Egaf Editore.
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti - Ufficio di statistica. (2010-2011). Conto Nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti. Roma: Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato S.p.A.
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti - Ufficio di statistica. (2009). Rapporto sull'incidentalità nei trasporti.
- Ministero dell'Interno (2005). Soccorso Italia in 20'. Dipartimento dei Vigili del Fuoco, del Soccorso e della Difesa Civile, Roma.
- OECD. (2008). Handbook on Constructing Composite Indicators. Methodology and User Guide . European Commission.
- Olivieri A. (2013). Mappatura dinamica accessi della sede ferroviaria, Master IISF Università Sapienza Roma. Direzione Territoriale Produzione Firenze di Rete Ferroviaria Italiana.
- Trenitalia. Nuovo treno a due piani. Spazio e comfort al servizio dei viaggiatori
- Rainoldi G. (2013). Corso di Dottorato in Infrastrutture e Trasporti XXV Ciclo – Università LaSapienza.
- Simonetti S. (2002). Rischio ambientale – Il rischio della civiltà industriale. Dario Flaccovio Editore.
- Torelli U. Porte aperte ai manager dei numeri, *Economia & Carriere*, Corriere della Sera, venerdì 13 Aprile 2007.
- UNDRO, (1979), Natural Disasters and Vulnerability Analysis, Report of Expert Group Meeting 9–12 July 1979, Office of the United Nations Disaster Relief Coordinator, Geneva.

Sitografia

- www.ansf.it - Agenzia Nazionale per la Sicurezza Ferroviaria
- www.bai.it - Brescia Antincendi International
- www.era.europa.eu - European Railway Agency
- www.isfort.it - Istituto superiore di formazione e ricerca per i trasporti
- <http://m.ffs.ch>
- www.protezionecivile.gov.it - Dipartimento Protezione Civile Nazionale

- www.rfi.it - Rete Ferroviaria Italiana
- www.trenitalia.com - Trenitalia
- www.vigilfuoco.it - Corpo Nazionale Vigili del Fuoco
- www.cartografia.regione.lombardia.it/geoportale - GeoPortale Regione Lombardia