

# CARATTERIZZAZIONE DELLA VULNERABILITÀ DELL'AREA CIRCOSTANTE IMPIANTI SOTTOPOSTI ALLA NORMATIVA SEVESO

Roberto Bubbico, Leonardo G. Luccone, Barbara Mazzarotta, Barbara Silveti  
Dip. Ing. Chimica, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Via Eudossiana 18, 00184 Roma  
[silveti@ingchim.ing.uniroma1.it](mailto:silveti@ingchim.ing.uniroma1.it)

## SOMMARIO

Questo lavoro propone una metodologia per la valutazione della vulnerabilità dell'ambiente intorno ad un'installazione a rischio di incidente rilevante che tiene conto sia della distribuzione geografica dei *target* che compongono l'ambiente, che della tipologie e dell'estensione delle zone di impatto dei *top event* che si possono verificare nell'impianto. La caratterizzazione dell'ambiente viene effettuata mediante procedure automatizzate basate su database GIS (Geographical Information System), considerando vari tipi di *target* suddivisi nelle categorie popolazione, ambiente naturale e antropizzato. La vulnerabilità dei singoli *target* in funzione della loro distanza dal sito viene valutata, per ogni incidente rilevante, mediante analisi delle conseguenze applicando funzioni di *probit* per valutare la percentuale di danno che può subire il *target*. La procedura consente di ottenere mappe di vulnerabilità, sia per ogni categoria di *target* che globali, assegnando opportuni "pesi" alle varie tipologie di *target*: le mappe sono direttamente utilizzabili per la pianificazione territoriale nella zona circostante l'impianto.

## 1. INTRODUZIONE

La caratterizzazione della vulnerabilità delle aree intorno ad uno stabilimento a rischio di incidente rilevante rappresenta senza dubbio una condizione molto importante per garantire la piena compatibilità tra l'installazione industriale ed il territorio circostante. Questo ruolo di primo piano è riconosciuto a livello legislativo dal DM del 9 maggio 2001 [1] in cui all'art. 6 comma 1 si prevede che "*Per gli stabilimenti e il territorio ricadenti in un'area ad elevata concentrazione di cui all'articolo 13 del decreto legislativo 17 agosto 1999, n. 334, gli strumenti di pianificazione territoriale e urbanistica tengono conto delle risultanze, ove disponibili, della valutazione dello studio di sicurezza integrato dell'area e del relativo piano di intervento*". Con questo DM si prevedono, quindi, i requisiti minimi di sicurezza in materia di pianificazione urbanistica e territoriale come attuazione dell'art. 14 del D.Lgs 334/99, recepimento in Italia della Direttiva Seveso II [2].

La caratterizzazione della vulnerabilità ambientale si presenta però come un problema complesso, per il numero e la varietà dei possibili elementi (*target*) che compongono l'ambiente (persone, piante, corsi d'acqua, infrastrutture, ecc.), per il reperimento di dati sulla loro distribuzione sul territorio, per la definizione stessa della vulnerabilità di questi elementi ai vari tipi di "danno" che un incidente rilevante può provocare, e per la difficoltà di derivare una vulnerabilità "globale" a partire da quella dei singoli elementi. Ne consegue che spesso il lavoro di caratterizzazione della vulnerabilità ambientale richiede, oltre alla conoscenza di molte informazioni, tempo ed esperienza, e può portare a risultati diversi in riferimento ai siti ai quali viene applicata la procedura ed a possibili differenti definizioni della vulnerabilità.

Gli studi esistenti su questo argomento sono per lo più focalizzati sulla definizione di "indici" di rischio [3-5]: alcuni dei metodi proposti sono molto dettagliati [3,4], ma pongono l'attenzione solo sulle problematiche riferite agli organismi viventi; altri metodi [5] sono orientati verso la semplificazione del problema, ma non consentono di prendere in esame aspetti di maggior dettaglio. Un'analisi più approfondita delle metodologie proposte per valutare la vulnerabilità ambientale è riportata altrove [6].

Questo lavoro propone una metodologia per la valutazione della vulnerabilità ambientale basata sull'utilizzo di sistemi GIS per pervenire ad una mappatura completa ed automatizzata dei vari elementi che costituiscono l'ambiente, accoppiata con opportune funzioni che esprimano, per ogni tipologia di *target* e di danno derivante da incidente rilevante, la vulnerabilità in funzione della distanza dal sito. Il risultato finale è una mappa della vulnerabilità ambientale intorno al sito, sia riferita ai singoli *target* che globale, valutata attraverso l'assegnazione di opportuni "pesi" ai vari tipi di *target*.

## 2. METODOLOGIA

La metodologia prevede i seguenti passi:

- Definizione dell'area di studio;
- Definizione dei *target* ambientali e quantificazione della loro distribuzione nell'area di studio;
- Valutazione della probabilità di danno di ogni tipo di *target* in conseguenza dei *top event*;
- Mappatura della vulnerabilità per ogni tipo di *target* e della vulnerabilità globale.

### 2.1 Definizione dell'area di studio

La metodologia prevede di considerare un'area di interesse centrata sullo stabilimento, la cui estensione va stabilita sulla base dell'area di impatto stimata per i *top event* riportati nei rapporti di sicurezza degli impianti a rischio di incidente rilevante. Le distanze di danno sono notevolmente maggiori per gli incidenti rilevanti in cui è presente la dispersione di una sostanza tossica che non per quelli in cui siano coinvolte sostanze infiammabili; l'ampiezza dell'area di impatto, inoltre, dipende dalle condizioni meteorologiche della località in cui si trova il sito industriale e dalla morfologia del territorio circostante.

Nella gran parte dei casi pratici, un'area di studio di 20 km x 20 km è adatta all'analisi della vulnerabilità ambientale nel caso in cui tra i *top event* previsti per l'impianto sia presente la dispersione massiccia di una sostanza tossica, mentre un'area di studio di dimensioni più ridotte, ad esempio 2 km x 2 km, può essere sufficiente nel caso di *top event* del tipo di incendi ed esplosioni, che prevedano effetti di irraggiamento e sovrappressione.

Per la mappatura della vulnerabilità ambientale è quindi opportuno suddividere l'area di studio in maglie di dimensioni più piccole, per ognuna delle quali verranno quantificati i *target* ed effettuati i calcoli della vulnerabilità. La scelta della dimensione delle maglie è legata al grado di dettaglio dei dati disponibili ed all'accuratezza richiesta per i risultati: è pure possibile utilizzare maglie di dimensioni diverse, mantenendole più fitte in prossimità dell'impianto, dove sono attesi i danni maggiori, ed aumentandone le dimensioni nelle zone più distanti. A titolo di esempio, all'interno di una zona di studio di 20 km x 20 km si può utilizzare una griglia di 500 m x 500 m nelle zone più lontane dallo stabilimento ed una griglia di 50 m x 50 m in una zona di ampiezza più limitata (ad esempio 2 km x 2 km) centrata sull'impianto.

A tal fine è stata predisposto un applicativo GIS con la procedura per la proiezione della griglia relativa all'area di studio sul territorio circostante il sito industriale [7].

### 2.2 Definizione e quantificazione dei *target* ambientali

I possibili elementi che caratterizzano l'ambiente sono stati suddivisi in tre tipologie di *target*:

- Popolazione;
- Ambiente naturale (piante, acque, ecc.);
- Ambiente antropizzato (tessuto urbano, siti industriali, ecc.).

In funzione del grado di dettaglio dei dati disponibili, ogni tipologia può essere a sua volta suddivisa in sottogruppi, in modo da ottenere una descrizione più accurata dell'ambiente: ad esempio, nell'ambito dell'ambiente naturale, si possono considerare separatamente i boschi, i terreni irrigui, ecc.

Le informazioni relative alla distribuzione delle varie tipologie di *target* nell'area di studio si possono ottenere da una serie di database GIS commerciali e non, che forniscono dati georeferenziati che definiscono la localizzazione e l'estensione di vari elementi che fanno parte dell'ambiente. Ad esempio, sono disponibili dati relativi all'uso del suolo, in cui le aree destinate alle varie utilizzazioni sono rappresentate mediante poligoni, dati sul censimento della popolazione residente, in cui viene riportato il numero di abitanti in ogni poligono di interesse (località abitata, zona censuaria, ecc.), rappresentazioni della rete stradale e ferroviaria, in forma di linee spezzate, ecc. In molti casi è possibile integrare tali informazioni di tipo generale con dati più specifici della zona in cui si trova il sito facendo riferimento agli enti locali.

Una volta acquisite le informazioni relative alla tipologia e distribuzione dei *target* ambientali, si procede alla loro quantificazione. Per effettuare questa operazione è stata messa a punto, sempre su GIS, una procedura automatica che provvede a quantificare i vari *target* per ognuna delle maglie in cui è suddivisa la griglia. I risultati sono forniti in forma adimensionale, attraverso un fattore di quantificazione variabile tra 0 ed 1. Questo fattore è definito dal rapporto tra il numero di elementi del *target* presenti nella maglia considerata ed il massimo numero di elementi di quel tipo che può essere presente nella stessa maglia. Ad esempio, se il *target* in esame è un terreno agricolo, il fattore di quantificazione è dato dal rapporto tra la superficie di terreno agricolo presente nella maglia e la superficie della maglia stessa.

Per quanto riguarda la popolazione, occorre però definire a priori un valore massimo di densità di popolazione atteso: la corretta scelta di questo valore riveste la massima importanza, poiché valori

eccessivamente alti porterebbero a fattori di quantificazione molto bassi, mentre valori eccessivamente bassi non consentirebbero di discriminare efficacemente le zone a maggiore densità di popolazione rispetto alle altre. Un possibile criterio di scelta è quello di riferirsi a valori di densità di popolazione che siano superati, a livello nazionale o locale, solo in una piccola percentuale dei casi [7].

### 2.3 Valutazione della probabilità che i *target* siano danneggiati dalle conseguenze dei *top event*

Gli incidenti rilevanti attesi per l'impianto industriale sono descritti nel rapporto di sicurezza, in cui vengono fornite anche informazioni relative alle aree di impatto e alle distanze di danno. Queste informazioni possono essere acquisite tal quali, o utilizzate come dati di partenza per eseguire delle simulazioni attraverso l'applicazione dell'analisi delle conseguenze [8]. Questa tecnica consente di valutare i profili di concentrazione, radiazione termica e sovrappressione generati dal *top event* nel tempo e nello spazio a partire dalle informazioni relative alla tipologia di incidente (sostanza coinvolta, stato fisico, condizioni operative, caratterizzazione delle modalità di fuoriuscita del prodotto, ecc.) ed alle condizioni meteorologiche ed ambientali del sito.

La conoscenza di questi profili costituisce l'elemento fondamentale per valutare la probabilità che i vari tipi di *target* considerati subiscano danni. Infatti, occorre tenere presente che, in generale, ogni *target* può presentare una specifica vulnerabilità agli effetti associati ai *top event*: ad esempio, la dispersione di una sostanza tossica è in grado di causare danni alla popolazione e ad alcuni *target* appartenenti alla tipologia ambiente naturale, ma non all'ambiente antropizzato; ancora, la radiazione termica avrà effetti su gran parte dei *target*, ma non sui corsi d'acqua, ecc.

Una volta stabilito quali tipologie di *target* possano subire un danno in conseguenza degli effetti (concentrazione di sostanza tossica, radiazione termica, sovrappressione) derivanti dai vari *top event*, occorre definire una funzione che leghi la probabilità che il *target* subisca il danno alla distanza del *target* stesso dal sito industriale. La relazione tra probabilità di subire un danno e "dose" di effetto subita dal *target* è espressa usualmente mediante funzioni di *probit* [9]:

$$Y = k_1 + k_2 \ln V \quad (1)$$

dove:

- Y è il *probit* (probability unit) variabile correlata alla probabilità;
- V è la "dose", che assume espressioni diverse dipendentemente dal tipo di effetto considerato:
  - esposizione a tossici:  $V = C^n \cdot t$  ( $C$  concentrazione;  $t$  tempo di esposizione);
  - irraggiamento:  $V = I^{4/3} \cdot t$  ( $I$  intensità radiazione,  $t$  tempo di esposizione);
  - sovrappressione:  $V = p^o$  ( $p^o$  sovrappressione);
- $k_1$ ,  $k_2$  ed  $n$  sono parametri dipendenti dal fenomeno considerato, dal tipo di *target* e di danno e, per l'esposizione a tossici, dalla sostanza coinvolta.

La conoscenza dei profili di concentrazione di sostanza tossica, irraggiamento e sovrappressione in funzione della distanza dal punto di emissione, calcolati per ognuno dei *top event*, e delle funzioni di *probit* per ogni tipologia di *target* consente di derivare delle funzioni che leghino la probabilità che quel tipo di *target* subisca un danno in conseguenza ad un determinato *top event* alla distanza del *target* stesso dal punto di emissione.

Ove lo si ritenga utile è anche possibile tenere conto dell'influenza della distribuzione locale delle direzioni di provenienza del vento per quei fenomeni, come la dispersione di sostanze tossiche, il flash fire, ecc., che sono sensibili a tale variabile.

### 2.4 Mappatura della vulnerabilità

La conoscenza della distribuzione dei *target* sul territorio e delle funzioni che legano la probabilità che essi subiscano danni alla loro localizzazione rispetto all'impianto consente di costruire delle mappe di vulnerabilità di ogni tipo di *target* agli effetti di ogni *top event*. La vulnerabilità dei *target* viene valutata per ogni maglia come prodotto del fattore di quantificazione del *target* e della probabilità che il *target* subisca un danno, valutata sulla base della distanza media tra il centro della maglia e il punto di emissione: nella maggior parte dei casi, per semplicità si può far coincidere il punto di emissione con il centro dell'impianto. La mappa di vulnerabilità assegna quindi ad ogni maglia il valore di probabilità di danno subito da ogni *target* in conseguenza di ogni *top event*.

Il passaggio da queste mappe di vulnerabilità di dettaglio a mappe più generali, in cui si tenga conto delle conseguenze di più *top event* e del contributo di varie tipologie di *target* non è tuttavia né automatico né semplice, poiché richiede l'attribuzione di opportuni "pesi" alle tipologie di danno associate ai *top event* ed alla vulnerabilità delle varie tipologie di *target*.

Per quanto riguarda la combinazione degli effetti dei diversi *top event* si può pensare di attribuire ad ognuno di essi un peso sulla base delle rispettive frequenze di accadimento attese, riportate sul rapporto di sicurezza. Tale approccio, tuttavia, tende a pesare di meno gli eventi più rari, che solitamente sono anche quelli dalle conseguenze più gravi e che presentano un impatto maggiore sul territorio. In alternativa è possibile sovrapporre gli effetti attribuendo un identico peso a tutti i *top event*, normalizzando quindi i risultati: in tal modo si tiene conto della vulnerabilità dei *target* a tutti gli incidenti rilevanti che possono comunque verificarsi nell'impianto.

La situazione si complica ulteriormente quando si passa ad esaminare il contributo dei diversi *target* alla vulnerabilità globale del territorio. In tale caso occorre infatti definire dei criteri sulla base dei quali attribuire un "peso" ad ogni *target*: tali criteri sono inevitabilmente opinabili e quindi non universalmente condivisibili.

Un primo criterio, per certi versi più "soggettivo" è quello di basarsi sul parere di esperti, magari organizzato in una forma statisticamente valida, come quella del metodo di prioritizzazione Saaty [10]. Tale metodo si basa sull'utilizzo di questionari che confrontano l'importanza dei vari *target* a coppie, utilizzando giudizi semi quantitativi (A è molto più importante di B, A è più importante di B, A e B hanno la stessa importanza, A è meno importante di B, A è molto meno importante di B) che portano all'ottenimento di matrici da cui si possono derivare i pesi da attribuire ad ogni *target* [7].

Un secondo criterio, sotto certi aspetti più "oggettivo" è quello di attribuire un valore economico ad ogni *target* [11]: questa operazione può essere effettuata con relativa facilità nel caso dei *target* appartenenti all'ambiente antropizzato e per alcuni *target* appartenenti all'ambiente naturale, mentre diviene più delicata passando a specifici *target* naturali (un lago, un parco protetto, ecc.) e, soprattutto, quando si considera la popolazione, per la difficoltà di attribuire un valore economico alla vita umana. In ogni caso anche questo approccio, seppure, con qualche cautela, risulta applicabile, ad esempio basandosi sui dati relativi al valore commerciale di terreni, di agenzie immobiliari, sui rimborsi previsti dalle compagnie assicuratrici, ecc.

### 3. APPLICAZIONE

La metodologia è stata applicata ad una raffineria italiana, mostrata in rosso al centro della Figura 1 che rappresenta l'area di studio. Gli incidenti a rischio rilevante per una raffineria non contemplano, di norma, il rilascio di sostanze tossiche, ma piuttosto varie tipologie di incendi ed esplosioni. Nell'applicazione si farà riferimento ad un *top event* rappresentato dall'esplosione di una nube di vapori di benzina. Per l'area di studio si è assunta, cautelativamente, una estensione di 20 km x 20 km, utilizzando una griglia di 500 m x 500 m nella zona più esterna ed una di 50 m x 50 m in quella più interna, di ampiezza 2 km x 2 km, centrata sullo stabilimento.

La caratterizzazione dell'ambiente che circonda lo stabilimento è stata fatta considerando le seguenti tipologie di *target* [6]:

- Popolazione:
  - Manodopera dello stabilimento;
  - Popolazione residente;
  - Utenti di strade e ferrovie;
- Ambiente naturale:
  - Aree ad uso agricolo;
  - Aree naturali;
  - Parchi ed aree protette;
  - Corpi idrici;
- Ambiente antropizzato:
  - Insediamenti industriali;
  - Servizi pubblici e infrastrutture;
  - Area edificate ad uso privato;
  - Area edificate ad uso pubblico.

Le informazioni necessarie sono state ricavate dai seguenti database GIS:

- Corine Land Cover [12]: informazioni circa l'uso del suolo;
- Roadnet di TeleAtlas [13]: informazioni sulla rete stradale e ferroviaria e sulla localizzazione di punti di interesse come scuole, ospedali o centri commerciali;
- APAT [14]: informazioni su parchi naturali e zone umide (Convenzione di Ramsar [15]);
- ISTAT [16]: informazioni sulla popolazione residente a livello delle località abitate.

L'insieme delle informazioni disponibili è mostrato nella Figura 1.

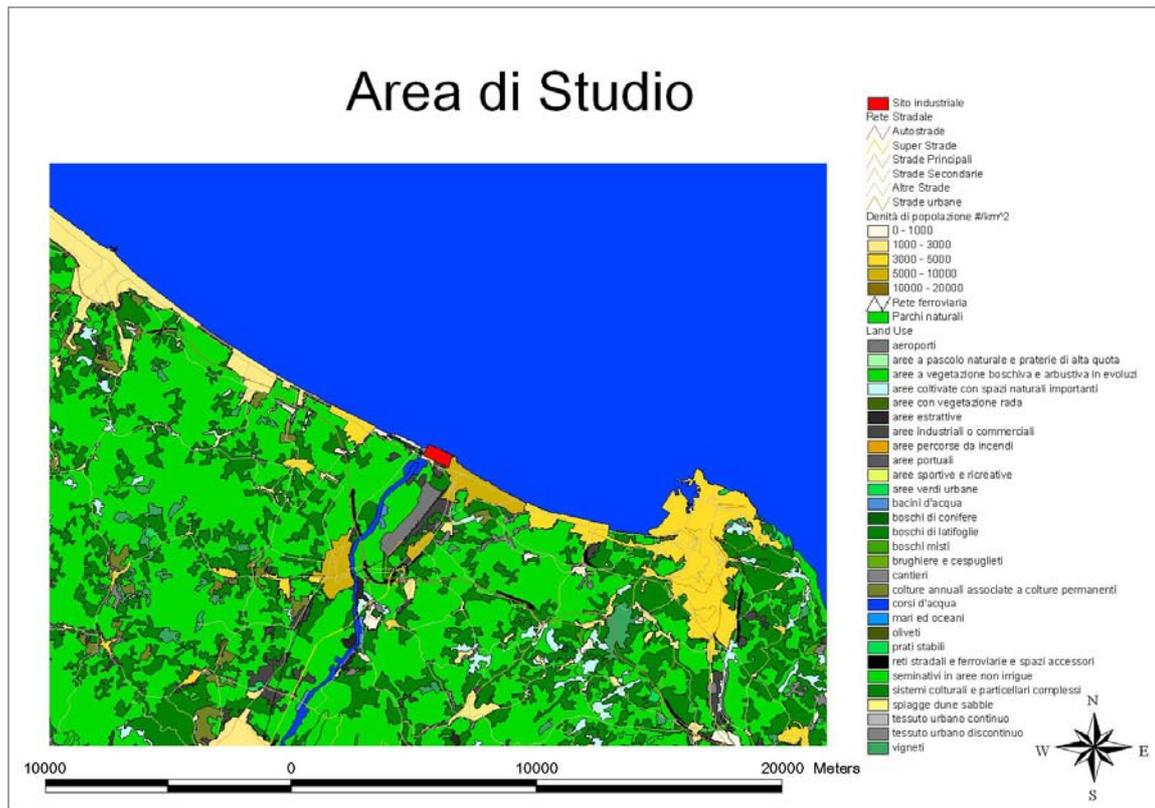


Figura 1. Area di studio.

### 3.1 Quantificazione dei target

Si è quindi applicata la procedura di quantificazione dei *target*, procedendo sulla base dei rapporti tra le aree, come descritto nel paragrafo 2, per quelli appartenenti all'ambiente naturale e antropizzato, fissando un valore di densità di popolazione massimo pari a 15000 persone/km<sup>2</sup> per il *target* umano. In particolare, per quanto attiene i fattori di quantificazione della popolazione [7]:

- il numero di persone dello staff della raffineria è stato ipotizzato pari a 150;
- il numero di residenti è stato valutato sulla base della densità di popolazione delle porzioni delle singole località abitate che ricadono in ogni maglia;
- il numero di utenti in transito sulla rete stradale e ferroviaria è stato valutato in base all'importanza del collegamento stradale e ferroviario.

La Figura 2 mostra i fattori di quantificazione relativi alla popolazione e all'ambiente antropizzato.

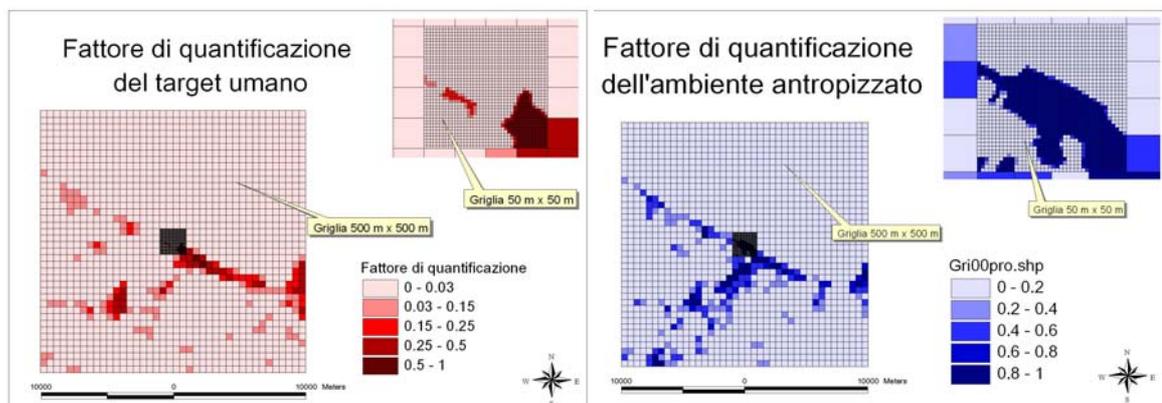


Figura 2. Fattori di quantificazione per la popolazione e l'ambiente antropizzato.

### 3.2 Valutazione della probabilità di danno dei target a seguito dell'incidente rilevante

Si è quindi proceduto ad effettuare l'analisi delle conseguenze del *top event* considerato: quest'ultimo è costituito dall'esplosione di una nube di 2000 kg di benzina, conseguente all'evaporazione del prodotto dal bacino di contenimento a valle della rottura di un serbatoio a tetto galleggiante. Per la simulazione si è utilizzato il software commerciale Trace [17] facendo riferimento alle condizioni meteorologiche caratteristiche della zona, con classe di stabilità di Pasquill D e velocità del vento pari a 3 m/s.

Le simulazioni effettuate hanno consentito di determinare l'andamento della sovrappressione indotta dall'esplosione in funzione della distanza, riportato sotto forma di punti in Figura 3; i dati ottenuti sono stati interpolati in modo soddisfacente con la seguente espressione a potenza, mostrata come curva in Figura 3:

$$p^{\circ} = 7 \cdot 10^6 x^{-1.2411} \quad (2)$$

dove  $p^{\circ}$  è la sovrappressione (Pa) e  $x$  è la distanza (m).

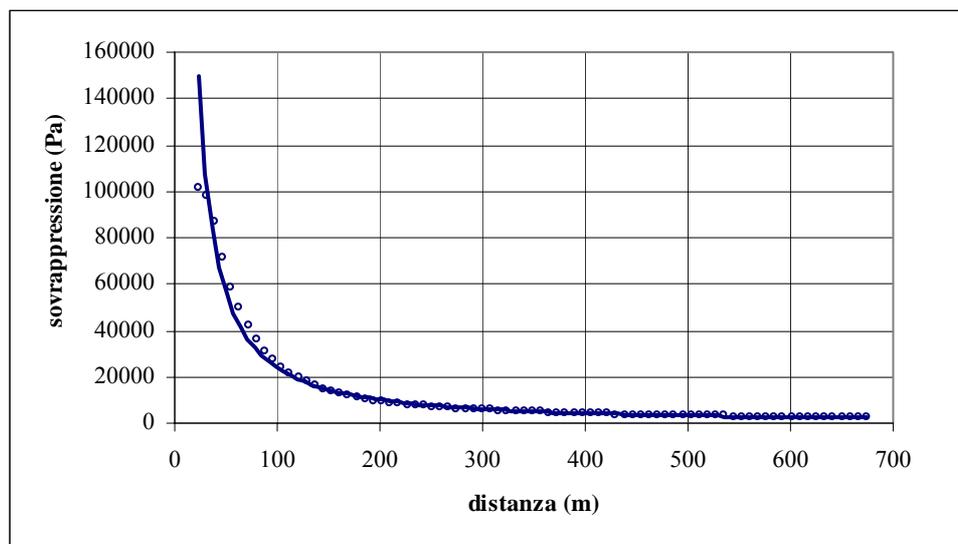


Figura 3. Andamento della sovrappressione in funzione della distanza.

L'equazione (2) è valida per distanze  $x > 23$  m; al di sotto di questo valore si è assunto che la sovrappressione  $p^{\circ}$  si mantenga costante e pari a circa 143.7 kPa. Tale assunzione non inficia le valutazioni seguenti, poiché la distanza minima assunta è circa pari alla metà dell'estensione della maglia più piccola adottata (50 m x 50 m).

Gli effetti del *top event* considerato si estrinsecano principalmente su persone e strutture, mentre sono presumibilmente molto modesti per quanto riguarda l'ambiente naturale e verranno quindi trascurati.

Per quanto concerne l'effetto della sovrappressione su persone e strutture sono disponibili, rispettivamente, le seguenti funzioni di *probit* [8]:

$$Y = -77.1 + 6.91 \ln p^{\circ} \quad (3)$$

$$Y = -23.8 + 2.92 \ln p^{\circ} \quad (4)$$

In particolare, l'equazione (3) fa riferimento alla morte causata da emorragia interna, che rappresenta l'effetto letale diretto della sovrappressione sulle persone; è tuttavia ben noto che, nel caso di un'esplosione, la causa principale di morte è rappresentata dal crollo delle strutture. A titolo di esempio, il D.M. 9.5.01 [1], richiamando il precedente D.M. 15.5.96 [18], fissa una soglia di sovrappressione corrispondente ad elevata letalità pari a 0.3 bar, in presenza di edifici o altre strutture il cui collasso possa determinare letalità indiretta, ove il valore di sovrappressione corrispondente all'inizio della letalità è fissato a 0.14 bar. Per valutare la probabilità di danno per la popolazione, anziché utilizzare l'equazione (3), si è quindi preferito derivare una funzione empirica dai limiti previsti dalla normativa, assumendo una frazione di danno pari ad 1 per sovrappressioni maggiori di 0.3 bar, pari a 0 per sovrappressioni inferiori a 0.14 bar, ed utilizzando una interpolazione lineare per valori di sovrappressione compresi tra 0.14 e 0.3 bar:

$$p^0 < 0.14 \text{ bar} \quad f = 0 \quad (5)$$

$$0.14 \text{ bar} < p^0 < 0.3 \text{ bar} \quad f = 6.25 p^0 - 0.875 \quad (6)$$

$$p^0 > 0.3 \text{ bar} \quad f = 1 \quad (7)$$

Combinando le equazioni (5-7) con la (2) si ottiene quindi l'andamento della probabilità che la popolazione subisca il danno di morte in funzione della distanza dal centro dell'impianto.

Per quanto concerne i *target* appartenenti alla categoria dell'ambiente antropizzato si è invece combinata l'equazione (4) con la (2) ottenendo l'andamento del *probit* in funzione della distanza.

Il *probit* è legato direttamente alla percentuale di danno mediante una funzione complessa [9], che non può essere utilizzata direttamente nell'applicativo GIS. Per tale ragione è stata ricavata una polinomiale interpolante, che correla la frazione  $f$  di danno subita dal *target* (compresa tra 0 e 1) al valore del *probit*, valida per valori di  $Y$  compresi tra 2.95 e 7.65:

$$f = -3.3565 + 4.6240Y - 2.3852 Y^2 + 0.56861Y^3 - 0.061408Y^4 + 0.0024548Y^5 \quad (2.95 \leq Y \leq 7.65) \quad (5)$$

Per valori del *probit* positivi, ma inferiori a 2.95, si può invece utilizzare la funzione a potenza:

$$f = 1 \cdot 10^{-5} Y^{7.0446} \quad (0 \leq Y \leq 2.95) \quad (6)$$

Per valori del *probit* negativi, la probabilità che il *target* subisca un danno è trascurabile ed è stata posta pari a zero; per valori del *probit* al di sopra di 7.65, cui corrisponde un valore di  $f$  pari a 0.996, si assume, cautelativamente, che  $f$  sia pari ad 1.

La Figura 4 riporta l'andamento della frazione di probabilità che il *target* subisca il danno, calcolata con le espressioni proposte (curva continua) in funzione del valore del *probit*.

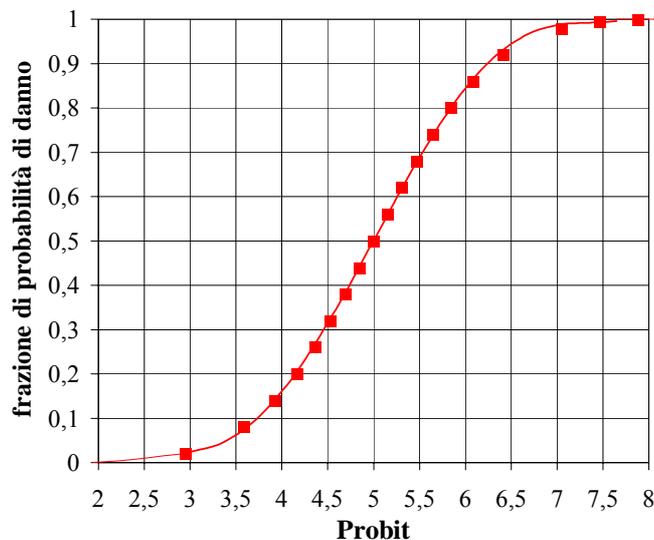


Figura 5. Relazione tra la frazione di probabilità che il *target* subisca il danno ed il *probit*.

Noto l'andamento del *probit* relativo all'ambiente antropizzato in funzione della distanza, si è quindi ricavato, l'andamento della frazione di probabilità che i *target* appartenenti a questa tipologia subiscano un danno in funzione della loro distanza dal centro dell'impianto.

La Figura 6 mostra le mappe di probabilità di danno per i *target* popolazione e ambiente antropizzato: per una migliore leggibilità dei risultati, è stata riportata, debitamente ingrandita, la zona di 2 km x 2 km con la maglia più fitta (50 m x 50 m) centrata sull'impianto. Si nota che gli effetti delle esplosioni si risentono all'interno di un'area di impatto di ampiezza modesta, con raggi intorno a poco più di 300 m per i danni alle strutture, che si riducono a circa 150 m per i danni alle persone.

In questo caso, infatti, il *top event* ipotizzato (UVCE di 2 t di vapori di benzina), pur nella sua gravità, non è in grado di esplicare conseguenze significative a lunghe distanze, ma presenta un impatto limitato all'area occupata dall'impianto ed alle sue immediate adiacenze. Ciò conferma come, nel caso di *top event* tipici delle sostanze infiammabili, la zona di studio possa avere un'ampiezza limitata.

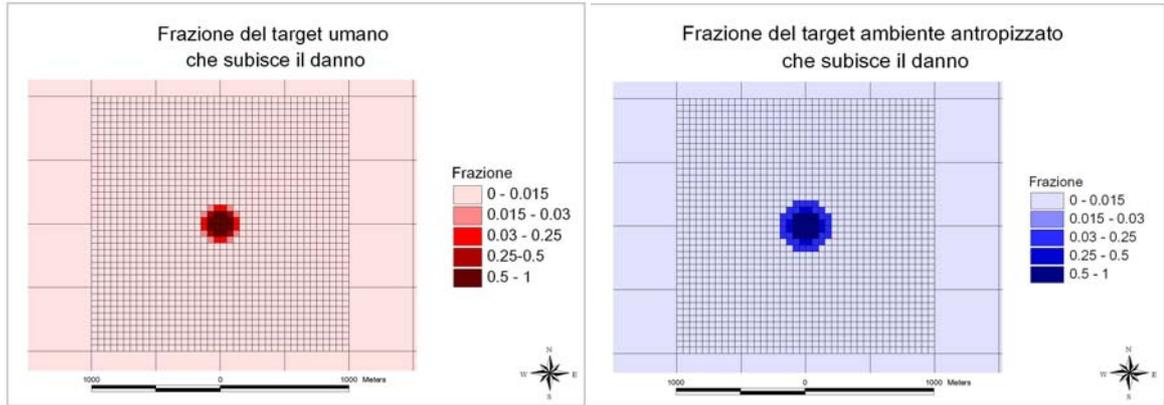


Figura 6. Frazione di danno attesa in conseguenza del *top event* per i *target* appartenenti alle tipologie popolazione e ambiente antropizzato in funzione della distanza dal centro dell'impianto.

### 3.3 Mappe di vulnerabilità dei *target*

Le informazioni relative alla quantificazione dei *target* e quelle relative alla probabilità che essi subiscano un danno in conseguenza del *top event* considerato sono state quindi combinate per ogni maglia, determinando le mappe di vulnerabilità per i *target*. In particolare, il valore della vulnerabilità è stato calcolato come prodotto del fattore di quantificazione del *target* nella maglia per la frazione di probabilità che il *target* subisca il danno, valutata in base alla distanza tra il centro della maglia considerata ed il centro dell'impianto. La vulnerabilità così ottenuta è adimensionale ed assume valori compresi tra 0 e 1.

Nel caso di studio occorre però rilevare come l'area di impatto del *top event* considerato ricada completamente all'interno dello stabilimento, ossia in una zona in cui il fattore di quantificazione dei *target* assume un valore costante. Ne consegue che l'andamento della mappa di vulnerabilità ricalca quello della frazione di danno attesa per le due tipologie di *target*, come mostra la Figura 7.

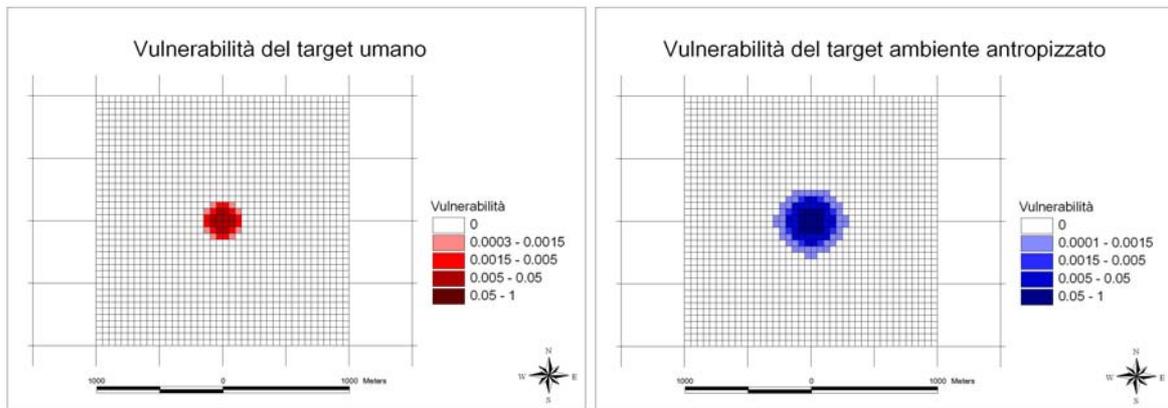


Figura 7. Mappe di vulnerabilità per la popolazione e l'ambiente antropizzato.

### 3.4 Mappatura della vulnerabilità globale

La conoscenza delle mappe di vulnerabilità delle singole tipologie di *target* consente di valutare la vulnerabilità globale dell'area circostante l'impianto. A questo scopo, come richiamato nel paragrafo 2.4, vanno definiti degli opportuni "pesi" da attribuire alle singole tipologie di *target*.

Nel corso di uno studio precedente [7] è stata applicata la metodologia Saaty [10] sottoponendo un complesso questionario ad esperti di varia estrazione (analisti di rischio, industriali, autorità pubbliche) provenienti da vari Paesi dell'U.E. per definire l'importanza relativa delle varie tipologie di *target*.

Da tale studio, statisticamente validato, sono emersi i seguenti "pesi" per le varie tipologie di *target* che caratterizzano l'ambiente [7]:

- Popolazione: 0.752;

- Ambiente naturale: 0.197;
- Ambiente antropizzato: 0.051.

È evidente come nella valutazione degli esperti sia stata largamente prevalente la preoccupazione per i danni alle persone rispetto a quelli subiti dall'ambiente naturale e antropizzato e come, in ogni caso, all'ambiente naturale sia stata attribuita una importanza assai maggiore che non a strutture e infrastrutture.

La Figura 8a mostra la mappa della vulnerabilità globale che si ottiene, per il sito di studio, applicando i pesi sopra riportati: il suo aspetto ricalca quello della vulnerabilità della popolazione, mostrata in Figura 7, e la zona in cui i valori di vulnerabilità sono superiori a zero è di ampiezza assai modesta rispetto a quella di studio.

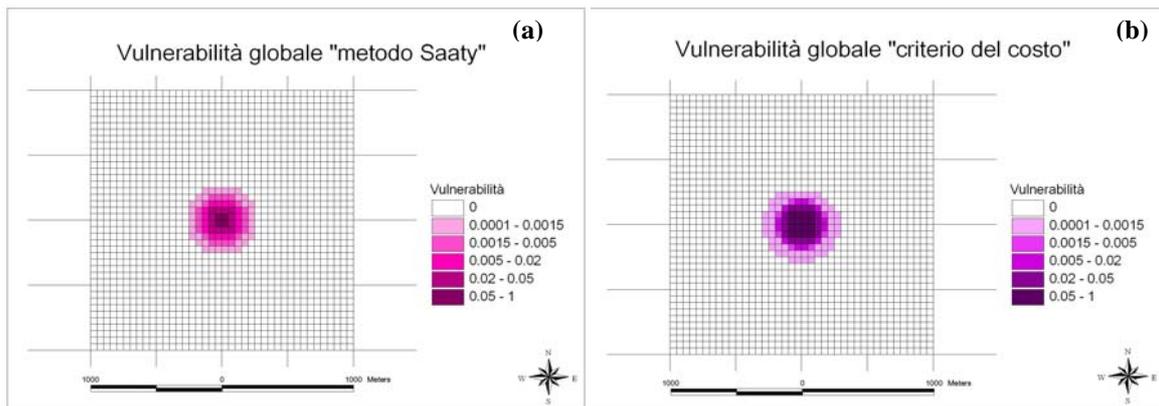


Figura 8. Mappa della vulnerabilità globale ottenuta con i pesi derivati dal metodo Saaty (a) e con i valori economici (b).

In alternativa alla procedura basata sulla valutazione statistica dell'opinione di esperti, è possibile attribuire dei pesi ai *target* attribuendo ad essi un valore economico [11]: questo secondo criterio è molto delicato in quanto richiede di attribuire un valore alla vita umana. Ai fini di questa valutazione il "danno" viene normalmente suddiviso in tre componenti:

- Danno biologico: arrecato alla salute di una persona, funzione della percentuale di invalidità e dell'età della persona;
- Danno patrimoniale: arrecato come mancanza o riduzione dei guadagni, funzione del reddito e dell'età della persona;
- Danno morale: arrecato come dolore fisico e/o psicologico, per la persona o i suoi parenti più prossimi (moglie/marito, figli, genitori, ecc.).

Ne consegue che l'attribuzione corretta di un valore economico alla vita umana richieda un'analisi dettagliata caso per caso, che non è facilmente applicabile alla valutazione della vulnerabilità di un territorio ampio, in cui le caratteristiche delle persone a rischio possono essere molto variabili. Nel lavoro citato [11] veniva suggerito un valore di  $1.2 \cdot 10^6$  € riferito ad un lavoratore medio dell'impianto: tenuto conto che non tutte le persone a rischio saranno in età lavorativa (e quindi, per i criteri adottati, hanno un valore economico inferiore) si è assunto come valore economico della vita di una persona "media"  $1 \cdot 10^6$  €.

Anche per quanto riguarda l'ambiente antropizzato, vi sono delle difficoltà nell'effettuare valutazioni precise, poiché non sono note in dettaglio le caratteristiche degli insediamenti industriali, servizi pubblici e infrastrutture ed aree edificate ad uso privato e pubblico nella zona. Ai fini dell'applicazione della metodologia proposta si è stabilito di assegnare un valore unico all'area occupata da ogni tipo di *target* che ricade nella categoria dell'ambiente antropizzato, ipotizzando un valore pari a  $2000$  €/m<sup>2</sup>, rappresentativo del valore a nuovo di un terreno su cui sia edificato un edificio di 4 piani.

È quindi possibile valutare il valore economico massimo che compete ad ogni maglia, ipotizzando che essa contenga la massima densità di popolazione ( $15000$  persone/km<sup>2</sup>) e, al tempo stesso, sia completamente ricoperta da *target* del tipo ambiente antropizzato: ad esempio, per una maglia da  $50$  m x  $50$  m, i valori ottenuti risultano, rispettivamente,  $37.5 \cdot 10^6$  € e  $5 \cdot 10^6$  €, per un totale di  $42.5 \cdot 10^6$  €. Sulla base di tali valori, i pesi da attribuire alla vulnerabilità dei *target* considerati risultano:

- Popolazione: 0.882;
- Ambiente antropizzato: 0.118.

Applicando questi pesi si ottiene la mappa di vulnerabilità riportata in Figura 8b.

Dal confronto tra le due mappe di vulnerabilità si nota come esse siano assai simili, sia per quanto

riguarda l'estensione della zona vulnerabile, ossia quella caratterizzata da valori di vulnerabilità superiori a zero, che per quanto attiene i valori assoluti della vulnerabilità, poiché entrambi i criteri utilizzati attribuiscono un peso predominante alla popolazione rispetto alle altre tipologie di *target*.

Per il caso studiato, quindi, le mappe di vulnerabilità globale non risultano particolarmente sensibili al criterio con cui vengono attribuiti i pesi alle singole tipologie di *target*, poiché i danni alla popolazione sono comunque valutati come assai più significativi rispetto a quelli arrecati agli altri *target* ambientali. Va però sottolineato come questo risultato non sia probabilmente estendibile ai casi in cui i danni siano limitati all'ambiente naturale e antropizzato, per il quale i due criteri proposti potrebbero fornire risultati diversi.

#### 4. DISCUSSIONE

L'analisi della vulnerabilità del territorio circostante l'impianto studiato, in cui il *top event* era rappresentato dall'esplosione di una nube di vapori infiammabile, presenta una situazione particolare, ma probabilmente non eccezionale, poiché la zona di impatto dell'incidente rilevante, e quindi la parte di territorio vulnerabile, risulta compresa all'interno dello stabilimento. Questo caso è d'altra parte rappresentativo di una vasta categoria di impianti che trattano sostanze infiammabili, per i quali le zone di effetto hanno un'ampiezza relativamente modesta (tipicamente entro un raggio di 500-1000 m), seppure variabile in funzione del quantitativo di infiammabile rilasciato, dalle sue caratteristiche, dalla tipologia di incidente rilevante ipotizzata e dalle condizioni meteorologiche.

La situazione riguardo alla vulnerabilità del territorio si presenta invece in modo sostanzialmente diverso quando tra i *top event* dell'impianto sia compreso il rilascio di un rilevante quantitativo di sostanza tossica, poiché l'area di impatto relativa alla dispersione di una nube tossica può estendersi, e di molto, oltre i confini dello stabilimento.

A solo titolo di esempio, ipotizzando che nella medesima localizzazione dell'impianto analizzato nel paragrafo precedente si verifichi la dispersione di 10 t di cloro, l'andamento della concentrazione della nube tossica in funzione della distanza dal punto di emissione si presenterebbe come riportato in Figura 9.

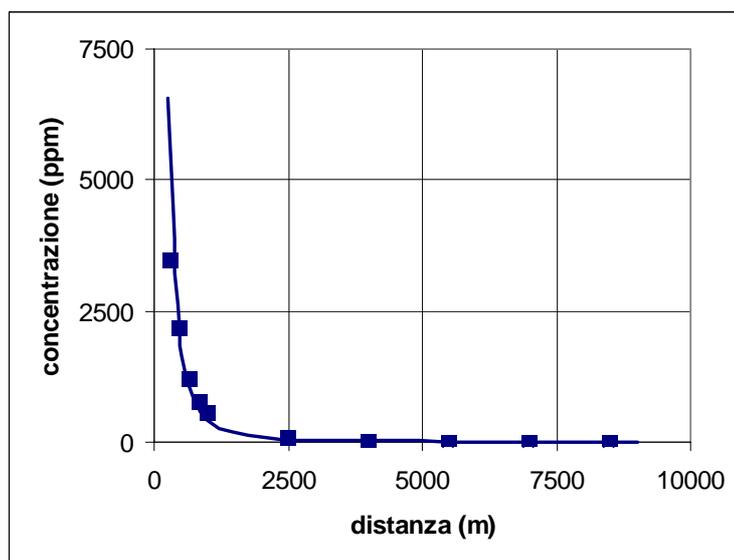


Figura 9. Andamento della concentrazione della nube tossica in funzione della distanza

Dalla Figura 9 si nota come la concentrazione di cloro si mantenga significativamente alta fino ad una distanza di circa 2000-2500 dal punto di emissione.

Applicando anche in questo caso una funzione di *probit*, e limitando l'analisi degli effetti al *target* popolazione (l'ambiente naturale e antropizzato sarà danneggiato in modo marginale da un rilascio occasionale di una sostanza tossica gassosa) si ottiene, procedendo come descritto nel paragrafo precedente, la mappa di vulnerabilità per la popolazione riportata in Figura 10.

Si può notare come, in questo caso, la parte di territorio vulnerabile all'incidente rilevante si estenda anche oltre i confini dello stabilimento: inoltre, l'andamento della vulnerabilità risente, oltre che di quello della frazione di percentuale di danno, che decresce al decrescere della distanza radiale, anche del fattore di quantificazione che tiene conto della distribuzione della popolazione sul territorio.

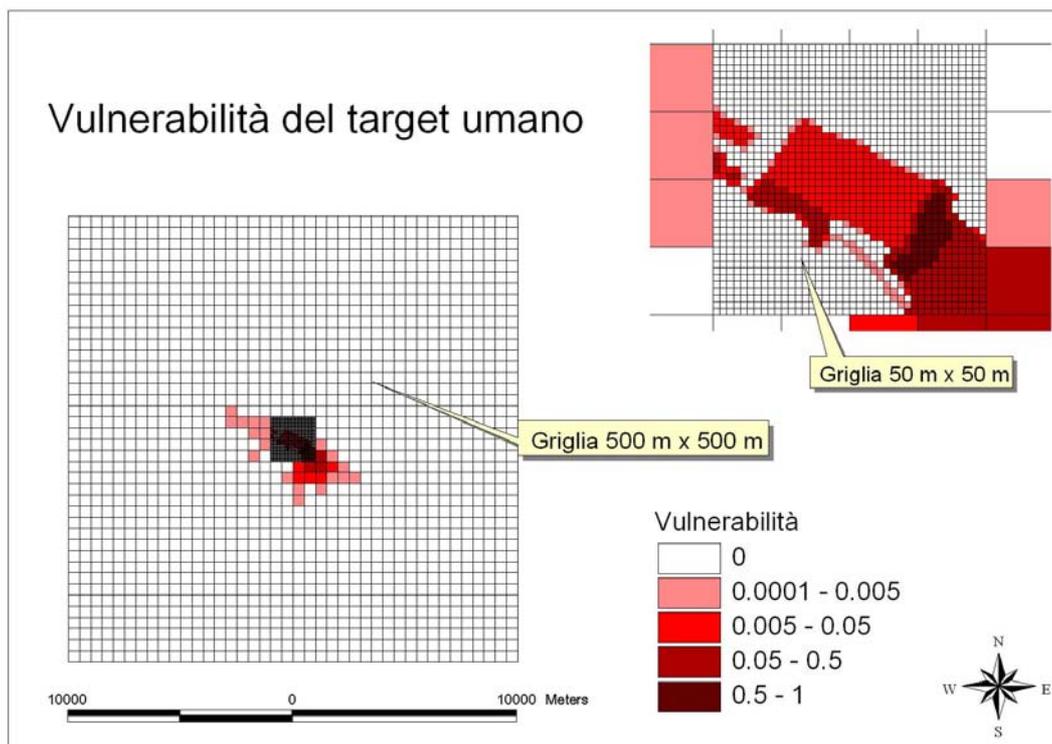


Figura 10. Mappa di vulnerabilità per la popolazione.

In questo caso, quindi, la mappa di vulnerabilità fornisce informazioni maggiormente utili ai fini della pianificazione territoriale. Va peraltro sottolineato come, anche nei casi in cui la zona vulnerabile non superi i confini dello stabilimento, la conoscenza di questa informazione sia della massima importanza per le Pubbliche Autorità.

## 5. CONCLUSIONI

La metodologia proposta consente di pervenire a mappe di vulnerabilità particolareggiate per ogni tipologia di *target* considerato e di *top event* presente nello stabilimento, come pure di ottenere mappe della vulnerabilità globale. Queste rappresentazioni del territorio circostante l'impianto a rischio di incidente rilevante agevolano la comprensione dell'impatto dello stabilimento sul territorio stesso, anche in riferimento all'effetto dei singoli *top event* sulle diverse tipologie di *target*. Queste informazioni costituiscono una base di conoscenza indispensabile per le Pubbliche Autorità ai fini della pianificazione territoriale.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] D.M. 9 maggio 2001, Requisiti minimi di sicurezza in materia di pianificazione urbanistica e territoriale per le zone interessate da stabilimenti a rischio di incidente rilevante, G.U. n.151 del 16.6.2001, Suppl. Ordinario n.138.
- [2] Direttiva 96/82/EC, 1996, On the control of major accident hazards involving dangerous substances, Official Journal of the European Community, L 10, 14.1.1997, pp.13-33 (1997).
- [3] S.R. Cave, D.W. Edwards, Chemical process route selection based on assessment of inherent environmental hazard, Computers Chemical Engineering, 21, Suppl., pp.965-970 (1997).
- [4] Å. Scott, Environment-accident index: validation of a model, Journal of Hazardous Material, 61 pp. 305-312 (1998).
- [5] Italian Ministry for the Environment and the World Health Organization (WHO), *Rapid Environment and Health Risk Assessment (REHRA)*, (2000).
- [6] R. Bubbico, R. Carta, S. Di Cave, L.G. Luccone, B. Mazzarotta, B. Silveti, Environmental vulnerability in the proximity of Seveso installations, *Chemical Industry and Environment IV*, A.Macias-Machin e J.Umbria Eds., Vol.2, pp.347-356, Las Palmas de Gran Canaria (2003).

- [7] J. Tixier, A. Dandrieux, G. Dusserre, R. Bubbico, L.G. Luccone, R. Carta, B. Silveti, B. Mazzarotta, S. Di Cave, E. Hubert, N. Rodrigues, O. Salvi, D. Gaston, Assessment of the environment vulnerability in the surroundings of an industrial site, *Safety and Reliability*, Bedford & van Gelder eds., Vol.2, pp.1543-1551, Lisse (2003).
- [8] Centre for Chemical Process Safety, *Guidelines for chemical process quantitative risk analysis*, AIChE, New York (2000).
- [9] Finney, D.J., *Probit Analysis* 3rd edition. Cambridge University Press, Cambridge (1971)
- [10] T. L. Saaty, *The analytic hierarchy process*, Mc Graw Hill, New York (1980).
- [11] G. Guidi, G. Ludovisi and B. Mazzarotta, Methodological approach for the evaluation, in economic terms, of the risk from industrial plants subject to Council Directive 96/82/EC (Seveso II), *Safety & Reliability*, E. Zio, M. Demichela, N. Piccinini Eds. Vol. 1, pp. 521-528, Torino (2001).
- [12] A. Annoni, A. Cumer, Progetto Corine Land Cover: le mappe delle regioni italiane, Atti 7° Conv. Naz. AIT, Telerilevamento, *GIS e cartografia al Servizio dell'Informazione Territoriale*, Ed. XEA (1995).
- [13] Roadnet TeleAtlas, *RoadNet for Arc/Info*, TeleAtlas BV (1996).
- [14] APAT: Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi tecnici, sito WEB: <http://www.sinanet.apat.it/default.htm>.
- [15] D.P.R. 488 13.3.1979.
- [16] ISTAT, 13° *Censimento generale della popolazione e delle abitazioni*, Roma (1992).
- [17] Safer System LLC, *TRACE 8.b User Guide*. Westlake Village (2000).
- [18] D.M 15 maggio 1996, Criteri di analisi e valutazione dei rapporti di sicurezza relativi ai depositi di gas e petrolio liquefatto (GPL), G.U. n. 159 del 9-7-1996 - Suppl. Ordinario n.113 (1996).