

UN APPROCCIO INTEGRATO ALLA VALUTAZIONE DEL RISCHIO PER LA SALUTE UMANA NELL'AREA DEL TORRENTE PACE DI MESSINA CON LO STRUMENTO EHHRA-GIS

Morra P.¹, Lisi R.², Spadoni G.¹, Maschio G.³

**1 Dipartimento di Ingegneria Chimica, Mineraria e delle Tecnologie Ambientali, Università di
Bologna, viale Risorgimento 2, Bologna, 40136, Italia**

**2 Dipartimento di Chimica Industriale e Ingegneria dei Materiali, Università di Messina, Salita
Sperone 31, Messina, 98166 - Messinambiente S.p.A., via Dogali, 50, Messina, 98122, Italia**

**3 Dipartimento di Principi e Impianti di Ingegneria Chimica, Università di Padova, via F. Marzolo 9,
Padova, 35131, Italia**

SOMMARIO

Il presente studio è finalizzato alla quantificazione del rischio per la salute umana in un'area caratterizzata dalla presenza di diverse sorgenti di inquinamento. Il lavoro è stato sviluppato con un approccio integrato alle problematiche ambientali, così come richiesto dalle normative vigenti in materia di protezione ambientale. La metodologia adottata ha permesso di considerare tutte le sostanze emesse e tutte le matrici ambientali interessate grazie all'utilizzo di uno strumento, il software EHHRA-GIS, che, grazie alla sua architettura "aperta", può essere interfacciato con i più recenti modelli di trasporto disponibili. In particolare, in questa applicazione, per il trasporto degli inquinanti in aria, si è utilizzato il codice AERMOD che ha permesso di considerare il modello tridimensionale, e quindi reale, dell'area in studio e di simulare con maggiore veridicità le condizioni meteorologiche locali. L'interfaccia GIS semplifica l'immissione dei dati di input relativi alla caratterizzazione dell'area in esame e consente una più immediata lettura dei risultati rappresentati da distribuzioni di concentrazioni, andamenti del rischio cancerogeno e dell'esposizione a sostanze tossiche e cancerogene in forma di curve e superfici sovrapposte alla cartografia opportunamente georeferenziata. L'analisi è stata sviluppata definendo opportunamente i recettori locali. Conclusa la fase quantitativa, per tener conto delle diverse incertezze e variabilità insite nei calcoli eseguiti, si è effettuata un'analisi di sensitività per valutare come la variabilità dei parametri di input incida sulle misure di esposizione al rischio. La metodologia applicata, unitamente e tramite il codice EHHRA-GIS, fornisce un utile supporto alle decisioni per il controllo e la gestione dell'area esaminata nella quale, nei prossimi anni, saranno realizzati ulteriori impianti tecnologici legati alla gestione dei rifiuti e, quindi, nuove potenziali sorgenti di inquinamento che si inseriranno nel contesto valutato.

1.0 INTRODUZIONE

L'antropizzazione e l'industrializzazione del territorio determinano una sempre più frequente esposizione a sostanze chimiche (cancerogene e tossiche) da parte degli organismi viventi, cui segue un aumento della frequenza di effetti negativi sulla salute degli esposti. I rischi ambientali sono associati ad eventi che possono causare danni agli ecosistemi, con ripercussioni sulla flora, sulla fauna e sulle matrici ambientali in genere, fino a minacciare direttamente anche la specie umana. I rischi ambientali si possono distinguere in rischi ambientali ecologici e rischi ambientali sanitari. Il rischio ambientale ecologico ha come obiettivo di indagine gli effetti sulle matrici ambientali che sono espressi in termini di stress sulle matrici stesse. Ma la loro determinazione e quantificazione è ancora lontana dall'essere definita univocamente dato l'alto numero di parametri di valutazione e di riferimento da considerare. Il rischio ambientale sanitario ha come obiettivo di indagine gli effetti sull'uomo. L'analisi di rischio può distinguere gli effetti di un evento pericoloso in un determinato punto ipotizzando la potenziale presenza di un uomo (rischio puntuale o individuale), oppure considerare gli effetti negativi sulla popolazione presente sull'area di studio (rischio diffuso o collettivo).

Le politiche relative alla protezione delle matrici ambientali sono state sviluppate prevalentemente durante le ultime due decadi. Gli approcci normativi utilizzati si sono basati sulla definizione di limiti restrittivi che però, con il passare del tempo, si sono dimostrati inefficienti nel risolvere le problematiche sia di risanamento, sia di protezione ambientale. Questo perché l'approccio basato su limiti di soglia, che comunemente viene definito "approccio tabellare", è caratterizzato dal considerare un numero di sostanze

limitato e per le quali non è definita una procedura di determinazione dei valori limite; i valori limite infatti sono basati sull'esperienza e sul giudizio professionale del normatore (e non sempre su standard scientificamente testati), i limiti di accettabilità dei singoli contaminanti hanno validità generica e non sono specifici del sito considerato. Questo approccio appare inadeguato ad inquadrare una particolare situazione nella sua complessità e peculiarità in quanto non tiene conto delle caratteristiche specifiche del sito e quindi non è in grado di valutare in modo appropriato gli impatti che il sito comporta per la salute pubblica e per l'ambiente. Per superare tale problema occorre stabilire strumenti/procedure/metodi in grado di definire i limiti di soglia in funzione del reale impatto. Al metodo puramente tabellare sarà opportuno, quindi, sostituire un approccio più versatile basato sulla stima del rischio.

L'analisi di rischio fornisce uno degli strumenti migliori per comprendere contemporaneamente tutti gli aspetti più rilevanti del processo decisionale che porta alla individuazione della migliore strategia d'intervento, in quanto il suo scopo principale risulta essere la protezione della salute pubblica e dell'ambiente.

La gestione sostenibile del territorio, allora, ove siano presenti sorgenti inquinanti di varia natura, richiede decisioni atte a ridurre i potenziali effetti dannosi verso l'ambiente. Le decisioni possono essere di tipo strategico (a lungo periodo), tattico (a medio periodo), operativo (a breve periodo), e coinvolgere scelte di tipo strategico-programmatico, di processo, di localizzazione, di mitigazioni degli impatti. L'analisi di rischio può essere un valido supporto alle decisioni.

Nell'ottica di soddisfare tali esigenze è stato sviluppato il presente lavoro i cui risultati, in forma di indice di rischio cancerogeno e quoziente di pericolo (rischio non-cancerogeno), sono stati raggiunti con un approccio integrato su tutte le matrici ambientali. L'area studiata è quella del torrente Pace che si trova nel territorio del comune di Messina, a pochi chilometri dal suo centro ma inserita nel tessuto urbano, caratterizzata dalla presenza di più sorgenti di inquinanti (prevalentemente legate alla gestione dei rifiuti) a tipologia di emissione diversa in tutte le matrici ambientali d'interesse (aria, acqua, suolo). In essa, infatti, si trovano un inceneritore di rifiuti solidi urbani attivo sin dal 1979, una discarica di r.s.u. coltivata per quasi 30 anni sino al 1998, chiusa nel 2002 ma non ancora messa in sicurezza, una stazione di trasferimento di rifiuti e due cave con produzione di bitumi. Inoltre, nell'area è prevista nei prossimi due anni la realizzazione di tre nuovi impianti di trattamento e smaltimento di rifiuti (un impianto di selezione della frazione secca, un impianto di compostaggio e una discarica di r.s.u.).

L'analisi quantificata di rischio per la salute dell'uomo utilizzata nello studio è piuttosto complessa e onerosa, anche in termini di tempo per l'esecuzione dei calcoli, quando la zona geografica analizzata è caratterizzata dalla presenza di sorgenti multiple, di diverse vie di esposizione e da tipologie multiple di recettori. Tale analisi, se effettuata con lo strumento EHHRA-GIS, adotta un approccio integrato essendo in grado di controllare tutti i punti di indagine in una struttura georeferenziata con un'interfaccia grafica utente. Definita dettagliatamente l'area in tutte le sue caratteristiche geografiche, geologiche, idrogeologiche e di uso del suolo, descritte e georeferenziate tutte le sorgenti presenti ivi comprese tutte le sostanze d'interesse emesse nelle tre principali matrici ambientali, aria, acqua e suolo, identificati i destini e i trasporti di tali sostanze e caratterizzati opportunamente i soggetti recettori presenti nell'area, lo strumento ha permesso di quantificare l'indice di rischio cancerogeno e il quoziente di pericolo e la loro visualizzazione sulla mappa dell'area in esame con curve iso-dose e iso-rischio.

2.0 LA METODOLOGIA EHHRA

Lo strumento EHHRA-GIS permette di quantificare il rischio per la salute umana derivante da più sorgenti attraverso lo svolgimento di tutte le fasi della metodologia dell'EPA [1, 2]; fa uso di una piattaforma GIS e consente quindi di visualizzare i risultati sulla cartografia dell'area studiata in termini di curve iso-dose e iso-rischio. I valori di rischio cancerogeno e di quoziente di pericolo sono valutati per ogni percorso di esposizione e per ogni ricettore identificati nell'area in studio ed infine sommati, per ogni ricettore e per tutte le possibili vie di esposizione e sostanze presenti, al fine di stimare il rischio cancerogeno totale individuale e il quoziente totale di pericolo. Per i dettagli sullo sviluppo della procedura e sulle relazioni utilizzate si rimanda a [3], limitandosi qui a descrivere gli elementi principali.

La prima fase della procedura consiste nella individuazione dell'area, nel suo inserimento in forma di cartografia georeferenziata nel sistema e nella descrizione delle attività in essa presenti caratterizzandone la natura e l'entità delle emissioni rilasciate nell'ambiente. La caratterizzazione include l'identificazione e la localizzazione sulle mappe delle sorgenti di contaminazione, la raccolta di informazioni basilari per lo studio relativamente agli impianti, al sito, alla stima dei ratei di emissione e all'identificazione delle sostanze chimiche di interesse.

La simulazione per la determinazione della distribuzione spaziale e temporale delle concentrazioni di sostanze nei differenti media ambientali è possibile utilizzando modelli predittivi integrati nel sistema. Attualmente sono integrati nel sistema modelli per la dispersione in aria (ISC3, AERMOD, CALINE), per la dispersione nel suolo, nel sottosuolo e nell'acqua di falda (HSSM, GMS), modelli multimedia e modelli per la determinazione della bioaccumulazione nella catena alimentare. Tuttavia, l'architettura "aperta" dello strumento permette l'aggiunta di nuovi codici o la sostituzione con modelli più idonei a sviluppare aspetti specifici dell'analisi.

Determinata la distribuzione della contaminazione nei differenti media è necessario selezionare le differenti tipologie di ricettori e i diversi scenari potenziali di esposizione nel territorio in esame. I ricettori umani possono venire a contatto con le sostanze inquinanti emesse nei media ambientali dalle sorgenti individuate attraverso vie di esposizione multiple, direttamente o indirettamente. Esseri umani, piante e animali possono assorbire le sostanze pericolose eventualmente presenti nell'area di studio direttamente dall'aria, dall'acqua, dal suolo, dall'acqua di falda o, indirettamente, ad esempio attraverso l'assunzione di cibo e acqua contaminati dalla deposizione delle sostanze stesse. La tipologia di dati necessaria per caratterizzare i ricettori umani include caratteristiche anatomiche, ratei di consumo di cibo, tempi di attività e di esposizione, ecc. La valutazione dell'esposizione consiste nel quantificare la dose potenziale cioè la quantità di agente che entra in contatto con l'organismo umano insieme ai punti di scambio con l'ambiente (polmoni, pelle, ...) in uno specifico intervallo temporale. La valutazione del rischio consta nella stima del rischio cancerogeno e del quoziente di pericolo per ogni ricettore nell'area di studio. Il rischio da esposizione alle sostanze cancerogene è la probabilità che un ricettore sviluppi la malattia tumorale nell'arco della propria vita, basandosi su uno specifico luogo di esposizione, un modello e determinanti valori di tossicità. Il quoziente di pericolo è invece quantificato come la possibilità di sviluppare effetti non cancerogeni come risultato di esposizione a sostanze chimiche tossiche per un determinato periodo di esposizione e non è una probabilità ma una misura dell'esposizione potenziale di un ricettore rispetto a dei livelli di esposizione di riferimento.

Infine il codice rappresenta graficamente sulla mappa del territorio esaminato le curve isovalore. La procedura è completata da un'analisi di sensitività che permette di comprendere quanto il rischio calcolato dipenda dall'incertezza e dalla variabilità dei fattori che contribuiscono alla sua stessa quantificazione.

3.0 L'AREA STUDIATA

L'area di studio si trova nella zona nord della città di Messina. La regione ha come asse il torrente Pace che si sviluppa perpendicolarmente alla linea di costa ed è delimitata dalle formazioni collinari al di là delle quali vi è il torrente Annunziata a Sud e il torrente Guardia a Nord. Quindi la valle in esame si trova tra altre due valli nelle quali sono presenti alcuni popolosi centri residenziali. La valle si estende per circa 2,5 km da Est (lato mare) a Ovest perpendicolarmente allo Stretto di Messina e passando dal livello del mare a quota 400 metri.

L'uso del territorio è principalmente agricolo e residenziale, tuttavia all'interno dell'area è presente una vasta zona destinata ad impianti tecnologici. Tale destinazione prevista nei Piani Regolatori degli ultimi trenta anni ha dato luogo alla nascita di una serie di impianti la cui presenza è stata oggetto del nostro studio. Occorre considerare inoltre che l'area negli ultimi venti anni è divenuta da periferica a zona di collegamento tra il centro città e importanti quartieri del comune.

Il rischio per la salute umana è causato, quindi, dalla presenza di diverse sorgenti di inquinamento per le diverse matrici ambientali: un inceneritore di r.s.u. (rifiuti solidi urbani) attivo sin dal 1979; una discarica dimessa di r.s.u., discarica di Portella Arena, attiva per circa trenta anni sino al 1998, ma non ancora messa in sicurezza; due cave di sabbia utilizzate anche per la produzione di bitume. Inoltre, data la vocazione tecnologica dell'area, pur trovandosi a ridosso di aree residenziali e turistiche, sono in fase di realizzazione

una nuova discarica per r.s.u., un impianto di compostaggio e un impianto per la selezione e il trattamento della frazione secca dei rifiuti da raccolta differenziata. La decisione di affrontare lo studio presente nell'area in esame deriva quindi, oltre che dalla presenza di più sorgenti di inquinanti anche dalla prospettiva dell'incremento previsto nel breve periodo e dalla sua specifica localizzazione. La particolare forma a tunnel e la notevole differenza di quota tra le due estremità dell'area ha reso particolarmente difficile l'uso di modelli di trasporto in quanto è stato necessario costruire ed usare nell'elaborazione di dati il modello tridimensionale del terreno (Figura 1).

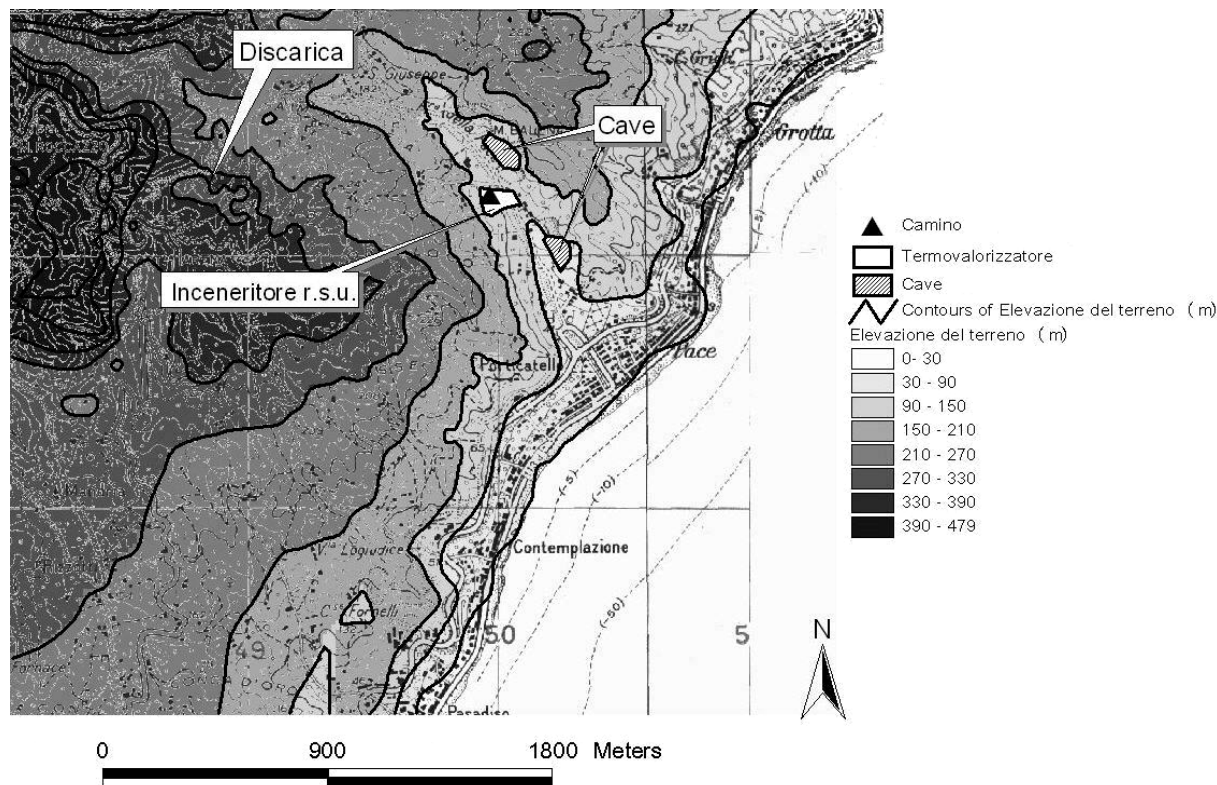


Figura 1. Mappa dell'elevazione del terreno e localizzazione delle sorgenti di contaminanti

Il modello di trasporto usato per la dispersione nel sottosuolo degli inquinanti è il GMS (Groundwater Modeling System). Il GMS è un sofisticato pacchetto software dedicato allo sviluppo di studi di modellistica per le acque sotterranee. È costituito da una interfaccia grafica utente per la gestione degli input e degli output e da una serie di programmi di calcolo (i modelli): l'interfaccia è stata sviluppata da Environmental Modeling Research Laboratory della Brigham Young University (Utah) e contiene moduli per la caratterizzazione del sito, la costruzione di un modello concettuale, la generazione automatica della discretizzazione bi o tridimensionale, l'analisi geostatica bi e tridimensionale e programmi di visualizzazione grafica e animazione; i programmi di calcolo (MODFLOW, MT3D, MODPATH, FEMWATER, SEEP2D, ecc.) sono tra quelli maggiormente provati e riconosciuti come standard a livello internazionale, e nel caso adattati per essere utilizzati all'interno dell'interfaccia GMS.

Per la simulazione della dispersione di contaminanti in atmosfera è stato utilizzato il codice AERMOD. Questo è un recente modello sviluppato dall'U.S.EPA e proposto come modello sostitutivo all'ISC3, perché fa uso dei nuovi algoritmi che rispecchiano l'attuale stato dell'arte della modellistica ambientale nel campo della diffusione e del trasporto di inquinanti primari emessi da sorgenti industriali [4].

Tutte le sorgenti presenti sono state analizzate e ne è stato valutato il peso in termini di rilascio nelle matrici ambientali di sostanze chimiche d'interesse. Nel seguito si rappresenta l'analisi fatta per sorgente considerata.

3.1 La discarica di Portella Arena

La discarica di Portella Arena si trova all'estremità Ovest dell'area in esame a quota 370 m sul livello del mare. E' stata coltivata tra il 1972 e il 1998 con metodi che vanno dal semplice deposito di incenerimento in loco, alla costipazione con copertura in terra. Ha un volume di circa 4.000.000 m³ e una superficie di circa 100.000 m² di estensione. Non ha avuto una impermeabilizzazione del fondo al suo inizio né una chiusura e messa in riserva finale. Solo nel 2002 è stato fatto un intervento di copertura con argilla allo scopo di regimentare le acque superficiali e controllarne l'azione erosiva piuttosto che di impermeabilizzare il corpo di impianto rispetto alle precipitazioni meteorologiche. La discarica è posta in tre valli contigue, orientate circa SW-NE, che presentano valori di pendenza variabile (dal 20 al 40%). Le tre valli sono delimitate nella parte più a monte dalla strada che costeggia il versante settentrionale della collina di Portella Arena (da cui prende il nome la discarica), mantenendosi sempre ad una quota di 370 m s.l.m. La discarica di Portella Arena, considerata come sorgente di inquinanti, ha fondamentalmente due tipologie di emissioni: in aria emette gas di discarica e nel suolo rilascia percolato. L'emissione di gas di discarica, comunemente chiamato biogas, non è stata considerata come contributo significativo al rischio per la salute umana per due ordini di motivi. Il primo è che la sorgente non è continua. Il gas di discarica ha un andamento parabolico nell'arco degli anni a partire da circa un anno dopo l'inizio della coltivazione: la produzione di gas cresce sino ai primi anni dopo la chiusura, resta circa costante per qualche anno e poi decresce fino a valori di emissione trascurabili. La presenza in volume di sostanze pericolose per la salute umana è anche variabile nel tempo ma certamente inizia ad essere significativa quando si raggiunge il picco di produzione. La discarica in studio è stata di fatto "coperta" con uno strato impermeabile proprio nel periodo in cui doveva iniziare la maggiore produzione e, quindi, la pericolosità per l'ambiente. Attualmente risulta impossibile ipotizzare che percentuale di biogas riesce a fuoriuscire dalle inevitabili discontinuità nella barriera di argilla o quanto, passando attraverso le pareti laterali della discarica, filtra verso l'atmosfera. Il secondo è che occorrerebbe effettuare uno studio che tenga conto oltre che delle condizioni al contorno sito-specifiche anche della natura e composizione dei rifiuti costipati nel corso della coltivazione. Quest'ultimo aspetto richiederebbe un dispendio di risorse giustificabile nel caso in cui si volesse sfruttare energeticamente tale produzione, piuttosto che per valutare il contributo, prevedibilmente trascurabile, di tale emissione al rischio per la salute umana nell'area in esame.

L'emissione di percolato nel suolo è stata oggetto di analisi e simulazioni al fine di definirne l'entità. Il suolo al di sotto della discarica è costituito da una matrice di ghiaia e sabbia (detta formazione Messina) dotata di una permeabilità primaria, per porosità piuttosto elevata, e, a notevole profondità da uno strato di formazione calcarea sul quale, presumibilmente, scorre la falda sino al mare.

La valutazione ha considerato la distribuzione degli inquinanti nel suolo e nella falda utilizzando modelli di dispersione per la simulazione del rilascio di percolato nel sottosuolo dalla discarica. Per l'applicazione del modello GMS si sono valutati diversi scenari possibili di propagazione nel sottosuolo considerando possibili profili della falda presente a grandi profondità nell'area. Non si sono, infatti, reperiti sondaggi di profondità pari a quella ipotizzata per la falda, ma sono stati considerati tre studi geologici e idrogeologici effettuati relativamente all'area negli ultimi dieci anni. In assenza di sondaggi geognostici per la determinazione certa del livello della falda rispetto al mare, sono stati considerati i pozzi presenti lungo la valle e in particolare il pozzo a 95 m dall'inceneritore e i diversi pozzi presenti lungo la linea di costa (uno dei quali dell'azienda municipale dell'acquedotto). Successivamente è stato valutato il possibile impatto della discarica sull'acqua di falda considerando la composizione del percolato, le valutazioni idrogeologiche e una distribuzione temporale dello scenario a partire dai primi anni della discarica.

Al fine di quantificare l'impatto nella matrice ambientale considerata dovuto all'infiltrazione di percolato in un terreno così permeabile, sono state valutate le sostanze inquinanti filtrate verso la falda sotterranea. Le concentrazioni stimate con la simulazione sono state confrontate con i valori di soglia indicati dal D.M. 471/99 [5] relativo ai siti contaminati. Le sostanze chimiche analizzate sono state scelte tra quelle rilevate nelle analisi di laboratorio effettuate nel 2003 su un campione di percolato prelevato da un pozzo di raccolta. Tra le sostanze rilevate si sono considerate solo quelle il cui valore di concentrazione superava i limiti dettati dal DM 471/99. In tabella 1 si riportano le concentrazioni delle sostanze considerate e i relativi limiti di legge.

Tabella 1. Valori di concentrazione nel percolato e relativi limiti di legge.

<i>Descrizione</i>	<i>Concentrazione nel percolato mg/l</i>	<i>Concentrazione limite nell'acqua di falda (D.M.471/99) mg/l</i>
Ione ammonio	2840	0.5
Cloro	3165	250
Solfati	1293	250
Ione ferro	7,53	200 10 ⁻⁶
Mercurio	0,074	1 10 ⁻⁶

Dovendo valutare il rischio per la salute umana per la popolazione esposta, sono state prese in considerazione solo le sostanze tossiche. La simulazione ha considerato un lasso temporale a partire dal 1972 sino al 2006. Si è considerato l'intervento di copertura con uno strato di argilla realizzato nel 2002. Il mercurio e lo ione ferro sono fortemente assorbite dalle particelle del suolo. Considerando la porosità e la densità del suolo, la simulazione ha prodotto un plume della concentrazione che rimane confinato in un'area in prossimità della discarica per diversi anni. Si prevede un'alta concentrazione nel suolo di mercurio e ione ferro, tuttavia il suolo contaminato si troverebbe ad elevate profondità e questo rende impossibile il contatto con radici di vegetali, animali o ricettori umani. La simulazione del trasporto dello ione ammonio ha generato un plume il cui culmine potrebbe arrivare in prossimità del mare contaminando, così, diversi pozzi di valle. Ma per valutare il rischio per la salute umana non vi sono abbastanza informazioni riguardo agli effetti dell'esposizione prolungata del recettore uomo a questa sostanza. La normativa vigente considera la presenza di tale sostanza specifica di inquinamento dell'acqua in quanto intermedio di sostanze tossiche. Ma lo stesso ione ammonio non è bioaccumulabile né nei vegetali né negli animali.

Per tutti i motivi di cui sopra il contributo della discarica di Portella Arena al rischio per la salute umana non è stato considerato.

3.2 Le cave

La particolare costituzione del suolo, sabbie e ghiaie della *formazione Messina*, ha determinato la nascita di tre grandi cave che, poste lungo il lato nord della vallata, producono sabbie e ghiaie per l'edilizia. Due di queste cave sono dotate di un piccolo impianto di produzione di bitumi e, quindi, oltre alle emissioni diffuse, tipiche delle attività estrattive, presentano le emissioni legate alla combustione.

L'attività di produzione di conglomerati bituminosi si caratterizza per l'esteso utilizzo di prodotti chimici. Tuttavia l'emissione in aria di sostanze inquinanti, nel caso dei forni per la produzione dei bitumi, è strettamente legata al combustibile usato (metano o gasolio). Le sostanze emesse in quantità significative nell'ambiente, nel caso specifico di utilizzo del gasolio come combustibile, sono fondamentalmente polveri, NO_x e SO_x. Gli IPA presenti sono in quantità limitate, ma significative dal punto di vista della sicurezza nei luoghi di lavoro [6]. Le polveri, NO_x e SO_x non risultano bioaccumulabili né nei vegetali né negli animali, per cui gli effetti sulla salute umana sono legati all'esposizione diretta per inalazione; al momento non esistono studi che evidenzino proprietà cancerogene di tali sostanze, ma la lunga esposizione ad esse potrebbe causare effetti di morbidità da verificare con studi epidemiologici o relazioni causa-effetto sito-specifiche.

Per questi motivi il contributo di queste sorgenti non sarà considerato nel calcolo finale del rischio per la salute umana.

3.3 L'inceneritore

L'inceneritore Pace è situato lungo il Torrente Pace, sul versante sud, a circa 700 metri dalla linea di costa e a 120 metri sul livello del mare. L'impianto permette la termodistruzione di rifiuti solidi urbani senza recupero di energia. Tuttavia il calore recuperato viene utilizzato per migliorare le prestazioni del ciclo di combustione e di trattamento fumi. Attivo dal 1979, è dotato di 2 linee di incenerimento per una capacità complessiva di circa 100 t/g. Ogni linea è dotata di un forno a griglia, una camera di post-combustione, uno

scambiatore di calore a olio diatermico, una torre di raffreddamento, un tubo venturi, un filtro a maniche e una torre di lavaggio. Entrambe le linee convogliano in un unico camino alto 30 metri con un diametro di 1,5 metri, una velocità e una temperatura medie dei fumi, rispettivamente, di 17 m/s e di 371,15 K. Il monitoraggio dei fumi è realizzato in continuo con strumenti posti in cima al camino a quota 27 metri. L'impianto è considerato esclusivamente come sorgente di emissioni in aria in quanto i recessi di lavorazione utilizzano un ciclo chiuso dell'acqua che, dopo essere stata depurata viene reimpressa nel sistema di trattamento fumi o nel raffreddamento scorie di combustione. Tra le diverse sostanze emesse dal camino, sono state prese in considerazione quelle maggiormente significative per le loro caratteristiche di tossicità e/o cancerogenicità. In Tabella 2 si riportano i valori medi dei ratei di emissione calcolati su un anno di rilevamenti.

Tabella 2. Sostanze considerate e ratei di emissione medi.

<i>Sostanza</i>	<i>Emissione g/s</i>
Acido cloridrico	0.2824
Diossine	$0.0022 \cdot 10^{-6}$
Cadmio	0.0016
IPA	0.0002

L'acido cloridrico ha caratteristiche di tossicità per inalazione, gli IPA hanno proprietà cancerogene, mentre diossine e cadmio sono caratterizzati da proprietà sia tossiche che cancerogene.

La stima della dispersione in aria e della deposizione secca dovute alle emissioni dell'inceneritore sono state calcolate con il modello AERMOD integrato con l'interfaccia GIS dello strumento EHHRA, dopo aver generato i file contenenti le condizioni meteorologiche e i dati relativi alla morfologia del territorio. I dati meteorologici reperiti ed utilizzati per la simulazione fanno riferimento a 11 anni di osservazioni su due quote di rilevamento, a 10-15 metri e a 117 metri. I dati rilevati ogni dieci minuti sono stati rielaborati in modo da estrarre rilevazioni orarie e valori medi sugli 11 anni disponibili. In figura 2 è riportata la rosa dei venti, con la direzione di provenienza del vento, calcolata dalla media su tutti gli anni di osservazione.

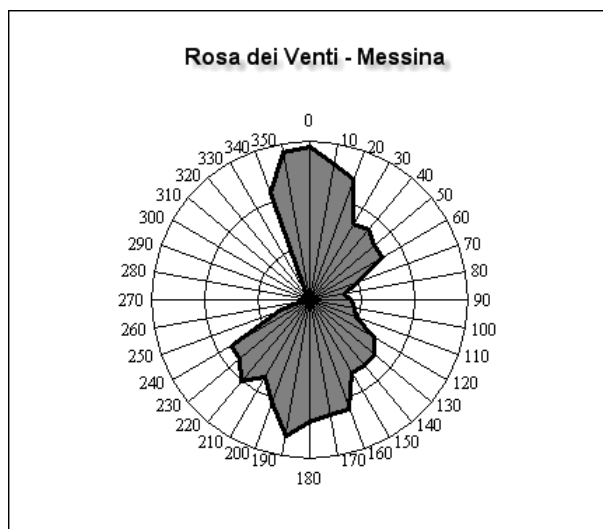


Figure 2. Rosa dei venti estrapolata dai dati meteorologici di Messina

L'output della simulazione consiste in mappe di distribuzione della concentrazione e della deposizione secca per ognuna delle sostanze prese in considerazione. Nelle figure 3a e 3b sono messe a confronto le mappe di distribuzione della concentrazione per le diverse sostanze esaminando l'opzione di terreno piatto (figura 3a a sinistra) e l'opzione con elevazione del terreno che considera la situazione reale del territorio (figura 3b a destra). È possibile osservare come le differenze siano significative sia sulle aree a massima concentrazione che sul profilo delle zone di ricaduta. Tali differenze sono dovute all'effetto della conformazione a valle

dell'area in esame. L'inceneritore e il pennacchio emesso, infatti, si trovano abbondantemente al di sotto delle colline delimitanti l'area per cui quest'ultime fanno da schermo riparando le zone residenziali circostanti.

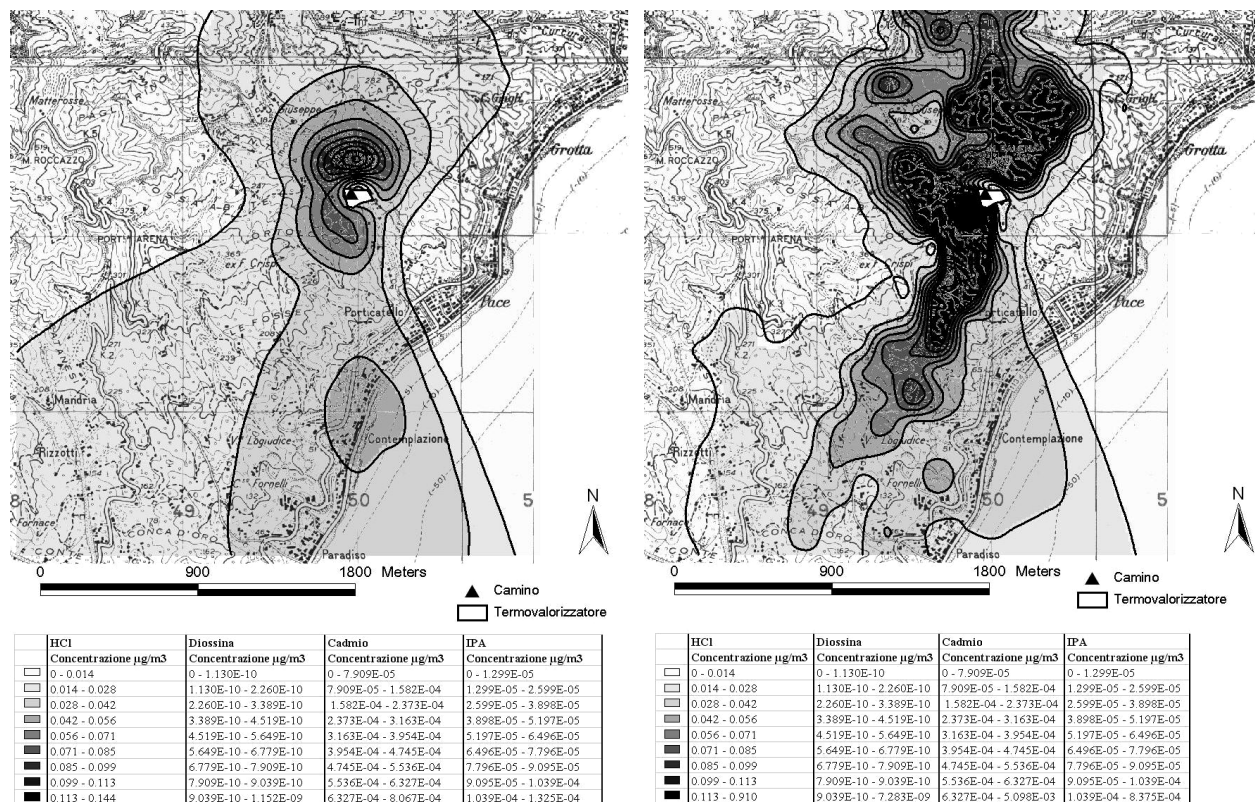


Figura 3. Distribuzione della concentrazione delle sostanze emesse dall'inceneritore con opzione di terreno piatto (3a a sinistra), e con elevazione del terreno (3b a destra)

3.4 Il rischio per la salute umana: i ricettori

Simulate le distribuzioni di concentrazione nei vari media ambientali, lo strumento utilizzato consente il calcolo della ripartizione dei contaminanti applicando i modelli multimedia implementati nel sistema stesso. Inoltre i modelli di bioaccumulo nella catena alimentare hanno stimato la concentrazione dei contaminanti osservati nei vegetali superficiali e sotterranei, nelle uova, nel latte e nella carne degli animali allevati nell'area di studio.

Al fine di stimare i valori di dose assorbita dalla popolazione esposta, nel territorio esaminato sono state individuate due classi distinte di recettori, ciascuna caratterizzata da diversi parametri: i recettori adulti ed i recettori bambini. La durata di esposizione alle emissioni è stata ipotizzata pari a 27 anni, ovvero la durata effettiva dell'impianto di incenerimento, per gli adulti e pari a 6 anni per i recettori bambini. Le proprietà anatomiche e le abitudini alimentari dei ricettori esposti sono state ricavate, laddove non disponibili, dal database europeo Exposure Factors Sourcebook [7]. Il calcolo dell'esposizione ha incluso tra i percorsi di esposizione l'inalazione indoor e outdoor, l'assorbimento cutaneo dal suolo, l'ingestione accidentale di suolo, l'ingestione di prodotti agricoli, carne, uova, acqua e latte. Vale la pena sottolineare che per quanto riguarda l'ingestione di alimenti, il sistema richiede informazioni sulla frazione di cibo prodotto localmente, poiché si ipotizza che i prodotti venduti commercialmente e quindi consumati dalla popolazione locale conterranno percentuali variabili di cibi contaminati.

Combinando i dati sulle concentrazioni dei composti pericolosi, sulle proprietà dei recettori, e sulle proprietà fisico-chimiche e tossicologiche delle sostanze, sono state ottenute mappe di esposizione, di rischio cancerogeno e di quoziente di pericolo. Il rischio cancerogeno totale e il quoziente di pericolo totale per ogni categoria di recettore, è stato valutato sommando i contributi dei vari percorsi di esposizione e di tutti i contaminanti inclusi nell'analisi. La distribuzione e i valori dei rischi calcolati sono riportati in figura 4.

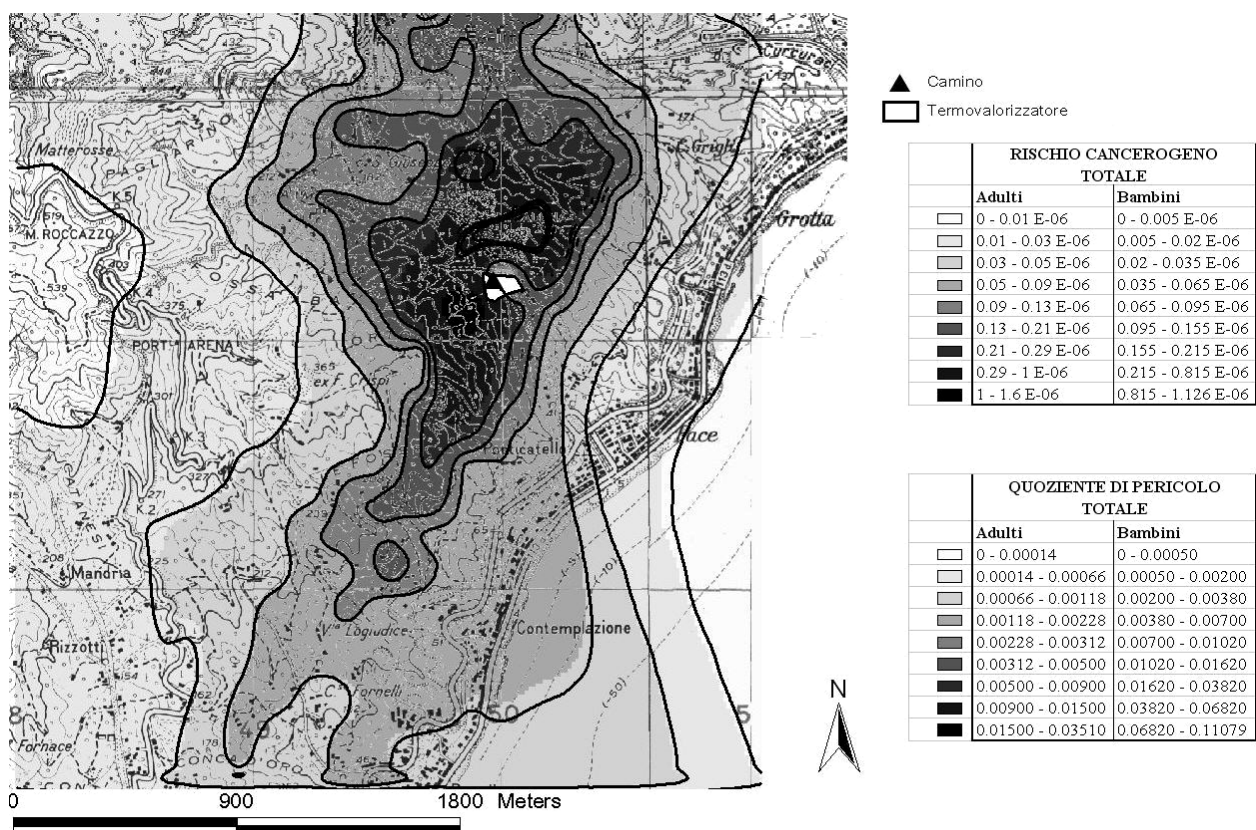


Figura 4. Mappa di distribuzione del rischio cancerogeno totale e del quoziente di pericolo totale per i recettori adulti e bambini

Esaminando i risultati alla luce del range di valori tipicamente ritenuto accettabile per il rischio cancerogeno, $10^{-4} - 10^{-6}$, si evince che il rischio totale per la salute umana sia dei recettori adulti sia dei recettori bambini che vivono nell'area di studio, supera di poco il valore 10^{-6} solo in un raggio piuttosto ristretto nelle adiacenze del camino dell'impianto di incenerimento. Per quanto riguarda il quoziente di pericolo totale, invece, è evidente come la distribuzione non supera in nessun punto dell'area esaminata il valore 1, indicatore di una situazione preoccupante.

3.5 L'analisi di sensitività

Per completare lo studio dell'area contaminata è stata effettuata un'analisi di rischio probabilistica e un'analisi di sensitività per valutare in che misura la variabilità dei parametri di input incida sulle stime di esposizione e di rischio. Per poter assegnare ai parametri una funzione di distribuzione di probabilità è stato di grande supporto il database europeo Expofacts [7] che raccoglie le informazioni sulla variabilità di numerosi fattori di esposizione relativi a diverse popolazioni europee. Utilizzando un software commerciale [8] per eseguire l'analisi Monte Carlo, è stato possibile calcolare la funzione di distribuzione di probabilità in particolare del rischio cancerogeno totale e il contributo dei diversi parametri alla sua varianza. Nel dettaglio i risultati dell'analisi di sensitività evidenziano come i ratei di inalazione, l'ingestione di prodotti agricoli superficiali e il peso corporeo siano le variabili che influenzano maggiormente la stima del rischio; seguono in ordine decrescente di sensitività tutti gli altri parametri. Nella figura 5 è riportato il grafico che illustra il contributo dei vari parametri alla varianza del rischio totale. Si noti che il valore in percentuale negativo per il peso corporeo indica una proporzionalità inversa del rischio rispetto alla variabile.

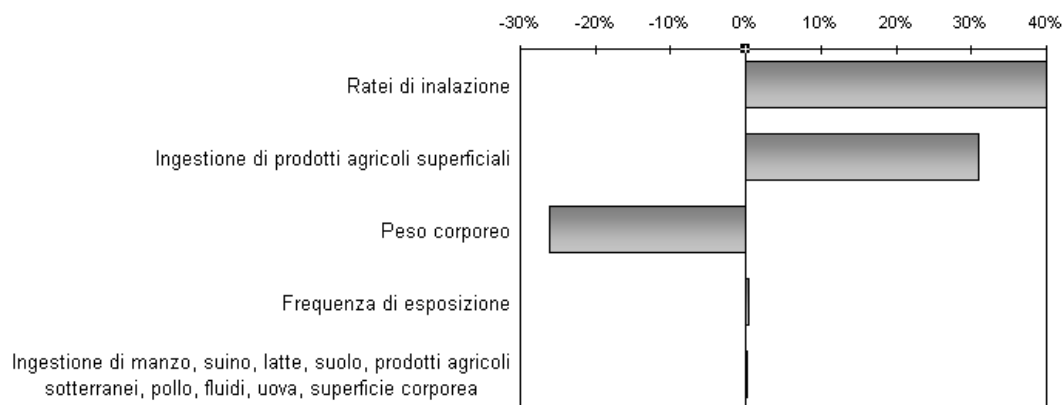


Figura 5. Contributo in percentuale dei vari parametri alla varianza del rischio cancerogeno totale

Con le informazioni complete sulla distribuzione di probabilità del rischio cancerogeno totale per i recettori adulti, opportune funzioni dello strumento EHHRA-GIS consentono di visualizzare sulla mappa dell'area di studio le curve iso-rischio a diversi percentili. Nella figura 6 sono riportate le curve iso-rischio del valore 10^{-7} del rischio cancerogeno totale per i recettori adulti al 20-esimo, 50-esimo e 90-esimo percentile.

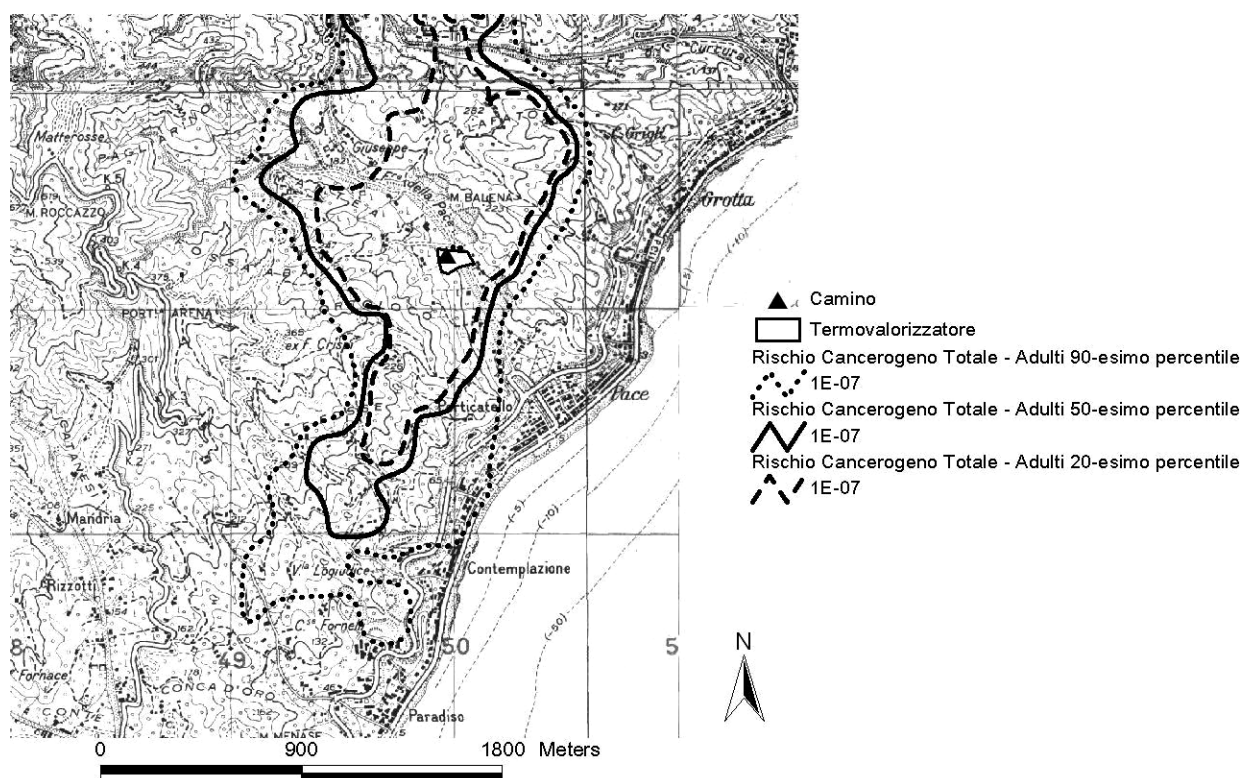


Figura 6. Distribuzione del rischio cancerogeno 10^{-7} per adulti al 20-esimo, 50-esimo e 90-esimo percentile

4.0 CONCLUSIONI

La metodologia utilizzata per lo studio sull'area del Torrente Pace si è dimostrata efficace per l'applicazione di un approccio integrato rispetto alle problematiche ambientali. Il codice EHHRA-GIS risulta essere un ottimo strumento di supporto per gestire tutti i passi della procedura per la stima del rischio per la salute umana. Lo strumento, nelle varie fasi di applicazione, permette di valutare contemporaneamente più sostanze emesse in tutte le matrici ambientali da più sorgenti e di verificare il reale contributo di ognuna di esse. L'approccio integrato, infatti, richiesto ormai dalla normativa europea e nazionale in materia di protezione

ambientale, necessita non solo una valutazione contemporanea delle emissioni in tutte le matrici ambientali (aria, acqua e suolo) ma anche di considerare, in situazioni complesse, sempre più frequenti, la presenza di diverse sorgenti di inquinamento ricadenti nella stessa area. La metodologia adottata ha permesso di evidenziare il contributo di ogni singola sorgente ma al contempo di analizzarle tutte.

L'approccio GIS dello strumento adottato si è dimostrato ancora una volta quello maggiormente indicato per la interfacciabilità con i vari modelli, per una più semplice fase di inserimento dei dati e, non ultimo, per una migliore lettura dei risultati soprattutto da parte di chi deve gestire le situazioni analizzate.

I modelli adottati per il trasporto di inquinanti nelle diverse matrici ambientali (GMS e AERMOD) hanno permesso di considerare la particolare elevazione del terreno e la caratteristica forma a tunnel della valle esaminata. In GMS si è lavorato su un modello tridimensionale del terreno e in AERMOD si è potuta effettuare una simulazione sufficientemente reale avendo a disposizione il modello del terreno e le informazioni sulle condizioni meteorologiche grazie ai dati molto dettagliati forniti dalla Società Stretto di Messina che ha effettuato le osservazioni a più quote di rilevamento.

Tra le numerose sostanze emesse, sono state scelte quelle più significative nel loro contributo al rischio cancerogeno e al quoziente di pericolo totali prediligendo le sostanze il cui effetto può portare alla *mortalità*. Tuttavia, considerando altre sostanze emesse, quali gli NO_x, gli SO_x e le polveri si potrebbe tenere in conto la *morbilità* generata dall'esposizione a queste sostanze. Questo approccio però necessita di modelli che legano le concentrazioni agli effetti sull'uomo non ancora univocamente riconosciuti e indagini sito specifiche maggiormente dettagliate che probabilmente non sono giustificate dal contributo complessivamente contenuto delle sorgenti attualmente presenti nell'area in esame.

L'analisi delle nuove installazioni o l'approfondimento dell'analisi con studi specifici sulle emissioni di biogas della discarica di Portella Arena e su quelle degli impianti di produzione bitume potrebbero richiedere la considerazione delle sostanze il cui effetto può portare morbidità piuttosto che mortalità. Un altro possibile sviluppo è rappresentato dall'approfondimento dello studio delle emissioni liquide della discarica di Portella Arena partendo da una campagna di monitoraggio dei pozzi distribuiti all'interno e a valle dell'area studiata al fine di verificare l'effettivo contributo ambientale della sorgente specifica.

L'analisi effettuata può ritenersi utile per la gestione e il controllo del territorio in esame. I risultati ottenuti possono, infatti, essere presi a riferimento per il controllo e monitoraggio delle prestazioni ambientali degli impianti esistenti, come stato di fatto su cui agire per migliorare tali prestazioni ambientali o per verificare e accettare la possibilità di nuove installazioni. Tutto questo rispettando quanto richiesto dalle recenti normative in materia di protezione ambientale che richiedono un approccio integrato alla problematica.

RIFERIMENTI

1. USEPA United States Environmental Protection Agency, Risk Assessment Guidance for Superfund: Volume I, Human Health Evaluation Manual, OERR, Washington, D.C. 2004.
2. USEPA United States Environmental Protection Agency, Human Health Risk Assessment Protocol for Hazardous Waste Combustion Facilities, vol.1, 2005.
3. Morra, P., Bagli, S., Spadoni, G., The analysis of human health risk with a detailed procedure operating in a Gis environment, Environment International, 32, No.4, 2005, pp. 444-454.
4. USEPA United States Environmental Protection Agency, User's Guide for the AMS/EPA Regulatory Model – Aermom, 2004.
5. D.M. 25 ottobre 1999, n. 471, Regolamento recante criteri, procedure e modalità per la messa in sicurezza, la bonifica e il ripristino ambientale dei siti inquinati, ai sensi dell'articolo 17 del D.Lgs. 5 febbraio 1997, n. 22, e successive modificazioni e integrazioni.
6. INAIL Consulenza Tecnica Accertamento Rischi e Prevenzione, Impianti di produzione dei conglomerati bituminosi, valutazione e contenimento dei rischi lavorativi, 2004
7. CEFIC-LRI 2005 EXPOFACTS Exposure Factors Sourcebook for Europe <http://www.ktl.fi/expofacts>
8. Crystal Ball ® 2004. User Manual