

# **POLITECNICO DI TORINO**

Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio



**Politecnico  
di Torino**

## **Tesi di Laurea Magistrale**

**Analisi degli incidenti NaTech (Natural Hazard Triggering  
Technological Disasters) e valutazione delle ricadute/impatti  
sull'ambiente e sulla salute**

**Relatore**

Panepinto Deborah

**Correlatore**

Ravina Marco  
Urbinati Federico

**Candidato**

Marta Brignone

A.a. 2023/2024

# Indice

<b>Introduzione</b> .....	3
<b>1. Progetto RETURN</b> .....	5
<b>1.1. VS4 – WP5: Modellizzazione delle conseguenze dei principali incidenti di natura industriale in termini di impatto ambientale; resilienza e adattamento delle infrastrutture interdipendenti sempre più esposte ai rischi NaTech dovuti al cambiamento climatico</b> .....	6
<b>2. Eventi NaTech</b> .....	9
<b>2.1. Natural hazard</b> .....	9
<b>2.2. Rischio NaTech</b> .....	9
<b>2.3. UNI/TS 11816-1 “Sicurezza degli impianti a rischio di incidente rilevante”</b> .....	10
<b>3. Database incidenti NaTech</b> .....	15
<b>4. Simulazione di un incidente industriale</b> .....	25
<b>4.1. Caso studio selezionato</b> .....	25
<b>4.2. Modello teorico</b> .....	26
<b>4.2.1. Vessel dynamics liquid</b> .....	27
<b>4.2.2. Mass transfer</b> .....	31
<b>4.2.3. Scelta della sostanza</b> .....	34
<b>4.3. Script modello</b> .....	36
<b>5. Mappe di concentrazione</b> .....	46
<b>5.1 Strumento di modellazione PMSS</b> .....	46
<b>5.2 Creazione delle mappe</b> .....	47
<b>5.3 Analisi mappe di concentrazione (stabilità o instabilità atmosferica)</b> .....	49
<b>5.4 Analisi mappe di concentrazione (limiti di concentrazione)</b> .....	54
<b>5.5 Valutazione del rischio</b> .....	59
<b>Conclusione</b> .....	62
<b>Bibliografia</b> .....	64
<b>Sitografia</b> .....	64
<b>Indice delle figure</b> .....	65
<b>Indice delle tabelle</b> .....	67
<b>ALLEGATO 1</b> .....	68

## Introduzione

La gestione dei rischi NaTech è rappresentata dall'interazione tra disastri naturali e incidenti tecnologici ed è un'ardua sfida dell'era moderna. Essa è caratterizzata da una crescente vulnerabilità delle infrastrutture e delle comunità ai cambiamenti climatici. La combinazione di eventi naturali estremi con incidenti tecnologici può avere conseguenze devastanti, rendendo essenziale lo sviluppo di strategie innovative e integrate per la gestione del rischio.

Negli ultimi decenni i cambiamenti climatici hanno intensificato la frequenza e la gravità di eventi naturali come terremoti, alluvioni e uragani, che possono a loro volta scatenare incidenti tecnologici quali fuoriuscite di sostanze chimiche pericolose, esplosioni industriali e perdite da serbatoi. La gestione del rischio NaTech richiede un approccio integrato che consideri sia i rischi naturali sia quelli tecnologici, al fine di prevenire e mitigare le conseguenze catastrofiche.

Sebbene numerosi studi abbiano esaminato separatamente la valutazione dei rischi naturali e tecnologici, la letteratura attuale evidenzia una lacuna significativa nell'integrazione di questi ambiti, la quale è cruciale per affrontare efficacemente il rischio NaTech.

L'obiettivo principale di questa tesi è quello di fornire un quadro completo e integrato per la gestione del rischio NaTech, integrando la valutazione dei rischi naturali ed antropici con nuove metodologie. Il raggiungimento di quest'ultimo avviene attraverso la creazione di un database dettagliato degli incidenti NaTech, lo sviluppo di un modello predittivo per simulare le conseguenze di tali incidenti e la realizzazione di una mappa delle concentrazioni delle sostanze inquinanti. Lo sviluppo di strategie concrete ed efficaci ha lo scopo di ridurre il rischio e l'adattamento ai cambiamenti climatici. Lo scopo principale è quello di fornire alle autorità competenti, agli operatori di emergenza e alle comunità locali gli strumenti necessari per affrontare in modo proattivo e responsabile le sfide legate al rischio NaTech, promuovendo la sicurezza e la sostenibilità a lungo termine.

In particolare, la tesi si sviluppa nei seguenti punti:

1. creazione di un Database di Incidenti NaTech: esso fornisce una panoramica delle situazioni passate, permettendo di identificare i modelli ricorrenti, le cause sottostanti e le conseguenze degli eventi. Attraverso l'analisi di queste informazioni, sarà possibile formulare strategie preventive più efficaci e affrontare in modo mirato le vulnerabilità esistenti.
2. creazione di un Modello di Simulazione: consiste nello sviluppare un modello predittivo in grado di simulare la rottura di serbatoi e l'evaporazione delle sostanze inquinanti in seguito a un evento NaTech. Questo modello sarà un prezioso strumento per valutare l'entità

dell'inquinamento e prevedere l'espansione delle sostanze inquinanti nell'ambiente circostante. Ciò consentirà di valutare con precisione l'impatto potenziale su risorse naturali, infrastrutture e comunità umane, facilitando la pianificazione di interventi di emergenza e la messa in atto di misure preventive.

3. creazione di Mappe di Concentrazione e Mappe di Valutazione dei Rischi: consentirà di identificare le zone ad alto rischio e di individuare le aree critiche che richiedono interventi prioritari. Inoltre, fornirà un quadro chiaro della distribuzione spaziale delle sostanze inquinanti, facilitando la pianificazione territoriale e la gestione delle risorse ambientali.

Mediante il conseguimento di tali obiettivi, ci si propone di fornire un contributo significativo alla gestione e alla prevenzione dei rischi NaTech, promuovendo la resilienza e la sostenibilità ambientale e garantendo la sicurezza delle comunità umane di fronte alle sfide dei cambiamenti ambientali e climatici.

La metodologia adottata combina l'analisi storica, la modellazione predittiva e la mappatura spaziale, creando un approccio integrato e multidisciplinare. L'analisi storica del database degli incidenti NaTech permetterà di identificare le principali cause degli incidenti, il modello predittivo sviluppato supporterà la valutazione degli impatti potenziali e la mappatura spaziale fornirà una visualizzazione chiara delle aree e delle concentrazioni a rischio.

Questo studio offre un approccio integrato e innovativo per la gestione del rischio NaTech. Esso integra l'analisi storica, la modellazione predittiva e la mappatura spaziale al fine di potenziare la capacità di risposta e di pianificazione delle autorità e delle comunità locali. L'obiettivo è promuovere una gestione dei rischi tecnologici più proattiva e responsabile, soprattutto in contesti di cambiamento climatico.

## 1. Progetto RETURN

Il progetto RETURN (multi-Risk sciEnce for resilienT commUnities undeR a changhiNg climate) è un'ampia collaborazione mirata a potenziare la ricerca sui vari rischi ambientali, naturali e antropici a livello nazionale, incoraggiando il coinvolgimento di tali ricerche nelle catene di valore chiave sia a livello europeo che globale.

Quest'ultimo coinvolge 26 partner, tra cui anche il Politecnico di Torino, in particolare 12 Università, 5 Enti di ricerca e Centri di Competenza, 6 privati, 2 Enti territoriali e il Dipartimento di Protezione Civile.

Il progetto, guidato dall'Università di Napoli Federico II, è finanziato da oltre 115 milioni di euro dal Ministero dell'Università e della Ricerca e avrà la durata di 36 mesi.

RETURN supporterà il potenziamento delle competenze fondamentali, la diffusione della tecnologia e delle conoscenze, e migliorerà la gestione delle emergenze in Italia, coinvolgendo sia enti pubblici che privati e altre parti interessate.

Espliciti sono gli obiettivi scientifici primari di RETURN, che si allineano con le nuove sfide delineate nel Piano Nazionale della Ricerca (PNR):

- comprendere meglio i rischi ambientali, naturali e antropici e la loro relazione con i cambiamenti climatici;
- migliorare la previsione dei rischi e le strategie di prevenzione, adattamento e mitigazione;
- sviluppare nuove tecniche e tecnologie di monitoraggio; promuovere un uso più efficiente e sostenibile di dati, prodotti e servizi;
- potenziare il collegamento tra ricerca e risultati pratici, valorizzando trasversalmente competenze, trasferimento tecnologico e integrazione dei servizi.

Pertanto, l'obiettivo del progetto è di identificare strategie per ridurre il rischio NaTech e adattarsi ai cambiamenti ambientali e climatici, basandosi su valutazione dei rischi naturali e antropici utilizzando nuove metodologie. Queste valutazioni saranno utili per creare scenari quantitativi che descrivono gli effetti sui beni e gli impatti sociali ed economici.

Il programma prevede una serie di attività suddivise in otto aree tematiche chiamate "Spoke", organizzate in tre gruppi distinti.

Il primo gruppo comprende gli Spoke focalizzati sui processi pericolosi legati all'acqua, alle instabilità del suolo, ai terremoti, ai vulcani e alla degradazione dell'ambiente.

Il secondo gruppo comprende gli Spoke che si concentrano sulla valutazione degli impatti degli eventi ambientali, naturali e antropici sulle aree urbane e metropolitane, sulle infrastrutture critiche e sulle comunità.

Il terzo gruppo consiste nello Spoke dedicato al cambiamento climatico.

### **1.1. VS4 – WP5: Modellizzazione delle conseguenze dei principali incidenti di natura industriale in termini di impatto ambientale; resilienza e adattamento delle infrastrutture interdipendenti sempre più esposte ai rischi NaTech dovuti al cambiamento climatico**

I siti industriali, soprattutto se hanno operato a lungo in passato senza leggi ambientali adeguate, sono stati responsabili di impatti ambientali dovuti alle emissioni in aria, acqua e suolo. Grazie alle rigide normative ambientali dell'Unione Europea, le emissioni industriali sono ora fortemente regolamentate, anche tramite l'Autorizzazione Integrata Ambientale per le industrie di grande impatto. Tuttavia, nonostante le emissioni rispettino i limiti di legge, c'è ancora la necessità di valutare la qualità ambientale in contesti industriali complessi, dove potenziali rischi NaTech (Naturali e Tecnologici), come incidenti industriali causati da eventi naturali come tempeste, terremoti, alluvioni e fulmini, possono influenzare sia l'ambiente che la salute umana.

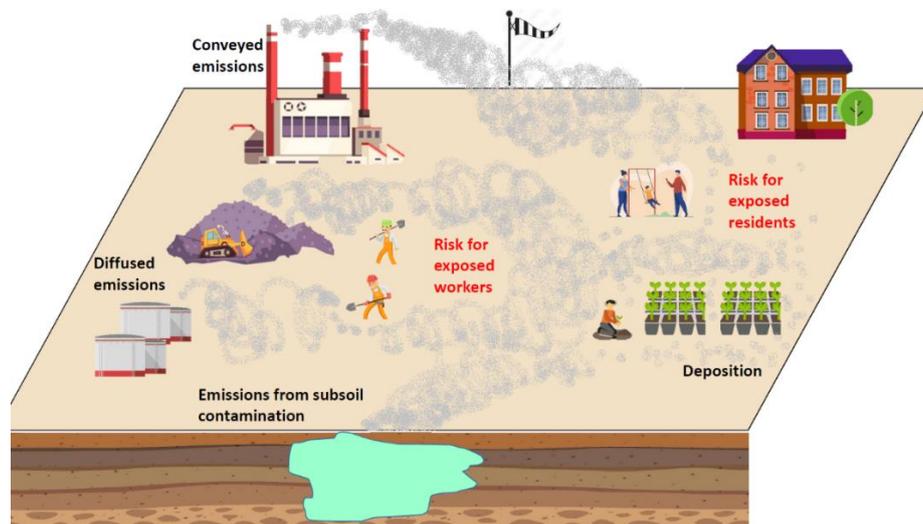
Una versione potenziata dell'Analisi Quantitativa del Rischio (QRA), adattata per gli incidenti industriali scatenati da eventi naturali, risulta essere lo strumento più efficace per valutare gli impatti di tali eventi sulle strutture industriali. Tuttavia, la QRA presenta il vincolo di richiedere notevoli risorse in termini di tempo e competenze. Di conseguenza, sono state sviluppate metodologie più snelle per la valutazione dei rischi industriali causati da eventi naturali. Queste metodologie, più facili da gestire, sono state concepite per eseguire screening e decidere se sia necessario condurre una QRA.

È essenziale condurre questo tipo di valutazione per diverse finalità:

- pianificare correttamente futuri progetti industriali e attività sulle aree potenzialmente coinvolte, come richiesto dalla normativa italiana/europea per valutare specifici progetti;
- definire interventi tecnici volti a ridurre l'impatto ambientale delle attività industriali attuali, come parte dell'autorizzazione ambientale integrata;
- analizzare l'impatto attuale sul territorio delle attività industriali esistenti, come richiesto dalla legislazione italiana/europea per determinate installazioni industriali.

Con riferimento agli impatti sull'atmosfera, per ottenere una valutazione completa dell'impatto dei siti industriali, è necessario considerare le emissioni provenienti sia dalle fonti diffuse degli impianti

operativi che dal sottosuolo eventualmente contaminato, insieme alle emissioni convenzionalmente rilasciate dai camini. È importante anche correlare la concentrazione di inquinanti nei punti di esposizione con i potenziali rischi per la salute dei soggetti esposti (*Figura 1*).



*Figura 1. Rappresentazione grafica dell'ambito del compito*

I modelli utilizzati per gestire le emissioni in un sito industriale, sia diffuse che concentrate, sono molto vari. Le emissioni dagli impianti industriali vengono valutate principalmente tramite modelli sofisticati che simulano la dispersione degli inquinanti nell'aria. Questi modelli consentono di considerare varie condizioni atmosferiche e topografiche, ma richiedono dati dettagliati e competenze specializzate per essere utilizzati efficacemente.

Recentemente, pochi studi hanno adottato modelli avanzati di dispersione nell'ambito della Valutazione del Rischio Sanitario-Ambientale, senza però cercare di armonizzare tali metodologie. Attualmente, l'approccio utilizzato per valutare gli impatti dei siti contaminati sull'ambiente e sulla salute umana è integrato nella Valutazione del Rischio Sanitario-Ambientale. Le metodologie per questa valutazione, sviluppate a livello internazionale per siti contaminati, mirano a valutare gli impatti specifici causati da agenti chimici o fisici in determinati siti e tempi, con l'obiettivo di proteggere la salute locale. In Italia, la Valutazione del Rischio Sanitario-Ambientale è stata standardizzata dall'Agenzia Pubblica ISPRA con le Linee Guida del 2008 e successive revisioni. Sul mercato sono disponibili software nazionali e internazionali, come Risk-net, RBCA, RISC, che eseguono analisi di rischio di secondo livello, basate su equazioni semplificate, ma tendenzialmente sovrastimano gli impatti sui riceventi.

Attualmente, né l'approccio basato sulla modellizzazione avanzata della dispersione né quello relativo alle metodologie di valutazione del rischio sanitario-ambientale possono essere utilizzati

efficacemente, in modo isolato e senza modifiche, per stimare con affidabilità l'impatto sulla salute umana causato da siti industriali in funzione o in fase di pianificazione.

Partendo dalla ricerca bibliografica sulle metodologie semplificate per la valutazione del rischio NaTech, sarà sviluppata una metodologia qualitativa che tiene conto delle normative più recenti, da utilizzare come strumento di selezione per identificare le situazioni che richiedono un'Analisi Quantitativa del Rischio (QRA) più dettagliata e costosa. Questa metodologia proposta, utilizzando indicatori chiave di pericolo (KHIs) appropriati, determinerà il livello di rischio NaTech associato a una particolare situazione, come ad esempio un impianto di processo situato in un'area specifica. Questo screening iniziale consentirà di individuare i siti che richiedono un'analisi più approfondita e per i quali è necessario modellare l'impatto sull'ambiente.

Attualmente, gli impatti derivanti dalle emissioni di contaminanti nell'atmosfera da fonti sopra e sotto il suolo vicino alle strutture industriali vengono valutati separatamente e con approcci diversi. Di conseguenza, non è possibile stimare le singole contribuzioni delle diverse fonti ai rischi totali e quindi i benefici economici delle misure di mitigazione specifiche che possono essere adottate per ridurre il rischio per i recettori esposti. Inoltre, le metodologie utilizzate per queste valutazioni sono molto differenti, il che rende difficile confrontare i risultati ottenuti dai vari studi. Per le fonti sopra il terreno, ad esempio, la valutazione degli impatti causati dalle emissioni nell'aria avviene tramite modelli complessi di dispersione dell'aria, che richiedono numerosi dati di input e competenze avanzate, rendendo l'accesso a tali strumenti difficile per molti operatori e regolatori.

Il compito principale è di armonizzare e integrare queste valutazioni per supportare la gestione della qualità ambientale in un contesto industriale complesso, dove sia l'inquinamento del suolo che gli impianti industriali possono impattare sull'ambiente e sulla salute umana. L'obiettivo secondario è di migliorare l'accuratezza e l'applicabilità degli strumenti esistenti ottimizzandone la precisione e l'utilizzo delle risorse disponibili, come il tempo, il personale e la tecnologia. Questo sarà realizzato tramite un approccio graduale con strumenti che vanno dalla semplicità alla complessità.

## **2. Eventi NaTech**

### **2.1. Natural hazard**

Un rischio naturale è un evento della natura che ha il potenziale di causare danni agli esseri umani, agli animali o all'ambiente. Il concetto di pericolo indica quindi una caratteristica intrinseca della natura che può provocare danni.

I pericoli naturali possono venir suddivisi in quattro grandi categorie:

- pericolo meteorologico: fulminazioni, piogge torrenziali, trombe d'aria, ecc.;
- pericolo idrologico: alluvioni, frane;
- pericolo climatico: temperature estreme, incendi boschivi, siccità;
- pericolo geologico: sisma, maremoti, eruzioni vulcaniche ecc...

Il concetto di pericolo naturale è spesso collegato al concetto di disastro naturale, poiché sono strettamente correlati. Un disastro naturale, noto anche come catastrofe o calamità, si verifica quando un pericolo naturale causa danni significativi a una comunità.

### **2.2. Rischio NaTech**

Il termine “NaTech” deriva infatti dall’abbreviazione dei termini inglesi “NATural hazard triggering TECHnological Disasters” (eventi naturali che innescano disastri tecnologici).

L’INAIL li definisce: “Incidenti tecnologici, come incendi, esplosioni e rilasci tossici, che possono verificarsi all'interno di complessi industriali e lungo le reti di distribuzione a seguito di eventi calamitosi di matrice naturale”.

In altre parole, si tratta di incidenti imprevisti che, sebbene abbiano alcune somiglianze, si differenziano dai tipici eventi tecnologici. Questo termine si riferisce agli incidenti industriali derivanti da fattori interni come malfunzionamenti, difetti di progettazione o errori umani durante le operazioni.

Nonostante le cause diverse, entrambi i tipi di eventi conducono agli stessi scenari, con conseguenze sulla popolazione e sull'ambiente. Il potenziale impatto di un evento naturale su un impianto industriale può essere considerato come un ulteriore fattore, aggiungendo la sua probabilità di accadimento a quella delle altre cause interne dell'impianto. Questo può portare potenzialmente a un aumento nella frequenza e nell'intensità degli incidenti legati al rilascio di sostanze pericolose.

### **2.3. UNI/TS 11816-1 “Sicurezza degli impianti a rischio di incidente rilevante”**

La nuova UNI/TS 11618-1 nasce dalla crescente consapevolezza riguardo all'importanza della prevenzione degli incidenti significativi causati da pericoli naturali, noti come NaTech, nelle industrie che gestiscono sostanze pericolose. Questa consapevolezza è supportata dall'evoluzione delle metodologie e delle normative a livello internazionale, europeo e nazionale. Nella specifica tecnica, l'evento NaTech è definito come un incidente significativo che coinvolge stabilimenti industriali che trattano sostanze pericolose, come definito dalla Direttiva 2012/18/UE (c.d. Seveso III) e dal D.lgs.105/2015, il suo recepimento nazionale.

La specifica tecnica (UNI/TS) inaugura una nuova serie dedicata ai NaTech che prevede sezioni dedicate ai singoli pericoli oggetto di analisi.

La parte 1 pubblicata include una sezione generale e una sezione specifica dedicata al rischio sismico, le parti successive che sono in lavorazione presso la UNI/CT 266 del CTI, saranno dedicate agli altri eventi NaTech quali: esondazioni, fulminazioni, tsunami, frane.

La UNI/TS 11816-1 nasce con l'obiettivo di fornire ai gestori di stabilimenti con pericolo di incidente rilevante criteri, metodologie e procedure per la valutazione dei rischi NaTech sulla base delle conoscenze al momento disponibili.

La specifica tecnica fornisce ai responsabili di impianti a rischio di incidenti significativi una serie di linee guida mirate ad aiutarli nell'analisi e nella gestione di tali rischi. Queste linee guida includono strumenti, informazioni e metodi per affrontare le fasi di previsione, preparazione, gestione dell'emergenza e ripristino delle condizioni originali.

Gli obiettivi per lo sviluppo della norma includono:

- fornire ai responsabili strumenti, approcci e protocolli avanzati per valutare i rischi NaTech;
- presentare una sintesi completa delle risorse attuali sulla gestione dei rischi NaTech per aiutare i gestori a migliorare i loro sistemi di gestione della sicurezza;
- facilitare l'armonizzazione con altre disposizioni normative nazionali relative agli impianti a rischio di incidenti significativi;
- promuovere la consapevolezza tra i gestori sull'importanza della prevenzione e della protezione da incidenti significativi causati da eventi NaTech.

La nuova linea guida aiuta a gestire eventi NaTech, migliorando la preparazione delle strutture industriali contro pericoli o disastri naturali. È particolarmente utile per le piccole e medie imprese, che potrebbero non avere risorse interne per affrontare tali eventi. Inoltre, mira a diffondere

metodologie già collaudate ma spesso poco conosciute dai gestori. Il progetto prevede una parte generale e sezioni specifiche per vari pericoli come sismi, alluvioni, fulmini, tsunami e frane. Altri pericoli naturali potranno essere aggiunti successivamente.

La guida adotta un approccio logico nella gestione dei pericoli, suddividendo il processo in varie fasi:

1. analisi e definizione dei pericoli naturali, compresa la caratterizzazione del territorio circostante basata sulle informazioni fornite dalle autorità pubbliche;
2. valutazione della vulnerabilità degli asset dello stabilimento e degli scenari incidentali associati agli eventi naturali ricorrenti nel sito;
3. identificazione degli elementi suscettibili agli effetti degli scenari incidentali e definizione delle conseguenze;
4. caratterizzazione dei rischi NaTech rilevanti per il sito;
5. attuazione di misure preventive e di protezione identificate attraverso le valutazioni del rischio NaTech;
6. implementazione di misure in risposta agli avvisi di Early Warning;
7. preparazione dei piani di intervento interni e coordinamento con le autorità esterne competenti in caso di evento NaTech, che coprono previsione/prevenzione, preparazione, risposta e ripristino.

Negli ultimi decenni, si è osservato un aumento dei disastri naturali, in gran parte dovuti a eventi idrologici e meteorologici, come alluvioni ed uragani, che causano ingenti danni economici, interessando aree estese (*Suarez-Paba, M. C., Perreur M., Munoz F., Cruz A. M., 2019*). Riguardo agli incidenti NaTech, le principali banche dati mondiali suggeriscono che circa un incidente significativo su 20 è causato da eventi naturali come fulmini, alluvioni, venti forti, frane e terremoti. L'ISPRA ha documentato almeno un incidente NaTech all'anno in un Paese dell'Unione Europea negli ultimi 30 anni, con circa 30 eventi segnalati in Italia, principalmente coinvolgenti impianti di gas, industrie chimiche, raffinerie e depositi di sostanze pericolose. Questa tendenza è attribuita e sarà sempre più influenzata dai cambiamenti climatici previsti e già in atto.

Il Piano Nazionale di Adeguamento ai Cambiamenti Climatici del 2018, attualmente in fase di valutazione presso il Ministero della Transizione Ecologica, considera le industrie e le infrastrutture pericolose come ambiti prioritari. Secondo i risultati del modello di simulazione climatica per l'Italia, nel periodo 2021-2050 si prevede un aumento della frequenza e dell'intensità degli eventi meteorologici estremi, come fulmini, alluvioni e frane, soprattutto nelle zone della pianura Padana, l'alto versante adriatico, le aree costiere del centro-sud, la Sicilia e la Sardegna. Questi eventi

potrebbero influenzare le attività industriali e le infrastrutture che impiegano processi e sostanze chimiche pericolose.

La maggior parte dei circa mille stabilimenti in Italia a rischio di incidenti rilevanti è soggetta al rischio NaTech, ovvero l'interazione tra disastri naturali e pericoli industriali. I principali eventi naturali fonte di preoccupazione sono i terremoti e i fenomeni idrogeologici come frane e alluvioni. Questi ultimi stanno diventando sempre più frequenti e impattanti, soprattutto a causa dei cambiamenti climatici e degli eventi meteorologici estremi.

Gli eventi NaTech vanno oltre gli incidenti rilevanti comuni, coinvolgendo l'intero stabilimento e causando danni simultanei su larga scala, con scenari incidentali complessi da gestire senza adeguate misure preventive. Inoltre, i disastri naturali influenzano infrastrutture cruciali come reti elettriche, forniture energetiche e idriche, e sistemi di comunicazione, riducendo l'accessibilità ai servizi di emergenza e sanitari. Possono anche causare incidenti in più installazioni nella stessa area e possono innescare altri pericoli naturali, come terremoti seguiti da tsunami (eventi NatNat). Il potenziamento della governance del rischio e l'aumento della resilienza dei sistemi locali sono obiettivi comuni dei paesi dell'UE secondo il Sendai Framework 2015-2030 per la riduzione del rischio da disastri, anche legati ai cambiamenti climatici.

La nuova norma UNI/TS 11816-1:2021 propone l'approccio sistemico multirischio come base metodologica, concentrato sul ciclo completo di prevenzione, previsione, preparazione, risposta, ripristino e follow-up. Questo metodo considera gli effetti degli eventi NaTech e utilizza analisi del sito per valutare i rischi correlati, definendo in modo integrato modalità di prevenzione, protezione e supporto per i pericoli naturali identificati. L'approccio segue lo schema del ciclo di gestione delle emergenze, utilizzando l'approccio di governo della complessità per gestire il rischio multirischio.

Questa metodologia mira a:

- sensibilizzare i gestori sugli stabilimenti al rischio di incidenti da eventi NaTech;
- integrare i Sistemi di Gestione della Sicurezza degli Stabilimenti per affrontare tali rischi;
- fornire strumenti e linee guida per gestire il rischio NaTech.

La guida consente di analizzare e valutare i pericoli naturali, valutare l'impatto su processi e installazioni, identificare aree vulnerabili e tipologie di incidenti, prevedere impatti multipli e sequenziali, considerare rischi multipli contemporanei e catene di eventi, proteggere l'ambiente e ridurre il rischio per le persone, nonché implementare misure di sicurezza e trarre insegnamenti dalle esperienze passate.

È essenziale collaborare con il Servizio Nazionale di Protezione Civile (SNPC), specialmente per valutare i pericoli naturali come sismicità e inondazioni nelle mappe di pericolosità, così come per considerare le proiezioni regionali dei cambiamenti climatici. Questa cooperazione è cruciale per sviluppare strategie di adattamento e implementare misure preventive e di mitigazione del rischio. Le attività del SNPC, definite dal Decreto Legislativo n.1 del 2018, coprono tutte le fasi del ciclo di gestione delle emergenze. Il dialogo con il SNPC consente di utilizzare informazioni sulla prevedibilità di eventi meteorologici estremi per attuare procedure di sicurezza e mitigazione degli impatti. Le "Zone di Allerta" (ZA) del sistema nazionale di protezione civile, coordinate dal Dipartimento della Protezione Civile (DPC), consentono di identificare aree omogenee per rispondere a eventi meteorologici e idrologici. Conoscere la ZA in cui si trova lo stabilimento e collegarsi al sistema di allertamento nazionale permette di anticipare eventi e implementare misure di protezione attiva, come il posizionamento di barriere, solo se c'è tempo sufficiente per agire in modo efficace.

Comprendere tali fattori consente di pianificare le attività dello stabilimento in conformità con i vari livelli di allerta del sistema nazionale-regionale, come preallerta, attenzione, preallarme e allarme, attraverso l'utilizzo dei dati meteorologici storici dello stabilimento, la valutazione dei rischi derivanti da eventi meteorologici eccezionali e l'identificazione degli hot-spot durante precipitazioni intense o allagamenti, considerando il battente e le aree critiche per l'emergenza.

Ci sono diversi aspetti che richiedono miglioramenti per un'applicazione efficace dell'approccio sistemico, tra cui:

- migliorare la conoscenza e l'integrazione tra i gestori degli stabilimenti PIR e il Sistema Nazionale di Protezione Civile, inclusi strumenti di previsione, metodi di prevenzione e gestione dell'emergenza;
- uniformare metodi, linguaggi e procedure tra gli attori coinvolti nella gestione degli eventi NaTech;
- aumentare l'analisi e la conoscenza dei potenziali scenari NaTech negli stabilimenti;
- potenziare le attività di preparazione (pianificazione e addestramento) per la gestione degli eventi NaTech;
- integrare le procedure di gestione degli eventi NaTech nei Sistemi di Gestione della Sicurezza degli Stabilimenti;
- potenziare la formazione e l'addestramento delle risorse interne degli stabilimenti PIR per la gestione degli eventi NaTech, anche in collaborazione con le strutture esterne di intervento.

La nuova norma UNI/TS 11816-1:2021, basata sull'approccio sistemico per varie tipologie di rischio naturale, come sismico, idrogeologico, eventi meteorologici estremi, tsunami e fulmini, mira a essere uno strumento valido per affrontare queste sfide.

### 3. Database incidenti NaTech

La crescente preoccupazione per gli eventi naturali che provocano scenari tecnologici, noti come eventi NaTech, coinvolge sia le autorità regolatorie che l'industria, soprattutto nelle regioni soggette a calamità naturali. Si presenta un'analisi completa sull'incidenza di tali scenari NaTech sull'industria di processo.

Si è esaminato un set di incidenti passati verificatisi negli ultimi 70 anni, con l'obiettivo di comprendere la tendenza degli eventi NaTech, la loro distribuzione geografica, gli esiti tecnologici finali e le conseguenze in termini danni materiali.

Il punto di partenza per lo sviluppo della banca dati è stato la raccolta di informazioni sugli incidenti industriali causati da eventi naturali. A questo scopo sono stati analizzati i seguenti database:

1. Database eMARS (Major Accident Reporting System) (European Major Accident Hazards Bureau (MAHB), 2019): gestito dall'European Major Accident Hazards Bureau (MAHB) del Centro Comune di Ricerca (JRC) della Commissione Europea, è stato istituito dopo l'implementazione della prima Direttiva "Seveso" (82/501/CEE) nel 1982, la quale è tuttora attiva.

Il database contiene informazioni relative a incidenti e situazioni in cui non si sono verificati infortuni nell'Unione Europea. Questi dati sono raccolti attraverso il sistema di segnalazione obbligatoria previsto dalle Direttive Seveso, e includono anche indicazioni volontarie provenienti da altri paesi. Le registrazioni presenti in eMARS forniscono dettagliate descrizioni degli incidenti, comprese informazioni sull'impianto coinvolto, le sostanze implicate, le cause dell'incidente, le conseguenze e le procedure di risposta in situazioni di emergenza.

2. Database eNATECH (Natural hazard-triggered technological accident database, 2012): banca dati sugli incidenti tecnologici provocati da rischi naturali, gestita dal Centro comune di ricerca della Commissione Europea.

eNATECH è un sistema online e collaborativo che permette l'analisi di eventi passati, inclusi incidenti e situazioni quasi incidentali, verificatisi in impianti industriali a causa di impatti derivanti da eventi naturali.

L'obiettivo principale di eNATECH consiste nella raccolta sistematica e organizzata di dati relativi a incidenti e situazioni quasi incidentali NaTech che sono accaduti in tutto il mondo.

Il database eNATECH è suddiviso in quattro tipi di registrazioni: Eventi Naturali, Incidenti NaTech, Siti e relativi Allegati.

Per reperire ulteriori dati relativi a incidenti e sversamenti, si potrebbero consultare le seguenti banche dati:

- Database MHIDAS (Major Hazards Incident Data Service) raccoglie informazioni sugli incidenti che coinvolgono l'industria di processo, il trasporto e lo stoccaggio di materiali pericolosi in 95 Paesi in tutto il mondo. Le registrazioni di MHIDAS forniscono dettagliati riepiloghi degli incidenti, inclusi dettagli sui materiali e sulle attrezzature coinvolte, nonché una catena di eventi che collega le cause alle conseguenze.
- Database TAD IChemE (The Accident Database, Institution of Chemical Engineers) documenta incidenti con sostanze pericolose in tutto il mondo. Questo archivio contiene oltre 10.500 registrazioni e fu popolato nel periodo tra il 1997 e il 2000. Le registrazioni includono dettagliate descrizioni degli incidenti, comprese informazioni sulle cause, sulle conseguenze e, in alcuni casi, sui dettagli delle attrezzature e delle sostanze coinvolte.
- Banca dati ARIA (Analisi, ricerca e informazione sugli incidenti) raccoglie informazioni sugli incidenti e infortuni che comportano o potrebbero comportare rischi per la salute, la sicurezza pubblica o l'ambiente. Benché il database contenga dati provenienti da tutto il mondo, la maggior parte (87%) delle informazioni riguarda incidenti avvenuti in Francia. Le registrazioni in ARIA sono dettagliate, ma non sempre sono disponibili in inglese.
- Database NRC (National Response Centre) raccoglie registrazioni relative a sversamenti di sostanze pericolose in qualsiasi area degli Stati Uniti e dei suoi territori. Le voci provengono da segnalazioni volontarie dei cittadini e possono non essere sempre accurate o verificate a causa della loro origine volontaria.
- CONCAWE annualmente pubblica un rapporto sulle prestazioni degli oleodotti europei che attraversano vari Paesi. Questo rapporto include informazioni sugli incidenti che hanno causato sversamenti. Le registrazioni di CONCAWE forniscono dettagli limitati, senza una descrizione approfondita dell'evento, ma contengono informazioni sul servizio, sul tipo di oleodotto coinvolto e sulla parte della pipeline in cui si è verificato il problema.

Poiché il numero dei dati consultati è elevato e variegato, particolare attenzione è stata dedicata a controlli specifici basati sulla data, sull'ubicazione geografica, sulla tipologia di attività industriale, sulle sostanze coinvolte nell'evento e sulla descrizione dell'incidente.

Nel database eMARS i dati sono stati ricercati utilizzando la parola chiave "NaTech" o basandosi sull'evento naturale che ha innescato lo scenario tecnologico.

Nel caso del database eNATECH, essendo tutti incidenti di natura NaTech, i dati sono stati selezionati in base alla specificità dell'incidente.

Durante il processo di recupero dei dati, sono stati elaborati oltre 1277 record:

- Database eMARS: 1198 record
- Database eNATECH: 79 record

*Tabella 1. Numero di eventi Natech raccolti nei diversi database consultati. Vengono riportati: il numero totale di record nel database, il numero di record selezionati e la % di eventi Natech presenti in ciascun database*

Database	Numero totale di record	Record selezionati	% eventi NaTech attendibili
eMARS	1198	29	2,42 %
eNATECH	79	40	50,63%

### **Struttura database:**

Nelle *Tabella 2* e *3* sono raffigurate le strutture dei database eMARS e eNATECH.

Per evitare l'abuso del database per criticare le performance di un paese o di un'azienda, non vengono identificate né la posizione né i nomi delle aziende coinvolte negli incidenti registrati. Questa prassi è comune nei database, dove l'anonimato favorisce la condivisione delle informazioni e scoraggia un utilizzo inappropriato delle stesse per fini di incriminazione o punizione delle fonti dei dati.

Le statistiche annuali eMARS, tuttavia, non sono considerate affidabili per i dati degli ultimi tre anni a causa del processo di reporting, che in genere richiede circa tre anni per essere completato a causa di indagini, revisioni interne e traduzioni. Di conseguenza, molti rapporti non diventano disponibili online fino a 2-3 anni dopo l'incidente.

In caso di significativa attività legale legata all'incidente, il ritardo nella pubblicazione del rapporto può essere molto più lungo di tre anni. Prima della Direttiva Seveso II, non esistevano le classificazioni "livello superiore" e "livello inferiore", e i siti non potevano essere classificati definitivamente fino agli inizi degli anni 2000. Inoltre, i siti al di fuori dell'UE non ricevono classificazioni Seveso. I "quasi incidenti" nei siti dell'UE sono eventi che non soddisfano i criteri per essere considerati incidenti rilevanti ai sensi del Seveso, mentre gli "altri eventi" sono solitamente incidenti legati al trasporto o segnalati da paesi OCSE non membri dell'UE.

*Tabella 2. Struttura database eMARS*

Identificativo dell'incidente	Data incidente	Legislazione	Tipo di evento	Titolo dell'incidente	Tipo d'industria
-------------------------------	----------------	--------------	----------------	-----------------------	------------------

eNATECH è un sistema online e collaborativo per l'analisi degli incidenti e degli eventi quasi incidenti che coinvolgono impianti industriali a causa di pericoli naturali. Operativo dal 2012, il sistema mira a raccogliere in modo sistematico e dettagliato dati su incidenti NaTech e eventi quasi incidenti in tutto il mondo, facilitando la ricerca e l'analisi dei rapporti sugli incidenti NaTech. Il database supporta studi sulle lezioni apprese e include record sui pericoli naturali, sugli incidenti NaTech, sui siti industriali e relativi allegati. Tutti gli utenti registrati possono contribuire ai dati, con misure per preservare la riservatezza delle informazioni sensibili.

Il sistema eNATECH offre un controllo a tre livelli dello stato dei dati per la maggior parte dei tipi di record: Bozza, Finale e Pubblicato. I record in Bozza sono visibili solo ai loro creatori e vengono considerati incompleti, consentendo modifiche continue. Quando i creatori completano il lavoro sul record, possono impostare lo stato come Finale, rendendolo pronto per la condivisione con gli altri utenti di eNATECH. Una volta che un record è Finale, gli amministratori del sistema lo esaminano per verificarne l'accuratezza. Se confermato, lo stato del record viene impostato su Pubblicato, rendendolo visibile a tutti gli utenti di eNATECH. I creatori non possono modificare i record pubblicati e devono contattare gli amministratori per ritornare allo stato di Bozza se necessario.

I record possono essere identificati in tre modi differenti: "Eventi Naturali", "Siti" e "Incidente NaTech".

Nella sezione "Eventi Naturali" in eNATECH contiene informazioni su eventi naturali passati che hanno causato incidenti NaTech. È suddiviso in varie sezioni, tra cui informazioni generiche, posizione geografica dell'evento, dettagli aggiuntivi sull'evento stesso e conseguenze, che includono perdite, morti e livello di risposta d'emergenza richiesta. È possibile aggiungere allegati, come articoli di giornale o scientifici, a ciascun record per fornire ulteriori informazioni di supporto.

Il tipo di record "Siti" in eNATECH contiene informazioni sui siti industriali in cui si sono verificati incidenti NaTech. È suddiviso in varie sezioni, tra cui informazioni generiche come il nome e il tipo dell'attività industriale, la posizione geografica del sito, una descrizione delle attività del sito e informazioni sull'azienda operante.

Il tipo di record "Incidente NaTech" in eNATECH contiene dettagli sulle cause, la dinamica, le conseguenze e la risposta agli incidenti NaTech, includendo le lezioni apprese. Ogni record è diviso in sezioni, con la prima che mostra informazioni generiche come il tipo di record, la data e lo stato dei dati, oltre all'evento naturale e al sito associato all'incidente. Gli utenti devono associare un evento naturale e un sito a ciascun incidente, scegliendo da un elenco esistente o creando nuovi record. Dopo le informazioni iniziali, ci sono sezioni aggiuntive per inserire dettagli specifici sull'incidente.

Tabella 3. Struttura database eNATECH

Identificativo dell'incidente	Data incidente	Rischio naturale	Luogo incidente	Titolo dell'incidente
-------------------------------	----------------	------------------	-----------------	-----------------------

Gli eventi raccolti sono stati organizzati in un database, la cui struttura è mostrata nella *Tabella 4*.

Ogni record è descritto da:

- ‘DATA’: il formato della data è DD/MM/YYYY, in particolare dall’anno 1983 al 2022;
- ‘LUOGO’: è identificato dallo Stato in cui è avvenuto l’incidente;
- ‘RISCHIO NATURALE’: in particolare, si sono riscontrati: fulmine, vento forte, uragano, terremoto, pioggia battente, frana, allagamento, tempesta, tsunami e basse temperature;
- ‘ATTIVITA’ INDUSTRIALE’: i processi produttivi maggiormente riscontrati sono petrolchimico/raffinerie di petrolio, oleodotti e gasdotti, attività minerarie, impianto iniezione acque reflue, produzione di prodotti chimici generali, produzione plastica e gomma, lavorazione metalli, produzione di prodotti farmaceutici, impianti di energia e desalinizzazione, produzione e stoccaggio di pesticidi, biocidi e fungicidi, impianto di biogas, produzione di prodotti alimentari e bevande, impianto di stoccaggio del gas naturale e stoccaggio e distribuzione all’ingrosso e al dettaglio;
- ‘UNITA’ LOCALE’: si riferisce a una parte specifica dell’installazione industriale che svolge una determinata funzione o processo. Può indicare un’area o un reparto all’interno dell’impianto stesso, che potrebbe essere dedicato a una fase particolare della produzione o a un’attività specifica. Si sono identificate: serbatoio di stoccaggio, gasdotto, bacino di decantazione, deposito materiali o materiali di scarto, tubazioni, serbatoio raccolta acqua piovana, scambiatori di calore, unità di steam cracking e altre unità dell’impianto.
- ‘TIPOLOGIA RILASCIO’: si riferisce al tipo di emissioni o scarichi che vengono rilasciati nell’ambiente circostante dall’attività industriale. Questi rilasci possono includere sostanze chimiche, gas, vapori, fumi, liquidi o altri materiali che vengono prodotti o emessi durante i processi industriali. La tipologia di rilascio può variare a seconda del tipo di industria, dei processi di produzione utilizzati e dei materiali impiegati. In particolare, si sono riscontrati i seguenti rilasci: rilascio di solido a terra, liquido a terra, liquido in acqua, rilascio di gas, vapore, nebbia o fumo nell’aria.
- ‘SOSTANZE COINVOLTE’: si riferisce alle diverse sostanze chimiche o materiali che sono presenti o utilizzate all’interno dell’impianto industriale. Queste sostanze possono essere impiegate nei processi di produzione, nei prodotti finiti o possono essere prodotte come

sottoprodotti durante le operazioni industriali. Le sostanze ritrovate maggiormente sono: metano, idrocarburi e miscele di idrocarburi, gas naturale, composti azotati, composti clorurati, cianuro e altre sostanze.

- ‘DESCRIZIONE EVENTO’: in questa sezione vengono descritti gli eventi incidentali all’interno delle diverse attività industriali.

Tabella 4. Struttura database

DATA	LUOGO	RISCHIO NATURALE	ATTIVITA' INDUSTRIALE	UNITA' COINVOLTE	TIPOLOGIA RILASCIO	SOSTANZE COINVOLTE	DESCRIZIONE EVENTO
------	-------	------------------	-----------------------	------------------	--------------------	--------------------	--------------------

Nella categoria ‘DATA’ si può osservare che 21 incidenti sono avvenuti prima degli anni 2000.

Nella *Figura 1* si può osservare la disposizione degli incidenti NaTech: 8 in America Settentrionale, 9 in America Meridionale, 21 in Europa, 2 in Africa, 8 in Asia e 1 in Oceania. Venti incidenti del database non hanno informazioni del luogo dell’incidente.



Figura 2. Locazione incidenti NaTech

Dalla *Figura 1* emerge chiaramente che le aree geografiche con il maggior numero di incidenti industriali sono prevalentemente localizzate nei Paesi che vantano un alto grado di industrializzazione in tutto il mondo. Questa tendenza indica una correlazione significativa tra lo sviluppo industriale di un Paese e la frequenza degli incidenti registrati all’interno delle sue strutture industriali. Questo può essere attribuito a una serie di fattori, tra cui la complessità delle operazioni industriali, la dimensione e la portata delle industrie presenti, nonché l’efficacia dei sistemi di sicurezza e di controllo dei rischi implementati in tali Paesi. È importante notare che, sebbene i Paesi industrializzati possano avere un maggior numero assoluto di incidenti industriali, ciò non implica necessariamente una maggiore propensione per tali eventi rispetto ai Paesi meno industrializzati, ma piuttosto riflette la densità delle attività industriali in queste regioni.

Nella categoria ‘RISCHIO NATURALE’ (*Tabella 5*) si sono riscontrati i seguenti risultati:

Tabella 5. Categoria 'Rischio Naturale'. Vengono riportati: le tipologie di rischio naturale, il numero dei diversi eventi e la % di eventi in base alla categoria di rischio naturale

<b>RISCHIO NATURALE</b>	<b>Numero eventi</b>	<b>% rischio naturale</b>
Fulmine	16	23.19
Vento forte (+3 come secondo evento)	8	11.59
Uragano	5	7.25
Terremoto	7	10.14
Pioggia battente	16	23.19
Frana	5	7.25
Allagamento	4	5.80
Tempesta	2	2.90
Tsunami	2	2.90
Basse temperature	7	10.14

Nell'elenco in questione sono inclusi solo alcuni dei pericoli naturali, tuttavia, è importante sottolineare che ce ne sono molti altri che possono essere identificati e suddivisi in varie categorie, tra cui pericoli meteorologici, idrologici, climatici e geologici.

È interessante notare come i due pericoli naturali più pericolosi siano inclusi nelle categorie di pericoli meteorologici e idrologici. I pericoli meteorologici comprendono eventi come tempeste, uragani, tornado, tempeste di neve e tempeste di ghiaccio. D'altra parte, i pericoli idrologici includono inondazioni, tsunami, frane e smottamenti.

La consapevolezza di questi pericoli e la preparazione ad affrontarli in modo efficace sono fondamentali per garantire la sicurezza pubblica e ridurre al minimo gli impatti negativi derivanti da eventi naturali estremi.

Nella categoria 'ATTIVITA' INDUSTRIALI' (Tabella 6) si sono riscontrati i seguenti risultati:

Tabella 6. Categoria 'Attività Industriale'. Vengono riportati: le tipologie di rischio naturale, il numero degli eventi e la % di eventi in base alla categoria di attività industriale

<b>ATTIVITA' INDUSTRIALI</b>	<b>Numero eventi</b>	<b>% attività industriale</b>
Petrochimico/raffinerie di petrolio	27	37.68
Oleodotti e gasdotti	5	7.25
Attività minerarie	3	4.35
Impianto iniezione acque reflue	1	1.45
Produzione di prodotti chimici generali	16	23.19

Produzione plastica e gomma	3	4.35
Lavorazione metalli	2	2.90
Produzione di prodotti farmaceutici	1	1.45
Impianto di energia e desalinizzazione	1	1.45
Produzione e stoccaggio di pesticidi, biocidi, fungicidi	1	1.45
Impianto di biogas	6	8.70
Produzione di prodotti alimentari e bevande	1	1.45
Impianto di stoccaggio del gas naturale	2	2.90
Stoccaggio e distribuzione all'ingrosso e al dettaglio	1	1.45

Le attività industriali costituiscono un complesso e diversificato panorama economico, caratterizzato da una vasta gamma di settori e industrie. Tra queste, spiccano per la loro complessità e i rischi connessi le attività petrolchimiche, le raffinerie e la produzione di prodotti chimici. Tuttavia, è importante comprendere che questo elenco rappresenta soltanto una piccola parte delle numerose attività industriali presenti nel mondo.

Nella categoria ‘UNITA’ COINVOLTE’ (Tabella 7) si sono riscontrati i seguenti risultati:

Tabella 7. Categoria ‘Unità Coinvolte’. Vengono riportati: le tipologie di unità coinvolte, il numero degli eventi e la % di eventi in base alla categoria di unità coinvolte

<b>UNITA’ COINVOLTE</b>	<b>Numero eventi</b>	<b>% unità coinvolte</b>
Serbatoi di stoccaggio	24	34.78
Gasdotto	7	10.14
Bacino di decantazione	3	4.35
Deposito materiali o materiali di scarto	3	4.35
Tubazioni	5	7.25
Serbatoio raccolta acqua piovana	4	5.80
Scambiatori di calore	2	2.90
Unità di steam cracking	2	2.90
Altre unità dell'impianto	19	27.54

Le strutture industriali che risultano essere maggiormente soggette a incidenti sono spesso i serbatoi di stoccaggio. Questi serbatoi, utilizzati per conservare una vasta gamma di sostanze, dalla chimica industriale ai prodotti petroliferi, possono presentare diversi rischi associati alla loro operatività. La loro complessità strutturale, insieme alla natura delle sostanze contenute e alle condizioni ambientali circostanti, contribuiscono a rendere i serbatoi di stoccaggio vulnerabili a potenziali incidenti.

Tra i rischi più comuni associati ai serbatoi di stoccaggio vi sono le perdite di contenuto, le fughe di gas o liquidi, le esplosioni dovute alla formazione di atmosfere infiammabili, i guasti strutturali o le perdite dovute a errori umani o a malfunzionamenti dei dispositivi di sicurezza. Tali incidenti possono causare danni materiali, impatti ambientali e, in alcuni casi, mettere a rischio la vita dei lavoratori e delle comunità circostanti.

Nella categoria ‘TIPOLOGIA RILASCIO’ (Tabella 8) si sono riscontrati i seguenti risultati:

Tabella 8. Categoria ‘Tipologia di Rilascio’. Vengono riportati: le tipologie di rilascio, il numero dei diversi eventi e la % di eventi in base alla categoria della tipologia di rilascio

<b>TIPOLOGIA DI RILASCIO</b>	<b>Numero eventi</b>	<b>% tipologia di rilascio</b>
Rilascio di solido a terra	1	1.45
Rilascio di liquido a terra	20	28.99
Rilascio di liquido in acqua	14	20.29
Rilascio di gas, vapore, nebbia o fumo nell'aria	30	43.48
Nessuna info	5	7.25

Nella categoria ‘SOSTANZE COINVOLTE’ (Tabella 9) si sono riscontrati i seguenti risultati:

Tabella 9. Categoria ‘Sostanze coinvolte’. Vengono riportati: le sostanze coinvolte, il numero degli eventi e la % di eventi in base alla categoria di sostanza coinvolta

<b>SOSTANZE COINVOLTE</b>	<b>Numero eventi</b>	<b>% tipologia di sostanza</b>
Metano	5	7.25
Idrocarburi e miscele di idrocarburi	36	52.17
Gas naturale (e derivati)	7	10.14
Composti con azoto	3	4.35
Altre sostanze	10	14.49
Cloro e composti con cloro	5	7.25
Cianuro e derivati	3	4.35

Le sostanze più frequentemente coinvolte negli incidenti NaTech risultano essere gli idrocarburi e le loro miscele. Queste sostanze, ampiamente utilizzate in diversi settori industriali, includono una vasta gamma di composti organici formati da idrogeno e carbonio, come ad esempio petrolio, benzina, gasolio e altri derivati del petrolio.

Gli idrocarburi sono particolarmente suscettibili a incidenti NaTech a causa della loro presenza diffusa in numerose attività industriali, come raffinerie di petrolio, impianti chimici, depositi di carburante e infrastrutture di trasporto. Le cause degli incidenti NaTech che coinvolgono gli idrocarburi possono variare, ma spesso sono associate a fenomeni come perdite di contenuto, fughe durante il trasporto o lo stoccaggio, e malfunzionamenti dei dispositivi di sicurezza.

Questi incidenti possono avere gravi conseguenze sia in termini di impatti ambientali che di rischi per la salute umana. Le fughe di idrocarburi possono contaminare le risorse idriche, danneggiare gli ecosistemi circostanti e causare inquinamento dell'aria. Inoltre, le esplosioni o gli incendi causati dagli idrocarburi possono mettere a rischio la sicurezza delle persone e delle infrastrutture vicine.

## 4. Simulazione di un incidente industriale

Lo scopo principale è creare un modello dettagliato e accurato che simuli il rilascio di una sostanza volatile in seguito a un evento accidentale, come la rottura di un serbatoio, e che analizzi il comportamento della sostanza nell'ambiente circostante durante il processo di evaporazione. Questo tipo di simulazione è fondamentale per comprendere gli effetti dell'incidente e per valutare le possibili misure di mitigazione e di gestione del rischio.

La simulazione tiene conto di vari fattori, tra cui la composizione chimica della sostanza, le condizioni ambientali e la geometria del luogo in cui avviene il rilascio.

### 4.1. Caso studio selezionato

All'interno del database si sono ricercati i casi studio nella categoria di 'TIPOLOGIA DI RILASCIO' con la voce "Rilascio nell'aria di gas/vapori/nebbie/ecc".

Dopo una ricerca dettagliata all'interno del database è stato selezionato il caso studio più adatto al modello.

Tabella 10. Record del caso studio selezionato

15/08 /2002	Repubblica Ceca, Spolana	Allaga mento	Produzione di prodotti chimici generali	Serbatoi di stoccaggio	Rilascio di liquidi nell'acqua e rilascio nell'aria di gas/vapori/nebbie/ecc	Etilbenzene (0.29 ton)
----------------	-----------------------------	-----------------	---	---------------------------	---	---------------------------

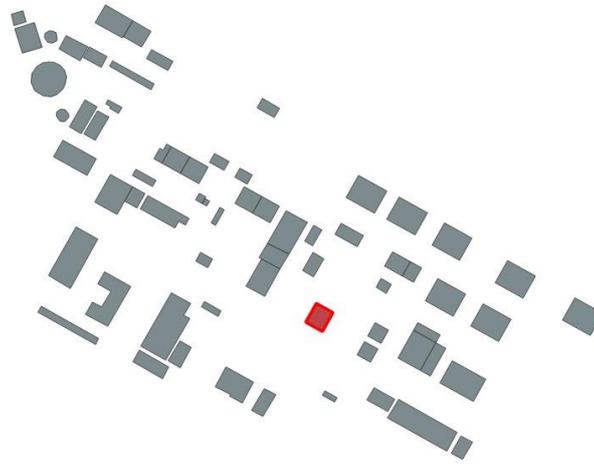
L'incidente NaTech preso in considerazione è avvenuto il 15/08/2002 in Repubblica Ceca, a Spolana. Durante la grande inondazione del fiume Moldava nell'agosto del 2002, i locali dello stabilimento di Spolana sono stati sommersi dalle acque tra il 14/8/2002 e il 18/8/2002.

Sono state coinvolte e allagate le aree E 4990 ed E 4920 e i pozzi di ritenzione di emergenza, che ospitavano i serbatoi di stoccaggio dell'etilbenzene. L'etilbenzene è stato rilasciato nell'ambiente sia nell'aria che nell'acqua il 15/8/2002, 17/8/2002 e 23/8/2002.

Un'allerta chimica di classe III è stata emessa alle ore 12:47 del 15/8/2002. Dopo la chiusura dello stabilimento, l'allerta è stata ridotta alla classe II alle ore 19:25. L'aria nel deposito è stata temporaneamente aspirata il 18/8/2002, e l'allerta è stata successivamente abbassata alla classe I alle 11.58 del 19/8/2002. La prima ispezione dell'interno dello stabilimento E 4990 è stata effettuata nel mattino del 23/8/2002.

Un'altra fuoriuscita di etilbenzene si è verificata durante l'estrazione della vasca 7 nello stabilimento 4990 il 23/8/2002. Un'allerta chimica di classe III è stata emessa alle ore 20:02, e successivamente

ridotta alla classe II alle ore 00:25. Dopo l'estrazione del cloro dai contenitori stabilizzati il 2/9/2002, l'allerta è stata ridotta alla classe I.



*Figura 3. Planimetria del sito*

Dalla planimetria si può osservare, evidenziato in rosso, un'area di stoccaggio dei serbatoi nella quale è avvenuta la rottura di suddette cisterne. Per semplificazione si è considerato un singolo serbatoio di lato 15 m e l'altezza di 9 m circa. Il serbatoio è cilindrico di raggio 7.5 m.

Il volume è di circa 1600 m<sup>3</sup>. Attorno a questo serbatoio si trova una vasca di raccolta dalla quale avverrà l'evaporazione della sostanza. La vasca è alta 2 m e ha una pianta quadrata di circa 30 m di lato.

Il serbatoio selezionato contiene etilbenzene e ha un grado di riempimento pari a 0.8 [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>], la sostanza ha una densità pari a 866 [kg/m<sup>3</sup>], quindi di capacità pari a 1280 m<sup>3</sup> di etilbenzene.

## **4.2. Modello teorico**

Per simulare il rilascio di una sostanza volatile causato dalla rottura di un serbatoio e la successiva evaporazione della stessa, sono stati impiegati modelli per valutare gli effetti fisici dei rilasci accidentali di materiali pericolosi.

A tale scopo, nel 1979 la Direzione Generale del Lavoro ha pubblicato il prontuario "Methods for the calculation of physical effects of the release of dangerous materials (liquids and gases)", noto comunemente in tutto il mondo come "Yellow Book" per via della copertina gialla, diventando nel corso dell'ultimo decennio uno strumento essenziale negli studi sulla sicurezza e nella valutazione del rischio per attività che coinvolgono materiali pericolosi.

Negli ultimi anni ci sono state diverse revisioni con i seguenti obiettivi:

- aggiornare i singoli modelli dal punto di vista scientifico e completare il libro con modelli mancanti;
- descrivere l'interfacciamento dei modelli;
- soddisfare i requisiti educativi.

In particolare, sono stati utilizzati due capitoli del manuale: *2.5.4. Liquids (2.5.4.1 Vessel dynamics liquid)* e *3.3.4 Mass transfer*.

#### **4.2.1. Vessel dynamics liquid**

La simulazione della dinamica di un contenitore contenente liquido non bollente ha lo scopo di prevedere la diminuzione della massa liquida durante il deflusso.

La portata di massa, determinata dalla pressione idraulica, varia in base al livello del liquido nel serbatoio; è possibile considerare una pressione costante P per la compressione con gas inerte.

Per descrivere la dinamica del serbatoio è sufficiente utilizzare la legge di conservazione della massa e considerare la pressione idraulica di una colonna di liquido.

Il modello consiste principalmente in un'iterazione numerica, in cui il deflusso di liquido è descritto in piccoli passaggi.

Questi passaggi devono essere sufficientemente piccoli per mantenere costanti le condizioni del serbatoio in un dato intervallo temporale.

Si inizia con le condizioni iniziali e di chiusura della procedura numerica, seguite dalla formulazione del modello sotto forma di procedura numerica. Questa procedura deve essere ripetuta fino al soddisfacimento delle condizioni di risoluzione. Infine, vengono fornite le equazioni che correlano l'altezza del liquido al volume nel recipiente per diverse forme di serbatoio.

##### *Condizioni iniziali e procedura di chiusura (non bollente) deflusso liquido da un recipiente*

L'iniziale stato del serbatoio ( $i=1$ ) è determinato dal suo livello di riempimento  $\phi$ , dalla temperatura costante e dal volume del serbatoio. La massa liquida nel recipiente può essere facilmente calcolata dato il grado di riempimento (iniziale)  $\phi$ , con

$$Q_{L,1} = \phi x V x \rho_L(T) \quad [\text{kg}] \quad \text{Equazione 4.1}$$

dove

$Q_{L,1}$  = massa liquida inizialmente nel recipiente [kg]

$\phi$  = grado di riempimento [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]

$V$  = volume del serbatoio [ $\text{m}^3$ ]

$\rho_L$  = densità del liquido alla temperatura di stoccaggio [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

Il volume liquido iniziale può essere stimato

$$V_{L,1} = Q_{L,1} / \rho_L \quad [\text{m}^3] \quad \text{Equazione 4.2}$$

L'altezza iniziale del liquido può essere approssimata utilizzando la relazione inversa tra il volume del liquido e l'altezza del liquido, considerando la geometria specifica del recipiente (Equazione 4.17a, 4.17b, 4.17c), definita da

$$h_{L,1} = F^{-1}(V_{L,1}) \quad [\text{m}] \quad \text{Equazione 4.3}$$

La dimensione del passo temporale,  $\delta t$ , è una scelta libera in linea di principio e dipende dal numero di passi temporali,  $N_t$ . Se si vuole stimare la portata di massa e le condizioni del serbatoio al tempo finale, allora la dimensione del passo temporale,  $\delta t$ , è determinata da

$$\delta t = t_{fine} / N_t \quad [\text{s}] \quad \text{Equazione 4.4}$$

Le procedure numeriche date dovrebbero essere ripetute finché i vincoli sono validi

$$t_i < t_{fine} \quad h_L > h_{foro} \quad \text{Equazione 4.5}$$

Maggiore è il numero di passaggi, maggiore è la precisione del modello, ma è necessario più tempo per il calcolo.

#### *Procedura numerica per il deflusso di liquido non in ebollizione da un recipiente*

Iniziando ogni iterazione passo dopo passo con una condizione del serbatoio rappresentata da  $Q_{L,i}$ , questa procedura mira a calcolare la condizione del serbatoio alla fine del breve intervallo temporale  $\delta t$ , rappresentata da  $Q_{L,i+1}$ .

Supponiamo che la velocità di deflusso sia determinata da una funzione generica  $f$ , la quale varia a seconda se il deflusso avviene attraverso un foro o un tubo.

$$q_{S,i} = f(h_{L,i}, P, \dots) \quad [\text{kg}/\text{s}] \quad \text{Equazione 4.6}$$

La conservazione della massa porta molto semplicemente a

$$\delta Q = -q_{S,i} \times \delta t \quad [\text{kg}] \quad \text{Equazione 4.7}$$

Il contenuto liquido diminuirà con

$$\delta V_L = \delta Q / \rho_L \quad [\text{m}^3] \quad \text{Equazione 4.8}$$

Quindi

$$V_{L,i+1} = V_{L,i} + \delta V_L \quad [\text{m}^3] \quad \text{Equazione 4.9}$$

Per forme geometriche elementari, ci sono formule disponibili per calcolare il volume di liquido e l'area della superficie liquida in relazione al livello del liquido.

In generale la seguente formulazione vale

$$A_{L,i} = f(h_{L,i}, \dots) \quad [\text{m}^2] \quad \text{Equazione 4.10}$$

Successivamente il nuovo livello di liquido può essere calcolato come

$$\delta h_L = \delta V_L / A_{L,i} \quad [\text{m}] \quad \text{Equazione 4.11}$$

$$h_{L,i+1} = h_{L,i} + \delta h_L \quad [\text{m}] \quad \text{Equazione 4.12}$$

Il tempo dall'inizio del rilascio deve essere incrementato di un time-step dopo ogni passaggio attraverso questa procedura numerica

$$t_{i+1} = t_i + \delta t \quad \text{Equazione 4.13}$$

La nuova condizione del serbatoio al tempo  $t_{i+1}$  è dato da:  $Q_{L,i+1}$  o  $h_{L,i+1}$ .

Questo procedimento numerico viene eseguito fino a quando le condizioni non sono soddisfatte.

### *Altezza del liquido in funzione del volume del liquido*

Per geometrie semplici sono disponibili equazioni per calcolare il volume del liquido  $V_L$  e la dimensione della superficie del liquido nel recipiente  $A_L$ , in funzione del livello del liquido  $h_L$ , nella forma generalizzata espressa da

$$A_L = F(h_L) \quad [\text{m}^2] \quad \text{Equazione 4.14}$$

$$V_L = F(h_L) \quad [\text{m}^3] \quad \text{Equazione 4.15}$$

Ad esempio, per alcune geometrie valgono le seguenti relazioni

*Tabella 11. Relazioni in base a diverse geometrie*

<b>Sfera</b>		
	$A_L = \pi \cdot (r^2 - (r - h_L)^2)$	<i>Equazione 4.16a</i>
	$V_L = \pi/3 \cdot r^2 h_L^2 f \cdot (3 \cdot r - h_L)$	<i>Equazione 4.17a</i>
<b>Cilindro orizzontale</b>		

$A_L = 2 \cdot L \cdot \sqrt{((2 \cdot r - h_L) \cdot h_L)}$	<i>Equazione 4.16b</i>
$V_L = L \cdot [r^2 \cdot \arccos\left(1 - \frac{h_L}{r}\right) - (r - h_L) \cdot \sqrt{((2 \cdot r - h_L) \cdot h_L)}]$	<i>Equazione 4.17b</i>
<b>Serbatoio verticale</b>	
$A_L = A_{base}$	<i>Equazione 4.16c</i>
$V_L = A_L \cdot h_L$	<i>Equazione 4.17c</i>

Dove:

$A_L =$  superficie del liquido all'interno del serbatoio [m<sup>2</sup>]

$A_{base} =$  cilindro verticale a base abbassata [m<sup>2</sup>]

$h_L =$  altezza del liquido [m]

$V_L =$  volume del liquido all'interno del serbatoio [m<sup>3</sup>]

$r =$  raggio della sfera o del cilindro [m]

### ***Deflusso del liquido attraverso fori e tubazioni***

La modellazione del deflusso di liquido attraverso fori e tubazioni mira a prevedere la portata massica in funzione della caduta di pressione.

*Flusso di liquido attraverso fori o orifizi*

Per i liquidi che fluiscono attraverso un orifizio si può applicare l'equazione di Bernoulli. Trascurando la velocità iniziale del liquido nel recipiente, la portata massica può essere stimata da

$$q_s = C_d \cdot A_h \cdot \sqrt{2(P - P_a) \cdot \rho_L} \quad [\text{kg/s}] \quad \text{Equazione 4.18}$$

Con

$$P = P_h + P_{aL} \quad [\text{N/m}^2] \quad \text{Equazione 4.19}$$

e

$$P_h = \rho_L \cdot g \cdot h_L \quad [\text{N/m}^2] \quad \text{Equazione 4.20}$$

$A_h =$  area della sezione trasversale del foro [m<sup>2</sup>]

$C_d =$  coefficiente di scarico [-]

$g =$  accelerazione gravitazionale [m/s<sup>2</sup>]

$h_L =$  altezza relativa del liquido [m]

$P =$  pressione totale in apertura [N/m<sup>2</sup>]

$P_h =$  pressione idraulica del liquido [N/m<sup>2</sup>]

$P_{aL} =$  pressione esterna sopra al liquido [N/m<sup>2</sup>]

$P_a =$  pressione atmosferica [N/m<sup>2</sup>]

$q_s = \text{portata massica}$  [kg/s]

$\rho_L = \text{densità del liquido}$  [kg/ m<sup>3</sup>]

Si danno i seguenti valori per i coefficienti di scarico: Beek (1975).

- Orifizi taglienti

$$C_d = 0.62 \quad \text{Equazione 4.21a}$$

- Orifizi diritti

$$C_d = 0.8262 \quad \text{Equazione 4.21b}$$

- Orifizi arrotondati

$$C_d = 0.9662 \quad \text{Equazione 4.21c}$$

- Rottura di un tubo

$$C_d = 1.062 \quad \text{Equazione 4.21d}$$

#### 4.2.2. Mass transfer

Il vento favorisce l'evaporazione del liquido dalla superficie della pozza attraverso il trasferimento di massa poiché sposta il vapore dalla zona ad alta concentrazione alla zona a bassa concentrazione. Questo processo avviene perché il liquido evapora per mantenere un equilibrio termodinamico con la pressione parziale del vapore sopra di esso, alla stessa temperatura della pozza. Di conseguenza la velocità di evaporazione di un liquido non bollente dipende principalmente dalla capacità del vento di rimuovere il vapore dalla superficie della pozza.

Il flusso di massa di evaporazione  $q_v''$ , dipende dal coefficiente di trasferimento  $k_m$  e dalla concentrazione di vapore  $c_i$ , sulla superficie della pozza liquida

$$q_v'' = k_m \cdot c_i(z = 0) \quad [\text{kg/m}^2\text{s}] \quad \text{Equazione 4.22}$$

Dove

$c_i = \text{componente di concentrazione } i$  [kg/m<sup>3</sup>]

$k_m = \text{coefficiente di trasferimento di massa}$  [m/s]

$q_v'' = \text{flusso di massa di vaporazione}$  [kg/s m<sup>2</sup>]

$z = \text{coordinata verticale}$  [m]

La correlazione adimensionale di Raj e Morris per il coefficiente di trasferimento di massa  $k_m$ , si basa sull'analogia calore-massa [Raj, 1987], [Studer, 1988].

$$Sh = 0.037 \cdot (Re^{0.8} - 15500) \cdot Sc^{1/3} \quad [-] \quad \text{Equazione 4.23}$$

Con

$$Sh = k_m \cdot \frac{l_p}{D_V} \quad [-] \quad \text{Equazione 4.24}$$

E

$$Re = \rho_a \cdot u_{w,10} \cdot (2 \cdot r_p) / \eta_a \quad [-] \quad \text{Equazione 4.25}$$

Dove

$Re$  = numero di Reynolds  $[-]$

$\rho_a$  = densità dell'aria  $[\text{kg/m}^3]$

$u_{w,10}$  = velocità del vento standard all'altezza di 10 m  $[\text{m/s}]$

$\eta_a$  = viscosità dinamica dell'aria  $[\text{N s/m}^2]$

$Sh$  = numero di Sherwood  $[-]$

$k_m$  = coefficiente di trasferimento di massa  $[\text{m/s}]$

$l_p$  = lunghezza della pozza lungo la direzione del vento  $[\text{m}]$

$D_V$  = coefficiente di diffusione del vapore nell'aria  $[\text{m}^2/\text{s}]$

Si noti che il numero di Sherwood ( $Sh$ ) per il trasferimento di massa è analogo al numero di Nusselt ( $Nu$ ) per il trasferimento di calore.

In passato è stata data la correlazione di Sutton per il coefficiente di trasferimento di massa  $k_m$ . Questa relazione funziona bene per gli esperimenti di laboratorio, ma la peculiare dimensionalità del risultato rende sospetta l'estrapolazione [Webber, 1987].

Un modello simile è stato fornito da MacKay & Matsugu [Kawamura, 1987] che è stato validato rispetto a numeri sperimentali

$$k_m = C_{m\&m} \cdot u_{w,10}^{0.78} \cdot (2 \cdot r_p)^{-0.11} \cdot Sc^{-0.67} \quad [\text{m/s}] \quad \text{Equazione 4.26}$$

Con

$$Sc = \nu_V / D_a \quad [-] \quad \text{Equazione 4.27}$$

Dove

$$C_{m\&m} = 0.004786 \quad [\text{m}^{0.33}/\text{s}^{0.22}]$$

$D_a =$  coefficiente di diffusione del vapore nell'aria [m<sup>2</sup>/s]

$k_m =$  coefficiente di trasferimento di massa [m/s]

$r_p =$  raggio della pozza d'acqua [m]

$u_{w,10} =$  velocità del vento standard all'altezza di 10 m [m/s]

$Sc =$  numero di Schmidt [-]

$\nu_V =$  viscosità cinematica del vapore [m<sup>2</sup>/s]

Si osserva che in generale, per gas e vapori, il numero di Schmidt è di circa 0.8. La formulazione originale di MacKay & Matsugu era espressa in diverse unità di misura.

Le correlazioni sviluppate da Sutton, Raj e Kawamura condividono lo stesso valore del numero di Schmidt. Tuttavia, secondo Brighton [1990], l'esponente in queste correlazioni è oggetto di dibattito e non fornisce una base solida per generalizzare i risultati ottenuti unicamente da esperimenti di laboratorio.

Il modello alternativo proposto da Brighton si basa sulla conoscenza scientifica della turbolenza atmosferica, come indicato da Brighton nel 1987. In questo modello, la diffusione molecolare è integrata nelle condizioni di confine. Tale modello è valido per condizioni di stabilità atmosferica neutra. La teoria di Brighton può essere confrontata con i risultati sperimentali, tuttavia, si osserva una significativa discrepanza tra i valori predetti e quelli sperimentali, specialmente per quanto riguarda la pressione.

#### *Calcolo concentrazione di vapore*

Per la determinazione della concentrazione di vapore  $c_i$  si parte dal calcolo della tensione di vapore utilizzando l'equazione di Antoine e la legge di Raoult.

L'equazione di Antoine descrive la relazione tra pressione di vapore saturo e la temperatura per un liquido chimicamente puro in equilibrio col suo vapore.

$$\log_{10}(P) = A - \left( \frac{B}{T+C} \right) \quad \text{Equazione 4.28}$$

Dove:

$P =$  pressione di vapore [bar]

$T =$  temperatura [K]

$A, B,$  e  $C$  sono coefficienti specifici per ciascun composto chimico.

L'equazione di Antoine è spesso utilizzata per stimare la pressione di vapore di un liquido puro a diverse temperature quando i dati sperimentali diretti non sono disponibili. I coefficienti A, B, e C sono determinati sperimentalmente per ciascun composto chimico.

La legge di Raoult è una legge empirica che descrive il comportamento della pressione di vapore di una soluzione ideale. La legge afferma che la pressione parziale di un componente di una soluzione ideale è direttamente proporzionale alla frazione molare di quel componente nella soluzione e alla pressione di vapore del componente puro.

In forma matematica, la legge di Raoult può essere espressa come:

$$c_i = \frac{P}{P_0} \quad \text{Equazione 4.29}$$

Dove:

$c_i$  = componente di concentrazione  $i$

$P$  = pressione di vapore

$P_0$  = tensione di vapore di un composto puro

### 4.2.3. Scelta della sostanza

Per simulare il rilascio di una sostanza volatile causato dalla rottura di un serbatoio e la successiva evaporazione della stessa è preso come riferimento una serie di sostanze comunemente utilizzate nell'industria chimica, caratterizzate da alta volatilità e tossicità non trascurabile.

Si definisce volatilità la tendenza di un liquido a passare in fase vapore, un liquido è tanto più volatile quanto maggiore è la sua tensione di vapore.

La volatilità di una sostanza può essere descritta e quantificata mediante varie leggi ed equazioni chimiche, tra cui la Legge di Raoult (*Equazione 4.29*) e l'Equazione di Antoine (*Equazione 4.28*). Queste leggi aiutano a comprendere come le sostanze si comportano quando sono in una miscela e come la loro pressione di vapore varia con la temperatura.

Il decreto legislativo 81/2008 definisce il Valore Limite come la concentrazione media, ponderata nel tempo, di un agente cancerogeno o mutageno nell'aria, misurata nella zona di respirazione di un lavoratore durante un determinato periodo di riferimento, come specificato nell'Allegato XLIII. Tuttavia, è ancora oggetto di dibattito se esista un livello "sicuro" per le sostanze cancerogene, al di sotto del quale il rischio di sviluppare il cancro sia nullo.

Vengono stabiliti valori limite di esposizione professionale per agenti chimici cancerogeni e mutageni a livello nazionale e internazionale, con l'obiettivo di offrire una misura di protezione per i lavoratori. Secondo l'articolo 222, comma 3 d, del DLGS 81/2008, il Valore Limite è definito come *“il limite della concentrazione media ponderata nel tempo di un agente chimico nell'aria all'interno della zona di respirazione di un lavoratore in relazione ad un determinato periodo di riferimento”*.

Per stabilire questi limiti, è necessario confrontarsi con i principali enti scientifici e governativi mondiali che raccomandano valori limite di esposizione per numerose sostanze. Tra questi enti ci sono l'ACGIH (*American Conference of Governmental Industrial Hygienists*), l'OSHA (*Occupational Safety and Health Administration*), il NIOSH (*National Institute for Occupational Safety and Health*) e il Comitato tedesco per i MAK.

Ogni anno, l'ACGIH pubblica e aggiorna una lista di Valori Limite di Soglia (Threshold Limit Values, TLV) per numerose sostanze. Questi limiti sono pensati come linee guida per aiutare gli igienisti a controllare l'esposizione alle sostanze chimiche negli ambienti di lavoro, non come standard legali. L'ACGIH raccomanda di mantenere l'esposizione ai cancerogeni al minimo.

I TLV dell'ACGIH sono solo indicazioni preliminari per ridurre il rischio. I limiti sono suddivisi in tre categorie:

- TLV - TWA (Time Weighted Average): limite per esposizioni prolungate nel tempo, rappresenta la concentrazione media ponderata nel tempo degli inquinanti nell'aria durante l'intero turno lavorativo. Indica il livello di esposizione considerato sicuro per un lavoratore che lavora 8 ore al giorno, 5 giorni alla settimana, per tutta la vita lavorativa;
- TLV - STEL (Short Term Exposure Limit): limite per brevi esposizioni, rappresenta le concentrazioni medie che possono essere raggiunte per un massimo di 15 minuti, non più di 4 volte al giorno, con almeno 1 ora di intervallo tra i periodi di esposizione;
- TLV - C (Ceiling): limite di soglia, rappresenta la concentrazione che non deve mai essere superata durante il turno lavorativo. Questo limite è utilizzato principalmente per sostanze con effetti immediati, irritanti o narcotici, che possono rapidamente compromettere l'attenzione del lavoratore, aumentando il rischio di infortuni e problemi operativi.

Sono state selezionate tre sostanze differenti per valutare gli impatti in funzione delle proprietà delle sostanze stesse:

1. etilbenzene;
2. metiletilchetone;
3. tetraidrofurano.

Per sviluppare il modello servono diversi parametri riferiti alle diverse sostanze: densità, parametri dell'equazione di Antoine e TLV-STEL (Tabella 12).

Tabella 12. Parametri sostanze selezionate

Sostanza	Densità (kg/ m3)	Parametri equazione di Antoine				TLV-STEL (ppm)
		Temperatura (K)	A	B	C	
Etilbenzene	866	420,00 - 600,00	4.40536	1695.026	-23.698	200
		329,74-410,27	4.07488	1419.315	-60.539	
Metiletilchetone	805	314.6 - 370.6	3.9894	1150.207	-63.904	150
Tetraidrofurano	890	296,29 - 372,8	4.12118	1202.942	-46.818	100

### 4.3. Script modello

Nel seguente capitolo viene descritto lo script MATLAB nel quale si è applicato il modello esplicito nei capitoli 4.2.1 e 4.2.2 al caso studio selezionato (ALLEGATO 1).

Nella prima parte del codice sono elencati i dati del caso studio e della sostanza all'interno del serbatoio. Si è ipotizzato un serbatoio cilindrico di raggio 7.5 m e un volume pari a 1600 m<sup>3</sup>, attorno ad esso c'è una vasca di raccolta, a pianta quadrata, con altezza pari a 2 m e di lato 30 m. Il foro ha una larghezza di 1 cm.; invece, la sostanza presa in considerazione, l'etilbenzene, ha densità pari a 866 kg/ m<sup>3</sup>.

Applicando l'Equazione 4.1 si è ricavata la massa iniziale di liquido all'interno del serbatoio pari a  $1.1 \cdot 10^6$  kg, ipotizzando un livello di riempimento  $\phi$  uguale a 0.8.

Con questi dati si è potuta ricavare l'altezza iniziale del liquido all'interno del serbatoio utilizzando l'Equazione 4.3 e si è ottenuto 7.24 m.

Per simulare lo svuotamento del serbatoio si sono impostati 10.000 passaggi temporali (N) e ognuno corrisponde a 10 s. Ad ogni passo temporale vengono aggiornati i valori all'interno di diversi vettori: tempo dopo la rottura, portata massica, grado di riempimento, rilascio totale di massa, livello del liquido nel recipiente.

Le condizioni iniziali dei vettori sono:

- tempo dopo la rottura: il primo valore è pari a zero;

- portata massica: il primo elemento del vettore viene calcolato utilizzando l'Equazione 4.18, utilizzando un coefficiente di scarico  $C_d = 0.62$  corrispondente ad un orifizio tagliente;
- grado di riempimento: il primo elemento è pari al livello di riempimento iniziale;
- rilascio totale di massa: il primo valore è pari a zero;
- livello del liquido nel recipiente: il primo elemento è pari all'altezza iniziale del liquido nel serbatoio.

Dopo aver impostato le condizioni iniziali dei vettori si simula lo svuotamento del serbatoio e ad ogni intervallo temporale vengono aggiornati i diversi dati all'interno dei cinque vettori. Il ciclo non si ferma finché il livello di riempimento non raggiunge un valore pari a zero.

Tabella 13. Evoluzione dei vettori ad ogni intervallo temporale ( $T$  = tempo dopo la rottura,  $MFR$  = portata massica,  $FD$  = grado di riempimento,  $TMD$  = rilascio totale di massa,  $LV$  = livello del liquido nel recipiente)

	<b>T</b>	<b>MFR</b>	<b>FD</b>	<b>TMD</b>	<b>LV</b>
<b>1</b>	0	50.2710	0.8000	0	7.2433
<b>2</b>	10	50.2596	0.7996	502.7103	7.2400
<b>3</b>	20	50.2482	0.7993	1.0052e+03	7.2367
<b>4</b>	30	50.2368	0.7989	1.5074e+03	7.2335
<b>5</b>	40	50.2254	0.7985	2.0095e+03	7.2302
<b>6</b>	50	50.2140	0.7982	2.5113e+03	7.2269
<b>7</b>	60	50.2027	0.7978	3.0128e+03	7.2236
<b>8</b>	70	50.1913	0.7975	3.5142e+03	7.2204
<b>9</b>	80	50.1799	0.7971	4.0153e+03	7.2171
<b>10</b>	90	50.1685	0.7967	4.5162e+03	7.2138

Nella Tabella 13 si osservano i primi 90 secondi dopo la rottura del serbatoio, ad ogni intervallo temporale i valori nei diversi vettori cambiano: la portata massica tende a diminuire siccome il liquido fuoriesce dal foro, il grado di riempimento decresce siccome il serbatoio si svuota, il rilascio totale di massa aumenta e livello del liquido nel recipiente diminuisce.

Dopo il completamento dei 10.000 passaggi temporali, si procede alla ricerca del tempo necessario per svuotare il serbatoio e si determina che il tempo di svuotamento del serbatoio è pari a 8 ore.

Nella seconda parte dello script viene effettuata la simulazione dell'evaporazione e si utilizzano dei dati reali di temperatura e di velocità del vento e si imposta che la simulazione incominci l'8 febbraio alle ore 00:00, questi dati vengono importati da un file Excel.

Per il calcolo della concentrazione di vapore,  $c_i$ , si parte dal calcolo della tensione di vapore utilizzando l'equazione di Antoine (Equazione 4.28) e la legge di Raoult (Equazione 4.28), si considera una tensione di vapore dell'etilbenzene puro pari a  $10^{-1.9}$  Pa.

Il flusso di massa di evaporazione, calcolato attraverso il modello di MacKay & Matsugu, varia in base alla concentrazione di vapore  $c_i$  e il coefficiente di trasferimento  $k_m$ .

Per il calcolo del coefficiente di trasferimento  $k_m$  sono necessari diversi parametri:  $C_{mm}$ , il raggio della pozza, il numero di Schmidt e la velocità del vento standard all'altezza di 10 m, quest'ultimo parametro varia e viene prelevato dal file Excel importato in precedenza.

Tabella 14. Evoluzione dei vettori della massa sversata e della massa evaporata nel tempo, etilbenzene

	<b>Data</b>	<b>MassaSversata</b>	<b>MassaEvaporata</b>
<b>1</b>	08-Feb-2021 00:00:00	1.6641e+05	882.0580
<b>2</b>	08-Feb-2021 01:00:00	3.0735e+05	774.0995
<b>3</b>	08-Feb-2021 02:00:00	4.2578e+05	923.2140
<b>4</b>	08-Feb-2021 03:00:00	5.2497e+05	748.8681
<b>5</b>	08-Feb-2021 04:00:00	6.0788e+05	553.4391
<b>6</b>	08-Feb-2021 05:00:00	6.7716e+05	531.6426
<b>7</b>	08-Feb-2021 06:00:00	7.3510e+05	514.0501
<b>8</b>	08-Feb-2021 07:00:00	1108480	791.3682
<b>9</b>	08-Feb-2021 08:00:00	0	531.6426
<b>10</b>	08-Feb-2021 09:00:00	0	832.2068

Nella Tabella 14 si osservano le prime 9 ore dall'evento e come variano la massa sversata e la massa evaporata nel tempo.

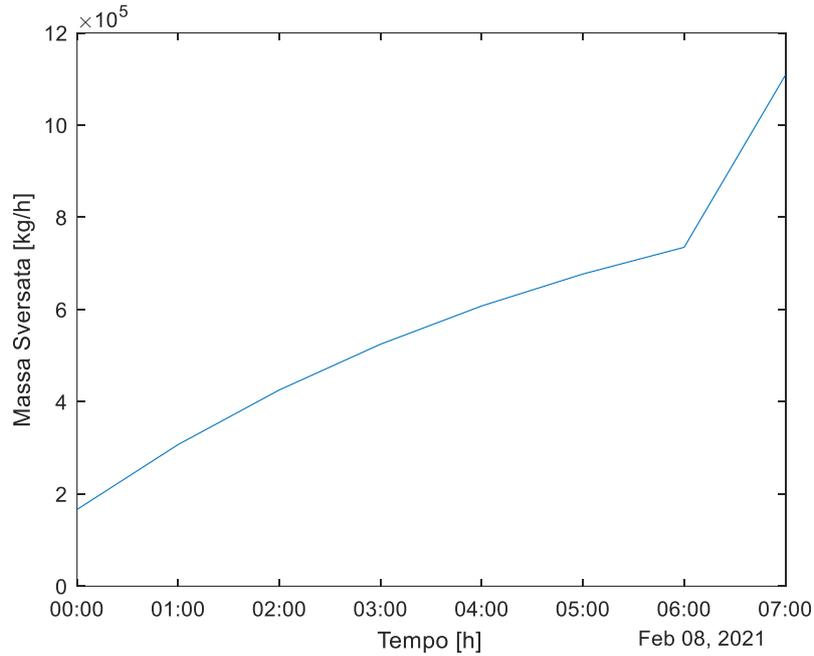


Figura 4. Massa sversata nel tempo

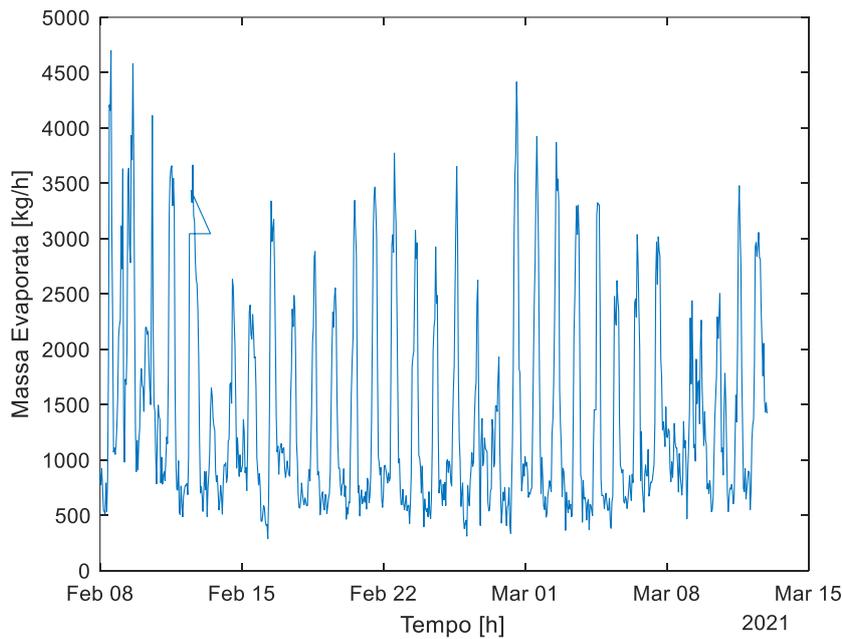


Figura 5. Massa evaporata di etilbenzene nel tempo

Nelle *Figure 4 e 5* sono rappresentati due grafici che descrivono l'evoluzione nel tempo della massa sversata e della massa evaporata.

In conclusione, si determina che la sostanza impiega 8 ore a fuoriuscire dal serbatoio mentre l'evaporazione della sostanza inizia l'8 febbraio alle ore 00:00 e termina il 12 marzo alle ore 23:00, quindi, la sostanza impiega più di un mese ad evaporare completamente.

## **Analisi di sensitività**

Al fine di ottenere condizioni realistiche di rilascio, anziché considerare un rilascio di etilbenzene, per le successive fasi di valutazione è stato ipotizzato un rilascio di sostanze molto volatili come il metiletilchetone o il tetraidrofurano.

Queste due sostanze sono state scelte anche in base al loro valore di TLV-STEL (*Tabella 15 e Tabella 17*).

Per verificare l'adeguatezza delle sostanze in termini di TLV-STEL, viene effettuato un confronto con il benzene. Il benzene è un composto organico volatile (COV) appartenente al gruppo degli idrocarburi aromatici. È utilizzato nella produzione di composti chimici di base, che sono impiegati per produrre policarbonati, resine epossidiche e nylon. Inoltre, è presente in tracce nella frazione aromatica della benzina, dove viene impiegato come antidetonante nella "benzina verde" al posto dei composti del piombo.

Il benzene è una sostanza cancerogena, classificato dallo IARC nel gruppo 1, che include le sostanze con evidenza comprovata di causare tumori nell'uomo, può essere facilmente assorbito per inalazione, contatto cutaneo o ingestione.

Il benzene ha un valore di TLV-STEL pari a 2.5 ppm, confrontando quest'ultimo con quelli dell'etilbenzene, del metiletilchetone e del tetraidrofurano, si può affermare che queste ultime sostanze sono più tollerabili.

In particolare, il benzene è incluso nel gruppo A1 delle sostanze cancerogene, che indica comprovata cancerogenicità per l'uomo. Invece, l'etilbenzene e il tetraidrofurano sono classificati nel gruppo A3, che comprende sostanze cancerogene per gli animali, ma con rilevanza sconosciuta per l'uomo. Il metiletilchetone, invece, è noto per causare effetti dannosi alla pelle. Questo confronto sottolinea l'importanza di considerare i valori di TLV-STEL e la classificazione delle sostanze cancerogene nella selezione dei composti chimici utilizzati.

### ***Metiletilchetone***

*Tabella 15. Valori metiletilchetone*

Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	805
TLV-STEL [ppm]	150

Tabella 16. Evoluzione dei vettori della massa sversata e della massa evaporata nel tempo, metiletilchetone

	<b>Data</b>	<b>MassaSversata</b>	<b>MassaEvaporata</b>
<b>1</b>	08-Feb-2021 00:00:00	1.5469e+05	9.7525e+03
<b>2</b>	08-Feb-2021 01:00:00	2.8570e+05	8.5961e+03
<b>3</b>	08-Feb-2021 02:00:00	3.9579e+05	1.0286e+04
<b>4</b>	08-Feb-2021 03:00:00	4.8799e+05	8.3614e+03
<b>5</b>	08-Feb-2021 04:00:00	5.6506e+05	6.2201e+03
<b>6</b>	08-Feb-2021 05:00:00	6.2946e+05	6.0147e+03
<b>7</b>	08-Feb-2021 06:00:00	6.8332e+05	5.8479e+03
<b>8</b>	08-Feb-2021 07:00:00	1030400	9.0427e+03
<b>9</b>	08-Feb-2021 08:00:00	0	6.0147e+03
<b>10</b>	08-Feb-2021 09:00:00	0	9.1319e+03
<b>11</b>	08-Feb-2021 10:00:00	0	2.0253e+04
<b>12</b>	08-Feb-2021 11:00:00	0	4.5634e+04
<b>13</b>	08-Feb-2021 12:00:00	0	4.4956e+04
<b>14</b>	08-Feb-2021 13:00:00	0	5.0538e+04
<b>15</b>	08-Feb-2021 14:00:00	0	3.3261e+04
<b>16</b>	08-Feb-2021 15:00:00	0	2.4536e+04
<b>17</b>	08-Feb-2021 16:00:00	0	1.1800e+04
<b>18</b>	08-Feb-2021 17:00:00	0	1.2297e+04
<b>19</b>	08-Feb-2021 18:00:00	0	1.1607e+04
<b>20</b>	08-Feb-2021 19:00:00	0	1.2571e+04
<b>21</b>	08-Feb-2021 20:00:00	0	1.4400e+04
<b>22</b>	08-Feb-2021 21:00:00	0	1.7307e+04
<b>23</b>	08-Feb-2021 22:00:00	0	2.3051e+04

	<b>Data</b>	<b>MassaSversata</b>	<b>MassaEvaporata</b>
<b>24</b>	08-Feb-2021 23:00:00	0	2.4125e+04
<b>25</b>	09-Feb-2021 00:00:00	0	2.4521e+04
<b>26</b>	09-Feb-2021 01:00:00	0	3.3566e+04
<b>27</b>	09-Feb-2021 02:00:00	0	2.9540e+04
<b>28</b>	09-Feb-2021 03:00:00	0	3.9582e+04
<b>29</b>	09-Feb-2021 04:00:00	0	1.4639e+04
<b>30</b>	09-Feb-2021 05:00:00	0	1.0809e+04
<b>31</b>	09-Feb-2021 06:00:00	0	1.8852e+04
<b>32</b>	09-Feb-2021 07:00:00	0	1.8276e+04
<b>33</b>	09-Feb-2021 08:00:00	0	2.1869e+04
<b>34</b>	09-Feb-2021 09:00:00	0	3.8167e+04
<b>35</b>	09-Feb-2021 10:00:00	0	3.9517e+04
<b>36</b>	09-Feb-2021 11:00:00	0	3.2400e+04
<b>37</b>	09-Feb-2021 12:00:00	0	3.0168e+04
<b>38</b>	09-Feb-2021 13:00:00	0	4.1653e+04
<b>39</b>	09-Feb-2021 14:00:00	0	3.9702e+04
<b>40</b>	09-Feb-2021 15:00:00	0	4.8723e+04
<b>41</b>	09-Feb-2021 16:00:00	0	3.9959e+04
<b>42</b>	09-Feb-2021 17:00:00	0	2.5465e+04
<b>43</b>	09-Feb-2021 18:00:00	0	1.3719e+04
<b>44</b>	09-Feb-2021 19:00:00	0	9.6953e+03
<b>45</b>	09-Feb-2021 20:00:00	0	1.2921e+04
<b>46</b>	09-Feb-2021 21:00:00	0	1.0024e+04
<b>47</b>	09-Feb-2021 22:00:00	0	1.2921e+04

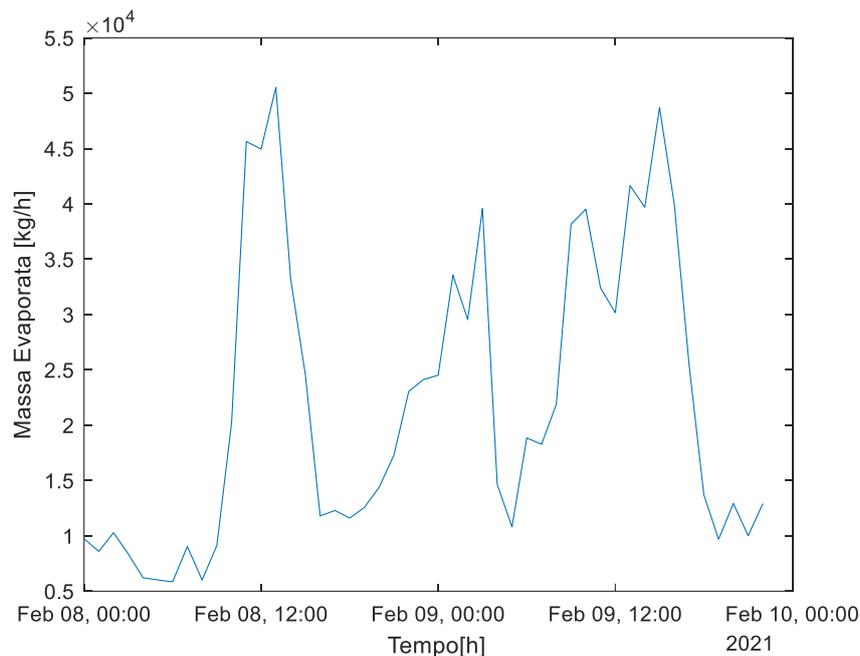


Figura 6. Massa evaporata di metiletilchetone nel tempo

Applicando lo script a questa sostanza si ottiene che impiega 8 ore a fuoriuscire dal serbatoio mentre l'evaporazione della sostanza inizia l'8 febbraio alle ore 00:00 e termina il 9 febbraio alle ore 22:00, il tempo di evaporazione è molto inferiore rispetto al caso dell'etilbenzene (Tabella 16).

### **Tetraidrofurano**

Tabella 17. Valori tetraidrofurano

Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	890
TLV-STEL [ppm]	100

Tabella 18. Evoluzione dei vettori della massa sversata e della massa evaporata nel tempo, tetraidrofurano

	<b>Data</b>	<b>MassaSversata</b>	<b>MassaEvaporata</b>
<b>1</b>	08-Feb-2021 00:00:00	1.7102e+05	1.8915e+04
<b>2</b>	08-Feb-2021 01:00:00	3.1587e+05	1.6709e+04
<b>3</b>	08-Feb-2021 02:00:00	4.3758e+05	2.0026e+04
<b>4</b>	08-Feb-2021 03:00:00	5.3952e+05	1.6298e+04
<b>5</b>	08-Feb-2021 04:00:00	6.2473e+05	1.2165e+04
<b>6</b>	08-Feb-2021 05:00:00	6.9593e+05	1.1803e+04

	<b>Data</b>	<b>MassaSversata</b>	<b>MassaEvaporata</b>
<b>7</b>	08-Feb-2021 06:00:00	7.5547e+05	1.1508e+04
<b>8</b>	08-Feb-2021 07:00:00	1139200	1.7837e+04
<b>9</b>	08-Feb-2021 08:00:00	0	1.1803e+04
<b>10</b>	08-Feb-2021 09:00:00	0	1.7643e+04
<b>11</b>	08-Feb-2021 10:00:00	0	3.8899e+04
<b>12</b>	08-Feb-2021 11:00:00	0	8.7647e+04
<b>13</b>	08-Feb-2021 12:00:00	0	8.6205e+04
<b>14</b>	08-Feb-2021 13:00:00	0	9.6653e+04
<b>15</b>	08-Feb-2021 14:00:00	0	6.3883e+04
<b>16</b>	08-Feb-2021 15:00:00	0	4.7277e+04
<b>17</b>	08-Feb-2021 16:00:00	0	2.2847e+04
<b>18</b>	08-Feb-2021 17:00:00	0	2.3890e+04
<b>19</b>	08-Feb-2021 18:00:00	0	2.2511e+04
<b>20</b>	08-Feb-2021 19:00:00	0	2.4368e+04
<b>21</b>	08-Feb-2021 20:00:00	0	2.7897e+04
<b>22</b>	08-Feb-2021 21:00:00	0	3.3457e+04
<b>23</b>	08-Feb-2021 22:00:00	0	4.4392e+04
<b>24</b>	08-Feb-2021 23:00:00	0	4.6410e+04
<b>25</b>	09-Feb-2021 00:00:00	0	4.7095e+04
<b>26</b>	09-Feb-2021 01:00:00	0	6.4262e+04
<b>27</b>	09-Feb-2021 02:00:00	0	5.6705e+04
<b>28</b>	09-Feb-2021 03:00:00	0	7.6226e+04
<b>29</b>	09-Feb-2021 04:00:00	0	2.8314e+04
<b>30</b>	09-Feb-2021 05:00:00	0	2.0941e+04

	Data	MassaSversata	MassaEvaporata
31	09-Feb-2021 06:00:00	0	3.6305e+04

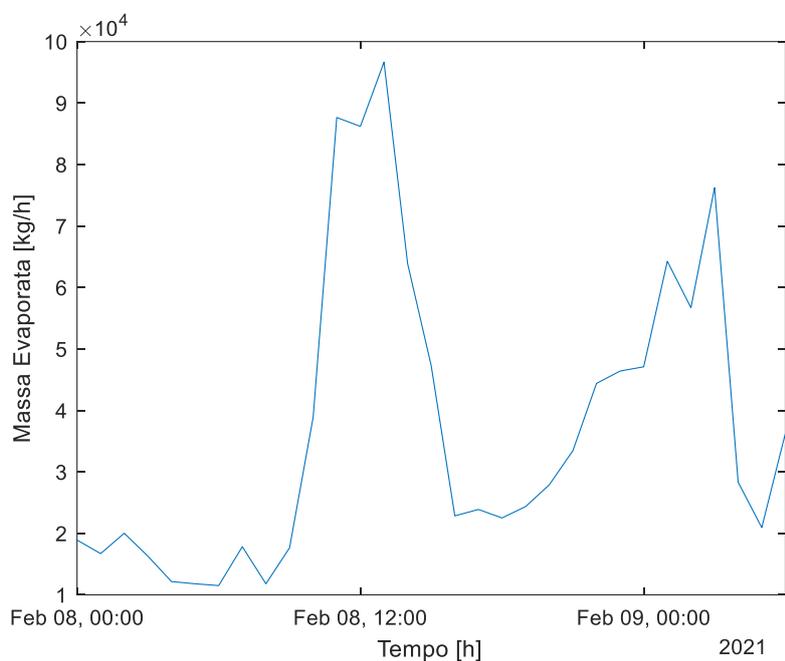


Figura 7. Massa evaporata di tetraidrofurano nel tempo

Utilizzando lo script su questa sostanza, si è determinato che impiega 8 ore per fuoriuscire completamente dal serbatoio. L'evaporazione della sostanza inizia l'8 febbraio alle 00:00 e termina il 9 febbraio alle 06:00 (Tabella 18). Anche nel caso del tetraidrofurano, il tempo di evaporazione è significativamente inferiore rispetto all'etilbenzene e richiede anche meno tempo rispetto al metiletilchetone.

## 5. Mappe di concentrazione

L'obiettivo finale della tesi è l'implementazione delle mappe di concentrazione in atmosfera della terza sostanza presa in analisi, il tetraidrofurano.

Queste mappe sono cruciali per diversi motivi:

- offrono una rappresentazione visiva immediata della distribuzione spaziale del tetraidrofurano nell'atmosfera, facilitando l'interpretazione dei fenomeni studiati;
- sono essenziali per l'identificazione delle aree critiche che richiedono interventi specifici;
- sono strumenti fondamentali per pianificare interventi in relazione a possibili rischi;
- permettono un confronto temporale, monitorare i cambiamenti nel tempo, valutando l'efficacia degli interventi;
- sono uno strumento potente per comunicare informazioni complesse in modo chiaro e comprensibile a un pubblico non tecnico.

Le mappe di concentrazione del tetraidrofurano create con Surfer rappresentano uno strumento avanzato per l'analisi e la visualizzazione dei dati geospaziali. La loro implementazione permette di ottenere una rappresentazione chiara e dettagliata della distribuzione della sostanza nell'atmosfera, facilitando interventi mirati e monitoraggi efficaci nel tempo.

### 5.1 Strumento di modellazione PMSS

È stata sviluppata una metodologia per simulare la dispersione di una sostanza, non trattata nella tesi, utilizzando lo strumento di modellazione PMSS.

Per simulare la dispersione degli inquinanti nell'atmosfera, è stato impiegato il codice Parallel Micro-Swift Spray (PMSS), sviluppato da Arianet. PMSS è un sistema di modellazione su scala microscopica che utilizza la modellazione particellare lagrangiana tridimensionale per simulare il trasporto e la dispersione degli inquinanti, consentendo di effettuare simulazioni in tempi generalmente più brevi rispetto ai modelli di fluidodinamica computazionale più complessi. Il sistema include PSwift, un preprocessore meteorologico diagnostico che minimizza la divergenza del campo di velocità e incorpora parametrizzazioni semi-empiriche per riprodurre gli effetti delle scie e della ricircolazione causati dalla presenza di edifici. Inoltre, comprende il modello di dispersione particellare lagrangiano parallelizzato e su scala microscopica Spray. Il codice è parallelizzabile, permettendo l'esecuzione di operazioni in parallelo su computer o reti di computer in una configurazione di memoria distribuita utilizzando il protocollo MPI.

## 5.2 Creazione delle mappe

Per la realizzazione di queste mappe è stato impiegato un software di modellazione e visualizzazione grafica specifico: Surfer. Questo strumento si occupa principalmente dell'analisi di dati geospaziali e la creazione di mappe.

Questo applicativo rappresenta una soluzione avanzata per la creazione di mappe a contorni e la mappatura di superfici. Surfer è un programma di mappatura che utilizza un approccio basato su griglie, consentendo di interpolare dati XYZ irregolari in una griglia a spaziatura regolare. Grazie a questa interpolazione, è possibile generare vari tipi di mappe, tra cui mappe a contorni, mappe a rilievo colorato e mappe di superfici tridimensionali, oltre ad altre tipologie.

Surfer mette a disposizione una vasta gamma di metodi di interpolazione, ciascuno dei quali offre una diversa interpretazione dei dati. Questa varietà consente di scegliere il metodo di interpolazione più adatto alle specifiche esigenze dell'analisi in corso. Inoltre, le metriche dei dati incorporate nel software permettono di rappresentare graficamente informazioni statistiche relative ai dati grigliati, arricchendo ulteriormente l'analisi e la visualizzazione dei risultati.

Sono stati implementati dei file di testo per ogni ora dell'evento, 31 ore, nel quale ci sono 3 specifiche colonne di dati (XYZ): le coordinate del punto X, Y e la concentrazione. La X e la Y permettono di identificare il punto sulla mappa nel quale si avrà una specifica concentrazione.

Tabella 19. Esempio riga di testo

X	Y	Concentrazione ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
3.276120e+02	4.601024e+03	6.191647e+01

Il processo di creazione della mappa è costituito da diversi passaggi:

1. importazione della mappa di base: utilizzando il comando *Base*, si importa la mappa del sito di interesse;
2. aggiunta del file di testo e creazione della griglia: si importa il file di testo del giorno da analizzare attraverso il comando *Grid Data* che crea la griglia interpolando i dati XYZ;
3. visualizzazione della griglia; attraverso il comando *Contour* si ottengono le linee di concentrazione sulla mappa.

Dopodiché vengono effettuate delle modifiche grafiche alla mappa per renderla più comprensibile:

- modifica del dominio: viene ristretto il dominio della mappa sul sito di nostro interesse;

- scala logaritmica: i dati vengono convertiti in scala logaritmica per una migliore visualizzazione;
- rimozione dei contorni: vengono rimossi i contorni delle mappe per una visualizzazione più pulita;
- eliminazione valori negativi: i valori al di sotto di zero, che rappresentano solo rumore, vengono eliminati;
- uniformità della legenda: si applica la stessa legenda di valori a tutte le immagini per facilitarne il confronto.

Da questi passaggi sono state generate 31 immagini ciascuna riferita a un'ora differente dell'evento.

È interessante notare come le mappe si trasformino significativamente dall'inizio fino alla conclusione dell'evento. Questi cambiamenti riflettono l'evolversi delle condizioni e delle dinamiche durante tutto il corso dell'evento.

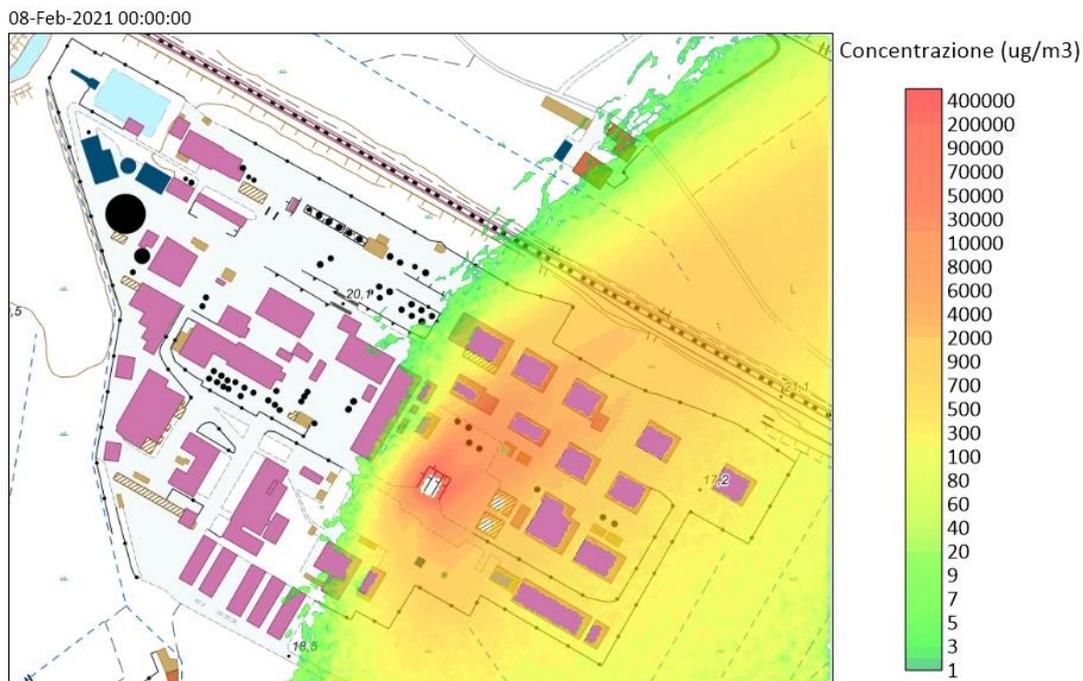


Figura 8. Mappa di concentrazione, 08/02/2021 00:00:00, scala 1: 25000

La Figura 8 è la mappa di concentrazione alla prima ora dell'evento, si può osservare che le concentrazioni raggiungono valori molto elevati e quasi tutto lo stabilimento è coperto dalla nube di tetraidrofurano.

09-Feb-2021 06:00:00

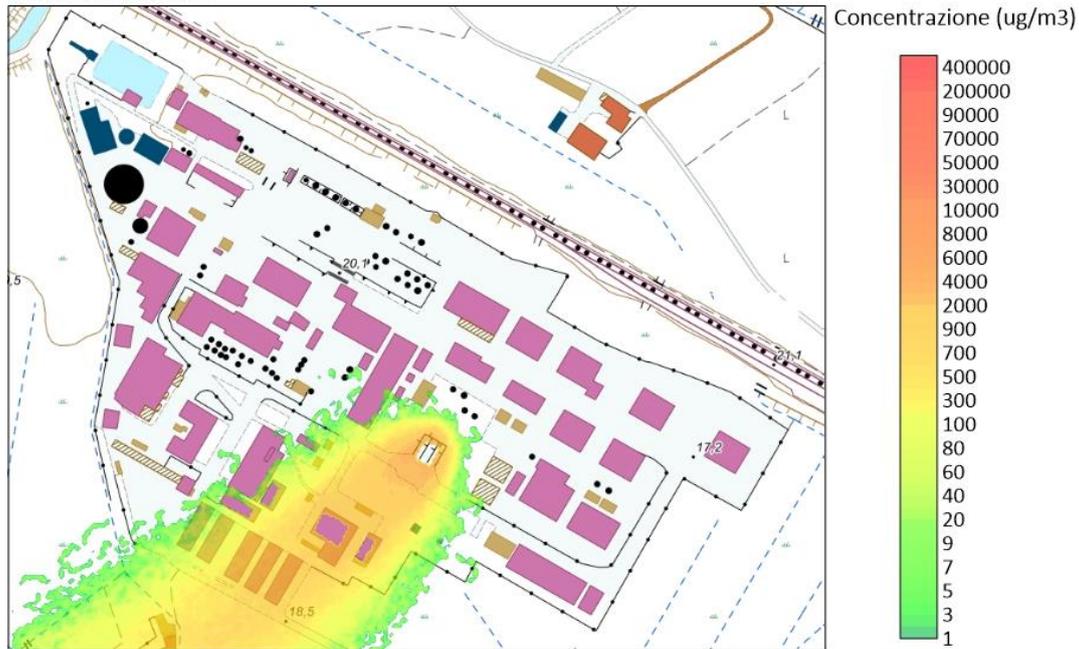


Figura 9. Mappa di concentrazione, 09/02/2021 06:00:00, scala 1: 25000

Guardando la *Figura 9* alla fine dell'evento, è evidente che le concentrazioni sono drasticamente diminuite rispetto all'inizio, poiché il tetraidrofurano si è completamente evaporato e disperso nell'atmosfera.

### 5.3 Analisi mappe di concentrazione (stabilità o instabilità atmosferica)

La quasi totalità degli eventi di inquinamento atmosferico si manifesta nella parte bassa della troposfera, nota come "Planetary Boundary Layer" (PBL), dove avvengono tutti i processi di dispersione atmosferica. Il PBL include la regione della troposfera in cui la struttura del flusso d'aria è influenzata dalla superficie terrestre e può estendersi fino a oltre un chilometro di altezza. Questo strato varia nel tempo e nello spazio a causa delle inversioni termiche, che influenzano il gradiente atmosferico.

Il trasporto dei contaminanti all'interno del PBL avviene principalmente attraverso due meccanismi:

1. trasporto del vento (convezione): il vento svolge un ruolo essenziale nel trasporto orizzontale degli inquinanti su lunghe distanze;
2. dispersione della turbolenza (miscelazione):
  - o turbolenza convettiva: generata dai gradienti termici verticali, questa forma di turbolenza è strettamente legata alla stabilità o instabilità atmosferica. In condizioni di stabilità, l'atmosfera resiste alla miscelazione verticale mentre in condizioni di instabilità, favorisce una più ampia miscelazione verticale degli inquinanti;

- o turbolenza meccanica: proveniente dai profili di velocità del vento, dalla rugosità e dalla morfologia della superficie terrestre, questa forma di turbolenza contribuisce ulteriormente alla dispersione degli inquinanti.

La stabilità e l'instabilità atmosferica sono concetti fondamentali per comprendere come gli inquinanti si diffondano nell'atmosfera, specialmente all'interno del Planetary Boundary Layer (PBL).

In condizioni di stabilità atmosferica, l'aria tende a resistere ai movimenti verticali, limitando la miscelazione verticale. Ciò si verifica quando lo strato inferiore dell'atmosfera è più freddo di quello superiore, creando un gradiente termico che inibisce il moto verticale dell'aria. Durante queste condizioni, gli inquinanti possono accumularsi vicino al suolo, determinando elevate concentrazioni locali.

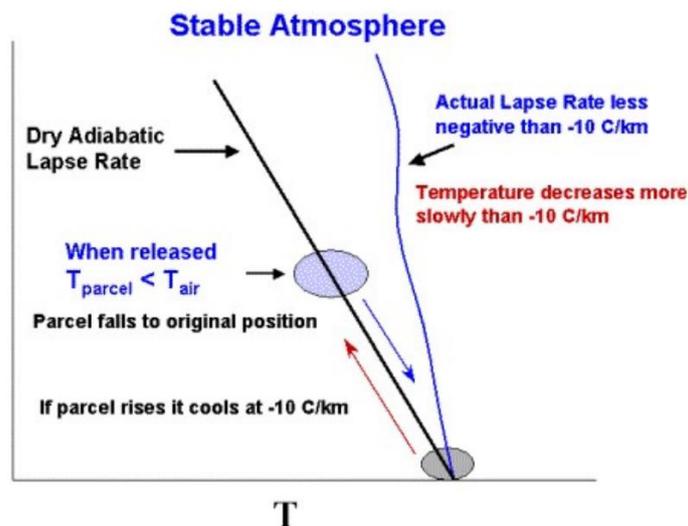


Figura 10. Stabilità atmosferica

Le caratteristiche della stabilità atmosferica includono inversioni termiche, dove la temperatura aumenta con l'altitudine, creando una barriera che limita la convezione e la miscelazione verticale degli inquinanti. Questo fenomeno riduce significativamente la dispersione degli inquinanti e promuove il loro accumulo a basse altitudini. Le condizioni stabili si manifestano spesso con cieli sereni e l'assenza di nubi, caratterizzati da una mancanza di attività convettiva che contribuisce ulteriormente alla persistenza degli inquinanti nell'aria bassa.

L'instabilità atmosferica favorisce la miscelazione verticale dell'aria, facilitando la dispersione degli inquinanti su un'ampia area. Si verifica quando lo strato inferiore dell'atmosfera è più caldo di quello superiore, creando un gradiente termico che promuove il moto verticale. In queste condizioni, l'aria calda sale e l'aria fredda scendono, aumentando il mescolamento e riducendo le concentrazioni locali di inquinanti.

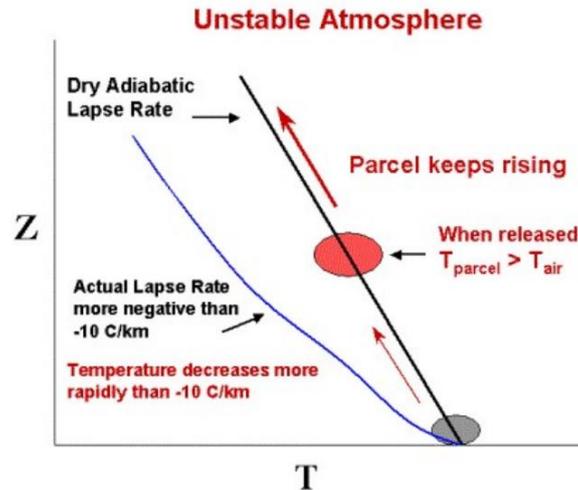


Figura 11. Instabilità atmosferica

Le caratteristiche dell'instabilità atmosferica comprendono un gradiente termico negativo, dove la temperatura diminuisce rapidamente con l'altitudine, facilitando il moto verticale dell'aria e degli inquinanti. Questo fenomeno è accompagnato da un elevato mescolamento verticale che favorisce la dispersione degli inquinanti, riducendo le loro concentrazioni al suolo. Le condizioni instabili si manifestano spesso con cieli nuvolosi e un'attività convettiva significativa, che contribuiscono a un ambiente turbolento favorevole alla miscelazione dell'aria e alla dispersione degli inquinanti nell'atmosfera.

In sintesi, la stabilità atmosferica tende a limitare la dispersione verticale degli inquinanti mentre l'instabilità atmosferica facilita una maggiore miscelazione e diffusione, influenzando significativamente la qualità dell'aria e la distribuzione degli inquinanti nel PBL.

La lunghezza di Monin-Obukhov ( $L_M$ ) è un parametro fondamentale nella micrometeorologia, utilizzato per descrivere le condizioni di stabilità o instabilità atmosferica all'interno del Planetary Boundary Layer (PBL). Introdotta dai meteorologi russo Aleksandr Monin e Andrei Obukhov, questa lunghezza caratterizza il bilancio tra la produzione di turbolenza meccanica, dovuta al vento, e la produzione o distruzione di turbolenza termica, dovuta ai gradienti di temperatura.

La lunghezza di Monin-Obukhov è definita come:

$$L_M = -\frac{u_*^3 \bar{\theta}}{g k u_z' \theta'} \quad \text{Equazione 5.1}$$

Dove:

- $u_*$ : velocità di attrito superficiale;
- $\bar{\theta}$ : temperatura media dell'aria;

- $g$ : accelerazione di gravità;
- $k$ : costante di von Karman ( $\sim 0.4$ );
- $\overline{u'_z\theta'}$ : flusso di calore sensibile alla superficie.

La lunghezza di Monin-Obukhov indica la distanza verticale sopra la superficie terrestre alla quale i flussi di calore e momento hanno un'influenza simile.

A seconda del segno e del valore di  $L_M$ , si possono ricavare le condizioni di stabilità atmosferica:

- condizioni neutre ( $L_M \rightarrow \infty$ ): quando  $L_M$  è molto grande, significa che la turbolenza meccanica prevale su quella termica. In questo caso, il profilo di temperatura non è significativamente influenzato dalla turbolenza termica, indicando condizioni neutre di stabilità;
- condizioni stabili ( $L_M > 0$ ): un valore positivo di  $L_M$  indica che il flusso di calore sensibile è positivo, ovvero il suolo è più freddo dell'aria sovrastante. Questo tende a limitare la turbolenza convettiva, favorendo condizioni di stabilità. L'aria fredda vicino alla superficie resiste al sollevamento, limitando la dispersione verticale degli inquinanti;
- condizioni instabili ( $L_M < 0$ ): un valore negativo di  $L_M$  indica che il flusso di calore sensibile è negativo, ovvero il suolo è più caldo dell'aria sovrastante. Questo promuove la turbolenza convettiva, favorendo condizioni di instabilità. L'aria calda vicino alla superficie tende a sollevarsi, aumentando la miscelazione verticale e facilitando la dispersione degli inquinanti.

La lunghezza di Monin-Obukhov fornisce quindi una misura quantitativa delle condizioni di stabilità o instabilità atmosferica, influenzando significativamente il comportamento della dispersione degli inquinanti nel PBL.

Tabella 20. Lunghezza di Monin-Obukhov al variare delle ore

Data	$L_M$
08/02/2021 00:00	90
08/02/2021 01:00	90
08/02/2021 02:00	90
08/02/2021 03:00	90
08/02/2021 04:00	90
08/02/2021 05:00	90
08/02/2021 06:00	90
08/02/2021 07:00	90
08/02/2021 08:00	90

08/02/2021 09:00	90
08/02/2021 10:00	613.108
08/02/2021 11:00	3032.41
08/02/2021 12:00	14463.358
08/02/2021 13:00	22578.498
08/02/2021 14:00	853.867
08/02/2021 15:00	253.374
08/02/2021 16:00	90
08/02/2021 17:00	90
08/02/2021 18:00	90
08/02/2021 19:00	90
08/02/2021 20:00	90
08/02/2021 21:00	90
08/02/2021 22:00	90
08/02/2021 23:00	90
09/02/2021 00:00	90
09/02/2021 01:00	184.172
09/02/2021 02:00	131.425
09/02/2021 03:00	359.81
09/02/2021 04:00	90
09/02/2021 05:00	90
09/02/2021 06:00	90

Nella *Tabella 20*, i valori della lunghezza di Monin-Obukhov forniti dal modello micrometeorologico indicano le condizioni di stabilità o instabilità atmosferica senza fornire il valore specifico del parametro  $L_M$ . Un valore pari a 90 rappresenta condizioni stabili, indicando che il suolo è più freddo dell'aria sovrastante, limitando la turbolenza convettiva e favorendo l'accumulo di inquinanti vicino al suolo. Valori diversi da 90 indicano condizioni instabili, suggerendo che il suolo è più caldo dell'aria sovrastante, promuovendo la turbolenza convettiva e una migliore dispersione degli inquinanti nell'atmosfera. Questi valori semplificati aiutano a comprendere rapidamente le condizioni atmosferiche e le loro implicazioni sulla qualità dell'aria.

Si può concludere che ci sono più ore in condizioni stabili che instabili e si riscontrano tre intervalli di ore:

1. dalle 00:00 alle 10:00 del 08/02/2021;

2. dalle 17:00 alle 01:00 del 09/02/2021;
3. dalle 04:00 alle 07:00 del 09/02/2021.

Condizioni instabili:

1. dalle 10:00 alle 17:00 del 08/02/2021;
2. dalle 02:00 alle 04:00 del 08/02/2021.

In condizioni stabili, l'aria stratificata limita il movimento verticale, causando un accumulo di inquinanti vicino alla sorgente e portando a concentrazioni elevate e localizzate. Al contrario, in condizioni instabili, l'aria più calda sotto l'aria più fredda favorisce il mescolamento verticale e la turbolenza, disperdendo gli inquinanti su un'area più vasta e riducendo le concentrazioni locali. Pertanto, le condizioni stabili comportano concentrazioni elevate e localizzate di inquinanti, mentre le condizioni instabili promuovono una distribuzione più uniforme e concentrazioni più basse.

#### **5.4 Analisi mappe di concentrazione (limiti di concentrazione)**

Come definito in precedenza, il TLV-STEL (Threshold Limit Value - Short Term Exposure Limit) è il limite per esposizioni brevi, rappresentando la concentrazione media che può essere tollerata per un massimo di 15 minuti, non più di 4 volte al giorno, con almeno un'ora di intervallo tra i periodi di esposizione. Per il tetraidrofurano, questo limite è fissato a 100 ppm, equivalente a circa  $3 \cdot 10^5$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Il tetraidrofurano è classificato nel gruppo A3, che include sostanze considerate cancerogene per gli animali, ma con rilevanza sconosciuta per l'uomo.

Dalle mappe generate si osserva che questo limite è superato in diverse occasioni, in particolare viene superato 9 volte in tutto l'evento.

Nella prima ora dell'evento, ore 00:00:00, la concentrazione massima che si raggiunge è pari a 392256.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Questa concentrazione è la più alta che viene raggiunta in tutte le 31 ore dell'evento, in quest'ora si ha il picco di concentrazione.

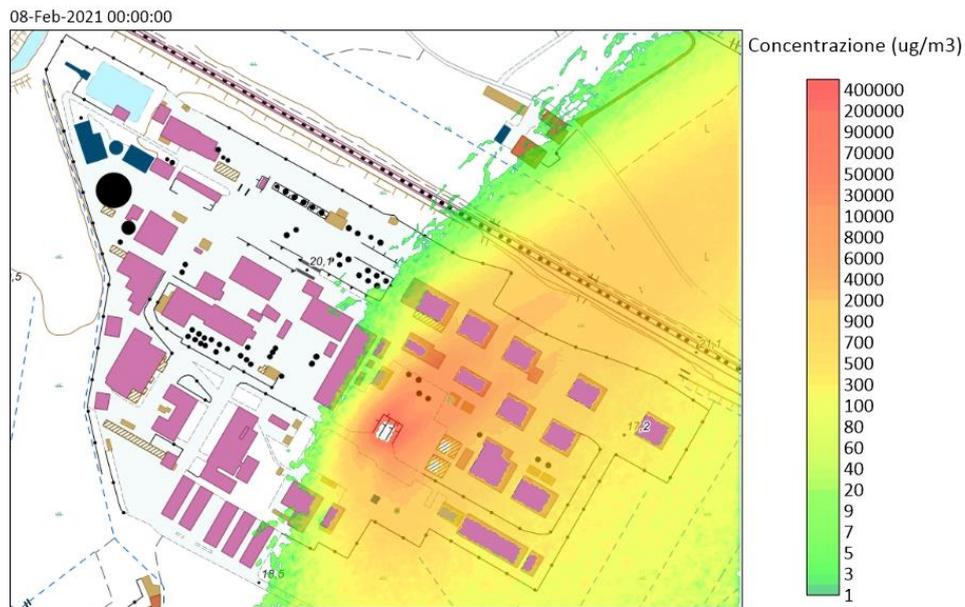


Figura 12. Mappa di concentrazione, 08/02/2021 00:00:00, scala 1: 25000

Nella seconda ora, 01:00:00, si ha anche una concentrazione massima che supera il TLV-STEL pari a 357647.00  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

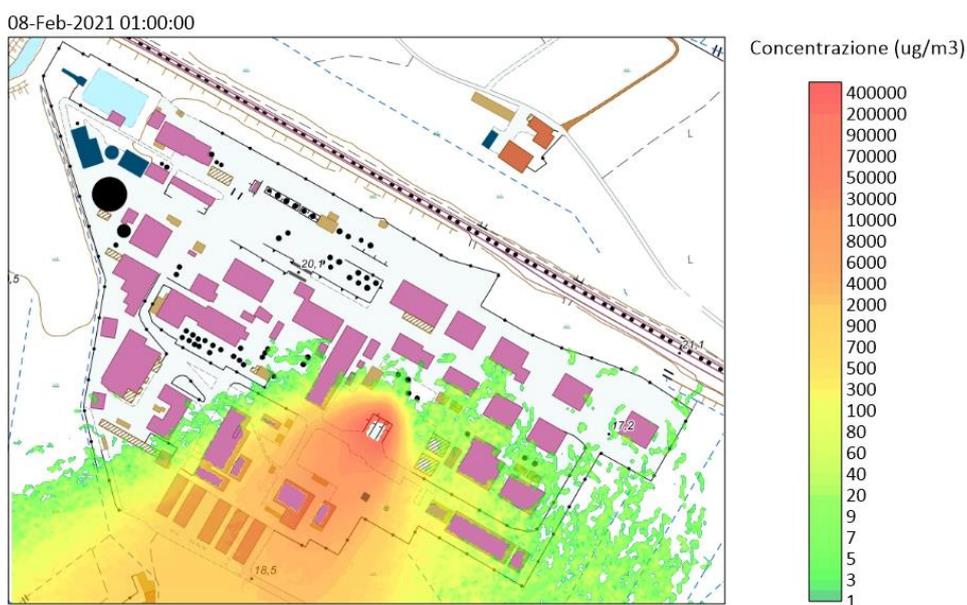


Figura 13. Mappa di concentrazione, 08/02/2021 01:00:00, scala 1: 25000

Alle ore 02:00:00 la concentrazione massima è pari a 363258.10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

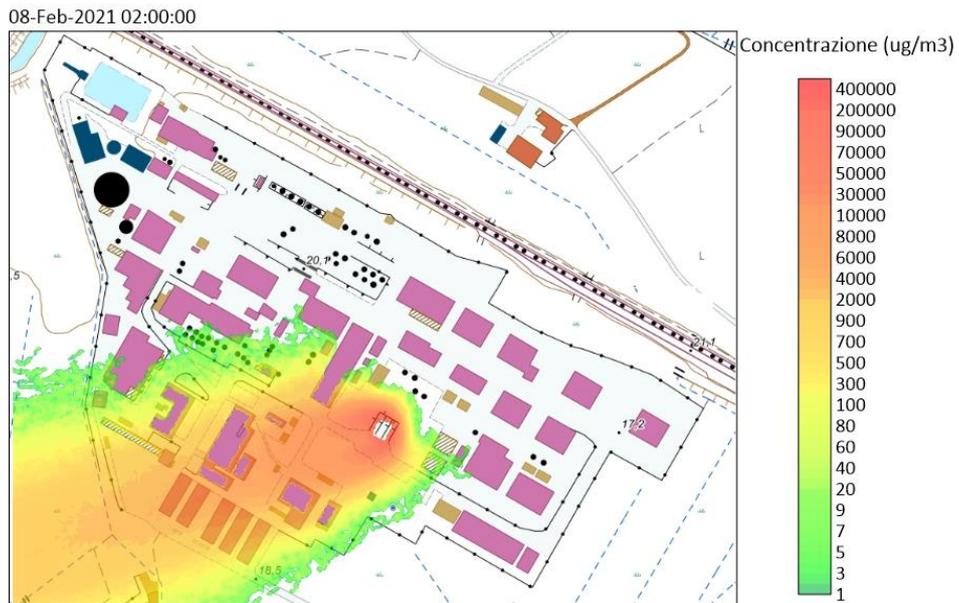


Figura 14. Mappa di concentrazione, 08/02/2021 02:00:00, scala 1: 25000

Alle ore 03:00:00 la concentrazione massima è pari a 324547.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , generando un ulteriore superamento del limite TLV-STEL.

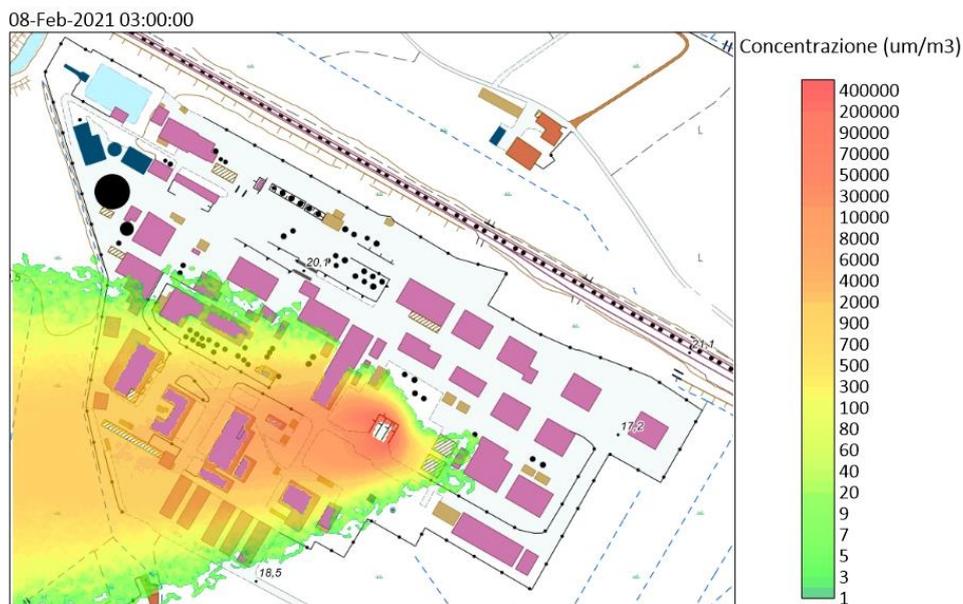


Figura 15. Mappa di concentrazione, 08/02/2021 03:00:00, scala 1: 25000

Dopo 10 ore in cui non è stato superato il TLV-STEL c'è stato un altro superamento del limite pari a 342135.9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

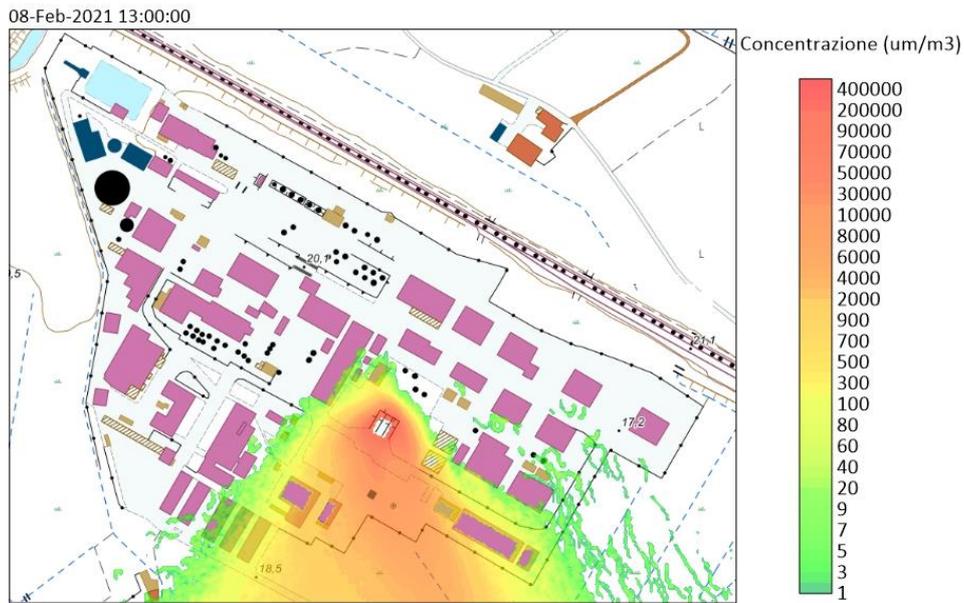


Figura 16. Mappa di concentrazione, 08/02/2021 13:00:00, scala 1: 25000

Alle ore 15:00:00 la concentrazione massima è pari a 302592.3 µg/m<sup>3</sup>.

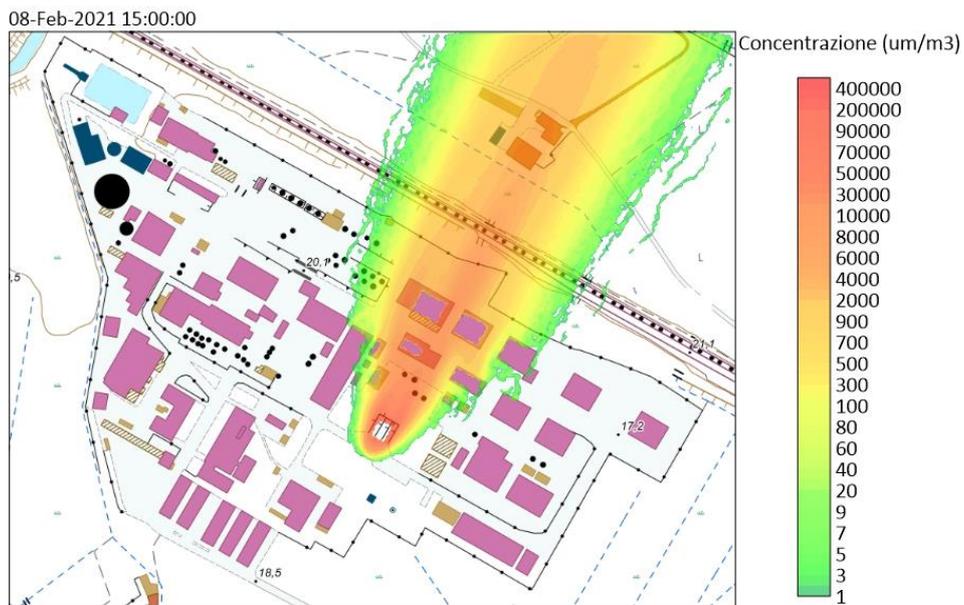


Figura 17. Mappa di concentrazione, 08/02/2021 15:00:00, scala 1: 25000

Verso le ultime ore dell'evento, precisamente alle 02:00:00 del 9 febbraio del 2021, la concentrazione massima ha superato il TLV-STEL raggiungendo un valore pari a 374776.4 µg/m<sup>3</sup>.

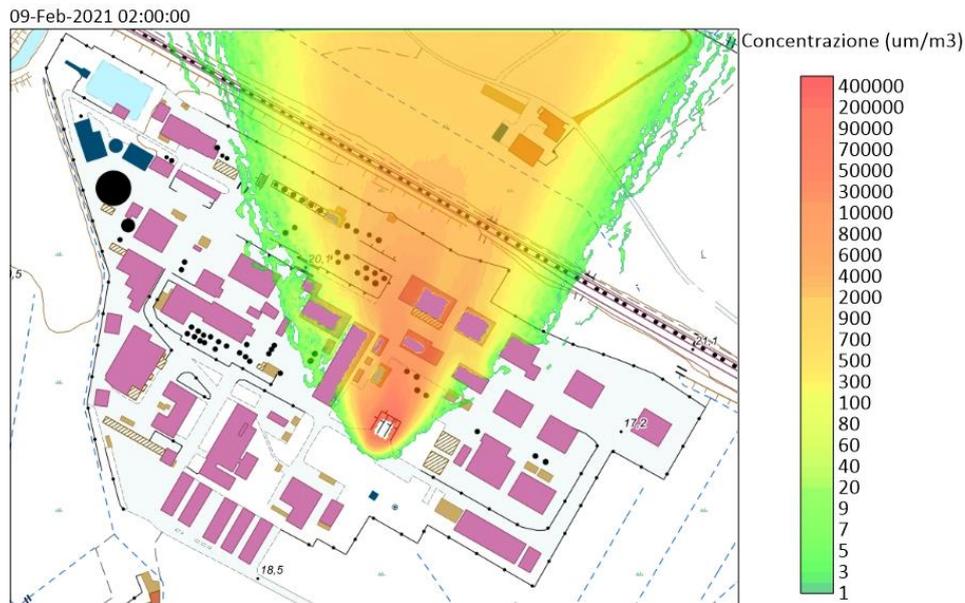


Figura 18. Mappa di concentrazione, 09/02/2021 02:00:00, scala 1: 25000

Alle ore 03:00:00 del 9 febbraio del 2021 la concentrazione massima è pari a 356659.5 µg/m<sup>3</sup>, generando un ulteriore superamento del limite TLV-STEL.

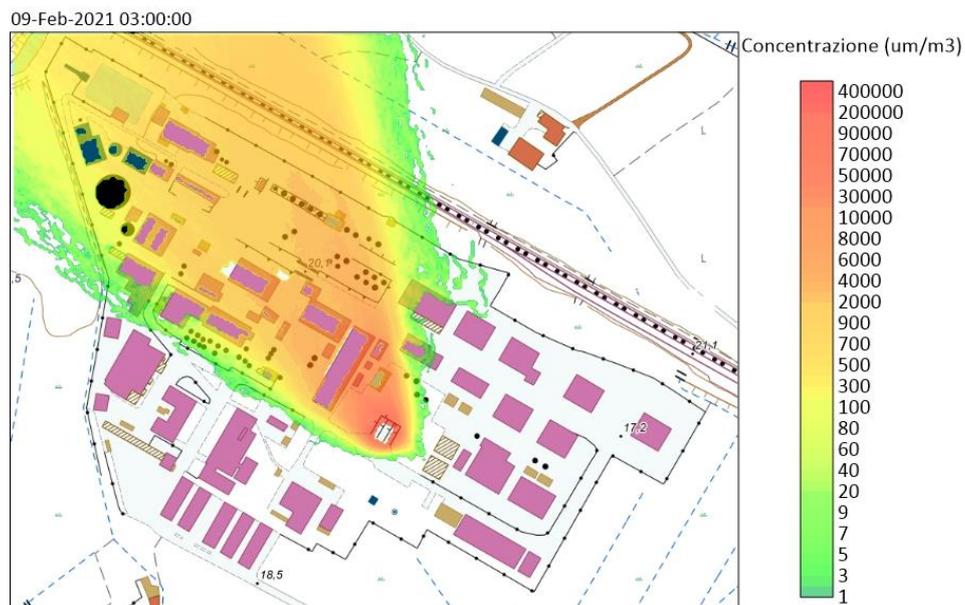


Figura 19. Mappa di concentrazione, 09/02/2021 03:00:00, scala 1: 25000

Il secondo picco è avvenuto alle ore 05:00:00 con una concentrazione pari a 386311.30 µg/m<sup>3</sup>.

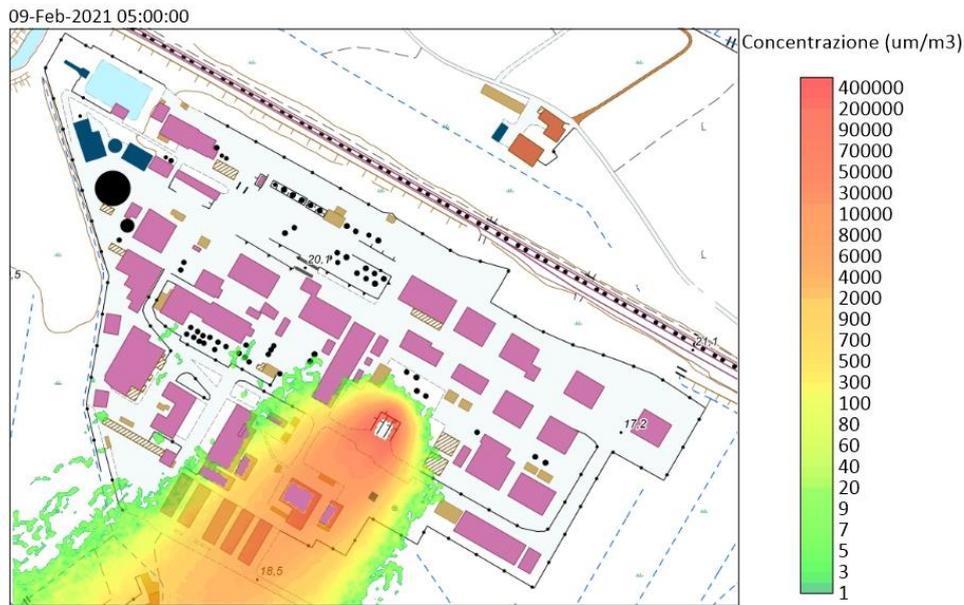


Figura 20. Mappa di concentrazione, 09/02/2021 05:00:00, scala 1: 25000

## 5.5 Valutazione del rischio

Le mappe di valutazione del rischio rivestono un ruolo cruciale nel contesto della salute e sicurezza sul lavoro, offrendo diversi benefici fondamentali. Esse facilitano la prioritizzazione degli interventi mediante la valutazione della gravità e della probabilità di ciascun rischio, consentendo di affrontare con priorità quelli più gravi e probabili. Questo approccio supporta una pianificazione preventiva mirata, dall'implementazione di misure di controllo alla selezione di attrezzature adeguate, garantendo condizioni di lavoro sicure. Inoltre, le mappe di rischio migliorano la comunicazione dei rischi ai lavoratori e ai responsabili della sicurezza attraverso rappresentazioni visive, aumentando la consapevolezza e la comprensione degli scenari potenziali.

Questi strumenti dinamici possono essere aggiornati regolarmente per monitorare l'efficacia delle misure di controllo e adattarsi a cambiamenti ambientali o nelle pratiche lavorative. Contribuiscono alla conformità normativa, aiutando le aziende a rispettare le leggi vigenti e a evitare sanzioni. Prevenendo incidenti e infortuni, le mappe di valutazione del rischio proteggono la salute dei lavoratori e riducono i costi associati a malattie, risarcimenti e interruzioni della produzione.

Integrate in un processo di miglioramento continuo, queste mappe consentono di analizzare dati dettagliati e di aggiornare regolarmente le misure di sicurezza, migliorando le pratiche aziendali e affrontando nuove sfide. Infine, forniscono dati e analisi cruciali per supportare decisioni aziendali relative alla sicurezza, influenzando investimenti, modifiche strutturali e procedure operative. In sintesi, le mappe di valutazione del rischio sono strumenti indispensabili per la gestione della

sicurezza sul lavoro, contribuendo a creare un ambiente lavorativo più sicuro e a promuovere una cultura della sicurezza all'interno dell'organizzazione.



Figura 21. Mappa di valutazione del rischio, 08/02/2021 00:00:00, scala 1: 25000



Figura 22. Mappa di valutazione del rischio, 09/02/2021 05:00:00, scala 1: 25000

Nella *Figura 19* e *20* sono rappresentate le mappe di valutazione del rischio nei due picchi dell'evento. In particolare, le immagini permettono di identificare le zone specifiche in cui la concentrazione supera il valore limite TLV-STEL, questo è stato possibile facendo il rapporto tra la concentrazione nel punto e il valore limite. Le zone di superamento sono identificate dal colore rosso,

il rapporto è pari o maggiore a 1, e dalle immagini si può osservare che interessano le zone in prossimità della sorgente.

In prossimità del serbatoio bisogna tenere conto delle schede tecniche dell'OMS riguardanti l'esposizione al tetraidrofurano, che può avere vari effetti negativi sulla salute umana. La sostanza può essere assorbita attraverso l'inalazione dei suoi vapori, l'ingestione e il contatto cutaneo. Sia il tetraidrofurano che i suoi vapori sono irritanti per gli occhi, la pelle e il tratto respiratorio.

L'esposizione al tetraidrofurano può provocare vari sintomi a seconda della via di esposizione. In caso di inalazione, i sintomi includono tosse, sensazione di bruciore in gola e nel petto, vertigini, mal di testa, nausea e perdita di conoscenza. La prevenzione prevede l'uso di ventilazione, aspirazione localizzata o dispositivi di protezione delle vie respiratorie. In caso di inalazione, è fondamentale portare la persona all'aria fresca, farla riposare e richiedere immediatamente assistenza medica.

Per l'esposizione cutanea, i sintomi possono essere secchezza della pelle, arrossamento e dolore. La prevenzione consiste nell'uso di guanti protettivi e vestiario adeguato. In caso di contatto, sciacquare la pelle con acqua per almeno 15 minuti, rimuovere i vestiti contaminati e continuare a sciacquare. È necessario consultare un medico.

Se il contatto avviene con gli occhi, i sintomi includono arrossamento e dolore. Per prevenirlo, è importante indossare occhiali protettivi a mascherina o una visiera. In caso di esposizione, sciacquare immediatamente con abbondante acqua per alcuni minuti, rimuovendo le lenti a contatto se possibile, e consultare un medico.

In caso di ingestione, i sintomi sono simili a quelli dell'inalazione. La prevenzione consiste nel non mangiare, bere o fumare durante il lavoro. Se la sostanza viene ingerita, sciacquare la bocca e richiedere assistenza medica immediata.

A livelli elevati, la sostanza può influire sul sistema nervoso centrale, provocando narcosi. Contatti ripetuti o prolungati con la pelle possono causare dermatiti. Inoltre, il tetraidrofurano può avere effetti sul fegato e sui reni, riducendone la funzionalità, ed è considerato un possibile cancerogeno per l'uomo.

In caso di versamento, è necessario evacuare la zona pericolosa e consultare un esperto. Per la protezione personale, è consigliato l'uso di un respiratore con filtro per gas e vapori organici adatto alla concentrazione atmosferica della sostanza. Bisogna rimuovere tutte le sorgenti di accensione e assicurare una buona ventilazione. Non si deve smaltire il tetraidrofurano nelle fognature. Il liquido fuoriuscito deve essere raccolto in contenitori sigillabili e il residuo assorbito con sabbia o assorbente inerte, per poi essere immagazzinato e smaltito secondo le normative locali.

## Conclusione

Si può concludere affermando che il presente lavoro di tesi ha contribuito all'obiettivo di sviluppare una nuova metodologia per la gestione dei rischi derivanti da eventi NaTech.

Tale metodo ha lo scopo di sopperire alla necessità di affrontare in modo integrato i rischi naturali e tecnologici, specialmente in un'era di cambiamenti climatici accelerati. Il lavoro di tesi si è basato su tre principali attività di ricerca.

In primo luogo, la creazione di un Database di Incidenti NaTech il quale ha fornito una base solida per comprendere modelli ricorrenti, cause sottostanti e impatti degli eventi passati. Questo approccio storico ha permesso di identificare criticità e vulnerabilità che guidano le strategie preventive e di mitigazione.

La seconda fase ha visto lo sviluppo di un Modello di Simulazione predittiva, progettato per anticipare le conseguenze di incidenti NaTech, come la rottura di serbatoi o la dispersione di sostanze inquinanti. Questo strumento non solo supporta la pianificazione delle risposte di emergenza, ma anche la progettazione di misure preventive più efficaci.

L'implementazione di Mappe di Concentrazione, infine, ha consentito di visualizzare chiaramente le aree ad alto rischio e le concentrazioni di sostanze inquinanti. Questo strumento di mappatura spaziale, integrato con tecnologie avanzate come il software Surfer, è cruciale per identificare le aree critiche che richiedono interventi prioritari.

Infine, grazie all'implementazione delle Mappe di Valutazione del Rischio, è stato possibile visualizzare in modo dettagliato le aree con un rischio significativamente elevato. Questo approccio ha fornito una panoramica chiara e dettagliata delle zone dove sono necessari interventi immediati per garantire la sicurezza e la salute dei lavoratori, nonché per proteggere l'ambiente circostante da potenziali danni.

L'approccio multidisciplinare adottato in questa ricerca combina l'analisi storica, la modellazione predittiva e la mappatura spaziale; inoltre, rappresenta un passo significativo verso una gestione del rischio NaTech più efficace e resiliente. Questo nuovo quadro metodologico non solo migliora la capacità di risposta delle autorità e delle comunità locali, ma promuove anche la sostenibilità ambientale e la sicurezza delle comunità umane di fronte alle sfide dei cambiamenti climatici.

Guardando al futuro, questa metodologia innovativa può essere adattata e applicata a una vasta gamma di casi studio e sostanze, offrendo un approccio replicabile e scalabile per la gestione integrata dei rischi NaTech in diverse realtà geografiche e industriali. In conclusione, il contributo di questa tesi non solo migliora la comprensione e la gestione dei rischi tecnologici in contesti di cambiamento

climatico, ma promuove anche una cultura di sicurezza proattiva e responsabile nelle nostre comunità globali.

## Bibliografia

- Pinna G., Ricchiuti A., Geri F., De Rosa A., Procaccini I., Barone D. (2021) – *Stabilimenti con pericolo di incidente rilevante - La nuova UNI/TS 11816-1 sugli eventi NaTech*, Energia & Dintorni
- Antonioni, G., Spadoni, G., Cozzani, V. (2007) - *A methodology for the quantitative risk assessment of major accidents triggered by seismic events*, Journal of Hazardous Materials
- Campedel, M., Cozzani, V., Garcia-Agreda, A., Salzano, E. (2008) *Extending the quantitative assessment of industrial risks to earthquake effects*, Risk Analysis
- Ricci F., Casson Moreno V., Cozzani V. (2021), *A comprehensive analysis of the occurrence of Natech events in the process industry*, Process Safety and Environmental Protection
- Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen 2, *Methods for the calculation of Physical Effects, Due to releases of hazardous materials (liquids and gases)*
- Cruz, A.M., Steinberg, L.J., Vetere Arellano, A.L., Nordvik, J.-P., Pisano, F., 2004. *State of the Art in Natech Risk Management*. Italy: European Commission-JRC, United Nations-ISDR, EUR 21292 EN.  
[https://www.unisdr.org/files/2631\\_FinalNatechStateofthe20Artcorrected.pdf](https://www.unisdr.org/files/2631_FinalNatechStateofthe20Artcorrected.pdf)

## Sitografia

- RETURN: <https://www.fondazione{return}.it/en/>
- Definizione Rischio Na-Tech: <https://www.inail.it/cs/internet/attivita/ricerca-e-tecnologia/area-sicurezza-sul-lavoro/stabilimenti-a-rischio-di-incidente-rilevante/rischio-na-tech.html>
- UNI/TS 11618-1: <https://www.certifico.com/normazione/358-news-normazione/13591-uni-ts-11816-1-2021>
- UNI/TS 11618-1: <https://www.mcmonline.it/stabilimenti-con-pericolo-di-incidente-rilevante-la-nuova-uni-ts-sugli-eventi-natech-25319>
- eNatech Database: [eNatech - eNatech Database \(europa.eu\)](http://eNatech.eu)
- eMARS Database: <https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/content>
- Equazione di Antoine Etilbenzene: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C100414&Mask=4>
- Equazione di Antoine Metiletilchetone: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=78-93-3>
- Equazione di Antoine Tetraidrofurano: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=109-99-9>

- TLV-STEL:  
<https://www.inail.it/cs/Satellite?c=Page&cid=6443108961189&d=68&pagename=Internet%2FPage%2FpaginaFoglia%2Flayout>
- TLV-STEL normativa:  
[https://www.inail.it/cs/internet/docs/allegato\\_xliii\\_valori\\_limite\\_di\\_esposizione\\_professionale\\_pdf.pdf%3Fsection=attivita](https://www.inail.it/cs/internet/docs/allegato_xliii_valori_limite_di_esposizione_professionale_pdf.pdf%3Fsection=attivita)
- TLV-STEL Benzene: <https://www.acgih.org/ethyl-benzene-2/>
- TLV-STEL Metiletilchetone: <https://www.acgih.org/methyl-ethyl-ketone-2/>
- TLV-STEL Tetraidrofurano: <https://www.acgih.org/tetrahydrofuran-2/>
- TLV-STEL Benzene: <https://www.acgih.org/benzene-2/>
- Caratteristiche benzene: <https://www.certifico.com/sicurezza-lavoro/documenti-sicurezza/67-documenti-riservati-sicurezza/6148-il-rischio-esposizione-occupazionale-benzene>
- Surfer: <http://downloads.goldensoftware.com/guides/Surfer16UsersGuidePreview.pdf>
- Scheda OMS Tetraidrofurano:  
[https://chemicalsafety.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\\_card\\_id=0578&p\\_version=1&p\\_lang=it](https://chemicalsafety.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_card_id=0578&p_version=1&p_lang=it)

## Indice delle figure

- Figura 2. Rappresentazione grafica dell'ambito del compito
- Figura 2. Locazione indicenti Natech
- Figura 3. Planimetria del sito
- Figura 4. Massa sversata nel tempo
- Figura 5. Massa evaporata di etilbenzene nel tempo
- Figura 6. Massa evaporata di metiletilchetone nel tempo
- Figura 7. Massa evaporata di tetraidrofurano nel tempo
- Figura 8. Mappa di concentrazione, 08/02/2021 00:00:00, scala 1: 25000
- Figura 9. Mappa di concentrazione, 09/02/2021 06:00:00, scala 1: 25000
- Figura 10. Stabilità atmosferica
- Figura 11. Instabilità atmosferica
- Figura 12. Mappa di concentrazione, 08/02/2021 00:00:00, scala 1: 25000
- Figura 13. Mappa di concentrazione, 08/02/2021 01:00:00, scala 1: 25000
- Figura 14. Mappa di concentrazione, 08/02/2021 02:00:00, scala 1: 25000
- Figura 15. Mappa di concentrazione, 08/02/2021 03:00:00, scala 1: 25000

- Figura 16. Mappa di concentrazione, 08/02/2021 13:00:00, scala 1: 25000
- Figura 17. Mappa di concentrazione, 08/02/2021 15:00:00, scala 1: 25000
- Figura 18. Mappa di concentrazione, 09/02/2021 02:00:00, scala 1: 25000
- Figura 19. Mappa di concentrazione, 09/02/2021 03:00:00, scala 1: 25000
- Figura 20. Mappa di concentrazione, 09/02/2021 05:00:00, scala 1: 25000
- Figura 21. Mappa di valutazione del rischio, 08/02/2021 00:00:00, scala 1: 25000
- Figura 22. Mappa di valutazione del rischio, 09/02/2021 05:00:00, scala 1: 25000

## Indice delle tabelle

- Tabella 1. Numero di eventi Natech raccolti nei diversi database consultati. Vengono riportati: il numero totale di record nel database, il numero di record selezionati e la % di eventi Natech presenti in ciascun database
- Tabella 2. Struttura database eMARS
- Tabella 3. Struttura database eNATECH
- Tabella 4. Struttura database
- Tabella 5. Categoria 'Rischio Naturale'. Vengono riportati: le tipologie di rischio naturale, il numero dei diversi eventi e la % di eventi in base alla categoria di rischio naturale
- Tabella 6. Categoria 'Attività Industriale'. Vengono riportati: le tipologie di rischio naturale, il numero degli eventi e la % di eventi in base alla categoria di attività industriale
- Tabella 7. Categoria 'Unità Coinvolte'. Vengono riportati: le tipologie di unità coinvolte, il numero degli eventi e la % di eventi in base alla categoria di unità coinvolte
- Tabella 8. Categoria 'Tipologia di Rilascio'. Vengono riportati: le tipologie di rilascio, il numero dei diversi eventi e la % di eventi in base alla categoria della tipologia di rilascio
- Tabella 9. Categoria 'Sostanze coinvolte'. Vengono riportati: le sostanze coinvolte, il numero degli eventi e la % di eventi in base alla categoria di sostanza coinvolta
- Tabella 10. Record del caso studio selezionato
- Tabella 11. Relazioni in base a diverse geometrie
- Tabella 12. Parametri sostanze selezionate
- Tabella 13. Evoluzione dei vettori ad ogni intervallo temporale (T = tempo dopo la rottura, MFR = portata massica, FD = grado di riempimento, TMD = rilascio totale di massa, LV = livello del liquido nel recipiente)
- Tabella 14. Evoluzione dei vettori della massa sversata e della massa evaporata nel tempo, etilbenzene
- Tabella 15. Valori metiletilchetone
- Tabella 16. Evoluzione dei vettori della massa sversata e della massa evaporata nel tempo, metiletilchetone
- Tabella 17. Valori tetraidrofurano
- Tabella 18. Evoluzione dei vettori della massa sversata e della massa evaporata nel tempo, tetraidrofurano
- Tabella 19. Esempio riga di testo
- Tabella 20. Lunghezza di Monin-Obukhov al variare delle ore

## ALLEGATO 1

```
%DATI
%SERBATOIO: serbatoio di stoccaggio
latoSerbatoio =15; %m
altezzaSerbatoio = 9; %m
%Serbatoio cilindrico
raggioSerbatoio = 7.5; %m
volumeSerbatoio = 1600 ;%m3
%volumeSerbatoioT = pi*raggioSerbatoio^2*altezzaSerbatoio %VolumeCilindro =
pi*r^2*h

% Attorno a questo serbatoio una vasca di raccolta (pianta quadrata) dalla quale
evapora la sostanza
altezzaVasca = 2; %m
latoVasca = 30; %m
Pa=101325; %N/m2, pressione sopra il liquido
dh=0.1; %m, larghezza del foro
hh=0; %m, altezza del foro
T0=288.15; %temperatura iniziale
Cd=0.62; %coef discharge
g=9.81; %m/s, accelerazione di gravità
phi=0.8;
%SOSTANZA: EtilBenzene
rhoL= 866; %kg/m³
Q0=volumeSerbatoio*rhoL*phi
%V=phi*r2*h
Vl=phi*volumeSerbatoio
Al=pi*raggioSerbatoio^2
hl_0=(Vl/(Al)) %altezza iniziale del liquido all'interno del cilindro
N=10000; %ogni intervallo è 10 sec

Time=zeros(1,N);
MassFlowRate=zeros(1,N);
FillingDegree=zeros(1,N);
TotalMassaDegree=zeros(1,N);
LiquidLevelVessel=zeros(1,N);
```

```

%condizioni iniziali
%qs= Cd*Ah*(2*(P-Pa)*rhoL
%P=Ph+Pal
%Ph=rhoL*g*hl
Ah=pi*(dh/2)^2;
Pa=101325; %N/m2, pressione atmosferica
Ph=rhoL*g*hl_0;
PaL= 101325; %N/m2, pressione al di sopra del liquido
qs_0=Cd*Ah*(2*(Ph)*rhoL)^0.5; % flusso di massa %kg/s
Tend=Q0/qs_0;
dT=10; %ogni 10 secondi
Time(1,1)=0
MassFlowRate(1,1)=qs_0
FillingDegree(1,1)=phi
TotalMassaDegree(1,1)=0
LiquidLevelVessel(1,1)=hl_0

dT_i=dT;
phi=0.8;
qs_i=qs_0;
for i=2:N
    dQ=-qs_i*dT_i;
    dQ_i=-dQ;
    dVl=dQ/rhoL;
    Vl_i=Vl+dVl;
    dhl=dVl/A1;
    hl_i=hl_0+dh1;
    phi_i=Vl_i/volumeSerbatoio;
    Ph_i=rhoL*g*hl_i;

    if(phi_i >= 0)
        qs_i=Cd*Ah*(2*(Ph_i)*rhoL)^0.5;
        Time(1,i)=dT_i;
        MassFlowRate(1,i)=qs_i;
        FillingDegree(1,i)=phi_i;
        TotalMassaDegree(1,i)=dQ_i;
        LiquidLevelVessel(1,i)=hl_i;
    end
end

```

```

        dTi=dTi+dT;
    else
        Time(1,i)=0;
        MassFlowRate(1,i)=0;
        FillingDegree(1,i)=0;
        TotalMassaDegree(1,i)=0;
        LiquidLevelVessel(1,i)=0;
    end
end
MassFlowRate(1,2897)=0;
FillingDegree(1,2897)=0;
TotalMassaDegree(1,2897)=0;
LiquidLevelVessel(1,2897)=0;

Time
MassFlowRate
FillingDegree
TotalMassaDegree
LiquidLevelVessel

% %Altezza liquido uscito dal serbatoio
HSerTempo = h1_0 - [LiquidLevelVessel(360) LiquidLevelVessel(2*360)
LiquidLevelVessel(3*360) LiquidLevelVessel(4*360) LiquidLevelVessel(5*360)
LiquidLevelVessel(6*360) LiquidLevelVessel(7*360) LiquidLevelVessel(2897)];
% %Volume uscito dal serbatoio
VSerTempo = HSerTempo*pi*raggioSerbatoio^2;

TS_s = Time(2897); %Tempo di svuotamento del serbatoio in secondi
TS_h=TS_s/3600
% Il tempo di svuotamento è di 8 ore
% %Massa uscita dal serbatoio ogni ora
TotMassTempo = [TotalMassaDegree(360) TotalMassaDegree(360*2)
TotalMassaDegree(360*3) TotalMassaDegree(360*4) TotalMassaDegree(360*5)
TotalMassaDegree(360*6) TotalMassaDegree(360*7) TotalMassaDegree(2897) 0];

for i=1:792

```

```

    if(i<=8)
        TotMassaSversata(i)=TotMassTempo(i);
    else
        TotMassaSversata(i)=0;
    end
end
filename = 'meteo completo.xlsx';
A = readtable(filename);
Ora=A.Date(913:8760);
U=A.U(913:8760);
T=A.T(913:8760);

T= 273.15 + T; % temperatura in K
A=4.07488;
B=1419.315;
C=-60.539;

logP=A-(B./(T+C));
P=10.^logP;

%Legge di Raoult P=p0*x
%tensione di vapore di un composto puro --> etilbenze = 10^-1.9
P0=10^-1.9;
ci=P/P0;

%modello simile è stato fornito da MacKay & Matsugu
%km=Cm&m. [uw10] ^0.78. [(2*rp)] ^(-0.11). [Sc] ^(-0.67)

Sc=0.8; %numero di Schmidt
Cmm = 0.004786; % m^0.33/s^0.22
%rp=(VserTempo/(pi*HserTempo))^0.5; %m, raggio della pozza

rp=7.5; %m, raggio cosrante della pozza
Ap=pi*rp^2; %m^2, area pozza

```

```

    km=Cmm*(U.^0.78)*((2*rp)^-0.11)*(Sc^-0.67);%m/s, coefficiente di trasferimento
di massa
    %Sc=vV/Da
    vV= 1.27 * 10^-6; %m^2/s, viscosita' cinematica del vapore aria
    Da=Sc/vV; % m2/s,coefficiente di diffusione del vapore nell'aria
%Il flusso di massa di evaporazione qv'', dipende dal coefficiente di trasferimento
km e dalla concentrazione di vapore ci, sulla superficie della pozza liquida
    %qv=km.ci a (z=0) [kg/m2*s]

    qv=km.*ci; %kg/m2s
    %qv in kg/s
    qv_1=qv*Ap;
    %qv in kg/h
    qv_2= qv_1*3600;

MassaEvaporataTot=0;
for i=1:length(qv_2)

    if(MassaEvaporataTot<=Q0)
        MassaEvaporataTot=MassaEvaporataTot+qv_2(i);
        i_fin=i;
    end
end
integer=i_fin;
%La massa è evaporata del tutto all'indice 792, quindi il 12 marzo ore 23
MassaEvaporataTot=sum(qv_2(1:integer)) ;

Data = Ora(1:integer);
MassaEvaporata = qv_2(1:integer);
MassaSversata =TotMassaSversata(1:integer)';

T = table(Data,MassaSversata , MassaEvaporata )

```