

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

**DOTTORATO DI RICERCA IN
GEOINGEGNERIA, GEORISORSE ED INGEGNERIA GEOTECNICA**

Ciclo XXIII

Settore Concorsuale di afferenza: 08/A2

Settore Scientifico Disciplinare: ING-IND/28

**PROCEDURE E STRUMENTI INNOVATIVI PER LO
SFRUTTAMENTO SOSTENIBILE DELLE RISORSE MINERARIE**

Presentata da: Ing. Carlo CORMIO

Coordinatore Dottorato

Relatore

Prof. Ing. Paolo Berry

Prof. Ing. Paolo Berry

Esame finale anno 2012

Procedure e strumenti innovativi per lo sfruttamento sostenibile delle risorse minerarie

1. PREMESSA.....	1
2. INTRODUZIONE.....	3
2.1. Struttura del lavoro di ricerca.....	3
2.1.1. L'amministrazione delle risorse minerarie. Politiche, approcci e strumenti normativi.....	4
2.1.2. Pianificazione come progettazione multidisciplinare a grande scala.....	6
2.1.3. Impatto ambientale prodotto dall'attività estrattiva.....	7
2.1.4. Strumenti disponibili per la ricerca nel settore delle georisorse.....	9
2.1.4.1. Sistemi Informativi Geografici per le attività estrattive.....	10
2.1.4.2. Free and Open Source Software.....	11
2.1.5. Sviluppo tecnologico ed applicazioni innovative.....	12
3. VIBRAZIONI INDOTTE DA VOLATE.....	15
3.1. Introduzione.....	15
3.2. Stato dell'arte.....	18
3.2.1. Fondamenti teorici.....	18
3.2.1.1. Fenomeno ondulatorio e caratteristiche della vibrazione indotta in superficie.....	18
3.2.1.2. Fenomeni di attenuazione o amplificazione del fenomeno vibratorio.....	21
3.2.2. Approcci scientifici allo studio del fenomeno.....	22
3.2.2.1. Formulazioni dell'equazione previsionale e criteri di inclusione dei fattori condizionanti...24	
3.2.2.1.1. Progettazione della volata.....	25
3.2.2.1.2. Caratteristiche del mezzo di propagazione.....	28
3.2.2.1.3. Frequenza di risonanza delle strutture sensibili.....	32
3.2.2.1.4. Progettazione del sistema di misura.....	33
3.2.2.2. Buone pratiche.....	34
3.2.2.3. Approcci innovativi: Reti Neurali Artificiali (ANN) e Support Vector Machines (SVM).....	36
3.2.2.3.1. BPNN ed SVM per la previsione della PPV e della frequenza.....	37
3.2.2.3.2. Considerazioni sulle reti neurali artificiali.....	41
3.2.3. Normativa sulla prevenzione del danno da vibrazione indotta su uomini e strutture.....	41
3.2.3.1. Prevenzione del danno provocato agli edifici.....	42
3.2.3.1.1. ISO 4866 e UNI 9916.....	42
3.2.3.1.2. USBM (RI 8507).....	43
3.2.3.1.3. DIN 4150.....	43
3.2.3.1.4. BS 7385.....	44
3.2.3.1.5. SN 640 312a.....	45
3.2.3.2. Prevenzione del disturbo arrecato agli individui.....	46
3.3. Contributo innovativo.....	47

3.3.1. Metodo di indagine.....	49
3.3.1.1. Pianificazione dell'intervento.....	50
3.3.1.2. Progettazione dell'intervento.....	50
3.3.1.3. Realizzazione dell'intervento.....	52
3.3.2. Sistema esperto.....	54
3.3.2.1. Strumenti adottati.....	55
3.3.2.2. Struttura del sistema.....	55
3.3.2.3. Applicazione pratica.....	56
3.3.2.3.1. Descrizione dell'area di indagine.....	56
3.3.2.3.2. Pianificazione.....	57
3.3.2.3.3. Progettazione.....	59
3.3.2.3.4. Considerazioni sull'applicazione pratica.....	63
4. RIQUALIFICAZIONE DI SITI ESTRATTIVI DISMESSI E/O ABBANDONATI.....	65
4.1. Introduzione.....	65
4.2. Modelli di gestione. Il partenariato pubblico - privato.....	66
4.2.1. Applicazione dei modelli di PPP al recupero dei siti estrattivi.....	69
4.3. Selezione e classificazione di siti degradati e di possibili interventi di riqualificazione.....	71
4.3.1. Parametri discriminanti.....	71
4.3.1.1. Caratterizzazione tecnica dei siti e delle soluzioni.....	71
4.3.1.1.1. Tipologia e morfologia.....	73
4.3.1.1.2. Litologia.....	74
4.3.1.1.3. Geometria.....	74
4.3.1.1.4. Stato di rilascio del sito.....	75
4.3.1.1.5. Idrologia.....	75
4.3.1.1.6. Idrogeologia.....	76
4.3.1.1.7. Climatologia.....	76
4.3.1.1.8. Proprietà dell'ammasso e del materiale roccioso.....	76
4.3.1.1.9. Distanza del sito da aree sensibili e da infrastrutture.....	77
4.3.1.1.10. Considerazioni sulla caratterizzazione tecnica.....	77
4.3.1.2. Proprietà del sito.....	78
4.3.1.2.1. Casi di studio.....	79
4.3.1.3. Interesse della Pubblica Amministrazione.....	80
4.3.1.3.1. Casi di studio.....	81
4.3.1.4. Analisi del contesto: selezione dei siti e delle soluzioni realizzabili.....	82
4.3.1.4.1. Contesto Socio – Culturale.....	83
4.3.1.4.2. Contesto Territoriale.....	83
4.3.1.4.3. Contesto Socio – Economico.....	84
4.3.1.5. Molteplicità e diversità delle soluzioni realizzabili.....	84
4.3.1.6. Partecipazione sociale.....	85

4.3.1.7. Sostenibilità ambientale.....	86
4.3.1.7.1.Risorse.....	89
4.3.1.7.2.Inquinamento.....	89
4.3.1.8. Fattibilità economica.....	90
4.3.1.8.1.Analisi del mercato.....	90
4.3.1.8.2.Servizi ed infrastrutture.....	91
4.3.1.8.3.Investimenti.....	91
4.3.2. Sequenza logico – temporale di indagine dei parametri discriminanti.....	92
4.4. Valutazione della sostenibilità ambientale di interventi di riqualificazione di siti degradati.....	94
5. CONCLUSIONI.....	97
5.1. Metodo di indagine e sistema esperto per la previsione ed il controllo delle vibrazioni indotte nel terreno da volate in cava a cielo aperto.....	97
5.2. Procedura di selezione e classificazione di siti degradati e di possibili interventi di riqualificazione	99
Bibliografia.....	101
Articoli scientifici.....	101
Riferimenti tecnici e normativi.....	104

1. PREMESSA

Dall'alba della specie l'uomo ha sfruttato a suo favore le risorse minerali della crosta terrestre, dapprima in maniera passiva (rifugiandosi nelle grotte naturali) e successivamente in maniera attiva (creando lame, corpi contundenti, oggetti di varia utilità e di complessità crescente). Oggi questo sfruttamento è quanto mai diffuso ed indispensabile per la vita quotidiana, poiché tutti gli oggetti di consumo contengono - o richiedono nella loro produzione - materie prime minerali (dal calcare, utilizzato in agricoltura, nell'industria cartiera, farmaceutica, alimentare ed in edilizia, al petrolio, per la produzione di carburanti e materiali plastici).

Queste risorse, non rinnovabili ma sempre più sfruttate da un mondo in continua crescita, **sembrano destinate ad esaurirsi in un tempo più o meno breve**. Salvo poi rivederne la disponibilità a seguito di indagini geognostiche più approfondite, alla luce della scoperta di nuove risorse, alla mercé dei capricci di un mercato finanziario che trasforma dinamicamente le riserve in giacimenti e viceversa.

Contemporaneamente, i **cambiamenti climatici**, insieme ad una crescente e ormai diffusa **sensibilità ambientale**, hanno portato all'adozione di una serie di strumenti tecnologici, metodologici e normativi volti a ridurre l'impatto dell'attività antropica sull'ambiente naturale.

Peraltro, lo sfruttamento delle risorse minerarie produce modificazioni irreversibili sull'ambiente naturale. Non è possibile, difatti, ripristinare le morfologie precedenti l'intervento e solo in alcuni casi è possibile riprodurre l'assetto naturalistico (fauna e vegetazione). Di certo, non è possibile ricreare le condizioni geologiche preesistenti (se avessimo questa capacità, probabilmente non avremmo bisogno di estrarre i minerali dal sottosuolo), e si cercano soluzioni diverse per "riempire" il vuoto lasciato dal minerale estratto.

Il quadro è completato dall'introduzione di norme per la tutela della salute e della sicurezza dei lavoratori e dei cittadini, anch'essi parte dell'ambiente in senso lato. **Il fattore sociale non può essere**, di fatto, trascurato né **sottovalutato nell'analisi complessiva dei costi e dei benefici**.

Il fabbisogno di materia prima e le trasformazioni apportate all'ambiente sottopongono l'industria estrattiva ad interessi e condizioni apparentemente contrastanti: da un lato il soddisfacimento delle richieste del mercato, dall'altro lato la tutela dei beni collettivi (ambiente, salute e sicurezza).

Questo rapporto antagonistico è dovuto, in gran parte, alla scarsa attenzione posta, nel secolo scorso, alla regolamentazione dell'attività mineraria ed alla tutela delle risorse interessate dall'estrazione. **Negli ultimi decenni**, per contro, **si è sviluppata una forte politica di sostenibilità ambientale** che ha sensibilizzato particolarmente gli individui e le istituzioni, ed ha portato alla **promulgazione di norme tecniche finalizzate al controllo dello sfruttamento razionale delle risorse disponibili**.

In questo complesso contesto, che include anche la realizzazione di piani di sviluppo territoriale e l'introduzione di misure di contenimento, mitigazione e protezione per garantire una razionale e sostenibile convivenza dell'uomo con l'ambiente che lo circonda, **diversi Stati sovrani hanno riconosciuto la responsabilità di intervenire rispetto all'attuale situazione di potenziale disequilibrio tra fabbisogni e disponibilità di risorse**, tra danno prodotto e misure di compensazione adottate.

Tale obiettivo può essere perseguito solo attraverso politiche di gestione condivisa delle risorse territoriali e l'adozione di opportuni strumenti normativi ed operativi.

La sensibile modificazione dei luoghi operata dall'attività estrattiva attraverso azioni la cui durata è strettamente legata alla vastità del giacimento, alla capacità di sfruttamento dello stesso ed alle richieste del mercato, produce alterazioni irreversibili e di notevole entità. Pertanto, **è necessario che le aree estrattive dismesse siano destinate** a progetti di utilizzazione differente da quella originaria, con finalità legate **ad una pianificazione territoriale sostenibile**.

In altri termini, **la trasformazione del territorio deve essere vissuta come una necessità ed una risorsa per lo sviluppo del territorio**, inevitabile ed inarrestabile, e non come intervento invasivo e indiscriminato dell'uomo sull'ambiente naturale.

Al fine di stimare il livello di interferenza tra l'attività estrattiva e il sistema ambiente, **è necessario individuare** con buona approssimazione **le conseguenze delle singole azioni poste in essere dall'estrazione delle materie prime minerali**, e prevedere il risultato della sovrapposizione degli effetti.

Il problema della stima degli effetti indotti (positivi o negativi) è molto complesso e **gli strumenti di valutazione attualmente utilizzati consentono una previsione parzialmente oggettiva** dell'impatto prodotto da determinate scelte operative.

I sistemi informativi territoriali (G.I.S.), le immagini satellitari, i metodi multicriterio, le matrici di impatto sono alcuni tra i numerosi strumenti che, utilizzati congiuntamente, possono agevolare il processo decisionale fornendo le informazioni di carattere oggettivo necessarie ad ottenere una previsione appropriata della sovrapposizione degli effetti di fattori di diversa natura.

Gli stessi strumenti consentono di monitorare l'evoluzione dei siti estrattivi rispetto all'assetto territoriale, e di individuare ulteriori riserve e giacimenti.

Il presente documento fornisce contributi innovativi per un diverso approccio culturale e strumentale alla pianificazione delle attività estrattive, con particolare attenzione alla sostenibilità ambientale nella gestione delle georisorse, e **attraverso un approccio multidisciplinare che prevede l'uso di moderni software geospaziali**.

Questo approccio, applicato su scala vasta (ad esempio, in un contesto territoriale nazionale o regionale) permette di ottenere informazioni fondamentali per sviluppare politiche economiche attente e ponderate sulle effettive potenzialità dell'area indagata.

2. INTRODUZIONE

L'ingegneria studia la realtà fisica, semplificandola opportunamente, applicata alla realizzazione di un'opera o a processi di indagine dei fenomeni naturali. Di per sé, dunque, **costituisce un compromesso tra il rigore scientifico della formulazione matematica di un fenomeno fisico e la necessità di riprodurlo nelle applicazioni tecnico-scientifiche**, introducendo fattori correttivi che tengono conto delle incertezze (dovute alla limitata conoscenza del fenomeno nella sua complessità fisico-matematica) e compensano le approssimazioni introdotte.

La possibilità di risolvere una problematica adottando soluzioni tecniche differenti introduce nell'approccio ingegneristico la **variabile finanziaria, elemento di compromesso tra la qualità tecnica della soluzione studiata ed il beneficio economico derivante dalla sua realizzazione**.

Ciò significa che, ad esclusione di quei settori in cui l'eccellenza della soluzione tecnica è una necessità che prescinde dai costi che si devono sostenere per realizzarla, **le scelte che operiamo sono sempre il risultato di una serie di considerazioni e obiettivi multidisciplinari**, di carattere tecnico, economico, sociale ed ambientale.

Nel caso specifico della ricerca presentata in questa Tesi di Dottorato, l'obiettivo prefissato era lo sviluppo di un **nuovo approccio alla progettazione e pianificazione delle attività estrattive**, volto a supportare l'iter decisionale attraverso l'adozione di moderni strumenti informatici e di indagine per la valutazione degli impatti prodotti dall'intervento umano sull'ambiente naturale.

2.1. Struttura del lavoro di ricerca

Lo sviluppo del tema di ricerca ha richiesto, innanzitutto, un'**approfondita indagine bibliografica multidisciplinare**, necessaria a produrre un quadro chiaro ed esaustivo circa lo stato dell'arte in merito agli argomenti trattati. L'indagine ha riguardato:

- la **normativa ambientale e delle attività estrattive** vigenti in Europa ed in Italia;
- gli **approcci e gli strumenti normativi ed operativi** adottati dagli enti locali (Regioni, Province, Comuni) nella pianificazione delle attività estrattive;
- gli **approcci e gli strumenti innovativi** sviluppati a supporto dei processi di pianificazione e progettazione;
- gli **strumenti operativi adottabili per il perseguimento degli obiettivi prefissati**.

La revisione critica del materiale raccolto ha consentito di identificare i limiti degli attuali approcci alla gestione del settore estrattivo ed i possibili ambiti di sviluppo e ricerca.

È stato quindi **definito l'approccio metodologico che si suggerisce di adottare per una corretta gestione delle georisorse ed un efficace tutela ambientale**.

Tale approccio, che paragona la pianificazione alla progettazione, sebbene ad una scala più ampia, introduce nel processo decisionale l'esigenza di **nuovi strumenti per la valutazione degli effetti di determinate azioni antropiche sull'ambiente**, che si verificano in un contesto dinamico ed in continua

evoluzione.

Questa esigenza può essere soddisfatta attraverso l'utilizzo di **strumenti che consentono di raccogliere ed aggiornare rapidamente**, e secondo standard condivisi, **tutti i dati disponibili e necessari al processo pianificatorio o progettuale**, prevenendo il rischio di tralasciare informazioni importanti. A questi strumenti di archiviazione e gestione delle informazioni ne devono essere affiancati altri, dedicati all'elaborazione di nuovi dati sulla base di modelli fisici o approcci olistici (reti neurali, matrici, grafi, ecc).

Lo strumento attraverso cui perseguire questi obiettivi è stato individuato nei **Sistemi Informativi Geografici (Geographical Information System, GIS)** e nei **Sistemi di Gestione degli Archivi Relazionali (Relational Database Management System, RDBMS)**.

In particolare, si è scelto di utilizzare **software liberi e con codice sorgente aperto** (FOSS, Free and Open Source Software), che hanno permesso di raggiungere risultati notevoli grazie alla possibilità di condividere il proprio lavoro con quello svolto da altri, incrementando la produttività e consentendo di colmare eventuali lacune multidisciplinari.

2.1.1. L'amministrazione delle risorse minerarie. Politiche, approcci e strumenti normativi

Con l'aumentare della popolazione, la crescita delle economie e delle attività produttive e la diffusione di una crescente, ancorché necessaria, sensibilità alle tematiche ambientali (paesaggio, acqua, aria, suolo, rifiuti) e della salute umana, è cresciuta anche la complessità degli strumenti normativi, in maniera adeguata alle nuove gerarchie politico-amministrative ed al passo con l'evoluzione della scienza e della tecnica. Questo processo, che vede il **passaggio da un quadro normativo a carattere prevalentemente giuridico ed a scala urbanistica, ad un sistema di norme tecniche, Piani di settore e Regolamenti con valenza a scala territoriale**, non ha escluso il settore estrattivo.

Il **primo**, ed ancora oggi principale, **riferimento normativo in materia di disciplina delle attività estrattive** (cave e miniere) è il **Regio Decreto n. 1443 del 1927**, a cui sono seguiti Decreti del Presidente della Repubblica piuttosto che Ministeriali.

Accantonato il progetto di una regia nazionale (con l'emanazione di una Legge Quadro) su un settore di importanza, a volte, strategica per l'economia nazionale, **lo Stato italiano tra il 1972 ed il 1977 delega** (DPR 14 Gennaio 1972, n. 2, art. 1 e DPR 24 Luglio 1977, n. 616, capo V) **l'amministrazione dell'attività estrattiva alle Regioni**, modificando l'art. 117 della costituzione e, in tal modo, attribuendogli competenze esclusive in materia. Dal 1972 il trasferimento delle competenze è proseguito al punto che il settore, ad oggi, è integralmente gestito a livello regionale.

Le **Regioni maggiormente interessate dall'attività estrattiva** (in termini occupazionali, industriali, ambientali, economici e sociali) sono intervenute prima, emanando le **Leggi Regionali tra la fine degli anni '70 ed i primi anni '80**. Altre, per motivi legati a specifiche problematiche locali, sono intervenute successivamente, addirittura dopo oltre trent'anni dal DPR 616/77 (è il caso della Calabria, che ha emanato la prima L.R. per la disciplina delle attività estrattive solo nel 2009).

Sebbene nate in tempi e contesti diversi, le varie Leggi Regionali sono accomunate da analoghe finalità, che possiamo riassumere in:

- **razionale sfruttamento delle risorse;**

- tutela ambientale;
- tutela della salute e della sicurezza;
- recupero delle aree degradate dall'attività estrattiva.

Quasi tutte, peraltro, prevedono l'istituzione di apposite commissioni di valutazione delle autorizzazioni richieste, creano osservatori statistici dell'attività di settore e adottano strumenti tecnico - normativi per la pianificazione di dettaglio del settore.

Così, tra Regolamenti, Piani e Norme di Attuazione, **ogni Regione provvede:**

- **ad analizzare** il territorio di specifica competenza, valutandone le potenzialità in termini di risorse, riserve, giacimenti ed attività in essere;
- **ad individuare** le porzioni di territorio in cui può e deve essere sviluppata l'attività estrattiva, nel rispetto degli strumenti normativi gerarchicamente superiori o di pari livello;
- **a definire** le modalità di autorizzazione alla coltivazione, la documentazione da allegare, le sanzioni previste, le misure di compensazione e prevenzione del danno ambientale;
- **a sviluppare** opportuni meccanismi per garantire lo sfruttamento dei giacimenti individuati sul territorio (espropri, concessioni, incentivi).

La differenza principale tra le strategie adottate dalle Regioni italiane risiede nel modo in cui vengono distribuite le competenze sul settore tra le varie Amministrazioni Locali, ovvero:

- **Accentramento:** la disciplina delle attività estrattive, e principalmente le attività di pianificazione e rilascio delle autorizzazioni, è in capo alla Regione, che attribuisce alle Province ed ai Comuni mere funzioni amministrative e di controllo;
- **Coordinamento:** la Regione redige un Piano Regionale che fornisce le linee di indirizzo per una pianificazione di dettaglio in capo alle Province. La gestione delle autorizzazioni è in capo alla Regione in particolari condizioni locali o qualora siano coinvolte più Province;
- **Delega:** tramite la Legge Regionale viene delegata alla Provincia la redazione del Piano di settore. Spesso a questi seguono dei Piani Comunali per una gestione specifica delle attività estrattive. Le Pubbliche Amministrazioni vengono coinvolte gerarchicamente nei casi in cui siano interessate diverse Amministrazioni Locali (più Comuni o più Province).

Ognuno di questi approcci, se opportunamente calato nello specifico contesto territoriale, può condurre ad un'ottimale gestione del territorio in relazione alle sue peculiarità.

Contemporaneamente, la nascita della **Comunità Europea** porta all'emanazione, con obbligo di recepimento da parte degli Stati Membri, di una serie di **Direttive** concernenti, per lo più, la **tutela ambientale** e la **valutazione degli effetti** (ambientali, sociali, economici) **di determinate politiche di pianificazione e gestione del territorio** (Valutazione Ambientale Strategica, Valutazione di Incidenza). A queste si affiancano norme tecniche che tutelano i beni ambientali, culturali e paesaggistici, che disciplinano il settore dei rifiuti, la protezione delle risorse idriche, la tutela della sicurezza nei luoghi di lavoro e altro ancora.

La rapida evoluzione del contesto normativo a tutti i livelli della gerarchia legislativa impone, sovente, una sensibile revisione dei Piani di Settore, se non addirittura delle politiche e delle strategie nazionali e regionali. Nel caso del settore estrattivo, la revisione dei Piani può portare ad una rivalutazione delle

riserve e dei giacimenti insistenti sul territorio, ma anche ad un adeguamento dei requisiti richiesti per lo svolgimento dell'attività estrattiva.

La complessità del sistema normativo e le peculiarità del settore estrattivo inducono ad affermare, pertanto, che **quanto più flessibili ed avanzati sono gli strumenti adottati, tanto più facilmente e rapidamente è possibile adeguarsi alle modificazioni occorse.**

2.1.2. Pianificazione come progettazione multidisciplinare a grande scala

La **pianificazione delle attività estrattive**, la cui ottimizzazione è indagata nel progetto di ricerca, viene concepita, nell'approccio adottato, come **processo di pre-progettazione** a livello di mesoscala. Lo studio è finalizzato alla determinazione del range di valori entro cui i vari parametri considerati (tipici dell'attività estrattiva) realizzano il minimo impatto negativo sull'ambiente circostante. In tal modo, **il Piano delle Attività Estrattive assume la connotazione di un Piano di Settore in forma di "progetto preliminare" già rispettoso della tutela da possibili impatti ambientali di carattere peggiorativo.**

La pianificazione deve tener conto di diversi elementi condizionanti, ovvero:

- le caratteristiche merceologiche del bene minerario;
- il quadro vincolistico;
- la struttura estrattiva regionale (ove per regione si intende un'area geografica e non un contesto amministrativo);
- la fattibilità tecnico-economica di determinati interventi;
- l'impatto ambientale delle scelte operate;
- la sicurezza nei luoghi di lavoro e nel territorio oggetto di indagine.

Affinché un corpo geologico possa essere considerato "giacimento" (nell'accezione mineraria del termine) è necessario che vengano soddisfatte almeno (ma non solo) le condizioni imposte da ognuno degli elementi in elenco.

Il processo decisionale che porta all'**elaborazione di un Piano di Settore** non è diverso, nelle linee generali, dall'iter che bisogna seguire nella progettazione di un'opera di ingegneria. Possiamo individuare le seguenti **fasi operative**:

1. **Inquadramento** e raccolta dati/informazioni (contesto normativo, territoriale, ambientale, sociale, ecc);
2. **Verifica** dati/informazioni, eventuale aggiornamento ed integrazione;
3. **Studio di fattibilità** per diverse alternative di intervento;
4. **Sviluppo** della miglior soluzione dal punto di vista tecnico, economico, ambientale e sociale;
5. **Produzione di elaborati** descrittivi del lavoro svolto e dell'intervento selezionato.

Se pure non fosse imposto dal quadro normativo vigente, l'oggetto stesso di un Piano delle Attività estrattive richiede, in ogni caso, un approccio multidisciplinare che vede il coinvolgimento di specialisti afferenti a diversi settori reciprocamente interagenti.

Nell'individuazione e classificazione dei giacimenti, non tutti i PRAE attualmente in vigore considerano i fattori impattanti tipici dell'attività estrattiva, quali ad esempio:

- acclività dei versanti;
- metodo di coltivazione adottato;
- tecniche di abbattimento, smarino, trasporto utilizzate;
- impatto visivo, atmosferico, acustico prodotto in relazione alle caratteristiche ambientali locali;
- interferenza con la flora e la fauna locali;
- indotto economico e sociale;
- impatto culturale.

L'analisi puntuale di questi fattori è realizzabile compiutamente solo disponendo di una banca dati sufficientemente ampia e dettagliata. Attraverso l'elaborazione di tali dati si può ottenere un Piano che fornisca indicazioni attendibili sulla coltivabilità di una risorsa e le linee guida per la successiva fase di progettazione.

In particolare, **quando ci si occupa di pianificazione del territorio è necessario elaborare dati di varia natura**, per lo più spazialmente e/o geograficamente definiti o altrimenti rappresentabili in forma tabellare, se non come semplice elenco. Questi dati/informazioni sono forniti da soggetti diversi, in formati diversi, **spesso elaborati secondo standard e criteri diversi** (anche quando trattano lo stesso argomento), ma devono essere utilizzati congiuntamente per creare un quadro completo ed omogeneo del territorio oggetto di pianificazione.

2.1.3. Impatto ambientale prodotto dall'attività estrattiva

L'identificazione di procedure e strumenti per lo sfruttamento sostenibile delle risorse minerarie impone un **approccio multidisciplinare**, che richiede di studiare i singoli fattori impattanti e successivamente valutarne l'effetto complessivo.

I **fattori impattanti tipici dell'attività estrattiva** sono:

- **polveri**: prodotte durante l'abbattimento e il trasporto del minerale, possono percorrere grandi distanze in particolari condizioni di ventosità e in assenza di opportuni sistemi di ritenzione e abbattimento;
- **visibilità dei fronti di scavo**: condizionata dalla morfologia dei luoghi, dallo sviluppo della cava (di versante o di pianura) e dal metodo di scavo, produce sicuramente l'impatto più compromettente dal punto di vista sociale;
- **depauperamento della flora e della fauna**: dovute alla scopertura del giacimento, che produce modificazioni all'ecosistema locale;
- **variazione d'uso dell'area d'intervento**: cambiando lo stato dei luoghi possono venire a mancare alcune delle condizioni ambientali preesistenti, e si rende necessaria una restituzione ad uso differente da quello originario;
- **stabilità geomeccanica dei fronti**: l'estrazione mineraria può innescare fenomeni franosi, se non

previsti e controllati;

- **modifica dell'assetto idrogeologico:** modificando le geometrie dei luoghi si interviene sulla regimazione delle acque superficiali e sotterranee;
- **vibrazioni indotte:** dovute alle operazioni di abbattimento, in particolare dalle volate, possono danneggiare edifici ed infrastrutture, oppure innescare movimenti franosi;
- **sovrappressioni in aria;** prodotto dai martelli demolitori o dalle volate, danneggia sia la fauna locale che gli abitanti delle zone limitrofe. Lo spostamento d'aria provocato dalle volate produce danni a cose, persone e animali, se non controllato;
- **rumore;** generato dai mezzi d'opera e dalle volate, produce un disturbo da caratterizzare e limitare in relazione al contesto locale ed alle norme vigenti.

In linea di principio si può pensare, a partire dai modelli concettuali validi per ciascun fattore impattante, di discretizzarne le equazioni di stato e produrre un modello matematico da implementare nel sistema informativo geografico adottato.

Come già accennato, solo alcuni fattori impattanti sono stati oggetto di studio nell'ambito del progetto di ricerca. In particolare, ci si è dedicati:

- ai modelli concettuali che rappresentano la diffusione del rumore in ambiente esterno, che in generale sono del tipo:

$$L_p = L_w + D_I - A_d - A_a - A_g - A_b - A_n - A_v - A_s - A_h$$

dove:

L_p = livello sonoro nella posizione del ricevitore;

L_w = livello di potenza sonora della sorgente;

D_I = indice di direttività della sorgente;

A_d = attenuazione per divergenza geometrica;

A_a = attenuazione per assorbimento atmosferico;

A_g = attenuazione per effetto del suolo;

A_b = attenuazione per diffrazione da parte di ostacoli;

A_n = attenuazione per effetto di variazioni dei gradienti verticali di temperatura e di velocità e della turbolenza atmosferica;

A_v = attenuazione per attraversamento di vegetazione;

A_s = attenuazione per attraversamento di siti industriali;

A_h = attenuazione per attraversamento di siti residenziali.

- ai fattori che condizionano la percezione dell'antropizzazione del paesaggio, ovvero:
 - visibilità del fronte di cava, in termini di;
 - occupazione percentuale del campo visivo da parte dell'oggetto d'interesse;

- contrasto cromatico tra oggetto d'interesse ed elementi del contorno;
- effetto delle condizioni atmosferiche e del livello di illuminazione naturale sulla visibilità del paesaggio;
- distribuzione delle pendenze locali;
- interventi di recupero realizzabili.
- ai parametri da considerare per determinare le pendenze ottimali da conferire ai versanti, ovvero:
 - condizioni di stabilità geomeccanica del versante roccioso;
 - visibilità del fronte di cava;
 - distribuzione delle pendenze locali;
 - interventi di recupero realizzabili.
- ai modelli che descrivono la propagazione delle vibrazioni nel terreno ed i fattori che condizionano il fenomeno;
- ai modelli che descrivono la propagazione della pressione sonora in atmosfera.

Di questi, saranno presentati i risultati ottenuti per la minimizzazione del danno prodotto dalla propagazione delle vibrazioni indotte nel terreno.

2.1.4. Strumenti disponibili per la ricerca nel settore delle georisorse

Gli **strumenti di valutazione degli impatti** attualmente utilizzati forniscono informazioni incomplete (puntuali ma con copertura limitata, quando si applicano leggi di rappresentazione dei fenomeni fisici) e semi - oggettive (nell'applicazione delle matrici e delle check list). Ciò non significa che tali strumenti siano inadeguati, ma semplicemente che sono utilizzati in maniera inefficiente perché se ne sfruttano solo in parte le potenzialità.

I **sistemi informativi geografici**, ad esempio, sono sovente utilizzati per la creazione e sovrapposizione di mappe: ciò consente di valutare congiuntamente diversi vincoli cartografabili, e di ottenere importanti informazioni. Per valutare l'interferenza tra i fattori impattanti ed i vincoli identificati è necessario implementare le leggi di rappresentazione dei fenomeni indagati all'interno del GIS, incrementandone sensibilmente l'efficienza e fornendo informazioni puntuali anche su aree vaste. In tal modo è possibile rappresentare cartograficamente i parametri di interesse e valutare rapidamente gli effetti prodotti da eventuali interventi di mitigazione. Dunque, non è necessario sviluppare un nuovo strumento, ma utilizzare in maniera efficiente quelli esistenti.

Un discorso analogo può esser fatto per gli approcci matriciali, nel caso specifico per la **matrice A.E.V.I.A.** (Attività Estrattive Valutazione di Impatto Ambientale, Ballestrazzi, 1996): sviluppata negli anni '80 per valutare l'impatto prodotto dall'attività estrattiva sull'ambiente, è costituita da 12 azioni tipiche dell'industria mineraria e da 41 caratteristiche ambientali. L'impatto di ogni azione sulle singole caratteristiche viene valutato tramite un "livello di interferenza" che assume valori pari a 0, 1, 2 e 4 a secondo dell'intensità. Il "livello unitario di interferenza" consente di definire il peso della generica

azione nel complesso, e la “magnitudo” delle singole azioni viene calcolata in funzione della loro entità secondo apposite tabelle. La combinazione dei suddetti parametri in ingresso consente di ottenere la matrice degli impatti, il cui risultato è un indice di impatto globale.

Affinché tale strumento abbia valore perlomeno semi oggettivo, deve essere compilata per diverse alternative progettuali da mettere a confronto con una soluzione di riferimento (solitamente l'opzione zero, ovvero il non intervento), che diventa il riferimento relativo per l'assegnazione del grado di interferenza.

I maggiori pregi della matrice A.E.V.I.A. sono la sua semplicità di utilizzo e la rapidità di compilazione, una volta noti i dati di progetto delle varie soluzioni prospettate. Nonostante ciò, questo strumento è passibile di ulteriori modifiche finalizzate ad incrementarne l'affidabilità ed a renderne più oggettivi i risultati.

Tra gli altri strumenti di analisi a disposizione, le **immagini satellitari**, oggi sempre più dettagliate, costituiscono un valido supporto per ottenere informazioni di varia natura, ad esempio, sui corpi geologici affioranti; sfruttando le differenti tecniche di rilevamento (spettro della luce visibile e dell'infrarosso, elaborazioni da radiotelescopi, immagini termiche, ecc.) è possibile utilizzare diverse proprietà nel riconoscimento dei corpi mineralizzati, spesso non individuabili e/o raggiungibili da terra. Le stesse immagini, opportunamente interpretate, possono consentire il monitoraggio del territorio e l'identificazione delle modificazioni occorse in tempi relativamente brevi.

Uno strumento ancora insufficientemente utilizzato nei processi decisionali è l'**analisi multicriterio**, che consente di ottimizzare le scelte operative considerando differenti criteri di valutazione, dettati dalla diversa natura dei fattori condizionanti. Ovviamente, il risultato di tale analisi non è la miglior soluzione rispetto ai singoli criteri considerati, ma la miglior soluzione di compromesso in riferimento alla totalità ed all'importanza attribuita ai fattori indagati. Anche in questo caso, al fine di ottenere un risultato soddisfacente, è necessario conferire obiettività al metodo e scegliere oculatamente gli indicatori.

2.1.4.1. Sistemi Informativi Geografici per le attività estrattive

I GIS rappresentano oggi uno degli strumenti più potenti a disposizione di progettisti e pianificatori. Solo in alcuni casi vengono utilizzati al massimo delle loro potenzialità, ed il loro utilizzo è ancora insufficientemente diffuso e limitato prevalentemente alla produzione cartografica di base.

Se utilizzato correttamente ed intensivamente, **un software GIS può inglobare grandi quantità di informazioni di varia natura e fornire valutazioni oggettive in tempi rapidi**. Rapidità di elaborazione che consente, peraltro, di confrontare un gran numero di possibili scenari, e di variare i fattori condizionanti a secondo delle necessità e degli obiettivi da perseguire, migliorando la qualità delle indagini condotte.

La simulazione della realtà, dunque, è una delle possibili strade per perseguire corrette politiche di sostenibilità ambientale (come imposto dalle norme della Comunità Europea, che procede verso le Valutazioni Integrate - VIA + IPPC - e la riduzione degli sprechi).

All'inizio degli anni '80 alcuni ricercatori e docenti universitari (Piga et al, 1987) svilupparono pionieristicamente i **primi Sistemi Informativi Territoriali per la pianificazione delle attività estrattive**. Nonostante i limiti tecnologici dell'epoca, la struttura del sistema prevedeva:

- la **realizzazione di una banca dati** finalizzata a raccogliere in maniera **omogenea** informazioni

frammentarie e diffuse;

- l'utilizzo di **mappe tematiche** in formato raster per la rappresentazione delle informazioni spaziali;
- l'utilizzo di **tabelle descrittive** per i parametri non rappresentabili geometricamente.

Una serie di **funzionalità appositamente sviluppate** consentiva di elaborare i dati disponibili ed ottenere carte tematiche relative, ad esempio, alla compatibilità tra attività estrattiva e vincoli vigenti, oppure carte della coltivabilità in relazione alle caratteristiche di un prodotto/territorio e delle corrispondenti richieste del mercato.

Già all'epoca, dunque, i **GIS** erano stati identificati quali **strumenti ottimali per la gestione dei dati e lo sviluppo di nuove procedure e strumenti di pianificazione**. I limiti culturali, oltre che tecnologici, non hanno fermato la diffusione dei GIS nel settore estrattivo; negli anni '90, infatti, altre Regioni (Puglia, Sardegna e Campania) li hanno adottati per lo sviluppo dei rispettivi Piani delle Attività Estrattive.

Ad oggi, la maggior parte delle Pubbliche Amministrazioni (in prevalenza le strutture regionali e provinciali) dispone di un sistema informativo territoriale, sebbene con notevoli differenze in termini di quantità e qualità delle informazioni raccolte e diffuse.

2.1.4.2. Free and Open Source Software

Gli strumenti adottati per lo sviluppo del lavoro di ricerca sono frutto di una scelta filosofica e qualitativa. **Il carattere innovativo, tipico di un lavoro di ricerca, può portare, anche in breve tempo, ad individuare i limiti di un prodotto apparentemente in grado di soddisfare le nostre esigenze**. Quando ciò accade, le **soluzioni** possibili sono:

- **l'abbandono dello strumento**, ed in parte dell'approccio al problema da risolvere;
- **la ricerca di una soluzione alternativa**, magari più ostica, che consenta di proseguire il lavoro senza abbandonare l'approccio e gli obiettivi fissati;
- **lo sviluppo di un nuovo prodotto** che soddisfi le nostre esigenze specifiche, ma con un notevole impegno in termini di acquisizione di competenze specifiche e di tempo dedicato.

Nel caso specifico, si è scelto di adottare la seconda soluzione, grazie alla disponibilità di strumenti, dalle notevoli potenzialità, che consentono di partire dai risultati conseguiti da altri ricercatori per perseguire ulteriori miglioramenti da condividere, a propria volta, con gli altri utilizzatori. È questa la filosofia con cui sono nati e si sono diffusi i **Free and Open Source Software (FOSS)**, caratterizzati dalla possibilità di accedere al codice sorgente (open source) e dalla libertà di modificarlo sotto la propria responsabilità (free).

Questo modo di condividere i prodotti dell'intelletto **consente di moltiplicarne in maniera esponenziale l'applicazione e la diffusione a tutti i campi della conoscenza umana**, riducendo la produzione di prodotti analoghi ed accelerando incredibilmente i tempi di sviluppo e la diffusione dell'innovazione.

Questa filosofia è stata abbracciata interamente nel percorso di ricerca affrontato, ed i risultati perseguiti giustificano la scelta operata.

A seguito di un approfondito studio sui FOS GIS (Free and Open Source Geographic Information

Systems), è stato scelto GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) come GIS in cui implementare i modelli concettuali rappresentativi delle azioni tipiche dell'attività estrattiva. GRASS (Neteler e Mitasova, 2007) è, attualmente, il più avanzato FOS GIS disponibile (oltre 400 operazioni disponibili, analisi dati raster 2d e 3d, vettoriali, analisi d'immagine), e il suo utilizzo prevalente è nel campo della ricerca. L'accesso al codice sorgente, insieme alla possibilità di modificarlo implementando nuove funzioni, rendono il software particolarmente adatto all'obiettivo che si vuole raggiungere nell'ambito di questo tema di ricerca.

2.1.5. Sviluppo tecnologico ed applicazioni innovative

I notevoli progressi della tecnologia informatica occorsi negli ultimi 20 anni hanno migliorato sensibilmente le potenzialità degli hardware che, a loro volta, hanno consentito lo sviluppo di software sempre più complessi ed in grado di gestire grandi moli di dati. La diffusione di questi strumenti è oggi tale che potremmo paragonare i GIS (per evoluzione, utilità ed applicazioni) ai software di progettazione assistita da computer (CAD).

Il contributo dei GIS ai processi decisionali (pianificazione, progettazione, valutazione) è indiscutibile, ed è confermato dall'adozione (da parte, ad esempio, della Comunità Europea), di protocolli standard ed infrastrutture (Direttiva INSPIRE) per la produzione e condivisione dei dati spaziali.

Uno degli aspetti più importanti di questi software è la loro estrema flessibilità, che ne consente l'integrazione con i principali codici di calcolo specialistici. In tal modo, il GIS diventa l'interfaccia ideale tra l'acquisizione, visualizzazione e gestione dei dati e la loro elaborazione esperta.

Inoltre, l'uso quotidiano dei computer e della rete internet ha portato, negli ultimi anni, allo sviluppo di strumenti per l'utilizzo di questi strumenti direttamente sul web, sfruttando architetture server/client ottimizzate per gli archivi relazionali di dati geografici.

In questo contesto tecnologico la pianificazione del settore estrattivo (come per molti altri settori) dimostra un uso ancora elementare degli strumenti a disposizione, sebbene già nei primi anni '80 fosse stata identificata, quale risultato eccellente, la possibilità di automatizzare le procedure di analisi del territorio e selezione delle aree estrattive attraverso un sistema esperto.

Ad oggi, infatti, i webGIS realizzati dalle Pubbliche Amministrazioni consentono di visualizzare e scaricare i dati presenti nei geodatabase, ma demandano all'utente l'elaborazione dei dati richiesti per l'ottenimento di autorizzazioni ed altre istanze. Ciononostante, operazioni particolarmente complesse potrebbero essere facilmente implementate nei webGIS con un maggior controllo da parte della Pubblica Amministrazione ed una semplificazione per gli utenti (Federici, 2010).

Sulla base di queste osservazioni, e grazie ad una conoscenza approfondita delle problematiche tipiche del settore estrattivo, sono stati sviluppati, nell'ambito del Dottorato di Ricerca, una serie di strumenti innovativi finalizzati principalmente:

- a supportare gli iter decisionali per la **riqualificazione dei siti degradati dall'attività estrattiva**, attraverso una procedura per l'individuazione e classificazione dei siti degradati e per la selezione delle migliori soluzioni di recupero;
- a valutare gli **effetti di determinate azioni antropiche**, tipiche dell'attività estrattiva, **sull'ambiente circostante**, attraverso l'implementazione di modelli fisici e dati sperimentali in un GIS.

I risultati conseguiti consentono di valutare positivamente l'utilizzo esperto dei software di analisi geospaziale (principalmente GIS e RDBMS), e giustificano il proseguimento della ricerca per la rappresentazione degli altri fattori impattanti.

3. VIBRAZIONI INDOTTE DA VOLATE

3.1. Introduzione

Tra le tecniche di abbattimento utilizzate nell'estrazione mineraria, in presenza di ammassi rocciosi costituiti da materiale competente¹, ci si può trovare a dover scegliere tra l'utilizzo del martello demolitore o della tecnica di perforazione e sparo (Drill and Blast, D&B).

Ambedue le tecniche sono basate sul rilascio di energia a seguito di fenomeni impulsivi, con conseguente generazione di un'onda di pressione che si propaga nel mezzo roccioso. La rottura, ovvero la frantumazione, si ottiene quando le sollecitazioni indotte superano i valori di resistenza a trazione della roccia attraversata.

La propagazione dell'onda diretta genera rottura in direzione radiale (Figura 1), non sufficiente ad ottenere materiale frantumato (a meno della pre-esistenza di un intenso stato di fratturazione dell'ammasso roccioso). In presenza di una superficie libera, ovvero di una discontinuità dell'impedenza acustica (ad esempio il passaggio roccia/aria), la riflessione dell'onda produce ulteriori sollecitazioni e, quindi, rottura del materiale roccioso in direzione circolare (rispetto alla sorgente). L'azione combinata dell'onda diretta e dell'onda riflessa permette l'effettiva frantumazione del materiale in banco. Ciò comporta, in particolare per la tecnica D&B, un'attenta stima della quantità di energia che deve essere rilasciata dalla sorgente in relazione alla distanza dalla superficie libera ed alle caratteristiche del mezzo roccioso, affinché sia garantita la generazione dell'onda riflessa e la frantumazione del materiale.

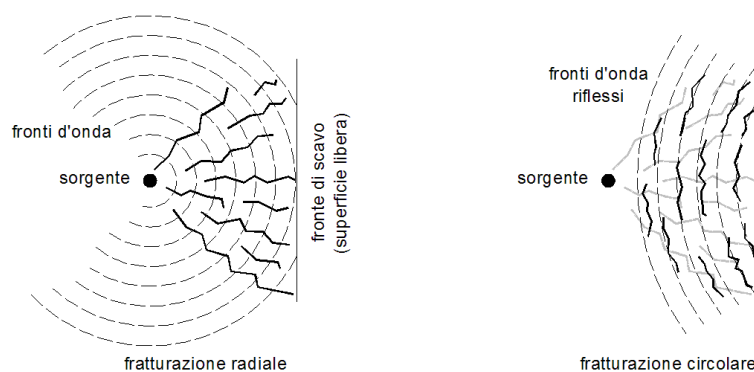


Figura 1: Perforazione e sparo (D&B). Schema generale del principio di frantumazione. La sollecitazione a trazione esercitata dalle onde S produce fratture radiali (a sinistra). La successiva riflessione delle onde P sulla superficie libera esercita una nuova sollecitazione che provoca fratturazione circolare.

Le due tecniche di abbattimento non sono esenti da effetti collaterali, risultanti dalla propagazione dell'onda di pressione, ovvero:

- emissione di polveri;
- emissione di rumore;
- lancio di materiale;

¹ Rocca dura con comportamento fragile, caratterizzata da elevata resistenza e rigidità.

- produzione di sovrappressioni in aria;
- propagazione di vibrazioni indotte nel terreno.

La quantità di energia rilasciata dall'evento impulsivo nel caso del martello demolitore è diversi ordini di grandezza inferiore rispetto a quella rilasciata dalla tecnica D&B, ed è direttamente proporzionale alla quantità di materiale frantumato. Pertanto, questa tecnica di abbattimento prevede la ripetizione di più eventi impulsivi per frantumare piccole porzioni di ammasso roccioso fino a raggiungere il volume previsto dal piano di produzione (sulla base di un'accurata progettazione e pianificazione dell'intervento).

La tecnica D&B, a fronte di una serie di operazioni preparatorie (perforazione, caricamento, collegamento delle mine e sparo) che possono richiedere diversi giorni di lavoro, consente di abbattere, con un numero esiguo di eventi impulsivi che si susseguono ad intervalli di pochi millisecondi, volumi di roccia sensibilmente più elevati, sempre compatibilmente con il piano di produzione.

L'effetto collaterale di maggior entità conseguente all'uso di martelli demolitori in siti estrattivi a cielo aperto è l'emissione sonora impulsiva, ripetitiva e prolungata nel tempo (che può propagarsi anche a distanze considerevoli in campo aperto ed in presenza di particolari condizioni atmosferiche, e producendo un disturbo psico-fisico), mentre il lancio di materiale, le sovrappressioni in aria e le vibrazioni indotte nel terreno sono limitate all'intorno dell'area di lavoro.

Nella tecnica D&B, invece, assumono importanza rilevante la sovrappressione generata in atmosfera (che si può propagare ben oltre i limiti dell'area estrattiva, provocando danni a cose e persone), la vibrazione indotta nel terreno (che può produrre danni anche considerevoli alle strutture circostanti) ed il lancio di materiale (che può raggiungere distanze anche di centinaia di metri, con elevato pericolo per strutture e persone). Le sovrappressioni in aria ed il lancio di materiale sono principalmente dovuti all'espansione dei gas rilasciati dalla reazione chimica innescata dall'esplosione.

Delle due tecniche di abbattimento si approfondirà quella del D&B, che dà luogo a fenomeni di disturbo di maggior intensità e, pertanto, soggetti a particolari procedure di verifica e controllo per prevenire danni a persone e strutture.

In questo capitolo sarà affrontato lo studio delle vibrazioni indotte nel terreno da volate in cava a cielo aperto, con particolare attenzione ai fattori che condizionano il fenomeno, alle leggi di rappresentazione elaborate ed ai metodi di monitoraggio.

Nei sottocapitoli che seguono si forniranno al lettore le informazioni necessarie per un corretto inquadramento:

- dei fondamenti teorici del fenomeno e della tecnica di abbattimento indagati;
- delle ricerche scientifiche condotte in merito al controllo ed alla rappresentazione del fenomeno nonché alla corretta progettazione delle volate di produzione;
- della normativa che definisce i criteri di prevenzione del danno arrecato a strutture e persone.

A partire dai risultati conseguiti da diversi ricercatori nell'analisi dei vari aspetti che caratterizzano la propagazione delle vibrazioni indotte da volata, è stato sviluppato, e ne sarà fornita ampia descrizione,

un sistema esperto per l'ottimizzazione delle volate ed il controllo delle vibrazioni, basato su:

- l'utilizzo di misure strumentali per la caratterizzazione del fenomeno in relazione al sito indagato;
- la creazione di un database cartografico a supporto della pianificazione, progettazione e realizzazione delle volate di abbattimento;
- la creazione di un database specialistico contenente informazioni su:
 - le caratteristiche dei mezzi di propagazione;
 - i parametri del progetto di volata;
 - le caratteristiche territoriali;
 - le caratteristiche delle strutture sensibili;
 - la distribuzione e le caratteristiche del sistema di monitoraggio;
- l'utilizzo di un GIS per la visualizzazione, l'analisi dei dati acquisiti e la creazione di mappe tematiche a supporto della progettazione delle volate di abbattimento e della minimizzazione dell'impatto prodotto dai fenomeni vibratorii ad esse riconducibili.

La riproduzione e l'analisi previsionale del fenomeno attraverso il sistema esperto sono basati sull'implementazione di buone pratiche e modelli di rappresentazione del fenomeno (leggi di propagazione, fattori di attenuazione o amplificazione, effetto del confinamento della carica, frequenza di risonanza delle strutture) nel GIS e nel database specialistico.

L'approccio tramite l'utilizzo esperto dei GIS, oltre a rappresentare un'innovazione nello studio del fenomeno, contribuisce in maniera sensibile a migliorare la previsione degli impatti prodotti dall'attività estrattiva, incidendo direttamente sulla mitigazione degli effetti psico - fisici e dei danni materiali. Risultati a cui si perviene migliorando sensibilmente la capacità di monitorare le vibrazioni indotte e di aggiornare rapidamente i parametri di coltivazione.

3.2. Stato dell'arte

Per la trattazione teorica approfondita della propagazione delle onde nei mezzi solidi e della progettazione delle volate di abbattimento in siti estrattivi a cielo aperto, di cui nel seguito si forniranno i riferimenti essenziali per la lettura del documento, si rimanda il lettore alla letteratura specialistica riguardante i due argomenti.

3.2.1. Fondamenti teorici

3.2.1.1. Fenomeno ondulatorio e caratteristiche della vibrazione indotta in superficie

Il rilascio di energia da una sorgente (di origine naturale o antropica) a seguito di un evento impulsivo (di qualsiasi entità) produce una perturbazione elastica che si propaga da punto a punto nel materiale attraversato, provocando uno spostamento delle particelle elementari che compongono il mezzo. Nel caso dei materiali rocciosi, la sollecitazione produce principalmente deformazioni elastiche. Tranne che nelle immediate vicinanze della sorgente sismica, una volta dissipata l'energia della perturbazione le particelle del mezzo di propagazione tornano nella posizione di partenza.

In funzione di come percorrono il materiale attraversato, le onde sismiche si distinguono in:

- onde di volume (P ed S, Figura 2);
- onde superficiali (di Rayleigh e di Love, Figura 3).

Le onde di volume si propagano dalla sorgente sismica, attraverso il volume del mezzo interessato, in tutte le direzioni. Le onde P corrispondono a compressioni e rarefazioni del mezzo in cui viaggiano; al loro passaggio le particelle del materiale attraversato compiono un moto oscillatorio nella direzione di propagazione dell'onda. La velocità di propagazione delle onde P è espressa dalla seguente formula:

$$V_P = \sqrt{\frac{k + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (3.1)$$

dove:

k = modulo di incompressibilità del materiale;

μ = modulo di rigidità del materiale;

ρ = densità del materiale.

Le onde S provocano nel materiale attraversato oscillazioni perpendicolari alla loro direzione di propagazione, e non possono propagarsi in mezzi fluidi (che hanno modulo di rigidità nullo). La velocità di propagazione è data dalla formula:

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (3.2)$$

Nel caso delle vibrazioni indotte nel terreno da volate in cava a cielo aperto la sorgente è molto vicina alla superficie, ed il fenomeno è caratterizzato principalmente dalla propagazione delle onde superficiali.

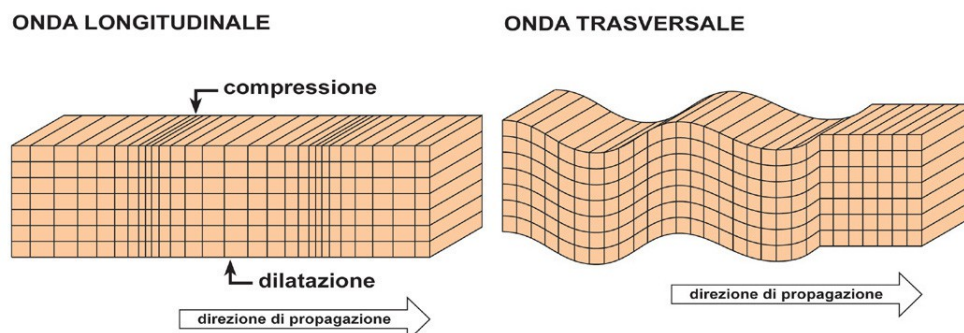


Figura 2 - Propagazione delle onde di volume longitudinali (onde P) e trasversali (onde S) (fonte: INGV, <http://www.ingv.it/.../photo.2010-04-30.5567012182/view>)

Le onde superficiali sono generate dalle onde di volume quando queste incontrano una discontinuità dell'impedenza acustica, e si propagano sulla superficie del mezzo perturbato (nel nostro caso roccia o terreno). La loro velocità di propagazione è inferiore a quella delle onde P ed S, ma mentre queste si attenuano in maniera inversamente proporzionale al quadrato della distanza percorsa, le onde superficiali si attenuano in maniera inversamente proporzionale alla distanza percorsa.

Quando un'onda S ed un'onda P incidono sulla superficie libera (discontinuità dell'impedenza acustica, nel caso specifico interfaccia roccia/aria) vengono in parte riflesse ed in parte si compongono vettorialmente, generando un'onda che si propaga sulla superficie stessa, chiamata **onda di Rayleigh**, il cui moto è vincolato in uno spazio verticale contenente la direzione di propagazione dell'onda stessa. La natura disomogenea del/dei mezzo/i attraversati la rendono un'onda dispersa, la cui velocità è funzione della frequenza.

L'incontro delle onde S con la superficie libera genera **onde di Love**, che fanno vibrare il terreno sul piano orizzontale in direzione ortogonale rispetto alla direzione di propagazione dell'onda.

La velocità delle onde di Love è maggiore di quella delle onde S negli strati più superficiali della crosta, ma minore della stessa negli strati più bassi. Poiché si propaga principalmente in mezzi disomogenei, è anch'essa un'onda dispersa.

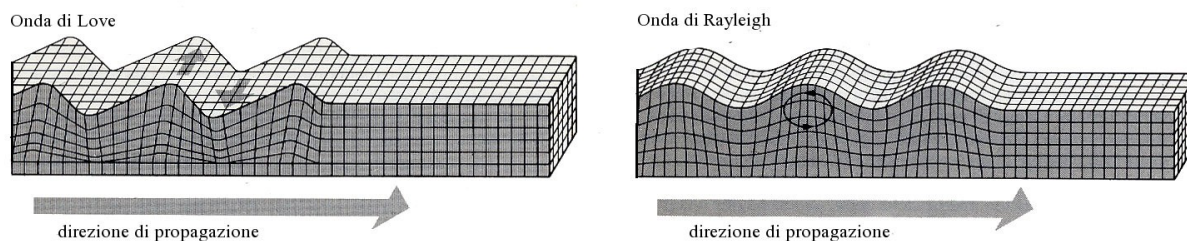


Figura 3 - Onde di superficie. Le onde di Love sono responsabili della componente trasversale del fenomeno vibratorio, le onde di Rayleigh generano le componenti verticali e longitudinali (fonte: INGV, <http://www.ingv.it/ufficio-stampa/.../photo.2008-09-30.8584552487/view>, modificata)

Matematicamente, l'onda è descritta come un fenomeno oscillatorio caratterizzato da (Figura 4):

- ampiezza dell'oscillazione (A);
- periodo di oscillazione (T);
- lunghezza d'onda (λ).

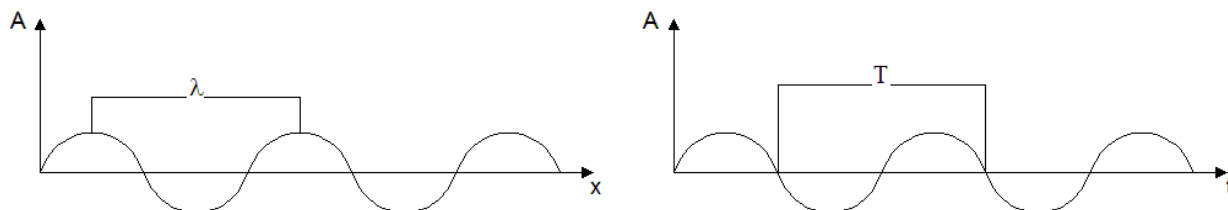


Figura 4 - Rappresentazione generale del fenomeno ondulatorio indisturbato. Propagazione nello spazio (a sinistra) e nel tempo (a destra)

La frequenza, ovvero il numero di oscillazioni nell'unità di tempo ($1/T$), e la velocità di vibrazione delle particelle del mezzo attraversato sono i parametri principalmente utilizzati per caratterizzare il fenomeno ondulatorio nello studio delle vibrazioni indotte nel terreno.

Diversi fattori sono in grado di attenuare o amplificare l'onda, e la sovrapposizione di più eventi rende il fenomeno ondulatorio molto complesso (Figura 5). In generale, l'onda di pressione che si propaga in un mezzo disomogeneo contiene numerose componenti di vibrazione a diverse frequenze; alcune di queste componenti vengono assorbite dal mezzo di propagazione lungo il percorso, altre sono soggette ad amplificazione, principalmente per fenomeni di risonanza o per sovrapposizione di onde riflesse.

Considerando che nella trattazione del fenomeno vibratorio finalizzata alla minimizzazione del disturbo indotto su strutture e persone avremo sempre a che fare con mezzi di propagazione disomogenei, è chiaro che lo studio delle componenti alle varie frequenze assumerà una notevole importanza in relazione alla frequenza di risonanza delle strutture sensibili ed alle frequenze che provocano disturbo psico - fisico nell'individuo.

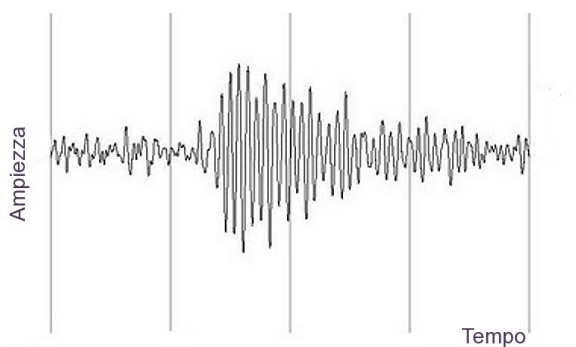


Figura 5 - Propagazione delle onde. Variazione dell'ampiezza in un punto di misura, dovuto al passaggio di componenti a diversa frequenza (fonte: <http://911research.wtc7.net/wtc/analysis/collapses/freefall.html>)

3.2.1.2. Fenomeni di attenuazione o amplificazione del fenomeno vibratorio

Il fenomeno vibratorio superficiale ha geometria tridimensionale, e può essere rappresentato, rispetto alla direzione di propagazione, attraverso una componente trasversale, dovuta alle onde di Love, una verticale ed una longitudinale, dovute al moto ellittico retrogrado delle onde di Rayleigh.

L'attenuazione della vibrazione che si propaga indisturbata sulla superficie del mezzo attraversato è dovuta:

- ad un fattore di dispersione dell'energia secondo l'inverso della distanza percorsa (attenuazione geometrica);
- all'assorbimento di energia da parte del mezzo di propagazione (attenuazione anelastica).

Nella rappresentazione matematica semplificata del fenomeno vibratorio la materia è descritta come distribuita continuamente nello spazio ed omogeneamente lungo le tre dimensioni (mezzo solido continuo). In questo mezzo omogeneo la propagazione segue una legge sinusoidale, descritta da ampiezza, periodo e lunghezza d'onda (Figura 3), e soggetta ai due fattori di attenuazione geometrica ed anelastica.

Nella realtà i materiali rocciosi presentano una notevole disomogeneità (Figura 6), dovuta alla composizione mineralogica, alla tessitura, allo stato di fessurazione ed al grado di alterazione. Inoltre, lungo il percorso di propagazione la vibrazione attraversa diversi materiali (rocce, terreni, terreno unico, materiali artificiali, Figura 7) che ne modificano le caratteristiche.

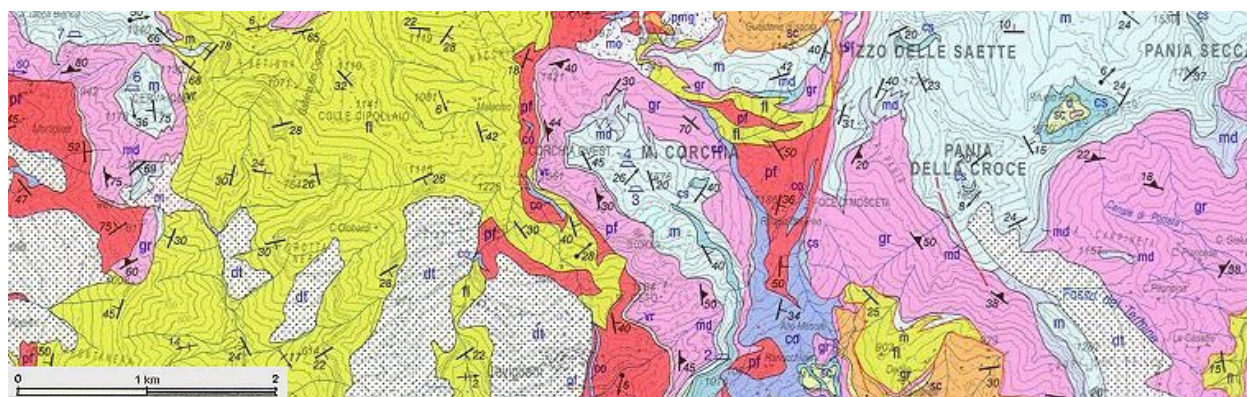


Figura 6 - Carta geologica. La variazione del mezzo di propagazione influisce sulle caratteristiche del fenomeno vibratorio, amplificandolo o attenuandolo (fonte: www.apuanegeopark.it)



Figura 7 - Carta di uso del suolo. La complessità dei materiali che compongono la superficie in cui si propaga la vibrazione complica la rappresentazione generale del fenomeno (fonte: Provincia di Lucca, http://www.provincia.lucca.it/areeprotette/presentazione.htm#CARTA_DELLUSO_DEL_SUOLO, modificata).

La propagazione del fenomeno vibratorio reale generato da una volata di produzione è condizionata:

- dal livello di confinamento della carica;
- dalle proprietà meccaniche dei differenti mezzi di propagazione;
- dalle discontinuità del materiale roccioso;
- dalla frequenza di risonanza dei materiali attraversati.

Non potendo controllare puntualmente tutti questi fattori condizionanti, il controllo e la previsione del fenomeno vibratorio richiedono, pertanto, l'individuazione di una legge di rappresentazione del fenomeno basata su dati sperimentali ed approcci statistici.

È inoltre rilevante, ai fini della corretta misurazione dei parametri descrittivi del fenomeno (ampiezza, velocità o accelerazione e frequenza di oscillazione delle particelle), la progettazione del sistema di acquisizione dei dati, in termini di tipologia e posizionamento del sensore sul terreno e sulla struttura, metodo di fissaggio, accoppiamento sensore-terreno e sensore-struttura (Dowding, 1992, Fabbri, 2007).

3.2.2. Approcci scientifici allo studio del fenomeno

La propagazione delle vibrazioni indotte nel terreno a seguito della detonazione di cariche confinate è oggetto di studio sin dalla prima metà del XX secolo. L'obiettivo delle ricerche e delle indagini sperimentali era la minimizzazione del danno e del disturbo provocati alle strutture circostanti ed alla popolazione locale, contestualmente alla massimizzazione della produzione mineraria, determinando la massima quantità di carica esplodibile istantaneamente.

Sebbene da tempo sia ampiamente condiviso l'utilizzo della velocità massima delle particelle del suolo in prossimità delle strutture al passaggio dell'onda sismica (peak particle velocity, PPV) quale parametro rappresentativo del danno, sono diverse le equazioni predittive espresse da vari autori.

La relazione generale adottata per la previsione della PPV indotta dal fenomeno vibratorio è espressa da una formula statistica sperimentale del tipo:

$$PPV = k \left(\frac{R}{Q^n} \right)^{-\alpha} \quad (3.3)$$

dove:

PPV = peak particle velocity (mm/s)

k = coefficiente rappresentativo delle caratteristiche del mezzo di propagazione

Q = carica esplosa per ritardo (kg)

n = coefficiente rappresentativo del confinamento della carica

R = distanza superficiale effettiva tra sorgente e punto di misura della PPV (m)

α = coefficiente rappresentativo delle caratteristiche del sito

Il termine in parentesi è definito “distanza scalata” (scaled distance, SD). Questa legge di propagazione è divenuta subito popolare per la sua semplicità di applicazione ed anche perché rappresentata in forma logaritmica è esprimibile come equazione di una retta, più facilmente comprensibile della legge di potenza. La formulazione logaritmica della (3.3) è la seguente:

$$\log(PPV) = \log(k) + \alpha \log(SD) \quad (3.4)$$

I coefficienti k ed α vengono determinati per regressione lineare delle coppie di valori (SD, PPV).

Nella maggior parte delle formulazioni elaborate dai diversi autori sulla base della 1.1, il valore di n è considerato costante e varia tra 0,33 ed 1.

I numerosi fattori che condizionano la propagazione del fenomeno vibratorio sono stati oggetto di indagine sin dagli anni '60 (Langefors e Kihlstrom, 1963, Ambrasey e Hendron, 1968, Nicholls, 1971, Bureau of Indian Standard, 1973, Westine, 1978, Siskind 1980, Ghosh e Daemen, 1983, Pal Roy, 1991, Hustrulid e Li, 2003, Ak, 2008) ed inseriti nella formula generale prevalentemente come coefficienti additivi o moltiplicativi, determinati in base a considerazioni relative alle caratteristiche dell'aspetto analizzato.

Nel corso dell'ultimo decennio, l'approccio statistico che ha portato alla formulazione della legge generale è stato rivisto, e sono state sviluppate procedure operative (buone pratiche) per minimizzare l'errore nella determinazione della massima carica esplosibile (Wetherelt, 2003, White, 2003, Kuzu, 2008).

Recentemente è stato proposto un nuovo approccio (Khandelwal e Singh, 2005, 2009, 2010, Monjezi et al., 2011, Dehghani e Ataee-pour, 2011) basato sull'utilizzo delle Reti Neurali Artificiali (Artificial Neural Networks, ANN), sostenuto dalla maggior potenza di calcolo dei computer moderni e dai recenti sviluppi di questa tecnica di risoluzione di problemi complessi.

3.2.2.1. Formulazioni dell'equazione previsionale e criteri di inclusione dei fattori condizionanti

La complessità del fenomeno vibratorio richiede, al fine di realizzare strumenti operativi facili da utilizzare ed i cui risultati siano di immediata comprensione, la ricerca di correlazioni affidabili attraverso l'introduzione di coefficienti rappresentativi di specifici fattori che condizionano la propagazione della vibrazione indotta nel terreno. Tanto più semplice è la loro formulazione quanto maggiore è la loro applicabilità e diffusione.

La legge di previsione della PPV sviluppata negli anni '70 dallo United States Bureau of Mines (USBM), utilizzata ancora oggi nella pratica professionale, assume come valore del coefficiente rappresentativo del confinamento della sorgente $n=1/3$ o $n=1/2$:

$$PPV = k \left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \right)^{-\alpha} \quad \text{per fronte d'onda sferico} \quad (3.5)$$

$$PPV = k \left(\frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^{-\alpha} \quad \text{per fronte d'onda cilindrico} \quad (3.6)$$

Altri autori ed Istituzioni (Tabella 1) hanno adottato valori differenti del coefficiente "n" compresi tra 0.33 e 1, oppure ne hanno determinato il valore tramite regressione multipla (Wetherelt, 2003).

Autore	Formula
USBM ed Ambrasey-Hendron (fronte sferico)	$PPV = k \left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \right)^{-\alpha}$
USBM (fronte cilindrico)	$PPV = k \left(\frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^{-\alpha}$
Langefors-Kihlstrom	$PPV = k \left(\sqrt{\frac{R^3}{Q}} \right)^{-\alpha}$
Equazione generale	$PPV = k \left(\frac{R}{Q^n} \right)^{-\alpha}$
Bureau of Indian Standard	$PPV = k \left(\frac{\sqrt[3]{R^2}}{Q} \right)^{-\alpha}$
Ghosh-Daemen (fronte sferico)	$PPV = k \left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \right)^{-\alpha} \cdot e^{-pD}$
Ghosh-Daemen (fronte cilindrico)	$PPV = k \left(\frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^{-\alpha} \cdot e^{-pD}$
CMRS (Pal Roy)	$PPV = n + k \left(\frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^{-1}$

Tabella 1 - Principali equazioni predittive della PPV. Le formule di Ghosh e Daemen e del CMRS (Central Mining Research Station) saranno riesaminate nel capitolo 3.2.2.1.2.

3.2.2.1.1. Progettazione della volata

La progettazione ottimale della volata nella tecnica di abbattimento per D&B è finalizzata al conseguimento dei seguenti obiettivi:

- frantumazione del materiale secondo una pezzatura (dimensione dei blocchi di roccia) media vincolata dai processi di valorizzazione del minerale e dai prodotti merceologici che si intende commercializzare;
- massimizzazione del volume di roccia abbattuta per volata, a fronte della minimizzazione del numero di fori realizzati e della quantità di esplosivo utilizzato;
- minimizzazione degli effetti collaterali.

Il soddisfacimento di queste tre condizioni non è di facile attuazione, pertanto la soluzione sarà caratterizzata dall'adozione di valori di compromesso che soddisfino il requisito più restrittivo, che in molti casi è la minimizzazione degli effetti collaterali.

Il confinamento della sorgente impulsiva dell'onda di pressione ha notevole importanza nel controllo delle vibrazioni indotte nel terreno (Siskind et al, 1980), poiché influisce sulla quantità di energia che raggiunge la superficie e si propaga fino alle strutture sensibili. Inoltre, si traduce in un efficientamento del progetto di volata, poiché tutta l'energia non dispersa nella generazione degli effetti collaterali è impiegata nella frantumazione, obiettivo principale dell'intervento.

La riduzione dell'energia dell'onda di pressione avviene per assorbimento da parte del materiale e per attenuazione geometrica. Per massimizzare l'incidenza di questi due meccanismi è necessario intervenire (Figura 8):

- sulla distanza della carica dalla superficie libera (spalla);
- sulla distanza tra le cariche (interasse tra i fori);
- sulla lunghezza ed il materiale utilizzato per riempire la parte di foro oltre la colonna di esplosivo (borraggio);
- sulla lunghezza del foro al di sotto del piede del fronte (sottoperforazione);
- sulla carica specifica (kg di esplosivo/m di foro) attraverso il diametro del foro;
- sull'energia specifica rilasciata dall'esplosivo;
- sulla posizione della carica di innesco (a fondo foro o in testa alla colonna di esplosivo);
- sull'intervallo di tempo tra l'innesco di una carica e la successiva (ritardo);
- sulla differenza tra il diametro del foro e quello della carica (disaccoppiamento).

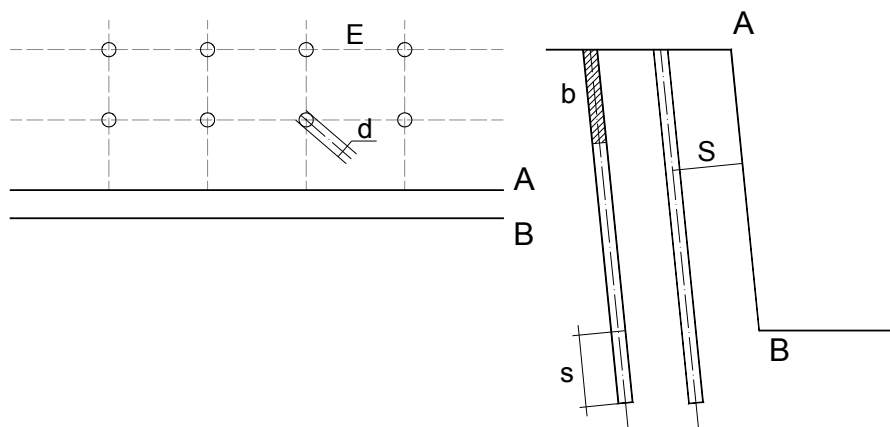


Figura 8: Caratteristiche geometriche generali di una volata a cielo aperto. E = interasse; S = spalla; d = diametro del foro; s = sottoperforazione; b = borraggio.

Tutti questi fattori incidono tanto sulla propagazione dell'onda quanto sui risultati ottenuti dalla volata in termini produttivi. Ciò comporta una limitazione al numero delle loro possibili combinazioni, stante la presenza di vincoli imposti dagli obiettivi di produzione (volumi, pezzatura, costi) e di prevenzione (controllo della PPV e della frequenza del fenomeno vibratorio).

Diversi studi e ricerche hanno messo in evidenza il contributo del confinamento della carica e dei parametri specifici delle volate. Un importante documento, a cui fanno riferimento diversi autori ancora oggi, è il Report of Investigation 8507 (RI8507) dell'USBM, condotto da Siskind, Stagg, Kopp e Dowding nel 1980. Attraverso l'analisi di una grande quantità di dati rilevati in diverse miniere, cave e cantieri civili, in questo rapporto vengono forniti importanti elementi per lo studio del fenomeno. In particolare, si evidenzia la necessità di approfondire l'influenza della volata.

Tale ipotesi viene confermata (RI9226, Siskind et al., 1989) dall'analisi delle misure di PPV effettuate in 6 miniere di carbone. Dal confronto dei nuovi dati con quelli del RI8507 (Figura 9) risulta:

- che i valori di PPV misurati per SD relative a volate a singolo foro/singola carica si trovano al di sotto della linea dei valori medi rilevati dal RI8507;
- che i valori di PPV misurati per SD relative a volate di produzione si collocano in prossimità della linea di inviluppo dei valori massimi rilevati dal RI8507, e prevalentemente al di sopra dei valori medi;
- che a parità di carica esplosa, volate di produzione con microritardi producono valori di PPV da 2 a 3 volte superiori a quelli rilevati da volate con singola carica istantanea;
- che a grande distanza dalla sorgente i ritardi influenzano il fenomeno generando elevati valori di PPV.

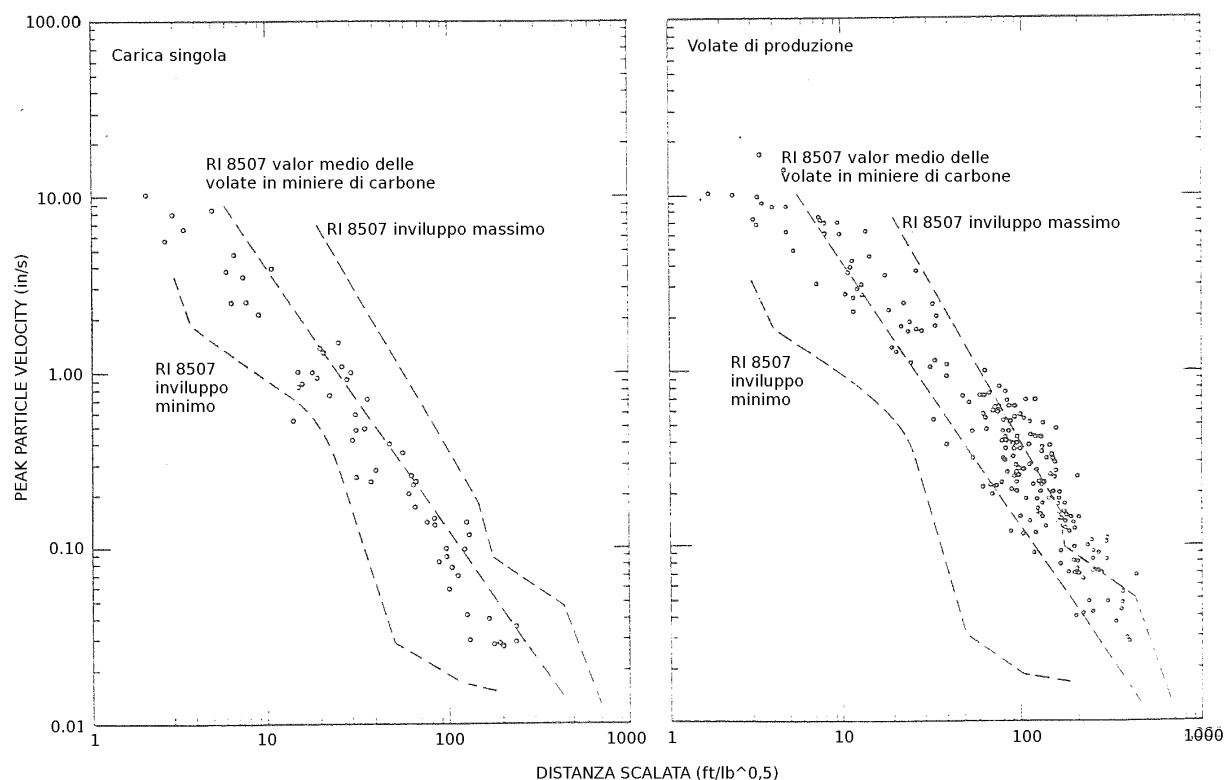


Figura 9 - RI 9226. Confronto dei valori di PPV e SD riscontrati nelle miniere di carbone oggetto di studio con le curve di involucro ottenute nel precedente RI8507 (fonte: USBM, Report of Investigation 9226).

Nel 1991 Taqieddin, Smith e Brinkmann analizzano il fenomeno conducendo test sperimentali a scala ridotta. Riproducono gli effetti di una volata a singolo foro o con tre fori e sparo ritardato variando:

- la posizione della carica d'innesco (a fondo foro o in testa alla colonna di esplosivo);
- la lunghezza del borraggio (10, 12, 18 pollici);
- il diametro del foro (0.5 e 0.75 pollici).

ed analizzano i risultati dei test rilevando quanto segue:

- il confinamento della sorgente influisce sulla composizione della vibrazione indotta, favorendo la componente verticale della PPV rispetto alle componenti trasversale e longitudinale;
- le cariche di innesco in testa alla colonna di esplosivo producono valori maggiori della PPV a parità di SD, in virtù del minor confinamento;
- a parità di diametro del foro, la lunghezza del borraggio incide sensibilmente sulla riduzione della PPV fino ad un valore asintotico;
- con la carica di innesco in testa alla colonna di esplosivo, qualora la velocità di detonazione e quella di propagazione dell'onda si equivalgano si produce un effetto di rinforzo dell'onda di pressione ed un incremento della PPV.

Questi risultati ci permettono di comprendere come, facendo uso di particolari accorgimenti in fase di progettazione della volata, sia possibile prevenire il danno prodotto dalle vibrazioni indotte nel terreno

ed ottimizzare la produzione.

3.2.2.1.2. Caratteristiche del mezzo di propagazione

Tra i fattori che condizionano la propagazione della vibrazione, le caratteristiche meccaniche e le discontinuità del mezzo roccioso assumono particolare importanza. Lo stesso confinamento della carica, oltre che dai parametri geometrici della volata e dal ritardo con cui vengono esplose cariche successive, è condizionato dalle caratteristiche del mezzo di propagazione.

Le rocce assorbono le alte frequenze del fenomeno vibratorio, ma consentono la propagazione, anche a notevole distanza dalla sorgente, delle componenti a bassa frequenza, caratterizzate da elevati valori di lunghezza d'onda ed ampiezza.

L'equazione (3.3) considera le caratteristiche del mezzo roccioso nel coefficiente k . Alcuni autori, però, non ritenendo tale formula sufficientemente rappresentativa del fenomeno fisico, ne hanno postulato versioni alternative introducendo dei fattori di attenuazione additivi o moltiplicativi.

Ghosh e Daemen nel 1983 hanno proposto una nuova formulazione delle equazioni predittive (3.5) ed (3.6) (proposte dal USBM per fronte sferico e cilindrico), introducendo un fattore moltiplicativo esponenziale che considera l'attenuazione anelastica della vibrazione nel mezzo di propagazione:

$$PPV = k \left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \right)^{-\alpha} \cdot e^{-pD} \quad \text{per fronte sferico} \quad (3.7)$$

$$PPV = k \left(\frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^{-\alpha} \cdot e^{-pD} \quad \text{per fronte cilindrico} \quad (3.8)$$

dove “ p ” è il fattore di attenuazione anelastica.

Nel 1991 Pal Roy esegue uno studio comparativo delle equazioni predittive riportate in Tabella 1, utilizzando i dati rilevati in diversi siti estrattivi caratterizzati, in totale, da 8 ammassi rocciosi differenti (calcare, granito, ferro, carbone, dolomite, basalto, arenaria e calcarenite). Dall'analisi dei risultati ottenuti con le diverse equazioni predittive, oltre a suggerire quella che meglio riproduce il fenomeno vibratorio per ognuno dei mezzi di propagazione indagati, elabora una nuova equazione predittiva (CMRS predictor equation) in cui viene introdotto un coefficiente di attenuazione legato alle caratteristiche dell'ammasso roccioso ed alle discontinuità geologiche:

$$PPV = n + k \left(\frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^{-1} \quad (3.9)$$

dove “ n ” è il coefficiente di attenuazione introdotto e “ k ” è relativo ai parametri progettuali della volata.

Hustrulid (2003), dopo un'analisi dei differenti approcci adottati per la previsione della PPV, propone

una nuova formula che la esprime in funzione della pressione generata dall'esplosione, ovvero:

$$PPV = k_w K_n V_0 \left(\frac{Q}{R} \right)^\alpha \quad (3.10)$$

dove:

K_n = numero di fori esplosi per ritardo

k_w = fattore che tiene conto della zona frantumata o plasticizzata intorno alla carica

$V_0 = \frac{P_0}{\rho c c_p}$ = velocità di vibrazione iniziale, funzione della densità della roccia (ρ), della pressione iniziale (P_0) e della velocità di propagazione delle onde P (c_p)

R = distanza effettiva tra sorgente e punto di misura

Sebbene fornisca valori di correlazione con i dati misurati migliori di quelli ottenuti con la formula della SD, questo approccio è valido, come dimostrato dalle applicazioni pratiche riportate dall'autore, solo a breve distanza dalla sorgente.

Un approccio diverso è quello di Westine, che nel 1978 contesta l'approccio statistico generale poiché, a suo avviso, non tiene debitamente conto del fenomeno fisico, ed elabora una relazione empirica non lineare per la previsione della componente radiale della PPV e dello spostamento radiale, utilizzando le misure, comprendenti un vasto range di valori di distanza scalata (9 ordini di grandezza), effettuate a seguito di detonazioni chimiche e nucleari.

Tale formulazione prevede l'inserimento di un termine di impedenza, determinato a partire da osservazioni empiriche, che tiene conto delle proprietà del mezzo di propagazione. Le formule proposte da Westine per sorgenti puntuali sono:

$$\frac{X}{R} \left(\frac{p_0}{\rho c} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{0.04143 \left(\frac{W}{\rho c^2 R^3} \right)^{1.105}}{\tanh^{1.5} \left[18.24 \left(\frac{W}{\rho c^2 R^3} \right)^{23.67} \right]} \quad (3.11)$$

$$\frac{U}{C} \left(\frac{p_0}{\rho c} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{6.169 \times 10^{-3} \left(\frac{W}{\rho c^2 R^3} \right)^{0.8521}}{\tanh \left[26.03 \left(\frac{W}{\rho c^2 R^3} \right)^{0.30} \right]} \quad (3.12)$$

e per sorgenti lineari:

$$\frac{X}{R} \left(\frac{p_0}{\rho c} \right)^{\frac{1}{2}} = 0.0792 \left(\frac{W/l}{\rho c^2 R^3} \right)^{1.125} \quad (3.13)$$

$$\frac{U}{c} \left(\frac{p_0}{\rho c} \right)^{\frac{1}{2}} = 0.7905 \left(\frac{W/l}{\rho c^2 R^3} \right)^{1.1010} \quad (3.14)$$

dove:

$\left(\frac{p_0}{\rho c} \right)^{\frac{1}{2}}$ = termine di impedenza

p_0 = pressione atmosferica (kPa)

ρ = massa volumica del mezzo di propagazione (kg/m³)

c = velocità dell'onda P nel mezzo di propagazione (m/s)

$\left(\frac{W}{\rho c^2 R^3} \right)$ = distanza scalata

W = energia rilasciata dall'esplosione (kiloton)

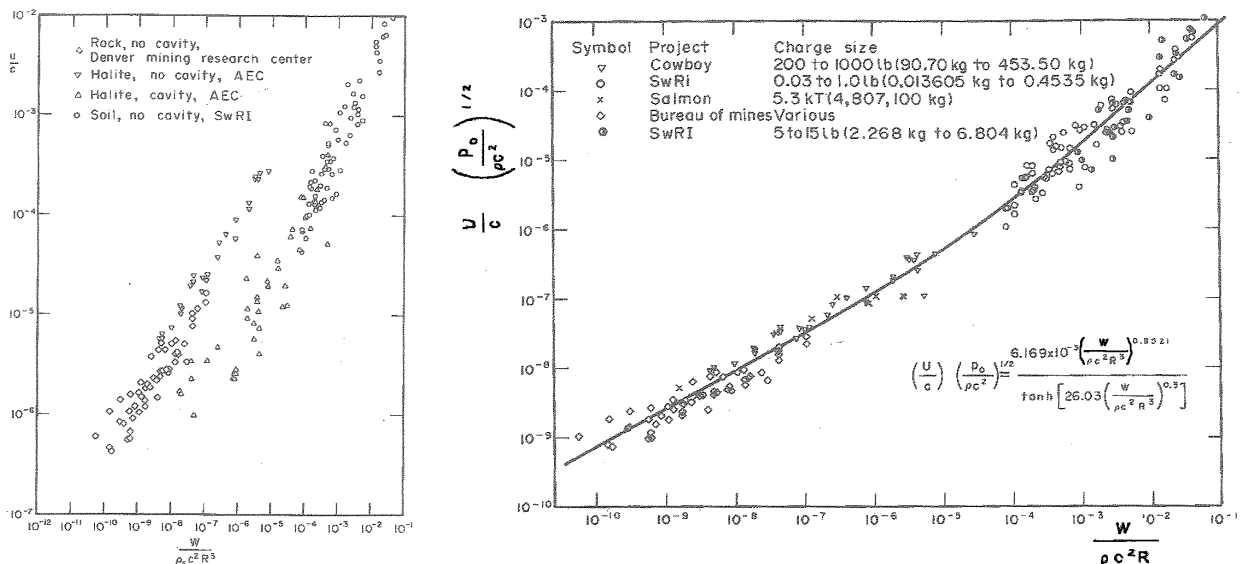


Figura 10 - Propagazione delle vibrazioni. Velocità delle particelle in relazione a carica esplosa e distanza dalla sorgente. A sinistra l'approccio convenzionale (Murphey, 1961), a destra l'accoppiamento proposto da Westine con l'introduzione del termine di impedenza.

Il termine di impedenza introdotto da Westine, calcolato per ogni materiale roccioso coinvolto nei test, produce un allineamento delle coppie di valori $\left(\frac{W}{\rho c^2 R^3}, X \left(\frac{p_0}{\rho c} \right)^{\frac{1}{2}} \right)$ e $\left(\frac{W}{\rho c^2 R^3}, \frac{U}{c} \left(\frac{p_0}{\rho c} \right)^{\frac{1}{2}} \right)$ rappresentate graficamente e separatamente (Figura 10), che sono ben riprodotte dalle equazioni (3.11) ed (3.12).

Il termine di impedenza nella formula della velocità e dello spostamento agisce da “coefficiente di accoppiamento” tra le caratteristiche del mezzo di propagazione e la rappresentazione di velocità e spostamento in funzione della distanza scalata.

Sebbene l'approccio abbia fornito risultati soddisfacenti, migliorando la rappresentatività del fenomeno attraverso una relazione basata sui dati sperimentali, il calcolo del termine di impedenza è possibile solo quando la propagazione avviene in un mezzo roccioso omogeneo.

Studi più recenti hanno messo in luce l'influenza delle discontinuità sulla propagazione della vibrazione superficiale, suggerendo la necessità di analizzare il fenomeno con particolare riferimento alla direzione di propagazione o introducendo un coefficiente di attenuazione.

Nel 2008 Kuzu esegue delle misure di PPV in una cava di arenaria, caratterizzata dalla presenza di due zone disomogenee, una costituita da materiale compatto ed una caratterizzata da numerose discontinuità. Rilevato l'orientamento delle linee di misura (una in ogni zona), tracciati i diagrammi stereografici polari delle discontinuità e definito l'orientamento dei fronti di scavo, vengono messi in relazione i risultati ottenuti e viene determinata la dipendenza del fenomeno vibratorio dallo stato di fratturazione del mezzo di propagazione. In particolare, si evidenzia come la presenza di discontinuità con immersione parallela alla direzione di propagazione della vibrazione produca un'attenuazione delle onde di Love, riducendo il valore della componente trasversale della PPV.

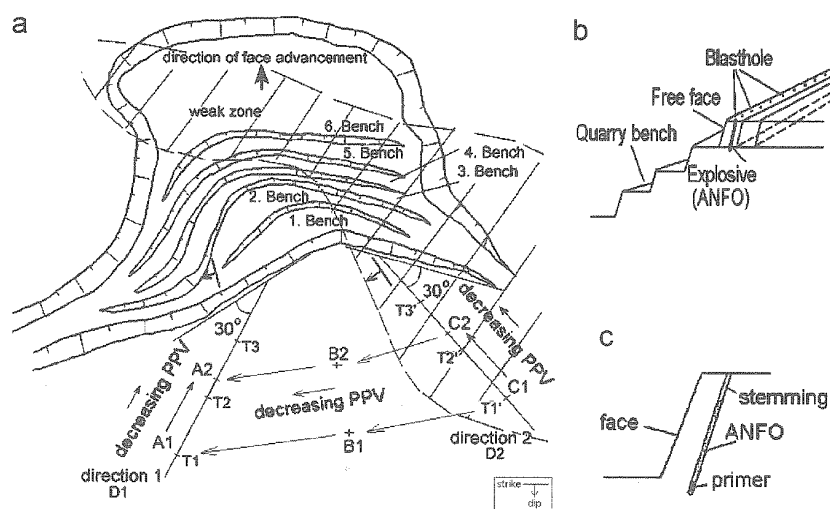


Figura 11 - Schema descrittivo del sito indagato da Kuzu per determinare l'influenza delle discontinuità sul fenomeno vibratorio.

Analoghe considerazioni sull'influenza della frequenza delle discontinuità sono fornite da Ak (2008), che aggiunge alla formula adottata dall'USBM (3.6) un fattore di attenuazione:

$$PPV = k \left(\frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^{-\alpha} \lambda^{-\beta} \quad (3.15)$$

dove λ è la frequenza delle discontinuità e β è il coefficiente di frequenza delle discontinuità.

Rispetto a questa formulazione dell'equazione della SD, quando quest'ultima ha valori bassi la velocità di propagazione è inversamente proporzionale alla frequenza delle fratture, mentre per SD elevate l'influenza delle discontinuità si riduce drasticamente.

In generale, quindi, gli approcci che considerano esplicitamente le caratteristiche del mezzo roccioso in cui si propaga la vibrazione, oltre a rendere più difficile l'applicazione pratica della formula, descrivono bene il fenomeno finché questo rimane confinato nel mezzo indagato. Diversamente, si dovrà adottare una formula più cautelativa.

Ad ogni modo, conoscere l'influenza del materiale roccioso sulla propagazione della vibrazione consente di migliorare la previsione della PPV.

3.2.2.1.3. Frequenza di risonanza delle strutture sensibili

La prevenzione del danno procurato alle strutture circostanti l'area estrattiva richiede, necessariamente, una conoscenza dettagliata del comportamento strutturale degli edifici sensibili.

Nel RI8507 (USBM, Siskind et al., 1980) viene analizzata la risposta delle strutture soggette a vibrazioni indotte da volate in cava, miniera e cantieri edili. Dal confronto delle serie temporali e degli spettri di frequenza rilevati da sensori posti sul terreno e sulla struttura (in punti ben definiti), emerge l'importanza della frequenza nella descrizione del fenomeno e nella prevenzione del danno alle strutture.

Le vibrazioni indotte nel terreno sono caratterizzate, oltre una certa distanza dalla sorgente, da frequenze basse (< 10 Hz) o molto basse (< 4 Hz), poiché quelle più alte vengono assorbite lungo il percorso. L'ampiezza, invece, non subisce variazioni sensibili al variare del mezzo di propagazione, ma può essere amplificata o attenuata dalla sovrapposizione di eventi dovuti alla riflessione delle onde di volume (per misure di PPV a grandi distanze dalla sorgente). L'analisi spettrale dimostra che spesso i maggiori valori di spostamento rilevati sulla struttura non si verificano in corrispondenza del picco di velocità misurato nel terreno, ma quando si realizza un buon accoppiamento con le frequenze di risonanza.

Le frequenze di risonanza rilevate per le strutture considerate nel RI8507 sono comprese tra i 4 Hz ed i 12 Hz, (in generale, a secondo dei materiali, della geometria e dell'altezza dell'edificio, i valori ricadono nell'intervallo 4÷30 Hz), ovvero all'interno del range di frequenze delle vibrazioni indotte, pertanto la loro determinazione diventa indispensabile per la progettazione ed il corretto dimensionamento della volata di produzione.

In assenza di monitoraggio, e solo per propositi statistici o predittivi, il rapporto suggerisce l'utilizzo della peggior curva di inviluppo dei dati rilevati, condizione che garantisce un approccio conservativo, ma rischia di sottovalutare notevolmente il valore della massima carica esplodibile per ritardo.

Lo studio condotto dall'USBM è affetto da alcune limitazioni, riconosciute dagli stessi autori, ovvero:

- la difformità delle volate monitorate in termini di quantità di carica esplosa per ritardo, numero di ritardi, entità del ritardo;
- l'esistenza di sorgenti antropiche di vibrazione con effetti comparabili o superiori a quelli delle volate;
- la presenza di un fenomeno di fatica, che porta al danneggiamento della struttura a seguito della ripetizione di un evento con livelli di vibrazione inferiori al limite.

Il rapporto è, comunque, fonte di ispirazione per Djordjevic, Kavetsky e Scott, i quali nel 1990 elaborano un'equazione che, fissata la frequenza "f", consente di determinare l'ampiezza "A(f)" della vibrazione indotta nel terreno da una volata di produzione, come prodotto di un fattore di amplificazione "F(f)" e dell'ampiezza "s(f)" della vibrazione indotta nel terreno dalla carica esplosa in un singolo foro della volata:

$$A(f) = F(f) \cdot s(f) \quad (3.16)$$

$$A(t) = \sum_{i=1}^N a_i s_i(t - \Delta_i) \quad (3.17)$$

$$F(f) = \left(\sum_{i=1}^N a_i \cos(2\pi f \Delta_i) \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N a_i \sin(2\pi f \Delta_i) \right)^2 \quad (3.18)$$

dove:

N = numero di fori totali della volata

t = istante di tempo in cui viene calcolata l'ampiezza

a_i = fattore di scala

s_i = ampiezza della vibrazione indotta dalla detonazione dell' i -esimo foro della volata

Δ_i = ritardo adottato nella volata (ms)

L'applicazione della (3.16) a due casi studio dimostra come il fattore di amplificazione assuma valori più elevati quando la frequenza della vibrazione del terreno e la frequenza di risonanza dell'edificio sono prossime.

Gli autori suggeriscono di minimizzare il disturbo dovuto alla vibrazione indotta minimizzando il fattore di amplificazione $F(f)$. Tale obiettivo può essere raggiunto riprogettando la volata utilizzando valori maggiori dei microritardi, con conseguente distribuzione dell'energia tra le diverse componenti di frequenza e riduzione dell'ampiezza in corrispondenza della frequenza di risonanza della struttura da tutelare.

3.2.2.1.4. Progettazione del sistema di misura

Alla luce dei risultati e delle considerazioni riportate nei precedenti capitoli, è evidente l'importanza di eseguire misure delle vibrazioni ripetibili ed affidabili per diminuire la dispersione dei dati (Dowding, 1985).

A tale scopo, è necessario utilizzare una catena di misura adatta. La configurazione strumentale è legata principalmente alla tipologia del trasduttore (geofono od accelerometro) ed al metodo di accoppiamento tra il sensore e la superficie di misura.

La qualità della misura è condizionata anche dal posizionamento dei trasduttori, che deve avvenire in punti rappresentativi del comportamento della struttura (Siskind, 1980, Dowding, 1992, Fabbri, 2007) e caratterizzarne la risposta rispetto alle tre componenti principali del parametro rilevato (spostamento, velocità o accelerazione delle particelle).

Nella progettazione del sistema di monitoraggio è necessario distinguere, pertanto, la misura della vibrazione indotta nel terreno da quella della struttura investita dalla vibrazione.

L'obiettivo, come già descritto in precedenza, è caratterizzare il fenomeno sia in termini di ampiezza che di frequenza. Ciò comporta anche la misurazione delle vibrazioni in punti diversi (mai meno di due) lungo uno stesso allineamento, in modo da disporre sempre di un numero sufficiente di valori di distanza scalata (Dowding, 1992). Inoltre, qualora lungo il percorso tra la sorgente e le strutture circostanti l'area estrattiva dovessero riscontrarsi particolari variazioni nelle caratteristiche del mezzo di propagazione, è necessario individuare gli edifici da monitorare e disporre la strumentazione lungo i nuovi percorsi (Dowding, 1992).

Data la complessità del fenomeno, il monitoraggio potrebbe richiedere un numero elevato di misurazioni, con costi non trascurabili a meno di adottare strumentazioni poco costose ma sufficientemente affidabili e precise (Fabbri, 2007).

Infine, poiché il fenomeno indagato ha breve durata, è importante che il sistema di monitoraggio consenta la registrazione nel momento in cui giunge la vibrazione (cercando di evitare l'acquisizione dei dati in continuo, con maggiori oneri per la memorizzazione del segnale e la successiva rielaborazione ed interpretazione) e con una frequenza di acquisizione sufficientemente elevata.

Una buona pratica per la gestione efficiente del monitoraggio delle vibrazioni indotte deve, pertanto, considerare sia le problematiche relative alla strumentazione (numero di trasduttori, tipologia, disposizione, accoppiamento) sia le caratteristiche del sito indagato (morfologia, geologia, urbanizzazione, ecc). Tale obiettivo può essere perseguito pianificando l'intervento di monitoraggio, ovvero acquisendo informazioni e classificando gli edifici ed il territorio in modo da individuare configurazioni ripetibili dei parametri che condizionano la misura, riducendo così al minimo indispensabile il numero delle misure da effettuare. Tanto maggiore sarà il livello di dettaglio (progettazione o realizzazione dell'intervento estrattivo) quanto più efficiente ed ottimizzato sarà il sistema di monitoraggio.

3.2.2.2. Buone pratiche

L'analisi dei diversi fattori che influenzano la propagazione della vibrazione nel terreno contribuisce ad incrementare il livello qualitativo delle equazioni di previsione della PPV, ma solo un approccio metodologico rigoroso permette di ottenere risultati migliori agendo su tutte le componenti del fenomeno indagato. Alcuni autori sono intervenuti a favore di una miglior formulazione delle equazioni predittive, altri hanno elaborato buone pratiche per un miglior utilizzo dei dati disponibili in funzione delle caratteristiche del sito.

In quest'ottica Wetherelt (2003) rivede l'equazione predittiva generale (e di conseguenza tutte le altre) dal punto di vista statistico, individuando nella regressione lineare applicata alla rappresentazione logaritmica un limite alla qualità della previsione e suggerisce di utilizzare la formula diretta a 3 parametri, ovvero:

$$PPV = a R^b Q^c \quad (3.19)$$

dove a, b e c sono i parametri specifici del sito, ottenuti per regressione multipla della PPV su R e Q dalla minimizzazione della somma degli scarti quadratici:

$$ssr = \sum_{i=1}^N (z_i - ax_i^b y_i^c)^2 \quad (3.20)$$

Sebbene l'approccio sia da considerare formalmente corretto, il miglioramento nella previsione dei valori misurati è di pochi punti percentuali (circa il 3%), a fronte di una maggior complessità di calcolo e, conseguentemente, una minor semplicità d'utilizzo.

Lo studio condotto da Wetherelt dimostra anche che l'elaborazione di diverse equazioni predittive per porzioni dell'area di indagine (ad esempio considerando un range di distanze dalla sorgente) porta a sensibili miglioramenti nella qualità dei valori di PPV calcolati, dimostrando l'influenza di vari fattori nell'attenuazione o amplificazione lungo il percorso tra sorgente e punto di misura.

Un ulteriore contributo per una miglior previsione della PPV viene fornito da White nel 2003, che dà indicazioni precise per il calcolo dell'errore standard e del relativo coefficiente moltiplicatore corretto da utilizzare nel determinare l'equazione della retta con intervallo di confidenza del 95%, da determinare in riferimento ai soli valori massimi della PPV nella distribuzione gaussiana:

$$\log(PPV) = \alpha \log(SD) + \log(k) + (x \times SE) \quad (3.21)$$

dove $x=1.645$ è il moltiplicatore per un intervallo di confidenza del 95% e SE è l'errore standard nella stima dei dati utilizzati per la previsione. L'utilizzo di $x=1.96$ non costituisce un errore ai fini della previsione, ma semplicemente un ampliamento dell'intervallo di confidenza ad un valore del 97,5%, quindi maggiormente cautelativo.

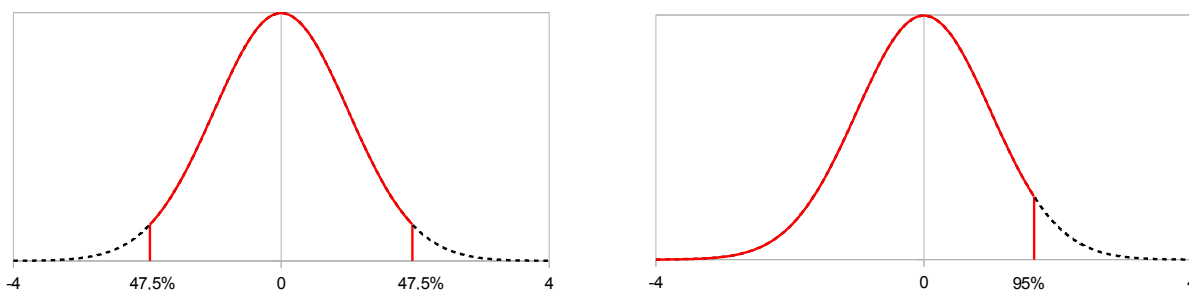


Figura 12 - Distribuzione normalizzata con media 0 e deviazione standard 1. A destra il range di valori che ricade in un intervallo di confidenza del 95% intorno al valor medio, che esclude i valori estremi della variabile considerata. A sinistra l'approccio corretto nella definizione dell'intervallo di confidenza del 95% per la PPV, escludendo solo i valori troppo elevati.

White suggerisce, sempre ai fini del miglioramento della previsione, di creare un database delle misure e di sostituire i dati prodotti in fase di test con dati di produzione non appena disponibili. Difatti le volate di apertura dei fronti sono caratterizzate da maggior confinamento, e danno spesso luogo a valori di PPV inferiori, anche del 50%, rispetto a quelle prodotte da volate di produzione.

Infine, analizzando le misure di PPV in 4 direzioni, White mette in evidenza come la disomogeneità geologica e strutturale del sito incida sulla propagazione delle vibrazioni intorno alla sorgente. Pertanto, al fine di avere migliori previsioni della PPV, è necessario utilizzare equazioni predittive per ogni direzione di propagazione considerata.

Il contributo delle buone pratiche alla riduzione del disturbo provocato dalle vibrazioni indotte nel terreno può essere determinante ai fini produttivi, poiché consente di ridurre l'errore nella previsione della PPV e quindi di utilizzare una carica istantanea maggiore.

3.2.2.3. Approcci innovativi: Reti Neurali Artificiali (ANN) e Support Vector Machines (SVM)

La tecnica delle reti neurali artificiali (Artificial Neural Networks, ANN) è una branca dell'intelligenza artificiale che simula la struttura ed il funzionamento del cervello umano. In tal senso, è una struttura interconnessa di elementi chiamati "neuroni", che consente di elaborare grandi quantità di dati e di risolvere problemi complessi. Poiché nell'ambito della presente ricerca questo strumento è stato analizzato solo quale approccio innovativo, ed in virtù della sua recente e limitata applicazione al tema in esame, ne sarà descritto il principio di funzionamento e le applicazioni ma non la rappresentazione matematica.

All'inizio del XXI secolo questa tecnica è stata applicata, in maniera innovativa, alla previsione della PPV e della frequenza delle vibrazioni indotte da volate in cava o miniera a cielo aperto (Khandelwal e Singh, 2005, 2009, Monjezi et al., 2011, Dehghani e Ataee-pour, 2011), con risultati soddisfacenti.

La rete viene inizialmente "istruita" processando un certo numero di dati in ingresso ed il relativo risultato. A seguito dell'apprendimento, la rete neurale è in grado di riconoscere la "similarità" tra nuovi dati in ingresso e quelli utilizzati in fase di istruzione, e fornisce una previsione del risultato.

L'algoritmo di istruzione utilizzato è quello della propagazione all'indietro (back-propagation, BP). Nell'applicazione di questo algoritmo, la rete neurale (BPNN) è costituita da tre livelli, ovvero:

- il livello di ingresso (input layer);
- il livello nascosto (hidden layer);
- il livello di uscita (output layer),

ognuno dei quali consiste di un certo numero di unità elementari di processamento (elementar processing units, ovvero i neuroni), ognuno collegato al livello successivo (dall'input all'hidden all'output layer) tramite pesi. I neuroni del livello di ingresso corrispondono alle variabili in ingresso, mentre quelli del livello di uscita corrispondono ai risultati. I neuroni nel livello nascosto (ed il numero di livelli nascosti) variano in relazione alla complessità del problema da risolvere (Figura 13).

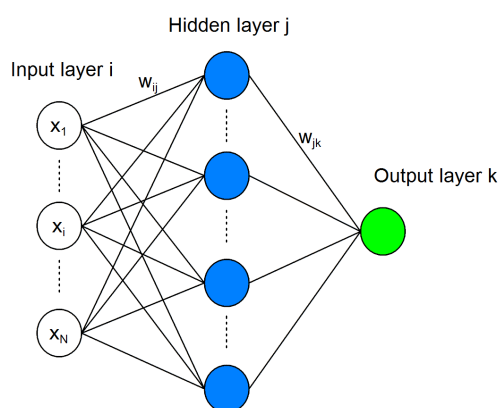


Figura 13 - Artificial Neural Network. Schema generale di una rete neurale istruita con l'algoritmo della propagazione all'indietro (BPNN)

I parametri in ingresso devono avere tutti valore numerico, e devono essere normalizzati in modo da avere valori compresi tra 0 ed 1. Una formula comune di normalizzazione prevede l'uso dei valori estremi (massimo e minimo), ovvero:

$$\text{Valore scalato} = \frac{(\text{valore massimo} - \text{valore non scalato})}{(\text{valore massimo} - \text{valore minimo})}$$

Una “funzione di trasferimento” definisce la relazione tra i neuroni dei diversi livelli. Per differenziare le varie unità di processamento, vengono introdotti dei neuroni fittizi chiamati “bias” (polarizzatori), il cui peso è pari ad 1 ed il cui segnale viene filtrato dalla funzione di trasferimento. Questa ha il compito di elaborare gli input al nodo e fornire l'output per il livello successivo o il livello di uscita.

Raggiunto il livello di uscita, il risultato ottenuto dalla rete con valori casuali dei pesi viene confrontato con il risultato atteso (misurato). L'errore viene processato all'indietro (back-propagation) per correggere i pesi delle singole connessioni dei neuroni e dei bias nei vari livelli.

Questo meccanismo si ripete finché l'errore non converge ad un valore minimo di tolleranza impostato dall'utente, spesso riferito allo scarto quadratico medio.

3.2.2.3.1. *BPNN ed SVM per la previsione della PPV e della frequenza*

Per lo studio di un problema quale la previsione delle vibrazioni indotte nel terreno da volate in cava, vari autori hanno ritenuto utile l'utilizzo di BPNN a tre (Khandelwal and Singh, 2005, 2009) o quattro livelli (Monjezi et al., 2011). Nel livello di input vengono considerati i parametri condizionanti il fenomeno e riconducibili all'influenza del progetto di volata, delle caratteristiche del mezzo di propagazione e della distanza. Il livello di output è costituito dai due parametri che permettono di descrivere il fenomeno in relazione al disturbo, ovvero PPV e frequenza. Il numero dei neuroni nei livelli nascosti varia da 8 a 15 (Figura 14, Figura 15).

Confrontando i risultati con quelli ottenuti da un'analisi di regressione multivariata (MVRA), piuttosto che dall'applicazione delle principali formule di distanza scalata (che peraltro non consentono di determinare la frequenza), si verifica che la rete neurale riproduce il fenomeno vibratorio in maniera molto più fedele (Khandelwal and Singh, 2006, 2009, Monjezi, 2011, Dehghani, 2011).

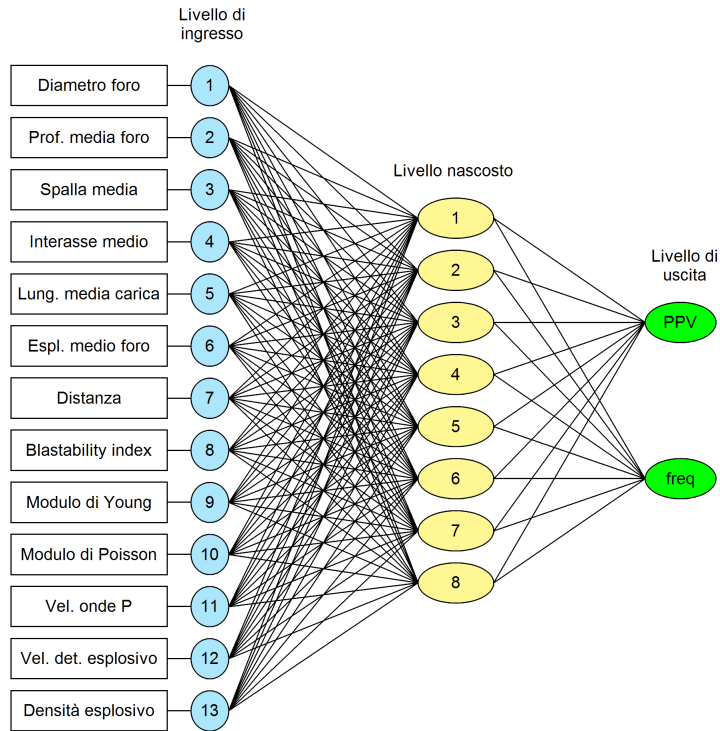


Figura 14 - Artificial Neural Network. Rete neurale (13-8-2) utilizzata da Khandelwal e Singh (2006) per la previsione della PPV e della frequenza delle vibrazioni indotte nel terreno da volate in miniera a cielo aperto.

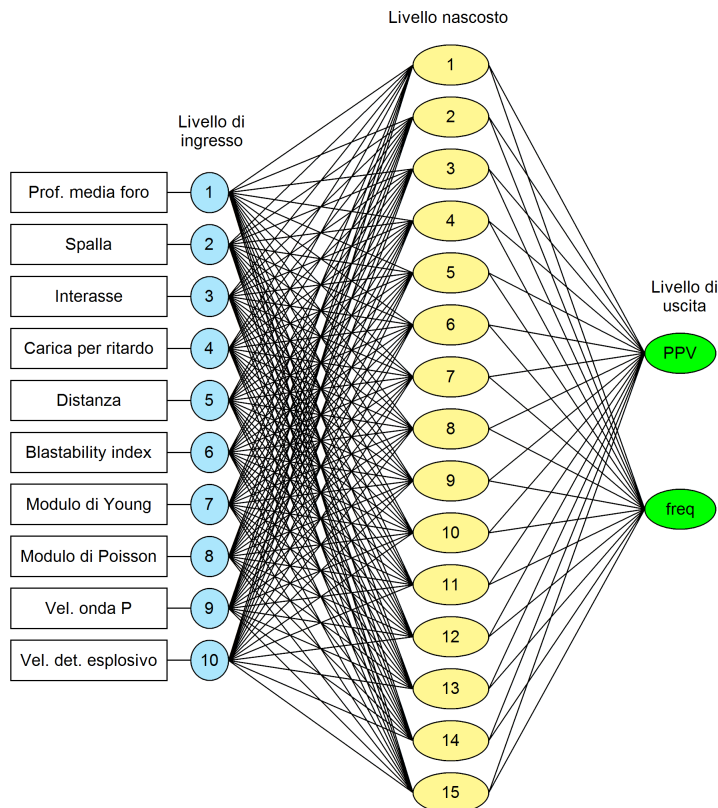


Figura 15 - Artificial Neural Network. Rete neurale (10-15-2) utilizzata da Khandelwal e Singh (2009) per la previsione della PPV e della frequenza delle vibrazioni indotte nel terreno da volate in miniera a cielo aperto.

Un approccio diverso è stato adottato da Dehghani (2011), che oltre a confrontare le performance (in termini di errore assoluto, errore relativo e scarto quadratico medio) tra vari modelli ANN a uno e due livelli nascosti per la determinazione della PPV (individuando nell'architettura 9-25-1 quella ottimale), effettua un'analisi di sensibilità sulle 9 variabili considerate nel livello di ingresso (Figura 16 e Tabella 2), ovvero:

- spalla (B);
- interasse (S);
- ritardo (D_e);
- densità dell'esplosivo (q);
- numero di file di fori per ogni volata (n);
- distanza sorgente-ricevitore (μ);
- numero di fori per ritardo (θ);
- carica esplosa per ritardo (ch);
- indice di resistenza a carico puntuale (point load index, σ).

Sulla base di questa analisi, esclude l'indice di resistenza carico puntuale ed il numero di file di fori per ogni volata (indice di sensibilità inferiore al 80%, scelto come valore di soglia, Tabella 2) ed utilizza il modello dell'analisi dimensionale (Bridgman, 1922, Langhaar, 1951, Bellamine ed Elkamel, 2006) per determinare una nuova formula predittiva della PPV, da confrontare con le formulazioni classiche della distanza scalata, anch'essa esprimibile in forma logaritmica per semplicità di rappresentazione.

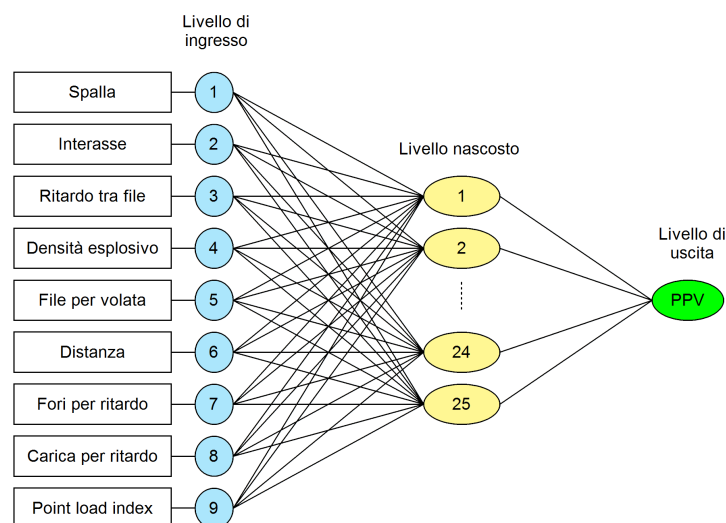


Figura 16 - Artificial Neural Networks. Rete neurale adottata da Dehghani con i dati della miniera di rame di Sarcheshmesh (Iran)

Variabile considerata	Indice di sensitività
spalla	0.8621
interasse	0.8233
ritardo	-0.9116
densità dell'esplosivo	0.9751
numero di file di fori per ogni volata	-0.6145
distanza sorgente-ricevitore	-0.9811
numero di fori per ritardo	0.9356
carica esplosa per ritardo	0.9543
point load index	0.7425

Tabella 2 - Artificial Neural Network. Risultati dell'analisi di sensitività condotta da Dehghani sulla rete neurale di Figura 16. Dalla successiva analisi dimensionale sono stati esclusi i parametri con indice inferiore a 0.80 (in valore assoluto).

La dipendenza della PPV dalle variabili selezionate è espressa come:

$$PPV = f(B, S, D_e, ch, q, \theta, \mu) \quad (3.22)$$

ovvero:

$$f(PPV, B, S, D_e, ch, q, \theta, \mu) = 0 \quad (3.23)$$

Selezionate forza (F), lunghezza (L) e tempo (T) quali dimensioni per l'analisi, Dehghani ottiene una relazione non lineare della seguente forma:

$$\begin{aligned} \log \left[PPV * D_e * \left(\frac{q}{ch} \right)^{\frac{1}{3}} \right] &= k + a \log \left[B \left(\frac{q}{ch} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \\ + b \log \left[S \left(\frac{q}{ch} \right)^{\frac{1}{3}} \right] &+ c \log \left[\mu \left(\frac{q}{ch} \right)^{\frac{1}{3}} \right] + d \log \theta \end{aligned} \quad (3.24)$$

i cui coefficienti a, b, c, d e k vengono determinati per regressione multivariata applicata sulla base dei dati considerati. La formula ottenuta è la seguente:

$$PPV = \frac{168.85}{D_e} \left(\frac{q}{ch} \right)^{-1.48} B^{-5.64} S^{3.43} \mu^{-1.22} \theta^{-1.18} \quad (3.25)$$

Sia il coefficiente di correlazione che lo scarto quadratico medio ottenuti da Dehghani sono migliori di quelli ottenuti dalle equazioni predittive classiche. L'utilizzo delle reti neurali, l'analisi di sensitività ed il modello dimensionale forniscono, pertanto, una descrizione più rigorosa del fenomeno, consentendo di valutare in maniera esplicita il contributo dei principali fattori che condizionano il fenomeno vibratorio

indagato.

3.2.2.3.2. Considerazioni sulle reti neurali artificiali

Analogamente ai metodi statistici adottati nell'approccio classico delle formule di distanza scalata (principalmente regressione lineare o multipla), le ANN non rappresentano il fenomeno vibratorio dal punto di vista fisico, anzi, l'approccio è dichiaratamente adimensionale. Consentono però di tener conto in maniera “esplicita” di tutti i fattori che condizionano i valori di PPV e frequenza. Disponendo di un consistente set di dati, selezionando opportunamente i fattori che costituiranno il layer di ingresso della rete e determinando il corretto numero di layer nascosti ed i relativi neuroni, è possibile utilizzare questo metodo per ottenere valori previsionali di PPV e frequenza molto vicini ai valori reali.

La dipendenza delle ANN dal set di dati utilizzati ne costituisce uno dei limiti principali. Difatti, il “livello di istruzione” sarà tanto maggiore quanto più i dati utilizzati per l'apprendimento saranno rappresentativi del fenomeno nel sito indagato. Inoltre, la soggettività nella scelta delle variabili in ingresso e nella progettazione della rete possono condurre a risultati anche molto differenti.

Inoltre, poiché l'istruzione di una rete neurale è basata sulla minimizzazione dell'errore di misura attraverso la determinazione dei pesi da attribuire alle relazioni tra i neuroni dei diversi livelli, l'algoritmo di apprendimento influenza notevolmente la qualità della rete. A tal proposito, per prevenire la possibilità che l'algoritmo di apprendimento resti “bloccato” in un minimo locale della funzione di trasferimento, è stato sviluppato un nuovo tipo di rete neurale chiamata Support Vector Machines (SVM, Vapnik, 2005), che utilizza il principio della minimizzazione del rischio strutturale (Structural Risk Minimization, SRM) nel processo di apprendimento.

Il vantaggio delle SVM rispetto alle BPNN risiede nella capacità di fornire valori previsionali molto vicini ai valori misurati nonostante l'uso di un set di dati non molto ampio (poche decine di misure) nel processo di apprendimento (Cheng-Xiang e Xia-Ting, 2003).

Visti i limiti e le potenzialità delle ANN e dell'approccio statistico classico (MVRA ed equazioni della distanza scalata), considerando che per tutte queste tecniche la qualità del risultato dipende dalla quantità e qualità dei dati misurati ed utilizzando l'analisi dimensionale come proposto da Dehghani, ulteriori approfondimenti potrebbero condurre ad una nuova e migliore procedura per la previsione della PPV.

3.2.3. Normativa sulla prevenzione del danno da vibrazione indotta su uomini e strutture

Sulla base dei principali fattori che caratterizzano il fenomeno vibratorio, descritti nei precedenti capitoli, gli enti di normazione nazionali ed internazionali hanno individuato i limiti di soglia da rispettare per prevenire danni alle strutture e disturbo agli individui. A secondo dell'approccio adottato, il parametro di riferimento è lo spostamento, la velocità o l'accelerazione delle particelle, in relazione alla frequenza della vibrazione indotta. Altri parametri considerati sono la durata del fenomeno (transiente o duraturo), il numero di eventi, il tipo di terreno, la tipologia e lo stato di conservazione delle strutture.

Tra le normative che individuano nel valore di picco della velocità di vibrazione delle particelle il parametro descrittivo del fenomeno vibratorio, alcune considerano il valore massimo registrato in una delle tre componenti principali (longitudinale, trasversale, verticale), altre considerano il valore di picco

dello pseudo-vettore di velocità, ottenuto dalla somma vettoriale dei valori di picco delle tre componenti (quindi maggiore di qualsiasi vettore risultante ottenuto in un determinato istante). La scelta dello pseudo-vettore è da ritenersi sicuramente più cautelativa.

Di seguito si riportano, brevemente, le indicazioni emanate da alcuni enti di normazione (USBM, ISO, UNI, BS, DIN, SN).

3.2.3.1. Prevenzione del danno provocato agli edifici

3.2.3.1.1. ISO 4866 e UNI 9916

La normativa ISO 4866 fornisce una serie di indicazioni sui requisiti della strumentazione da adoperare per il monitoraggio delle vibrazioni indotte, nonché sul numero, la posizione e l'orientamento dei trasduttori e le modalità di accoppiamento con il terreno.

In merito al numero di misure ed alla loro localizzazione, devono essere determinati in base alla geometria dell'edificio e delle osservazioni emerse durante il monitoraggio stesso.

Particolare attenzione viene posta all'identificazione delle tipologie di edificio, delle fondazioni e dei diversi tipi di terreno (allegato B della normativa). La combinazione di questi tre parametri determina la resistenza complessiva del sistema e, pertanto, il livello di protezione richiesto. La classificazione degli edifici è riportata in Tabella 3.

Classe dell'edificio	Categoria della struttura								
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Categoria delle fondazioni (lettera maiuscola) e dei tipi di terreno (lettera minuscola)									
← Livello di vibrazione accettabile decrescente	1	Aa							
	2	Ab	Aa	Aa	Aa				
	3		Ab, Ba	Ab, Ba	Ab	Aa, Ab			
	4		Ac, Bb	Bb	Ac	Ac, Ba, Bb			
	5		Bc	Ac		Bc	Ba		
	6		Af		Ad	Bd	Bb, Ca	Ba	
	7			Af	Ae	Be	Bc, Cb	Bb, Ca	
	8						Be, Cc	Bc, Cb	
	9		Bf				Cd	Bd, Cc	Aa
	10			Bf			Ce	Be, Cd	Ab
	11				Cf	Cf		Ce	Ba
	12						Cf		Bc, Ca
	13							Cf	Bd, Cb, Cc
	14								Cd, Ce, Cf

Tabella 3 - Classificazione degli edifici in relazione alla loro resistenza alla vibrazione (ISO 4866)

È da notare che la norma non impone valori limite di spostamento, velocità o accelerazione delle particelle, ma fornisce indicazioni in merito al modo di affrontare il monitoraggio del fenomeno in considerazione delle caratteristiche della struttura (edificio, fondazione, terreno di fondazione) oggetto di indagine.

La normativa UNI 9916 in buona sostanza recepisce la ISO 4866, e rimanda ad altre normative internazionali (DIN 4150, BS 7385, SN 640312a) per la definizione dei valori limite di velocità delle particelle, in relazione alla frequenza ed alla tipologia di edificio.

3.2.3.1.2. USBM (RI 8507)

Il Report of Investigations 8507 (RI8507) dello United States Bureau of Mines (Siskind et al., 1980), già citato nei capitoli precedenti, oltre a studiare il fenomeno vibratorio ed identificare l'influenza dei diversi parametri analizzati nel capitolo 3.2.2.1, rivede i valori di soglia della distanza scalata stabiliti dal precedente bollettino 656 (Nicholls et al, 1971) e suggerisce di adottare il criterio della PPV solo per la disciplina e la pianificazione degli interventi, mentre per la fase progettuale ritiene necessaria un'analisi dello spettro di risposta delle strutture da preservare, insieme al monitoraggio delle vibrazioni.

Per strutture residenziali (moderne/di non recente costruzione), l'USBM suggerisce un valore limite della PPV pari a 0.50/0.75 in/s (1.27/1.91 cm/s) per basse frequenze di vibrazione del terreno ($f \leq 40 \text{ Hz}$) ed un valore di 2.0 in/s (5,08 cm/s per entrambi i tipi di struttura) per alte frequenze ($f \geq 40 \text{ Hz}$).

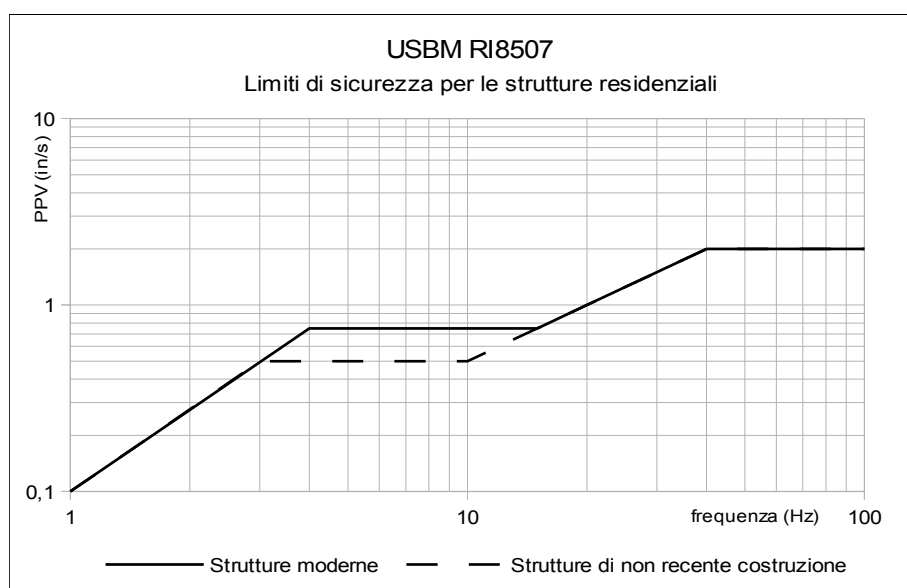


Figura 17 - Controllo delle vibrazioni. Valori di soglia della PPV individuate dal USBM per le strutture residenziali.

3.2.3.1.3. DIN 4150

La normativa tedesca DIN 4150 prende in considerazione la componente della velocità che presenta il maggior valore di picco (peak component particle velocity), e suddivide gli edifici in tre classi. Per ogni classe, viene definito il valore di soglia della pcpv misurata sulla struttura (fondazione o piano alto) in

relazione alla frequenza principale rilevata.

Inoltre, al fine di prevenire il danno a fatica o per risonanza, la norma distingue i limiti di pcpv per eventi di breve durata e per eventi duraturi (in maniera simile a quanto realizzato dalla ISO 4866).

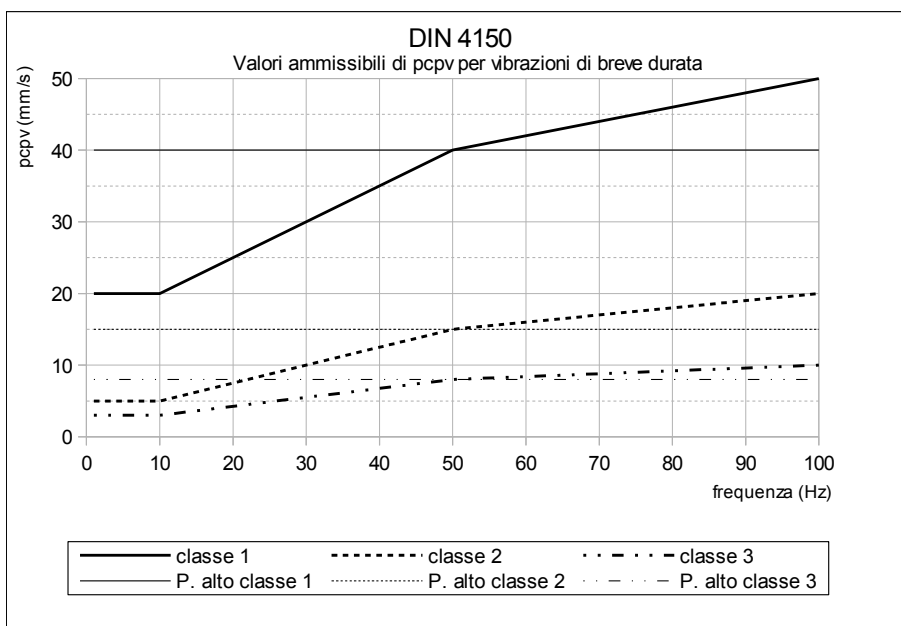


Figura 18 - Controllo delle vibrazioni. Limiti della componente di picco della velocità delle particelle previsti dalla normativa tedesca, in relazione alla frequenza della vibrazione indotta.

Classe	Tipo di edificio	Valori di riferimento per la pcpv (mm/s) rispetto alla frequenza				
		Fondazioni			Piano alto	Eventi duraturi
		1 Hz < f < 10 Hz	10 Hz < f < 50 Hz	50 Hz < f < 100 Hz		
1	Costruzioni industriali	20	20 ÷ 40	40 ÷ 50	40	10
2	Edifici residenziali	5	5 ÷ 15	15 ÷ 20	15	5
3	Strutture degne di tutela	3	3 ÷ 8	8 ÷ 10	8	2.5

Tabella 4 - Controllo delle vibrazioni. Valori di soglia della pcpv adottati dalla normativa tedesca.

3.2.3.1.4. BS 7385

La normativa inglese BS 7385 fa riferimento alla pcpv, e definisce i valori di soglia in un range più ampio di frequenze (4 ÷ 250 Hz) suddividendo gli edifici in due classi (industriali e residenziali), considerando due classi di frequenza e distinguendo eventi transienti da eventi duraturi.

Classe	Tipo di edificio	Valori di riferimento per la pcpv (mm/s) rispetto alla frequenza		
		4 Hz < f < 15 Hz	15 Hz < f < 40 Hz	40 Hz < f < 250 Hz
1	Strutture rinforzate	50		
2	Strutture non rinforzate	15 ÷ 20	20 ÷ 50	50

Tabella 5 - Controllo delle vibrazioni. Valori di soglia della pcpv previsti dalla normativa inglese in caso di eventi transienti. Per eventi duraturi i valori delle due classi di edifici sono ridotti del 50%.

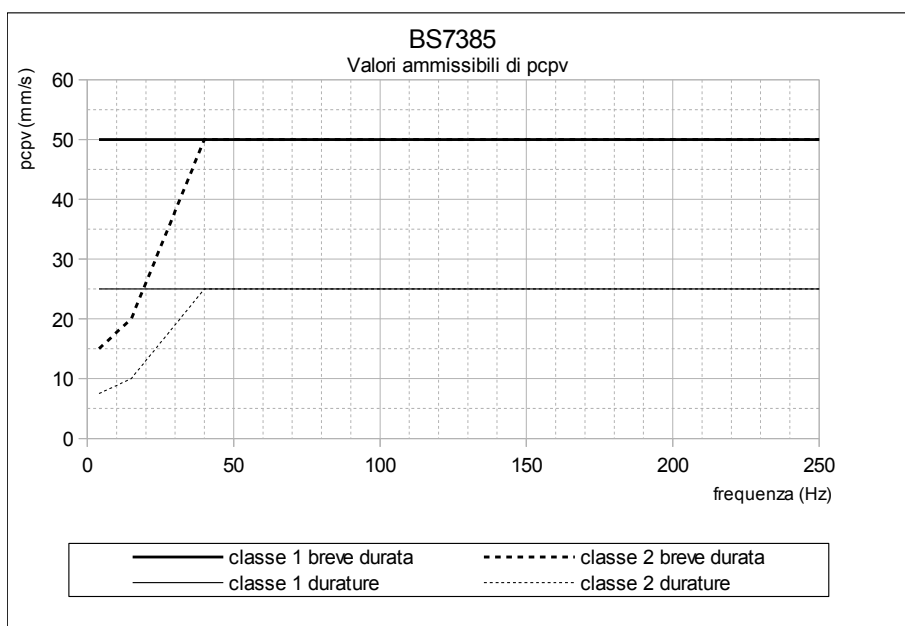


Figura 19 - Controllo delle vibrazioni. Limiti della componente di picco della velocità delle particelle previsti dalla normativa inglese, in relazione alla frequenza della vibrazione indotta.

3.2.3.1.5. SN 640 312a

La normativa svizzera SN 640 312a prende in considerazione la PPV (vettore risultante dalla somma delle tre componenti principali misurate nel medesimo istante e nel medesimo punto). Le strutture vengono suddivise in 4 classi in funzione della sensibilità alle vibrazioni indotte, e per ognuna si forniscono i valori di soglia, suddivisi per classi di frequenza della vibrazione, per eventi occasionali, frequenti e duraturi. Per il fenomeno indagato considereremo solo gli eventi occasionali. Il range di frequenze considerate è compreso tra gli 8 Hz ed i 150 Hz.

Classe	Tipo di struttura	Valori di riferimento per la PPV (mm/s) rispetto alla frequenza		
		8 Hz < f < 30 Hz	30 Hz < f < 60 Hz	60 Hz < f < 150 Hz
A	Molto poco sensibile	45	60	90
B	Poco sensibile	30	40	60
C	Normalmente sensibile	15	20	30
D	Particolarmente sensibile	7.5	10	15

Tabella 6 - Controllo delle vibrazioni. Valori di soglia della PPV previsti dalla normativa Svizzera per eventi occasionali. La posizione di misura è il punto della struttura in cui sono attesi i maggiori effetti della vibrazione.

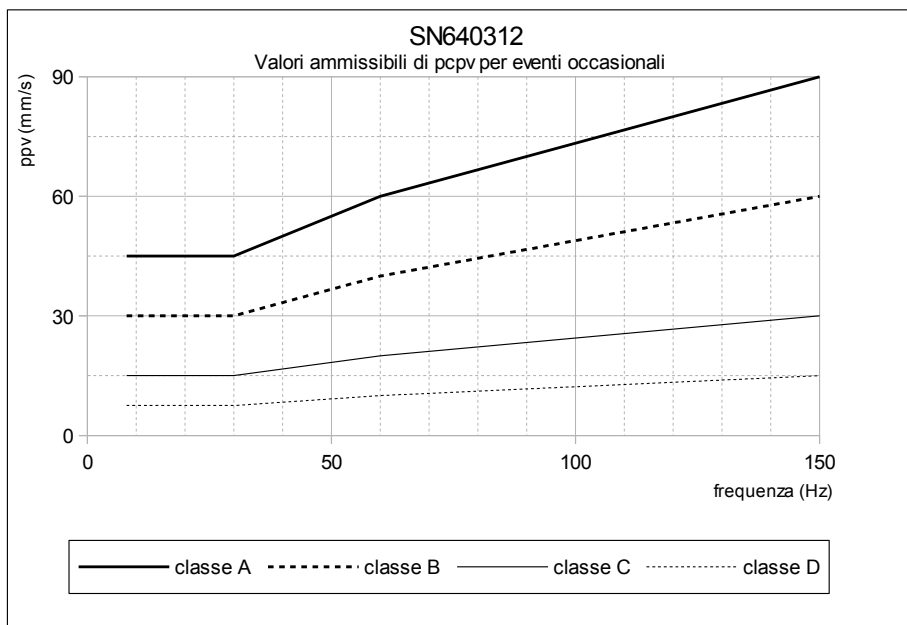


Figura 20 - Controllo delle vibrazioni. Limiti della PPV previsti dalla normativa svizzera, in relazione alla frequenza della vibrazione indotta e per eventi occasionali.

3.2.3.2. Prevenzione del disturbo arrecato agli individui

Il fenomeno vibratorio, oltre a danneggiare le strutture, può produrre disturbo psico-fisico sugli individui, particolarmente sensibili alle alte frequenze. Le normative nazionali ed internazionali che pongono limiti di soglia per contenere tale disturbo fanno riferimento ai valori di accelerazione o di velocità delle particelle. Inoltre, vengono imposti limiti differenti per il giorno e la notte, in considerazione della diversa percezione della vibrazione in funzione della posizione del corpo umano (verticale/seduta o orizzontale).

Gli enti di normazione che hanno affrontato con maggior attenzione l'effetto delle vibrazioni indotte (e degli eventi sismici in generale) sulla salute umana (principalmente in termini di benessere psico-fisico) sono l'International Standard Organization (ISO, normativa 2631-1 e 2631-2), l'Unione Normativa Italiana (UNI, normativa UNI 9614), l'Istituto Tedesco per la Normazione (Deutsches Institut für Normung, DIN, normativa DIN 4150).

Poiché nell'approccio innovativo proposto si farà riferimento agli effetti delle vibrazioni indotte nel terreno sulle strutture circostanti il sito estrattivo, la trattazione delle norme citate non sarà approfondita.

3.3. Contributo innovativo

Lo stato dell'arte descritto nel capitolo precedente mette in evidenza i principali fattori che condizionano la propagazione delle vibrazioni indotte nel terreno da volate a cielo aperto, ovvero:

- il confinamento della carica in relazione al progetto di volata;
- le proprietà meccaniche e le discontinuità del materiale roccioso attraversato;
- la propagazione attraverso mezzi con caratteristiche differenti.

In termini di previsione del danno materiale arrecato a strutture sensibili (quali, ad esempio, costruzioni in prossimità dell'area estrattiva) e del disturbo psico-fisico provocato nei confronti di individui sensibili (che vivono o svolgono attività nell'area di influenza del sito estrattivo), sono stati individuati nello spostamento, nella velocità di vibrazione e nell'accelerazione delle particelle i parametri che descrivono il fenomeno vibratorio.

Inoltre, è stata evidenziata una relazione tra la frequenza della vibrazione nel terreno e la frequenza di risonanza delle strutture monitorate, da cui deriva la necessità di rilevare anche questi parametri per un'efficace azione preventiva.

Infine, è stata sottolineata l'importanza del sistema di monitoraggio ai fini di una corretta previsione del fenomeno.

Stante la connotazione "spaziale" di molti di questi elementi, e la possibilità di riprodurre in forma tabellare gli altri, si è ritenuto utile affrontare il tema in esame attraverso l'utilizzo dei Sistemi Informativi Geografici (Geographical Information System, GIS), che uniscono le potenzialità dei sistemi di gestione degli archivi di dati (Database Management System, DBMS) alla rappresentazione spaziale (anche geografica) dei dati stessi.

È stata quindi messa a punto una procedura per:

- la corretta pianificazione e progettazione delle volate;
- il monitoraggio delle vibrazioni indotte.

Questa procedura trova applicazione in un metodo di studio del fenomeno basato principalmente sulle buone pratiche (in ottica di minimizzazione dei danni e dei disturbi) ed in un sistema esperto basato su:

- la creazione di un database cartografico a supporto della fase di pianificazione del monitoraggio e della progettazione delle volate di abbattimento;
- la creazione di un database specialistico relativo a:
 - caratteristiche dei mezzi di propagazione;
 - parametri del progetto di volata;
 - caratteristiche territoriali;
 - caratteristiche delle strutture sensibili;

- distribuzione e caratteristiche del sistema di monitoraggio;
- normativa di riferimento per la prevenzione del danno/disturbo;
- l'utilizzo di misure strumentali per la caratterizzazione del fenomeno in relazione al sito indagato;
- l'utilizzo di un GIS per l'analisi dei dati acquisiti, la creazione di mappe tematiche a supporto della progettazione delle volate di abbattimento.

L'approccio tramite GIS allo studio del fenomeno è stato adottato la prima volta alle soglie del 2000 (Berry e Pistocchi, 2003). L'equazione predittiva elaborata dal USBM (3.6, propagazione cilindrica) è stata utilizzata per la mappatura dei valori di PPV all'interno ed all'intorno di una cava di calcare coltivata a cielo aperto. I valori dei coefficienti " k " e " α " sono stati determinati tramite regressione lineare dei valori di PPV rispetto alla SD rilevati in diverse cave di calcare italiane (Carastro e Dantini, 1976). Gli autori prendono in considerazione lo pseudo-vettore delle velocità, adottando un criterio cautelativo.

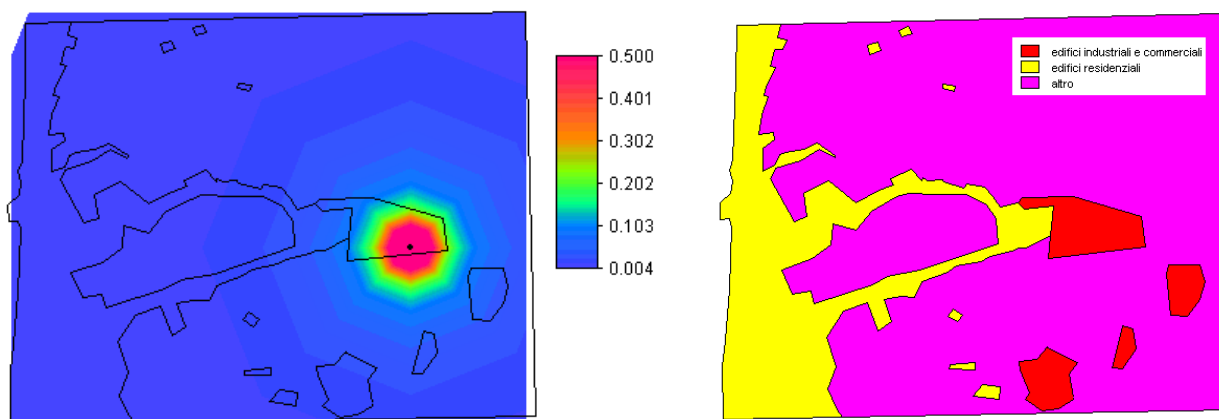


Figura 21 - Approccio innovativo. A sinistra, mappa dei valori di PPV ottenuta secondo un modello di propagazione cilindrica (Berry, Pistocchi, 2003). A destra, zonizzazione secondo la norma DIN 4150.

Rispetto a quanto riportato nel seguito del presente documento, l'applicazione appena descritta considerava una propagazione isotropa intorno alla sorgente, e la distanza dalla sorgente era calcolata come distanza euclidea nel piano orizzontale (in linea d'aria) e non lungo il percorso della vibrazione nel mezzo di propagazione.

In questo modo si sottostima la distanza percorsa dall'onda, ottenendo un minor valore della distanza scalata e, pertanto, una PPV maggiore di quella che si dovrebbe ottenere dalla corretta applicazione della formula adottata. Poiché, come ampiamente argomentato, le equazioni predittive sono di per se stesse cautelative (a maggior ragione quando si utilizza l'equazione con intervallo di confidenza dei valori pari o superiore al 95%), il valore della massima carica esplodibile che si può ricavare utilizzando questo approccio è ancor più penalizzante dal punto di vista della produzione mineraria.

Inoltre, l'approccio non tiene conto della disomogeneità del sito (area estrattiva, aree boschive, zone industriali ed urbanizzate) all'intorno della sorgente, attribuendo comportamento isotropo all'attenuazione del fenomeno vibratorio nelle varie direzioni.

Questi limiti, in parte individuati dagli stessi autori, sono stati analizzati e risolti nel corso del presente progetto di ricerca, e nei prossimi sottocapitoli saranno argomentati i progressi raggiunti.

3.3.1. Metodo di indagine

Affinché sia possibile ridurre al minimo l'interferenza tra l'attività estrattiva ed il territorio in cui si insedia, è necessario acquisire le informazioni necessarie all'analisi del fenomeno oggetto di studio, incrementando il livello di dettaglio nelle varie fasi di indagine (pianificazione, progettazione e realizzazione dell'opera), e stabilendo la corretta sequenza delle operazioni da svolgere. Il metodo di indagine presentato prevede, pertanto, l'acquisizione di informazioni diverse in relazione al livello di dettaglio dell'indagine (Figura 22).

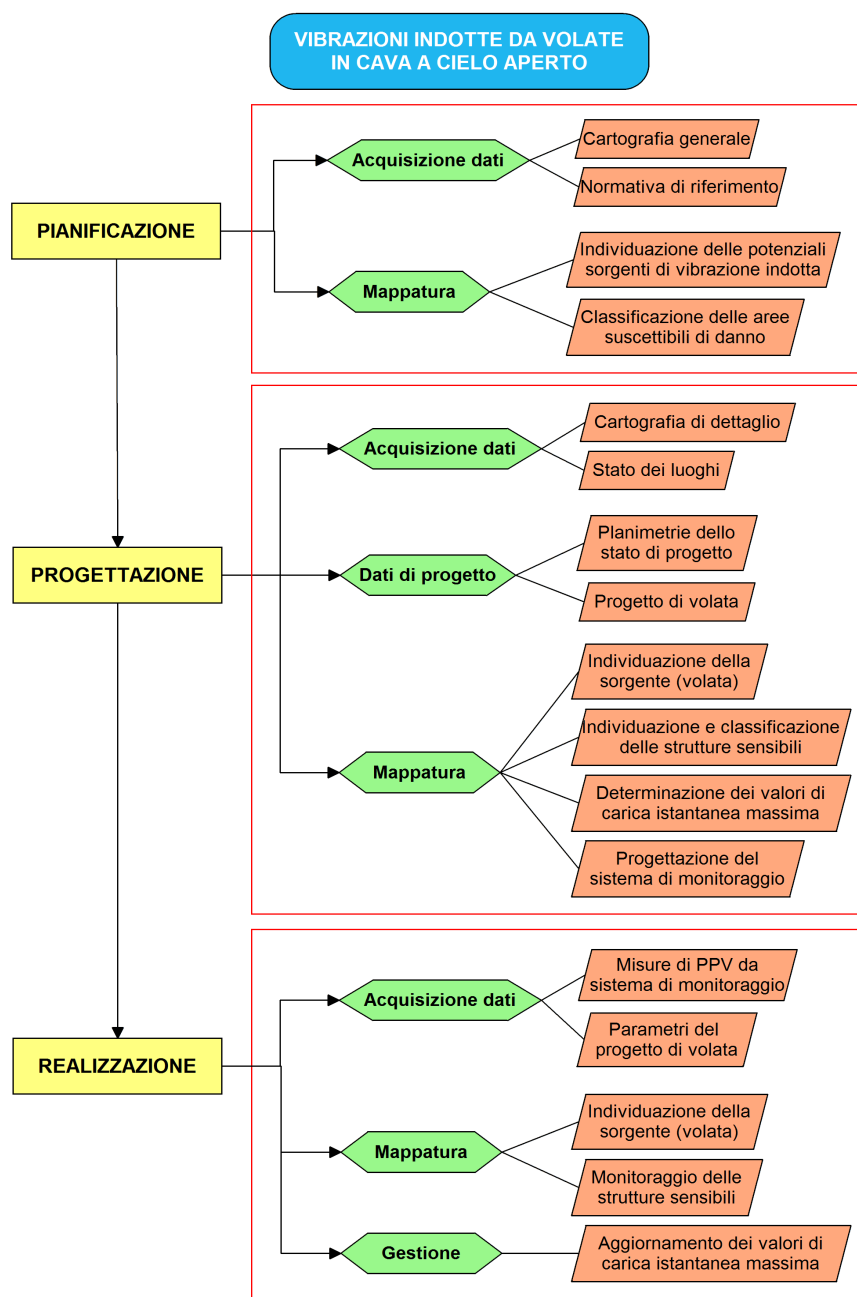


Figura 22 - Contributo innovativo. Schema generale del metodo di indagine proposto. Il livello di dettaglio nell'analisi è tanto maggiore quanto più sono raffinate le informazioni disponibili.

3.3.1.1. Pianificazione dell'intervento

In fase di pianificazione, l'indagine è finalizzata ad una mappatura del territorio in funzione dei valori limite di PPV. A tale scopo è necessario disporre, quantomeno, di:

- carte di uso del suolo, per individuare le potenziali sorgenti di disturbo (nel nostro caso siti estrattivi in attività e aree di futura coltivazione) e le aree sensibili (insediamenti industriali o artigianali, insediamenti residenziali, strutture isolate sparse sul territorio), nonché per la caratterizzazione del contesto territoriale (superfici artificiali, aree coltivate, aree naturali);
- carte geologiche, per inquadrare la complessità potenziale della propagazione del fenomeno vibratorio;
- carte topografiche, per definire le morfologie ed individuare le aree più a rischio di danno/disturbo.

Oltre ai dati cartografici, si deve disporre dei criteri di prevenzione del danno previsti dalla normativa, in base ai quali si potrà procedere alla mappatura del territorio secondo classi di sensibilità.

Infine, utilizzando dati di letteratura è possibile fissare valori di soglia cautelativi della massima distanza scalata ammissibile (Figura 23).

Questo approccio consente, nella successiva fase di progettazione, di realizzare valutazioni preliminari sulla possibilità di utilizzare la tecnica D&B nel contesto territoriale indagato.

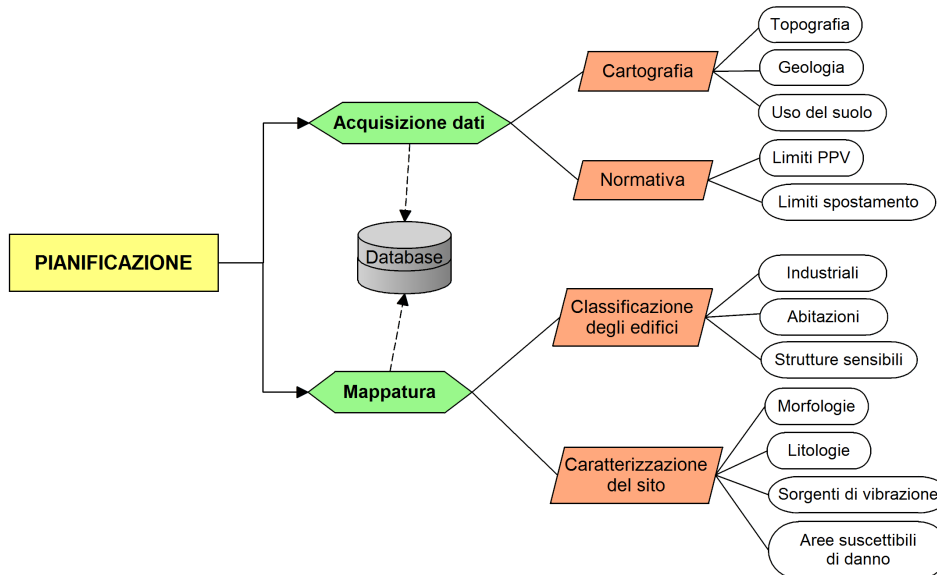


Figura 23 - Contributo innovativo. Schema generale del metodo di indagine a livello di pianificazione. I dati acquisiti ed elaborati vengono inglobati nei database cartografico e strutturale.

3.3.1.2. Progettazione dell'intervento

Durante la fase progettuale è necessario migliorare il livello di conoscenza del territorio, utilizzando:

- carte tecniche regionali, da cui ricavare la sagoma in pianta delle strutture sensibili e la loro classificazione urbanistica (edifici civili, capannoni, chiese, impianti sportivi, ecc);
- carte topografiche di dettaglio, in particolare atte a riprodurre le morfologie dei luoghi secondo quanto previsto dal progetto di coltivazione, per individuare la posizione della sorgente (volata) e determinare con la maggior precisione possibile la distanza percorsa dalla vibrazione indotta;
- carte geologiche e geomorfologiche di dettaglio, per individuare aree omogenee in relazione alla propagazione della vibrazione e progettare efficacemente il sistema di monitoraggio.

Queste informazioni consentono al progettista di operare soddisfacendo i requisiti di tutela imposti dalla normativa e di ottimizzare l'intervento di coltivazione massimizzando la produzione. Individuata la posizione della sorgente è infatti possibile determinare, sulla base del valore di SD acquisito in fase di pianificazione, la massima quantità di carica esplodibile istantaneamente (Q_{max}), utilizzando la formula inversa dell'equazione predittiva adottata. A partire da questo valore si può procedere alla corretta progettazione della volata (Figura 24).

Prima della fase di realizzazione dell'opera, sarà necessario procedere alle consuete attività di verifica dei dati acquisiti. Difatti, le carte a disposizione potrebbero non essere aggiornate, e si dovrà pertanto ricorrere all'uso di ortofoto, foto satellitari e sopralluoghi per ricostruire l'effettivo stato dei luoghi al momento di avviare i lavori di coltivazione.

Come descritto nel capitolo 3.2.2.1.3, diverse attività antropiche e fenomeni naturali (come i sismi ed il vento, ad esempio), possono produrre effetti analoghi a quelli riconducibili alle vibrazioni indotte da volate a cielo aperto, pertanto si dovrà procedere alla redazione di testimoniali di stato per ogni struttura sensibile che potrebbe essere soggetta a danneggiamento, completando il quadro descrittivo dello stato dell'arte.

In base alle informazioni relative alle strutture da proteggere ed alle caratteristiche territoriali, si potrà progettare il sistema di monitoraggio in termini di:

- direzioni principali di misura rispetto alla sorgente;
- tipologia di edificio monitorato (classificazione, geometria, altezza, struttura);
- distanza tra la sorgente e la struttura sensibile;
- variazione del mezzo di propagazione lungo il percorso.

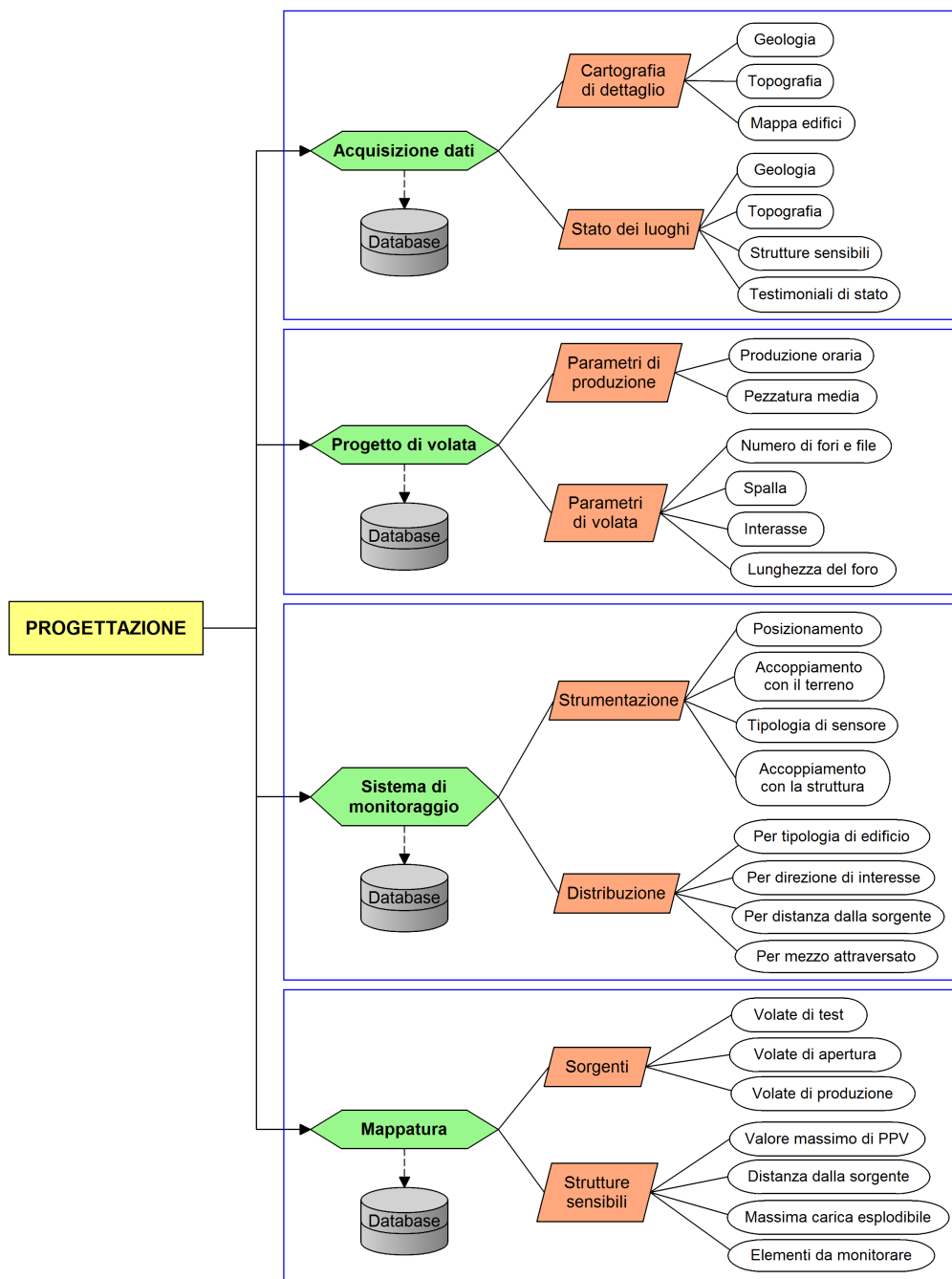


Figura 24 - Contributo innovativo. Schema generale del metodo di indagine a livello di progettazione. I dati cartografici devono avere un dettaglio maggiore rispetto alla fase di pianificazione, ed essere ottenuti da rilievi specifici. In questa fase vengono approfonditi i dettagli del progetto di volata e del sistema di monitoraggio. La mappatura è più puntuale, e fornisce i primi valori di soglia per singoli edifici.

3.3.1.3. Realizzazione dell'intervento

In fase di realizzazione dell'opera (Figura 25) le informazioni acquisite ed i dati elaborati nella precedente fase progettuale consentiranno:

- di installare e gestire in maniera efficiente, efficace ed economica il sistema di monitoraggio;
- di ottimizzare la produzione intervenendo sul progetto di volata, riducendone i tempi di aggiornamento e minimizzando il rischio di danno alle strutture circostanti.

Affinché la realizzazione dell'opera sia correttamente gestita, i dati di letteratura utilizzati per la previsione cautelativa della massima carica esplodibile dovranno essere sostituiti con misure dirette, secondo il progetto del sistema di monitoraggio delle vibrazioni, in modo da migliorare, nel tempo, le prestazioni del progetto di volata in termini produttivi.

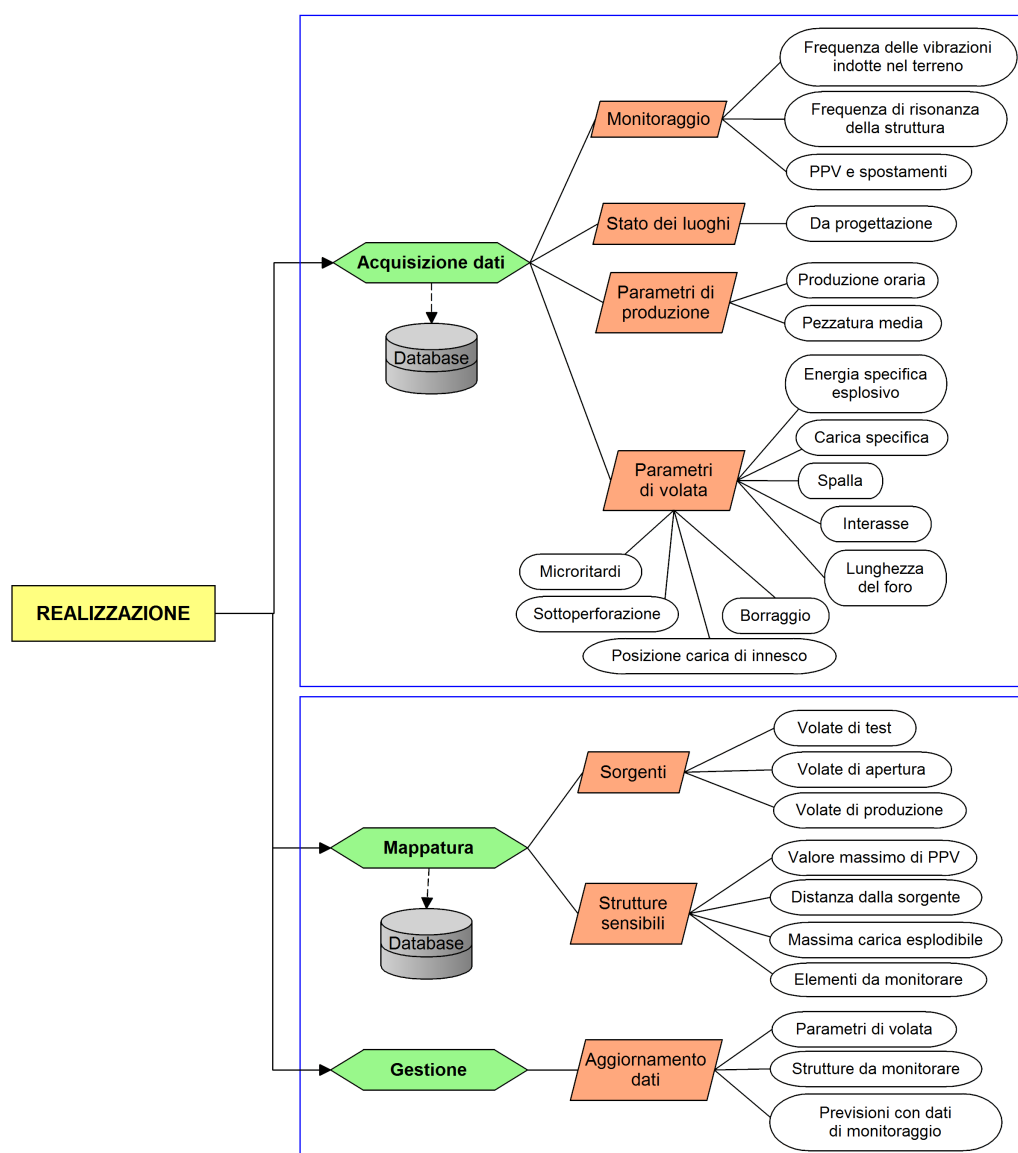


Figura 25 - Contributo innovativo. Schema generale del metodo di indagine a livello di progettazione. Il livello di dettaglio è particolarmente elevato in merito al progetto di volata ed al sistema di monitoraggio, al fine di ottimizzare le prestazioni (produttività e sostenibilità) di entrambi.

Tutte queste operazioni consentono di minimizzare il rischio di danno alle strutture pur massimizzando la produzione di materia prima minerale. Ovviamente, un metodo di indagine così complesso richiede l'utilizzo di idonei strumenti di lavoro, che permettano al pianificatore, al progettista o al direttore dei lavori di elaborare ed aggiornare i dati a disposizione in tempi rapidi, automatizzando le procedure e, conseguentemente, riducendo il rischio di commettere errori di valutazione (facilmente riscontrabili nell'analisi di un fenomeno condizionato da numerosi fattori).

3.3.2. Sistema esperto

Il sistema esperto sviluppato è stato concepito come strumento operativo a supporto dell'applicazione pratica del metodo di indagine appena descritto, in maniera rapida ed efficiente. Configurato come sviluppo di un GIS, ne sfrutta le potenzialità e ne amplia le potenzialità applicative.

Questo strumento prevede e consente:

- l'acquisizione delle mappe di base necessarie allo studio del fenomeno. Queste possono essere scaricate dai portali cartografici degli Enti che li forniscono, oppure essere consultate come servizi WMS e WFS. Qualora disponibili solo in formato cartaceo si potrà procedere alla digitalizzazione e georeferenziazione, operando sempre tramite il GIS utilizzato;
- l'elaborazione di tabelle contenenti i valori di soglia del parametro (spostamento, velocità, accelerazione delle particelle) adottato ai fini preventivi dalla normativa di riferimento. Le tabelle, parte del database specialistico, vengono redatte dal gestore del sistema esperto. È possibile introdurre nuove tabelle per ogni normativa che si intende considerare nell'analisi;
- la creazione e l'aggiornamento delle tabelle relative ai parametri di progetto (produzione, volata, sistema di monitoraggio, ecc).

Oltre alla struttura dei dati, parte fondamentale del sistema esperto sono gli strumenti di calcolo appositamente sviluppati, che consentono di determinare i parametri necessari al corretto studio del fenomeno indagato. In particolare, sono state automatizzate le procedure per il calcolo della massima carica esplosibile, sia in riferimento alle strutture sensibili che per la mappatura di intere aree di interesse.

Nello specifico, una volta acquisiti tutti i dati necessari (mappe e tabelle), selezionati la sorgente ed il riferimento normativo (ad esempio, valore limite di PPV per un determinato range di frequenza), l'utente può:

- determinare il valore limite di SD di riferimento (SD_{max});
- classificare le aree urbanizzate e le singole strutture in base alla normativa considerata;
- generare automaticamente la mappa delle Q_{max} all'interno di un'area precedentemente classificata (e di cui, pertanto, è noto il valore di SD_{max});
- generare automaticamente la mappa delle Q_{max} per ogni struttura considerata e precedentemente classificata.

Le prime due operazioni prevedono l'utilizzo di strumenti GIS standard (interrogazione, estrazione, riclassificazione di dati), mentre le altre costituiscono uno dei contributi del lavoro di ricerca.

3.3.2.1. Strumenti adottati

Il sistema è stato sviluppato utilizzando il GFOSS (Geographical Free Open Source Software) GRASS GIS, ed il database specialistico è stato creato tramite il RDBMS (Relational Database Management System) SQLite.

Gli strumenti di calcolo sono script in linguaggio BASH, ed alcune funzioni sono state sviluppate in linguaggio C (algoritmo per il calcolo della distanza percorsa dalla vibrazione).

3.3.2.2. Struttura del sistema

Il sistema esperto utilizza le funzionalità di rappresentazione spaziale (raster e vettoriale) e geografica di GRASS GIS, e le funzionalità di archiviazione, interrogazione e relazione di SQLite.

I due strumenti funzionano in parallelo, e sono preposti tanto all'acquisizione che all'elaborazione dei dati (Figura 26).

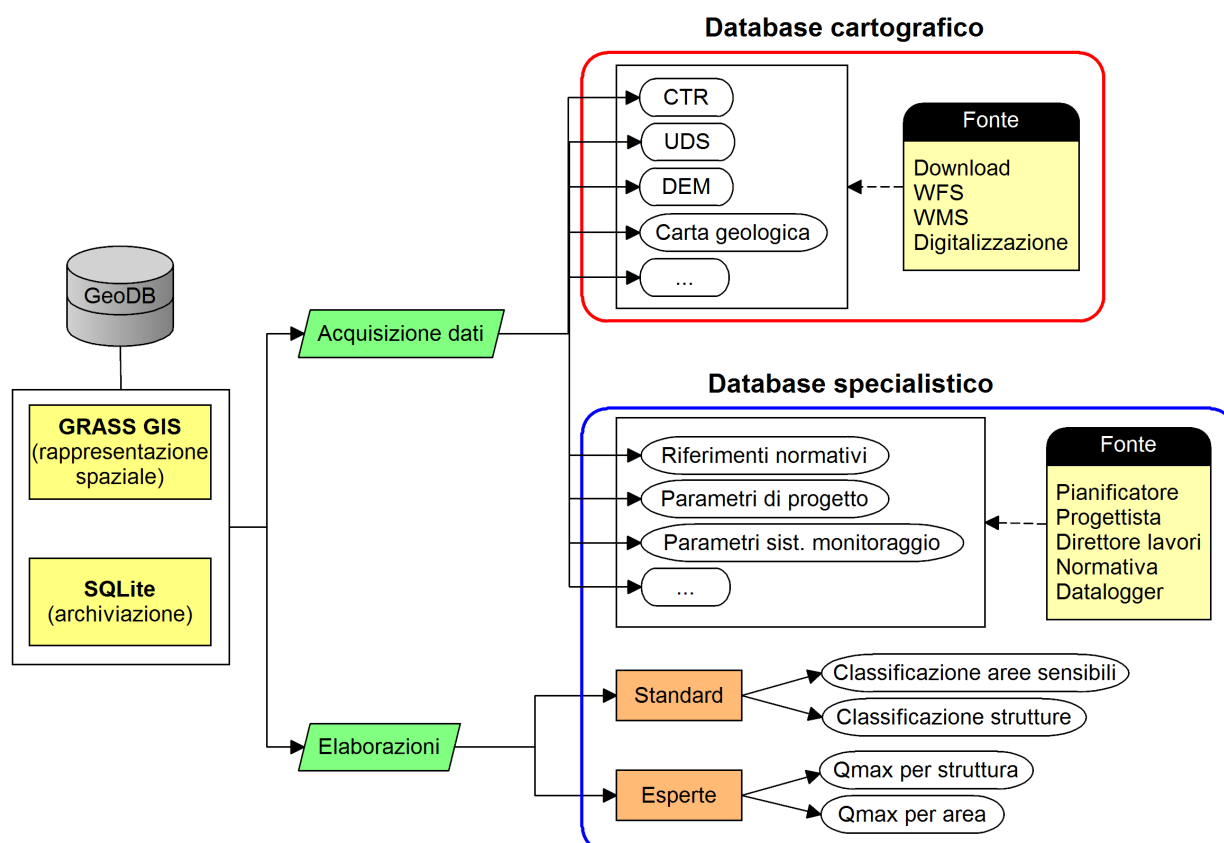


Figura 26 - Sistema esperto. Schema di organizzazione dei dati secondo la tipologia di rappresentazione (spaziale e tabellare). Tutti i dati acquisiti confluiscono nel geodatabase.

3.3.2.3. Applicazione pratica

A dimostrazione della validità del metodo di indagine elaborato e delle potenzialità del sistema esperto sviluppato, si presenta un'applicazione pratica per la pianificazione e la progettazione dell'attività estrattiva in un sito di cava attivo ricadente nel comune di Palo del Colle (BA).

I dati cartografici sono stati acquisiti dal SIT - Regione Puglia, e nello specifico sono stati utilizzati:

- carta di uso del suolo (vettoriale, poligoni, scala 1:5000);
- carta tecnica regionale (vettoriale, linee e poligoni, scala 1:5000);
- modello digitale di elevazione (Digital Elevation Model, DEM, risoluzione 8 m);
- ortofoto a colori del 2008 (risoluzione 0.5 m).

Inoltre, è stata utilizzata la carta geologica in scala 1:100000 realizzata dal Servizio Geologico d'Italia e distribuita come servizio wms tramite il Portale Cartografico Nazionale (www.pcn.minambiente.it).

L'applicazione, seppur relativa ad un caso semplice per quanto riguarda la discontinuità geologica locale, mette in evidenza aspetti non altrimenti rilevabili nell'analisi classica del fenomeno vibratorio, nonché la rapidità con cui i dati possono essere elaborati e aggiornati.

3.3.2.3.1. Descrizione dell'area di indagine

L'area indagata (Figura 27) coincide con il foglio n° 438092 della carta tecnica regionale (CTR) elaborata dalla Regione Puglia in scala 1:5000, e copre un'area di circa 1000 ha (10 km²) tra i Comuni di Modugno, Palo del Colle, Bitetto e Bitonto.

Il sito estrattivo (una cava di calcare coltivata per la produzione di granulati) si trova in posizione centrale, leggermente spostato all'interno del quadrante nord-orientale del foglio, ed ha un'estensione di circa 50 ha (0.5 km²). La S.S. 96 attraversa l'area da E-NE verso W-SW, e separa l'area estrattiva da un'area industriale artigianale, caratterizzata dalla presenza di diversi capannoni, cabine e linee elettriche, piccole aree verdi. Il Comune di Palo del Colle si trova all'estremità sud-occidentale del foglio.

Ad esclusione di una discarica esaurita, posta a NW del sito estrattivo, la restante parte del territorio oggetto di indagine è caratterizzato principalmente dalla presenza di uliveti.

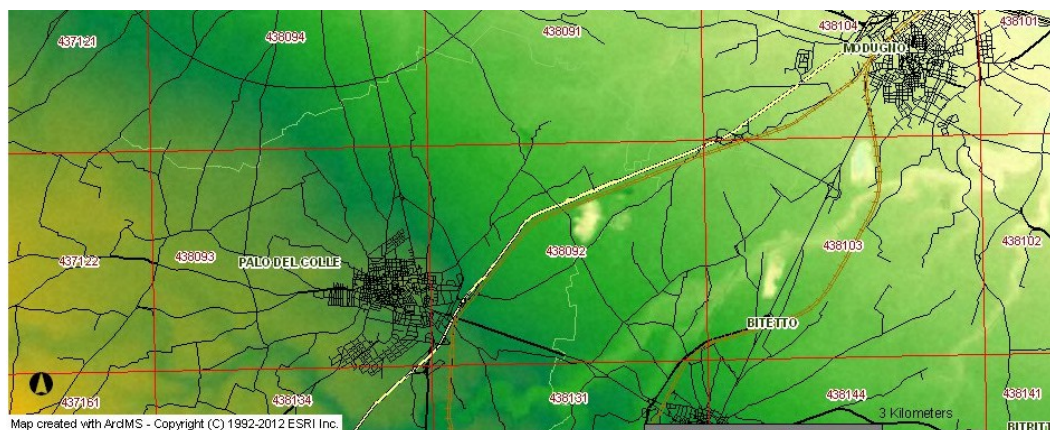


Figura 27 - Localizzazione dell'area d'indagine, rettangolo celeste (fonte: SIT-Regione Puglia).

3.3.2.3.2. Pianificazione

L'obiettivo di questa applicazione è la mappatura del territorio in termini di valore massimo della distanza scalata attraverso l'individuazione:

- delle potenziali sorgenti di vibrazione indotta nel terreno;
- delle aree suscettibili di danno.

Attraverso la carta dell'uso del suolo sono state individuate l'area estrattiva, gli insediamenti industriali e gli insediamenti residenziali (Figura 28), su cui si è concentrata l'indagine.

Definite le aree in cui approfondire l'analisi, è stato analizzato il contesto geologico, rilevando la presenza di “depositi conglomeratici, sabbioso-limosi e calcarenitici variamente cementati”, “calcarei e calcari dolomitici, stratificati o in banchi, variamente fratturati” e “aree di probabile intensa fratturazione” (Figura 29). A questo livello di indagine (pianificazione), si considera il sito geologicamente omogeneo, salvo considerare la presenza diffusa di aree agricole (uliveti) e della zona industriale prospiciente la cava. L'indicazione sulle aree intensamente fratturate sarà di interesse nelle successive fasi di indagine.

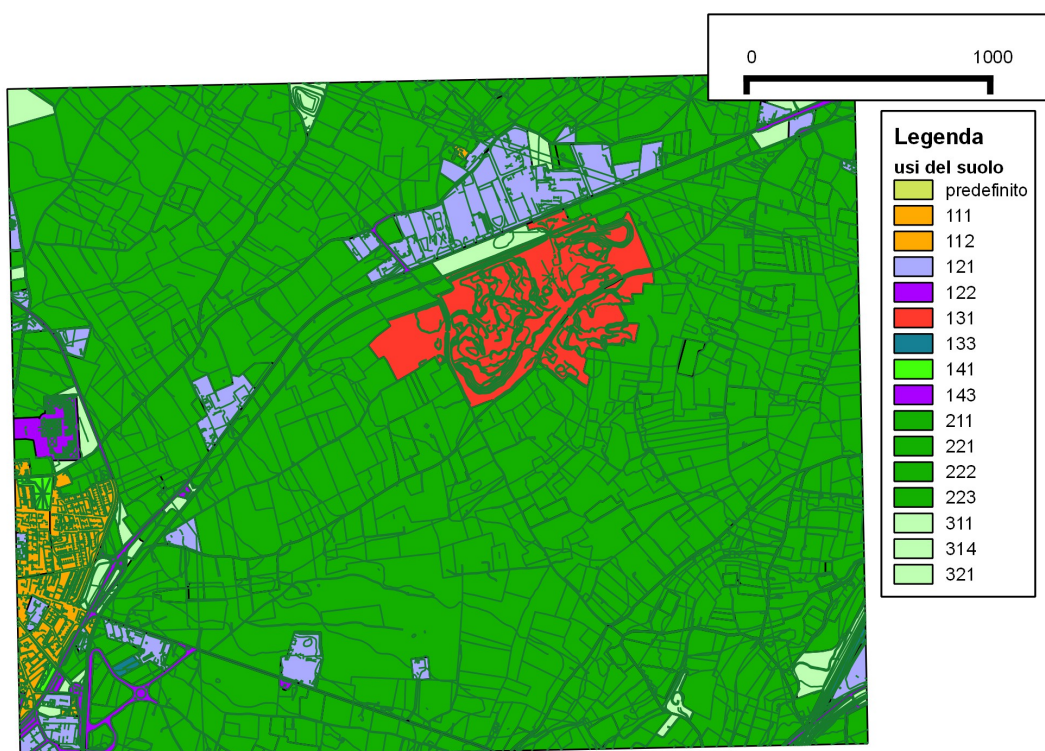


Figura 28 - Applicazione. Mappa dell'uso del suolo, utilizzata per l'individuazione delle aree estrattive (codice 131 in legenda) e delle aree sensibili (codici 111, 112, 121). La scala è relativa alle distanze in metri.

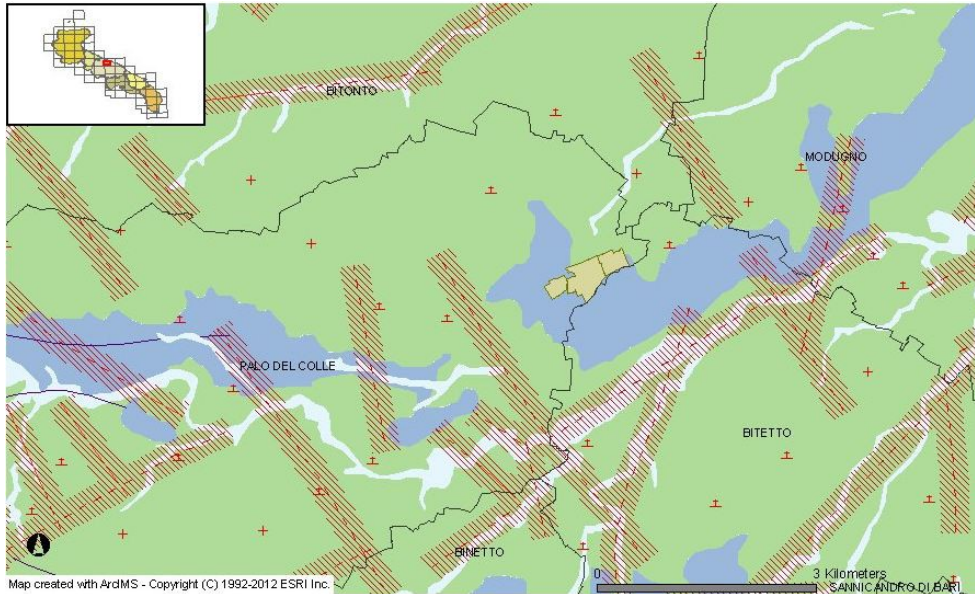


Figura 29 - Applicazione. Mappa geologica dell'area di interesse. L'area estrattiva è campita in marrone chiaro (fonte: SIT-Regione Puglia).

La mappatura dell'area analizzata (Figura 28) è stata realizzata alle seguenti condizioni:

- rappresentazione della propagazione delle vibrazioni indotte secondo l'equazione predittiva elaborata dall'USBM (3.6) per fronte cilindrico;
- coefficienti di regressione (k ed α , Tabella 7) ricavati dalla misura delle vibrazioni in cave di calcare (Carastro e Dantini, 1976) per le tre componenti di velocità (verticale, trasversale e longitudinale);
- riferimento alla normativa DIN 4150 per i valori di soglia della pcpv (Tabella 4 e Figura 18).

Il risultato della fase di pianificazione è, pertanto, l'attribuzione dei valori di SD max riportati in tabella alle aree individuate tramite la carta dell'uso del suolo. Dalle informazioni ottenute non risulta la presenza di strutture afferenti alla classe 3 della DIN 4150.

Frequenza(Hz)	Classe struttura	pcpv lim	K_v	K_l	K_t	α_v	α_l	α_t	SD _{max}
1 ÷ 10	1	20	37,042	68,905	56,517	1,553	1,632	1,654	122,053
	2	5	37,042	68,905	56,517	1,553	1,632	1,654	282,195
	3	3	37,042	68,905	56,517	1,553	1,632	1,654	384,307
10 ÷ 50	1	40	37,042	68,905	56,517	1,553	1,632	1,654	80,269
	2	15	37,042	68,905	56,517	1,553	1,632	1,654	145,239
	3	8	37,042	68,905	56,517	1,553	1,632	1,654	212,393
50 ÷ 100	1	50	37,042	68,905	56,517	1,553	1,632	1,654	70,138
	2	20	37,042	68,905	56,517	1,553	1,632	1,654	122,053
	3	10	37,042	68,905	56,517	1,553	1,632	1,654	185,587

Tabella 7 - Coefficienti di regressione e valori di soglia della SD considerati nell'applicazione pratica (DIN 4150).

3.3.2.3.3. Progettazione

A partire da quanto ottenuto nella precedente fase di pianificazione è possibile, adoperando strati informativi con un maggior livello di dettaglio, approfondire l'analisi del contesto territoriale e migliorare la stima dei valori di soglia della PPV.

La CTR della Regione Puglia riporta la sagoma di tutte le strutture presenti sul territorio, e le classifica in base alla tipologia (edifici abitativi, capannoni, infrastrutture, ecc) con un elevato livello di dettaglio.

Riclassificando le tipologie di strutture presenti nella CTR è possibile ricondurle alle 3 classi individuate dalla DIN 4150, realizzando delle carte tematiche per ogni tipologia di struttura sensibile (Figura 30). Rispetto all'analisi basata sulla carta dell'uso del suolo, in questa fase si evidenzia la presenza di strutture afferenti alla classe 3 (soggette a particolare tutela) e la commistione di strutture appartenenti a classi diverse nella stessa area omogenea ricondotta ad un'unica classe (ci sono, ad esempio, edifici abitativi nell'area industriale-artigianale e viceversa).

Nota la tipologia e la posizione della struttura sensibile, è necessario inserire i parametri progettuali per localizzare le sorgenti della vibrazione indotta (punto rappresentativo della volata).

A questo punto si può procedere al calcolo automatizzato della Q_{max} con riferimento:

- alla classe di sensibilità di ogni singolo edificio censito (ovvero rispetto alla $pcpv$ limite);
- al valore di soglia della SD determinato in riferimento ai dati di letteratura;
- alla distanza tra la sorgente ed i singoli edifici.

Le distanze sono state calcolate (Figure 31, 32 e 33), utilizzando il DEM rilasciato dal SIT - Regione Puglia, utilizzando gli strumenti appositamente sviluppati dall'autore.

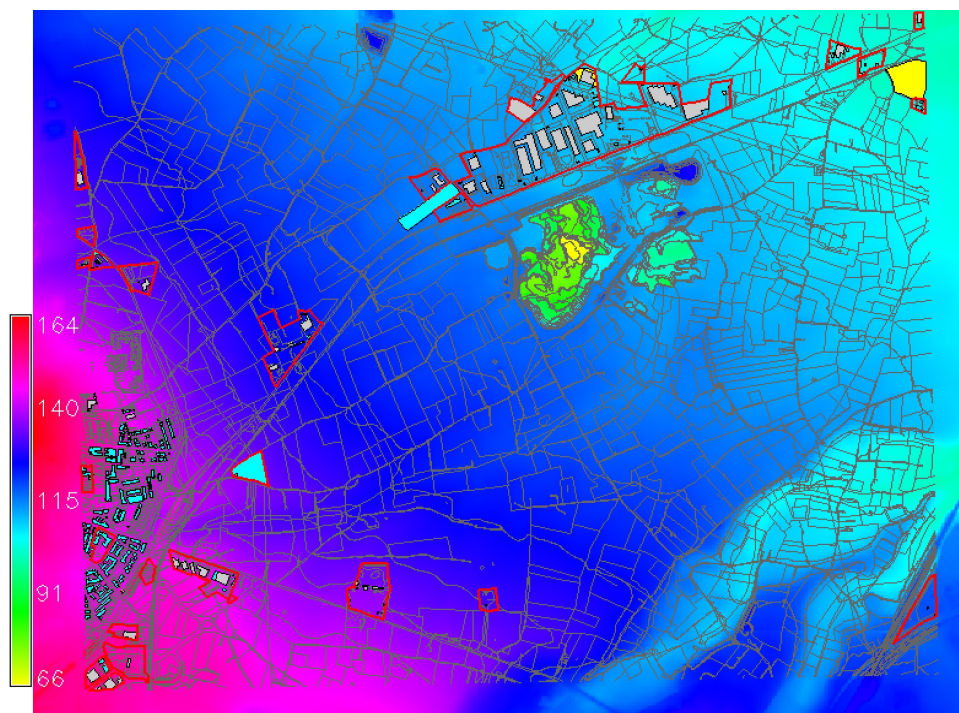


Figura 30 - Mappatura degli edifici sensibili. Sono riportati il DEM dell'area di studio (scala delle quote in m s.l.m.), le aree sensibili (da carta di uso del suolo) e gli edifici in classe 1, 2 e 3 (da CTR in celeste, grigio chiaro e giallo).

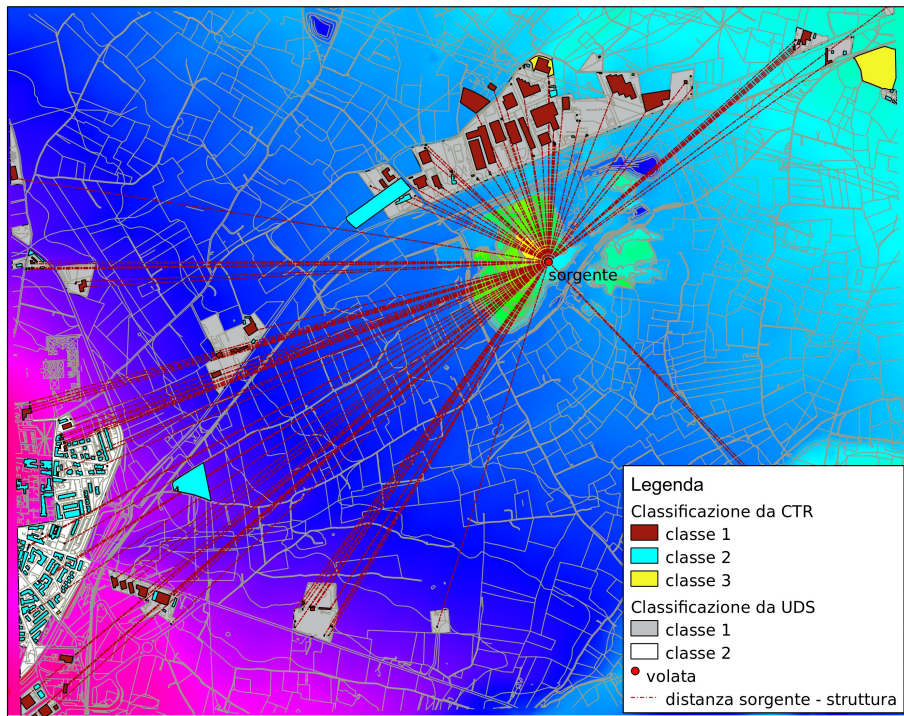


Figura 31 - Applicazione. Tracce delle distanze tra la sorgente di vibrazione indotta (volata) e le strutture in classe 1 precedentemente individuate tramite la CTR. Lungo le tracce è stata calcolata la distanza percorsa dalla vibrazione.

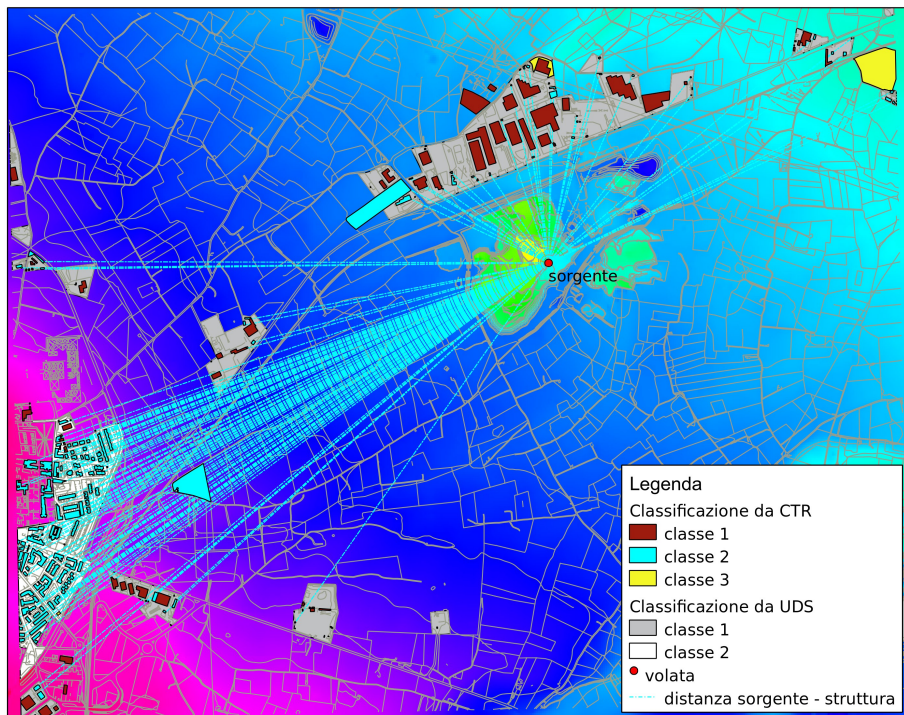


Figura 32 - Applicazione. Tracce delle distanze tra la sorgente di vibrazione indotta (volata) e le strutture in classe 2 precedentemente individuate tramite la CTR.

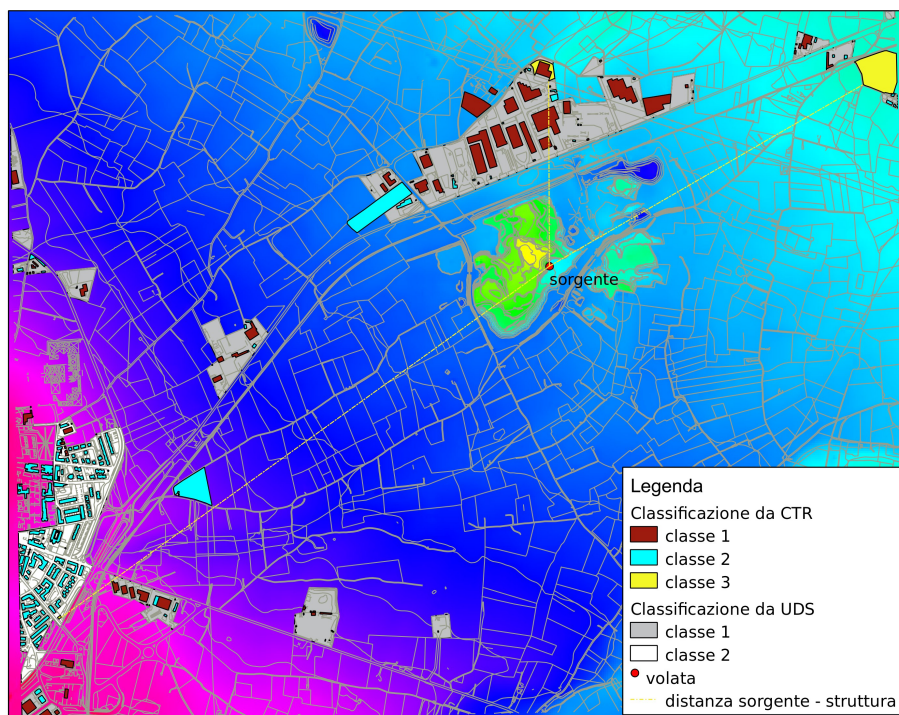


Figura 33 - Applicazione. Tracce delle distanze tra la sorgente di vibrazione indotta (volata) e le strutture in classe 3 precedentemente individuate tramite la CTR.

Realizzate le 3 mappe dei valori di Q_{max} per ogni struttura considerata, si utilizza il valore minimo assoluto quale riferimento per la progettazione (Figure 36, 35 e 34). In questo caso, il minor valore di Q_{max} (2.66 kg) è stato ottenuto per un edificio abitativo (classe 2 DIN 4150, Figura 35).

Qualora non fossero disponibili le informazioni di dettaglio reperite nella CTR, si possono realizzare mappe dei valori limite di Q_{max} all'interno delle aree individuate attraverso la carta di uso del suolo.

A titolo di esempio è stata elaborata la mappa di Q_{max} per edifici in classe 1 all'interno dell'area prospiciente il sito estrattivo (Figura 37).

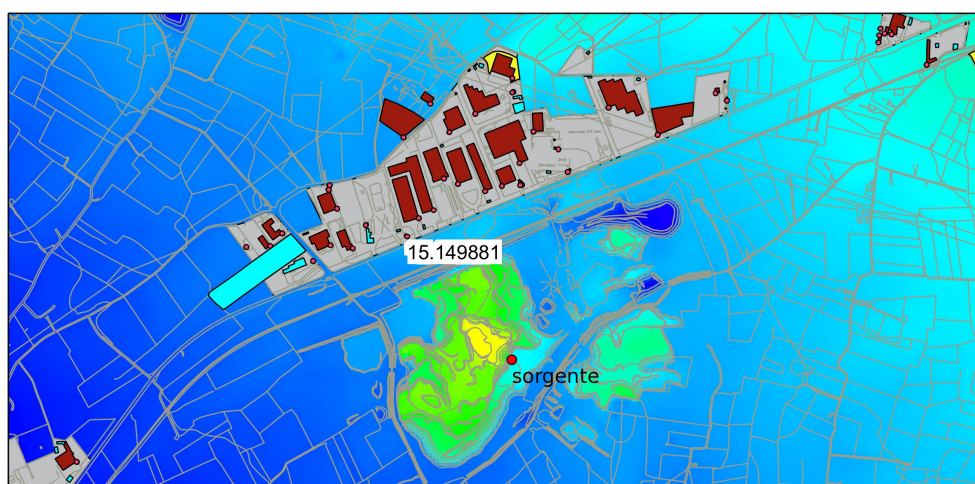


Figura 34 - Applicazione. Dettaglio ed individuazione dell'edificio più sensibile in classe 1 (Q_{max} in kg)

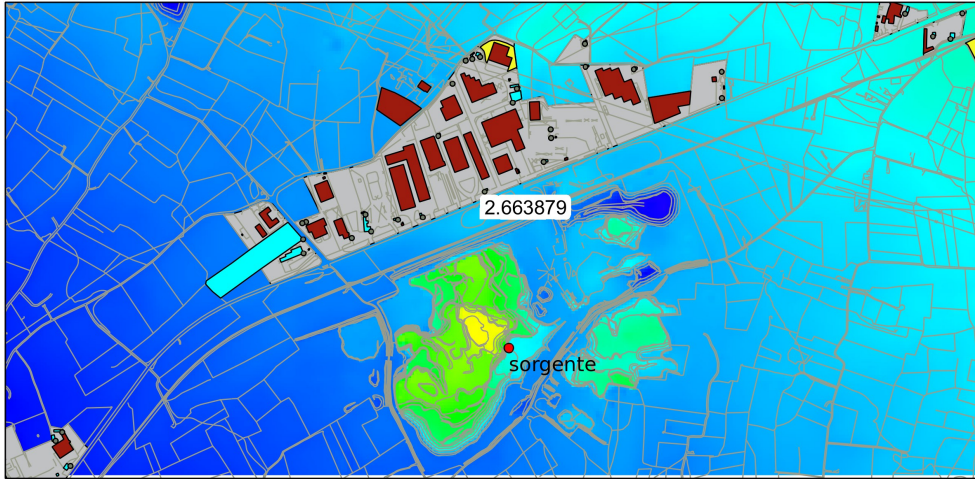


Figura 35 - Applicazione. Dettaglio ed individuazione dell'edificio più sensibile in classe 2 (Q_{max} Q_{max} in kg)

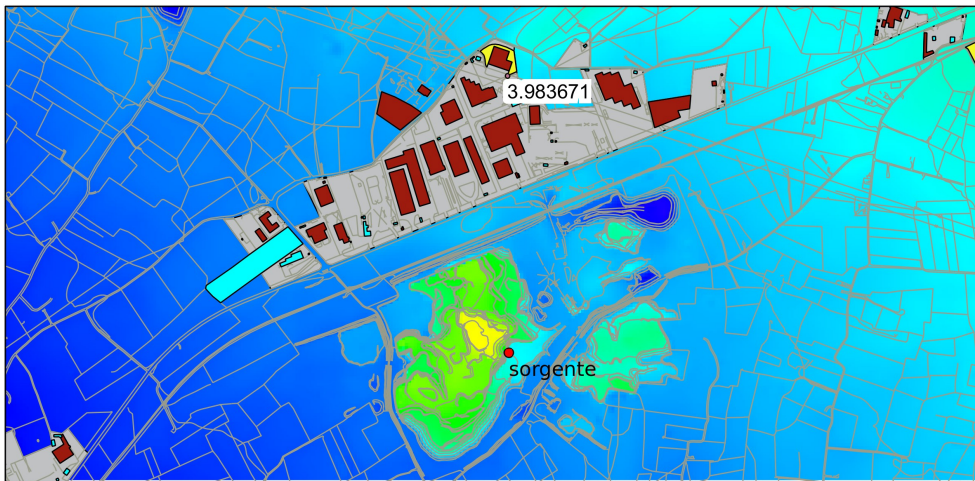


Figura 36 - Applicazione. Dettaglio ed individuazione dell'edificio più sensibile in classe 3 (Q_{max} Q_{max} in kg)

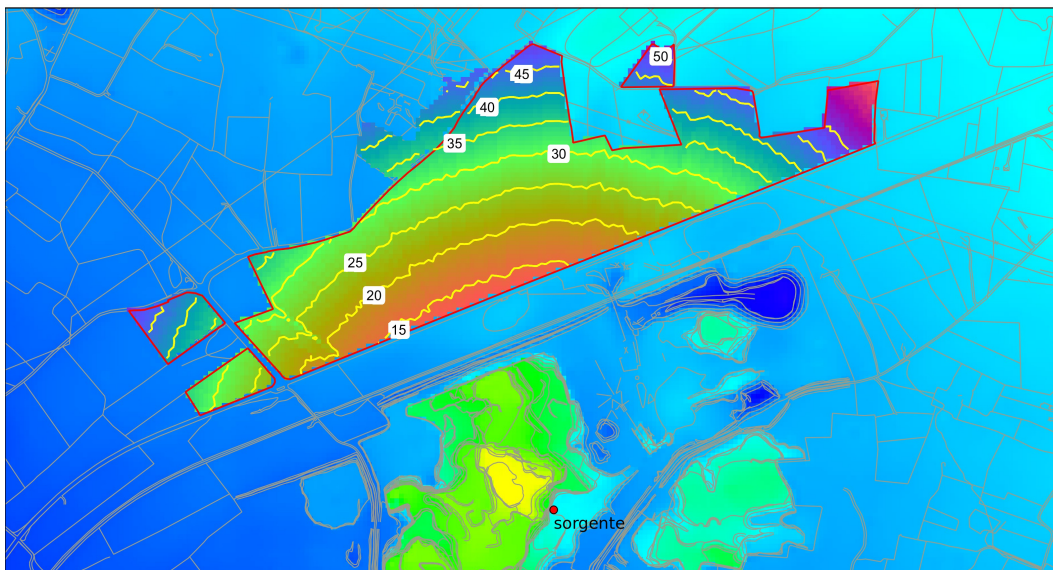


Figura 37 - Mappa della Q_{max} per edifici in classe 1 all'interno dell'area prospiciente il sito estrattivo (perimetrata in rosso). I valori di Q_{max} sono rappresentati sia tramite mappa raster (scala di colori) che vettoriale (linee isovalore). L'immagine mette in risalto l'effetto della topografia sulla distribuzione dei valori misurati.

3.3.2.3.4. *Considerazioni sull'applicazione pratica*

L'applicazione ha messo in evidenza l'importanza, ai fini di una corretta analisi del fenomeno vibratorio in ottica di tutela delle strutture, di avere a disposizione dati aggiornati e dettagliati (l'uso della CTR evidenzia i limiti della carta di uso del suolo, che produce una sottostima del livello di sensibilità territoriale rispetto al fenomeno). In fase di progettazione è sempre indispensabile effettuare una verifica dei dati acquisiti.

La possibilità di determinare i valori di Q_{max} per ogni edificio evita qualsiasi interpretazione erranea delle informazioni disponibili, consentendo l'individuazione della struttura più sensibile in assoluto e di non tralasciare alcun elemento. Nel caso specifico, la compresenza di capannoni industriali, edifici abitativi e strutture sensibili nella stessa area avrebbe messo in difficoltà il progettista, che con molta probabilità avrebbe individuato nella struttura sensibile quella da cui ricavare il valore di Q_{max} di riferimento, a meno di una lunga e dettagliata analisi delle altre strutture. Con gli strumenti sviluppati questa analisi viene effettuata in maniera completamente automatica, prevenendo errori da parte dell'operatore e riducendo drasticamente i tempi di elaborazione della soluzione.

La risoluzione del DEM utilizzato per il calcolo della distanza percorsa dalla vibrazione incide sulla determinazione dei valori di Q_{max} . La possibilità di rappresentare i luoghi, in particolare le complesse geometrie dei siti estrattivi, con un elevato grado di dettaglio migliora sensibilmente la qualità dei risultati ottenuti. La controparte, soprattutto nell'elaborazione di mappe della Q_{max} per intere aree di interesse (come quella in Figura 37), è un notevole aumento degli oneri computazionali e, pertanto, dei tempi di elaborazione.

4. RIQUALIFICAZIONE DI SITI ESTRATTIVI DISMESSI E/O ABBANDONATI

4.1. Introduzione

La presenza sul territorio italiano di siti degradati dall'attività estrattiva (cave abbandonate e/o dismesse) è una diretta conseguenza dell'evoluzione della normativa di settore.

Disciplinato per la prima volta nel 1927 con il Regio Decreto n° 1443, il settore estrattivo in Italia ha sofferto e soffre dell'assenza di una Legge Quadro Nazionale atta a definire modalità, uniformi per tutto il territorio nazionale, di conferimento delle autorizzazioni e delle concessioni per la coltivazione in cava.

Negli anni '70, a seguito della delega dello Stato alle Regioni per la disciplina delle attività estrattive (DPR n° 616/77), ed a compensazione locale dell'assenza della Legge Quadro, furono emanate le prime Leggi Regionali. Alcune di queste subordinavano il rilascio dell'autorizzazione alla presentazione di un progetto di recupero ambientale associato al progetto di coltivazione, ma solo negli anni '90 sono state introdotte misure più rigide e sanzioni per chi non avesse provveduto ad evitare il degrado ambientale prodotto dall'intervento estrattivo

Questo percorso normativo ha dato luogo, per diversi decenni, ad autorizzazioni all'estrazione di minerali di seconda categoria senza obblighi di ripristino dei luoghi, con conseguente proliferazione di siti estrattivi dismessi o abbandonati e la generazione di un notevole danno ambientale.

Con la crescita di una diffusa e moderna sensibilità ambientale, che considera l'Ambiente come bene collettivo di primaria importanza, e con la conseguente emanazione, a partire dagli anni '90, dei Piani Regionali delle Attività Estrattive (PRAE) - previsti dalle Leggi Regionali - vengono imposte la redazione di elaborati tecnici, compensazioni economiche fideiussorie, misure più rigide di controllo dell'attività autorizzata.

Oltretutto, nonostante l'acquisita consapevolezza ambientale abbia portato alla richiesta di un dettagliato progetto di recupero ambientale coordinato con il progetto estrattivo, solo verso la fine degli anni '90 (e principalmente negli ultimi dieci anni) sono state introdotte misure per la realizzazione di interventi di riqualificazione dei siti dismessi ed abbandonati.

L'analisi storica degli interventi di recupero di cave dismesse o abbandonate, progettati e realizzati in Italia ed all'estero, suggerisce di considerare rilevanti aspetti critici, sin dalle prime fasi dell'elaborazione progettuale. Tali aspetti riguardano, tra l'altro, i criteri di valutazione delle tipologie di recupero dei paesaggi e degli ambienti naturali degradati dalle attività estrattive pregresse.

La grande eterogeneità ed il vasto numero di siti estrattivi dismessi ed abbandonati e la singolarità o specificità di ciascuno di essi, insieme alla loro estensione, richiede notevoli investimenti per la riqualificazione funzionale che, di fatto, esclude la possibilità, per la Pubblica Amministrazione, di risolvere il problema attingendo alle proprie risorse finanziarie.

In questo capitolo si presenta il metodo elaborato per selezionare siti estrattivi dismessi e/o abbandonati e determinare i possibili interventi di riqualificazione. Sarà presentata un'analisi dei meccanismi di finanziamento e gestione di tali interventi con capitale privato, e saranno proposte delle linee guida per la realizzazione delle soluzioni tramite forme di partenariato pubblico - privato.

4.2. Modelli di gestione. Il partenariato pubblico - privato

Diversamente da quanto accadeva in passato nei periodi di recessione economica, durante i quali lo Stato Italiano investiva nella realizzazione di opere pubbliche per rilanciare l'economia nazionale, nella prima metà degli anni '90 la spesa pubblica italiana per investimenti ha subito un drastico ridimensionamento (Figura 38). Dal 1995 al 2002, con l'introduzione dell'euro, il trend cambia di segno, ma con un gradiente molto debole rispetto a quanto accadeva in passato. Peraltro, a questo periodo è seguita una nuova riduzione della spesa pubblica che si è protratta fino ad oggi.

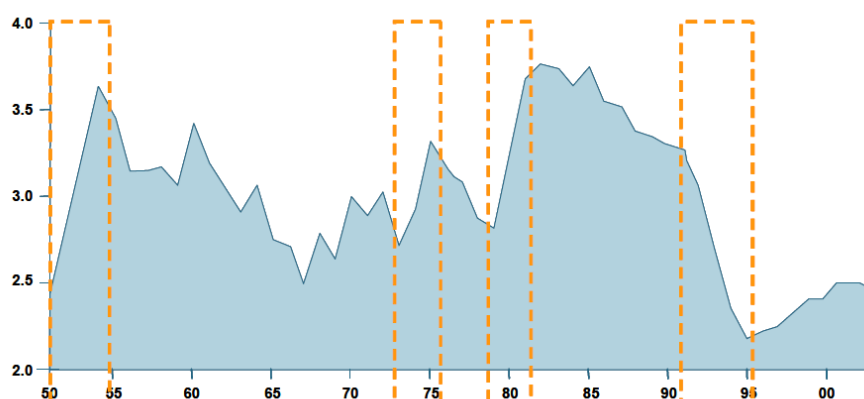


Figura 38 - Investimenti pubblici in Italia tra il 1950 ed il 2003 in percentuale sul PIL (fonte: elaborazione Roland Berger su dati Banca d'Italia e Conti Pubblici Territoriali).

Una delle principali cause di questo trend negativo è la crescente indisponibilità di risorse finanziarie da parte degli Enti Pubblici, conseguentemente impossibilitati ad investire in opere di interesse strategico ed a sostenere l'economia locale.

In questo contesto, il coinvolgimento finanziario dei privati rappresenta un'opportunità non trascurabile per non arrestare la crescita economica e garantire il welfare. Coinvolgimento che non deve escludere la Pubblica Amministrazione dalla gestione del bene pubblico, ma generare un rapporto di collaborazione con il privato (partenariato).

Nella "Comunicazione sui Partenariati Pubblico - Privati" (PPP) del 2005 la Comunità Europea afferma che "l'interesse per queste forme di associazione ... è dovuto, in parte, ai vantaggi che le autorità pubbliche potrebbero trarre dal know-how del settore privato e, in parte, ai vincoli dei bilanci pubblici". Un rapporto simbiotico, dunque, dal quale la Pubblica Amministrazione può trarre utili insegnamenti ed una miglior gestione delle risorse a disposizione.

Il partenariato può realizzarsi secondo diversi modelli di cooperazione pubblico-privato, le cui caratteristiche principali, secondo quanto riportato nel "Libro Verde relativo ai partenariati Pubblico-privati ed al diritto comunitario degli appalti pubblici e delle concessioni" (Bruxelles, 30.04.2004, COM(2004), 327 definitivo), sono (cap. 1.1 comma 2):

- la durata relativamente lunga della collaborazione tra partner pubblico e privato;
- il finanziamento prevalente da parte del privato, con un impiego di risorse finanziarie del partner pubblico solo in casi particolari;

- la definizione specifica del ruolo del partner privato nella realizzazione del progetto;
- la ripartizione dei rischi tra il partner pubblico ed il partner privato, sul quale sono trasferiti i rischi solitamente a carico del settore pubblico.

Dagli accordi di partenariato, pertanto, dovrebbero essere esclusi gli strumenti che prevedono la mera realizzazione di un'opera in cambio di un corrispettivo, quali ad esempio gli appalti pubblici (in realtà contemplati dal Libro Verde). Tipiche forme di partenariato sono le concessioni (di costruzione o di gestione) ed il "Project Financing" (finanza di progetto).

Il libro verde prevede due tipologie principali di PPP:

- **contrattuale:** si esplica attraverso un contratto con il partner privato per la realizzazione o la gestione dell'opera. Al partner privato vengono affidati una o più delle operazioni necessarie (dalla progettazione, al finanziamento, alla realizzazione, al rinnovamento, allo sfruttamento del bene). Si tratta tipicamente di concessioni ed appalti, ma anche di finanza di progetto;
- **istituzionalizzato:** prevede la creazione di un ente misto pubblico-privato (tipicamente una società mista) con lo scopo di fornire un bene od un servizio alla comunità.

In entrambi i casi, il soggetto privato viene selezionato nel rispetto dei principi concorrenziali, per garantire il buon investimento delle risorse pubbliche ed il principio comunitario della parità di trattamento.

La differenza sostanziale tra l'appalto e la concessione è che mentre il primo prevede l'erogazione esclusiva di prestazioni all'amministrazione pubblica in cambio di un corrispettivo per l'attività svolta, la seconda prevede che il privato si assuma il rischio della gestione dell'opera o del servizio, la cui remunerazione deriva dalla vendita all'utente.

In buona sostanza, nel rispetto dei tre elementi caratteristici dei PPP definiti nel Libro Verde, la concessione è la forma contrattuale preferenziale per realizzare opere di pubblica utilità che stimolino l'investitore privato senza pesare eccessivamente sulla spesa pubblica.

Per quanto concerne gli interventi di risanamento dei siti degradati da attività estrattiva, si ritiene più interessante, tra le altre forme di PPP contrattuale, il Finanziamento di Progetto (Project Financing), ovvero la realizzazione di opere pubbliche senza oneri finanziari per la Pubblica Amministrazione, ma con un utile in grado di garantire il ritorno dell'investimento per il privato ed una proficua gestione dell'attività stessa (che è quindi in grado di autofinanziarsi).

I vantaggi di un simile modello di gestione del PPP per l'ente pubblico sono:

- la possibilità di realizzare opere indispensabili per la comunità locale a costi ridotti per la Pubblica Amministrazione;
- l'erogazione del bene o del servizio tramite una struttura imprenditoriale altamente efficiente (stante la necessità, per il privato, di trarre profitto dall'attività svolta), e per un periodo di tempo prolungato (che può arrivare a trenta e più anni);
- la possibilità di focalizzare le risorse sulle attività di controllo (qualità del servizio, erogazione, livelli tariffari).

Tra i PPP istituzionalizzati, invece, i più diffusi sono le società miste e le società di trasformazione urbana. Inizialmente, il quadro legislativo imponeva una partecipazione economica maggioritaria dell'ente pubblico sul partner privato, condizione venuta meno con la L. 498/92.

Le società di trasformazione urbana possono costituirsi per:

- attività di progettazione;
- realizzazione di interventi;
- commercializzazione di aree riqualificate;
- gestione di servizi di pubblica utilità.

Si configurano, pertanto, come entità strettamente legate al ruolo dell'Ente Locale nell'assetto del territorio.

La letteratura specialistica offre numerosi esempi di modelli di gestione mista pubblico-privato secondo le forme di PPP appena descritte, riguardanti diversi campi dell'ingegneria, la gestione dei servizi sul territorio, dei servizi ambientali e delle risorse energetiche, la realizzazione di strutture ed infrastrutture, ecc.

Allo stato attuale delle conoscenze, in Italia non si sono registrate applicazioni significative di modelli di progettazione, realizzazione e gestione mista pubblico-privati nell'ambito di processi o interventi di recupero di cave dismesse o abbandonate. I tentativi posti in essere in alcuni Comuni italiani si sono ridotti, sin dalle prime fasi, alla elaborazione di un'idea progettuale di massima (su vasta scala) finanziata dalla Pubblica Amministrazione con un esborso economico del tutto marginale. Il tentativo di realizzazione della proposta si è poi scontrato con le logiche, di gran lunga prevalenti in Italia, che regolano i rapporti tra amministrazione pubblica e settori industriali dotati di significativa forza di condizionamento delle decisioni politiche.

Un altro significativo ostacolo alla diffusione del partenariato pubblico-privato nel settore estrattivo è rappresentato da quanto disposto dall'art. 45 del REGIO DECRETO 29 Luglio 1927, n. 1443 modificato dall'art. 7, del D.P.R. 28 giugno 1955, n. 620: "*Le cave e le torbiere sono lasciate in disponibilità del proprietario del suolo*". In altri termini, il proprietario del suolo è anche proprietario del minerale di seconda categoria che insiste nella stessa proprietà.

Pertanto, interrotta l'estrazione (per sfavorevoli condizioni di mercato, per termine dell'autorizzazione, ecc.) il titolare della proprietà terriera, che non sia obbligato dalle norme vigenti a porre in essere interventi di recupero ambientale, è determinante nell'attivare o nell'ostacolare processi che prevedono azioni, decise in sede amministrativa, tese a modificare lo stato dei luoghi.

È evidente, pertanto, l'esistenza di notevoli difficoltà (anche di carattere culturale) a varare interventi pubblico - privati che non siano caratterizzati da:

- livello estremamente ridotto degli investimenti pubblici;
- importanti investimenti privati;
- sensibili ritorni economici.

4.2.1. Applicazione dei modelli di PPP al recupero dei siti estrattivi

Qui di seguito sono indicati e commentati sinteticamente i principali aspetti che si devono considerare per individuare i modelli di gestione più idonei per la riqualificazione dei siti degradati da attività estrattiva:

- **Ritorno economico dell'intervento di recupero.** Deve essere più vantaggioso rispetto ad altre forme di investimento affinché sia concretamente e significativamente possibile attrarre capitali privati;
- **Interesse ad intervenire.** L'ente pubblico deve avere un reale e concreto interesse nella realizzazione di interventi di recupero ambientale/territoriale di alto profilo;
- **Potenziale tecnico - economico.** La Pubblica Amministrazione non è, per lo più, dotata di risorse tecniche ed economiche tali da permettergli di impegnarsi finanziariamente in questo tipo di interventi. Conseguentemente, non è in grado di garantire il finanziamento e la realizzazione in proprio delle attività relative alla redazione del progetto definitivo, del progetto esecutivo e, soprattutto, ha limitate possibilità economiche da destinare alla realizzazione dell'intervento. Inoltre, non è in grado di garantire, con adeguate risorse, la corretta gestione "dell'opera realizzata" ed il suo mantenimento (manutenzione ordinaria e straordinaria) in maniera remunerativa o senza gravare sulla spesa pubblica;
- **Funzione politica.** Salvo eccezioni da esaminare con estrema attenzione, l'azione pubblica non può che rimanere confinata a promuovere "politicamente" ed a seguire con attenzione la realizzazione dell'intervento. Le azioni della Pubblica Amministrazione devono essere orientate a:
 - favorire il coinvolgimento attivo di tutta la comunità (onde evitare la costituzione di "comitati" contrari all'iniziativa);
 - individuare soluzioni di reale e sentito interesse per la comunità;
 - favorire, con atti amministrativi (semplificazione degli atti burocratici), la rapida realizzazione delle azioni relative all'intervento;
 - supportare economicamente la prima fase della progettazione (idea progettuale, progetto preliminare);
 - coinvolgere, sin dalle prime fasi, le altre amministrazioni pubbliche che rivestono ruolo di controllo e decisionale;
- **Pubblica utilità.** L'intervento rivolto alla eliminazione del degrado ambientale deve avere valenza di opera di pubblica utilità, la cui realizzazione deve prevedere (pena la non fattibilità) la partecipazione del "soggetto privato" sotto varie forme (finanziamento, progettazione, cessione di terreni, ecc.);
- **Valorizzazione del bene pubblico.** La progettazione, la realizzazione e la gestione dovrebbero essere ricondotte a modelli di "Project Financing", coinvolgendo il soggetto privato ed eventualmente il mercato finanziario nel progetto stesso e spingendolo a trovare il modo di far fruttare per sé e per la comunità il terreno su cui insiste l'insediamento estrattivo degradato ed i terreni limitrofi (di presumibile scarso valore economico a causa dell'assetto territoriale locale degradato, che tale resterebbe per la mancanza di fondi pubblici);

- **Proprietà del sito.** Nel caso in cui i terreni su cui ricade la cava dismessa o abbandonata siano demaniali oppure patrimonio dell'Ente pubblico, l'intervento gode di una situazione più favorevole rispetto a quella in cui i terreni siano di proprietà privata. L'Ente dovrebbe individuare forme per una sua partecipazione attiva che determini un concreto ritorno economico dall'esercizio dell'intervento realizzato;
- **Misure di compensazione.** Nel caso il progetto preveda l'utilizzazione di terreni limitrofi appartenenti a soggetti privati occorre trovare forme di partecipazione, di questi ultimi, ai benefici economici dell'intervento (la partecipazione potrebbe rientrare nel Project Financing). Estrema conseguenza della realizzazione della "opera di pubblica utilità" è l'esproprio con giusto indennizzo;

In definitiva, perché abbia successo un modello di gestione pubblico-privato si ritiene che il sito ed il tipo di intervento debbano essere esaminati e valutati sulla base di un'analisi preliminare di alcuni fattori caratterizzanti quali:

- l'interesse concreto (basato su un'analisi della "storia" e "cultura" locale) dell'Ente Pubblico verso interventi che permettano di riacquisire aree degradate per reinserirle armonicamente nel contesto territoriale e ambientale;
- un favorevole atteggiamento culturale, di un'ampia maggioranza della comunità locale, per interventi di risanamento ambientale e di sviluppo armonico e razionale del territorio;
- la vocazione locale del territorio e la comprovata possibilità di successo di soluzioni nuove o innovative, da realizzare utilizzando la morfologia della cava abbandonata;
- la necessità concreta di interventi riconducibili ad opere di pubblica utilità che possano trovare razionale applicazione nell'area di cava;
- le concrete possibilità di attrazione, da parte degli utenti e quanto meno a livello provinciale, per opere quali ad esempio impianti sportivi, centri culturali, centri turistici;
- il contesto morfologico iniziale (stato morfologico di abbandono della cava e dei terreni limitrofi);
- lo specifico contesto infrastrutturale (vie di comunicazione, approvvigionamento idrico ed energetico, servizi turistici, servizi tecnici, ecc) di cui necessita la soluzione prescelta;
- i parametri condizionanti la fattibilità del tipo di soluzione che si vuole adottare.

Per ogni soluzione occorre esaminare, in primo luogo, le reali possibilità di successo economico (redditività, tempi di ritorno dell'investimento, ecc.), le caratteristiche dell'utenza cui è prevalentemente destinata l'opera, la presenza di un contesto territoriale e culturale favorevole all'insediamento, le possibilità che questo favorisca lo sviluppo e l'espansione economica verso aree più vaste di quella destinata alla soluzione realizzata.

4.3. Selezione e classificazione di siti degradati e di possibili interventi di riqualificazione

Sulla base dell'analisi riportata nel capitolo 4.2.1, sono stati individuati e verranno ora descritti i parametri discriminanti da considerare ai fini di una corretta caratterizzazione tecnica, economica, ambientale e sociale dei siti e degli interventi, ovvero:

- Proprietà del sito (e di eventuali aree limitrofe);
- Interesse della Pubblica Amministrazione;
- Analisi del Contesto;
- Caratterizzazione tecnica (del sito e delle soluzioni);
- Molteplicità delle soluzioni realizzabili;
- Partecipazione sociale;
- Sostenibilità ambientale;
- Fattibilità economica.

La sequenza logico - temporale con cui i parametri discriminanti vengono analizzati è di fondamentale importanza per ottimizzare il processo di selezione e classificazione (dei siti prima e dei possibili interventi di riqualificazione poi), e sarà descritta e commentata nel capitolo 4.3.2. Si ritiene necessario sottolineare come tale sequenza consenta di ottenere i migliori risultati quando l'obiettivo è pianificare interventi di riqualificazione in un territorio a partire da un elenco di siti degradati.

Qualora si voglia semplicemente procedere alla valutazione della sostenibilità (tecnica, ambientale, economica e sociale) di un determinato intervento (o più alternative) da realizzare in un sito specifico, gli stessi parametri discriminanti diventano criteri di valutazione, e devono essere indagati secondo una sequenza differente, più efficiente per questa specifica finalità (valutazione di sostenibilità di una coppia sito - soluzione), descritta nel capitolo 4.4.

4.3.1. Parametri discriminanti

4.3.1.1. Caratterizzazione tecnica dei siti e delle soluzioni

È evidente, ma si ritiene opportuno sottolinearlo, che una stessa soluzione di recupero adottata per due diversi siti di cava può risultare sostenibile in un caso e non sostenibile nell'altro. Pertanto, deve essere valutata la coppia "sito estrattivo - soluzione di recupero" per definire la sostenibilità dell'intervento di riqualificazione.

A tale scopo, è necessario procedere ad una caratterizzazione tecnica del sito e della soluzione di recupero secondo parametri che consentano:

- di definire le caratteristiche del sito degradato, in termini geometrici ed ambientali, per catalogarlo e rendere più agevole l'analisi delle possibili soluzioni di recupero realizzabili;

- di selezionare le condizioni che si dovranno necessariamente soddisfare per la realizzazione di una determinata soluzione di recupero, distinguendole dalle condizioni che influiranno sul livello qualitativo complessivo dell'intervento ma non sulla sua fattibilità;
- di classificare, per ogni sito, i possibili interventi in funzione del numero di parametri soddisfatti, e quindi in termini di qualità della realizzazione.

La caratterizzazione richiede l'acquisizione di numerosi parametri e la loro attribuzione ai siti considerati dall'indagine, prevalentemente adoperando i dati disponibili nei sistemi informativi territoriali (nazionali o regionali). Per ogni soluzione di recupero censita, agli stessi parametri dovrà essere attribuito un valore (o un range di valori) ammissibile perché l'intervento sia realizzabile.

I parametri considerati fondamentali per la descrizione e caratterizzazione dei siti e delle soluzioni sono i seguenti:

- tipologia e morfologia del sito;
- litologia;
- geometria;
- stato di rilascio;
- idrologia;
- idrogeologia;
- climatologia (anemometria, eliometria, termoigrometria);
- proprietà del massiccio:
 - geomeccaniche;
 - mineralogiche;
 - idrauliche;
- distanze:
 - da aree sensibili;
 - da infrastrutture;
- vincoli.

Per ogni sito sarà compilata una scheda in cui vengono riportati i valori rinvenuti per ognuno dei suddetti parametri, come descritti in Figura 39. Questa scheda sarà confrontata con l'omologa realizzata per le soluzioni censite, in cui i valori assegnati ai diversi parametri rappresentano i requisiti da soddisfare perché la specifica soluzione sia realizzabile. Stante l'estrema varietà delle soluzioni di recupero, è necessario il coinvolgimento di esperti di diversi settori per definirne correttamente i requisiti.

Il confronto tra la scheda del sito e quella della soluzione darà luogo ad un indice rappresentativo della compatibilità tra le caratteristiche del sito e quanto richiesto dalla soluzione.

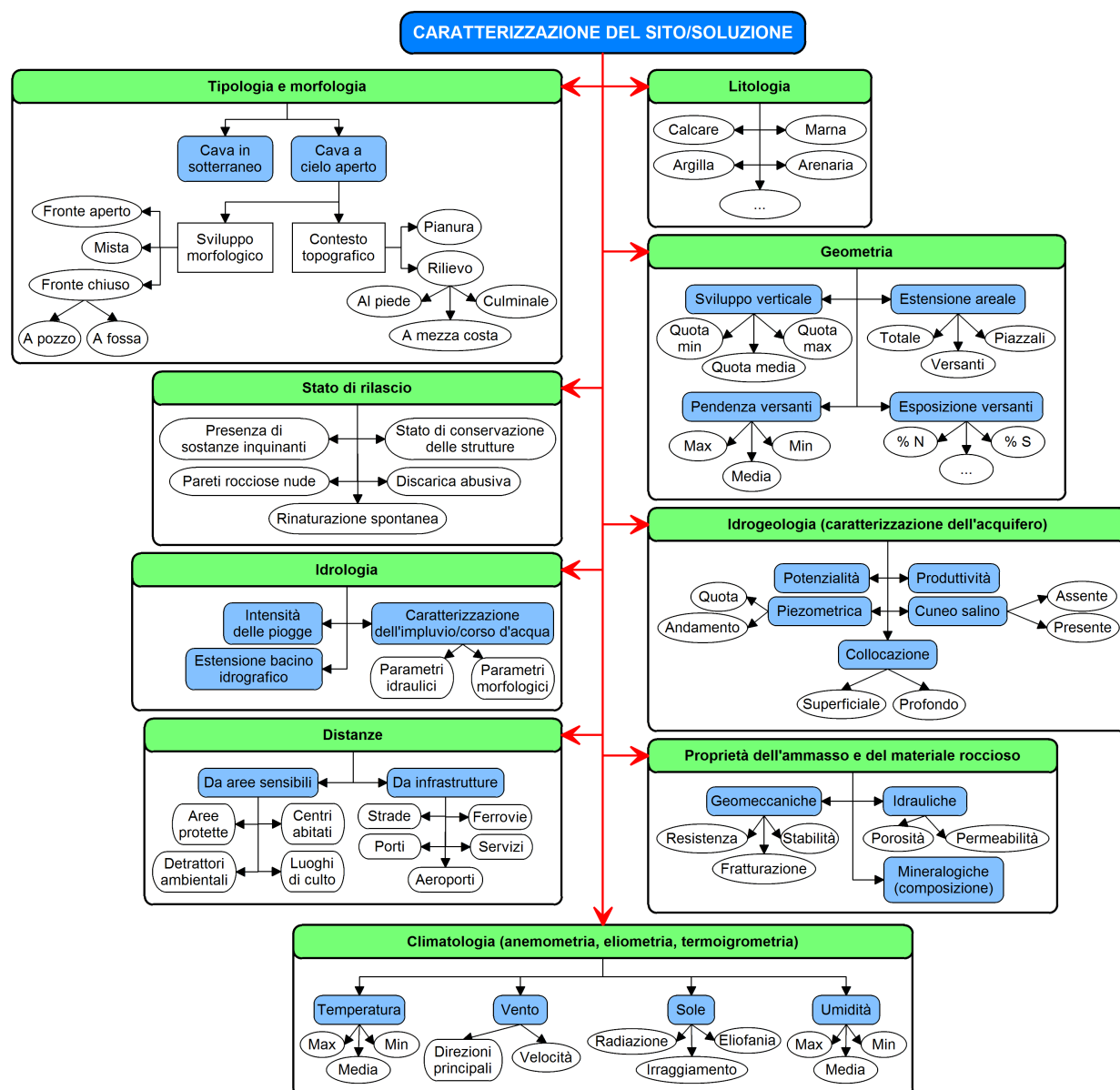


Figura 39 - Caratterizzazione del sito e dell'intervento. Parametri da acquisire per descrivere i siti degradati e gli interventi di recupero, al fine di verificarne la compatibilità in fase di scelta della soluzione di recupero del sito di interesse.

4.3.1.1.1. Tipologia e morfologia

In prima istanza è necessario definire la cava in base ai caratteri morfologici ed organizzativi ed alla posizione topografica, distinguendo:

- cave a cielo aperto:
 - contesto topografico:
 - cave in sito pianeggiante;
 - cave al piede di un rilievo;

- cave a mezzacosta di un rilievo;
- cave sulla sommità di un rilievo;
- sviluppo morfologico:
 - a fronte aperto;
 - a fronte chiuso:
 - a fossa;
 - a pozzo;
 - sviluppo misto;
- cave in sottterraneo².

4.3.1.1.2. Litologia

La conoscenza della litologia consente di ottenere alcune informazioni utili a discriminare le soluzioni di recupero realizzabili. In particolare, saranno le caratteristiche del litotipo a determinarne l'idoneità rispetto a specifici interventi (ad esempio, bassa o nulla permeabilità nel caso si valuti la realizzazione di un vaso idrico o sia comunque necessario tutelare le falde idriche).

La litologia è rinvenibile attraverso specifiche mappe elaborate dalla Pubblica Amministrazione. Qualora tali mappe non fossero disponibili, è necessario recuperare l'informazione attraverso i dati storici sulle coltivazioni pregresse o provvedere ad opportuni sopralluoghi geologici.

4.3.1.1.3. Geometria

La geometria del sito e quella richiesta dalla soluzione di recupero sono fondamentali per valutare l'adeguatezza della coppia "sito - soluzione", e deve essere caratterizzata in termini di:

- estensione areale:
 - totale;
 - dei piazzali di cava;
 - dei versanti interessati dallo scavo;
- sviluppo verticale dello scavo:
 - quota massima;
 - quota minima;
- pendenza dei versanti (fronti di cava abbandonati):
 - valore massimo;
 - valore minimo;

² Nella trattazione del tema ci si soffermerà sugli interventi relativi a cave a cielo aperto, e pertanto non saranno approfonditi gli aspetti legati alle cave in sottterraneo.

- valore medio;
- esposizione dei versanti (fronti di cava abbandonati):
 - immersione ed inclinazione medie per ogni versante;
 - orientazione statistica dei fronti.

Qualora non ci sia corrispondenza tra le geometrie richieste dalla soluzione e quelle che caratterizzano il sito, si potranno valutare interventi di rimodellamento con parziale estrazione di materiale roccioso, per quanto possibile da riutilizzare nella realizzazione dell'intervento di riqualificazione. Interventi di questo tipo sono spesso necessari in presenza di più siti degradati confinanti o ravvicinati, e possono anche portare ad una ricoltivazione del giacimento (sempre finalizzata al recupero ambientale, ma comunque con effettivo ritorno economico).

4.3.1.1.4. Stato di rilascio del sito

Le condizioni in cui si trova il sito possono favorire o meno la realizzazione di una determinata soluzione di recupero. È quindi necessario descrivere lo stato attuale, che può essere espresso in termini di:

- livello (%) di rinaturazione spontanea dell'area di cava;
- presenza di discariche abusive;
- presenza di sostanze contaminanti e/o dannose per la salute;
- stato di conservazione delle pertinenze (uffici, depositi, impianti, ecc);
- presenza di fronti di scavo non aggrediti da vegetazione spontanea.

Lo stato del sito influisce sia nel definire l'opportunità di un intervento (alcuni siti rinaturalizzati spontaneamente rappresentano microclimi o habitat potenzialmente oggetto di tutela), sia nella valutazione degli oneri da sostenere per un corretto recupero del sito.

4.3.1.1.5. Idrologia

L'idrologia può incidere sulla scelta di una determinata soluzione tanto in termini di "interferenza" (conseguenze dell'intervento sull'idrologia locale) quanto in termini di "interazione positiva" (necessità di un certo regime idrologico per la realizzazione della soluzione scelta).

A tal fine, è necessario acquisire informazioni in merito a:

- intensità delle piogge nell'area di interesse;
- bacino idrografico che interessa l'area oggetto di valutazione;
- parametri caratterizzanti i corsi d'acqua o eventuali impluvi:
 - morfologici;
 - idraulici.

4.3.1.1.6. Idrogeologia

È di fondamentale importanza, nella selezione dell'intervento da realizzare, provvedere ad un'attenta descrizione dell'acquifero, la cui presenza/assenza (quest'ultima intesa come acquifero profondo e non in comunicazione con la superficie) e le cui caratteristiche specifiche possono influenzare tanto la possibilità quanto l'opportunità di realizzare l'intervento.

L'acquifero può essere descritto in termini di:

- collocazione (superficiale/profondo);
- altezza ed andamento della superficie piezometrica;
- estensione e caratteristiche del reticolo idrodinamico;
- sua potenzialità;
- sua produttività;
- livello di contaminazione;
- presenza del cuneo salino.

4.3.1.1.7. Climatologia

Le caratteristiche climatiche del sito possono avere un ruolo determinante nella scelta di alcuni interventi di riqualificazione. Sarà pertanto necessario caratterizzare i principali fattori climatici, ovvero:

- vento (anemometria):
 - direzioni principali di provenienza;
 - velocità media e di raffica;
- sole (eliometria):
 - radiazione solare;
 - irraggiamento;
 - eliofania.
- temperatura ed umidità (termoigrometria).

4.3.1.1.8. Proprietà dell'ammasso e del materiale roccioso

Molte soluzioni devono considerare anche le caratteristiche meccaniche del materiale roccioso o del minerale presente nel sito oggetto di valutazione (possiamo considerare questo parametro alla stregua di un approfondimento sulla litologia), pertanto è necessario qualificare e quantificare le proprietà:

- geomeccaniche;
 - stato di fratturazione (immersione, inclinazione, spaziatura, distribuzione statistica dei giunti, caratteristiche meccaniche, ecc.);

- stabilità dei fronti;
- resistenza meccanica;
- mineralogiche/petrografiche:
 - composizione;
- idrauliche:
 - permeabilità;
 - porosità.

Appare evidente che queste proprietà richiedono prove e rilievi specifici, non acquisibili tramite mappe rappresentative di vaste aree territoriali. Qualora non fossero disponibili i documenti archiviati a seguito delle precedenti coltivazioni del giacimento, si dovrà procedere all'acquisizione diretta.

4.3.1.1.9. Distanza del sito da aree sensibili e da infrastrutture

Soluzioni apparentemente realizzabili in siti con opportune caratteristiche geometriche e ambientali, potrebbero rivelarsi inattuabili in assenza di adeguate infrastrutture di trasporto (strade, ferrovie, porti, aeroporti) e di servizio (officine, alberghi, ristoranti, attività commerciali, ecc.). Analogamente, la presenza di determinate aree sensibili (centri abitati, luoghi di culto, detratatori ambientali, aree protette) può incidere favorevolmente od ostativamente sulla fattibilità dell'intervento selezionato per un determinato sito.

4.3.1.1.10. Considerazioni sulla caratterizzazione tecnica

Poiché il numero di siti degradati potrebbe essere molto elevato, la caratterizzazione proposta è realizzabile solo disponendo delle informazioni necessarie su tutto il territorio oggetto di indagine e di opportuni strumenti informatici per l'automatizzazione del processo. Si tratta, difatti, di estrarre diverse informazioni da mappe e tabelle ed attribuirle all'area di intervento. Qualora le informazioni richieste siano frammentarie o insufficienti, sarà necessario procedere ad una preventiva selezione finalizzata a ridurre il numero di siti da caratterizzare. D'altro canto, come già detto nel capitolo 4.2.1, un approccio efficiente al tema trattato non può prescindere da una valutazione dell'opportunità di intervenire su uno specifico sito, stante la necessità di attrarre capitali privati nell'interesse della comunità locale.

Anche in assenza di un sistema esperto e delle informazioni necessarie si dovrà, comunque, procedere alla creazione di un database delle soluzioni di recupero ed alla caratterizzazione di ognuna di esse. Sebbene onerosa al principio, questa operazione consentirà, successivamente, di identificare in tempi molto rapidi le soluzioni realizzabili in un sito degradato, e sarà rapidamente aggiornabile qualora dovessero essere annoverati nuovi interventi di riqualificazione o qualora fosse aggiornato l'elenco dei siti degradati.

4.3.1.2. Proprietà del sito

Il punto di partenza per la selezione, dal vasto numero di siti dismessi e/o abbandonati, di poche aree degradate su cui intervenire è la determinazione della proprietà catastale del sito, informazione che va ricercata nel catasto regionale.

Qualora il sito fosse di proprietà della Pubblica Amministrazione, accertato il reale interesse di questa per l'intervento, si verificherebbe la migliore condizione auspicabile (elevato valore in fase di valutazione).

Nel caso in cui il sito fosse in parte o in toto di proprietà privata o di altre Pubbliche Amministrazioni, la necessità di interfacciare ed armonizzare interessi e soggetti diversi introduce complicazioni (potenzialmente risolvibili) in termini di possibilità di realizzare l'intervento, crescendo significativamente il livello di complessità con il numero di soggetti coinvolti (Figura 40).

In generale, a meno della coesistenza di particolari condizioni di degrado diffuso, non imputabili esclusivamente all'attività estrattiva, la titolarità ad intervenire deve essere giustificata dal possesso del fondo da riqualificare. Ciò significa che, escludendo gli interventi di pubblica utilità e pubblica sicurezza, in questa fase dell'indagine devono essere selezionati i siti di proprietà (anche parziale) della Pubblica Amministrazione.

Individuati i soggetti proprietari del sito degradato è necessario determinare il livello di gradimento e di interesse alla realizzazione dell'intervento di riqualificazione. I proprietari potrebbero esprimersi favorevolmente, opporsi o essere indifferenti ad operare nel sito degradato.

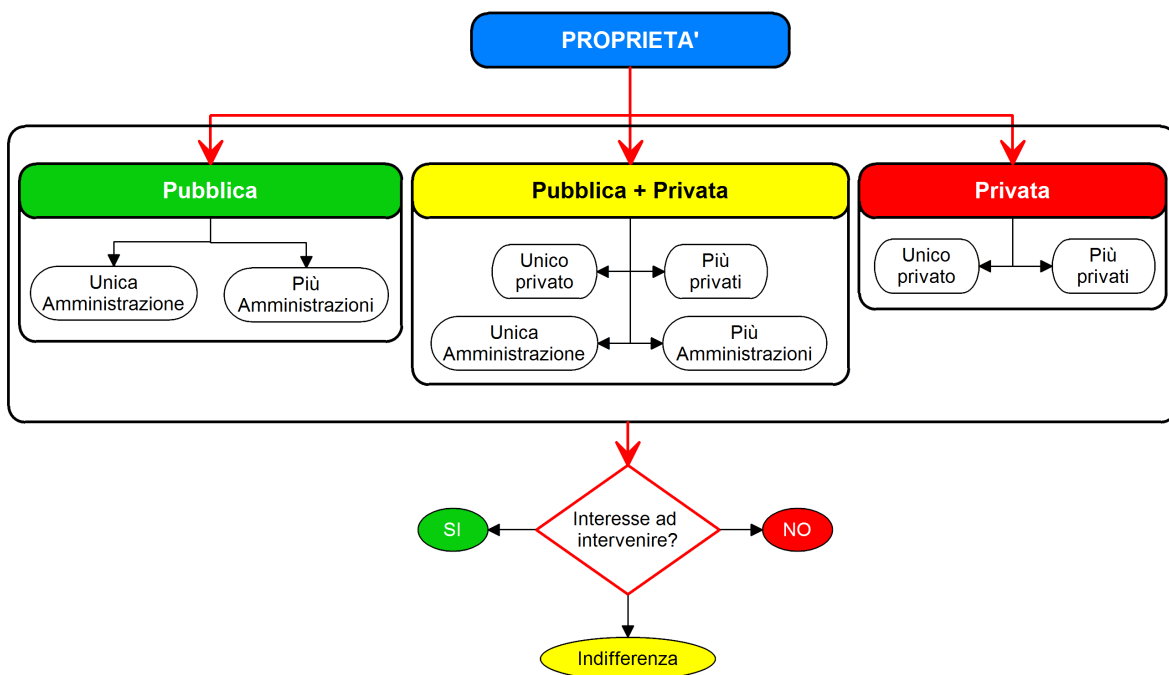


Figura 40 - Proprietà. Il parametro è di fondamentale importanza nella selezione dei siti su cui è opportuno programmare interventi di riqualificazione.

Una volta selezionati i siti in cui si reputa opportuno intervenire (sulla base degli altri parametri discriminanti), nel momento in cui si dovrà operare la scelta tra diversi tipi di intervento realizzabili, e nel caso in cui l'intervento stesso richieda il coinvolgimento di un'area più vasta di quella del sito estrattivo,

occorrerà riprendere in considerazione il parametro “proprietà” con riferimento alle particelle catastali limitrofe a quelle occupate dalla cava.

L'analisi di questo parametro discriminante impone necessariamente di avere la disponibilità di due tipi di informazioni:

- mappa dei siti estrattivi dismessi e/o abbandonati: questa carta deve contenere i perimetri delle aree di cava e relative pertinenze, che nel loro insieme costituiscono il “sito degradato”;
- mappa delle proprietà catastali: questa carta, associata ad una tabella degli attributi che riporti i dati dei proprietari, sovrapposta alla precedente consente di identificare automaticamente le proprietà insistenti sul sito oggetto di indagine.

Affinché sia possibile gestire tramite un sistema informativo territoriale queste informazioni, è necessario che le stesse siano già disponibili nel formato opportuno.

4.3.1.2.1. *Casi di studio*

Ogni sito estrattivo, considerata la generale vasta estensione del territorio occupato, coinvolge solitamente numerose particelle catastali, a volte proprietà di un unico soggetto, più spesso un mix di proprietà e di disponibilità acquisite con contratti di affitto. Quest'ultima condizione generalmente solleva problemi complessi, se non insormontabili, rispetto alla fattibilità di un'operazione di recupero dell'area dismessa e comporta maggiori oneri per l'investitore.

Un esempio di come la proprietà delle aree interessate dal progetto influisca sulla possibilità di realizzare un determinato intervento di recupero è il Piano di riqualificazione del Comune di Montecorvino Pugliano (SA). L'Amministrazione Comunale ha deciso di riqualificare una porzione di territorio ampia 300 ha (3 km²) con un progetto di rimodellamento morfologico finalizzato ad un razionale sfruttamento dei giacimenti di argilla e calcare ed al recupero funzionale del territorio con riusi agricoli e tecnologici (Figura 41).

Il Piano prevedeva:

- il coinvolgimento delle proprietà pubbliche e private, imponendo espropri per pubblica utilità finalizzati alla sua corretta realizzazione;
- una concertazione con i cavaatori e con i proprietari terrieri, al fine di minimizzare gli effetti negativi e rendere partecipe l'intera comunità.

L'elevata estensione dell'area interessata e, di conseguenza, l'elevato numero di soggetti (ed interessi) coinvolti, ha portato ad un fallimento del Piano di riqualificazione, che si è ridotto alla realizzazione di singoli interventi disarmonici ed incoerenti rispetto alle indicazioni del Piano stesso.

Affinché, in un contesto simile, sia possibile perseguire l'obiettivo di una pianificazione sostenibile bisogna adottare un approccio più rigoroso che tenga conto, oltre agli obiettivi di carattere tecnico ed ambientale, delle necessarie misure di compensazione, incentivazione e controllo.

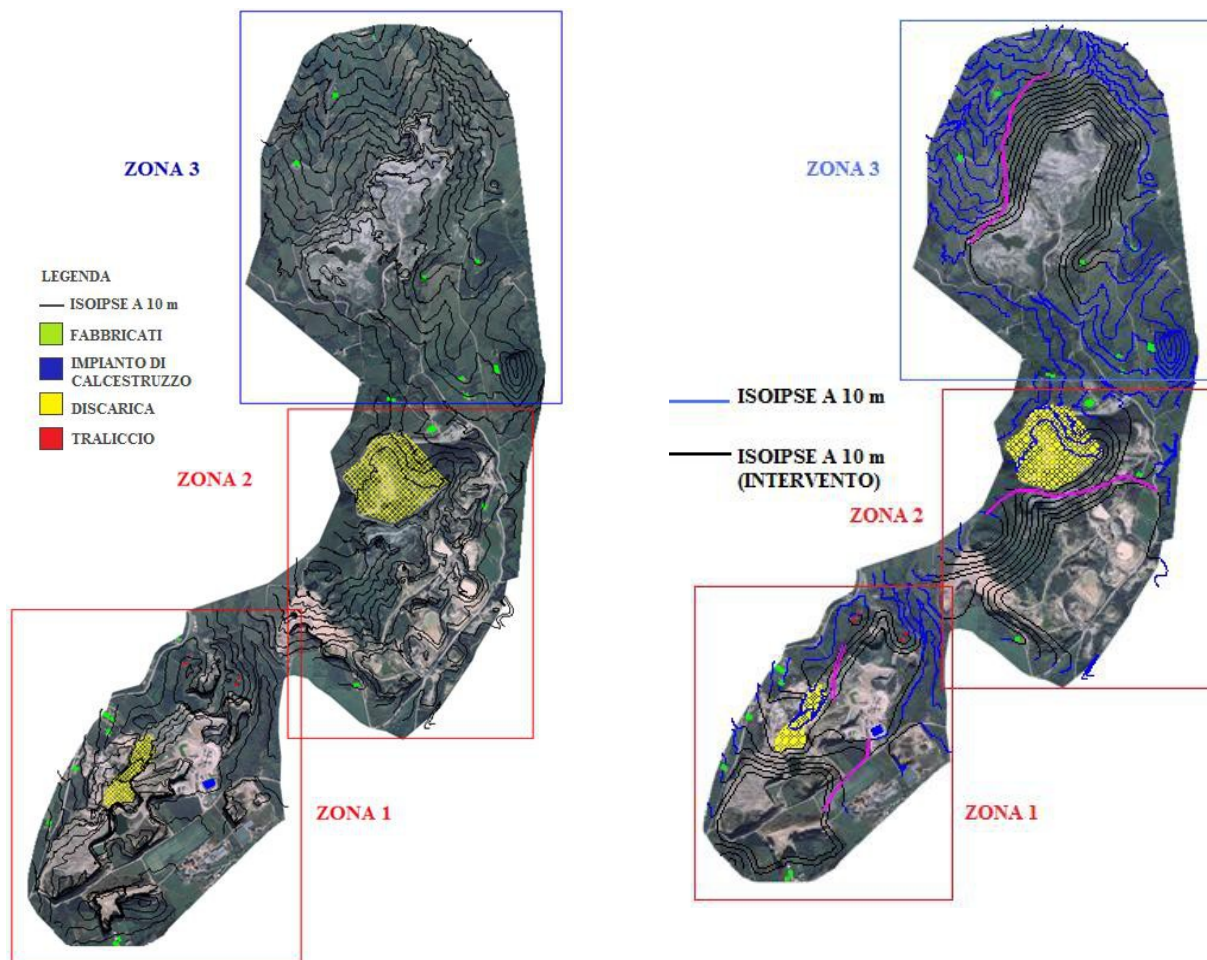


Figura 41 - Stato di fatto e stato di progetto del Piano di riqualificazione ambientale del Comune di Montecorvino Pugliano

4.3.1.3. Interesse della Pubblica Amministrazione

Il soggetto che propone il risanamento (molto probabilmente, ma non esclusivamente, una Pubblica Amministrazione tra Comune, Provincia e Regione) deve sondare il parere degli altri soggetti interessati (Figura 42), che deve essere determinato dall'analisi di Piani, Programmi, Leggi, norme e regolamenti vigenti (che descrivono l'assetto territoriale e gli obiettivi di sviluppo prefissati, nonché i vincoli e gli incentivi alla realizzazione di determinati interventi) ma anche in considerazione delle Politiche ambientali, sociali, di sviluppo a scala locale, nazionale ed europea (ricavandone indicazioni sulle prospettive future nella gestione e nell'amministrazione del territorio).

Da queste analisi emergeranno condizioni e vincoli (favorevoli e/o ostativi) che incideranno sulla possibilità di realizzare determinati interventi, e che consentiranno di definire il potenziale interesse, disinteresse o la contrarietà ad intervenire sul sito indagato.

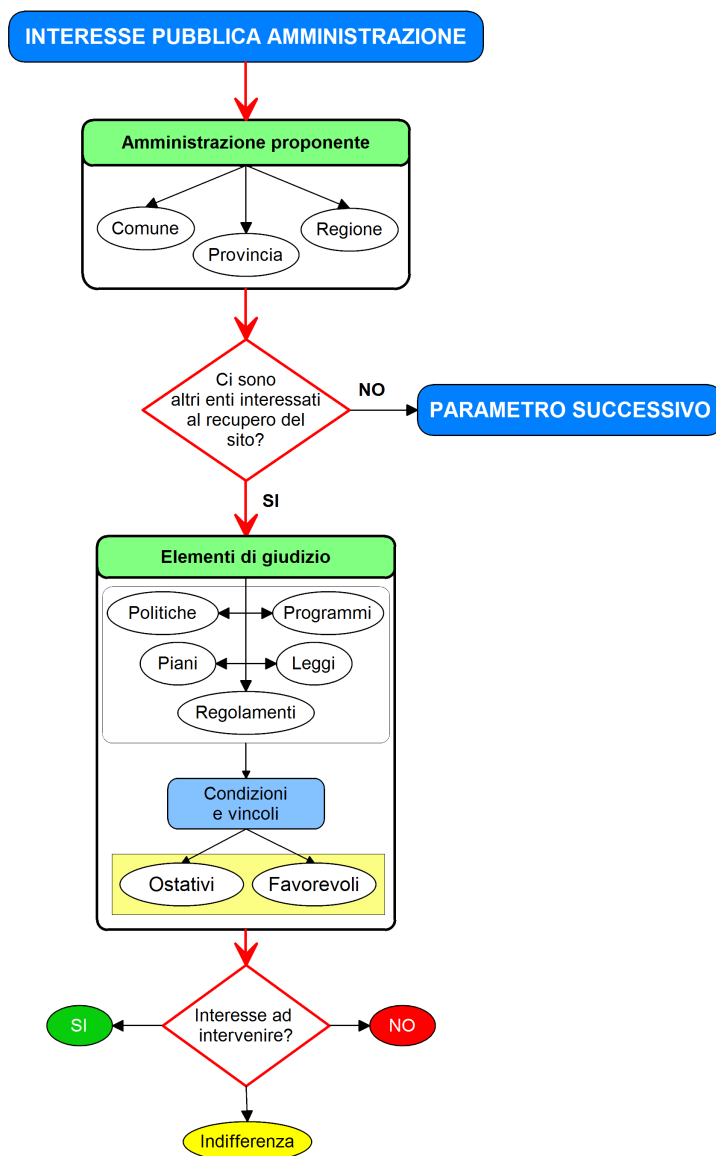


Figura 42 - Interesse della Pubblica Amministrazione. Qualora la gestione dell'intervento coinvolga altri soggetti oltre al proponente, è necessario analizzarne le "posizioni" e l'interesse a riqualificare l'area oggetto di indagine.

4.3.1.3.1. Casi di studio

L'area degradata oggetto di studio può essere oggetto di tutela/disciplina da parte di più soggetti Pubblici, come nel caso della cava di calcare (Figura 43), che si estende a cavallo tra due Comuni laziali limitrofi (nella fotografia il confine comunale è segnato con una linea rossa). Il mancato coinvolgimento di entrambe le amministrazioni, ha imposto di limitare alle proprietà del Comune maggiormente interessato (per ampiezza del territorio occupato dal sito estrattivo) uno studio per la riqualificazione territoriale del versante montuoso. Sebbene solo una porzione trascurabile di cava ricada nel Comune a sinistra del confine, l'impossibilità di rimodellare il versante in quell'area impone una soluzione di recupero a verde non ottimale.



Figura 43 - Fotografia della cava di calcare a cavallo tra i due Comuni laziali (il confine è indicato dalla linea rossa).

4.3.1.4. *Analisi del contesto: selezione dei siti e delle soluzioni realizzabili*

Per evitare lo scontro sociale e valutare razionalmente l'interazione tra il sito degradato e la realtà in cui si trova, è necessario analizzare il contesto (Figura 44):

- Socio - Culturale;
- Territoriale;
- Socio - Economico.

Caratterizzare il contesto in cui si trova il sito degradato consente di comprenderne la percezione da parte della popolazione locale, ma anche di definire le potenzialità della comunità nella gestione dell'opera che si propone di realizzare.

Poiché è eccessivamente gravoso condurre l'indagine a livello locale, è necessario disporre di mappe che caratterizzino in modo adeguato ed approfondito i contesti citati su scala regionale, consentendo di individuare, ad esempio, i beni del paesaggio (aree di pregio), le offese al paesaggio (detrattori), gli esempi di buone e cattive pratiche, per valutare il contesto territoriale (beni ed offese) e socio - culturale (buone e cattive pratiche).

Mappe analoghe potrebbero consentire la valutazione del contesto socio - economico (ad esempio carte della vocazione produttiva locale, della geografia economica regionale, ecc).

A seguito dell'inquadramento dei siti nei rispettivi contesti è possibile individuare i settori produttivi di afferenza delle soluzioni di riqualificazione realizzabili, selezionate tra quelle che rispondono alle attitudini ed alle esigenze della comunità locale.

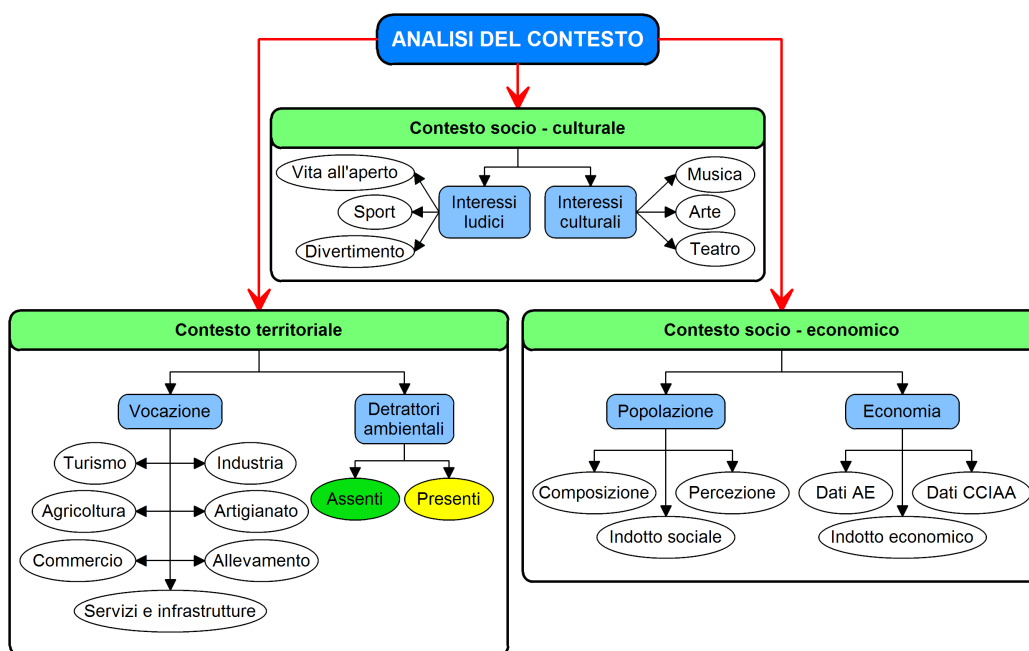


Figura 44 - Analisi del contesto. I tre contesti individuati consentono di definire le tipologie di intervento con maggior probabilità di realizzazione e successo.

4.3.1.4.1. Contesto Socio - Culturale

La conoscenza delle caratteristiche del territorio e della popolazione è di importanza rilevante nell'ottica di uno sviluppo sostenibile in termini di rispetto per l'ambiente, crescita territoriale, miglioramento della qualità della vita.

Una volta descritte, attraverso opportuni indicatori, la cultura, le richieste e le necessità della comunità locale, è possibile selezionare interventi dedicati alle manifestazioni artistiche e culturali (teatro, danza, musica, arti visive, arti plastiche, cinema, ecc.).

Altrettanto vale per gli interessi ludici, che devono essere analizzati al fine di dare opportuno sviluppo allo sport, alle attività all'aria aperta ed al divertimento.

Qualora non si dovessero individuare particolari attitudini verso la cultura e le attività ricreative, si potrà procedere all'eliminazione, dall'elenco degli interventi censiti, delle soluzioni orientate alle attività socio-culturali.

4.3.1.4.2. Contesto Territoriale

Ogni territorio è caratterizzato da una sua vocazione produttiva, culturale, industriale, artigianale, turistica, ecc. dettata dalle caratteristiche ambientali o dalla storia del luogo.

È dunque fondamentale conoscere e classificare la vocazione del territorio, e contestualizzarne il valore economico e di mercato, con l'obiettivo di selezionare le migliori soluzioni di recupero produttivo. Le vocazioni di un territorio possono essere riassunte in:

- Allevamento;
- Agricoltura;
- Industria;
- Artigianato;
- Turismo;
- Commercio;
- Servizi ed infrastrutture.

Inoltre, è necessario contestualizzare il degrado prodotto dall'attività estrattiva con riguardo allo stato di salute complessivo del territorio circostante, individuando la presenza/assenza di ulteriori detrattori ambientali che devono essere classificati in base al loro stato (attivi o dismessi) ed alla proprietà (pubblica, pubblico-privata, privata).

La caratterizzazione dei detrattori influisce sulla fattibilità dell'intervento in maniera decisiva, poiché incide sull'effettivo beneficio apportato dall'intervento di recupero in termini di sostenibilità ambientale e benessere per la comunità locale.

4.3.1.4.3. *Contesto Socio - Economico*

Lo stato di salute della società e dell'economia locale sono elementi di conoscenza dai quali non si può prescindere nella selezione degli interventi di recupero, soprattutto quando l'obiettivo è la riqualificazione produttiva del territorio.

È dunque compito del decisore e del pianificatore indagare in merito alle conseguenze delle soluzioni adottate sulla popolazione (in termini di indotto sociale e percezione storico - culturale dell'ambiente circostante), al fine di favorirne lo sviluppo, la ricchezza ed il benessere.

Allo stesso modo, l'intervento deve favorire l'economia locale in termini di indotto economico (l'esistente può rimanere immutato, incrementato e/o riqualificato, ma non deve essere sfavorito o danneggiato) e di supporto alle attività pre - esistenti sul territorio o alle vocazioni imprenditoriali locali.

4.3.1.5. *Molteplicità e diversità delle soluzioni realizzabili*

Data la complessità e numerosità dei parametri discriminanti che incidono sulla possibilità di riqualificare un sito degradato, avere un ventaglio di alternative tra cui scegliere incrementa le probabilità di realizzare un intervento (Figura 45). In prima battuta è importante che siano realizzabili interventi riconducibili a diversi settori produttivi (servizi, artigianato, commercio, ecc), al fine di diversificare "l'offerta" e di indagare le reazioni dei diversi soggetti interessati. Nel caso ciò non si verifichi, ovvero si individui un solo ambito di intervento, è auspicabile che trovi potenziale applicazione più di una soluzione specifica.

È evidente come la situazione più critica si realizzi qualora venga individuata un'unica possibilità di intervento, poiché la sua "bocciatura" escluderebbe qualsiasi possibilità di intervenire sul sito indagato.

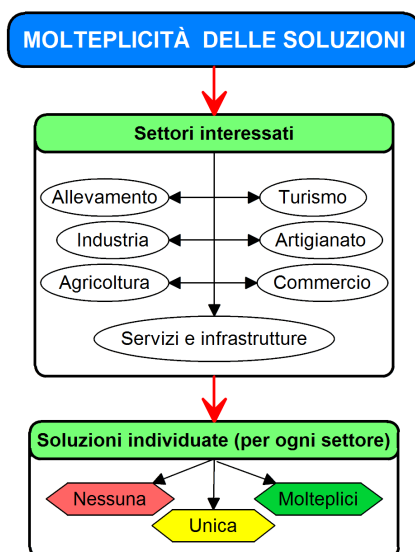


Figura 45 - Il numero di interventi realizzabili e l'afferenza a settori produttivi differenti incrementa le possibilità di riqualificare il sito degradato indagato.

4.3.1.6. Partecipazione sociale

Il coinvolgimento e la partecipazione della popolazione e, più in generale, dei soggetti interessati alla realizzazione dell'intervento proposto, è una condizione esplicitamente richiesta dalle vigenti Direttive della Comunità Europea (Convenzione di Århus, 1998, e Direttive 2005/370/CE e 2006/957/CE), sia per quanto riguarda gli Studi di Impatto Ambientale sia per le Valutazioni Ambientali Strategiche di Piani e Programmi.

Pertanto, nella scelta di una determinata soluzione di recupero per il sito indagato sarà necessario considerare il giudizio espresso dai soggetti interessati (politici, imprenditori, cittadini privati) insieme ai parametri di valutazione di natura tecnica, economica ed ambientale.

Il livello di "apprezzamento" dei soggetti interessati alla realizzazione dell'intervento può essere determinato, in prima battuta, attraverso un'indagine sulle cronache locali, finalizzata ad individuare episodi riconducibili a quello in esame (realizzazione di una determinata opera) ed a valutare le reazioni della popolazione locale e degli enti interessati.

In una fase di maggior dettaglio, una volta identificate le criticità della soluzione proposta ed apportate le necessarie variazioni, si dovrà procedere a valutare le reali opinioni sulla realizzazione dell'opera specifica con interviste, sondaggi, distribuzione di appropriati questionari alla comunità interessata.

In generale, alcune soluzioni di recupero sono quasi dappertutto oggetto di contestazione (poli industriali, attività estrattive, discariche, centrali energetiche, ecc), mentre altre, in particolare quelle che forniscono servizi alla comunità locale, sono generalmente ben accette. In realtà, ogni specifico contesto culturale può produrre reazioni differenti rispetto al trend appena descritto, pertanto sarà necessario contestualizzare l'intervento per determinarne l'accettabilità.

In ogni caso sarà necessario, per evitare la formazione di comitati avversi alla realizzazione dell'opera, mettere in atto tutte le strategie di informazione e comunicazione disponibili, al fine di coinvolgere

attivamente i soggetti interessati e presentare l'intervento in maniera chiara e con l'intenzione di approfondire eventuali varianti.

La Comunità Europea propone il metodo European Awareness Scenario Workshop (1994), come strumento idoneo per stimolare la partecipazione democratica e la concertazione negli iter decisionali. Questo metodo, ampiamente applicato in Italia nell'elaborazione di piani e programmi, soprattutto in materia ambientale, coinvolge un numero limitato di soggetti (non superiore a 40 individui) rappresentativi della comunità all'interno del territorio oggetto di intervento, che affrontano un dibattito coordinato da un workshop leader e finalizzato all'elaborazione di una visione comune relativamente alla problematica affrontata, seguita dalla proposizione di idee per la sua risoluzione.

4.3.1.7. Sostenibilità ambientale

L'interazione tra l'opera che si intende realizzare ed il territorio in cui questa si inserisce è un fattore imprescindibile in fase di selezione della soluzione di recupero. Le Leggi Regionali per la disciplina delle Attività Estrattive prevedono la redazione di un progetto di ricomposizione ambientale del sito estrattivo. Inoltre, dal recepimento nazionale della Direttiva della Comunità Europea 85/337/CEE attraverso il DPR 12/04/1996, i siti che presentano determinate caratteristiche dimensionali (estensione superiore a 200.000 m²) o determinate produzioni annue (superiori a 500.000 m³/anno) sono obbligatoriamente sottoposti a VIA. Per gli interventi minori, invece, è prevista una procedura di verifica dell'assoggettabilità a VIA, che tiene conto delle condizioni specifiche del sito in cui si realizzerà l'opera. Queste misure garantiscono una miglior gestione dei nuovi siti estrattivi, o di quelli ancora in essere, prevenendo la creazione di nuovo degrado. Gli stessi riferimenti normativi citati forniscono indicazioni in merito alla necessità o meno di una VIA per altre opere, tra cui potrebbero ricadere possibili interventi di riqualificazione del sito indagato.

La valutazione della sostenibilità ambientale della soluzione analizzata deve tenere conto dello stato dei luoghi prima dell'intervento e confrontarlo con lo scenario che si presenterà a seguito della sua realizzazione.

Secondo il Millennium Ecosystem Assessment (MA, 2006), un progetto delle Nazioni Unite sviluppato tra il 2001 ed il 2005, è necessario studiare gli ecosistemi in termini di "servizi", ovvero di benefici che l'uomo ottiene dall'ecosistema stesso (Figura 46).

Dunque, uno degli aspetti da considerare nella valutazione della sostenibilità ambientale di una soluzione di recupero è l'interazione di questa con l'ecosistema e con i servizi che questo offre all'uomo. Tali servizi possono essere depauperati o incrementati, o rimanere invariati, a seguito della realizzazione di un determinato intervento.

Poiché una soluzione non è mai esattamente replicabile in siti diversi, la sua valutazione non può essere espressa tramite un giudizio assoluto (quindi con un termine di paragone sempre uguale), ma va confrontata con lo stato dell'arte (la cosiddetta "opzione zero" o non intervento) o con soluzioni alternative, come avviene, ad esempio, nell'applicazione della matrice AEVIA per la valutazione di impatto ambientale dei progetti di coltivazione mineraria (Ballestrazzi, 1996).

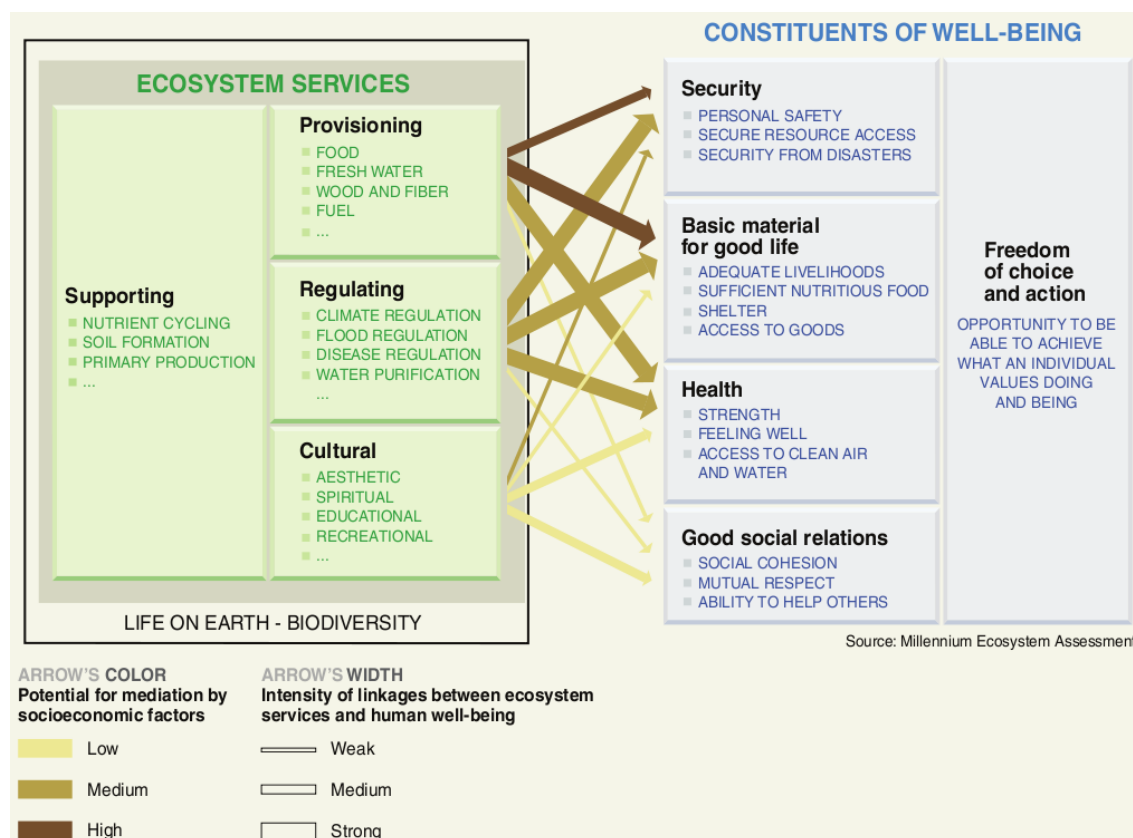


Figura 46: Relazione tra i servizi ecosistemici e i parametri descrittivi del benessere umano (fonte: Millennium Ecosystem Assessment (fonte: Millennium Ecosystem Assessment, *Ecosystem and Human Well-Being: Summary*, Island Press, Washington, DC, 2005)

I fattori che influenzano direttamente un ecosistema ed i suoi servizi sono, secondo il Millennium Ecosystem Assessment:

- variazioni nella copertura e nell'uso del suolo;
- introduzione o rimozione di specie animali e/o vegetali;
- sviluppo ed utilizzo delle tecnologie disponibili;
- fornitura di risorse tramite interventi esterni (ad esempio uso di fertilizzanti, irrigazione, ecc);
- produzione e consumo di risorse;
- cambiamenti climatici;
- eventi e fenomeni naturali, fisici e biologici.

La sostenibilità ambientale della soluzione può essere definita, analogamente a quanto proposto dal Millennium Ecosystem Assessment, attraverso l'Environmental Performance Index (EPI), risultato di un progetto della Yale University e della Columbia University in collaborazione con il World Economic Forum e il Joint Research Center (JRC), che fornisce una classifica dei Paesi di tutto il mondo in relazione al modo in cui affrontano le pressioni ambientali, in termini di salute dell'ambiente e vitalità dell'ecosistema, considerando il consumo di risorse, la produzione di rifiuti, la qualità e l'accessibilità alle

risorse, le politiche ambientali del Paese analizzato (Tabella 8).

Indice	Obiettivo	Categoria	Indicatore
EPI	Salubrità ambientale	Livello di degrado ambientale	Livello di degrado ambientale
		Inquinamento atmosferico (effetto sugli esseri umani)	Inquinamento in luoghi chiusi
			Inquinamento in luoghi aperti
		Acqua (effetto sugli esseri umani)	Accesso all'acqua
			Accesso agli impianti sanitari
		Vitalità dell'ecosistema	Inquinamento atmosferico (effetto sugli ecosistemi)
	Emissioni di ossidi di azoto		
	Emissioni di componenti organiche volatili		
	Ozono nell'ecosistema		
	Acqua (effetto sugli ecosistemi)		Indice di qualità dell'acqua
			Indice di sfruttamento dell'acqua
			Indice di scarsità dell'acqua
	Biodiversità ed habitat		Protezione degli habitat terrestri
			Protezione degli habitat marini
			Protezione degli habitat a rischio
	Deforestazione		Variazioni dei volumi di abbattimento
			Variazioni della copertura arborea
	Pesca		Indice di eutrofizzazione marina
			Intensità della pesca a strascico
	Agricoltura		Consumo di acqua di irrigazione
			Sussidi all'agricoltura
			Regolazioni nell'uso dei pesticidi
	Cambiamenti climatici		Emissioni di CO ₂ pro - capite
Emissioni di CO ₂ per produzione elettrica			
Emissioni di CO ₂ da attività industriale			

Tabella 8 - Indicatori utilizzati nella determinazione dell'Environmental Performance Index (fonte: 2010epi_data.xls, Yale Center for Environmental Law and Policy (YCELP) e Columbia University, 2010)

Nella selezione dell'intervento di riqualificazione bisogna tenere conto dei suddetti fattori, il cui valore può essere desunto da mappe tematiche, indici, dati statistici, censimenti, ecc (Figura 47).

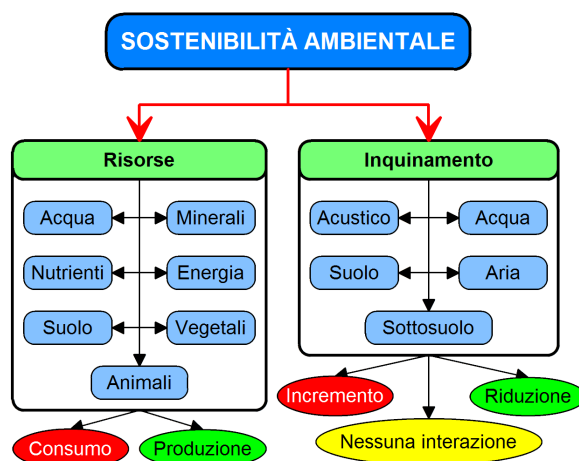


Figura 47 - Sostenibilità ambientale. Il parametro richiede di valutare l'interazione dell'intervento con le risorse naturali (in termini di produzione o consumo) e con le emissioni dannose

4.3.1.7.1. Risorse

La realizzazione dell'intervento produce, nella maggior parte dei casi, un fabbisogno di risorse di cui bisogna opportunamente approvvigionarsi. Queste potrebbero essere sottratte ad altri usi o, peggio, non essere disponibili in loco, producendo squilibri e nuove fonti di inquinamento.

In altri casi, invece, la realizzazione dell'opera contribuisce al sistema in cui si inserisce producendo risorse carenti o altrimenti assenti.

In ogni caso, la produzione di una risorsa, qualora prevista, sarà accompagnata da un consumo di altre risorse. L'interazione tra i fabbisogni ed i prodotti della soluzione di recupero adottata e la disponibilità di risorse in loco è un fattore imprescindibile nella valutazione della sostenibilità ambientale di un intervento.

4.3.1.7.2. Inquinamento

La realizzazione dell'intervento produrrà, nella totalità dei casi, nuove fonti di inquinamento. Queste potrebbero essere temporanee o permanenti, e potrebbero essere accompagnate da misure di mitigazione più o meno efficaci. Alcune soluzioni produrranno, al contrario, dei benefici in termini di riduzione dell'inquinamento esistente. Poiché le emissioni prodotte influiscono sulla vivibilità e la salute dell'ecosistema in cui l'opera si inserisce, anche questo fattore (l'inquinamento) deve essere opportunamente valutato per determinare la sostenibilità ambientale della soluzione proposta.

Particolare attenzione deve essere posta alla determinazione del carico ambientale pre - esistente, ovvero del livello di inquinamento e di depauperamento di risorse presente prima dell'intervento di riqualificazione, che in quanto tale non deve aggravare la situazione.

4.3.1.8. Fattibilità economica

Per valutare la fattibilità economica, è necessario considerare tutti i fattori che possono determinare la remuneratività e le possibilità di concreto successo dell'intervento proposto, tenendo conto del mercato in cui si va ad incidere, dei servizi e delle infrastrutture a supporto dell'attività da avviare, degli investimenti necessari per il buon esito della soluzione prescelta (Figura 48).

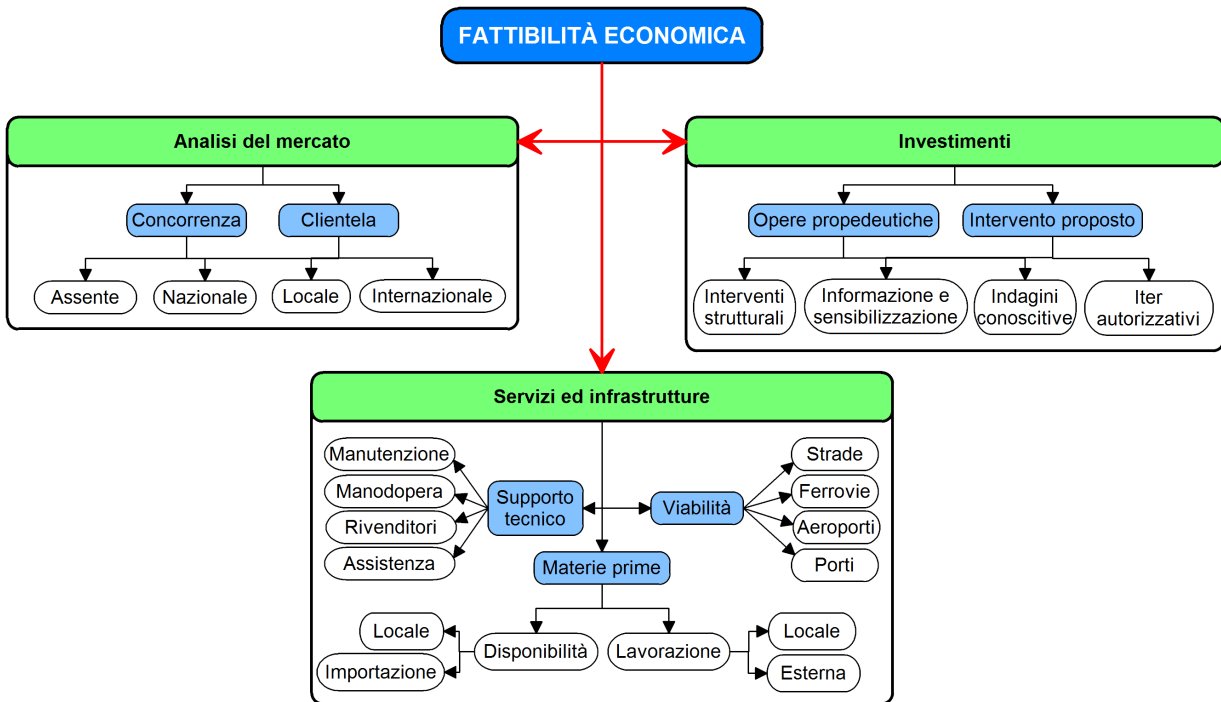


Figura 48 - Fattibilità economica. Per determinare la sostenibilità dell'intervento di riqualificazione è necessario che questo sia robusto sotto il profilo imprenditoriale, e che sia sostenuto economicamente e strutturalmente.

4.3.1.8.1. Analisi del mercato

Qualsiasi soluzione di recupero, anche se riconducibile ad opera di pubblica utilità, deve essere valutata considerando le caratteristiche del potenziale mercato di riferimento, in termini di clientela e concorrenza.

Le caratteristiche del potenziale fruitore definiscono il bacino di utenza del bene/servizio offerto, e consentono di acquisire una prima ed importante informazione in merito alle possibilità di successo della soluzione proposta. Infatti, l'assenza di un congruo interesse per il prodotto offerto riduce o annulla la convenienza a realizzare l'intervento.

Il secondo parametro (la concorrenza) contribuisce a determinare le possibilità di entrare come nuovo soggetto in un mercato già consolidato, o di aprire la strada verso nuovi mercati. Qualora la concorrenza non consentisse di conseguire quote di mercato a condizioni vantaggiose, verrebbe meno l'interesse finanziario/sociale a realizzare l'intervento.

4.3.1.8.2. Servizi ed infrastrutture

Una volta determinata l'esistenza dello specifico mercato e la capacità di competere con la concorrenza, è necessario valutare la fattibilità dell'intervento in relazione ai servizi ed alle infrastrutture disponibili a supporto dell'attività da realizzare.

Per alcune soluzioni è indispensabile l'esistenza di un'opportuna rete di vie di comunicazione (stradali, ferroviarie, aeroportuali, portuali), per altre occorre determinare la possibilità di approvvigionamento di materie prime grezze e/o lavorate. Per tutte le soluzioni è necessario disporre di un valido supporto tecnico, in termini di manutenzione, manodopera, assistenza, reti di vendita.

L'assenza, o anche la sola carenza, di servizi ed infrastrutture può limitare drasticamente ogni possibilità di realizzare l'intervento.

D'altra parte, la realizzazione di un progetto di ripristino può essere l'occasione per dare vita ad interventi sulle infrastrutture e, quindi, generare un indotto di alto profilo. Questo scenario rappresenta un aspetto positivo ed auspicabile nella selezione dell'intervento da realizzare.

4.3.1.8.3. Investimenti

La realizzazione dell'intervento può richiedere, a seconda del contesto e dello stato dell'arte del sito selezionato, investimenti più o meno ingenti, che potrebbero riguardare l'opera stessa o voci accessorie del tipo:

- interventi strutturali;
- campagne di informazione e sensibilizzazione;
- indagini conoscitive;
- iter autorizzativi.

Il processo di valutazione della fattibilità economica dell'intervento deve determinare il livello di incidenza degli investimenti sulla sua realizzazione. Ad esempio, la necessità di realizzare onerosi interventi strutturali assume una forte incidenza sull'analisi finanziaria della soluzione oggetto di valutazione. Analogamente, l'eventuale opposizione da parte della popolazione locale potrebbe richiedere investimenti in campagne di informazione e sensibilizzazione. Ancora, la necessità di eseguire espropri e/o acquisire proprietà da privati introduce fattori di rischio d'impresa non trascurabili. Questo, se accompagnato da un complesso iter autorizzativo, porterebbe all'esclusione della soluzione analizzata dall'elenco degli interventi realizzabili, soprattutto in caso di soluzioni a bassa redditività.

La soluzione ottimale, dal punto di vista economico, prevede:

- interventi strutturali minimi o inesistenti;
- campagna di informazione e sensibilizzazione ad un pubblico già favorevole o sensibile rispetto al servizio ottenuto;
- indagini conoscitive minime o limitate;
- Pubblica Amministrazione/investigatore proprietari del sito oggetto di intervento;

- iter autorizzativo semplice e limitato a pochi soggetti interessati (Enti Pubblici ed Amministrazioni).

4.3.2. Sequenza logico - temporale di indagine dei parametri discriminanti

La priorità temporale attribuita all'indagine dei diversi parametri discriminanti (Figura 49) è frutto di un'approfondita analisi del rapporto logico-sequenziale tra gli stessi, ed è finalizzata a minimizzare il carico di lavoro all'aumentare del grado di dettaglio, attraverso una progressiva riduzione dei siti e delle soluzioni da esaminare.

La situazione ottimale per la realizzazione di un intervento di recupero su un sito degradato si concretizza quando:

- il sito, e le aree circostanti qualora interessate dall'intervento, sono di proprietà di un'unica Pubblica Amministrazione;
- l'amministrazione proprietaria del sito, l'amministrazione proponente l'intervento e gli eventuali Enti e soggetti interessati sono favorevoli alla riqualificazione dell'area degradata;
- l'intervento si inserisce armonicamente e positivamente nel contesto socio - culturale, territoriale e socio - economico locale;
- il sito ha caratteristiche adatte alla realizzazione più efficiente e più efficace dell'intervento;
- il sito ha caratteristiche compatibili con più di una soluzione, ciascuna appartenente a settori differenti, da porre in essere singolarmente oppure come mix di soluzioni;
- l'intervento è significativamente remunerativo, per l'investitore, a livello paragonabile o superiore rispetto alle altre opportunità offerte dal mercato finanziario;
- la soluzione migliora sensibilmente le condizioni ambientali e la qualità della vita nel territorio interessato dall'intervento;
- la comunità è ampiamente favorevole alla realizzazione dell'intervento proposto.

Il risultato dell'indagine condotta sul parametro "proprietà" fornisce una prima "vaghiatura" dei siti, individuando come prioritari quelli nella disponibilità diretta della Pubblica Amministrazione.

Considerando la tipologia delle aree oggetto di indagine (siti degradati), il soggetto proponente l'intervento sarà, molto probabilmente ma non esclusivamente, un Ente Pubblico che riconosca per quella porzione di territorio delle opportunità di sensibile miglioramento della qualità della vita per la comunità locale. L'esistenza o l'assenza di un interesse politico ad operare sul sito selezionato porta all'esclusione (o meno) di questo dalle successive fasi di indagine.

Per i siti che hanno superato positivamente l'analisi dei primi due parametri discriminanti si può procedere all'analisi del contesto, che consentirà di individuare i possibili settori di intervento e di escludere alcune soluzioni tra quelle censite.

A questo punto, i siti selezionati possono essere caratterizzati, e si può procedere all'individuazione degli interventi realizzabili. Solo a questo punto si procede, per le soluzioni che richiedono superfici superiori rispetto a quella del sito (quindi per un sottoinsieme di siti e interventi tra quelli ancora indagati), a definire la proprietà delle aree limitrofe sondando l'interesse dei proprietari a procedere con

l'intervento di riqualificazione.

Sempre nell'ottica di ottimizzare l'iter di pianificazione degli interventi, le indagini sulla fattibilità economica, la sostenibilità ambientale e la partecipazione sociale dovranno essere condotte, prioritariamente, per i siti che hanno il maggior ventaglio di soluzioni alternative. Il risultato finale sarà un elenco di siti e soluzioni classificati a coppie in funzione dell'opportunità di procedere con l'intervento.

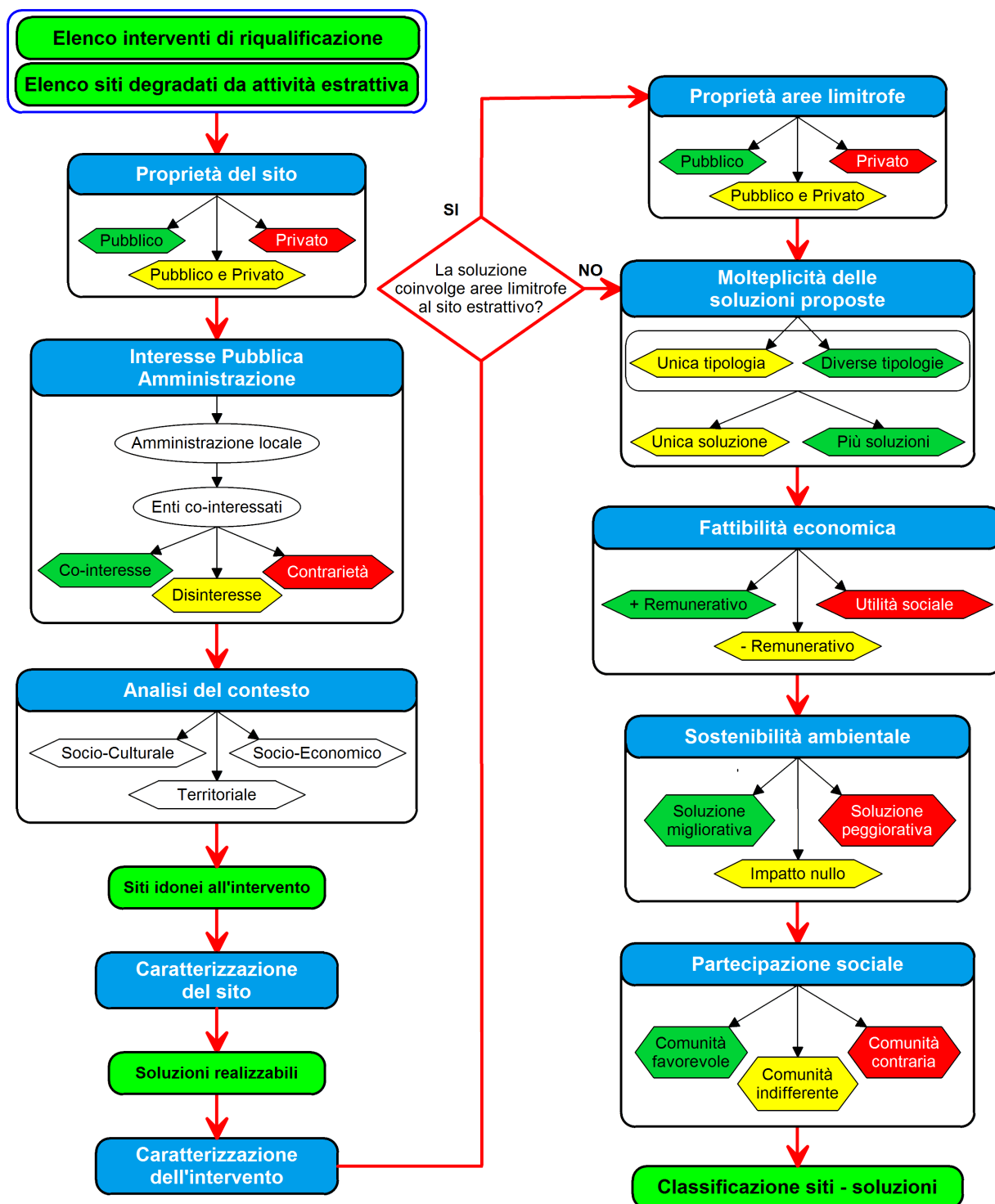


Figura 49 - Schema logico per la selezione di siti degradati su cui realizzare interventi di riqualificazione territoriale.

4.4. Valutazione della sostenibilità ambientale di interventi di riqualificazione di siti degradati

Il metodo di selezione e classificazione dei siti degradati e dei possibili interventi di riqualificazione descritto nel precedente capitolo è finalizzato ad attività di pianificazione a scala territoriale vasta.

Gli stessi parametri discriminanti, indagati secondo un ordine logico - temporale differente, permettono di valutare la sostenibilità (economica, tecnica, ambientale e sociale) di interventi di recupero alternativi selezionati per il recupero di uno specifico sito. La diversa dimensione del problema richiede una revisione del processo logico descritto nel capitolo 4.3.2, che deve essere adattato al nuovo obiettivo (Figura 50).

In questo caso è opportuno suddividere i parametri discriminanti in due gruppi. Nel primo saranno considerati quelli che consentono di valutare il sito, nell'altro quelli relativi all'intervento, ovvero:

- Parametri relativi al sito:
 - Proprietà (area estrattiva ed eventuali aree limitrofe);
 - Interesse della Pubblica Amministrazione;
 - Analisi del contesto;
- Parametri relativi alla soluzione;
 - Partecipazione sociale;
 - Sostenibilità ambientale;
 - Fattibilità economica.

Dato che sia il sito sia gli interventi alternativi sono stati selezionati secondo criteri diversi (ad esempio interesse specifico di un'Amministrazione o di una comunità) da quelli precedentemente descritti (ovvero per estrazione da un archivio di soluzioni di recupero), e considerando che il sito oggetto di indagine è unico, non è possibile né necessario valutare la molteplicità delle soluzioni realizzabili.

Elaborati i parametri di valutazione per il sito ed ognuno degli interventi considerati, è necessario caratterizzare entrambi con i parametri riportati nel capitolo 4.3.1.1.

Rispetto all'approccio adottato per la pianificazione, questo è certamente meno sostenibile, e potrebbe essere ricondotto al primo applicando la sequenza logico - temporale del precedente capitolo con riferimento al sito di interesse, a prescindere dalla sua "posizione in classifica" rispetto ad altri siti.

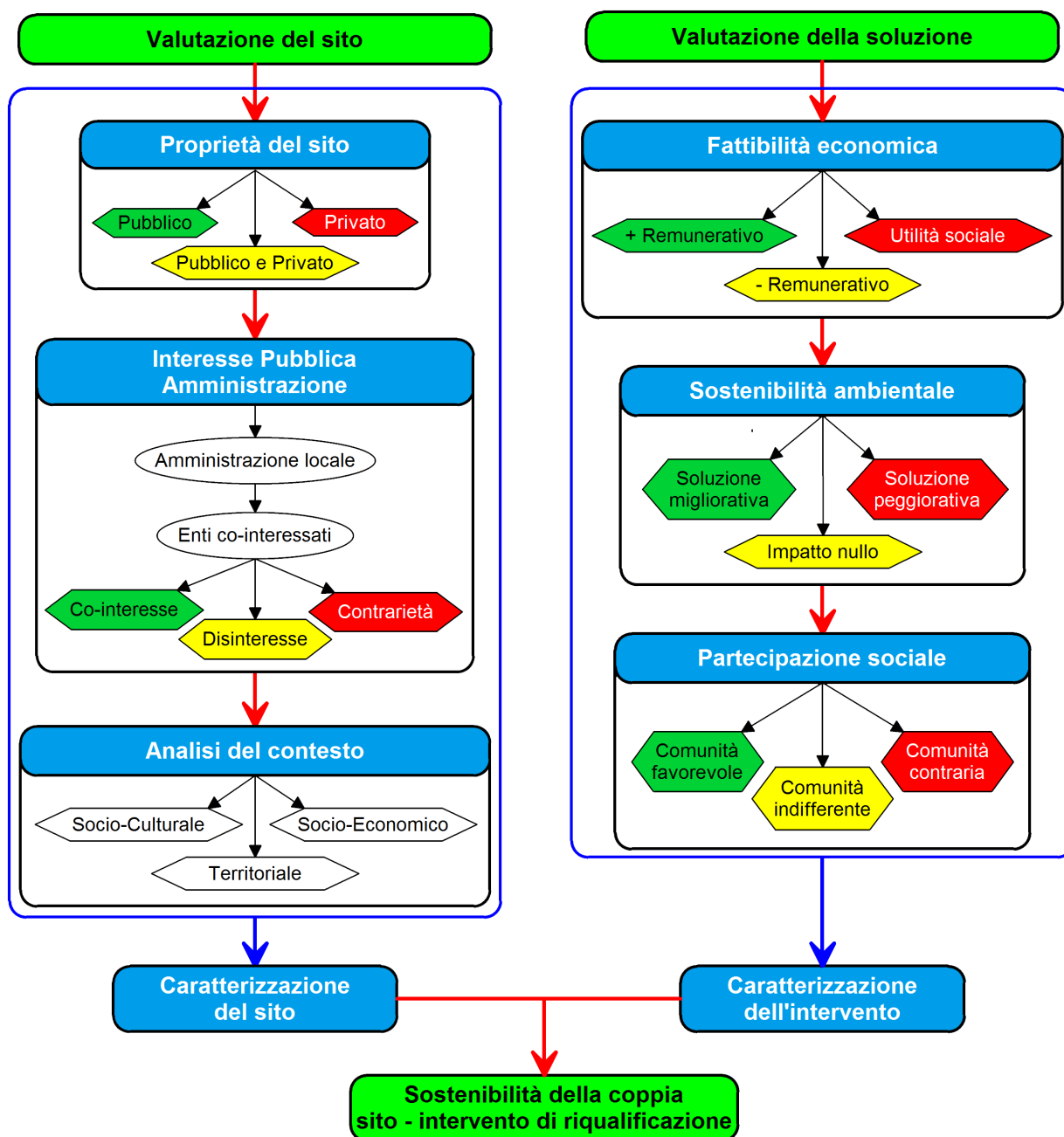


Figura 50 - Schema logico - temporale per la valutazione del sito di interesse e degli interventi di riqualificazione considerati.

5. CONCLUSIONI

Il lavoro di ricerca ha indagato i principali aspetti della pianificazione e della progettazione per lo sfruttamento sostenibile delle georisorse.

L'analisi delle leggi e dei Piani di settore ha consentito di evidenziare i limiti e le carenze degli strumenti e delle strategie adottate nella disciplina delle attività estrattive. Sebbene i Piani Regionali prevedano il razionale sfruttamento delle risorse minerarie nel rispetto dell'ambiente naturale (bene collettivo) e l'adozione di misure per la riqualificazione dei siti estrattivi abbandonati in condizioni di degrado, sono ancora pochi gli esempi e gli strumenti realizzati per perseguire queste finalità.

Obiettivo del lavoro di ricerca è stato lo sviluppo di un nuovo approccio alla progettazione e pianificazione delle attività estrattive, volto a supportare l'iter decisionale attraverso l'adozione di moderni strumenti informatici e di indagine per la valutazione degli impatti prodotti dall'intervento umano sull'ambiente naturale.

Asserita la necessità di trattare la pianificazione come un processo progettuale a scala territoriale, sono state individuate le azioni tipiche dell'attività estrattiva che interferiscono maggiormente con l'ambiente circostante (naturale ed antropico), ed è stato proposto un nuovo metodo di indagine basato sull'implementazione di modelli fisici, modelli statistici ed approcci olistici in un Sistema Informativo Geografico (GIS).

A dimostrazione della validità e dell'applicabilità pratica del metodo proposto sono stati sviluppati, e descritti, una procedura operativa ed un sistema esperto per la previsione ed il controllo delle vibrazioni indotte da volate in cava a cielo aperto.

A supporto degli obiettivi di riqualificazione territoriale, è stata messa a punto una procedura per la selezione e classificazione dei siti degradati da attività estrattiva e l'individuazione degli interventi di recupero realizzabili alla luce di una serie di parametri che ne condizionano la fattibilità e la sostenibilità.

Il lavoro di ricerca è stato condotto utilizzando al meglio le potenzialità dei software Free and Open Source, in particolare GRASS GIS.

5.1. Metodo di indagine e sistema esperto per la previsione ed il controllo delle vibrazioni indotte nel terreno da volate in cava a cielo aperto

Gli studi condotti negli ultimi 60 anni da ricercatori di tutto il mondo hanno portato all'individuazione ed analisi dei principali fattori che condizionano la propagazione delle vibrazioni indotte nel terreno da volate a cielo aperto, ovvero:

- il confinamento della carica in relazione al progetto di volata;
- le proprietà meccaniche e le discontinuità del materiale roccioso attraversato;
- la propagazione attraverso mezzi con caratteristiche differenti.

Stante la connotazione “spaziale” di molti di questi elementi, e la possibilità di riprodurre in forma

tabellare gli altri, è stato proposto un nuovo approccio basato sull'utilizzo dei GIS.

È stata quindi messa a punto una procedura per la corretta pianificazione e progettazione delle volate ed il monitoraggio delle vibrazioni indotte, basata principalmente sull'adozione di buone pratiche volte alla minimizzazione dei danni e dei disturbi ed di un sistema esperto costituito da:

- un database cartografico a supporto della fase di pianificazione del monitoraggio e della progettazione delle volate di abbattimento;
- un database specialistico relativo a:
 - caratteristiche dei mezzi di propagazione;
 - parametri del progetto di volata;
 - caratteristiche territoriali;
 - caratteristiche delle strutture sensibili;
 - distribuzione e caratteristiche del sistema di monitoraggio;
 - normativa di riferimento per la prevenzione del danno/disturbo;
- misure strumentali per la caratterizzazione del fenomeno in relazione al sito indagato;
- un GIS per l'analisi dei dati acquisiti e la creazione di mappe tematiche a supporto della progettazione delle volate di abbattimento.

Il metodo di indagine proposto consente di minimizzare il rischio di danno alle strutture pur massimizzando la produzione di materia prima minerale, poiché prevede l'analisi dei principali fattori che condizionano la propagazione ed il controllo del fenomeno vibratorio e la previsione dei suoi effetti sulle strutture.

Un metodo di indagine così complesso richiede l'adozione di idonei strumenti di lavoro, che permettano al pianificatore, al progettista o al direttore dei lavori di elaborare ed aggiornare i dati a disposizione in tempi rapidi, automatizzando le procedure e, conseguentemente, riducendo il rischio di commettere errori di valutazione (facilmente riscontrabili nell'analisi di un fenomeno condizionato da numerosi fattori).

Il sistema esperto sviluppato, concepito come strumento operativo a supporto dell'applicazione pratica del metodo di indagine in maniera rapida ed efficiente, prevede e consente:

- l'acquisizione delle mappe di base necessarie allo studio del fenomeno;
- l'elaborazione di tabelle contenenti i valori di soglia del parametro (spostamento, velocità, accelerazione delle particelle) adottato ai fini preventivi dalla normativa di riferimento;
- la creazione e l'aggiornamento delle tabelle relative ai parametri di progetto (produzione, volata, sistema di monitoraggio, ecc).

Oltre alla struttura dei dati, parte fondamentale del sistema esperto sono gli strumenti di calcolo appositamente sviluppati, che consentono di determinare i parametri necessari al corretto studio del fenomeno indagato. In particolare, sono state automatizzate le procedure per il calcolo della massima

carica esplosibile, sia in riferimento alle strutture sensibili che per la mappatura di intere aree di interesse.

L'applicazione pratica del metodo di indagine e del sistema esperto ne dimostrano la validità scientifica ed applicativa, in termini di:

- ottimizzazione nell'utilizzo delle informazioni disponibili per la pianificazione, la progettazione e l'esecuzione dell'intervento estrattivo;
- efficienza e completezza nell'analisi dei dati a disposizione, con notevole riduzione dei tempi di elaborazione grazie all'automatizzazione delle procedure di calcolo;
- maggior affidabilità dei risultati ottenuti grazie al calcolo del percorso effettivo della vibrazione e della possibilità di considerare la disomogeneità territoriale e la complessità del tessuto urbano.

La modularità e la possibilità di sviluppo del sistema esperto ne consentono l'applicazione anche per lo studio degli altri fenomeni che conseguono allo svolgimento dell'attività estrattiva (sovrappressioni in aria, diffusione del rumore in ambiente esterno, impatto paesaggistico, ecc). Anche ulteriori approfondimenti nel campo della ricerca possono beneficiare delle potenzialità del sistema sviluppato, grazie alla possibilità di trattare i dati disponibili in maniera più efficiente, contribuendo in tal modo a ridurre ulteriormente l'interferenza tra l'attività estrattiva ed il territorio in cui si insedia.

5.2. Procedura di selezione e classificazione di siti degradati e di possibili interventi di riqualificazione

La presenza sul territorio italiano di siti degradati dall'attività estrattiva è una diretta conseguenza dell'evoluzione della normativa di settore, che solo a partire dagli anni '90, ed a circa 20 anni dalla delega dei poteri amministrativi alle Regioni in materia, ha previsto misure più stringenti per la tutela dell'ambiente quale risorsa della collettività e non del singolo proprietario.

Nell'impossibilità di richiedere il risarcimento del danno a chi lo ha prodotto, il risanamento delle aree degradate è possibile solo tramite un'azione costruttiva della Pubblica Amministrazione, volta a migliorare la qualità della vita delle comunità investite dal depauperamento delle risorse territoriali.

Il lavoro di ricerca ha proposto un approccio esperto alla problematica, che ha richiesto l'individuazione e la descrizione dei parametri discriminanti da considerare ai fini di una corretta caratterizzazione tecnica, economica, ambientale e sociale dei siti estrattivi dismessi e/o abbandonati e dei possibili interventi di riqualificazione, ovvero:

- Proprietà del sito (e di eventuali aree limitrofe);
- Interesse della Pubblica Amministrazione;
- Analisi del Contesto;
- Caratterizzazione tecnica (del sito e delle soluzioni);
- Molteplicità delle soluzioni realizzabili;
- Partecipazione sociale;

- Sostenibilità ambientale;
- Fattibilità economica.

La sequenza logico-temporale con cui i parametri discriminanti vengono analizzati è stata messa a punto per ottimizzare il processo di selezione e classificazione, e consente di ottenere i migliori risultati quando l'obiettivo è la programmazione degli interventi di riqualificazione in un territorio a partire da un elenco di siti degradati.

Qualora si voglia semplicemente procedere alla valutazione della sostenibilità (tecnica, ambientale, economica e sociale) di un determinato intervento (o più alternative) da realizzare in un sito specifico, gli stessi parametri discriminanti diventano criteri di valutazione, e devono essere indagati secondo una sequenza differente, più efficiente per questa specifica finalità (valutazione di sostenibilità di una coppia sito - soluzione).

Il metodo di indagine e le procedure messe a punto, seppur valide dal punto di vista qualitativo, soffrono della mancanza di un'applicazione pratica.

La disponibilità di strumenti informatici e di dati utili al reperimento delle informazioni necessarie lasciano presupporre che il metodo proposto sia applicabile in maniera efficiente, salvo rivederne la struttura alla luce della qualità delle informazioni disponibili.

Il metodo proposto, e la sua possibile implementazione in un sistema esperto basato sui GIS, rappresenta un approccio innovativo nell'uso di strumenti operativi sempre più diffusi ed alla portata di pianificatori e progettisti.

Bibliografia

Articoli scientifici

- Ak, H., Konuk, A. «The effect of discontinuity frequency on ground vibrations produced from bench blasting: A case study». *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 28, n° 9 (Settembre 2008): 686-694.
- Ambrasey, N. R., Hendron, A. J. «Dynamic behaviour of rock masses», a cura di Stagg, K. G. e Zeinkiewicz, O. C. *Rock Mechanics in Engineering Practice*, Wiley, London, 1968, 203-207.
- Ballestrazzi, P. e E. Imolesi, «Criteri di stima dei rischi ecologici dell'attività estrattiva: analisi costi benefici e valutazione d'impatto ambientale». *Quarry & Construction*, XXII, n°5, 1996.
- Bellamine, F. H., Elkamel, A. «Numerical characterization of distributed dynamic systems using tools of intelligent computing and generalized dimensional analysis». *Applied Mathematics and Computation*, Volume 182, Issue 2, 15 November 2006, 1021-1039. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0096300306004176>
- Bernard, T. «Reducing vibration level using simulation and predictive software with EDD (ten years of history in two Lafarge quarries)». In *Explosives and Blasting Technique*, a cura di R Holmberg, 97-100. Taylor & Francis, 2003. <http://www.crcnetbase.com/doi/pdfplus/10.1201/9781439833476.ch12>.
- Berry, P., Pistocchi, A. «A multicriteria approach for the environmental impact assessment of open-pit quarries». *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, vol. 17, n° 4, 2003, 213-226.
- Bridgman, P. «Dimensional Analysis». New Haven, Yale University Press, 1922.
- Carastro, M., Dantini, E. M., «Onde sismiche dovute a volate in cava: ricerca sperimentale di una distanza di sicurezza». *L'Ingegnere. Rivista tecnica di ingegneria ed architettura*. n° 7-8, Roma, 1976, 305-316.
- Djordjevic, N; Kavetsky, A; Scott, A. «Blast design optimisation to minimise induced vibrations of structures». Proc 3rd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Brisbane, 26-31 August 1990P373-380. Publ Parkville: AusIMM, 1990. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 30, n° 2 (Aprile 1993): A111.
- Dehghani, H., Ataee-pour, M. «Development of a model to predict peak particle velocity in a blasting operation». *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 48, n° 1 (Gennaio 2011): 51-58.
- Dowding, C. H. «Suggested methods for blast monitoring». *International Journal of rock Mechanics. Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*, vol. 29, n° 2, 1992, 143-156.
- Fabbri, A. «Fenomeni vibratori indotti da volate e da demolitori. Analisi e caratterizzazione delle cause di dispersione delle grandezze fondamentali». Tesi di Dottorato in Geingegneria e

- Georisorse, ciclo XIX, Università di Bologna, Bologna, 2007.
- Federici, B., Giacomelli, D., Sguerso, D., Vitti, A., Zatelli, P. «A web processing service for gnss realistic planning». *1st International Workshop on Pervasive Web Mapping, Geoprocessing and Services*, Como: ISPRS, 2010 -(ISPRS Archives; XXXVIII-4/W13). Atti di: WebMGS 2010, Como - Italy, (Agosto 2010), 26-27.
 - Ghosh, A., Daemen, J. K. «A simple new blast vibration predictor (based on wave propagation laws)». *US Symposium of Rock Mechanics*, 24th, 1983, 151-161.
 - Hustrulid, W, Lu, W. «The Lu-Hustrulid approach for calculating the peak particle velocity caused by blasting». In *Explosives and Blasting Technique*, a cura di R Holmberg, 291-300. Taylor & Francis, 2003. <http://www.crcnetbase.com/doi/pdfplus/10.1201/9781439833476.ch36>.
 - Indian Standard Institute. «Criteria for safety and design of structures subjected to underground blast». *ISI bulletin*, IS-6922, 1973.
 - Khandelwal, M., Singh, T. N. «Prediction of blast induced ground vibrations and frequency in opencast mine: A neural network approach». *Journal of Sound and Vibration* 289, n° 45, 2005. 711-725.
 - Khandelwal, M., Singh, T. N. «Prediction of blast-induced ground vibration using artificial neural network». *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 46, n° 7, 2009, 1214-1222.
 - Khandelwal, M. «Evaluation and prediction of blast-induced ground vibration using support vector machine». *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 47, n° 3, 2010, 509-516.
 - Kuzu, C. «The importance of site-specific characters in prediction models for blast-induced ground vibrations». *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 28, n° 5 (Maggio 2008): 405-414.
 - Langefors, U., Kihlstrom, B. K. «Rock blasting». John Wiley and Sons, Inc., New York, 1963, 405pp.
 - Langhaar, H., «Dimensional analysis and theory of models». 1st ed. New York, Wiley (1951).
 - McKenzie, C. «Quarry blast monitoring. Technical and environmental perspectives». *Quarry ManageDec* 1990, P23-29. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 28, n° 2 3 (Maggio 1991): A172.
 - Monjezi, M., Ghafurikalajahi, M., Bahrami, A. «Prediction of blast-induced ground vibration using artificial neural networks». *Tunnelling and Underground Space Technology* 26, n° 1 (Gennaio 2011): 46-50.
 - Murphey, B. F., Particles motions near explosions in halite. *Journal of Geophysics Research*, n° 66, 1961.
 - Neteler, M., Mitasova, H., 2008. «Open Source GIS A GRASS GIS Approach, 3rd ed». Springer, NY, USA, ISBN 978-0-387-35767-6, 406 pp.
 - Nicholls, H. R., Johnson, C. F., Duvall, W. I. «Blasting vibrations and their effects on structures». *US Bureau of Mines Bulletin* 656, 1971, 105pp.
 - Pal Roy. P. «Vibration control in an opencast mine based on improved blast vibration

- predictors». *Mining Science and Technology* 12, n° 2 (Marzo 1991): 157-165.
- Pal Roy, P. «Prediction and control of ground vibration due to blasting». *Colliery Guard* V239, N7, Nov 1991, P215-219. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 29, n° 3 (Maggio 1992): A176.
 - Piga, P., Pinzari, M., Schiavoni, U., Sciotti, M., Talamo, M. «Metodo e strumenti per la redazione di un Piano Regionale delle Attività Estrattive con l'ausilio di un sistema computerizzato». *Atti del Convegno Nazionale su Attività Estrattiva de uso del Suolo*, Senigallia, 18-19-20 Settembre 1987, 103-136.
 - Strelec, S., Bozic, B., Gazdek, M. «Different evaluation criteria of permissible explosive quantity». In *Explosives and Blasting Technique*, a cura di R Holmberg, 119-126. Taylor & Francis, 2003. <http://www.crcnetbase.com/doi/pdfplus/10.1201/9781439833476.ch15>.
 - Taqieddin, Salah A., R.L. Ash, N.S. Smith, e J.R. Brinkmann. «Effects of some blast design parameters on ground vibrations at short scaled distances». *Mining Science and Technology* 12, n° 2 (Marzo 1991): 167-178.
 - Westine, P. S. «Ground shock from the detonation of buried explosives». *Journal of Terramechanics* 15, n° 2 (Giugno 1978): 69-79.
 - Wetherelt, A, P Hunt, e J Pepper. «Peak particle velocity modelling». In *Explosives and Blasting Technique*, a cura di R Holmberg, 81-88. Taylor & Francis, 2003. <http://www.crcnetbase.com/doi/pdfplus/10.1201/9781439833476.ch10>.
 - White, T, M Pegden, e W Birch. «Developments in the use of scaled-distance modelling which allow an increase in the permitted charge weights while still ensuring vibration compliance». In *Explosives and Blasting Technique*, a cura di R Holmberg, 89-96. Taylor & Francis, 2003. <http://www.crcnetbase.com/doi/pdfplus/10.1201/9781439833476.ch11>.
 - Cheng-Xiang, Y, Xia-Ting, F.. «Estimation of structural response to mining-induced blast vibration using support vector machines». In *Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry*, a cura di Sean Dessureault, Rajive Ganguli, Vladislav Kecojevic, e Jami Girard Dwyer, 587-594. Taylor & Francis, 2005. <http://www.crcnetbase.com/doi/pdfplus/10.1201/9781439833407.ch78>.

Riferimenti tecnici e normativi

- BS 7385-2 "Evaluation and measurement for vibration in buildings", 1993.
- Commissione della Comunità Europea. Libro verde relativo ai partenariati pubblico-privati ed al diritto comunitario degli appalti pubblici e delle concessioni. COM(2004) 327 definitivo, Bruxelles, 30-04-2004.
- Commissione della Comunità Europea. Comunicazione sui Partenariati pubblico-privati e sul diritto comunitario in materia di appalti pubblici e concessioni, COM (2005) 569 definitiva, Bruxelles, 15-11-2005.
- Commissione Economica delle Nazioni Unite per l'Europa. Convenzione sull'accesso alle informazioni, la partecipazione del pubblico ai processi decisionali e l'accesso alla giustizia in materia ambientale. Århus, Danimarca, 1998.
- Decisione del Consiglio dell'Unione Europea del 17 febbraio 2005 relativa alla conclusione, a nome della Comunità europea, della convenzione sull'accesso alle informazioni, la partecipazione del pubblico ai processi decisionali e l'accesso alla giustizia in materia ambientale (2005/370/CE).
- Decisione del Consiglio dell'Unione Europea del 18 dicembre 2006 relativa alla conclusione, a nome della Comunità europea, di un emendamento alla convenzione sull'accesso alle informazioni, la partecipazione del pubblico ai processi decisionali e l'accesso alla giustizia in materia ambientale (2006/957/CE).
- Decreto del Presidente della Repubblica 14 gennaio 1972, n. 2. Trasferimento alle Regioni a statuto ordinario delle funzioni amministrative statali in materia di acque minerali e termali, di cave e torbiere e di artigianato e del relativo personale, GU del 15 Gennaio 1972 - Suppl. Ordinario, n° 12).
- Decreto del Presidente della Repubblica 24 luglio 1977 n. 616. Attuazione della delega di cui all'art. 1 della legge 22 luglio 1975, n. 382, GU del 29 agosto - Suppl. Ordinario, n° 234.
- Decreto del Presidente della Repubblica 28 giugno 1955, n. 620. Decentramento dei servizi del Ministero dell'industria e del commercio, GU 5 Agosto 1955, n° 179.
- Decreto Presidente della Repubblica 12 aprile 1996. Atto di indirizzo e coordinamento per l'attuazione dell'art. 40, comma 1, della L. 22 febbraio 1994, n. 146, concernente disposizioni in materia di valutazione di impatto ambientale, G.U. del 07 Settembre 1996, n° 210.
- Direttiva del Consiglio dell'Unione Europea del 27 giugno 1985 concernente la valutazione dell'impatto ambientale di determinati progetti pubblici e privati, G.U.C.E 5 luglio 1985, n° 175 (85/337/CE).
- DIN 4150 -2 "Human exposure to vibration in buildings", giugno 1999.
- DIN 4150-3 "Effects of vibration on structures", febbraio 1999.
- Esty, C. D., Kim, K., Srebotnjak, T. "2008 Environmental Performance Index Report". Yale Center

for Environmental Law & Policy/Center for International Earth Science Information Network at Columbia University, 2008.

- ISO 4866 “Mechanical vibration and shock - Vibration of buildings - Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings”, 1996.
- Legge 23 dicembre 1992, n. 498. Interventi urgenti in materia di finanza pubblica, GU 29 Dicembre 1992, n° 304.
- Millennium Ecosystem Assessment. Millennium Ecosystem Assessment Synthesis Reports. 2006.
- Programma Innovazione della Commissione Europea. European Awareness Scenario Workshop, 1994. <http://cordis.europa.eu/easw/home.html>
- Regio decreto 29 Luglio 1927, n° 1443. Norme di carattere legislativo per disciplinare la ricerca e la coltivazione delle miniere nel Regno. GU 23 Agosto 1927, n° 194.
- SN 640312a “Effet des vibrations sur les constructions”, aprile 1992.
- Siskind, D E; Stagg, M S; Kopp, J W., Dowding, C. H. «Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting». US Bureau of Mines report RI 8507, 1980, 74pp.
- Siskind, D E; Krum, W., Otterness, R. E., Kopp, J W. «SComparative study of blasting vibrations from Indiana surface coal mines». US Bureau of Mines report RI 9226, 1989, 40pp.
- UNI 9916 “Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici”, aprile 2004.