

UN APPROCCIO GEOGRAFICO MULTICRITERIO PER LA VALUTAZIONE DELL'IMPATTO AMBIENTALE DA ATTIVITÀ ESTRATTIVE

P. Berry[#], A. Pistocchi[◇], D. Neri^{*}

Sommario

La memoria presenta una metodologia, basata sulla modellistica GIS, per la valutazione dell'impatto ambientale indotto da attività estrattive a cielo aperto. Il metodo proposto utilizza modelli spazialmente distribuiti e procedure di analisi multicriterio a supporto delle decisioni e la sua efficacia è stata analizzata applicandolo al caso reale di una cava toscana. La memoria sottolinea anche i vantaggi di un approccio spazialmente distribuito rispetto a quelli tradizionali comunemente in uso, caratterizzati dall'impiego di giudizi sintetici, espressi quasi sempre in forma di matrice, nei quali è superiore, rispetto al metodo proposto, il peso dell'arbitrarietà del giudizio sull'entità dell'impatto.

ABSTRACT

The paper shows an application of distribute modeling techniques using a GIS package, together with multicriteria analysis (MCA) for decision support, in the environmental impact assessment of a surface quarry in Tuscany. A comparison is drawn with more traditional techniques now widely in use, such as matrixial lumped judgements, thus highlighting the advantages of coupling a geographical approach with MCA in order to minimize the bias due to subjective evaluation.

1. INTRODUZIONE

Nel settore delle attività estrattive per l'approvvigionamento di materiali di seconda categoria (attività di cava), la pianificazione a livello regionale o provinciale non utilizza a tutt'oggi strumenti di valutazione dell'impatto ambientale [1], [2] "strategico". Inoltre, la procedura di valutazione dell'impatto ambientale per la singola area estrattiva quasi sempre ricorre a metodi di tipo sintetico, quali quelli matriciali [3], nei quali non è del tutto trascurabile la soggettività di giudizio sugli effetti ambientali dell'insediamento industriale. Con questi metodi, il livello d'impatto è espresso da un valore rappresentativo del giudizio complessivo di un'azione su una componente ambientale. Conseguentemente, viene a mancare ogni informazione sull'intero spettro di intensità e sulla distribuzione spaziale degli effetti indotti su tutta la regione limitrofa al centro estrattivo.

In entrambi i casi, è estremamente rilevante la componente geografica nella valutazione degli impatti [4], sia per stabilire una localizzazione ottimale delle cave, sia per individuare e mitigare gli effetti indesiderati di queste ultime.

[#] Professore Ordinario di Arte Mineraria, DICMA (Dipartimento di Ingegneria Chimica, Mineraria e delle Tecnologie Ambientali), Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna.

[◇] Dottorato di Ricerca in Georisorse e Geotecnologie, DICMA (Dipartimento di Ingegneria Chimica, Mineraria e delle Tecnologie Ambientali), Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna.

^{*} Dottore in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, Indirizzo Georisorse.

D'altra parte, un tale approccio è applicabile solamente se le informazioni sull'ambiente fisico e socioeconomico, nel quale si inserisce l'attività estrattiva in progetto, sono disponibili in un formato cartografico numerico, e quando si dispone di un GIS (sistema informativo geografico) per le analisi previsionali sugli effetti delle attività stesse.

Molte Regioni italiane sono oggi dotate di archivi cartografici e software dedicati a trattare i relativi dati su base informatica, ma appare, per lo più, poco diffusa la consapevolezza che i software utilizzati per la cartografia hanno anche notevoli capacità di analisi territoriale, e consentono di implementare modelli matematici con un alto grado di completezza e di capacità predittiva.

La costruzione di un sistema previsionale, a supporto delle decisioni amministrative e di piano, che consenta di rispondere, con ragionevole affidabilità, a domande del tipo "cosa succede se...", richiede di integrare [5]:

- a) una banca di dati alfanumerici;
- b) un sistema di carte geografiche, per la rappresentazione dei dati;
- c) un modello o un sistema di equazioni per descrivere i fenomeni.

Mentre in passato si riscontrava uno scollamento fra i modellisti e coloro che si occupavano di banche dati e cartografia, oggi il fatto che esistano software di tipo GIS che consentono anche di programmare alcuni tipi di modelli matematici previsionali spinge ad una unificazione fra le discipline dell'acquisizione e gestione dei dati, e quelle dell'analisi degli stessi e di simulazione.

I modelli matematici distribuiti di tipo tradizionale (a elementi finiti, differenze finite, ecc.) ricorrono alla risoluzione di equazioni complesse e ad una descrizione in termini formali dei sistemi fisici; per contro, la modellistica basata sui GIS sfrutta relazioni per lo più empiriche o formule analitiche, per la deduzione delle grandezze di interesse, a partire dalla conoscenza di proprietà spaziali elementari, quali, ad esempio, la distanza, la contiguità, le variazioni qualitative o quantitative di un attributo lungo un percorso, sfruttando la struttura di calcolo definita dall'algebra delle mappe [6].

Nel presente studio si è fatto ricorso ad algoritmi basati essenzialmente su proprietà di distanza, ed i modelli impiegati sono riconducibili ad una mappatura di distanze, da differenti sorgenti, pesate secondo criteri che hanno un proprio e definito significato fisico.

2. DESCRIZIONE DEI FENOMENI E VALUTAZIONE DEGLI IMPATTI

Spesso, a partire da "azioni" (cause) si valutano, direttamente, gli impatti (positivi o negativi) sull'ambiente ed il territorio; in questo studio è apparso più corretto introdurre un passaggio intermedio consistente nell'analizzare i diversi fenomeni fisici (o effetti) prodotti da ogni "azione", e per ogni effetto si è valutato l'impatto. Questo secondo passaggio impone il ricorso a criteri di valutazione quasi sempre soggettivi, condivisibili in misura variabile. Pertanto, occorre che il confronto sul giudizio d'impatto sia sottoposto a discussione razionale per decidere se possa essere ritenuto soddisfacente, o come debba essere modificato. Viceversa, la caratterizzazione degli effetti può essere fatta con metodi molto spesso oggettivi (quali i modelli matematici), e sui quali generalmente si riscontra una larga convergenza di giudizio (Fig. 1).

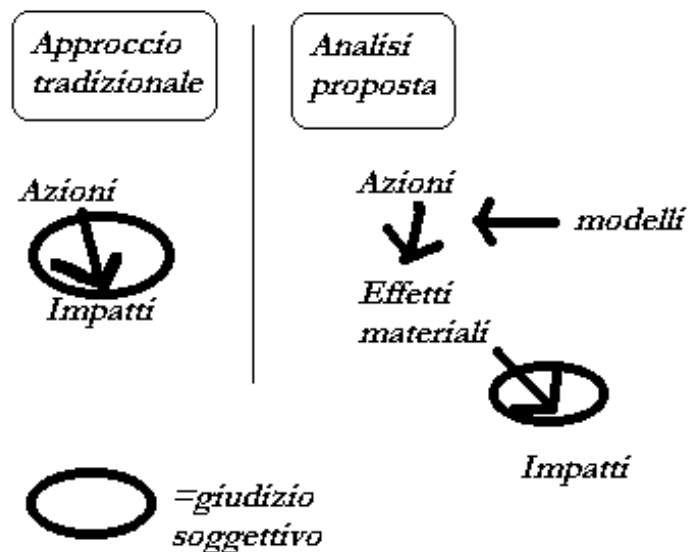


Fig. 1 – Schema concettuale dell’approccio tradizionale e di quello adottato nel presente studio per la VIA.

La Tabella 1, che indica gli effetti principali delle attività estrattive sui “comparti ambientali”, mette in evidenza come i metodi per descriverli siano in numero piuttosto limitato. Infatti, per ciascun effetto o fenomeno fisico generato, si possono individuare, al più, alcuni modelli o metodi razionali di descrizione, che consentono di valutarne la distribuzione spaziale e l’intensità quantitativa. In alcuni casi (per esempio quando si tratta di sistemi socio – economici o di stock delle risorse naturali) non si può fare a meno di ricorrere a termini di valutazione soggettivi, ma si ritiene che sia relativamente facile pervenire a valutazioni condivise almeno in linea di massima.

L’assegnazione di un giudizio di impatto è invece frutto di un’attività valutativa che introduce sempre elementi non completamente oggettivi. Infatti, essa dipende dal sistema etico di riferimento del valutatore, dai rapporti di forza fra le parti variamente interessate che devono pervenire alla decisione da elementi di natura, tutto sommato, imprevedibile e contingente.

Tab. 1 – Effetti materiali indotti dall'attività estrattiva

Comparto ambientale interessato dai fenomeni	Effetti o fenomeni fisici	Metodi disponibili per descrivere i fenomeni
Atmosfera (rumore)	Rumore prodotto dalla coltivazione e dal trasporto connesso; sovrappressioni in aria (air blast) indotto da volate	Modelli empirici deterministici di propagazione del rumore (per fenomeni non impulsivi); equivalenze empiriche per i rumori impulsivi; metodi deterministici di integrazione delle equazioni delle onde
Atmosfera (particolato solido)	Dispersione di particolato solido in aria e di eventuali altri inquinanti	Modelli box, modelli gaussiani, modelli lagrangiani o euleriani di integrazione numerica dell'equazione parabolica diffusivo – convettiva
Acque superficiali e sotterranee	Modificazioni idrologiche, idrogeologiche e geomorfologiche; aumento del carico di sedimenti nei corsi d'acqua per erosione di superficie denudate; scarico di acque di lavorazioni contenenti particolato solido e/o inquinanti	Modelli empirici (ad es. Universal Soil Loss Equation per la previsione dell'erosione locale media annua); bilanci di massa; analisi di dettaglio con modelli di flusso e trasporto delle acque sotterranee; modelli di qualità delle acque superficiali (es. equazione di Streeter e Phelps)
Litosfera	Instabilità dei versanti indotta dagli scavi e dalle discariche; vibrazioni indotte da esplosivi e demolitori idraulici	Modelli geomeccanici per la valutazione della stabilità (deterministici o probabilistici); modelli empirici (es. IRSM)
Paesaggio percepito	Impatto visivo generato dai fronti di scavo, dalla discarica e dagli impianti dell'insediamento industriale	Analisi della morfologia del terreno e calcolo dell'area nella quale gli oggetti sono visibili (viewshed); analisi geometrica della porzione di fronte di scavo visibile da varie posizioni; analisi qualitative di simulazione fotorealistica.
Paesaggio come insieme di ecosistemi	Effetti di "disturbance" indotti dalla cava, dalla discarica e dall'insediamento industriale.	Analisi delle reti e dei mosaici ecologici e delle modificazioni indotte alle loro caratteristiche funzionali; indicizzazione sintetica; modelli previsionali di disturbo e di resilienza; analisi multicriteri della trasformazione attraverso più layers tematici.
Sistemi socio – economici	Occupazione, effetti socio – economici indotti	Analisi ad hoc, statistiche descrittive.
Risorse naturali	Modificazione degli stock naturali del sito (suolo vegetale, biomasse, geomasse, ecc.)	Bilanci di massa, considerazioni ad hoc

Le numerose ricerche rivolte ad individuare metodi di valutazione che portino a decisioni il più possibile condivise, a minimizzare le possibilità di arbitrio soggettivo, e a consentire che ogni valutatore, a partire dagli stessi elementi di conoscenza del problema, pervenga alla stessa conclusione, non hanno ancora individuato una metodologia che soddisfi l'obiettivo [7]. In questo studio è stato affrontato il problema della valutazione di impatto ambientale di una cava utilizzando:

- un set di modelli cartografici (basati per lo più su modelli matematici descrittivi dei fenomeni fisici, e sull'incrocio di informazioni geografiche secondo opportuni criteri), caratterizzanti gli effetti o i fenomeni provocati dall'attività estrattiva;
- un set di 'leggi di impatto', che consentano di valutare l'impatto di ciascun fenomeno, preso separatamente, sul territorio, assegnando un valore a ciascun punto dello spazio su una scala normalizzata;
- una scala delle priorità, che consente di assegnare un peso a ciascun effetto ed ai suoi impatti. I pesi sono stati ottenuti con la tecnica del confronto a coppie di Saaty[4].

3. LA VIA PER CAVE A CIELO APERTO

Per valutare la fattibilità e l'efficienza dell'approccio geografico multicriterio per la valutazione dell'impatto ambientale prodotto da attività estrattiva a cielo aperto, è stato preso in considerazione un progetto per la coltivazione di calcare in una cava a cielo aperto in Toscana.

Il metodo di coltivazione e le fasi elementari di sviluppo previste dal progetto (splateamento a gradone unico con rotazione del fronte), permettono di attenuare al massimo grado le modificazioni alla morfologia dell'area (che è di tipo collinare con quote variabili tra 150 e 500 metri s.l.m.), ed inoltre permettono l'immediato intervento di ripristino della vegetazione in ogni platea, rendendo minima l'entità dell'impatto visivo.

Gli effetti ed i fenomeni fisici indotti dall'attività della cava di calcare si possono sostanzialmente ricondurre a: rumori; polveri; vibrazioni e sovrappressioni in aria; impatto visivo; modifica degli ecosistemi.

Le due figure seguenti (Figg. 2 e 3) rappresentano, rispettivamente, la carta dell'uso del suolo della regione circostante la cava con l'indicazione delle sorgenti e degli effetti elementari indotti e la vista tridimensionale della cava di calcare ricavata dal calcolo del DEM (Digital Elevation Model).

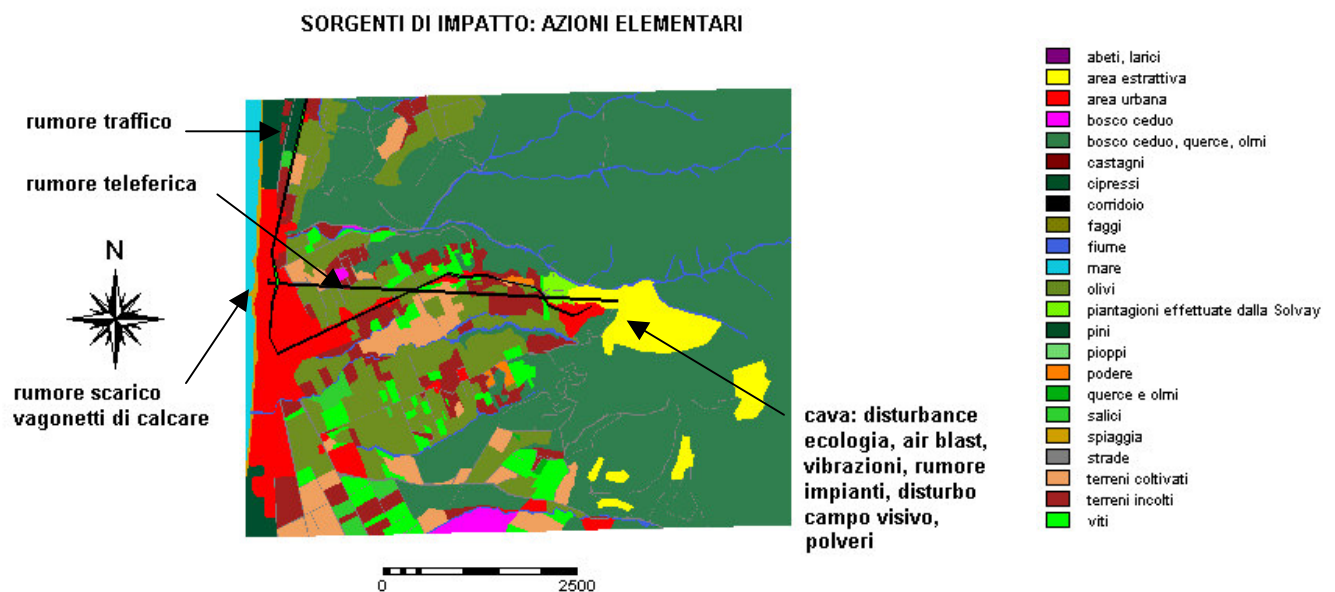


Fig. 2 – Carta dell'uso del suolo e delle sorgenti di impatto generato dell'attività industriale.

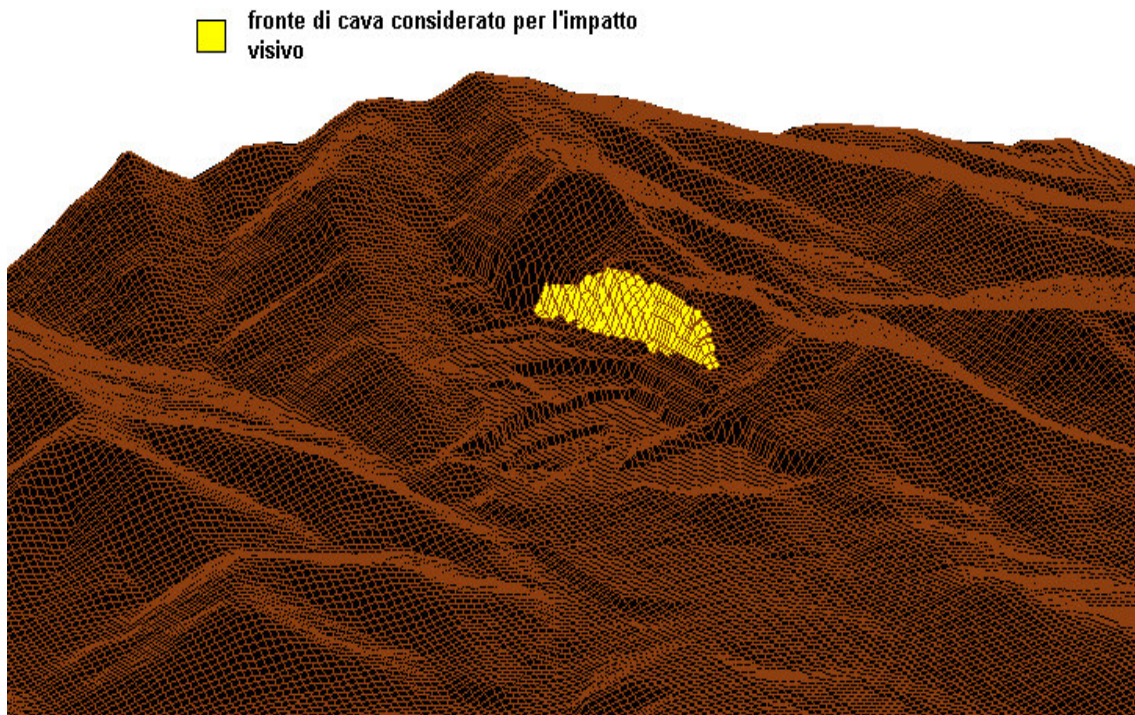


Fig. 3 – Grafico volumetrico della zona di interesse e fronti della cava visti da un osservatore posto a Nord – Ovest rispetto alla cava.

3.1. Rumore

Le sorgenti di rumore più significative sono l'impianto di trattamento del minerale (frantumazione, carico e scarico del materiale nelle tramogge, vagliatura, ecc.), il trasporto e, più in generale, la movimentazione del calcare, il trasporto dei materiali, gli spostamenti delle macchine operatrici, la teleferica, lo scarico del minerale nella stazione di arrivo della teleferica.

La mappa del rumore è stata ottenuta a partire dal valore del LeqA (livello equivalente continuo di pressione sonora ponderato in curva A) di ogni sorgente elementare ricorrendo alle formule di propagazione dei fenomeni acustici, considerando le attenuazioni causate dalle condizioni ambientali [8]: la divergenza geometrica, l'assorbimento dell'aria, l'assorbimento del suolo e la diffrazione.

Di seguito sono riportate le relazioni per il calcolo del LeqA, la mappa dei valori di questa grandezza (Fig. 5) e la carta della zonizzazione acustica preliminare condotta in base ai criteri indicati in [9] (Fig. 6).

Il livello equivalente viene definito come:

$$\text{LeqA [dBA]} = 10 \log \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^8 10^{0.1 [L_{p(ij)} + A_f^{(j)}]} \right] \right\}$$

dove:

n = è il numero di sorgenti;

j = indice corrispondente a ciascuno degli 8 valori medi standard della frequenza (da 63 Hz a 8 kHz) [8]

A_f = è il peso ponderato secondo la curva A per la frequenza f ;

L'attenuazione (dBA) è stata calcolata come somma dei diversi effetti secondo la somma:

$$Att = Att_1 + Att_2 + Att_3 + Att_4$$

In cui Att_1 è la divergenza geometrica, Att_2 è l'assorbimento da parte dell'aria, Att_3 è l'assorbimento da parte del suolo e Att_4 è la diffrazione del suono dovuta alle barriere acustiche.

La divergenza geometrica è data da (dB):

$$Att_1 = 20 \log (r) + 11$$

l'assorbimento dell'aria (dB):

$$Att_2 = \alpha r/1000$$

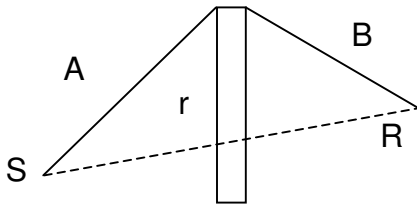
l'assorbimento del suolo (dB):

$$Att_3 = Att_s + Att_m + Att_r$$

L'effetto delle barriere (dB) è dato da:

$$Att_4 = 5 + 20 \log \frac{\sqrt{2\pi|N|}}{\tanh \sqrt{2\pi|N|}}$$

Ove: r = distanza geometrica in linea retta dalla sorgente, α = coefficiente di assorbimento acustico dell'aria (dB/m), λ = lunghezza d'onda del suono (m), ed N è un indice dato dalla formula seguente (riferita ai simboli di figura 4):



$$N = \frac{2}{\lambda} (A + B - r)$$

Figura 4 – Schema di calcolo della diffrazione dovuta ad una barriera (S = sorgente, R = recettore).

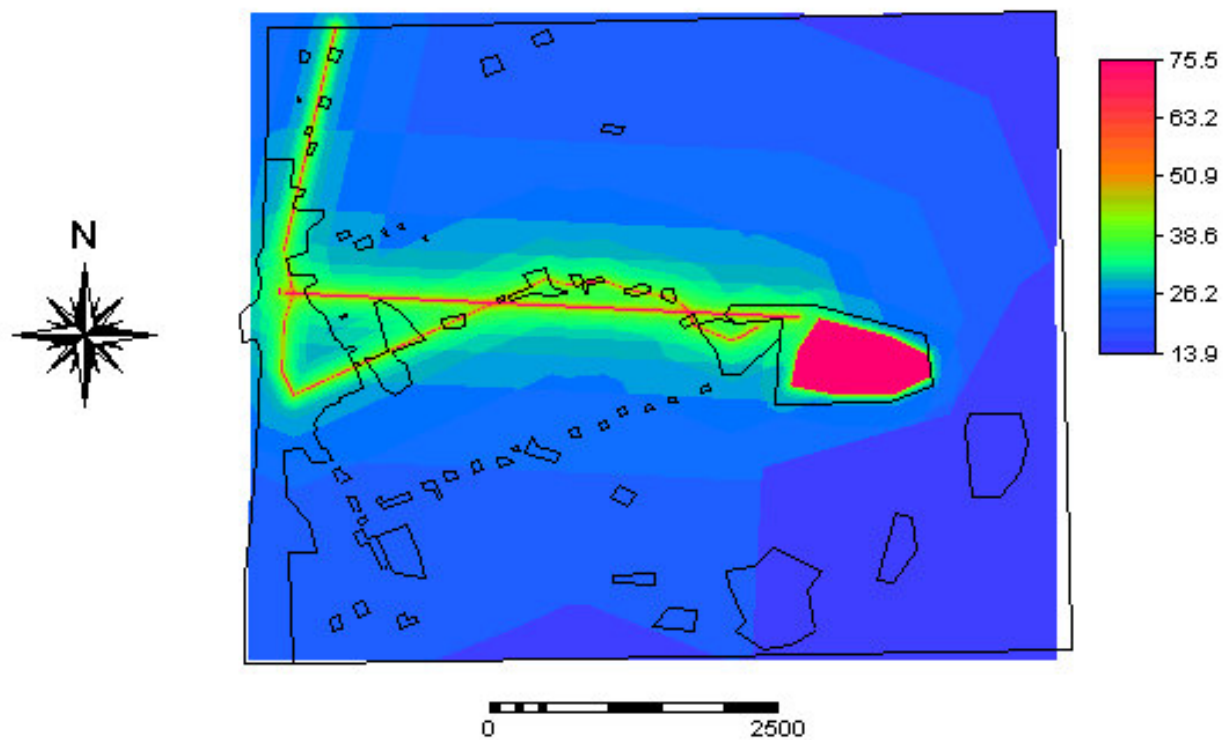


Fig. 5 – Valori, calcolati secondo [8], del LeqA (dBA) nella zona della cava

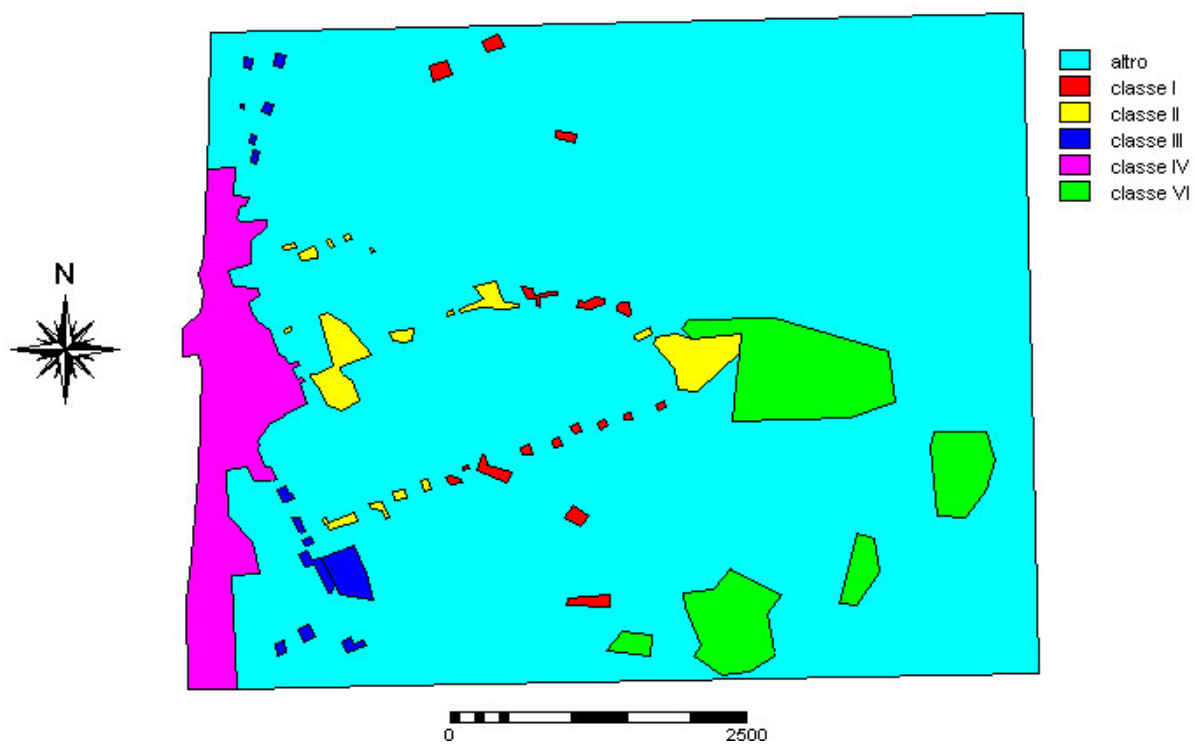


Fig. 6 – Carta della zonizzazione acustica [9]

3.2. Polveri

L'inquinamento provocato dalla dispersione di polveri è stato attribuito fondamentalmente all'abbattimento (volate), alla movimentazione del materiale ed allo stoccaggio dell'abbattuto al piede del gradone.

Le emissioni possono essere caratterizzate tramite appropriate campionamenti e la distribuzione spaziale delle concentrazioni può essere definita a partire dai dati sperimentali tramite adatti modelli geostatistici. In questo caso, in mancanza di un numero adeguato di campioni si è preferito fare ricorso a valori tratti da un'ampia casistica riferibile ad attività di cava del tutto simili a quella esaminata in termini di potenza dell'impianto, organizzazione del lavoro, caratteristiche dell'impianto di trattamento, materiale estratto, ecc. Nella tabella 2 sono riportati i valori del particolato solido disperso in aria, corrispondente alla quantità di minerale trattato dalle singole sorgenti di polvere individuate nella cava esaminata.

Tab. 2 – Quantità di particolato solido emesso in aria dalle più significative sorgenti della cava sorgenti

Fase di lavorazione	Quantità di materiale	Quantità specifica di polvere emessa	Quantità oraria di polvere emessa
Abbattimento	1200 t/h	0,067 kg/t	80 kg/h
Movimentazione	1200 t/h	0,021 kg/t	25 kg/h
Stoccaggio		1 kg/ha/giorno	0,0275 kg/h

La dispersione delle polveri è stata studiata in prima approssimazione adottando un modello di tipo *box* per lo *screening* degli effetti, in quanto capace di fornire le prime indicazioni sugli effetti di diluizione del particolato in atmosfera, sotto le seguenti ipotesi:

- l'inquinamento riguarda un volume di controllo a forma di parallelepipedo con geometria indicata nella Fig. 7, in cui viene immessa globalmente una portata in massa m_k d'inquinante A_k ;
- l'aria all'interno del parallelepipedo è considerata perfettamente miscelata;
- il vento soffia con velocità costante u , diretta parallelamente ad un lato di lunghezza B (in assenza di affidabili rilievi sperimentali, si è assunto un valore, ritenuto cautelativo, di $u = 3$ m/s; questa scelta è giustificata dall'interesse puramente esplorativo della modellazione a questo stadio di approfondimento);
- il regime è stazionario per quanto concerne la quantità di polvere totale M (la quantità di polvere rimossa per diluizione atmosferica dal volume di controllo eguaglia ad ogni istante la portata in massa immessa) $\Rightarrow \frac{\Delta M}{\Delta t} = 0$;
- la massa volumica dell'aria, cioè la concentrazione di polveri sospese, è costante all'interno del volume di controllo;
- non ci sono reazioni chimiche;
- la concentrazione iniziale d'inquinante è nulla.

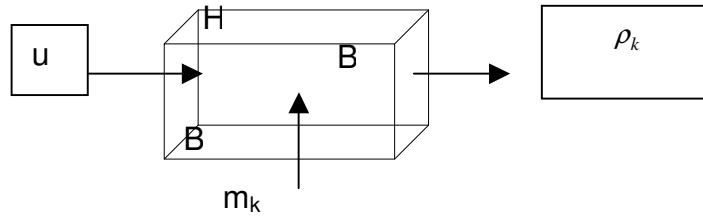


Fig. 7 – Schema del Modello BOX: all’ingresso (velocità del vento e portata in massa dell’inquinante) si associa come uscita del modello la concentrazione di quest’ultimo.

Effettuando, per il parallelepipedo considerato, il bilancio di massa di A_k (espresso in $\mu\text{g}/\text{m}^3$), si ha:

$$\rho_k = \frac{m_k}{u * B * H}$$

L’uso del volume di controllo, nel quale il lato B del parallelepipedo viene fatto coincidere con la distanza dalla sorgente, ed in cui si assume un’altezza H (“altezza di miscelazione”) pari a 100 m dal piano di campagna – in assenza di rilievi meteorologici affidabili – consente di visualizzare ad un primo livello di approssimazione l’effetto di diluizione cui vanno incontro le polveri prodotte in cava.

Nella Fig. 8 è riportata la densità di concentrazione di polveri nel territorio circostante la cava.

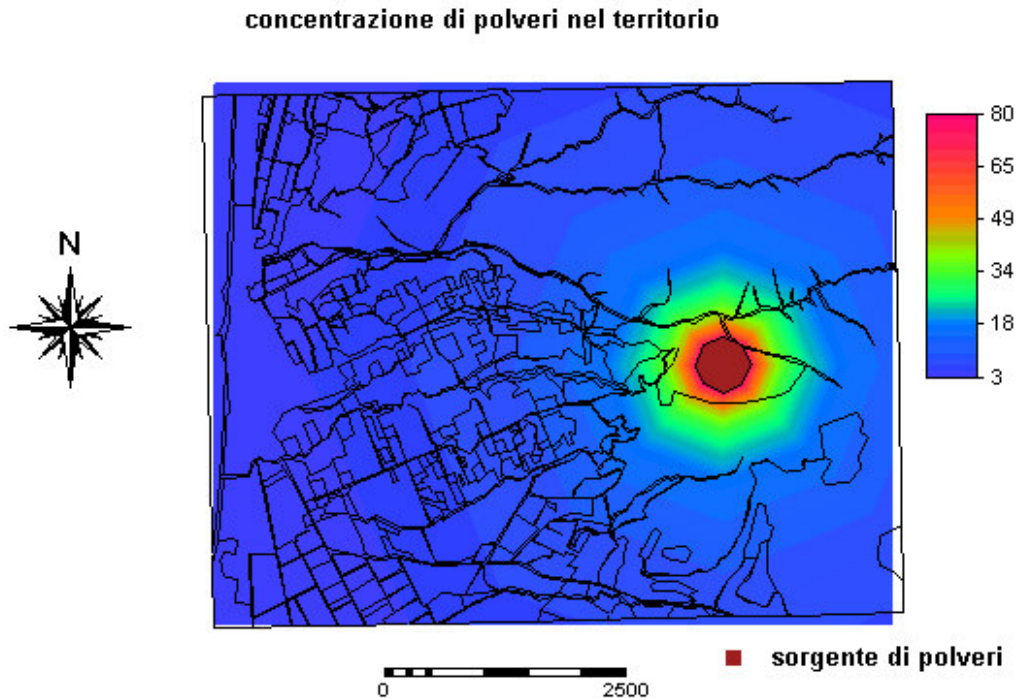


Fig. 8 – Mappa della distribuzione di polvere generata dalle attività di cava (concentrazioni in $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Come si può notare, il modello di screening adottato per stimare la distribuzione dei valori della concentrazione di polveri sul territorio è isotropo e può fornire solo elementi di giudizio di prima approssimazione. Gli ulteriori approfondimenti della ricerca sono stati indirizzati ad analizzare l'applicabilità ed i vantaggi conseguibili ricorrendo a modelli più complessi che effettivamente descrivano il fenomeno nelle diverse condizioni ambientali.

3.3 Vibrazioni nei terreni

Un vasto numero di ricerche teorico – sperimentali, sugli effetti dinamici indotti dalle volate, hanno portato a correlare i parametri fisici del fenomeno vibratorio con i danni. Una delle grandezze più utilizzate è la velocità massima di vibrazione delle particelle del terreno in prossimità delle strutture da salvaguardare. Il criterio della velocità massima è stato recepito da numerose normative, ampiamente riportate dalla letteratura specialistica [10], ed uno dei parametri esaminati nelle Raccomandazioni dell'ISRM [11].

Le numerose leggi di correlazione tra la distanza dal punto di esplosione, la quantità di esplosivo che detona istantaneamente ed il punto di misura sono di forma esponenziale, del tipo:

$$V_{\max} = K \cdot R^{-n} \cdot Q^b$$

ove:

- K, n, b sono parametri che dipendono dal tipo di volata, di esplosivo e dalle caratteristiche della formazione rocciosa;
- R è la distanza dal punto di sparo (m);
- Q è la quantità di esplosivo per ritardo (kg).

I valori proposti per i coefficienti b ed n sono vari [10].

Introducendo il concetto di distanza scalata si può scrivere la precedente relazione nel modo seguente:

$$V_{\max} = K \cdot \left(\frac{R}{Q^c} \right)^{-b}$$

dove R/Q^c è la distanza scalata.

Per c sono stati assunti valori variabili da 0.33 a 1. In altri termini, il valore massimo della velocità delle particelle o di una sua componente (verticale, longitudinale, trasversale) è dipendente dalla distanza scalata. In funzione dei valori limite di velocità delle particelle e di questa relazione, sono state proposte normative di sicurezza che impongono valori della distanza scalata:

$$\frac{R}{Q^c} > D_s$$

I valori dei coefficienti K e b sono stati assunti simili a quelli ottenuti in ammassi rocciosi carbonatici analoghi a quello coltivato dalla cava presa in considerazione da questa ricerca. Nella tabella 3 sono riportati per ogni componente della velocità massima i valori dell'intercetta K e degli esponenti ottenuti con analisi di regressione.

Tab. 3 – Coefficienti, ottenuti con analisi di regressione, della legge di decadimento della velocità, di vibrazione della particelle, con la distanza scalata [12]

roccia	Componente della velocità [cm/s]	b	K
calcare	V_v	1,553	37,042
	V_l	1,632	68,905
	V_t	1,654	56,517

La figura 9 riporta la distribuzione dei valori massimi delle velocità di vibrazione delle particelle del terreno, indotta dal passaggio dell'onda sismica generata dalle volate in cava. La figura 10 mostra la classificazione del territorio in base al comportamento nei confronti dei fenomeni vibratorii [13].

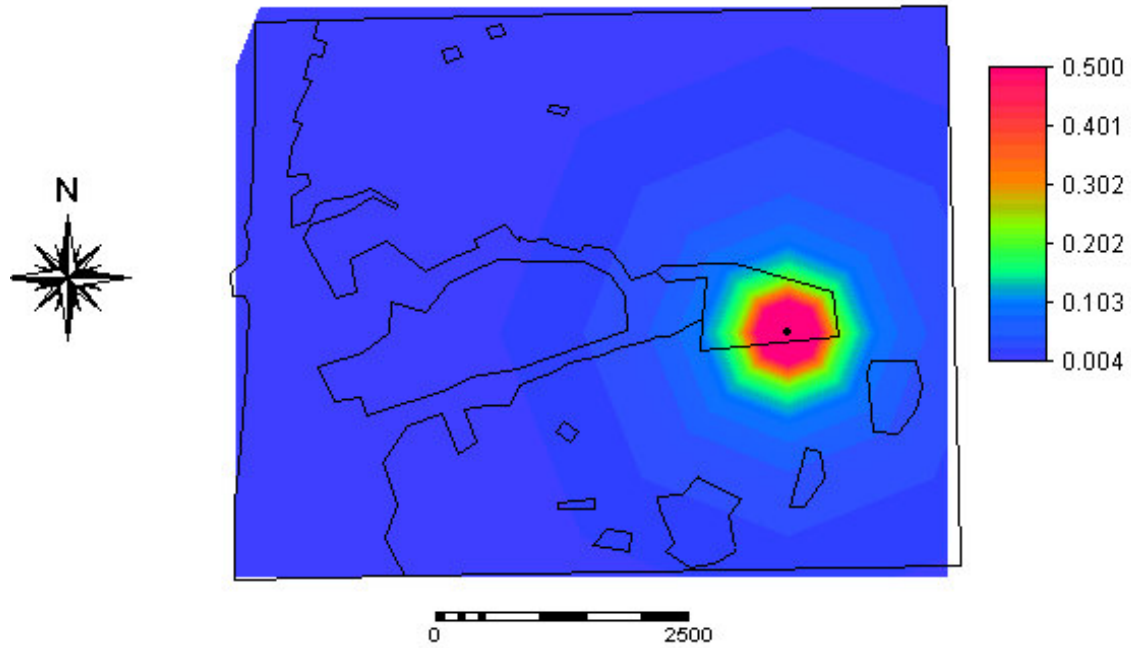


Fig. 9 – Effetti indotti da volate. Distribuzione dei valori massimi dello pseudovettore della velocità di vibrazione delle particelle. I valori sono espressi in cm/s.

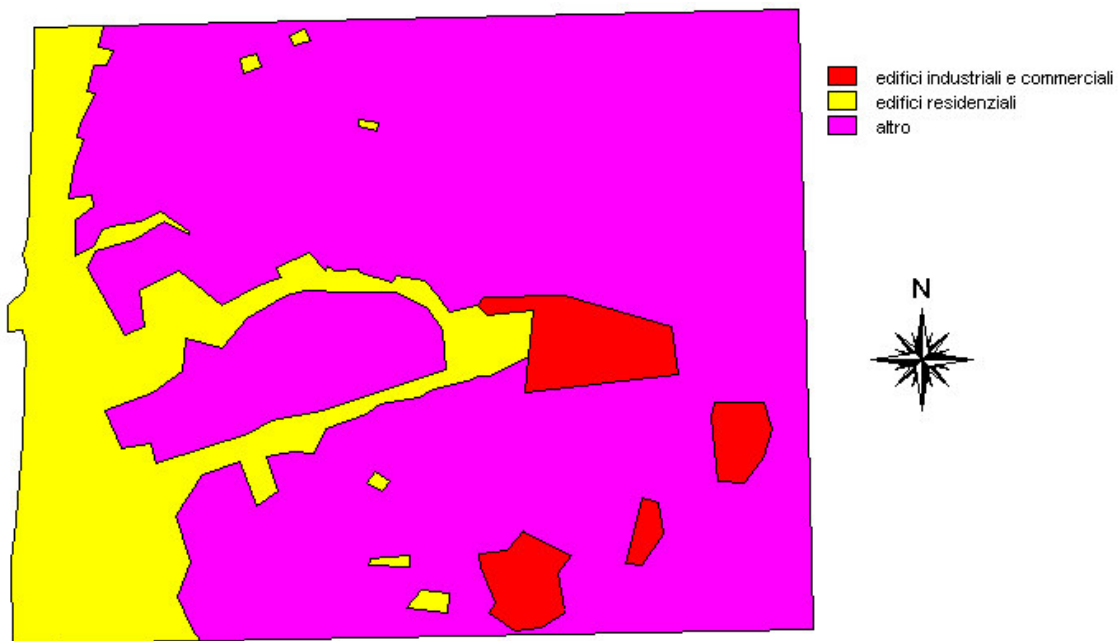


Fig. 10 – Zonizzazione del comportamento del territorio rispetto ai fenomeni vibratori secondo [13].

3.4 Air blast

La detonazione di cariche esplosive causa un'onda di sovrappressione in aria (*air blast*) che può provocare danni alle strutture e recare grave disturbo acustico. L'analisi del fenomeno è piuttosto complessa, soprattutto per quanto riguarda la valutazione dell'ampiezza del picco dell'onda di pressione. L'onda sonora generata da un'esplosione è tipicamente un fenomeno impulsivo, e conseguentemente la valutazione dell'impatto acustico derivante dalla detonazione delle mine deve seguire logiche diverse rispetto al caso dei fenomeni acustici precedentemente trattati. La stima del livello sonoro, in funzione della distanza dalla sorgente, può essere ottenuta ricorrendo alla seguente relazione di tipo empirico [14, 15, 16, 17]:

$$P = K \cdot \left(\frac{D}{\sqrt[3]{Q}} \right)^{-n}$$

dove:

P = pressione sonora istantanea nel punto di misura, (Pa);

D = distanza dal punto di misura dall'esplosione, (m);

Q = carica istantanea, (kg);

K, n = coefficienti sperimentali.

Nella figura 11 sono riportati i valori della pressione indotta in aria dalle volate.

valori del livello di pressione sonora indotti dall'esplosione [dB]

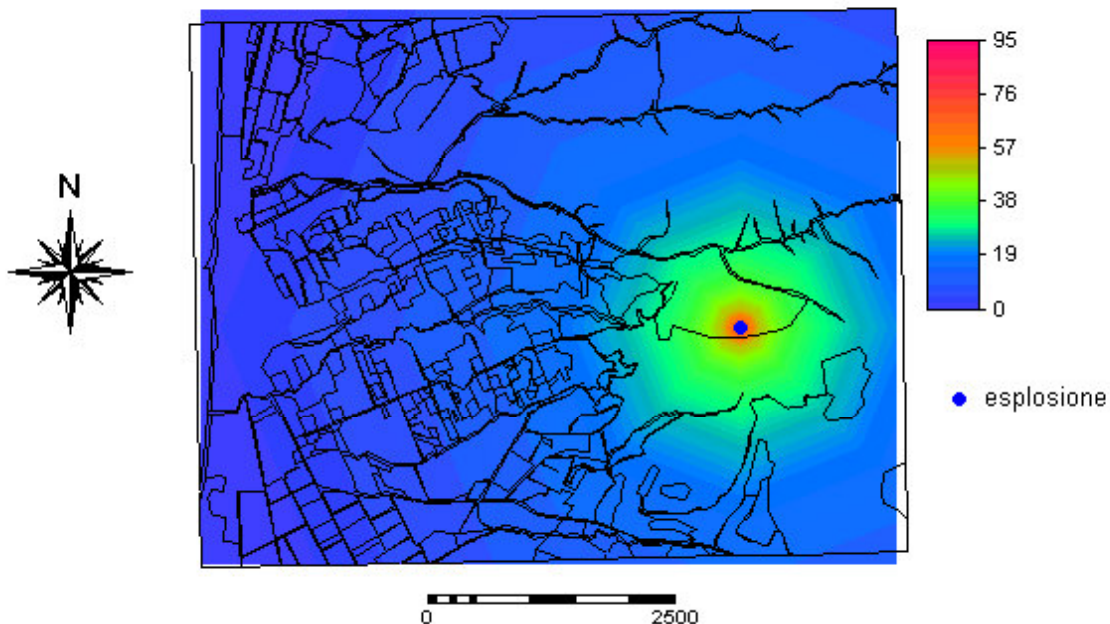


Fig. 11 – Distribuzione dei valori del livello di pressione in aria indotti da volate (valori in dB)

Nello studio della legge di propagazione della sovrappressione si è supposto che lo strato atmosferico, sede del fenomeno, sia immobile e omogeneo. In realtà, tali condizioni sono del tutto improbabili e occorrerebbe tenere conto dei valori puntuali del vento, dello stato termico e dell'umidità. Anche la morfologia e la natura del terreno possono dare luogo a fenomeni di riflessioni o di assorbimenti localizzati dell'onda di pressione. Il limitato numero di ricerche sull'argomento e la tipologia dell'impatto ambientale indotto dalla variazione impulsiva della pressione in aria che, per le volate adottate nella cava studiata, è circoscritto vicino al punto dell'esplosione, giustificano il ricorso all'algoritmo ora descritto, che è valido per propagazione isotropa.

3.5 Disturbance ecologica

Si è scelto di seguire un approccio, oggi largamente condiviso, allo studio degli impatti sugli ecosistemi, interpretando il paesaggio stesso come "sistema di ecosistemi" [18]. Se con il termine ecosistema si intende rappresentare l'insieme degli organismi viventi nel territorio e la loro interazione con il substrato fisico, ogni paesaggio può essere analizzato come insieme di ecosistemi differenti (boschi, siepi, strade, ecc.) chiaramente distinguibili l'uno dall'altro.

Per valutare il disturbo ecologico che l'attività estrattiva presa in considerazione induce sul paesaggio, si è adottato l'Indice di Biopotenzialità Territoriale (Btc) [18] valutandone la variazione dalle condizioni precedenti l'insediamento estrattivo (Fig. 12) allo stato attuale (Fig. 13). La Btc è un indicatore sintetico calcolabile a partire da considerazioni sul concetto di stabilità resistente (resistance stability) dei principali tipi di ecosistemi della biosfera, e dai loro dati metabolici (biomassa, produzione primaria lorda, respirazione). L'indice è espresso in $\text{Mcal/m}^2/\text{anno}$. Una gamma di valori indicativi della Btc è stata calcolata sulla media di elementi paesistici (macchie paesistiche) tipici dell'Europa centro – meridionale, elencati con riferimento a naturalità ed antropicità [18]. Al livello di screening proprio dell'analisi svolta, si è utilizzato questo indice come desunto da detta tabulazione, mentre per analisi più specifiche è possibile perfezionare il calcolo [18-bis].

Si assegna ad ogni macchia paesistica della zona esaminata un valore di Btc.

Ogni macchia del paesaggio è idealmente divisa in due parti: il nucleo (core), o parte interna della macchia, e il bordo (buffer), o parte esterna della macchia.

Si suppone che il valore di Btc sia costante all'interno del nucleo, ed invece nella fascia di bordo il valore vari linearmente fra i due valori di nucleo delle macchie confinanti, come è indicato negli schemi della figura 14.

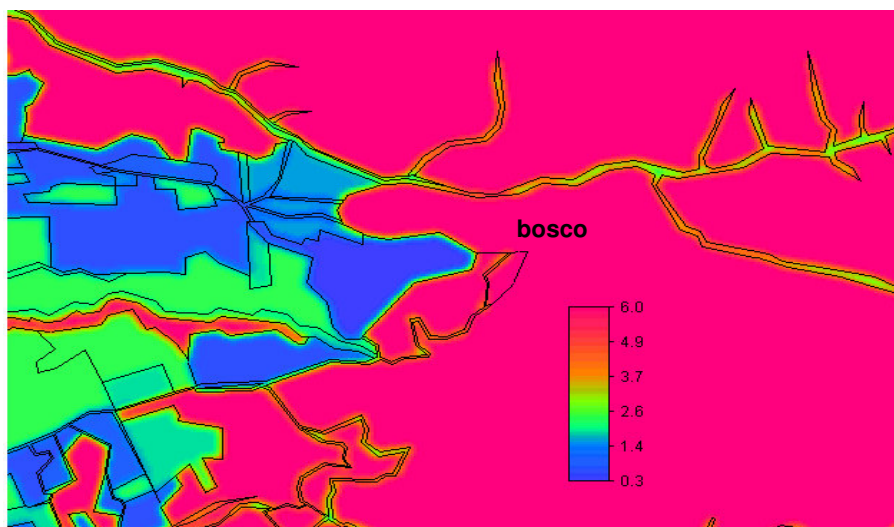


Fig. 12 – Situazione della Biopotenzialità Territoriale (Btc) prima dell'insediamento della cava. Sulla destra è rappresentata l'ampia macchia boschiva interessata dall'insediamento industriale (valori in Mcal/m²/anno).

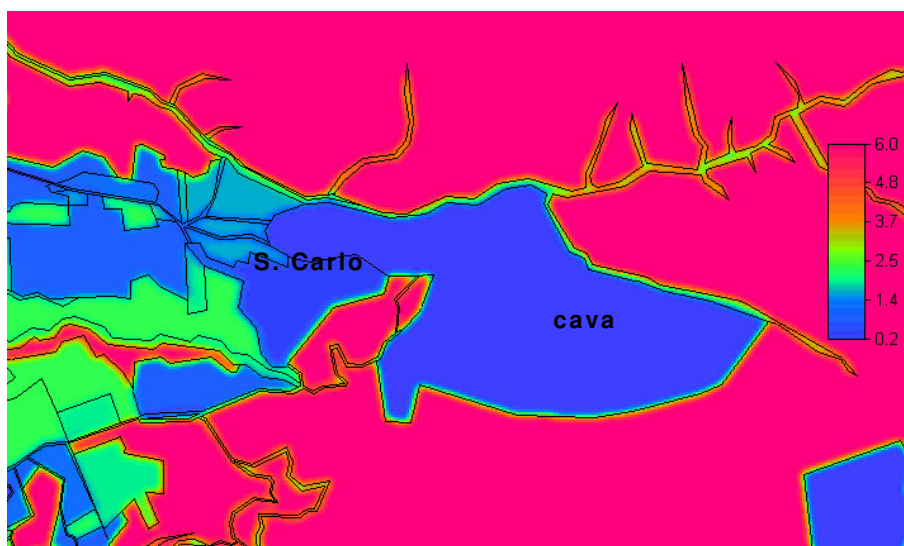


Fig. 13 – Vista ravvicinata della mappa della biopotenzialità Territoriale (Btc) dopo l'insediamento della cava (valori in Mcal/m²/anno). Si nota che la cava provoca un drastico calo della Btc, che si estende al di là dei confini fisici del sito industriale con la legge di variazione convenzionalmente assunta.

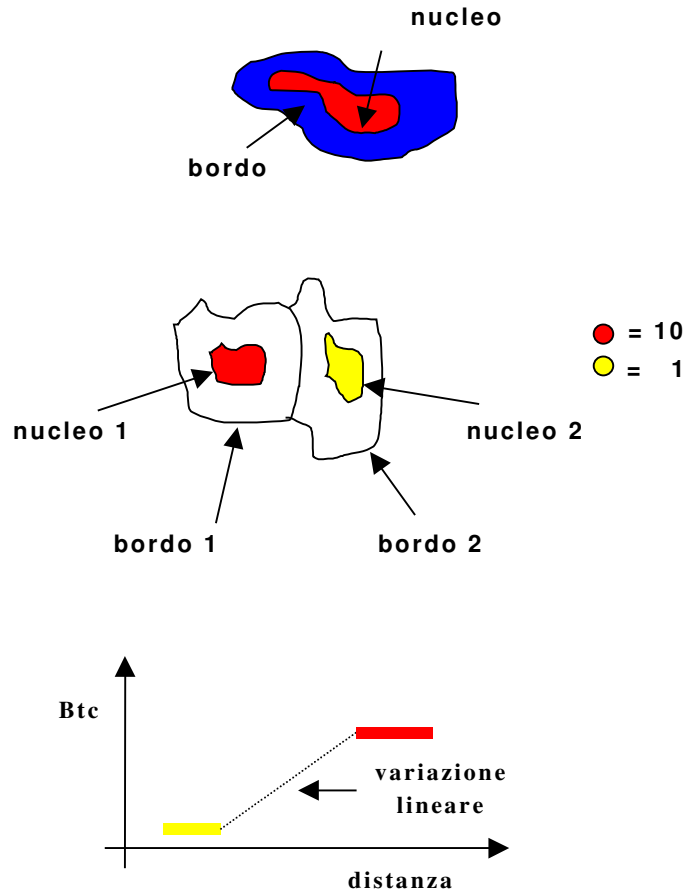


Fig. 14 – Concetto di macchia o ecosistema definito tramite il nucleo ed il bordo, e schema della variazione del valore di Btc tra due ecosistemi adiacenti.

3.6 Impatto visivo

L'impatto visivo di una cava, o di un grande scavo, sul paesaggio si può ricondurre a due fatti essenziali: il primo è dato dal grado di contrasto tra il nuovo aspetto delle zone scavate rispetto alle circostanti; il secondo è legato all'estensione del disturbo ed è riconducibile ai volumi scavati ed in particolare alla superficie del fronte di scavo visibile sui piani dello scenario paesaggistico.

In questo studio si è scelto di utilizzare come indicatore di impatto visivo la percentuale di area occupata dalla superficie di cava rispetto all'area del campo visivo umano ad una data distanza. Il campo visivo umano può essere sinteticamente rappresentato attraverso un'ellisse con le caratteristiche geometriche dello schema di figura 15.

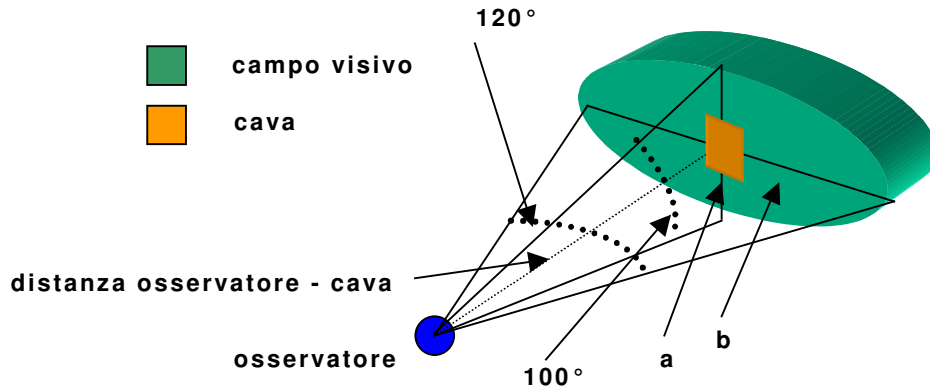


Fig. 15 – Schema della geometria del campo visivo umano

Nello schema, sono indicati i parametri geometrici che vengono calcolati come segue:

- semiasse minore $a = \text{distanza osservatore - cava} * \text{tg}(50^\circ)$
- semiasse maggiore $b = \text{distanza osservatore - cava} * \text{tg}(60^\circ)$

L'area del campo visivo vale $a * b * \pi$;

In questo modo, per ogni distanza osservatore – cava e per ogni angolazione è possibile stimare, almeno in prima approssimazione, la percentuale di area occupata dalla cava rispetto all'area osservata dal campo visivo umano; come è intuitivo, questa percentuale diminuisce per motivi puramente geometrici all'aumentare della distanza dalla cava.

Per individuare i punti da cui la cava è visibile (*viewshed* o bacino di influenza visiva dell'oggetto) ci si è basati sul modello digitale del terreno o DEM (Digital Elevation Model) [19] della zona della cava, suddividendo il fronte di scavo in strisce verticali di ampiezza unitaria (un pixel) per le quali fosse possibile assumere un'altezza del fronte di scavo costante e pari alla media. Il calcolo fornisce una mappa di tipo binario, in cui viene assegnato il valore 1 ai pixel da cui il fronte è visibile, il valore 0 ai pixel rimanenti. Sommando per ogni pixel il valore (0 o 1) riferito ad ognuna delle strisce, e moltiplicando questo valore per l'area di ciascuna striscia, si ottiene per ogni punto il valore dell'area del fronte di scavo visibile. Effettuando il rapporto fra l'area così calcolata e l'area del campo visivo sopra definita, si ottiene la mappa dell'indicatore di impatto visivo già ricordato (Fig. 16).

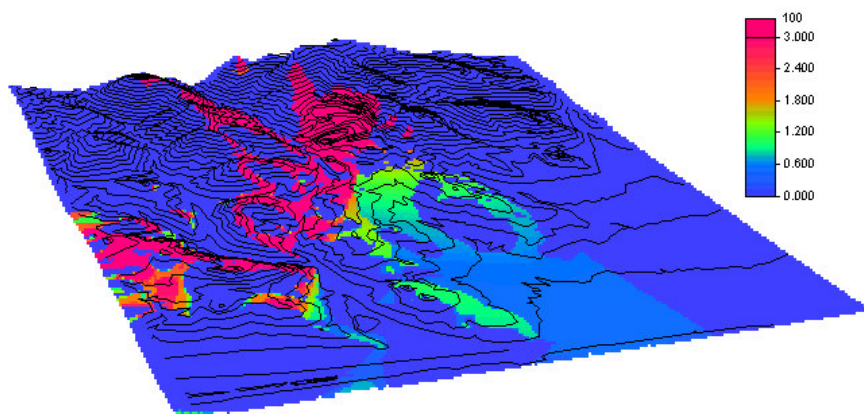


Fig. 16 – Visualizzazione volumetrica della mappa dei valori del rapporto (espresso come percentuale) tra area occupata dalla superficie di cava e area del campo visivo umano (si noti che, per evidenziare la variazione dell'indicatore, si è effettuato uno *stretching* lineare dei valori fra lo 0 ed il 3%)

4. LA VALUTAZIONE E SOVRAPPOSIZIONE DEI VARI IMPATTI

Non esistono regole generali che indichino come convertire i dati di intensità dei fenomeni materiali (livelli di rumore, concentrazione di polvere, velocità delle vibrazioni, impatto visivo, ecc.), che sono potenziali *indicatori* di impatto, in *indici* assoluti di impatto ambientale. In questo studio si è scelto di individuare soglie significative di questi indicatori, alle quali viene assegnato un valore nella scala degli impatti (y) convenzionalmente variabile fra 0 e 10, come già proposto in molti altri studi di impatto ambientale [20].

Come criterio generale, si è deciso di assegnare alla grandezza y il valore 10 in corrispondenza dei punti che hanno valori immediatamente inferiori alle soglie limite di normativa, quando questa esiste¹; il valore 5 ai punti corrispondenti ai valori guida; il valore 0 ai punti che corrispondono all'assenza di impatto. Nei casi in cui una normativa non è disponibile, o non ha senso parlare di soglie, si è normalizzato sulla scala dell'impatto y l'intero range dei valori.

I punti così ottenuti, disposti nel diagramma degli impatti (valore dell'indicatore, impatto), devono essere riportati ad una funzione continua, per poter classificare un *range* continuo di valori degli indicatori in un *range* altrettanto continuo di impatti. Nel caso in esame si è scelto di procedere effettuando un'analisi del *best fit* e di utilizzare la funzione di regressione così calcolata per ciascun caso. Occorre notare che la procedura ha lo scopo di riclassificare il valore degli indicatori in un valore di impatto su scala normalizzata; pertanto, non si può affermare che esista una procedura migliore delle altre, occorre invece giustificare razionalmente le scelte fatte, e sottoporre a discussione i risultati che discendono da queste scelte. La valutazione dell'impatto deve essere giudicata e validata non sulla base della sua

¹ Si ritiene legittima questa assunzione dal momento che i limiti, per i casi considerati, sono stati valutati *safe side* per cui, anche con valori vicini alla soglia, non si hanno situazioni che da elevati *impatti* degenerino in veri e propri *rischi*.

oggettività, ma della sua capacità di rappresentare effettivamente gli impatti percepiti, il che richiede non un calcolo ingegnerizzabile, ma una notevole capacità interpretativa della previsione di impatto, nell'evidenziare le forme e le distribuzioni dei disturbi.

A titolo d'esempio, si riporta la valutazione dell'indice di impatto per le polveri. Il DPR 203/88 [21] fornisce, per la qualità dell'aria, il valore limite ed il valore guida, riportati qui di seguito.

Tab. 4 – Concentrazioni in aria ammesse per le polveri

Polveri	Valore guida ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Valore limite ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Particelle sospese	50	150

I valori dell'indice d'impatto sono assegnati considerando il possibile aumento della concentrazione di polveri, provocato dalle attività di cava, rispetto al valore guida ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) già supposto presente nell'aria.

Tab. 5 – Valori dell'indice d'impatto corrispondenti alle concentrazioni di polveri nell'aria

Indice d'impatto (y)	Concentrazione di polvere indotta dalle lavorazioni ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Concentrazione totale nell'aria ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
0	0	50
5	50	100
10	≥ 90	≥ 140

Con riferimento al diagramma di impatto di figura 17, l'analisi di regressione ha fornito la seguente di correlazione tra la funzione impatto e la concentrazione di polveri:

$$y_p = 0,0003 \cdot x^2 + 0,0861 \cdot x$$

Con analoghe procedure si ottengono gli impatti per tutte le azioni considerate.

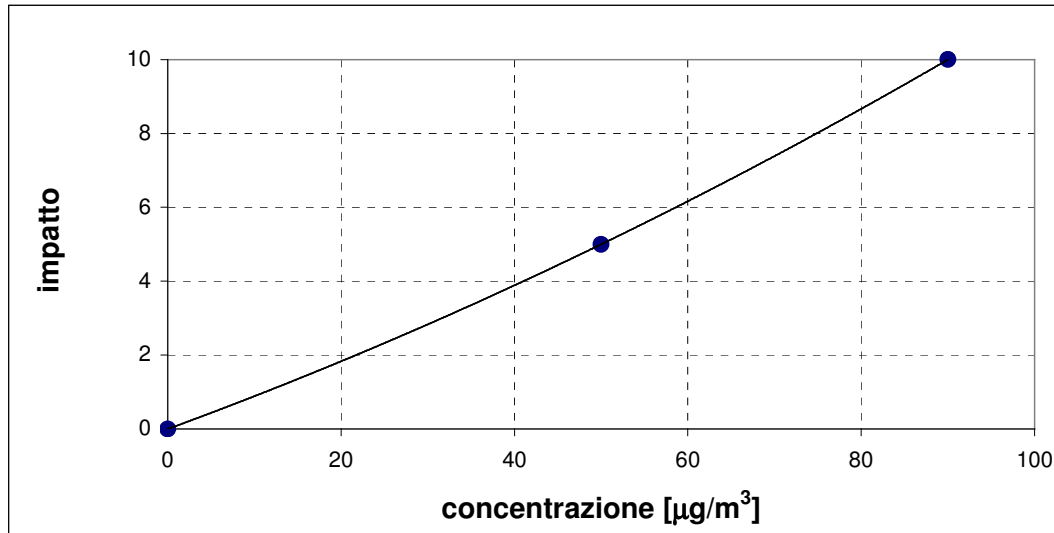


Fig. 17 – Indici di impatto per le polveri corrispondenti a tre diverse concentrazioni in aria

L'indice d'impatto ambientale globale è stato calcolato come somma pesata tra i vari indici, tutti sulla stessa scala, ottenuti analogamente all'esempio descritto. Il peso (importanza) assegnato ad ogni indice d'impatto (e quindi ad ogni azione) è stato ricavato attraverso la tecnica di analisi multicriterio nota come Analytical Hierarchy Process [19], che consiste in un'analisi dell'importanza relativa tra gli impatti, confrontati a due a due.

Con tale approccio, si costruisce una matrice (che risulta essere una matrice reciproca), assegnando alla posizione (i, j) un valore variabile da 1 a 9 (Tab. 6) a seconda del livello di superiorità dell'importanza dell'impatto i sull'impatto j. Se l'impatto j è più importante dell'impatto i, si assegna alla posizione (i, j) l'inverso del valore (1/3, 1/5 ecc.). La matrice assegnata nello studio descritto è mostrata in Tab. 7.

Si può dimostrare [23] che il vettore dei pesi da assegnare ai diversi impatti è l'autovettore normalizzato associato all'unico autovalore non nullo della matrice stessa, che nel caso studiato è risultato pari a:

$$\lambda_{\max} = 6,1378$$

La tabella 8 riporta i pesi calcolati con il metodo descritto.

Tab. 6 – Valori di superiorità di importanza (cfr.[23]).

Importanza	Definizione
1	Medesima importanza
3	Importanza moderatamente superiore
5	Importanza superiore
7	Importanza nettamente superiore
9	Assoluta predominanza
2,4,6,8	Valori intermedi fra i precedenti

Tab. 7 – Matrice dei confronti a coppie

	Rumore	Polveri	Air blast	Vibrazioni	Impatto visivo	Disturbance ecologica
Rumore	1	3	4	5	1/4	1/2
Polveri	1/3	1	2	3	1/5	1/3
Air blast	1/4	1/2	1	2	1/7	1/5
Vibrazioni	1/5	1/3	1/2	1	1/9	1/7
Impatto visivo	4	5	7	9	1	2
Disturbance ecologica	2	3	5	7	1/2	1

Tab. 8 – Pesi normalizzati

Azione	Rumore	Polveri	Air blast	Vibrazioni	Impatto visivo	<i>Disturbance ecologica</i>
pesi normalizzati	0,1630	0,0816	0,0500	0,0326	0,4271	0,2457

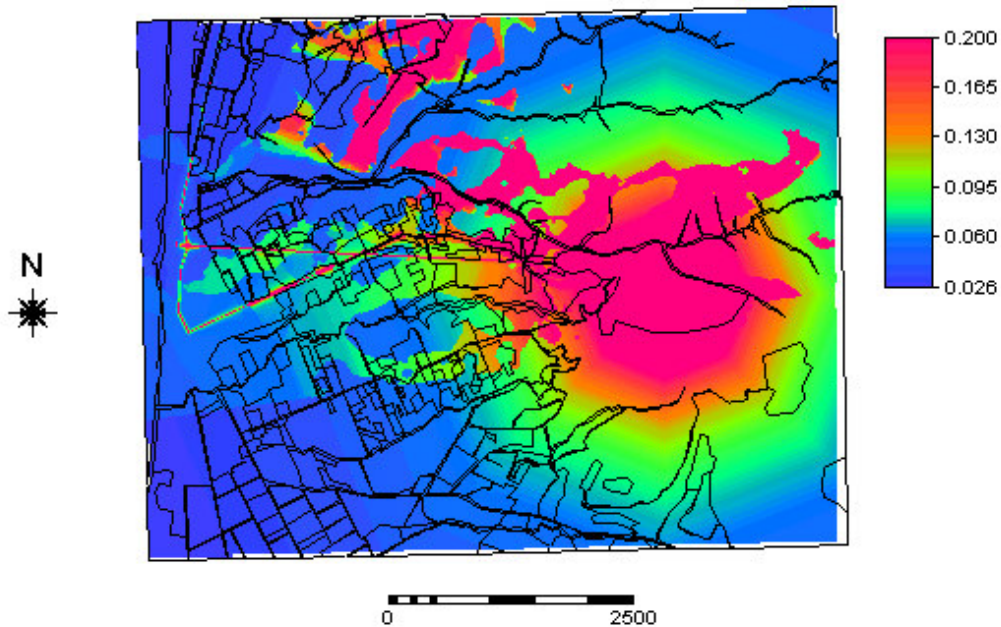


Fig. 18 – Impatto ambientale globale ottenuto per somma pesata dei valori normalizzati degli impatti. I valori hanno significato all'interno di una scala di condizione relativa, e non assoluta; possono pertanto essere utilizzati solo per visualizzare le aree sottoposte a maggiore impatto all'interno del contesto di studio.

Per verificare che i pesi trovati siano corretti, si ricorre all'indice di consistenza della matrice, da calcolare secondo quanto riportato in [19]: questo indice deve risultare inferiore ad 1 ed il più possibile vicino a 0. Se l'indice di consistenza ha valore maggiore di 1, significa che vi sono delle incongruenze nell'assegnazione dei valori d'importanza nella matrice dei confronti a coppie. La verifica, che è unicamente di tipo logico, conferisce rigore all'intero processo di confronti multipli. Nel caso della cava presa in considerazione, l'indice di consistenza è risultato essere molto basso e pari a $\mu = 0,0276$. Bisogna comunque sempre tenere presente che ciascun giudizio di confronto è viziato dalla soggettività di chi lo esprime, ma si ritiene più facile accordarsi su un confronto a coppie che su una scala di importanza complessiva. Questo ha portato alla scelta del metodo del confronto a coppie rispetto alle molte alternative disponibili fra le tecniche di analisi multicriterio. La figura 18 riporta la mappa dei valori di impatto complessivo ottenuto.

5. L'USO DEGLI INDICI COMPLESSIVI DI IMPATTO A SUPPORTO DELLE DECISIONI

Lo spirito con cui si esegue la valutazione di impatto è, in ultima analisi, di individuare le zone a maggiore impatto e le cause da cui esso dipende. Si ritiene che l'approccio proposto offra la possibilità di simulare tutti gli scenari conseguenti ad interventi finalizzati alla mitigazione degli impatti stessi. Ad esempio, l'effetto in termini di variazione degli indici di impatto di un rilevato con funzione di barriera acustica e visiva, messo in opera nella zona ovest dell'area estrattiva, è mostrato dalla figura 19.

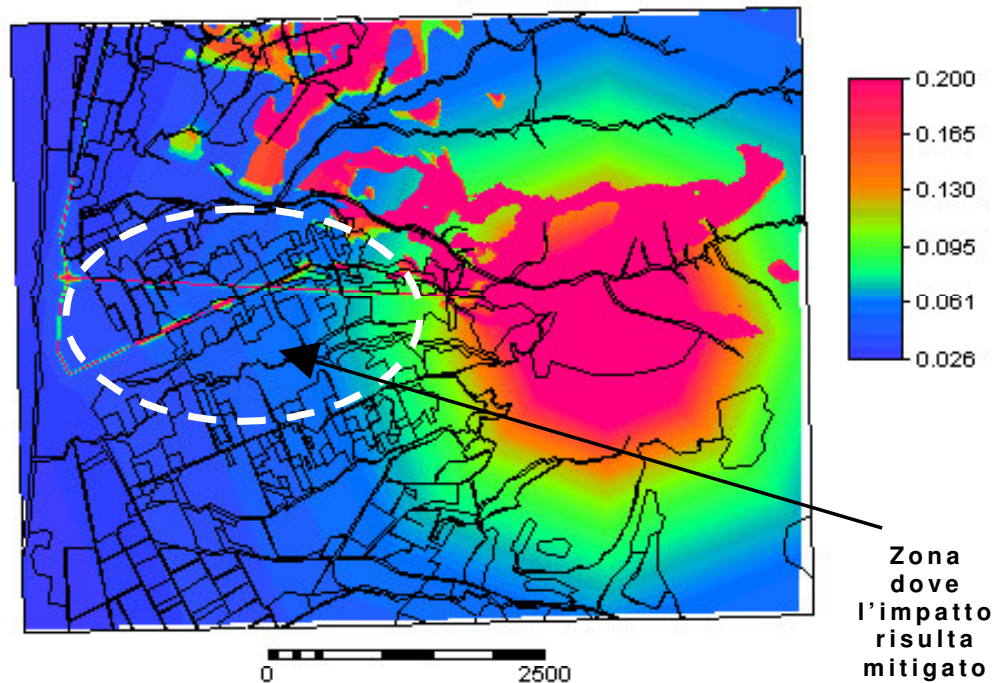


Fig. 19 – Esempio di effetto della mitigazione dell'impatto visivo ed acustico

L'esempio illustra come la VIA possa essere uno strumento di supporto al progettista per:

- correggere e ottimizzare gli aspetti delle lavorazioni già esistenti che più danneggiano l'ambiente fino ad arrivare ad un compromesso che soddisfa tutte le parti in causa;
- operare una scelta che sia la più corretta ed oggettiva possibile tra una serie di alternative di progetto riguardanti l'avviamento dell'attività estrattiva.

Ancora una volta si rimarca l'interpretazione 'anti-positivista' della VIA: non si tratta di un metodo formale standardizzabile per estrarre valutazioni con pretesa di oggettività, ma di un processo interattivo nel quale i progettisti, gli analisti e i pianificatori si incontrano con le varie parti coinvolte, mettendo al centro della discussione gli effetti materiali valutati per vari possibili scenari. Il passaggio dalla stima degli effetti materiali al giudizio del loro impatto ha il compito di evidenziare, sulla base di un giudizio soggettivo ma razionalmente giustificabile, il complesso dei fenomeni che deriva dall'interazione di molteplici impatti elementari. Il metodo proposto, che ricorre ad una tecnica multicriterio di confronto a coppie e a strumenti di modellistica cartografica all'interno dello stesso software applicativo, sembra mostrare buona

capacità di soddisfare sia le esigenze di valutare gli effetti materiali, sia quelle di fornire un giudizio di facile lettura e di pronto utilizzo nella discussione.

6. CONCLUSIONI

L'applicazione di tecniche di analisi basate sui GIS, per la valutazione dell'impatto ambientale delle attività estrattive, consente di sfruttare in modo ottimale:

- a) l'insieme degli elementi di conoscenza sul contesto territoriale, in cui si vuole attivare l'insediamento industriale;
 - b) la descrizione matematica previsionale di fenomeni fisici indotti dalla cava.
- al fine di caratterizzare gli impatti stessi e di controllare l'efficienza ed efficacia degli interventi di mitigazione.

I GIS costituiscono l'ambiente ideale per l'implementazione di questo tipo di procedura, perché consentono un input ed un output cartografico dei dati e facilitano perciò l'inserimento del calcolo proposto all'interno dei processi di piano [24]. Nel caso studiato, sono stati trascurati molti aspetti di dettaglio, ed in particolare una modellazione della dispersione di polveri che tenga conto del tipo di terreno, dell'orografia e della direzione prevalente del vento. I risultati esposti sono relativi solo ai passi iniziali del programma di ricerca, che prevede, tra l'altro, di inglobare nella procedura algoritmi più evoluti per la modellistica della fase atmosferica ed un approfondimento degli aspetti relativi ai fenomeni dell'air blast e delle vibrazioni del terreno. Attualmente si stanno analizzando gli effetti, sulla valutazione degli impatti relativi a questi due fenomeni, di opportuni pesi sulle distanze, derivanti dalla considerazione dei diversi materiali geologici attraversati dall'onda di pressione.

Un altro aspetto da studiare è la possibilità di utilizzare valori caratteristici della distribuzione dei valori numerici considerati (le mappe degli impatti) nel contesto di un quadro (ad esempio matrice AEVIA [25]) di indici di impatto. L'utilità di questo tipo di schemi è ancora importante, soprattutto in sede di confronto complessivo fra alternative (più cave poste in diversi contesti) ed esplicitazione dell'ordine di preferenza. A tale scopo, possono essere utilizzati come punteggi in ingresso nelle matrici, opportunamente riorganizzate, i parametri statistici dell'istogramma dei valori delle mappe di impatto (massimo, media, mediana, ecc.).

Al momento pare possibile concludere che il pieno sfruttamento sia dei dati spazialmente distribuiti circa il territorio in cui si collocherà la cava, sia della conoscenza "a valore aggiunto" derivante dalla modellazione previsionale dei fenomeni fisici, consentono di caratterizzare in maniera piuttosto completa il progetto e i suoi effetti sull'ambiente, nonché di indirizzare le scelte progettuali e valutarne l'efficacia e sostenibilità.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Morris, P., Therivel, R., Methods of Environmental Impact Assessment, UCL Press, London, 1995
- [2] Vanclay, F., Bronstein, D., Environmental and social impact assessment, J.Wiley & Sons, Chichester, 1995
- [3] Prezioso, M., La base geoeconomica della Valutazione di Impatto Ambientale, Pacini, Pisa, 1995
- [4] Malczewski, J., GIS & Multicriteria decision analysis, J.Wiley & Sons, New York, 1999
- [5] Ye, Z., Maidment, D., McKinney, D., Map-based surface and subsurface flow simulation models: an object-oriented and GIS approach; CRWR Online Report 96-5, Austin, Texas, 1996

- [6] Burrough, P.A., Opportunities and limitations of GIS-based modeling of solute transport at the regional scale; in Applications of GIS to the Modeling of Non-point source pollutants in the vadose zone, SSSA special publication No. 48, 1996.
- [7] Munda, G., Multicriteria Evaluation in a Fuzzy Environment, Physica-Verlag, Heidelberg, 1995.
- [8] Norma ISO 9613 – 2: Acoustic attenuation of sound during propagation outdoors – general methods of calculation, International Standard 1996
- [9] Legge 26 ottobre 1995, n. 447, “Legge quadro sull’inquinamento acustico”
- [10] Cancedda, A.; Dantini, E.M.; Carastro, M.; Scavo subacqueo nel porto di Olbia. Problemi di sicurezza connessi con le volate. Quaderni dell'IAM, ottobre, 1980 ed. Istituto di Arte Mineraria, Facoltà di Ingegneria, Università di Roma “La Sapienza”
- [11] ISRM, Raccomandazioni per il monitoraggio delle vibrazioni indotte dal brillamento di cariche esplosive, Ed. sc. Italiane, Rivista Italiana di Geotecnica, anno XXVIII, n°4, ott. – dic. 1994
- [12] Dantini, E.M., Carastro, M., Onde sismiche dovute a volate in cava: ricerca sperimentale di una distanza di sicurezza, L'ingegnere, 1976.
- [13] Norma DIN standard 4150, “Valori limite per il vettore risultante dai massimi delle velocità vibratorie dei terreni in relazione alle tipologie strutturali interessate”
- [14] Kinney, F. K.; Graham, K. J., Explosives Shocks in Air, Springer – Verlag, N.Y., 1985
- [15] Baker, W. E., Explosions in Air, University of Texas Press, Austi, London, 1973
- [16] Granstrom, S. A., Loading Characteristics of Air Blasts from Detonating Charges, Handlingar n° 100, The Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1956
- [17] Berry, P., Dantini, E.M., Stima delle sovrappressioni in aria generate da volate in galleria, Quarry and Construction, XXXII, n° 12, pp. 79 – 87, 1994
- [18] Ingegnoli, V., Fondamenti di ecologia del paesaggio. Studio dei sistemi di ecosistemi, CittàStudi, Milano, 1994
- [18-bis] Ingegnoli, V. (A cura di), Esercizi di ecologia del paesaggio, CittàStudi, Milano, 1996
- [19] Patrono, A., and Saldaña, A., Modeling with neighbourhood operators, ILWIS 2.1 application guide, ILWIS Department-ITC, Enschede, 1997.
- [20] Vismara, R., Ecologia applicata, Hoepli, Milano, 1992
- [21] DPR 24 maggio 1988, n. 208, “Attuazione delle direttive CEE concernenti norme in materia di qualità dell'aria, relativamente a specifici agenti inquinanti, e di inquinamento prodotto dagli impianti industriali, ai sensi della legge 16 aprile 1987, n.183”
- [22] Saaty, T. The Analytical Hierarchy Process for decision in a complex world, RWS Publication, Pittsburgh, 1980
- [23] Saaty, T.L., A scaling method for priorities in hierarchical structures, Journal of mathematical psychology 15, 234-281, 1977.
- [24] Pistocchi, A., Sistemi informativi geografici e pianificazione delle attività estrattive, Quarry and Construction, XXXVII, n° 6, 1999
- [25] 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