

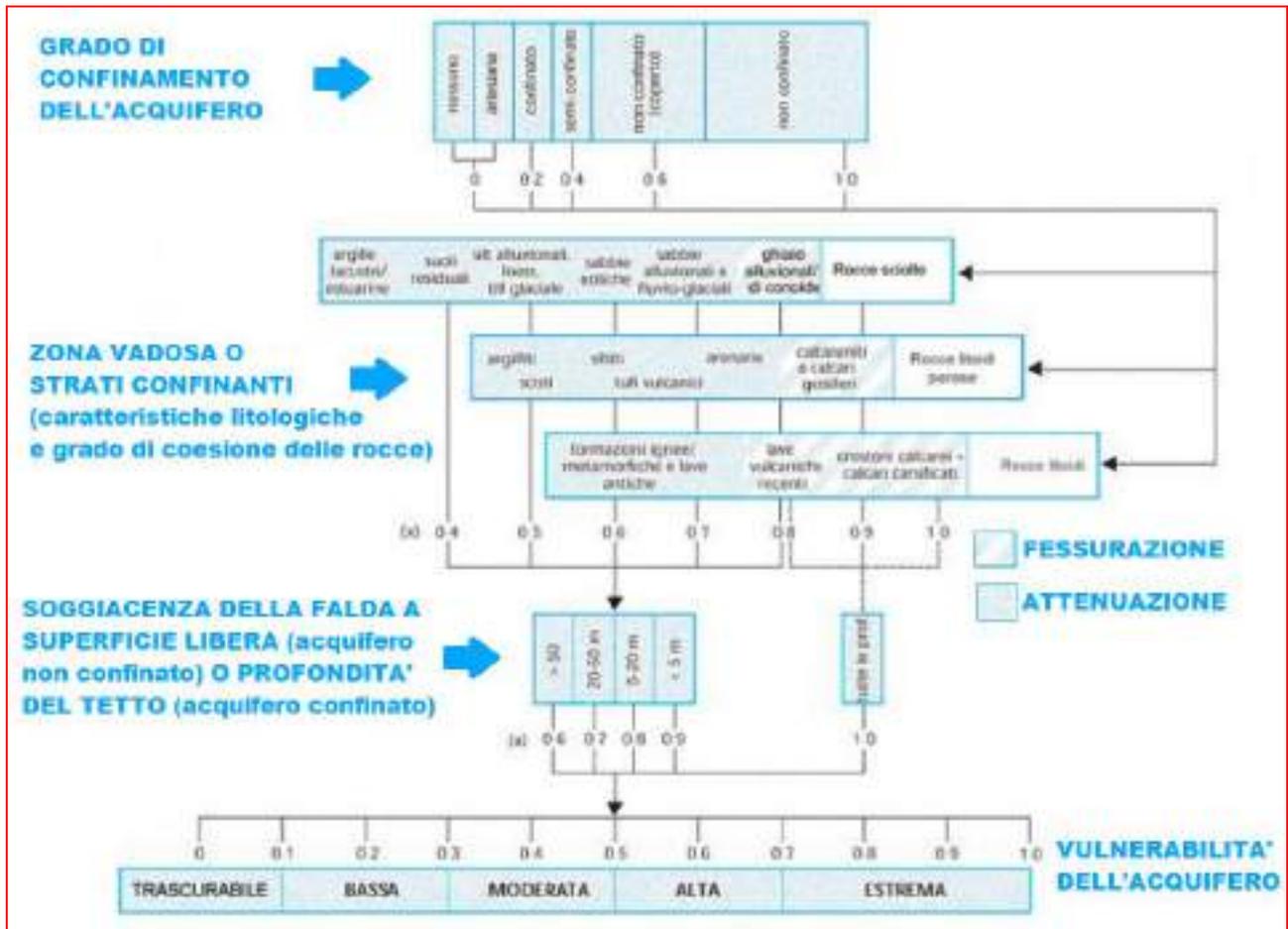
VULNERABILITÀ INTRINSECA DI UN ACQUIFERO ALLA CONTAMINAZIONE

(Luigi Fanizzi - ECOACQUE®)

Col termine “vulnerabilità intrinseca di un acquifero, alla contaminazione” si intende la predisposizione con cui lo stesso, per proprie caratteristiche naturali, possa essere raggiunto e contaminato da una sostanza inquinante. Secondo la definizione di Civita (1987) la vulnerabilità intrinseca di un acquifero, all'inquinamento, può essere espressa, in senso di misura, come *“la suscettività specifica del sistema acquifero, nelle sue diverse parti componenti e nelle diverse situazioni geometriche e idrodinamiche, ad ingerire e diffondere, anche mitigandone gli effetti, un inquinante fluido o idroveicolato, tale da produrre impatto sulla qualità dell'acqua sotterranea, nello spazio e nel tempo”*. La conoscenza della vulnerabilità concorre all'analisi del rischio derivante dalle pressioni rilevate su ciascun corpo idrico sotterraneo. Tutti gli acquiferi (liberi e confinati) presentano un grado di sensibilità alla propagazione di inquinanti, provenienti dalla superficie ovvero immessi direttamente nel sottosuolo, che dipende da una serie di fattori come ad esempio:

1. le caratteristiche fisiche e chimiche del sottosuolo;
2. granulometria, tessitura, porosità efficace, indice di fratturazione del sistema idrologico;
3. soggiacenza della falda ed entità delle sue oscillazioni;
4. i parametri che regolano il deflusso idrico sotterraneo (conducibilità idraulica, trasmissività ecc.);
5. copertura del soprassuolo, condizioni di alimentazione e drenaggio.

Tutti questi fattori concorrono a definire la “vulnerabilità intrinseca” ovvero la vulnerabilità propria del sistema acquifero. La vulnerabilità delle falde, in realtà, è condizionata anche dalla natura e dalla tipologia di sostanza inquinante, proveniente dalla superficie ovvero dalle sue caratteristiche fisico-chimiche (*solubilità in acqua, coefficiente di distribuzione, coefficienti di diffusione eccetera*). Per la stima della vulnerabilità dell'acquifero dell'area d'intervento, si è fatto riferimento al metodo numerico a punteggio semplice, sintetico, sistematico e speditivo, G.O.D. (acronimo di Groundwater occurrence, Overall lithology of aquifer, Depth to groundwater table or strike; S. Foster & R. Hirata, 1988), che consiste nella stima di **3** (tre) parametri fattoriali fondamentali, i cui *ranges* numerici (*magnitudo*), sono riportati nella seguente figura:



Assegnando i seguenti valori:

- 📄 **G:** Tipologia della falda acquifera (libera, confinata, semiconfinata);
- 📄 **O:** Tipo di acquifero, in particolare caratteristiche litologiche e grado di consolidazione delle rocce della zona non satura (per gli acquiferi non confinati) e dei livelli confinanti a tetto (per gli acquiferi confinati);
- 📄 **D:** soggiacenza della falda a superficie libera nel caso di acquiferi non confinati o tetto dell'acquifero nel caso di acquiferi confinati.

La vulnerabilità intrinseca dell'acquifero, all'inquinamento, si ricava dal prodotto dei **3** (tre) indici numerici, corrispondenti ai parametri specifici, sopramenzionati:

$$G.O.D_{Index} = G \cdot O \cdot D$$

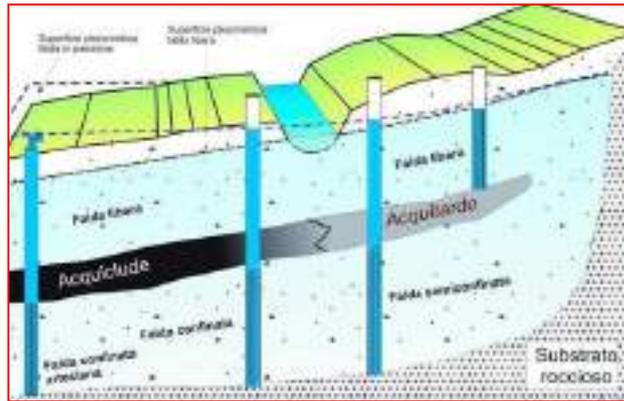
L'indice GOD può essere compreso tra **0** e **1** e corrisponde a **5** gradi di vulnerabilità intrinseca, come di seguito riportati:

GRADI	MAGNITUDO	VULNERABILITA' INTRINSECA
1°	0 ÷ 0,1	TRASCURABILE
2°	0,1 ÷ 0,3	BASSA
3°	0,3 ÷ 0,5	MODERATA
4°	0,5 ÷ 0,7	ALTA
5°	0,7 ÷ 1	ESTREMA

Gli stessi Autori (Foster et Alt., 2002), hanno chiarito il significato dei diversi gradi di vulnerabilità, così come espresso nelle definizioni della seguente Tabella:

GRADO DI VULNERABILITA'	DEFINIZIONE
Estrema	Vulnerabilità alla maggioranza degli inquinanti con rapido impatto in molti dei possibili scenari d'inquinamento.
Alta	Vulnerabilità a molti inquinanti (eccetto quelli fortemente adsorbiti o velocemente trasformati) con rapido impatto in tutti gli scenari di inquinamento.
Moderata	Vulnerabilità a qualche inquinante ma solo quando rilasciati in maniera continua.
Bassa	Vulnerabilità nel caso di inquinanti conservativi rilasciati in maniera continua.
Trascurabile	Sono presenti strati confinanti con flusso verticale non significativo.

La **tipologia della falda**, ossia l'**esistenza o meno di confinamenti dell'acquifero**, da parte di strati di roccia o di terreno semipermeabili od impermeabili, è importante ai fini dell'acquisizione delle sue caratteristiche idrodinamiche e dei suoi condizionamenti pressori (pressioni $\geq p.$ atmosferica). La mancanza di una copertura impermeabile, nei cosiddetti acquiferi liberi, infatti, rende questi ultimi più sensibili all'inquinamento, da parte di sostanze chimiche allo stato liquido, disperse ovvero scaricate sulla superficie topografica.

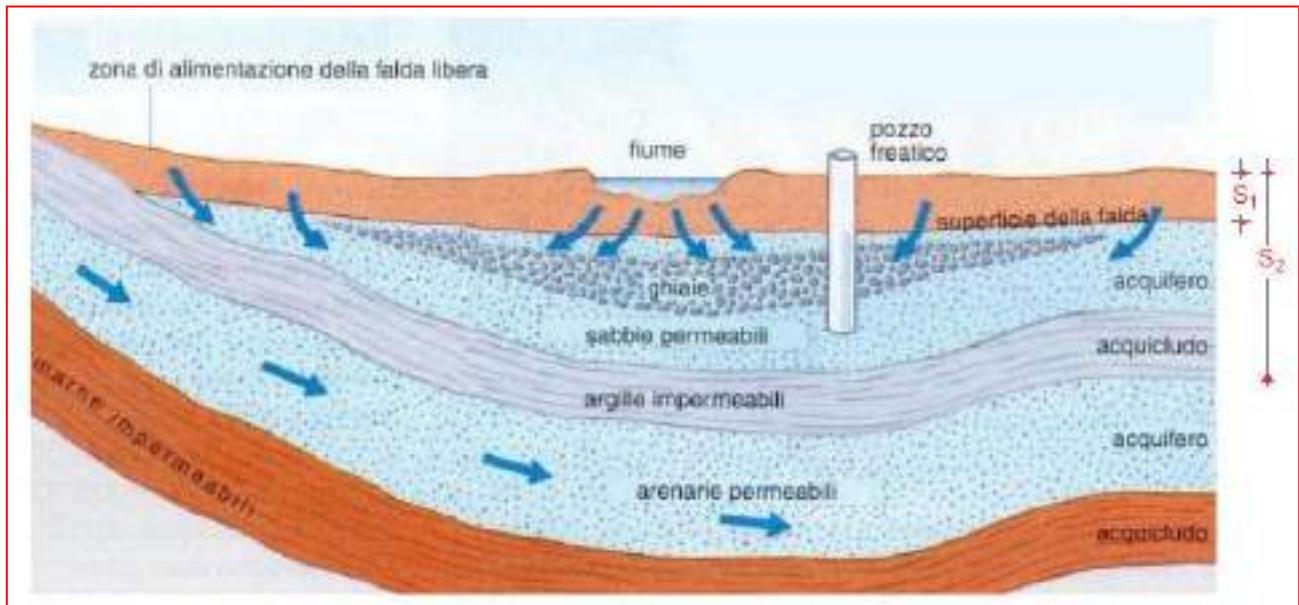


Tipologie di falde acquifere

Il **tipo di acquifero**, esercita il controllo sulla lunghezza del percorso seguito dall'inquinante (da cui dipendono i fenomeni di autodepurazione) e sulla direzione da esso seguita (influenzata dalle variazioni granulometriche e dall'andamento delle fratture). In genere se maggiore è la dimensione del materiale costituente l'acquifero, maggiore è la **permeabilità** e, di conseguenza, maggiore ne risulta la vulnerabilità. Sono stati considerati **depuranti** ossia con **capacità di attenuazione**, i sedimenti non consolidati da **0,40 a 0,75**, le rocce porose consolidate da **0,50 a 0,80** ed infine le rocce cristalline ignee, vulcaniche e metamorfiche da **0,60 a 0,75**.

LITOTIPI	DEPURANTE				NON DEPURANTE			
Alluvioni grossolane								
Calcari carsificati								
Calcari fessurati								
Dolomie fessurate								
Alluvioni medio-fini								
Complessi sabbiosi								
Arenarie e conglomerali								
Alternanze (flysch)								
Marne e argilliti								
Argille e limi								
Piroclastiti diverse								
Metamorfiti fessurate								

La soggiacenza indica la profondità, dal piano campagna, della superficie piezometrica dell'acqua, nel caso di acquiferi freatici, o del tetto dell'acquifero stesso nel caso di falde in pressione. Tale profondità corrisponde alla distanza che un inquinante deve percorrere dalla superficie attraverso il non saturo per raggiungere l'acquifero (tale parametro perde evidentemente di significato nel caso in cui un inquinante venga immesso direttamente in falda). Maggiore è la soggiacenza, maggiore è il tempo di arrivo dell'inquinante in falda e maggiori saranno, quindi, i processi di attenuazione dell'inquinante stesso (diluizione, dispersione, filtrazione meccanica, volatilizzazione, scambio ionico, adsorbimento, eccetera). Ne consegue che più alto è il valore della soggiacenza, minore è il punteggio assegnato e quindi minore è la vulnerabilità all'inquinamento della falda. La soggiacenza è, tuttavia, un parametro dinamico, variabile nel tempo (variazioni annuali, stagionali, climatiche) per cui con essa varia anche il grado di vulnerabilità.

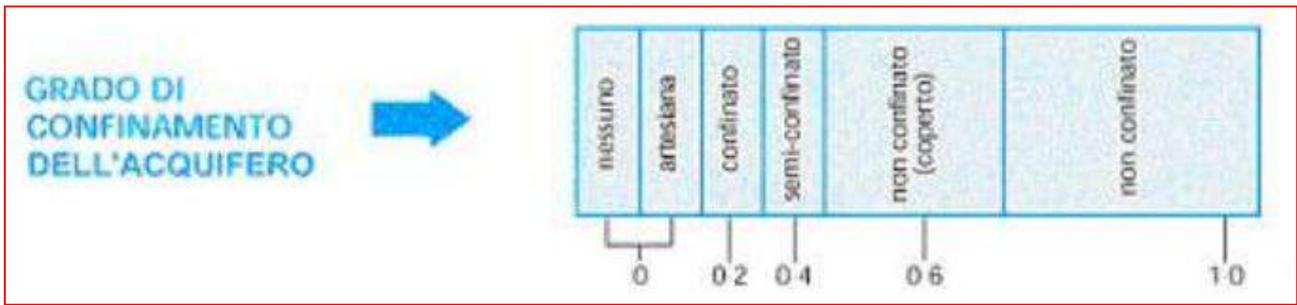


Ad esempio di quanto teoricamente, fin qui esposto, si riporta l'applicazione del metodo sistematico G.O.D., per il calcolo della vulnerabilità intrinseca di un acquifero, all'inquinamento, situato nella regione Puglia, ai fini della localizzazione di un impianto di appropriato trattamento e smaltimento di acque meteoriche di dilavamento, per uno stabilimento produttivo. L'area oggetto di studio è ubicata in un territorio che, sotto l'aspetto idrogeologico, appartiene alla cosiddetta "idrostruttura delle Murge". In tale zona affiorano le rocce calcarenitiche calambriane, ascrivibili alla formazione litologica della **Calcarenite di Gravina**, che costituiscono un cospicuo serbatoio d'acqua. La conducibilità idraulica è molto variabile sia in senso verticale sia orizzontale: il valore medio risulta essere non inferiore a 10^{-5} m/s e la porosità efficace non supera, in media, il 10%. La ricarica della falda avviene mediante una fitta rete di pori che, in occasione di eventi meteorici, divengono le vie preferenziali per l'alimentazione della falda stessa. In conseguenza dell'ubicazione, della quota e delle caratteristiche geolitologiche, il sito si trova in una zona quasi prossima a quella di emergenza della falda, localizzata lungo la costa barese. Tale superficie piezometrica, localmente libera (*acquifero non confinato*), è posta a circa 15 m sul l.m.m. ed è inclinata verso la linea di costa, dove il suo carico si annulla, con cadente prossima a circa $2,5 \cdot 10^{-3}$ m/m. Il soprassuolo, infine, si presenta, praticamente, **privo di vegetazione**.

Per il caso specifico, il metodo G.O.D. ha permesso di valutare la vulnerabilità intrinseca dell'acquifero, secondo il prodotto dei seguenti fattori:

G = rappresenta il grado di confinamento dell'acquifero; sono presenti sei classi alle quali vengono attribuiti punteggi variabili tra 0 e 1. L'acquifero è considerato *coperto* quando lo spessore del **materiale fine** nella zona non satura risulta maggiore od uguale a 3,0 m. Nel caso in cui la soggiacenza della falda fosse inferiore a 3,0 metri, l'acquifero si considera sempre non confinato, per qualsiasi spessore del materiale fine. I litotipi, considerati per ottenere lo spessore del **materiale fine** sono i seguenti:

- ☐ argille;
- ☐ argille limose;
- ☐ argille sabbiose;
- ☐ limi;
- ☐ limi argillosi;
- ☐ limi sabbiosi;
- ☐ alternanze (*flysh*);
- ☐ marne e dolomie;
- ☐ metamorfiti e piroclastiti;
- ☐ arenarie, calcareniti, sabbie alluvionali medio-fini e conglomerati non fessurati.



Per i punti terra esaminati, relativi all'area di studio, la superficie piezometrica risulta essere libera ossia con grado di confinamento dell'acquifero nullo (tipologia: *falda libera*), con magnitudo del parametro **G**, pari a **1** (spessore materiale fine in zona vadosa > 3m).

NOME		DESCRIZIONE	
G	Grado di confinamento	Il tipo di falda locale presenta superficie piezometrica libera ossia con grado di confinamento nullo (coperto) .	
		SITUAZIONE	MAGNITUDO MIN/MAX
Presenza di copertura in zona vadosa ed assenza di vegetazione superficiale		0	0,6
		1	

O = caratteristiche litologiche e grado di coesione delle rocce della **zona non satura** (per gli acquiferi non confinati) e dei livelli confinati a tetto (per gli acquiferi confinati). Alle caratteristiche litologiche ed allo stato di coesione delle rocce della **zona non satura (vadosa)**, per gli **acquiferi non confinati**, o degli strati confinati, per gli acquiferi in pressione, compete un punteggio variabile tra **0,4** e **1**. I valori del parametro **O**, per stratigrafie con strati litoidi diverse, sono calcolati in corrispondenza della zona vadosa ("punti terra") attribuendo un valore stimato sulla base della seguente relazione:

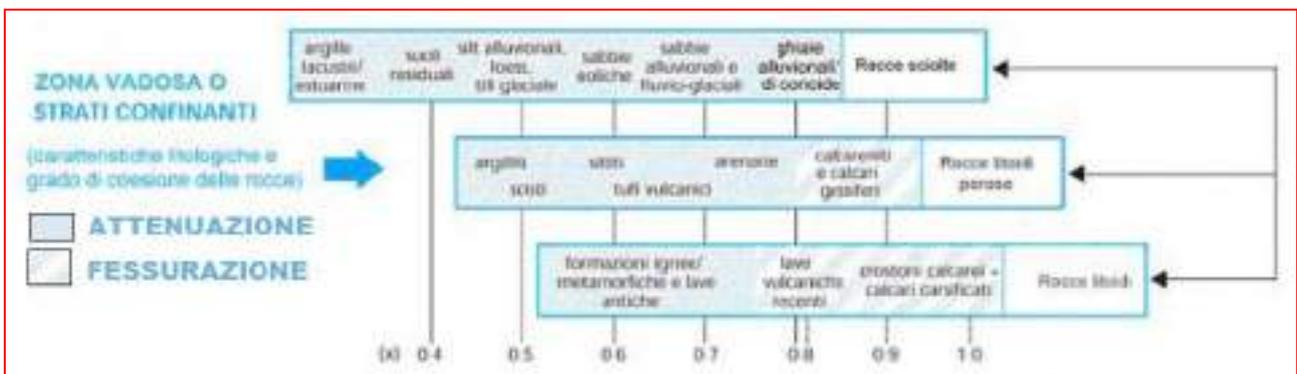
$$O = \frac{\sum(a_i \cdot s_i)}{S_A}$$

dove

a_i = valore del parametro **O** relativo ad ogni livello costituente la stratigrafia della zona non satura, sulla base dei valori previsti dal metodo G.O.D. (2002) per le differenti litologie (Tabella);

s_i = spessore del singolo livello;

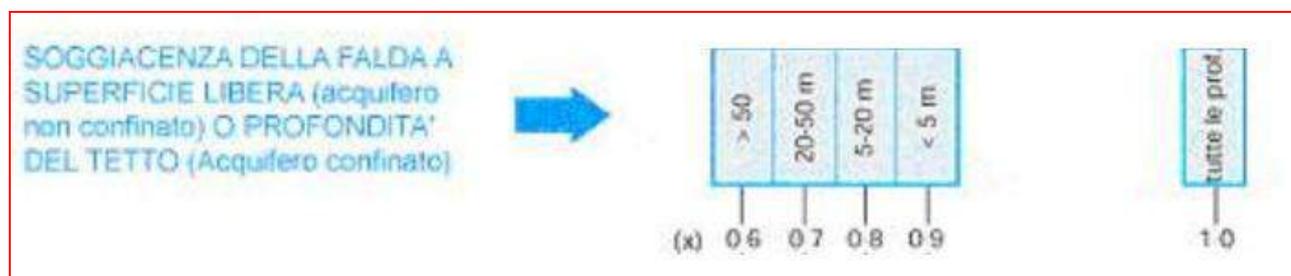
S_A = spessore della zona Anidra (zona Insatura).



Nella fattispecie al parametro **O** è stata assegnata magnitudo pari a **0,90** corrispondente ad una litologia di natura **calcarenitica**.

NOME		DESCRIZIONE	
O	ZONA VADOSA	<i>Le caratteristiche litologiche ed il grado di coesione delle rocce sono quelle ascrivibili a formazioni litoidi porose di tipo calcarenitico.</i>	
SITUAZIONE		MAGNITUDO MIN/MAX	MAGNITUDO DI STIMA
Rocce litoidi porose non attenuanti		0,5	0,90
		0,9	

D = soggiacenza della falda a superficie libera nel caso di acquifero non confinato o tetto dell'acquifero per gli acquiferi confinati, il metodo assegna un punteggio compreso fra **0,6** e **1**.



Nella fattispecie, al parametro **D** è stata assegnata magnitudo pari a **0,8** (**soggiacenza falda: tra 5 e 20 m**).

NOME		DESCRIZIONE	
D	SOGGIACENZA FALDIFERA O PROFONDITA' DI TETTO	<i>Rispetto al piano campagna la superficie libera della falda si trova a circa 15 m.</i>	
SITUAZIONE		MAGNITUDO MIN/MAX	MAGNITUDO DI STIMA
Acquifero non confinato		0,6	0,80
		1	

L'influenza complessiva di tutti i fattori considerati, sulla componente idrica sotterranea ossia l'indice di vulnerabilità intrinseca dell'acquifero, all'inquinamento, espressa dall'indice GOD è data, pertanto, dal prodotto degli stessi, ossia:

$$\text{G.O.D.} = 0,6 \cdot 0,9 \cdot 0,8 = \mathbf{0,432}$$
 che determina un grado di vulnerabilità **MODERATO**.

Dato che, dalla letteratura, si evince che con i metodi parametrici, come il G.O.D., si ottengono valori di vulnerabilità, generalmente, di poco inferiori alla vulnerabilità intrinseca reale (Civita, 1994), si è ritenuto opportuno, in via del tutto cautelativa, aumentare la magnitudo dell'indice di vulnerabilità, portandola, così, al valore **0,518** di vulnerabilità **ALTA**, ottenuto dal prodotto, dei tre fattori parametrici, aumentato del **20 %** (anziché del **15 %**), per l'assenza, nel soprassuolo, di copertura vegetazionale.



Considerato che l'intervento proposto dovrà rispettare le prescrizioni riportate nelle NTA del PAI dell'Autorità di Bacino della Puglia (2005) oltre che nel Piano di Tutela delle Acque regionale (2009; agg. 2015-2021), le prescrizioni del D. Lgs. 3 aprile 2006, N. 152 e s.m.i. nonché del D.Lgs. 18 agosto 2000, N. 258, volte alla tutela dall'inquinamento delle risorse idriche captate ad uso idropotabile, si ritiene che la realizzazione della struttura di progetto sia compatibile con la locale condizione idrogeologica dell'ambito analizzato e che non sia in grado di apportare significative alterazioni/modificazioni.

Il sistema di calcolo della vulnerabilità dell'acquifero, il metodo G.O.D. e la sua applicazione, dovranno essere preceduti dai seguenti, approfonditi, inquadramenti, caratteristici del territorio in esame:

- INQUADRAMENTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E GEOPEDOLOGICO**
- INQUADRAMENTO GEOLOGICO*
 - INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO*
 - INQUADRAMENTO GEOPEDOLOGICO*
- INQUADRAMENTO IDROGRAFICO ED IDROGEOLOGICO**
- IDROGRAFIA*
 - IDROGEOLOGIA*
 - 1 STRUTTURA DELLE FALDE IDRICHE*
 - 2 LA FALDA SUPERFICIALE NEL TERRITORIO*

BIBLIOGRAFIA

- [1] Foster, S., y R. Hirata (1988): "Groundwater pollution risk: a methodology using available data". WHO-PAHO/HPE-CEPIS Technical Manual, Lima, Perù.
- [2] Foster S.S.D. (1987): "Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy". Proc. Int. Conf. vulnerability of soil and groundwater to pollutants, Noordwijk, The Netherlands, pp. 69-86.
- [3] Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M. and Paris, M. (2002): "Groundwater Quality Protection: a Guide for Water Utilities, Municipal Authorities and Environment Agencies". World Bank Publication: Washington D.C., USA, pp.103.
- [4] Civita M. (1987): "La previsione e la prevenzione del rischio di inquinamento delle acque sotterranee a livello regionale mediante le carte di vulnerabilità. Atti del Convegno "Inquinamento delle Acque Sotterranee: Previsione e Prevenzione", Mantova, Prov. MN, Ass. Amb. e Ecol., pp. 9-18.
- [5] ISPRA (2001): "Linee guida per la redazione e l'uso delle carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento". Manuali e linee guida 4/2001, ANPA, Dip. Stato dell'Ambiente, Controlli e Sistemi informativi, Roma.
- [6] CIVITA M. (1994): "Le carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento: teoria e pratica", Pitagora Editrice, Bologna.