

# Strutture Geologiche per i Modelli di Flusso degli Acquiferi

J.P. Brandenburg  
Traduzione: Alessio Fileccia

# *Strutture Geologiche per i Modelli di Flusso degli Acquiferi*

*The Groundwater Project*

*J.P. Brandenburg*

*Senior Geologist  
Haley & Aldrich, Incorporated  
Ann Arbor, Michigan, United States*

*Traduzione: Alessio Fileccia  
Consulente in Idrogeologia*

*Strutture geologiche  
per i modelli di flusso  
degli acquiferi*

*The Groundwater Project  
Guelph, Ontario, Canada*

Tutti i diritti sono riservati. Questa opera è protetta da copyright. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in alcuna forma o con ogni mezzo, senza il permesso scritto degli autori (per ottenerlo, contattare: [permissions@gw-project.org](mailto:permissions@gw-project.org)). Sono altresì vietate la distribuzione commerciale ed ogni forma di riproduzione.

I testi di GW-Project possono essere scaricati liberamente dal sito [gw-project.org](http://gw-project.org).

Chiunque può condividere il link [gw-project.org](http://gw-project.org) per scaricare i lavori di GW-Project. Non è permesso inserire i documenti di GW-Project su altri siti web, né inviare direttamente copie degli stessi ad altri.

Copyright © 2020 J.P. Brandenburg (Autore)

Pubblicato da “the Groundwater Project”, Guelph, Ontario, Canada, 2020.

Brandenburg, J.P.

Geologic Frameworks for Groundwater Flow Models / J.P. Brandenburg - Guelph, Ontario, Canada, 2020.

25 pages.

ISBN: 978-1-7770541-9-9

Traduzione di Alessio Fileccia, 2021.

28 pagine

ISBN: 978-1-77470-026-6

DOI: <https://doi.org/10.21083/978-1-7770541-9-9>

Siete invitati ad iscrivervi alla mailing-list di “the Groundwater Project” per essere informati su nuove pubblicazioni, eventi e modalità per collaborare al progetto. Iscrivervi alla mailing-list ci aiuta a costruire una comunità internazionale di studiosi degli acquiferi. [Inscriviti](#).

**Citazione:** Brandenburg, J.P., 2020, [Geologic Frameworks for Groundwater Flow Models](#). The Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada.



*Editori:* John Cherry e Eileen Poeter

*Direzione:* John Cherry, Paul Hsieh, Ineke Kalwij, Stephen Moran, Everton de Oliveira e Eileen Poeter

*Comitato organizzatore:* John Cherry, Allan Freeze, Paul Hsieh, Ineke Kalwij, Douglas Mackay, Stephen Moran, Everton de Oliveira, Beth Parker, Eileen Poeter, Ying Fan, Warren Wood, e Yan Zheng.

*Copertina:* J.P. Brandenburg, 2020

*Traduzione italiana:* Alessio Fileccia

# Indice

<b>PRESENTAZIONE DI THE GROUNDWATER PROJECT .....</b>	<b>V</b>
<b>PREMESSA.....</b>	<b>VI</b>
<b>PREMESSA ALLA VERSIONE ITALIANA .....</b>	<b>VII</b>
<b>PREFAZIONE .....</b>	<b>VIII</b>
<b>RINGRAZIAMENTI.....</b>	<b>IX</b>
<b>RINGRAZIAMENTI DEL TRADUTTORE .....</b>	<b>X</b>
<b>1 INQUADRAMENTO GENERALE.....</b>	<b>1</b>
<b>2 INTRODUZIONE .....</b>	<b>2</b>
<b>3 CONTESTO E SCOPI .....</b>	<b>3</b>
3.1 MODELLI CONCETTUALI .....	3
3.2 GEOLOGIA LOCALE .....	3
3.3 GEOLOGIA STRUTTURALE .....	3
3.4 STRATIGRAFIA .....	4
<b>4 RICOSTRUZIONE DELLA STRUTTURA GEOLOGICA .....</b>	<b>5</b>
4.1 MAPPE E SEZIONI .....	5
4.2 SUPERFICI.....	5
4.3 COSTRUIRE LA GRIGLIA (GRIDDING) .....	8
<b>5 CALCOLARE LE PROPRIETÀ .....</b>	<b>11</b>
5.1 SPESSORE TOTALE .....	11
5.2 SPESSORE NETTO.....	12
5.3 RAPPORTO SPESSORE NETTO-SPESSORE TOTALE .....	13
5.4 PROPRIETÀ .....	13
<b>6 IL MODELLO .....</b>	<b>15</b>
<b>7 RICOSTRUZIONE DI UN MODELLO STATICO DALLA MAPPATURA DELLE FACIES.....</b>	<b>16</b>
<b>8 COSTRUZIONE DI UN MODELLO STATICO CON PROPRIETÀ RIDIMENSIONATE .....</b>	<b>17</b>
<b>9 COSTRUZIONE DI UN MODELLO STATICO DALLA LITOLOGIA .....</b>	<b>19</b>
<b>10 CONCLUSIONI.....</b>	<b>20</b>
<b>11 BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>21</b>
<b>12 ESERCIZI .....</b>	<b>22</b>
ESERCIZIO 1.....	22
ESERCIZIO 2.....	22
ESERCIZIO 3.....	22
<b>13 APPROFONDIMENTO BOXES .....</b>	<b>23</b>
<b>14 SOLUZIONE DEGLI ESERCIZI .....</b>	<b>25</b>
ESERCIZIO 1 - SOLUZIONE .....	25
ESERCIZIO 2 - SOLUZIONE .....	25
ESERCIZIO 3 - SOLUZIONE .....	25
<b>15 BREVE PROFILO DELL'AUTORE.....</b>	<b>26</b>
<b>16 BREVE PROFILO DEL TRADUTTORE .....</b>	<b>27</b>
<b>MODIFICHE ALL'EDIZIONE ORIGINALE.....</b>	<b>A</b>

## Presentazione di The Groundwater Project

I soci e membri dell'Agenzia delle Nazioni Unite UN-Water stabiliscono i loro progetti con alcuni anni di anticipo. Il tema del World Water Day del 22 marzo 2022, è:

“L'acqua sotterranea: rendere visibile l'invisibile.” Tale proposta è molto appropriata per il debutto dei primi testi di Groundwater Project (GW-Project) nel 2020, avente lo scopo di rendere visibile l'acqua sotterranea.

The GW-Project, un'organizzazione non-profit registrata in Canada nel 2019, si è data il compito di contribuire a migliorare l'istruzione portando un nuovo metodo alla creazione e diffusione della conoscenza e della soluzione di problemi. The GW-Project gestisce il sito web <https://gw-project.org>, come piattaforma globale per una diffusione democratica delle conoscenze sugli acquiferi ed è basata sul principio che:

*“Il sapere dovrebbe essere libero e quello migliore dovrebbe essere libero sapere.” Anonimo*

La missione di The GW-Project è quella di rendere accessibile liberamente online, materiale educativo di alta qualità ed in molte lingue diverse per tutti quelli che desiderano imparare le problematiche legate all'acqua sotterranea e comprendere come essa si relaziona e sostiene i sistemi ecologici e le attività umane. Questo costituisce un nuovo aspetto di impegno educativo globale, nel senso che è basato sul volontariato professionale da parte di accademici, consulenti e personale in quiescenza provenienti da diverse discipline di studio. The GW-Project è costituito da centinaia di volontari, in continuo aumento e provenienti da più di 200 organizzazioni di 14 paesi e 6 continenti.

The GW-Project costituisce uno sforzo continuo, con centinaia di libri da pubblicare online nei prossimi anni, inizialmente in inglese e quindi in altre lingue, per essere scaricati ovunque Internet sia operativo. Le pubblicazioni di GW-Project comprendono anche materiale di supporto come filmati, lezioni, prove di laboratorio, e sussidi didattici in collegamento a software di dominio pubblico nel settore acque sotterranee e come appoggio al processo educativo.

The GW-Project è un'entità in continuo divenire, con ulteriori edizioni dei libri pubblicate periodicamente. I lettori sono quindi invitati a proporre eventuali modifiche.

Vi ringraziamo di far parte della Comunità del GW-Project. Speriamo di ricevere da voi i vostri commenti sui testi ed il materiale educativo. Apprezziamo idee e volontari!

Il Comitato Organizzatore di The GW-Project

Novembre 2020

## Premessa

L'idrogeologia applicata richiede l'applicazione di modelli concettuali per rappresentare il flusso delle acque sotterranee, aspetto chiave per risolvere problemi di contaminazione. Per comprendere le condizioni idrogeologiche si deve iniziare a capire la geologia e quindi utilizzare quelle informazioni geologiche per effettuare delle stime di conducibilità idraulica e porosità. A sua volta la distribuzione della conducibilità idraulica e della porosità ricavata dalla geologia è utilizzata per costruire una rappresentazione idrogeologica del sistema di flusso sotterraneo. Prima degli anni '70 questa procedura era effettuata con carta e penna ma oggi si esegue facilmente tramite dei software. Comunque per usare questi programmi efficacemente, è essenziale comprendere questo processo di conversione. Questo libro: Strutture Geologiche per i Modelli di Flusso degli Acquiferi di J.P. Brandenburg è un'introduzione al processo di conversione molto utilizzato nell'industria petrolifera, ma che è rimasto in secondo piano nel settore dell'idrogeologia. Gli Idrogeologi sono consapevoli che i modelli numerici tridimensionali sono essenziali, ma è la conversione dalla geologia all'idrogeologia che necessita di essere meglio chiarita. Questa conversione è nota come "modellazione statica", che precede la "modellazione dinamica". La modellazione dinamica si riferisce alla modellazione del flusso e trasporto (per esempio, gli acquiferi sono considerati ambienti statici, ma i fluidi in essi contenuti sono in movimento e quindi dinamici).

J.P. Brandenburg, autore di questo libro è particolarmente qualificato in questo settore possedendo una buona preparazione sia in geologia che nella dinamica dei fluidi; si è occupato di conversione per sofisticati modelli statici e dinamici nell'industria petrolifera; e attualmente è specializzato sulla conversione di complessi modelli di acquiferi nelle tre dimensioni.

John Cherry, The Groundwater Project Leader  
Guelph, Ontario, Canada, Novembre 2020

## Premessa alla Versione Italiana

In Italia l'Idrogeologia non ha ancora goduto della stessa divulgazione ricevuta da altre materie delle Scienze della Terra. Lo stesso non è vero per i paesi di lingua anglosassone dove si assiste da tempo anche ad una fruttuosa collaborazione tra geologi, ingegneri, matematici. Gli argomenti trattati in questo libro sono un buon esempio di tale collaborazione e questo è uno dei motivi per cui ho accettato di occuparmi della traduzione. Un altro aspetto che ho considerato è la chiarezza e sinteticità con cui i concetti sono esposti e resi comprensibili. Questo approccio, denota da parte dell'Autore la sua familiarità con la materia ed il suo impegno e successo per renderla fruibile ed applicabile da parte di una vasta platea di lettori. Lo stesso atteggiamento lo ritroviamo in tutti gli altri testi disponibili su The GW-Project. E' pertanto un esempio che mi sento di appoggiare e far conoscere, considerata anche l'esperienza e l'autorevolezza di tutti gli autori.

Alessio Fileccia, volontario di The Groundwater Project

Luglio 2021

## Prefazione

Tutti quelli che si dedicano alla modellazione numerica degli acquiferi dovrebbero conoscere ed avere accesso ai metodi per trasformare la geologia del sottosuolo in una rappresentazione numerica. Inoltre gli idrogeologi ne trarrebbero un beneficio dalla comprensione di questi processi. Questo libro è un'introduzione ad alcune tecniche per ricostruire la struttura geologica sotterranea dei modelli di flusso sotterraneo. Il testo fa riferimento ad un sito ipotetico con un acquifero inquinato, ed inizia con l'illustrazione della raccolta dati ed interpretazione geologica, quindi descrive le fasi richieste per costruire un modello numerico realistico. Il lettore vedrà che molti metodi e calcoli possono essere applicati con semplice carta e matita. Ogni volta che è stato possibile sono stati inseriti dei link a risorse di calcolo disponibili pubblicamente.

## Ringraziamenti

Ringrazio le seguenti persone per l'utile e completa revisione e per avere contribuito al libro:

- ❖ John G. Solum, Shell International Exploration and Production;
- ❖ Steve Naruk, Adjunct Professor, Department of Earth and Atmospheric Sciences, University of Houston; and,
- ❖ Murray Einarson, Technical Expert, Haley & Aldrich, Inc.

Sono stati molto apprezzati i suggerimenti e contributi di Eileen Poeter. Sono anche grato per la supervisione di Amanda Sills e redazione del testo da parte di Elhana Dyck entrambe di the Ground Water Project, Guelph, Ontario, Canada. Ringrazio anche Eileen Poeter (Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA) per la revisione, impaginazione e produzione del libro. La figura in copertina è stata ottenuta utilizzando Visual MODFLOW Flex, un programma di Waterloo Hydrogeologic.

Ringrazio infine il collega dr Alessio Fileccia, per la disponibilità dimostrata nel preparare la traduzione completa del testo, dall'inglese.

## Ringraziamenti del Traduttore

Sono riconoscente al collega Riccardo Castagner, che ha gentilmente accettato di controllare la traduzione.

# 1 Inquadramento Generale

Prima di iniziare la simulazione del flusso sotterraneo è necessario un modello del sottosuolo. Il settore petrolifero, rispetto a quello idrogeologico, ha avuto procedure meglio definite per la modellazione geologica, e the Ground Water Project presenta questo libro per ripassare i processi fondamentali della modellazione sotterranea che comprendono tecniche comuni alle acque sotterranee ed alla ricerca petrolifera. Considerati gli interessi commerciali dell'industria petrolifera, gli sforzi sono concentrati a simulare correttamente il volume, il flusso e l'estrazione dei fluidi dal sottosuolo. Le tecniche descritte in questo libro, in particolare i concetti di *spessore netto* (spessore dei livelli a granulometria grossolana interessati dal flusso idrico) rispetto allo *spessore totale* (spessore totale verticale tra due unità confinanti) non sono solo importanti per la produzione petrolifera ma anche per simulare i flussi dell'acqua sotterranea, che possono interessare i modellisti delle risorse idriche quando devono stimare il volume immagazzinato negli acquiferi.

I modelli numerici redatti per simulare il percorso dei contaminanti richiedono una dettagliata ricostruzione geologica. Per queste applicazioni serve ricostruire l'eterogeneità geologica locale, dato che gli inquinanti seguono percorsi preferenziali attraversando zone interconnesse ad alta conducibilità idraulica e molti processi di trasporto e recapito dipendono dallo scambio tra fluidi a diverso chimismo tra zone a diversa conducibilità.

Le tecniche di modellazione presentate, si riferiscono agli acquiferi porosi, composti da sedimenti sciolti o rocce sedimentarie derivate da alterazione meccanica, in pratica miscele di ghiaia, sabbia, silt ed argilla. Questi materiali possono essere sciolti (leggermente addensati, grani non cementati) o compatti (molto compatti, grani cementati). Queste procedure non si applicano a rocce fratturate, carsiche o ad acquiferi dove la porosità secondaria costituisce la via principale per il flusso idrico sotterraneo.

In questo libro è utilizzato il software [Visual MODFLOW FLEX](#) della Società Waterloo Hydrogeologic. Si tratta di un programma che facilita la modellazione delle acque sotterranee con il più utilizzato codice di simulazione degli acquiferi: [MODFLOW code](#) dell'USGS. Il programma ha anche il vantaggio di condividere le sue origini con Petrel della Società Schlumberger, considerato uno standard per la modellazione geologica del sottosuolo. In questo libro è anche utilizzato il programma di modellazione geologica della Ditta [RockWorks](#). Questo software permette di generare una distribuzione spaziale dei materiali a cui sono assegnate diverse proprietà idrauliche, convertite poi in valori assegnati ad una griglia di modellazione come quella definita da MODFLOW.

## 2 Introduzione

Gli Idrogeologi lavorano con altri geologi ed ingegneri per sviluppare uno schema utile a fornire le basi per definire le proprietà di un modello di flusso idrico sotterraneo

in due fasi: modellazione statica seguita da una dinamica del flusso. Le proprietà geologiche fisse sono inserite nel modello statico, mentre il modello dinamico simula il flusso e adatta le proprietà idrauliche quando i cambiamenti nel sistema di flusso alterano queste proprietà.

Per esempio, la diminuzione di pressione durante l'estrazione dei fluidi provoca una compattazione del materiale, riducendo la conducibilità idraulica e la porosità (proprietà dinamiche). Allo stesso tempo la quantità di sabbia in rapporto a quella di argilla nel giacimento non cambia (proprietà statica). Un modello statico è costruito con metodi geometrici e per inserire proprietà idrauliche in un simulatore di flusso. Un modello dinamico è costruito utilizzando un codice di flusso (per gli acquiferi si utilizza di solito MODFLOW) per modificare le proprietà idrauliche di modo che quelle misurate sul campo siano simili a quelle calcolate. Operando in questo modo il software è in grado di prevedere i cambiamenti nel sistema di flusso in risposta alle sollecitazioni esterne.

Per il passato il modello statico era sviluppato dai geologi e quindi trasmesso agli ingegneri per le simulazioni dinamiche. L'esperienza ha però dimostrato che questa procedura a senso unico ha dei limiti, dato che la calibrazione del modello dinamico può fornire ulteriori indizi alla geologia ed a sua volta comprendere meglio la geologia può modificare i parametri richiesti per la calibrazione. Oggi il processo tende ad essere molto più iterativo. Nel settore delle acque sotterranee, il modellista è spesso esperto in matematica, ingegneria e geologia, in alternativa è un gruppo di esperti che lavora insieme per sviluppare il modello.

Costruire un modello di acquifero è un processo approfondito dal punto di vista geografico, con particolare riferimento a dettagli geomorfologici e semplificazioni del sottosuolo in un serie di acquiferi o unità idrostratigrafiche. Questo è sicuramente l'approccio migliore per la modellazione a scala regionale o di bacino e molti software GIS sono disponibili per questo tipo di lavoro. D'altro canto questi programmi e metodi possono essere complessi quando si tratta di operare a livelli più circoscritti, con aree di intervento di poche migliaia o centinaia di metri quadri.

Questo libro si concentra sulla preparazione di modelli di acquiferi contaminati a scala locale, utilizzando i concetti di flusso di lavoro comuni nella modellazione statica dei giacimenti petroliferi. Non sono consigliati particolari programmi, dato che gran parte del lavoro può essere fatta con carta e matita od un software generico di interpolazione. Molti dei concetti fondamentali sono precedenti ai moderni computer con capacità grafiche e non sono cambiati con i programmi migliorati di oggi.

Il metodo di modellazione statica è descritto tramite una serie di fasi necessarie per costruire uno schema in una ipotetica zona contaminata (l'area di prova). Tutto questo inizia con un esercizio di riflessione per costruire il modello concettuale, passa poi alle tecniche per trasformare tale rappresentazione in un modello numerico tridimensionale (3D) e sfocia nell'utilizzo di questa ricostruzione per creare il modello di flusso.

## 3 Contesto e Scopi

Prima di iniziare la fase di modellazione, vanno definiti chiaramente gli scopi del progetto. Utili valutazioni sul flusso ed il trasporto, si possono ottenere con modelli analitici, spesso anche con fogli elettronici. E' consigliabile iniziare con carta e matita prima di impostare un complicato modello numerico, per vedere a quante domande si può rispondere. Fatto questo, un calcolo preciso fornisce un punto di partenza per valutare le funzionalità di base per modelli più complessi.

### 3.1 Modelli Concettuali

Gran parte dei progetti per la decontaminazione degli acquiferi richiede un modello concettuale per ottemperare alle normative nazionali. Il modello concettuale definisce le caratteristiche fondamentali dell'acquifero contaminato, la sua geometria, profondità spessore, gamma di conducibilità idrauliche, carichi piezometrici misurati e particolarità del sistema che influiscono sul comportamento idraulico, come bacini idrici superficiali e pozzi in funzione. Per piccole aree contaminate, è possibile che il modello concettuale sia adeguato alle normative, ma non abbastanza dettagliato per prevedere efficacemente il comportamento del sistema e quindi strutturare il piano di risanamento. Modelli concettuali che descrivono strati potenti con proprietà omogenee, sono un'indicazione che un'indagine più approfondita potrebbe portare a migliorare il modello stesso.

### 3.2 Geologia Locale

La conoscenza e la familiarità con la geologia locale è necessaria per ogni modellazione del sottosuolo. Pozzi per acqua, studi geotecnici, ad altre indagini sono di solito comuni, di facile reperimento e già elaborati. E' utile controllare lavori eseguiti per altri progetti nell'area, per acquisire informazioni sulle condizioni del sottosuolo e sulle proprietà, ed imparare dai problemi che si sono presentati ad altri che hanno affrontato lavori simili.

### 3.3 Geologia Strutturale

I dati richiesti per identificare le strutture geologiche sono essenziali ma non sufficienti in molte zone contaminate. Di conseguenza le faglie possono non essere rilevate ed il substrato rappresentato come una superficie piatta o con profondità regolare, mentre in realtà può avere una morfologia accidentata. L'andamento del substrato è molto importante in zone con inquinanti ad alta densità, non miscibili in acqua (DNAPL), poiché questi affondano verso strati a bassa conducibilità idraulica e lo spostamento che segue è controllato dalla morfologia del substrato. Le faglie sono comuni un po' ovunque. Per esempio le zone del Golfo del Texas sono interessate da deformazioni superficiali collegate a faglie di scorrimento, sebbene questa parte del Nord America sia tranquilla dal punto di

vista tettonico. Nelle zone inquinate, piccole faglie sono spesso identificate grazie ad un aumento del gradiente idraulico. L'Esempio presentato in questo libro riporta una piccola faglia diretta.

### 3.4 Stratigrafia

La scarsità dei dati per le aree contaminate, presenta anch'essa delle difficoltà per ricostruire la stratigrafia. Ad ogni modo negli ultimi anni c'è stato un passo in avanti, dato che sempre più spesso la complessità stratigrafica si dimostra un ostacolo per un buon intervento di bonifica. Gli interventi che richiedono l'iniezione e l'estrazione di acqua sotterranea possono essere ridotti negli effetti dal rallentamento del flusso per la presenza di livelli a bassa permeabilità. Strati sottili di materiale a grana fine ricco in argilla e materia organica hanno un'elevata capacità di intrappolare sostanze inquinanti. Dopo che le aree a maggior permeabilità sono state depurate, queste sostanze possono diffondersi nuovamente nell'acqua sotterranea causando un nuovo aumento di concentrazione. Strati come quelli descritti possono essere non evidenziati con l'utilizzo di vecchie tecniche d'investigazione come la trivella e la perforazione a rotazione. I log elettrici in pozzo e gli strumenti tipo direct-push, ad alta risoluzione a spinta, permettono di ricavare dei log con il dettaglio necessario. I classici principi stratigrafici sono comunque necessari per ottenere una significativa interpretazione di come queste proprietà si estendono nelle tre dimensioni tra sondaggio e sondaggio. Documenti di riferimento come quello di Schulz et al. (2017), contengono informazioni dettagliate e procedure su come arrivare ad ottenere queste ricostruzioni stratigrafiche.

Nel caso dei giacimenti di petrolio e gas, gran parte della caratterizzazione è ottenuta selezionando e paragonando differenti facies deposizionali (per es. Shepherd, 2009). Per esempio la relativa omogeneità delle dune eoliche si traduce in una migliore permeabilità del giacimento, rispetto alla natura stratificata, molto sezionata e dendritica delle torbiditi canalizzate di mare profondo. Solo questo argomento meriterebbe un testo specifico, e non è discusso in questa sede, eccetto che per sottolineare che i progetti ambientali possono trarre vantaggio da questa linea di ricerca. Inoltre le aree contaminate sono spesso di estensione ridotta ed i fondi a disposizione per raccogliere i dati sono scarsi, con la conseguenza di non rendere possibile un'analisi stratigrafica.

## 4 Ricostruzione della Struttura Geologica

La struttura geometrica è la parte basilare per la modellazione statica. Questa definisce la zona contaminata nelle tre dimensioni rispetto ai sondaggi.

### 4.1 Mappe e Sezioni

Per molti anni mappe e sezioni hanno costituito l'intera struttura per la modellazione statica. Con i moderni software, tutto questo è ottenuto in ambienti totalmente tridimensionali che facilitano la concettualizzazione. Ad ogni modo, mappe e sezioni costituiscono ancora le basi per l'interpretazione tridimensionale. In questo esempio useremo le classiche mappe e sezioni.

La zona di progetto ha una dimensione di circa 9 ettari ed è stata investigata con 14 sondaggi. I fori sono allineati lungo due direzioni all'incirca perpendicolari, perforati in sedimenti sciolti ed arrestati sul basamento roccioso. La superficie del terreno ha una quota di 70-73 m s.l.m., con un'inclinazione verso sud. La roccia è stata ritrovata a profondità tra i 40 e 70 m. I dettagli usati per la ricostruzione della struttura, sono in Figura 1, dove le due sezioni sono riportate a destra della planimetria, con ogni particolare in scala.

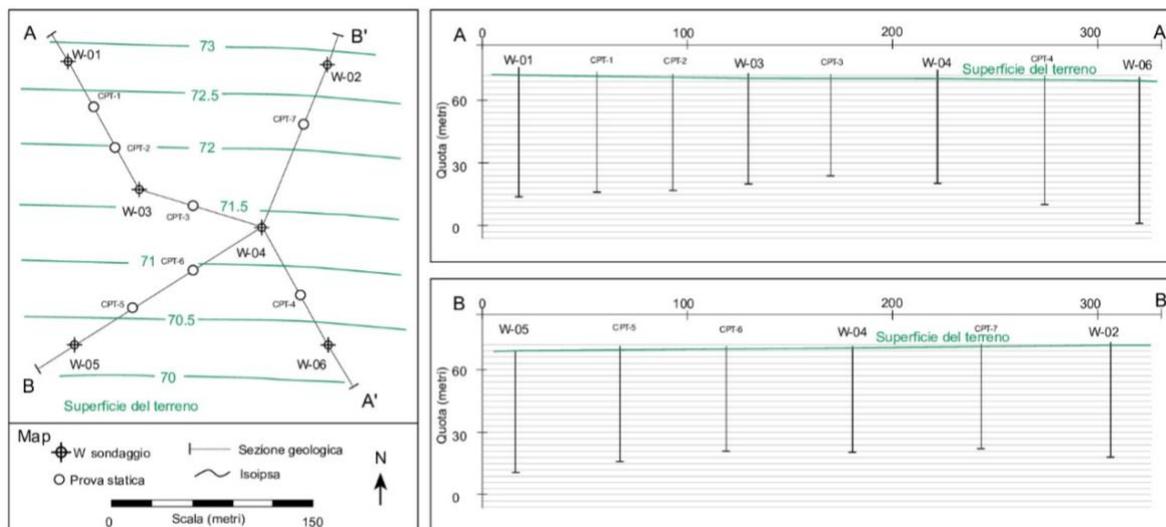


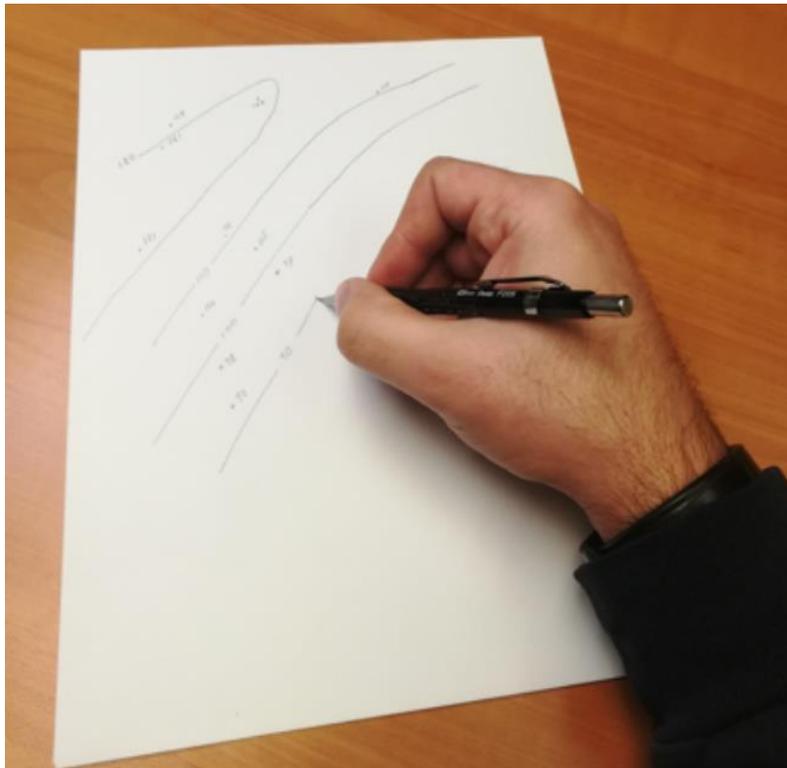
Figura 1 - Interpretazione della struttura geologica del sottosuolo (Brandenburg, 2020).

### 4.2 Superfici

L'interpretazione geologica presuppone che il sottosuolo sia diviso in strati. Gli stratigrafhi sono interessati ad orizzonti e zone che rappresentano particolari intervalli temporali geologici, i geologi strutturali cercano di identificare delle superfici orizzontali in origine ed i geofisici ricercano livelli con proprietà acustiche differenti. Ricostruire le superfici tridimensionali costituisce una fase importante della modellazione geologica, qualunque sia l'approccio. Il modo più sensato di ottenere questo è di interpolare i dati per definire la superficie di interesse, creando mappe strutturali ad isolinee: mappe con linee

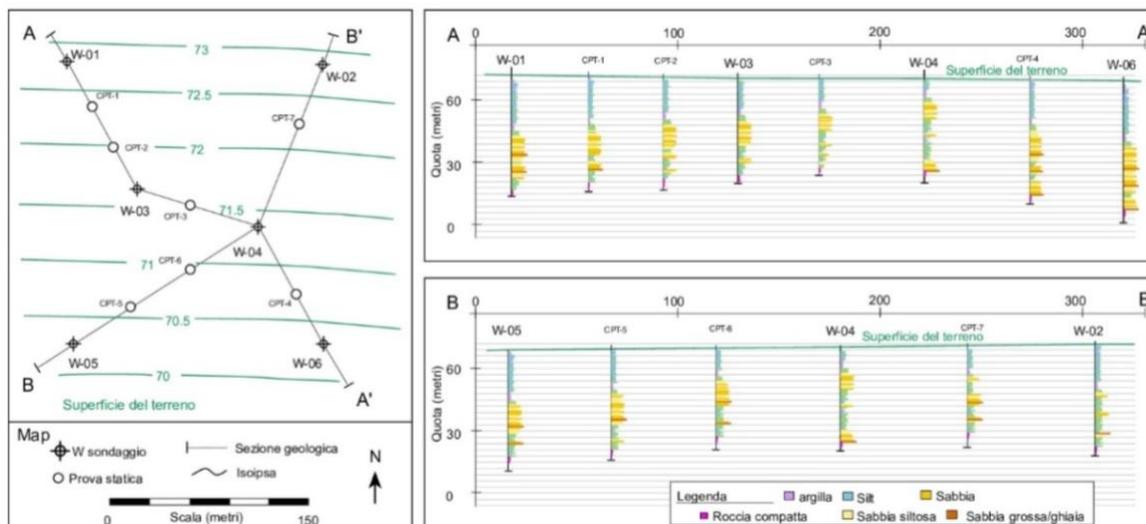
di ugual quota della superficie geologica ricercata. Queste mappe strutturali sono analoghe a quelle topografiche con le isoipse.

Il fatto di effettuare le interpolazioni a mano (Figura 2) invece che affidarsi all'algoritmo del computer, ha il vantaggio di applicare l'esperienza personale alle tipiche caratteristiche geologiche, mentre il software non ha quel buon senso che servirebbe in zone con dati scarsi. L'interpolazione manuale è utile anche come controllo qualitativo delle isolinee generate da un programma, soprattutto per quelle superfici discontinue a causa di fenomeni tettonici.



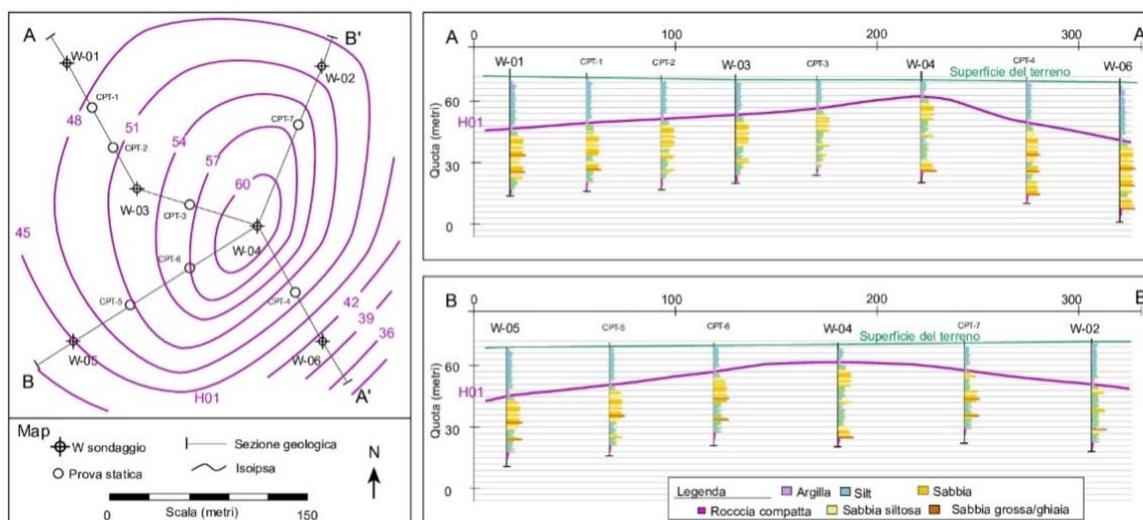
**Figura 2** - Disegnare le isolinee di strutture geologiche a mano, è un metodo affidabile per effettuare un'interpretazione geologica (Brandenburg, 2020).

Nella zona di studio, sono state ricavate stratigrafie dettagliate da ogni sondaggio utilizzando sia i campioni durante le perforazioni sia informazioni da sensori a fondo foro (Figura 3). In questo caso i log litologici sono stati ricostruiti con una prova penetrometrica (CPT): un metodo che misura direttamente il cambiamento delle proprietà meccaniche di materiali non consolidati, durante le perforazioni. Il metodo CPT è normalmente usato nelle indagini ambientali col vantaggio di restituire dei log ad intervalli finiti invece che con una curva continua. Per il sito in esame i log litologici diversificano tra basamento roccioso e sei classi di argilla, silt, sabbia e ghiaia.



**Figura 3** - Log litologici ad intervalli, per il sito di progetto. Le linee isoipse indicano la quota del terreno sopra il livello mare (Brandenburg, 2020).

L’analisi dei log indica una generale riduzione di granulometria dei sedimenti verso l’alto ed un assottigliamento dei livelli al di sopra di un alto nel substrato. Le superfici importanti identificate, sono il top del basamento ed un deposito laterale continuo di argilla che separa la parte più grossolana da quella sottostante più fina (silt ed argilla). Sulla base di una leggera risalienza osservata durante l’inserimento del piezometro, lo strato di argilla si comporta come un livello semipermeabile. Questo è disegnato come l’orizzonte stratigrafico H01, mostrato in Figura 4. Dalla similitudine con altre zone, l’orizzonte è disegnato come un anticlinale approssimativamente simmetrica.

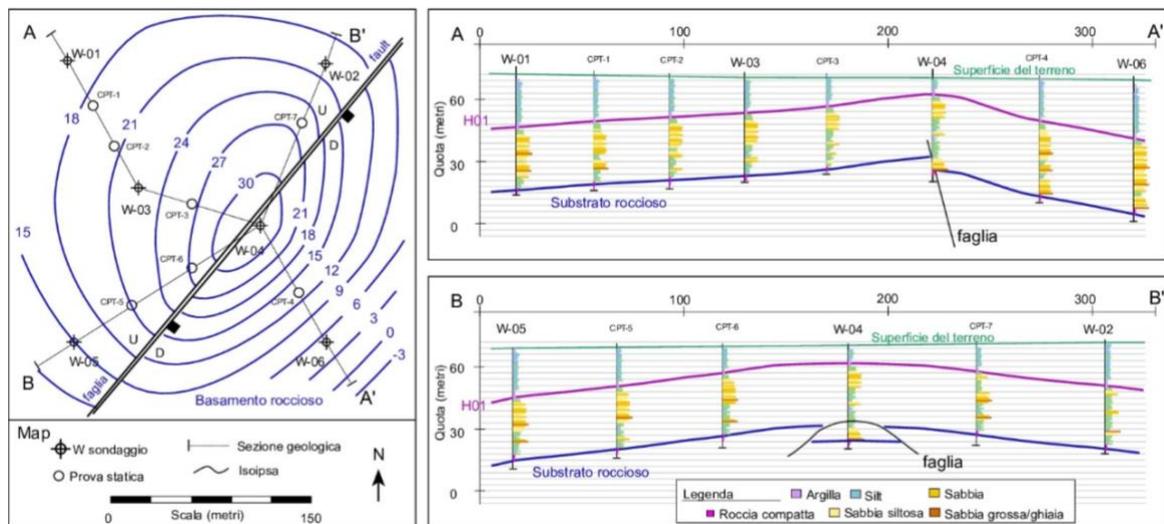


**Figura 4** - Orizzonte stratigrafico H01. Le isolinee mostrano la quota dell’orizzonte stratigrafico H01 sul mare (Brandenburg, 2020).

E’ noto che il basamento in questa zona è interessato da faglie dirette orientate nord-est sud-ovest. La zona di contatto molto inclinata è stata identificata come un deposito grossolano alla base del sondaggio W-04 ma non presente in altri punti. Lo spessore del

livello stratigrafico tra H01 ed il substrato è maggiore nei punti W-04, CPT-7 e W-02, rispetto allo spessore nei punti CPT-6, CPT-5 e W-05. Questo indica che si tratta di una faglia attiva in crescita (growth fault) che probabilmente non raggiunge il livello H01. In conseguenza di questa interpretazione le isobate del substrato mostrano uno spostamento della sua superficie in Figura 5.

Questo tipo di piccole scarpate di faglia sepolte è comune nelle aree tettonicamente attive nell'Ovest degli Stati Uniti. Il riconoscimento delle faglie dai dati di sondaggio è un altro argomento complesso ed al di fuori dello scopo di questo libro. Nella zona di progetto, la faglia è importante perché la parte sabbiosa è più spessa e grossolana nel lato ribassato della faglia. Se questo particolare fosse importante per lo Studio (per es. nel caso di contaminazione da DNAPL), si potrebbero applicare dei metodi geofisici che sono adatti a definire la superficie di passaggio tra sedimenti e substrato.



**Figura 5** - Superficie strutturale che definisce il tetto del substrato. Le isobate indicano la quota del tetto del substrato sul mare. Le isolinee sono interrotte ai due lati della faglia (Brandenburg, 2020, [gw-project.org](http://gw-project.org))

Nel settore della ricerca petrolifera, i modelli statici si rivolgono alle porzioni di giacimento occupati da fluidi. In questo esempio, la sezione importante è il livello grossolano tra il tetto del basamento ed H01. Negli studi di valutazione per i depositi di petrolio e gas, il volume di roccia tra queste due superfici corrisponderebbe al giacimento. Nel nostro caso è l'acquifero. In alcuni studi idrogeologici, è importante la natura del materiale a grana fine per conoscere la sua capacità di immagazzinare o rilasciare acqua o la proprietà di trasferire, per diffusione, certe sostanze chimiche.

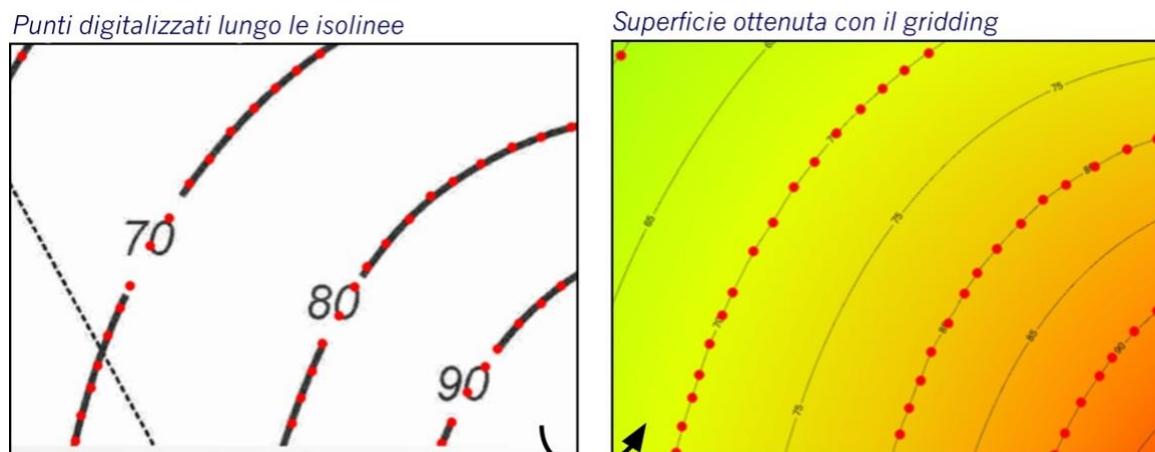
### 4.3 Costruire la Griglia (Gridding)

Dopo questa fase, e per evidenziare in pianta lo sviluppo verticale, le superfici ricavate in sezione vengono collegate mediante una tecnica di interpolazione chiamata gridding. Questa tecnica rappresenta le quote di ogni superficie interessata, secondo

intervalli regolari in una griglia, su tutta la zona di progetto ed è necessaria per le simulazioni tridimensionali. Il metodo più semplice per costruire una griglia è quello di utilizzare la misura puntuale, come la quota di uno strato in un sondaggio, come valore di input nell'algoritmo di gridding. Questo metodo si può utilizzare con i programmi commerciali come [EVS](#) o [Surfer](#). Lo scopo principale di questi software è quello di visualizzare i dati, ma possono essere altrettanto ben utilizzati per preparare le superfici interpolate per i modelli.

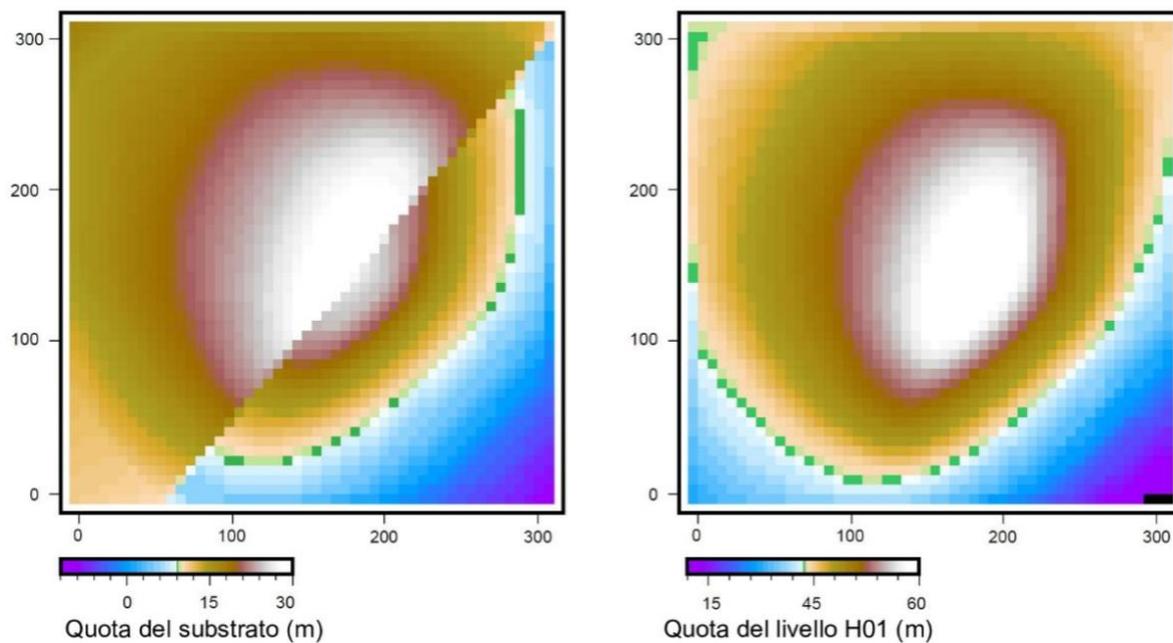
In questa fase è molto importante la qualità dei dati inseriti. Il gruppo di misure ideale contiene punti che sono distribuiti uniformemente, coprono tutta l'area e sono stati ricontrollati per evidenziare eventuali incongruenze e quindi validati. Con questa tipologia di dati la maggior parte degli algoritmi produce superfici interpolate simili. La causa principale di errore nella modellazione geologica è dovuta a dati sparsi, distribuiti irregolarmente e non congruenti. In questo caso algoritmi di gridding diversi danno risposte altrettanto diverse fornendo di conseguenza dati dubbi e valori molto diversi dai valori medi (outliers). Tipici artefatti sono linee concentriche (bull's eye) attorno ad un punto e linee che si estendono di molto, al di là dei dati originali (Vedi il [Box 1](#) con degli esempi).

In situazioni dove esistono dati sparsi o distribuiti irregolarmente, serve un metodo geologico per indirizzare l'algoritmo di gridding nello spazio vuoto tra le varie misure. Alcuni software disponibili per questa modellazione tridimensionale sono, per esempio, [Visual MODFLOW Flex](#) e [RockWorks](#). Per il sito di progetto è utilizzato il semplice metodo di digitalizzare dei punti fittizi per permettere all'algoritmo di disegnare le isolinee. In questo modo non serve un software particolare (Figura 6).



**Figura 6** - L'algoritmo di gridding deve essere "manipolato" in zone con dati sparsi. Qui delle isolinee disegnate a mano sono digitalizzate per fornire dei dati all'algoritmo. (Brandenburg, 2020).

Nella zona di intervento, i dati interpolati a mano sono stati prima digitalizzati poi è stata sovrapposta una maglia di 50 x 50 nodi con celle elementari che misurano all'incirca 15 x 15 m. Questa griglia 50 x 50 è utilizzata per i calcoli in tutti gli esempi del libro.



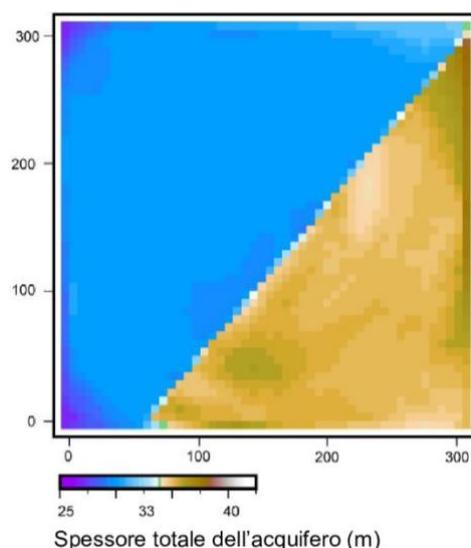
**Figura 7** - Superfici di gridding per il tetto del basamento (sinistra) ed H01 (destra). Ogni quadratino corrisponde ad un valore interpolato di quota della superficie e grandezza riferita al colore. Disegno ottenuto con Open-Source Generic Mapping Tools ([GMT](#)) (Brandenburg, 2020).

## 5 Calcolare le Proprietà

Una volta che la struttura tridimensionale è definita ed interpolata, la fase seguente è di inserire ai nodi della griglia i valori delle proprietà idrauliche necessari per la simulazione.

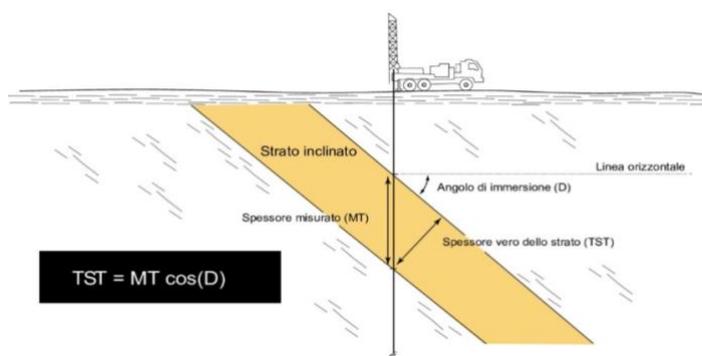
### 5.1 Spessore totale

Il parametro più semplice è lo spessore del giacimento, o dell'acquifero, cioè la distanza verticale tra le due superfici di contenimento (Figura 8).



**Figura 8** - Lo spessore dell'acquifero è la differenza di quota tra le due superfici H01 superiore, substrato roccioso inferiore (Brandenburg, 2020).

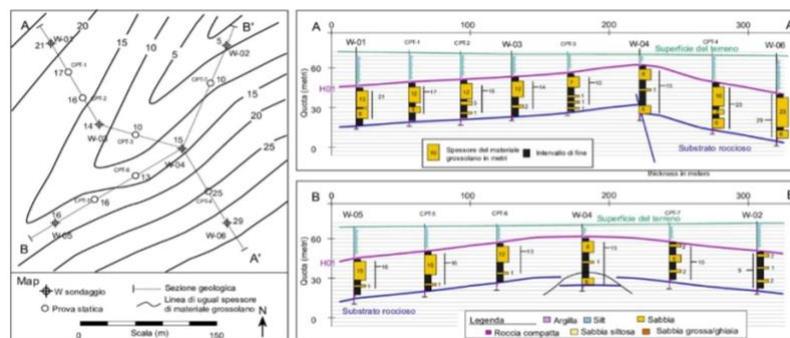
Per strati inclinati o piegati, è necessario inserire una formula trigonometrica (Figura 9). Nell'esempio mostrato la deformazione strutturale è minima quindi non applichiamo la correzione per l'inclinazione.



**Figura 9** - Calcolo del vero spessore stratigrafico da misure in pozzo per uno strato inclinato (Brandenburg, 2020).

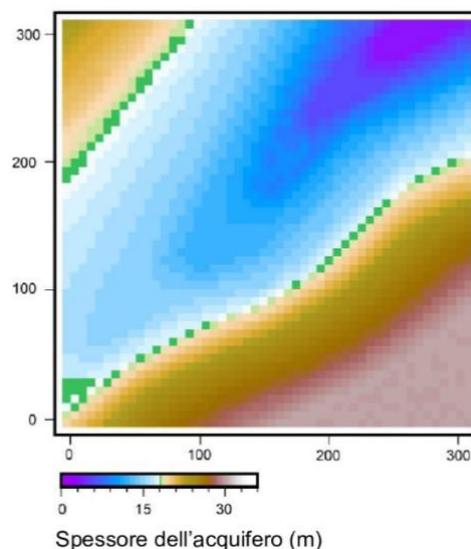
## 5.2 Spessore Netto

Le argille e le rocce simili come lo shale (argillite) hanno porosità elevate ma con vuoti non interconnessi e rappresentano un volume di acquifero non coinvolto dal flusso idrico. Questo fenomeno è importante per descrivere la contaminazione dei siti (Payne et al., 2008). La porzione del giacimento, od acquifero interessata dal flusso è definita come “porzione netta”. Per determinare quest’ultima, si seleziona un valore di soglia per la granulometria grossolana in modo da suddividere la litologia tra zone nette (sedimenti grossolani) e non nette (sedimenti fini). Per ogni sondaggio si utilizza lo spessore della porzione netta per costruire le isolinee di ugual spessore in Figura 10. In questo caso si ottiene una mappa delle isopache, dove le isolinee collegano punti di uguale spessore invece che di ugual quota.



**Figura 10** - Quantificazione dello spessore netto mediante log ed una carta delle isopache. (Brandenburg, 2020).

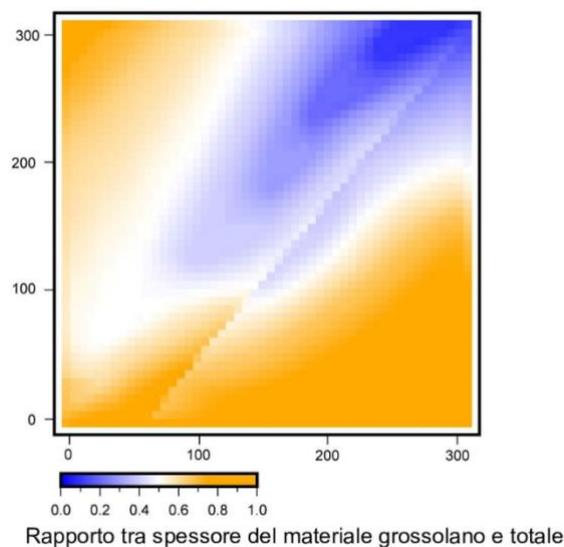
Alle isolinee viene poi applicata la tecnica di gridding con la stessa procedura vista in precedenza per le superfici (Figura 11).



**Figura 11** - Procedura di gridding per la mappa degli spessori netti (Brandenburg, 2020, [gw-project.org](http://gw-project.org))

### 5.3 Rapporto Spessore Netto-Spessore Totale

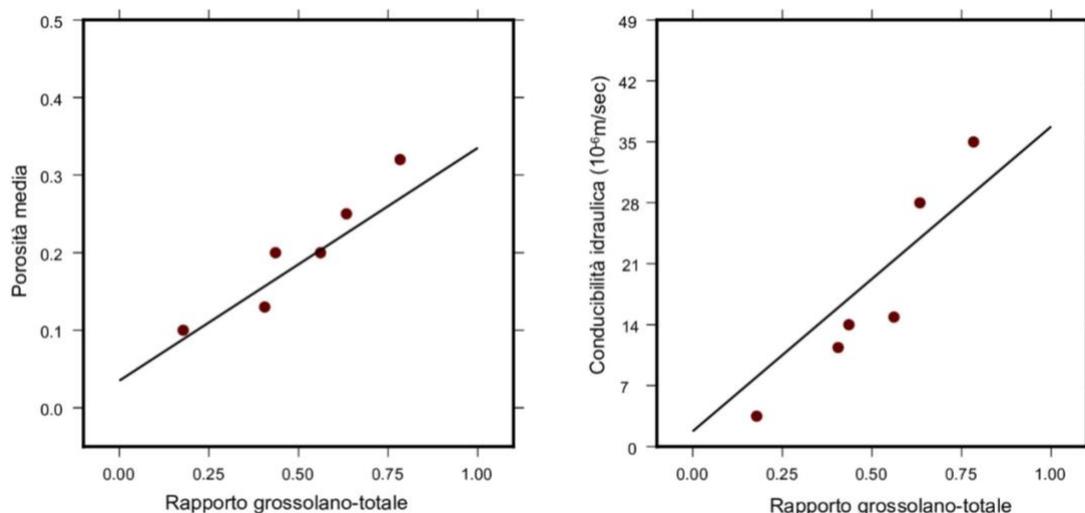
Dopo avere mappato e sottoposto a gridding i dati di spessore netto e totale è abbastanza semplice calcolarne il loro rapporto. Lo spessore netto diviso per quello totale costituisce il rapporto tra lo spessore di tutti i livelli grossolani rispetto al totale del giacimento, un valore tra 0 ed 1, brevemente indicato come “rapporto grossolano sul totale” o “net to gross ratio” (Figura 12). A prescindere dalla particolare facies sedimentaria, valori elevati di “rapporto grossolano sul totale” sono sinonimi di mezzo permeabile ed idraulicamente ben collegato. Al contrario valori bassi di “rapporto grossolano sul totale” possono indicare una certa permeabilità locale (a livello del pozzo) ma è più verosimile che il mezzo sia costituito da vuoti non collegati.



**Figura 12** - Maglia dei valori del rapporto grossolano-totale (Brandenburg, 2020).

### 5.4 Proprietà

Nelle valutazioni sui giacimenti di petrolio e gas, il “rapporto grossolano sul totale” per le formazioni sciolte granulari è da tempo noto per avere una buona correlazione con molte proprietà del giacimento stesso. La porosità e la permeabilità del reservoir vengono spesso estrapolate direttamente dai valori di “rapporto grossolano sul totale”, utilizzando funzioni di interpolazione tipiche di uno specifico campo petrolifero. Nella zona di studio, la porosità e la conducibilità idraulica sono stimate sulla base della correlazione tra “rapporto grossolano sul totale” e dei loro valori ricavati in pozzi di monitoraggio come quelli in Figura 13.



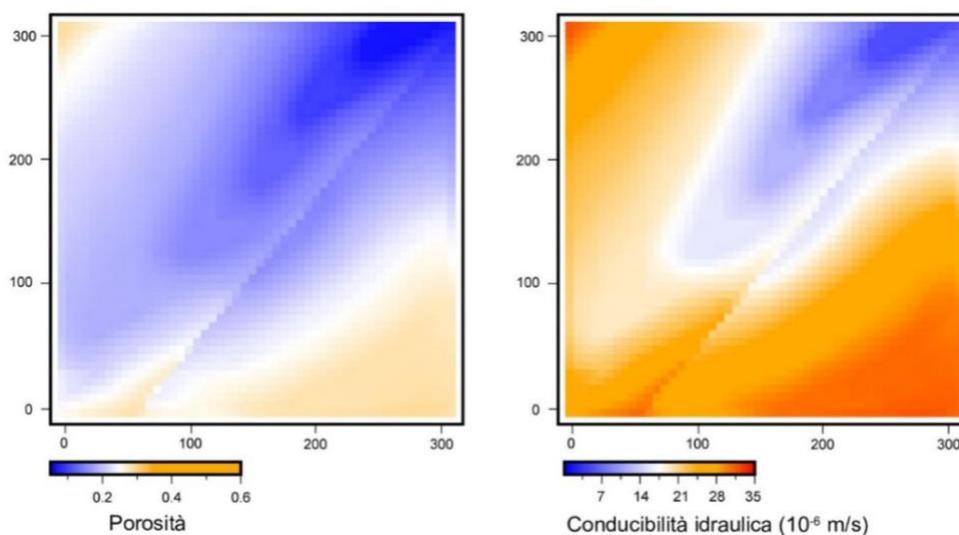
**Figura 13** - Relazione tra rapporto grossolano-totale misurato per ogni pozzo con la porosità e conducibilità idraulica (Brandenburg, 2020).

Le equazioni delle rette in Figura 13 sono (Equazioni 1 e 2):

$$\text{Porosità} = \phi = 0.3 \left[ \frac{N}{G} \right] + 0.035 \quad (1)$$

$$\text{Conducibilità idraulica} = K = (35 \times 10^{-6}) \left[ \frac{N}{G} \right] + (1.8 \times 10^{-6}) \quad (2)$$

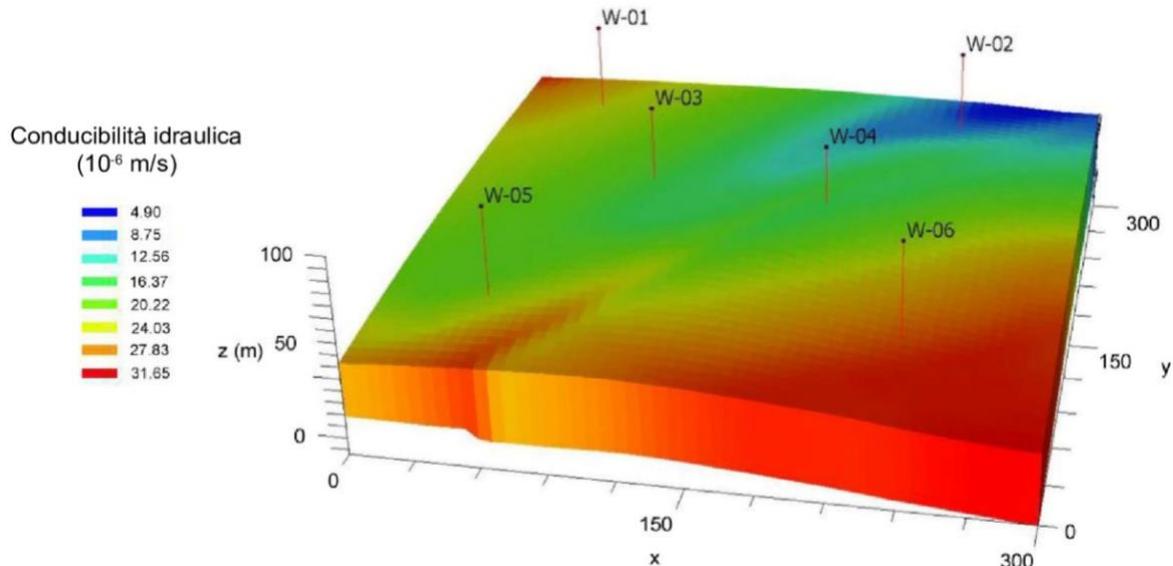
Dopo avere trovato le relazioni matematiche, si può trovare la distribuzione di questi parametri idrogeologici per ogni cella 50 x 50 della griglia conoscendo il "rapporto grossolano sul totale" (Figura 14).



**Figura 14** - Maglia della porosità e conducibilità idraulica ottenuta dalle equazioni 1 e 2 (Brandenburg, 2020).

## 6 Il Modello

Il modello in Figura 15 è stato ottenuto con Visual Modflow FLEX, e con una maglia ricavata dalle relazioni di porosità e conducibilità idraulica descritte nel capitolo precedente.



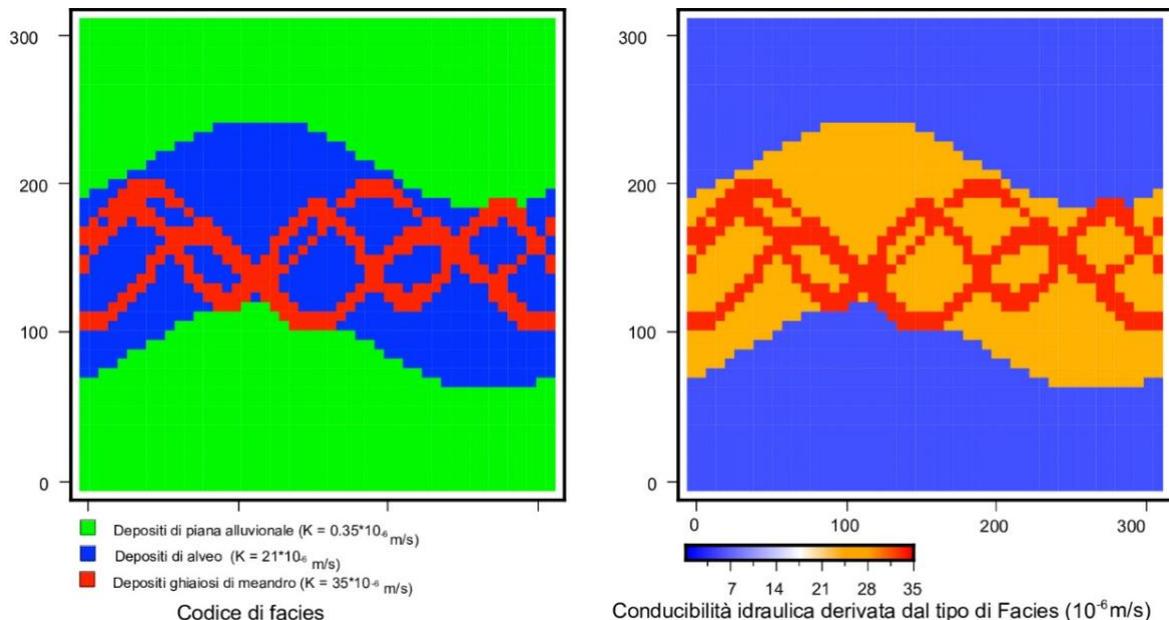
**Figura 15** - La conducibilità idraulica riportata sulla mappa tridimensionale di Visual MODFLOW FLEX (Brandenburg, 2020).

A questo punto il modello è pronto per essere utilizzato nella simulazione dinamica. Ad ogni modo questo modello è presentato per illustrare i principi della ricostruzione geologica del sottosuolo tramite i dati di perforazione. Il modello raffigura la zona di studio come un unico strato, i modelli idrogeologici, invece, richiedono di solito più livelli per rappresentare sistemi con vari acquiferi, strutture particolari all'interno e presenza di eterogeneità geologiche specialmente quando si tratta di simulazioni di trasporto o progetti di bonifica.

Un modello multi strato può essere simulato con gli stessi metodi descritti in questo testo. Anche i metodi geostatistici possono essere applicati; per esempio, la maggior parte dei programmi di pre-processing permettono l'interpolazione della conducibilità idraulica tra i valori osservati, con la tecnica del Kriging.

## 7 Ricostruzione di un Modello Statico dalla Mappatura delle Facies

Un metodo comune per raffigurare l'eterogeneità nei modelli statici usati nel settore petrolifero è la mappatura di facies. Le facies geologiche sono gruppi di rocce, sedimenti o suoli con un'origine e storia geologica comune, in questo contesto, si produrrebbe anche un simile comportamento idrogeologico. Per esempio in un ambiente fluviale, i depositi di piena tendono ad avere un'abbondanza di fanghi stratificati a grana fine, formando zone a bassa conducibilità idraulica e rapporti di conducibilità idraulica verticale su orizzontale, molto inferiore ad uno. Al contrario, un deposito interno di meandro avrebbe un'alta conducibilità idraulica con un rapporto di anisotropia vicino ad uno. Con la mappatura di facies ogni cella della griglia ha un codice corrispondente ad un set di parametri idraulici (Figura 16).

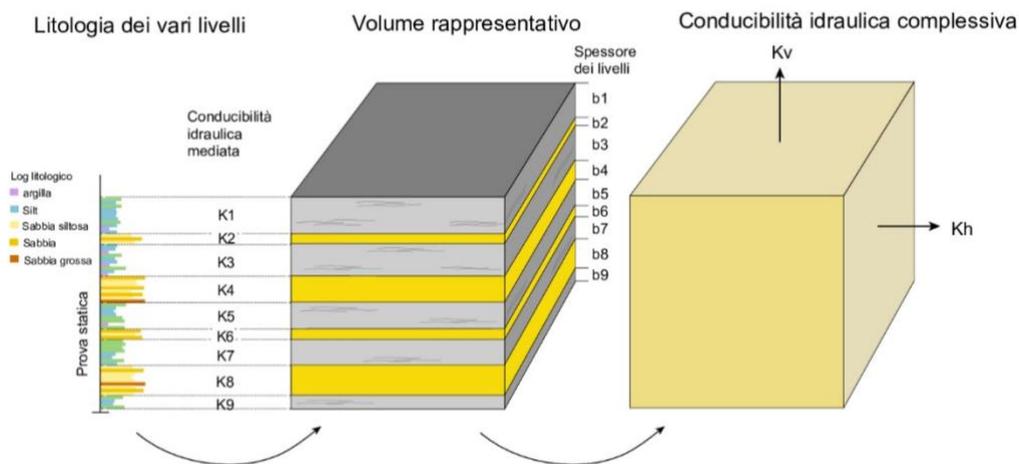


**Figura 16** - Conducibilità idrauliche ottenute tramite la mappatura di facies (Brandenburg, 2020).

Chiaramente la facies è nota a livello puntuale (sondaggio); per tutti gli altri punti bisogna ricorrere ad altri metodi. L'approccio più semplice fa ricorso all'esperienza del modellista. In realtà si possono sviluppare diverse ed altrettanto valide mappature di facies. Questo forma la base di modelli geostatistici avanzati che rispettano contemporaneamente principi geologici e vincoli statistici. Questi modelli sono molto complessi e rappresentano le eterogeneità misurate in dettaglio su affioramenti od altre indagini geologiche a scala più fine della risoluzione della griglia del modello. L'utilizzo di questi risultati in un modello di flusso richiede una tecnica scalare di rielaborazione per essere sicuri che la precisione delle proprietà di flusso venga mantenuta nella griglia a maglia più estesa.

## 8 Costruzione di un Modello Statico con Proprietà Ridimensionate

Un metodo più diretto ma anche più laborioso è quello di inserire nel modello, dei valori idraulici adattati scalarmente alle misure dei campioni più piccoli e disponibili. I campioni indisturbati di carota prelevati dai sondaggi si possono inviare al laboratorio per ricavare la porosità o la conducibilità idraulica. Questo permette la correlazione tra litologia e proprietà idrauliche a scala centimetrica. Si ricava quindi un volume rappresentativo con uno schema che privilegia le litologie più abbondanti nel campione. Ad ogni livello si associa una conducibilità idraulica “mista” che rappresenta una media statistica delle misure di laboratorio per quella litologia. Questi livelli sono poi trasformati in conducibilità verticale ( $K_v$ ) ed orizzontale ( $K_h$ ) equivalenti (Figura 17).



**Figura 17** - Ridimensionamento da una discretizzazione verticale ad una conducibilità idraulica equivalente (Brandenburg, 2020).

La conducibilità idraulica orizzontale equivalente viene calcolata come media aritmetica degli strati omogeneizzati, come indicato nell'Equazione 3 per l'esempio in Figura 17.

$$K_h = \frac{K_1 b_1 + K_2 b_2 + K_3 b_3 + K_4 b_4 + K_5 b_5 + K_6 b_6 + K_7 b_7 + K_8 b_8 + K_9 b_9}{b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5 + b_6 + b_7 + b_8 + b_9} \quad (3)$$

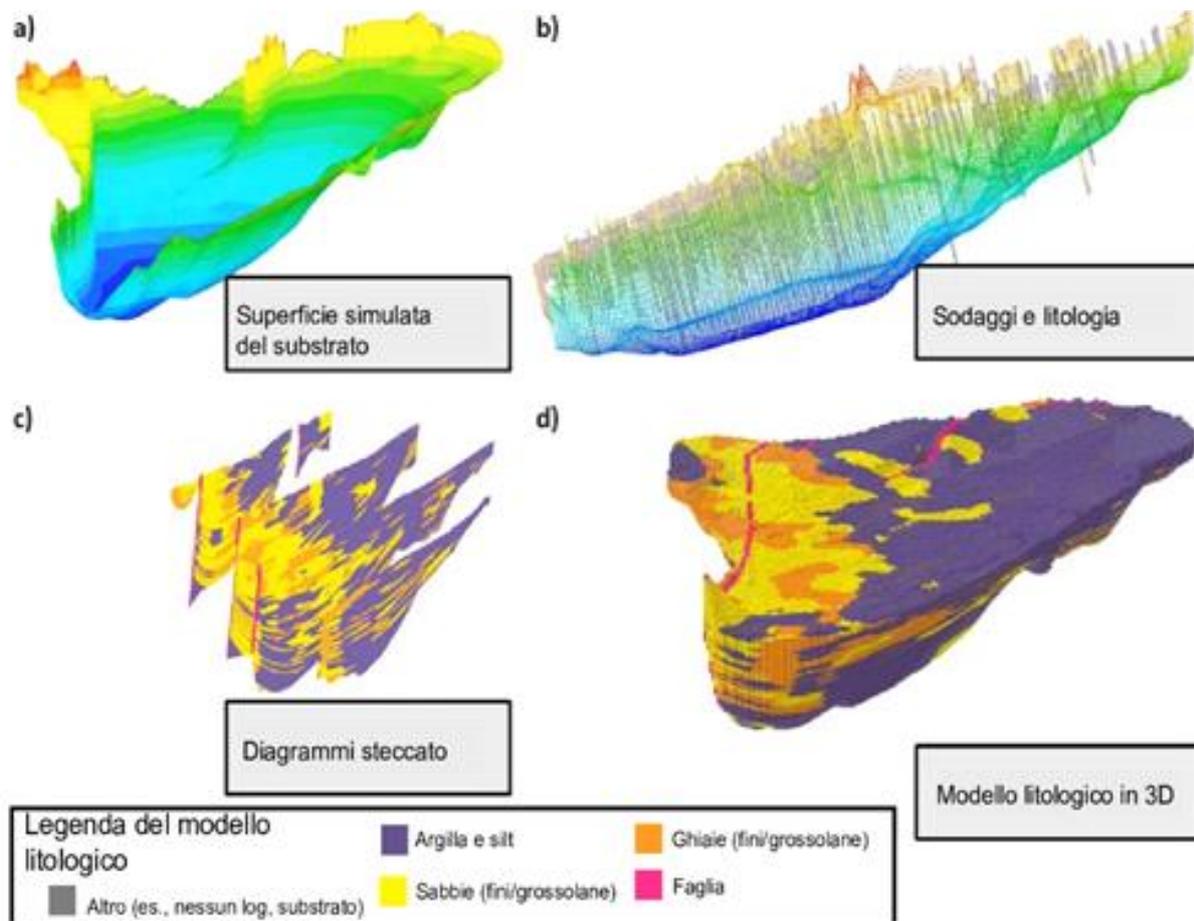
Anche la porosità complessiva viene calcolata come media aritmetica. La conducibilità idraulica verticale equivalente è calcolata come media armonica dei livelli omogeneizzati come nell'Equazione 4 per l'esempio in Figura 17.

$$K_v = \frac{b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5 + b_6 + b_7 + b_8 + b_9}{\frac{b_1}{K_1} + \frac{b_2}{K_2} + \frac{b_3}{K_3} + \frac{b_4}{K_4} + \frac{b_5}{K_5} + \frac{b_6}{K_6} + \frac{b_7}{K_7} + \frac{b_8}{K_8} + \frac{b_9}{K_9}} \quad (4)$$

In senso generale la media armonica rappresenta meglio  $K$  nel caso di livelli perpendicolari alla direzione di flusso, mentre la media aritmetica viene utilizzata di preferenza per una stratificazione parallela al flusso. Queste procedure sono abbastanza precise in uno spazio nelle vicinanze del sondaggi, ma per estendere le valutazioni al resto della zona modellata si ricorre ad ulteriori metodi. In pratica per ottenere una migliore rappresentazione si opera in due modi: il ridimensionamento delle proprietà e l'uso di una modellazione di tipo stocastico.

## 9 Costruzione di un Modello Statico dalla Litologia

Quanto i dati per definire la struttura di un modello idrogeologico sono sufficienti, si può utilizzare un programma come [RockWorks](#) per costruire una griglia di tipi litologici per l'area del modello, ognuna con le sue proprietà idrauliche (Figura 18). [In questo video viene presentato un breve filmato](#) . L'animazione di 35 secondi (~80Mb) ruota il volume dell'acquifero nello spazio tridimensionale mostrando: la superficie del substrato; i log litologici usati per rappresentare la geologia; i diagrammi a steccato lungo alcune sezioni ed il modello finale lungo piani verticali da ovest ad est e da sud a nord in andata e ritorno. I materiali a grana fine hanno un colore violaceo, quelli a grana media sono gialli, quelli grossolani arancio mentre le faglie sono in rosso.



**Figura 18** - Modello litologico che inizia con a) definizione del substrato; b) illustrazione delle diverse litologie in ogni sondaggio; c) qualche diagramma steccato dopo avere interpolato ed estrapolato le informazioni tra i vari sondaggi; d) il modello solido litologico. Le immagini sono state fornite da RockWare (2020).

## 10 Conclusioni

Il testo spiega i concetti della modellazione del sottosuolo secondo le procedure della simulazione statica e dinamica. Ogni progetto di studio degli acquiferi è particolare e le indicazioni fornite vanno considerate come delle raccomandazioni generali piuttosto che strette procedure operative. La classica limitazione della scarsità dei dati a livello dell'intervento rende l'iniziale concettualizzazione strutturale e stratigrafica del modello, la prima fase critica del processo. I protocolli di lavoro hanno il vantaggio di fornire una guida in grado di assicurare che le modifiche alle ipotesi ed i vincoli imposti dai dati si estendano a tutte le fasi del progetto.

Mentre alcune delle tecniche esposte si applicano solo ad acquiferi in materiale sciolto, il metodo di ricostruire una struttura 3D ricavata da mappe, sezioni, e superfici ad isolinee è applicabile universalmente. Tutte le procedure di modellazione statistica e litologica più avanzate qui illustrate, si basano su di una valida struttura 3D. Disegnare con carta e penna o su di una lavagna all'interno di un gruppo di lavoro è anch'esso un buon metodo per raggiungere un accordo generale, definire meglio le ipotesi e facilitare la comunicazione. Questo procedura usata inizialmente va considerate una buona pratica per l'esercizio di modellazione.

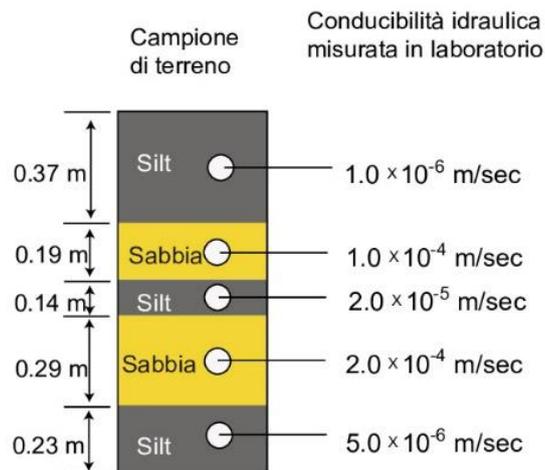
## 11 Bibliografia

- Brandenburg, J.P., 2020, figure originali.
- Payne, F., J. Quinnan, and S. Potter, 2008, Remediation Hydraulics, 1<sup>st</sup> Edition. Chemical Rubber Company (CRC) Press.
- RockWare, 2020, <https://ww.rockware.com/product/rockworks/>.
- Schultz, M., R. Cramer, C. Plank, H. Levine, K. Ehman, 2017, Best practices for environmental site management: A practical guide for applying environmental sequence stratigraphy to improve conceptual site models. Technical Report. [https://cfpub.epa.gov/si/si\\_public\\_file\\_download.cfm?p\\_download\\_id=536250&Lab=NRMRL](https://cfpub.epa.gov/si/si_public_file_download.cfm?p_download_id=536250&Lab=NRMRL).
- Shepherd, M., 2009, Oil field production geology. AAPG Memoir, The American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, Oklahoma, volume 91, 350 pages, <https://doi.org/10.1306/M911316>.

## 12 Esercizi

Un metodo per analizzare le carote di terreno raccolte durante le perforazioni è quello di misurare le proprietà idrauliche dei campioni di misura centimetrica, ottenuti in laboratorio dalla carota più grande ("core plugs" o pezzetti di carota). Prima di utilizzare i risultati per le simulazioni di flusso bisogna trovare le proprietà a scala più macroscopica.

Consideriamo il campione qui sotto, raccolto da un deposito stratificato di silt e sabbia. La carota misura 1,22 m ed è orientata perpendicolarmente agli strati. La conducibilità idraulica è stata calcolata su 5 pezzi più piccoli di carota:



### Esercizio 1

Se è importante solo il flusso idrico attraverso la sabbia, quale è il rapporto grossolano/totale della carota?

[Click per la soluzione dell'esercizio 1 ↴](#)

### Esercizio 2

Quali sono i valori di conducibilità idraulica equivalente orizzontale e verticale per il volume rappresentativo?

[Click per la soluzione dell'esercizio 2 ↴](#)

### Esercizio 3

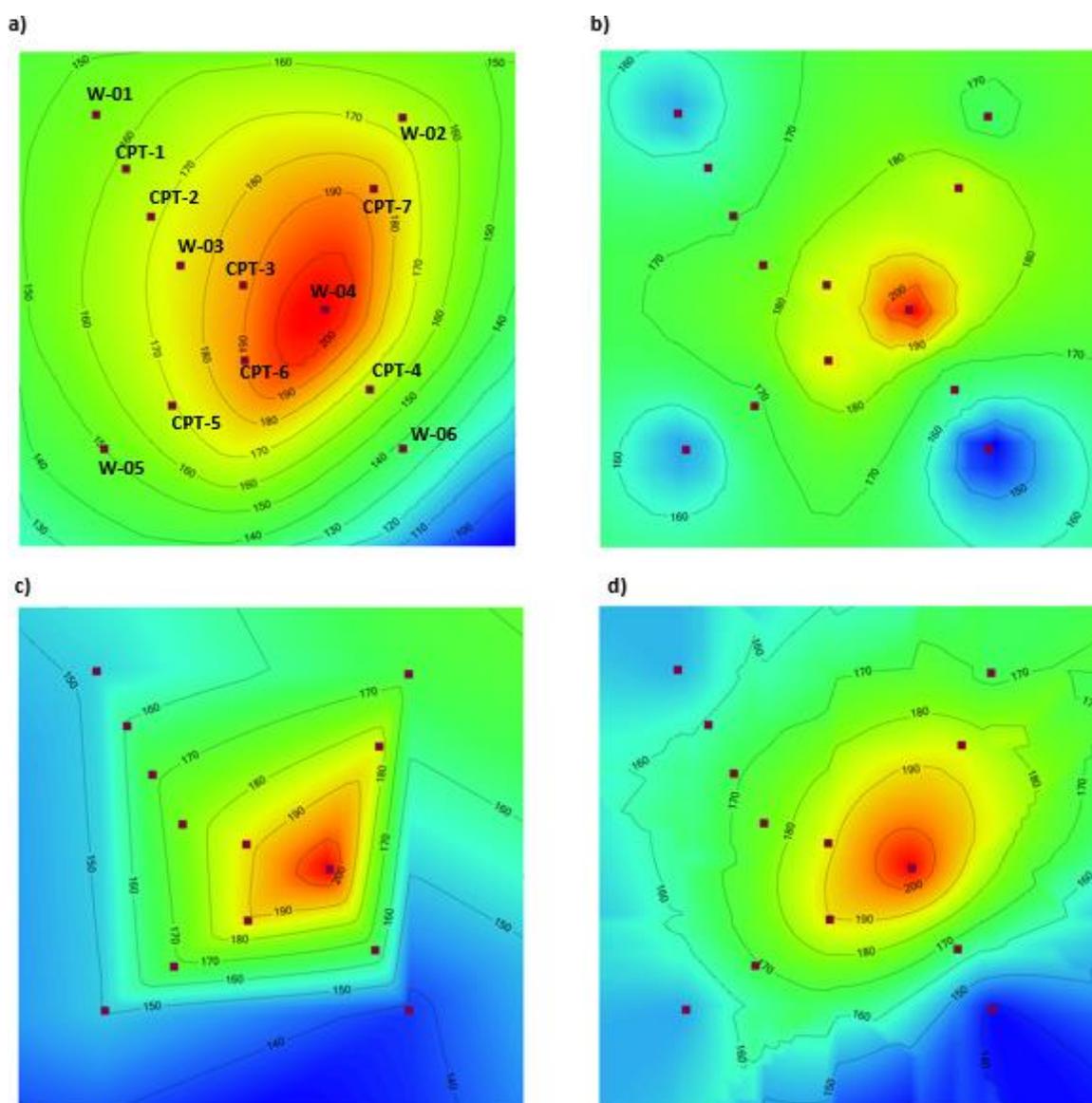
Cos'altro serve conoscere prima di utilizzare questi valori nel modello di flusso ?

[Click per la soluzione dell'esercizio 3 ↴](#)

## 13 Approfondimento Boxes

### Box 1 - Gridding con Dati Dispersi

Con dati da un numero sufficiente di sondaggi, tutti gli algoritmi di gridding riproducono superfici geologiche simili. Con informazioni scarse i risultati sono differenti a seconda del metodo di interpolazione scelto. Per la zona di progetto viene mostrata la superficie di gridding H01 utilizzando le quote ricavate da 14 sondaggi e con vari algoritmi (vedi Figura 19).



**Figura 19** - Superfici di gridding di H01 con l'uso delle sole quote misurate in 14 sondaggi., ottenute mediante: a) isolinee strutturali che rappresentano la "realtà" geologica; b) algoritmo "inverse distance"; c) algoritmo "natural neighbors"; e, d) algoritmo di "Kriging". (Brandenburg, 2020, [gw-project.org](http://gw-project.org)).

Queste immagini sono state ottenute con gli algoritmi di gridding disponibili in Visual MODFLOW FLEX (Waterloo Hydrogeologic, 2020) utilizzando in genere parametri di default. Con l'esperienza i parametri di gridding possono essere modificati per ottenere una superficie più simile a quella prevista per H01. Questo vale soprattutto per il Kriging, che è strutturato per elaborare dati geologici irregolarmente distribuiti.

Ad ogni modo una conoscenza geologica preliminare è fondamentale e non importa quale algoritmo si scelga. La rappresentazione dell'algoritmo di gridding è sempre poco fedele nelle zone vicine ai limiti della griglia. Gli algoritmi effettuano l'interpolazione all'interno della zona dei punti di misura, e l'estrapolazione all'esterno. L'estrapolazione è per natura più incerta, ed ha come risultato degli artefatti quando il limite dell'area modellata è lontana dai punti di misura.

[Ritorna al riferimento del Box 1](#) ↑

## 14 Soluzione degli Esercizi

### Esercizio 1 - Soluzione

Se ricerchiamo solo il flusso attraverso al sabbia, quale è il rapporto grossolano-totale di questo campione di carota?

$$\frac{\text{grossolano}}{\text{totale}} = \frac{0.19 + 0.29}{0.37 + 0.19 + 0.14 + 0.29 + 0.23} = 0.39 \quad (5)$$

[Ritorna all'esercizio 1](#) ↗

### Esercizio 2 - Soluzione

Quali sono le conducibilità idrauliche equivalenti, verticale ed orizzontale, per il volume rappresentativo ?

$$Kv = \frac{0.37 + 0.19 + 0.14 + 0.29 + 0.23}{\frac{0.37}{1.0 \times 10^{-6}} + \frac{0.19}{1.0 \times 10^{-4}} + \frac{0.14}{2.0 \times 10^{-5}} + \frac{0.29}{2.0 \times 10^{-4}} + \frac{0.23}{5.0 \times 10^{-6}}} \quad (6)$$

$$\text{Conducibilità idraulica verticale equivalente} = Kv = 2.9 \times 10^{-6} \frac{m}{s}$$

$$Kh = \frac{(1.0 \times 10^{-6} * 0.37) + (1.0 \times 10^{-4} * 0.19) + (2.0 \times 10^{-5} * 0.14) + (2.0 \times 10^{-4} * 0.29) + (5.0 \times 10^{-6} * 0.23)}{0.37 + 0.19 + 0.14 + 0.29 + 0.23} \quad (7)$$

$$\text{Conducibilità idraulica orizzontale equivalente} = Kh = 6.7 \times 10^{-5} \frac{m}{s}$$

[Ritorna all'esercizio 2](#) ↗

### Esercizio 3 - Soluzione

Cos'altro è necessario per il modello di flusso, prima di utilizzare le proprietà idrauliche calcolate?

E' necessario capire se il singolo campione può essere considerato rappresentativo della struttura geologica. Alcune domande da porsi: quale è la scala del modello in rapporto a quella del campione ? Il campione è abbastanza rappresentativo del flusso per unità idrostratigrafiche di pochi metri di spessore, ma non per quelle di decine di metri. I livelli stratigrafici sono orizzontali od hanno un'immersione misurabile ? Nel caso bisognerebbe applicare una correzione per l'inclinazione, come fatto nella Sezione 5. Non dimenticare che la geologia varia sia orizzontalmente che verticalmente ed altri campioni sarebbero necessari per applicare questo metodo più rigorosamente.

[Ritorna all'esercizio 3](#) ↗

## 15 Breve Profilo dell'Autore



**Dr. JP Brandenburg** è un geologo professionista presso Haley & Aldrich dove si occupa di modellazione idrogeologica con varie applicazioni nel settore ambientale, minerario e risorse idriche. Ha iniziato la sua carriera di modellista nella geodinamica, studiando i moti di convezione viscosa nel mantello terrestre presso l'Università del Michigan. E' entrato in seguito nel gruppo di ricerca di Royal Dutch Shell, sviluppando dei metodi per modellare complesse strutture geologiche nei giacimenti di idrocarburi. Dopo vari anni di sviluppo di queste tecniche presso i settori produttivi ed esplorativi della Shell, il Dr Brandenburg ha cambiato i suoi interessi verso il settore ambientale. Oltre alla modellazione applicata, egli continua a migliorare la sua esperienza in settori trasversali per sviluppare nuovi metodi di ricostruzione della eterogeneità geologica del sottosuolo. Il Dr Brandenburg ha al suo attivo numerose pubblicazioni in geodinamica, geologia del petrolio, geologia strutturale, e modellazione numerica.

## 16 Breve Profilo del Traduttore



**Il dr Alessio Fileccia** si occupa di idrogeologia in terreni porosi e fratturati, con una lunga esperienza maturata in vari paesi del terzo mondo e per conto di Organismi Internazionali (EEC, WB, ADB, UNESCO). Durante la sua carriera ha potuto mettere in pratica diverse tecniche idrogeologiche: dalle valutazioni preliminari, alla programmazione ed esecuzione delle indagini, progettazione pozzi, prove su acquifero, monitoraggi. Gran parte dell'attività più recente si è svolta in Italia per Società Acquedottistiche (ATS) ed all'estero per HydroNova ltd. La sua esperienza è rivolta a conciliare teoria e pratica ed alla divulgazione dell'idrogeologia in ambito professionale.

Vi invitiamo ad iscrivervi alla lista di The Groundwater Project per essere informati sull'uscita di nuovi testi, eventi e modalità di partecipazione a The Groundwater Project. Accettando l'invito ci aiutate ad accrescere la comunità globale delle acque sotterranee.

[Iscriviti](#)↗.



## Modifiche all'edizione originale

### Modifiche generali:

Rimosso lo stile in grassetto nelle equazioni ad esclusione di quello nella risposta finale delle soluzioni degli esercizi.

Cambiato il colore dei collegamenti nel testo del libro, da blu a nero.

Aggiunto il simbolo del collegamento esterno dove mancava.

Aggiunto il simbolo del collegamento interno dove mancava.

Rimossi I contrassegni errati dal pannello di navigazione.

### Modifiche particolari:

pagina iii, aggiunto informazioni sulla modalità di citazione ed il numero DOI del libro.

pagina 11, sostituito "20 per 20" con "50 per 50"

pagina 11, sostituito "20 per 20" con "50 per 50"

pagina 11, aggiunto un trattino nella didascalia di Fig. 7 tra le parole "Open" e "Source".

pagina 17, sostituito "20 per 20" con "50 per 50"

pagina 21, corretto il denominatore dell'equazione 4 da  $b_8/K_5$  a  $b_8/K_8$  ed inclusa anche la frazione  $b_9/K_9$

pagina 25, rimossa un'interruzione di pagina sbagliata dall'ultimo riferimento .