

Il Fenomeno  
Dell'immagazzinamento Negli  
Acquiferi Confinati

Herbert F. Wang  
Traduzione: Alessio Fileccia

*Il Fenomeno  
Dell'immagazzinamento  
Negli Acquiferi Confinati*

*The Groundwater Project*

***Herbert F. Wang***

*Professore Emerito di Geoscienze,  
Università del Wisconsin-Madison,  
Madison, Wisconsin, USA*

*Traduzione: Alessio Fileccia  
Consulente in idrogeologia*

***Il Fenomeno  
Dell'immagazzinamento  
Negli Acquiferi Confinati***

*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.

Diritti d'autore © 2020 Herbert F. Wang (Autore)

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

Wang, Herbert F.

Titolo originale: Groundwater Storage in Confined Aquifers / Herbert F. Wang - Guelph, Ontario, Canada, 2020.

ISBN: 978-1-7770541-7-5

Traduzione di Alessio Fileccia, 2022, 33 pagine

ISBN: 978-1-77470-086-0

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. [Iscriviti](#).

Citazione: Wang, H.F., 2020, [Groundwater Storage in Confined Aquifers](#) The Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada.



Editori: John Cherry e Eileen Poeter

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

Comitato organizzatore: Yin Fan, Allan Freeze, Paul Hsieh, Ineke Kalwijn, Douglas Mackay, Stephen Moran, Everton de Oliveira, Beth Parker, Eileen Poeter, Warren Wood e Yan Zheng.

Copertina: Darton (1900).

Traduzione italiana: Alessio Fileccia

## Dedica

Ad Evan, Mia, e Noah; Melia e Chloe. La “Storia delle arenarie del Dakota” del nonno è iniziata all’incirca quando Laura Ingalls Wilder viveva nel Sud Dakota.

# Indice

<b>DEDICA</b> .....	<b>IV</b>
<b>INDICE</b> .....	<b>V</b>
<b>PRESENTAZIONE DI THE GROUNDWATER PROJECT</b> .....	<b>VI</b>
<b>PREMESSA</b> .....	<b>VII</b>
<b>PREFAZIONE</b> .....	<b>VIII</b>
<b>PREMESSA DELLA VERSIONE ITALIANA</b> .....	<b>IX</b>
<b>RINGRAZIAMENTI</b> .....	<b>X</b>
<b>RINGRAZIAMENTI DEL TRADUTTORE</b> .....	<b>XI</b>
<b>1 INTRODUZIONE</b> .....	<b>1</b>
<b>2 LA STORIA DELL'ACQUIFERO DEL DAKOTA</b> .....	<b>4</b>
<b>3 LA SOLUZIONE DI THEIS</b> .....	<b>12</b>
<b>4 LA FORMULA DI JACOB SULLA COMPRESSIBILITÀ RELATIVA ALL'IMMAGAZZINAMENTO DELL'ACQUIFERO</b> .....	<b>16</b>
<b>5 EQUAZIONE DELLA DIFFUSIONE</b> .....	<b>23</b>
<b>6 SOMMARIO</b> .....	<b>25</b>
<b>7 ESERCIZI</b> .....	<b>26</b>
ESERCIZIO 1 .....	26
ESERCIZIO 2 .....	26
<b>8 BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>28</b>
<b>9 NOTE SULL'AUTORE</b> .....	<b>31</b>
<b>10 BREVE PROFILO DEL TRADUTTORE</b> .....	<b>32</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.

GW-Project, una 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. 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 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. GW-Project è costituito da centinaia di volontari, in continuo aumento e provenienti da più di 200 organizzazioni di 14 paesi e 6 continenti.

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.

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 iniziò come moderna disciplina nel 1856 quando Henry Darcy pubblicò la sua "legge" sulla semplice relazione che lega il flusso ed il gradiente del carico idraulico. Poco tempo dopo, questo ha portato alla descrizione matematica del flusso ai pozzi in regime stazionario ed in acquiferi omogenei ed orizzontali. Sono dovuti passare comunque dei decenni, prima che comparissero formule matematiche relative al flusso non stazionario verso i pozzi negli acquiferi confinati, ad opera di C.V. Theis (1935) del Servizio Geologico degli Stati Uniti. Per sviluppare questa trattazione fu necessario a Theis comprendere l'origine dell'acqua prelevata dai pozzi negli acquiferi confinati.

Riconoscere l'origine di quest'acqua fu complesso per lui, dato che doveva ricorrere alle conoscenze sulle proprietà di interfaccia dell'acquifero tra idraulica e geomeccanica e per arrivare a questo, l'intuizione scientifica doveva evolversi in un pensiero quantitativo con il contributo degli idrogeologi più esperti del tempo. Questo libro *Il fenomeno dell'immagazzinamento negli acquiferi confinati (Groundwater Storage in Confined Aquifers)* di Herbert F. Wang spiega come l'acqua, negli acquiferi porosi confinati, provenga dalla compressione della struttura solida dell'acquifero (risistemazione dei granuli) e dall'aumento di volume a mano a mano che la pressione esterna diminuisce durante il pompaggio. Questo libro illustra non solo i principi e processi coinvolti, ma ci dà una descrizione interessante di questa scoperta sotto forma di una storia sul Selvaggio West, ripresa per mostrare come il metodo scientifico è stato utilizzato per risolvere il mistero dell'origine dell'acqua nei confinati.

L'autore di questo libro ha condotto per decenni ricerche riconosciute internazionalmente. La sua attività accademica si è concentrata sulla geomeccanica e l'idrogeologia e questa evoluzione storica sulla comprensione dell'immagazzinamento degli acquiferi è la sua lezione preferita.

John Cherry, Groundwater Project Leader  
Guelph, Ontario, Canada, November, 2020



## Prefazione

Gli acquiferi sotterranei sono una risorsa per il 70% dell'acqua usata a scopo irriguo. Molti di questi acquiferi hanno subito forti riduzioni di pressione e sono minacciati di sovrasfruttamento. Esportare un pomodoro o una mandorla significa spostarlo tra aree a diversa ricchezza idrica. Il fatto che l'acqua sotterranea non sia visibile rende la sua gestione dipendente da una comprensione geologica e fisica delle modalità di estrazione. Verso la fine del diciannovesimo secolo, quando un gran numero di immigrati iniziò a l'agricoltura nel territorio del Dakota negli U.S.A., il Servizio Geologico degli Stati Uniti intraprese indagini idrogeologiche che continuarono per quasi un secolo. Questo testo presenta una sintesi storica per comprendere la deformazione dell'acquifero in risposta al pompaggio effettuato dai pozzi.

L'autore del libro si è occupato di insegnamento e ricerca per vari decenni, nelle discipline della meccanica delle rocce e dell'idrogeologia. Il libro è basato sulla lezione di idrogeologia, tenuta dall'autore e relativa alla "Storia delle Arenarie del Dakota" la cui sintesi dimostra come la rimozione di acqua dagli acquiferi confinati coinvolga le due discipline suddette.

## Premessa della 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, non sempre semplici, 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 approccio lo ritroviamo in tutti gli altri testi disponibili su 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  
Settembre 2021

## Ringraziamenti

Sono molto felice dell'opportunità di riportare su di un libro la mia lezione sull'immagazzinamento degli acquiferi per "the Groundwater Project". Il testo originario è stato migliorato sensibilmente dai seguenti colleghi, mentre sono dovuti a me in larga parte gli errori o le omissioni.

- ❖ Kamini Singha, Professore, Dipartimento di Geologia e Ingegneria Geologica presso la Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA;
- ❖ J. F. Hermance, Professore Emerito, Brown University, Providence, Rhode Island, USA;
- ❖ Charlie Fitts, Fitts Geosolutions, Scarborough, Maine, USA;
- ❖ Giuseppe Gambolati, Professor Emeritus, Facoltà di Ingegneria, Università di Padova, Padova, Veneto, Italia;
- ❖ Pietro Teatini, Professore Associato, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Architettura, Università di Padova, Padova, Veneto, Italia;
- ❖ David McWhorter, Professore Emerito Di Ingegneria Chimica e Biologica, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, USA; e
- ❖ Wolfgang Kinzelbach, Professore, ETH (Swiss Federal Institute of Technology), Zurich, Zurich, Switzerland.

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 per la revisione, impaginazione e produzione del libro.

Inoltre sono grato per il supporto finanziario fornito dal Sistema Pensionistico del Wisconsin e da quello di Sicurezza Sociale.

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

Herbert Wang

## Ringraziamenti del Traduttore

Sono riconoscente al collega dr Riccardo Castagner per i consigli forniti ed avere gentilmente accettato di controllare la traduzione.

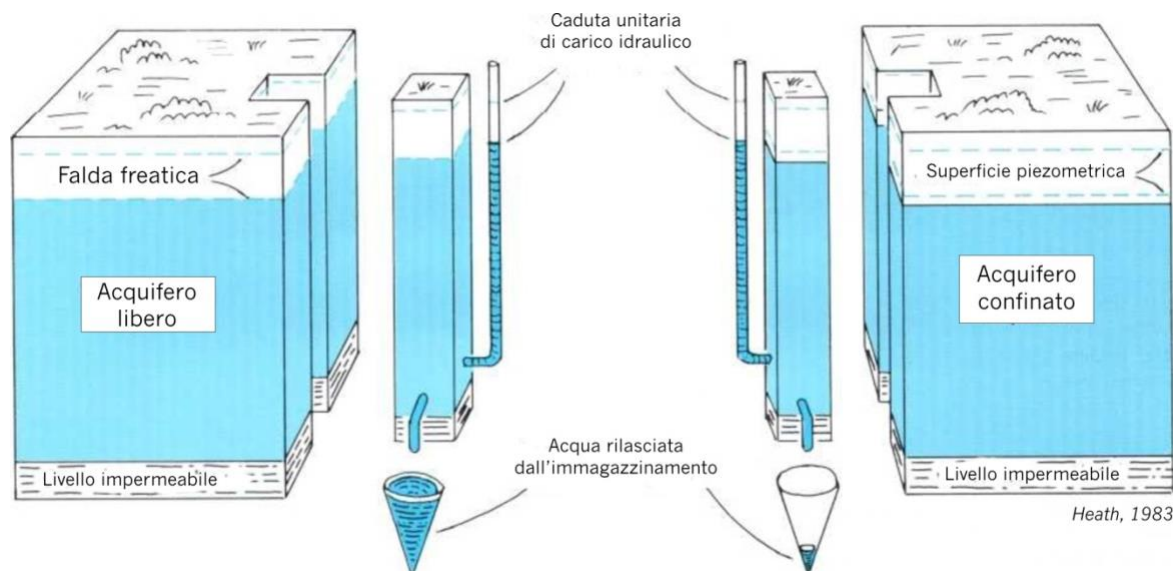
# 1 Introduzione

L'argomento di cui tratta questo libro riguarda la scoperta e quantificazione del fenomeno dell'immagazzinamento negli acquiferi in pressione. Tutti gli acquiferi contengono acqua e sono permeabili, ma la natura dell'immagazzinamento è diversa tra acquiferi liberi e confinati, come è spiegato nei testi di GW-Project: [L'acqua sotterranea nel ciclo dell'acqua](#)<sup>1</sup> (Poeter ed al., 2020) e [Proprietà idrologiche delle terre e principi del flusso idrico sotterraneo](#)<sup>2</sup> (Woessner e Poeter, 2020). La parte superiore di un acquifero freatico costituisce la tavola d'acqua, come indicato in entrambi i libri precedenti di GW-Project. Il pompaggio da un acquifero libero induce un drenaggio d'acqua dai pori saturi del terreno ed abbassa il livello piezometrico. Con la riduzione della pellicola d'acqua che aderisce ai grani del sedimento per tensione superficiale, alla scala del Volume Rappresentativo Elementare,<sup>1</sup> l'immagazzinamento per un acquifero libero è il rapporto tra il volume dei vuoti e quello dell'intero REV, in altri termini la porosità. REV e porosità sono spiegati nel libro di GW-Project a cura di Woessner e Poeter (2020). Nel caso di un acquifero freatico, il parametro immagazzinamento è indicato come porosità efficace ed il suo meccanismo relativamente semplice.

Un acquifero confinato, come implica il suo nome, è un'unità rocciosa permeabile inserita tra due livelli impermeabili. La zona di alimentazione è limitata a quella di affioramento ed il flusso è incanalato all'interno di questa unità. Il carico piezometrico, o carico, per ogni sezione trasversale dell'acquifero confinato è costante per ogni profondità e ad una quota superiore al tetto dell'acquifero. Il pompaggio da un acquifero in pressione estrae acqua contenuta nei vuoti del sedimento ma il materiale stesso rimane saturo. Non esiste una tavola d'acqua da abbassare. L'aspetto in comune che hanno i due mezzi, confinato e libero, è che il pompaggio abbassa il carico piezometrico. (**Figura 1**). L'immagazzinamento negli acquiferi confinati è concentrato nella compressibilità della roccia ed in quella dell'acqua che riempie i pori, come risposta alla variazione di pressione o carico piezometrico. Un aspetto interessante da sottolineare è quando il livello piezometrico scende al di sotto del tetto dell'acquifero e lo stesso diventa un acquifero libero. Il parametro immagazzinamento cambia di parecchi ordini di grandezza da valori tipici per i confinati a quelli per i freatici.

---

<sup>1</sup> in inglese REV, il campione più piccolo le cui proprietà ben rappresentano gran parte dell'intero volume di studio



**Figura 1** - Immagazzinamento in acquiferi liberi ed in pressione. Il volume d'acqua rilasciato dall'immagazzinamento per una diminuzione unitaria del carico, negli acquiferi liberi, è di parecchi ordini di grandezza superiore a quello rilasciato negli acquiferi in pressione (Heath, 1983).

Quando un elemento di volume unitario (REV) in un acquifero confinato, aggiunge o toglie acqua in risposta ad una variazione di carico idraulico<sup>2</sup> questa variazione di immagazzinamento va inclusa nell'equazione del bilancio di massa per il flusso dell'acqua sotterranea. Come conseguenza, la risposta dell'acquifero confinato al pompaggio o ad altre sollecitazioni è temporanea e porta all'equazione del flusso sotterraneo dipendente dal tempo. Una trattazione più dettagliata sul carico idraulico, il bilancio di massa e sull'equazione del flusso sotterraneo dipendente dal tempo si può trovare nel testo di the GW-Project preparato da Woessner e Poeter (2020). L'immagazzinamento è quindi, fondamentale per comprendere l'entità ed il movimento dell'acqua sotterranea. Il parametro dell'immagazzinamento degli acquiferi è probabilmente il secondo per importanza, dopo la legge di Darcy, nel campo dell'idrogeologia.

Questo libro presenta una descrizione storica sulla formulazione dell'immagazzinamento negli acquiferi confinati. Altri articoli importanti, prodotti in circa mezzo secolo, riportano insieme discussioni che spaziano dall'idrogeologia alla geomeccanica ed all'ingegneria del petrolio con riferimenti di matematica e fisica. Lo scopo è quello di apprezzare il concetto di immagazzinamento con un significato più profondo di quello ottenibile dalla sua mera definizione. La storia inizia con l'esame di un paradosso riguardante l'origine dell'acqua di irrigazione nel territorio del Dakota, nella parte centro settentrionale degli Stati Uniti. Lavori importanti sono stati gli studi di campagna del sistema idrogeologico (Darton, 1896, 1901, 1909), la connessione tra la deformazione dell'acquifero ed il prelievo di un fluido dai pori (Meinzer, 1928), la soluzione matematica della variazione di carico a seguito di pompaggio da pozzo, per analogia con il trasporto di calore (Theis, 1935), ed infine il calcolo "dalle fondamenta" dell'equazione principale,

<sup>2</sup> Nel testo, per "carico" si intende carico idraulico

dipendente dal tempo e fondato sulla compressibilità dell'acquifero relativo al movimento delle acque sotterranee (Jacob, 1940).

## 2 La Storia dell'Acquifero del Dakota

La Legge sulle Concessioni Terriere del 1862, aprì agli insediamenti la porzione più settentrionale degli Stati Uniti, del Louisiana Purchase del 1803. I concessionari potevano acquistare 160 acri di terreno (0.65 km<sup>2</sup>) per 18\$ con l'obbligo di coltivarlo per almeno 5 anni. La parte meridionale del territorio del Dakota si sviluppò da 10000 abitanti nel 1870 fino a circa 100000 nel 1880 (Fabry, 2016). I lunghi periodi piovosi degli anni '70 del diciannovesimo secolo, portarono la convinzione che " la pioggia segue l'aratro". Purtroppo il periodo di siccità tra il 1886 e 1889 favorì la perforazione di numerosi pozzi a scopo irriguo. Il famoso pozzo artesiano a Woonsocket, Sud Dakota, USA (vedi copertina del libro) fu perforato nel 1888 ed aveva una pressione iniziale di 17 bar (1,7 MPa) con una portata naturale di circa 8000 gal/min, o 500 l/s (30 m<sup>3</sup>/min). La siccità del 1886-1889 fu presa in considerazione dal Congresso degli Stati Uniti a causa delle conseguenze sul futuro sviluppo agricolo nei nuovi stati del Nord e Sud Dakota. John Wesley Powell, secondo direttore del Servizio Geologico degli Stati Uniti, fu chiamato a testimoniare, due anni dopo la sua fondazione<sup>3</sup>

*"Mentre le arenarie del Dakota costituiscono l'acquifero più importante tra quelli artesiani conosciuti, la quantità di terra che può essere riutilizzata a scopo agricolo attraverso il suo utilizzo, è così piccola che potrebbero verificarsi dei risultati disastrosi nel porre su di esso grandi aspettative" (Gli acquiferi artesiani sono illustrati nella collana editoriale di the GW-Project da Woessner e Poeter, 2020).*

*"Tale è la complessità e grande il rischio di un disastro con l'applicazione di un costoso sfruttamento e la non conoscenza delle reali condizioni che l'argomento richiede l'indagine più attenta che gli può essere riservata"*

*Da un discorso di Powell (1890)*

In effetti N.H. Darton<sup>4</sup> (1896, 1901, 1909) pose in atto degli studi dettagliati che continuarono per tutto il ventesimo secolo ad opera di famosi idrogeologi del Servizio Geologico degli Stati Uniti (U.S.G.S.). Tra questi, Bredehoeft ed altri appoggiarono completamente il parere di Darton nel loro report del 1983.

*"L'acquifero del Dakota nel sud dello stato, è un classico acquifero artesiano. Molte idee odierne sugli acquiferi artesiani derivano dagli studi di Darton sull'acquifero del Dakota condotti tra il 1890 ed i primi del '900. Questo report si basa largamente sui dati raccolti da Darton e vuole essere un omaggio alla sua preparazione come idrologo."*

---

<sup>3</sup> Powell guidò la famosa spedizione del 1869 sul fiume Colorado e Grand Canyon. Il libro di Wallace Stegner (1954) Oltre il Centesimo Meridiano (Beyond the 100th Meridian) e quello di John Ross (2018) La Promessa del Grand Canyon (The Promise of the Grand Canyon) ne danno un racconto particolareggiato.

<sup>4</sup> "Dopo avere incontrato un altro geologo vicino ad un affioramento, l'altro disse 'ho fatto le mie considerazioni su questa formazione. Quale è il tuo pensiero?' Darton rispose, 'Non cerco di indovinare, ho visto i fatti ed ora so'"



Bredehoeft et al. (1983) inserirono molte altre citazioni dai lavori di Darton (1909, pag. 60). Delle due considerate, la prima fa direttamente parte dell'argomento di questo libro, la seconda è tra virgolette più in basso. La prima citazione riguarda come Darton ha concettualizzato gli affioramenti delle Black Hills, nell'ovest del Sud Dakota e come questi abbiano fornito il potenziale necessario per il flusso verso est, dove furono perforati migliaia di pozzi irrigui (tale argomento è discusso nel testo di the GW-Project scritto da Woessner e Poeter, 2020).

*“La prova di questa pressione, tipica di molti pozzi della parte orientale del Sud Dakota, dimostra che l'acqua scorre nel sottosuolo per centinaia di miglia. Tale pressione si può spiegare solo per la presenza di un carico idrostatico dovuto ad una colonna d'acqua a quota molto elevata verso ovest. Se non ci fosse uno sbocco per l'acqua verso est e sud, il carico iniziale acquisito dall'acqua sugli altipiani nella zona di ricarica sarebbe continuo in tutta la regione, ma a causa di questa perdita la pressione si modifica, e si verifica una graduale diminuzione verso est, nota come “gradiente idraulico”, una leggera pendenza dovuta all'attrito dell'acqua nel passaggio attraverso gli strati”.*

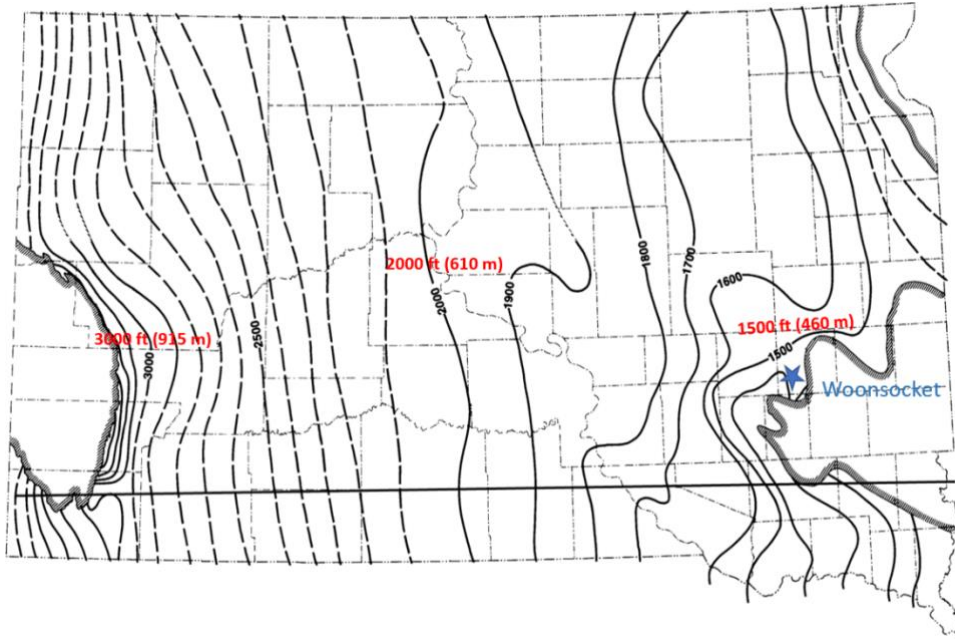
La “prova” di Darton era in una mappa della superficie piezometrica del sistema acquifero del Dakota (**Figura 2**). Da questa cartografia e grazie ai chiarimenti di T.C. Chamberlin (1885) che spiegavano i principi geologici e fisici dell'artesianismo, Darton disegnò una sezione del sistema acquifero del Dakota (**Figura 3**), spesso utilizzata nei testi di idrogeologia. La seconda citazione di Bredehoeft et al. (1983), denunciava il fatto che la conclusione di Darton dell'esistenza di una perdita attraverso lo strato confinante fu ignorata per molti decenni.

*“Un altro fattore che senza dubbio influenza l'esistenza di un gradiente nella regione delle Grandi Pianure è una sicura ma sconosciuta quantità di una certa riduzione di pressione attraverso i cosiddetti strati impermeabili, soprattutto quando sottoposti a pressioni elevate”.*

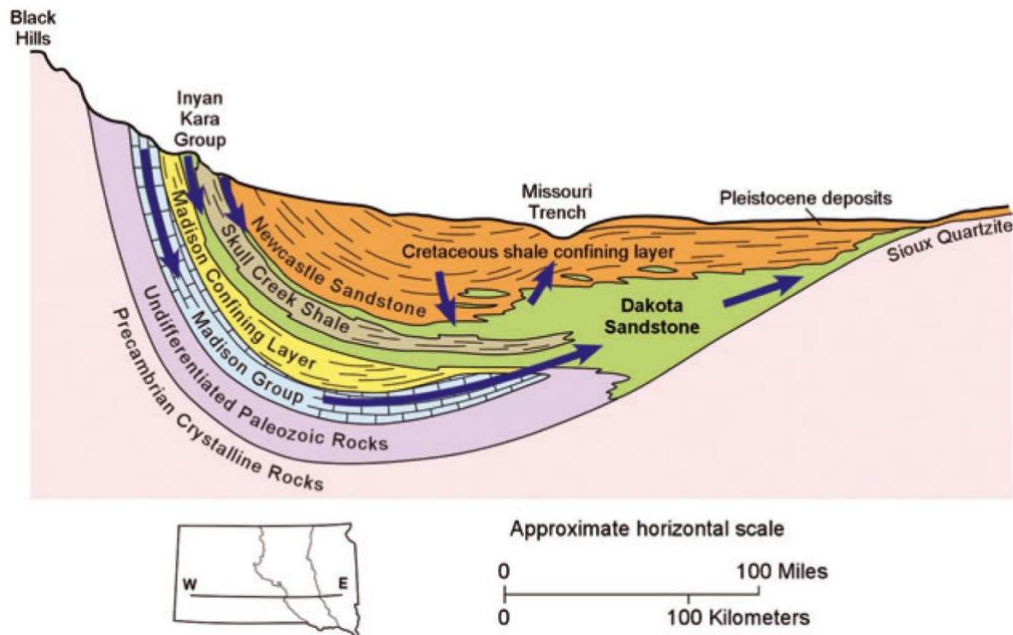
Fino al 1923, circa 10000 pozzi furono perforati nel Sud Dakota che salirono a 15000 nel 1958 (Davis et al. 1961). La pressione iniziale nel pozzo Woonsocket, scese a 8,9 bar (0,9 MPa) nel 1892 e la portata si ridusse a 1150 gal/min o 4,3 m<sup>3</sup>/min (72 l/s). Nel 1915 la pressione scese ancora a 3,1 bar (0,3 MPa) e nel 1925 a 2,4 bar (0,24 MPa) (Meinzer e Hard, 1925). Trascorsi 35 anni, Meinzer e Hard ebbero modo di riflettere sulle parole premonitrici di Powell del 1890.

*“ E' oltremodo interessante e gratificante riconoscere che nel marzo 1890, quando l'entusiasmo per i pozzi artesiani doveva essere al massimo, Maj.J.W. Powell, Direttore del Servizio Geologico degli Stati Uniti (U.S.G.S.) fece un'osservazione sul problema prima ancora della Commissione per l'Irrigazione della Camera dei Rappresentanti che doveva essere considerata inutilmente conservativa per quei tempi ma che sottolineava chiaramente l'aspetto temporaneo di queste pressioni e*

portate elevate, dando anche una stima della portata permanente che oggi, dopo 34 anni di sfruttamento ed abbassamento (piezometrico), è straordinariamente precisa.”



**Figura 2** - Superficie potenziometrica iniziale dell'acquifero del Dakota (ft). La stella indica la città di Woonsocket (quota 400 m). Le isolinee con equidistanza 100 ft, indicano la zona di ricarica sulle Black Hills nel sud ovest del Sud Dakota (a sinistra) e quella di recapito ai pozzi nella zona sud orientale del Sud Dakota. La linea orizzontale è la traccia della sezione in **Figura 2** in basso (riprodotto da Bredehoeft et al., 1983; originale da Darton, 1909).



**Figura 3** - Sezione ovest – est mostrante il Sistema Acquifero del Dakota (da Bredehoeft et al., 1983).

Sebbene il resoconto di Meinzer e Hard riportava essenzialmente numerosi rilievi e misure di pressione e portata nel tempo, per vari pozzi irrigui, un capitolo di 4 pagine "Prelievo dell'acqua immagazzinata e riduzione di volume dell'Arenaria del Dakota" fornì la base per l'articolo fondamentale del 1928, di Meinzer "Compressibilità ed Elasticità degli Acquiferi Artesiani". La difficoltà che Meinzer affrontò con quella ricerca fu un problema di bilancio di massa.

1. Tra il 1886 e 1923, l'estrazione media di acqua sotterranea era di 3000 gallons/minute<sup>5</sup> (galloni/minuto o gpm) pari a 11,4 m<sup>3</sup>/min, per un gruppo di 18 comunità (da R65 a R48), ognuna delle quali occupava un territorio di 6 miglia x 6 miglia.
2. Il flusso laterale in condizioni stazionarie, attraverso una sezione rappresentativa dell'acquifero basato sulla legge di Darcy,  $Q = KiA$ , fornisce alla comunità solo 500 gal/min o 1,9 m<sup>3</sup>/min. La legge di Darcy è illustrata nel testo di the GW-Project scritto da Woessner and Poeter (2020).
  - $K = 6.25 \times 10^{-4}$  ft/s ( $1.9 \times 10^{-4}$  m/s) (conducibilità idraulica)
  - $i = 5$  ft/mile (~1 m/km) sulla base della carta delle isopotenziali (gradiente idraulico dalla **Figura 1**)
  - $A = 6$  miles (~10,000 m) x 60 ft (~20 m) (area della sezione rappresentativa dell'acquifero ricavata dalla larghezza di territorio della comunità per lo spessore di acquifero)
  - $Q = KiA = (6.25 \times 10^{-4}$  ft/s) (5 ft/mi) (6 mi \* 60 ft) (60 s/min) (7.5 gal/ft<sup>3</sup>) = 500 gallons/minute (~2000 l/min) (portata media da ovest verso est che passa attraverso una sezione nord-sud corrispondente al confine della comunità)

Le valutazioni dei punti (1) e (2) non risolvevano il problema di trovare altri 2500 gal/min (9,5 m<sup>3</sup>/min) che sono la differenza tra il totale delle portate estratte di 3000 gal/min (1,9 m<sup>3</sup>/min) e la portata naturale della falda attraverso la sezione verticale dell'acquifero di 500 gal/min (1.9 m<sup>3</sup>/min). Meinzer concluse che il surplus produttivo derivava da un volume di acqua preesistente nei pori dell'acquifero. Meinzer riportò delle prove su questo comportamento e sulla base di alcune osservazioni di tipo idromeccanico:

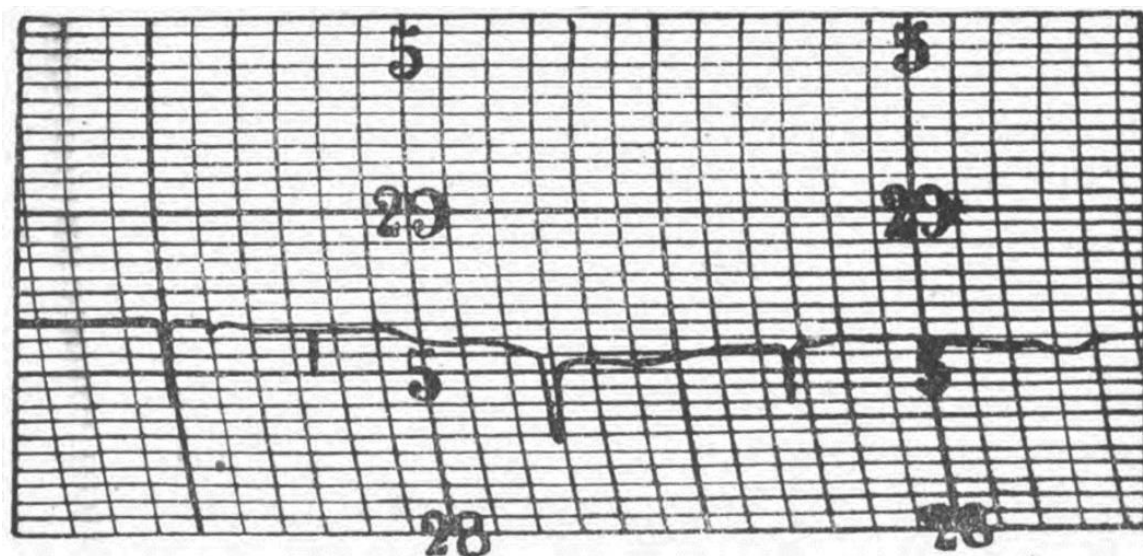
1. F.H. King (1892, pag. 67-69) scrisse che "Una delle osservazioni più sorprendenti fatte durante questo studio è che anche un treno a pieno carico ha il potere di influenzare il livello di falda nella zona satura del terreno, ma come questo avvenga non è facile spiegarlo." (La risposta della piezometria è in **Figura 4** del testo dopo questa esposizione)... "Gli aumenti maggiori di livello piezometrico sono prodotti quando il treno carico si muove lentamente. Una sola locomotiva

<sup>5</sup> In realtà i prelievi si ridussero da 10000 gpm nel 1910 a 5000 nel 1915, 2000 nel 1920, fino a 1000 nel 1923.

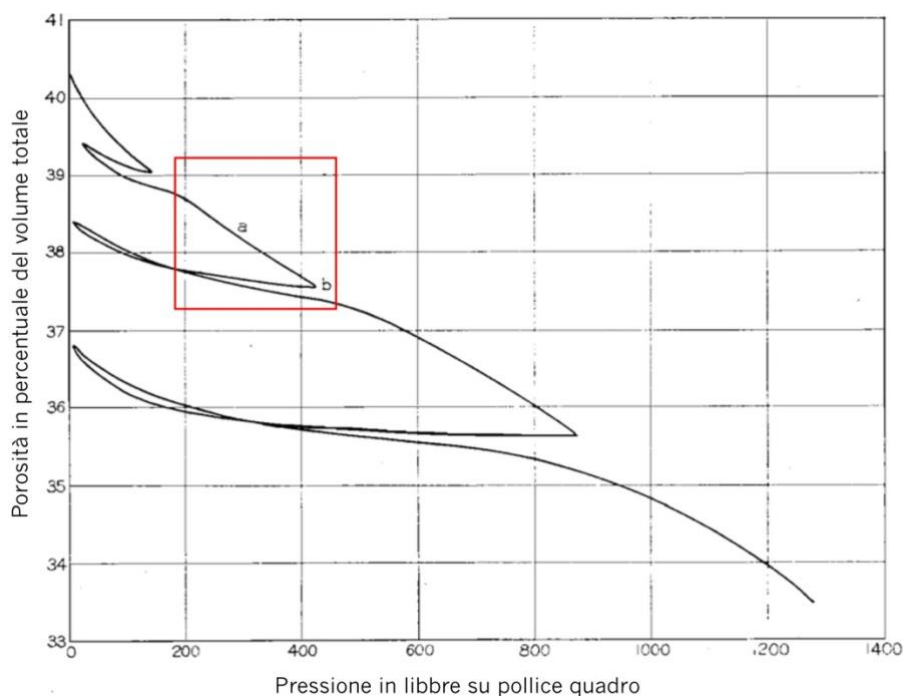
- non ha mai prodotto modifiche ed i treni passeggeri ad alta velocità causano solo piccole o nessuna variazione.”
2. Terzaghi (1925) effettuò esperimenti in laboratorio per misurare la porosità (volume dei vuoti diviso per il volume totale) di un campione compattato di sabbia, in risposta a variazioni dello sforzo assiale (forza divisa per area unitaria ad essa perpendicolare) (La risposta allo sforzo è in **Figura 5** dopo questa dimostrazione). Il campione fu sottoposto a vari cicli di carico e scarico. Sebbene lo scarico produceva una compattazione permanente, un nuovo sovraccarico produceva una curva simile a quella iniziale dopo che era stato raggiunto lo sforzo assiale del carico precedente. Per Meinzer fu importante che la riduzione di porosità tra i punti *a* e *b* in **Figura 5** era simile a quella necessaria per spiegare la mancanza di volume d'acqua nei suoi calcoli.
  3. Schureman (1926) riportò dei dati che dimostravano come i livelli piezometrici in un pozzo profondo 800 ft (244 m) a Longport, New Jersey, erano in sincronia con le maree oceaniche registrate ad Atlantic City situate 7 miglia a nord est. Le due località sono situate su un cordone litoraneo largo circa 1000 ft (305 m) nell'Oceano Atlantico al largo della costa orientale degli Stati Uniti. (Le oscillazioni di marea e quelle del livello piezometrico nel pozzo sono riportate in **Figura 6** di questo libro, dopo la dimostrazione). La correlazione doveva essere dovuta ad un effetto di sovraccarico meccanico dato che la presenza di un livello intermedio di argilla, pari a 300 ft (90 m) non poteva permettere una comunicazione idraulica con la sabbia più profonda (Thompson, 1926).
  4. Pratt e Johnson (1926) attribuirono i fenomeni di subsidenza a Goose Creek nella Baia di Galveston, all'estrazione di petrolio, gas ed acqua dai pori della roccia, nelle formazioni profonde (La subsidenza è mostrata in **Figura 7** di questo libro, dopo la dimostrazione). Nei primi tre esempi sopra descritti, l'applicazione di un carico meccanico ha prodotto un risultato in termini di pressione del fluido, associata alla riduzione di volume dei pori. I fenomeni di subsidenza a Goose Creek dimostrarono che anche il contrario era vero, e cioè che l'estrazione di fluidi porta ad una perdita di porosità.

Meinzer concluse che la differenza tra il volume estratto e quello di ricarica poteva essere spiegata con una diminuzione del volume di acquifero. La variazione di volume di acquifero fu imputata ad una consolidazione verticale,  $\Delta V_{pore}/V_{pore} = \Delta b/b$ , dove  $\Delta$  indica la variazione o la differenza tra il volume dei vuoti prima e dopo il pompaggio,  $V_{pore}$  è il volume iniziale dei pori, e  $b$  è lo spessore iniziale dell'acquifero. Considerare la deformazione come mono dimensionale è una semplificazione del problema, che in realtà è tridimensionale, ed è spesso utilizzata per acquiferi molto estesi in senso orizzontale. L'ipotesi di assenza di deformazioni laterali, (strain, misura di una variazione in lunghezza, areale o volumetrica) riporta il problema ad una dimensione unica verticale con una deformazione verticale definita come  $\varepsilon_v = -db/b = 4.4 \text{ in}/60 \text{ ft} = 0.6 \%$  (Meinzer, 1928, pag.

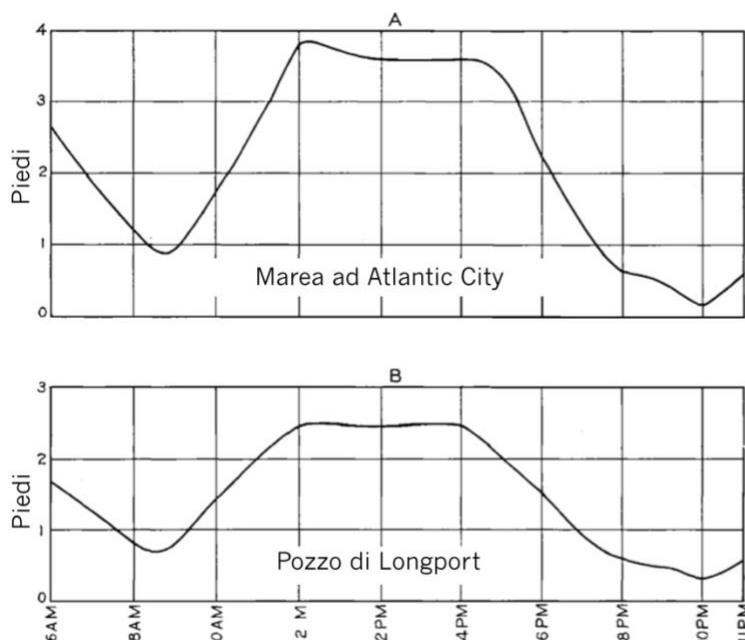
281), dove per convenzione la compressione  $\varepsilon_v$  è considerata positiva. Con una deformazione verticale di 0,6%, la diminuzione di porosità passava dagli iniziali 38,2% a 37,6%. Con queste valutazioni, il ragionamento di Meinzer prevedeva che una compressione di acquifero pari a 0,11 m su di una superficie di 648 miglia quadrate (1680 km<sup>2</sup>) delle 18 comunità, sarebbe stata sufficiente a fornire 2500 gal/min (9,5 m<sup>3</sup>/min) per 38 anni. In questo modo la "compressibilità degli acquiferi artesiani" della pubblicazione di Meinzer, risolse il problema del bilancio di massa ed allo stesso modo fornì una chiara esposizione delle basi fisiche dell'immagazzinamento negli acquiferi confinati.



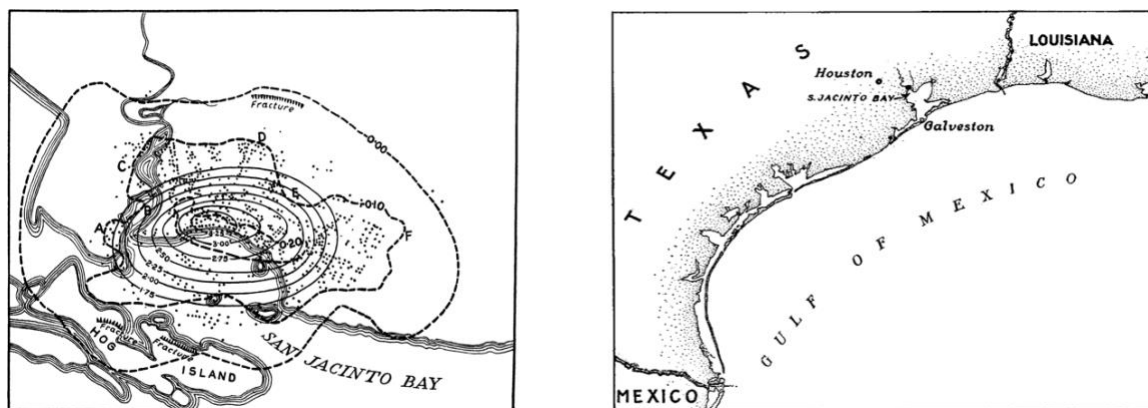
**Figura 4** - Oscillazioni di livello piezometrico in un punto a circa 12 m di profondità e 43 m dai binari. I movimenti sono indotti dai treni in movimento e misurati con un galleggiante attaccato ad un braccio munito di pennino ed a sua volta fissato su di un cilindro verticale che ruotava periodicamente al di sopra del pozzo. In questo modo i movimenti verso l'alto di livello piezometrico erano registrati da un salto in basso del pennino (King, 1892).



**Figura 5** - Riduzione di porosità con sforzo verticale in aumento (“ la pressione” in ascissa). L’area nel riquadro in rosso tra i punti a e b corrisponde approssimativamente alla diminuzione di pressione del fluido nell’acquifero del Dakota (ridisegnato da Meinzer, 1928, da un lavoro di Terzaghi, 1925) .



**Figura 6** - A sinistra: Oscillazione di marea (A) il 22 gennaio 1926 ad Atlantic City, New Jersey, 7 miglia (11 km) a nord est dove furono registrate le oscillazioni piezometriche (B) in un pozzo profondo 244 m a Longport, New Jersey (ridisegnato da Meinzer, 1928, da un lavoro di Schureman, 1926). La sincronia tra i due grafici di livello è una prova del sovraccarico meccanico perché altrimenti vi sarebbe stato un ritardo temporale se i livelli oscillavano a causa di un movimento di flusso idrico. A destra: Una carta tratta da Thompson (1926). La zona in grigio scuro è costituita dagli affioramenti della formazione di Kirkwood, costituita da sabbie che si ritenevano le stesse ritrovate nel pozzo Longport a 244 m di profondità.



**Figura 7** - A seguito dell'estrazione di petrolio, gas, acqua e sabbia dal campo petrolifero di Goose Creek nella Baia di Galvestone si verificò una subsidenza (abbassamento del terreno) di parecchi piedi (Pratt e Johnson, 1926) A sinistra: Le isolinee chiuse a tratto continuo di forma ellittica sono intervallate di 8 anni; quelle tratteggiate irregolari sono per un periodo di un anno. I puntini indicano i pozzi. Lo Stato del Texas provò a vantare dei diritti dopo che la zona fu sommersa, dato che lo Stato aveva proprietà sulle zone sotto acqua. A destra: Cartina topografica da Pratt e Johnson (1926).

### 3 La Soluzione di Theis

Il concetto di immagazzinamento si ritrova di frequente in idrogeologia come parametro “S” nella formula di Theis (1935). Theis concettualizzò il problema dell’abbassamento in pozzo per analogia con la conduzione di calore. Tale idea fu espressa in un carteggio con il suo compagno di college, Clarence Lubin, che era diventato professore di matematica all’Università di Cincinnati (Freeze, 1985).

*“Il flusso delle acque sotterranee presenta molte analogie con quello del trasferimento di calore per conduzione. Possiamo notare delle analogie precise nella teoria sulle acque sotterranee per quanto riguarda il gradiente termico, la conducibilità termica ed il calore specifico. Penso che un approccio preciso alla soluzione dei nostri problemi, probabilmente [sic] è già disponibile con la teoria esistente sulla conduzione del calore. Questo problema è stato già risolto per quanto riguarda il flusso radiale?: Se consideriamo una piastra di spessore e caratteristiche termiche costanti ad una temperatura iniziale uniforme, come calcolare la variazione di temperatura su tutta la piastra [sic] in ogni istante e considerando una zona mantenuta a zero gradi ? Oppure, più importante dal nostro punto di vista (di idrogeologi): se consideriamo la stessa piastra alle stesse condizioni di temperatura ed inseriamo una zona nella quale il calore scorre ad una velocità costante? Ho anche dimenticato di dire che la piastra ha un’estensione areale infinita*

Lubin fornì a Theis la soluzione di Carslaw<sup>6</sup> (1921) che Theis correttamente annotò nel suo articolo (secondo Banks, 2015). Theis confermò l’analogia con il flusso di calore, come specificò nella sua lettera a Lubin.

*“La legge di Darcy è simile alla legge del flusso termico per conduzione, il carico idraulico è analogo alla temperatura, il gradiente idraulico a quello termico, la permeabilità alla conducibilità termica e la porosità efficace al calore specifico [aggiunto in corsivo]. La teoria matematica sulla conduzione del calore, sviluppata da Fourier e studiosi seguenti è largamente applicabile alle teorie sull’idraulica. Questa analogia è stata riconosciuta fin dai lavori di Slichter<sup>7</sup>, ma sembra non sia stato fatto nessun tentativo per introdurre la variabile temporale nelle formulazioni matematiche sull’idrologia sotterranea.”*

*“Nella conduzione di calore una certa quantità di calore è persa istantaneamente ed in contemporanea con la diminuzione di temperatura. Per analogia, sembra probabile che negli acquiferi elastici artesiani un volume specifico viene rilasciato*

<sup>6</sup> Il libro di H.S. Carslaw e J. C. Jaeger’s “Conduzione del Calore nei Solidi” (seconda edizione) pubblicato da Clarendon Press nel 1959, è una fonte ricca di teoria e soluzioni analitiche applicabile all’idrogeologia quantitativa.

<sup>7</sup> La storia di Slichter è stata riassunta nell’articolo del 1987 di H. F. Wang “Charles Sumner Slichter: An engineer in mathematician’s clothing” in History of Geophysics, volume 3, The History of Hydrology, edito da Edward R. Landa e Simon Ince, pag. 103-112.



*istantaneamente dall'immagazzinamento, non appena cala il carico idraulico [aggiunto in corsivo]."*

Per definire l'immagazzinamento Theis adottò la variabile  $S$ , che inizialmente chiamò "potenzialità specifica" nella citazione sopra, da non confondere con la "potenzialità specifica" degli acquiferi freatici (*in italiano chiamata porosità efficace n.d.t.*). In realtà, l'analogia col calore specifico<sup>8</sup> è l'unica caratteristica che Theis diede a  $S$ , a differenza invece di una breve definizione del significato fisico del coefficiente di trasmissività  $T$ . Theis nel suo articolo del 1935 non diede alcuna spiegazione sui meccanismi dell'immagazzinamento per le acque sotterranee; era semplicemente un parametro ricavato per analogia con il flusso di calore. Comunque Theis fornì un'elaborazione di  $S$  in una Nota dell'Autore aggiunta ad una ristampa del 1952 del suo lavoro del 1935 della Società Geologica degli Stati Uniti (United States Geological Society USGS).

*"Il fattore  $S$  dell'equazione fornita è chiamato 'potenzialità specifica' nel testo dell'articolo. Considerazioni seguenti consigliano di chiamare questo termine come "coefficiente di immagazzinamento" dell'acquifero e di definirlo come il volume di acqua in piedi cubi, che viene rilasciato da un prisma verticale di acquifero con base di area un piede quadrato ed altezza uguale a quella dell'acquifero, quando il livello piezometrico scende di un piede."*

Con questo, Theis non usa più il termine "potenzialità specifica" per un acquifero confinato. Oggi il termine "storatività" è sinonimo di "coefficiente di immagazzinamento" e la definizione di Theis è quella comunemente inserita nei libri di testo ed illustrata per definire gli acquiferi artesiani in **Figura 1**.

La definizione di Theis per definire l'immagazzinamento si riferisce al flusso radiale bi dimensionale. Nelle tre dimensioni, il corrispondente del calore specifico è l'immagazzinamento specifico, per cui la quantità d'acqua ottenuta dal volume rappresentativo elementare (REV) per una caduta di gradiente unitaria è normalizzata utilizzando il volume unitario (REV). Per maggior precisione quanto scritto viene tradotto in una equazione, sebbene la maggior parte dei testi di idrogeologia segue Theis e tralascia di precisare questo. Un valore importante da definire è l'incremento del volume di fluido,  $\zeta$  (Equazione 1), che proviene dalla meccanica dei terreni e dalla teoria della poroelasticità (Biot, 1941; Wang, 2000).

---

<sup>8</sup> Theis in seguito nel suo articolo utilizza il termine "specific heat per unit-volume," (calore specifico unitario) analogo di "immagazzinamento specifico" cioè capacità di immagazzinamento per volume unitario. Dato che il termine "specifico" generalmente si riferisce ad un valore unitario di una certa grandezza, "calore specifico di volume unitario" viene chiamato "capacità termica volumetrica."

$$\zeta = \frac{\Delta V_w}{V} \quad (1)$$

con:

$\Delta V_w$  = volume di acqua aggiunto o rimosso dall'immagazzinamento in un volume elementare REV ( $L^3$ )

$V$  = volume dell'elemento rappresentativo elementare ( $L^3$ )

La grandezza  $\Delta V_w$  è positiva quando l'acqua è aggiunta all'acquifero e negativa quando viene estratta.  $\Delta V_w$  rappresenta il volume di acqua trasportato verso o da una fonte esterna ad una pressione di riferimento, che di solito è quella atmosferica, dato che i manometri misurano la differenza tra la pressione assoluta e quella atmosferica. Perciò  $\Delta V_w$  rappresenta la variazione di volume d'acqua aggiunto o rimosso dall'acquifero, praticamente come una somma di denaro è versata o prelevata dal conto corrente. Questo volume, aggiunto o prelevato dall'acquifero viene normalizzato con il volume  $V$  del REV. Infine traducendo le parole di Theis in un'equazione si ottiene la definizione matematica dell'immagazzinamento specifico mostrata nelle Equazioni 2a e 2b.

$$S_s = \frac{\zeta}{\Delta h} \quad (2a)$$

L'immagazzinamento specifico  $S_s$  ha come unità l'inverso della lunghezza, 1/m. Questa definizione si può anche esprimere come cambiamento della pressione del fluido perchè  $\Delta p = \rho_w g \Delta h$ . Il carico ( $h$ ) è spiegato nel testo di the GW-Project redatto Woessner and Poeter (2020).

$$S_s = \rho_w g \frac{\zeta}{\Delta p} \quad (2b)$$

con:

$\rho_w$  = Densità dell'acqua ( $M/L^3$ )

$g$  = Accelerazione di gravità ( $L/T^2$ )

Nel flusso radiale bidimensionale, la storatività,  $S$ , per un acquifero confinato di spessore  $b$ , è data da immagazzinamento specifico per spessore di acquifero,  $S = S_s b$ , dato che la storatività nella definizione di Theis è il volume di acqua "rilasciato da un prisma verticale di acquifero" di base unitaria e per una caduta di gradiente unitaria. La storatività è un parametro adimensionale dato che  $S_s$  è l'inverso di una lunghezza.

Lo sviluppo della soluzione di Theis del 1935 per spiegare l'abbassamento causato da un pozzo in pompaggio in un acquifero orizzontale, dimostra il ruolo importante dell'analogia con la conduzione di calore per la comprensione del concetto di immagazzinamento idrogeologico. Questa affinità è sia fisica che matematica (**Tabella 1**). Calore e temperatura sono i potenziali che permettono il flusso di acqua e di calore in base alle leggi di Darcy e Fourier. L'immagazzinamento specifico (volume di acqua rilasciato dall'immagazzinamento per volume unitario di acquifero e caduta di gradiente unitaria) è

analogo al calore specifico per volume unitario ( quantità di calore necessaria per aumentare di un grado un volume unitario di materiale).

Un aspetto contrastante di questa analogia tra calore e flusso idrico è che la definizione di immagazzinamento specifico è espresso da un rapporto di due grandezze che diminuiscono entrambe (*portata al numeratore e carico al denominatore*) data l'importanza di estrarre l'acqua dall'acquifero. Al contrario la definizione di calore specifico è espressa da variazioni di parametri entrambi in aumento (*calore al numeratore e temperatura al denominatore*).

La **Tabella 1** non è completa dato che la coppia di equazioni fondamentali sarà discussa alla Sezione 5 relativa all'equazione di diffusione.

**Tabella 1** - Parametri simili per il flusso sotterraneo e quello di calore (Wang and Anderson, 1982; Wang, 2000; Anderson, 2007).

Flusso idrico sotterraneo	Flusso di calore
Carico idraulico, $h = p / (\rho_w g) + z$ [m]	Temperatura, $T$ [°K]
Volume aggiunto all'immagazzinamento $\Delta V_w$ [m <sup>3</sup> ]	Calore, $\Delta Q$ [J]
Flusso idrico sotterraneo, [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /s = m/s]	Flusso di calore, $q$ [J/(m <sup>2</sup> s) = W/m <sup>2</sup> ]
Conducibilità idraulica, $K$ [m/s]	Conducibilità termica, $K$ [J/(m °K s) = W/(m °K)]
Immagazzinamento specifico, $S_s = S/b$ [1/m]	Capacità termica specifica (per volume unitario), $\rho c$ [J/(°K m <sup>3</sup> )]
Diffusività, $K/S_s$ [m <sup>2</sup> /s]	Diffusività termica, $K/(\rho c)$ [m <sup>2</sup> /s] (K è la conducibilità termica, vedi sopra)
Legge di Darcy, $q = -K (dh/dx)$	Legge di Fourier, $q = -K (dT/dx)$

## 4 La Formula di Jacob sulla Compressibilità Relativa All'immagazzinamento Dell'acquifero

Un ulteriore passo avanti per la comprensione dell'immagazzinamento in idrogeologia è dovuto a C.E. Jacob (Titus, 1973) in un articolo del 1940. Jacob collegava il concetto di immagazzinamento di Theis, simile alla capacità termica, alle analisi di Meinzer relative alla compressibilità dell'acquifero del Dakota. Come ha riconosciuto lui stesso,<sup>9</sup> Jacob ebbe uno scambio di idee con il collega C.V.Theis presso il Servizio Geologico degli Stati Uniti (USGS). Lo scopo cui mirava Jacob era di ricavare l'equivalente idrogeologico dell'equazione differenziale parziale per il flusso termico variabile nel tempo, e quindi ottenere una descrizione matematica del flusso idrico sotterraneo basata su fondate basi fisiche piuttosto che su analogie.

*“L'autore propone di ricavare “dalla base” l'equazione differenziale fondamentale che controlla il flusso idrico in un acquifero elastico artesiano, considerando ciascuna delle ipotesi necessarie a derivare l'equazione”*

Jacob calcolò il bilancio di massa in un volume rappresentativo (REV) per un intervallo temporale durante il quale la pressione era cambiata di una quantità  $\Delta p$ . La sua conclusione era basata su tre principi fisici: (1) Una diminuzione di pressione del fluido corrisponde ad un aumento di pressione verticale. (2) Una diminuzione di pressione contribuisce ad espellere un volume d'acqua uguale alla perdita di porosità associata alla compressibilità dell'acquifero. (3) Una diminuzione di pressione comporta un'espansione di volume d'acqua nei pori legata alla sua stessa compressibilità.

1. Il titolo dell'articolo di Meinzer del 1928 richiamò l'attenzione al ruolo della “compressibilità ed elasticità degli acquiferi artesiani.” (**Figura 5**). Come riprova presentò l'esperimento di Terzaghi nel quale una pressione verticale causava una diminuzione di porosità nell'arenaria. L'effetto di diminuire la pressione dei pori produce lo stesso effetto di un eguale aumento di pressione verticale (**Figura 8**). Questo concetto viene definito come “Legge della tensione efficace”, vedi Equazione 3.

$$\varepsilon_v = \beta_v(\sigma_v - p) = \beta_v \sigma_e \quad (3)$$

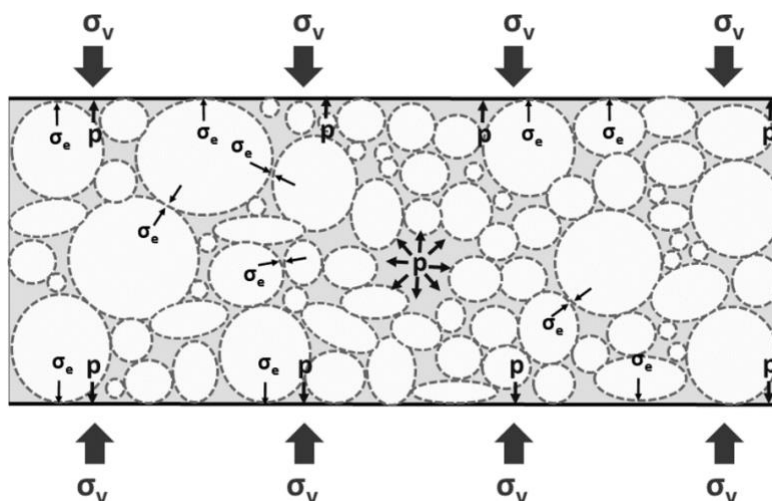
con:

$\beta_v = \varepsilon_v / \sigma_v$  = Compressibilità verticale per  $p = 0$  (condizioni drenate)

$\sigma_e = \sigma_v - p$  = Tensione verticale efficace, pari alla differenza tra la tensione verticale e la pressione dei pori

Per convenzione gli sforzi di compressione sono positivi.

<sup>9</sup> “L'autore è infinitamente grato ai colleghi del Servizio Geologico per le critiche ed i molteplici suggerimenti, e soprattutto a C.V. Theis, poichè molte delle idee illustrate derivano da sue osservazioni personali all'autore.”



**Figura 8** - La legge della tensione efficace stabilisce che la pressione vertical effettiva  $\sigma_e = \sigma_v - p$  regola la deformazione verticale (da Atkinson, 2000).

- Jacob riteneva che l'estrazione di acqua da un acquifero non modifica la pressione totale verticale. Essendo costante la pressione verticale complessiva, un aumento delle tensioni efficaci è uguale ma di segno opposto alla diminuzione di pressione del fluido, cioè,  $\Delta\sigma_e = -\Delta p$ , in questo modo l'Equazione 3 diventa Equazione 4.

$$\Delta\varepsilon_v = -\beta_v\Delta p \tag{4}$$

Per convenzione la deformazione e la pressione verticali sono positive quando c'è una compressione. Ipotizzando una deformazione laterale nulla, la deformazione verticale è uguale alla diminuzione di porosità, con la considerazione che la compressibilità della parte solida è trascurabile. In altre parole,  $\Delta\varepsilon_v$  è uguale al volume di acqua per unità di volume (REV) prelevata dall'immagazzinamento a causa della compressibilità dell'acquifero.

- Inoltre, l'aumento di volume tra i pori a seguito della diminuzione di pressione del fluido deve essere considerato nel bilancio del volume rappresentativo unitario, REV (Equazione 5).

$$\frac{\Delta V_w}{V_w} = -\beta_w\Delta p \tag{5}$$

con:

$$\begin{aligned} \beta_w &= \text{Compressibilità dell'acqua } (4.5 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}) \\ V_w &= nV, n \text{ è la porosità e } V \text{ il volume del REV} \end{aligned}$$

Sommando insieme le due fonti di acqua rilasciate dall'immagazzinamento a seguito di una diminuzione della pressione dei pori di  $-\Delta p$ , Jacob ottenne un'espressione del coefficiente d'immagazzinamento,  $S$ , che racchiude la compressibilità dell'acquifero, quella dell'acqua, lo spessore dell'acquifero e la porosità, come indicato nell'Equazione 6a e 6b.

$$S = \rho_w g b (\beta_v + n\beta_w) \quad (6a)$$

Dividendo  $S$  per lo spessore di acquifero si ottiene l'immagazzinamento specifico.

$$S_s = \rho_w g (\beta_v + n\beta_w) \quad (6b)$$

Secondo il sistema internazionale (SI), l'unità di misura di  $S_s$  è  $1/m$ , vedi Equazione 2.

Jacob in seguito ricavò dal principio di conservazione della massa, l'equazione differenziale parziale per un flusso radiale in un acquifero di spessore  $b$  nella stessa forma di quella ipotizzata da Theis per analogia con la propagazione del calore. La differenza era che il coefficiente di immagazzinamento  $S$  era espresso in termini di compressibilità e non come una grandezza definita per analogia.

L'esperimento di Terzaghi (**Figura 5** ed Equazione 6b) può essere usato per stimare l'immagazzinamento specifico della sabbia sciolta.

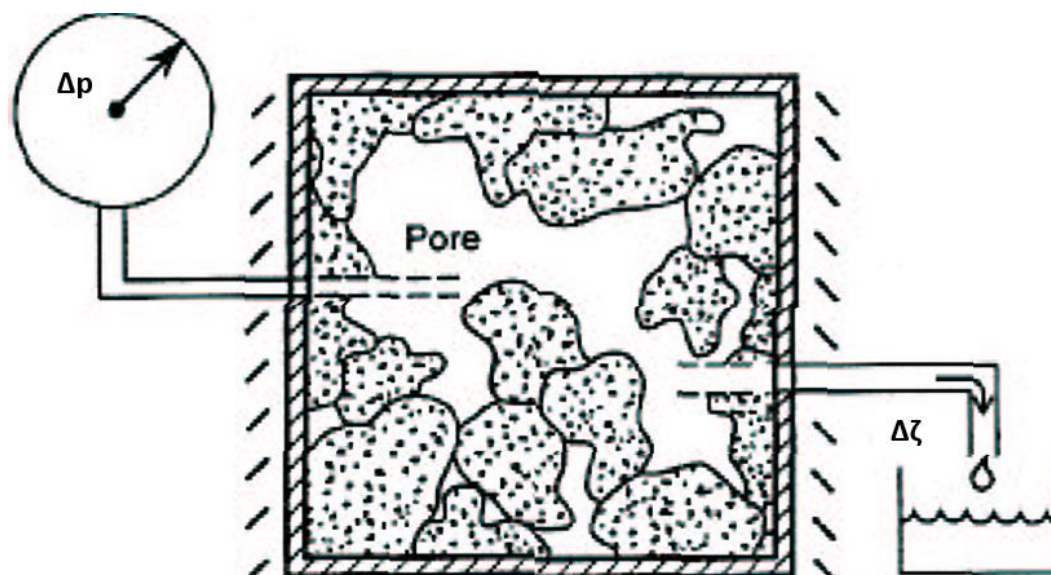
La compressibilità verticale  $\beta_v$  tra i punti  $a$  e  $b$  si ricava dalla pendenza della curva e vale  $7 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$  dopo conversione dalle unità anglosassoni. Con una porosità del 38% si ottiene l'altro termine  $n\beta_w = 2 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ .

Sommando i termini e moltiplicando per  $\rho_w g$  si ottiene l'immagazzinamento specifico di  $2.3 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$  ed il rapporto tra la compressibilità della sabbia e dell'acqua è 3,5. I valori di immagazzinamento specifico dipendono dal tipo di roccia e sono variabili all'interno della stessa litologia. Con questi presupposti la **Tabella 2** fornisce un ordine di grandezza dei valori per una piccola serie di terreni. I volumi di acqua ottenuti per l'irrigazione dall'acquifero del Dakota dimostrano che materiali molto comprimibili possono immagazzinare una gran quantità di fluidi. Tuttavia i valori di immagazzinamento specifico in **Tabella 2** hanno un ordine di grandezza molto inferiore alla porosità efficace degli acquiferi liberi.

**Tabella 2** - Compressibilità ed immagazzinamento specifico di alcune rocce (Palciauskas e Domenico, 1989). I valori di compressibilità ed immagazzinamento specifico si riferiscono a situazioni di stress isotropico confinato, non verticale. Le cifre provengono da varie situazioni. Per il calcare siamo nel caso di pressioni atmosferiche o di marea. Gli altri valori sono ricavati da bibliografia e calcolati in base ad ipotesi. L'immagazzinamento specifico sulla base dei carichi è stato calcolato da valori di pressione utilizzando la  $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$  e  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ . Come riferimento la compressibilità dell'acqua è  $\beta_w = 4.5 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ .

Roccia	Compressibilità $\beta, 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$	Immagazzinamento specifico come pressione $S_s/(\rho_w g), 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$	Immagazzinamento specifico come carico $S_s, 10^{-6} \text{ m}^{-1}$
Argilla	160	162	159
Siltite	4.6	5.4	5.3
Arenaria di Kayenta	1.1	1.2	1.2
Calcare	0.3	0.95	0.93
Basalto di Hanford	0.22	0.44	0.43

In idrogeologia, la compressibilità dell'acquifero è più significativa di quella della sola acqua. D'altra parte gli ingegneri petroliferi, in genere consideravano i giacimenti di idrocarburi come incompressibili per la loro elevata profondità. Jacob studiò questa ipotesi per il caso del campo petrolifero dell'East Texas, descritto da Muskat (1937) nel suo classico trattato *Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media (Flusso di fluidi omogenei nei mezzi porosi)*. Il giacimento produceva 500 milioni di barili (80 milioni di  $\text{m}^3$ ) di petrolio con un calo di pressione di 375 psi (2.6 MPa; 25,8 bar). Ipotizzando un serbatoio rigido, Muskrat pensò che il petrolio doveva contenere del gas disciolto per incrementare la compressibilità complessiva del fluido di 20 volte e per produrre la quantità trovata come solo dovuta alla sua compressibilità, nonostante il fluido fosse sottosaturo. Jacob suggerì che la causa della produzione di petrolio era piuttosto da ricercare nella compressibilità complessiva del serbatoio, costituito dalle sabbie di Woodbine con le intercalazioni di argilla. Va sottolineato che che  $S$  ed  $S_s$  nell'Equazione 6a o 6b possono essere misurate in campo da una prova di pompaggio od in laboratorio, considerando la loro definizione di volume liquido rimosso dall'immagazzinamento a causa di un cambiamento della pressione dei pori (**Figura 9**). In realtà questa misura diretta è difficile da ottenere in modo preciso, dato che bisogna considerare anche il fluido contenuto nelle tubazioni che collegano i pori del campione, o dell'acquifero.



**Figura 9** - Misura dell'immagazzinamento specifico come cambiamento della pressione del fluido, Equazione 2b (Wang, 2000).

Oltre all'Equazione 6a, Jacob ricavò quelle relative alla variazione di livello piezometrico in risposta ad altrettante variazioni di pressione barometrica o di marea. Queste variazioni furono determinate anche in termini di compressibilità del fluido permettendo così anche la misura indiretta dell'immagazzinamento. Il presupposto di una vasta superficie di carico produce un aumento di pressione nel fluido dato che questo non può espandersi lateralmente. Nel campo della meccanica dei suoli, siamo nella situazione di un acquifero in condizioni *non drenate*. Nel caso di un sovraccarico dovuto alla marea o pressione barometrica la pressione verticale non è costante. Quando cambia la pressione dei pori, l'acqua può essere aggiunta o rimossa dall'immagazzinamento in base alla pressione verticale applicata (vedi l'Equazione 2b). In genere quindi, l'aumento del contenuto di fluido va espresso in termini sia di variazione di pressione verticale che di pressione dei pori. La forma più semplice di un'equazione è quella di considerare lineare l'incremento di fluido per entrambe le variabili.

$$\zeta = -\beta_v \Delta\sigma_v + \rho_w S_s \Delta p \quad (7a)$$

Per convenzione si usa  $\zeta$  positive quando l'acqua è aggiunta al REV e  $\Delta\sigma_v$  è positivo quando il REV è compresso. Il primo termine a destra nell'Equazione 7a è l'aumento del contenuto di fluido corrispondente alla variazione di pressione verticale *quando non c'è variazione di pressione nel fluido*. Jacob ipotizzò che il volume di acqua nel REV diminuisce della stessa quantità del volume di REV stesso, in altri termini la variazione del volume di acqua dell'immagazzinamento è contraria alla deformazione, il che spiega come il coefficiente  $\Delta\sigma_v$  nell'Equazione 7a è  $\beta_v$ . Il secondo termine a destra nell'Equazione 7a è l'incremento di fluido associato ad una variazione nella pressione del fluido stesso *quando non varia la pressione verticale*, il che corrisponde alla definizione di immagazzinamento specifico (vedi Equazione 2).



L'Equazione 7a è una delle due equazioni fondamentali della poroelasticità per il caso particolare di un sovraccarico verticale arealmente distribuito (Wang, 2000). L'altra importante equazione è quella che correla linearmente la deformazione verticale ai cambiamenti della pressione verticale e di quella dei pori.

$$\Delta \varepsilon_v = \beta_v \Delta \sigma_v - \beta_v \Delta p \quad (7b)$$

L'Equazione 7b fornisce la deformazione verticale come somma di due termini. Il primo termine stabilisce che la deformazione verticale è quella dovuta ad un cambiamento nella pressione verticale *quando non vi è alcuna variazione della pressione del fluido*, mentre il secondo termine è la deformazione verticale associata ad una variazione della pressione del fluido *quando non c'è cambiamento della pressione verticale*. Il coefficiente di proporzionalità è  $\beta_v$  per entrambi i termini per la legge delle tensioni efficaci, l'Equazione 7b è semplicemente una ridefinizione dell'Equazione 3.

La risposta sincrona dei livelli idrici di un acquifero, alle maree oceaniche (**Figura 6**) fu citata da Meinzer come prova di una elasticità dello stesso. Il rapporto tra l'aumento di livello piezometrico in un pozzo e quello di marea viene chiamato efficienza di marea (tidal efficiency T.E.). Questo rapporto è simile al rapporto  $\Delta p / \Delta \sigma_v$ . Se immaginiamo che non c'è scambio idrico con l'esterno dell'acquifero a causa della grande superficie su cui si applica il sovraccarico e consideriamo una situazione non drenata,  $\zeta=0$ , l'Equazione 7a fornisce la pressione dei pori, cioè  $\Delta p = \beta_v \sigma_v / (\rho_w g S_s)$ . Sostituendo il valore di  $S_s$  dell'Equazione 6b si ottiene l'Equazione 8.

$$T.E. = \frac{\beta_v}{\beta_v + n\beta_w} \quad (8)$$

L'efficienza barometrica B.E., è definita analogamente come il rapporto tra l'aumento di livello nel pozzo e l'aumento di pressione verticale (espresso come aumento di carico idraulico). La differenza con l'efficienza di marea in termini di risposta del pozzo è che una variazione di pressione atmosferica  $\Delta p$  agisce direttamente sull'acqua del pozzo di una quantità by  $-\Delta p / \rho_w g$ . Questo valore va aggiunto a quello prodotto sull'acquifero dalla pressione atmosferica come nel caso del sovraccarico di marea. In sintesi  $B.E. = 1 - T.E.$  come esplicitato nell'Equazione 9.

$$B.E. = \frac{n\beta_w}{\beta_v + n\beta_w} \quad (9)$$

Le espressioni matematiche dell'efficienza di marea e di quella barometrica contengono gli stessi parametri dell'immagazzinamento specifico per l'acquifero e cioè compressibilità verticale, compressibilità dell'acqua e porosità. Misurare T.E. o B.E. supponendo di conoscere  $n$  e  $\beta_w$  significa che  $\beta_v$ , e quindi  $S_s$ , si possono ricavare dalle Equazioni 8 o 9 e quindi si può ricavare il rapporto del contributo tra la compressibilità dell'acqua,  $n\beta_w$ , e quella dell'acquifero  $\beta_v$ .

Jacob (1941) utilizzò l'efficienza di marea per calcolare indirettamente il coefficiente di immagazzinamento dato che era più facile da trovare dell'efficienza barometrica. Jacob confrontò il contributo relativo dell'elasticità dell'acquifero e della compressibilità dell'acqua dalla risposta di marea (**Figura 6**), con prove di portata effettuate per profondità tra 217 m e 244 m nella formazione delle Lloyd Sand a Long Island, Stati Uniti. Il rapporto tra compressibilità dell'acquifero e dell'acqua ottenuto tramite l'efficienza di marea era di 1,7, mentre dall'elaborazione delle prove di pompaggio era di 2,8.

## 5 Equazione della Diffusione

Lo studio della diffusione termica ha una storia lunga e variegata in fisica matematica ed inizia con Fourier nel 1822. La velocità di trasporto del calore attraverso un mezzo, dipende chiaramente, dalla conducibilità termica, ma anche dall'immagazzinamento, poichè il tasso di variazione della temperature nel REV è legato alla quantità di calore da trasportare per modificarla. Per lo stesso valore di conducibilità termica, la diffusione di calore è più lenta con un'alta capacità termica che con una bassa. Ne segue che la capacità termica è qualcosa di simile ad una pellicola nei confronti della conducibilità termica. Questa relazione inversa tra immagazzinamento e conducibilità nel determinare la velocità di diffusione è evidenziata tramite il loro rapporto. Nell'ambito del trasporto di calore viene chiamata diffusività termica,  $\kappa = K/(\rho c)$ , dove  $K$  è la conducibilità termica,  $\rho$  è la densità,  $c$  è la capacità termica, e  $\rho c$  è la capacità termica per volume unitario. Per analogia con il flusso sotterraneo  $\kappa = T/S$  nel caso del flusso bidimensionale; e  $\kappa = K/S_s$  per quello lineare monodimensionale. Il parametro diffusività ha come unità di misura di  $m^2/s$ . Le definizioni di diffusività idraulica e termica sono indicate in **Tabella 3**, che è il seguito della **Tabella 1**. Nel suo lavoro del 1935, Theis non aveva inserito l'equazione della diffusione, probabilmente perchè era già ben conosciuta in fisica matematica, e quindi è inserita in **Tabella 3**. Ad ogni modo Theis, presentò il lavoro di Lubin sull'analogia termica nel caso del pozzo in pompaggio. Il calcolo iniziava con la soluzione per "una sorgente lineare istantanea coincidente con l'asse  $z$  di valore  $Q$ "<sup>10</sup> (**Tabella 3**). L'analogia soluzione nel caso del carico,  $h$  (*idraulico*) è la stessa di quella ottenuta considerando  $Q$  come un volume di acqua aggiunto al pozzo per unità di lunghezza.

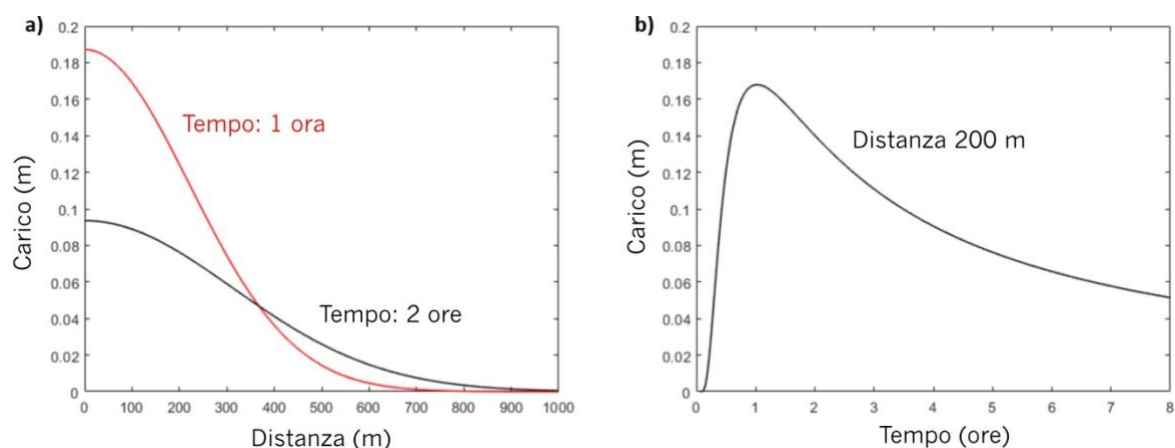
**Tabella 3** - Equazione di diffusione e soluzione di Theis per il flusso idrico sotterraneo e di calore.

	Flusso idrico sotterraneo	Flusso di calore
Diffusività ( $\kappa$ )	Diffusività idraulica $K/S_s [m^2/s]$	Diffusività termica $K/(\rho c) [m^2/s]$
Equazione fondamentale per flusso piano	$\kappa \left( \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial h}{\partial t}$	$\kappa \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial T}{\partial t}$
Soluzione per sorgente lineare	$h = \frac{Q}{4\pi S t} e^{-(x^2+y^2)/4\kappa t}$	$T = \frac{Q}{4\pi K t} e^{-(x^2+y^2)/4\kappa t}$
Definizione di sorgente lineare	$Q$ è il volume di acqua aggiunto al limite lineare dell'acquifero per unità di lunghezza	$Q$ è la quantità di calore aggiunto al limite lineare della piastra per unità di lunghezza
Tempo di propagazione approssimato lungo $x$	$t = x^2/(2\kappa)$	

La singola corrispondenza tra le colonne nelle Tabelle 1 e 3 è l'analogia matematica che Theis aveva utilizzato. Sia la temperatura che il carico idraulico sono regolati

<sup>10</sup> "Q" in **Tabella 3** è diverso da quello di Theis perchè la sua definizione di "Q" comprendeva la divisione con calore specifico per unità di volume invece che considerarlo in modo esplicito come è fatto qui. Theis, seguendo il lavoro di Carslaw, per la temperatura, utilizzò "v" al posto di "T".

dall'equazione della diffusione. Nel caso del flusso radiale bidimensionale, una trasmissività elevata significa che il fluido si sposta rapidamente. Al contrario, un valore di immagazzinamento elevato rallenta il movimento perché una maggior quantità di fluido deve essere spostata dentro e fuori dell'immagazzinamento per provocare un certo cambiamento di carico idraulico. Andando agli estremi, se per un acquifero  $S = 0$ , ogni modifica delle condizioni al contorno interne od esterne del flusso o della pressione, sarà riequilibrata rapidamente con una nuova condizione di regime permanente. La diffusività idraulica indica quanto veloce una sollecitazione si propaga attraverso l'acquifero. Tale modifica può essere provocata, ad esempio, da un'improvvisa iniezione di un volume d'acqua o massa generica in un pozzo, da un pompaggio o da una variazione delle condizioni al contorno. La diffusione mostra come un picco iniziale del carico si appiattisce lentamente e lateralmente. La Diffusione "appiattisce il gradiente" di modo che l'avvicinamento del sistema alle condizioni di regime permanente si rallenta nel tempo (**Figura 10a**). Contemporaneamente in ogni punto lontano dalla sorgente, la curva di sollecitazione si alza nel tempo, raggiunge un massimo e poi degrada (**Figura 10b**). Per il flusso lineare monodimensionale il picco arriva dopo un tempo  $t = x^2/(2\kappa)$ . Questo valore di  $t$  è il tempo caratteristico che indica l'intervallo necessario per la propagazione di una modifica repentina ai limiti, per ridursi ed espandersi fino alla distanza  $x$ . Nell'esempio in **Figura 10b**, con una diffusività di  $6,8 \text{ m}^2/\text{s}$ , il picco si verifica dopo un'ora a 200 m di distanza.



**Figura 10** - Grafici ottenuti a seguito dell'inserimento istantaneo di un corpo (o volume idrico) in un pozzo, per un acquifero con diffusività idraulica di  $6,8 \text{ m}^2/\text{s}$ . a) Profili per tempi diversi che mostrano come la diffusività idraulica riduce il gradiente. b) Ricostruzione temporale dell'andamento del carico idraulico a 200 m di distanza; i valori di picco sono raggiunti dopo circa un'ora.

## 6 Sommario

La definizione di immagazzinamento dell'acquifero e delle sue basi fisiche è stata fondamentale per comprendere origine e movimento delle acque sotterranee. Meinzer (1928) verso la fine del 20 secolo, dimostrò che la compressibilità dell'acquifero e la perdita di volume dei pori a causa della riduzione di pressione, era responsabile dell'80% dell'acqua di irrigazione nel Sud Dakota durante un periodo di 40 anni. Theis (1935) ricorse alle proprietà dell'immagazzinamento per analogia con il trasporto di calore per risolvere il problema della variazione temporale del carico idraulico in un pozzo in pompaggio. Jacob (1940) ricavò dalle basi l'equazione del flusso sotterraneo considerando la fisica dell'immagazzinamento in termini di compressibilità dell'acquifero e dell'acqua. Questa descrizione in tre parti conduce alla comprensione del flusso sotterraneo dalle condizioni di equilibrio a quelle di "non equilibrio".

## 7 Esercizi

### Esercizio 1

Singha (2008) fornisce un [esercizio interattivo](#) per introdurre il concetto di prelievo d'acqua da un acquifero artesiano. L'esercizio utilizza un contenitore con del succo come analogia con un mezzo poroso in uno spazio confinato, e mostra come una riduzione della pressione del fluido dovuta al pompaggio provoca un aumento delle tensioni efficaci, ipotizzando una pressione totale costante.

In breve, un contenitore di succo rappresenta i pori dell'acquifero confinato. Allo studente è chiesto di applicare una forza costante verso il basso dall'alto del contenitore per rappresentare il peso degli strati. Questa forza rappresenta la pressione totale. Lo studente deve porsi le seguenti domande: 1) perché il contenitore non si deforma a seguito della forza applicata; e 2) cosa succede se inseriamo una cannuccia nel contenitore. Quindi lo studente inserisce una cannuccia (il che equivale a perforare l'acquifero confinato). Sempre mantenendo la stessa pressione verticale costante, "pompa" l'acquifero succhiando il succo con la cannuccia. Lo studente noterà che il volume del succo diminuisce e gli viene chiesto di immaginare cosa stia succedendo nell'acquifero. Lo studente noterà che il contenitore non si deforma prima del pompaggio quando è applicata la pressione del sovraccarico perché la tensione efficace dell'acquifero (il contenitore) e la pressione del fluido nei pori (il succo) controbilanciano il peso degli strati superiori (la mano). A seconda del peso della copertura e lunghezza della cannuccia può succedere che il succo sprizzi fuori quando si inserisce la cannuccia, in analogia con un pozzo artesiano fluente. Se la pressione verticale è bassa, il succo risale nella cannuccia al di sopra del contenitore ma non fluisce all'esterno della cannuccia. Nell'esercizio di Singha (2008) potete trovare maggiori dettagli.

### Esercizio 2

Lo scopo dell'esperimento è di misurare l'immagazzinamento specifico  $S_s$  di un pallone che simula l'elasticità dell'acquifero. La prova è disegnata in modo da dimostrare praticamente l'incremento variabile del contenuto di fluido e l'influenza dello stato tensionale sull'immagazzinamento specifico.

In breve, il beccuccio di un palloncino di gomma è infilato all'estremità di una buretta, bloccata ad una asticella metrata attaccata ad un alto supporto. Il pallone e la buretta sono riempiti con un volume noto di acqua fino ad una altezza arbitraria sull'asticella, di modo da poter determinare il volume del pallone. In seguito si aggiunge un volume noto di acqua e supponendo che la compressibilità dell'acqua e della buretta siano piccoli, il volume di acqua deve entrare nel pallone o nella buretta. Il volume nel pallone può essere determinato da quello entrato nella buretta leggendo il corrispondente livello. Le proprietà tridimensionali di immagazzinamento del pallone vengono quindi determinate aggiungendo acqua e annotando la variazione di carico nella buretta. Questa

procedura può essere eseguita varie volte per vedere se il valore di immagazzinamento è costante. L'acqua può essere rimossa per vedere se il pallone è elastico. Infine, l'esperimento si può ripetere bloccando lateralmente il pallone in un tubo di plexiglass per ottenere l'immagazzinamento specifico monodimensionale ( $S_s$ ) del pallone. Quest'ultimo può essere confrontato con la misura ottenuta nel caso dell'espansione tridimensionale del pallone.

I dettagli dell'esercizio (compresi i diagrammi) così come le informazioni per usare l'esercizio a scopo didattico, sono disponibili su:

[Science Education Resource Center at Carleton College website](#)<sup>↗</sup>. Un file pdf dell'esperimento di laboratorio, intitolato ["Aquifer Elasticity e Specific Storage è disponibile qui"](#)<sup>↗</sup>. La teoria di supporto è discussa in questo libro ed anche nel capitolo del testo di Herb F. Wang disponibile sullo stesso sito ([textbook chapter](#)<sup>↗</sup>).

## 8 Bibliograifa

- Anderson, M.P., 2007, Introducing groundwater physics. *Physics Today*, volume 60, issue 5, pages 42-47, <https://doi.org/10.1063/1.2743123>.
- Atkinson, J., 2000, Based on part of the GeotechniCAL reference package by Professor John Atkinson, <http://environment.uwe.ac.uk/geocal/SoilMech/stresses/stresses.htm#EFFECTIVE>, Accessed on October 3, 2022.
- Banks, D., 2015, Horatio Scott Carslaw and the origins of the well function and line source heat function. *Scottish Journal of Geology*, volume 51, issue 1, pages 100-104, <http://dx.doi.org/10.1144/sjg2014-021>.
- Biot, M.A., 1941, General theory of three-dimensional consolidation. *Journal of Applied Physics*, volume 12, pages 155-164, <https://doi.org/10.1063/1.1712886>.
- Bredehoeft, J.D., C.E. Neuzil, and P.C.D. Milly, 1983, Regional Flow in the Dakota Aquifer: A Study of the Role of Confining Layers. United States Geological Survey Water-Supply Paper 2237, 45 pages, <https://pubs.usgs.gov/wsp/2237/report.pdf>, Accessed on October 3, 2022.
- Carslaw, H.S., 1921, Introduction to the Mathematical Theory of the Conduction of Heat in Solids, second edition. Macmillan and Company, London, United Kingdom, 152 pages, [https://books.google.com/books/about/Introduction\\_to\\_the\\_Mathematical\\_Theory.html?id=yco-AAAAIAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com/books/about/Introduction_to_the_Mathematical_Theory.html?id=yco-AAAAIAAJ&redir_esc=y), Accessed on October 3, 2022.
- Carslaw, H.S., and J.C. Jaeger, 1959, Conduction of Heat in Solids, second edition. Clarendon Press, Oxford, United Kingdom.
- Chamberlin, T.C., 1885, The requisite and qualifying conditions of artesian wells. United States Geological Survey Annual Report, number 5, pages 125-173.
- Darton, N.H., 1896, Preliminary report on artesian waters of a portion of the Dakotas. United States Geological Survey Annual Report, number 17, part 2, pages 609-691, [https://books.google.com/books/about/Preliminary\\_Report\\_on\\_Artesian\\_Waters\\_of.html?id=WjgAzQEACAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com/books/about/Preliminary_Report_on_Artesian_Waters_of.html?id=WjgAzQEACAAJ&redir_esc=y), Accessed on October 3, 2022.
- Darton, N.H., 1900, United States Geological Survey Field photo of Woonsocket Well.
- Darton, N.H., 1901, Geology and water resources of the southern half of the Black Hills and adjoining regions in South Dakota and Wyoming. United States Geological Survey Annual Report, number 21, part 4, pages 489-599, <https://www.journals.uchicago.edu/doi/abs/10.1086/621007>, Accessed on October 3, 2022.
- Darton, N.H., 1909, Geology and Underground Waters of South Dakota. United States Geological Survey Water-Supply Paper 227, 156 pages, <https://pubs.usgs.gov/wsp/0227/report.pdf>, Accessed on October 3, 2022.



- Fabry, M., 2016, Now You Know: Why Are There Two Dakotas? Time Magazine, United States, <https://time.com/4377423/dakota-north-south-history-two/>, Accessed on October 3, 2022.
- Freeze, R.A., 1985, Historical correspondence between C.V. Theis and C.I. Lubin, *Eos*, volume 66, number 20, May 14, 1985, page 442.
- Heath, R.H., 1983, Basic Ground-Water Hydrology. United States Geological Survey Water-Supply Paper 2220, 86 pages, <https://pubs.usgs.gov/wsp/2220/report.pdf>, Accessed on October 3, 2022.
- Jacob, C.E., 1940, On the flow of water in an elastic artesian aquifer. *Transactions of the American Geophysical Union*, volume 21, number 2, pages 574-588, <https://doi.org/10.1029/TR021i002p00574>.
- Jacob, C.E., 1941, Notes on the elasticity of the Lloyd sand on Long Island, New York. *in* *Transactions of the American Geophysical Union*, volume 22, number 3, pages 783-787.
- King, F.H., 1892, Observations and experiments on the fluctuations in the level and rate of movement of ground-water on the Wisconsin agricultural experiment station farm and at Whitewater, Wisconsin. *Bulletin of the United States Weather Bureau*, volume 5, Washington, D.C. <https://books.google.com/books?id=VuifAAAAMAAI>, Accessed on October 3, 2022.
- King, P.B., 1949, Memorial to Nelson Horatio Darton: Proceedings of the Geological Society of America. Annual Report for 1948, pages 145-170.
- Meinzer, O.E. and H.A. Hard, 1925, The Artesian Water Supply of the Dakota Sandstone in North Dakota, with Special Reference to the Edgeley Quadrangle, *in* *Contributions to the Hydrology of the United States 1923-1924*. United States Geological Survey Water-Supply Paper 520, Washington, District of Columbia, United States, pages 73-95, <https://doi.org/10.3133/wsp520E>.
- Meinzer, O.E., 1928, Compressibility and elasticity of artesian aquifers. *Economic Geology*, volume 23, number 3, pages 263-291.
- Muskat, M., 1937, *The Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media*. McGraw-Hill, New York, United States, 763 pages.
- Palciauskas, V.V. and P.A. Domenico, 1989, Fluid pressures in deforming porous rocks. *Water Resources Research*, volume 25, issue 2, pages 203-213, <https://doi.org/10.1029/WR025i002p00203>.
- Pratt, W.E. and D.W. Johnson, 1926, Local subsidence of the Goose Creek Oil Field. *Journal of Geology*, volume 34, pages 577-590.
- Ross, J. F., 2018, *The Visionary John Wesley Powell Had a Plan for Developing the West, But Nobody Listened*. Smithsonian Institution, <https://www.smithsonianmag.com/smithsonian-institution/visionary-john-wesley-powell-had-plan-developing-west-nobody-listened-180969182/>, Accessed on October 3, 2022.

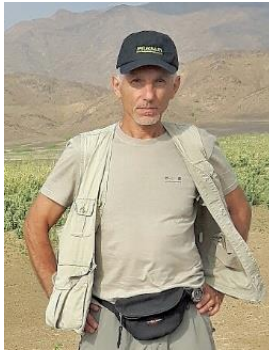
- Schureman, P., 1926, Tides in wells. *Geographical Review*, volume 16, number 3, pages 479-483.
- Singha, K., 2008, An active learning exercise for introducing ground-water extraction from confined aquifers, *Journal of Geoscience Education*, volume 56, number 2, pages 131-135,  
<https://people.mines.edu/ksingha/wp-content/uploads/sites/44/2018/12/singha2008.pdf>, Accessed on October 3, 2022.
- Stegner, W., 1954, *Beyond the Hundredth Meridian: John Wesley Powell and the Second Opening of the West*. Houghton Mifflin, 438 pages.
- Terzaghi, C., 1925, Principles of soil mechanics: VI – Elastic behavior of sand and clay. *Engineering News Record*, volume 95, pages 987-990 (reprinted in *History of Progress, 2003: Selected Papers in Geotechnical Engineering*, edited by W. Allen Marr American Society of Civil Engineers, pages 26-29),  
[https://www.google.com/books/edition/\\_vGCqACNvq7UC?gbpv=1](https://www.google.com/books/edition/_vGCqACNvq7UC?gbpv=1), Accessed on October 3, 2022.
- Theis, C.V., 1935, The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. *American Geophysical Union Transactions*, volume 16, pages 519-524,  
<https://doi.org/10.1029/TR016i002p00519>.
- Thompson, D.G., 1926, Ground-water problems on the barrier beaches of New Jersey. *Geological Society of America Bulletin*, volume 37, pages 463-474,  
<https://doi.org/10.1130/GSAB-37-463>.
- Titus, F.B., 1973, Memorial to Charles Edward Jacob; 1914-1970. *Geological Society of America*, volume 2, pages 76-78.
- Wang H.F., 1987, Charles Sumner Slichter: An engineer in mathematician's clothing, in *History of Hydrology*, volume 3, E.R. Landa and S. Ince, editors, pages 103-112.
- Wang, H.F., 2000, *An Introduction to the Linear Theory of Poroelasticity with Applications to Geomechanics and Hydrogeology*. Princeton University Press, 287 pages.
- Wang, H. F. and M.P. Anderson, 1982, *Introduction to Groundwater Modeling: Finite Difference and Finite Element Methods*. Academic Press, Appendix D3, page 222.
- Woessner, W.W. and E.P. Poeter, 2020, *Hydrologic Properties of Earth Materials and Principles of Groundwater Flow*. The Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada, 207 pages,  
<https://www.gw-project.org/books/27/hydrologic-properties-of-earth-materials-and-aquifers-and-principles-of-groundwater-flow>, Accessed on October 3, 2022.

## 9 Note sull'Autore



**Dr. Herb Wang** è Professore Emeritus di Geoscienza all'Università di Wisconsin-Madison, dal 1972. La sua ricerca sulla poroelasticità si focalizza sull'interazione tra resistenza e pressione del fluido nei pori. Il suo lavoro più recente in quest'area è stato nel contesto dei Sistemi Geotermici Potenziali (Enhanced Geothermal Systems, EGS). Un'altra ricerca recente è nel settore del Rilevamento Acustico Diffuso (Distributed Acoustic Sensing, DAS), con il quale viene utilizzato un cavo a fibre ottiche come sensore per le onde sismiche. L'attività di insegnamento del Dr. Wang ha riguardato l'idrogeologia, la modellazione idrogeologica, la tettonofisica, la meccanica delle rocce, ed i problemi di giustizia ambientale. E' stato relatore per il dottorato (PhD) di 15 studenti ed ha pubblicato libri sulla modellazione idrogeologica e la poroelasticità (vedi bibliografia sopra) ed all'incirca 100 articoli di ricerca. Nel 2003 ha ricevuto il premio Distinguished Teaching Wisconsin's Phi Beta Kappa alpha chapter e nel 2004 il premio Distinguished Faculty dal Department of Geoscience Board of Visitors.

## 10 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 in via di sviluppo 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 la società HydroNova Llc. 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 Groundwater Project per essere informati sull'uscita di nuovi testi, eventi e modalità di partecipazione a Groundwater Project. Accettando l'invito ci aiutate ad accrescere la comunità globale delle acque sotterranee. [Iscriviti](#).

