

4. IL GIACIMENTO PUNQS3

Il giacimento PunqS3 rappresenta uno dei problemi più studiati nell'ambito della validazione di metodologie di *History Matching* e valutazione dell'incertezza nelle previsioni. Questo nonostante si tratti di un giacimento inesistente.

Il giacimento PunqS3, acronimo di *Production forecasting with UNcertainty Quantification (Simplified)* [1], è stato definito nelle sue caratteristiche nell'ambito di un progetto europeo per una valutazione delle metodologie di *History Matching* e valutazione del rischio. L'obiettivo era rendere disponibile alle varie compagnie e centri di ricerca coinvolti le informazioni *hard*, geometria del *Reservoir* e proprietà petrofisiche ai pozzi, e *soft*, descrizione qualitativa del modello sedimentologico, necessarie per poter realizzare un modello dinamico coerente. Per semplificare il flusso di lavoro, la geometria è stata fissata sin dall'inizio definendo il volume del giacimento attraverso una griglia di simulazione di tipo *Corner Point*, scritta nel formato richiesto dal software di simulazione numerica ECLIPSE™. Il giacimento reale è stato realizzato sinteticamente attraverso una simulazione geostatistica delle proprietà petrofisiche, ovvero generando nella griglia di modello una distribuzione di permeabilità e porosità con caratteristiche di eterogeneità compatibili con le informazioni *hard* e *soft* condivise. In questo modo è stato possibile definire un periodo di produzione storica di 8.5 anni, seguito da un periodo di 8 anni caratterizzabile come periodo di sviluppo. Alla storia produttiva generata sinteticamente è stato aggiunto un rumore di fondo in modo da simulare reali processi di misura con relativo errore sperimentale. Ulteriore contributo alla sua popolarità, tutti i dati possono essere scaricati liberamente da un sito Internet [24].

E' quindi possibile costruire un modello di giacimento e utilizzare quindi tale modello, insieme con i dati di produzione generati nel modo sopra descritto, per condurre un processo di *History Matching* e successivamente valutare la vicinanza del modello così calibrato alla realtà confrontando il suo comportamento con quello reale per la fase di sviluppo (*Forecast*). Il problema così impostato presenta le caratteristiche tipiche di un problema di *History Matching* evidenziate nei capitoli precedenti. La calibrazione dà luogo ad un problema inverso chiaramente mal posto: come vedremo, sono infatti possibili svariati modelli, diversi fra loro e diversi dal modello reale, in grado di

riprodurre ragionevolmente bene la storia produttiva. Inoltre, questi modelli possono dare nel periodo di sviluppo diversi profili di produzione.

4.1. *Caratteristiche Generali del Giacimento*

In questa sezione presenteremo le caratteristiche generali del giacimento PunqS3, ovvero quelle proprietà, quali la geometria, le distribuzioni iniziali dei fluidi e le loro proprietà termodinamiche, le proprietà sedimentologiche, che costituiscono generalmente i dati di partenza in uno studio di giacimento. Inoltre queste proprietà rappresentano le pietre miliari di questo studio, la base della simulazione, e non vengono modificate durante il processo di *History Matching*.

Il giacimento è suddiviso in cinque livelli; le caratteristiche generali del PunqS3 sono espone nella tabella 4-1, in cui si specifica la profondità minima e massima del *Reservoir* nonché le profondità dei contatti iniziali gas – olio (GOC) e acqua – olio (WOC), in metri al di sotto del livello del mare.

Caratteristiche Del Giacimento	
<i>Profondità Minima</i>	-2340 m
<i>Profondità Massima</i>	-2419 m
<i>GOC</i>	-2355 m
<i>WOC</i>	-2395 m

Tabella 4-1. PunqS3: Caratteristiche Generali del Caso Test

La figura 4-1 presenta una sezione verticale del giacimento PunqS3, in evidenza le profondità massime e minime del giacimento.

Il campo è circondato a est e a sud da due faglie, mentre da ovest a nord sono presenti due acquiferi fortemente attivi. Le interazioni tra gli acquiferi e il giacimento vengono descritte attraverso un modello analitico [10] all'interno del simulatore ECLIPSE™. La figura 4-2 mostra la posizione delle faglie e dei contatti gas – olio e acqua – olio, nonché la posizione dei pozzi nel giacimento, localizzati attorno all'area di

contatto gas – olio. Data la presenza degli acquiferi, non sono necessari pozzi iniettori nel giacimento.

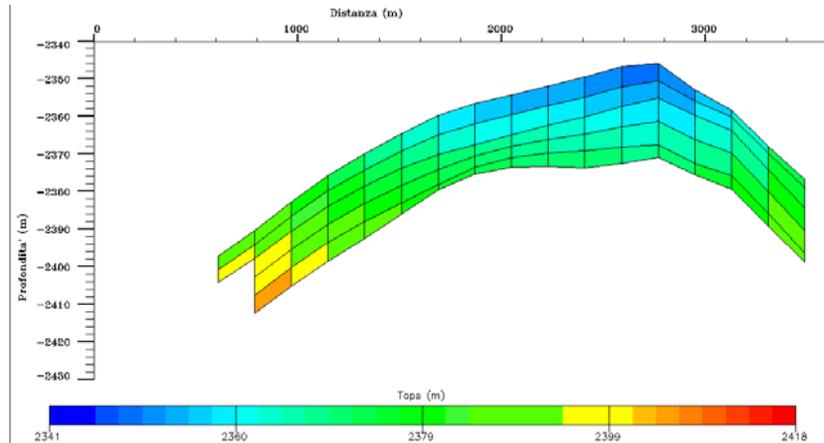


Figura 4-1. Punqs3: Livello 1 del Giacimento

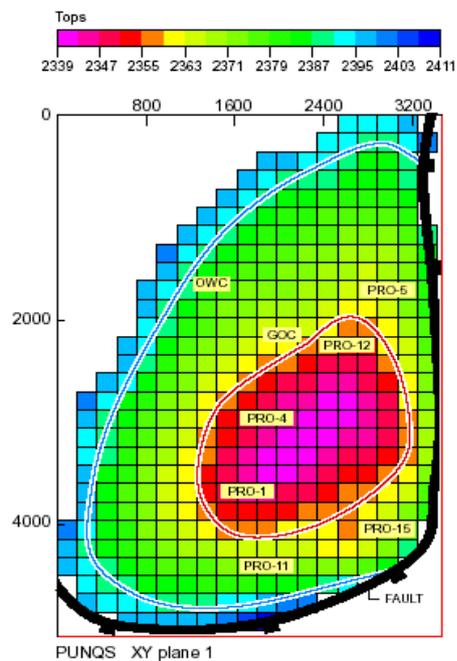


Figura 4-2. Punqs3: Posizione delle Faglie, dei Pozzi, WOC e GOC

Al modello ingegneristico sono stati poi aggiunti i dati termodinamici dei fluidi di giacimento; a questo proposito, le caratteristiche di acqua, olio e gas nel PunqS3 sono presentate nella tabella 4-2, in cui R_s rappresenta il valore iniziale del GOR (Mm^3/m^3), B il fattore di formazione volumetrico, P_B la pressione di bolla (MPa), ρ la densità (Kg/m^3) e c la compressibilità (MPa^{-1}). Le definizioni di questi parametri sono fornite nell'Appendice A.

OLIO		ACQUA		GAS	
α_{API}	23.65	B_w	1.0042	B_g	4.4×10^{-6}
ρ_o^{STC}	912	ρ_w^{STC}	1000	ρ_g^{STC}	0.8266
R_s	74	c	5.43×10^{-6}	---	---
P_B	23.4	---	---	---	---

Tabella 4-2. PunqS3: Caratteristiche Termodinamiche dei Fluidi

Il modello ingegneristico del giacimento è stato poi completato con i dati di acquifero del modello originale, e con leggi di potenza per il calcolo delle permeabilità relative di olio, gas e acqua in funzione delle saturazioni. Dai valori di questi parametri, è semplice risalire alle leggi di potenza mediante un'interpolazione dei dati assegnati, come mostrato nella figura 4-3.

Nella definizione del giacimento PunqS3 si è assunto che le pressioni capillari siano trascurabili.

Il piano di produzione prevede un primo anno di intensi test sui pozzi, seguito da tre anni di chiusura totale del giacimento prima che la produzione del campo ricominci. Il primo anno di test è suddiviso in quattro periodi di produzione di tre mesi ciascuno; durante lo sfruttamento del campo, vale a dire dal quarto anno in poi, due settimane all'anno vengono utilizzate per condurre test di *shut – in* e collezionare misure di pressione di fondo pozzo. Inizialmente, i pozzi lavorano a portata costante: raggiunto il limite inferiore di pressione di fondo pozzo, il vincolo si trasforma in estrazione a pressione costante.

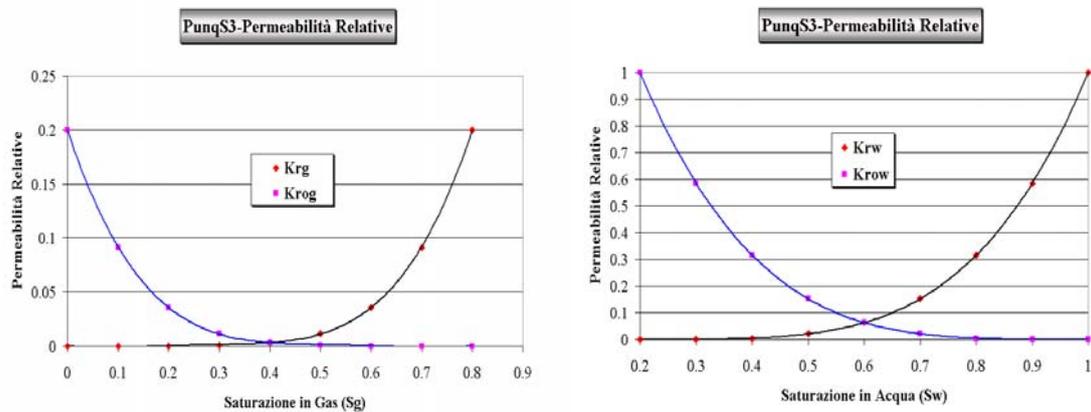


Figura 4-3. Punq3: Relazioni Permeabilità Relative – Saturazioni

4.2. Geologia del Reservoir Punq3

Da un punto di vista geologico è possibile descrivere le eterogeneità presenti in giacimento basandosi sulla conoscenza della geologia regionale, che è normalmente nota grazie alla presenza di campi adiacenti o di pozzi pilota. Nell'interpretazione geologica lo spessore dei livelli del giacimento, che è dell'ordine dei 5 metri, gioca un ruolo molto importante [4].

Il campo contiene inizialmente 6 pozzi di produzione e, data la presenza dell'acquifero, non sono presenti pozzi iniettori.

Per quanto riguarda la descrizioni del giacimento, si può dire che i livelli 1, 3 e 5 consistono di canali fluviali racchiusi da arenaria; il livello 2 è costituito da argilla marina o lagunare mentre il livello 4 rappresenta un delta lagunare racchiuso da una strato di argilla. Inoltre:

- ✓ I livelli 1, 3 e 5 contengono vene lineari di sabbia di porosità elevata ($\phi \geq 20\%$), di profondità variabile, racchiuse da matrici di scisto (argilla friabile) di porosità inferiore ($\phi \leq 5\%$);

- ✓ Nel livello 2 è presente dello scisto lagunare o marino, che costituisce un mezzo a bassa porosità ($\phi \leq 5\%$) ma che contiene zone irregolari a porosità superiore ($\phi \geq 5\%$);
- ✓ Il livello 4 è costituito da argilla lagunare, di porosità media ($\phi \cong 15\%$) e presenta un lobo esterno racchiuso da una matrice a bassa porosità ($\phi \leq 5\%$). Solitamente questo lobo viene rappresentato a forma di ellisse.

4.3. Discretizzazione del Giacimento

La griglia di discretizzazione tridimensionale del giacimento è presentata nella figura 4-4, mentre la figura 4-5 è la proiezione della griglia in due dimensioni nel piano. In evidenza in entrambe le figure la posizione dei pozzi, indicati come **PRO-X**, e la saturazione in olio all'inizio del periodo di *History Matching*.

Come si nota, il giacimento è costituito da 5 livelli verticali, ognuno dei quali è discretizzato secondo una griglia *Corner Point* di 19×28 celle. Dunque, il *Reservoir* viene simulato utilizzando 2660 celle, 1761 delle quali sono attive.

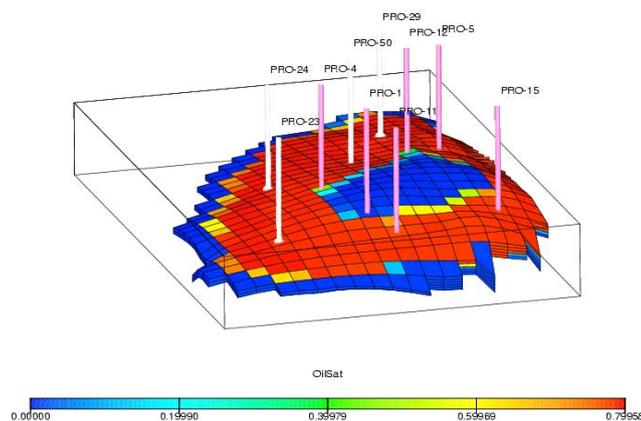


Figura 4-4. Punqs3: Griglia Tridimensionale

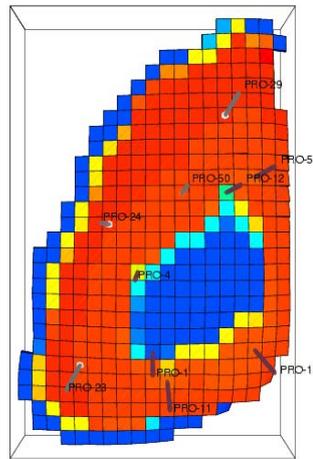


Figura 4-5. Punqs3: Vista dall'alto della Griglia di Discretizzazione

4.3.1. PROPRIETÀ PETROFISICHE DEL GIACIMENTO REALE

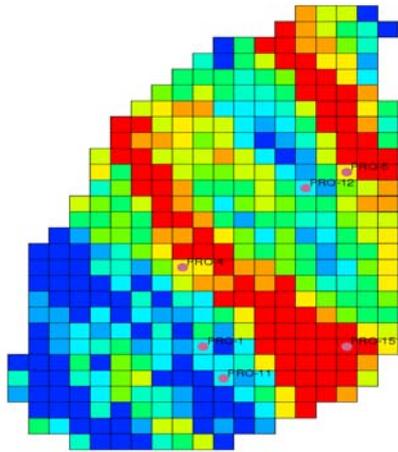
Le distribuzioni di permeabilità e di porosità sono state generate utilizzando un modello geostatistico basato sulle distribuzioni aleatorie di tipo gaussiano (*Gaussian Random Fields*): questi due parametri sono stati poi correlati statisticamente tra di loro [9]. In seguito a questa correlazione, il modello originale fornisce i valori permeabilità e porosità che variano negli intervalli specificati nella tabella 4-3.

Livello	Porosità	Permeabilità Orizzontale (mD)	Permeabilità Verticale (mD)
1	0.01 – 0.30	0.1 – 1000	0.1 – 500
2	0.01 – 0.17	0.1 – 200	0.1 – 50
3	0.01 – 0.30	0.1 – 1000	0.1 – 500
4	0.01 – 0.22	0.1 – 500	0.1 – 100
5	0.01 – 0.30	0.1 – 1000	0.1 – 500

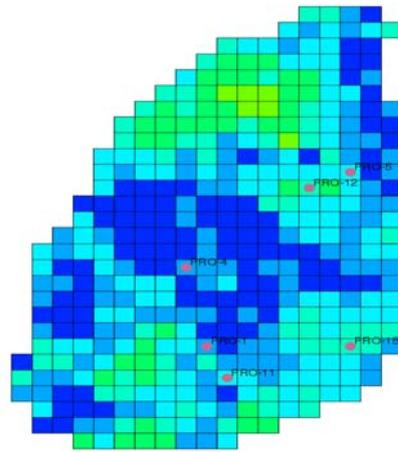
Tabella 4-3. Punqs3: Intervalli di Porosità e Permeabilità

I parametri geostatistici per la generazione delle distribuzioni, come medie, deviazioni standard e variogrammi, sono stati scelti in modo da essere il più possibili coerenti con il modello geologico originale. Le relative distribuzioni di porosità e di permeabilità nel modello reale sono mostrate rispettivamente nelle figure 4-6 e 4-7, per tutti e cinque i livelli del giacimento.

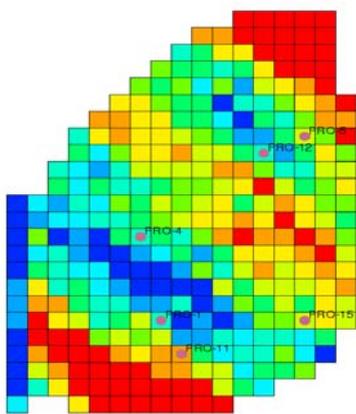
(a)



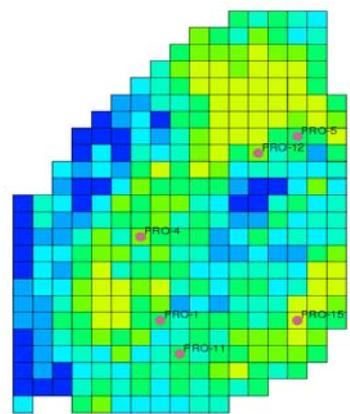
(b)



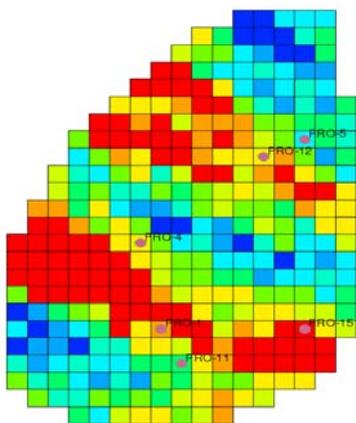
(c)



(d)



(e)



(f)

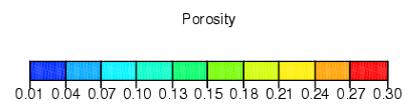
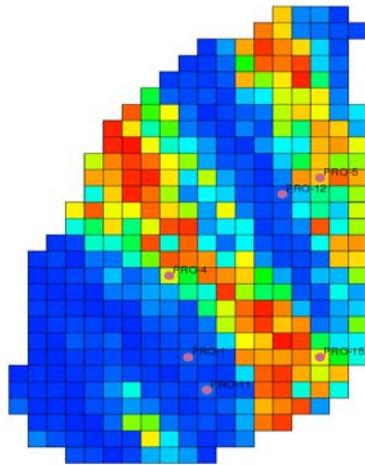
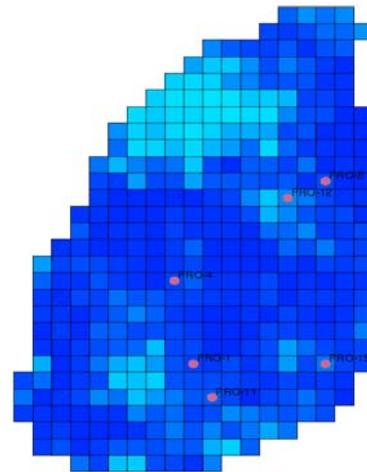


Figura 4-6. Punqs3: Distribuzione di Porosità nei Livelli 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d), 5 (e). Barra di Distribuzione (f)

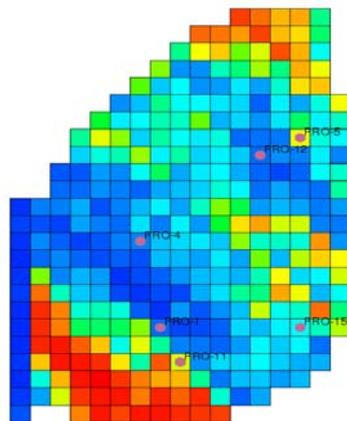
(a)



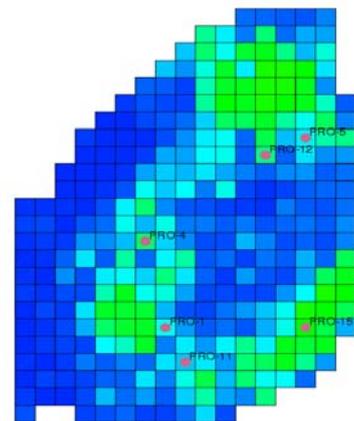
(b)



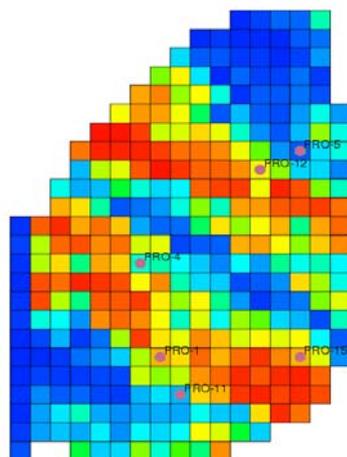
(c)



(d)



(e)



(f)

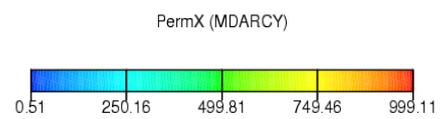


Figura 4-7. PunqS3: Distribuzione di Permeabilità nei Livelli 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d), 5 (e). Barra di Distribuzione (f)

4.3.2. PROPRIETÀ PETROFISICHE DEL MODELLO KRIGED

Dai dati di porosità/permeabilità disponibili, le correlazioni stocastiche che si possono facilmente ottenere per interpolazione lineare forniscono le seguenti relazioni deterministiche tra permeabilità orizzontale – porosità e permeabilità orizzontale – permeabilità verticale:

$$\log(k_x) = 0.77 + 9.03\phi \quad [4.1]$$

$$k_z = 3.124 + 0.306k_x \quad [4.2]$$

Un semplice esempio del tipo di correlazione ottenibile e della distribuzione dei dati sperimentali di porosità – permeabilità orizzontale è presentato nel grafico semi logaritmico della figura 4-8. Il coefficiente di correlazione per questi due parametri è risultato di circa 0.9.

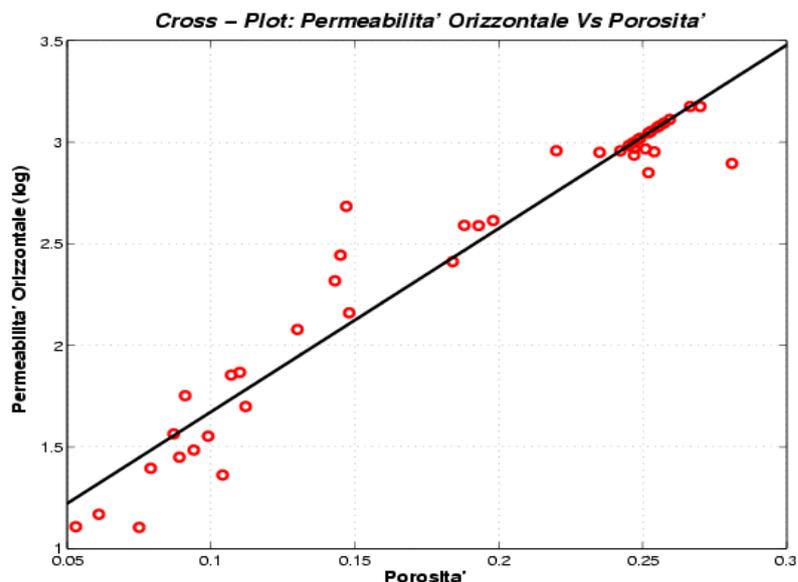
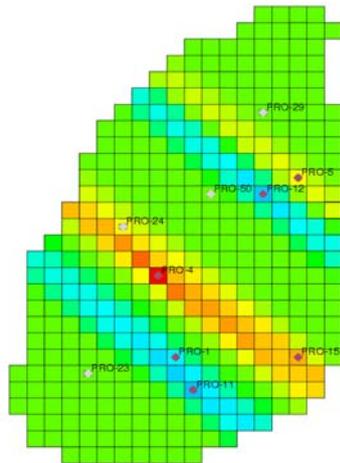


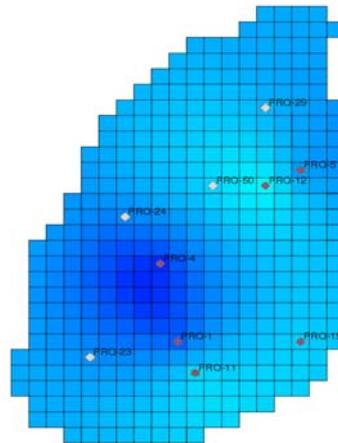
Figura 4-8. PunqS3: Correlazione Porosità – Permeabilità Orizzontale

Le figure 4-9 e 4-10 presentano le proprietà di permeabilità e porosità nella rappresentazione ingegneristica del giacimento, in seguito ad interpolazione: per generare queste distribuzioni di permeabilità e porosità, a differenza del caso reale, sono stati utilizzati unicamente i dati relativi ai pozzi. Unitamente ai variogrammi generati con la tecnica *Gaussian Random Fields*, i dati sono stati interpolati grazie ad una particolare strategia detta *Kriging* [13]. Un semplice confronto tra le figure 4-7 – 4-9 e 4-8 – 4-10 rispettivamente, mostra l'incertezza che caratterizza queste proprietà man mano che ci si allontana dalla regione dei pozzi. Grazie a ciò, il caso test PunqS3 risulta molto simile ad un giacimento reale, in cui il valore di molti parametri fondamentali è ignoto o quantomeno stimato approssimativamente nelle zone più lontane dai pozzi produttori o iniettori.

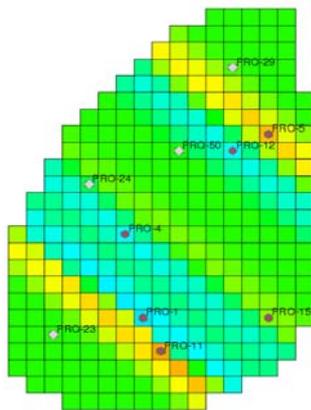
(a)



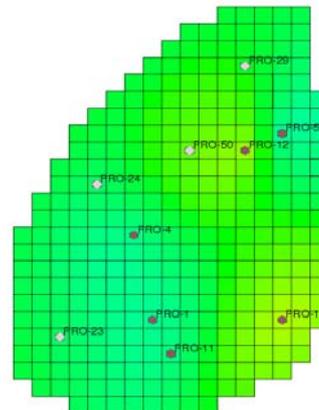
(b)



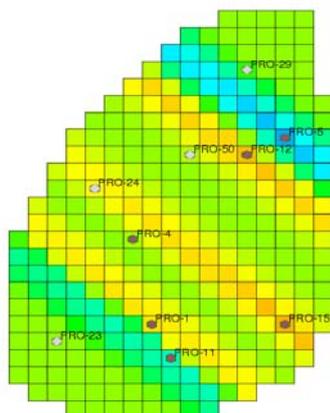
(c)



(d)



(e)



(f)

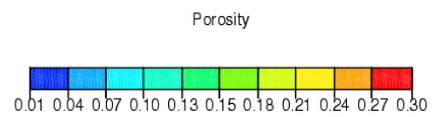
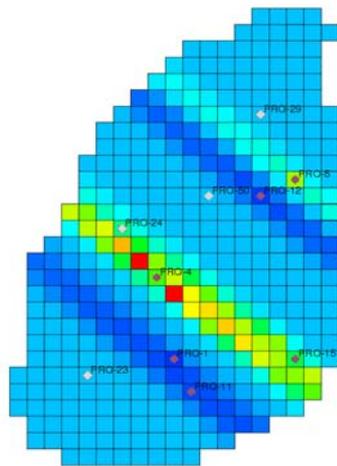
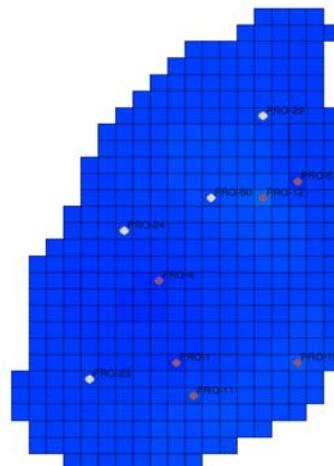


Figura 4-9. Punqs3: Distribuzione di Porosità nei Livelli 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d), 5 (e). Barra di Distribuzione (f)

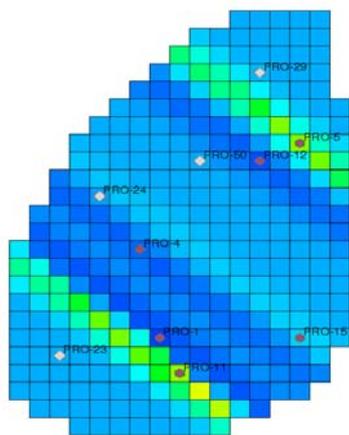
(a)



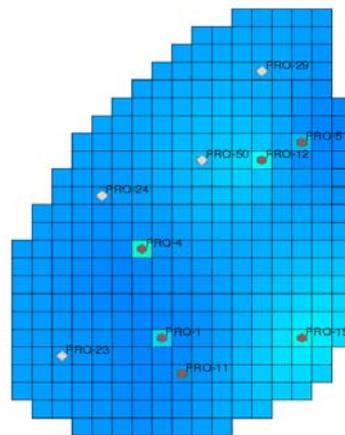
(b)



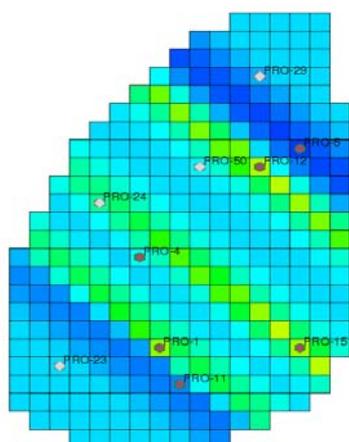
(c)



(d)



(e)



(f)

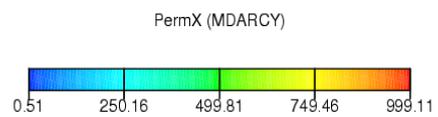


Figura 4-10. Punqs3: Distribuzione di Permeabilità nei Livelli 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d), 5 (e). Barra di Distribuzione (f)

4.3.3. CARATTERIZZAZIONE DEI DATI STORICI AI POZZI

Ai dati di produzione, come GOR, WCT e WBHP, è stato aggiunto del rumore di fondo di tipo gaussiano correlato nel tempo, per simulare più realisticamente gli errori sistematici che sempre occorrono durante qualunque tipo di misura sperimentale. Il livello di rumore nei dati statici di pressione di fondo pozzo è tre volte inferiore rispetto a quello nei dati di pressione dinamica. Nel caso del GOR, il livello di rumore è posto al 10% prima dell'arrivo del gas e al 25% in seguito. In modo simile, nel WCT il livello di rumore varia tra il 2% prima dell'arrivo dell'acqua e al 5% in seguito.

Il risultato è un data set con rumore di fondo uniformemente distribuito, il che può essere ragionevolmente considerato come una buona approssimazione di un caso reale.

Utilizzando dunque il modello ingegneristico descritto, la storia sintetica del giacimento viene creata dal simulatore ECLIPSE™. La figura 4-11 propone l'andamento della produzione del campo negli anni di *History*.

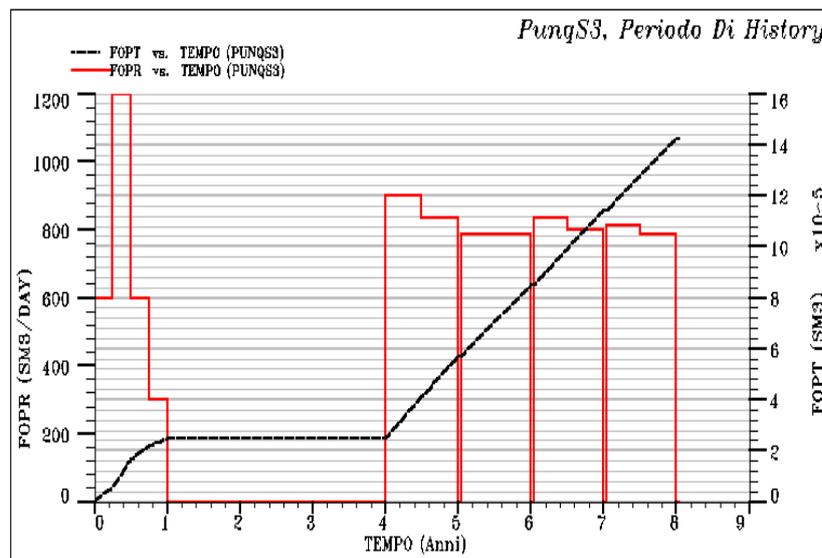


Figura 4-11. Punqs3: Produzione Giornaliera e Globale nel Periodo di History

Come già specificato, il periodo totale di simulazione è di 16.5 anni, al termine del quale la produzione globale di olio è di $3.87 \cdot 10^6 m^3$.

4.4. Parametri di Match

In ogni processo di *History Matching*, uno dei passaggi obbligati, nonché più importanti, è la scelta dei parametri di calibrazione: dato l'enorme numero di celle in cui un giacimento è discretizzato, il numero di variabili possibili nella simulazione è virtualmente infinito.

Nel caso test PunqS3, i parametri utilizzati per l'*History Matching* sono moltiplicatori di porosità e permeabilità: i moltiplicatori derivano semplicemente dal processo di zonazione, descritto nei paragrafi precedenti, in cui per ogni zona del giacimento (e quindi per un grande numero di celle) viene definito un solo moltiplicatore. Il valore del parametro in una determinata cella di quella zona è poi calcolato come prodotto tra il moltiplicatore e il valore iniziale del parametro nella cella in questione.

Formulando matematicamente il concetto, un moltiplicatore è definito da:

$$P_V = \frac{\phi}{\phi_{iniziale}} \quad [4.3]$$

Dove ϕ rappresenta la porosità, e dunque P_V è il moltiplicatore di porosità. Analoga è la definizione del moltiplicatore di permeabilità; tuttavia, a causa di alcuni problemi di calcolo all'interno del simulatore ECLIPSE™, i gradienti dei parametri osservati rispetto al moltiplicatore di permeabilità assumono valori errati. Questo errore nel software di simulazione può essere facilmente aggirato adottando, in loco dei moltiplicatori di permeabilità, quelli di trasmissibilità (T_{xy} e T_z lungo le direzioni degli assi), la cui definizione è riportata in Appendice A.

Per il caso PunqS3, dunque, i parametri di *History Matching* che verranno utilizzati sono i moltiplicatori di porosità e di trasmissibilità. Il loro numero, e quindi la dimensionalità del problema matematico da ottimizzare, è funzione della zonazione tipica di ogni caso, come risulterà evidente nella sezione successiva.