

UNIVERSITÀ  
DI PAVIA

Dipartimento di Scienze della Terra e dell'Ambiente

Direttore: Prof. S. Seno

Corso di Laurea Magistrale in

Geoscienze per lo Sviluppo Sostenibile

# Modellazione di reservoir geotermici di bassa entalpia in successioni silicoclastiche neogeniche del Bacino Padano, area est Milano

Relatore:

Prof. Luca Colombera

Correlatore:

Dott. Georgios Pantopoulos

Tesi di Laurea Magistrale

in Geoscienze per lo Sviluppo Sostenibile

di Valentina Bagnoli

Matricola: 545157

Anno Accademico 2024/2025



# INDICE

CAPITOLO 1 – INTRODUZIONE.....	5
1.1 Scopo del lavoro.....	5
CAPITOLO 2 – INQUADRAMENTO DELL’AREA DI STUDIO .....	9
2.1 Inquadramento geologico-strutturale .....	9
2.2 Inquadramento stratigrafico .....	12
CAPITOLO 3 – DATI DI SOTTOSUOLO .....	17
3.1 Organizzazione dei dati del sottosuolo .....	17
3.2 Elaborazione dei dati del sottosuolo .....	28
CAPITOLO 4 – MODELLAZIONE STATICA DI RESERVOIR .....	33
4.1 SGSIM- Sequential Gaussian Simulation.....	34
4.2 DSSIM - Direct Sequential Simulation.....	35
4.3 SISIM – Sequential Indicator Simulation .....	36
4.4.1 Simulazioni DSSIM di superfici stratigrafiche: PL1 e base della SGF .....	37
4.4.2 Modellazione degli spessori della SGF e stime dei volumi .....	50
4.4.3 Modellazione delle facies.....	62
CAPITOLO 5 – APPLICAZIONE: QUANTIFICAZIONE DELLA RISORSA GEOTERMICA ..	83
CAPITOLO 6 – CONCLUSIONI.....	88
Bibliografia .....	96



# CAPITOLO 1 – INTRODUZIONE

## 1.1 Scopo del lavoro

Negli ultimi decenni è aumentata la richiesta per le energie rinnovabili ed in questo ambito è cresciuto l'interesse per lo sfruttamento dell'energia geotermica, in particolare per quanto riguarda la risorsa geotermica a bassa entalpia. Tuttavia, in aree caratterizzate da un potenziale geotermico moderato, come la Pianura Padana (figura 1), l'effettivo potenziale di sfruttamento di tali risorse risulta ancora poco indagato. La valutazione del potenziale geotermico di un'area richiede una dettagliata caratterizzazione geologica del sottosuolo, con particolare riferimento alla geometria, alla distribuzione e alle proprietà petrofisiche delle unità sedimentarie potenzialmente idonee a costituire serbatoi geotermici.

Il Bacino Padano è caratterizzato da una potente serie neogenico-quadernaria deposta in un contesto di avanfossa, all'interno della quale si sviluppano corpi sedimentari con proprietà petrofisiche potenzialmente idonee allo sfruttamento geotermico (ISPRA, 2015). In particolare, le unità clastiche grossolane, quali ghiaie e sabbie, rivestono un ruolo importante in quanto possono costituire serbatoi profondi caratterizzati da buona porosità e permeabilità, spesso associati a coperture argillose a bassa permeabilità che ne favoriscono il confinamento idraulico (Colucci et al., 2016).

Tra queste unità, la Formazione delle Ghiaie di Sergnano (SGF), di età tardo miocenica-pliocenica inferiore, rappresenta uno dei principali target nel sottosuolo lombardo. Essa è costituita prevalentemente da conglomerati e ghiaie con intercalazioni sabbiose e livelli fini, ed è diffusa nel settore centro-settentrionale del bacino (Rizzini e Dondi, 1978). La sua importanza geotermica è legata alla combinazione di ampia estensione areale, proprietà idrauliche favorevoli e profondità tali da intercettare intervalli di temperatura compatibili con utilizzi a bassa entalpia (Pantopoulos et al., 2025; figura 1). La formazione presenta una marcata eterogeneità con spessori variabili e geometrie complesse, legate alle dinamiche deposizionali ed erosionali attive tra il Messiniano e lo Zancleano; i corpi deposizionali presentano una distribuzione spaziale che riflette l'evoluzione dei sistemi fluviali e la formazione delle superfici erosionali alla loro base (Rizzini e Dondi, 1978).

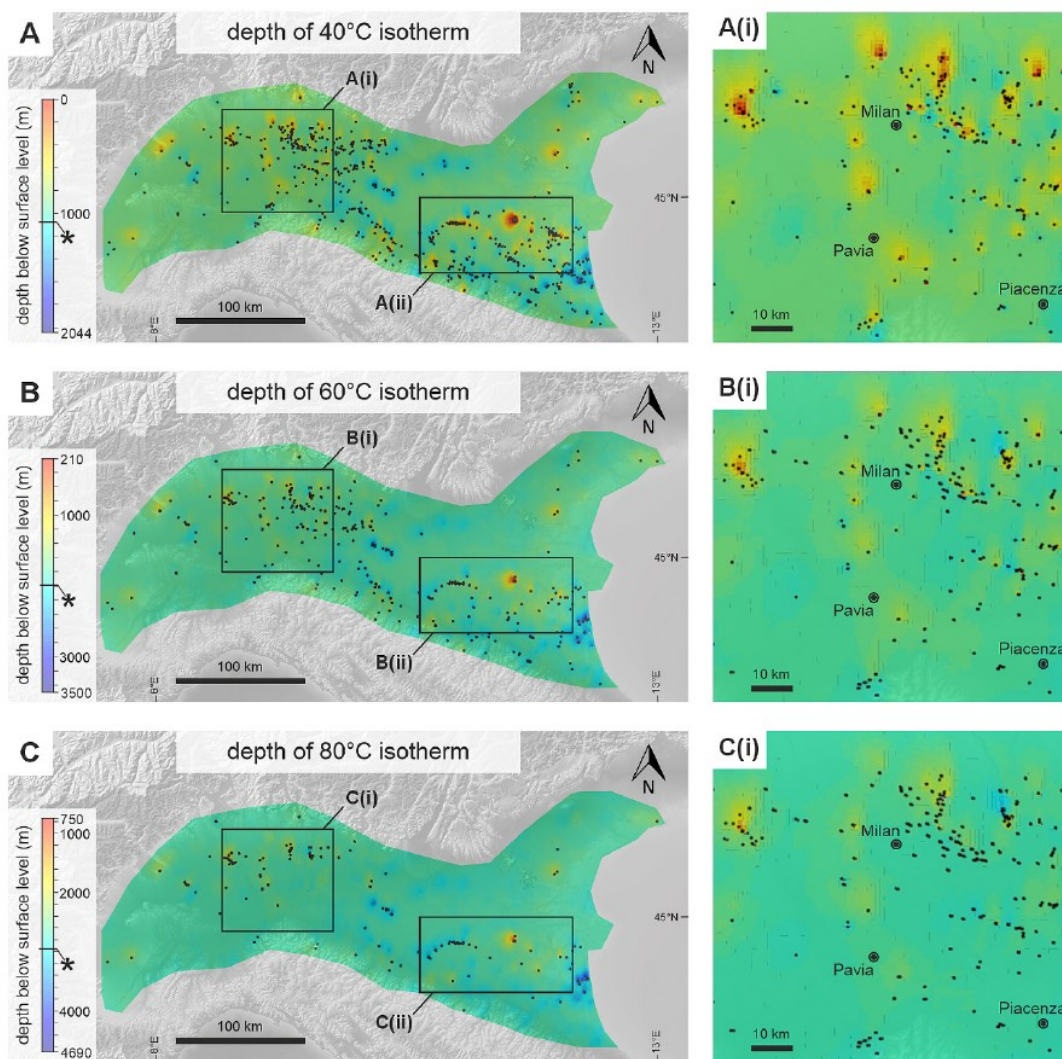
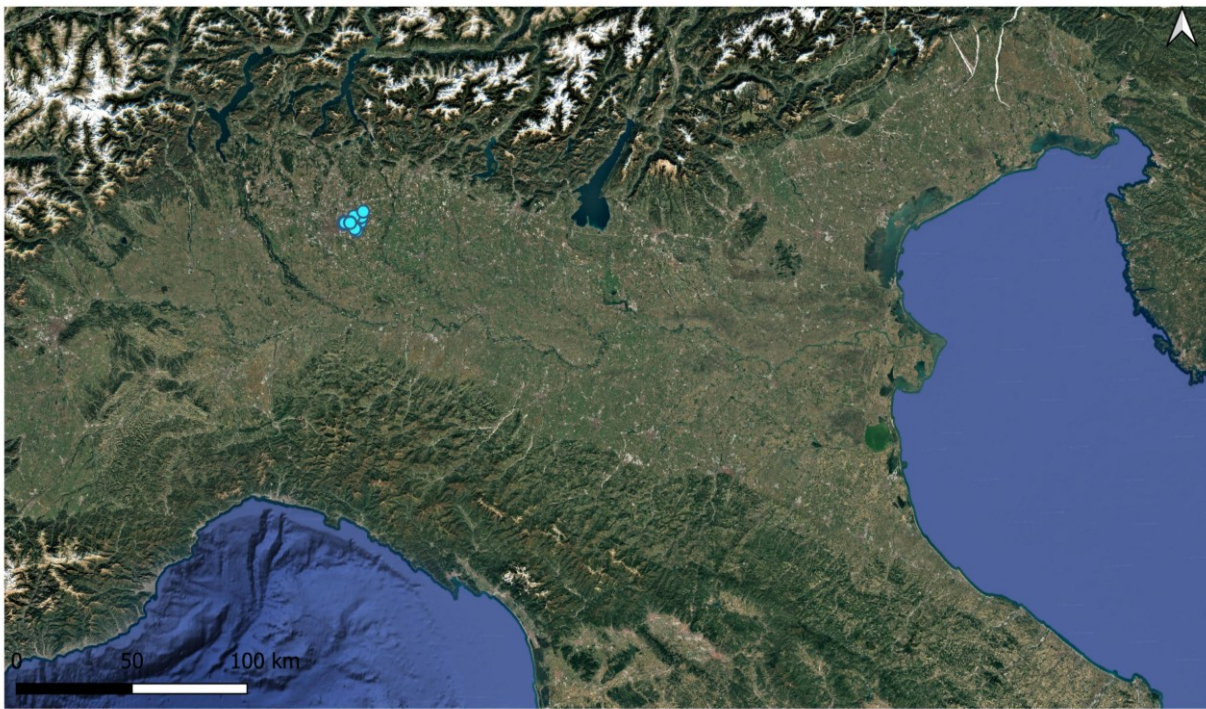


Figura 1: Mappe di profondità delle isoterme a 40°C (A), 60°C (B) e 80°C (C). Barrera Acosta et al. (2024).

Nel settore orientale della Lombardia, e in particolare nell'area a est di Milano, la SGF assume un interesse specifico per la geotermia in quanto si colloca a profondità tali da raggiungere condizioni termiche potenzialmente sfruttabili.

Il presente lavoro ha lo scopo di analizzare e modellare la successione clastica-neogenica (Messiniano-Zancleano) del sottosuolo, con particolare riferimento alla Formazione delle Ghiaie di Sergnano (SGF), nell'area orientale della provincia di Milano (Cernusco sul Naviglio, Lambrate, Segrate e altri comuni; figura 2), al fine di valutarne l'idoneità come potenziali serbatoi geotermici per applicazioni di riscaldamento.



**A**



**B**

Figura 2: Inquadramento geografico dell'area di studio tramite QGIS, i punti in azzurro rappresentano i 15 pozzi analizzati. A) Localizzazione nell'area di studio nella Pianura Padana; B) Dettaglio dell'area di studio nell'area urbana di Milano.



# CAPITOLO 2 – INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO

## 2.1 Inquadramento geologico-strutturale

La Pianura Padana si imposta sul principale bacino sedimentario dell'Italia settentrionale – il Bacino Padano – ed è caratterizzata da un'estesa pianura alluvionale che copre una superficie superiore a 40.000 km<sup>2</sup>. L'area è delimitata dalle Alpi lungo il margine settentrionale e occidentale, dall'Appennino Settentrionale lungo il margine meridionale e dal Mare Adriatico a est. L'attuale configurazione della pianura è il risultato dell'evoluzione tettonica e sedimentaria del Bacino Padano, una vasta depressione tettonico-sedimentaria progressivamente riempita da depositi marini e continentali durante il Cenozoico.

Dal punto di vista strutturale e geodinamico, il Bacino Padano si colloca all'interno di un sistema orogenico complesso, compreso tra due distinti sistemi di pieghe e sovrascorrimenti (fold and thrust belts) associati rispettivamente alle Alpi Meridionali e all'Appennino Settentrionale, i quali condividono un comune avampaese costituito da una porzione della microplacca Adria (Amadori et al., 2018; Carminati e Doglioni, 2012; Dercourt et al., 1986). Il Bacino Padano rappresenta un bacino di avampaese, originatosi in risposta al carico crostale esercitato da entrambi questi sistemi orogenici (figura 3).

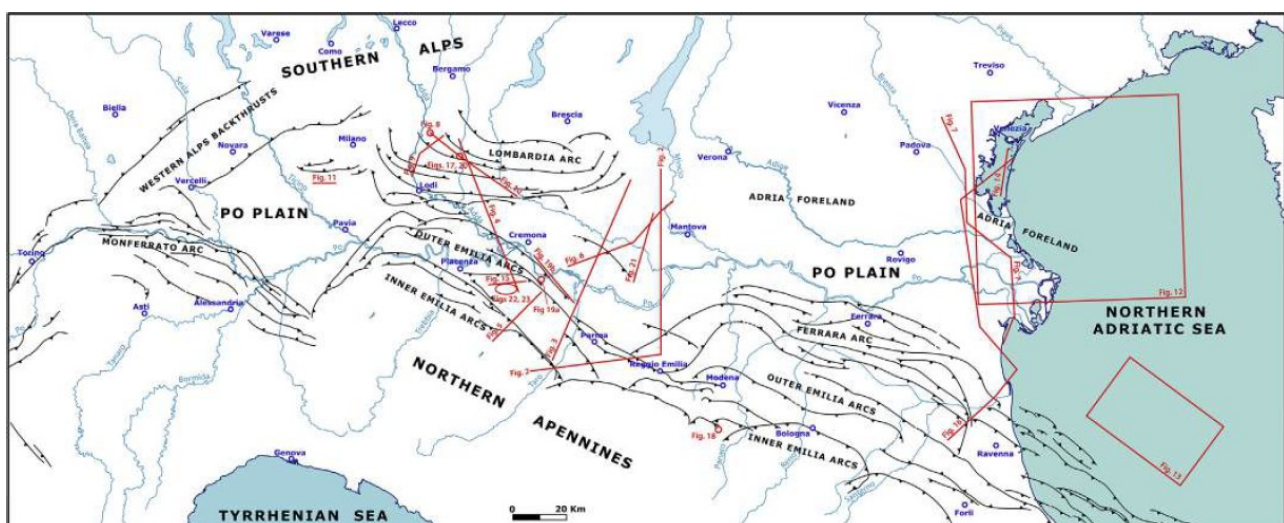


Figura 3: Carta di inquadramento del Bacino Padano-Adriatico tra Alpi e Appennini, con indicazioni dei principali elementi strutturali Messiniani-Pliocenici (Rossi et al., 2015).

L'avanzamento dei fronti tettonici alpini e appenninici è avvenuto progressivamente verso l'avampaese, su un substrato caratterizzato dalla presenza di strutture preesistenti generate durante la tettonica estensionale mesozoica. Tali lineamenti strutturali presentano una direzione prevalente NNW-SSE e risultano generalmente orientati con elevate obliquità rispetto alla direzione di avanzamento delle strutture compressive (Fantoni et al., 2004; Livani et al., 2018).

Le due catene hanno inoltre seguito evoluzioni tettoniche differenti nel tempo. In particolare, il Bacino Padano è stato interessato da eventi compressivi di origine alpina a partire dal medio Eocene, mentre la deformazione appenninica si è sviluppata successivamente a partire dal Miocene inferiore (Carminati e Doglioni, 2012; Maesano et al., 2015; Livani et al., 2018). Queste fasi deformative sono responsabili della configurazione attuale del bacino.

Nelle porzioni settentrionali e centrali della Pianura Padana sono presenti i fronti di sovrascorrimento sepolti delle Alpi Meridionali (SA), caratterizzati da vergenza verso sud e localmente affioranti lungo la fascia pedemontana alpina.

L'evoluzione dell'avampaese tra il Messiniano e il Quaternario è stata caratterizzata dalla progressiva disattivazione del settore occidentale delle Alpi Meridionali e dallo spostamento del settore di massima flessione verso la catena appenninica, che ha portato alla formazione di depocentri di avanfossa di notevole spessore fino ai 7000-8000 m (figura 4). I depocentri neoalpini settentrionali e quelli appenninici, alimentati dall'erosione delle catene montuose, sono stati progressivamente colmati da grandi volumi di sedimenti marini e continentali (Fantoni e Franciosi, 2010). Il risultato è una successione clastica che poggia su carbonati mesozoici e culmina verso l'alto con depositi alluvionali e fluviali di età quaternaria. La geometria e la distribuzione delle diverse litologie riflettono le variazioni tettoniche ed eustatiche che hanno caratterizzato la storia del bacino (Pantopoulos et al., 2025).

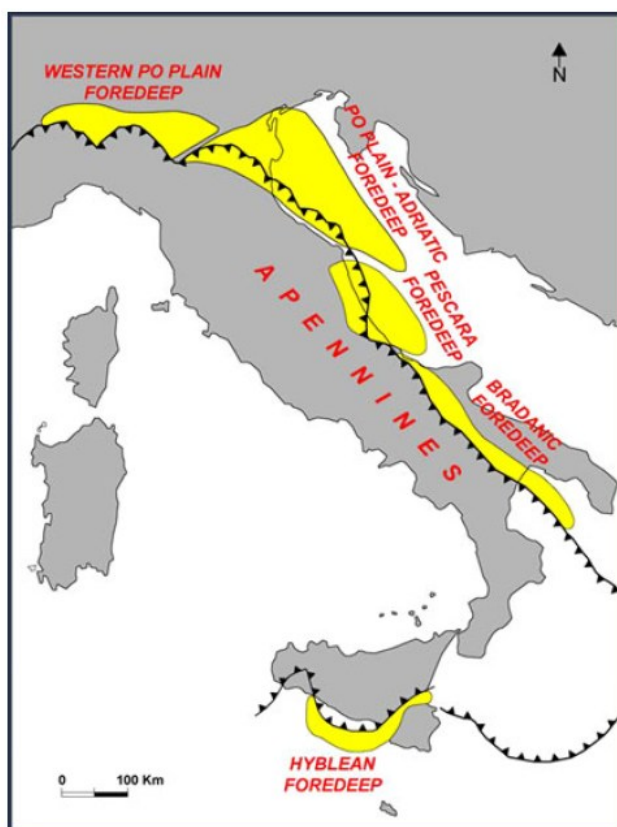


Figura 4: Distribuzione dei depocentri dell'avanfossa Appenninica attuale (MAF) e localizzazione dell'Avanfossa Padano-Adriatica (PPAF) nel tardo Pliocene-Pleistocene (Ghielmi et al., 2010).

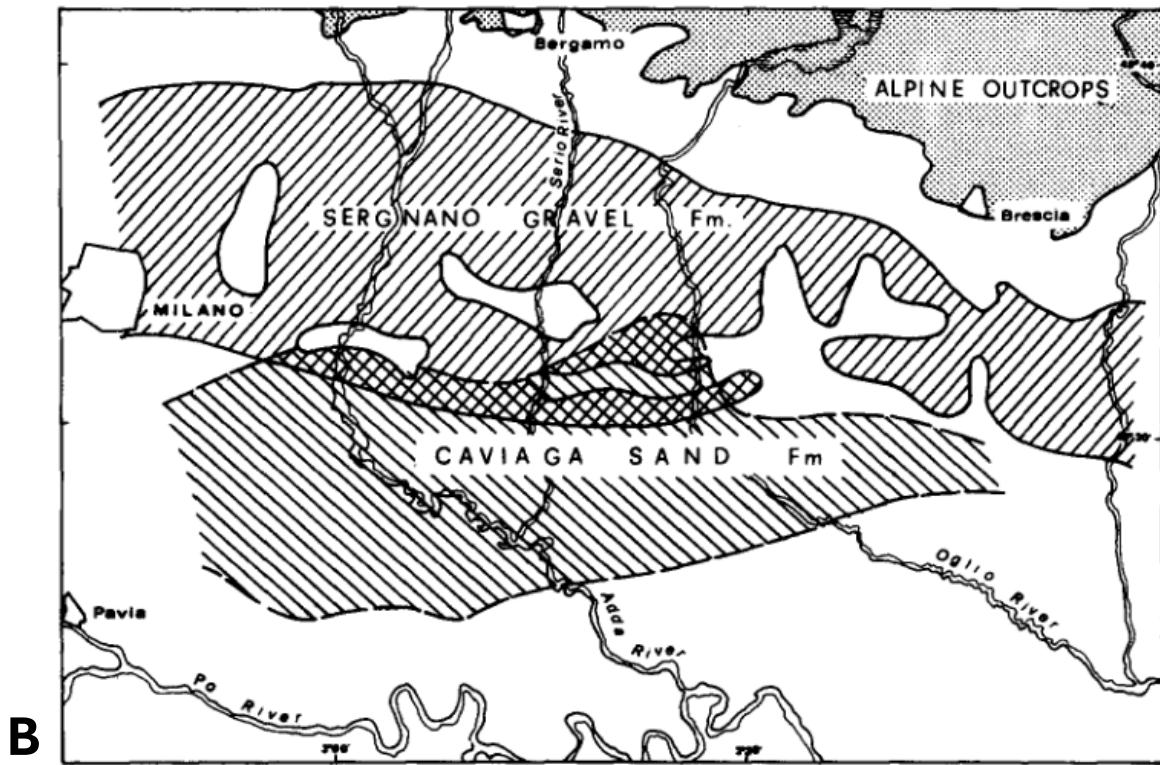
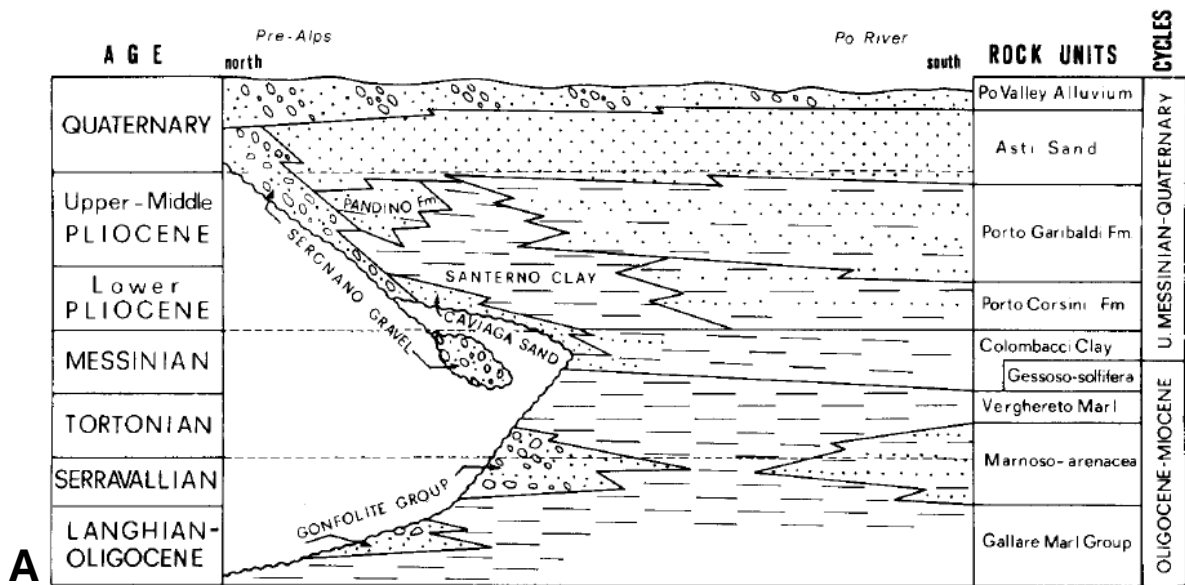
Il Messiniano ha rappresentato un momento di particolare discontinuità nell'evoluzione del bacino: il marcato abbassamento eustatico associato alla nota crisi di salinità ha innescato un'intensa fase erosionale con la formazione di valli incise, superfici di discontinuità e di un paleo paesaggio strutturato in alti e bassi topografici (Rizzini e Dondi, 1978). Tali superfici hanno in seguito controllato sia la direzione del trasporto sedimentario sia la localizzazione di massimo accumulo. Con la risalita del livello marino nel Pliocene inferiore, le depressioni erosionali sono state progressivamente colmate da sedimenti grossolani a carattere trasgressivo, prevalentemente sabbie e ghiaie. La distribuzione e la geometria di questi depositi risultano fortemente controllate dalla paleomorfologia del substrato miocenico: in corrispondenza degli alti morfologici, dove lo spazio di accomodamento era limitato, i depositi grossolani, noti come Ghiaie di Sergnano, si presentano con geometria più regolare e spessore meglio definito; si trovano direttamente al di sotto della superficie PL1, che ne segna il tetto, e sono confinati alla base da un unconformity messiniana che ritaglia le Marne di Gallare di età miocenica, che fungono da substrato impermeabile. Nei bassi morfologici, al contrario, i depositi ghiaiosi raggiungono spessori maggiori, ma presentano una geometria più complessa e una maggiore eterogeneità interna, rendendo più difficile la caratterizzazione del corpo sedimentario. È proprio questa differenza nella configurazione stratigrafica, descritta in dettaglio nel capitolo seguente, a rendere gli alti morfologici il contesto geologico peculiare per lo sfruttamento

geotermico: una stima robusta della risorsa termica disponibile richiede una caratterizzazione dettagliata dell'architettura ed eterogeneità interna del possibile reservoir (Pantopoulos et al., 2025).

## 2.2 Inquadramento stratigrafico

La successione stratigrafica del sottosuolo lombardo è organizzata in due cicli sedimentari principali. Il primo, di età oligocenico-miocenica, è dominato da sedimenti clastici grossolani prodotti dal sollevamento ed erosione della catena alpina, raggruppati nel Gruppo della Gonfolite nella fascia settentrionale, e da facies progressivamente più fini verso il centro del bacino, rappresentate dal Gruppo delle Marne di Gallare e dalla Formazione Marnoso-Arenacea. Il secondo ciclo, compreso tra il Messiniano superiore e il Quaternario, si apre con una profonda discontinuità stratigrafica legata alla crisi di salinità messiniana e culmina con la progradazione alluvionale quaternaria (Rizzini e Dondi, 1978).

Il limite tra i due cicli è segnato da una delle discontinuità stratigrafiche più significative dell'intera successione padana: la superficie erosionale miocenica, su cui poggiano i depositi basali del secondo ciclo. In questo contesto si inserisce la Formazione delle Ghiaie di Sergnano (SGF), elemento stratigrafico di primario interesse sia per la ricostruzione paleogeografica del bacino sia per le sue implicazioni applicative in ambito geotermico. La formazione è prevalentemente costituita da ghiaie con matrice sabbiosa, talvolta cementate. Sono presenti intercalazioni di livelli argillosi e ricchi di frammenti carboniosi (figura 5). La SGF può essere articolata in due elementi deposizionali distinti: successioni di regressione forzata posizionate sugli alti strutturali del paleorilievo miocenico e depositi di riempimento delle paleovalli, comprendenti facies fluviali e corpi sabbiosi paralicci trasgressivi (Rizzini e Dondi, 1978). Questa duplice natura deposizionale si riflette in una marcata eterogeneità interna con rapide variazioni di facies sia in senso verticale sia laterale, che influenzano direttamente la distribuzione della permeabilità e la connettività idraulica del sistema.



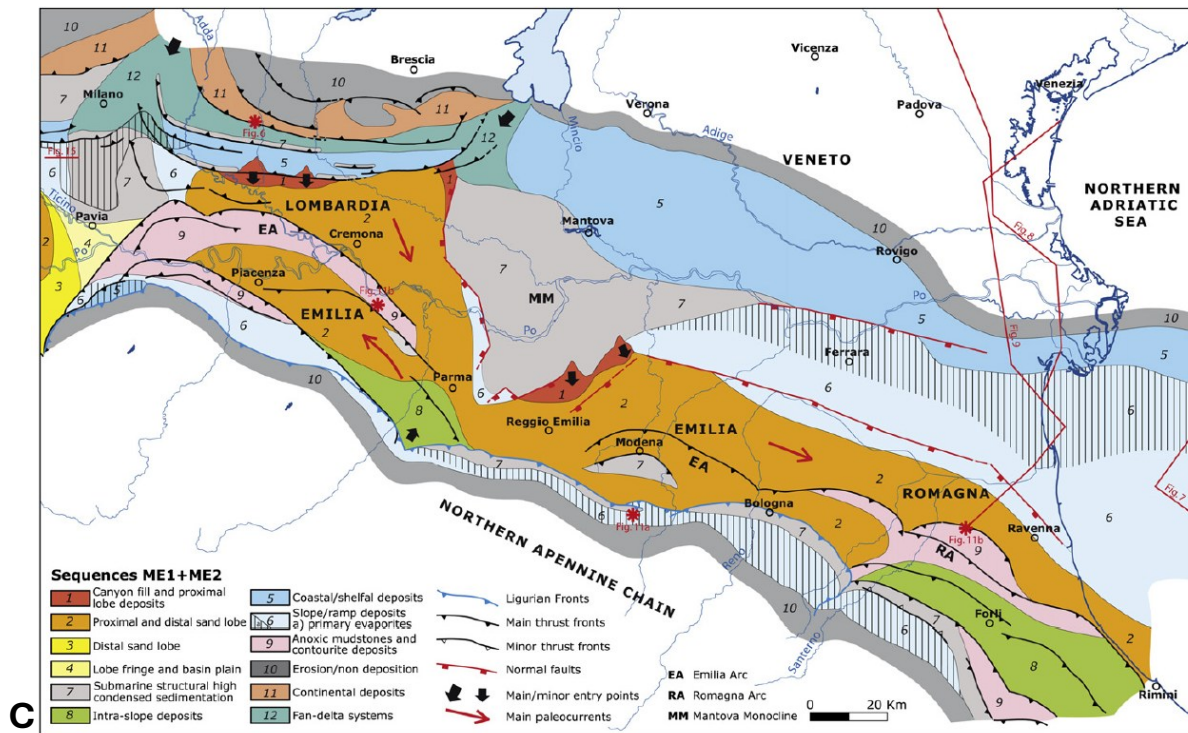


Figura 5: A) Schema lito-e cronostratigrafico dei depositi terziari e quaternari della Pianura Lombarda (Rizzini e Dondi, 1978); B) Estensione areale attesa della Formazione delle Ghiaie di Sergnano e della Formazione delle Sabbie di Caviaga nel sottosuolo della Pianura Lombarda (Rizzini e Dondi, 1978). C) Mappa di distribuzione di facies delle sequenze messiniane pre- e sin-evaporitiche ME1 e ME2 nel bacino Padano (Ghielmi et al., 2013).

La crisi messiniana si concluse con un brusco innalzamento del livello del mare al limite Miocene-Pliocene, che diede avvio a una rapida trasgressione marina. I bassi morfologici lasciati dall'erosione messiniana furono progressivamente colmati dalle facies sabbiose trasgressive della Formazione di Caviaga, caratterizzate da granulometria decrescente verso l'alto (Rizzini e Dondi, 1978).

Al di sopra della Formazione di Caviaga, la successione è dominata dalle argille emipelagiche della Formazione delle Argille del Santerno, deposte su piattaforma esterna durante il Pliocene inferiore-medio. Verso il margine alpino del bacino, questa formazione passa lateralmente alla Formazione di Pandino, caratterizzata da alternanze sabbioso-argillose (Rizzini e Dondi, 1978).

La SGF risulta pertanto sigillata superiormente dalle argille marine plioceniche, che ne costituiscono la copertura impermeabile sia sugli alti morfologici sia nei bassi morfologici (figura 6), configurando un sistema stratigrafico chiuso di potenziale interesse per lo sfruttamento geotermico.

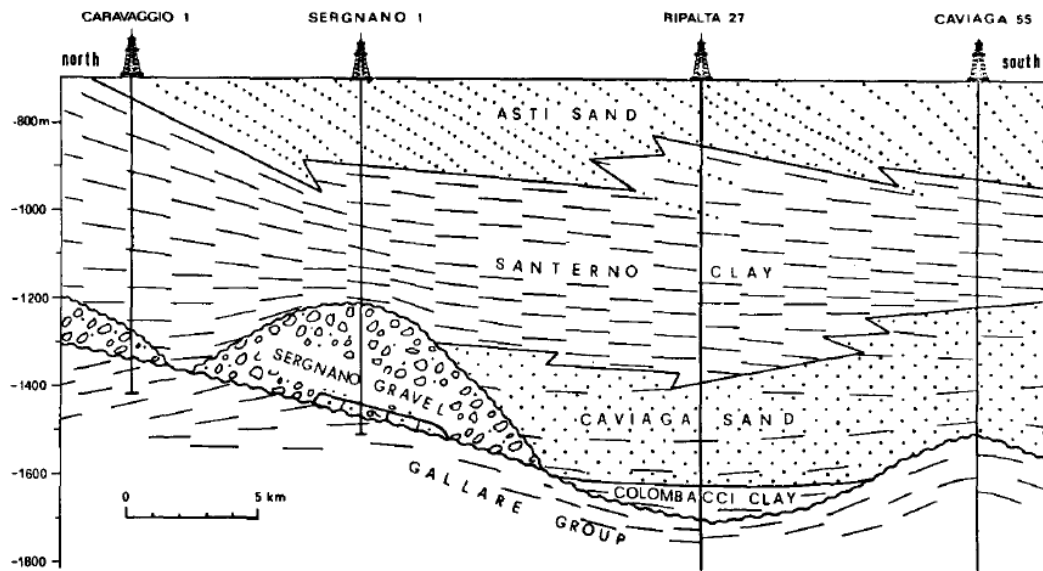


Figura 6: Sezione geologica regionale schematica, trasversale al bacino, che mostra le variazioni verticali e laterali di facies tra le formazioni deposte al di sopra della principale discordanza miocenica (Rizzini e Dondi, 1978).



# CAPITOLO 3 – DATI DI SOTTOSUOLO

## 3.1 Organizzazione dei dati del sottosuolo

Il presente lavoro ha avuto inizio con la digitalizzazione sistematica delle litostratigrafie relative a successioni sedimentarie intercettate da 15 pozzi esplorativi (figura 7), mediante l'analisi dei profili di pozzo disponibili all'interno del database pubblico ViDEPI (figura 8), che raccoglie dati di pozzo e sismica a riflessione acquisiti nel corso di precedenti campagne di esplorazione per idrocarburi condotte nel territorio italiano. L'utilizzo di questa banca dati ha consentito di ricostruire, con adeguata risoluzione verticale, la variazione laterale e verticale delle unità sedimentarie nel sottosuolo dell'area in esame.

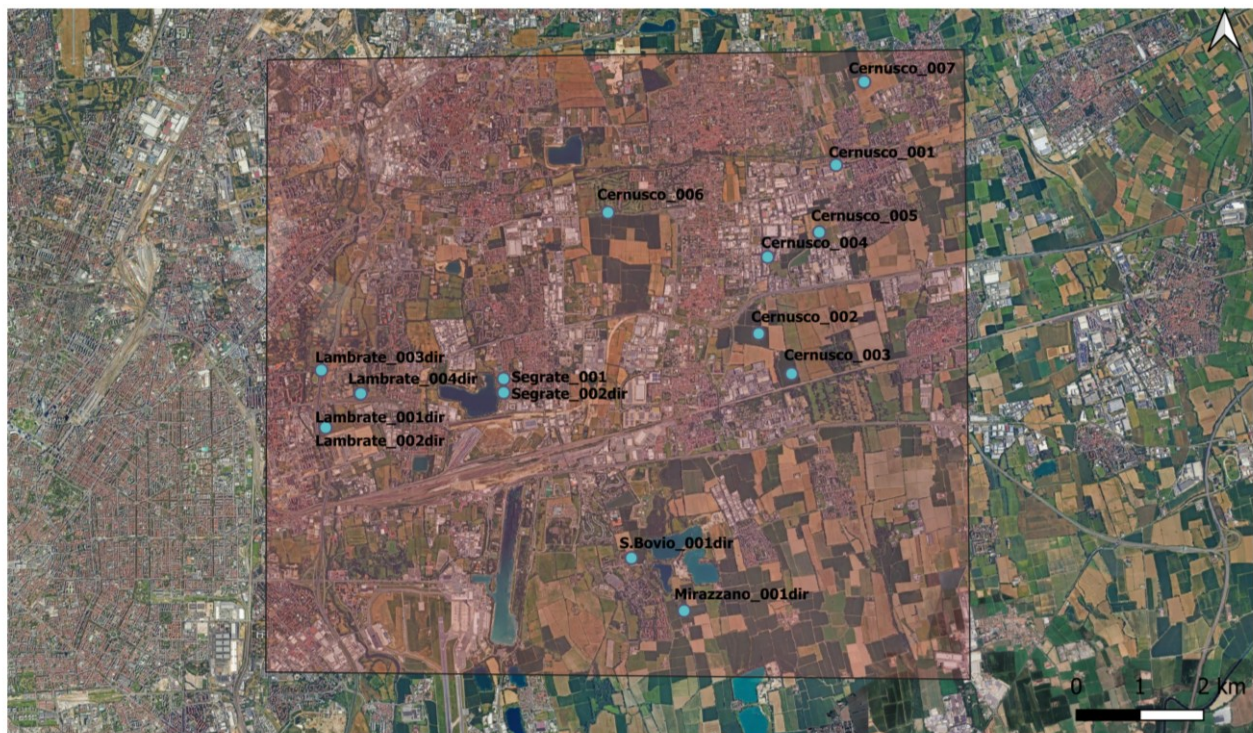


Figura 7: Collocazione dei pozzi analizzati in QGIS nell'area Est di Milano. I pozzi Lambrate\_004dir e Lambrate\_001dir a questa scala risultano sovrapposti.

## Progetto ViDEPI

Visibilità dei dati afferenti all'attività di esplorazione petrolifera in Italia

IL PROGETTO ▾ I DATI ▾ WebGIS

Progetto ViDEPI

IT | EN

### Visibilità dei dati afferenti all'attività di esplorazione petrolifera in Italia

Il progetto ViDEPI (Visibilità dei Dati afferenti all'attività di Esplorazione Petrolifera in Italia) ha l'obiettivo di rendere facilmente accessibili i documenti tecnici relativi all'esplorazione petrolifera in Italia.

Si tratta di documentazione riguardante titoli minerari cessati, e pertanto pubblica, depositata a partire dal 1957 presso l'UNMIG, Ufficio nazionale minerario per gli idrocarburi e le georisorse del Ministero dell'ambiente e della sicurezza energetica.

L'attività di esplorazione petrolifera in Italia è disciplinata dalla [Legge 11 gennaio 1957, n. 6](#), che ha istituito l'UNMIG. La normativa stabilisce che le Compagnie operatrici dei singoli titoli minerari debbano fornire all'UNMIG rapporti tecnici progressivi sull'attività svolta nei titoli medesimi includenti copia di documenti quali carte geologiche, carte strutturali, profili finali di pozzi, linee sismiche, etc.

La [Legge 21 luglio 1967, n. 613](#) (articolo 39, comma 2) e il [Decreto legislativo 25 novembre 1996, n. 625](#) (articolo 16, comma 4) prevedono che i documenti consegnati divengano di pubblica disponibilità dopo un anno dalla cessazione del titolo per il quale erano stati prodotti.

In più di mezzo secolo si è venuta a costituire un'importante base di dati concernenti il sottosuolo italiano.

Con la realizzazione del progetto ViDEPI l'intera documentazione, sino ad allora disponibile solo in formato cartaceo, è resa disponibile in formato elettronico a chiunque ne abbia interesse.

**A**

I contenuti sono distribuiti con licenza [Creative Commons Attribuzione 4.0 Internazionale](#).

**B**

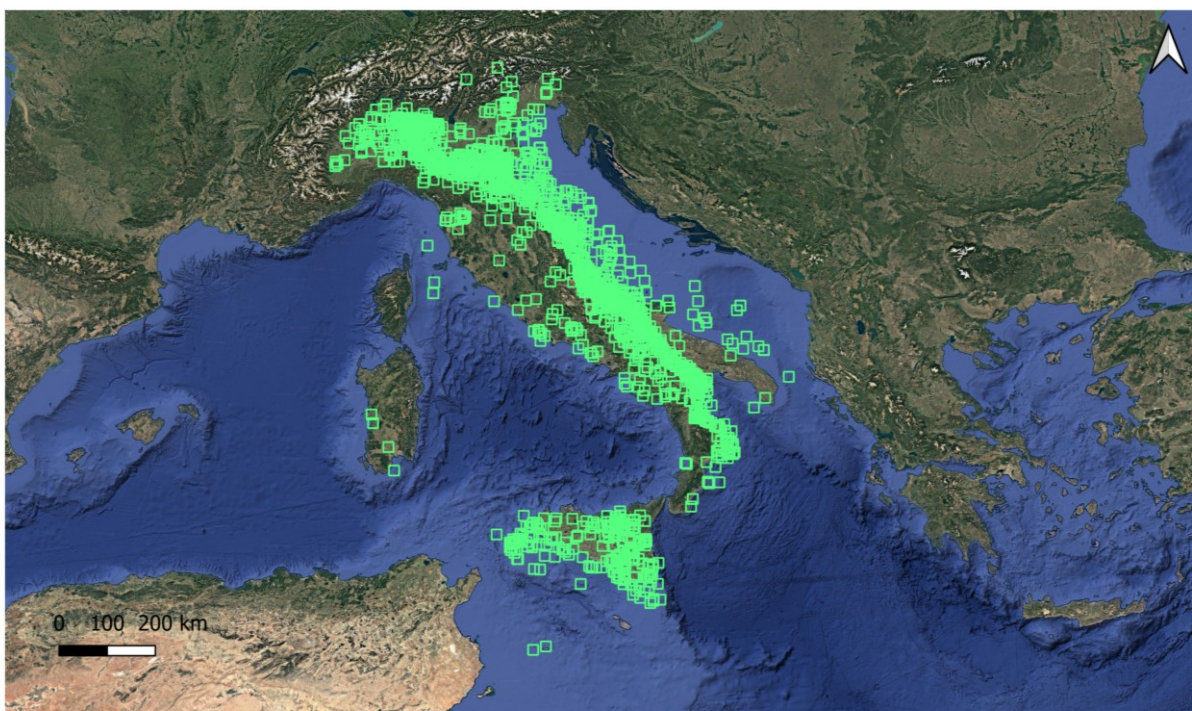


Figura 8: A) Interfaccia del database ViDEPI. B) Distribuzione geografica dei pozzi esplorativi disponibili nel database ViDEPI (punti verdi), derivanti dalle campagne storiche di esplorazione di idrocarburi condotte in Italia.

La digitalizzazione delle litologie è stata condotta mediante la lettura e l'interpretazione dei profili di pozzo (figura 9) ottenuti dal database ViDEPI, i quali riportano la successione stratigrafica rilevata durante la perforazione sotto forma di log litologici, corredati da log di pozzo quali gamma ray, resistività e sonic. Per ciascun pozzo, le informazioni litologiche sono state trascritte manualmente in

un foglio di calcolo Microsoft Excel (figura 10), strutturato con le seguenti colonne: intervallo di profondità espresso in metri di tetto e base di ogni intervallo (colonne Top e Base), la litologia di ciascun intervallo (descritta mediante sigle standardizzate, figura 11) e l'età stratigrafica dell'intervallo, dove indicata nel profilo originale.

La risoluzione verticale adottata nel processo di digitalizzazione non è stata fissa, ma variabile in funzione dell'eterogeneità litologica dell'intervallo considerato. Negli intervalli caratterizzati da successioni sedimentarie generalmente omogenee, come spessi intervalli argillosi o marnosi, è stata adottata una risoluzione più grossolona. Al contrario, negli intervalli a maggiore eterogeneità litologica, come le zone di transizione tra facies fini e facies più grossolone o in prossimità di superfici stratigrafiche di riferimento, la risoluzione è stata incrementata anche fino ad un metro, al fine di preservare con maggiore fedeltà le informazioni stratigrafiche rilevanti per le analisi e per vincolare i modelli di reservoir.

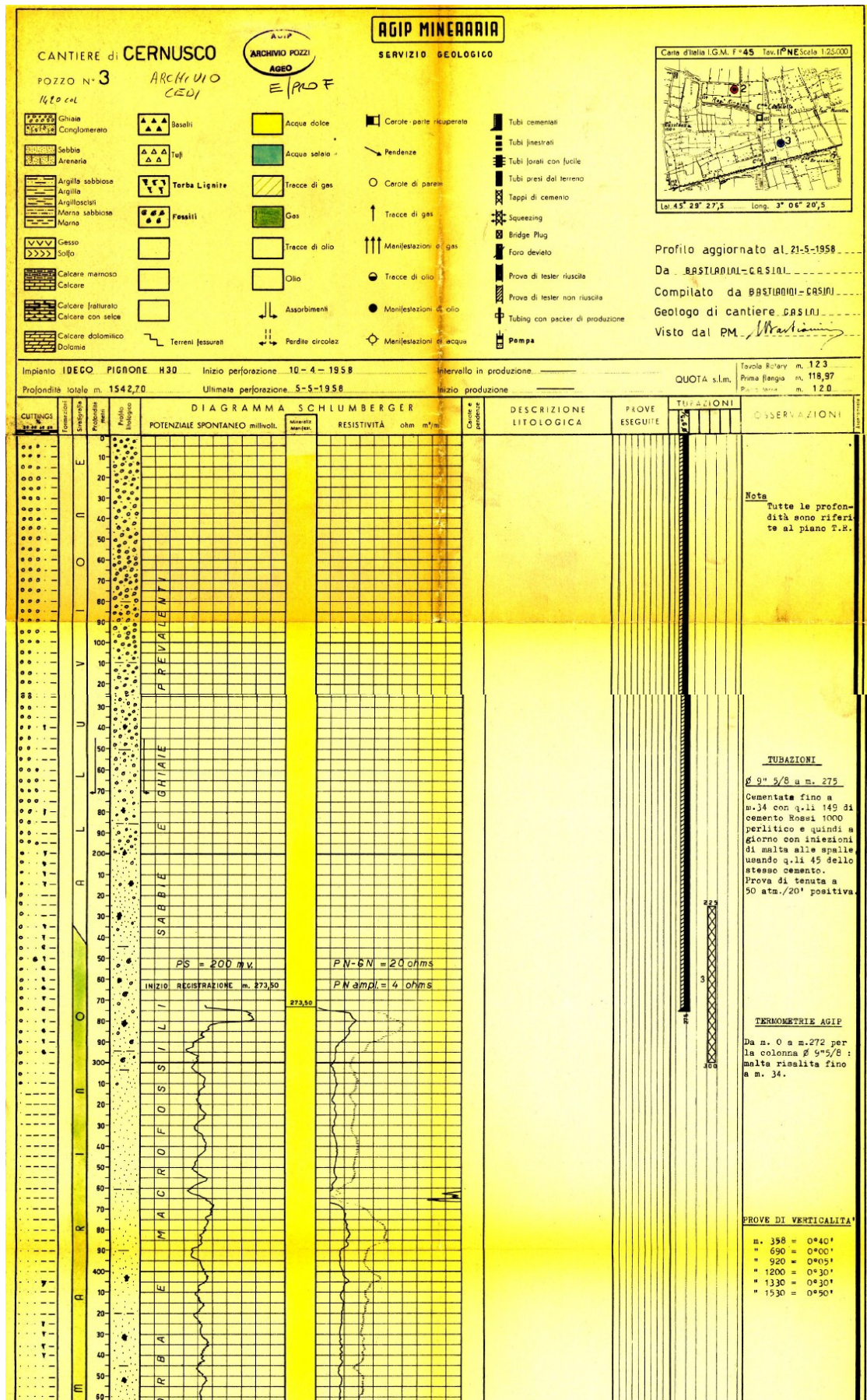


Figura 9: Estratto del profilo del pozzo Cernusco\_003 ottenuto dal database ViDEPI.

Profondità (m)	Litologia	Note	Età/Ambiente	Top (m)	Base (m)
0-80	GHSB			0	80
80-81	ARG + GH			80	81
81-109	GHSB			81	109
109-110	ARG			109	110
110-150	GHSB		A	110	150
150-151	ARG		L	150	151
151-178	GHSB		L	151	178
178-180	GHSB + torba		U	178	180
180-185	GHSB		V	180	185
185-186	ARG		I	185	186
186-199	GHSB		O	186	199
199-200	GHSB + torba		N	199	200
200-214	SF + GH		A	200	214
214-215	SF + GH + torba		L	214	215
215-228	SF		E	215	228
228-231	SF + torba			228	231
231-238	SF + GH			231	238
238-244	SF			238	244
244-245	ARG			244	245
245-250	SF			245	250
250-255	SF + CT + F			250	255
255-260	SF			255	260
260-262	SF + CT + torba			260	262
262-266	SF			262	266
266-270	SF + F			266	270
270-280	SF + CT			270	280
280-283	SF + torba			280	283
283-289	SF + CT			283	289
289-291	SF + F			289	291
291-294	SF			291	294
294-295	ARG			294	295
295-296	SF			295	296
296-300	SF + CT + F			296	300
300-303	SF			300	303
303-304	ARG			303	304
304-360	SF			304	360
360-361	ARG			360	361
361-390	SF			361	390
390-391	ARG			390	391
391-402	SF			391	402
402-405	SF + torba			402	405
405-420	SF			405	420
420-421	ARG			420	421
421-430	SF		Q	421	430
430-434	SF + torba		U	430	434
434-445	SF		A	434	445
445-446	ARG		T	445	446
446-450	SF		E	446	450
450-453	SF + torba		R	450	453
453-500	SF		N	453	500
500-501	ARG		A	500	501
501-527	SF		R	501	527
527-530	SF + torba		I	527	530
530-544	SF		O	530	544
544-545	ARG			544	545
545-574	SF		M	545	574
574-575	ARG		A	574	575
575-630	SF		R	575	630
630-631	ARG		I	630	631
631-662	SF		N	631	662
662-665	SF + torba		O	662	665
665-678	SF			665	678
678-679	ARG			678	679
679-700	SF			679	700
700-702	SF + torba			700	702
702-715	SF			702	715
715-716	ARG			715	716
716-755	SF			716	755
755-756	ARG			755	756
756-800	SF			756	800
800-801	ARG			800	801

A

801-832	SF				801	832
832-833	ARG				832	833
833-864	SF				833	864
864-865	ARG				864	865
865-880	SF				865	880
880-881	ARG				880	881
881-894	SF				881	894
894-895	ARG				894	895
895-900	SF				895	900
900-901	ARG				900	901
901-910	SF				901	910
910-911	ARG				910	911
911-919	SF				911	919
919-940	ARG				919	940
940-944	ARGSB				940	944
944-992	ARG				944	992
992-993	SF				992	993
993-1045	ARG				993	1045
1045-1055	ARGSB				1045	1055
1055-1199	ARG/MN			Fino 1115m	1055	1199
1199-1205	GHSB				1199	1205
1205-1206	ARG				1205	1206
1206-1213	GHSB				1206	1213
1213-1215	ARG				1213	1215
1215-1225	GHSB				1215	1225
1225-1226	ARG				1225	1226
1226-1233	GHSB				1226	1233
1233-1235	ARG				1233	1235
1235-1245	GH + ARN				1235	1245
1245-1248	ARG				1245	1248
1248-1255	GHSB				1248	1255
1255-1256	ARG				1255	1256
1256-1265	GHSB				1256	1265
1265-1266	ARG				1265	1266
1266-1273	GH + ARN				1266	1273
1273-1274	ARG				1273	1274
1274-1279	ARN				1274	1279
1279-1280	ARG				1279	1280
1280-1290	GH + ARN				1280	1290
1290-1291	ARG				1290	1291
1291-1297	SF				1291	1297
1297-1298	ARG				1297	1298
1298-1305	SF + torba				1298	1305
1305-1306	ARG				1305	1306
1306-1314	SF + torba				1306	1314
1314-1315	ARG				1314	1315
1315-1323	ARN + GH				1315	1323
1323-1328	ARG				1323	1328
1328-1334	GH + ARN				1328	1334
1334-1342	ARG				1334	1342
1342-1347	SF + torba				1342	1347
1347-1348	ARG				1347	1348
1348-1351	SF				1348	1351
1351-1356	ARG				1351	1356
1356-1366	ARN				1356	1366
1366-1367	ARG				1366	1367
1367-1371	SF				1367	1371
1371-1372	ARG				1371	1372
1372-1374	SF				1372	1374
1374-1375	ARG				1374	1375
1375-1381	ARN				1375	1381
1381-1382	ARG				1381	1382
1382-1386	SF				1382	1386
1386-1387	ARG				1386	1387
1387-1389	SF 1390 unconformity				1387	1389
1389-1410	MARN				1389	1410
1410-1414	ARN + CT				1410	1414
1414-1440	MARN				1414	1440
1440-1445	MARN + CT				1440	1445
1445-1458	MARN				1445	1458
1458-1460	MARN + CT				1458	1460
1460-1542	MARN				1460	1542

P  
L  
I  
.  
M  
-  
S

P  
L  
I  
O  
C  
E  
N  
E  
  
I  
N  
F  
E  
R  
I  
O  
R  
E

M  
I  
O  
.  
I  
N  
F

Profondità (m)	Litologia	Note	Età/Ambiente	Top (m)	Base (m)
257-300	SBARG		Q	257	300
300-306	SF		U	300	306
306-327	SBARG		A	306	327
327-328	ARG		T	327	328
328-336	SF		E	328	336
336-340	SBARG		R	336	340
340-348	SF		N	340	348
348-352	SBARG		A	348	352
352-357	SF		R	352	357
357-366	SBARG		I	357	366
366-370	SF		O	366	370
370-379	SBARG			370	379
379-385	SF		M	379	385
385-393	SBARG		A	385	393
393-397	SF		R	393	397
397-535	SBARG		I	397	535
535-538	ARG		N	535	538
538-540	SF		O	538	540
540-543	ARG			540	543
543-548	ARGSB			543	548
548-553	ARG			548	553
553-555	ARGSB			553	555
555-560	ARG		P	555	560
560-561	SF		L	560	561
561-564	ARG		I	561	564
564-587	ARGSB		O	564	587
587-590	ARG		C	587	590
590-600	ARGSB		E	590	600
600-605	ARG		N	600	605
605-606	SF		E	605	606
606-611	ARG			606	611
611-614	SF		M	611	614
614-638	ARG		-	614	638
638-643	SF		S	638	643
643-648	ARG		U	643	648
648-655	ARGSB		P	648	655
655-680	ARG			655	680
680-695	ARGSB			680	695
695-705	ARG			695	705
705-710	ARGSB			705	710
710-752	ARG			710	752
752-760	GHSB			752	760
760-765	ARG			760	765
765-775	GHSB			765	775
775-778	ARG			775	778
778-783	GHSB			778	783
783-786	ARG			783	786
786-796	GHSB			786	796
796-799	ARG		P	796	799
799-805	GHSB		L	799	805
805-810	ARG		I	805	810
810-812	GHSB		O	810	812
812-815	ARG		C	812	815
815-820	GHSB		E	815	820
820-825	ARGSB		N	820	825
825-828	GHSB		E	825	828
828-830	ARG			828	830
830-834	GHSB		I	830	834
834-836	ARGSB		N	834	836
836-838	ARG		F	836	838
838-841	SF		E	838	841
841-845	ARGSB		R	841	845
845-847	ARGSB + GH		I	845	847
847-858	SBARG		O	847	858
858-860	SF + GH		R	858	860
860-869	SBARG		E	860	869
869-870	SBARG + GH			869	870
870-876	SBARG			870	876
876-880	ARG			876	880
880-882	SBARG + GH			880	882
882-885	ARG			882	885
885-906	SBARG			885	906
906-910	ARG + GH			906	910
910-918	SBARG			910	918
918-930	MARN		M	918	930
930-940	MN		I	930	940
940-968	MARN		O	940	968
968-985	MN		C	968	985
985-991	MARN		E	985	991
991-998	MN		N	991	998
998-1000	MARN		E	998	1000
			I		
			N		
1000-1020	MN		F	1000	1020

**B**

Figura 10: A) Pozzo Cernusco\_003 digitalizzato; B) Pozzo Cernusco\_007 digitalizzato. Si faccia riferimento a Figura 11 per i codici litologici.

<b>LEGENDA</b>			
<b>Classificazione 1:</b>	<b>Classificazione 2:</b>	<b>Classificazione 3:</b>	
CT = ciottoli	ARG = fini (argilla+marna+depositi organici)	GH =	0
GH = ghiaia	SB = sabbie/arenarie	SB =	1
SF = sabbia fine	GH = grossolani (ghiaia + conglomerato)	ARG =	2
ST = silt			
ARGST = argilla siltosa			
ARG = argilla			
SBARG = sabbia argillosa			
ARGSB = argilla sabbiosa			
GHSB =ghiaia sabbiosa			
CNG = conglomerato			
ARN = arenaria			
MN = marna			
MARN = marna arenacea			
F = fossili			
ARMN = argille marnose			
MNSLT = marne siltose			

Figura 11: Classificazioni alternative utilizzate per digitalizzare le litologie intercettate dai pozzi e successivamente codificate per scopi di modellazione del sottosuolo.

In una fase successiva sono stati identificati e correlati orizzonti stratigrafici chiave, corrispondenti a superfici di discontinuità. La superficie in questione è la base del Pliocene (PL1), ovvero il limite stratigrafico che, a grandi linee, separa i depositi miocenici sottostanti dalle successioni plioceniche sovrastanti (Ghielmi et al., 2010).

Nel contesto del Bacino Padano, questa superficie ha un'importanza fondamentale in quanto rappresenta una discontinuità regionale legata alla crisi di salinità del Messiniano e alla successiva ingressione marina zancleana (Ghielmi et al., 2013). Nei bassi morfologici, la PL1 coincide con l'unconformity erosionale messiniana alla base delle Ghiaie di Sergnano: durante la crisi di salinità, l'intensa incisione fluviale ha prodotto profonde paleovalli nel substrato miocenico, successivamente colmate dalla trasgressione zancleana con depositi ghiaiosi che poggiano direttamente sulla superficie erosionale. Negli alti morfologici, invece, la PL1 corrisponde al tetto delle Ghiaie di Sergnano messiniane preservate in zone di interfluvio dai processi di incisione valliva. In queste posizioni morfologicamente elevate, le ghiaie erano già depositate prima dell'ingressione marina zancleana; qui la PL1 si amalgama con una superficie di ravinement trasgressivo, ovvero la superficie erosionale prodotta dall'avanzamento del mare zancleano sul tetto dei depositi ghiaiosi preesistenti (unconformity intra-Zancleana). Una unconformity messiniana più antica della PL1 si trova inoltre alla base delle ghiaie, corrispondendo alla superficie di contatto erosionale tra le Ghiaie di Sergnano e le Marne di Gallare sottostanti (denominata 'Superficie 2' in figura 12).

La posizione della PL1 e la deposizione dei sedimenti varia significativamente in funzione della morfologia del substrato pre-pliocenico (figura 12):

- Nei bassi morfologici, depressioni erosionali, la PL1 si trova a profondità maggiori ed è associata a una potente successione sedimentaria pliocenica. In questo contesto, la

trasgressione marina ha favorito la deposizione di sedimenti fini di ambiente marino, seguiti verticalmente da depositi deltizi e fluvio-deltizi progradazionali in risposta alla tendenza regressiva dei sistemi sedimentari nel corso del Pliocene. Le Ghiaie di Sergnano si trovano in tali posizioni grazie alle condizioni di accomodamento e subsidenza locale, che hanno permesso lo sviluppo e preservazione di corpi ghiaiosi lateralmente estesi ed interpretabili come depositi di alta energia riconducibili a sistemi fluviali o transizionali (Fantoni & Franciosi, 2010).

- Negli alti morfologici e sugli alti strutturali, la PL1 risulta più superficiale rispetto ai bassi morfologici, poiché tali zone sono rimaste emerse per un tempo più prolungato durante l'ingressione marina zancleana (Fantoni & Franciosi, 2010).

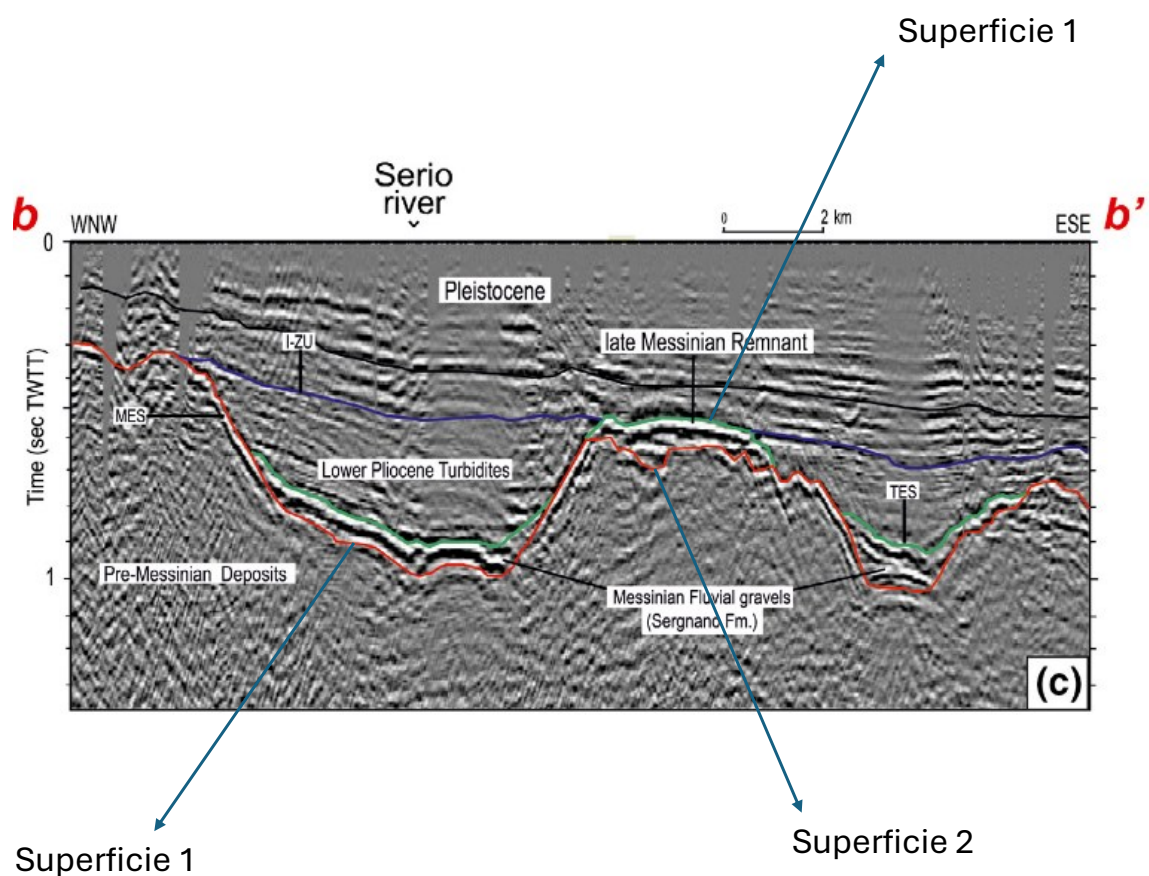


Figura 12: Esempio di profilo sismico rappresentativo di alti e bassi morfologici delle successioni Messiniane-Zancleane. Il profilo lungo la traccia b-b', acquisito da dataset ENI, mostra in dettaglio la presenza di canyon incisi nel substrato al di sotto della Pianura Padana, evidenziandone la variabilità morfologica. Si osserva una corrispondenza tra l'attuale posizione del fiume Serio e l'incisione messiniana (MES) sottostante. La linea verde (TES, Top Erosion Surface) rappresenta una fase erosionale successiva, attribuibile alla base dello Zancleano, che ha rimosso gran parte dei depositi fluviali grossolani post-evaporitici. La paleovalle è successivamente colmata da depositi torbiditici plio-pleistocenici, mentre la linea blu individua una discordanza intra-zancleana (Intra-Zanclean Unconformity, I-ZU). I depositi pre-messiniani sono riferibili alla successione oligocenico-miocenica (Amadori et al., 2018).

La fase successiva del lavoro è stata dedicata al riconoscimento e alla correlazione della superficie PL1 nei diversi pozzi analizzati, con l'obiettivo di definire la sua geometria e distinguere i settori caratterizzati da alti e bassi morfologici della paleotopografia messiniana. Questo lavoro è stato svolto

tramite un'analisi integrata dei dati di pozzo, basata sull'interpretazione congiunta di informazioni litologiche, variazioni di facies e discontinuità stratigrafiche. Il riconoscimento della PL1 è il risultato dell'identificazione di una marcata discontinuità stratigrafica, associata a un cambiamento nelle caratteristiche sedimentologiche, interpretabile come il passaggio tra depositi pre-pliocenici e successioni plioceniche e si presenta come superficie erosionale o lacuna stratigrafica.

Al fine di aumentare l'affidabilità e la coerenza dell'interpretazione litostratigrafica, i dati di pozzo sono stati integrati con le profondità della PL1 ottenute dall'interpretazione sismica, derivate da un lavoro di mappatura precedentemente condotto da Barrera Acosta (2025), la cui copertura spaziale si estende ben oltre i limiti dell'area di studio oggetto della presente tesi (figura 13). Le profondità della PL1 identificate nei log di pozzo attraverso il riconoscimento delle successioni litologiche caratteristiche descritte nel paragrafo precedente sono state confrontate con le profondità della PL1 sismica nei punti corrispondenti o più vicini alla posizione planimetrica di ciascun pozzo. Questo confronto ha permesso di verificare la coerenza tra l'interpretazione litostratigrafica di pozzo e quella sismica, individuando eventuali discrepanze e affinando l'identificazione della superficie nei casi di maggiore incertezza nei log. Nei casi in cui la PL1 sismica e quella di pozzo risultavano coerenti, l'interpretazione è stata confermata; laddove emergevano discrepanze significative, queste sono state analizzate criticamente per valutare se attribuibili a incertezze nell'interpretazione sismica, a variazioni litologiche locali o a errori nell'identificazione della superficie nel log di pozzo. Successivamente i dati sismici sono stati analizzati anche per verificare la classificazione degli intervalli stratigrafici assegnati alla Formazione delle Ghiaie di Sergnano in ciascun pozzo come successioni preservate su alto morfologico o deposte in basso morfologico. La continuità laterale della PL1 nella sismica e la sua correlazione tra pozzi adiacenti ha consentito di tracciare l'andamento regionale della superficie e di valutare la posizione relativa degli intervalli di interesse di ciascun pozzo rispetto alla morfologia del substrato pre-pliocenico, confermando o correggendo la classificazione inizialmente attribuita sulla base della sola analisi litologica. In particolare, nei pozzi localizzati nei bassi morfologici, dove la PL1 non è direttamente identificabile nei log di pozzo in quanto più profonda del fondo pozzo, il confronto con la PL1 sismica ha fornito una stima della profondità minima della superficie.

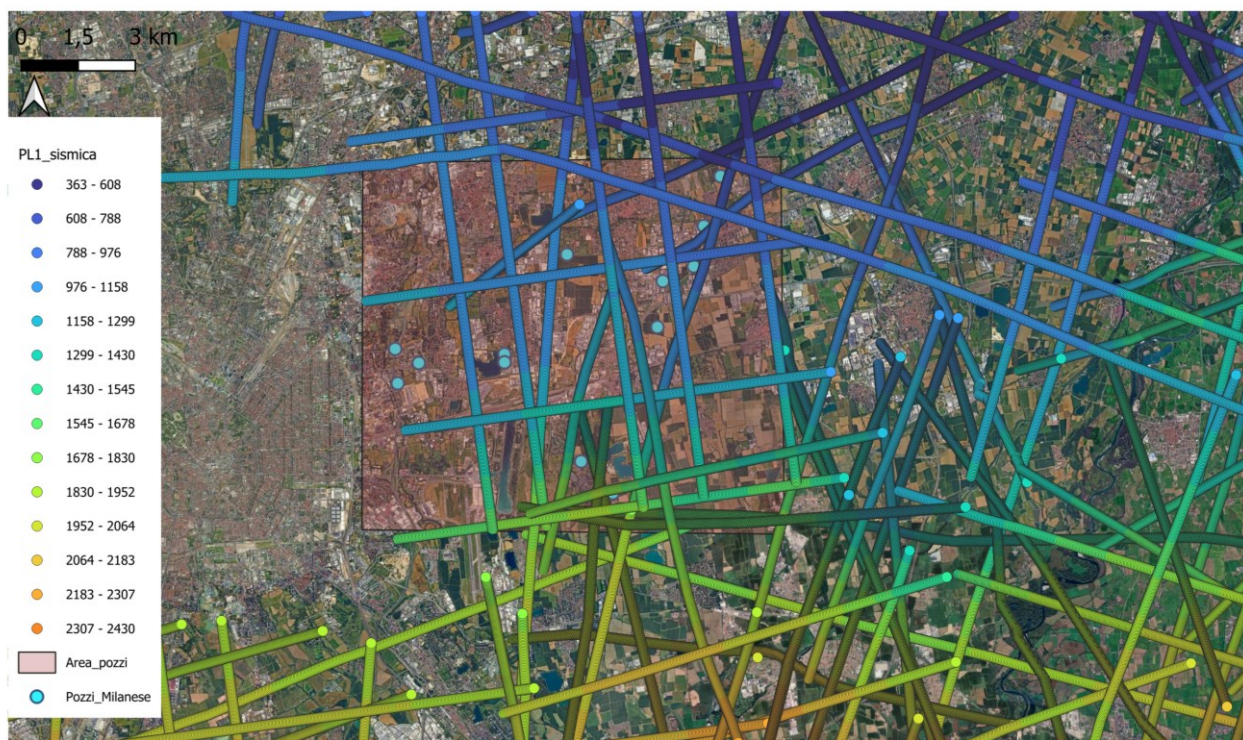


Figura 13: Mappa delle tracce delle linee sismiche e dei pozzi nell'area di studio (rettangolo rosso e i cerchi azzurri rappresentano i pozzi utilizzati nell'analisi). I colori delle tracce sismiche rappresentano la profondità della superficie PL1 derivata dall'interpretazione di Barrera Acosta (2025), secondo una scala cromatica espressa in metri nella legenda.

Questo metodo ha permesso di combinare la risoluzione verticale dei log di pozzo con la continuità laterale fornita dai dati sismici, verificando la coerenza geometrica delle superfici individuate e riducendo le incertezze interpretative. In questo modo è stato possibile distinguere i settori caratterizzati da alti morfologici da settori solcati da bassi morfologici incisi nel Messiniano.

Il riconoscimento delle superfici stratigrafiche di riferimento è stato effettuato mediante l'identificazione di specifiche successioni litologiche caratteristiche, differenti a seconda della posizione del pozzo rispetto agli elementi paleotopografici (figura 12). La successione stratigrafica incontrata nei profili di pozzo rispecchia il quadro deposizionale descritto nell'inquadramento stratigrafico (capitolo 2.2).

Nei pozzi che intercettano gli alti morfologici messiniani la successione riconoscibile nei profili di pozzo è la seguente, dall'alto verso il basso: nella parte superiore del pozzo si trovano i depositi continentali quaternari, costituiti prevalentemente da sabbie e argille di ambiente alluvionale e fluviale riferibili al Pleistocene, che testimoniano la regressione generalizzata e le successive fasi glaciali e interglaciali. Al di sotto si individua un intervallo argilloso marino, le Argille del Santerno, una formazione di età Quaternaria marina, costituita prevalentemente da argille e argille marnose

depositate in ambiente marino di piattaforma durante la fase di trasgressione e highstand del Pliocene. Il contatto inferiore di questo intervallo coincide con il tetto delle Ghiaie di Sergnano, che corrisponde alla superficie PL1. Le Ghiaie di Sergnano preservate sugli alti paleotopografici si sono depositate in sistemi alluvionali e paralici durante la crisi messiniana. La base delle Ghiaie di Sergnano è localmente marcata dalla Latest Tortonian Unconformity, superficie di significato regionale corrispondente al limite inferiore della sequenza ME1 e dell'Allogruppo EM (Ghielmi et al. 2013), che nel bacino Padano rappresenta il contatto discordante tra i depositi tortoniani sottostanti e la successione messiniana sovrastante. Al di sotto di questa superficie si incontrano le Marne di Gallare, formazione marnosa di ambiente marino profondo di età tortoniana. Questa unconformity è una superficie erosionale sin-evaporitica associata alla progradazione forzata dei sistemi clastici grossolani di provenienza alpina, sviluppatasi lungo il margine delle Alpi meridionali in risposta all'abbassamento del livello di base durante la crisi di salinità messiniana (Ghielmi et al., 2013). Il grosso dell'incisione valliva nell'area di studio è tuttavia posteriore a questa superficie ed è legato alle incisioni vallive marcate dal paleorilievo della superficie PL1 (Ghielmi et al., 2013), come discusso nel capitolo 2.2.

Nei settori dove sono riconoscibili dei bassi morfologici messiniani-zancleani gli intervalli alluvionali quaternari e le Argille del Santerno sono analogamente riconoscibili nelle parti superiori delle stratigrafie di pozzo, ma il passaggio alle ghiaie sottostanti risulta più graduale, caratterizzato da una zona di transizione a granulometria mista ghiaia-sabbia riferibile a depositi di riempimento vallivo accumulatisi in condizioni trasgressive, in relazione allo spazio di accomodamento disponibile nei depocentri erosionali. In questo caso la base delle Ghiaie di Sergnano non viene mai intercettata dalla perforazione, di conseguenza la PL1 non è direttamente identificabile nei profili di pozzo.

### 3.2 Elaborazione dei dati del sottosuolo

Il presente lavoro si focalizza sulla caratterizzazione volumetrica delle Ghiaie di Sergnano messiniane preservate in corrispondenza degli alti morfologici, chiaramente identificabili nei profili di pozzo. Come discusso nel capitolo precedente, questa scelta è motivata dalla necessità di caratterizzare separatamente il potenziale geotermico di questi volumi geologici.

A seguito dell'identificazione delle superfici stratigrafiche di riferimento, in particolare del tetto della base delle Ghiaie di Sergnano in corrispondenza degli alti morfologici, e della superficie PL1 coincidente con il tetto delle stesse, è stata effettuata una selezione dei pozzi analizzati affinché

soddisfino le condizioni stratigrafiche necessarie per l'elaborazione. Dei 15 pozzi inizialmente analizzati, soltanto 4 pozzi presentavano un set di dati completo (figura 14):

- Quote base e/o tetto delle Ghiaie di Sergnano;
- Superficie PL1 riconoscibile e in corrispondenza del tetto delle ghiaie;
- SGF collocate su un alto morfologico;
- Coordinate spaziali.

Gli altri pozzi sono stati esclusi dall'analisi presentata nel seguito in quanto privi di uno o più degli attributi richiesti.

Disponendo delle coordinate planimetriche e delle quote stratigrafiche dei 4 pozzi, è stata condotta su Microsoft Excel un'analisi di tendenza della profondità della base delle Ghiaie di Sergnano poggianti su alto morfologico (figura 14). I dati sono stati proiettati lungo la direzione Nord-Sud, coerentemente con la tendenza strutturale regionale del Bacino Padano e con l'orientamento dei sistemi di drenaggio messiniani (N-S, Amadori et al.,2018). I valori della base delle ghiaie in zone di alto morfologico sono stati interpolati mediante una regressione lineare, al fine di quantificare l'approfondimento generale della superficie alla base delle ghiaie procedendo da Nord verso Sud.

<b>Nome</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
Cernusco_003	5037551,9	1389,00
Cernusco_002	5038182,4	1493,50
Cernusco_005	5039775,8	984,0
Cernusco_007	5042139,8	918,0

*Figura 14: Dati dei pozzi per analisi di tendenza.*

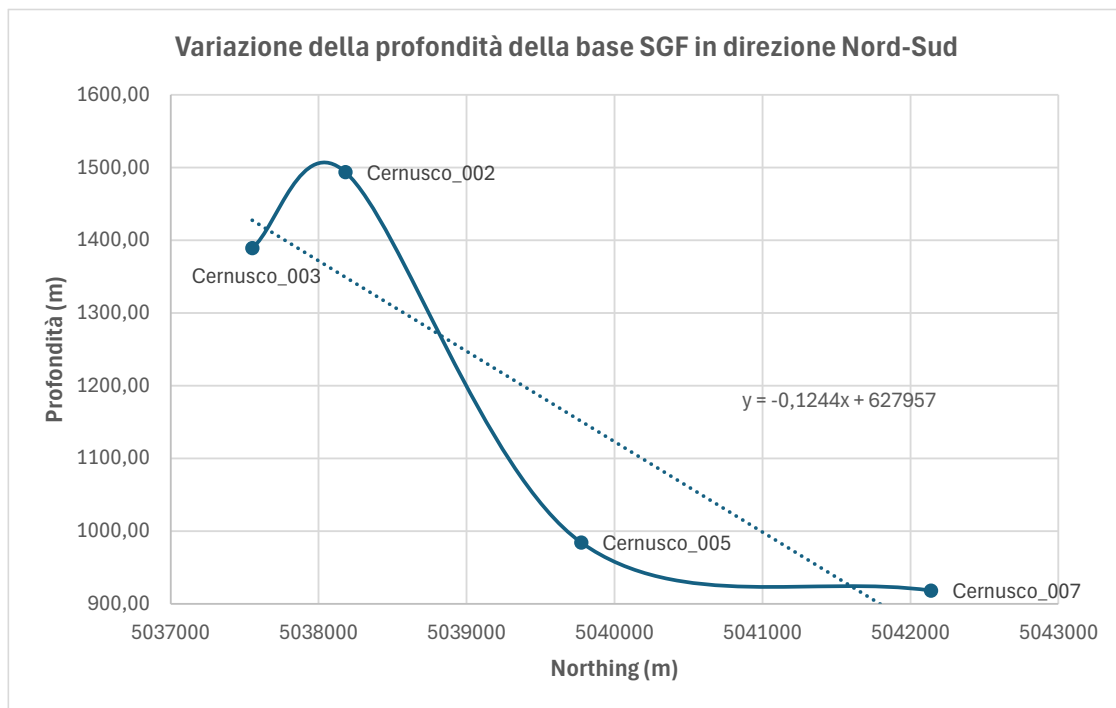


Figura 15: Profondità della base della SGF in funzione della coordinata Northing UTM per i 4 pozzi selezionati. La curva continua collega i valori osservati nei singoli pozzi, evidenziando un andamento generale di approfondimento da Nord (destra) verso Sud (sinistra). La retta tratteggiata rappresenta il trend lineare di approfondimento ricavato mediante regressione lineare sui 4 pozzi dell'area di studio ( $y = -0,1244x + 627957$ ).

Il grafico (figura 15) mostra la profondità della base delle Ghiaie di Sergnano (asse Y, in metri) in funzione della coordinata Nord in sistema di riferimento UTM (asse X, in metri). Poiché i valori crescenti sull'asse X corrispondono a posizioni progressivamente più settentrionali, i punti a sinistra rappresentano i pozzi più meridionali, mentre quelli a destra i pozzi più settentrionali (figura 7).

L'andamento generale della curva evidenzia un approfondimento della base delle ghiaie procedendo da Nord verso Sud, coerente con la geometria regionale del Bacino Padano e con l'immersione generale delle strutture verso la catena appenninica. Questo è confermato e quantificato dalla retta di regressione lineare (linea tratteggiata), descritta dall'equazione  $y = -0,1244x + 627957$ : il coefficiente angolare negativo indica che all'aumentare della coordinata Nord, la profondità della base delle ghiaie diminuisce, ovvero la superficie si solleva procedendo verso Nord con un gradiente medio di circa 124,4 m ogni 1000 m in direzione N-S. Questo trend è stato derivato matematicamente in supporto delle attività di modellazione descritte nel capitolo successivo, ma non rappresenta un'informazione geologicamente solida, dato il numero limitato di punti disponibili. Inoltre, l'andamento della curva non è monotono: si osserva un picco di profondità anomalo in corrispondenza di Cernusco\_002, dove la base delle ghiaie raggiunge la quota di 1493,50 m. questo valore risulta significativamente maggiore rispetto a Cernusco\_003 (più a sud, 1390 m) e quelli a nord. Tale anomalia può essere interpretata come una depressione strutturale localizzata o una paleodepressione messiniana in corrispondenza di quel pozzo. La variabilità nello spazio di accomodamento associato alle variazioni

nella profondità della base delle ghiaie indica la complessità paleotopografica della superficie su cui si impostano le successioni di regressione forzata preservate in zone di alto morfologico.

Non è da escludere però che la proiezione dei pozzi su un unico asse N-S, in presenza di una distribuzione planimetrica non perfettamente allineata, possa introdurre una componente di distorsione nell'andamento osservato.

Dal punto di vista del significato geologico regionale, la tendenza di approfondimento verso Sud riflette una combinazione della subsidenza differenziale del bacino, più accentuata nella porzione meridionale per effetto del carico tettonico esercitato dalla catena appenninica, con la direzione di drenaggio dei sistemi clastici che hanno scolpito e riempito la base delle ghiaie in contesti di alto morfologico. Dal punto di vista applicativo, la retta di regressione costituisce uno strumento predittivo utile per stimare la profondità attesa della base delle Ghiaie di Sergnano in zone di alto in posizioni non campionate da pozzi.



# CAPITOLO 4 – MODELLAZIONE STATICA DI RESERVOIR

Nella modellazione geologica del sottosuolo esistono due approcci fondamentali per la ricostruzione della distribuzione spaziale delle proprietà geologiche: i metodi deterministici e i metodi stocastici.

I metodi deterministici, tra cui i vari algoritmi di kriging<sup>1</sup>, producono un'unica rappresentazione della realtà attraverso l'interpolazione ottimale dei dati disponibili, minimizzando la varianza dell'errore di stima. Sebbene tali metodi garantiscano la riproduzione esatta dei valori nei punti campionati, tendono a produrre risultati che sottostimano la variabilità locale e non forniscono alcuna misura dell'incertezza associata alle zone non campionate (Remy et al., 2009).

I metodi stocastici, al contrario, non mirano a produrre un'unica soluzione ottimale, bensì un insieme di realizzazioni equiprobabili, ciascuna delle quali riproduce la variabilità spaziale osservata nei dati e il modello di variogramma<sup>2</sup> definito, pur differendo nelle zone non vincolate da dati. L'insieme di queste realizzazioni costituisce un modello di incertezza che consente di valutare la probabilità di diverse configurazioni geologiche e di propagare l'incertezza nelle fasi successive di analisi, rendendo i metodi stocastici particolarmente adatti alla caratterizzazione quantitativa dell'eterogeneità del sottosuolo in contesti dove i dati disponibili sono limitati e distribuiti in modo irregolare (Remy et al., 2009).

Nel presente lavoro, la simulazione stocastica riveste un ruolo centrale in quanto costituisce la base per la stima del calore in posto (Heat in Place, HIP) nell'intervallo di interesse delle Ghiaie di Sergnano, ovvero la quantità totale di energia termica immagazzinata all'interno di questo corpo sedimentario a potenziale geotermico. Il valore di HIP viene calcolato esclusivamente all'interno di questo intervallo stratigrafico, escludendo le successioni argillose e marnose impermeabili di

---

<sup>1</sup> Kriging: il kriging è un metodo di interpolazione spaziale che stima il valore di una proprietà in una posizione non campionata come combinazione lineare pesata dei valori misurati nei punti vicini. I pesi vengono determinati in modo da minimizzare la varianza dell'errore di stima, tenendo conto sia della distanza tra i punti sia della ridondanza tra i dati di condizionamento. A differenza dei metodi di interpolazione classici, il kriging fornisce non solo una stima del valore, ma anche la varianza associata a tale stima, costituendo quindi una misura locale dell'incertezza (Remy et al., 2009).

<sup>2</sup> Variogramma: il variogramma è uno strumento statistico utilizzato in geostatistica per quantificare la struttura di variabilità spaziale di una proprietà. In sostanza, misura quanto sono dissimili in media i valori di una proprietà in due punti in funzione della distanza e della direzione che li separa: a distanze ridotte i punti tendono ad avere valori simili, mentre all'aumentare della distanza la dissimilarità cresce fino a raggiungere un valore massimo detto sill, corrispondente alla varianza totale della proprietà. La distanza alla quale il variogramma raggiunge il sill è detta range e rappresenta la soglia oltre la quale i punti non sono più correlati spazialmente. La modellazione del variogramma sperimentale costituisce un passaggio fondamentale in tutti gli algoritmi geostatistici basati su statistiche a due punti (Remy et al., 2009).

overburden e underburden. La distribuzione spaziale e il volume dei tipi litologici (facies s.l.) costituenti questo intervallo ma non direttamente osservabili al di fuori dei pozzi disponibili, vengono pertanto stimati attraverso la simulazione stocastica che consente di generare molteplici scenari geologici equiprobabili e di quantificare l'incertezza associata alla stima del HIP. La propagazione di questa incertezza attraverso il calcolo energetico fornisce infine una stima probabilistica delle risorse geotermiche presenti nell'area di studio.

In questo lavoro sono stati applicati tre distinti algoritmi di simulazione stocastica, entrambi implementati all'interno del software SGeMS (Stanford Geostatistical Modelling Software; Remy et al., 2009): la simulazione gaussiana sequenziale (SGSIM, Sequential Gaussian simulation), la simulazione sequenziale diretta (DSSIM, Direct Sequential Simulation) e la simulazione sequenziale per indicatori (SISIM, Sequential Indicator Simulation).

SGeMS è un software sviluppato presso la Stanford University per l'applicazione di metodi geostatistici a dati spazialmente distribuiti in ambito geoscientifico. Il software integra una vasta collezione di algoritmi di stima e simulazione stocastica appartenenti a due famiglie principali. La prima comprende i metodi basati su statistiche bipunto, i quali descrivono la relazione spaziale tra coppie di punti in funzione della loro distanza e direzione attraverso il variogramma. La seconda famiglia comprende i metodi basati su statistiche multipunto, che superano i limiti del variogramma descrivendo le relazioni spaziali tra più punti contemporaneamente attraverso l'utilizzo di una training image, ovvero un'immagine concettuale che rappresenta la struttura spaziale attesa del fenomeno da simulare, con la quale è possibile riprodurre geometrie geologiche complesse (Remy et al., 2009). Nel presente lavoro sono stati utilizzati algoritmi appartenenti alla prima famiglia.

## 4.1 SGSIM- Sequential Gaussian Simulation

SGSIM è un algoritmo di simulazione stocastica sequenziale progettato per la simulazione di variabili continue basato sull'assunzione di un modello di distribuzione gaussiano multivariato (Isaaks et al., 1989). A differenza di DSSIM e SISIM, SGSIM richiede che i dati seguano una distribuzione gaussiana: qualora la variabile originale non soddisfi questa condizione è necessario applicare una trasformazione in normal score, che converta i dati nella distribuzione gaussiana standard, e successivamente retro-trasformare i valori simulati nello spazio originale della variabile al termine della simulazione (Remy et al., 2009).

Il principio teorico alla base di SGSIM stabilisce che, in ogni nodo della griglia di simulazione, la distribuzione condizionata locale (ccdf) viene approssimata come una distribuzione gaussiana la cui

media corrisponde alla stima di kriging e la cui varianza corrisponde alla varianza di kriging. Poiché la distribuzione gaussiana è completamente definita da questi due parametri, non è necessario stimare esplicitamente la forma della cdf, il che rende l'algoritmo computazionalmente efficiente (Remy et al., 2009).

Dal punto di vista operativo, l'algoritmo visita in ordine casuale ciascun nodo della griglia di simulazione. Per ogni nodo vengono recuperati i dati di condizionamento vicini, costituiti dai dati originali di pozzo e dai valori già simulati nei nodi precedenti, e viene definita la cdf locale come distribuzione gaussiana con media e varianza determinate tramite kriging. Un valore viene quindi estratto da tale distribuzione, ritrasformato nello spazio originale, e aggiunto al set di dati di condizionamento per i nodi successivi. Il processo viene ripetuto per ciascun nodo fino al completamento della realizzazione e può essere iterato per generare un numero arbitrario di realizzazioni equiprobabili (Remy et al., 2009).

## 4.2 DSSIM - Direct Sequential Simulation

DSSIM è un algoritmo di simulazione stocastica sequenziale diretta progettato per la simulazione di variabili continue, con il vantaggio di non richiedere alcuna trasformazione preliminare dei dati in spazio gaussiano, a differenza di algoritmi quali Sequential Gaussian Simulation (Soares, 2001). Questo aspetto lo rende particolarmente adatto alla simulazione di variabili che non seguono una distribuzione gaussiana.

Il principio teorico alla base di DSSIM stabilisce che la condizione necessaria affinché il variogramma del modello venga riprodotto, è che la distribuzione condizionata locale (cdf, conditional cumulative distribution function) abbia come media e varianza la stima e la varianza di kriging semplice. La forma della cdf non è fissa ma viene determinata localmente per ciascun nodo lungo il percorso di simulazione, senza che sia necessario assumere a priori una distribuzione gaussiana (Remy et al., 2009).

Dal punto di vista operativo, l'algoritmo visita in ordine casuale ciascun nodo della griglia di simulazione. Per ogni nodo vengono recuperati i dati di condizionamento, costituiti dai dati originali di pozzo nelle vicinanze e dai valori già simulati nei nodi precedenti, e viene definita la cdf locale con media e varianza determinate tramite kriging semplice. Un valore viene quindi estratto da tale distribuzione e aggiunto al set di dati di condizionamento per i nodi successivi. Il processo viene

ripetuto per ciascun nodo fino al completamento della realizzazione. L'intera procedura può essere iterata per generare un numero arbitrario di realizzazioni equiprobabili (Remy et al., 2009).

### 4.3 SISIM – Sequential Indicator Simulation

SISIM è un algoritmo di simulazione stocastica sequenziale progettato per la simulazione sia di variabili continue che di variabili categoriche, basato sul formalismo degli indicatori (Deutsch & Journel, 1992). A differenza di DSSIM, che opera direttamente sui valori della variabile continua, SISIM non stima un singolo valore in ciascun nodo, bensì costruisce una stima della distribuzione condizionata locale (ccdf) attraverso la codifica a indicatori dei dati di condizionamento. Nel caso di variabili categoriche, ogni dato viene trasformato in un valore binario per ciascuna categoria, pari a 1 se il dato appartiene alla categoria considerata, altrimenti 0, e la probabilità di appartenenza a ciascuna categoria viene stimata tramite Indicator kriging. L'insieme di queste stime definisce la ccdf locale, da cui viene estratto un valore simulato (Remy et al., 2009).

Anche SISIM, analogamente a DSSIM, non richiede alcuna assunzione sulla distribuzione dei dati. Questo lo rende adatto a situazioni in cui i dati presentano distribuzioni irregolari o asimmetriche, per le quali un approccio gaussiano risulterebbe inadeguato. Tuttavia, rispetto a DSSIM, SISIM richiede un maggiore sforzo nella modellazione del variogramma se si opta per definire un modello di variogramma distinto per ogni categoria di facies s.l. Nel presente lavoro è stata adottata l'opzione Full IK, nella quale viene definito e modellato un variogramma indipendente per ciascuna facies di modellazione, allo scopo di descrivere in modo più accurato la variabilità spaziale della proprietà ai diversi livelli della distribuzione. Questo approccio offre una rappresentazione più flessibile e dettagliata della struttura spaziale della variabilità simulata (Remy et al., 2009).

Dal punto di vista operativo, l'algoritmo visita in ordine casuale ciascun nodo della griglia di simulazione. Per ogni nodo vengono recuperati i dati di condizionamento vicini, trasformati in valori indicatori per ciascuna facies, e viene stimata la ccdf locale tramite Indicator kriging. Un valore viene quindi estratto da tale distribuzione e aggiunto al set di dati di condizionamento per i nodi successivi. Il processo viene ripetuto per ciascun nodo fino al completamento della realizzazione e può essere iterato per generare un numero arbitrario di realizzazioni equiprobabili (Remy et al., 2009).

#### 4.4.1 Simulazioni DSSIM di superfici stratigrafiche: PL1 e base della SGF

La prima fase della modellazione statica ha previsto la costruzione di una griglia cartesiana 2D all'interno del software SGeMS, definita in modo da coprire l'area di interesse dei pozzi analizzati. La scelta di una griglia bidimensionale è coerente con l'obiettivo di simulare la distribuzione areale di superfici stratigrafiche di riferimento, la PL1 e la base delle Ghiaie di Sergnano dove queste sono preservate su paleo-alti morfologici.

La griglia è stata impostata con una risoluzione spaziale di 100 m x 100 m per cella, su un dominio di 150 x 150 celle, per un'estensione totale dell'area modellata di 15 km x 15 km. L'origine (spigolo sud-ovest) della griglia è stata posizionata alle coordinate  $X = 518824$  m e  $Y = 5032860$  m (figura 13) in sistema di riferimento UTM, corrispondenti al centro della cella di origine, in modo da garantire che tutti e quattro i pozzi selezionati ricadessero all'interno del dominio di simulazione. La risoluzione di 100 m è stata ritenuta adeguata a rappresentare la variabilità spaziale delle superfici nell'area di studio, tenendo conto della densità e della distribuzione spaziale dei dati di condizionamento disponibili. Una risoluzione più fine non sarebbe stata giustificata dal numero limitato di pozzi disponibili e dalla risoluzione orizzontale della sismica a riflessione, mentre una risoluzione più grossolana avrebbe comportato una perdita di dettaglio nella rappresentazione delle superfici simulate.

Successivamente sono stati importati nella griglia i dati di condizionamento necessari alla simulazione, organizzati sotto forma di pointset in SGeMS. I pointset rappresentano insiemi di punti georeferenziati a cui è associato il valore della proprietà di interesse, in questo caso la profondità ( $z$ , figura 14) della superficie stratigrafica nel punto conosciuto, e costituiscono i vincoli che l'algoritmo di simulazione deve rispettare durante la generazione delle realizzazioni.

Sono stati importati tre pointset distinti (figura 16):

- I primi due comprendono i dati di pozzo, ovvero le profondità della base delle Ghiaie di Sergnano e della superficie PL1 ricavate dai 4 pozzi selezionati attraverso l'elaborazione descritta nel capitolo precedente. Sebbene numericamente limitati, questi dati rappresentano i vincoli affidabili in quanto derivati da misurazioni dirette in pozzo.
- Il terzo pointset comprende le quote della PL1 derivata dall'interpretazione sismica del lavoro di Barrera Acosta (2025), precedentemente citato. Questo dataset, pur estendendosi spazialmente oltre i limiti della griglia di simulazione, fornisce all'interno dell'area modellata una copertura areale significativamente più densa rispetto ai soli dati di pozzo, consentendo di vincolare la simulazione della superficie PL1 in zone non campionate da pozzi e di ridurre

l'incertezza delle aree dove non ci sono dati di pozzo. Va sottolineato che i dati sismici, essendo derivati da un'interpretazione indiretta, presentano comunque un'incertezza, ma la loro densità spaziale li rende un contributo fondamentale per migliorare la qualità del condizionamento areale della simulazione.

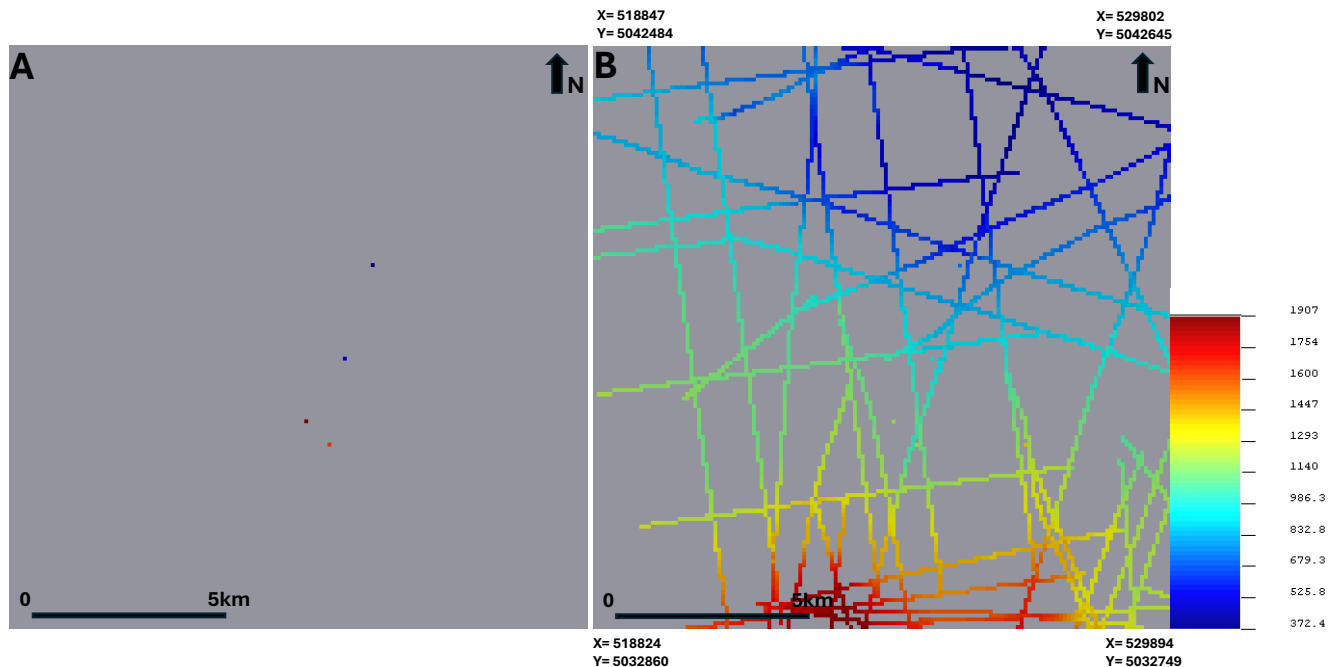


Figura 16: A) Griglia cartesiana 2D con i pointset della base delle Ghiaie di Sergnano della superficie PL1 ricavati dai 4 pozzi selezionati: nella rappresentazione. B) Distribuzione areale del pointset della superficie PL1 derivata dall'interpretazione sismica (Barrera Acosta, 2025). La scala di colore esprime la profondità in metri.

Prima di procedere alla simulazione, è stata condotta un'analisi esplorativa della distribuzione statistica dei dati di condizionamento della PL1 sismica mediante la costruzione dell'istogramma della variabile, generato automaticamente da SGeMS sul pointset importato (figura 17).

L'istogramma basato su 3535 punti derivati dall'interpretazione sismica evidenzia una distribuzione con valori compresi tra un minimo di 372.35 m e un massimo di 1907.3 m. La forma della distribuzione riflette la variabilità areale della superficie PL1 nell'area coperta dai dati sismici, documentando l'ampio intervallo di profondità della superficie, conseguenza della morfologia articolata del substrato pre-pliocenico con la presenza di alti e bassi strutturali. Questi parametri statistici sono stati utilizzati per parametrizzare la ccdf locale dell'algoritmo DSSIM durante la simulazione.

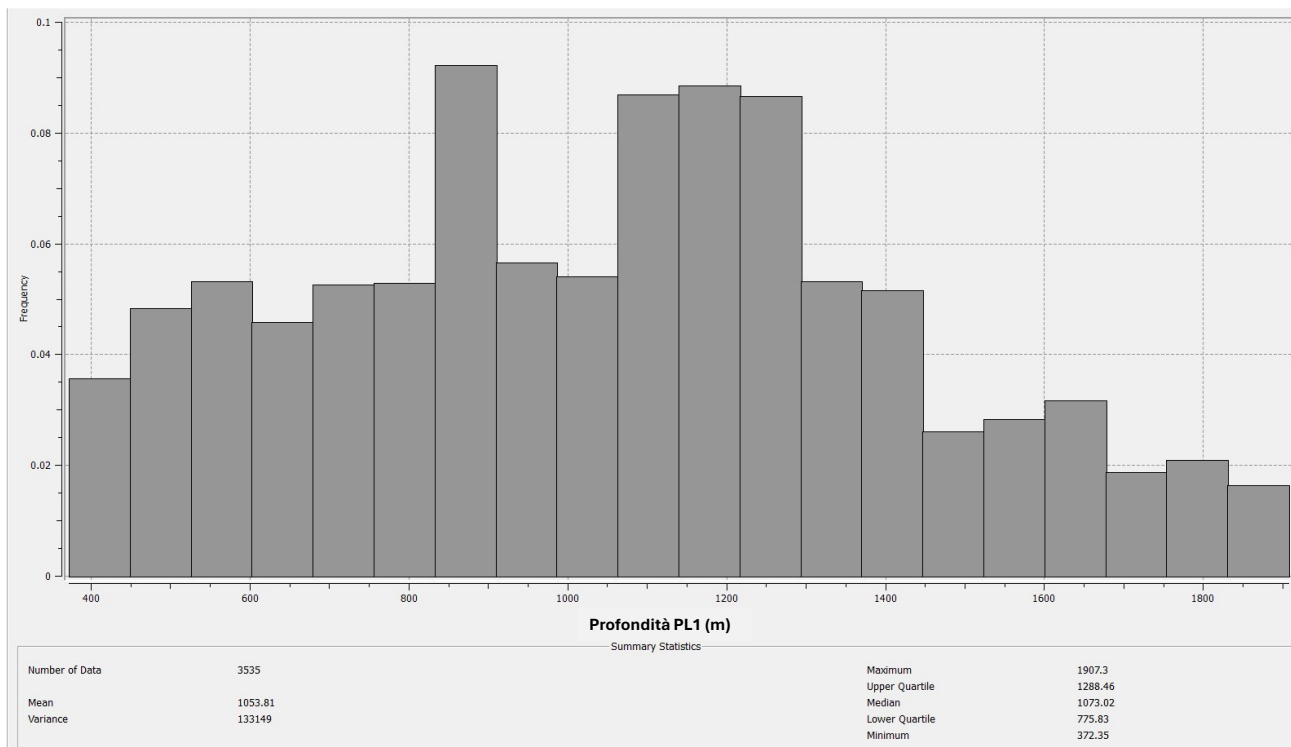


Figura 17: Istogramma della superficie PL1 nella sismica sull'area di studio (Barrera Acosta, 2025). La distribuzione, basata su 3535 punti, presenta una media dei valori di profondità dal piano campagna di 1053.81m e valori compresi tra 372.35 e 1907.3m

Successivamente è stata condotta un'analisi geostatistica del variogramma sperimentale della PL1 in direzione Est-Ovest (figura 18). Come discusso in precedenza, sulla direzione Nord-Sud non è stato possibile definire un modello di variogramma in quanto la PL1 presenta in tale direzione una tendenza sistematica di approfondimento, che impedisce la definizione di un range di correlazione significativo. Il variogramma sperimentale in direzione E-O è stato fittato con un modello sferico, sin quanto descrive una struttura di correlazione spaziale che cresce regolarmente con la distanza fino a raggiungere il sill, dopodiché rimane costante. Il modello è stato impostato privo di effetto nugget (nugget = 0), indicando che non è stata rilevata variabilità a scala inferiore alla distanza minima di campionamento e che i dati presentano una continuità spaziale coerente fino alle distanze più piccole osservabili.

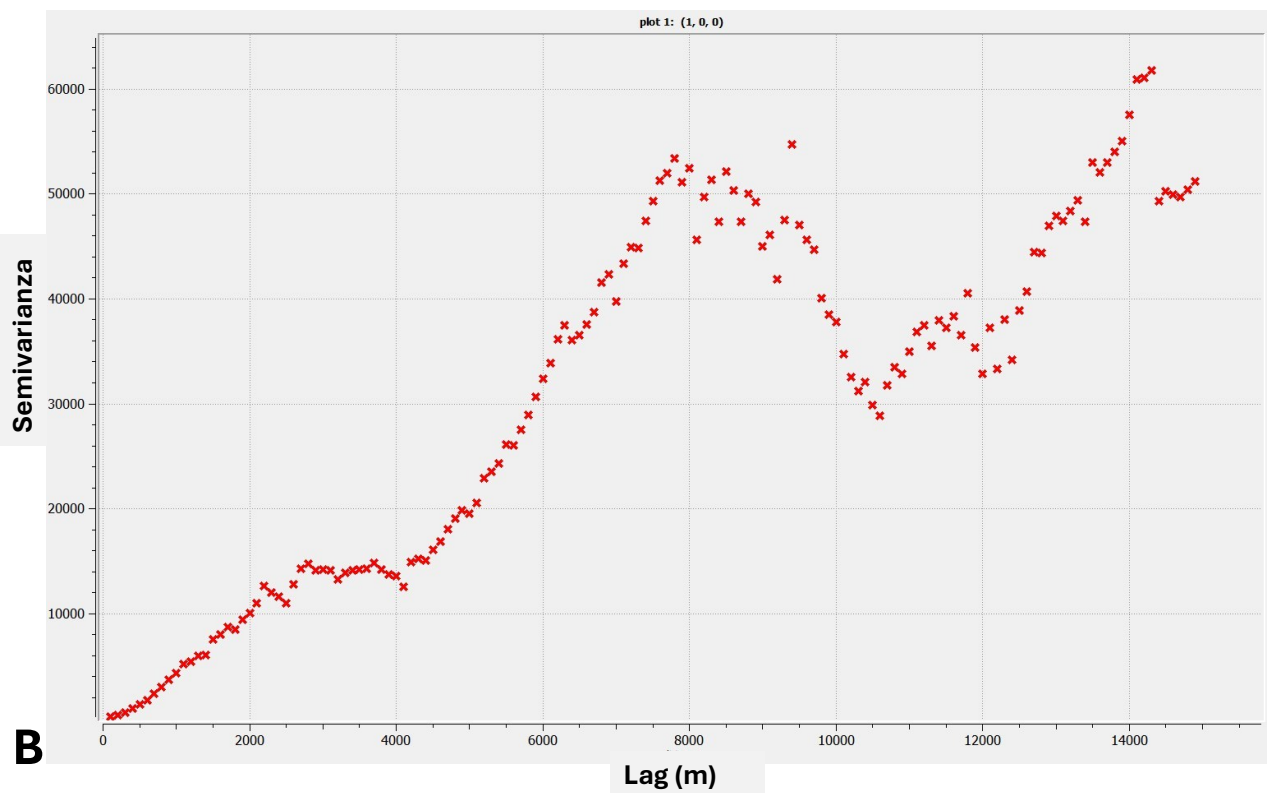
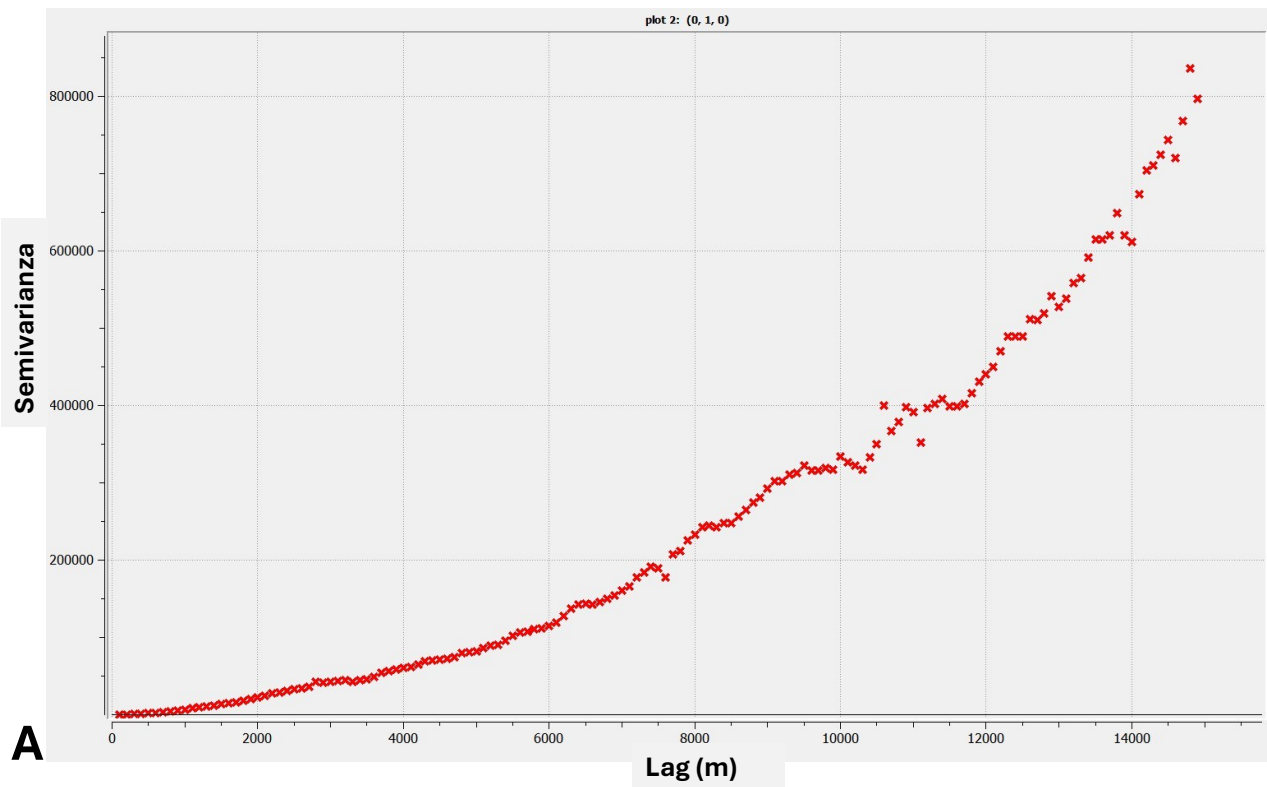


Figura 18: Variogrammi sperimentali della PL1: A) direzione N-S (0,1,0), andamento stazionario dominato dalla tendenza di approfondimento verso sud; B) direzione E-O (1,0,0), utilizzato per la modellazione del variogramma sferico nella simulazione DSSIM.

I parametri del modello di variogramma sono sintetizzati in figura 19:

- range massimo = 10 000 m lungo X, corrisponde alla direzione di massima continuità spaziale della PL1 ed è maggiore della griglia
- range medio = 7 000 m lungo Y, rappresenta la direzione di minore continuità all'interno del piano orizzontale, ottenuto dal variogramma
- range minimo = 1 m lungo Z, valore formale che indica le bidimensionalità della simulazione.

	Max	Med	Min
<b>Ranges</b>	10000	7000	1

	Azimuth	Dip	Rake
<b>Angles</b>	0	0	0

Figura 19: Parametri del modello di variogramma sferico utilizzato nella simulazione DSSIM della PL1: A) impostazioni generali (nugget = 0, contribution = 1, tipo sferico); B) parametri geometrici (range max = 10000 m, range med = 7000 m, range min = 1 m, azimuth = dip = rake = 0°).

L'ellissoide di ricerca è stato impostato con range massimo e medio pari a 10 000 m nelle direzioni X e Y, e range minimo 1 m lungo Z. i valori scelti garantiscono che in ciascun nodo vengano considerati tutti i dati di condizionamento spazialmente correlati disponibili nell'area di studio. Un ellissoide di ricerca troppo piccolo rischierebbe di escludere dati rilevanti.

Per gestire la tendenza di approfondimento della PL1 in direzione Nord-Sud, è stato adottato un kriging with trend assumendo un trend lungo Y. In SGeMS questa opzione consente di modellare esplicitamente una tendenza lineare nella direzione Y della griglia. Questo approccio consente all'algoritmo di separare la componente di tendenza regionale, che descrive l'approfondimento della PL1 sulla direttrice N-S, dalla variabilità residuale locale, quest'ultima simulata attraverso il modello di variogramma definito in direzione E-O. Il risultato finale è una simulazione che riproduce la tendenza strutturale regionale e la variabilità locale della superficie PL1 (figura 20).

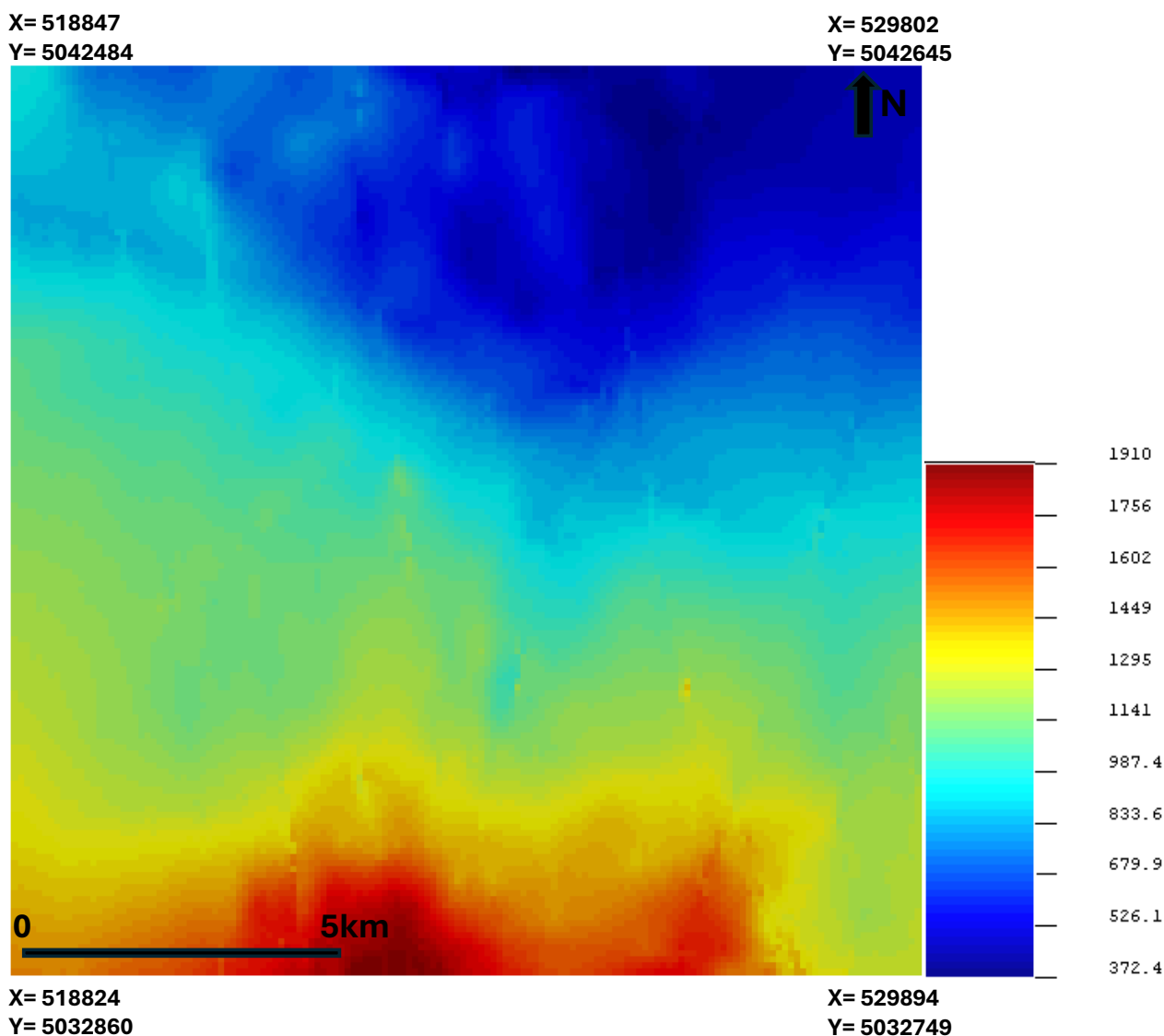


Figura 20: Risultato della simulazione DSSIM della superficie PL1 nell'area di studio. La scala cromatica indica la profondità della superficie in metri, con valori compresi tra 372 m (blu scuro, zone settentrionali più superficiali) e 1910 m (rosso, zone meridionali più profonde).

La mappa ottenuta dalla simulazione DSSIM della superficie PL1 (figura 20) mostra la distribuzione areale della profondità della superficie nell'area di studio, rappresentata attraverso una scala cromatica che va dal blu scuro, corrispondente alle profondità minori (minimo, circa 372 m, zone settentrionali), al rosso, corrispondente alle profondità maggiori (massimo, circa 1910 m, zone meridionali).

Il risultato evidenzia con chiarezza la tendenza regionale di approfondimento da nord verso sud, gestito durante la simulazione tramite il kriging with trend lungo Y e coerente con quanto atteso dalla regressione lineare discussa nel capitolo precedente. Nella porzione settentrionale dell'area la PL1 si trova a profondità minori, rappresentate dai toni blu intenso, mentre procedendo verso sud la superficie si approfondisce progressivamente raggiungendo i valori massimi evidenziati dai toni rosso-arancio nella fascia meridionale nella mappa (figura 20).

Sovrapposta a questa tendenza regionale, la simulazione restituisce una variabilità locale significativa, visibile come alternanza di zone a profondità relativamente maggiore e minore che si sviluppano con un'elongazione prevalentemente in direzione Nord-Sud, coerentemente con il range di correlazione del variogramma modellato in questa direzione (20000 m). Questa variabilità riflette la morfologia articolata del substrato pre-pliocenico, con la presenza di alti e bassi morfologici di scala chilometrica associati alle incisioni messiniane.

In particolare, si osservano nella porzione centrale della mappa alcune zone di minore profondità, evidenziate dai toni ciano-verde che si protendono verso sud rispetto alla fascia blu scuro settentrionale, interpretabili come la proiezione areale degli alti morfologici del substrato messiniano, ovvero le zone dove la PL1 si trova più superficiale rispetto alle aree circostanti.

Il risultato della simulazione costituisce quindi una rappresentazione spazialmente continua e geologicamente coerente della superficie PL1, che integra la tendenza strutturale regionale con la variabilità locale di scala chilometrica.

La seconda fase della simulazione con algoritmo DSSIM ha riguardato la base delle Ghiaie di Sergnano, ovvero la superficie corrispondente all'unconformity messiniana più antica sottostante gli alti morfologici. Sono state generate 50 realizzazioni equiprobabili della superficie, condizionate ai dati di pozzo disponibili, al fine di quantificare l'incertezza associata alla distribuzione spaziale della base delle ghiaie nell'area di studio e di fornire un insieme statisticamente rappresentativo di scenari geologici per il successivo calcolo dei volumi stratigrafici che contribuiscono alle stime di Heat in Place.

A differenza della simulazione della PL1, per la quale era disponibile un dataset sismico denso (3535 punti), la simulazione della base delle Ghiaie di Sergnano dispone di soli 4 punti di condizionamento, corrispondenti ai 4 pozzi utilizzabili. Con un numero così limitato di dati non è possibile calcolare un variogramma sperimentale affidabile, in quanto il numero di coppie di punti disponibili è insufficiente per stimare la struttura di correlazione spaziale della variabile. Per questo motivo il range del variogramma è stato mutuato dal lavoro di Pantopoulos et al. (2025), condotto nell'area di Treviglio, geograficamente prossima all'area di studio e dove la stessa superficie è stata caratterizzata su un dataset più ampio e rappresentativo. In tale lavoro, il range di correlazione spaziale della base delle Ghiaie di Sergnano in corrispondenza degli alti morfologici è stato stimato in circa 8000 m per la

direzione Est-Ovest (range intermedio), valore adottato nel presente lavoro come input per il modello di variogramma.

La scelta di trasferire il range da un'area adiacente è geologicamente giustificata dalla natura della superficie simulata: la base delle Ghiaie di Sergnano riflette la paleotopografia dell'incisione messiniana, la cui lunghezza d'onda caratteristica, ovvero la distanza tipica tra alti e bassi morfologici del substrato eroso, è controllata dalla scala delle strutture tettoniche sepolte del Bacino Padano e dalla separazione tra i bacini idrografici dei sistemi alluvionali che hanno inciso il substrato miocenico. È ragionevole assumere che tale lunghezza d'onda sia comparabile tra l'area di Treviglio e l'area di studio, rendendo il range mutuato da Pantopoulos et al. (2025), un'approssimazione geologicamente accettabile. Va tuttavia sottolineato che questa scelta introduce un'incertezza aggiuntiva nella simulazione, in quanto il range effettivo nell'area specifica non è direttamente verificabile con i soli quattro punti disponibili.

Analogamente alla simulazione della PL1, anche per la base delle Ghiaie di Sergnano è stato adottato un modello sferico privo di effetto nugget, con range intermedio 8000 m in direzione X (Est-Ovest) e range minimo di 1 m in direzione Z. In direzione Nord-Sud, la presenza di una tendenza sistematica di approfondimento da Nord verso Sud, coerente con quello osservato per la PL1, rende non stazionaria la variabile e impedisce una stima affidabile del range del variogramma in questa direzione. Per coerenza con il modello adottato per la PL1, è stato mantenuto lo stesso valore di range massimo di 10000 m anche per questa superficie. Gli angoli di orientazione del modello sono stati impostati con azimuth = 0°.

La determinazione dei valori estremi della distribuzione (minimo e massimo) utilizzati per parametrizzare la ccdf locale dell'algoritmo DSSIM ha seguito un approccio diverso rispetto alla simulazione della superficie PL1 dove erano disponibili migliaia di punti associati al dato di sismica a riflessione. Disponendo di soli 4 pozzi, i valori osservati della base delle ghiaie, compresi tra 918 m (Cernusco\_007) e 1493 m (Cernusco:002), non rappresentano in modo adeguato il range di variazione atteso sull'intera area della griglia di simulazione, in quanto campionano solo una porzione limitata del dominio spaziale.

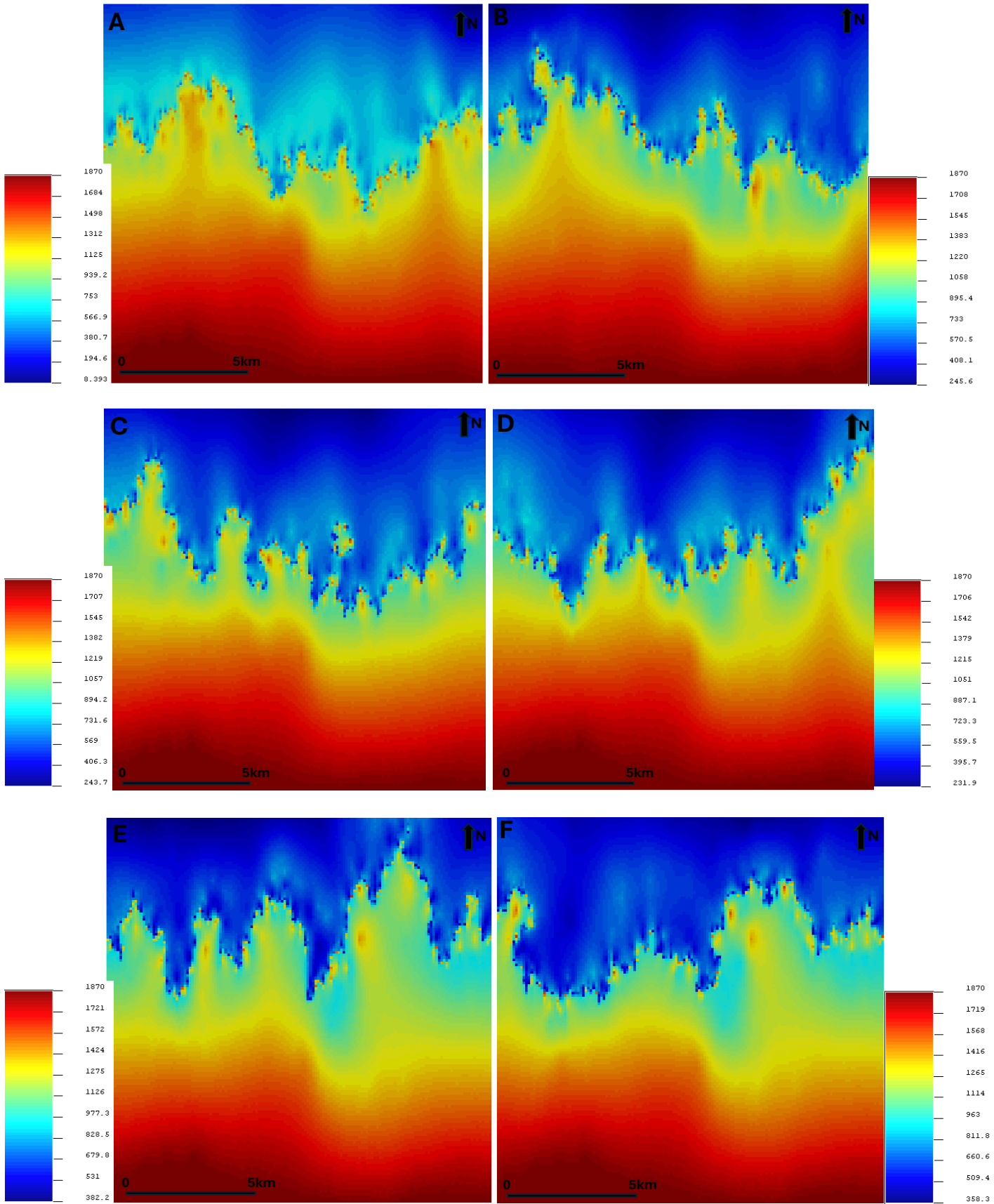
Per ottenere una stima più rappresentativa dei valori estremi attesi sull'intera area modellata, sono stati utilizzati i valori calcolati attraverso la regressione lineare della tendenza di approfondimento N-S descritta nel capitolo precedente (figura 15; equazione:  $y = -0,1244x + 627957$ ), applicata alle coordinate Y dei due estremi della griglia di simulazione:

- all'estremo sud della griglia (Y=5032860m corrispondente all'origine della griglia), la tendenza fornisce un valore di 1869 m adottato come valore massimo della distribuzione;
- all'estremo nord della griglia (Y=5047860m corrispondente all'estremo opposto) il trend fornisce un valore teorico di 8,4 m, impostato come valore minimo.

Va precisato che il valore minimo di 8,4 m rappresenta un'estrapolazione del trend nella porzione settentrionale della griglia e non corrisponde a un valore geologicamente osservato, configurandosi come limite teorico inferiore della distribuzione modellata. Questo valore va quindi interpretato come limite della ccdf necessario per consentire all'algoritmo di simulare correttamente le zone settentrionali della griglia dove la base delle ghiaie è attesa a profondità minori.

Anche per questa simulazione è stato adottato il kriging with trend lungo Y, per le stesse ragioni metodologiche descritte per la PL1: la presenza della tendenza sistematica di approfondimento in direzione N-S rende necessario separare la componente regionale della variabilità locale, consentendo all'algoritmo di simulare correttamente entrambe le componenti in modo indipendente e coerente con i dati di condizionamento disponibili (Remy et al., 2009).

Le mappe di figura 21 mostrano 12 realizzazioni equiprobabili della simulazione DSSIM della base delle Ghiaie di Sergnano (A-N), rappresentate attraverso una scala cromatica rainbow con massimo fisso a 1870 m (rosso, zone meridionali più profonde) e minimo variabile per ciascuna realizzazione (blu scuro, zone settentrionali meno profonde). I valori minimi di ciascuna realizzazione sono riportati nelle didascalie individuali.



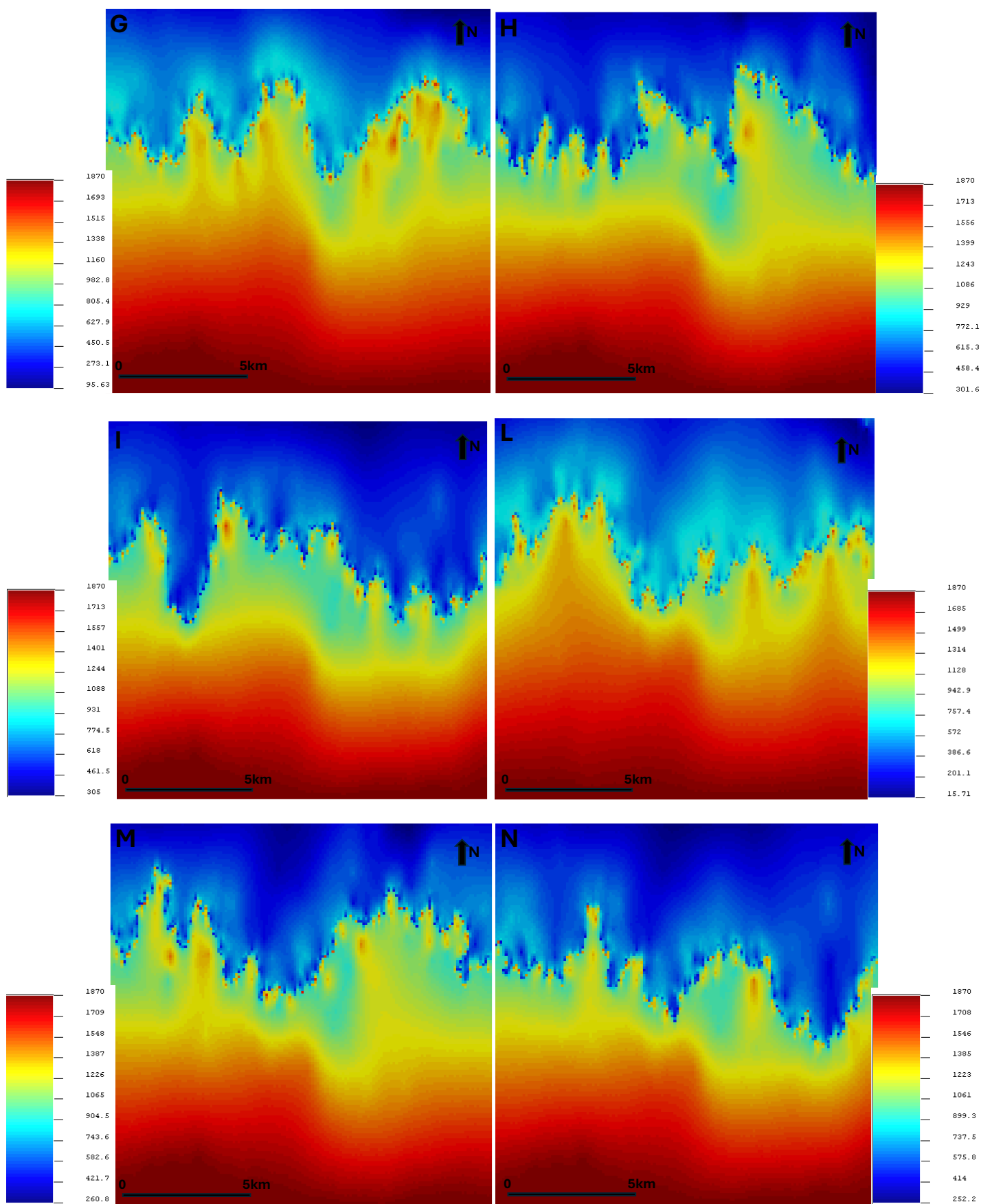


Figura 21: Selezione di 12 realizzazioni equiprobabili (A-N) della simulazione DSSIM della base delle Ghiaie di Sergnano nell'area di studio. La scala cromatica rainbow indica la profondità della superficie in metri, con massimo fisso a 1870m (rosso) e minimo variabile per ciascuna realizzazione (blu scuro): A) min = 8,393 m; B) min = 245,64 m; C) min = 243,71 m; D) min = 232,88 m; E) min = 382,20 m; F) min = 358,27 m; G) min = 95,63 m; H) min = 301,60 m; I) min = 305,01 m; L) min = 15,71 m; M) min = 260,80 m; N) min = 252,21 m.

Tutte le realizzazioni condividono alcuni elementi strutturali fondamentali, coerenti con i dati di condizionamento:

- La tendenza regionale di approfondimento da nord verso sud è chiaramente riconoscibile in tutte le realizzazioni, con la porzione settentrionale dominata dai toni blu (profondità minori) e quella meridionale dai toni rosso-arancio (profondità maggiori). Questo riflette il kriging with trend lungo Y applicato.
- La fascia di transizione centrale, compresa tra le zone settentrionali poco profonde e quelle meridionali più profonde, presenta in tutte le realizzazioni un andamento irregolare e frastagliato orientato prevalentemente Est-Ovest, con alternanza di protuberanze verso nord (alti morfologici che si protendono verso l'alto) e rientranze verso sud (bassi morfologici, che si approfondiscono). Questa geometria riflette la paleotopografia dell'incisione messiniana iniziale, caratterizzata dalla presenza di bassi e alti topografici con lunghezza d'onda caratteristica di circa 8000 m in direzione E-O.
- La porzione meridionale della mappa mostra in tutte le realizzazioni un andamento più omogeneo e regolare con valori di profondità elevati e variabilità locale ridotta, espressione di un'area di basso strutturale e paleotopografico esteso e continuo.

Le differenze tra le singole realizzazioni riflettono l'incertezza geologica nelle zone non vincolate da dati di condizionamento, ovvero nelle aree interpozze. Complessivamente, l'insieme delle 50 realizzazioni, di cui 12 mostrate a titolo esemplificativo (figura 21), consente di quantificare l'incertezza associata alla distribuzione spaziale della base delle Ghiaie di Sergnano e di propagarla nel successivo calcolo dei volumi considerati per la stima di Heat in Place, fornendo una stima probabilistica della risorsa geotermica più informativa rispetto a una singola soluzione deterministica.

A partire dalle 50 realizzazioni equiprobabili della base delle Ghiaie di Sergnano generate con DSSIM, è stata prodotta una mappa della loro media (E-type, figura 22) mediante l'algoritmo PostSim<sup>3</sup> di SGeMS. La mappa E-type rappresenta il valore atteso della profondità della base delle ghiaie in ciascun nodo della griglia, calcolato come media aritmetica dei valori corrispondenti nelle 50 realizzazioni. A differenza delle singole realizzazioni stocastiche, che presentano una variabilità locale elevata e geometrie irregolari della fascia di transizione, la mappa E-type fornisce una rappresentazione attenuata e statistica della superficie, in cui l'incertezza locale viene mediata e il

---

<sup>3</sup> PostSim: PostSim è un algoritmo di post-elaborazione implementato in SGeMS che consente di calcolare statistiche riassuntive a partire da un insieme di realizzazioni stocastiche. Dato un set di L realizzazioni equiprobabili di una proprietà, PostSim calcola per ciascun nodo della griglia statistiche quali la media, la varianza e altri fattori della distribuzione dei valori simulati. La mappa E-type rappresenta il valore atteso della proprietà nell'area di studio, analogamente al risultato di kriging ma con il vantaggio di essere derivato direttamente dall'insieme delle realizzazioni stocastiche (Remy et al., 2009).

segnale geologico regionale emerge con maggiore chiarezza. È importante sottolineare che la mappa E-type non costituisce una realizzazione stocastica: perde la variabilità locale caratteristica di ciascuna di esse.

La mappa E-type della base delle Ghiaie di Sergnano (figura 22) mostra la distribuzione areale del valore atteso della profondità della superficie nell'area di studio, con valori compresi tra un minimo di 356,9 m (blu scuro) e un massimo di 1870 m (rosso).

Rispetto alle singole realizzazioni, la mappa E-type presenta una fascia di transizione centrale significativamente più regolare e continua, priva delle geometrie irregolare delle singole realizzazioni stocastiche. Questo è un effetto atteso della media: le strutture locali che nelle singole realizzazioni appaiono in posizioni diverse si cancellano reciprocamente nel processo di mediazione, producendo una superficie più omogenea.

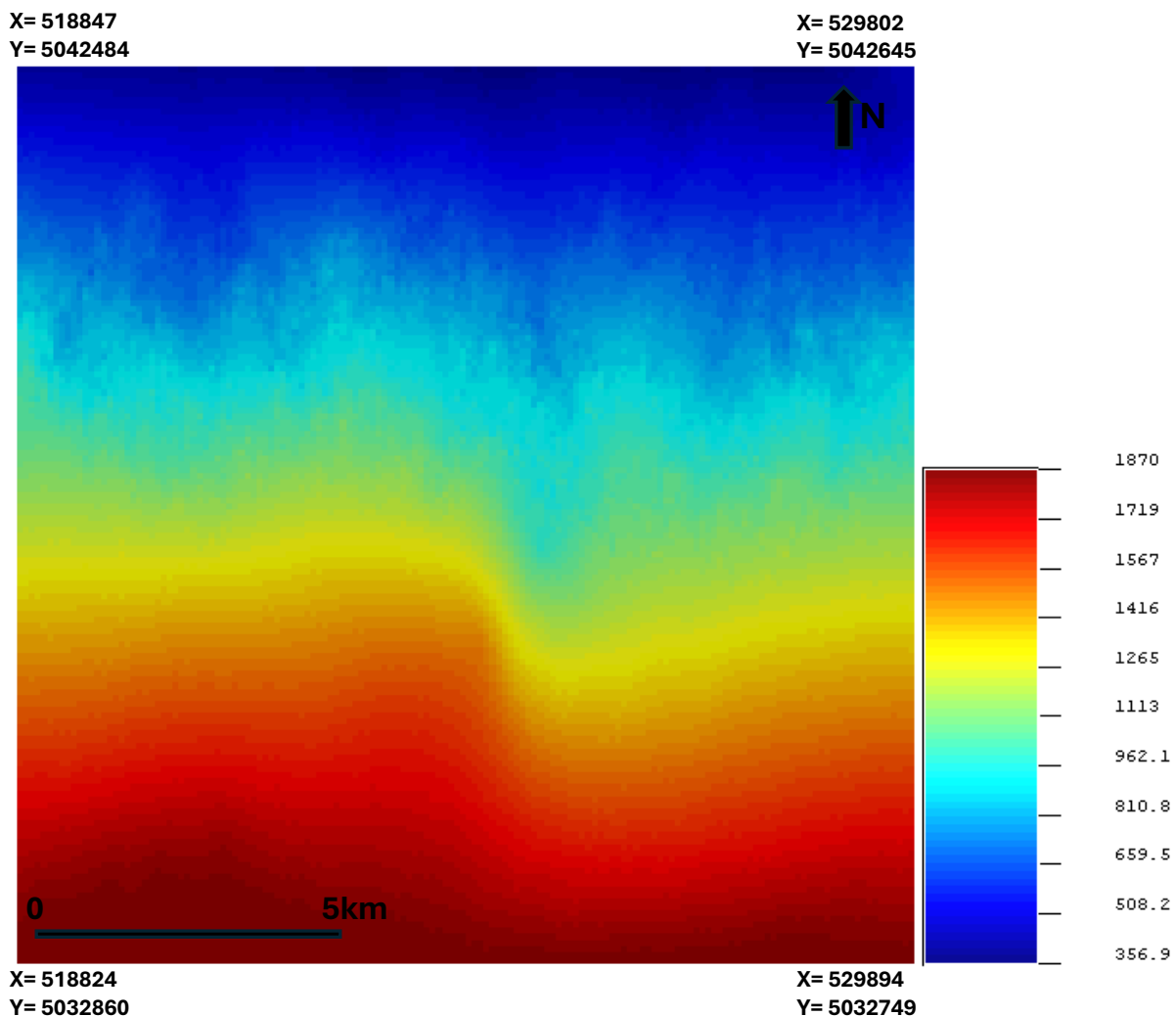


Figura 22: Mappa E-type della base delle Ghiaie di Sergnano, ottenuta come media aritmetica delle 50 realizzazioni DSSIM mediante l'algoritmo PostSim di SGeMS. La scala cromatica indica il valore atteso della profondità in metri (min =356,87 m, blu scuro; max =1869,99 m, rosso). La mappa evidenzia la tendenza regionale di approfondimento da nord verso sud e la variabilità locale residua in direzione Est-Ovest associata alla paleotopografia messiniana.

## 4.4.2 Modellazione degli spessori della SGF e stime dei volumi

A partire dalle 50 realizzazioni della base delle Ghiaie di Sergnano e della simulazione DSSIM della superficie PL1, è stato calcolato lo spessore delle Ghiaie di Sergnano in corrispondenza degli alti morfologici per ciascuna delle 50 realizzazioni, ottenendo un insieme di 50 mappe equiprobabili (figura 24) dei valori di spessore che consentono di quantificare l'incertezza associata alla stima volumetrica del corpo ghiaioso.

Il calcolo è stato eseguito mediante uno script Python (figura 23) implementato nell'editor di script di SGeMS, che opera sulla griglia "Area\_Pozzi": per ciascuna delle 50 realizzazioni della base delle Ghiaie di Sergnano viene calcolata cella per cella la differenza rispetto alla superficie PL1 simulata, secondo l'operazione **Spessore = Base ghiaie – PL1**.

Questa operazione è geometricamente corretta in quanto:

- negli alti morfologici, la base delle ghiaie si trova a profondità maggiore rispetto alla PL1, che coincide con il tetto delle ghiaie, producendo una differenza positiva che rappresenta lo spessore reale del corpo ghiaioso.
- Nei bassi morfologici, la PL1 si trova a profondità maggiore rispetto alla base delle ghiaie simulate, producendo una differenza negativa che non ha significato fisico in quanto in queste zone il corpo ghiaioso non è geometricamente definito nei termini utilizzati per gli alti morfologici.

I valori negativi, corrispondenti alle zone di basso morfologico, vengono quindi convertiti in zero, escludendo di fatto tali aree dal calcolo dello spessore e circoscrivendo l'analisi alle sole zone di alto morfologico dove la geometria del corpo ghiaioso è geologicamente significativa e verificabile con i dati di pozzo disponibili.

Il risultato di ciascuna iterazione viene salvato come una nuova proprietà della griglia, producendo un totale di 50 mappe di spessore equiprobabili. Va precisato che per il calcolo dello spessore è stata utilizzata una singola realizzazione della PL1 come riferimento fisso per tutte le 50 differenze, scelta metodologica che consente di isolare l'incertezza legata alla variabilità della base delle ghiaie rispetto a quella della PL1, la cui simulazione è maggiormente vincolata dalla disponibilità dei dati sismici densi di Barrera Acosta (2025).

```

import sgems

# Proprietà PL1 (sempre la stessa)
pl1 = sgems.get_property('Area_Pozzi', 'PL1_DSSIM_real0')

# Ciclo sulle 50 simulazioni
for r in range(50):
    prop_name = 'Base_Ghiaie_DSSIM_real' + str(r)
    base = sgems.get_property('Area_Pozzi', prop_name)

    diff = [0] * len(base)

    for i in range(len(base)):
        val = base[i] - pl1[i]

        if val < 0:
            val = 0

        diff[i] = val

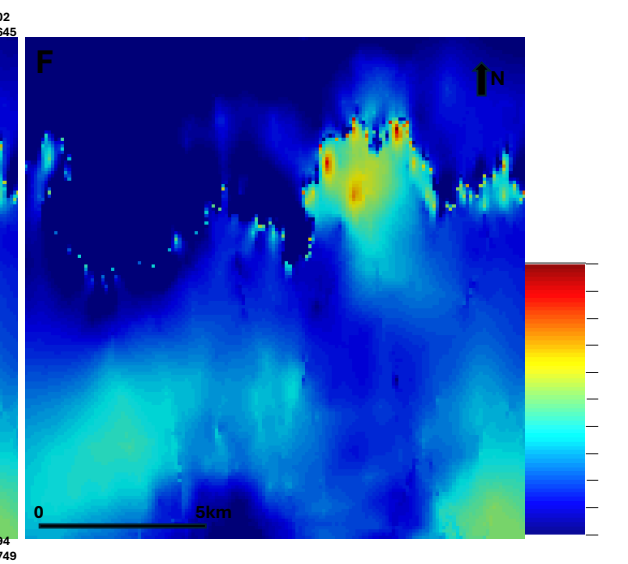
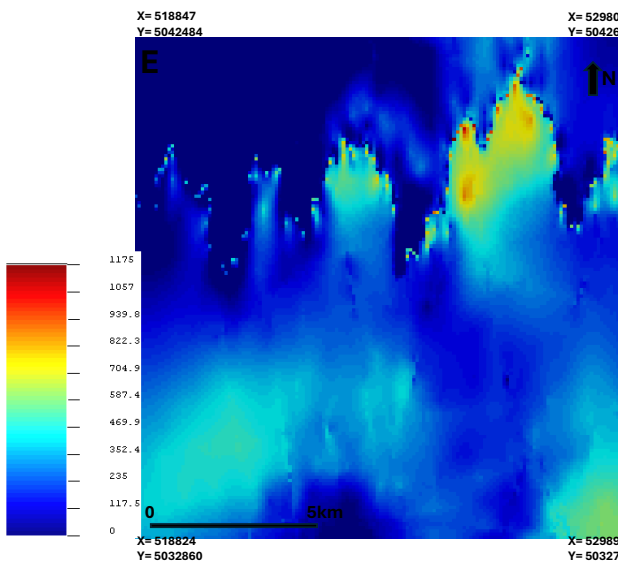
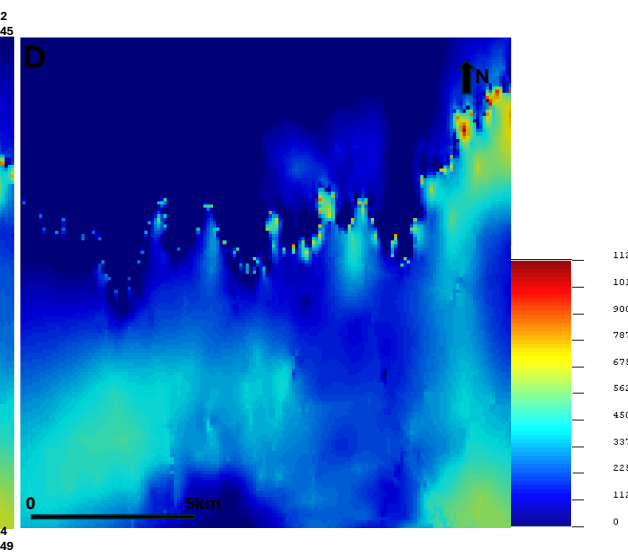
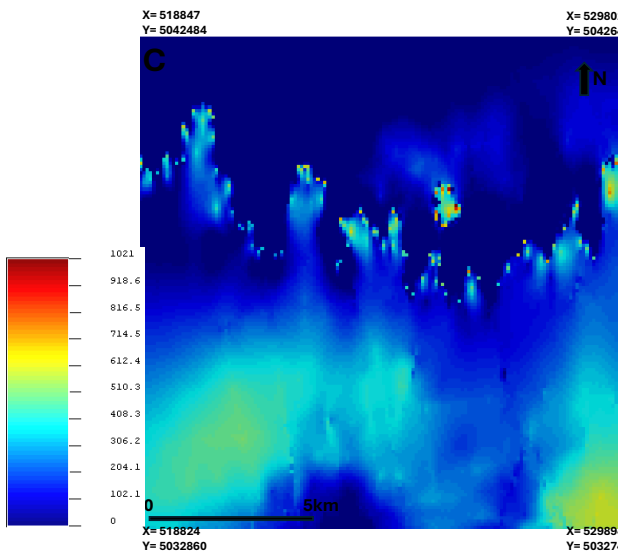
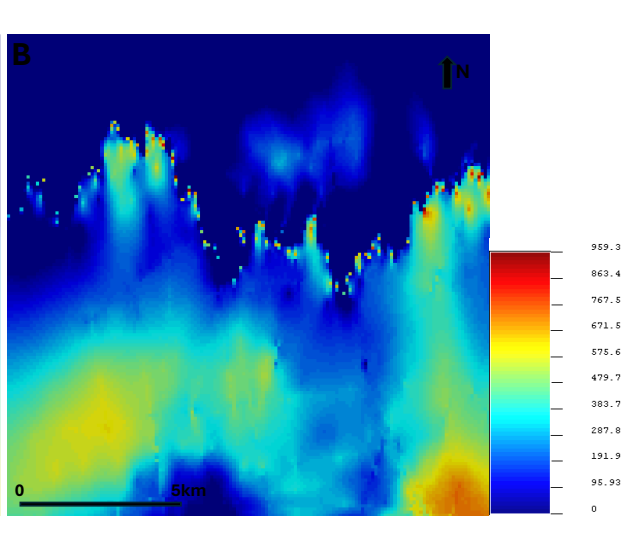
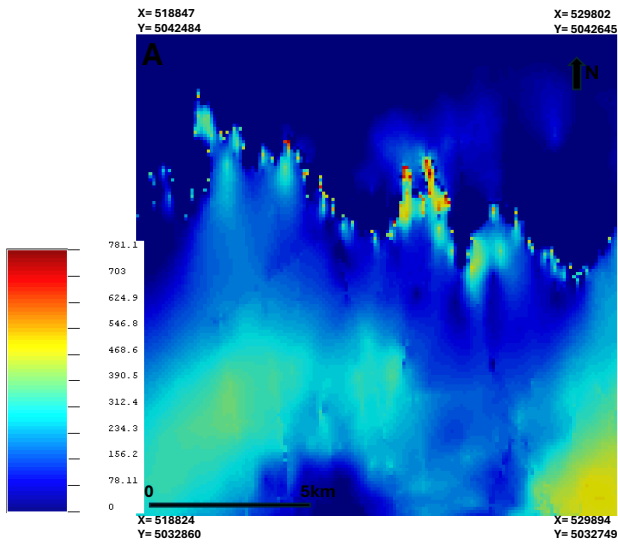
    # Nome della nuova proprietà
    out_name = 'Diff_BaseGhiaie_PL1_real' + str(r)

    sgems.set_property('Area_Pozzi', out_name, diff)

# Mostra l'ultima proprietà creata
sgems.execute('DisplayObject Area_Pozzi::Diff_BaseGhiaie_PL1_real49')

```

*Figura 23: Script Python utilizzato in SGeMS per il calcolo delle 50 mappe di spessore delle Ghiaie di Sergnano. Per ciascuna realizzazione viene calcolata la differenza Base ghiaie - PL1, con conversione a zero dei valori negativi corrispondenti ai bassi morfologici.*



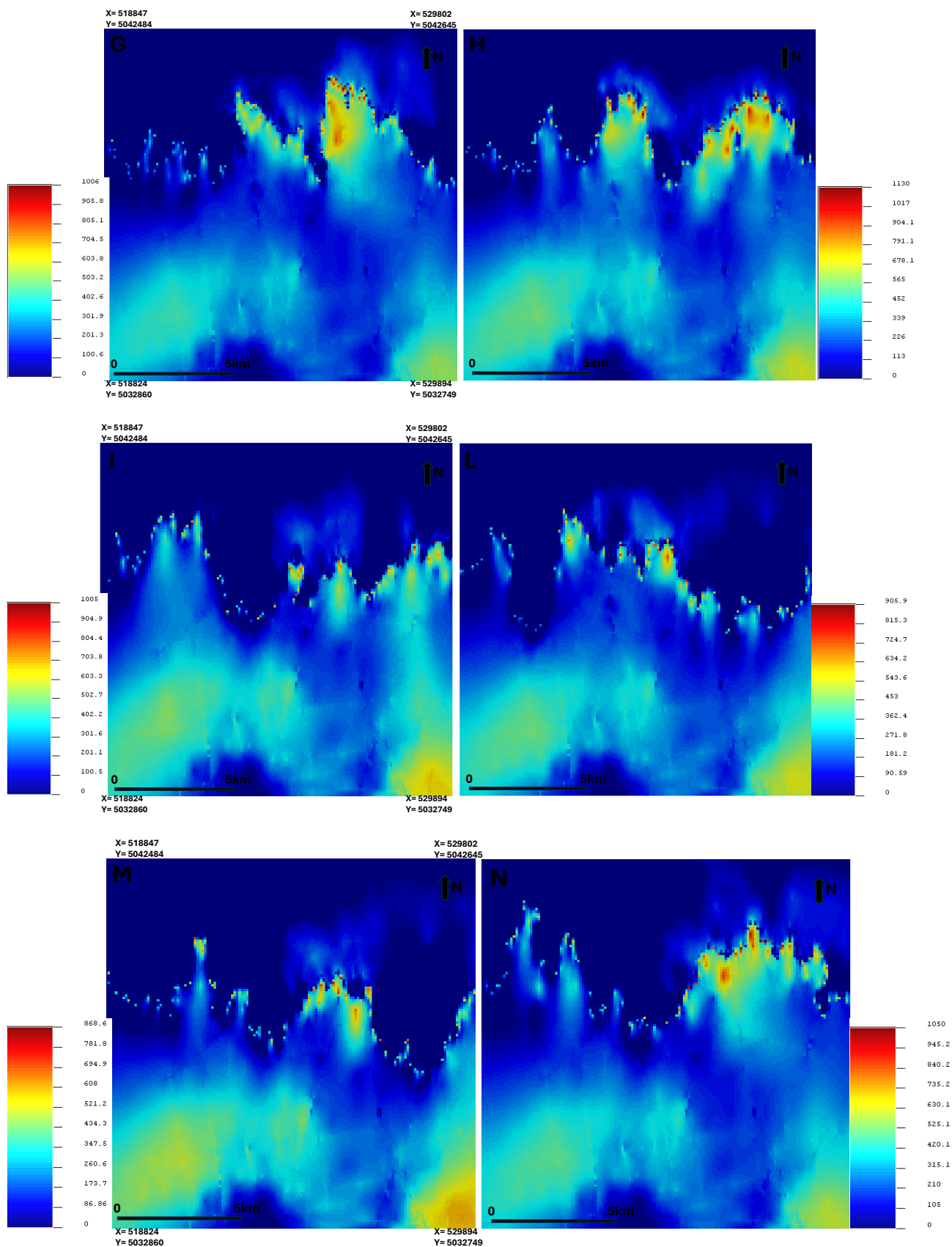


Figura 24: Selezione di 12 realizzazioni equiprobabili delle mappe di spessore delle Ghaie di Sergnano negli alti morfologici: A) max = 781,07 m; B) max = 959,32 m; C) max = 1020,68 m; D) max = 1125,26 m; E) max = 1174,77 m; F) max = 1168,98 m; G) max = 1006,41 m; H) max = 1130,09 m; I) max = 1005,49 m; L) max = 905,93 m; M) max = 868,64 m; N) max = 1050,24 m. La scala cromatica (visualizzata in figura come esempio della realizzazione N) va da blu scuro (spessore = 0m, zone di basso morfologico) a rosso (spessore massimo, variabile per ciascuna realizzazione). Le mappe mostrano la distribuzione spaziale discontinua dei corpi ghiaiosi in corrispondenza degli alti morfologici del substrato messiniano, con la variabilità tra le realizzazioni che quantifica l'incertezza geologica associata alla stima dello spessore.

Le mappe in figura 24 mostrano 12 realizzazioni equiprobabili dello spessore delle Ghiaie di Sergnano in corrispondenza degli alti morfologici (A-N), ottenute come differenza tra la profondità della base delle ghiaie simulata con DSSIM e la superficie PL1, con conversione a zero dei valori negativi corrispondenti ai bassi morfologici. La scala cromatica va dal blu scuro (spessore = 0 m, zone di basso morfologico o assenza di ghiaie) al rosso (spessore massimo, variabile da realizzazione a realizzazione, corrispondenti agli alti morfologici), con toni intermedi corrispondenti a spessori crescenti.

Tutte le realizzazioni mostrano una struttura spaziale coerente, riconducibile alla geometria della paleotopografia messiniana e ai dati di condizionamento disponibili:

- La distribuzione degli spessori è fortemente controllata dalla morfologia delle successioni messiniane sin-evaporitiche: gli spessori maggiori, evidenziati dai toni giallo-arancio-rosso, si concentrano in corrispondenza degli alti morfologici, ovvero nelle zone dove la base delle ghiaie si trova significativamente al di sotto della PL1, mentre nelle zone di basso morfologico lo spessore è zero.
- La geometria della zona a spessore non nullo presenta in tutte le realizzazioni un andamento frastagliato e discontinuo in direzione Est-Ovest, con una serie di corpi isolati o semi-connessi che si sviluppano lungo una fascia sub-orizzontale nella porzione centrale-settentrionale della mappa. Questa geometria riflette direttamente la morfologia della fascia di transizione osservata nelle mappe della base delle ghiaie.
- In tutte le realizzazioni sono visibili corpi ghiaiosi isolati di forma approssimativamente ellittica nella porzione settentrionale della mappa, corrispondenti ad alti morfologici localizzati del substrato messiniano. La posizione di questi corpi varia da realizzazione a realizzazione, riflettendo l'incertezza sulla localizzazione esatta degli alti morfologici nelle zone non campionate da pozzi.

Le principali differenze tra le singole realizzazioni riguardano:

- Il valore massimo dello spessore, che varia da realizzazione a realizzazione in funzione della profondità della base delle ghiaie simulata nei punti di massimo accumulo. Alcune realizzazioni mostrano spessori massimi più elevati e concentrati in corpi ben definiti (es. C, D, G, H), mentre altre presentano spessori massimi più contenuti e distribuiti su aree più ampie (es. A, B, I).

- La distribuzione e connettività dei corpi ghiaiosi nella fascia centrale: in alcune realizzazioni i corpi appaiono più isolati e discontinui (es. E, I, L), mentre in altre tendono a connettersi lateralmente formando corpi più estesi (es. B, D, H, N).
- La localizzazione degli spessori massimi in direzione E-O: in alcune realizzazioni i valori più elevati si concentrano nella porzione centrale della mappa (es. C, E, G), mentre in altre si spostano verso est (es. D, H, N) o verso ovest (es. A, M).

Complessivamente, la variabilità tra le 50 realizzazioni, di cui 12 mostrare a titolo esemplificativo, quantifica l'incertezza geologica associata alla stima dello spessore delle Ghiaie di Sergnano negli alti morfologici, che si traduce direttamente in un'incertezza sul volume del corpo ghiaioso e, di conseguenza, sulla stima del Heat in Place.

Le 50 mappe di spessore così ottenute costituiscono la base per la successiva conversione in volumi e per il calcolo del Heat in Place nelle Ghiaie di Sergnano, come descritto nei capitoli seguenti. L'insieme delle 50 realizzazioni consente di propagare l'incertezza geologica associata alla posizione della base delle ghiaie attraverso tutte le fasi successive dell'analisi, fornendo infine una stima probabilistica della risorsa geotermica più informativa e scientificamente rigorosa a una singola stima deterministica.

A partire dalle 50 mappe di spessore delle Ghiaie di Sergnano negli alti morfologici, è stata condotta una stima quantitativa del volume del corpo ghiaioso per ciascuna delle 50 realizzazioni, al fine di caratterizzare la distribuzione statistica dei volumi e quantificare l'incertezza associata alla stima volumetrica.

Il volume del corpo ghiaioso per ciascuna realizzazione è stato calcolato mediante la seguente relazione su un foglio di calcolo Excel:

$$V = n\_celle \times A\_cella \times h\_medio$$

Dove:

- N\_celle = numero totale di celle della griglia 2D pari a 22 550 celle (150x150x1);
- A\_cella = area planimetrica di ciascuna cella, pari a 10 000m<sup>2</sup> (100m x 100m);
- H\_medio = spessore medio delle Ghiaie di Sergnano nell'area di studio per ciascuna realizzazione, estratto manualmente dal valore "Mean" dell'istogramma di ogni mappa in SGeMS.

I valori così ottenuti sono stati trascritti in un foglio di calcolo Microsoft Excel, dove è stata applicata la formula di calcolo del volume per ciascuna realizzazione (figura 25).

n°realizzazione	h_medio (m)	n_celle	A_cella (m2)	V (m3)
0	172,17	22550	10000	38824335000
1	159,46			35958230000
2	169,47			38215485000
3	189,82			42804410000
4	172,39			38873945000
5	190,01			42847255000
6	210,93			47564715000
7	166,44			37532220000
8	175,26			39521130000
9	158,28			35692140000
10	161,86			36499430000
11	187,29			42233895000
12	192,601			43431525500
13	188,23			42445865000
14	230,95			52079225000
15	198,999			44874274500
16	234,78			52942890000
17	223,85			50478175000
18	190,499			42957524500
19	224,85			50703675000
20	162,275			36593012500
21	227,41			51280955000
22	191,81			43253155000
23	266,82			60167910000
24	199,11			44899305000
25	203,56			45902780000
26	158,93			35838715000
27	169,97			38328235000
28	165,995			37431872500
29	212,23			47857865000
30	159,84			36043920000
31	196,43			44294965000
32	200,87			45296185000
33	203,38			45862190000
34	201,76			45496880000
35	213,31			48101405000
36	161,696			36462448000
37	166,23			37484865000
38	194,69			43902595000
39	206,896			46655048000
40	222,044			50070922000
41	177,55			40037525000
42	210,28			47418140000
43	228,38			51499690000
44	230,62			52004810000
45	189,97			42838235000
46	154,155			34761952500
47	155,45			35053975000
48	197,19			44466345000
49	228,67			51565085000

Figura 25: Foglio di calcolo Microsoft Excel per la stima del volume delle Ghiaie di Sergnano negli alti morfologici per ciascuna delle 50 realizzazioni DSSIM. Per ogni realizzazione sono riportati: lo spessore medio ( $h_{\text{medio}}$ , in metri) estratto dall'istogramma ( $n=22\,500$ , corrispondente alla griglia 2D "Area\_Pozzi" di  $150 \times 150 \times 1$  celle), l'area di ciascuna cella ( $A_{\text{cella}} = 10\,000 \text{ m}^2$ ) e il volume calcolato come  $V = n_{\text{celle}} \times A_{\text{cella}} \times h_{\text{medio}}$  (in  $\text{m}^3$ ).

I volumi calcolati per le 50 realizzazioni mostrano una variabilità significativa, con valori compresi tra un minimo di circa  $3,48 \times 10^{10} \text{ m}^3$  e un massimo di circa  $6,02 \times 10^{10} \text{ m}^3$ . La distribuzione statistica dei volumi è visualizzata nell'istogramma di figura 26, costruito suddividendo il range di variazione in classi di ampiezza uniforme.

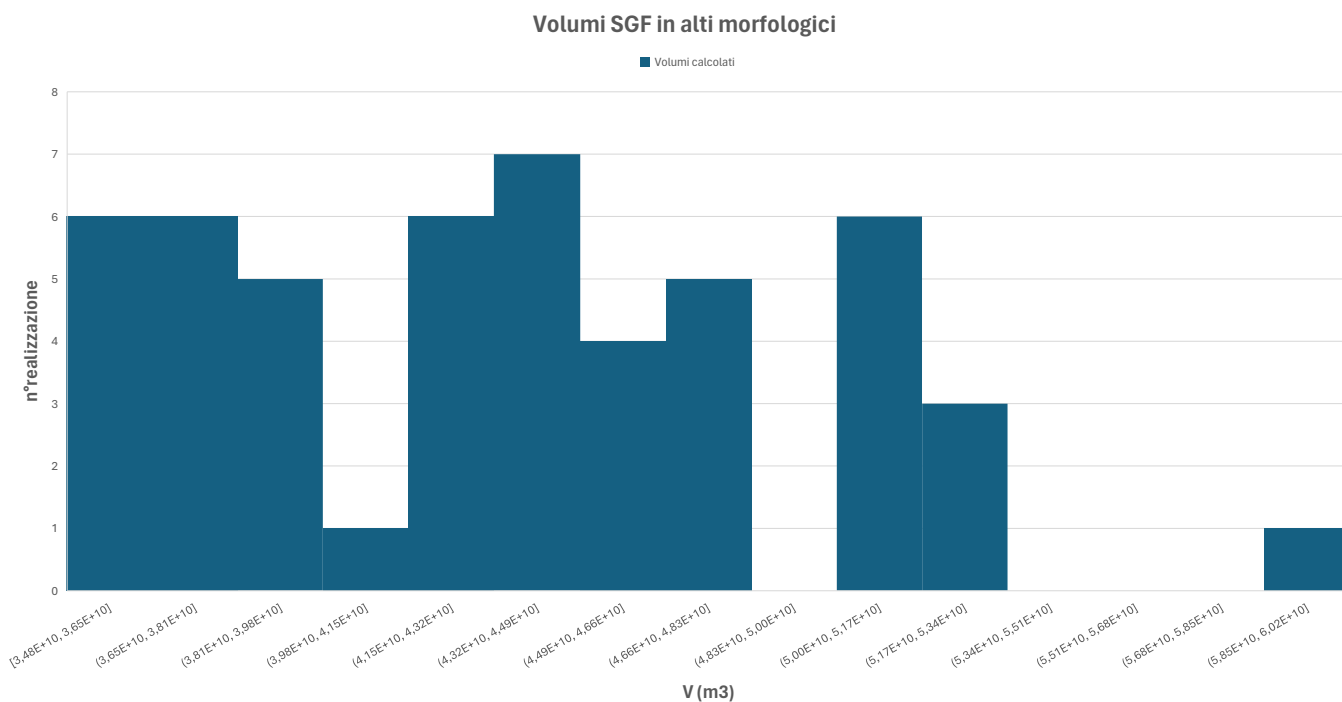


Figura 26: Distribuzione dei volumi delle Ghiaie di Sergnano negli alti morfologici calcolati per le 50 realizzazioni DSSIM. l'asse X riporta il volume in  $\text{m}^3$  suddiviso in classi di ampiezza uniforme, l'asse Y il numero di realizzazioni per ciascuna classe. La distribuzione mostra una variabilità compresa tra circa  $3,48 \times 10^{10} \text{ m}^3$  e  $6,02 \times 10^{10} \text{ m}^3$ , con moda nella classe  $4,32-4,49 \times 10^{10} \text{ m}^3$ .

L'istogramma evidenzia una distribuzione irregolare e non gaussiana, con due zone di maggiore concentrazione delle realizzazioni: una prima zona nella fascia  $3,48-3,81 \times 10^{10} \text{ m}^3$  che raccoglie circa il 24% delle realizzazioni, e una seconda zona più concentrata nella fascia  $4,15-4,49 \times 10^{10} \text{ m}^3$ , che rappresenta la moda della distribuzione con un picco di 7 realizzazioni nella classe  $4,32-4,49 \times 10^{10} \text{ m}^3$ . Una terza concentrazione si osserva nella fascia  $5,00-5,17 \times 10^{10} \text{ m}^3$ , con 6 realizzazioni. Si osservano inoltre alcuni buchi nella distribuzione, intervalli di volume privi di realizzazioni, attribuibili al numero limitato di 50 realizzazioni, insufficiente a garantire una copertura uniforme dell'intero range di variabilità; con un numero maggiore di realizzazioni questi buchi tenderebbero a riempirsi progressivamente.

La variabilità dei volumi tra le 50 realizzazioni, con un range di circa  $2,54 \times 10^{10} \text{ m}^3$  tra minimo e massimo, fornisce una misura diretta dell'incertezza geologica associata alla stima del volume delle Ghiaie di Sergnano negli alti morfologici. Questa incertezza è principalmente attribuibile alla scarsa densità dei dati di condizionamento disponibili (4 pozzi), che lascia ampi margini di variabilità nelle

zone interporo, e all'utilizzo di un range del variogramma mutuato da un'area adiacente (Pantopoulos et al., 2025) piuttosto che direttamente stimato sui dati locali.

L'insieme dei 50 volumi calcolati costituisce la base per la successiva stima probabilistica del Heat in Place nelle Ghiaie di Sergnano, come descritto nel capitolo seguente. La distribuzione statistica dei volumi verrà propagata nel calcolo energetico per ottenere una stima probabilistica della risorsa geotermica, più informativa e scientificamente rigorosa rispetto a una singola stima deterministica.

In preparazione alla simulazione tridimensionale delle facies, è stato caricato su SGeMS un pointset degli spessori delle Ghiaie di Sergnano in alto morfologico che include tutti i 15 pozzi inizialmente analizzati, ampliando quindi il dataset di condizionamento rispetto alle fasi precedenti in cui erano stati utilizzati solo i 4 pozzi con informazioni stratigrafiche complete.

A differenza delle fasi precedenti, in cui la variabile di interesse era la profondità delle superfici stratigrafiche di riferimento (PL1 e base delle ghiaie), in questa fase la variabile considerata è lo spessore delle Ghiaie di Sergnano in corrispondenza degli alti morfologici, calcolato come differenza tra la profondità della base delle ghiaie e quella della superficie PL1:

**spessore = base ghiaie - PL1**

Questa trasformazione consente di includere nel dataset di condizionamento anche i pozzi per i quali lo spessore delle ghiaie non era direttamente utilizzabile nelle fasi precedenti, ampliando la base informativa disponibile per la simulazione. In particolare, i 15 pozzi sono stati classificati in 3 categorie:

- Pozzi in alto morfologico con dati completi (4 pozzi): per questi pozzi lo spessore è stato calcolato direttamente come differenza tra la profondità della base delle ghiaie e quella della PL1, entrambe identificate nei profili di pozzo. Questi pozzi costituivano già il dataset di condizionamento delle fasi precedenti.
- Pozzi in alto morfologico dove la SGF è assente o pozzi in basso morfologico: per questi pozzi lo spessore delle Ghiaie di Sergnano è stato impostato a zero, in quanto o le ghiaie sono assenti o il pozzo è localizzato in un basso morfologico dove la configurazione stratigrafica è diversa da quella degli alti. L'assunzione di spessore zero equivale a ipotizzare, per semplicità, una erosione completa delle ghiaie in queste posizioni, ovvero l'assenza del corpo ghiaioso negli alti morfologici in corrispondenza di tali pozzi.

L'inclusione dei pozzi con spessore zero nel dataset di condizionamento rappresenta una scelta metodologica conservativa ma geologicamente motivata: questi pozzi forniscono all'algoritmo di simulazione un'informazione negativa, ovvero l'assenza delle ghiaie in determinate posizioni, che contribuisce a vincolare la distribuzione spaziale del corpo ghiaioso e a ridurre l'incertezza nelle zone interpozzi. In assenza di questa informazione, l'algoritmo potrebbe simulare spessori non nulli anche in zone dove i dati di pozzo indicano l'assenza delle ghiaie, producendo realizzazioni geologicamente non coerenti con le osservazioni disponibili.

Va tuttavia precisato che l'assunzione di erosione completa per i pozzi a spessore zero è una semplificazione ma ha un impatto trascurabile sul risultato finale in quando, essendo l'analisi focalizzata esclusivamente sugli alti morfologici, le zone di basso morfologico a spessore nullo sono già escluse per costruzione dalla stima volumetrica e dalla successiva modellazione tridimensionale delle facies.

La modellazione della griglia degli spessori delle Ghiaie di Sergnano negli alti morfologici è stata condotta integrando due distinte fonti di informazione entrambe caricate in SGeMS:

- Il point set degli spessori dei 15 pozzi costruito nel paragrafo precedente, che fornisce i valori puntuali affidabili degli spessori in corrispondenza dei pozzi analizzati, con spessore positivo per i quattro pozzi in alto morfologico con dati completi e spessore zero per gli altri, e costituisce il dato di condizionamento locale che la griglia degli spessori deve onorare.
- La mappa E-type degli spessori (figura 27) ottenuta come media aritmetica delle 50 realizzazioni DSSIM Mediante l'algoritmo PostSim di SGeMS che fornisce una stima realmente continua e statisticamente robusta della distribuzione degli spessori derivata dalla simulazione stocastica. Questa mappa, con valori compresi tra 0 m (blu scuro, zone di basso morfologico) e 608 m (rosso, depo-centri degli alti morfologici), è stata utilizzata come tendenza spaziale per guidare la modellazione degli spessori nelle zone non campionate da pozzi, catturando la struttura spaziale della variabilità geologica nell'area di studio.

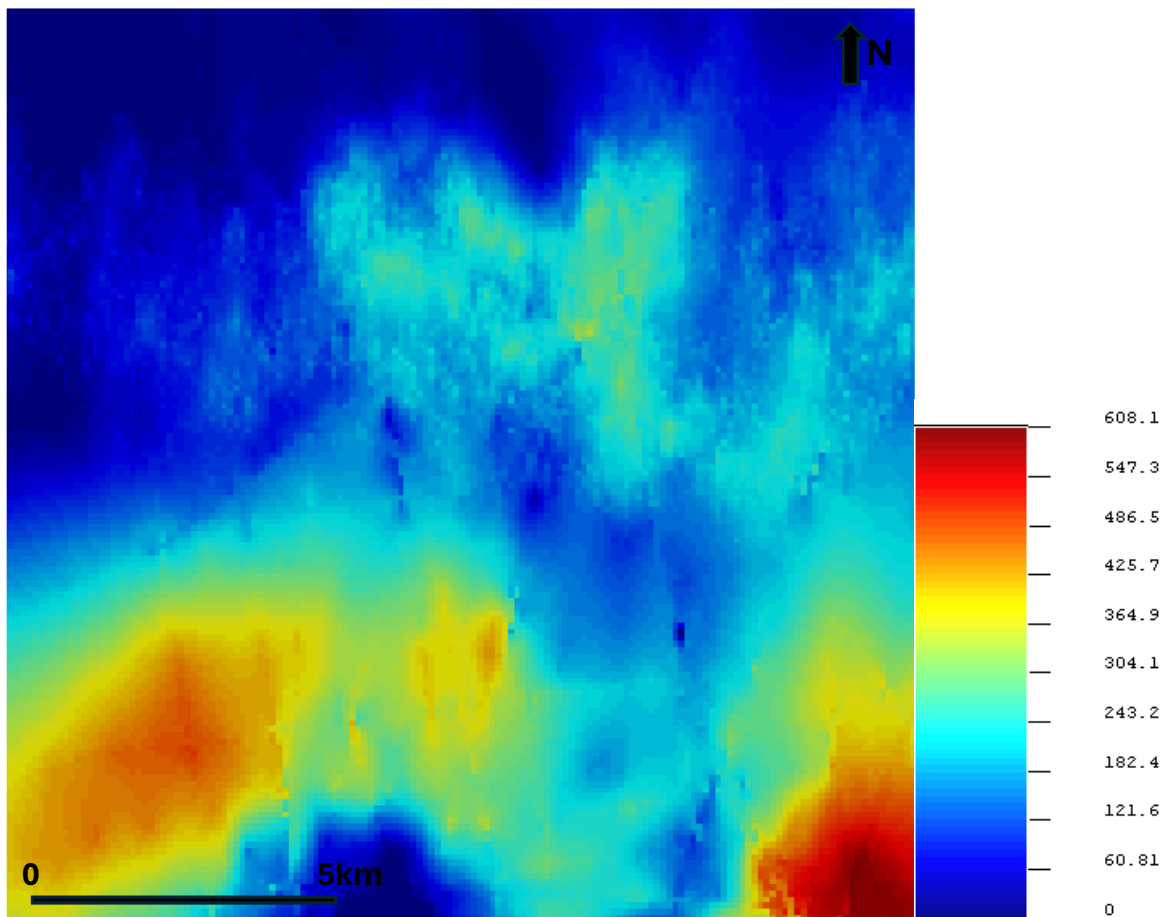


Figura 27: Mapa E-type degli spessori delle Ghiaie di Sergnano negli alti morfologici, ottenuta come media aritmetica delle 50 realizzazioni DSSIM mediante l'algoritmo PostiSim di SGeMS.

La mappa E-type (figura 27) mostra la distribuzione areale del valore atteso dello spessore delle Ghiaie di Sergnano negli alti morfologici. Rispetto alle singole realizzazioni stocastiche, caratterizzate da geometrie frastagliate e discontinue, la mappa E-type presenta una distribuzione degli spessori più regolare e continua, con transizioni graduali tra zone a spessore nullo e zone a spessore elevato, effetto atteso della media aritmetica che cancella le strutture locali presenti in posizioni diverse nelle singole realizzazioni. La mappa evidenzia la presenza di aree principali di maggiore spessore nella porzione centrale e meridionale dell'area di studio, corrispondenti degli alti morfologici del substrato messiniano separate da zone a spessore ridotto o nullo in corrispondenza dei bassi morfologici.

Utilizzando il point set degli spessori come dato di condizionamento e la mappa E-type come tendenza spaziale, è stata prodotta una griglia modellata degli spessori (figura 28), che onora simultaneamente e i valori osservati nei pozzi e la variabilità spaziale regionale derivata dalla simulazione stocastica. La griglia risultante mostra una distribuzione degli spessori più realistica rispetto alla sola mappa E-type, in quanto incorpora l'informazione puntuale dei pozzi e nel rispetta i valori esatti in corrispondenza delle loro posizioni planimetriche, producendo una stima spazialmente

continua e geologicamente coerente degli spessori delle Ghiaie di Sergnano sui paleo-alti morfologici messiniani nell'area di studio.

A partire dalla griglia degli spessori modellata, è stata ricavata la superficie di base delle Ghiaie di Sergnano in alto morfologico mediante estrazione degli spessori da modello e successivo calcolo su Microsoft Excel, applicando la relazione;

$$\text{Base ghiaie} = \text{PL1} - \text{Spessore}$$

Dove i valori di spessore sono stati estratti dalla griglia modellata per ciascuna cella e sottratti alla superficie PL1 simulata. Questo approccio iterativo consente di ottenere una superficie della base delle ghiaie che onora contemporaneamente i dati di pozzo sugli spessori e la distribuzione spaziale della tendenza derivata dalle 50 realizzazioni stocastiche, producendo una stima più realistica rispetto a quella ottenuta con i soli quattro pozzi nelle fasi precedenti. Va precisato che nei bassi morfologici lo spessore è già pari a zero per costruzione; pertanto, l'operazione restituisce in queste zone semplicemente  $\text{PL1} - 0 = \text{PL1}$ , Senza alcun impatto sul risultato finale. Poiché l'analisi focalizzata esclusivamente sugli alti morfologici, le zone di basso morfologica spessore nullo non influenzano la stima volumetrica nella successiva modellazione tridimensionale delle facies. Il volume del corpo ghiaioso così ottenuto questo costituisce la base per la modellazione tridimensionale descritta nel capitolo seguente.

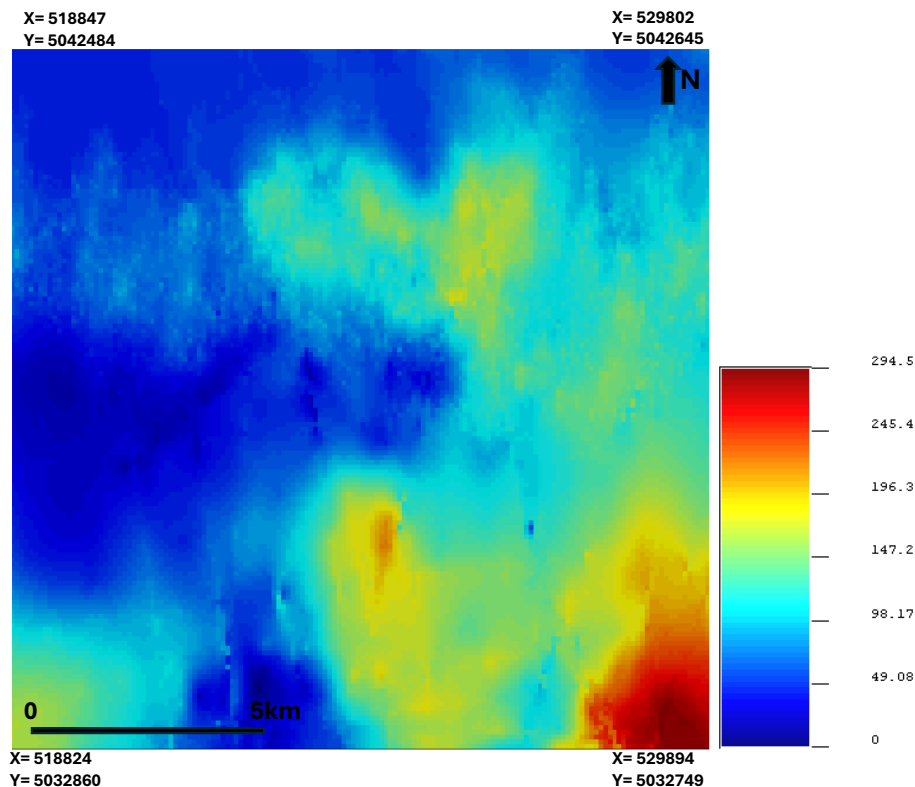


Figura 28: Griglia Modellata degli spessori delle Ghiaie di Sergnano negli alti morfologici, ottenuta integrando il pointset degli spessori dei 15 pozzi come dato di condizionamento e la mappa E-type (figura 27) come tendenza spaziale. La griglia onora ai valori osservati nei pozzi e la variabilità spaziale regina derivata dalle 50 realizzazioni stocastiche, costituendo la base per il calcolo della superficie base delle ghiaie per la successiva modellazione tridimensionale delle facies.

### 4.4.3 Modellazione delle facies

In preparazione alla modellazione tridimensionale delle facies, i quattro pozzi in alto morfologico con dati stratigrafici completi sono stati codificati in termini litologici secondo una classificazione a tre classi, che suddivide la successione sedimentaria nelle seguenti categorie (figura 29):

- Classe 0 - GH (ghiaie): corrispondente agli intervalli prevalentemente ghiaiosi delle Ghiaie di Sergnano, costituenti il corpo sedimentario di interesse per la modellazione del reservoir geotermico.
- Classe 1 - SB (sabbie): corrispondente agli intervalli prevalentemente sabbiosi intercalati alle ghiaie o presenti in intervalli di transizione.
- Classe 2 - ARG (argille): Corrispondente agli intervalli argillosi e marnosi, sia all'interno della successione ghiaiosa che nelle formazioni soprastanti o sottostanti.

Questa classificazione semplificata a tre classi consente di discriminare le facies grossolane di potenziale interesse da un punto di vista di estrazione di fluido geotermico, ghiaie e sabbie, dalle facies impermeabili, mantenendo al contempo una sufficiente risoluzione litologica per la modellazione delle eterogeneità interne al corpo sedimentario.

I dati codificati dai quattro pozzi di interesse (Cernusco\_002, Cernusco\_003, Cernusco\_005 e Cernusco\_007), sono stati organizzati in un foglio di calcolo Microsoft Excel strutturato con le seguenti colonne (figura 30): coordinata x, coordinata y, profondità del tetto dell'intervallo (m), profondità della base dell'intervallo (m) e codice litologico (0, 1, 2). Ciascuna riga del foglio di calcolo corrisponde a un intervallo litologico riconosciuto nel profilo di pozzo, con la risoluzione verticale variabile in funzione della complessità litologica dell'intervallo, come descritto nel capitolo dedicato alla digitalizzazione delle litologie. Il dataset così strutturato, comprensivo dei dati di tutti e quattro i pozzi organizzati in sequenza (Cernusco\_002, Cernusco\_003, Cernusco\_005 e Cernusco\_007), costituisce l'input per la successiva importazione in SGeMS e per la modellazione tridimensionale delle facies descritte nei paragrafi seguenti.

<b>Classificazione 3:</b>	
GH =	0
SB =	1
ARG =	2

Figura 29: Classificazione litologica a 3 classi: GH = 0 (ghiaie), SB = 1 (sabbie), ARG = 2 (argille).

X	Y	Tetto	Base	Cod.
527086.1	5037551.9	1167	1176	0
527086.1	5037551.9	1176	1177	2
527086.1	5037551.9	1177	1183	0
527086.1	5037551.9	1183	1187	2
527086.1	5037551.9	1187	1195	0
527086.1	5037551.9	1195	1196	2
527086.1	5037551.9	1196	1203	0
527086.1	5037551.9	1203	1205	2
527086.1	5037551.9	1205	1210	0
527086.1	5037551.9	1210	1211	2
527086.1	5037551.9	1211	1234	0
527086.1	5037551.9	1234	1235	2
527086.1	5037551.9	1235	1241	0
527086.1	5037551.9	1241	1242	2
527086.1	5037551.9	1242	1245	0
527086.1	5037551.9	1245	1247	2
527086.1	5037551.9	1247	1253	0
527086.1	5037551.9	1253	1255	2
527086.1	5037551.9	1255	1266	0
527086.1	5037551.9	1266	1267	2
527086.1	5037551.9	1267	1275	0
527086.1	5037551.9	1275	1276	2
527086.1	5037551.9	1276	1284	0
527086.1	5037551.9	1284	1285	2
527086.1	5037551.9	1285	1290	0
527086.1	5037551.9	1290	1291	2
527086.1	5037551.9	1291	1300	0
527086.1	5037551.9	1300	1301	2
527086.1	5037551.9	1301	1306	1
527086.1	5037551.9	1306	1307	2
527086.1	5037551.9	1307	1313	1
527086.1	5037551.9	1313	1315	2
527086.1	5037551.9	1315	1320	1
527086.1	5037551.9	1320	1321	2
527086.1	5037551.9	1321	1330	1
527086.1	5037551.9	1330	1331	2
527086.1	5037551.9	1331	1335	1
527086.1	5037551.9	1335	1336	2
527086.1	5037551.9	1336	1350	0
527086.1	5037551.9	1350	1354	2
527086.1	5037551.9	1354	1360	0
527086.1	5037551.9	1360	1362	2
527086.1	5037551.9	1362	1367	0
527086.1	5037551.9	1367	1375	2
527086.1	5037551.9	1375	1377	1
527086.1	5037551.9	1377	1386	2
527086.1	5037551.9	1386	1390	1
527086.1	5037551.9	1390	1422	2
527086.1	5037551.9	1422	1424	1

527086.1	5037551.9	1424	1449	2
527086.1	5037551.9	1449	1452	1
527086.1	5037551.9	1452	1454	2
527086.1	5037551.9	1454	1459	1
527086.1	5037551.9	1459	1465	2
527086.1	5037551.9	1465	1474	1
527086.1	5037551.9	1474	1475	2
527086.1	5037551.9	1475	1480	0
527086.1	5037551.9	1480	1481	2
527086.1	5037551.9	1481	1483	0
527086.1	5037551.9	1483	1485	2
527086.1	5037551.9	1485	1488	0
527086.1	5037551.9	1488	1490	2
527086.1	5037551.9	1490	1493.5	0
526568.9	5038182.4	1199	1205	0
526568.9	5038182.4	1205	1206	2
526568.9	5038182.4	1206	1213	0
526568.9	5038182.4	1213	1215	2
526568.9	5038182.4	1215	1225	0
526568.9	5038182.4	1225	1226	2
526568.9	5038182.4	1226	1233	0
526568.9	5038182.4	1233	1235	2
526568.9	5038182.4	1235	1245	0
526568.9	5038182.4	1245	1248	2
526568.9	5038182.4	1248	1255	0
526568.9	5038182.4	1255	1256	2
526568.9	5038182.4	1256	1265	0
526568.9	5038182.4	1265	1266	2
526568.9	5038182.4	1266	1273	0
526568.9	5038182.4	1273	1274	2
526568.9	5038182.4	1274	1279	0
526568.9	5038182.4	1279	1280	2
526568.9	5038182.4	1280	1290	0
526568.9	5038182.4	1290	1291	2
526568.9	5038182.4	1291	1297	1
526568.9	5038182.4	1297	1298	2
526568.9	5038182.4	1298	1305	1
526568.9	5038182.4	1305	1306	2
526568.9	5038182.4	1306	1314	1
526568.9	5038182.4	1314	1315	2
526568.9	5038182.4	1315	1323	1
526568.9	5038182.4	1323	1342	2
526568.9	5038182.4	1342	1347	1
526568.9	5038182.4	1347	1348	2
526568.9	5038182.4	1348	1351	1
526568.9	5038182.4	1351	1356	2
526568.9	5038182.4	1356	1366	1
526568.9	5038182.4	1366	1367	2
526568.9	5038182.4	1367	1371	1
526568.9	5038182.4	1371	1372	2

526568.9	5038182.4	1372	1374	1
526568.9	5038182.4	1374	1375	2
526568.9	5038182.4	1375	1381	1
526568.9	5038182.4	1381	1382	2
526568.9	5038182.4	1382	1386	1
526568.9	5038182.4	1386	1387	2
526568.9	5038182.4	1387	1389	1
527521.3	5039775.8	966	973	0
527521.3	5039775.8	973	975	2
527521.3	5039775.8	975	984	0
528226.7	5042139.8	752	760	0
528226.7	5042139.8	760	765	2
528226.7	5042139.8	765	775	0
528226.7	5042139.8	775	778	2
528226.7	5042139.8	778	783	0
528226.7	5042139.8	783	786	2
528226.7	5042139.8	786	796	0
528226.7	5042139.8	796	799	2
528226.7	5042139.8	799	805	0
528226.7	5042139.8	805	810	2
528226.7	5042139.8	810	812	0
528226.7	5042139.8	812	815	2
528226.7	5042139.8	815	820	0
528226.7	5042139.8	820	825	2
528226.7	5042139.8	825	828	0
528226.7	5042139.8	828	830	2
528226.7	5042139.8	830	834	0
528226.7	5042139.8	834	838	2
528226.7	5042139.8	838	841	1
528226.7	5042139.8	841	847	2
528226.7	5042139.8	847	876	1
528226.7	5042139.8	876	880	2
528226.7	5042139.8	880	882	0
528226.7	5042139.8	882	885	2
528226.7	5042139.8	885	906	1
528226.7	5042139.8	906	910	2
528226.7	5042139.8	910	918	1

Figura 30: Estratto di un foglio Excel con la codifica litologica degli intervalli dei 4 pozzi in alto morfologico (Cernusco\_002, Cernusco\_003, Cernusco\_005, Cernusco\_007), con colonne X, Y, Tetto, Base e codice litologico.

Parallelamente alla codifica litologica dei pozzi, è stata eseguita la costruzione della griglia tridimensionale (Grid\_3D) che costituisce il dominio di modellazione per la simulazione delle facies

e la successiva popolazione delle proprietà petrofisiche. La griglia è stata creata mediante il software Rockware PetraSim<sup>4</sup> e successivamente importata in SGeMS per le fasi di modellazione geostatistica.

La geometria della griglia tridimensionale è stata definita con i seguenti parametri (figura 31):

- Numero di celle: 150 x 150 x 200, per un totale di 4 500 000 celle.
- Dimensione di ciascuna cella: 100 m x 100 m x 10 m, mantenendo la stessa risoluzione planimetrica della griglia 2D utilizzata nelle fasi precedenti e adottando una risoluzione verticale di 10 m, sufficiente a rappresentare le variazioni litologiche interne al corpo ghiaioso con adeguato dettaglio ai fini della quantificazione del calore in posto.
- Origine della griglia (centro della cella di origine): X = 518824 m, Y = 5032860 m in coordinate UTM, coincidente con l'origine della griglia 2D; Z = -2000 m, valore scelto per assicurare che l'intera successione stratigrafica di interesse, dalla superficie PL1 alla base delle Ghiaie di Sergnano, sia contenuta all'interno dell'estensione verticale della griglia.

L'estensione verticale totale della griglia è quindi di 2000 m, coerentemente con le profondità massime della base delle Ghiaie di Sergnano osservate nei pozzi analizzati (1870 m) e con l'origine verticale impostata a -2000 m. La griglia così definita copre l'intero intervallo di profondità di interesse per la modellazione del reservoir geotermico.

Una volta completata la costruzione della griglia in Rockware PetraSim, questa è stata esportata in SGeMS, dove è stato contestualmente caricato il pointset delle litologie codificate (figura 31) dei quattro pozzi in alto morfologico descritto nel paragrafo precedente. L'integrazione della griglia tridimensionale con il dataset di condizionamento litologico costituisce la base per la successiva modellazione delle facies mediante algoritmo SISIM, descritta in questo capitolo.

---

<sup>4</sup> PetraSim è un'interfaccia grafica sviluppata da Thunderhead Engineering che consente la costruzione e la gestione di griglie stratigrafiche tridimensionali per la modellazione del sottosuolo. Nel presente lavoro PetraSim è stato utilizzato esclusivamente per la costruzione della griglia 3D, successivamente esportata e importata in SGeMS per le fasi di modellazione geostatistica (Thunderhead Engineering, 2023).

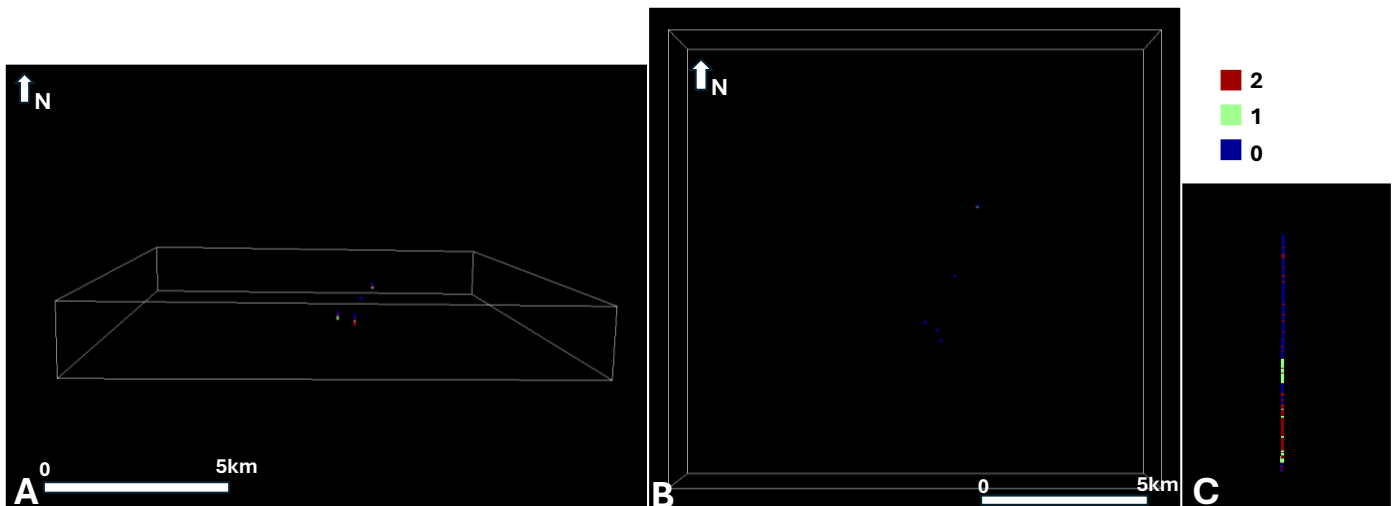


Figura 31: Grid 3D (150 x 150 x 200 celle) in SGeMS con i pointset delle litologie codificate dei 4 pozzi in alto morfologico. B) Visualizzazione planimetrica (dall'alto) del Grid 3D con i 4 pozzi. C) Dettaglio della codifica litologica visualizzato in profondità di un pozzo: blu = GH (0), verde = SB (1), rosso = GH (0).

Il Grid 3D costruito in PetraSim e importato in SGeMS incorpora il volume delle Ghiaie di Sergnano negli alti morfologici calcolato nelle fasi precedenti, definendo il dominio tridimensionale all'interno del quale verranno successivamente simulati la distribuzione delle facies e il campo di porosità. La visualizzazione tridimensionale del grid 3D (figura 32) mostra chiaramente la struttura della successione modellata di colore rosso corrispondente alle Ghiaie di Sergnano, il corpo sedimentario di interesse geotermico.



Figura 32: Visualizzazione tridimensionale del Grid 3D (150 x 150 x 200 celle), dimensione cella 100 x 100 x 10m) con il volume delle Ghiaie di Sergnano calcolato nelle fasi precedenti (in rosso).

Le sezioni stratigrafiche lungo le tre direzioni X, Y e Z (figura 34) sono state estratte mediante lo strumento Volume Explorer di SGeMS (figura 33), che consente di esplorare l'interno del volume tridimensionale attraverso sezioni orientate lungo i tre assi principali (X, Y, Z) in posizioni selezionabili interattivamente. Le quattro sezioni sono state posizionate rispettivamente allo 0%, 25%, 50%, 75% e 100% dell'estensione totale della griglia nelle rispettive direzioni.

In tutte le sezioni è riconoscibile la struttura fondamentale del modello: le Ghiaie di Sergnano si presentano come una fascia sottile, che va in pinch-out, e continua nella porzione inferiore del dominio. La variazione dello spessore del corpo ghiaioso tra le diverse sezioni riflette la distribuzione spaziale degli spessori derivata dalla griglia modellata.

Le sezioni lungo X mostrano la distribuzione lungo le direzioni Est-Ovest, le sezioni lungo Y invece lungo le direzioni Nord-Sud e le sezioni lungo Z mostrano la variazione della distribuzione delle ghiaie in pianta lungo la profondità.

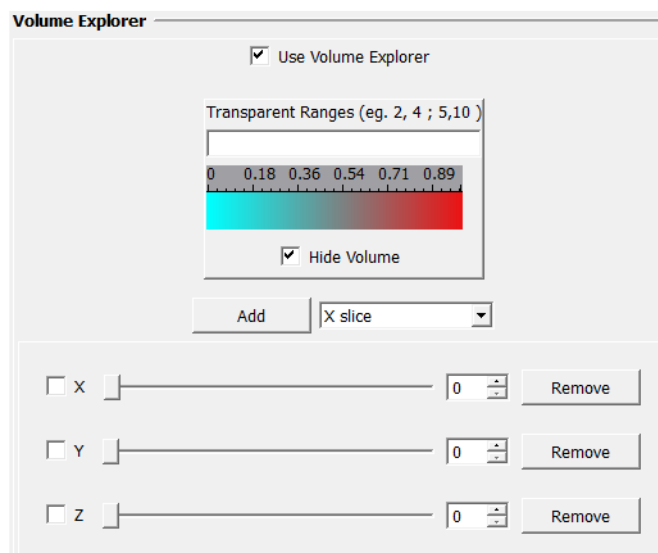
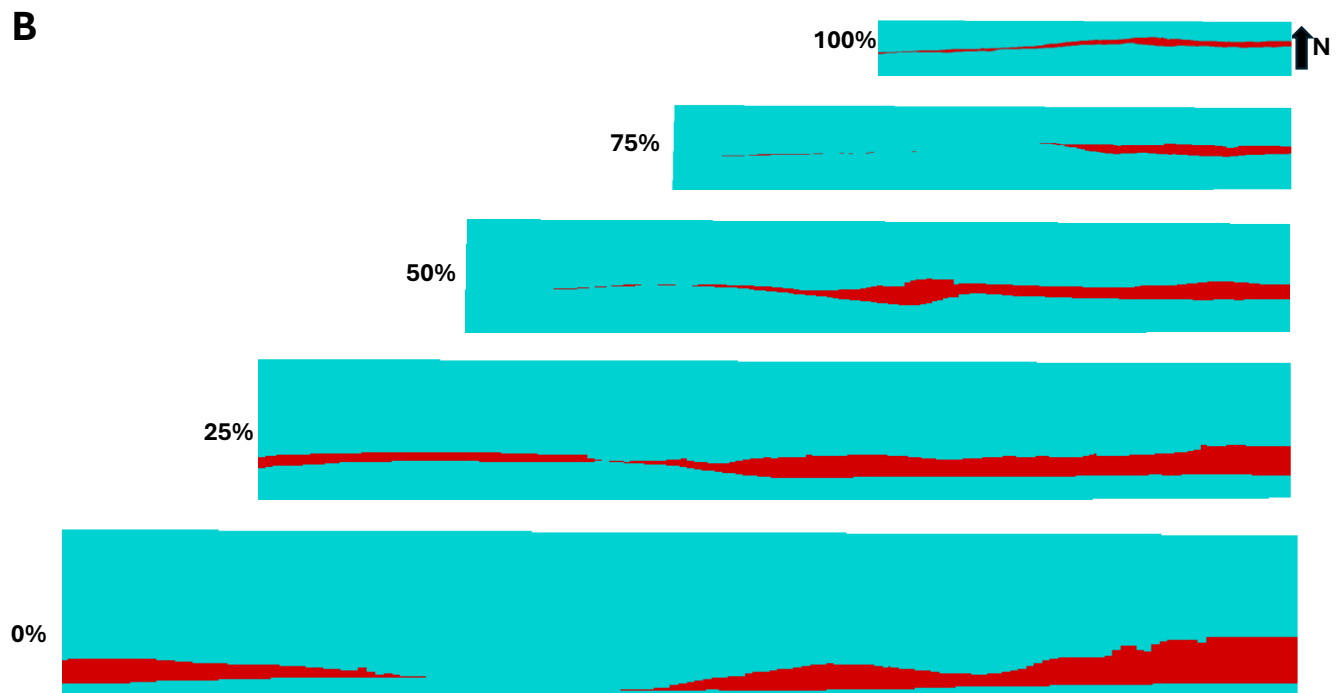
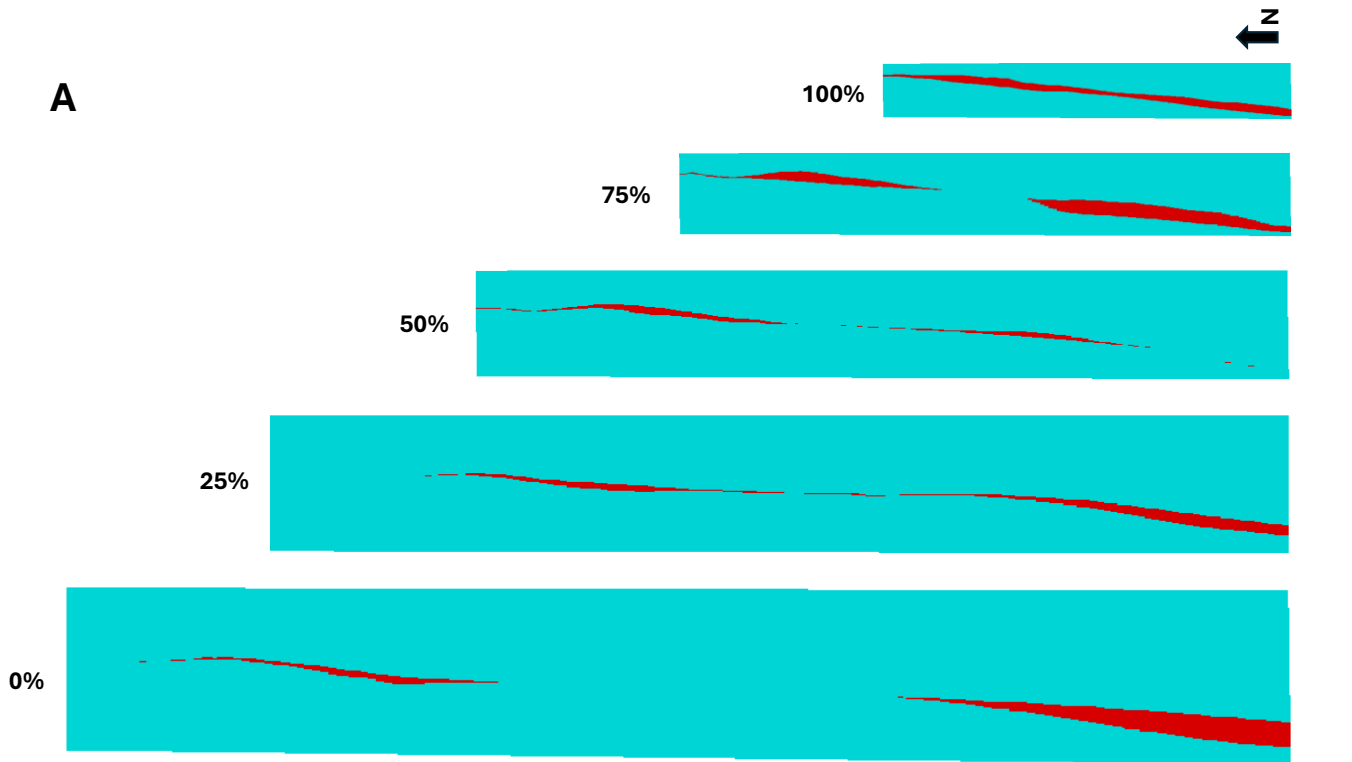
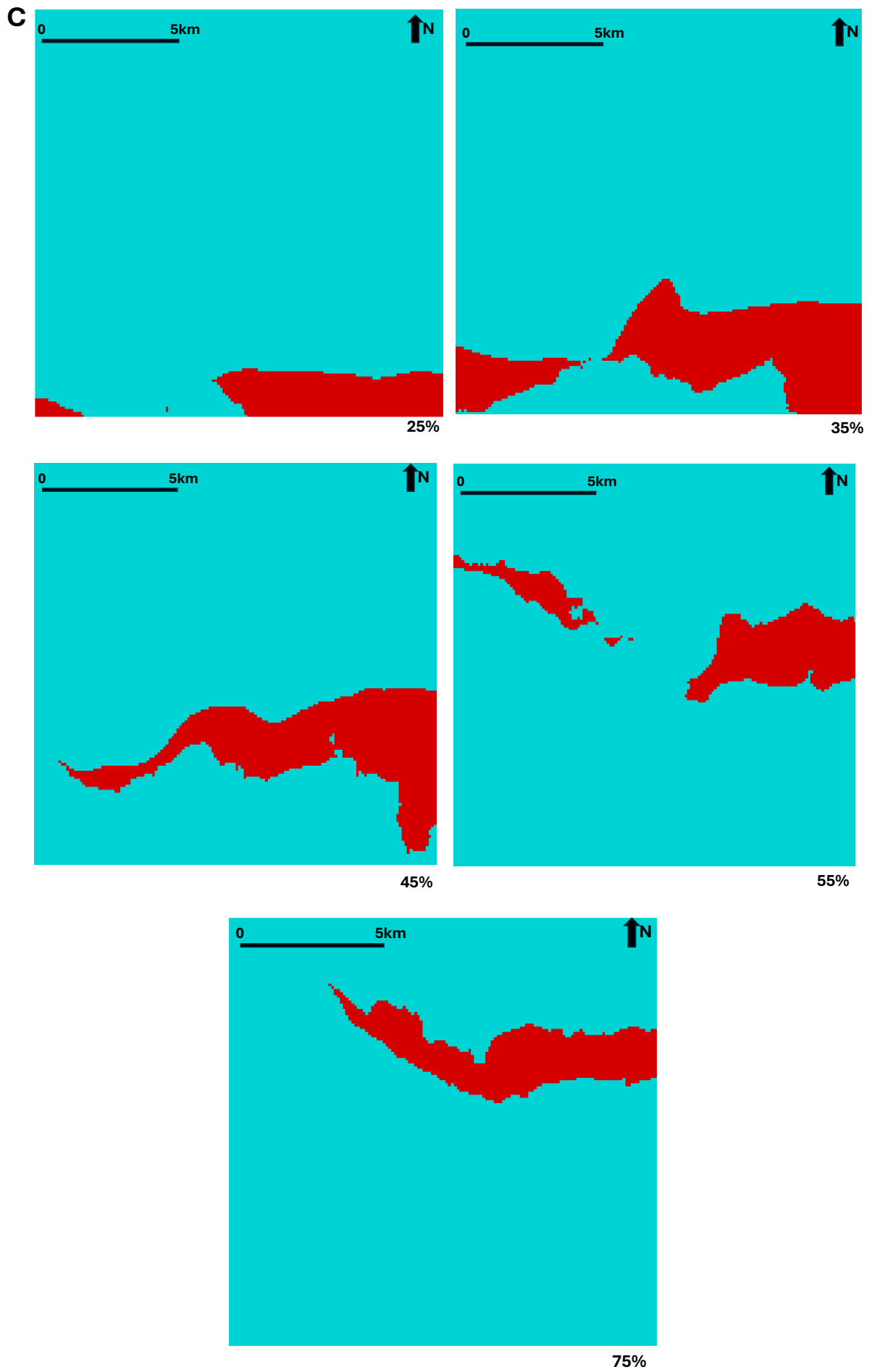
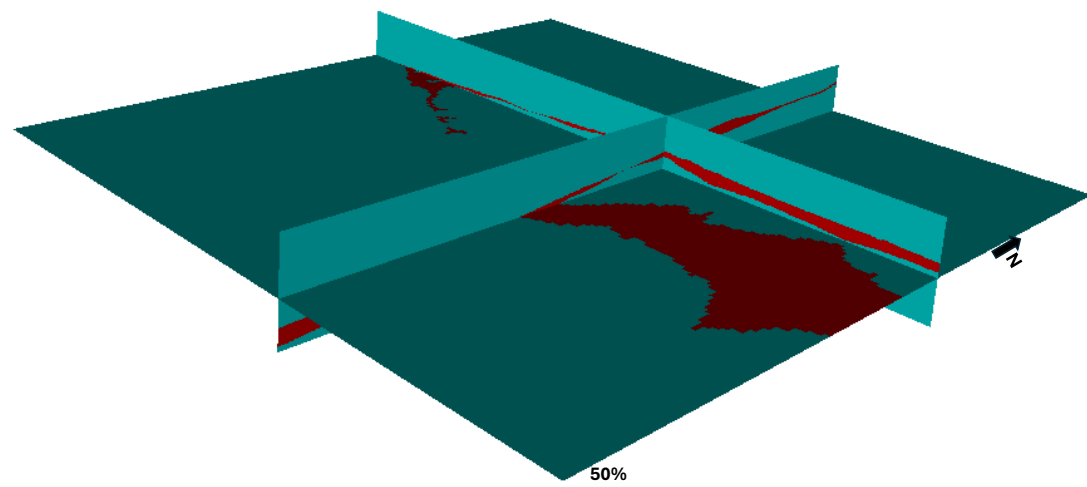
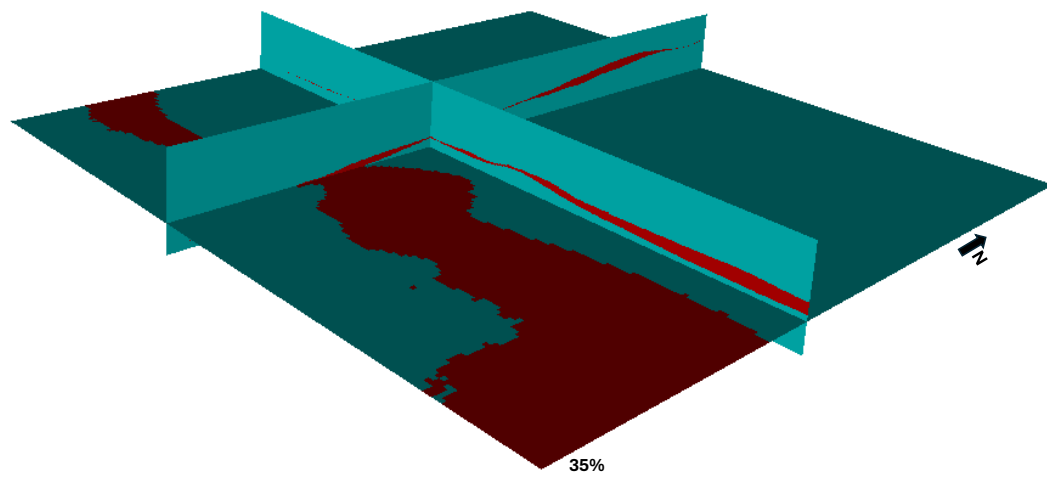
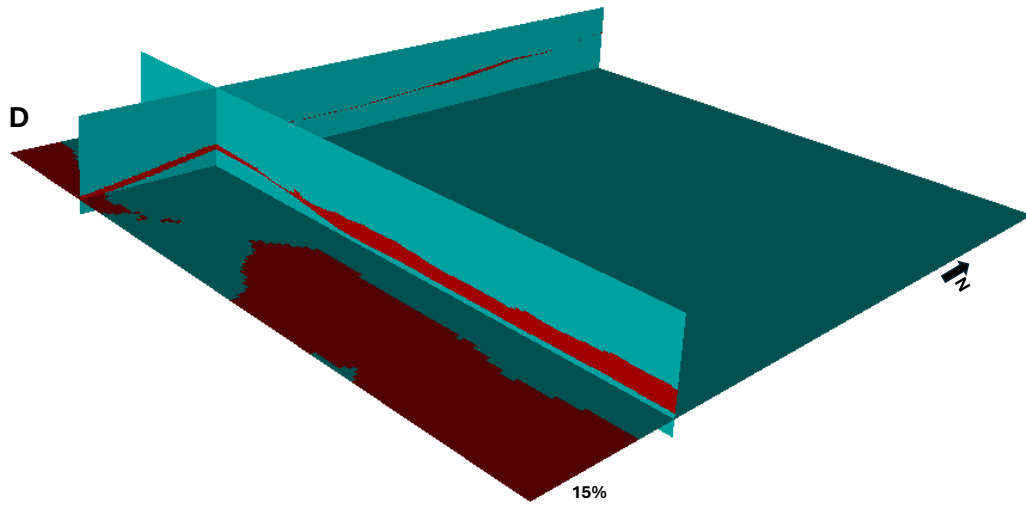


Figura 33: Interfaccia del Volume Explorer di SGeMS, strumento utilizzato per l'estrazione di sezioni orientate lungo i tre assi principali (X; Y, Z) all'interno del Grid 3D.







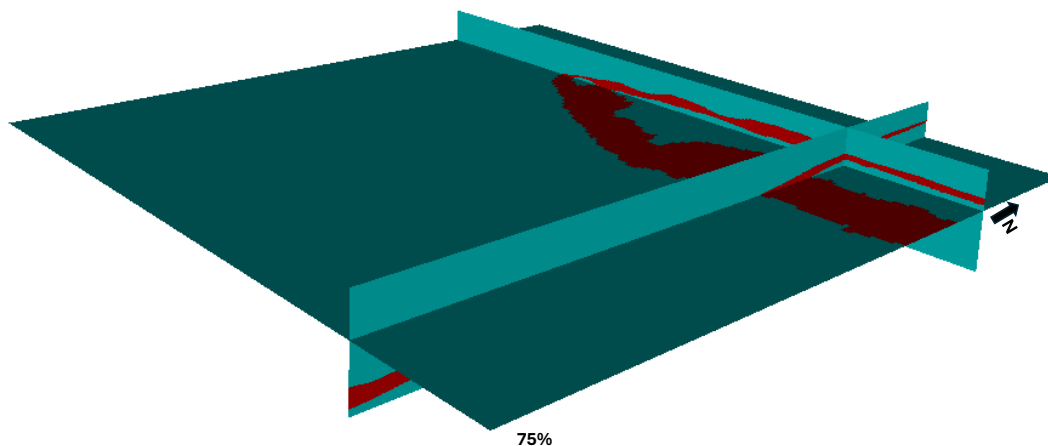


Figura 34: A) Visualizzazione delle sezioni stratigrafiche lungo la direzione X del Grid 3D a cinque posizioni progressive (0%, 25%, 50%, 75% e 100% dell'estensione totale in direzione X, corrispondenti rispettivamente da Ovest verso Est). Le sezioni mostrano la variazione laterale del corpo ghiaioso (rosso = Ghiaie di Sergnano). Si evidenzia la tendenza di approfondimento della fascia ghiaiosa da Nord (sinistra) verso Sud (destra) coerente con la tendenza regionale N-S, con variazione dello spessore tra le diverse posizioni. B) Visualizzazione delle sezioni stratigrafiche lungo la direzione Y del Grid 3D a cinque posizioni progressive (0%, 25%, 50%, 75% e 100% dell'estensione totale in direzione Y, corrispondenti rispettivamente da Sud verso Nord). Le sezioni mostrano la variazione del corpo ghiaioso (rosso = Ghiaie di Sergnano). C) Visualizzazione delle sezioni stratigrafiche lungo la direzione Z del Grid 3D a cinque posizioni progressive (25%, 35%, 45%, 55% e 75% dell'estensione totale in direzione Z, corrispondenti rispettivamente da più profonda a più superficiale). Le sezioni evidenziano la progressiva espansione areale con l'aumentare della profondità del corpo ghiaioso (rosso = Ghiaie di Sergnano). D) Fence diagram tridimensionale del Grid 3D in corrispondenza di quattro profondità (15%, 35%, 50% e 75%). Ciascuna figura mostra l'intersezione di tre sezioni ortogonali (X, Y e Z).

La modellazione tridimensionale delle tre facies operative (ghiaie, sabbie e fini) all'interno del Grid 3D è stata condotta mediante l'algoritmo SISIM (Sequential Indicator Simulation) descritto nel capitolo 4.2, generando 50 realizzazioni equiprobabili della distribuzione litologica nel dominio di modellazione. La scelta di SISIM è motivata dalla natura categorica della variabile simulata, le tre classi litologiche definite nel paragrafo 4.3.1, per la quale il formalismo a indicatori di SISIM è metodologicamente appropriato.

Prima di procedere alla simulazione, è stato necessario definire le proporzioni globali delle tre classi litologiche nell'area di studio, estratte dall'istogramma delle facies (figura 35) calcolato sui dati di pozzo discretizzati sul Grid 3D. Le proporzioni così ottenute sono le seguenti:

- GH (Ghiaie, classe 0) = 38%;
- SB (Sabbie, classe 1) = 26%.
- ARG (Argille, classe 2) = 36%;

Questi valori rappresentano la distribuzione statistica globale delle tre litologie nell'intero dominio di modellazione e costituiscono riferimento per la produzione della distribuzione marginale delle facies nelle 50 realizzazioni.

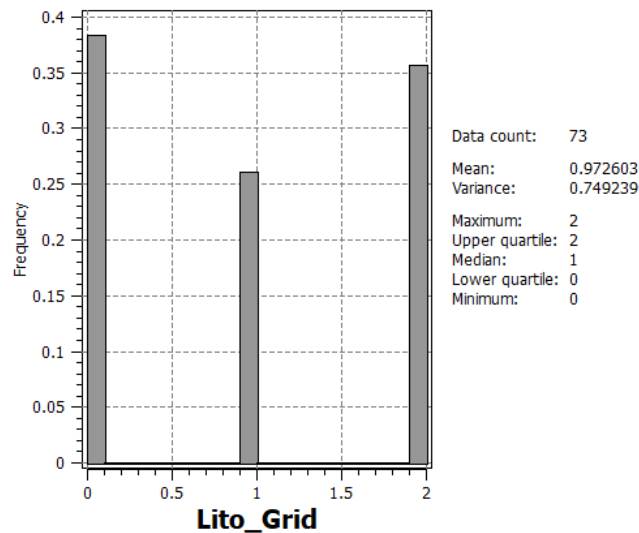


Figura 35: Istogramma delle facies codificate nel Grid 3D, generato automaticamente da SGeMS- Le tre barre corrispondono alle classi litologiche GH = 0 (ghiaie, 38%), SB = 1 (sabbie, 26%) e ARG = 2 (argille 36%) con n = 73 dati. Le proporzioni così ottenute sono state utilizzate come input per la simulazione SISIM.

La simulazione è stata condotta selezionando l'opzione Full Indicator Kriging (Full IK), che consente di definire un modello di variogramma indicatore specifico e indipendente per ciascuna delle tre classi litologiche, garantendo una descrizione più accurata della struttura spaziale di ciascuna facies rispetto all'opzione Median IK che assumerebbe un unico variogramma proporzionale per tutte le classi (Deutsch et al., 1992).

Come hard data di condizionamento sono stati utilizzati i dati litologici codificati dai quattro pozzi in alto morfologico, importati nel grid 3D a partire da un point set e descritti nel paragrafo 4.3.1. L'utilizzo di hard data garantisce che in corrispondenza dei pozzi tutte le 50 realizzazioni incorporino esattamente i codici litologici osservati, mentre nelle zone tra i pozzi la variabilità tra le realizzazioni riflette l'incertezza geologica associata alla distribuzione spaziale delle facies.

L'ellissoide di ricerca è stato definito con i seguenti parametri, che determinano il volume spaziale entro cui l'algoritmo cerca i dati di condizionamento per ciascun nodo della griglia:

- Range massimo (X): 4000 m
- Range medio (Y): 4000 m
- Range minimo (Z): 5 m
- Angoli: azimuth = 0°, dip = 0°, rake = 0°.

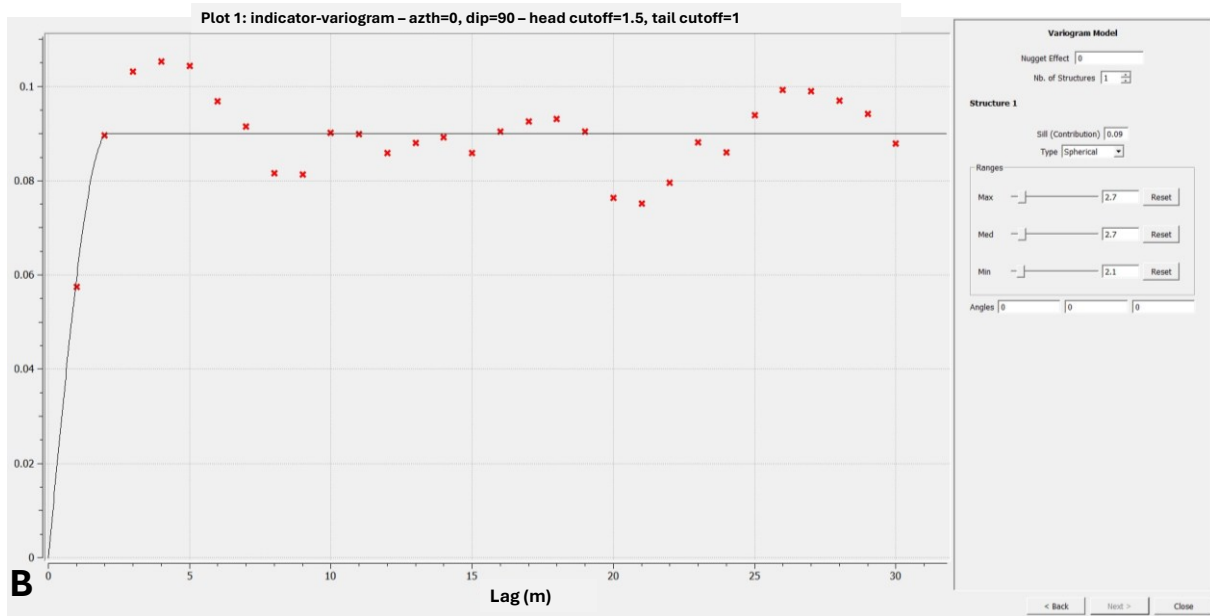
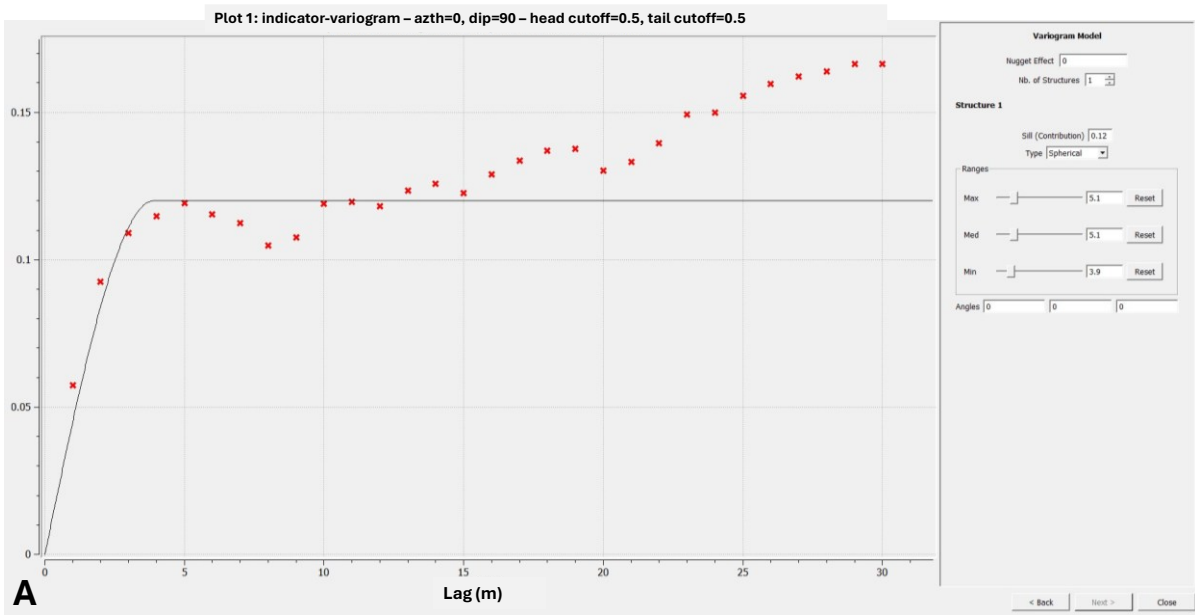
L'anisotropia dell'ellissoide di ricerca con range orizzontale di 4000 m e range verticale di soli 5 m, riflette la natura intrinsecamente anisotropa della variabilità geologica nel sottosuolo padano, dove la continuità laterale delle facies è significativamente maggiore rispetto quella verticale.

Per ciascuna delle tre classi litologiche è stato definito un modello di variogramma indicatore specifico (figura 36), caratterizzato da un modello sferico privo di effetto nugget (nugget = 0), con angoli di azimut, dip e rake pari a 0 °. I parametri di range dei tre modelli di variogramma sono i seguenti:

- Ghiaie: range massimo = 806 m, range medio = 161 m, range minimo 3,9 m
- Sabbie: range massimo = 3650 m, range medio = 730 m, range minimo 2,1 m
- Argille: range massimo = 2821 m, range medio = 564 m, range minimo 3,0 m

La definizione di variogrammi distinti per ciascuna facies consente di riprodurre in modo realistico la diversa struttura di continuità spaziale delle tre litologie, che riflette le loro differenti caratteristiche deposizionali.

I range orizzontali (massimo e medio) dei variogrammi indicatori sono stati mutuati dallo studio di Pantopoulos et al. (2025) condotto nell'area di Treviglio, geograficamente prossima all'area di studio, che considera questi intervalli di valori come scenari rappresentativi dell'anisotropia dell'eterogeneità sedimentaria delle Ghiaie di Sergnano in corrispondenza degli alti morfologici. Il ricorso a questa fonte esterna è motivato dalla scarsa densità dei dati di pozzo disponibili nell'area di studio; i quattro pozzi esistenti non consentono di stimare variogrammi sperimentali affidabili per le direzioni orizzontali, data la distanza eccessiva tra i pozzi rispetto alla scala di variabilità delle facies. I valori di range verticali (range minimo), al contrario, sono stati stimati direttamente dai profili di pozzo disponibili, che forniscono informazioni sulla variabilità litologica verticale con una risoluzione adeguata. Questi valori, compresi tra 2,1 m e 3,9 m a seconda della litologia, definiscono la lunghezza d'onda verticale delle eterogeneità litologiche osservate nei pozzi e consentono all'algoritmo di riprodurre la struttura verticale della successione con un dettaglio compatibile con la risoluzione della griglia (10 m per cella).



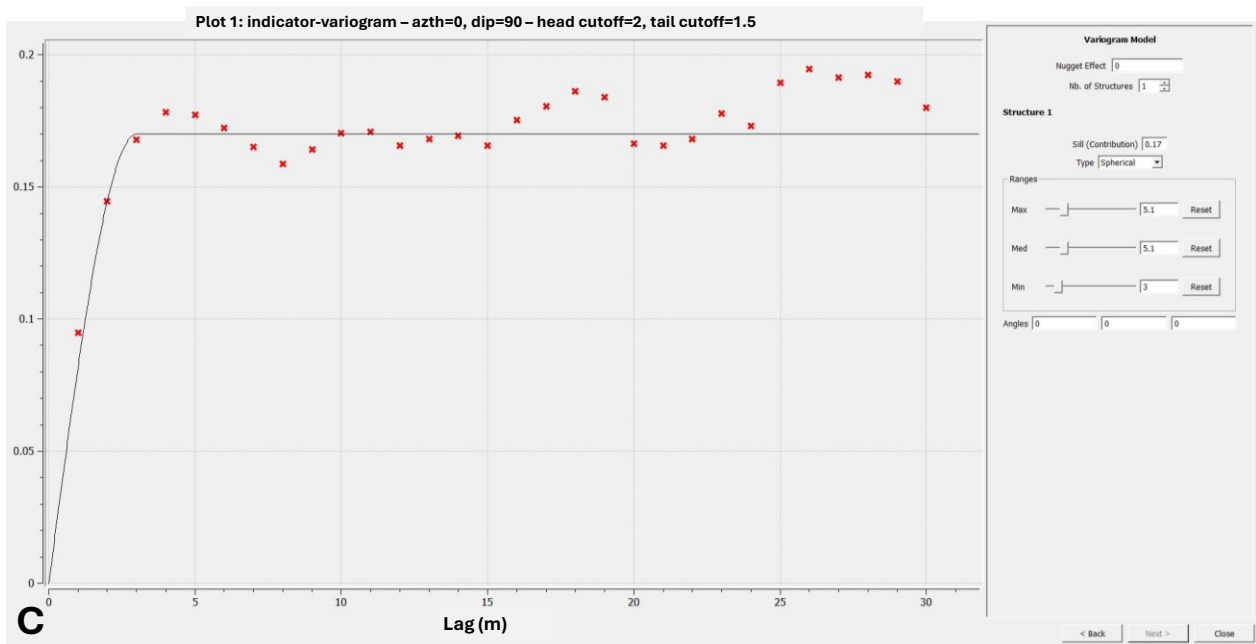


Figura 36: A) Variogramma indicatore verticale ( $azth = 0$ ,  $dip = 90$ ) per la classe GH, fittato con modello sferico (nugget = 0, sill = 0.12, range min = 3,9m) L'asse X rappresenta la distanza in metri, l'asse Y la semivarianza indicatrice. B) Variogramma indicatore verticale ( $azth = 0$ ,  $dip = 90$ ) per la classe SB, fittato con modello sferico (nugget = 0, sill = 0.09, range min = 2,1m) L'asse X rappresenta la distanza in metri, l'asse Y la semivarianza indicatrice. C) Variogramma indicatore verticale ( $azth = 0$ ,  $dip = 90$ ) per la classe ARG, fittato con modello sferico (nugget = 0, sill = 0.17, range min = 3,0m) L'asse X rappresenta la distanza in metri, l'asse Y la semivarianza indicatrice.

Le figure mostrate in seguito, mostrano tre realizzazioni rappresentative della simulazione SISIM delle facies nel Grid 3D, SIS\_09 (figura 37 - A, B), SIS\_26 (figura 37 - C, D), SIS\_1 (figura 37 - E, F), visualizzate in due modalità complementari una vista laterale prospettica dell'intero volume (A, C, E) e un fence diagram con sezione orizzontale e verticale al 45% dell'estensione (B, D, F).

La scala cromatica utilizzata è la seguente: blu scuro = GH ghiaie (0), verde = SB sabbie (1), rosso = ARG argille (2). Le zone grigie corrispondono alle celle in cui non è presente il volume ghiaioso di interesse.

La distribuzione delle facies si evidenzia una concentrazione maggiore delle ghiaie nella porzione meridionale dell'area coerentemente con le proporzioni imposte (38% GH) e con la distribuzione del volume ghiaioso derivata dalle fasi precedenti.

In tutte le realizzazioni le proporzioni globali delle tre tipologie sono rispettate, ma la loro disposizione spaziale cambia da realizzazione a realizzazione, riflettendo l'incertezza nelle zone non campionate da pozzi. Riguardo alla continuità laterale dei corpi litologici, in alcune realizzazioni corpi di ghiaie appaiono più estesi e continui, mentre in altre risultano più frammentati e discontinui, riflettendo la variabilità stocastica dell'algoritmo.

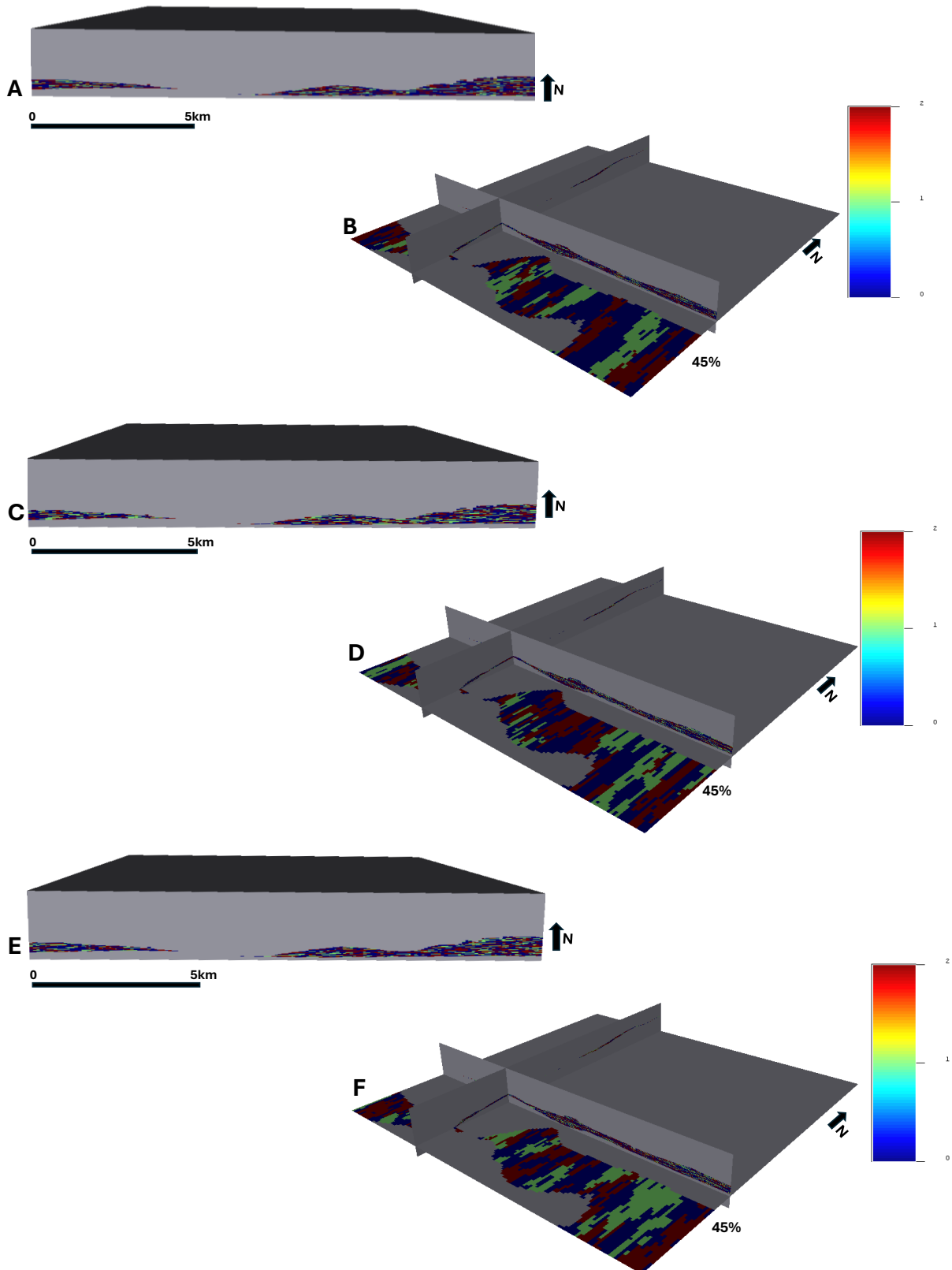


Figura 37: A) Vista laterale prospettica del grid 3D con la realizzazione SIS\_09 della simulazione SISIM delle facies. B) Fence diagram della realizzazione SIS\_09, che mostra la distribuzione planimetrica delle tre facies litologiche all'interno del corpo ghiaioso. C) Vista laterale prospettica del grid 3D con la realizzazione SIS\_26 della simulazione SISIM delle facies. D) Fence diagram della realizzazione SIS\_26, che mostra la distribuzione planimetrica delle tre facies litologiche all'interno del corpo ghiaioso. E) Vista laterale prospettica del grid 3D con la realizzazione SIS\_1 della simulazione SISIM delle facies. F) Fence diagram della realizzazione SIS\_1, che mostra la distribuzione planimetrica delle tre facies litologiche all'interno del corpo ghiaioso.

A partire dalle 50 realizzazioni prodotte dalla simulazione SISIM, è stata calcolata la probabilità di occorrenza per ciascuna delle tre facies modellate, ghiaie (GH facies = 0), sabbie (SB = facies 1) e argille (ARG = facies 2), mediante uno script Python sviluppato nell'ambiente SGeMS. Lo script opera in un singolo passaggio attraverso tutte le realizzazioni, contando per ciascuna cella del grid tridimensionale l'occorrenza di ogni facies e normalizzando il suo numero totale di realizzazioni valide, producendo così tre grid di probabilità (Prob\_0, Prob\_1, Prob\_2) e un grid di verifica della somma (Prob\_sum), il cui valore atteso è pari a 1 in ogni cella.

I risultati (figura 38) mostrano una distribuzione spaziale coerente con il modello geologico atteso. La facies ghiaiosa (Prob\_0) presenta la probabilità media più elevata circa 0.47, con valori che raggiungono localmente il massimo in corrispondenza dei pozzi di condizionamento dove la presenza di un certo tipo di facies è certa. Questa distribuzione, visibile nel fence diagram, evidenzia come il corpo ghiaioso si concentri nella fascia basale del volume modellato. La facies argillosa (Prob\_2, media circa 0.32) occupa una posizione intermedia, mentre la facies sabbiosa (Prob\_1, media circa 0.21) mostra la probabilità media più bassa.

In tutti e tre i grid di probabilità, i valori più elevati si localizzano in prossimità dei pozzi di condizionamento dove i dati hard impongono alla simulazione la facies osservata con certezza. Allontanandosi dai pozzi, la probabilità tende ad approssimare la proporzione globale di ciascuna facies, riflettendo l'incertezza crescente della stima geostatistica nelle zone non campionate.

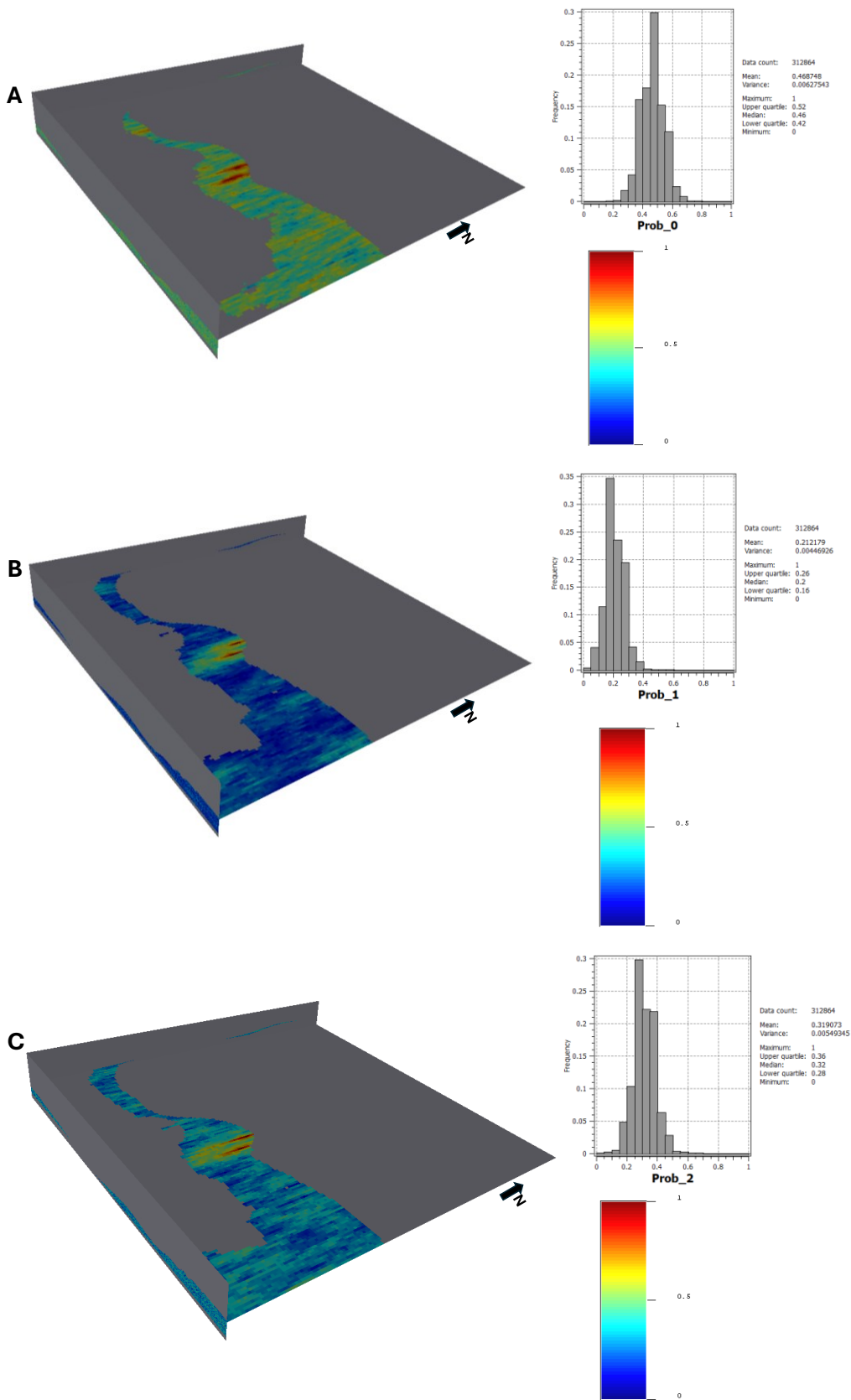


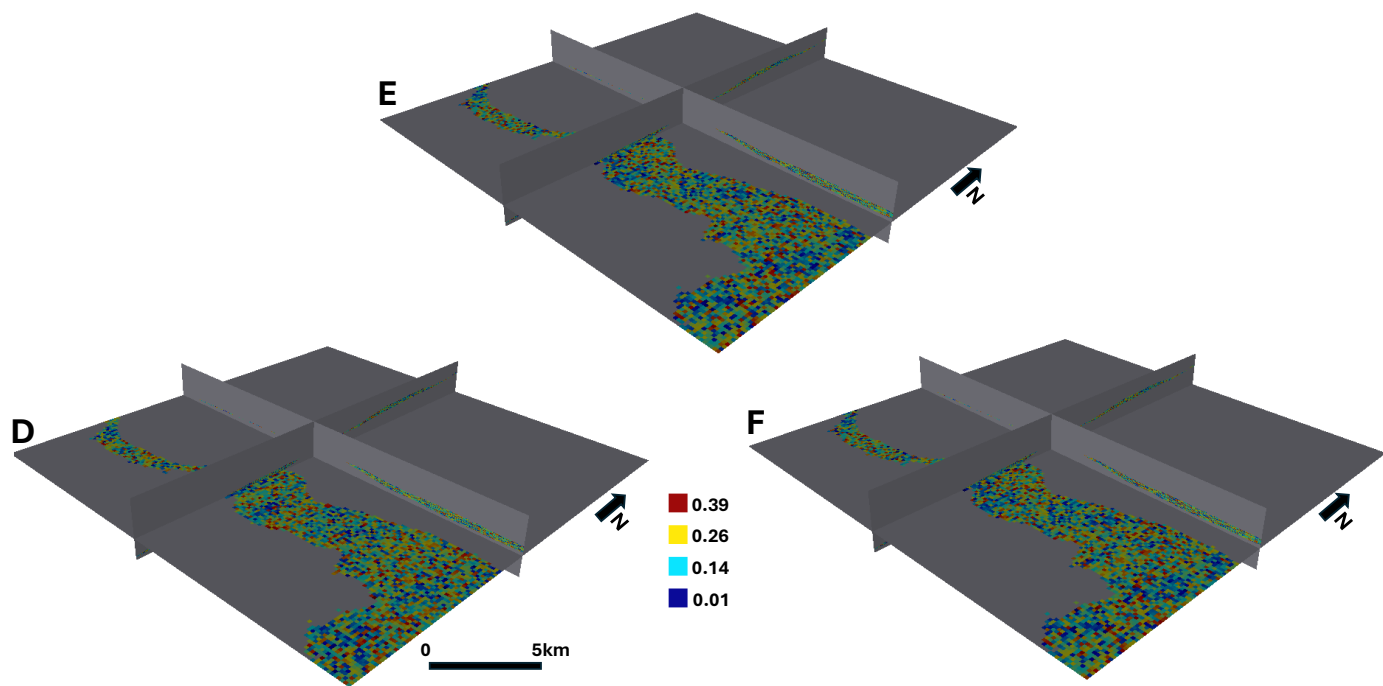
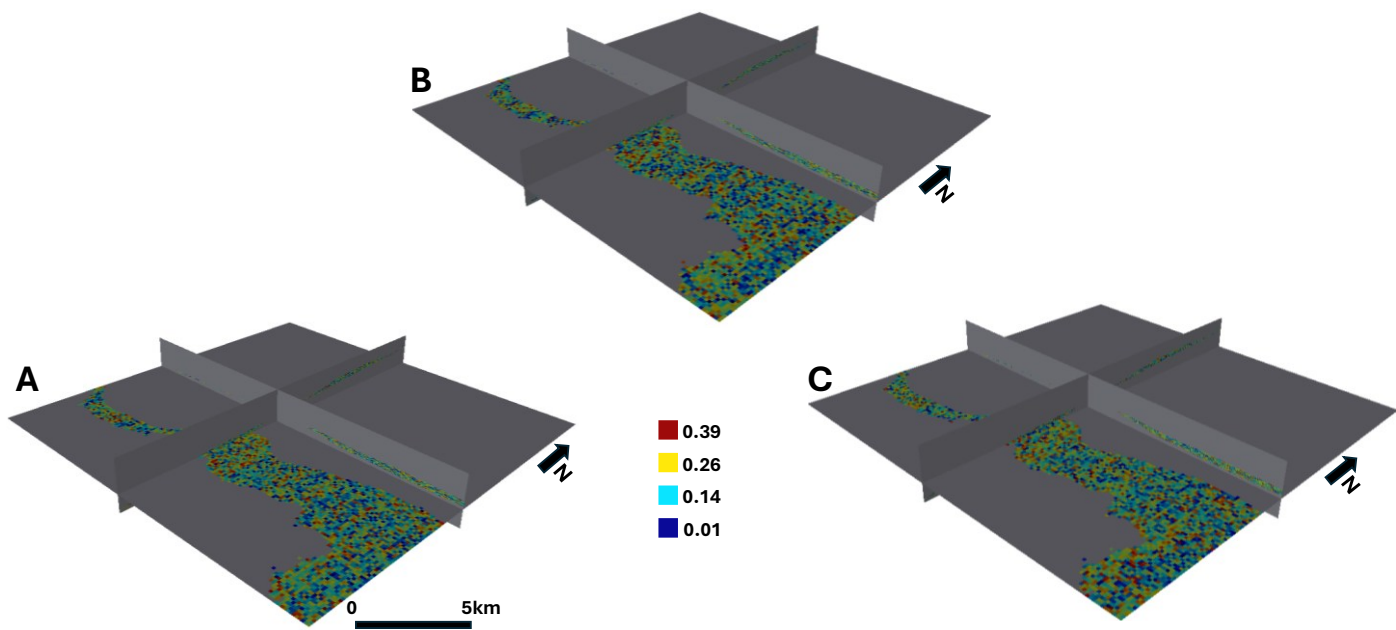
Figura 38: Mappe e istogrammi di probabilità per facies ottenute dalle 50 realizzazioni SISIM. A) Fence Diagram e distribuzione statistica della probabilità di occorrenza della facies ghiaiosa (Prob\_0, media = 0.47). B) Fence Diagram e distribuzione statistica della probabilità di occorrenza della facies sabbiosa (Prob\_1, media = 0.21). C) Fence Diagram e distribuzione statistica della probabilità di occorrenza della facies argillosa (Prob\_2, media = 0.32).

Le 50 realizzazioni SIS costituiscono un insieme di scenari alternativi equiprobabili, e rappresentano la misura quantitativa della variabilità nella distribuzione spaziale delle facies e, di conseguenza, dell'incertezza sulla distribuzione e connettività dei volumi net associati a ciascuna di esse. L'insieme delle simulazioni fornisce infatti una stima dell'incertezza sui volumi delle facies ghiaiose, sabbiose e fini, consentendo di propagare tale incertezza nelle fasi di analisi successive. In questo contesto, il modello statico così costruito costituisce la base per la quantificazione dell'incertezza dei volumi relativi di diverse facies e della loro distribuzione tridimensionale, nonché per la stima delle porosità di bulk e dell'associata capacità termica, parametro fondamentale per il calcolo del Heat in Place del reservoir geotermico.

A partire dalle tre realizzazioni SISIM selezionate (real\_01, real\_09, real\_26), è stata eseguita la simulazione geostatistica sequenziale gaussiana (SGS, Sequential Gaussian Simulation) della porosità, separatamente per ciascuna facies. Per ogni realizzazione SIS di riferimento, sono state prodotte tre simulazioni di porosità distinte, una per la facies ghiaiosa (GH), una per la facies sabbiosa (SB) e una per la facies argillosa (ARG), ottenendo complessivamente nove grid di porosità, tre per ciascuna realizzazione SISIM di riferimento (figura 39). I valori di distribuzione della porosità adottati per ciascuna facies sono stati desunti direttamente dalla griglia di riferimento della porosità delle tre litologie sugli alti morfologici, ricavata dal lavoro condotto nell'area di Treviglio (Pantopoulos et al., 2025).

I parametri di simulazione sono stati differenziati per facies sia in funzione delle rispettive proprietà fisiche e della continuità spaziale attesa. Per tutte le facies è stato adottato un kriging semplice (SK) con un massimo di 12 dati di condizionamento e un variogramma di tipo esponenziale. Le code della distribuzione sono state modellate con una funzione Power ( $\omega = 3$  per la coda inferiore  $\omega = 0.333$  per la coda superiore) per tutte e tre le facies.

Le differenze principali tra le facies riguardano il range del variogramma e i limiti delle code delle distribuzioni statistiche. Per la facies ghiaiosa i range sono stati impostati a 10 m (Max), 8 m (Med) e 7 m (Min), con valori di porosità compresi tra 0.01 e 0.39. Per la facies sabbiosa i range sono stati ampliati a 30 m (Max), 25 m (Med) e 20 m (Min), con valori di porosità compresi tra 0.05 e 0.39, riflettendo una maggiore continuità spaziale rispetto alle ghiaie. Per la facies argillosa i range sono stati impostati a 10 m (Max), 8 m (Med) e 6 m (Min), con valori di porosità compresi tra 0.01 e 0.34, coerentemente con i valori di porosità totale attesi per i sedimenti fini.



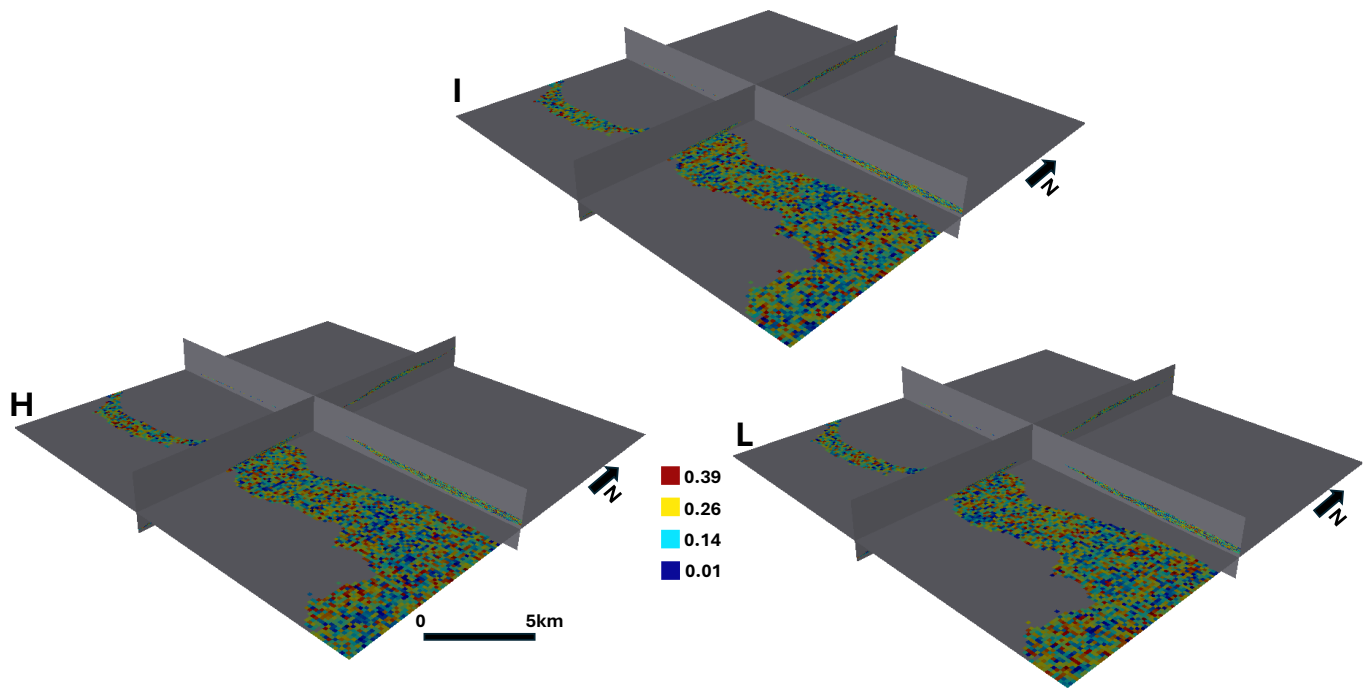


Figura 39: Fence Diagram delle simulazioni SGS di porosità per le tre realizzazioni SISIM di riferimento. A) Poro\_real1\_real0; B) Poro\_real1\_real1; C) Poro\_real1\_real2; D) Poro\_real09\_real0; E) Poro\_real09\_real2; F) Poro\_real09\_real2; G) Poro\_real26\_real0; H) Poro\_real26\_real1; I) Poro\_real26\_real2. Ciascuna fence diagram mostra la distribuzione spaziale della porosità per tutte e tre le facies litologiche (SB, ARG, GH). I colori caldi indicano valori di porosità elevati, i colori freddi valori bassi.

# CAPITOLO 5 – APPLICAZIONE: QUANTIFICAZIONE DELLA RISORSA GEOTERMICA

A partire dalle nuove realizzazioni di porosità ottenute dalla simulazione, è stato calcolato l'Heat in Place (figura 41) per ciascuna combinazione di realizzazione di facies e realizzazione di porosità, mediante uno script Python sviluppato in SGeMS. Il calcolo è stato eseguito su base cellulare, assegnando a ogni singola cellula del grid tridimensionale un valore di capacità termica volumetrica in funzione della litologia e della porosità localmente simulate.

La capacità termica volumetrica è stata calcolata come combinazione lineare del contributo della matrice rocciosa e del fluido interstiziale secondo la relazione:

$$C_{vol} = (1 - \varphi) \cdot \rho_{rock} \cdot cp_{rock} + \varphi \cdot \rho_{fluid} \cdot cp_{fluid}$$

dove  $\varphi$  è la porosità della cella,  $\rho_{rock} = 2600 \text{ kg/m}^3$  è la densità della roccia,  $\rho_{fluid} = 1000 \text{ kg/m}^3$  è la densità del fluido,  $cp_{fluid} = 4180 \text{ J/kg/K}$  è il calore specifico dell'acqua, e  $cp_{rock}$  è il calore specifico della matrice rocciosa, differenziato per facies:  $850 \text{ J/kg/K}$  per le ghiaie (facies 0),  $800 \text{ J/kg/K}$  per le sabbie (facies 1) e  $900 \text{ J/kg/K}$  per i sedimenti fini (facies 2). Il calore in posto per ogni cella è stato quindi calcolato come:

$$Q = V_{cella} \cdot C_{vol} \cdot (T - T_{ref})$$

dove  $V_{cella} = 100 \times 100 \times 10 \text{ m}^3 = 100.000 \text{ m}^3$  è il volume della cella,  $T$  è la temperatura locale stabilita sulla base di un modello di temperatura e  $T_{ref} = 10^\circ\text{C}$  è presa come temperatura di riferimento. I valori di temperatura sono stati ottenuti dalla griglia tridimensionale di temperatura dell'area di studio, ritagliata dal dataset di Barrera Acosta et al. (2024, figura 40) a seguito di downscaling alla risoluzione scelta.

Al fine di ottenere una rappresentazione bidimensionale della distribuzione areale dell'HIP, I valori tridimensionali sono stati integrati verticalmente lungo la colonna stratigrafica per ciascuna coppia di celle (x, y), sommando i contributi di tutti i livelli e normalizzando il risultato rispetto all'area della cella, esprimendo il valore finale in  $\text{GJ/M}^2$ . Le mappe 2D (figura 42) così ottenute permettono di visualizzare in pianta la variazione spaziale del calore in posto in funzione della distribuzione delle facies e della porosità simulata.

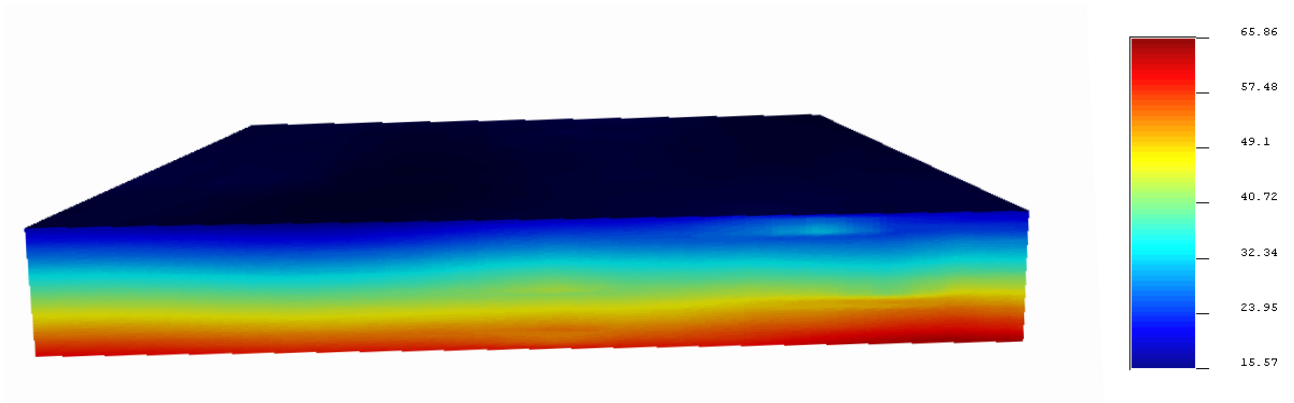


Figura 40: Grid tridimensionale delle temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) ritagliato sull'area di studio a partire dal dataset di Barrera Acosta et al. (2024). La scala cromatica varia da  $15.6^{\circ}\text{C}$  a  $65.9^{\circ}\text{C}$ , riflettendo il gradiente geotermico verticale con temperature crescenti con la profondità.

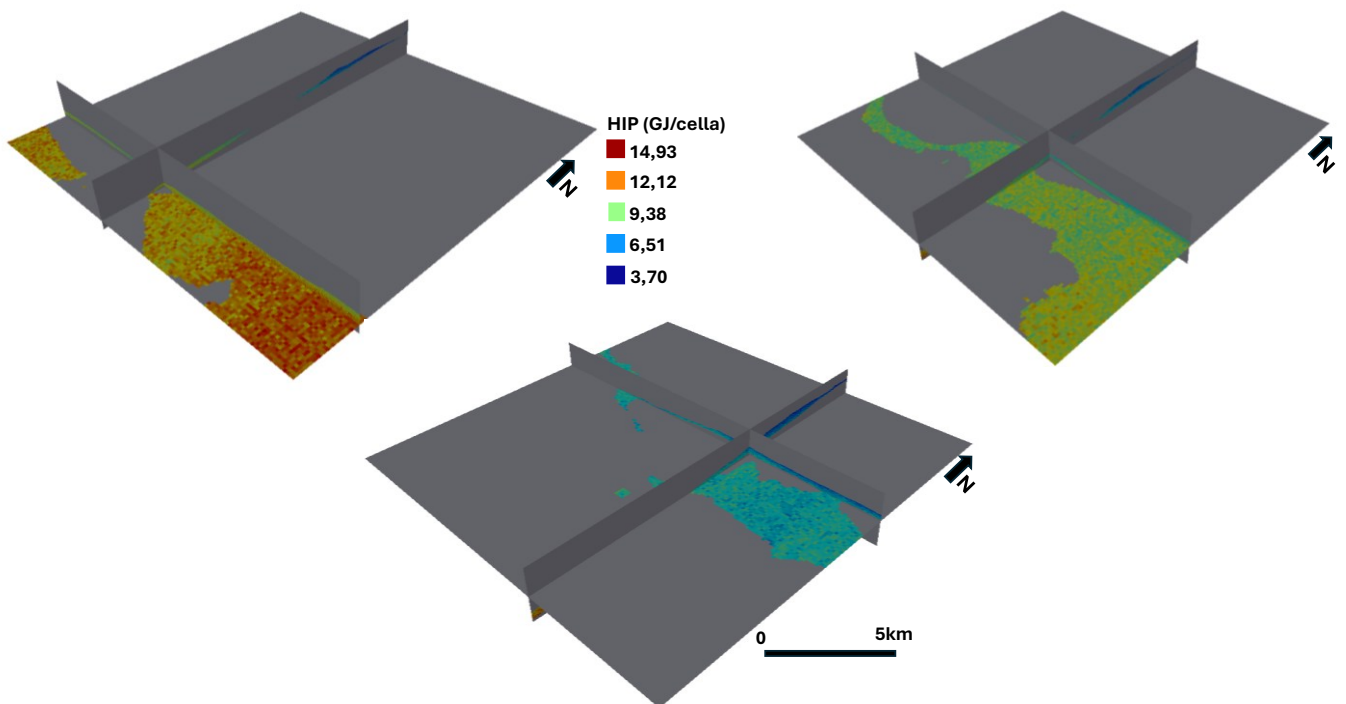


Figura 41: Fence diagram dell'Heat in place tridimensionale per la realizzazione real\_1 (scala cromatica: 3.70-14.93 GJ/cella). I colori caldi indicano valori di HIP elevati in corrispondenza delle temperature più alte nella parte basale del volume; i colori freddi indicano valori minori nella parte sommitale.

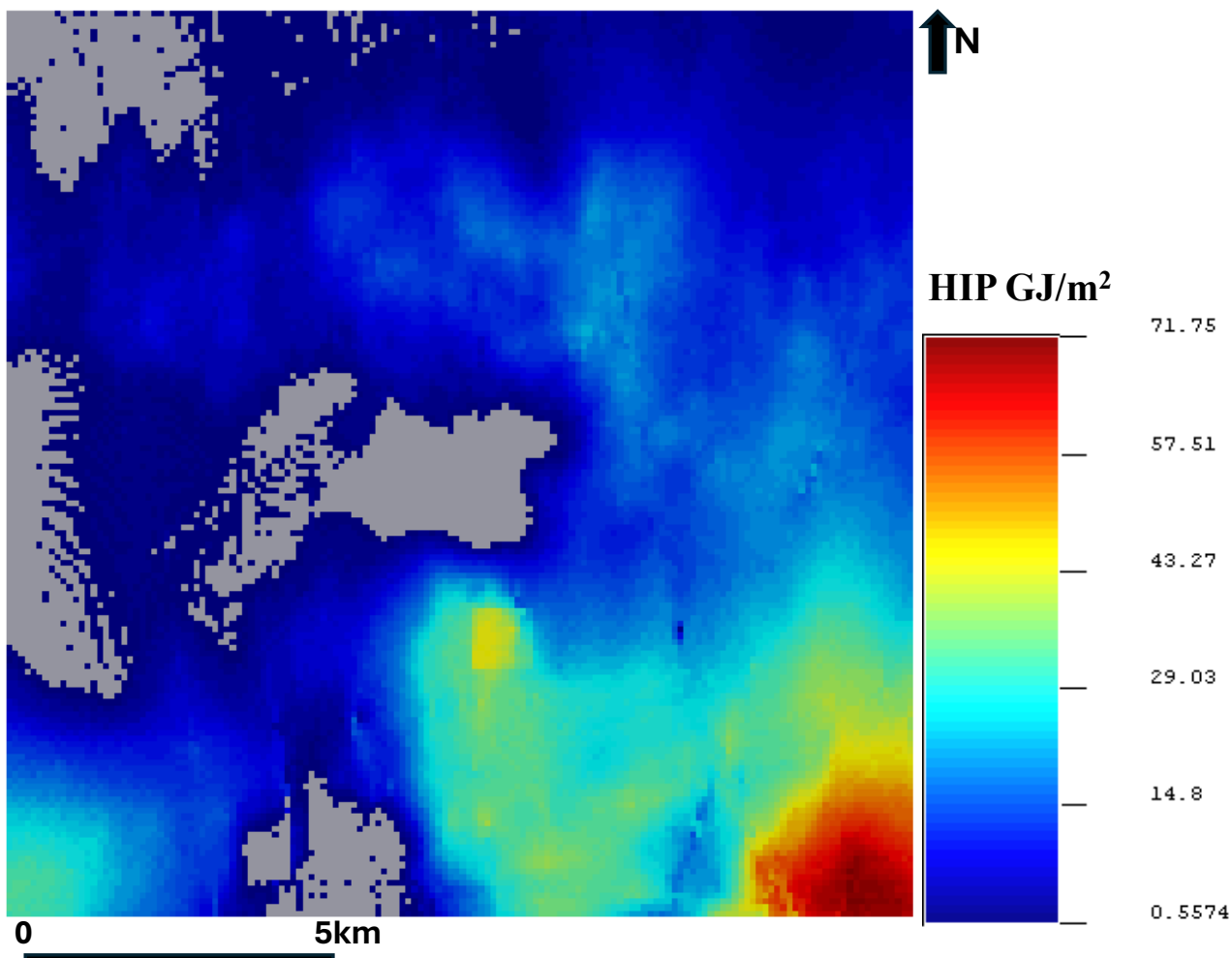


Figura 422: E-type delle mappe 2D di Heat in Place ottenuto come media delle nove realizzazioni (scala cromatica: 0.56-71.75 GJ/m<sup>2</sup>), Le zone a maggiore HIP coincidono con le aree di alto morfologico. In grigio le celle prive di dati, dove la SGF non è preservata su alti morfologici (zone associate a paleodepressioni tardo-messiniane).

I risultati del calcolo dell'HIP Sono stati analizzati sia in forma tridimensionale che bidimensionale, al fine di valutare la distribuzione spaziale del potenziale geotermico e quantificare l'incertezza associata alla variabilità volumetrica del corpo ghiaioso.

A titolo rappresentativo, la figura 41 mostra il fence diagram dell'HIP tridimensionale per la realizzazione real\_01, con scala cromatica compresa tra 3.70-14.93 GJ/cella. La distribuzione del calore in posto riflette direttamente il gradiente geotermico verticale: i valori più elevati, rappresentati dai colori caldi, si concentrano nella parte basale del volume modellato, dove le temperature sono più alte, mentre i valori diminuiscono progressivamente verso la parte sommitale, in corrispondenza delle temperature più basse. Le nove realizzazioni prodotte mostrano variazioni molto limitate tra loro, a conferma che le variabilità della distribuzione delle facies e della porosità hanno un impatto contenuto sul valore assoluto dell'HIP tridimensionale, mentre il controllo dominante è esercitato dal gradiente termico.

La distribuzione areale del calore in posto è stata analizzata attraverso la mappa E-type dell'HIP 2D (figura 42), ottenuta come media delle stime associate alle nove realizzazioni integrate sulla verticale, con valori compresi tra 0.56 e 71.75 GJ/m<sup>2</sup>. La mappa evidenzia come le zone a maggiore potenziale geotermico coincidano con le aree di alto morfologico nella porzione meridionale dell'area di studio, dove le ghiaie raggiungono gli spessori maggiori e la temperatura più elevata; questa distribuzione è controllata dallo spessore del corpo ghiaioso, come mostrato dalla mappa 2D degli spessori modellati (figura 42), che presenta valori compresi tra 106.7 m e 608.1 m, e dalla profondità del volume, che aumenta verso sud raggiungendo temperature maggiori.

La relazione tra volume e calore in posto è quantificata dal crossplot di figura 44, che mette in relazione lo spessore del gross reservoir modellato (asse x, metri) con l'E-type dell'HIP 2D (asse y, GJ/m<sup>2</sup>) per le 19807 celle attive, corrispondenti alle zone di alto morfologico messiniano. La dispersione dei punti riflette l'effetto combinato di più fonti di variabilità: lo spessore gross del corpo ghiaioso, la profondità media del reservoir, che controlla il campo termico locale, la distribuzione delle facies e la variabilità della porosità simulata dalla SGS. Questo risultato suggerisce che, nell'area di studio, l'incertezza sul calore in posto è dominata dall'incertezza volumetrica piuttosto che da quella petrofisica, e che una migliore determinazione della superficie basale della SGF costituisce il fattore critico per la riduzione dell'incertezza nella stima del potenziale geotermico.

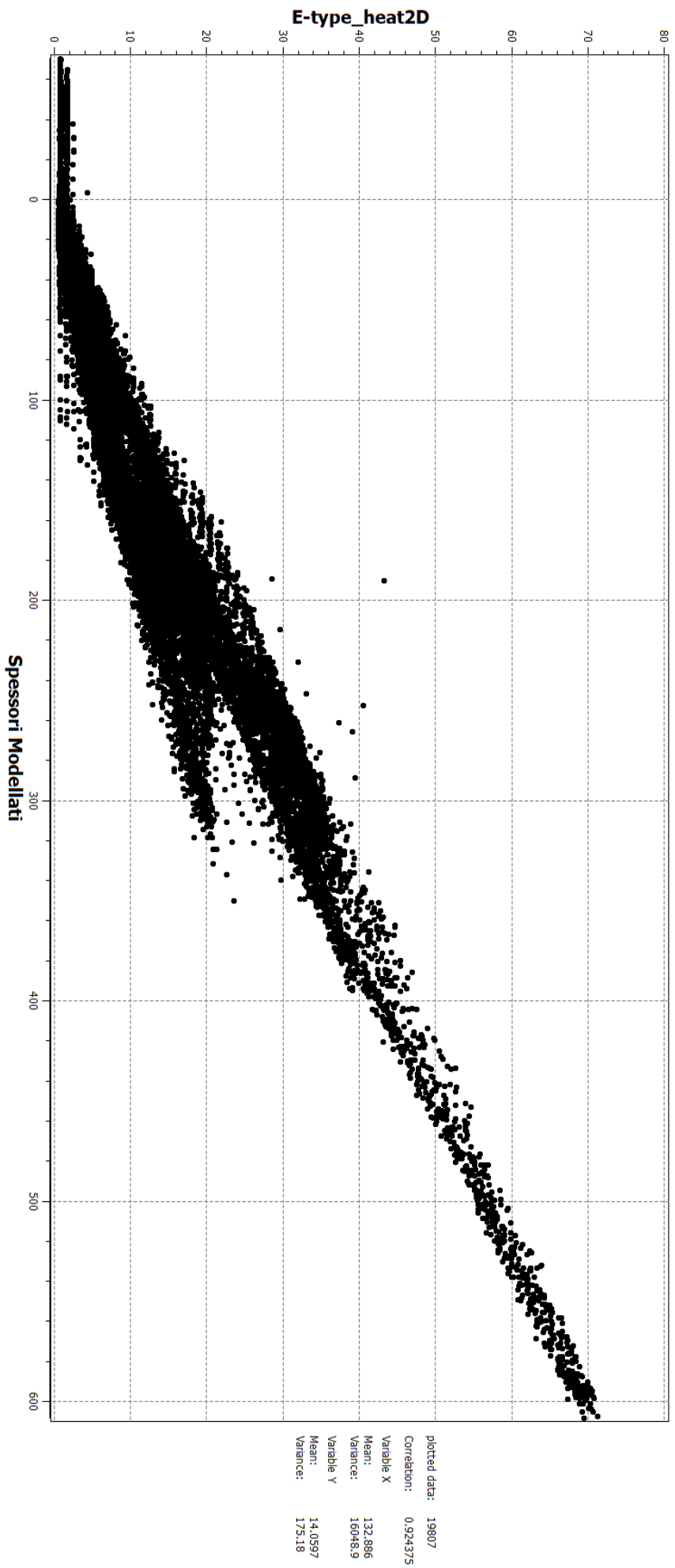


Figura 44: Crossplot tra spessori modellati (asse X, m) e E-type dell'HIP 2D (asse Y,  $GJ/m^2$ ) per 19807 celle ( $R=0.924$ ).  
 La forte correlazione lineare evidenzia il controllo esercitato dal volume Gross sul calore in posto; la dispersione dei punti  
 riflette l'incertezza volumetrica sulla superficie basale e la variabilità della porosità simulata.

## CAPITOLO 6 – CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha affrontato la caratterizzazione e modellazione geostatistica del sottosuolo dell'area urbana di Milano, con l'obiettivo di costruire un modello statico tridimensionale delle Ghiaie di Sergnano (SGF) e quantificarne il potenziale geotermico associato attraverso il calcolo dell'Heat in Place, sviluppando un flusso di lavoro integrato che combina dati di pubblico dominio (pozzi esplorativi dal database ViDEPI) con interpretazioni esistenti di dati di sismica a riflessione, per la costruzione di un framework di modellazione statica di reservoir geotermico. Il lavoro si è focalizzato sulla simulazione statica piuttosto che dinamica, con l'obiettivo primario di quantificare l'Heat in Place e la sua incertezza associata.

Il punto di partenza è stato la digitalizzazione sistematica delle successioni stratigrafiche di 15 pozzi esplorativi acquisiti dal database pubblico ViDEPI, e il riconoscimento di orizzonti stratigrafici chiave: la PL1 e la base delle Ghiaie di Sergnano dove queste sono presenti in corrispondenza di paleoalti morfologici preservati dall'erosione associata all'incisione messiniana. Queste superfici hanno costituito il quadro di riferimento stratigrafico per la costruzione del modello geologico.

A partire da questo framework geologico, è stato costruito un grid tridimensionale sul quale sono state eseguite 50 realizzazioni di simulazione sequenziale di indicatori (SISIM) delle tre facies principali, ghiaie (GH), sabbie (SB) e argille (ARG). Le realizzazioni, condizionate ai quattro pozzi localizzati sugli alti morfologici hanno mostrato una distribuzione spaziale delle facies coerente con il modello geologico atteso. L'analisi delle mappe di probabilità per facies ha confermato che la facies ghiaiosa presenta la probabilità di occorrenza più elevata (circa 0.47) nelle zone struttura niente più alte, mentre la probabilità decresce progressivamente allontanandosi dai pozzi di condizionamento. Su tre realizzazioni SISIM selezionate casualmente (real\_1, real\_09, real\_26), è stata successivamente eseguita la simulazione geostatistica sequenziale gaussiana (SGS) della porosità, differenziata per facies sulla base dei valori di riferimento desunti da Pantopoulos et al., 2025, ottenendo complessivamente nove realizzazioni di porosità e facies.

La distribuzione dei volumi gross delle 50 realizzazioni SISIM, riferita alle zone di alto morfologico, è mostrata in figura 45. Le stime volumetriche basate sui 4 pozzi degli alti morfologici restituiscono un range compreso tra  $3.48 \times 10^{10}$  e  $6.02 \times 10^{10} \text{ m}^3$ . Il volume modellato calcolato a partire dalla mappa degli spessori includendo tutti i 15 pozzi, tra cui quelli nei bassi morfologici con spessore delle ghiaie pari a zero, è pari a  $3.375 \times 10^{10} \text{ m}^3$  (linea rossa tratteggiata in figura 45), e si colloca al di sotto del range delle 50 realizzazioni. Questo risultato evidenzia come le stime volumetriche basate

esclusivamente sui pozzi degli alti morfologici tendano a sovrastimare il volume gross complessivo, e che l'inclusione dei vincoli nei bassi morfologici costituisce un elemento critico per una stima più conservativa e realistica del volume del reservoir.

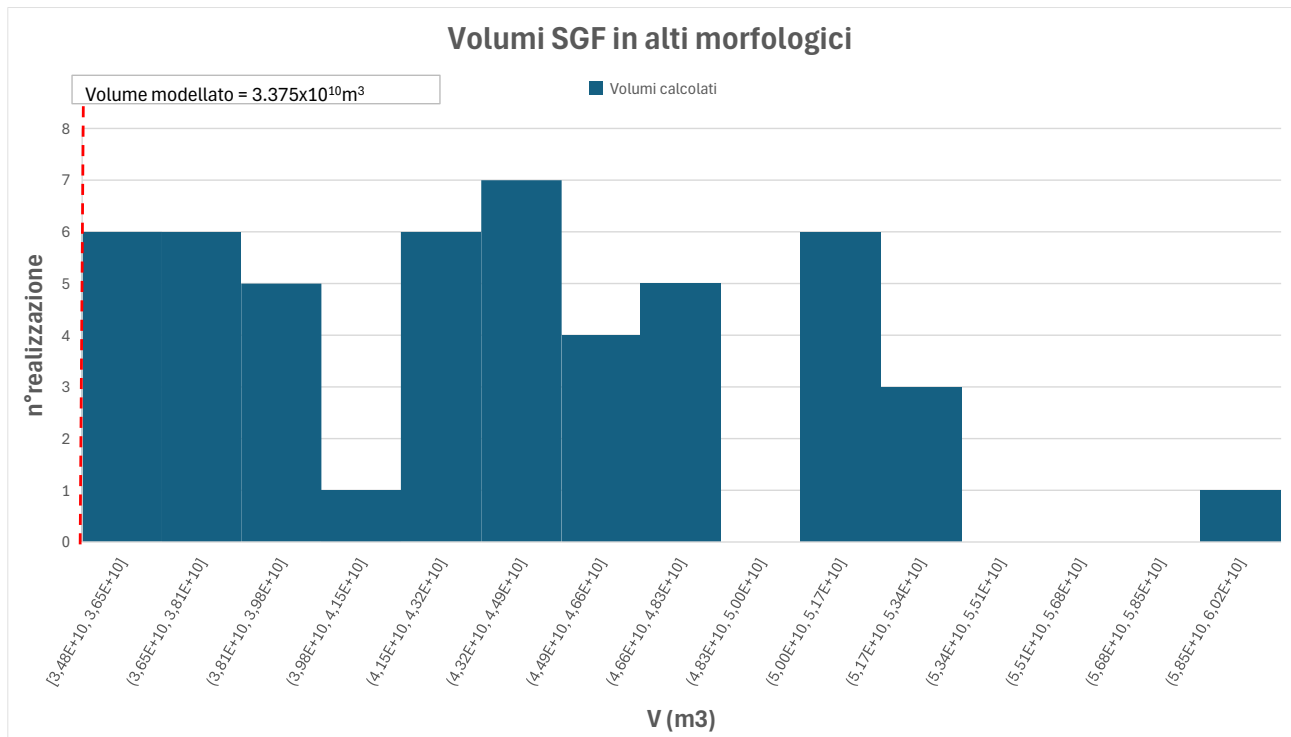


Figura 45: Istogramma dei volumi gross delle Ghiaie di Sergnano nelle zone di alto morfologico calcolati dalle 50 realizzazioni DSSIM della base delle ghiaie in alto morfologico, considerando solo i 4 pozzi in alto morfologico (asse x = volume in m³; asse y = numero di realizzazioni). La linea rossa tratteggiata indica il volume corrispondente al modello stratigrafico utilizzato per la modellazione statica ( $3.375 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ) calcolato dalla mappa degli spessori includendo tutti i 15 pozzi, compresi quelli nei bassi morfologici con spessore delle ghiaie pari a zero.

Il calcolo dell'Heat in Place è stato eseguito su base cellulare, assegnando a ogni cella del grid tridimensionale un valore di capacità termica volumetrica in funzione della litologia e della porosità simulate, e utilizzando la griglia tridimensionale di temperatura desunta da Barrera Acosta et al. (2024) come campo termico di riferimento. I risultati mostrano che la distribuzione del calore in posto è fortemente controllata dallo spessore del corpo ghiaioso (figura 46 – mappa 2D spessori; figura 47 – E-type HIP 2D), con i valori più elevati concentrati nelle zone di maggiore spessore delle successioni in alto morfologico. Questo controllo è quantificato dal crossplot tra spessore gross e HIP 2D (figura 48, che evidenzia una correlazione lineare con coefficiente  $R = 0.924$ , dimostrando che l'incertezza sul calore in posto è dominata dall'incertezza volumetrica associata alla difficoltà nello stabilire la geometria della superficie basale della SGF piuttosto che dalla variabilità petrofisica.

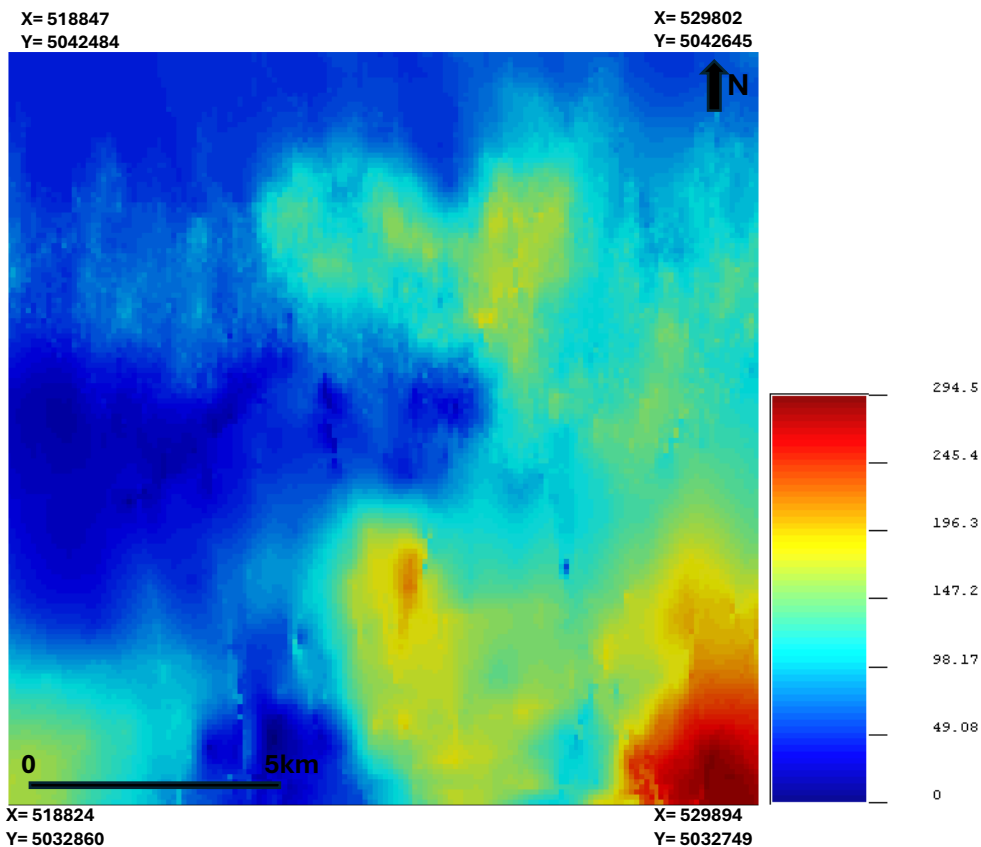


Figura 46: Mappa 2D degli spessori modellati delle Ghiaie di Sergnano nelle zone di alto morfologico (scala cromatica 0-294.5 m). I valori negativi ai bordi del dominio rappresentano artefatti di interpolazione legati all'incertezza sulla superficie basale della SGF nelle zone meno vincolate dai dati di pozzo.

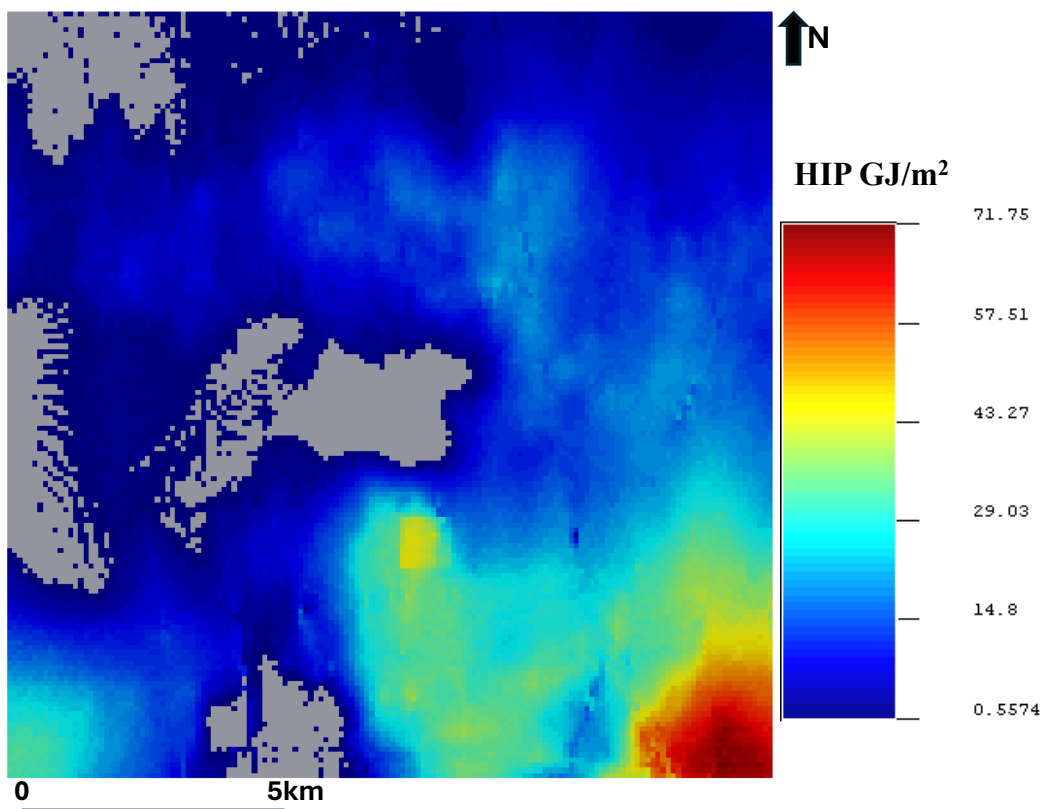


Figura 47: E-type delle mappe 2D di Heat in Place Ottenuto come media delle nuove realizzazioni (scala cromatica: 0.56-71.75 GJ/m²). Le zone a maggiore HIP coincidono con le aree di alto morfologico dove le ghiaie raggiungono gli spessori maggiori e a maggiori profondità.

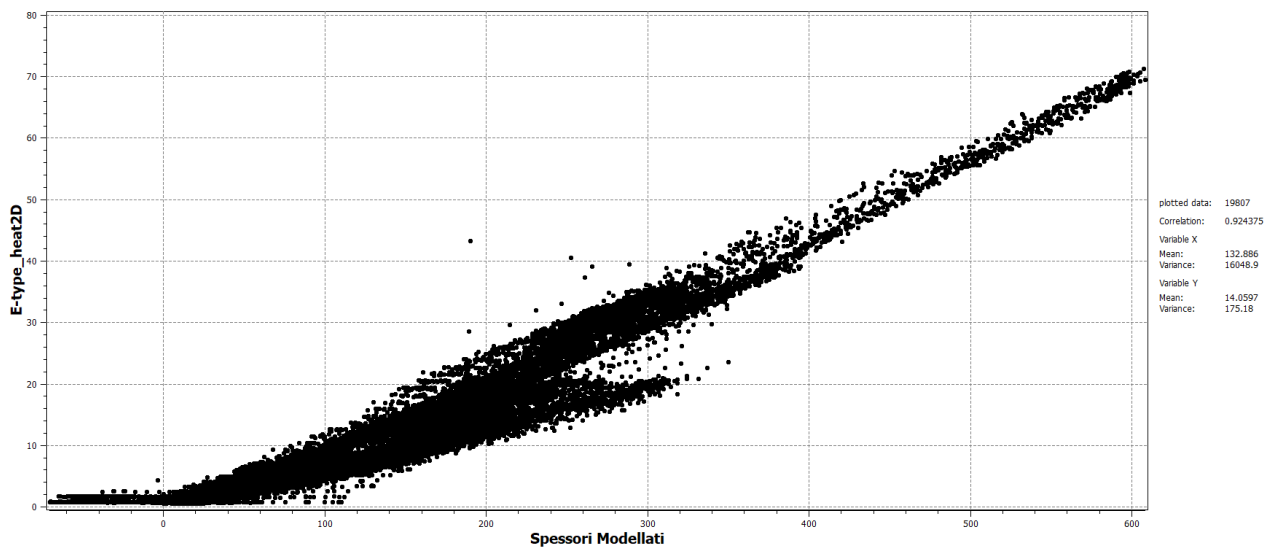


Figura 48: Crossplot tra spessori modellati delle Ghiaie di Sergnano (asse X, m) e E-type dell'HIP 2D (asse Y, GJ/m<sup>2</sup>) per 19807 celle ( $R = 0.924$ ). La forte correlazione lineare evidenzia il controllo esercitato dal volume gross sul calore in posto; la dispersione dei punti riflette l'incertezza volumetrica sulla superficie basale e la variabilità della porosità simulata.

In sintesi, i principali risultati del lavoro sono:

- Il flusso di lavoro sviluppato, basato sull'integrazione di dati di pubblico dominio e dati sismici in un framework di modellazione statica geostatistica, che costituisce un approccio replicabile per la caratterizzazione di reservoir geotermici a bassa entalpia in contesti analoghi al bacino padano.
- La distribuzione spaziale delle Ghiaie di Sergnano nell'area di studio è fortemente controllata dalla morfologia del substrato.
- Il volume gross reservoir stimato includendo tutti 15 pozzi ( $3.375 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ) è inferiore al limite inferiore del range delle 50 realizzazioni SISIM condizionate ai soli pozzi degli alti morfologici, evidenziando l'importanza di includere i vincoli di ineguaglianza (in questo caso, spessore = 0) per una stima volumetrica più realistica.
- Il calore in posto è fortemente correlato con lo spessore del gross reservoir, indicando che la riduzione dell'incertezza volumetrica, attraverso una migliore determinazione della superficie basale del reservoir costituisce il fattore critico per migliorare la stima del potenziale geotermico dell'area.

Al fine di contestualizzare i risultati ottenuti nel quadro più ampio delle risorse geotermiche a bassa entalpia europee, vengono qui discussi due casi di riferimento: il primo relativo a un sistema già attivamente sfruttato per teleriscaldamento, il secondo relativo a un workflow di caratterizzazione geostatistica metodologicamente analogo a quello sviluppato nel presente lavoro.

## **Caso 1 – North German Basin, Germania: sfruttamento attivo di acquiferi clastici a bassa entalpia**

Il caso più pertinente per un confronto basato su profondità e range termico simili alla SGF è quello degli acquiferi mesozoici arenacei del bacino sedimentario della Germania settentrionale (North German Basin, NGB). Le indagini intensive sullo sfruttamento del potenziale geotermico del NGB iniziano nei primi anni '80 (Seibt & Kellner, 2003), con i primi test di produzione e reiniezione in reservoir arenacei nel 1982, che portano nel 1984 all'entrata in funzione del primo impianto geotermico per teleriscaldamento in Germania, nella città di Waren (Muritz). L'acquifero sfruttato a Waren è costituito da arenarie a una profondità di 1470 m, con una temperatura dell'acqua prodotta di 62 °C e portate nell'ordine di 60 m<sup>3</sup>/h (Seibt & Kellner, 2003).

Il confronto con il reservoir della SGF è significativo soprattutto per quanto riguarda il range termico. Gli acquiferi del NGB più importanti per le applicazioni geotermiche mostrano temperature maggiori di 60 °C, porosità maggiore del 20% e permeabilità maggiore di 500 mD, con spessori generalmente superiori a 20 m. Questo range termico è confrontabile con i valori massimi registrati nella parte basale del reservoir della SGF nell'area di studio (circa 66 °C), sebbene i valori medi del reservoir milanese siano più contenuti. Dal punto di vista litologico entrambi i sistemi sono reservoir clastici a porosità della matrice primaria: le unità arenacee a dominanza fluviale del NGB sono caratterizzate da basso contenuto di argilla, porosità efficace tra 20% e 35% e permeabilità misurata su carote superiori a 500 mD, valori analoghi e quelli di riferimento adottati nel presente lavoro per la facies ghiaiosa della SGF (Pantopoulos et al., 2025). La principale differenza risiede nella profondità: gli acquiferi del NGB vengono sfruttati tipicamente a 1200-1500 m, mentre la SGF si colloca a profondità localmente più contenute. Un caso recente a Hannover ha esplorato acquiferi arenacei del Wealden a una profondità di 1200-1300 m e ad una temperatura di circa 70 °C, dimostrando che un doublet<sup>5</sup> con spaziatura di 500 m può sostenere una produzione termica di 0.5- 2MW per almeno trent'anni (Seibt & Kellner, 2003). Questo dato fornisce un ordine di grandezza di riferimento per la potenza termica estraibile da un sistema geotermico con caratteristiche petrofisiche analoghe alla SGF, una volta che la permeabilità del reservoir sarà caratterizzata.

## **Caso 2 – Paesi Bassi: modellazione geostatistica 3D di acquiferi geotermici a bassa entalpia**

---

<sup>5</sup> Doublet: Il termine doublet indica la configurazione impiantistica standard per lo sfruttamento geotermico di acquiferi profondi, basato su due pozzi: un pozzo di produzione, dal quale viene estratta l'acqua termica da reservoir, è un pozzo di reiniezione, nel quale l'acqua raffreddata viene reimessa nel reservoir col passaggio attraverso scambiatore di calore in superficie. Questa configurazione a circuito chiuso garantisce il mantenimento della pressione del reservoir e la sostenibilità a lungo termine dello sfruttamento, evitando l'esaurimento della risorsa idrica sotterranea.

Il secondo caso di confronto riguarda il workflow di caratterizzazione geostatistica degli acquiferi geotermici nei Paesi Bassi, sviluppato nell'ambito del sistema ThermoGIS (Pluymaekers et al., 2012). L'esplorazione geotermica nei Paesi Bassi può beneficiare considerevolmente del patrimonio dei dati di pozzo e dell'esplorazione di idrocarburi. In molti casi, i reservoir di idrocarburi costituiscono l'equivalente laterale degli acquiferi geotermici; i dati di sottosuolo accumulati nelle ultime decadi sono stati utilizzati per sviluppare modelli 3D della struttura del sottosuolo, adottati come punto di partenza per la mappatura delle geometrie delle proprietà di reservoir geotermici. Un workflow è stato sviluppato per mappare le proprietà degli acquiferi su scala regionale, ottenendo mappe di trasmissività e la relativa incertezza per possibili acquiferi geotermici (Pluymaekers et al., 2012).

Dal punto di vista metodologico, il workflow olandese presenta stretta analogia con quello sviluppato nel presente lavoro. Nel West Netherlands Basin, a causa della distribuzione spaziale fortemente discontinua dei membri del Cretacico inferiore, è stato sviluppato un modello 3D popolato con diverse facies, sabbie marine e fluviali e argille, condizionato ai dati di pozzo, con 50 realizzazioni equiprobabili prodotte per rappresentare l'incertezza (Pluymaekers et al., 2012). Il numero di realizzazioni, il tipo di simulazione geostatistica, la struttura del workflow, l'integrazione di dati di pozzo pubblici e dati sismici per la costruzione di un modello statico 3D di facies, seguita dalla caratterizzazione petro-fisica, sono tutti elementi direttamente analoghi a quelli adottati nel presente lavoro. La differenza principale risiede nel fatto che il workflow olandese include anche la modellazione della permeabilità e della trasmissività, spingendosi fino alla valutazione della potenza estraibile da un doublet per ciascun acquifero, costituendo il naturale sviluppo metodologico verso cui orientare le future applicazioni di questo studio.

Il confronto con questi due casi permette di posizionare il reservoir dell'area milanese nel contesto più ampio delle risorse geotermiche a bassa entalpia europee. In termini di temperatura la si colloca nella fascia inferiore del range tipicamente sfruttato per il riscaldamento in Europa, dove i sistemi più efficienti operano a temperature di produzione di 60-90 °C, con valori nella parte basale del reservoir a 50-66 °C che si avvicinano alla soglia di utilizzo diretto per teleriscaldamento, mentre la parte sommitale (16-30 °C) richiederebbe l'ausilio di pompe di calore per applicazioni termiche. In termini di litologia clastica e porosità di matrice, la SGF è analoga agli acquiferi arenacei del NGB e del West Netherlands Basin, con il vantaggio rispetto ai sistemi carbonatici di una distribuzione della porosità più prevedibile e modellabile con approcci geostatistici standard. Il principale fattore limitante rispetto ai casi di confronto rimane la mancanza di dati di permeabilità e trasmissività, che impedisce al momento una valutazione della producibilità effettiva del reservoir.

Il presente lavoro ha sviluppato un framework di modellazione statica per la quantificazione dell'Heat in Place, concentrandosi sulla caratterizzazione litologica e petrofisica del reservoir nelle zone di alto morfologico; tuttavia, alcune limitazioni metodologiche devono essere considerate per una corretta interpretazione dei risultati e per indirizzare i futuri sviluppi della ricerca.

Il principale limite riguarda l'assenza di una modellazione della permeabilità, parametro fondamentale per valutare la producibilità effettiva del reservoir. La permeabilità potrebbe essere simulata all'interno dello stesso framework geostatistico sviluppato, utilizzando relazioni poro-perm derivate dalla letteratura per le facies modellate, in analogia con quanto fatto per la porosità.

L'integrazione della permeabilità nel modello consentirebbe di stimare la trasmissività dell'acquifero, parametro critico per la definizione della configurazione del doublet di produzione e reiniezione, e permetterebbe un confronto diretto con i valori di trasmissività tipici dei sistemi geotermici a bassa entalpia attivamente sfruttati in Europa.

Un secondo sviluppo naturale del lavoro è la modellazione dinamica del reservoir, basata sul modello statico costruito, per simulare il comportamento del sistema geotermico in condizioni di produzione e valutare l'energia effettivamente recuperabile in funzione del layout dei pozzi, della portata di produzione e della durata dello sfruttamento. Questo passaggio consentirebbe di confrontare direttamente i risultati con quelli dei sistemi di riferimento europei in termini di potenza termica estraibile e fattore di recupero.

Un terzo e particolarmente rilevante sviluppo riguarda l'estensione dell'analisi alle ghiaie che riempiono i bassi morfologici. I risultati del presente lavoro mostrano che nelle zone di alto morfologico le ghiaie si trovano a profondità più contenute, con temperature che variano dalla parte sommitale del reservoir (intorno ai 16-30°C) alla parte basale (intorno ai 50-66°C). Mentre i valori basali si avvicinano alla soglia di utilizzo diretto per teleriscaldamento, i valori sommitali richiederebbero l'ausilio di pompe di calore per applicazioni termiche. I sistemi geotermici a bassa entalpia operano tipicamente a temperatura tra 0-30 °C e richiedono una pompa di calore per il riscaldamento degli spazi, mentre al di sopra di 30 °C è possibile il teleriscaldamento diretto o con minore ausilio nell'estrazione del calore. Nei bassi morfologici, le ghiaie si trovano a profondità maggiori, con temperature corrispondentemente più elevate lungo il gradiente geotermico regionale, e sono quindi potenzialmente più adatte all'uso diretto per teleriscaldamento senza ausilio di pompa di calore. Un approccio integrato che consideri diversi orizzonti geologici sfruttati in modi differenti è oggi riconosciuto come la soluzione più efficace e sostenibile per i sistemi di teleriscaldamento e raffreddamento urbani (Romanov & Leiss, 2022).

Questo suggerisce un'interessante possibilità di utilizzo complementare degli intervalli stratigrafici associati alle due strutture morfologiche associate alla paleotopografia messiniana. Le successioni più superficiali a temperature moderate, potrebbero essere sfruttate con sistemi a pompa di calore per applicazione di riscaldamento decentralizzato di edifici o quartieri; le successioni di riempimento dei bassi morfologici, più profonde e a temperature più elevate, potrebbero rappresentare il target per un eventuale teleriscaldamento di rete a più alta temperatura. La scelta tra perforazione più profonda o più superficiale richiederebbe la costruzione di un modello geostatistico separato per gli intervalli stratigrafici dei bassi morfologici, condizionato ai pozzi disponibili per quelle zone. Questo permetterebbe di ottenere una stima integrata del potenziale geotermico dell'intera area di studio, superando il limite del presente lavoro che considera solo le zone di alto.

Il framework di modellazione statica sviluppato in questo lavoro, basato sull'integrazione di dati di pozzo di pubblico dominio e dati di sismica industriale, costituisce un punto di partenza concreto per la valutazione del potenziale geotermico a bassa entalpia per l'area milanese. I risultati ottenuti aprono la strada a sviluppi futuri che includono la modellazione della permeabilità, la simulazione dinamica del reservoir è un'analisi comparativa tra alti e bassi paleomorfologici messiniani, con l'obiettivo di definire una strategia di sfruttamento integrata e differenziata per profondità e applicazione.

# Bibliografia

**Amadori C., Garcia-Castellanos D., Toscani G., Sternai P., Fantoni R., Ghielmi M., Di Giulio A. (2018)** – Restored topography of the Po Plain-Northern Adriatic region during the Messinian base-level drop – Implications for the physiography and compartmentalization of the paleo-Mediterranean basin. *Basin Research*, 30(S1), 3-22.

**Barrera Acosta D. (2025)**. Plio-Pleistocene Evolution of the Po Plain Subsurface: Insights from a 3D Geological Model and its Relationship with the Occurrence of Thermal Anomalies for Geothermal Energy Exploration. Tesi di dottorato, Università degli Studi di Pavia, discussa il 14 aprile 2025.

**Barrera Acosta D., Toscani G., Colombera L., Amadori C., Fantoni R., Di Giulio A. (2024)**. Predicting the thermal regime of the Po Plain subsurface (Italy) using geostatistical modelling constrained by legacy wells. *Marine and Petroleum Geology*, 167, 106936.

**Carminati E., Doglioni C. (2012)**. Alps vs. Apennines: The paradigm of a tectonically asymmetric Earth. *Earth-Science Reviews*, 112(1-2), 67-96.

**Colucci F., Guandalini R., Macini P., Mesini E., Moia F., Savoca D. (2016)**. A feasibility study for CO<sub>2</sub> geological storage in Northern Italy. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 55, 1-14.

**Dercourt J., Zonenshain L.P., Ricou L.E., Kuzmin V.G., Le Pichon X., Knipper A.L. et al. (1986)**. Geological evolution of the Tethys belt from the Atlantic to the Pamir since the Lias. *Tectonophysics*, 123(1-4), 241-315.

**Deutsch C.V., Journel A.G. (1992)**. *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*. Oxford University Press, New York.

**Fantoni R., Bersezio R., Forcella F. (2004)**. Alpine structure and deformation chronology at the Southern Alps-Po Plain border in Lombardy. *Bollettino della Società Geologica Italiana*, 123, 463-476.

**Fantoni R., Franciosi R. (2010)**. Mesozoic extension and Cenozoic compression in Po Plain and Adriatic foreland. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 21(S1), 181-196.

**Ghielmi M., Minervini M., Nini C., Rogledi S., Rossi M. (2010).** Sedimentary and tectonic evolution in the eastern Po Plain and northern Adriatic Sea area from Messinian to Middle Pleistocene (Italy). *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 21(S1), 131-166.

**Ghielmi M., Minervini M., Nini C., Rogledi S., Rossi M. (2013).** Late Miocene-Middle Pleistocene sequences in the Po Plain-Northern Adriatic Sea (Italy): The stratigraphic record of modification phases affecting a complex foreland basin. *Marine and Petroleum Geology*, 42, 50-81.

**Isaaks E.H., Srivastava R.M. (1989).** *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York.

**ISPRA (2015).** Modello geologico 3D e geopotenziali della Pianura Padana centrale (Progetto GeoMol). D'Ambrogi C., Molinari F.C., Piccin A. et al. *Rapporti ISPRA*, 234/2015, pp. 104. ISPRA, Roma.

**Livani M., Scrocca D., Arecco P., Doglioni C. (2018).** Structural and stratigraphic control on salient and recess development along a thrust belt front: The Northern Apennines (Po Plain, Italy). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(5), 4360-4387.

**Maesano F.E., D'Ambrogi C., Burrato P., Toscani G. (2015).** Slip-rates of blind thrust in slow deforming areas: Examples from the Po Plain (Italy). *Tectonophysics*, 643, 8-25.

**Pantopoulos G., Colombera L., Barrera Acosta D., Firouzbehi F., Medici G., Petitta M., Bigi S., Toscani G., Di Giulio A. (2025).** Contrasting the Geothermal Potential of Clastic and Carbonate Successions in Lombardy (Po Basin Subsurface, Italy): A Modelling Study. *European Geothermal Congress 2025*, Zurich, Switzerland, 6-10 October 2025.

**Pantopoulos G., Colombera L., Barrera Acosta D., Toscani G., Di Giulio A., Firouzbehi F., Medici G. (2025).** Geothermal Potential of the Po Basin Subsurface in the Treviglio area, Lombardy: Insights from Geological Modelling of Neogene Clastic Successions. *17<sup>th</sup> OMC Med Energy Conference and Exhibition*, Ravenna, Italy, 8-10 April 2025.

**Pluymaekers M., Kramers L., Van Wees J.D., Kronimus A., Nelskamp S., Boxem T., Bonté D., (2012).** Reservoir characterisation of aquifers for direct heat production: Methodology and screening of the potential reservoirs for the Netherlands. *Netherlands Journal of Geosciences*, 91, 621-636.

**Remy N., Boucher A., Wu J. (2009).** *Applied Geostatistics with SGeMS: A User's Guide*. Cambridge University Press.

**Rizzini A., Dondi L. (1978).** Erosional surface of Messinian age in the subsurface of the Lombardian Plain (Italy). *Marine Geology*, 27, 303-325.

**Romanov D., Leiss B. (2022).** Geothermal energy at different depths for district heating back into sandstone reservoirs. *Geothermics*, 32(4-6), 733-741.

**Rossi M., Minervini M., Ghielmi M., Rogledi S. (2015).** Messinian and Pliocene erosional surfaces in the Po Plain-Adriatic Basin: Insights from allostratigraphy and sequence stratigraphy in assessing play concepts related to accommodation and gateway turnarounds in tectonically active margins. *Marine and Petroleum Geology*, 66, 192-216.

**Seibt P., Kellner T. (2003).** Practical experience in the reinjection of cooled thermal waters back into sandstone reservoirs. *Geothermics*, 32(4-6), 733-741.

**Soares A. (2001).** Direct Sequential Simulation and Cosimulation. *Mathematical Geology*, 33(8), 911-926.

**Thunderhead Engineering (2023).** *PetraSim User Manual*. Rockware/Thunderhead Engineering, Manhattan, Kansas.