



UNIVERSITÀ
degli STUDI
di CATANIA

Dipartimento di Scienze
Biologiche, Geologiche e Ambientali

Dottorato di Ricerca in “Scienze della Terra e dell’Ambiente”

XXXVII Ciclo

**TECNICHE INNOVATIVE PER LA GESTIONE, LO SFRUTTAMENTO E IL
MONITORAGGIO DELLA RISORSA GEOTERMICA IN SICILIA: IL RESOURCE
MANAGEMENT AL SERVIZIO DELLA TRANSIZIONE GREEN.**

Salvatore Urso

Tutor:

Prof. Marco Viccaro

Co-Tutor:

Prof. Agata Di Stefano

Coordinatore:

Prof. Rosanna Maniscalco

Catania 2025

Indice

Abstract.....	VI
1. Stato dell'arte (cornice tecnico scientifica)	10
1.1. Geotermia a bassa entalpia: principi e tecnologie	12
1.1.1. Basi fisiche dello scambio termico terreno–edificio	12
1.1.2. Pompe di calore geotermiche: principi e indicatori prestazionali.....	13
1.1.3. Configurazioni impiantistiche e soluzioni costruttive.....	13
1.1.4. Prestazioni attese e fattori di influenza	14
1.1.5. Condizioni di applicabilità e vincoli.....	15
1.1.6. Integrazione con reti e sistemi ibridi	16
1.1.7. Verso un approccio “GIS + MCDA” per il management della risorsa	16
1.2. Politiche europee e nazionali per il riscaldamento e il raffrescamento (H&C)	18
1.2.1. Il quadro UE: principi, target e traiettorie per H&C	19
1.2.2. Dal quadro UE al recepimento italiano: strumenti, regole e incentivi	20
1.2.3. Standard tecnici e buone pratiche per H&C geotermico	24
1.2.4. Sintesi operativa per l'integrazione con i moduli decisionali e cartografici	24
1.2.5. Misure RED III per H&C e ruolo degli accumuli UTES	25
1.2.6. EPBD, smart readiness (SRI) e integrazione rete–edificio.....	26
1.2.7. Incentivi e modelli economicofinanziari.....	26
1.3. Italia e Sicilia: stato e potenzialità della geotermia a bassa entalpia.....	27
1.3.1. Stato dell'arte nazionale: quadro statistico, barriere e leve.....	27
1.3.2. La Sicilia: contesto geologico, domanda energetica e casi d'uso	29
1.3.3. Lacune informative e contributo della tesi.....	30
1.3.4. Permitting e governance regionale.....	30
1.3.5. Raccordo con l'architettura GIS/MCDA e conclusioni parziali.....	31
1.4. GIS e MCDA per il decision making.....	31
1.4.1. Fondamenti GIS per la microzonazione geotermica	32

1.4.2.	MCDA: indicatori, normalizzazione, pesi e aggregazione.....	33
1.4.3.	Classificazione dei risultati e validazione/robustezza	37
1.4.4.	Output operativi e tracciabilità delle decisioni	37
1.5.	Esperienze comparabili (Mediterraneo/isole vulcaniche)	38
1.5.1.	Salina (Isole Eolie, Italia): microzonazione geotermica in contesto vulcanico	38
1.5.2.	Ischia (Campania, Italia): vincoli geotecnici e monitoraggio in area vulcanica attiva	38
1.5.3.	Pianura e valli appenniniche in clima mediterraneo: mapping del potenziale e strumenti MCDA	39
1.5.4.	Reti di quinta generazione in clima mediterraneo: ruolo della geotermia superficiale e degli UTES	39
1.5.5.	Isole mediterranee: opportunità e limiti sistemici	40
1.5.6.	Sintesi comparativa e implicazioni per la Sicilia	40
2.	Inquadramento geologico energetico, microzonazione e GeoDatabase regionale ..	42
2.1.	Inquadramento energetico e geotermico della Sicilia.....	44
2.1.1.	Quadro termico regionale e implicazioni per l'idoneità superficiale	45
2.1.2.	Domanda termica regionale: segmenti prioritari e stagionalità	46
2.1.3.	Parametri chiave per l'idoneità alla geotermia superficiale	48
2.1.4.	Componenti tecnologiche e impatti sulla resa.....	49
2.1.5.	Dalla conoscenza alla priorità d'intervento.....	49
2.2.	Quadro geologico vulcanico e idrogeologico	51
2.3.	Modello geologico di diffusione del calore	56
3.	La microzonazione geotermica e la Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA)	61
3.1.	La MCDA e la microzonazione	62
3.1.1.	Indicatori termici/termofisici.....	66
3.1.2.	Indicatori idrogeologici/ambientali	67
3.1.3.	Analisi di sensibilità e incertezza.....	67
3.2.	Classi di contesto geotermico per usi termici.....	68

3.3.	Fonti dati e flusso ETL (disegno).....	74
3.4.	GeoDatabase regionale (schema concettuale ER).....	77
3.5.	Selezione di siti-campione	82
4.	Domanda termica, economia e quadro normativo	86
4.1.	Profilo della domanda termica per settori e territori.....	87
4.1.1.	Metriche, risoluzione e basi informative	87
4.1.2.	Segmentazione settoriale e profili di domanda	88
4.1.3.	Densità di carico e criteri spaziali per hotspot.....	89
4.1.4.	Vincoli idrogeologici e sostenibilità termica	90
4.1.5.	Domanda termica e domini geologici siciliani.....	91
4.1.6.	Indicatori di priorità domanda-risorsa	91
4.1.7.	Coerenza con microzonazione e validazione	93
4.1.8.	Implicazioni gestionali per il sistema informativo	93
4.1.9.	Sintesi	93
4.2.	Modello economico di base e KPI	94
4.2.1.	Struttura del modello, ipotesi e perimetro di calcolo	94
4.2.2.	Scomposizione dei costi: CAPEX e OPEX per tecnologia	94
4.2.3.	Metriche economiche: LCOH, VAN, TIR, payback.....	95
4.2.4.	Assunzioni operative e confrontabilità fra alternative	96
4.2.5.	KPI energetici e ambientali per il benchmarking.....	97
4.2.6.	Modalità di confronto tra alternative.....	97
4.3.	Analisi di sensibilità.....	98
4.3.1.	Obiettivi e approccio.....	98
4.3.2.	Parametri chiave e gradienti di variazione.....	98
4.3.3.	Scenari di riferimento e interpretazione	99
4.3.4.	Soglie di convenienza e regole di decisione.....	99
4.3.5.	Implicazioni per progetti GWHP, BTES/ATES e reti	100

4.4.	Quadro regolatorio e permitting (focus Sicilia).....	101
4.4.1.	Norme e standard applicabili.....	101
4.4.2.	Procedure autorizzative: chi fa cosa.....	102
4.4.3.	Tempi, vincoli ricorrenti e qualità progettuale.....	102
4.4.4.	Checklist documentale e format dati minimi.....	103
4.5.	Incentivi e strumenti finanziari.....	105
4.5.1.	Mappa degli strumenti.....	105
4.5.2.	Effetti su LCOH, VAN/TIR e payback.....	106
4.5.3.	Condizioni di accesso, cumulabilità e priorità settoriali.....	107
4.6.	Integrazione domanda/offerta nel sistema gestionale.....	107
4.6.1.	Regole di matching e soglie operative.....	107
4.6.2.	Logiche di ordinamento e priorità.....	109
4.6.3.	Output cartografici e tabellari.....	110
5.	Sintesi comparativa dei contesti-tipo selezionati.....	111
5.1.	Sito A — contesto vulcanico.....	113
5.2.	Sito B — isola minore.....	115
5.3.	Sito C — tessuto urbano/produttivo.....	116
6.	Sistema gestionale integrato GIS-modello geoeconomico — Blueprint architetturale.....	118
6.1.	Requisiti e casi d’uso (user stories).....	118
6.2.	Microzonazione geotermica in GIS (integrazione operativa MCDA).....	121
6.3.	Architettura logica, livelli dati e interfacce.....	124
6.3.1.	Schema logico del GeoDB e API.....	125
6.3.2.	Interfacce utente (wireframe).....	128
6.4.	Sicurezza e data governance.....	130
6.5.	Applicazione del modello geo economico.....	131
6.6.	Piano di implementazione.....	134
6.6.1.	Backlog.....	135

6.6.2. Piano di test e validazione	136
6.6.3. Replicabilità e scalabilità	137
7. Discussione	139
7.1. Evidenze e robustezza del blueprint.....	139
7.2. Punti di forza e margini di miglioramento.....	142
7.3. Implicazioni per policy e filiere.....	146
8. Conclusioni.....	148
Bibliografia	156
Appendice A — Dati & Modello (ER GeoDB + MCDA)	169
Appendice B — Interfacce & UX (API + Wireframe)	173
Appendice C — Delivery (Backlog + Test/Validazione).....	180
Appendice D — Governance & Siti (Checklist + Schede).....	189
Appendice E — Roadmap TRL.....	194

ABSTRACT

La ricerca sviluppa un'architettura integrata per individuare, valutare e governare in modo sostenibile la risorsa geotermica a bassa entalpia in Sicilia, collegando il potenziale del sottosuolo ai bisogni effettivi di riscaldamento e raffrescamento degli edifici e costruendo un quadro operativo utile a progettisti, gestori e decisori pubblici. L'impostazione assume come dato di partenza l'eterogeneità dei contesti regionali, dalle aree vulcaniche alle isole minori fino ai tessuti urbani e produttivi di pianura e collina, e riconosce che le scelte di investimento, autorizzazione e gestione richiedono criteri trasparenti, verificabili e riproducibili. La finalità non si esaurisce nella descrizione del potenziale, ma si estende alla trasformazione della conoscenza geoscientifica in regole implementabili, così da orientare la microzonazione decisionale, la preselezione dei siti, il predimensionamento delle soluzioni impiantistiche e l'istituzione di percorsi di monitoraggio che mantengano nel tempo la coerenza tra obiettivi energetici, vincoli ambientali e qualità del servizio.

Per raggiungere tale scopo, il lavoro costruisce un impianto informativo e valutativo coerente, capace di integrare fonti diverse e di restituire indicazioni operative fruibili. La base è un sistema informativo geografico che armonizza dati geologici, idrogeologici, geotermici superficiali, d'uso del suolo e di domanda energetica, e li organizza in un GeoDatabase normalizzato, corredato da metadati, regole di qualità e versionamento. Su questa piattaforma si innesta una procedura di analisi multicriterio che seleziona criteri fisici, tecnici, ambientali e logistici, attribuisce pesi coerenti con il contesto e sintetizza i risultati in indici di idoneità per la geotermia a bassa entalpia. L'impianto prevede regole di abbinamento tra classi di idoneità e densità di carico termico, con l'obiettivo di rendere immediatamente verificabile la coerenza tra domanda e soluzioni tecnologiche, differenziando tra sistemi con scambio con acqua di falda, sonde verticali singole o in campi BTES, accumuli stagionali e configurazioni ibride integrabili con reti di teleriscaldamento e teleraffrescamento di nuova generazione. In parallelo viene definito un modello geoeconomico capace di confrontare le alternative secondo indicatori ampiamente utilizzati nella pratica professionale, in modo da far emergere i compromessi tra investimento iniziale, costi operativi e valore economico lungo il ciclo di vita, e da esplorare, attraverso analisi di sensibilità, l'impatto di variabili quali profili d'uso, condizioni locali e scenari di prezzo. La catena informativa è completata da una pipeline di estrazione, trasformazione e caricamento che presidia la coerenza dei dati e ne garantisce la tracciabilità, mentre l'interoperabilità è assicurata dalla definizione di interfacce applicative essenziali per

la consultazione e l'aggiornamento controllato dei contenuti, così da abilitare l'integrazione con strumenti esterni e la costruzione di servizi a valore aggiunto come viewer tematici, moduli di preverifica e dashboard di monitoraggio.

I risultati principali possono essere letti su tre piani tra loro interdipendenti. Sul piano spaziale e decisionale emergono mappe di idoneità operativa che traducono la complessità del sottosuolo e delle condizioni d'uso in livelli informativi direttamente utilizzabili, facendo emergere aree più promettenti in funzione di combinazioni di permeabilità, temperatura del terreno, profondità utile, vulnerabilità ambientale, accessibilità e compatibilità con la domanda termica locale. Queste mappe non rappresentano un semplice esercizio cartografico, ma diventano strumenti di coordinamento tra discipline e uffici, poiché permettono di visualizzare le implicazioni di scelte diverse e di documentare il percorso logico che conduce dalle ipotesi di partenza alle raccomandazioni progettuali. Sul piano tipologico e tecnologico prende forma una tassonomia dei contesti che riconosce famiglie di siti con risposte ricorrenti agli stimoli progettuali, consentendo di trasferire conoscenza senza scadere in semplificazioni improprie; a tale tassonomia si affiancano regole di abbinamento impianto-sito che tengono insieme densità di carico, disponibilità di infrastrutture, vincoli ambientali e finalità di esercizio, riducendo i rischi di sovradimensionamento o sottodimensionamento e orientando la selezione verso configurazioni che massimizzano l'efficienza complessiva del sistema edificio-impianto. Sul piano informativo-gestionale, lo schema logico del GeoDatabase e gli endpoint essenziali per la consultazione, l'estrazione filtrata e l'aggiornamento controllato costituiscono una base stabile per la cooperazione tra soggetti, diminuendo ambiguità interpretative, rendendo più fluido l'interscambio tra software e favorendo la nascita di pratiche di valutazione e monitoraggio condivise.

Un ulteriore esito rilevante consiste nella definizione di un nucleo di indicatori energetici, ambientali e operativi pensati per il monitoraggio post-installazione. L'attenzione è rivolta alle misure in condizioni reali d'uso, in grado di restituire la prestazione effettiva e di rendere confrontabili impianti diversi su basi omogenee. Tale nucleo consente di evidenziare in modo tempestivo scostamenti significativi rispetto alle attese di progetto, di interpretarne le cause e di pianificare azioni correttive, innestando un ciclo di apprendimento che riallinea nel tempo gli impianti agli obiettivi originariamente dichiarati. Il disegno è completato da wireframe di viewer e dashboard che concretizzano percorsi d'uso tipici per operatori con esigenze differenti: localizzazione assistita di siti candidati, verifica rapida di vincoli e opportunità, lettura di trend prestazionali e confronto tra scenari tecnologici o gestionali. La validazione dell'intero impianto avviene confrontando la struttura metodologica con tre contesti

rappresentativi della varietà regionale, selezionati per esplorare condizioni geologiche e socio-economiche differenti; questo passaggio, insieme ai controlli di coerenza interna e alle analisi di sensibilità, consente di verificare la robustezza delle regole di abbinamento e la stabilità degli esiti al variare dei pesi e delle soglie decisionali, evitando che le raccomandazioni siano il frutto di assunzioni opache o di specificità non generalizzabili.

Le implicazioni che discendono dal lavoro interessano la pianificazione energetica, la governance dei dati e le pratiche professionali. La disponibilità di una infrastruttura informativa condivisa, di standard di interoperabilità e di interfacce disegnate sui compiti reali riduce tempi e incertezze nelle fasi cruciali di selezione e predimensionamento e rende più comparabili progetti e soluzioni, poiché uniforma i criteri di valutazione e documenta con chiarezza assunzioni e passaggi. La combinazione di microzonazione decisionale, regole di abbinamento e modello geoeconomico permette di mettere a fuoco i compromessi tra benefici energetici, costi e vincoli ambientali, anticipando scenari e favorendo un dialogo più informato con le comunità locali e con le autorità preposte ai procedimenti autorizzativi. Laddove esistano sensibilità paesaggistiche o tutele ambientali stringenti, la possibilità di simulare percorsi alternativi e di esplicitare gli effetti attesi su parametri osservabili rende più trasparenti le scelte e più agevole l'individuazione di condizioni di esercizio e mitigazioni compatibili con l'interesse pubblico.

L'approccio proposto mostra inoltre una chiara vocazione alla replicabilità e suggerisce percorsi di implementazione graduale. La natura modulare del sistema consente di iniziare dall'istituzione del GeoDatabase con gli strati informativi prioritari, proseguire con la messa in esercizio delle interfacce essenziali e dei viewer cartografici, e maturare attraverso progetti pilota che innestino cicli di monitoraggio su impianti reali, in modo da alimentare con dati operativi la revisione periodica dei pesi e delle soglie e da affinare le regole di abbinamento in funzione delle evidenze raccolte. La Sicilia, per le sue peculiarità geologiche e la compresenza di contesti urbani, insulari e vulcanici, costituisce un banco di prova utile per sperimentare meccanismi di coordinamento tra enti, modalità di coinvolgimento degli operatori economici e pratiche di manutenzione dell'infrastruttura informativa; allo stesso tempo, l'impianto metodologico conserva sufficiente generalità per essere esteso ad altri territori mediterranei con condizioni geotecniche e assetti socio-economici assimilabili, grazie alla chiarezza delle assunzioni, alla trasparenza dei calcoli e all'uso di indicatori largamente condivisi nella comunità professionale.

Nel complesso, l'elaborato sostiene l'idea che la geotermia a bassa entalpia, quando è accompagnata da un sistema informativo solido e da una valutazione integrata della fattibilità,

possa contribuire in modo credibile alla decarbonizzazione dei consumi termici, soprattutto dove la stagionalità dei fabbisogni e il retrofitting del costruito impongono soluzioni flessibili e scalabili. Il valore aggiunto non risiede soltanto nell'aver messo in relazione fonti di dati eterogenee e tecnologie impiantistiche diverse, ma nell'aver costruito un dispositivo di apprendimento e coordinamento che rende più rapide, giustificabili e verificabili nel tempo le scelte di investimento e gestione. L'incontro tra geoscienze, ingegneria degli impianti, valutazione economico-finanziaria, gestione dei dati e progettazione delle interfacce produce un lessico comune e un metodo che riducono la distanza tra analisi e decisione, e che offrono a progettisti e amministrazioni un percorso praticabile per trasformare un potenziale diffuso in interventi coerenti con gli obiettivi regionali di transizione energetica.

Parole chiave: geotermia a bassa entalpia; Sicilia; GIS; analisi multicriterio; microzonazione; pompe di calore; governance dei dati; transizione energetica.

1. STATO DELL'ARTE (CORNICE TECNICO SCIENTIFICA)

La geotermia rappresenta l'insieme delle tecnologie che consentono di estrarre, trasferire, convertire e gestire l'energia termica immagazzinata nella litosfera, trasformandola in servizi energetici utili quali riscaldamento, raffrescamento, acqua calda sanitaria e, in taluni contesti, produzione elettrica o trigenerazione termica (caldo/freddo/acqua) in assetto di cogenerazione o di reti di teleriscaldamento e teleraffrescamento (district heating and cooling, DHC). A scala globale, la geotermia include un continuum di risorse che vanno da sistemi ad alta e media entalpia (tipici di aree vulcaniche e di rifting) a sistemi di bassa entalpia diffusi pressoché ovunque, poiché fondati su gradienti termici modesti e su scambi termici superficiali attivabili ovunque siano presenti terreni e rocce perforabili o acquiferi sfruttabili in sicurezza (Diego Moya et al., 2018). La differenza fra “risorsa” e “uso” è cruciale: la prima riguarda il contenuto energetico del sottosuolo; il secondo dipende dalle tecnologie adottate e dalla capacità di interfacciare l'ambiente geologico con la domanda energetica reale dei territori, secondo criteri di sostenibilità tecnico-economica e ambientale (Carlos Rubio-Maya et al., 2015).

Per inquadrare la geotermia come infrastruttura della transizione energetica, è utile richiamare tre dimensioni: (i) la fisica della sorgente – cioè la distribuzione del calore nel sottosuolo e i meccanismi di trasporto (conduzione, convezione, advezione); (ii) le piattaforme tecnologiche – dai pozzi produttivi per alta/media entalpia alle pompe di calore con scambio termico terreno–edificio, ai sistemi di accumulo termico stagionale nel sottosuolo (UTES: Underground Thermal Energy Storage); (iii) i modelli di integrazione territoriale – dalla singola utenza alla rete di quartiere sino al distretto, connessi a sistemi di governance, permitting e gestione operativa (David et al., 2017). In questa chiave, la geotermia non è soltanto una fonte “di nicchia” legata ai contesti vulcanici; è, soprattutto nella declinazione a bassa entalpia, una tecnologia di sistema che può abilitare il decarbonization pathway dell'uso finale del calore, settore che pesa in Europa per oltre la metà dei consumi energetici totali (David et al., 2017).

Classificazione per entalpia e usi finali.

La letteratura distingue convenzionalmente tra: alta entalpia ($T > 180\text{--}200\text{ °C}$ all'imboccatura del pozzo), utilizzata per generazione elettrica a vapore secco o flash; media entalpia (circa $90\text{--}180\text{ °C}$), adatta a cicli binari ORC/Kalina e a usi termici di processo; bassa entalpia (sotto 90 °C)

destinata prevalentemente a usi diretti del calore e, soprattutto, allo scambio termico superficiale mediante pompe di calore (Chandrasekharam & Bundschuh, 2008; Chamorro et al., 2012). Nella pratica della pianificazione energetica urbana, la bassa entalpia è l'architrave per affrontare in modo capillare e scalabile il fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento degli edifici e dei servizi pubblici, anche in contesti privi di anomalie geotermiche marcate (Bayer et al., 2019).

Gradienti e disponibilità fisica della risorsa.

In assenza di flussi convettivi, la temperatura del sottosuolo aumenta con la profondità secondo un gradiente conduttivo medio dell'ordine di 20–30 °C/km; a profondità di 10–20 m si osservano condizioni termiche quasi stazionarie, prossime alla media annua dell'aria locale, con attenuazione delle oscillazioni stagionali, condizione che rende il sottosuolo un sink/sorgente termica estremamente stabile per gli scambi con pompe di calore (Carotenuto et al., 2016). In molte aree, la presenza di falde freatiche poco profonde accresce l'effettiva conducibilità termica apparente del terreno per contributo advettivo, migliorando le performance di scambio a parità di geometria dell'impianto (Arola et al., 2014). Queste proprietà fisiche sono ubiquitarie, benché modulabili da litologia, porosità, grado di saturazione e tessitura dei depositi superficiali (Carotenuto et al., 2016).

Perché la geotermia nel mix della transizione.

Gli impianti geotermici di bassa entalpia, abbinati a pompe di calore elettriche ad alta efficienza, consentono riduzioni drastiche dei consumi finali e delle emissioni locali, operando con COP stagionali (SPF) tipicamente compresi tra 3 e 4+ a seconda del contesto e della qualità progettuale, con potenziali di integrazione in reti 4a/5a generazione (reti a bassa temperatura con scambio bidirezionale caldo/freddo) e sistemi di demand response (Abdelazim et al., 2022; David et al., 2017). L'integrazione con accumuli stagionali UTES permette, inoltre, di scollegare temporalmente produzione e uso del calore, migliorando il load matching e la resilienza delle infrastrutture locali (Bloemendal et al., 2018).

Una prospettiva gestionale e territoriale.

La diffusione sostenibile della geotermia di bassa entalpia richiede criteri di pianificazione che minimizzino interferenze termiche, impatti idrogeologici e conflitti d'uso del sottosuolo,

soprattutto in aree urbane dense. Tale esigenza ha alimentato lo sviluppo di metodi di mappatura del potenziale, strumenti decisionali multicriterio, e linee guida operative per la progettazione di impianti e di interi distretti (G.POT; TAP; rOGER), che verranno richiamati e calati nel contesto siciliano nei capitoli successivi (Casasso & Sethi, 2016; Böttcher et al., 2019; Baralis & Barla, 2024).

A partire da questa cornice generale, la Sezione 1.1 propone un excursus sistematico sulla geotermia a bassa entalpia, mettendone in luce principi, tecnologie, prestazioni e condizioni d'impiego in vista della successiva integrazione con i moduli cartografici (GIS) e decisionali (MCDA – *Multi-Criteria Decision Analysis*) della tesi.

1.1. Geotermia a bassa entalpia: principi e tecnologie

1.1.1. Basi fisiche dello scambio termico terreno–edificio

Il funzionamento dei sistemi geotermici a bassa entalpia poggia sulla capacità del terreno (o dell'acquifero) di fungere da serbatoio termico. Due sono i meccanismi di trasporto principali: conduzione, governata dalla legge di Fourier e dalla conducibilità termica (λ) del mezzo poroso; advezione/convezione, rilevante in presenza di flusso d'acqua in falda o nei sistemi open loop (Carotenuto et al., 2016). Parametri chiave sono: conducibilità (λ , $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), capacità termica volumetrica ($\rho\cdot c$, $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$), e diffusività ($\alpha=\lambda/(\rho\cdot c)$, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$). La presenza di acqua satura aumenta, in generale, sia λ sia $\rho\cdot c$ rispetto a terreni asciutti; l'effetto può spingersi fino a raddoppiare la risposta termica efficace in acquiferi con permeabilità medio-alta, riducendo le resistenze di scambio al contorno sonda–terreno (Arola et al., 2014). In fase di progettazione è opportuno includere uno screening idrogeochimico con indici di incrostazione/corrosione e controllo dei gas disciolti, come suggerito dagli studi nazionali (Apollaro et al., 2024).

A scala di progetto, lo scambio termico è modellato con approcci lumped (resistenze termiche equivalenti) o con soluzioni semi-analitiche (G-function) per campi sonda verticali, nonché con modelli numerici termo-idrogeologici per open loop/ATES. Il carico termico annuale e il suo sbilanciamento stagionale (cooling-dominated vs heating-dominated) condizionano le traiettorie di temperatura nel tempo: sistemi sbilanciati possono indurre drift termici del sottosuolo e perdita di performance, mentre configurazioni bilanciate o dotate di UTES mantengono la temperatura prossima allo stato naturale (Bayer et al., 2014; Bloemendal et al., 2018). La caratterizzazione termo-fisica del sito (prove in situ, letteratura, proxy

litostratigrafici) è dunque un prerequisito per il dimensionamento e per la gestione in esercizio (Carotenuto et al., 2016).

1.1.2. Pompe di calore geotermiche: principi e indicatori prestazionali

Le pompe di calore geotermiche (**GSHP**) sono macchine a compressione di vapore che trasferiscono energia termica tra due serbatoi a diversa temperatura grazie a un lavoro esterno elettrico. Gli indicatori più utilizzati sono: **COP** (Coefficient of Performance) in riscaldamento, **EER/ESEER** in raffrescamento, e **SPF** (Seasonal Performance Factor) su base ciclica annuale. In condizioni tipiche di progetto, i sistemi GSHP presentano COP nominali dell'ordine di 3–5, con SPF stagionali realisticamente nell'intervallo 3–4+ in contesti ben progettati (Abdelazim et al., 2022). Le prestazioni dipendono da: temperatura della sorgente/pozzo (terreno o falda), delta-T di progetto lato impianto, qualità del circuito idraulico, regolazione climatica, terminali di emissione a bassa temperatura e qualità dell'isolamento dell'involucro edilizio (Abdelazim et al., 2022; Bernier et al., 2004).

Da un punto di vista exergetico, il vantaggio dei sistemi GSHP è massimizzato quando la differenza di temperatura tra sorgente (terreno) e utenza (impianto) è ridotta; per questo motivo la combinazione con terminali a bassa temperatura (pannelli radianti, ventilconvettori ad alta efficienza, UTA con batterie a bassa ΔT) è strategica, specie in retrofit di edifici pubblici con fabbisogni continuativi (David et al., 2017).

1.1.3. Configurazioni impiantistiche e soluzioni costruttive

Closed loop (circuiti chiusi). Sono costituiti da scambiatori in cui un fluido termovettore (tipicamente acqua additivata con antigelo atossico) circola in sonde geotermiche verticali (BHE) o orizzontali, scambiando calore per conduzione con il terreno. Le configurazioni più comuni sono: U-pipe singola o doppia in tubazione PE100/PE100-RC; coassiale (tubo interno/esterno) in applicazioni particolari; campi di sonde con profondità tipiche 50–200 m e passo 4–8 m a seconda di carichi e conducibilità. Il riempimento delle perforazioni con grout ad alta conducibilità migliora lo scambio riducendo la resistenza termica del foro (Casasso & Sethi, 2014). In ambito urbano, la progettazione deve tenere conto di interferenze termiche tra pozzi/sistemi adiacenti e con infrastrutture sotterranee, adottando distanze minime e logiche di campo idonee (Angelotti & Sterpi, 2024).

Una declinazione dei closed loop sono le **geo-strutture energetiche**: pali di fondazione energetici, diaframmi e paratie attivate termicamente, gallerie e metropolitane con conci

termo-attivi. Tali soluzioni valorizzano superfici e volumi già presenti nelle opere civili, riducendo costi marginali e impatti, e sono particolarmente coerenti con rigenerazioni urbane e nuove infrastrutture (Brandl, 2006; Barla & Perino, 2015; Dickmann et al., 2019).

Open loop (GWHP). I sistemi a circuito aperto prelevano acqua da un acquifero, ne estraggono o cedono calore tramite scambiatore e la reimmettono in un pozzo di restituzione o in un corpo recettore secondo le norme. Offrono elevata efficienza grazie alla temperatura più stabile e alla convezione d'acqua che rigenera l'orizzonte di scambio; richiedono però caratterizzazione idrogeologica, analisi del bilancio idrico locale, controllo di fenomeni chimico-fisici (incrostazioni, gas disciolti) e gestione accurata delle interferenze termiche e del plume (Banks et al., 2019; Casasso & Sethi, 2019). In contesti alpini o collinari italiani, casi studio mostrano buone prestazioni e sostenibilità quando adeguatamente dimensionati e monitorati (Cappellari et al., 2022).

UTES: accumulo termico stagionale nel sottosuolo. Le famiglie principali sono: **BTES** (Borehole Thermal Energy Storage), in cui un campo di sonde opera come batteria termica stagionale; **ATES** (Aquifer Thermal Energy Storage), che sfrutta due (o più) pozzi su un acquifero per creare "bolle" calde e fredde bilanciate stagionalmente. Gli ATES richiedono condizioni idrogeologiche favorevoli (permeabilità adeguata, bassa vulnerabilità a contaminanti e normativa abilitante) ma offrono efficienze di ciclo molto elevate e riduzione dei picchi di potenza elettrica per HVAC (Bloemendal et al., 2014; Bloemendal et al., 2018). La letteratura recente sottolinea l'importanza della **gestione dello sbilanciamento termico** a scala di distretto e di regole di zoning per prevenire interferenze e massimizzare benefici collettivi (Bulté et al., 2021; Beernink et al., 2022).

Varianti e sorgenti speciali. Dove presenti, cavità e acquiferi minerari dismessi costituiscono serbatoi termici a basso costo con portate e volumi rilevanti per open/closed-loop ibridi; esperienze nel Regno Unito e altrove documentano schemi affidabili con esigenze di controllo specifiche (chemistry, ferro/ochre) (Banks et al., 2019; Athresh et al., 2016; Chu et al., 2021).

1.1.4. Prestazioni attese e fattori di influenza

In applicazioni residenziali/terziarie, i COP in riscaldamento variano in genere tra 3 e 5; in raffrescamento gli EER sono comparabili o superiori, a seconda delle temperature di sorgente/utenza e della configurazione idronica (Abdelazim et al., 2022). A scala annuale, i SPF dipendono da:

- **Qualità del terreno e dell'eventuale falda** (λ , saturazione, velocità di flusso) (Arola et al., 2014).
- **Geometria del campo sonda** (profondità, passo, topologia idraulica) e resistenza termica del foro (Casasso & Sethi, 2014).
- **Sbilanciamento energetico** e strategia di **ricarica termica** (free-cooling estivo, dissipazione, UTES) (Bayer et al., 2014; Bloemendal et al., 2018).
- **Sistema edificio-impianto** (terminali a bassa temperatura, VAV/UTA, controllo climatico e modulazione compressori/inverter) (Abdelazim et al., 2022).

Per la **progettazione**, la normativa tecnica e le buone pratiche raccomandano analisi di carico orario, modellazione del sottosuolo, valutazione delle interazioni con altri impianti/utenze e, dove necessario, prove e monitoraggi in esercizio; la letteratura offre metodi quantitativi per la mappatura del potenziale e per il predimensionamento a scala territoriale (G.POT; TAP; rOGER), efficaci come primo filtro e per la pianificazione di distretto (Casasso & Sethi, 2016; Böttcher et al., 2019; Baralis & Barla, 2024).

1.1.5. Condizioni di applicabilità e vincoli

Geologia e idrogeologia. Litologie fini (argille, limi) hanno in genere λ inferiori a rocce e terreni granulari saturi; in presenza di acquiferi con velocità di flusso moderata si ottengono prestazioni superiori per effetto advettivo, ma occorre verificare vulnerabilità e regimi di protezione della risorsa idrica (Arola et al., 2014). La perforabilità e la presenza di livelli cementati o cavità condizionano tempi/costi e la scelta tra sonde verticali, orizzontali o geo-strutture (Carotenuto et al., 2016; Brandl, 2006).

Contesti urbani densi. L'elevata densità di carico e la prossimità tra utenze impongono di gestire **interferenze termiche** e cumulative: la pianificazione deve definire distanze minime tra sonde/pozzi, capacità massima installabile per isolato e criteri di bilanciamento, eventualmente tramite reti termiche interne (Angelotti & Sterpi, 2024; Bayer et al., 2019). Esperienze europee mostrano l'utilità di **regolamenti locali** e **sportelli geotermici** per coordinare concessioni e prevenire conflitti (Böttcher et al., 2019; Bloemendal et al., 2018).

Aspetti ambientali e di qualità dell'acqua. Nei sistemi GWHP e ATES, fenomeni di **riciclo termico** (thermal recycling) e **decremento di efficienza** sono possibili se il plume caldo/freddo reintercetta il pozzo di presa; la modellazione di flusso e trasporto, unita a strategie operative (inversione stagionale, portate e slot temporali), riduce tali rischi (Casasso & Sethi, 2015; Baquedano et al., 2022; Bulté et al., 2021). Sono documentati casi di problemi

microbiologici o gas disciolti (metano) che richiedono prevenzione, monitoraggi e materiali idonei (Barnett et al., 2023; Banks et al., 2019).

Regolazione e monitoraggio. In Italia e in Europa si registra un crescente interesse verso **linee guida e obblighi di monitoraggio**, con attenzione alla sostenibilità a lungo termine e alla tracciabilità dei dati di esercizio (portate, ΔT , energia scambiata), in particolare per impianti in aree urbane e per circuiti aperti o UTES (Cerutti, 2024; Cerutti, 2025). Nel prosieguo della tesi, con focus su Sicilia, si tratterà il quadro autorizzativo e le prassi operative più aggiornate.

1.1.6. Integrazione con reti e sistemi ibridi

Le soluzioni **GE+DH/DC** (geotermia + district heating/district cooling) consentono livelli elevati di elettrificazione efficiente dei carichi termici connessi a pompe di calore di taglia media/grande e, se presenti, fonti complementari (solare termico, recuperi calore di processo, CHP in assetto flessibile). Si stanno affermando **reti a bassa temperatura (4G/5GDHC)** che usano il sottosuolo come livellatore stagionale e spaziale, con scambi bidirezionali tra utenti (prosumer termici) e gestione tramite algoritmi di ottimizzazione (David et al., 2017; Calise et al., 2021). In Italia, studi termo-economici evidenziano convenienza e riduzione emissioni in assetti ibridi geotermico-solare o con sorprese di free-cooling estivo e UTES (Buonomano et al., 2015; Calise et al., 2016).

1.1.7. Verso un approccio "GIS + MCDA" per il management della risorsa

Per passare dall' "opportunità" alla **gestione sistemica** della bassa entalpia occorre disporre di layer informativi affidabili e verificabili, organizzati in un GeoDatabase coerente con standard OGC/INSPIRE e utilizzabili da un **motore decisionale** trasparente. La letteratura propone strumenti e metodi per mappare il potenziale (ad es. G.POT per la componente conduttiva), per valutare l'idoneità di acquiferi (es. TAP) e per supportare il design gestionale a scala metropolitana (es. rOGER) (Casasso & Sethi, 2016; Böttcher et al., 2019; Baralis & Barla, 2024). Queste basi metodologiche, riprese e specializzate nella presente tesi, consentono di allocare le tecnologie corrette (closed/open/UTES) ai **contesti geologico-idrogeologici** idonei, minimizzando rischi e massimizzando benefici collettivi.

Tabella 1. Tipologie di sistemi geotermici a bassa entalpia, profondità tipiche e ambiti d'uso

Tecnologia	Sorgente/Scambiatore	Profondità/Estensione tipica	Ambito d'uso prevalente	Note su prestazioni/criticità
GSHP closed loop (sonde verticali, BHE)	Conduzione terreno (grout ad alta λ)	50–200 m per sonda; campi multi-pozzo	Residenziale/terziario, reti 4/5G	Elevata stabilità; attenzione a interferenze e drift termico (Casasso & Sethi, 2014; Bayer et al., 2014).
GSHP closed loop (orizzontali/slinky)	Terreno superficiale	Trincee 1–2 m, sviluppo >100 m	Lotti con spazio disponibile	Costi minori; maggiore sensibilità stagionale (Carotenuto et al., 2016).
Geo-strutture (pali, diaframmi, tunnel)	Elementi strutturali attivati	Come da opera civile	Nuove costruzioni/rigenerazione	Sinergie costruttive; forte potenziale urbano (Brandl, 2006; Barla & Perino, 2015).
GWHP open loop	Acquifero (presa/restituzione)	Piezometria locale	Usi con carichi elevati e continui	Efficienze alte; gestione plume, qualità acqua (Banks et al., 2019; Casasso & Sethi, 2019).

BTES (UTES)	Campo sonde come "batteria"	Densità/volume a progetto	Distretti, campus, ospedali	Bilanciamento stagionale; controllo perdite termiche (Bloemendal et al., 2018).
ATES (UTES)	Acquifero con pozzi caldo/freddo	Dipende da K e spessore	Distretti/aree urbane	Alta efficienza; regolazione e zoning necessari (Bloemendal et al., 2014; Bulté et al., 2021).
Mine-water/altre	Gallerie/miniere, acque di cava	Volumi esistenti	Riconversione siti	Opportunità ma criticità chimiche (Banks et al., 2019; Athresh et al., 2016).

Nota: le profondità/estensioni sono indicative e devono essere verificate con analisi di carico e caratterizzazione di sito.

1.2. Politiche europee e nazionali per il riscaldamento e il raffrescamento (H&C)

Il riscaldamento e il raffrescamento costituiscono oltre la metà dei consumi energetici finali dell'Unione europea e rappresentano l'asse portante della decarbonizzazione di lungo periodo, poiché coinvolgono il patrimonio edilizio, l'industria leggera e i servizi pubblici locali. In tale cornice, l'evoluzione del quadro regolatorio UE – Green Deal, pacchetto "Fit for 55", REPowerEU, RED III e la riforma della EPBD – ha progressivamente spostato l'attenzione dalle sole prestazioni energetiche degli edifici all'integrazione sistemica tra pompe di calore, reti elettriche, fonti rinnovabili e infrastrutture digitali. Questo cambio di paradigma, unitamente alle misure nazionali di recepimento, definisce traiettorie stringenti per la penetrazione di rinnovabili termiche e pompe di calore, con implicazioni dirette sul disegno di progetti

geotermici distribuiti, in particolare a bassa entalpia (GSHP e sistemi open/closed loop) in contesti regionali come la Sicilia. (Comunicazione REPowerEU, 2022; Direttiva (UE) 2023/2413; Direttiva (UE) 2024/1275).

1.2.1. Il quadro UE: principi, target e traiettorie per H&C

Green Deal, Fit for 55, REPowerEU. Il Green Deal europeo ha fissato l'obiettivo della neutralità climatica al 2050 e ha innescato una revisione complessiva degli strumenti normativi, successivamente declinati nel pacchetto "Fit for 55" (riduzione delle emissioni del 55% al 2030) e, dopo la crisi energetica del 2022, nel piano REPowerEU, che ha posto un'enfasi specifica sul dispiegamento rapido delle pompe di calore e sull'elettrificazione efficiente dei carichi termici. Tra le metriche operative più note, REPowerEU ha introdotto un target di accelerazione per il parco pompe di calore, in coerenza con l'aumento della quota di rinnovabili negli usi termici e con la riduzione della dipendenza da combustibili fossili importati. (Comunicazione REPowerEU, 2022; European Commission, Energy – REPowerEU).

RED III (Direttiva (UE) 2023/2413). La revisione della Direttiva rinnovabili ha innalzato al 42,5% il target vincolante di quota rinnovabili al 2030, con un livello di ambizione "volontario" del 45%, e – per la prima volta – ha reso vincolante l'incremento medio annuo della quota di rinnovabili nei consumi di H&C: +0,8 punti percentuali come media annuale nel periodo 2021–2025 e +1,1 p.p. nel periodo 2026–2030, calcolati rispetto alla quota nazionale del 2020 (art. 23). La direttiva prevede inoltre la possibilità di conteggiare, entro limiti precisi, calore di scarto e elettricità rinnovabile utilizzata per H&C (p.es. tramite pompe di calore con efficienza > 100%), nonché "top-up" aggiuntivi per ciascuno Stato membro (Allegato IA). Per i sistemi di **teleriscaldamento e teleraffrescamento**, l'aumento indicativo medio annuo della quota di rinnovabili e calore di scarto è +2,2 p.p. tra il 2021 e il 2030 (art. 24), a conferma della centralità del vettore termico nel disaccoppiamento dei settori. Queste prescrizioni sono decisive per la pianificazione regionale e comunale di H&C, in quanto impongono una traiettoria quantitativa e strumenti di policy (almeno due tra dodici misure) che includono promozione di heat pumps, accumuli termici, piani locali del calore e schemi di sostituzione dei generatori fossili. (Direttiva (UE) 2023/2413; Allegato IA art. 23; art. 24).

EPBD (rifusione 2024/1275). La nuova Direttiva sulla prestazione energetica nell'edilizia ha introdotto la nozione di **edificio a emissioni zero (ZEB)** e reso obbligatoria la classe ZEB per i nuovi edifici pubblici dal 1° gennaio 2028 e per tutti i nuovi edifici dal 1° gennaio 2030, con requisiti su domanda energetica molto bassa, assenza di emissioni in sito da fossili e progressiva integrazione di rinnovabili (solar-ready, predisposizione per PV/solare termico).

Sono previste traiettorie di riduzione dell'energia primaria media del parco residenziale (almeno **-16% al 2030, -20-22% al 2035**) e standard minimi per il non residenziale (progressivo innalzamento oltre le fasce peggiori), nonché fine degli incentivi per l'installazione di caldaie autonome a combustibili fossili dal 2025 (orientamento chiarito dalla guida della Commissione su art. 17(15)). Tali elementi spostano in modo strutturale la domanda verso pompe di calore e soluzioni rinnovabili per usi termici, incidendo direttamente sulla bancabilità dei progetti geotermici distribuiti. (Direttiva (UE) 2024/1275; Commissione europea, EPBD – guidance su art. 17(15)).

Stato dell'arte: dinamica H&C nelle statistiche UE. Le più recenti serie Eurostat indicano che la quota di rinnovabili in H&C in UE ha raggiunto il 26,2% nel 2023, in crescita rispetto al 25,0% del 2022; la dinamica è trainata da biomasse e pompe di calore, con forte variabilità tra Paesi. L'andamento osservato è coerente con la necessità di accelerare oltre gli 0,8/1,1 p.p. annui, soprattutto nei contesti urbani e mediterranei dove la domanda di raffrescamento cresce rapidamente. (Eurostat, 2025; BUILD UP, 2025).

Geotermia nel dibattito UE. Nel 2024 il Consiglio dell'Unione europea ha approvato ***conclusioni sulla promozione dell'energia geotermica***, invitando gli Stati membri e la Commissione a rimuovere barriere finanziarie e procedurali (capex upfront, permitting) e a rafforzare competenze e cooperazione R&S; le conclusioni rappresentano un chiaro segnale politico a favore di un maggior ricorso alla geotermia nello spettro delle opzioni H&C, dagli impianti deep ai sistemi shallow a pompa di calore. (Consiglio UE, 16 dicembre 2024).

Implicazioni per la progettazione. Per sistemi **geotermici a bassa entalpia**, l'allineamento a RED III ed EPBD significa: (i) domanda "abilitata" da standard edilizi più stringenti e fase-out degli incentivi alle tecnologie fossili; (ii) contabilità favorevole all'uso di elettricità rinnovabile e waste heat; (iii) incentivo regolatorio a pianificare microreti termiche o **energy communities** con scambio di calore; (iv) contesto di policy che premia soluzioni ad **alta efficienza stagionale** e **monitoraggio** prestazionale, elementi centrali per l'integrazione con i moduli GIS/MCDA della presente tesi. (Direttiva (UE) 2023/2413; Direttiva (UE) 2024/1275; REPowerEU, 2022).

1.2.2. Dal quadro UE al recepimento italiano: strumenti, regole e incentivi

Recepimento RED II/III e PNIEC.

L'Italia ha recepito RED II con il **D.Lgs. 199/2021**, che ha introdotto misure per la crescita delle FER nei diversi settori, semplificazioni autorizzative e schemi di sostegno; nel 2024 è stata pubblicata la **revisione del PNIEC**, che aggiorna i contributi nazionali al 2030 alla luce dei

nuovi obiettivi UE e delle traiettorie per H&C. Nell'ambito del recepimento e della successiva attuazione di RED III, è stata avviata (fine 2023) la consultazione sul decreto **OIERT** (Obbligo di incremento dell'energia rinnovabile termica) per gli operatori che vendono calore/raffrescamento a terzi (es. teleriscaldamento/CHP), con l'obiettivo di definire quote annuali di energia rinnovabile al 2030; il percorso conferma l'orientamento a spingere la componente rinnovabile nei servizi termici e a creare domanda per tecnologie ad alta efficienza, incluse le pompe di calore geotermiche. (D.Lgs. 199/2021; PNIEC 2024; MASE – consultazione OIERT 2023/2024).

EPBD: recepimento e ricadute pratiche.

Sul fronte edilizio, il recepimento della EPBD nel quadro italiano aggiorna i requisiti minimi (DM 26 giugno 2015), l'Attestato di Prestazione Energetica (D.Lgs. 48/2020) e spinge verso l'adozione di **ZEB** nei nuovi edifici e la riqualificazione profonda del parco esistente; la guida della Commissione chiarisce inoltre lo **stop agli incentivi per caldaie autonome a fossili** dal 2025, spostando la leva fiscale verso pompe di calore, ibridi e soluzioni rinnovabili. In parallelo, si consolida il ruolo del **Conto Termico 2.0** e delle detrazioni (Ecobonus/Bonus Casa) come strumenti di sostegno alla domanda di pompe di calore, anche geotermiche, specie per PA e edilizia residenziale. (EPBD 2024/1275; DM 26/06/2015; D.Lgs. 48/2020; GSE – Conto Termico).

Semplificazioni per impianti geotermici “shallow”.

Con il DM 30 settembre 2022 (pubblicato in G.U. 14/10/2022) sono state definite **prescrizioni tecniche e misure di semplificazione** per gli impianti geotermici destinati alla climatizzazione (piccole utilizzazioni locali ≤ 2 MW e profondità ≤ 400 m), delineando procedure in edilizia libera o PAS a seconda dei casi, requisiti per perforazioni, qualificazione degli installatori, dati di progetto/collaudo e istituzione del **registro telematico** delle piccole utilizzazioni; il provvedimento ha ridotto in modo significativo l'incertezza amministrativa per sistemi a circuito chiuso (sonde verticali/orizzontali) e ha inquadrato meglio i casi open loop rispetto alla normativa su acque sotterranee. A livello tecnico, le norme UNI 11466/11467/11468 (2012) offrono **referimenti per dimensionamento/progettazione, installazione e requisiti ambientali** dei sistemi geotermici a pompa di calore, costituendo buona pratica nazionale in assenza di standard cogenti specifici. (DM 30/09/2022; UNI 11466:2012; UNI 11467:2012; UNI 11468:2012).

Incentivi economici attivi.

Il **Conto Termico 2.0** incentiva interventi di generazione termica rinnovabile ed efficienza – incluse pompe di calore geotermiche – con contributi fino al 65% delle spese ammissibili, plafond complessivo 900 milioni €/anno (di cui 400 milioni destinati alle PA), con tempi di erogazione generalmente più rapidi rispetto alle detrazioni fiscali; a ciò si affiancano misure fiscali (Ecobonus/Bonus Casa) e, in alcuni periodi, schemi straordinari (es. Superbonus ridotto). L'orientamento UE post-2024 restringe progressivamente il perimetro degli incentivi per tecnologie fossili stand-alone, aumentando la **competitività relativa delle soluzioni elettriche rinnovabili** come le GSHP. (GSE – Conto Termico; guida EPBD art. 17(15)).

Condizioni di mercato. La dinamica europea delle vendite di pompe di calore ha mostrato volatilità nel 2023–2024, con rallentamenti legati alla contrazione di sussidi e ai prezzi relativi gas/elettricità; ciò rende ancora più importanti: progettazione accurata, qualità installativa e **monitoraggio** per garantire prestazioni reali elevate e ridurre il rischio di underperformance, fattori che incidono sulla redditività dei progetti geotermici. (EHPA/Fonti stampa 2024–2025).

Tabella 2. Strumenti di policy chiave e implicazioni operative per progetti geotermici a bassa entalpia

Strumento	Disposizioni rilevanti per H&C	Implicazioni operative per GSHP/UTES
RED III (Dir. 2023/2413)	Target UE 42,5% rinnovabili 2030; incremento vincolante RES-H&C: +0,8 p.p. (2021–2025) e +1,1 p.p. (2026–2030); indicativo +2,2 p.p. per DHC; misure minime (≥ 2) tra 12 opzioni (art. 23–24; All. IA).	Pianificare pipeline progetti che contribuiscano a target locali; valorizzare elettricità rinnovabile e waste heat nel bilancio; coordinare con piani del calore comunali/di distretto.
EPBD (Dir. 2024/1275)	ZEB: nuovi edifici pubblici dal 2028, tutti i nuovi dal 2030; riduzione energia primaria residenziale -16% (2030) e -20–22% (2035); stop incentivi per caldaie fossili stand-alone dal 2025; solar-ready.	Spinta strutturale a pompe di calore e integrazione rinnovabili; priorità a edifici pubblici; criteri di comfort e IAQ; necessità di progettazione integrata edificio-impianto-sottosuolo.
D.Lgs. 199/2021 & PNIEC 2024	Recepimento RED; traiettorie nazionali; misure per FER termiche; consultazione OIERT per venditori di calore a terzi.	Opportunità per progetti in reti private/condominiali e piccole microreti; possibili obblighi/quote favoriscono tecnologie ad alta efficienza stagionale.
DM 30/09/2022	Semplificazioni per piccole utilizzazioni locali (≤ 2 MW, ≤ 400 m), edilizia libera/PAS, prescrizioni tecniche, registro, qualificazione installatori.	Riduzione tempi e incertezza autorizzativa per closed loop; migliore inquadramento open loop in relazione a tutela acque; allineamento con UNI.
GSE – Conto Termico	Contributi fino al 65%; plafond 900 M€/a (PA 400 M€/a).	Sostegno capex per PA/privati; utile per progetti su scuole, ospedali, uffici; riduzione LCOH.

(Direttiva (UE) 2023/2413; Direttiva (UE) 2024/1275; D.Lgs. 199/2021; DM 30/09/2022; GSE – Conto Termico).

1.2.3. Standard tecnici e buone pratiche per H&C geotermico

Il raccordo tra policy e messa in opera richiede riferimenti tecnico-normativi e prassi consolidate. In Italia, sebbene non esista un “codice unico” per la geotermia a bassa entalpia, si dispone di: (i) norme UNI 11466/11467/11468 su dimensionamento/progettazione, installazione e aspetti ambientali di sistemi GSHP; (ii) criteri EPBD/DM 26/06/2015 per la prestazione energetica e l’APE; (iii) **linee guida e semplificazioni** del DM 30/09/2022 per impianti <2 MW; (iv) riferimenti europei EN 14511, EN 14825, EN 15450 per prestazioni stagionali e sistemi a pompa di calore; (v) best practice internazionali (p.es. VDI 4640) ampiamente utilizzate in progettazione. In chiave gestionale, è raccomandabile integrare sin dall’inizio **monitoraggio** (temperature pozzi, portate, COP/EER stagionali, consumi elettrici), **commissioning** e **M&V** in linea con protocolli di prestazione (p.es. IPMVP), così da alimentare dashboard decisionali e basi dati **GIS** per la gestione “asset-based” della risorsa. (UNI 11466/11467/11468; DM 30/09/2022; ENEA RAEE 2024).

1.2.4. Sintesi operativa per l’integrazione con i moduli decisionali e cartografici

La lettura integrata di RED III, EPBD e recepimento italiano suggerisce un percorso progettuale che unisce conformità regolatoria, qualità ingegneristica e gestione per dati:

1. **Allineamento agli obiettivi locali:** tradurre i target percentuali in indicatori territoriali (kWh di calore rinnovabile/anno per comune; % edifici pubblici da trasformare in ZEB; capex incentivabile) e fissare milestones coerenti con i cicli di bilancio. (Direttiva (UE) 2023/2413; EPBD 2024/1275).
2. **Scelte tecnologiche ottimali:** privilegiare configurazioni GSHP o UTES con elevata efficienza stagionale, riduzione dei picchi, predisposizione a demand response e thermal storage, in ottica di integrazione settoriale. (RED III art. 23–24).
3. **Permitting e qualità esecutiva:** applicare le semplificazioni del DM 30/09/2022 per i sistemi “shallow”, verificando i vincoli locali (acquiferi, tutela, aree a pericolosità) e adottando le UNI come riferimento tecnico; per open loop, pianificare studi idrogeologici e monitoraggi ex ante/ex post. (DM 30/09/2022; UNI 11466/67/68).
4. **Incentivi e bancabilità:** combinare Conto Termico e detrazioni, con un piano cash-flow che includa tempi di erogazione, costi di perforazione e gestione; valutare la riduzione del rischio tramite monitoraggio prestazionale e contratti EPC/servizi energia. (GSE – Conto Termico; D.Lgs. 199/2021).

5. **Governance dei dati:** definire KPI di progetto (COP/EER stagionali, kWh/anno rinnovabili, riduzione emissioni, costi O&M), pipeline di **data analytics** e **dashboard GIS** per rendicontare risultati e supportare **decisioni MCDA** a livello regionale/comunale. (ENEA RAEE 2024).

1.2.5. Misure RED III per H&C e ruolo degli accumuli UTES

La RED III non si limita a fissare target: richiede agli Stati membri di adottare almeno due misure tra dodici opzioni (art. 23). Per l'implementazione dei sistemi geotermici a bassa entalpia, risultano particolarmente rilevanti: integrazione fisica di rinnovabili e calore di scarto, pianificazione locale del calore, installazione di tecnologie ad alta efficienza negli edifici, accumuli termici e reti rinnovabili di teleriscaldamento/raffrescamento. Queste leve diventano "specifiche di progetto" quando vengono tradotte in requisiti tecnici, indicatori e procedure operative.

Accumuli UTES come misura RED III. L'inclusione degli accumuli termici rende naturale l'adozione di UTES (BTES/ATES/CTES) nel disegno dei progetti:

- **BTES (Borehole Thermal Energy Storage):** campi sonde usati come batterie stagionali per ricaricare il sottosuolo in estate (freecooling, PV/solare termico) e prelevare in inverno. Accorgimenti chiave: spaziatura fra sonde ($\geq 5-7$ m in climi caldi), grouting ad alta conducibilità ($\geq 1,5-2,0$ W/mK), controllo del drift termico e delle perdite perimetrali; KPI: $\eta_{\text{roundtrip}}$, ΔT medio e perdite.
- **ATES (Aquifer Thermal Energy Storage):** alternanza di pozzi caldo/freddo in acquiferi confinati/semiconfinati; richiede verifica di permeabilità (K), gradiente idraulico e confinamento, oltre a modellazione del plume termico e definizione dei ΔT in rispetto ai limiti ambientali; KPI: tasso di recupero e impatto su falda.
- **CTES (Cold Thermal Energy Storage):** sfrutta l'inerzia di geostrutture/platee per attenuare i picchi di raffrescamento tipici dei climi mediterranei.

Pianificazione locale del calore (heat planning). RED III incoraggia **mappe del calore e piani comunali:** per la presente tesi ciò si traduce in layer GIS che incrociano domanda (scuole, ospedali, uffici), attitudine geologica/idrogeologica, vincoli e cantierabilità, generando aree di accelerazione per perforazioni/UTES e microreti.

Sostituzione pianificata dei generatori fossili. Una roadmap coerente prevede il phaseout di caldaie autonome in PA e condomini, sostituite con GSHP e terminali a bassa temperatura, abbinate a BEMS e monitoraggio per garantire prestazioni reali.

1.2.6. EPBD, smart readiness (SRI) e integrazione rete-edificio

La rifusione EPBD (2024/1275) introduce lo standard ZEB per i nuovi edifici (pubblici dal 2028, tutti dal 2030), rafforza i BACS e lo Smart Readiness Indicator (SRI), e rende più stringenti i MEPS per il parco esistente. Per i sistemi geotermici a bassa entalpia, ciò comporta:

- **Progettazione integrata** edificio-impianto-sottosuolo con terminali a bassa ΔT e controlli evoluti;
- **Flessibilità lato domanda** tramite preraffrescamento/preriscaldamento e modulazione in base a tariffe orarie;
- **Interoperabilità dati** (contatori di calore/elettrici, sensori di pozzo, API) verso cruscotti di monitoraggio e M&V;
- **Accoppiamento con PV on-site e UTES**, governato da logiche predittive (MPC) per massimizzare quota rinnovabile e ridurre i picchi. Queste disposizioni rafforzano la bancabilità dei progetti GSHP, allineandoli ai requisiti EPBD (comfort, IAQ, efficienza stagionale) e alla strategia all-electric dei servizi H&C.

1.2.7. Incentivi e modelli economico-finanziari

Gli incentivi vanno letti con doppia lente, finanziaria e operativa:

- **Conto Termico 2.0**: contributi in conto capitale (tipicamente 40–65% per GSHP in PA), erogazioni rapide e ammissibilità di sonde, pompe di calore, BEMS e opere accessorie; impatto diretto su **CAPEX** (Capital Expenditures) e **LCOH** (Levelized Cost of Heat).
- **Detrazioni fiscali** (Ecobonus/Bonus Casa): utili nel residenziale; attenzione all'evoluzione post-2025 in coerenza con EPBD.
- **Contratti EPC e Pay-for-Performance**: trasferiscono rischio prestazionale a operatori specializzati, a patto di monitoraggi robusti (COP/EER stagionali, ore equivalenti, kWh_rinn, comfort).
- **Domanda abilitata**: EPBD e RED III, con stop incentivi alle caldaie fossili stand-alone, spostano strutturalmente la domanda verso pompe di calore e UTES, favorendo pipeline di progetti su PA, ricettivo e residenziale.

Operativamente, la tesi adotterà un **modello LCOH parametrico** (€/MWh_{th}) basato su: costo perforazioni €/m, CAPEX meccanico, SPF_H/SPF_C, ore equivalenti, prezzo kWh_e e incentivi; il modello alimenterà il **MCDA** per confrontare siti e configurazioni.

1.3. Italia e Sicilia: stato e potenzialità della geotermia a bassa entalpia

L'Italia presenta un quadro favorevole allo sviluppo della geotermia a bassa entalpia, per dotazione geologica, domanda termoigrometrica sempre più sbilanciata verso il raffrescamento estivo nei climi mediterranei, e un insieme di incentivi e semplificazioni che, se ben coordinati, possono favorire la scalabilità del parco GSHP. La **Sicilia** aggiunge specificità geologiche (aree vulcaniche: Etna e arcipelaghi eoliani; bacini sedimentari con coperture alluvionali; substrati carbonatici e vulcanici) e socio-economiche (elevata incidenza di edifici pubblici strategici, diffusione di edilizia residenziale a bassa efficienza, crescita dei servizi turistico-ricettivi) che rendono la **geotermia “shallow”** una soluzione tecnicamente idonea e potenzialmente competitiva, specie in scenari “all-electric” abilitati da pompe di calore ad alta efficienza. (ISPRA, 2024; ENEA, 2024).

1.3.1. Stato dell'arte nazionale: quadro statistico, barriere e leve

Quadro statistico. I dati più recenti disponibili indicano una crescita dell'uso di rinnovabili nel settore H&C e un ruolo crescente delle pompe di calore nel mix italiano; il Rapporto statistico GSE 2023 conferma l'incremento della produzione elettrica da FER e, sul lato termico, un utilizzo sempre più pervasivo di tecnologie a pompa di calore sostenute da incentivi nazionali. Sebbene la statistica ufficiale separi con maggiore granularità la produzione elettrica, la **penetrazione delle pompe di calore** come terminale H&C è rilevabile nelle serie ENEA/GSE e nelle misure di sostegno (Conto Termico e detrazioni). (GSE, Rapporto statistico FER 2023; ENEA RAEE 2024).

Barriere chiave. Le principali criticità che rallentano la scala dei progetti geotermici “shallow” in Italia includono: (i) **costi upfront** di perforazione e scavi per sonde e pozzi, con sensibilità ai prezzi delle materie prime; (ii) **frammentazione normativa** regionale, soprattutto per impianti open loop che richiedono titoli su derivazione/ricarica, e per aree vincolate; (iii) **variabilità delle competenze** lungo la filiera (progettazione, perforazione, esercizio) e necessità di qualificazione installatori; (iv) **qualità progettuale ed esecutiva** non sempre omogenea (rischio di underperformance → COP/EER reali inferiori a quelli attesi); (v) **percezione del rischio** da parte di committenze pubbliche e private, per mancanza di dati comparabili e trasparenti su performance e costi lungo il ciclo di vita. (DM 30/09/2022; UNI 11466/67/68; ENEA RAEE 2024).

Leve e opportunità. Sul lato opposto, agiscono leve forti: (i) **spinta regolatoria** di RED III (target vincolanti in H&C) e EPBD (ZEB e fine incentivi a caldaie fossili), che indirizzano scelte

tecnologiche; (ii) **incentivi stabili** (Conto Termico 2.0; detrazioni), con occhio alle evoluzioni post-2025; (iii) **semplificazioni** per impianti “shallow” e filiere locali di perforazione; (iv) **integrazione digitale** (BMS, smart metering, monitoraggi) che consente M&V solide e quindi modelli Pay-for-Performance e contratti EPC; (v) **co-benefici** gestionali (riduzione O&M, assenza di rifornimenti, sicurezza d'esercizio).

Il risultato è una finestra di opportunità per trasformare edifici pubblici (scuole, uffici, strutture sanitarie) e patrimoni privati residenziali/ricettivi, considerando la compatibilità urbanistica e le condizioni geotecniche locali. (Direttiva (UE) 2023/2413; Direttiva (UE) 2024/1275; GSE – Conto Termico; DM 30/09/2022).

Tabella 3. Barriere e leve per la geotermia a bassa entalpia: Italia e Sicilia

Dimensione	Barriere	Leve/Opp.	Implicazioni per la tesi
Regolatoria	Frammentazione titoli (open loop), vincoli aree sensibili; scarsa standardizzazione dati.	DM 30/09/2022 semplifica “shallow”; EPBD/RED spingono heat pumps; OIERT in gestazione.	Proposta di checklist autorizzativa e data standard per la piattaforma GIS.
Economica	Capex perforazioni e sottoservizi; percezione rischio; volatilità incentivi fiscali.	Conto Termico stabile; bancabilità tramite M&V; riduzione OPEX e assenza combustibili.	Modello LCOH con scenari incentivi; contratti EPC/servizi energia.
Tecnica	Variabilità competenze; rischio underperformance; gestione acque (open loop).	Norme UNI ; formazione installatori; strumenti di commissioning e monitoraggio .	Pacchetto QA/QC e KPI per MCDA e cruscotti.
Territoriale	Vincoli idrogeologici/geotecnici locali; archeologia/centri storici.	Mappatura GIS vincoli/attitudini; priorità retrofit edifici pubblici fuori centri storici.	Microzonazione energetica e prioritizzazione interventi.

(DM 30/09/2022; UNI 11466/67/68; Direttiva (UE) 2023/2413; Direttiva (UE) 2024/1275; GSE/ENEA).

1.3.2. La Sicilia: contesto geologico, domanda energetica e casi d'uso

Geologia e risorsa “shallow”. La Sicilia combina domini geologici diversi: (i) **aree vulcaniche** (Etna) e porzioni dell'Arco Eoliano che suggeriscono **anomalie geotermiche locali**; (ii) **bacini sedimentari** costieri con depositi alluvionali e sabbiosi; (iii) **unità carbonatiche e vulcaniche** dell'entroterra. Per la scala “shallow” (30–100 m), più che l'anomalia termica profonda contano **conducibilità e capacità termica** dei terreni e la stabilità delle temperature annuali, che in climi mediterranei favoriscono EER competitivi in raffrescamento e COP elevati in riscaldamento, riducendo la necessità di picchi elettrici. La documentazione nazionale (ISPRA, ENEA) conferma l'ampiezza degli areali potenzialmente **idonei per pompe di calore geotermiche** a bassa profondità, ferma restando la verifica idrogeologica sito-specifica e i vincoli locali. (ISPRA, 2024; ENEA RAEE 2024).

Domanda energetica e profilo climatico. In Sicilia, la domanda di raffrescamento estivo è in crescita per l'innalzamento delle temperature e l'urbanizzazione; parallelamente, il riscaldamento invernale ha carichi moderati con forti variazioni microclimatiche (aree interne vs. coste). Questa **asimmetria nella domanda termica** rende particolarmente adatte le **GSHP reversibili** e le configurazioni ibride con supporto da solare termico o fotovoltaico con pompa di calore, in logica all-electric e predisposizione per demand response. (ENEA RAEE 2024; EPBD 2024/1275).

Casi d'uso prioritari. Tre cluster appaiono promettenti:

1. **Edifici pubblici** (scuole, ospedali, uffici regionali/comunali): Conto Termico dedicato (plafond PA), disponibilità di siti per perforazioni e rilevanza simbolica nel percorso verso ZEB.
2. **Strutture turistico-ricettive** in aree costiere e rurali (agriturismi, resort): profili di carico sbilanciati sul raffrescamento, con possibili economie di scala in campi sonde e UTES (es. BTES/ATES dove idoneo).
3. **Residenziale** diffuso e condomini: interventi integrati su involucro e impianti, con heat pump e terminali a bassa temperatura; opportunità in nuove costruzioni soggette a standard ZEB e in riqualificazioni con ibride e accumuli. (GSE – Conto Termico; EPBD 2024/1275).

Vincoli e tutele. Necessario valutare: (i) **vulnerabilità falde** e rischio di interferenze idrauliche per open loop (bilancio idrico, plume termico); (ii) **aree vincolate** paesaggistiche/archeologiche che condizionano perforazioni; (iii) **pericolosità sismica** e compatibilità geotecnica per sonde (grouting, tenuta), con protocolli di controllo. Il DM

30/09/2022 e le UNI supportano la definizione di misure preventive e di monitoraggio, mentre la componente GIS permette di **incrociare layer di vincoli/attitudini per una microzonazione energetica** utile alla pianificazione provinciale/comunale. (DM 30/09/2022; UNI 11466/67/68).

1.3.3. Lacune informative e contributo della tesi

Nonostante i progressi normativi e l'interesse crescente verso la climatizzazione geotermica, in Sicilia permane un vuoto informativo e organizzativo che ostacola la scalabilità degli interventi. Le principali lacune riguardano: (i) l'assenza di un **catasto prestazionale** comparabile per impianti GSHP (dati di esercizio armonizzati su COP/EER stagionali, ore equivalenti, energia scambiata e costi O&M); (ii) la mancanza di una **microzonazione energetica** ad alta risoluzione che incroci proprietà termo-fisiche dei terreni e della falda con vincoli e domanda termica locale; (iii) la **non uniformità** delle procedure autorizzative per i sistemi open loop e, più in generale, la scarsa standardizzazione dei dataset richiesti in istruttoria; (iv) l'assenza di metriche condivise di **costo livellato del calore (LCOH)** tarate sui profili mediterranei di carico, con crescente peso del raffrescamento. (ENEA RAEE 2024; DM 30/09/2022; UNI 11466/67/68).

In risposta, la presente tesi propone quattro obiettivi operativi, concepiti per essere immediatamente riusabili da amministrazioni e operatori: (1) un **catalogo prestazionale regionale** alimentato da protocolli minimi di **monitoraggio & verifica (M&V)**, collegati all'iter autorizzativo e agli incentivi; (2) una **microzonazione energetica** basata su **GIS+MCDA**, che produca mappe di attitudine e priorità a scala comunale con criteri trasparenti e replicabili; (3) una **checklist autorizzativa** e uno **standard dati** (formati, attributi, frequenze di campionamento) per allineare progetti e controlli in campo; (4) un **modello LCOH parametrico** che consenta confronti omogenei tra alternative (closed/open/UTES) e scenari di incentivo, validato su casi studio. (PEARS Sicilia; Direttiva (UE) 2023/2413; Direttiva (UE) 2024/1275).

1.3.4. Permitting e governance regionale

Il **quadro autorizzativo** per le piccole utilizzazioni geotermiche a bassa profondità è stato semplificato dal DM 30/09/2022 per i sistemi closed loop (edilizia libera o PAS secondo casistiche), mentre i sistemi open loop richiedono titoli su derivazione e ricarica in attuazione del D.Lgs. 152/2006 e della normativa regionale sulle risorse idriche, con particolare attenzione a qualità, quantità e vulnerabilità della falda. È raccomandabile che i progetti

includano un **Piano di Monitoraggio** (baseline, collaudo, esercizio) con misure su portate, ΔT , livelli piezometrici, qualità chimico-fisica e prestazioni stagionali degli impianti, così da favorire tracciabilità e apprendimento collettivo. (DM 30/09/2022; D.Lgs. 152/2006; UNI 11466/67/68).

Per ridurre tempi e incertezze procedurali, si propone una **cabina di regia regionale** (Assessorato dell'Energia, ARPA Sicilia, Autorità di bacino, Soprintendenze, Città metropolitane e Comuni) che curi: (a) lo **sportello geotermico** unico per i progetti GSHP, con modulistica standard e tempi certi; (b) l'aggiornamento dei **layer GIS** pubblici (aree con vincoli a perforazione, vulnerabilità delle falde, pericolosità sismica, buffer archeologici e paesaggistici); (c) le **linee guida tecniche** per progettazione, cantiere e M&V; (d) il raccordo con **PEARS** e con i piani comunali **PAESC**, per allineare obiettivi energetici, climatici e di qualità dell'aria. (PEARS Sicilia; PAESC; ENEA RAEE 2024).

1.3.5. Raccordo con l'architettura GIS/MCDA e conclusioni parziali

L'architettura proposta combina un **geodatabase regionale** (geologia 1:50.000, carta idrogeologica, uso/consumo di suolo, vincoli paesaggistici-archeologici-idrogeologici, rete elettrica MT/BT, proxy di domanda termica, siti pubblici candidabili) con un **motore MCDA** che calcola indicatori di **attitudine allo scambio** e **rischio**, normalizza e pesa i criteri, e restituisce **classi di idoneità** e **mappe di priorità** per Comune o distretto. I progetti selezionati confluiscono in un flusso di **monitoraggio con KPI comuni** (SPF_H/SPF_C, kWh_rinnovabili/anno, LCOH, tCO₂ evitate, disponibilità d'impianto, indicatori d'impatto su falda), pubblicati su **cruscotti** interoperabili e riutilizzati come evidenze per **incentivi** e contratti EPC. (Direttiva (UE) 2023/2413; Direttiva (UE) 2024/1275; GSE – Conto Termico; ENEA RAEE 2024).

1.4. GIS e MCDA per il decision making

La costruzione di un sistema decisionale affidabile per la geotermia a bassa entalpia richiede la convergenza di **conoscenza geologica**, **regole tecniche** e **criteri gestionali** in un processo trasparente e replicabile. Il **GIS** (Geographic Information System) fornisce l'infrastruttura per integrare dati eterogenei (geologia, idrogeologia, uso del suolo, vincoli, domanda, rete elettrica) e per eseguire analisi spaziali coerenti; la **MCDA** (Multi-Criteria Decision Analysis) rende esplicite le preferenze, la pesatura dei fattori e l'aggregazione degli indicatori in **mappe di idoneità e priorità**. In questa sezione si delineano i fondamenti metodologici che sostengono

la microzonazione geotermica proposta dalla tesi, con attenzione a indicatori, normalizzazione, pesi, aggregazione, classificazione e validazione/robustezza.

1.4.1. Fondamenti GIS per la microzonazione geotermica

Nella microzonazione geotermica si opera su un **geodatabase** che mette ordine a informazioni molto diverse tra loro: i **raster** descrivono la risposta termica del sottosuolo (per esempio una conducibilità apparente mappata a scala comunale), mentre i **vettori** portano in mappa vincoli, edifici, pozzi e infrastrutture. Per ogni layer registriamo metadati essenziali — scala, data di produzione, accuratezza, adesione a standard OGC/INSPIRE — e, soprattutto, rendiamo espliciti quattro requisiti di qualità: **completezza, accuratezza posizionale e tematica, consistenza logica e attualità**, sostenuti da procedure di **validazione** e da un semplice versionamento. L'esperienza maturata con i metodi di mappatura del potenziale “shallow” in Italia (tra cui G.POT e applicazioni affini) mostra che la standardizzazione delle fonti e la chiarezza degli assunti sono condizioni di base per ottenere risultati comparabili e utili alla pianificazione territoriale (Casasso & Sethi, 2016; Casasso & Sethi, 2017; Casasso et al., 2017). Dentro questo contenitore informativo convivono le componenti che più contano per decidere dove e come intervenire: la **geologia**, che fornisce litologie, tessiture e gradi di cementazione da cui deriviamo i parametri termo-fisici chiave (λ , $\rho \cdot c$, umidità); l'**idrogeologia**, con profondità della falda, permeabilità K, gradienti idraulici, aree vulnerabili e zone di salvaguardia idropotabile; i **vincoli** paesaggistici, archeologici, idrogeologici e sismici; la **domanda termica**, rappresentata tramite proxy come densità edilizia, destinazioni d'uso, superficie utile climatizzata e indicatori climatico-energetici (HDD/CDD); la **cantierabilità**, che considera spazi liberi, sottoservizi e accessibilità; e, non da ultime, le **infrastrutture** elettriche di prossimità (rete MT/BT, cabine, limiti di potenza locale). La codifica di **domini e regole topologiche** — ad esempio evitando la sovrapposizione tra buffer di tutela e siti perforabili — riduce errori e ambiguità già nelle prime analisi (Cosentino et al., 2014; ENEA RAEE 2024; DM 30/09/2022).

Per rendere confrontabili i dati numerici riportiamo tutto su una griglia di riferimento (ad esempio 50×50 m) con **interpolazione** e **resampling**, applichiamo **maschere di esclusione** per i vincoli assoluti e calcoliamo **indicatori** cella per cella tenendo traccia delle formule utilizzate (map algebra). I valori estremi sono trattati con regole semplici — **winsorizing** o soglie percentile — e le unità sono uniformate, così da evitare errori di scala e tenere sotto controllo la propagazione dell'incertezza (Casasso & Sethi, 2016; Malczewski, 1999).

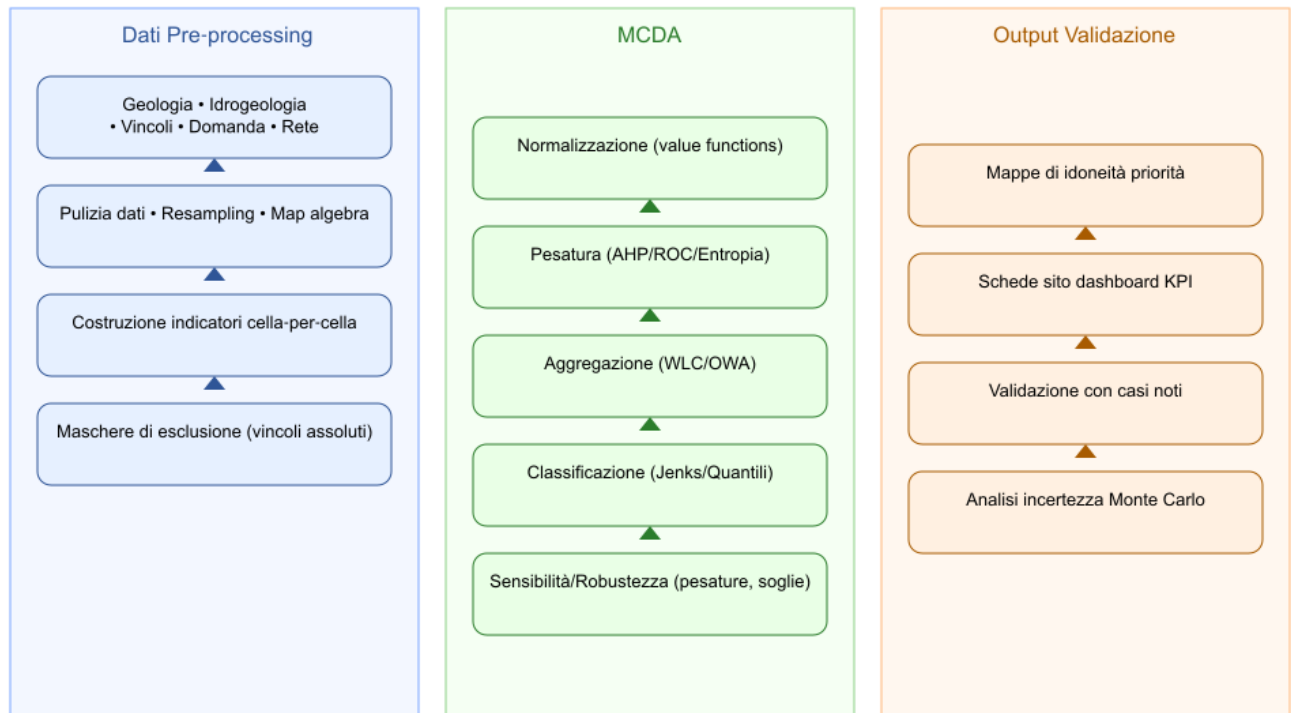


Figura 1. Flusso di processo dalla raccolta dati al calcolo degli indici di idoneità e alla generazione delle mappe di priorità, con evidenza delle fasi di normalizzazione, pesatura, aggregazione, classificazione e validazione.

1.4.2. MCDA: indicatori, normalizzazione, pesi e aggregazione

Per trasformare i layer del GIS in scelte praticabili occorre un passaggio di merito: decidere quali aspetti contano e come farli dialogare in modo trasparente. Qui entra in gioco la MCDA. Cominciamo dagli **indicatori**, che selezioniamo perché rilevanti per la resa tecnico-economica e ambientale dei sistemi, misurabili con fonti accessibili e aggiornabili nel tempo. La letteratura italiana sulla stima del potenziale geotermico superficiale — a partire dal filone **G.POT** — offre un repertorio di variabili robuste su cui calibrare la nostra microzonazione, a cui affianchiamo indicatori di domanda e di governance desunti da linee guida e rapporti istituzionali (Casasso & Sethi, 2016; Casasso & Sethi, 2017; Casasso et al., 2017; ENEA RAEE 2024; DM 30/09/2022). La **Tabella 4** propone un estratto degli indicatori che usiamo come spina dorsale del modello: proprietà termo-fisiche del sottosuolo, profondità e caratteristiche della falda per distinguere fra closed e open loop, vincoli, densità e destinazioni d'uso come proxy della domanda, aspetti di cantierabilità e prossimità alle infrastrutture. Per ciascun indicatore anticipiamo già l'idea di **funzione di valore** con cui lo porteremo su una scala comune.

Tabella 4. Indicatori proposti per la microzonazione geotermica (estratto)

Dominio	Indicatore	Unità	Tipo (beneficio/costo)	Fonte dati tipica	Normalizzazione (esempio)
Geologico	Conducibilità termica λ (apparente)	W/mK	Beneficio	Carte litologiche, letteratura petrofisica	Value function crescente con saturazione a $\lambda \geq 2,5$ W/mK
Geologico	Capacità termica volumica $\rho \cdot c$	MJ/m ³ K	Beneficio	Banche dati petrofisiche	Lineare crescente
Idrogeologico	Profondità falda	m	Beneficio (closed) / vincolo (open)	Carta idrogeologica, pozzi	Plateau ottimale (es. 10–40 m per closed)
Idrogeologico	Permeabilità K	m/s	Beneficio (open)	Dati prove pompaggio, studi	Crescente fino a K soglia; penalità per K troppo bassi
Vincoli	Aree di tutela/servitù	binario	Vincolo	PPR, PTCP, PAI, Siti Natura 2000	Esclusione (mask)
Domanda	Densità SLP climatizzata	m ² /ha	Beneficio	Catasto fabbricati, OSM, piani urbanistici	Crescente; soglia per evitare saturazione
Cantierabilità	Spazio disponibile	m ²	Beneficio	Ortofoto, PRG, rilievi	Crescente con soglie minime

	per perforazioni				
Infrastrutture	Distanza da punti di consegna elettrici	m	Costo	Rete MT/BT	Decrescente (penalità con distanza)
Ambientale	Vulnerabilità alla intrusione salina (costa)	classi	Costo	Studi idrogeologici/regionali	Classi con penalità

(Casasso & Sethi, 2016; Casasso & Sethi, 2017; Casasso et al., 2017; DM 30/09/2022; ENEA RAEE 2024).

Portare questi indicatori su una stessa **metrica** significa **normalizzarli** in [0,1], facendo attenzione alle diverse nature: alcune variabili crescono al crescere dell'idoneità (ad es. λ), altre decrescono (la distanza da un punto di consegna), altre ancora hanno un **ottimo intermedio** (una profondità della falda né troppo bassa né troppo alta per certe soluzioni). Usiamo quindi funzioni di valore lineari o a tratti, e quando serve forme sigmoidi o campane troncate; i parametri sono documentati per consentire che chiunque possa ripetere i calcoli con gli stessi esiti (Malczewski, 1999; Eastman, 2009).

Stabilita la scala comune, resta da **attribuire il peso** relativo a ciascun indicatore. Quando lavoriamo con gruppi di esperti e amministrazioni preferiamo ricorrere all'**AHP**, perché oltre a sintetizzare i giudizi consente un **test di coerenza**; quando l'onere valutativo va alleggerito, il **ROC** offre una buona approssimazione a partire da un semplice ordinamento; in parallelo, il metodo dell'**Entropia** ci aiuta a leggere i dati "dal basso", valorizzando le variabili che portano più informazione. In tutti i casi accompagniamo la scelta con esercizi di **sensibilità** sulle pesature (variazioni del $\pm 10-30\%$) per misurare quanto l'ordinamento finale dipenda davvero da queste assunzioni (Malczewski, 1999; Eastman, 2009).

Tabella 5. Metodi MCDA a confronto (scopo e impatto operativo)

Metodo	Natura	Punti di forza	Limiti operativi	Uso consigliato nella tesi
WLC (Weighted Linear Combination)	Compensatorio	Semplice, trasparente, riproducibile; facile in GIS	Sensibile alla scala; linea di compensazione e a volte eccessiva	Mappe di idoneità di primo livello
AHP (pesi)	Derivazione pesi	Coinvolgimento esperti; test di coerenza	Onere valutativo; soggettività	Pesatura baseline e scenari
OWA	Quasi-compensatorio	Modula ottimismo/pessimismo (ORness)	Scelta parametri non intuitiva	Analisi cautelativa/ottimistica
TOPSIS	Distanza da ideale	Buon ordinamento alternative	Normalizzazione influisce; scala globale	Confronto siti candidati (secondo livello)
PROMETHEE/ELECTRE	Outranking	Gestisce preferenze non compensative	Parametrizzazione complessa	Verifica di robustezza su shortlist

(Malczewski, 1999; Eastman, 2009).

Con pesi e valori normalizzati possiamo aggregare l'informazione. In prima istanza adottiamo una **combinazione lineare pesata (WLC)** su griglia raster, che è intuitiva e tracciabile; quando vogliamo modulare il grado di compensazione fra fattori favorevoli e sfavorevoli ricorriamo a **OWA**, impostando livelli di ORness più o meno cautelativi. Per il confronto puntuale di una short-list di siti può essere utile anche **TOPSIS**, che ordina le alternative in base alla distanza da una soluzione ideale: è un buon controllo incrociato per verificare la coerenza dell'ordinamento ottenuto con WLC.

1.4.3. *Classificazione dei risultati e validazione/robustezza*

Una volta calcolato il punteggio si continua per ogni cella o sito, **traducendo in classi operative** così da renderlo leggibile per chi deve programmare interventi. Quando l'obiettivo è evidenziare nuclei omogenei usiamo le Jenks Natural Breaks, che minimizzano la varianza interna; quando serve semplicità comunicativa o un controllo sul numero di elementi per classe, ricorriamo ai quantili; se esistono soglie normative o vincoli inderogabili, le integriamo come regole di esclusione o come cut-off della scala. Questo passaggio, apparentemente formale, è in realtà un punto chiave per l'uso amministrativo delle mappe (Malczewski, 1999; Eastman, 2009).

Le mappe non valgono per ciò che promettono in astratto ma per quanto reggono al confronto con la realtà. Per questo sono **validate** incrociandole con ciò che è già noto: la localizzazione e le prestazioni di impianti esistenti (SPF_H/SPF_C), gli esiti dei **Ground Response Test** dove disponibili, e — per gli open loop — le osservazioni idrogeologiche su portate e ΔT . Laddove le evidenze siano scarse, la strategia più credibile è attivare **progetti pilota** con **monitoraggio** pubblicato e riutilizzato come base dati regionale (Gizzi et al., 2023; Casasso & Sethi, 2019).

Infine, nessuna decisione è davvero solida se non si misura quanto è **sensibile** alle scelte di modellazione. Per questo accompagniamo il risultato con analisi che variano sistematicamente i **pesi** degli indicatori ($\pm 10-30\%$), i parametri delle **funzioni di valore** e le **soglie di classificazione**; si eseguono simulazioni **Monte Carlo** quando abbiamo stime plausibili di incertezza sugli input e mettiamo a confronto il comportamento **compensatorio** della WLC con approcci più cautelativi (OWA). L'output non è solo la mappa di idoneità, ma anche una **mappa di stabilità** — quante volte una cella mantiene il proprio rango — e una **heat-map del rischio decisionale** da affiancare in trasparenza al prodotto principale (Marsden, 2001; Malczewski, 1999; Eastman, 2009).

1.4.4. *Output operativi e tracciabilità delle decisioni*

Il risultato di questo percorso non è una “bella mappa” ma un **pacchetto operativo**: carte di **idoneità** e **priorità** pronte per alimentare la programmazione, **schede sito** che riassumono il punteggio composito e gli indicatori dominanti, i **vincoli** da rispettare e una stima preliminare del **LCOH** coerente con i parametri locali; insieme, **cruscotti KPI** per il **monitoraggio e la verifica** (SPF_H/SPF_C, kWh_rinnovabili/anno, tCO₂ evitate, disponibilità d'impianto, impatti su falda) consentono di seguire gli impianti nel tempo e di correggere le politiche con dati alla mano (ENEA RAEE 2024; DM 30/09/2022).

Perché questi strumenti siano credibili, dobbiamo poter ricostruire ogni passaggio. La tracciabilità è garantita da un'Appendice metodologica che documenta provenienza dei dati, regole di preprocessing, funzioni di valore, pesi, formule di aggregazione e criteri di classificazione; ogni versione del geodatabase e dei parametri è numerata e datata, in modo che terzi possano replicare l'esercizio e verificarne l'evoluzione. È il prerequisito per il riuso amministrativo e per una **governance della risorsa basata su evidenze**.

1.5. Esperienze comparabili (Mediterraneo/isole vulcaniche)

Questa sezione raccoglie esperienze pertinenti a territori mediterranei e, quando disponibili, insulari/vulcanici, per identificare componenti trasferibili alla Sicilia. Non si intende fornire un catalogo esaustivo, ma un set rappresentativo di casi da cui estrarre **lezioni operative** su indicatori, configurazioni impiantistiche, governance e metriche prestazionali.

1.5.1. Salina (Isole Eolie, Italia): microzonazione geotermica in contesto vulcanico

L'Isola di Salina rappresenta un caso emblematico di indagine delle risorse geotermiche a bassa entalpia in un **contesto vulcanico insulare** del Mediterraneo. Le attività di rilevamento geologico e di valutazione del potenziale condotte in anni recenti hanno messo in evidenza l'importanza di un approccio multilivello: rilievi di dettaglio, ricostruzioni litostratigrafiche, stima delle proprietà termo-fisiche e definizione di aree prioritarie per lo scambio termico con il sottosuolo. La metodologia adottata – con attenzione alle infrastrutture esistenti e ai vincoli paesaggistici – è **trasferibile** nella nostra architettura GIS/MCDA, soprattutto nella definizione di indicatori geologico-strutturali e nella gestione delle aree di tutela. (Floridia & Viccaro, 2019).

Componenti trasferibili: (i) uso di **microzonazione geotermica** come prerequisito ai progetti; (ii) integrazione vincoli paesaggistici con **cantierabilità**; (iii) considerazione delle **variazioni tessiturali** delle vulcaniti per l'assegnazione delle **funzioni di valore** di λ e $\rho \cdot c$; (iv) raccomandazioni operative per impianti **closed loop** in aree con discontinuità geologiche superficiali. (Floridia & Viccaro, 2019).

1.5.2. Ischia (Campania, Italia): vincoli geotecnici e monitoraggio in area vulcanica attiva

L'Isola di Ischia offre lezioni sull'interazione tra assetto termo-reologico della crosta e sicurezza/monitoraggio in territori vulcanici. Pur non essendo un caso di diffusione su larga scala di impianti a bassa entalpia, gli studi sulla reologia crostale e sulla **deformazione del**

suolo aiutano a delineare **attenzioni progettuali** e necessità di **monitoraggio** (es. controllo deformazioni e integrità delle perforazioni in zone tettonicamente attive). Queste conoscenze, integrate nel GIS, diventano **layer di rischio** da associare ai punteggi di idoneità, a tutela di sostenibilità e durabilità dell'investimento. (Castaldo et al., 2017).

Componenti trasferibili: (i) introduzione di indicatori di **pericolosità geotecnica/vulcanica** nel MCDA; (ii) protocolli di **monitoraggio** post-installazione; (iii) linee guida per la **qualità del grouting** e per la verifica di **stabilità** nelle aree con microdeformazioni attive. (Castaldo et al., 2017; UNI 11466/67/68).

1.5.3. Pianura e valli appenniniche in clima mediterraneo: mapping del potenziale e strumenti MCDA

Diversi studi italiani – pur non insulari – hanno sviluppato metodi riproducibili per la **mappatura del potenziale geotermico shallow** in contesti mediterranei o temperati, con solidi riferimenti **GIS/MCDA**. Tra questi: il metodo **G.POT** e applicazioni a livello provinciale/regionale (es. Cuneo, Valle d'Aosta, Cerkno), volte a stimare l'attitudine del sottosuolo combinando indicatori geologici/ idrogeologici e vincoli, con output operativi per pianificazione e permitting. Le metriche includono **idoneità spaziale**, stima dei **pozzi/sonde** installabili per isolotto/cartella catastale, e valutazioni preliminari del **costo livellato del calore**. Questi lavori sono alla base del nostro disegno di indicatori, pesature e validazione. (Casasso & Sethi, 2016; Casasso & Sethi, 2017; Casasso et al., 2017; Casasso et al., 2018).

Componenti trasferibili: (i) pipeline GIS **standardizzate**; (ii) indicatori tecnici aderenti alle **condizioni italiane**; (iii) articolazione dei risultati in **classi e schede sito**; (iv) coinvolgimento delle amministrazioni nella definizione dei **pesi** per migliorare l'adozione. (Casasso & Sethi, 2016; 2017; Casasso et al., 2017).

1.5.4. Reti di quinta generazione in clima mediterraneo: ruolo della geotermia superficiale e degli UTES

Le reti di **teleriscaldamento/teleraffrescamento di quinta generazione (5GDHC)**, basate su **basse temperature** e scambi bidirezionali, sono particolarmente adatte a climi mediterranei e urbani compatti. La letteratura recente sottolinea il ruolo della geotermia superficiale (GSHP centralizzate, campi sonde BTES) come backbone termico, con **accumuli stagionali** e **controlli intelligenti** per massimizzare il contenuto rinnovabile e la **flessibilità**. Le analisi su *Mediterranean Europe* propongono soluzioni modulari e replicabili, evidenziando **metriche** quali SPF stagionali, quota di energia rinnovabile, load-shifting e riduzione delle

emissioni. La nostra tesi recepisce tali evidenze nella definizione dei **KPI** e nella scelta di **OWA** per scenari prudenziali/espansivi. (García-Céspedes et al., 2022; Jodeiri et al., 2022; Chicco & Mandrone, 2022).

Componenti trasferibili: (i) integrazione **BTES/GSHP** in reti a bassa temperatura; (ii) **accumulo** stagionale come misura RED III; (iii) KPI specifici per 5GDHC (quota rinnovabile, $\eta_{\text{round-trip}}$, ore di flessibilità); (iv) interfacce **BEMS/BACS** per SRI e demand response. (García-Céspedes et al., 2022; Jodeiri et al., 2022).

1.5.5. Isole mediterranee: opportunità e limiti sistemici

Le isole mediterranee condividono caratteristiche che impattano la **bancabilità** dei progetti geotermici shallow: (i) **profili di carico** sbilanciati sul **raffrescamento**; (ii) **vincoli ambientali/paesaggistici**; (iii) **reti elettriche** locali con capacità limitate; (iv) **logistica e cantierabilità** sensibili alla stagionalità turistica. Le esperienze internazionali su isole (non solo mediterranee) mostrano che l'integrazione di **PV** e sistemi di **accumulo termico** a scala edificio/quartiere, associata a modelli contrattuali **EPC** e a un monitoraggio accurato, riduce il rischio e migliora la performance economica. Queste lezioni si riflettono nella nostra proposta di **KPI** e nel disegno della **governance** dei dati. (Kuang et al., 2016; ENEA RAEE 2024; GSE – Conto Termico).

Componenti trasferibili: (i) integrazione **PV + GSHP + UTES** per aumentare la quota rinnovabile e smussare i picchi; (ii) **procedure snelle** per permitting (DM 30/09/2022) con check di **impatti sulla falda** per open loop; (iii) **schede sito** e **mappe di priorità** per indirizzare gli investimenti pubblici. (DM 30/09/2022; Casasso & Sethi, 2019; Gizzi et al., 2023).

1.5.6. Sintesi comparativa e implicazioni per la Sicilia

Dalle esperienze richiamate emergono alcuni tratti comuni utili alla progettazione del sistema siciliano:

1. **Centralità del GIS/MCDA:** l'integrazione di indicatori tecnici, vincoli e domanda produce **mappe operative** che orientano scelte di progetto e politiche locali. (Casasso & Sethi, 2016; 2017).
2. **Valore degli UTES:** i **BTES** e, ove idrogeologicamente possibile, gli **ATES** abilitano **flessibilità** e ottimizzazione stagionale, migliorando gli **SPF** e l'integrazione con rinnovabili elettriche. (Chicco & Mandrone, 2022; Jodeiri et al., 2022).

3. **Governance e permitting**: semplificazioni e **standard dati** accorciano i tempi, soprattutto in contesti insulari/vulcanici con vincoli sensibili. (DM 30/09/2022; ENEA RAEE 2024).
4. **KPI e M&V**: la **misura** di COP/EER stagionali, kWh_rinn, LCOH e impatti su falda è condizione per **bancabilità** e apprendimento collettivo. (Gizzi et al., 2023; Casasso & Sethi, 2019).

Questi elementi vengono recepiti nel **Capitolo 2** (geodatabase e microzonazione) e sviluppati nella **Metodologia**: l'architettura regionale proposta mira a tradurre evidenze e buone pratiche in uno strumento di **programmazione** e **monitoraggio** scalabile, aperto e verificabile.

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO ENERGETICO, MICROZONAZIONE E GEODATABASE REGIONALE

L'inquadramento che segue costruisce la base conoscitiva su cui si innesta l'intero impianto metodologico della tesi. Il tema è duplice: da un lato la domanda termica reale dei territori siciliani, con i suoi profili stagionali, le distribuzioni spaziali e le eterogeneità tra settori d'uso, dall'altro la risorsa geotermica a bassa e media profondità, intesa come combinazione di condizioni geologiche, idrogeologiche e termiche che rendono il sottosuolo idoneo allo scambio di calore con sistemi a pompa di calore. Il raccordo tra domanda e risorsa è un passaggio indispensabile che consente di definire priorità geografiche e settoriali, scenari di penetrazione tecnologica, e, soprattutto, criteri per una microzonazione energetica in grado di guidare scelte d'investimento credibili nel contesto siciliano.

La letteratura recente sulla Sicilia conferma un quadro geodinamico complesso, dove domini di avampaese, avanfossa e catena orogenica si accompagnano a aree vulcaniche attive e a gradienti termici differenziati in profondità (Floridia et al., 2022). In tale cornice, il campo termico crostale mostra variazioni significative per spessori sedimentari, natura del basamento, produzione radiogenica e contributi mantellari, traducendosi in potenziali di sfruttamento geotermico disomogenei sia a scala regionale, sia a scala locale. Per i fini della climatizzazione efficiente degli edifici (riscaldamento e raffrescamento), questa eterogeneità non è un ostacolo, ma un'opportunità: i sistemi geotermici a bassa entalpia (closed-loop verticali/orizzontali, sistemi open-loop su falda, campi con accumulo stagionale) possono essere dimensionati per operare anche in assenza di anomalie termiche, beneficiando della stabilità termica del sottosuolo superficiale e delle condizioni idrogeologiche favorevoli (Floridia and Viccaro, 2019).

In parallelo, la domanda termica regionale dipende dalla morfologia insulare, dalla distribuzione urbana e periurbana lungo le coste, dall'entroterra collinare e montano, dalla prevalenza dell'edilizia residenziale diffusa rispetto a grandi condomini in alcune aree, e dai profili di carico del terziario (sanità, istruzione, PA, turistico-ricettivo). La stagionalità è bipolare: picchi invernali per il riscaldamento (più marcati nelle fasce altimetriche e nell'entroterra) e picchi estivi per il raffrescamento (più marcati nelle conurbazioni costiere e nelle valli interne). In questo senso, la geotermia a bassa entalpia offre un doppio servizio energetico lungo l'intero anno, riducendo la dipendenza da combustibili fossili per il

riscaldamento e migliorando l'efficienza del raffrescamento estivo, quando il COP delle pompe di calore aria-aria degrada per via delle alte temperature esterne (Zangheri et al., 2014).

La traiettoria tecnologica, già delineata nel Capitolo 1, ha due implicazioni operative per la Sicilia. Primo: i parametri termo-fisici degli orizzonti geologici superficiali (0–150 m) – conduttività termica, calore volumetrico, saturazione, permeabilità valutano quanto il gradiente geotermico sia profondo, e la progettazione deve muovere da misure e mappe affidabili di tali parametri (Dalla Santa et al., 2020; VDI 4640). Secondo: i miglioramenti sui componenti chiave (grout, sonde, fluidi, sistemi di accumulo) abbassano le profondità totali installate e i costi specifici, ampliando il dominio di applicabilità in contesti urbani densi e in aree con vincoli paesaggistici/ambientali (Viccaro, 2018; Floridia et al., 2022). Il capitolo mette a sistema queste dimensioni, definendo criteri e dati di base necessari alla microzonazione energetica e al disegno del GeoDatabase regionale, che verranno poi sviluppati nel prosieguo.

Dal punto di vista geologico, la Sicilia è un laboratorio naturale: al tettonico-collisivo si somma la presenza di vulcani attivi o quiescenti e domini sedimentari profondi. La risultante è una “mappa” di potenziali geotermici differenziati: aree a calore di mantello più elevato e coperture più sottili; aree a forte spessore sedimentario dove il campo termico superficiale è condizionato dalla conducibilità e dallo stato di saturazione; aree carbonatiche in cui la fratturazione e la presenza di acquiferi guidano lo scambio termico. La lettura energetica di questa mappa, tuttavia, non può prescindere dalla domanda: l'allocazione di risorse pubbliche e private, la priorità di intervento su edifici pubblici energivori, la possibilità di soluzioni di quartiere (reti di prossimità, sistemi ibridi con solare termico/fotovoltaico) dipendono dall'incontro tra “dove ha senso energetico” e “dove c'è domanda e fattibilità tecnico-economica” (Floridia et al., 2022). Un'ultima considerazione riguarda la governance dei dati. La costruzione di un geodatabase regionale integrato per la geotermia superficiale non è un mero esercizio cartografico. È la condizione abilitante per passare da analisi qualitative a decisioni replicabili: integrare strati informativi geologici e idrogeologici, vincoli, indicatori di domanda, fattori di rischio, esiti di test in sito, ritorni di esperienza impiantistici. La qualità, la completezza e la tracciabilità dei dati diventano requisiti di progetto tanto quanto un COP dichiarato: senza una base informativa solida, la microzonazione scivola nell'opinabilità e la progettazione si espone a sovra/sottodimensionamenti costosi.

Quanto segue, a partire dal §2.1, declina questa premessa in chiave energetica e geotermica per la Sicilia, disegnando un quadro di riferimento su fabbisogni, profili di carico e compatibilità

con la risorsa del sottosuolo alle scale dove si prendono le decisioni (comunale, sub-urbana, sito).

2.1. Inquadramento energetico e geotermico della Sicilia

L'analisi integrata della domanda termica e della disponibilità geotermica potenziale richiede di leggere la Sicilia come un sistema energetico territoriale, non come la semplice somma di edifici. Quattro elementi strutturano il quadro: (i) il clima e la sua stagionalità, che determinano i profili di carico per riscaldamento e raffrescamento; (ii) la morfologia e la distribuzione degli insediamenti, con la concentrazione lungo le coste e nuclei nell'entroterra; (iii) la composizione del parco edilizio e degli usi finali (residenziale, terziario pubblico/privato, produttivo-artigianale); (iv) le condizioni del sottosuolo nei primi 150 metri, che governano lo scambio termico efficace per i sistemi shallow e, per alcune applicazioni, la possibilità di accumulo stagionale.

Clima e profili di carico. La Sicilia presenta gradini climatici marcati: costiere e pianure con estati calde e inverni miti ma umidi; rilievi e altopiani con inverni più rigidi ed escursioni termiche più ampie. Ne derivano profili di carico differenti a parità d'uso: nelle aree costiere densamente urbanizzate il raffrescamento estivo incide significativamente sui consumi; nelle aree interne e collinari, il riscaldamento invernale pesa di più. A scala annuale, l'opportunità per la geotermia a bassa entalpia è duplice: con pompa di calore si coprono riscaldamento e produzione di ACS in inverno e gran parte del raffrescamento estivo, stabilizzando il carico elettrico e riducendo i picchi di domanda termica. L'inversione stagionale dei flussi (estrazione/iniezione di calore dal/nel terreno) contribuisce anche a mitigare la deriva termica locale del sottosuolo, con benefici sulla resa di lungo periodo dei campi sonde e sull'affidabilità delle prestazioni (Zangheri et al., 2014; VDI 4640).

Distribuzione insediativa e usi finali. La geografia degli usi finali in Sicilia vede grandi concentrazioni urbane e periurbane lungo le coste e un tessuto diffuso nell'interno. Residenziale e terziario rappresentano i giacimenti principali per la geotermia superficiale, mentre il manifatturiero leggero e le PMI artigiane offrono potenziale per soluzioni open-loop o per campi sonde dedicati dove la superficie utile esterna è limitata ma la profondità è ammessa. È nelle scuole, negli ospedali, negli edifici amministrativi, negli impianti sportivi, nelle strutture turistico-ricettive e nelle reti di edifici pubblici concentrati che la geotermia a bassa entalpia può generare maggior valore: profili d'uso regolari e prevedibili, ore equivalenti

elevate, fabbisogni termici/ frigoriferi importanti e continuità gestionale, oltre alla maggiore capacità di investimento e alla possibilità di aggregare domanda.

Sottosuolo e risorsa geotermica potenziale. Il potenziale superficiale dipende in prima istanza dalle proprietà termo-fisiche dei terreni e dalle condizioni idrogeologiche locali. Nei domini sedimentari, la presenza di livelli sabbioso-ghiaiosi saturi, con conduttività termica e capacità termica volumetrica favorevoli, aumenta le potenze specifiche estraibili per metro di sonda; nei domini carbonatici fratturati, l'interazione con acquiferi e la circolazione idrica possono migliorare la resa, ma richiedono attenzione a interferenze e misure di protezione. La presenza di vulcaniti superficiali e sub-superficiali in aree etnee e insulari porta con sé parametri termo-fisici variabili: prodotti piroclastici sciolti, lave massicce, tufi alterati; a parità di profondità installata, ciò determina differenze non trascurabili nella resa di scambio e nelle scelte di miscela di riempimento e di geometria delle sonde (Casasso and Sethi, 2016; Dalla Santa et al., 2020; Vespasiano et al., 2023).

Domanda e risorsa: principi di raccordo. Il nodo progettuale è far coincidere le aree di maggiore fattibilità tecnico-economica (buone proprietà termo-fisiche, perforabilità, accessibilità cantieristica) con i bacini di domanda concentrata e con le filiere di gestione capaci di accompagnare investimenti e manutenzioni (Vicarò et al., 2016; Casasso and Sethi, 2017). Ciò sposta l'attenzione dalle "anomalie" termiche profonde all' "ordinario" del sottosuolo superficiale: classi di conducibilità, presenza/assenza di saturazione, profondità consigliate, densità installabile di campi sonde in contesti urbani, vincoli e coesistenza con sottoservizi.

2.1.1. Quadro termico regionale e implicazioni per l'idoneità superficiale

La ricostruzione del campo termico regionale a scala crostale evidenzia come, al di sotto dei 10 km, il regime delle temperature sia modulato da spessore dei sedimenti, proprietà del basamento e contributi dal mantello, mentre a scala superficiale le differenze emergono soprattutto per natura litologica e stato di saturazione delle prime centinaia di metri (Floridia et al., 2022). A fini di climatizzazione degli edifici con sistemi shallow, ciò rafforza la centralità della mappatura delle proprietà termo-fisiche 0-150 m e della microzonazione rispetto a basamenti e Moho: le prestazioni stagionali dipendono prevalentemente dal "primo chilometro" di geologia, non da eventuali anomalie profonde. In particolare, l'esistenza di domini sedimentari con pacchi di coperture di spessore plurichilometrico comporta, in superficie, livelli alterati e spesso saturi che possono risultare favorevoli allo scambio, mentre le fasce carbonatiche interne, più rigide e talora a conduttività termica più elevata ma con variabilità idraulica, richiedono inquadramenti idro-stratigrafici più puntuali.

In contesti vulcanici insulari, l'assetto termo-idraulico superficiale è condizionato dalla stratificazione alternata di coltri piroclastiche, tufi e lave, con differenze nette tra depositi sciolti poco saturi (conduttività bassa) e prodotti consolidati o saturi (conduttività e capacità termica maggiori) (Floridia and Viccaro, 2019). La discontinuità laterale dei corpi e la presenza di strutture tettoniche attive suggeriscono, per tali aree, programmi di indagine in sito e calibrazioni locali più serrate, specie in ottica di campi sonde multipli, UTES o sistemi open-loop.

2.1.2. Domanda termica regionale: segmenti prioritari e stagionalità

Per orientare microzonazione e priorità di intervento, è utile distinguere alcuni segmenti di domanda con ricadute diverse sulla scelta delle soluzioni geotermiche:

- **Edilizia residenziale compatta e diffusa.** Nelle conurbazioni costiere, la densità edilizia e l'elevato carico estivo rendono promettenti gli impianti geotermici a servizio di condomini, complessi residenziali e quartieri, soprattutto se abbinati a reti interne di scambio e a sistemi ibridi con fotovoltaico e accumulo elettrico. Nei centri minori e nell'entroterra, la taglia delle pompe di calore e la disponibilità di suolo indirizzano verso soluzioni a sonda verticale per unità immobiliare o aggregazioni di poche utenze.
- **Edifici pubblici e terziario energivoro.** Scuole, ospedali, poli amministrativi, impianti sportivi e strutture turistico-ricettive presentano carichi termici e frigoriferi significativi e profili di funzionamento prolungati nell'anno. Sono candidati naturali a sistemi a pompa di calore geotermica, per i quali esistono standard di dimensionamento e solide esperienze operative.
- **Piccole/medie attività produttive e artigianali.** In molte aree periurbane e zone PIP, piccoli capannoni con fabbisogni termici e di raffrescamento medi possono essere serviti da impianti geotermici dedicati o condivisi, anche con soluzioni open-loop laddove le condizioni idrogeologiche lo consentano e la gestione autorizzativa sia sostenibile.

Tabella 6. Settori d'uso, profili stagionali e criteri di selezione per progetti GSHP/UTES in Sicilia

Settore	Profilo stagionale prevalente	Opportunità GSHP/UTES	Rischi/attenzioni	Criteri di priorità
Edifici pubblici (scuole, ospedali, uffici)	Inverno moderato; estate in crescita (ospedali: uso continuo)	Campi sonde verticali; BTES per bilanci stagionali; monitoraggi M&V	Cantierabilità in siti storici; continuità di servizio	Incentivi dedicati; disponibilità spazi; tempi autorizzativi
Ricettivo (costa/interne)	Estate dominante; picchi luglio-agosto	GSHP reversibili + BTES; integrazione FV; 5GDHC in resort/microreti	Stagionalità cantieri; carichi sbilanciati	Densità camere/SLP; integrazione con FV; profilo tariffario
Residenziale multifamiliare	Misto con raffrescamento in crescita	GSHP centralizzata; reti a bassa T; accumuli	Vincoli condominiali; rumore/cantiere	Densità condominiale; spazi perforazioni; TEP evitati
Terziario privato (uffici/retail)	Estate marcata; orari concentrati	Campi sonde compatti; free-cooling	Picchi simultanei; gestione drift	Prossimità a cabina; possibilità UTES
Industriale leggero/artigianale	Variabile; spesso raffrescamento di processo	Recupero calore; GSHP ibride	Interferenze con processo; qualità acqua (open loop)	Ore equivalenti; layout; sinergie di processo

Nota: Tabella qualitativa, utile a rappresentare relazioni e criteri. Le voci sono coerenti con l'approccio domanda-risorsa e con la microzonazione proposta nel capitolo.

Sul piano stagionale, i profili tipici indicano carichi invernali per il riscaldamento che possono essere ridotti a parità di comfort grazie alle COP più elevate delle pompe di calore aria-acqua/terra-acqua rispetto alle caldaie, e carichi estivi affrontabili con EER favorevoli rispetto a sistemi ad aria, in presenza di sottosuolo con temperatura annua media contenuta (Zangheri et al., 2014; VDI 4640). L'uso combinato inverno/estate attenua il rischio di sbilanciamenti termici di lungo periodo del terreno, soprattutto in presenza di utenze con raffrescamento estivo marcato (uffici, commerciali, ospitalità), e giustifica strategie di accumulo stagionale dove la domanda estiva supera quella invernale.

2.1.3. Parametri chiave per l'idoneità alla geotermia superficiale

Nel contesto isolano, alcuni parametri derivanti dal sottosuolo assumono peso particolare per l'idoneità geotermica a bassa entalpia:

- **Conduttività termica e capacità termica volumetrica dei terreni superficiali.** Litologie a granulometria fine e secche mostrano conduttività basse, mentre livelli sabbiosi/ghiaiosi saturi e rocce compatte (calcari, lave massive) presentano conduttività più elevate. Le differenze si riflettono direttamente sulle potenze specifiche estraibili per metro di sonda, quindi sulla profondità totale necessaria e sui costi (Dalla Santa et al., 2020).
- **Stato di saturazione e dinamica idrica.** La presenza di falde superficiali in movimento può incrementare lo scambio termico (effetto advezione) e sostenere prestazioni stagionali stabili; richiede, tuttavia, attenzione a possibili interferenze tra sistemi e a misure di tenuta idraulica del foro (grouting) adeguate a proteggere gli acquiferi e garantire l'isolamento tra orizzonti (Piga et al., 2017; Casasso and Sethi, 2019).
- **Perforabilità e vincoli realizzativi.** Spessori di riporti, litologie incoerenti, presenza di lapilli/tufi sciolti o lenti di argilla, così come calcari duri e basalti, condizionano metodi e costi di perforazione, scelta delle sonde e delle miscele di riempimento, e possibili geometrie in assenza di profondità elevate (campi più densi, sonde corte, soluzioni orizzontali laddove lo spazio lo consenta) (VDI 4640).
- **Vincoli e coesistenza con sottoservizi.** In aree urbane, la densità di sottoservizi può limitare la disposizione dei fori; la progettazione richiede rilievi GPR e coordinamento con gestori di reti. In ambiti vincolati, la soluzione geotermica può rappresentare un'opzione "invisibile" compatibile con il paesaggio, a condizione di una progettazione accurata e tracciabilità delle lavorazioni.

2.1.4. Componenti tecnologiche e impatti sulla resa

Le scelte progettuali sulle componenti di campo influenzano direttamente le performance e la fattibilità in contesti siciliani:

- **Miscele di riempimento (grout) ad alta conducibilità controllata.** L'impiego di grout migliorati con additivi ad alta conducibilità termica, mantenendo al contempo resistenze meccaniche e tenuta idraulica, consente di ridurre la resistenza termica del foro e la profondità totale necessaria a pari carico. La scelta del tenore di additivo deve evitare eccessi che creino cortocircuiti termici locali o incompatibilità con le proprietà del terreno; è cruciale allineare la conducibilità del grout a quella dello strato prevalente per evitare discontinuità troppo marcate e rispettare i requisiti di isolamento tra orizzonti idrici (Vicarò, 2018; Floridia et al., 2022).
- **Sonde con materiali e geometrie ottimizzate.** L'adozione di configurazioni a U semplice o doppia, sonde coassiali o soluzioni ibride, e l'uso di materiali con migliore conducibilità termica (pur bilanciando costi e posa) contribuiscono a ridurre le profondità e i numeri di fori. Il guadagno è particolarmente rilevante in lotti urbani con spazi ristretti o dove i costi di perforazione sono elevati (VDI 4640).
- **Circuiti aperti (open-loop) e sistemi ibridi.** In contesti con acquiferi superficiali ben caratterizzati e regimi idrodinamici stabili, sistemi open-loop possono offrire prestazioni eccellenti, a patto di un controllo rigoroso su qualità delle acque, prevenzione dell'intasamento e rispetto di portate/temperature di ritorno. Dove la praticabilità autorizzativa o la qualità della risorsa idrica è incerta, i closed-loop restano la scelta preferibile (Casasso and Sethi, 2019).
- **Accumuli stagionali (ATES/BTES).** Nel clima siciliano, con carichi estivi di raffrescamento significativi, l'uso di ATES (acquifero) o BTES (campo sonde) per accumulare calore "in eccesso" estivo e restituirlo in inverno può rifasare i bilanci termici dei campi, migliorando l'affidabilità delle prestazioni nel lungo periodo e la sostenibilità idraulica-termica del sottosuolo (Midttømme and Banks, 2008).

2.1.5. Dalla conoscenza alla priorità d'intervento

La convergenza tra domanda e risorsa si traduce operativamente in mappe di idoneità e di priorità. Le prime derivano dalla combinazione di indicatori fisici del sottosuolo (conduttività, saturazione, perforabilità), vincoli e rischi; le seconde nascono dall'incrocio con indicatori di domanda (consumi termici proxy, densità di carico, presenza di grandi utenze pubbliche), costi

attesi e fattibilità cantieristica. La declinazione per bacini urbani e per ambiti funzionali (zone scolastiche e ospedaliere, quartieri ad alta densità di edifici energivori, aree artigianali) permette di costruire pipeline d'interventi scalabili, dove le prime realizzazioni fungono da casi pilota, migliorando la qualità dei dati e delle stime per gli interventi successivi (Casasso and Sethi, 2016; Galgaro et al., 2015; Viesi et al., 2018; Viccaro et al., 2016).

In sintesi, l'inquadramento energetico e geotermico della Sicilia individua un potenziale diffuso per la geotermia superficiale, con punte in contesti urbani costieri e in poli pubblici ad alta intensità d'uso, e specificità nelle aree con assetti geologici più variabili (vulcaniti, domini carbonatici fratturati). La traduzione di tale potenziale in cantieri richiede basi dati regionali consistenti, regole di microzonazione trasparenti e un disegno del GeoDatabase capace di tenere insieme geologia, domanda e decisione. Proprio questo sarà l'oggetto dei paragrafi successivi del capitolo.

A valle di questo quadro, vale la pena esplicitare alcuni passaggi operativi che rendono concreta l'interazione tra domanda e risorsa nell'ottica siciliana. Un primo passaggio consiste nella ricostruzione della domanda termica a scala sub-comunale, utilizzando indicatori climatici (gradi-giorno di riscaldamento e di raffrescamento), densità edilizia e mix d'uso, età del costruito e standard medi di prestazione energetica per destinazione d'uso. Questo consente di generare mappe di carico termico e frigorifero per chilometro quadrato e di stimare ore equivalenti di funzionamento per tecnologie a pompa di calore, cui si associano fattori di picco coerenti con il clima locale (Zangheri et al., 2014). Il secondo passaggio è la trasposizione di tali mappe sulla "tessitura geologica" dei primi 150 m: a ciascuna unità litotecnica/idrostratigrafica sono attribuiti parametri termo-fisici (conduttività, calore volumetrico), idraulici (presenza e produttività di acquiferi) e di perforabilità/cantierabilità, derivati da banche dati esistenti e da letteratura regionale, eventualmente raffinati con test in sito mirati (Dalla Santa et al., 2020; Vespasiano et al., 2023). L'overlay domanda-risorsa produce così matrici di idoneità "energetica-geologica" su cui innestare regole di priorità e di policy.

Un ulteriore elemento che ha particolare rilevanza in Sicilia riguarda la gestione degli squilibri stagionali tra carichi invernali ed estivi. In territori dove l'intensità del raffrescamento supera quella del riscaldamento, il terreno tende a riscaldarsi nel tempo se non si adottano strategie di bilanciamento: l'impiego di UTES (BTES o ATES), il caricamento termico invernale attraverso recuperi di calore di processo o l'adozione di sistemi ibridi (aria-acqua/terra-acqua) con logiche di priorità stagionale sono strumenti che permettono di mantenere stabile la temperatura del campo sonde, prevenendo decadimenti prestazionali e garantendo la

sostenibilità termica di lungo periodo (Midttømme and Banks, 2008; VDI 4640). Per le aree urbane costiere, dove lo spazio per i campi verticali può essere limitato e la presenza di falde superficiali è frequente, scenari open-loop con reiniezione e monitoraggio termico-chimico rappresentano un'opzione praticabile laddove il quadro autorizzativo e le caratteristiche idrogeologiche siano favorevoli (Casasso and Sethi, 2019).

Sul fronte dei costi e dei tempi realizzativi, evidenze raccolte in contesti mediterranei comparabili mostrano che la scelta di miscele di riempimento ad alta conducibilità e di geografie di campo ottimizzate (interassi adeguati, profondità ridotte ma numero di fori maggiore dove la perforabilità è critica) consente di minimizzare la lunghezza totale installata a parità di carico, riducendo sensibilmente l'impatto cantieristico in ambito urbano (Viccaro, 2018; Floridia et al., 2022). Questi accorgimenti progettuali sono particolarmente utili per edifici pubblici energivori (scuole, ospedali) e per strutture turistico-ricettive con elevata domanda estiva, che possono beneficiare di schemi a pompa di calore in grado di erogare contemporaneamente servizi di climatizzazione e di ACS in cicli a recupero, massimizzando le ore equivalenti.

Infine, la costruzione di una pipeline di progetti richiede un meccanismo di prioritizzazione trasparente. Nelle zone dove l'idoneità geologica è alta e la domanda concentrata, la preferenza va data a cluster di edifici pubblici con profili d'uso prevedibili e forte visibilità sociale (scuole, presidi sanitari), che possono fungere da "avviatori" di filiere locali (perforatori, termotecnici, imprese elettriche) e da casi dimostrativi. Nei bacini urbani a media idoneità ma con domanda importante, la leva può essere la scala di quartiere (reti a bassa temperatura alimentate da campi sonde condominiali o da ATEs), integrando la geotermia con fotovoltaico e accumulo per ridurre il carico elettrico di rete nelle ore di punta (Casasso and Sethi, 2016; Galgaro et al., 2015; Viesi et al., 2018). In ambiti interni diffusi, con domanda sparsa e litologie a conduttività modesta, si può invece puntare su interventi a taglia ridotta ma numerosi, sfruttando incentivi e schemi di terziario energetico per la PA e per i piccoli comuni.

2.2. Quadro geologico vulcanico e idrogeologico

Il contesto geologico della Sicilia combina l'edificio vulcanico etneo e l'arco eoliano con la catena appenninico-maghrebide, i bacini foredeep e l'avampaese ibleo. Questa compresenza di domini tettonici e litologici determina un mosaico idrostratigrafico articolato, con forti contrasti di permeabilità e una variabilità delle proprietà termo-fisiche dei terreni superficiali che incide direttamente sull'efficacia degli scambi geotermici e, in diversi casi, sulla praticabilità dei

sistemi a circuito aperto. Nei primi 150–200 m, laddove si colloca la maggior parte degli impianti shallow, prevalgono le condizioni legate alla natura dei depositi (sciolti/coerenti), allo stato di saturazione, ai livelli freatici e alle principali discontinuità strutturali, mentre i contributi delle anomalie profonde giocano un ruolo marginale ai fini del dimensionamento impiantistico per climatizzazione. La messa a fuoco di questi aspetti è quindi essenziale per una microzonazione credibile e per disegnare regole di idoneità coerenti con il comportamento reale del sottosuolo (Floridia et al., 2022).

L'Etna rappresenta un caso emblematico. L'alternanza verticale e laterale di lave a tessitura variabile, piroclastiti, tufi e intercalazioni sedimentarie locali produce una stratificazione di livelli ad alta permeabilità (fratture, vacuoli, condotti preferenziali nelle lave pahoehoe e aa) e di orizzonti più fini o alterati che agisce da livelli di semiconfine o di acquitard. Questa architettura genera acquiferi complessi, con circuiti freatici e talora artesiani in prossimità delle linee di frattura principali; per la geotermia superficiale ciò implica, da un lato, **buone rese termiche** per effetto dell'advezione laddove la circolazione è significativa, dall'altro l'esigenza di **progettare fori e grouting** in modo da isolare orizzonti diversi ed evitare cortocircuiti idraulici e termici. In quest'area, le discontinuità strutturali e i trend di micro-deformazione suggeriscono inoltre controlli puntuali di **stabilità dei fori**, scelta di **profondità massime** compatibili con la meccanica dei livelli attraversati e l'adozione di miscele di riempimento con conducibilità e comportamento meccanico calibrati al contesto (Floridia and Viccaro, 2019).

Nell'arcipelago eoliano, l'impronta vulcanica si accompagna a variazioni laterali rapide di litologia e grado di alterazione; a Salina, Lipari e Vulcano sono frequenti alternanze di tufi e piroclastiti con colate laviche e livelli sedimentari rielaborati. A scala shallow, i depositi sciolti a bassa saturazione risultano meno favorevoli in termini di conducibilità termica, mentre orizzonti consolidati o saturi migliorano la resa di scambio; la presenza di faglie e fratture attive o recenti indirizza l'orientamento dei campi sonde e talvolta consiglia assetti **BTES** o soluzioni ibride con campi più densi e profondità ridotte per minimizzare rischi e ottimizzare l'efficacia scambiante. L'esperienza di microzonazione condotta su Salina mostra come la lettura geomorfologico-strutturale, integrata a informazioni termiche e idrostratigrafiche, consenta di delimitare ambiti a diversa idoneità per GSHP e UTES, con attenzione ai vincoli ambientali e paesaggistici (Floridia and Viccaro, 2019).

Nei settori interni della catena, la presenza di unità carbonatiche fratturate e, localmente, carsificate, introduce acquiferi ad alta produttività ma con forti eterogeneità spaziali; qui l'effetto di **fratturazione** e **circolazione** può aumentare la resa di scambio, ma richiede

campagne di indagine attente alle **interferenze** fra sistemi e all'isolamento degli orizzonti. A confronto, i bacini **foredeep** (es. Gela) e le pianure costiere ospitano **depositi clastici** con livelli sabbiosi-ghiaiosi saturi intercalati a limi e argille: laddove i livelli permeabili sono continui e di spessore adeguato, gli assetti open-loop risultano tecnicamente praticabili, con l'ovvia cautela europea sulle temperature di prelievo/restituzione e sul mantenimento della qualità chimica delle acque (Casasso and Sethi, 2019). In prossimità delle coste, resta un tema di **intrusione salina** e di vulnerabilità all'over-pumping: le verifiche di sostenibilità idraulica devono precedere ogni ipotesi di schemi GWHP con reiniezione, privilegiando configurazioni che minimizzino la possibilità di rimescolamenti indesiderati e di avanzamento del cuneo salino.

Sul piano idrogeochimico, i casi a circuito aperto indicativi di potenziale biofouling. Queste verifiche, insieme a prove di portata e risposta termica, definiscono la finestra operativa sostenibile del sistema e riducono i rischi di decadimento prestazionale e di manutenzioni straordinarie. In ambiti vulcanici e costieri, l'attenzione è particolare: solfati elevati, cloruri da miscele marine, silice e acque sovrassature rispetto a carbonati possono generare fenomeni di scaling su scambiatori/pozzi; protocolli chimici e gestionali adeguati, insieme a scelte impiantistiche conservatrici (filtri, inibitori dove consentito, geometrie anti-intasamento), risultano necessari.

La **perforabilità** è un discriminante spesso sottovalutato, ma cruciale per i costi e la fattibilità. I livelli piroclastici sciolti e i riporti richiedono casing adeguato ad attraversare i primi metri; le lave massive e i calcari duri comportano tempi e costi superiori, ma garantiscono in cambio conduttività più elevate e stabilità del foro; argille e livelli fini impongono spesso miscele di grout con comportamento reologico e termico controllato per evitare risalite o segregazioni. In tutti i casi, la **tenuta idraulica** del foro rimane un requisito: isolare orizzonti a diversa qualità e piezometria evita scambi indesiderati e tutela la risorsa idrica sotterranea (VDI 4640; Floridia et al., 2022).

Questo quadro consente di proporre una **tipizzazione idro-termo-litologica** utile ai fini della microzonazione, che collega litologia/struttura, proprietà termo-idrauliche e ricadute impiantistiche. La rappresentazione matrice-sintesi aiuta a tradurre la geologia in regole progettuali e decisionali.

Tabella 7. Tipizzazione idro-termo-litologica e ricadute impiantistiche a scala shallow in Sicilia

Dominio/litologia prevalente	Proprietà termo-fisiche (qualitativo)	Idrostratigrafia (qualitativo)	Implicazioni GSHP (closed loop)	Implicazioni GWHP/UTES
Lave basaltiche massicce/colonnari (Etna, Eolie)	Conducibilità medio-alta; calore volumetrico medio	Fratturazione diffusa; falde locali su livelli alterati	Buona resa per metro di sonda; attenzione a stabilità foro	Open-loop possibile dove la fratturazione alimenta portate stabili; UTES BTES favorevole
Piroclastiti/tufi (variamente alterati)	Conducibilità bassa-media (↑ se saturi)	Acquiferi discontinui; livelli semiconfinati	Profondità totali maggiori; grout ad hoc	Open-loop da verificare puntualmente; ATES locale se livelli sabbiosi
Calcari/dolomie fratturati (Madonie, Nebrodi, Peloritani)	Conducibilità medio-alta	Acquiferi carsici/locali ad alta variabilità	Ottima resa in presenza di saturazione	Open-loop con controllo interferenze; rischio turbolenze/scarichi
Clastiti costiere (sabbie/ghiaie)	Conducibilità medio-alta se saturi	Acquiferi costieri continui	Campi compatti efficaci	Open-loop favorevole ma attenzione a intrusione salina
Argille/limi (bacini interni)	Conducibilità bassa	Acquiferi modesti/discontinui	Profondità totali elevate a pari carico	Open-loop poco conveniente; BTES come accumulo

La traduzione cartografica di questa tipizzazione si appoggia a geologie aggiornate e a modelli termici 3D di riferimento per la regione: l'informazione termica profonda supporta il contesto, ma ai fini shallow contano soprattutto i primi orizzonti, come confermato da studi regionali che integrano assetto crostale, facies e proprietà termo-fisiche (Floridia et al., 2022). In ambito eoliano, applicazioni pilota mostrano che la microzonazione che combina indicatori geomorfologici e idrostratigrafici è in grado di distinguere ambiti di **alta**, **media** e **bassa** idoneità per GSHP e per forme di accumulo stagionale, con ricadute pratiche sul disegno dei campi e sulle profondità consigliate (Floridia and Viccaro, 2019).

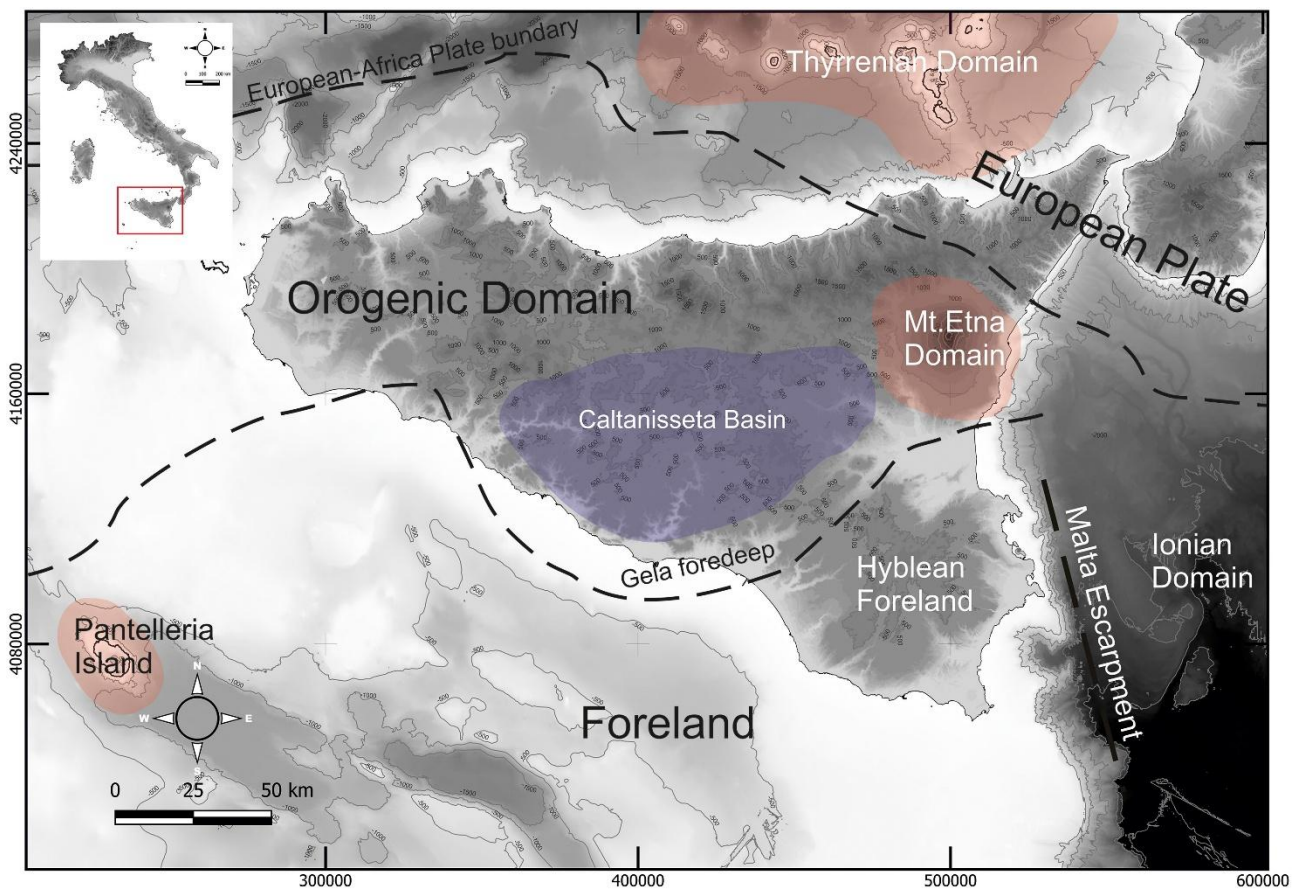


Figura 2. Topografia del DTM Sicilia (risoluzione 2 m) e batimetria del Progetto EmodNet per tutta la Sicilia. Coordinate sono in EPSG:32633 – WGS84/UTM zona 33 N. (Credits Floridia et al. 2022)

In termini autorizzativi e di gestione, il quadro idrogeologico impone alcune cautele generali. In presenza di **falde costiere**, l'analisi di **vulnerabilità all'intrusione** e la definizione di **zone di rispetto** per prelievo e reiniezione evitano effetti cumulativi; nelle **aree urbane** ad alta densità di impianti, la **distanza** tra sistemi e la verifica di **interferenze termiche** mediante modelli semplificati o strumenti numerici diventano standard di progetto; nei contesti

vulcanici, la progettazione si allinea agli elementi strutturali e, dove necessario, limita le profondità e adotta grouting a conducibilità controllata per prevenire dissipazioni e preservare gli equilibri idrici (Floridia et al., 2022; Casasso and Sethi, 2019).

Nel loro insieme, questi elementi rendono il quadro geologico vulcanico e idrogeologico un dispositivo operativo: dalle carte litostratigrafiche e strutturali si passa a **mappe di idoneità** che pesano conducibilità, saturazione, fratturazione, perforabilità, qualità delle acque e vincoli; da qui discendono **regole** di scelta tecnologia (closed/open/UTES), **profondità consigliate**, **interassi** e **criteri** per distanze minime, ΔT di esercizio e protocolli di monitoraggio. Le scelte sono ancorate a evidenze regionali e a esperienze insulari comparabili, in particolare nei sistemi eoliani, dove la combinazione di indicatori geomorfologici e idrogeologici ha mostrato di supportare decisioni affidabili per la geotermia a bassa entalpia (Floridia and Viccaro, 2019; Floridia et al., 2022; Apollaro et al., 2012).

2.3. Modello geologico di diffusione del calore

La stima della propagazione termica nel sottosuolo che interessa gli impianti geotermici superficiali richiede un modello concettuale capace di collegare, in modo coerente, le proprietà dei materiali nei primi 100–200 m, le condizioni idrogeologiche locali e i profili di carico termico stagionali delle utenze. L'obiettivo non è riprodurre ogni dettaglio del sottosuolo, ma rappresentare con sufficiente fedeltà i meccanismi dominanti ai fini della progettazione e della microzonazione: conduzione nel mezzo geologico, advezione laddove sia presente circolazione di falda, risposte transitorie ai cicli di carico e condizioni al contorno rilevanti (parete del foro, superficie, campo lontano). In Sicilia, la stratificazione litologica, la variabilità dei gradi di alterazione nei domini vulcanici e la presenza di acquiferi clastici costieri impongono di parametrizzare in modo esplicito la conducibilità termica (λ), il calore volumetrico ($\rho \cdot c$) e, dove significativo, il campo di velocità di falda (v), alla luce del quadro regionale e dei dati locali (Floridia et al., 2022; Casasso and Sethi, 2016).

Il cuore fisico è descritto, nella forma più elementare, dall'equazione del calore:

$$\partial T / \partial t = \kappa \nabla^2 T + QV / (\rho \cdot c)$$

in cui T è la temperatura, t il tempo, $\kappa = \lambda / (\rho \cdot c)$ la diffusività termica e QV un'eventuale sorgente/pozzo volumetrico associata a scambi diffusi (ad esempio in BTES molto densi). In presenza di falda con velocità significativa, il termine advettivo introduce la convezione forzata:

$$\partial T / \partial t + v \cdot \nabla T = \kappa \nabla^2 T$$

La rilevanza pratica dell'advezione può essere discussa tramite il numero di Péclet ($Pe = v \cdot L / \alpha$), con L scala caratteristica (raggio del pennacchio o interasse) e α diffusività termica: valori $Pe \gg 1$ indicano dominanza advettiva e rapida traslazione del pennacchio termico, mentre $Pe \ll 1$ implicano comportamento prevalentemente diffusive (Piga et al., 2017; Casasso and Sethi, 2019). In molte aree siciliane, il regime resta conduttivo o debolmente advettivo nei terreni fini e piroclastici alterati; al contrario, in clastiti costiere sature o in carbonati fratturati può emergere una componente convettiva sufficiente a modificare la resa di scambio e la distribuzione spaziale dei ΔT (Floridia and Viccaro, 2019; Casasso and Sethi, 2019).

Variabili principali e condizioni al contorno

A scala di singolo foro geotermico (BHE), il comportamento termico si rappresenta con un modello di sorgente lineare in mezzo semi-infinito, in cui la parete del foro scambia calore con il terreno attraverso una resistenza termica di foro (R_b) che accorpa la geometria delle sonde, il grout e la convezione interna del fluido. Le condizioni al contorno tipiche sono: (i) flusso termico prescritto (Neumann) alla parete del foro in funzione del carico istantaneo; (ii) temperatura indisturbata (Dirichlet) a distanza grande rispetto al campo; (iii) superficie con scambio convettivo/periodico che introduce modulazioni stagionali. La stima di R_b e della coppia ($\lambda, \rho \cdot c$) locale si affida a test specifici (TRT) e a misure/laboratorio, oltre che a letteratura e proxy litologici (VDI 4640; Dalla Santa et al., 2020; Floridia et al., 2022).

A scala di campo sonde (10–100 m), la sovrapposizione degli effetti tra fori (principio di sovrapposizione lineare) impone di stimare distanze e interassi per contenere le interferenze termiche e il drift stagionale; la presenza di falda può introdurre anomalia asimmetrica del pennacchio, con benefici o penalità a seconda della direzione del flusso rispetto all'orientamento del campo. In configurazioni BTES, i cicli carica/scarica devono rispettare limiti di ΔT di terreno al contorno e mantenere una energia residua compatibile con le funzioni ecosistemiche del suolo (Midttømme and Banks, 2008; VDI 4640). A scala di quartiere (100–1000 m), infine, la combinazione di più campi e/o schemi open-loop richiede un controllo di interferenze e coerenza dei ΔT con le regole di protezione degli acquiferi (Casasso and Sethi, 2019).

Ipotesi semplificative e loro portata

Per consentire un uso scalabile del modello nella microzonazione, si adottano alcune ipotesi standard e si esplicita la loro portata:

- Omogeneità e isotropia effettive del mezzo per orizzonti litotecnici dominanti: valida per scale $\geq$ interasse del campo e per tempi $\geq$ stagionali; si accetta un errore locale che viene assorbito nelle tarature TRT e nella fattorizzazione della R_b (Dalla Santa et al., 2020).
- Mezzo semi-infinito con T_0 indisturbata costante: adeguato a campi con profondità $\leq 150\text{--}200$ m e distanze sufficienti dai bordi termici (superficie/contatti litologici); la deroga è gestita con correzioni per superficie periodica e layering dove i dati lo consentono (VDI 4640).
- Carichi quasi-periodici con decomposizione in base-load + peak-load: consente di utilizzare funzioni di risposta (g-functions) o curve di progetto equivalenti per integrare i carichi lungo la stagione; eventuali squilibri sono gestiti da cicli BTES o da mix tecnologia (Midttømme and Banks, 2008).
- Advezione trascurabile salvo indicatori idrogeologici positivi (portate, gradienti, Pe): in caso contrario, si introduce un termine di drift che «trascina» il pennacchio e modifica il criterio di interasse/posizione relativi ai carichi (Casasso and Sethi, 2019).

Queste ipotesi consentono un predimensionamento affidabile per la maggior parte dei casi shallow siciliani, rinviando alle tarature locali di sito (TRT, prove di pompaggio) la rifinitura dei parametri.

Collegamento con il predimensionamento

Il predimensionamento richiede di trasformare i carichi mensili/settimanali in potenze specifiche e lunghezze equivalenti. Con un modello sorgente lineare, si procede a: (i) derivare la potenza specifica per metro $P'(t)$ in funzione del profilo orario/stagionale; (ii) integrare gli effetti nel tempo con funzioni di risposta del terreno (g-functions) per stimare il ΔT parete-fluido ammissibile; (iii) calcolare la lunghezza totale L_T e il numero di fori N per rispettare ΔT_{lim} e interassi minimi; (iv) verificare il drift stagionale e pluriennale e, se necessario, prevedere BTES/UTES per il bilancio energetico annuale (VDI 4640; Dalla Santa et al., 2020; Midttømme and Banks, 2008). La R_b diviene il punto di manovra progettuale: grout a conducibilità elevata e geometrie di sonda ottimizzate riducono ΔT parete-fluido e, quindi, L_T a parità di carico (Viccaro, 2018; Floridia et al., 2022).

Per sistemi open-loop (GWHP), il predimensionamento ruota su portate Q , ΔT acqua e rendimento del ciclo di pompa di calore; la sostenibilità richiede che $\Delta T_{restituzione}$ e gradiente termico imposto restino entro limiti di tutela dell'acquifero, con verifica di

tracciamento termico e tempi di breakthrough in doppietti/pozzi multipli (Casasso and Sethi, 2019; Apollaro et al., 2024).

Validazione e robustezza a scala di progetto e di territorio

A scala di sito, la validazione procede con TRT per estrarre λ_{eff} e R_b , log geofisici/stratigrafici, misure piezometriche e, nei casi open-loop, prove a portata con traccianti/termometria per caratterizzare dispersione e tempi di scambio. A scala di territorio, la robustezza del modello si garantisce con sensibilità dei parametri chiave (λ , $\rho \cdot c$, R_b , interassi, presenza falda) e con confronto contro casi di studio regionali (Salina, aree etnee) e contro l'informazione termica 3D disponibile (Floridia et al., 2022; Floridia and Viccaro, 2019). La coerenza fra risultati numerici e indicatori della microzonazione (classi di conducibilità, potenziale ATES/BTES, rischio interferenze) è il criterio per giudicare la tenuta del processo.

Output attesi e integrazione nel GeoDatabase

Gli esiti del modello si traducano in layer e regole operative che entrano nel GeoDatabase regionale:

- Mappe di potenza specifica installabile (W/m) per classi litologiche/idrostratigrafiche a standard di R_b fissato, e per scenari con/ senza falda attiva.
- Mappe di drift termico atteso e di interferenze in funzione della densità di campi e degli interassi minimi raggiungibili.
- Aree con potenziale BTES/ATES (bilanci stagionali favorevoli, falda continua, vincoli ΔT) e relative regole di esercizio.
- Schede sito con parametri predimensionati (λ , $\rho \cdot c$, R_b , L_T , N , interassi consigliati) e checklist autorizzative (ΔT , distanze, qualità acque per open-loop).

Questi prodotti sono direttamente consumabili dall'analisi MCDA del capitolo successivo e, soprattutto, abilitano confronti trasparenti fra alternative tecnologiche a parità di requisiti di comfort ed energia. Questo impianto concettuale, ancorato al quadro geologico siciliano e alle pratiche di dimensionamento e gestione riconosciute, fornisce la base per integrare la diffusione del calore nel processo di microzonazione e per guidare scelte progettuali proporzionate ai contesti (Floridia et al., 2022; VDI 4640; Casasso and Sethi, 2016; Midttømme and Banks, 2008; Viccaro, 2018).

Tabella 8. Variabili del modello, origine dati e impatto su progettazione e microzonazione

Variabile	Simbolo/Unità	Origine dati (GeoDB/sito)	Ruolo nel modello	Impatto su progettazione/microzonazione
Conducibilità termica	λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	Litologia (GeoDB), TRT/lab (sito)	Diffusione del calore ($\kappa=\lambda/\rho c$)	Potenza specifica per metro; profondità totale
Calore volumetrico	$\rho\cdot c$ [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$]	Litologia (GeoDB), lab (sito)	Inerzia termica, κ	Tempo di risposta; smorzamento picchi
Resistenza termica di foro	R_b [$\text{K}\cdot\text{m}\cdot\text{W}^{-1}$]	Progetto/materiali, TRT	ΔT parete-fluido	Riduzione L_T con grout/sonde ottimizzate
Velocità di falda	v [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	Idrogeologia (GeoDB), prove a portata	Termine advettivo	Pennacchi asimmetrici; interassi/distanze
Profondità e interassi	L, s [m]	Progetto/cantierabilità	Geometria campo	Interferenze; drift stagionale
ΔT di esercizio	ΔT [K]	Standard/regole, progetto	BC su parete/pozzi	Limiti su scambio, tutela acquiferi
Portata (GWHP)	Q [$\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$]	Prove a portata	Trasporto termico	ΔT restituzione; breakthrough
Bilancio stagionale	–	Carichi energetici	Cicli BTES/ATES	Stabilità di lungo periodo

3. LA MICROZONAZIONE GEOTERMICA E LA MULTI-CRITERIA DECISION ANALYSIS (MCDA)

La microzonazione geotermica costituisce il ponte operativo tra la conoscenza geologico-idrogeologica del territorio e le scelte d'investimento per usi termici efficienti e sostenibili. L'obiettivo è trasformare un mosaico eterogeneo di dati (litologie, parametri termofisici, profondità e dinamica delle falde, vincoli ambientali e d'uso del suolo, domanda locale di calore/freddo, cantierabilità) in mappe di idoneità e priorità che siano trasparenti, riproducibili e direttamente utilizzabili da amministrazioni e operatori. In questa prospettiva, le tecniche GIS (Geographic Information Systems) forniscono l'infrastruttura per l'integrazione spaziale, mentre la MCDA (Multi-Criteria Decision Analysis) rende esplicite le preferenze, la pesatura dei fattori e la loro aggregazione in indicatori sintetici utilizzabili per il confronto tra alternative e scenari (Malczewski, 1999; Eastman, 2009).

Il capitolo introduce un metodo coerente e verificabile per costruire mappe di idoneità geotermica a scala regionale e locale, con particolare attenzione alla Sicilia quale caso di studio. In primo luogo si inquadra il problema decisionale (obiettivi, vincoli, stakeholder e domini informativi); quindi si definisce un set di indicatori, si specificano le funzioni di valore e le regole di normalizzazione, si scelgono i metodi di pesatura, e si stabiliscono gli operatori di aggregazione (compensatori e non). Il risultato è un punteggio continuo per cella/sito, successivamente tradotto in classi operative (ad esempio: «non idoneo», «idoneo con vincoli», «idoneo», «prioritario») con criteri espliciti e auditabili. A valle, un pacchetto di analisi di sensibilità e incertezza quantifica la robustezza dei risultati. Il capitolo si chiude con i requisiti di trasparenza, tracciabilità e audit necessari a garantire riproducibilità, confronto tra scenari e aggiornabilità periodica del quadro informativo.

Il metodo qui proposto recepisce e integra gli approcci consolidati per la valutazione del potenziale geotermico «shallow» (ad es. il filone G.POT per la componente conduttiva) e gli strumenti di decision support sviluppati in ambito GIS, adattandoli alle specificità geologico-ambientali e regolatorie del contesto italiano e siciliano (Casasso & Sethi, 2016; Casasso et al., 2017; ENEA, 2024; DM 30/09/2022). La logica è modulare: gli stessi mattoni (indicatori, pesi, funzioni di valore) possono essere ricalibrati per sottosistemi tecnologici (closed loop, open loop, UTES) e per scenari di policy differenti (ad es. maggiore cautela in aree vulnerabili o priorità alla decarbonizzazione degli edifici pubblici).

3.1. La MCDA e la microzonazione

La valutazione multicriteriale integra, in un unico quadro decisionale, i layer informativi geologici, idrogeologici, ambientali e di domanda energetica per produrre mappe di idoneità che siano trasparenti e riproducibili. Il processo prende avvio dalla definizione degli obiettivi (incremento della quota di calore rinnovabile, tutela quantitativa e qualitativa della risorsa idrica), prosegue con l'individuazione dei vincoli inderogabili e dei fattori che incidono in modo graduato sull'idoneità, e si ancora a regole di tracciabilità dei dati e di audit dell'intero flusso di lavoro.

I dataset sono armonizzati in fase di ETL e sottoposti a controlli di qualità (completezza, accuratezza posizionale e tematica, coerenza di scala e unità). Gli indicatori sono poi trasformati mediante funzioni di valore su metrica comune $[0,1]$, scegliendo forme crescenti/decrescenti o a plateau in base alla loro natura fisica (beneficio, costo, ottimo intermedio). La pesatura ricorre a metodi complementari: un'impostazione partecipata (AHP) che garantisce coerenza e documentazione dei giudizi; una baseline semplice (ROC) che riduce l'onere valutativo; una misura «dal basso» (entropia) che esprime la quantità di informazione effettivamente contenuta dai dati. La convergenza dei tre approcci costituisce la base per gli esercizi di sensibilità.

L'aggregazione dei punteggi normalizzati avviene in prima istanza con una combinazione lineare pesata (WLC), chiara e implementabile in GIS; ove serva modulare il grado di compensazione tra indicatori si applicano operatori OWA, costruendo scenari più «cautelativi» (bassa ORness) o più «espansivi» (alta ORness). Per la comparazione puntuale tra siti in rosa ristretta si usano metodi distance-to-ideal (es. TOPSIS) come verifica indipendente dell'ordinamento. Il risultato continuo è tradotto in poche classi operative attraverso soglie esplicite (Jenks, quantili o soglie normative), mantenendo in parallelo maschere *no-go* sui vincoli inderogabili.

In termini operativi, l'impostazione OWA a bassa ORness è preferibile quando si lavora in contesti sensibili — ad esempio acquiferi ad alta vulnerabilità, litorali con rischio di intrusione salina, aree urbane dense con sottoservizi fitti — perché limita la compensazione fra indicatori favorevoli e criticità locali e rende più prudente l'idoneità finale. Viceversa, un'OWA con ORness elevata o una WLC «piena» è funzionale a programmi di espansione in ambiti infrastrutturati e tecnicamente favorevoli (sottosuoli omogenei, falda profonda e stabile, domanda concentrata),

dove l'obiettivo è selezionare opportunità senza sovra-penalizzare singole debolezze. La scelta del grado di compensazione, documentata nell'audit dei parametri, diventa parte integrante del messaggio politico-amministrativo associato alle mappe, evitando letture tecnicistiche scollegate dal contesto.

La traduzione in classi operative, a valle del punteggio continuo, richiede coerenza tra finalità e criterio di soglia. Quando si intende mettere in evidenza «nuclei» realmente omogenei, la suddivisione naturale (Jenks) aiuta a esaltare contrasti strutturali del territorio; quando prevalgono esigenze di equità territoriale o di programmazione per quote, è più utile la ripartizione in quantili, che distribuisce in maniera bilanciata le aree nelle classi. Se sono presenti soglie regolatorie (esclusioni ambientali, distanze minime da tutele, limiti di ΔT o profondità) queste diventano regole di appartenenza: non sostituiscono la classificazione, ma la «forgiano» introducendo classi di idoneità condizionata. In cartografia, la legenda narrativa accompagna il colore con enunciati chiari («idoneo con cautela in presenza di...», «non idoneo per vincoli inderogabili»), facilitando l'uso amministrativo del prodotto.

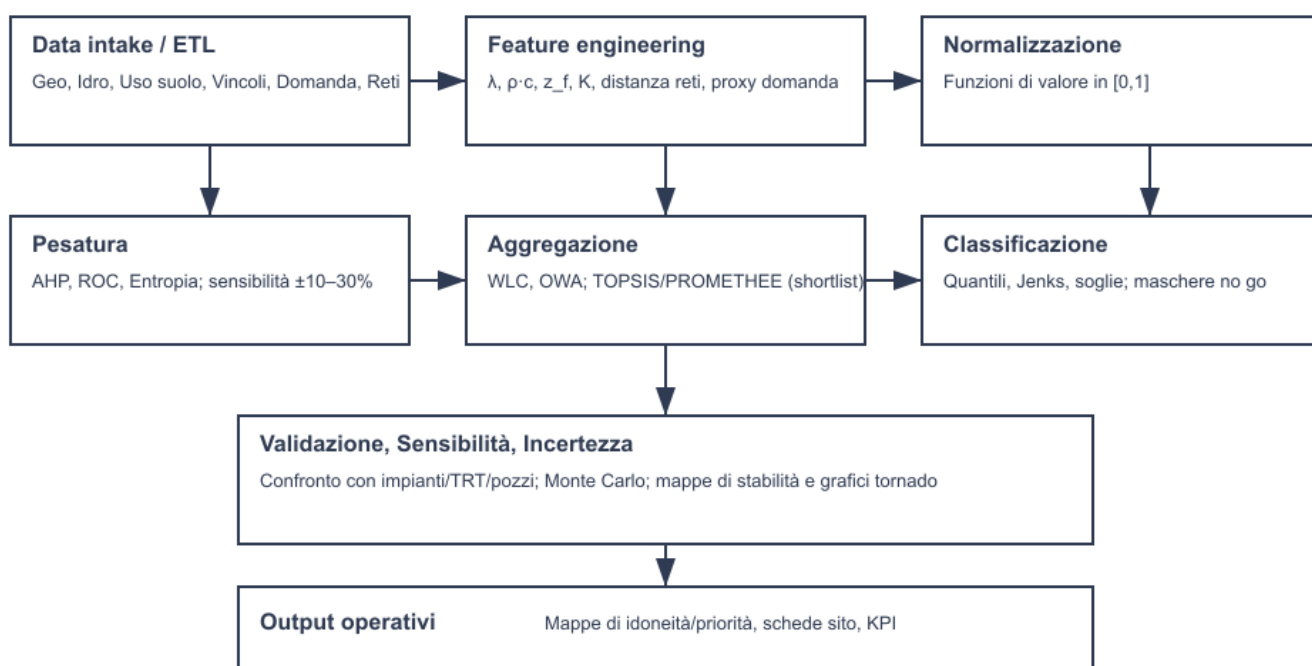


Figura 3. Flusso di processo dalla raccolta dati al calcolo degli indici di idoneità e alla generazione delle mappe di priorità, con evidenza di normalizzazione, pesatura, aggregazione, classificazione e validazione.

Tabella 9. Fasi della pipeline GIS MCDA e output attesi

Fase	Input principali	Operazioni	Output	Note operative
Data intake/ETL	Carte geol./idrogeol., uso suolo, vincoli, domanda, reti	Reproject, resample, controlli QA/QC, unità	GeoDB armonizzato	Metadati OGC/INSPIRE, domini/topologie
Feature engineering	GeoDB armonizzato	Indicatori λ , $\rho \cdot c$, z_f , K , domanda, distanza reti, vincoli	Raster indicatori 0–1 (pre-norm.)	Documentazione formule (map algebra)
Normalizzazione	Indicatori grezzi	Funzioni di valore (lin./sigm./plateau)	Indicatori normalizzati [0,1]	Parametri pubblici e motivati
Pesatura	Indicatori normalizzati	AHP/ROC/Entropia; sensibilità ± 10 –30%	Vettore pesi e scenari	CR<0,1 per AHP
Aggregazione	Indicatori + pesi	WLC/OWA; TOPSIS su shortlist	Punteggio continuo S	Penalità/maschere per vincoli inderogabili
Classificazione	Raster S	Quantili/Jenks/soglie	Classi operative	Legenda narrativa, <i>no-go</i>
Validazione	Mappe/classi; KPI	Confronto con impianti/TRT/pozzi; Monte Carlo	Mappe di stabilità e <i>tornado</i>	Report robustezza e incertezza

La qualità del prodotto cartografico è verificata mediante validazione con evidenze indipendenti (impianti esistenti, test di risposta termica, osservazioni piezometriche) e con un pacchetto di analisi di sensibilità e incertezza che quantifica la stabilità del rango e la probabilità di cambiamento di classe. Tutte le scelte (dalle funzioni di valore ai parametri di classificazione) sono documentate in un registro di audit che consente la ripetibilità del calcolo e il confronto tra scenari territoriali.

Tabella 10. Struttura minima del MCDA Audit Record

Sezione	Contenuti minimi	Formato
Dati e fonti	Origine, versione, licenza, scala/accuratezza	YAML/CSV
ETL/Pre-processing	Regole di <i>resampling/snap</i> , unità, domini/topologie	Markdown + script
Indicatori	Definizione, formula, unità, <i>value function</i>	Markdown + JSON parametri
Pesi	Metodo, matrici AHP, CR, ROC, Entropia	CSV + immagini
Aggregazione	Formula (WLC/OWA), ORness, penalità	Markdown
Classificazione	Schema e soglie, maschere <i>no-go</i>	Markdown
Validazione	Dataset indipendenti, KPI, grafici <i>tornado</i>	PDF/PNG
Sensibilità/MC	Range, n-run, criteri di stabilità	YAML + CSV
Output	Rasters/tables con metadati, checksum	GeoTIFF/CSV
Versionamento	ID run, timestamp, autore, changelog	Markdown

Un ciclo di versionamento leggero, centrato su identificativi di *run*, timestamp e changelog sintetici, consente di collegare ogni mappa prodotta alle scelte che l'hanno generata. I metadati minimi — fonte, licenza, scala, accuratezza, regole di ETL, parametri delle funzioni di valore, pesi, operatori di aggregazione e schema di classificazione — rendono l'intero sistema *update-ready*: all'arrivo di un nuovo dato o di una revisione normativa si può rilanciare il calcolo

mantenendo la piena tracciabilità delle differenze. La stessa struttura di audit, richiamata in Tabella 10, è pensata per favorire il confronto fra scenari e periodi, e per abilitare verifiche indipendenti da parte di amministrazioni e terzi.

3.1.1. Indicatori termici/termofisici

Gli indicatori termici delineano la capacità del sottosuolo di trasferire e immagazzinare calore e, quindi, il margine tecnico con cui diverse soluzioni tecnologiche possono operare in modo affidabile. La conducibilità termica dell'ammasso roccioso governa il flusso conduttivo intorno ai campi sonde e cresce con la saturazione, la densità e il contenuto di quarzo: in termini operativi, terreni fini poco cementati tendono a collocarsi su valori più bassi, mentre litotipi sabbiosi saturi, arenacei e calcarei mostrano intervalli più elevati. La capacità termica volumetrica determina l'inerzia dello scambio: valori maggiori attenuano le oscillazioni di temperatura e sostengono cicli stagionali più profondi, qualità particolarmente ricercata negli accumuli sotterranei (BTES/UTES). La diffusività, derivata dal rapporto tra conducibilità e capacità, informa sulla rapidità con cui la perturbazione termica si propaga.

La temperatura indisturbata del terreno e il gradiente geotermico riflettono il contesto climatico e tettonico. In Sicilia, la prossimità a province vulcaniche e le condizioni costiere possono elevare la temperatura a bassa profondità rispetto alla media nazionale, con effetti favorevoli su COP/SCOP e sulla profondità utile di progetto. Il flusso di calore fornisce un controllo di coerenza a scala regionale, mentre la resistenza termica del pozzo sintetizza l'effetto della geometria, dei materiali di riempimento e della configurazione delle sonde: è un parametro di tipo «costo», poiché valori elevati penalizzano la resa per metro di perforazione. La profondità utile perforabile dipende da aspetti normativi, di sicurezza e di cantierabilità urbana; essa pone un limite concreto alla lunghezza complessiva di scambio e incide direttamente sui costi specifici. In presenza di dati misurati, i Thermal Response Test sostituiscono le stime litologiche e permettono la taratura locale dei parametri, riducendo l'incertezza.

Per l'integrazione in MCDA, ciascun indicatore è trasformato su metrica [0,1] mediante funzioni di valore coerenti con la fisica del fenomeno. La conducibilità e la capacità termica sono mappate con funzioni crescenti a saturazione, la resistenza del pozzo con funzione decrescente, mentre la profondità falda (nei sistemi a circuito chiuso) è descritta con una funzione a plateau, che premia intervalli ottimali e penalizza condizioni troppo superficiali o eccessivamente profonde. Le scelte parametriche sono motivate da letteratura e da misure disponibili e sono accompagnate da range di confidenza da impiegare nelle analisi Monte Carlo.

3.1.2. Indicatori idrogeologici/ambientali

Il quadro idrogeologico influenza in modo decisivo la fattibilità e l'affidabilità, soprattutto per le soluzioni a ciclo aperto. La profondità e lo spessore degli acquiferi definiscono i margini operativi e gli intervalli filtranti, mentre la conducibilità idraulica e la trasmissività controllano le portate sostenibili e i drawdown esperibili senza interferenze. Gradiente idraulico e direzione di flusso incidono sul rischio di *thermal recycling* nei sistemi a doppio pozzo, determinando distanze ottimali tra pozzi e configurazioni preferibili. La temperatura della falda e la sua variabilità stagionale condizionano i rendimenti stagionali, premiando contesti termicamente stabili. La qualità chimica – con particolare attenzione a salinità, ferro, manganese e torbidità – può costituire criterio *go/no-go* in presenza di rischi di incrostazioni o fouling.

Gli aspetti ambientali e territoriali agiscono come vincoli o penalità. Le aree protette, i buffer delle captazioni potabili e le salvaguardie idrogeologiche rappresentano esclusioni inderogabili; le classi di pericolosità idrogeologica e sismica modulano i livelli di cautela progettuale; l'uso del suolo e la densità di sottoservizi informano sulla cantierabilità e sulla prevedibile incidenza dei costi in ambito urbano. Nei litorali, il rischio di intrusione salina richiede valutazioni specifiche per gli impianti a ciclo aperto.

In fase di modellazione, gli indicatori idrogeologici sono normalizzati su scala [0,1] con trasformazioni coerenti (logaritmiche per K, soglie progettuali per la trasmissività, funzioni decrescenti per gradienti elevati), mentre i vincoli ambientali sono rappresentati come maschere *no-go* o come funzioni di penalità in base alla distanza dai confini di tutela. L'assegnazione dei pesi riflette il contesto applicativo: gli indicatori idrogeologici assumono maggiore importanza per sistemi open-loop e in aree costiere, mentre, nei circuiti chiusi, prevalgono parametri termo-fisici e fattori di cantierabilità.

3.1.3. Analisi di sensibilità e incertezza

La robustezza delle mappe viene saggiata variando sistematicamente i pesi, le funzioni di valore e gli schemi di classificazione. Un piano di esperimenti con variazioni controllate sui pesi (ad esempio $\pm 10\text{--}30\%$) consente di misurare la stabilità del rango per cella e il tasso di passaggio tra classi operative; i risultati sono sintetizzati con mappe di stabilità e rappresentazioni «tornado» sui siti candidati. La propagazione dell'incertezza dei dati d'ingresso si affronta con simulazioni Monte Carlo, associando distribuzioni plausibili ai parametri (conducibilità, capacità, resistenza del pozzo, conducibilità idraulica, ecc.) e calcolando, per ogni cella, media,

deviazione standard e intervalli di confidenza dell'indice di idoneità. In parallelo, scenari discreti (cautelativo, mediano, espansivo) aiutano a comunicare in modo chiaro le implicazioni decisionali. La validazione incrociata con impianti reali, test termici e osservazioni idrogeologiche costituisce la verifica esterna della qualità del modello.

Per evitare un uso «deterministico» delle classi, le tavole cartografiche affiancano alla mappa di idoneità una mappa di stabilità (quota di *run* in cui la cella conserva la classe) e una sintesi per celle dei relativi intervalli di confidenza. La legenda esplicita messaggi chiave — ad esempio quando un'area è «idonea ma sensibile ai pesi idrogeologici» oppure «non idonea con bassa incertezza» — così da indirizzare istruttorie e priorità. Nei report, una nota metodologica standard descrive la natura delle distribuzioni usate in Monte Carlo e i criteri di arresto, ancorando la comunicazione del rischio decisionale a convenzioni riproducibili.

3.2. Classi di contesto geotermico per usi termici

La classificazione in classi di contesto nasce dall'esigenza di collegare in modo operativo la varietà geologica e idrogeologica siciliana a soluzioni tecnologiche e criteri di esercizio realmente praticabili, evitando una lettura esclusivamente «fisica» del sottosuolo e integrando domande d'uso, vincoli e cantierabilità. L'obiettivo non è semplicemente ordinare il territorio per «potenziale», ma fornire a decisori e progettisti una grammatica condivisa per riconoscere rapidamente opportunità e criticità: in quali domini litostratigrafici conviene puntare su campi sonde verticali (BTES/GSHP), dove gli open-loop su falda (GWHP) sono sostenibili, e in quali ambiti le soluzioni di accumulo stagionale in sotterraneo (UTES) possono bilanciare domanda e risorsa. L'impostazione è coerente con gli studi termici 3D più recenti sulla Sicilia e con l'esperienza maturata su terreni vulcanici delle Eolie e dell'Etna, che evidenziano eterogeneità locali nella distribuzione delle proprietà termofisiche e del campo termico superficiale utili a definire classi applicative distinte (Floridia & Viccaro, 2019; Floridia et al., 2022).

L'assegnazione a una classe non dipende da un singolo indicatore, ma da insiemi coerenti di condizioni: litologia/struttura (e.g., basalti fratturati, piroclastiti alterate, calcari carsici, alluvioni costiere), idrostratigrafia (presenza, spessore e continuità di acquiferi), parametri termici (λ , $\rho \cdot c$, diffusività), sensibilità ambientale (vulnerabilità a contaminazione o intrusione salina), vincoli e domanda locale. La «regola di appartenenza» è deliberatamente logica, non numerica: il dettaglio quantitativo è trattato nei modelli e nelle funzioni di valore (§3.1), mentre qui vengono fissate le invarianti per l'uso amministrativo e progettuale. In generale, domini con roccia coerente, buona saturazione e conducibilità medio-alta favoriscono rese specifiche

elevate per metro di perforazione in closed-loop; domini con acquiferi continui e K sufficiente abilitano configurazioni open-loop e ATEs; domini a bassa conducibilità o con eterogeneità molto marcata richiedono strategie di compensazione (campi più densi, sonde ottimizzate, grout ad alta λ) e/o funzioni di servizio dedicate (accumulo termico) (VDI 4640; Dalla Santa et al., 2020; Viesi et al., 2018).

Nei domini vulcanici (lave basaltiche massive o colonnari, coperture piroclastiche alterate) si osservano combinazioni differenti: i basalti coerenti e fratturati, spesso con livelli alterati saturi, offrono rese per metro competitive per GSHP; le piroclastiti eterogenee richiedono maggiore cura su perforazione e grouting e beneficiano di campi con interassi ottimizzati; in entrambi i casi la prossimità a aree di gradiente termico locale può incrementare il margine operativo in raffrescamento estivo (Floridia & Viccaro, 2019). Nei domini carbonatici, la fratturazione/carsismo introduce variabilità: ottime rese in closed-loop in presenza di saturazione; per open-loop serve controllo delle interferenze e della qualità chimica, con attenzione a incrostazioni e torbidità. I domini clastici costieri (sabbie e ghiaie) sono favorevoli ai GWHP, ma la gestione dell'intrusione salina e delle restituzioni termiche richiede distanze e assetti congrui; i bacini argillosi interni, pur penalizzati da bassa λ , possono ospitare BTES «lenti» utili per profili con forte sbilanciamento stagionale (Midttømme & Banks, 2008; Piga et al., 2017; Casasso & Sethi, 2019).

Una lettura territoriale per quadri coerenti aiuta a fissare esempi concreti. L'Etna e i suoi fianchi rappresentano un laboratorio per le classi A/B: colate laviche con fratturazione diffusa, coperture piroclastiche e livelli alterati a saturazione parziale definiscono un mosaico che, a scala comunale, suggerisce GSHP come opzione prevalente con rese per metro tendenzialmente buone e, localmente, opportunità di campi BTES per utenze con forte raffrescamento (campus, strutture ricettive) grazie alla combinazione tra inerzia termica e domanda estiva. Le isole Eolie, e in particolare Salina, mostrano accoppiamenti utili tra litologie vulcaniche e microclimi con carichi estivi marcati: anche qui GSHP e micro-BTES emergono come preferibili in prossimità degli abitati, mentre eventuali open-loop restano subordinati a portate e qualità d'acqua confermate (Floridia & Viccaro, 2019). Nei bacini costieri meridionali, come tra Gela e Licata, la continuità di livelli sabbiosi e la presenza di falde poco profonde orientano verso GWHP e, per utenze distrettuali, verso ATEs caldo/freddo, con presidio su intrusione salina e ΔT di restituzione. I domini carbonatici dei Peloritani-Madonie, con carsismo e sorgenti, richiedono valutazioni sito-specifiche: rese elevate in closed-loop in saturazione; open-loop possibili laddove le sorgenti non siano impattate e le portate siano sostenibili.

La tassonomia proposta è articolata in sei classi operative a valenza regionale e locale. Ogni classe è definita da (1) dominio geologico/idrostratigrafico prevalente, (2) profondità utile tipica e cantierabilità, (3) tecnologia/e preferibili e condizioni d'esercizio, (4) presidi e vincoli, (5) possibilità di transizione in presenza di condizioni «ponte» (ad es. variazione di profondità falda o di domanda). La legenda narrativa della mappa di classe riporta, per ciascun colore, una frase breve che orienta l'interpretazione amministrativa («idoneo per GSHP; GWHP solo con studio idrogeologico», «preferibile BTES; open-loop non raccomandato»), a cui si affiancano maschere no-go per esclusioni inderogabili.

Tabella 11. Classi di contesto geotermico per usi termici in Sicilia: regole di appartenenza e transizione

Classe	Dominio geo-idro	Profondità utile tipica e cantierabilità	Tecnologie e condizioni preferibili	Presidi/Vincoli	Regole di transizione
A — Vulcaniti coerenti fratturate (Etna/Eolie)	Lave basaltiche massicce/colonnari con fratturazione diffusa; livelli alterati saturi locali	80–150 m; perforabilità media, allineamenti regolari possibili	GSHP verticali con grout λ elevata; BTES per utenze con forte raffrescamento estivo	Verifica stabilità foro; controllo vibrazioni in aree sensibili; monitoraggio plume termico se falda presente	Se i livelli alterati sono continui e K sufficiente → valutare GWHP/ATES su scala di distretto (Floridia & Viccaro, 2019; VDI 4640)
B — Coperture piroclastiche/tufi eterogenei	Piroclastiti variamente alterate; acquiferi discontinui	70–130 m; perforabilità variabile; spine rigide/misure anti-collasso	GSHP con sonde ottimizzate e grout reologico/conduittivo; campi più densi	Controllo segregazione grout; protezione orizzonti potabili	In presenza di livelli sabbiosi continui a K adeguato → transizione verso C (open-loop puntuale) (Floridia & Viccaro, 2019; Dalla Santa et al., 2020)
C — Clastiti costiere (sabbie/ghiaie)	Depositi costieri/alluvionali; acquiferi	50–120 m; facile cantierabilità extra-urbana	GWHP a doppio pozzo; ATES caldo/freddo per	Gestione intrusione salina; distanze da	Se rischio intrusione elevato o vincoli stringenti → transizione a A/B in

3. La microzonazione geotermica e la Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA)

	liberi/semiconfinati continui		distretti e strutture ricettive	captazioni potabili; limiti ΔT restituzione	closed-loop (Piga et al., 2017; Casasso & Sethi, 2019)
D — Calcari/dolomie fratturati	Unità carbonatiche con carsismo variabile	80–200 m; perforabilità medio-alta	GSHP con alte rese per metro in saturazione; GWHP dove portate sono stabili	Controllo interferenze e qualità chimica; torbidità; protezione sorgenti	In assenza di continuità idrica → transizione a closed-loop con interassi aumentati (VDI 4640)
E — Bacini argillosi/limosi interni	Coperture fini; acquiferi modesti/discontinui	80–180 m; cantierabilità variabile	BTES come accumulo; GSHP con profondità maggiori o sonde coassiali	Limitata resa specifica; attenzione a consolidazione/risalite	In presenza di livelli sabbiosi intercalati → transizione a B/C per servizi localizzati (Midttømme & Banks, 2008)
F — Ambiti urbani ad alta densità di sottoservizi	Mosaico litologico; vincoli di spazio e sottoservizi	60–120 m; cantierabilità complessa	GSHP con campi compatti; scambiatori geostrutturali; micro-BTES	Coordinamento reti; rilievi GPR; riduzione interassi e profondità con grout/sonde ad alte prestazioni	Qualora si liberalizzino spazi/aree adiacenti → transizione a A/D con campi più ampi (VDI 4640; Viesi et al., 2018)

La mappa delle classi è costruita a partire da layer tematici certificati e da un set minimo di attributi per cella: litologia prevalente e stato di saturazione, presenza/continuità di acquifero e K stimata, profondità falda, vincoli ambientali no-go e buffer, indicatori di domanda (densità edilizia/terziario). L'assegnazione avviene con regole logiche ordinate: si escludono le aree no-go; si riserva la classe F alle celle urbane con densità di sottoservizi oltre soglia; si classificano A–E secondo dominanza geologica/idrica e indicatori termo-fisici; si applicano poi «regole di transizione» per aree di bordo (es. $F \leftrightarrow A/D$ in caso di liberazione spazi o vincendo vincoli, $C \leftrightarrow A/B$ in caso di intrusione salina emergente). Le classi sono derivate su griglia (es. 50×50 m) ma si leggono a scala amministrativa; le schede comunali riportano quota di superficie per classe, stima del carico termico compatibile e vincoli prevalenti.

L'impiego delle classi come interfaccia amministrativa comporta due vantaggi: 1) rende comprensibile ai non addetti ai lavori il perché di certe raccomandazioni («open-loop ammissibile solo con verifica K e bilancio idrico»; «preferibile BTES per sbilanciamento estivo»), e 2) permette di aggiornare con facilità la mappa al mutare di alcuni layer, senza dover ritarare l'intero modello. La coerenza con le evidenze bibliografiche e applicative supporta la trasferibilità in contesti mediterranei e insulari comparabili (Viesi et al., 2018; Casasso & Sethi, 2016).

Un secondo livello applicativo riguarda le «regole di esercizio per classe», che orientano il predimensionamento: per A/D è consentito assumere rese specifiche per metro nella fascia medio-alta del range regionale, con interassi maggiori in presenza di flussi di falda significativi; per B/E si raccomandano grout ad alta λ e sonde con geometrie ottimizzate (ad es. doppia U o coassiali) per contenere R_b e ridurre profondità complessive; per C si indicano distanze minime tra pozzi di prelievo/ricarica, verifiche di breakthrough termico e limiti ΔT di restituzione coerenti con normative e stato chimico del corpo idrico; per F si suggeriscono soluzioni geostrutturali (pali energetici, diaframmi) e campi compatti su corti e parcheggi, con cantieri a basso impatto e coordinamento accurato con gestori di sottoservizi (VDI 4640; Piga et al., 2017).

La connessione con la domanda locale chiude il cerchio: aree con alta densità di edifici pubblici e strutture turistico-ricettive privilegiano soluzioni reversibili con elevata efficienza stagionale (GSHP/UTES) e sistemi di accumulo per ridurre i picchi elettrici; aree residenziali diffuse con lotti piccoli richiedono campi compatti, geoscambiatori strutturali e ottimizzazione di grout/sonde per contenere profondità e interferenze; distretti industriali leggeri con carichi

continui si prestano a GWHP e ATEs a condizione di bilanci idrici e termici attentamente governati (ENEA RAEE 2024; DM 30/09/2022; UNI 11466/11467/11468).

3.3. Fonti dati e flusso ETL (disegno)

Il flusso ETL (Extract–Transform–Load) fornisce l’ossatura informativa della microzonazione. La qualità delle mappe di idoneità dipende dalla tracciabilità delle fonti, dall’armonizzazione di scale e sistemi di riferimento, e dalla coerenza semantica con cui gli attributi sono trasformati in indicatori. Le sorgenti prioritarie includono: carte geologiche e idrogeologiche ufficiali, inventari di pozzi/captazioni e stratigrafie, layer di uso/copertura del suolo e vincoli paesaggistici/ambientali, dataset climatici (HDD/CDD), reti e sottoservizi quando disponibili, oltre a misure in sito (TRT, prove di pompaggio, analisi chimico-fisiche). La pipeline è progettata per essere update-ready: nuovi dati entrano con versioni, metadati completi e controlli di qualità, rilanciando automaticamente le fasi di feature engineering, normalizzazione e aggregazione.

Sorgenti e tracciabilità. Ogni dataset è registrato con metadati minimi (fonte, data/versione, scala e accuratezza, licenza, SR/CRS), oltre ad attributi di qualità (completezza, accuratezza posizionale/tematica, consistenza, attualità). I riferimenti a standard OGC/INSPIRE e a buone pratiche nazionali assicurano interoperabilità e riuso nei servizi cartografici e applicativi; le scelte risultano in linea con gli approcci consolidati nella letteratura italiana su mappatura del potenziale geotermico e con l’architettura GIS delineata nei capitoli precedenti (Casasso & Sethi, 2016; Casasso & Sethi, 2017; ENEA RAEE 2024).

Trasformazioni e armonizzazione. I layer in ingresso sono omogeneizzati su una griglia di riferimento (ad es. 50×50 m) mediante resampling coerente con la scala del dato e proiezione comune (ad es. ETRS89/UTM33N per la Sicilia), con regole esplicite di snap-to-grid e di rasterizzazione per vettori. Le variabili numeriche sono controllate con regole esplicite: gestione di outlier (winsorizing), unit casting in SI, domain mapping per categorie (es. classi litologiche→ $\lambda/\rho\cdot c$), validazione topologica per vettori (no intersezioni improprie fra buffer e aree perforabili). Da carte geologiche e stratigrafie si derivano proxy termofisici (λ , $\rho\cdot c$) mediante tabelle di corrispondenza tarate su database e misure reperite in letteratura tecnica; da inventari di pozzi e da modelli idrogeologici si derivano profondità falda, K e trasmissività; da uso del suolo e destinazioni si ricavano indicatori di domanda e cantierabilità. Le regole di trasformazione sono versionate e pubbliche, rese disponibili come map algebra e notebook operativi (Casasso & Sethi, 2016; Viesi et al., 2018).

Controlli qualità. La pipeline adotta controlli QA/QC multilivello: schema validation (attributi obbligatori e domini), controlli di coerenza spaziale (snap a griglia, soglie di sliver per poligoni), verifiche di completezza per comune/zona, sense-check su range fisici degli indicatori (λ , $\rho \cdot c$, K, profondità utili) e cross-check fra sorgenti indipendenti (es. profondità falda da pozzi vs. mappe idrogeologiche). Le regole QA/QC sono allineate con il registro di audit del §3.1 e con il modello di versioning per assicurare riproducibilità e confronto tra run.

Caricamento e pubblicazione. Il caricamento nel GeoDatabase regionale segue una struttura coerente con i domini informativi: geologia/idrogeologia (raster di proprietà termiche, falde, K; vettori di pozzi, stratigrafie), vincoli e tutele (aree protette, buffer captazioni, pericolosità), domanda/cantierabilità (edificato, destinazioni d'uso, densità sottoservizi), parametri e risultati MCDA (indicatori normalizzati, pesi, punteggi, classi, mappe di stabilità). I servizi WMS/WFS sono pubblicati con stili e legende narrative standard, così che tavole e portali rendano immediatamente leggibili esiti e incertezze al pubblico tecnico-amministrativo. L'aggiornamento è differenziato per famiglia di dati: near-real-time per serie strumentali (pozzi spia, misure termiche), periodico per uso del suolo e domanda, «a evento» per nuove stratigrafie o deroghe/nuovi vincoli (Casasso & Sethi, 2016; ENEA RAEE 2024).

Ruoli e frequenze di aggiornamento. La responsabilità del dato va ancorata a ruoli chiari e a scadenze realistiche. Le tabelle sottostanti definiscono data owner, data steward, frequenza minima di aggiornamento e trigger che impongono un rilascio straordinario. La governance dei dati si raccorda con il registro di audit (Tabella 10) e con i servizi di pubblicazione.

Prassi specifiche per GWHP e aree costiere. Per i sistemi a ciclo aperto su acquiferi costieri, la pipeline integra moduli dedicati: stima del rischio di intrusione salina con indicatori proxy (rapporto $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$, conducibilità elettrica, trend pluriennali piezometrici), simulazione semplificata del plume termico per dimensionare distanze tra pozzi e per verificare il rispetto dei limiti ΔT in restituzione, logiche di allerta al superamento di soglie di qualità chimico-fisica. Tali controlli concorrono alla definizione di regole di appartenenza/condizionalità della classe C e alla predisposizione di schede prescrittive per l'istruttoria.

Tabella 12. Piano di aggiornamento, ruoli e controlli qualità per famiglia di dati

Famiglia di dati	Data owner	Data steward	Frequenza ordinaria	Trigger straordinari	QC minimi
Geologia e stratigrafie	Regione/Servizio Geologico; Università	Team GeoDB	A evento (nuove carte, nuove stratigrafie)	Pubblicazione di nuove mappe/pozzi, revisioni litostratigrafiche	CRS/scala coerenti; domini litologici; completezza attributi
Idrogeologia (falde, K, T)	Autorità di bacino/ARPA	Team GeoDB + Idro	Semestrale	Nuove campagne piezometriche; crisi siccità	Range K/T; coerenza tra pozzi e mappe; anomalie
Vincoli e tutele	Assessorati/Enti tutela	Team GeoDB	Trimestrale	Nuove aree protette; variazioni buffer captazioni	Geometrie topologicamente valide; no sovrapposizioni improprie
Uso suolo e domanda	Regione/ISTAT/ENEA	Team GeoDB + Energy	Annuale	Nuovi censimenti; variazioni grandi utenze	Coerenza destinazioni; indicatori HDD/CDD
Misure in sito (TRT, pozzi spia)	Comuni/Operatori/Università	Team Monitoraggio	Mensile/continuo	Installazione nuovi impianti o campagne	Validazione sensori; controlli drift; outlier
Parametri/risultati MCDA	Unit MCDA	Team GeoDB + MCDA	A ogni run	Modifica funzioni di valore/pesi; nuovi layer	Confronti differenze run; mappe di stabilità

Integrazione con portali e servizi. I layer pubblicati sono serviti attraverso endpoint stabili (WMS/WFS) con fogli di stile comuni, così che enti comunali e regionali possano embeddare mappe e tavole nei propri portali. Ogni servizio espone il changelog (data e ID di run) e i metadati essenziali; i pacchetti dati (GeoTIFF/GeoPackage) includono checksum e file README con istruzioni di utilizzo e contatti dei referenti. Un semplice sistema di ticketing (issue tracker) consente a enti e operatori di segnalare errori o proporre aggiornamenti, alimentando il ciclo di miglioramento continuo.

Versionamento e riproducibilità. Ogni esecuzione della pipeline genera un ID di run, un pacchetto di report QA/QC e un set di confronti con run precedenti (differenze spaziali, variazioni percentuali per classe e per comune, impatti sulla potenza stimata per tecnologia). Il principio di trasparenza è ribadito dalla disponibilità di notebook con parametri e funzioni di valore, da tabelle di pesi e da file di configurazione documentati. Ciò consente di isolare rapidamente l'effetto di nuove fonti o di revisioni parametriche, facilitando valutazioni di sensibilità lato dati e lato modello e assicurando un dialogo informato con gli stakeholder.

Dalla pipeline ai prodotti. Oltre alle mappe di idoneità e alle classi operative, la pipeline produce indicatori a supporto del decision making: (1) superfici e volumi tecnici per classe e per comune; (2) stime di potenza termica installabile per tecnologia (GSHP/GWHP/UTES) date le condizioni; (3) lista dei presidi obbligatori (monitoraggi, distanze, ΔT di restituzione); (4) cruscotti di robustezza (mappe di stabilità, tornado sui siti candidati). Questi prodotti alimentano le schede comunali e le valutazioni ex ante di programmi di retrofit ed efficientamento, integrando domanda e risorsa con criteri trasparenti e riproducibili (ENEA RAEE 2024; DM 30/09/2022; UNI 11466/11467/11468).

3.4. GeoDatabase regionale (schema concettuale ER)

Il GeoDatabase regionale costituisce l'infrastruttura informativa permanente a supporto della microzonazione geotermica e dell'aggiornamento dei prodotti MCDA. Lo schema concettuale adotta un modello entità-relazioni (ER) capace di vincolare qualità e coerenza semantica tra misure, stratigrafie, vincoli e layer tematici, preservando la storicizzazione bitemporale (validità del dato e tempo di registrazione) e il versionamento dei *run* di calcolo (ISO 19115:2014; INSPIRE, 2007).

Il nucleo del modello comprende cinque domini: **Osservazioni e misure, Geologia/Idrogeologia, Impianti e opere, Vincoli e uso del suolo, MCDA e prodotti cartografici**. Ciascun dominio espone entità con chiavi stabili, attributi controllati e relazioni a

cardinalità esplicita. La progettazione è «data-first»: il GeoDatabase non è un semplice contenitore di raster e vettori, ma una base di conoscenza con regole di integrità che riducono ambiguità e duplicazioni, facilitando audit, riproducibilità e confronto tra scenari (Casasso & Sethi, 2016).

Domini e entità chiave. Nel dominio *Osservazioni e misure* rientrano **Pozzo**, **Stratigrafia**, **Campione** (idrogeochimico), **Misura Piezometrica**, **Prova Pompaggio**, **Prova TRT** e **Sonda** (strumentale), con relazioni 1:N e N:M dove necessario; ogni entità porta metadati minimi (fonte, data, accuratezza, sistema di riferimento) e attributi tecnici (Apollaro et al., 2024; Dalla Santa et al., 2020).

Nel dominio *Geologia/Idrogeologia* sono modellate **Unità Litologica**, **Formazione**, **Acquifero**, **Isopache/Profondità Falda** (raster catalogati) e **Conduttività Idraulica** (range e valori puntuali), con raccordo alle stratigrafie. Il dominio *Impianti e opere* accoglie **Campo Sonde**, **Scambiatore Geostrutturale**, **Impianto GWHP**, **Pozzo Emungimento**, **Pozzo Reimmissione**, **Linea Scarico**, con vincoli di prossimità e congruenza idraulica/termica (VDI 4640; UNI 11466/11467/11468). Il dominio *Vincoli e uso del suolo* comprende **Vincolo** (tipizzato: paesaggistico, idropotabile, Natura 2000, aree protette, *no-go*), **Uso Suolo**, **Edificato/Tipologia Utenza**, **Sottoservizi** (quando disponibili). Infine il dominio *MCDA e prodotti* raccoglie **Indicatore** (normalizzato in [0,1] con funzione di valore), **Peso**, **Aggregazione** (WLC/OWA), **RunMCDA** (configurazione parametrica), **Indice Idoneità** (raster), **Classe Contesto** (vettoriale), **Mappa Stabilità** e **Audit Record** (ISO 19115:2014; Casasso & Sethi, 2017).

Chiavi e integrità. Ogni entità possiede una chiave primaria opaca (UUID) e, quando esiste un identificativo esterno, una chiave naturale unica (es. *codice Pozzo* da catasto) per garantire allineamento con registri ufficiali. I vincoli di integrità referenziale impediscono l'isolamento di record orfani (es. una *Prova TRT* richiede una relazione a **Campo Sonde** e un *sensore* valido; una **Analisi Chimica** richiede un **Campione** associato a un **Pozzo** o a **Corpo Idrico**). La *domain integrity* fornisce liste di valori controllate per classi litologiche, metodi analitici, stato di saturazione, tipo di acquifero, standard di prova, stato di esercizio dell'impianto (ISO 19115:2014).

Storico bitemporale e versionamento. Ogni record critico è dotato di due coppie di timestamp: *valid_from/valid_to* (intervallo di validità nel mondo reale) e *record_from/record_to* (intervallo di permanenza nel database), in modo da distinguere correzioni retrospettive da modifiche realmente accadute sul terreno. Le entità **RunMCDA** e **Audit Record** tracciano il

versionamento delle esecuzioni, agganciando pesi, funzioni di valore, operatori di aggregazione e criteri di classificazione ai raster e vettori prodotti; i *delta* tra run successivi sono persistiti come layer differenza e come statistiche per comune/zona omogenea (Casasso & Sethi, 2016; ISO 19115:2014).

Relazioni e cardinalità. Gli snodi centrali sono: **Pozzo** 1:N **Stratigrafia** (una stratigrafia per campione di profondità o per tratto), **Pozzo** 1:N **Campione** N:1 **Analisi Chimica** (alcuni campioni generano più analisi), **Pozzo** 1:N **Misura Piezometrica** e **Prova Pompaggio**; **Campo Sonde** 1:N **Sonda** 1:N **Prova TRT**; **Impianto GWHP** 1:N **Pozzo Emungimento** e 1:N **Pozzo Reimmissione** con relazione M:N mediata verso **Corpo Idrico**; **RunMCDA** 1:N **Indicatore** e 1:N **Peso** → 1:1 **Aggregazione** → 1:N **Indice Idoneità** → N:1 **Classe Contesto**. Le entità **Vincolo** e **Uso Suolo** si legano spazialmente (overlay) alle altre mediante relazioni topologiche e *triggers* che assicurano coerenza tra *buffer* captazioni, aree *no-go* e posizionamento di opere (INSPIRE, 2007; VDI 4640).

La modellazione ER è completata da regole di business e *triggers* che implementano vincoli di coerenza: (i) una **Prova TRT** non può esistere senza un **Campo Sonde** attivo e con coordinate valide; (ii) un **Pozzo Reimmissione** deve appartenere allo stesso **Impianto GWHP** del corrispondente **Pozzo Emungimento** e rispettare distanze/quote minime dai vincoli idropotabili; (iii) le geometrie delle opere devono cadere all'esterno delle aree *no-go*, salvo deroghe motivate e protocollate. I raster sono archiviati in un *catalogo raster* con metadati completi e con collegamento al relativo **RunMCDA** e **Audit Record** (ISO 19115:2014; INSPIRE, 2007).

Il modello assicura l'allineamento fra componenti fisiche misurate (prove, stratigrafie, analisi), descrizioni geologiche e prodotti decisionali del MCDA, con un legame esplicito fra *input*, *parametri* e *output*. L'adozione di domini controllati e di *check constraints* riduce errori sistematici (es. unità errate, *outlier* non fisici), mentre la bitemporalità permette di ricostruire a posteriori le condizioni che hanno portato a una specifica classificazione o prescrizione (ISO 19115:2014; Casasso & Sethi, 2017).

Indicizzazione e performance. Per sostenere interrogazioni complesse e map-algebra, lo schema impiega indici spaziali su geometrie (R-tree), indici composti su campi temporali e su chiavi esterne critiche (es. *id_pozzo + data* per serie piezometriche). I raster d'esito sono organizzati per scacchiera (*tiling*) con piramidi per scale multiple; le query di differenza fra run sono precalcolate per comune e zona omogenea, consentendo dashboard performanti anche su portali pubblici.

Tabella 13. Schema concettuale ER: entità, chiavi e cardinalità principali

Entità	Chiave primaria	Attributi chiave	Relazioni principali	Vincoli
Pozzo	id_pozzo (UUID)	codice, SR, quota, prof_max	1:N Stratigrafia; 1:N Campione; 1:N MisuraPiez.; 1:N ProvaPomp.	codice unico; SR valido
Stratigrafia	id_strat (UUID)	da_m, a_m, litologia, stato	N:1 Pozzo; N:1 UnitàLitologica	da_m < a_m; litologia ∈ dominio
Campione	id_camp (UUID)	prof, matrice, data	N:1 Pozzo; 1:N AnalisiChimica	prof ≤ prof_max; matrice ∈ dominio
AnalisiChimica	id_anal (UUID)	parametro, valore, unità, metodo	N:1 Campione; N:1 Corpoldrico (opz.)	unità SI; QC laboratorio
MisuraPiezometrica	id_mis (UUID)	h_falda, data	N:1 Pozzo; N:1 Acquifero (deriv.)	SR coerente; controllo outlier
ProvaPompaggio	id_pp (UUID)	Q, T, drawdown	N:1 Pozzo; N:1 Acquifero	Q > 0; coerenza drawdown
CampoSonde	id_campo (UUID)	comune, SR, interasse, n_sonde	1:N Sonda; 1:N ProvaTRT	interasse > 0; topologia campi
ProvaTRT	id_trt (UUID)	R_b, λ_eff, t_prova, potenza	N:1 CampoSonde	R_b, λ_eff in range fisici
ImpiantoGWHP	id_imp (UUID)	potenza, ΔT_in/out, uso	1:N PozzoEmung.; 1:N PozzoReim.	ΔT entro limiti; coerenza portate

3. La microzonazione geotermica e la Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA)

PozzoEmungimento	id_em (UUID)	Q, filtro, quota	N:1 ImpiantoGWHP; N:1 Acquifero	Q>0; distanza da vincoli
PozzoReimmissione	id_re (UUID)	Q, filtro, quota	N:1 ImpiantoGWHP; N:1 Acquifero	Q>0; rispetto ΔT restituzione
Vincolo	id_vin (UUID)	tipo, buffer	Overlay con opere, classi	<i>no-go</i> inderogabili
UnitàLitologica	id_lito (UUID)	codice, λ _attesa, $\rho \cdot c$ _atteso	1:N Stratigrafia	range λ , $\rho \cdot c$ plausibili
Acquifero	id_acq (UUID)	tipo, K, T	1:N Misure; 1:N Opere	K>0; tipizzazione INSPIRE
Indicatore	id_ind (UUID)	nome, f_val, unità	N:1 RunMCDA	f_val documentata
Peso	id_peso (UUID)	valore, metodo	N:1 RunMCDA	somma pesi=1
RunMCDA	id_run (UUID)	data, autore, note	1:N Indicatore; 1:N Peso; 1:N IndiceIdoneità	parametri versionati
IndiceIdoneità	id_idx (UUID)	risoluzione, SR	N:1 RunMCDA; N:1 ClasseContesto	metadati completi
ClasseContesto	id_cls (UUID)	classe A-F	N:1 IndiceIdoneità	nomenclatura univoca
AuditRecord	id_audit (UUID)	md, log, checksum	N:1 RunMCDA	tracciabilità completa

Coerenza semantica (dizionario dati). Un *data dictionary* centralizza codici e definizioni (litologie, categorie d'uso, tipologie di impianto, metodiche analitiche), ancorandoli a standard e letteratura. Per litologie e proprietà termiche il dizionario riporta range plausibili per λ e $\rho \cdot c$ per ciascuna classe, con riferimenti a database e misure TRT più recenti, così da supportare controlli automatici di plausibilità e aggiornamenti mirati (Dalla Santa et al., 2020). Per gli aspetti idro-chimici, la sezione dedicata elenca parametri chiave e metodi analitici, con soglie operative utili a valutare incrudimenti, corrosioni o rischi di fouling in sistemi GWHP (Apollaro et al., 2024; Casasso & Sethi, 2019).

Integrazione con MCDA e audit. Il dominio MCDA conserva funzioni di valore, pesi e operatori d'aggregazione per ciascun **RunMCDA**, insieme a raster e vettori di esito e alle *mappe di stabilità* calcolate tramite analisi di sensibilità/Monte Carlo. Ogni *run* è firmato digitalmente con checksum dei file e log dei parametri; un *audit trail* riporta ragioni e fonti delle scelte (es. variazione di f_{val} sulla profondità falda in seguito a nuove piezometrie), facilitando valutazioni di robustezza e *peer review* (Casasso & Sethi, 2016; ISO 19115:2014).

Interoperabilità e pubblicazione. Lo schema è compatibile con servizi OGC (WMS/WFS/WCS) e con i metadati INSPIRE per garantire ricerca, accesso e riuso. Le legende narrative, coordinate alla tassonomia del §3.2, sono condivise come stili (SLD/QML) in repository versionati; ciò supporta la lettura coerente degli esiti sulle diverse piattaforme, riducendo il rischio di interpretazioni divergenti da parte di amministrazioni e progettisti (INSPIRE, 2007).

3.5. Selezione di siti-campione

La selezione di siti-campione ha lo scopo di costruire un set rappresentativo per la validazione incrociata e per la comparazione sistematica delle soluzioni tecnologiche, evitando sovrapposizioni con le schede di dettaglio in appendice. La metodologia privilegia la copertura delle **classi di contesto** (§3.2), la varietà dei domini geologici/idrogeologici della Sicilia, la presenza di **misure dirette** (TRT, prove di pompaggio, analisi idrochimiche), la qualità dei metadati e la rilevanza della **domanda locale**, così da garantire inferenze robuste a scala regionale (Floridia et al., 2022; Casasso & Sethi, 2016).

Criteri di inclusione. Un sito è eleggibile se rispetta tre condizioni: (i) *rappresentatività* di almeno una classe di contesto A–F, con possibilità di includere casi di transizione; (ii) *disponibilità informativa*, con almeno un asse di misura diretta o validazione indipendente (TRT, piezometria, prove idrauliche, serie idro-chimiche); (iii) *rilevanza d'uso*, intesa come

presenza di utenze pubbliche/terziarie o cluster residenziali/ricettivi idonei a piani di decarbonizzazione e comunità energetiche (ENEA RAEE 2024; VDI 4640). Criteri di esclusione immediata riguardano *no-go* ambientali inderogabili, carenze gravi di metadati o conflitti insolubili con la tutela della risorsa idropotabile (INSPIRE, 2007; UNI 11466/11467/11468).

Griglia territoriale e bilanciamento. La griglia di campionamento privilegia la copertura delle principali province e isole, includendo: 1) domini vulcanici (Etna, Eolie), 2) domini carbonatici (Peloritani-Madonie), 3) bacini clastici costieri meridionali, 4) bacini argillosi interni, 5) ambiti urbani ad alta densità di sottoservizi (Palermo, Catania). All'interno di ciascuna area, i siti selezionati coprono almeno una coppia *tecnologia-contesto* (GSHP/BTES in suolo coerente; GWHP/ATES in clastiti costiere; geoscambiatori in ambiti urbani), assicurando una distribuzione equilibrata dei profili di domanda (residenziale, pubblico, ricettivo, piccolo industriale) (Floridia & Viccaro, 2019; Casasso & Sethi, 2019).

Informazione misurata e qualità. La priorità è assegnata a siti per i quali esistono TRT eseguiti secondo buone pratiche e con R_b/λ_{eff} documentati, pozzi con prove di pompaggio/piezometria pluriennale, e serie idrochimiche con protocolli analitici tracciati (VDI 4640; Dalla Santa et al., 2020; Apollaro et al., 2024). Per i GWHP su costa, la presenza di indicatori salinità/chimica (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , EC) e di elementi isotopici quando disponibili rende più affidabile la valutazione del rischio intrusione e dei fenomeni di fouling (Apollaro et al., 2024). Per i BTES/GSHP, TRT e modelli di carico permettono di valutare compatibilità stagionale e necessità di strategie di accumulo; la coerenza tra domanda e interassi/numero di sonde è verificata ex ante con modelli consolidati.

Normativa e compatibilità ambientale. I siti includono solo configurazioni compatibili con la normativa regionale/nazionale vigente su ΔT di restituzione, distanze tra opere e vincoli idropotabili, prescrizioni per aree protette; per ciascun candidato sono verificate le esclusioni *no-go* e le condizioni d'uso condizionato (buffer captazioni, pericolosità, rete Natura 2000), anche tramite overlay automatizzati nel GeoDatabase (DM 30/09/2022; UNI 11466/11467/11468).

La griglia dei criteri è volutamente parca: l'idea è selezionare casi «puliti» che permettano comparazioni solide tra tecnologie e contesti, massimizzando il valore informativo per la validazione e l'analisi costi-benefici successiva (Casasso & Sethi, 2016; ENEA RAEE 2024). L'uso di soglie logiche (presenza/assenza; conformità/non conformità) riduce l'arbitrarietà e consente una selezione trasparente, replicabile con poche informazioni di base.

Tabella 14. Criteri di selezione dei siti campione: requisiti e verifiche

Dimensione	Requisito/Indicatore	Verifica/ Fonte	Soglia logica
Classe di contesto	Copertura A-F, incluse transizioni	Overlay mappa classi	≥1 sito per classe
Misure termiche	TRT con R_b e λ_{eff} documentati	Report TRT; GeoDB Misure	Presente/Assente (priorità Presente)
Idraulica	Prove di pompaggio; serie piezometriche	Catasto pozzi; report	≥1 prova e ≥3 misure annue
Idro-chimica	Serie parametri chiave (Cl^- , EC, pH, durezza)	Laboratori/GeoDB	≥1 campagna/anno
Domanda	Utenze pubbliche/terziarie/ricettive	Catasto edilizio/ENEA	Presenza cluster/utenza
Vincoli	No-go/condizionali	GeoDB Vincoli	No-go=Escluso
Normativa	ΔT , distanze, scarichi	Norme/permessi	Conforme
Metadati	Completi (fonte, data, SR)	ISO 19115	Completi

Piano di monitoraggio per i siti selezionati. Per ciascun sito-campione sono definiti indicatori minimi e frequenze: (i) per GWHP costieri, serie trimestrali idro-chimiche e piezometriche, verifica ΔT e test stagionali di bilancio termico; (ii) per GSHP/BTES, TRT iniziale e, se possibile, collaudo termico post-installazione, più misure periodiche del COP stagionale e temperature di ritorno; (iii) per siti urbani densi, controllo su interferenze termiche tra campi e mappatura dei sottoservizi per aggiornare cantierabilità. Le responsabilità di misura e pubblicazione (data owner/steward) sono definite nel GeoDatabase, con *issue tracker* per non conformità e *run* di aggiornamento sensibili a nuovi dati (Casasso & Sethi, 2019; ENEA RAEE 2024; VDI 4640).

Rischi e mitigazioni. Le principali criticità riguardano lacune informative, difetti di metadati e conflitti con vincoli. Mitigazioni: campagne misure mirate per colmare buchi (TRT o prove idrauliche); protocolli standardizzati di laboratorio e catena del freddo per idro-chimica;

accordi di cooperazione con gestori per accesso a reti e dati; gestione *bitemporale* per evitare perdita di storia e migliorare audit e riproducibilità (Apollaro et al., 2024; ISO 19115:2014; INSPIRE, 2007).

Esiti attesi. Il risultato della selezione non è un *ranking* assoluto, ma un paniere robusto e bilanciato di casi con documentazione verificabile, pronti a sostenere analisi comparative su prestazioni energetiche, impatti idraulici/termici e costi di ciclo di vita, oltre a *stress test* di sensibilità/robustezza incrociati con le classi e gli scenari del MCDA (Floridia et al., 2022; Casasso & Sethi, 2016).

4. DOMANDA TERMICA, ECONOMIA E QUADRO NORMATIVO

La domanda termica costituisce il ponte quantitativo tra la disponibilità di risorsa geotermica a bassa entalpia resa operativa dalla microzonazione e le effettive traiettorie di decarbonizzazione dei consumi in Sicilia, regione caratterizzata da un mosaico geologico che alterna domini vulcanici e sedimentari e da un tessuto socioeconomico eterogeneo. La domanda di calore e raffrescamento è funzione congiunta di fattori climatici (gradiente termico stagionale e microclimi locali), morfologia urbana e rurale, caratteristiche dell'edificato e dei processi produttivi, profili d'uso e di occupazione, nonché delle abitudini di consumo e dei prezzi dell'energia. La prospettiva gestionale richiede che tale domanda sia descritta con granularità spaziale e temporale coerente con il GeoDatabase regionale e con il modello MCDA già impiegato per la classificazione di idoneità (§2–3), così da abilitare un matching domanda/offerta in GIS che orienti priorità d'intervento, dimensionamento delle soluzioni e valutazioni economico-finanziarie su base comparabile.

Dal punto di vista infrastrutturale, la geotermia a bassa entalpia abilita modelli di fornitura termica distribuiti, mono-utilizzatore (GSHP per edificio/complesso) o multi-utilizzatore (reti termiche di 4a–5a generazione con pompe di calore e sorgenti geotermiche diffuse), nei quali la nozione di “densità di carico” (kW di picco/ha o MW/km²) diventa variabile di controllo sia per la sostenibilità termica (interferenze, ΔT ammissibili, bilanciamento stagionale) sia per la bancabilità (CAPEX specifici, fattori di utilizzazione, LCOH) (Bayer et al., 2019; Calise et al., 2021). La letteratura tecnica europea e italiana su mapping del potenziale e pianificazione dell'uso del sottosuolo (G.POT, TAP, ROGER) fornisce cornici metodologiche replicabili per integrare carichi e potenziali in modo trasparente, con attenzione a limiti idrogeologici, interferenze termiche in campo e requisiti autorizzativi (Casasso & Sethi, 2016; Böttcher et al., 2019; Baralis & Barla, 2024; Angelotti & Sterpi, 2024). In contesti insulari e vulcanici mediterranei, esperienze di reti e sistemi ibridi geotermia-solare evidenziano opportunità di flessibilità e condivisione del calore, specie in presenza di stagionalità marcata e turismi variabili, con ricadute positive sulla stabilità economica degli investimenti (Buonomano et al., 2015; Blázquez et al., 2018).

A scala regionale, la Sicilia mostra fabbisogni termici differenziati: comparto residenziale e PA diffusi, turismo stagionale nelle aree costiere e insulari, agrifood e industria leggera con usi

processuali e sanitari, oltre a utenze energivore localizzate. Il quadro geologico-idrogeologico locale — dalla permeabilità dei soprassuoli e delle prime falde alla conducibilità termica λ e capacità termica volumetrica $\rho \cdot c$ delle formazioni — condiziona la selezione tecnologica (open-loop GWHP, closed-loop BHE/BTES, ATES) e i regimi di esercizio sostenibili (ΔT di prelievo/restituzione, R_b , bilanciamenti annuali) (Cappellari et al., 2022; Casasso & Sethi, 2019; Beernink et al., 2022). Nei domini vulcanici etnei, oltre ai vantaggi termici si considerano aspetti idrogeochimici e gassosi peculiari per gli open-loop (CO_2 , CH_4 , durezza, ferro, manganese), che suggeriscono accurate valutazioni e monitoraggio per garantire prestazioni e conformità (Apollaro et al., 2012; Barnett et al., 2023; Bellia et al., 2015).

Nel seguito, la domanda termica viene profilata per settori e territori in ottica gestionale: si definiscono metriche, indicatori e formule di stima coerenti con il GeoDatabase; si stabiliscono criteri di priorità in relazione alla mappa di idoneità geotermica e ai vincoli ambientali; si propone un set minimo di KPI energetici e ambientali utile ai confronti economici e alla successiva analisi di sensibilità. La strutturazione consente di alimentare le logiche di ordinamento per il matching in GIS (§4.6) e di predisporre schematicamente le esigenze di permitting e incentivi (§4.4–4.5) in funzione delle scelte tecniche e localizzative.

4.1. Profilo della domanda termica per settori e territori

4.1.1. Metriche, risoluzione e basi informative

La profilazione della domanda adotta tre livelli di risoluzione geografica: i) comunale/urbano funzionale, per la pianificazione sovracomunale e la valutazione di densità di carico; ii) microzona censuaria o “unità edilizia aggregata” (UEA) per cluster tipologici dell’edificato; iii) sito/proprietà per casi d’uso prioritari (PA, sanità, scuole, impianti sportivi, poli produttivi). La risoluzione temporale è duplice: annuale per la stima dei consumi ($kWh_{th} \cdot a^{-1}$) e oraria/sottogiornaliera per la modellazione dei picchi (kW) e dei fattori di contemporaneità, con avvertenza specifica per i profili estivi di raffrescamento in zone costiere e isole minori. La base informativa integra: geometrie e attributi del GeoDatabase (§2 e 3), layer climatici e orografici, cartografie dell’uso del suolo e insediative, inventari dell’edificato e, ove presenti, consumi storici e diagnosi energetiche. La standardizzazione di queste basi dati è necessaria per garantire coerenza con la microzonazione geotermica e con i moduli MCDA di normalizzazione/pesatura (Bayer et al., 2019; Casasso & Sethi, 2016).

Indicatori principali

Domanda annua di calore per riscaldamento/ACS e raffrescamento Q_{ann} [MWhth·a⁻¹];

- **Carico di picco** P_{peak} [kW];
- **Densità di carico termico** $D_c = P_{peak} / A$ [kW/ha o MW/km²];
- **Intensità energetica specifica** EUI [kWhth·m⁻²·a⁻¹] per tipologia d'uso;
- **Fattori di contemporaneità e di diversità** ($f_c(j,s)$) per cluster;
- **Quota trattabile** con geotermia (ϕ_g) in funzione dei vincoli idrogeologici, ΔT sostenibile e tecnologia selezionata (GWHP/BTES/ATES);
- **Quota elettrica associata** per le pompe di calore (coefficiente di prestazione stagionale).

Le formule operative si esprimono, per un'unità territoriale e settore:

$$Q_{ann}(j,s) = \sum_i A_i(j,s) \cdot EUI_i(j,s) \cdot \kappa_{clim}(j) \cdot \kappa_{uso}(i,s) \cdot \eta_{imp}(i)$$

$$P_{peak}(j,s) = \alpha_s \cdot \beta_j \cdot Q_{ann}(j,s) / H_{equiv}(s)$$

$$D_c(j) = \frac{[\sum_s P_{peak}(j,s) \cdot f_c(s)]}{A_j}$$

dove A_i è la superficie utile per tipologia i , κ_{clim} un correttivo climatico locale, κ_{uso} cattura profili di occupazione e comfort, η_{imp} l'efficienza media del parco impiantistico, α_s e β_j rappresentano rispettivamente coefficienti di forma del carico per settore e correttivi microclimatici/morfologici, e H_{equiv} sono le ore equivalenti del servizio. La quota trattabile ϕ_g deriva dall'intersezione in GIS tra densità di carico, classi di idoneità geotermica e vincoli, con regole distinguibili per GWHP (portate e ΔT di prelievo/restituzione) e per BTES/ATES (volumi attivabili, ΔT medio stagionale, R_b di campo) (Bayer et al., 2019; Casasso & Sethi, 2014; Beernink et al., 2022).

4.1.2. Segmentazione settoriale e profili di domanda

La segmentazione si allinea ai cluster di consumo prevalenti in Sicilia, distinguendo: residenziale, terziario privato, Pubblica Amministrazione e servizi pubblici, sanità, istruzione, turismo/ricettivo, industria leggera e agroalimentare, logistica/condizionamento di magazzini, oltre a usi speciali (piscine, centri sportivi, musei, data center). La definizione dei profili considera l'interazione con comportamenti d'utenza e con regolazioni impiantistiche (setpoint, orari), nonché l'effetto dei retrofit e dell'ibridazione con altre rinnovabili. Per il raffrescamento si adotta un profilo "coast-islands" a maggior incidenza estiva e uno "inland" con picchi

attenuati, coerenti con la distribuzione climatica regionale. Le curve di durata del carico (load duration curves) per settore orientano il dimensionamento di pompe di calore, scambiatori e, per reti multi-utenza, la taglia di sottostazioni e accumuli.

Residenziale. Domanda invernale dominante per riscaldamento e ACS, con intensità energetica dipendente dall'epoca costruttiva e dalla tipologia edilizia; fattori di contemporaneità elevati nelle ondate fredde; per il raffrescamento, carichi estivi significativi nelle aree costiere e in conurbazioni interne, con forte variabilità interannuale (Calise et al., 2021; Bayer et al., 2019).

Terziario privato e commercio. Profili marcati di raffrescamento estivo e carichi invernali moderati; elevata diversità tra sottosettori (retail di prossimità, GDO, uffici), utile per lo smoothing del carico aggregato in reti a bassa temperatura (Blázquez et al., 2018; Calise et al., 2021).

PA, sanità e istruzione. Carichi termici continui per ACS e riscaldamento, con requisiti di affidabilità e ridondanza; per ospedali e RSA, presenza di carichi processuali e di umidificazione che favoriscono l'integrazione con accumuli e chiller geotermici (Calise et al., 2021).

Turismo/ricettivo e isole minori. Stagionalità estiva molto accentuata e picchi localizzati; domanda invernale ridotta ma non trascurabile in aree montane e nelle Eolie/Etna in relazione a vocazioni stagionali; opportunità per sistemi ibridi geotermia-solare e reti di 5a generazione con forte componente di raffrescamento (Buonomano et al., 2015; Blázquez et al., 2018).

Industria leggera, agroalimentare, logistica. Domande termiche a bassa/media temperatura (acqua calda di processo, lavaggi, essiccazione), free-cooling e raffrescamento, con profili spesso meno stagionali; in contesti con disponibilità idrica controllata e parametri idrogeochimici compatibili, i GWHP offrono alti COP e recuperi di calore, mentre in aree con scambi aperti sensibili si privilegiano BTES/ATES con bilanciamento rigoroso (Cappellari et al., 2022; Casasso & Sethi, 2019; Beernink et al., 2022).

4.1.3. Densità di carico e criteri spaziali per hotspot

La mappatura della densità di carico richiede la derivazione, per ciascun poligono territoriale (ad es. UEA), di aggregato e la normalizzazione sull'area effettivamente servibile, escludendo superfici improprie (aree protette sensibili, corridoi idraulici, buffer di vincoli). La densità, discretizzata in classi ordinali, guida la priorità di attivazione di soluzioni puntuali (campi BHE, well doublet GWHP) o di cluster per reti termiche. In parallelo si computa un indicatore di **compattezza del carico** (rapporto tra P_{peak} e perimetro/estensione delle aree servibili) per

valutare l'economicità di reti multi-utenza a bassa temperatura. L'intersezione in GIS con la **mappa di idoneità geotermica** (cap. 3) produce una matrice domanda-offerta dalla quale discendono le regole di matching e di priorità (Casasso & Sethi, 2016; Böttcher et al., 2019; Baralis & Barla, 2024).

Criteri di hotspot (estratto operativo):

1. D_c superiore a $D_{c,thr}$ una soglia definita per tecnologia (tipicamente $>0,5-1,0$ MW/km² per cluster residenziali/terziari; soglie più alte per reti di 5a generazione in ambito denso), con compattezza del carico elevata;
2. classe di idoneità geotermica alta/molto alta nel layer MCDA e assenza di vincoli ambientali stringenti;
3. disponibilità di pozzi/sondaggi o stratigrafie affidabili a supporto del predimensionamento;
4. prossimità a utenze pubbliche strategiche o a distretti produttivi/servizi con profili complementari, per massimizzare la diversità del carico e il fattore di utilizzazione;
5. accessibilità per cantierizzazione (campi BHE) o per opere idrauliche (GWHP), con valutazione preventiva di interferenze e di R_b accettabile.

4.1.4. Vincoli idrogeologici e sostenibilità termica

La determinazione della quota trattabile ϕ_g impone di verificare condizioni di sostenibilità termica e ambientale:

- **GWHP (open-loop).** Portate e ΔT di scambio compatibili con la vulnerabilità e l'uso della falda; caratteristiche idrogeochimiche (Fe, Mn, durezza, CO₂/CH₄ disciolti, microbiologia) e percorsi di restituzione che evitino corto-circuiti termici e chimici; monitoraggio delle termiche di falda e dei gradienti idraulici (Cappellari et al., 2022; Barnett et al., 2023; Bellia et al., 2015; Apollaro et al., 2012).
- **BTES/BHE (closed-loop).** Verifica di R_b , λ e $\rho \cdot c$ del volume attivabile; minimizzazione delle interferenze a lungo termine e delle derive termiche, specie in aree dense; corretto dimensionamento della grouting line in funzione delle proprietà geomeccaniche/termiche (Angelotti & Sterpi, 2024; Casasso & Sethi, 2014; Bayer et al., 2019).
- **ATES.** Esigenza di bilanciamento stagionale e di confinamento idrogeologico; controllo delle interferenze tra pozzi caldo/freddo e fra sistemi adiacenti, con criteri pianificatori e di licenza specifici per l'uso del sottosuolo (Beernink et al., 2022; Bloemendal et al., 2014, 2018).

La sostenibilità è formalizzata tramite **indicatori di pressione** (ad es. ΔT_{vol} annuo indotto nel volume attivato) e **indicatori di stato** (drift termico di medio periodo, tendenza al “thermal mining”), con soglie guida per classi di contesto e strumenti di monitoraggio (sensori in foro, piezometri, bilanci termici annuali) integrati nel sistema gestionale (Casasso & Sethi, 2019; Bayer et al., 2019).

4.1.5. Domanda termica e domini geologici siciliani

Nei domini vulcanici (Etna e arcipelaghi), la combinazione di litologie fratturate, basalti e piroclastiti, depositi risedimentati e alternanze con livelli più fini determina un mosaico di parametri termo-fisici e idrogeologici favorevoli a configurazioni differenziate. In ambito etneo, il carico antropico elevato lungo il piede orientale e le dinamiche deformative richiedono attenta pianificazione d’area per open-loop e reti di 5a generazione, con presidio tecnico sul comportamento delle faglie attive e sul drenaggio verso il mare. Nelle isole minori, la forte stagionalità turistica suggerisce soluzioni ibridate e cluster di utenze, privilegiando BTES/ATES dove gli acquiferi quaternari lo consentano e GWHP in presenza di buone portate e qualità idrochimica, con monitoraggio per prevenire fenomeni di intrusione salina in fasce costiere.

Nei domini sedimentari/carbonatici meridionali e occidentali, la presenza di acquiferi granulari e di calcari/dolomie fratturate consente GWHP in aree con falde di spessore e ricambio adeguati; l’eterogeneità locale e la presenza di argille/livelli marini impone analisi di dettaglio per valutare le perdite di carico, i fronti termici e le condizioni di vulnerabilità, anche in ottica di ricarica artificiale o di ATES in contesti idonei (Böttcher et al., 2019; Casasso & Sethi, 2016; Beernink et al., 2022).

4.1.6. Indicatori di priorità domanda-risorsa

Per supportare decisioni trasparenti può essere definito un **Indice di Priorità Geotermica per la Domanda (IPGD)** su base 0–1:

$$IPGD(j) = w_1 \cdot D_c(j) + w_2 \cdot \hat{\phi}_g(j) + w_3 \cdot \Delta C_{O_2}(j) + w_4 \cdot \Delta C(j) + w_5 \cdot VIN(j)$$

dove le variabili con cappello sono normalizzate [0–1] (densità di carico, quota trattabile geotermica, riduzione specifica di CO₂, riduzione di costo LCOH rispetto al BAU, favorevolezza dei vincoli VIN), e w_k sono i pesi coerenti con il framework MCDA del cap. 3 (testati in sensibilità al §4.3). L’IPGD abilita graduatorie per la selezione di progetti pilota e per la pianificazione di reti, con soglie di attivazione differenziate per ambito urbano, periurbano e rurale.

Tabella 15. Matrice settoriale indicatori-parametri per la domanda termica e criteri di hotspot

Settore	EUI tipico (kWhth·m ⁻² ·a ⁻¹)	Fattore picco		Quota raffrescamento	attesa	Vincoli principali
Residenziale	45–120	0,20– 0,30	0,7– 0,9	Bassa–media	Media–alta (BTES/BHE)	Interferenze in aree dense; profondità utile
Terziario / uffici	55–130	0,25– 0,35	0,5– 0,8	Medio-alta	Alta (BTES/ATES)	Vincoli urbanistici, spazi per campi
Scuole/PA	60–140	0,25– 0,35	0,6– 0,9	Media	Media	Continuità di servizio; ridondanza
Sanità	90–200	0,30– 0,45	0,8– 0,95	Media	Media (GWHP/BTES)	Qualità idrica; affidabilità
Turismo / ricettivo	70–160	0,20– 0,35	0,4– 0,7	Alta	Alta (ibridi)	Stagionalità; intrusione salina
Industria leggera/agro	30–120	0,20– 0,40	0,5– 0,8	Media	Variabile (GWHP/BTES)	Portate; qualità idrica
Logistica/maga zzini	25–80	0,15– 0,30	0,4– 0,7	Media	Media	Volumi; setpoint

Nota: intervalli indicativi per il dimensionamento preliminare e la comparazione tra alternative; i valori specifici vanno tarati su dataset locali e diagnosi disponibili (Bayer et al., 2019; Blázquez et al., 2018; Calise et al., 2021; Cappellari et al., 2022; Casasso & Sethi, 2014, 2016; Beernink et al., 2022; Angelotti & Sterpi, 2024).

4.1.7. Coerenza con microzonazione e validazione

La profilazione della domanda si integra con la microzonazione geotermica attraverso: i) uso delle stesse unità territoriali e sistemi di riferimento; ii) riuso delle funzioni di valore e dei pesi per la normalizzazione di indicatori; iii) validazione incrociata dei risultati mediante confronti indipendenti (consumi misurati, diagnosi energetiche campione, termografie, controlli a campione su R_b e λ). La robustezza è testata tramite **analisi di sensibilità** sui pesi dell'*IPGD* e sui parametri di conversione domanda–picco, documentando l'intervallo di variazione delle graduatorie (vedi §4.3).

4.1.8. Implicazioni gestionali per il sistema informativo

La traduzione operativa nel sistema gestionale prevede:

- dashboard con indicatori chiave (D_c , ϕ_g , ΔCO_2 , ΔC , stato vincoli) a scala comunale e di microzona;
- funzioni “what-if” per variare EUI, *SCOP/SEER*, mix tecnologico e pesi dell'*IPGD*, con aggiornamento dinamico di mappe e graduatorie;
- export di elenchi ordinati di cluster candidati con metadati minimi per permitting e analisi economica (coordinate, superfici, tecnologie possibili, range di taglia, vincoli, contatti).

4.1.9. Sintesi

La domanda termica in Sicilia, letta in ottica geotermica, emerge come un insieme di campi di carico eterogenei ma razionalizzabili mediante indicatori comuni e intersezione con la mappa di idoneità. La combinazione di densità, compattezza e quota trattabile — temperata dai vincoli idrogeologici e dalle specificità dei domini geologici — consente di definire hotspot e priorità d'intervento consistenti con le esigenze di sostenibilità tecnica ed economica e con gli obiettivi di decarbonizzazione del riscaldamento e raffrescamento regionale.

4.2. Modello economico di base e KPI

4.2.1. Struttura del modello, ipotesi e perimetro di calcolo

Il modello economico valuta alternative tecnologiche di geotermia a bassa entalpia (GWHP, BTES/BHE, ATEs e ibridi con reti di 4a–5a generazione) rispetto agli scenari di riferimento a combustibili fossili e sistemi elettrici convenzionali. Il perimetro di calcolo include: i) investimenti iniziali (CAPEX), ii) costi operativi e manutentivi ricorrenti (OPEX), iii) sostituzioni/overhaul di componenti con vita utile inferiore all'orizzonte di progetto, iv) ricavi/risparmi derivanti dall'energia termica utile erogata e da eventuali incentivi, v) costi esterni e benefici ambientali monetizzabili (opzionali). Gli esiti primari sono il costo livellato del calore (LCOH), il Valore Attuale Netto (VAN), il Tasso Interno di Rendimento (TIR) e il payback, affiancati da un set di KPI energetici e ambientali per il benchmarking coerente con il framework MCDA dei capitoli 2–3 (Bayer et al., 2019; Casasso & Sethi, 2016; Calise et al., 2021). L'orizzonte temporale n è tipicamente compreso tra 20 e 30 anni per impianti con campi geotermici e reti, con vite utili differenziate: perforazioni/scambiatori in foro 50+ anni (soggetti a verifica di sostenibilità termica), pompe di calore 15–20 anni, ausiliari 10–15 anni; per gli open-loop la vita utile è guidata dalla gestione idrogeochimica e dal regime di esercizio (VDI 4640; Casasso & Sethi, 2019). Il tasso di sconto reale riflette il costo del capitale del soggetto attuatore e l'eventuale leva finanziaria; le grandezze monetarie sono espresse in termini reali, con inflazione trattata separatamente ove esplicitata (Böttcher et al., 2019).

4.2.2. Scomposizione dei costi: CAPEX e OPEX per tecnologia

La scomposizione dei costi segue voci standardizzate per garantire comparabilità fra alternative e allineamento a prezzi tecnici regionali e letteratura di settore. Per **GWHP**: indagini e progettazione; opere idrauliche (pozzi di emungimento e reiniezione, test di portata, pompe sommerse), piping e scambiatori, sistema di filtrazione/trattamento, pompe di calore e sottosistemi elettrici/controllo; per **BTES/BHE**: indagini geotecniche e progettazione, perforazioni e sonde geotermiche, grouting termico e collettori, pozzetti e dorsali, pompe di calore e centrale termica; per **ATEs**: coppie pozzo caldo/freddo con completamenti e valvole, sensoristica, centrali di scambio e pompe di calore, opere civili e di rete; per **reti 4a–5a generazione**: dorsali a bassa temperatura, sottostazioni e scambiatori/HP di utenza, sistemi di misura e controllo (VDI 4640; Bayer et al., 2019; Angelotti & Sterpi, 2024). Gli OPEX includono energia elettrica per le pompe di calore e i sollevamenti, manutenzione preventiva e correttiva,

sostituzione filtri/materiali di trattamento (GWHP), controlli e monitoraggi (BTES/ATES), oneri di servizio e canoni.

Tabella 16. Struttura dei costi per tecnologia e intervalli parametrici guida

Tecnologia	CAPEX principali	OPEX principali	Parametri tecnico-economici-guida (intervalli)	Fonti
GWHP (open-loop)	Indagini; pozzi P&R; scambiatori; HP; piping e trattamento	Energia pompe e HP; trattamento; manutenzioni	SCOP 3,2–5,0; ΔT 3–6 K; portate 20–80 m ³ /h per MW _{th}	Casasso & Sethi, 2019; VDI 4640
BTES/BHE (closed-loop)	Sondaggi e sonde; grouting; collettori; HP; centrale	Energia HP; circolazione; manutenzione	R _b 0,06–0,15 K/W; λ suolo 1,5–2,8 W/mK; SCOP 3,0–4,5	Casasso & Sethi, 2014; Bayer et al., 2019
ATES	Pozzi caldo/freddo; valvole; sensori; HP	Energia pompe/HP; monitoraggi	ΔT stagionale 6–12 K; confinamento idrogeologico; SCOP 4,0–6,0	Beernink et al., 2022; Bloemendal et al., 2014
Reti 4G/5G	Dorsali LT; sottostazioni; scambiatori/HP	Perdite idrauliche; controllo; manutenzione	T _{mandata} 10–25 °C; UF 2.000–4.000 h/a	Calise et al., 2021; Blázquez et al., 2018

Nota: intervalli indicativi tarabili su dataset locali, audit energetici e prove in sito; la scelta finale dipende da vincoli idrogeologici e layout (Angelotti & Sterpi, 2024; Casasso & Sethi, 2019).

4.2.3. Metriche economiche: LCOH, VAN, TIR, payback

Il **costo livellato del calore (LCOH)** è definito come il rapporto tra il valore attuale dei costi totali e il valore attuale dell'energia termica utile erogata:

$$LCOH = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{I_t + O_t + R_t - S_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{Q_{th,t}}{(1+r)^t}}$$

dove I_t sono gli investimenti (CAPEX) al tempo t , O_t gli OPEX (inclusi costi elettrici), R_t le sostituzioni, S_t gli eventuali sussidi/ricavi specifici e $Q_{th,t}$ il calore utile erogato nell'anno t (Calise et al., 2021). Una forma ingegneristica equivalente usa il **fattore di recupero del capitale (CRF)** per ripartire CAPEX:

$$CRF = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1}$$

$$LCOH \approx \frac{CRF \cdot CAPEX + OPEX_{fix}}{Q_{ann}} + \frac{OPEX_{var}}{Q_{ann}}$$

con Q_{ann} energia annua utile, $OPEX_{fix}$ costi fissi e $OPEX_{var}$ costi variabili (energia elettrica, reagenti, ecc.), utili per confronti preliminari (VDI 4640).

Il **VAN** è la somma attualizzata dei flussi di cassa liberi FCF_t :

$$VAN = \sum_{t=0}^n \frac{FCF_t}{(1+r)^t} = -CAPEX_0 + \sum_{t=1}^n \frac{(risparmi netti + incentivi - OPEX_t)}{(1+r)^t}$$

ed è criterio decisionale principale in presenza di target di rendimento definiti (Blázquez et al., 2018). Il **TIR** è il tasso r^* che annulla il VAN, mentre il **payback** è il tempo necessario a recuperare l'investimento iniziale, nelle versioni semplice e scontata; per infrastrutture termiche è raccomandata la forma scontata in combinazione con misure di rischio (Calise et al., 2021).

Per i confronti con lo scenario convenzionale (BAU), il differenziale di costo specifico ΔC e la riduzione emissiva ΔCO_2 sono KPI chiave già impiegati nel capitolo 4.1 e nel framework MCDA; ΔC si misura come $LCOH_{geo} - LCOH_{BAU}$ a parità di servizio, mentre ΔCO_2 deriva dal confronto tra fattori di emissione e consumi energetici equivalenti (Bayer et al., 2019; Casasso & Sethi, 2016).

4.2.4. Assunzioni operative e confrontabilità fra alternative

La confrontabilità richiede un set di ipotesi coerenti: profili di carico e ore equivalenti condivisi; per le pompe di calore, $SCOP$ e $SEER$ e calcolati su profili climatici regionali; per gli open-loop, rendimento della catena idraulica e perdite; per i BTES, R_b e λ coerenti con la microzonazione;

per le reti, perdite termiche e livelli di temperatura; per ogni alternativa, orizzonte e residuo terminale (valore recuperabile a fine vita dei componenti sostituiti). Le ipotesi su prezzo dell'energia e indicizzazione si applicano in modo uniforme, con test di sensitività su gradienti definiti al §4.3 (VDI 4640; Casasso & Sethi, 2019). Per i progetti in aree vulcaniche o costiere, è prudente includere contingencies su CAPEX/OPEX per gestione idrogeochimica o misure anti-intrusione, con riflessi su $OPEX_{var}$ e disponibilità dell'impianto (Apollaro et al., 2012; Bellia et al., 2015).

4.2.5. KPI energetici e ambientali per il benchmarking

Il set minimo di KPI a supporto del confronto e dell'integrazione nel sistema gestionale comprende:

- **LCOH** [€/MWh_{th}]: costo livellato del calore, definito sopra (Calise et al., 2021).
- **CAPEX specifico** [€/kW_{th}] e [€/MWh_{th}·a⁻¹]: investimento rapportato alla potenza utile e/o all'energia annua (VDI 4640).
- **OPEX specifico** [€/MWh_{th}]: costi operativi per calore utile, distinguendo quota elettrica (Bayer et al., 2019).
- **SCOP/SEER** [-]: prestazioni stagionali misurate o simulate su profili climatici e carico (VDI 4640).
- **Fattore di utilizzazione** [h/a]: ore equivalenti di pieno carico del sistema (Blázquez et al., 2018).
- ΔC [€/MWh_{th}]: differenza rispetto a BAU a servizio equivalente (Casasso & Sethi, 2016).
- ΔCO_2 [t·a⁻¹]: riduzione di emissioni rispetto a BAU a parità di servizio (Bayer et al., 2019).
- **PES (Primary Energy Saving)** [%]: risparmio di energia primaria riferito a BAU (Calise et al., 2021).
- **Indice di sostenibilità termica** [-]: proxy basato su drift termico stimato e rispetto delle soglie ΔT /interferenza (Angelotti & Sterpi, 2024; Casasso & Sethi, 2019).

4.2.6. Modalità di confronto tra alternative

Il confronto fra alternative (GWHP, BTES/ATES, ibridi, BAU) avviene a servizio termico equivalente e con boundary coerente; si applicano ordini di merito per LCOH, VAN e TIR e si riportano KPI energetico-ambientali ΔCO_2 , PES e indice di sostenibilità. Per reti multi-utenza si

adottano approcci portfolio che combinano utenze con profili complementari per elevare il fattore di utilizzazione e ridurre $LCOH$ e rischio, in coerenza con evidenze europee su reti 4G/5G (Blázquez et al., 2018; Calise et al., 2021). La decisione viene poi integrata nel sistema gestionale GIS con pesi MCDA e vincoli locali (Casasso & Sethi, 2016).

4.3. Analisi di sensibilità

4.3.1. Obiettivi e approccio

L'analisi di sensibilità accerta la robustezza dei risultati economici alle variazioni dei parametri più incerti o volatili. Si impiegano: i) **analisi a una variabile** (one-way) con rappresentazione a **tornado plot** delle elasticità del $LCOH$ e del VAN ; ii) **analisi a scenari** su set coerenti di grandezze (prezzi energia, tassi, prestazioni, costi di perforazione e componenti); iii) ove necessario, **analisi due-variabili** su coppie critiche (ad es. prezzo elettrico- $SCOP$, costo perforazione- λ/R_b). I risultati sono interpretati in termini di soglie di convenienza (break-even), rischio e priorità d'intervento (Bayer et al., 2019; Calise et al., 2021).

4.3.2. Parametri chiave e gradienti di variazione

I parametri considerati includono:

- **Prezzi dell'energia:** elettricità per pompe di calore e sollevamenti; gas/metano per scenari BAU; gradienti tipici $\pm 20\text{--}40\%$ rispetto al caso base e scenari strutturali "alto/basso" (Calise et al., 2021).
- **Prestazioni di sistema:** $SCOP/SEER$ e disponibilità; gradienti $\pm 10\text{--}20\%$ e valutazioni dei fattori che influenzano le prestazioni (ΔT lato sorgente, R_b , λ , strategie di controllo) (VDI 4640; Casasso & Sethi, 2014; Angelotti & Sterpi, 2024).
- **Costi di perforazione e materiali:** €/m di sonda, grouting ad alta conducibilità, collettori; gradienti $\pm 20\text{--}30\%$ con specifiche attenzioni in terreni difficili o aree urbane dense (VDI 4640; Bayer et al., 2019).
- **Parametri idraulici per GWHP/ATES:** portata e prevalenza (kWh_{el} per m^3), efficienza di pompaggio, perdite di carico, ΔT sostenibile; gradienti $\pm 20\%$ (Casasso & Sethi, 2019; Beernink et al., 2022).
- **Tasso di sconto n e orizzonte r :** test su incrementi/decrementi di 1–2 punti percentuali e variazioni di ± 5 anni; impatto elevato su VAN/TIR (Blázquez et al., 2018).
- **Ore equivalenti e composizione del carico:** variazioni nel fattore di utilizzazione per effetto di mix utenze e gestione della domanda; gradienti $\pm 10\text{--}20\%$ (Calise et al., 2021).

Per ogni parametro X si calcola l'**elasticità del LCOH**: $E_X = (\Delta \text{LCOH} / \text{LCOH}) / (\Delta X / X)$, utile per il ranking degli impatti e la progettazione di misure di mitigazione (Böttcher et al., 2019).

4.3.3. Scenari di riferimento e interpretazione

Si propongono tre famiglie di scenari:

1. **Scenario “prezzi energia”**: combinazioni alto/basso di prezzo elettrico e gas; ricadute immediate su *OPEX* e convenienza relativa tra GSHP e BAU.
2. **Scenario “prestazioni/costi”**: variazioni combinate di SCOP/SEER, R_b/λ e costo perforazione; utile per valutare il ruolo delle condizioni geologiche e delle scelte progettuali.
3. **Scenario “finanza/tempo”**: variazioni di r , n e tempistiche di permitting/cantierizzazione; stress test su VAN e payback in progetti con reti (Blázquez et al., 2018; Calise et al., 2021).

La lettura avviene su tre livelli: i) confronto del segno e dell'ordine di grandezza della variazione del LCOH; ii) soglie di **break-even** tra alternativa geotermica e BAU; iii) misure di mitigazione prioritarie (tecniche, gestionali, finanziarie) per riportare gli indicatori in zona di convenienza (Bayer et al., 2019).

4.3.4. Soglie di convenienza e regole di decisione

La soglia di **break-even** tra alternativa geotermica e BAU si calcola e interpreta in due modi complementari:

- **Soglia su prezzo/SCOP**: uguagliando LCOH_{geo} e LCOH_{BAU} a parità di servizio; ad esempio, per una GSHP monoutenza, $\text{LCOH}_{geo} \approx (CRF \text{ CAPEX} + O_{fix}) / (Q_{ann} + C_{el} / SCOP)$, mentre $\text{LCOH}_{BAU} \approx C_{comb} / \eta_{BAU}$; risolvendo per SCOP o per C_{el} si derivano le soglie minime di prestazione o massime di prezzo per mantenere la convenienza (VDI 4640; Calise et al., 2021).
- **Soglia su CAPEX**: dato un target LCOH* o VAN = 0, il **CAPEX massimo ammissibile** soddisfa $\text{CAPEX}_{max} = (\text{LCOH}^* - O_{spec}) Q_{ann} / CRF$, utile per negoziazioni d'appalto e per l'ottimizzazione del layout (Bayer et al., 2019).

Le regole di decisione nel sistema gestionale attribuiscono priorità a cluster con: i) bassa sensibilità a variabili esogene (prezzi energia), ii) alta leva progettuale interna (miglioramento SCOP, riduzione R_b , ottimizzazione reti), iii) ΔCO_2 elevato e PES positivo; l'integrazione con i pesi MCDA consente di riflettere preferenze di policy e vincoli locali (Casasso & Sethi, 2016; Blázquez et al., 2018).

4.3.5. Implicazioni per progetti GWHP, BTES/ATES e reti

Nei **GWHP**, i driver di rischio dominanti sono la componente energetica dei sollevamenti e la qualità idrogeochimica: interventi su curve pompanti, riduzione delle perdite di carico e ottimizzazione del ΔT di scambio riducono la sensibilità del LCOH a prezzo elettrico e prestazioni; la gestione della qualità dell'acqua limita OPEX e downtime (Casasso & Sethi, 2019; Apollaro et al., 2012). Nei **BTES/BHE**, il rischio è concentrato nel costo di perforazione e nelle proprietà termo-fisiche del sottosuolo che determinano R_b e λ ; l'uso di grouting ad alta conducibilità e la progettazione del campo limitano interferenze e migliorano SCOP (Angelotti & Sterpi, 2024; Casasso & Sethi, 2014). Negli **ATES**, la condizione necessaria è il bilanciamento stagionale e il confinamento idrogeologico; in assenza di questi requisiti, la sensibilità a prestazioni e costi cresce significativamente (Beernink et al., 2022; Bloemendal et al., 2014).

Tabella 17. Schema dei KPI per il benchmarking e integrazione MCDA

KPI	Definizione sintetica	Unità	Uso gestionale
LCOH	$PV(\text{costi})/PV(Q_{th})$	€/MWh _{th}	Ordine di merito economico
VAN	Somma attualizzata FCF	€	Decisione investimento
TIR	Tasso con VAN=0	%	Soglia rendimento
Payback scontato	Tempo di recupero con sconto	anni	Liquidità/rischio
SCOP/SEER	Prestazioni stagionali	–	Driver OPEX
PES	Risparmio energia primaria	%	Coerenza FER/clima
ΔC	$LCOH_{geo} - LCOH_{BAU}$	€/MWh _{th}	Preferenza economica
ΔCO_2	Emissioni evitate	t·a ⁻¹	Preferenza ambientale
Indice sostenibilità termica	Drift/ ΔT entro soglie	–	Rischio tecnico

4.4. Quadro regolatorio e permitting (focus Sicilia)

La regolazione di riferimento per gli impianti geotermici a bassa entalpia in Italia – con specificità applicative in Sicilia – si innesta su tre livelli: quadro europeo (RED/EPBD), recepimento e strumenti nazionali (D.Lgs. 199/2021, DM 30/09/2022, norme UNI 11466/67/68), disciplina ambientale idrica (D.Lgs. 152/2006) e governance regionale/locale (PEARS, PAESC, sportelli e competenze tecnico-amministrative). Gli esiti operativi differiscono tra sistemi **closed loop** (sonde verticali/orizzontali e BTES/BHE, generalmente ricadenti in edilizia libera o PAS secondo casistiche) e **open loop** (GWHP/ATES con emungimento e restituzione), i secondi soggetti a titoli su derivazione/ricarica e tutela delle acque sotterranee. A completamento, norme tecniche e protocolli di monitoraggio qualificano progettazione, cantiere e M&V, riducendo rischi tecnici e incertezze autorizzative.

4.4.1. Norme e standard applicabili

Il quadro europeo orienta domanda e standard edilizi verso soluzioni ad alta efficienza stagionale e quota rinnovabile, spingendo pompe di calore e accumuli termici nelle reti e negli edifici, con riflessi diretti sulla pianificazione regionale e comunale. A livello nazionale, il D.Lgs. 199/2021 recepisce RED II, mentre la strategia al 2030 è aggiornata dal PNIEC 2024; la proposta di decreto OIERT per quote rinnovabili nel calore/raffrescamento venduto a terzi si inserisce nello stesso solco, con potenziali ricadute per micro-reti e distretti di utenze (D.Lgs. 199/2021; PNIEC 2024; OIERT in consultazione). In edilizia, la EPBD (Dir. 2024/1275) rafforza target ZEB e criteri prestazionali, con effetti indiretti sull'adozione di GSHP/UTES in nuovi edifici pubblici e nella riqualificazione profonda del costruito.

Per la **geotermia “shallow”** destinata alla climatizzazione, il DM 30/09/2022 definisce prescrizioni tecniche e misure di semplificazione per le **piccole utilizzazioni locali** (≤ 2 MW e ≤ 400 m), distinguendo iter per circuiti chiusi e aperti, requisiti per perforazioni, dati minimi di progetto/collaudo e un registro telematico delle installazioni. Le UNI 11466/11467/11468 forniscono buone pratiche per dimensionamento, posa, requisiti ambientali e controlli, costituendo riferimento nazionale per qualità e tracciabilità. Per gli open loop, la disciplina di tutela delle acque sotterranee e degli scarichi è inquadrata dal D.Lgs. 152/2006, cui vanno allineati bilancio idrico, plume termico e standard di qualità del corpo idrico recettore (DM 30/09/2022; UNI 11466/67/68; D.Lgs. 152/2006).

In Sicilia, la governance può essere resa più efficiente tramite una **cabina di regia regionale** (Assessorato dell'Energia, ARPA Sicilia, Autorità di bacino, Soprintendenze, Città metropolitane e Comuni) e attraverso **sportelli geotermici** con modulistica standard, layer GIS pubblici aggiornati (perforabilità, vulnerabilità falde, vincoli paesaggistici/archeologici, pericolosità sismica) e linee guida tecniche per progettazione, cantiere e M&V integrate con PEARS e PAESC.

4.4.2. Procedure autorizzative: chi fa cosa

Closed loop (GSHP/BHE, BTES)

- **Titolo edilizio:** edilizia libera o PAS secondo casistiche, con asseverazione tecnica.
- **Ente/i:** Comune (SUAP/SUE) per titoli edilizi; eventuali pareri per vincoli paesaggistici/beni culturali; coordinamento con gestori sottoservizi per cantierabilità.
- **Documentazione:** relazione geologica/geotecnica; progetto esecutivo (layout sonde, materiali, grout con λ , R_b attesa); piano di cantiere (protezione acquiferi, gestione fanghi); **piano M&V** (baseline; collaudo; esercizio: COP/EER stagionali, ΔT , ore equivalenti); certificazione materiali e installatori qualificati (UNI).
- **Collaudo e registro:** prove di integrità/tenuta, TRT ove necessario, consegna dati di collaudo e iscrizione al registro impianti.

Open loop (GWHP/ATES)

- **Titoli idrici:** concessione di derivazione e **autorizzazione alla restituzione**/ricarica, con condizioni su portate, ΔT , qualità, protezione delle falde e interferenze con altri usi.
- **Ente/i:** Autorità di bacino/Regione per derivazione/ricarica; ARPA per aspetti ambientali; Comune per titolo edilizio delle opere in superficie; Soprintendenze ove vincoli.
- **Studi richiesti:** bilancio idrico e **confinamento idrogeologico** (per ATES); prova di pompaggio e test iniezione; modellazione del **plume termico** e analisi interferenze; piano M&V con rete di piezometri (livelli, qualità chimico-fisica, temperatura) e controlli sulle prestazioni di sistema; misure anti-intrusione salina in aree costiere.
- **Collaudo e monitoraggio:** collaudo idraulico e funzionale, definizione parametri di esercizio (ΔT , portate) e reporting periodico.

4.4.3. Tempi, vincoli ricorrenti e qualità progettuale

I fattori che più spesso condizionano tempi e iter includono: sovrapposizione di pareri su aree vincolate (paesaggio, archeologia), interferenze con sottoservizi urbani, incertezze

idrogeologiche (disponibilità/qualità e rischio interferenza per open loop), lacune nella progettazione esecutiva (assenza di piano M&V, materiali/grout non qualificati). Progetti completi di **checklist autorizzativa**, **dati minimi** standardizzati e **piani di monitoraggio** riducono la probabilità di richieste integrative, migliorano bancabilità e facilitano la rendicontazione di incentivi.

4.4.4. Checklist documentale e format dati minimi

Per accelerare l'istruttoria e garantire tracciabilità si propone un **format dati minimo** (CSV/GeoPackage) che accompagni la pratica con: coordinate e SR, classe idoneità e vincoli, materiali sonde/grout (λ , densità, certificazioni), parametri di progetto (interassi, profondità, ΔT , Q_{th} , SCOP/SEER attesi), per open loop geometrie P&R, prove e modellazioni, piano M&V con frequenze, punti di misura e template report. L'adozione di un formato condiviso consente la successiva alimentazione del registro e dei cruscotti regionali.

Tabella 18. Griglia di conformità autorizzativa per impianti geotermici “shallow” (Sicilia)

Area	Requisito/Voce	Contenuti essenziali	Riferimenti	Output atteso
Dati di base	Inquadramento e microzonazione	UTM, layer vincoli, classe di idoneità, distanze di rispetto	PEARS/PAESC; layer GIS comunali	Estratto tavole/SHP + nota
Progetto di campo (closed)	Layout sonde e materiali	Schema, interassi, profondità, grout (λ , reologia), R_b attesa	UNI 11466/67/68; VDI 4640	Tavola + relazione tecnica
Progetto idraulico (open)	P&R, SCAMBI, ΔT /portate	Bilancio idrico, curva pompaggio, ΔT sostenibile, perdite di carico	D.Lgs. 152/2006; DM 30/09/2022	Relazione + calcoli
Studi idrogeologici (open/ATES)	Confinamento e plume	Pompaggi/slug, modellazione plume termico, interferenze	D.Lgs. 152/2006	Studio + mappe
Cantiere e QA/QC	Protezione acquiferi	Barriere, gestione fanghi, test tenuta; DPI e qualifica installatori	DM 30/09/2022; UNI 11466/67/68	POS + registro prove
M&V	Piano monitoraggi	Baseline; collaudo; esercizio (COP/EER, ΔT , kWh _{el} , Q _{th} , livelli/qualità)	DM 30/09/2022; UNI 11466/67/68	Piano + template report
Titoli e pareri	Titolo edilizio e concessioni	Edilizia libera/PAS; derivazione/ricarica; pareri vincoli	DM 30/09/2022; D.Lgs. 152/2006	SCIA/PAS + concessioni

4.5. Incentivi e strumenti finanziari

Gli strumenti economici e fiscali incidono in modo sostanziale sulla fattibilità e sul ranking delle alternative geotermiche, soprattutto per soggetti pubblici e PMI. Si distinguono: **incentivi in conto capitale** (es. Conto Termico), **detrazioni** per privati/residenziale, e **strumenti contrattuali/finanziari** (EPC/Pay-for-Performance, leasing, project financing). Tali leve si combinano con gli indirizzi regolatori (RED/EPBD) che spostano strutturalmente la domanda di servizi termici verso pompe di calore e UTES.

4.5.1. Mappa degli strumenti

- **Conto Termico 2.0 (GSE)**: contributi in conto capitale, con aliquote fino al 65% e plafond annuo 900 M€ (di cui 400 M€ per PA), ammissibilità di sonde, pompe di calore, BEMS e opere accessorie; tempi di erogazione tendenzialmente rapidi, con impatto diretto sul CAPEX e dunque sul LCOH e sul payback. Opzione particolarmente rilevante per PA, scuole, ospedali, uffici.
- **Detrazioni fiscali (Ecobonus/Bonus Casa)**: fruibili in ambito residenziale/condominiale per sostituzione impianti con pompe di calore geotermiche e interventi integrati su involucro/impianti; utilità legata all'aliquota vigente e alla capienza fiscale del beneficiario.
- **Contrattualistica di rendimento (EPC/Pay-for-Performance)**: trasferisce parte del rischio prestazionale a ESCo/operatori, abilitata da monitoraggi robusti (COP/EER stagionali, ore equivalenti, kWh_rinn, comfort) e da clausole di M&V; utile per PA e grandi utenze multi-sito.
- **Indirizzi regolatori (RED III/EPBD)**: target vincolanti RES-H&C e requisiti ZEB spostano il mercato verso GSHP/UTES, sostenendo pipeline di progetti in reti private/condominiali e distretti a bassa temperatura.

Tabella 19. Strumenti di sostegno e impatti sugli indicatori economici

Strumento	Beneficiari	Oggetto	Indicazioni operative	Effetto su KPI
Conto Termico 2.0	PA, PMI, privati	GSHP/UTES, BEMS, opere accessorie	Contributo in conto capitale; pratica su PortalTermico; rendicontazione collaudo/M&V	↓ CAPEX → ↓ LCOH; ↑ VAN/TIR; ↓ Payback
Detrazioni fiscali	Privati/condomini	Pompe di calore/geotermia, interventi trainati	Aliquota e capienza fiscale determinano efficacia; orizzonte 5-10 anni	↓ esborso netto; ↑ VAN/TIR; impatto su cassa diluito
EPC/PfP	PA/Grandi utenti	Servizio energia con garanzia performance	Richiede misure e baseline affidabili; condivisione risparmi	Riduce rischio prestazionale; stabilizza cash-flow
RED III/EPBD	Amministrazioni/mercato	Target RES e standard edilizi	Pianificare pipeline e priorità; stop a soluzioni fossili stand-alone	Spinta strutturale a GSHP/UTES; domanda più stabile

4.5.2. Effetti su LCOH, VAN/TIR e payback

Gli incentivi in conto capitale riducono direttamente il CAPEX; nella forma ingegneristica del LCOH, la riduzione agisce sul numeratore annuo $CRF \cdot CAPEX$: un'aliquota di contributo applicata ai costi ammissibili comporta una riduzione approssimativa, con miglioramento

proporzionale del payback. Le detrazioni riducono l'esborso netto del beneficiario ma con effetti distribuiti nel tempo; EPC/PfP abbattano il rischio di underperformance e possono migliorare il costo del capitale effettivo, alzando VAN e TIR. A parità di servizio, l'ordine di efficacia sul LCOH è generalmente: **contributo in conto capitale > detrazione > sola leva regolatoria**, mentre la leva regolatoria è determinante per il **volume di domanda** (pipeline) e per la priorità amministrativa.

4.5.3. Condizioni di accesso, cumulabilità e priorità settoriali

Le condizioni di accesso e l'ammissibilità delle spese vanno verificate sugli atti vigenti e sulle guide operative, con particolare attenzione a: corretta progettazione e collaudo (dati minimi, M&V), qualificazione installatori, rispetto di vincoli ambientali e titoli idrici. In via generale, occorre verificare i regimi di cumulabilità tra strumenti e adottare un **piano di gara (PA)** o una **checklist** (PMI/privati) che eviti sovrapposizioni e massimizzi l'effetto sul LCOH. In Sicilia risultano prioritari: **edifici pubblici** (scuole, sanità, uffici), **ricettivo/turismo** costiero e rurale, **residenziale** in cluster condominiali, con possibili economie di scala su campi sonde e UTES a servizio di distretti.

4.6. Integrazione domanda/offerta nel sistema gestionale

L'integrazione fra domanda termica e offerta geotermica è realizzata in ambiente GIS come **matching multiscala** tra: (i) densità di carico e profili d'uso a scala comunale/microzonale; (ii) classi di idoneità geotermica (closed/open/UTES) ottenute dal MCDA; (iii) vincoli e soglie tecnico-ambientali; (iv) priorità economico-finanziarie espresse dagli indicatori del §4.2–4.3. Il processo è costruito come **regola decisionale trasparente e riproducibile**, con normalizzazione degli indicatori, pesi dichiarati e criteri di esclusione/ordinamento, così da favorire auditabilità, replicabilità e aggiornamento periodico dei risultati.

4.6.1. Regole di matching e soglie operative

L'unità operativa del matching è il cluster di carico (poligoni omogenei ottenuti aggregando edifici/particelle per destinazione d'uso e profilo) accoppiato alle celle di offerta (griglia regolare o microzone). Per ogni coppia (i, j) si calcola uno **score di accoppiamento** M_{ij} come combinazione (somma pesata o prodotto) di tre componenti: **idoneità tecnica, congruenza domanda-profilo** e **stato dei vincoli**. In prima battuta agiscono **filtri di esclusione**

(*knock-out*) su tutela ambientale e interferenze; i candidati ammissibili sono poi ordinati per priorità tecnica, economica e ambientale.

- **Idoneità tecnica (S_tech).** È il punteggio normalizzato (0–1) della classe geotermica elaborata dal MCDA per ciascuna tecnologia (GSHP/BTES, GWHP/ATES, ibridi). Per i closed-loop si verifica il drift termico/ ΔT ammissibile in funzione di R_b , λ , e ρc del terreno; per gli open-loop si controllano portata sostenibile, ΔT di restituzione e confinamento idrogeologico.
- **Congruenza domanda–profilo (S_load).** Misura la compatibilità tra profilo di carico (baseload/peakload, ore equivalenti stagionali) e tecnologia: BTES/UTES per stagionalità marcata e bilancio annuale, GWHP laddove si dispone di risorsa idrica e di richieste simultanee H&C, GSHP per carichi diffusi e vincoli di spazio.
- **Stato vincoli (S_env).** Penalità per interferenze tra campi sonde, distanze di rispetto da opere idrauliche e captazioni potabili, vulnerabilità idrica elevata, vincoli archeologico-paesaggistici, sottoservizi urbani; in aree dense le penalità possono essere progressive o costituire criteri di esclusione.

La **soglia di ammissibilità** $M_{i,j} \geq M^*$ è (valore guida 0,6–0,7). I candidati che superano la soglia vengono riordinati dal blocco economico (ΔC , LCOH, VAN/TIR) e dai KPI ambientali (ΔCO_2 , PES), applicando preferenze di policy (PA, scuole, sanità) e criteri di clusterizzazione per micro-reti a bassa temperatura.

Tabella 20. Regole di matching domanda/offerta e soglie operative

Dimensione	Regola/soglia	Razionale e note operative
Idoneità tecnica (GSHP/BTES)	Ammissibile se classe MCDA $\geq$ “Media” e verifica e indice di sostenibilità termica entro limiti; preferenza per grout ad alta e interassi conformi	Minimizza interferenze e lunghezze; migliora SCOP e stabilità pluriennale
Idoneità tecnica (GWHP/ATES)	Ammissibile se portata sostenibile e ΔT restituzione entro limiti locali; necessaria verifica plume termico e confinamento	Riduce rischi idraulici/idrochimici e ricircolo termico
Congruenza domanda-profilo	BTES/UTES per stagionalità marcata; GWHP per carichi simultanei H&C; GSHP per carichi diffusi e limiti di spazio	Assicura matching energetico e stabilità termica
Vincoli ambientali	Esclusione/penalità in vulnerabilità alta, fasce di rispetto, aree paesaggistiche; gestione sottoservizi in urbano denso	Evita conflitti regolatori e cantieri ad alto rischio
Priorità strategiche	Premialità per PA (scuole, sanità), cluster condominiali e distretti con rete LT	Massimizza ΔCO_2 e fattore di utilizzazione

4.6.2. Logiche di ordinamento e priorità

Il **ranking finale** a scala comunale/sovracomunale è costruito con regole a **strati**:

- **Esclusioni**: candidati che violano soglie (ΔT , distanze, vincoli) o con $M_{ij} < M^*$.
- **Ordine di merito economico**: crescente; in caso di parità, rispetto al BAU; successivamente **VAN** e **TIR**.
- **Criteri ambientali e di sostenibilità**: evitata e **indice di sostenibilità termica** (drift/ ΔT).
- **Criteri strategici** (policy): priorità a PA e cluster con **rete LT** esistente/pianificata; premialità a progetti che chiudono il **bilancio stagionale** tramite BTES/UTES. Il **peso** relativo degli strati 2–4 è reso esplicito in un pannello MCDA (pesi modificabili) per auditabilità e what-if.

4.6.3. Output cartografici e tabellari

Gli output del sistema gestionale sono progettati per supportare decisioni e trasparenza amministrativa:

- **Mappe di priorità** (heatmap e choropleth) del punteggio e dell'alternativa tecnologica preferita, con simbologia condivisa e **metadati ISO 19115**; vista per comune/microzona e layer dei vincoli attivi.
- **Graduatorie** esportabili (CSV/GeoPackage) con **top-N** candidati per comune: codice, coordinate/centroide, tecnologia proposta, KPI principali (LCOH, VAN, ΔCO_2 , UF), stato vincoli e **checklist permitting** (§4.4).
- **Schede cluster**: profilo di carico (baseload/peak), parametri termo-fisici/idrogeologici, dimensionamento di massima (L_T o $I-\Delta T$), rischi e mitigazioni, **impatti economici degli incentivi** (§4.5).
- **Report tematici**: copertura attesa del fabbisogno per tecnologia/scenario, mappa di **gap** domanda/offerta e fabbisogno residuo da rete LT/HT.

5. SINTESI COMPARATIVA DEI CONTESTI-TIPO SELEZIONATI

La comparazione di siti rappresentativi per la geotermia a bassa entalpia in Sicilia richiede una griglia coerente di parametri tecnici, economici e ambientali in grado di connettere il quadro geologico-idrogeologico locale con la domanda termica e con i vincoli regolatori. La scelta di tre archetipi — A) contesto vulcanico, B) isola minore, C) tessuto urbano/produttivo — rispecchia la varietà dei domini presenti nel territorio regionale e nei contesti affini mediterranei, consentendo di inferire regole di progetto trasferibili e di calibrare i pesi dei criteri nel modello MCDA definito nei capitoli precedenti (Casasso & Sethi, 2016; Böttcher et al., 2019; Angelotti & Sterpi, 2024).

Sul piano tecnico, la griglia comune considera: proprietà termo-fisiche dei terreni (λ , $\rho \cdot c$), condizioni idrogeologiche (profondità e dinamica di falda, permeabilità K , qualità chimica), fattori di cantierabilità (profondità utile, perforabilità, spazi e distanze minime), vincoli ambientali e paesaggistici, criteri di interferenza termica/idraulica (closed/open loop), indicatori prestazionali e di sostenibilità (SPF_H/SPF_C, ΔT e bilanciamento stagionale, LCOH, tCO_2 evitate), aspetti regolatori (iter autorizzativi, monitoraggi), e requisiti infrastrutturali per reti termiche a bassa temperatura laddove opportuno (Angelotti & Sterpi, 2024; Bloemendal et al., 2014; Blázquez et al., 2018).

Sul piano geologico, le evidenze regionali confermano che, per la scala “shallow”, la resa impiantistica dipende soprattutto da stratigrafia, stato di saturazione e circolazione idrica nei primi 100–200 m, più che da anomalie profonde, pur rilevanti come contesto termico generale (Floridia et al., 2022). In domini vulcanici (Etna, Arco Eoliano) l’alternanza di lave fratturate e coperture piroclastiche genera mosaici di elevata eterogeneità idrostratigrafica, con opportunità per GSHP e BTES, e, caso per caso, per GWHP/ATES laddove le condizioni lo consentano (Floridia & Viccaro, 2019).

Sul piano regolatorio, rimangono centrali i limiti sullo scarico termico e la tutela delle acque sotterranee per i sistemi open loop, insieme ai requisiti di monitoraggio a lungo termine anche per i closed loop: la prassi nazionale e i contributi tecnici più recenti convergono su protocolli di controllo delle interferenze e della sostenibilità termica nel sottosuolo urbano (Cerutti, 2024; Cerutti, 2025; Casasso & Sethi, 2019).

Le sezioni che seguono presentano, per ciascun archetipo, una sintesi dei tratti geologici e idrogeologici, dei vincoli ed opportunità impiantistiche, della domanda tipica e degli indicatori

prestazionali desumibili da letteratura consolidata e da documentazione tecnica europea e italiana coerente con i capitoli 1–3. Le conclusioni parziali concorrono a tarare le funzioni di valore e i pesi della MCDA.

Tabella 21. Griglia comparativa dei parametri chiave per gli archetipi A–B–C

Dominio	Parametro/Indicatore	Sito A — contesto vulcanico	Sito B — isola minore	Sito C — tessuto urbano/produttivo
Geologia/Termofisica	Conducibilità λ apparente (W/mK)	medio-alta; aumentata in saturazione	variabile (vulcaniti/riempimenti); saturazione determinante	medio; elevata nei livelli sabbiosi saturi
	Capacità termica $\rho \cdot c$ (MJ/m ³ K)	media; ↑ con contenuto d'acqua	media; ↑ in depositi costieri saturi	media-alta in bacini alluvionali saturi
Idrogeologia	Profondità falda tipica (m)	variabile; falde locali e circuiti in fratture	bassa lungo coste; risorsa idrica scarsa all'interno	bassa-media; acquiferi continui con vulnerabilità urbana
	Permeabilità K (m/s)	elevata ma discontinua in lave fratturate; livelli semiconfinati i piroclastici	variabile; attenzione a salinità in fascia costiera	da media (sabbie) a bassa (limi/argille); sensibile a interferenze
	Geochimica	potenziale presenza di CO ₂ /solfati/Fe–Mn; aggressività variabile	rischio salinizzazione e biofouling in open loop	qualità da verificare; possibili inquinanti urbani
Tecnologie	Soluzioni preferibili	GSHP verticali con grout ad alta	GSHP e micro-BTES; ibridazioni con FV/solare termico;	Campi GSHP multi-utenza; ATES in

		λ ; BTES per carichi estivi; GWHP/ATES caso per caso	eventuali seawater-HP per utenze costiere	sedimenti permeabili; reti 5GDHC
	Spaziature minime (indicativo)	6–8 m (da ottimizzare su λ e carico)	5–8 m con cluster compatti	6–10 m; verifica interferenze e confini
Vincoli	Regolatori	ΔT di restituzione, tutela acque; monitoraggi in esercizio	paesaggio, aree protette; vincoli idrici	distanze da sottoservizi; norme scavi/perforazioni; piani comunali
Prestazioni	SPF_H / SPF_C (stagionali)	3.5–5.0 con sonde adeguate e bilanciamento	3.5–4.8 in retrofit severo; >4.5 in nuovo (Buonomano et al., 2015)	3.2–4.5 in reti/condomini con bilanciamento stagionale
Economia	Driver LCOH	λ/K , profondità utile, governance dati e permitting	logistica/isola, densità carichi turistici, costi perforazione	densità di carico, coordinamento lotti, gestione interferenze

Nota: le forchette prestazionali sono derivate da letteratura internazionale e nazionale su sistemi shallow in climi temperati mediterranei e vanno intese come ordini di grandezza per calibrazione MCDA; la validazione locale richiede audit progettuale e monitoraggi (Casasso & Sethi, 2019; Angelotti & Sterpi, 2024).

5.1. Sito A — contesto vulcanico

Quadro geologico-stratigrafico e parametri termo-fisici. I domini vulcanici siciliani (Etna e, per contiguità, Arco Eoliano) presentano successioni di lave basaltiche a tessitura variabile, intercalazioni piroclastiche e livelli alterati che definiscono un mosaico geologico a forte eterogeneità laterale e verticale. La stratificazione alterna orizzonti a elevata fratturazione — con vuoti e condotti preferenziali che incrementano la circolazione d'acqua — a livelli più fini

e/o alterati a comportamento semiconfinato, con effetti diretti sulla resa termica per metro di sonda e sulle condizioni di esercizio dei sistemi a circuito aperto.

Le proprietà termofisiche tipiche riflettono questa variabilità: nelle lave massive o colonnari le λ apparenti sono mediamente favorevoli e crescono in presenza di saturazione, mentre la capacità termica volumica $\rho \cdot c$ è mediamente elevata in livelli saturi o sub-saturi; nei tufi e nelle coperture piroclastiche, le λ tendono a valori medio-bassi a secco e migliorano all'aumentare del contenuto d'acqua, con necessità di abbassare il passo verticale e di utilizzare grout ad alta conducibilità per garantire il trasferimento di calore (Floridia et al., 2022; Casasso & Sethi, 2014).

Idrogeologia e implicazioni impiantistiche. Gli acquiferi vulcanici presentano circuiti freatici complessi, talora artesiani, in prossimità di lineamenti strutturali maggiori; la componente advettiva può migliorare significativamente lo scambio termico locale, ma richiede la progettazione accurata dell'isolamento dei livelli per prevenire cortocircuiti idraulici/termici e l'adozione di grouting e materiali compatibili con geochimiche potenzialmente aggressive (CO_2 disciolta, solfati, ferro-manganese) (Bellia et al., 2015; Apollaro et al., 2012). In tali contesti, GSHP verticali con grout ad alte λ e campi BTES calibrati sui carichi estivi offrono performance robuste; GWHP/ATES risultano praticabili solo dove permeabilità e portate sostenibili sono dimostrate con prove in sito e dove i vincoli sugli scarichi termici consentono ΔT di progetto compatibili (Floridia & Viccaro, 2019; Cerutti, 2024).

Vincoli, permitting e monitoraggio. La dimensione regolatoria è determinante: per i sistemi open loop occorre la verifica del bilancio idraulico e la compatibilità con gli obiettivi di tutela delle acque sotterranee; per i closed loop è crescente l'attenzione a interferenze termiche cumulative e al monitoraggio in esercizio, con raccomandazioni su spazature, profondità utili e protocolli di M&V (monitoring & verification) (Casasso & Sethi, 2019; Angelotti & Sterpi, 2024). In domini vulcanici, si aggiungono vincoli paesaggistici e, localmente, interferenze con tettonica superficiale attiva che orientano a layout compatti e a clusterizzazione dei fori per limitare l'esposizione a movimenti differenziali.

Indicatori prestazionali e casi di letteratura. In climi mediterranei con profili di carico misti, gli SPF stagionali in riscaldamento e raffrescamento risultano tipicamente compresi in forchette 3.5–5.0 per GSHP correttamente dimensionati in lave fratturate e coperture piroclastiche, con miglioramenti sensibili ove il bilanciamento stagionale sfrutta BTES o integrazioni solari (Ahmed et al., 2022; Calise et al., 2021). La microzonazione condotta in ambiti eoliani mostra che la combinazione di indicatori geologico-strutturali e di domanda

consente di individuare sub-aree prioritarie per GSHP e BTES, con profondità ottimali e spaziatore differenziate in funzione di λ e K (Floridia & Viccaro, 2019). Ulteriori contributi da Etna e fianco orientale — per quanto orientati al monitoraggio deformativo — rafforzano la lettura di un sottosuolo altamente eterogeneo con lineamenti attivi che richiedono attenzione progettuale.

Implicazioni per la MCDA. La classe “vulcanica” assegna pesi elevati a λ , $\rho \cdot c$ e K , con penalità su vincoli idrici e paesaggistici e bonus per la disponibilità di cluster compatti in aree extra-urbane, allineando le scelte tecnologiche a GSHP/BTES come baseline e a GWHP/ATES solo dove dimostrate condizioni idrauliche e regolatorie favorevoli (Casasso & Sethi, 2016; 2019; Cerutti, 2024).

5.2. Sito B — isola minore

Quadro geologico-energetico e domanda. Le isole minori mediterranee condividono caratteristiche comuni: patrimoni vulcanici o vulcanoclastici diffusi, risorse idriche limitate e profili di carico dominati dal raffrescamento estivo e dall’ospitalità turistica. In questo contesto, la domanda tende a picchi stagionali elevati, mentre i carichi invernali sono moderati; l’infrastruttura elettrica locale può essere debole o vincolante in punta, rendendo strategico l’impiego di GSHP ad alta efficienza e di accumuli stagionali per modulare i profili (Floridia & Viccaro, 2019; Blázquez et al., 2018).

Condizioni geologiche e implicazioni. La presenza di vulcaniti e di depositi costieri sabbiosi/ghiaiosi introduce condizioni termo-idrauliche variabili: λ favorevoli in livelli saturi, ma discontinuità laterali e potenziali influenze di salinità lungo la costa per i sistemi open loop. In tali scenari, la soluzione baseline è spesso il closed loop (GSHP verticali/orizzontali) con micro-BTES e, quando compatibile, ATES caldo/freddo su livelli sabbiosi con K sufficiente, operando entro ΔT ammissibili e con presidio su intrusioni saline (Beernink et al., 2022; Bloemendal et al., 2014). Laddove si disponga di bacini o di acqua marina, si possono valutare seawater-HP a servizio di reti locali, con adeguate misure anticorrosione e antifouling (Aresti et al., 2022).

Ibridazioni e casi applicativi. La combinazione con solare termico/fotovoltaico e con desalinizzazione/recupero acque abilita poligenerazioni adatte a strutture ricettive e servizi insulari, come evidenziato da studi su isole turistiche italiane con profili simili (Ischia): le simulazioni indicano SPF ed economie migliorative quando gli accumuli e il coordinamento domanda-offerta sono gestiti a scala di struttura o di micro-rete (Buonomano et al., 2015;

Calise et al., 2016; 2021). In parallelo, la microzonazione geotermica a Salina mostra che l'integrazione di indicatori geologici, vincolistici e di accessibilità può selezionare "finestre" cantierabili ad alta resa e ridurre il rischio autorizzativo (Floridia & Viccaro, 2019).

Vincoli e permitting. Nei contesti insulari i vincoli paesaggistici e ambientali (aree protette, siti Natura 2000, fasce costiere) impongono layout minimali e tecniche di perforazione a basso impatto; per gli open loop la scarsità di risorsa idrica comporta verifiche stringenti su bilancio, ΔT e qualità, spesso rendendo preferibile l'opzione closed loop con monitoraggio termico del campo (Cerutti, 2024; Casasso & Sethi, 2019).

Indicatori prestazionali. In scenari di retrofit di strutture ricettive con predominanza di raffrescamento, GSHP e assetti ibridi mostrano SPF_C nell'intervallo $\sim 4-5$ e SPF_H > 3.5 , con LCOH sensibile ai costi di perforazione e alla possibilità di condividere campi/accumuli; in nuova costruzione, SPF > 4.5 sono realistici con terminali a bassa temperatura e involucro performante (Buonomano et al., 2015; Calise et al., 2016).

Implicazioni per la MCDA. La classe "isola minore" attribuisce pesi elevati a domanda estiva e logistica (spazio cantieri, accessibilità, vincoli paesaggistici), mantenendo come discriminante idrogeologico la sostenibilità di eventuali open loop e la presenza di volumi utili per accumulo stagionale (Bloemendal et al., 2014; Beernink et al., 2022).

5.3. Sito C — tessuto urbano/produttivo

Contesto e densità di carico. Nei tessuti urbani/produttivi siciliani (piane costiere, aree metropolitane e distretti industriali) la densità di carico termico è elevata e concentrata, con mix di usi residenziali, terziari e produttivi. Qui la geotermia a bassa entalpia può operare sia come soluzione building-scale (campi GSHP per condomini/poli sanitari) sia come infrastruttura di quartiere tramite reti 5GDHC alimentate da campi sonde e, dove possibile, da ATES caldo/freddo, con vantaggi in termini di flessibilità e load shifting (Blázquez et al., 2018; Calise et al., 2021).

Condizioni geologico-idrogeologiche tipiche. I riempimenti urbani e i depositi alluvionali presentano λ medie e $\rho \cdot c$ buone in saturazione; gli acquiferi superficiali sono spesso continui ma vulnerabili e intersecati da fitti sottoservizi. La sostenibilità impiantistica dipende dalla gestione delle interferenze termiche (in campo e reciproche fra lotti), dal rispetto delle distanze minime e dalla pianificazione a scala comunale per evitare sovraccarichi locali (Angelotti & Sterpi, 2024; Bayer et al., 2019). Gli ATES sono tecnicamente promettenti in sedimenti ad alta K, ma richiedono regole di zoning e coordinamento per bilanciare gli sbilanciamenti termici

stagionali e prevenire “ombre termiche” reciproche (Bloemendal et al., 2014; Beernink et al., 2022).

Permitting, governance e strumenti di pianificazione. In ambito urbano, oltre ai vincoli sulle acque sotterranee e sulle emissioni termiche, pesano le regole su scavi, distanze da fondazioni/sottoservizi e la necessità di un catasto sonde/pozzi affidabile. Metodi e strumenti come G.POT, TAP e rOGER aiutano a mappare potenziale, vincoli e fattibilità, supportando decisioni trasparenti e coordinando la realizzazione di campi in lotti contigui (Casasso & Sethi, 2016; Böttcher et al., 2019; Baralis & Barla, 2024). In Italia si registra un’evoluzione del quadro tecnico-regolatorio con attenzione specifica alla geotermia “shallow”, incluse misure di monitoraggio in esercizio dei closed loop e di gestione delle restituzioni negli open loop (Cerutti, 2024; 2025).

Indicatori prestazionali e reti. La letteratura europeo-italiana su quartieri geotermici indica SPF compresi in ~3.2–4.5 per sistemi distribuiti ben progettati, con miglioramenti quando si implementano strategie di bilanciamento stagionale e accumulo (Blázquez et al., 2018). Per gli ATEs in ambito urbano, l’ottimizzazione della rete di utenti e delle regole di scambio termico tra pozzi caldi e freddi riduce i consumi primari e le emissioni complessive, ma richiede standard di governance per l’uso del sottosuolo (Beernink et al., 2022; Bloemendal et al., 2014).

Implicazioni per la MCDA. La classe “urbano/produttivo” assegna pesi elevati alla densità di carico e agli indicatori di interferenza (distanze, spaziature, presenza di impianti esistenti) e richiede layer informativi ad hoc nel GeoDatabase (catasto perforazioni, sottoservizi, piani scavi), con regole di priorità che privilegiano cluster coordinati e reti di prossimità (Casasso & Sethi, 2016; Baralis & Barla, 2024).

6. SISTEMA GESTIONALE INTEGRATO GIS–MODELLO GEOECONOMICO — BLUEPRINT ARCHITETTURALE

La gestione sostenibile della geotermia a bassa entalpia in Sicilia richiede un sistema informativo capace di integrare basi dati eterogenee, procedure trasparenti di microzonazione e strumenti di analisi geoeconomica orientati alla decisione pubblica e privata. L'architettura proposta combina un GeoDatabase regionale normalizzato, un motore MCDA (Multi-Criteria Decision Analysis) per la produzione di indici e classi di idoneità, servizi applicativi per interrogazione e analisi, e interfacce utente per la consultazione e l'esplorazione di scenari «what-if», in coerenza con gli obiettivi metodologici fissati nei capitoli 1–3. L'impianto è progettato per garantire interoperabilità (standard OGC/INSPIRE), tracciabilità (versionamento dei dataset e delle esecuzioni MCDA), auditabilità dei risultati e aggiornabilità periodica, con particolare attenzione ai domini insulari e vulcanici della regione. L'inquadramento e le finalità discendono dal programma di ricerca e dal disegno dell'indice, che prevedono un deliverable di microzonazione geotermica e un sistema gestionale a supporto della transizione energetica regionale. (Casasso & Sethi, 2016; ENEA RAEE, 2024; INSPIRE, 2007; ISO 19115:2014).

La componente geoeconomica si interfaccia al GIS per comparare alternative localizzative e tecnologiche secondo indicatori energetici, ambientali e finanziari (LCOH, VAN/TIR, payback, tCO₂ evitate), preservando coerenza con i criteri di priorità domanda–risorsa fissati dalla microzonazione. Il sistema deve quindi supportare sia la programmazione pubblica (PAES(C), piani regolatori, programmazione di incentivi) sia la progettazione esecutiva (studi di fattibilità, permitting, M&V), assicurando criteri riproducibili, comparabilità nel tempo e scalabilità territoriale. (Bayer et al., 2019; Calise et al., 2021; Casasso & Sethi, 2019).

6.1. Requisiti e casi d'uso (user stories)

Requisiti funzionali (estratto prioritario).

F1. Ingestione, normalizzazione e catalogazione di dataset geologico-idrogeologici, climatici, energetici, amministrativi e di vincolo, con metadati conformi a ISO 19115 e profilo INSPIRE.

F2. Motore MCDA configurabile: definizione di indicatori, funzioni di valore, pesi e operatori di aggregazione; generazione di punteggi continui e classi operative, con logging dei parametri di run.

F3. Servizi di validazione/QA: controlli di qualità su coerenza geometrica, completezza attributiva, range fisici, unità di misura e cronologia.

F4. Interfacce di consultazione e analisi «what-if» per utenti tecnici e decisori (variazione pesi, soglie, domanda prevista, mix tecnologico) con export di report tabellari/cartografici.

F5. Integrazione del modello geoeconomico: calcolo LCOH e KPI associati per cluster territoriali e siti, con scenari di prezzo e costo.

F6. Versionamento e audit end-to-end: ogni esecuzione produce un identificativo univoco, un pacchetto di esiti, differenze rispetto ai run precedenti e un registro di modifica pesi/funzioni.

F7. Servizi OGC per pubblicazione/riuso (WMS/WFS/WCS/WMTS; OGC API Features) e pacchetti di download (GeoPackage/GeoTIFF) con checksum e README. (ISO 19115:2014; INSPIRE, 2007).

Requisiti non funzionali (selezione).

N1. Interoperabilità: adozione di standard OGC/INSPIRE per dati e servizi;

N2. Prestazioni: risposta < 2 s per interrogazioni a scala comunale e < 10 s per ricalcolo «what-if» su aree sub-provinciali;

N3. Scalabilità: capacità di trattare raster multi-GB e milioni di geometrie con caching/livelli piramidali;

N4. Affidabilità e continuità operativa: RPO ≤ 24 h e RTO ≤ 4 h;

N5. Sicurezza: modello IAM con ruoli e permessi granulari, crittografia in transito e a riposo, audit trail e hardening degli endpoint;

N6. Manutenibilità: configurazioni dichiarative delle run MCDA e test automatizzati di regressione cartografica;

N7. Trasparenza: pubblicazione dei metadati minimi, changelog dei layer e dei run, indicatori di robustezza (sensibilità/instabilità). (Casasso & Sethi, 2016; ENEA RAEE, 2024).

Stakeholder e utenti chiave.

Pubbliche Amministrazioni regionali e locali; Autorità di bacino/ARPA; gestori di reti e utility; progettisti e consulenti geotecnici/idrogeologi; ESCo ed EPC contractor; gestori di patrimoni immobiliari pubblici/privati; ricerca e università. L'assetto regionale richiama il coordinamento multi-ente già delineato per lo sportello geotermico unico e l'aggiornamento dei layer pubblici. (PEARS/PAESC; ENEA RAEE, 2024).

User stories e criteri di accettazione (estratto MoSCoW).

PA regionale (Must). *Come dirigente energia/ambiente voglio una mappa ufficiale di idoneità e priorità per Comune e per microzona così da programmare bandi e incentivi su aree ad alto valore atteso. Criteri:* classi aggiornate ≤ 12 mesi; metadati completi; report di robustezza (sensibilità pesi $\pm 20\%$). (Casasso & Sethi, 2016; ENEA RAEE, 2024).

Comune/Autorità di bacino (Must). *Come responsabile permitting voglio un viewer con maschere «no-go» (tutela captazioni, aree protette, fasce di rispetto, buffer sismici) e prescrizioni tecnologiche così da istruire le pratiche con tempi certi. Criteri:* overlay coerenti; export dei vincoli in GeoPackage; storico delle modifiche. (DM 30/09/2022; INSPIRE, 2007).

Progettista (Must). *Come progettista voglio interrogare il GeoDB per stratigrafie, parametri termo-fisici (λ , $\rho \cdot c$), profondità falda e vincoli, così da dimensionare campi BHE/GWHP/UTES e redigere relazioni geologiche/idrogeologiche. Criteri:* API con query per bounding box e filtri; export CSV/GeoJSON; log delle chiamate. (Casasso & Sethi, 2016; VDI 4640).

ESCo/EPC (Should). *Come ESCo voglio un modulo per il precalcolo del LCOH e KPI energetico-ambientali per cluster candidati così da selezionare investimenti bancabili. Criteri:* scenari multipli di prezzo/costo; template di report; coerenza con classi MCDA. (Bayer et al., 2019; Calise et al., 2021).

Utility (Could). *Come gestore rete voglio la sovrapposizione tra hotspot di domanda termica, cluster geotermici e capacità di rete elettrica così da pianificare connessioni e reti di 4^a–5^a generazione. Criteri:* layer MT/BT aggiornati; stime di taglia per tecnologia; indicatori di picco/stagionalità. (Calise et al., 2021).

Ricerca/Università (Should). *Come gruppo di ricerca voglio accedere a dataset e notebook parametrizzati così da riprodurre run MCDA e proporre miglioramenti metodologici. Criteri:* repository di configurazioni; DOI dei pacchetti dati; licenze chiare. (ISO 19115:2014; ENEA RAEE, 2024).

Vincoli e assunti di progetto.

Allineamento semantico dei dataset regionali; rispetto della riservatezza per dati sensibili (p.es. pozzi privati, captazioni idropotabili); aggiornamento ciclico dei layer ad alto dinamismo (uso suolo, domanda, rete elettrica); compatibilità con il perimetro regolatorio regionale per closed-/open-loop (ΔT di restituzione, distanze, portate). (DM 30/09/2022; VDI 4640).

6.2. Microzonazione geotermica in GIS (integrazione operativa MCDA)

La microzonazione è il ponte operativo tra conoscenza geologico-idrogeologica, domanda locale e scelta tecnologica; le tecniche GIS forniscono l'infrastruttura di integrazione spaziale, mentre la MCDA rende esplicite preferenze e compromessi attraverso funzioni di valore, pesi e operatori di aggregazione. L'implementazione adotta una pipeline standardizzata: raccolta e armonizzazione, calcolo degli indicatori elementari, normalizzazione e scoring, pesatura e aggregazione, classificazione in classi operative, validazione e pubblicazione. (Malczewski, 1999; Eastman, 2009; Casasso & Sethi, 2016; Floridia & Viccaro, 2019; Viccaro et al., 2016; Floridia et al., 2022).

Orchestrazione dei layer e controlli preliminari.

I layer sono portati su una griglia di riferimento (ad es. 50×50 m), con riproiezione comune, resampling documentato e metadati completi (scala, accuratezza, data). Si applicano maschere di esclusione per vincoli inderogabili (aree di salvaguardia idropotabile, siti Natura 2000 incompatibili, pericolosità/instabilità note) e buffer di rispetto per opere sensibili. Ogni passaggio è tracciato (provenance) per assicurare riproducibilità. (INSPIRE, 2007; ISO 19115:2014).

Indicatori e formule di derivazione (schema).

Gli indicatori coprono cinque famiglie: (i) termo-fisica del sottosuolo (λ , $\rho \cdot c$, R_b , ΔT utile), (ii) idrogeologia e sostenibilità idraulica (profondità falda, K , gradienti, vulnerabilità), (iii) vincoli/compatibilità ambientale e d'uso del suolo, (iv) domanda termica e densità di carico, (v) cantierabilità e interferenze. Indicatori specifici sono derivati da stratigrafie, misure piezometriche, prove TRT, carte d'uso del suolo, proxy di domanda (densità edilizia, superficie utile climatizzata, HDD/CDD) e layer infrastrutturali (rete MT/BT). (Casasso & Sethi, 2016; Bayer et al., 2019; ENEA RAEE, 2024).

Normalizzazione e scoring.

La trasformazione $x_i \rightarrow v_i$ (x_i) $\in [0,1]$ avviene con funzioni di valore monotone (lineari, piecewise, sigmoidi) o non monotone ove necessario (intervalli ottimali). Esempi: λ crescente (maggiore conducibilità $\rightarrow$ maggiore idoneità per BHE); profondità falda con funzione «finestra» (GWHP ottimale a profondità intermedie); vulnerabilità con funzione decrescente (maggiore vulnerabilità $\rightarrow$ minore idoneità o esclusione). I parametri di soglia sono

documentati per dominio litologico e sottosistema tecnologico. (Casasso & Sethi, 2016; Malczewski, 1999).

Pesatura e aggregazione.

La pesatura utilizza approcci diretti (budget dei pesi con somma a 1) o derivate da AHP semplificato per gruppi di stakeholder; l'aggregazione adotta operatori additivi compensatori o, per criteri critici, regole di congiunzione (min) o OWA semi-compensative, con verifica di coerenza (no-dominanza, monotonicità). Il punteggio di cella è dato da:

$$S = \sum_{i=1}^n w_i \cdot v_i(x_i)$$

con $\sum_{i=1}^n w_i = 1, w_i \geq 0$

Le maschere di esclusione prevalgono su qualsiasi compensazione. (Malczewski, 1999; Eastman, 2009).

Classificazione e prodotti.

Il punteggio continuo è tradotto in classi operative («non idoneo», «idoneo con vincoli», «idoneo», «prioritario») mediante soglie informate da distribuzioni, obiettivi di copertura e vincoli di sostenibilità; le classi sono restituite per tecnologia (GSHP/GWHP/UTES) e per scenari (pesi/obiettivi). Tra i prodotti derivati: stima di potenza installabile per cella/cluster, prescrizioni tecniche minime (ΔT di esercizio, interassi, distanze da captazioni, monitoraggi), elenco di presidi per permitting. (ENEA RAEE, 2024; DM 30/09/2022; VDI 4640).

Validazione e aggiornamento periodico.

La validazione combina: (i) coerenza interna (test di monotonicità, analisi di stabilità rispetto a variazioni dei pesi $\pm 10-20\%$); (ii) confronto esterno con dati indipendenti (impianti esistenti, prove TRT e portate GWHP, serie termiche osservate); (iii) audit esperto per classi «borderline». La pipeline prevede run di aggiornamento a cadenza annuale o on-demand a fronte di nuove evidenze (nuovi sondaggi, variazioni domanda, revisione normativa); ogni run produce differenze spaziali e statistiche per Comune. (Casasso & Sethi, 2016; ENEA RAEE, 2024).

Tabella 22. Indicatori e layer operativi per la MCDA di microzonazione (estratto)

Famiglia	Indicatore / Layer	Scala tipica	Fonte / Derivazione	Aggiornamento	Note d'uso
Termo-fisica	Conducibilità termica λ ; capacità volumetrica $\rho \cdot c$; resistenza di foro R_b	1:10k–1:50k (raster/vettori)	Stratigrafie, bibliografia, TRT	3–5 anni	Funzioni di valore per litologia
Idrogeologia	Profondità falda; K; gradienti; vulnerabilità	1:10k–1:25k	Piezometri, prove di pompaggio, carte vulnerabilità	1–3 anni	Maschere «no-go» su salvaguardia
Vincoli/ambiente	Aree protette, buffer captazioni, pericolosità/instabilità	1:5k–1:25k	PA regionale/A RPA	continuo	Prevalgono su compensazione
Domanda	Densità edilizia, superficie utile climatizzata, HDD/CDD	comunale/micro zona	Catasto, open data, climatologia	annuo	Driver per priorità
Cantierabilità	Spazi liberi, sottoservizi, accessibilità	1:2k–1:10k	PRG/OSM, rilievi	on-demand	Condizionano BHE/campi
Rete	MT/BT, cabine, limiti potenza	1:10k–1:50k	Gestori rete	1–2 anni	Integrazione con reti 4 ^a –5 ^a gen

(Fonti: Casasso & Sethi, 2016; Bayer et al., 2019; ENEA RAEE, 2024).

6.3. Architettura logica, livelli dati e interfacce

L'architettura logica adotta una stratificazione «dati → servizi → applicazione → presentazione», con separazione netta delle responsabilità, controlli di sicurezza perimetrali e interni, e strumenti di versionamento e audit end-to-end.

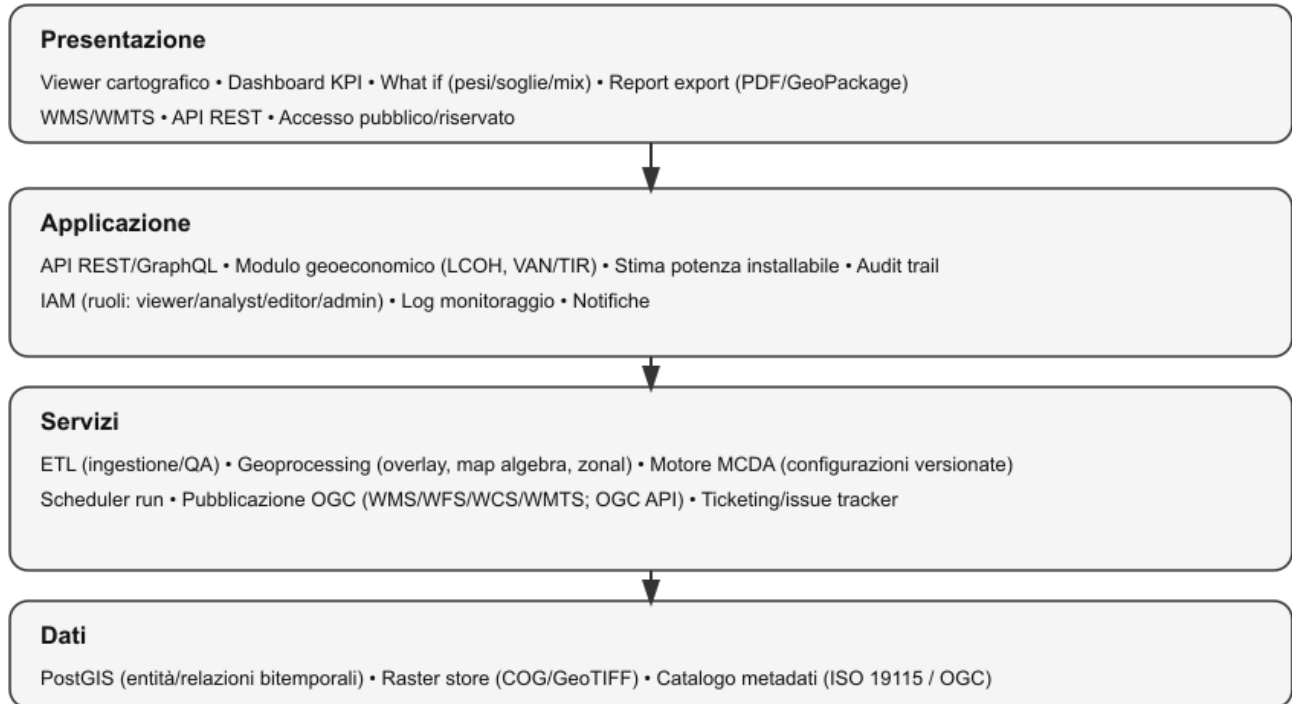


Figura 4. Architettura logica a strati con responsabilità e principali componenti; evidenziati standard di interoperabilità, servizi MCDA e moduli geoeconomici.

Livello Dati. GeoDatabase relazionale (PostgreSQL/PostGIS) per entità e relazioni controllate; storage oggetti per raster/tiles (GeoTIFF, COG) e pacchetti di distribuzione (GeoPackage); catalogo metadati (CSW/OGC API Records) con profilo ISO 19115. Bitemporalità sui record critici (valid_from/valid_to; record_from/record_to) e domini controllati per garantire integrità e coerenza semantica. (ISO 19115:2014).

Livello Servizi. Pipeline ETL dichiarativa (ingestione, controlli, derivazioni); servizi geoprocessing (map algebra; zonal statistics; overlay) e motore MCDA con configurazioni versionate; scheduler per run periodiche e on-demand; servizi OGC (WMS/WFS/WCS/WMTS; OGC API Features/ Tiles/Processes) per pubblicazione; sistema di ticketing per feedback e correzioni. (INSPIRE, 2007).

Livello Applicazione. API REST/GraphQL per consultazione (query spaziali/attributive), analisi (scoring «what-if», stima potenza, LCOH) ed export; moduli di autenticazione/autorizzazione (IAM) con ruoli: *viewer* pubblico, *analyst* (enti/ricerca), *editor* (gestori dato), *admin*; audit trail completo. (Casasso & Sethi, 2016; ENEA RAEE, 2024).

Livello Presentazione. Viewer cartografico e dashboard KPI; strumenti «what-if» per variazione pesi/soglie/mix e confronto tra run; reportistica integrata con indicatori di robustezza. Interoperabilità con portali esterni e pacchetti di download firmati. (ENEA RAEE, 2024).

Integrazione con ecosistemi esterni.

L'esposizione di servizi standard consente l'incorporamento su portali istituzionali e l'uso da parte di strumenti esterni (desktop GIS, notebook analitici). I pacchetti dati includono checksum e README; ogni servizio espone changelog e metadati minimi. Un ciclo di miglioramento continuo è alimentato da un issue-tracker aperto a enti e operatori. (ENEA RAEE, 2024).

Sicurezza applicativa e data governance (cenni).

Il modello IAM disciplina ruoli/permessi, la classificazione dei dati regola la pubblicazione (open/by-request/riservato), l'auditing garantisce rintracciabilità delle modifiche e la continuità operativa è presidiata da backup, replica e test periodici di ripristino. Le politiche di pubblicazione recepiscono le esigenze di tutela delle acque, dei vincoli ambientali e della privacy dove applicabile. (DM 30/09/2022; ENEA RAEE, 2024).

6.3.1. Schema logico del GeoDB e API

Il GeoDatabase è organizzato per domini semantici armonizzati e sottoposti a regole di integrità e versionamento bitemporale (validità reale e validità di registrazione), in modo da garantire tracciabilità delle modifiche, audit delle esecuzioni MCDA e riproducibilità dei risultati (ISO 19115:2014; INSPIRE, 2007). Le entità sono indicizzate spazialmente e temporalmente; la catalogazione avviene mediante metadati minimi conformi a ISO 19115 con estensioni per qualità, provenienza e livello di aggiornamento. L'impianto logico è concepito per interoperare con servizi OGC (WMS/WFS/WCS/WMTS; OGC API Features/Records/Processes) e con il motore MCDA, che persiste configurazioni (indicatori, funzioni di valore, pesi, operatori di

aggregazione) e output (indici continui e classi) nel dominio apposito (Casasso & Sethi, 2016; ENEA, 2024).

Domini e principali entità.

Il dominio **Geologia/Idrogeologia** include *UnitàLitologica*, *Formazione*, *Acquifero*, raster catalogati (*ProfonditàFalda*, *Isopache*), *ConduttivitàIdraulica* (valori puntuali e range) e *Stratigrafia*, con regole topologiche per coerenza tra sondaggi e modelli. Il dominio **Impianti e Opere** comprende *Campo Sonde*, *Sonda BHE*, *Impianto GWHP*, *Pozzo Emungimento*, *Pozzo Reimmissione*, *Linea Scarico*, *Prova TRT* e *Monitoraggio*, con vincoli di prossimità e congruenza idraulico-termica (VDI 4640; UNI 11466/11467/11468). Il dominio **Vincoli/Usi** raccoglie *Vincolo* (tipizzato: paesaggistico, idropotabile, Natura 2000, aree protette, no-go), *Uso Suolo*, *Edificato/Tipologia Utenza* e *Sottoservizi*. Il dominio **Domanda Energetica** contiene *Densità Carico Termico*, *HDD/CDD* e *Cluster Utenze*. Il dominio **MCDA & Prodotti** gestisce *Indicatore* (normalizzato in $[0,1]$), *Funzione Valore*, *Peso*, *Aggregazione* (WLC/OWA), *RunMCDA* (configurazione parametrica), *Indice Idoneità* (raster), *Classe Contesto* (vettoriale), *Mappa Stabilità* e *Audit Record*. Infine, il dominio **Geoeconomico** archivia *Scenario Prezzi*, *Capex/Opex* per tecnologia, *LCOH* e KPI ambiente-energia, con chiavi esterne a *RunMCDA* per garantire coerenza GIS→analisi (ISO 19115:2014; Casasso & Sethi, 2017).

Chiavi, integrità e versionamento.

Ogni entità usa una chiave primaria opaca (UUID) e, quando presente, una chiave naturale (es. *codice Pozzo* del catasto). Le foreign key e i domini controllati evitano record orfani e disallineamenti semantici (es. una *Prova TRT* richiede associazione a *Campo Sonde* e sensore valido). La bitemporalità distingue tra correzioni retrospettive e modifiche reali sul terreno; i delta tra *RunMCDA* successivi sono persistiti come layer differenza e statistiche per Comune, con log dei parametri di run (Casasso & Sethi, 2016; ISO 19115:2014).

Catalogo e qualità.

Metadati minimi: origine, scala/risoluzione, accuratezza posizionale, accuratezza attributiva, data di acquisizione, frequenza di aggiornamento, licenza. Indicatori di qualità: completezza, coerenza topologica, coerenza temporale, stabilità del punteggio MCDA rispetto a variazioni $\pm 10\text{--}20\%$ dei pesi; per le serie idrochimiche e piezometriche si registrano procedure di controllo, outlier e trasformazioni (Apollaro et al., 2024; ENEA, 2024).

API: endpoint, formati e controlli.

Gli endpoint sono esposti come **OGC API Features** per interrogazioni spaziali/attributive e **OGC API Processes** per task asincroni (es. run MCDA); un'API REST proprietaria gestisce

funzioni applicative (export, stima potenza, LCOH). Filtri: *bbox*, *datetime*, *q* (ricerca testuale), *where* (es. dominio = 'vulcaniti' AND profondita_falda BETWEEN 10 AND 40), *limit/offset*, *orderby*. Formati: GeoJSON, CSV, GeoPackage; raster via COG/GeoTIFF. Controlli: throttling, quote per ruolo, logging per audit e campi obbligatori su input (ISO 19115:2014; INSPIRE, 2007).

Tabella 23. Endpoint e payload principali dell'API (estratto)

Endpoint	Metodo	Funzione	Parametri/Body (estratto)	Output	Controlli
/features/{layer}	GET	Query spaziale/attributiva	bbox, datetime, where, limit, offset, orderby	GeoJSON/CSV	Rate limit; filtro per ruolo
/mcda/run	POST	Avvio esecuzione MCDA	JSON: indicatori, pesi, funzioni, aggregazione, maschere	run_id	Validazione schema; firma input
/mcda/result/{run_id}	GET	Recupero risultati	format (GeoTIFF/GeoPackage), products	Raster + vettori	Verifica permessi su run_id
/export/cluster	POST	Export cluster e KPI	JSON: geoms, tech, kpi	ZIP (GPKG+PDF)	Consistenza geometrie
/potenza/stima	POST	Stima potenza installabile	JSON: geoms, tech, ΔT , interassi	Report JSON/PDF	Range fisici, coerenza norme
/catalog/metadata/{id}	GET	Metadati dataset	format (ISO 19115/JSON)	XML/JSON	Accesso pubblico
/validazione/serie	POST	QA su serie idrochimiche	JSON: serie, metodo	Report qualità	Regole di outlier/duplicati

Le chiamate che incidono su risultati ufficiali (/mcda/run, /export) richiedono firma digitale dell'input e tracciamento *hash* per garantire non ripudio; i risultati sono marcati con versione dei dataset e degli algoritmi.

Criteri prestazionali.

Indici spaziali per tutti i layer di grandi dimensioni; piramidi di tile per raster; *caching* lato server per query ripetute; paginazione e *streaming* per export; job asincroni per ricalcoli «what-if». Tempi obiettivo: <2 s per query comunali, <10 s per ricalcolo su aree sub-provinciali.

Allineamento con contesti vulcanici e insulari.

Il modello logico consente layers specifici per vulcaniti (parametri termo-fisici per unità e tessiture), profondità falda costiera e gradienti, oltre a indicatori di rischio idrochimico/biologico in open-loop con criteri di esclusione/mitigazione (Floridia & Viccaro, 2019; Apollaro et al., 2024).

6.3.2. Interfacce utente (wireframe)

Le interfacce servono due classi di utenti: tecnici che eseguono analisi e decisori che richiedono lettura sintetica e *what-if* controllato. Il viewer cartografico fornisce strumenti di interrogazione, trasparenza sugli strati e maschere «no-go»; la dashboard espone KPI e confronti per microzona/Comune; gli strumenti *what-if* permettono variazioni guidate di pesi, soglie e mix tecnologico entro *guard-rail* metodologici (ENEA, 2024).

Wireframe — viewer cartografico e dashboard KPI.

Il viewer presenta pannello layer, legenda dinamica, riquadro filtri (bbox, dominio, classe), *feature info* contestuale e *split view* per confronto tra run; la dashboard contiene grafici di distribuzione delle classi, stime di potenza e mappe di instabilità. Gli *alert* segnalano sovrapposizioni con vincoli inderogabili. L'accessibilità è garantita da colori con contrasto sufficiente, comandi da tastiera e descrizioni testuali brevi (INSPIRE, 2007).

Flussi d'interazione e usabilità.

I flussi prioritari: (i) interrogazione di microaree con *feature info* e prescrizioni; (ii) confronto di run con slider pesi e soglie; (iii) selezione di cluster e generazione del pacchetto di export per permitting; (iv) consultazione dei metadati e del changelog. Requisiti: coerenza icone/terminologia, tempi di risposta coerenti con gli obiettivi prestazionali, possibilità di salvare e condividere viste, modalità *stampa* ottimizzata, localizzazione in italiano e inglese. L'accesso per decisori espone KPI sintetici e narrazione breve con riferimenti alle classi MCDA e alle condizioni d'uso (ENEA, 2024; INSPIRE, 2007).



Figura 5. Wireframe del viewer GIS e della dashboard KPI: layout funzionale del viewer e della dashboard con strumenti *what if* e componenti principali.

6.4. Sicurezza e data governance

La sicurezza e la *data governance* sono strutturate su quattro assi: **Identity & Access Management, classificazione dei dati e politiche di pubblicazione, auditing e tracciabilità end-to-end, continuità operativa e gestione del rischio**. Le politiche recepiscono i vincoli ambientali e sanitari, nonché le prassi per i sistemi geotermici a bassa entalpia in closed- e open-loop, con particolare attenzione all'interferenza idraulica/termica e ai rischi idrochimici (VDI 4640; UNI 11466/11467/11468; DM 30/09/2022).

Identity & Access Management (IAM).

Ruoli: *pubblico* (consultazione di mappe e metadati), *viewer istituzionale* (accesso vincoli estesi), *analyst* (strumenti *what-if* e download completi), *editor* (aggiornamento dataset con workflow di approvazione), *admin* (gestione ruoli/policy). Autenticazione a due fattori per ruoli elevati, scadenza credenziali, *least privilege* e segregazione tra ambienti (sviluppo/test/produzione). Tracciamento di tutte le azioni sensibili con time-stamp e riferimento a versione dati/algoritmi (ENEA, 2024).

Classificazione e pubblicazione.

Classi: *Open* (mappe di sintesi e metadati), *By-request* (layer con potenziali ricadute su proprietà/rischio), *Riservato* (dati sensibili: coordinate pozzi privati, captazioni idropotabili, serie idrochimiche con identificativi). Le politiche di pubblicazione aderiscono a INSPIRE e allineano licenze, citazioni e riuso; le mappe ufficiali riportano la versione dei dati e il *run_id* del MCDA. Per gli open-loop si richiede esplicito avviso su limiti d'uso, ΔT di restituzione e distanze dai punti sensibili (INSPIRE, 2007; DM 30/09/2022).

Auditing e tracciabilità.

Ogni *RunMCDA* è accompagnato da *manifest* con hash degli input, versione dei dataset, funzioni di valore, pesi, operatori, soglie e risultati; i *manifest* sono conservati nel dominio *Catalogo & Audit* con DOI interno. Eventuali aggiornamenti di misure piezometriche o idrochimiche sono versionati per data di campionamento e data di registrazione, con procedure QA su duplicati/outlier e *gap filling* documentato (Apollaro et al., 2024; ISO 19115:2014).

Continuità operativa e rischio informatico.

Obiettivi: $RPO \leq 24$ h e $RTO \leq 4$ h, con *backup* giornalieri su *object storage* geo-ridondato, verifica periodica dei ripristini e *warm standby* per servizi critici. Hardening degli endpoint, cifratura in transito e a riposo, gestione delle vulnerabilità con ciclo di patching mensile e risposta a incidenti. Per i layer dinamici (domanda, rete elettrica) sono previsti piani di

aggiornamento e validazione accelerati. *Stress test* periodici simulano picchi di richieste e ricalcoli simultanei (ENEA, 2024).

Governance per contesti vulcanici/insulari.

La *governance* include protocolli per qualità del *grout* e per la verifica di stabilità nelle aree con microdeformazioni attive, oltre a regole idrochimiche per open-loop (es. precipitazioni di carbonati, ossidi di ferro, metano disciolto) con soglie operative e piani di monitoraggio associati. L'integrazione nel GIS di indicatori di pericolosità geotecnica/vulcanica e di serie idrochimiche consente criteri di esclusione/mitigazione trasparenti nelle istruttorie (Florida & Viccaro, 2019; Piga et al., 2017; Apollaro et al., 2024).

Trasparenza e responsabilità.

Tutte le mappe pubblicate riportano data/ora di generazione, versione del dataset, autore della *run*, note metodologiche sintetiche e *link* ai metadati completi. I dati di origine esterna sono accompagnati da citazione e, quando disponibili, DOI; i pacchetti di export includono README e checksum.

6.5. Applicazione del modello geo economico

La valutazione geoeconomica delle alternative localizzative e tecnologiche integra i risultati della microzonazione MCDA con indicatori energetici e finanziari comparabili, consentendo decisioni trasparenti per Pubbliche Amministrazioni, progettisti ed ESCo. Il modello è concepito come servizio applicativo integrato al GIS: riceve in input i cluster territoriali e i parametri tecnico-normativi per ciascuna tecnologia (GSHP a sonde verticali/orizzontali, GWHP in open-loop, UTES/BTES/ATES) e restituisce misure di costo del calore, metriche economico-finanziarie e indicatori ambientali (tCO₂ evitate), rispettando i vincoli idraulico-termici e le prescrizioni della microzonazione (VDI 4640; DM 30/09/2022; Casasso & Sethi, 2016).

Funzione obiettivo e vincoli

La funzione obiettivo primaria è la minimizzazione del **costo livellato del calore** (LCOH) per sito/tecnologia, con obiettivi secondari su rischio, emissioni evitate e allineamento a domanda locale. Per l'alternativa k in un cluster c :

$$LCOH_{k,c} = \frac{CAPEX_{k,c} \cdot CRF(i,n) + OPEX_{k,c} + CostiVariabili_{k,c}}{Q_{k,c}^{utile}}$$

con **CRF** (Capital Recovery Factor) = $i(1+i)^n / ((1+i)^n - 1)$; Q^{utile} è il calore utile annuo consegnato all'utenza. L'ottimizzazione è soggetta a vincoli tecnologici/normativi (profondità massime, interassi minimi, ΔT di esercizio e di restituzione, distanze da captazioni e corpi idrici), a vincoli idraulici (drawdown, portate sostenibili, interferenze) e a vincoli ambientali (aree no-go, tutele) come determinati dal GIS e dal motore MCDA (VDI 4640; UNI 11466/11467/11468; DM 30/09/2022).

L'obiettivo può essere esteso a una forma **multi-obiettivo** con pesi dichiarativi, per esempio minimizzazione di LCOH e massimizzazione delle tCO₂ evitate per euro investito, con frontiera di Pareto calcolata per sottoinsiemi di alternative con idoneità MCDA $\geq$ soglia (Bayer et al., 2019; Calise et al., 2021).

Struttura dei parametri e interfacce con il GIS

Gli input sono gerarchici: (i) **parametri di sito** estratti dal GeoDB (λ , ρ_c , R_b , profondità falda, vulnerabilità, vincoli, domanda locale, mix esistente), (ii) **parametri tecnologici** (COP/EER nominali e stagionali, rendimenti di sottosistemi, interassi e geometrie di campo, schemi idraulici), (iii) **parametri economico-finanziari** (CAPEX scomposto per work package, OPEX fissi/variabili, prezzi energia, WACC/tasso di sconto, vita utile, profili inflazione), (iv) **policy e tariffe** (incentivi, detrazioni, prezzi ETS, oneri concessori). Il connettore GIS→modello applica controlli di coerenza e normalizza le unità di misura in fase di ingestione (ISO 19115:2014; INSPIRE, 2007).

Gli scambi avvengono tramite API interne: l'ID del **RunMCDA** è passato al modello per garantire tracciabilità; il modello restituisce un **manifest** con i KPI, le assunzioni, la versione dei dati e l'intervallo di validità. Per GWHP si innestano moduli aggiuntivi di rischio idrochimico (scala/carbonati, ferro-manganese, gas disciolti) con regole di derating tecnico/economico secondo letteratura (Apollaro et al., 2024).

Calcoli energetici e dimensionamento sintetico

Per ogni alternativa valida, il modello calcola energia utile annua e potenza di progetto coerenti con i vincoli MCDA. Esempi:

- **GSHP con sonde verticali (BHE):** $Q^{utile} = P_{BHE} \tau \eta_{sistema}$, con P_{BHE} derivata da TRT o da parametri λ , R_b e ΔT ammissibile; i vincoli definiscono interassi minimi, numero di sonde, profondità massime (VDI 4640; Casasso & Sethi, 2016).
- **GWHP (open-loop):** $Q^{utile} = \dot{m} c_p \Delta T \eta_{sistema}$, con $\dot{m} \leq$ portata sostenibile e ΔT rispettoso dei limiti di restituzione; si applicano penalità economiche per rischio di

incrostazioni/ossidazioni o gas, e per misure aggiuntive di filtrazione/aerazione (Apollaro et al., 2024; DM 30/09/2022).

- **UTES (BTES/ATES)**: bilanci energetici stagionali con efficienza di round-trip; compatibilità stratigrafica e capacità termica del volume utile condizionano taglia e LCOH (Bayer et al., 2019).

I **carichi** sono ricavati dal layer «Domanda» (densità edilizia, SUC climatizzata, HDD/CDD) e traslati in profili orari/settimanali per verificare coperture, picchi e fattori di carico, in coerenza con la classe MCDA del contesto. Dove disponibili, i **modelli termici 3D** calibrati su Sicilia migliorano la stima del gradiente e del campo termico profondo a supporto dell'analisi di sensitività (Floridia et al., 2022; Viccaro et al., 2016).

Scenari di costo e prezzo

Il modello implementa **scenari** combinando curve di prezzo elettrico/gas, evoluzione dell'ETS, incentivi, CAPEX per unità di profondità/sonda/pozzo e OPEX (manutenzione, energia, gestione acque). Gli scenari «Base/Alto/Stress» sono associati a probabilità soggettive e alimentano la stima di **LCOH atteso** e intervalli di confidenza. Gli scenari territoriali considerano premium/malus per cantierabilità (centri storici vs aree periurbane), per vincoli ambientali e per complessità idrogeologica (ENEA RAEE, 2024; Calise et al., 2021).

Output e confronti

Gli output per alternativa includono: LCOH, VAN/TIR su orizzonte, payback scontato, CAPEX/OPEX per voce, tCO₂ evitate/anno e per MWh utile, indicatori di rischio (technical risk score per GWHP), **classe di coerenza MCDA** (idoneità, vincoli, priorità). I confronti sono restituiti in tabelle e grafici sintetici e nel viewer come layer tematici (isocrone di LCOH, mappe «miglior alternativa» per Comune/microzona) (Casasso & Sethi, 2016; ENEA RAEE, 2024).

Aggiornabilità e manutenzione del modello

La configurazione (funzioni di costo, parametri elettrici, fattori CRF, limiti normativi) è **versionata**; ogni ricalcolo «what-if» produce differenze rispetto al run di riferimento. La **validazione** include: coerenza con benchmark bibliografici e casi reali regionali; test di sensitività su ± 10 -20% dei principali driver (CAPEX unitario, prezzo elettrico, COP/EER); controllo di compatibilità con gli esiti MCDA e con le prescrizioni VDI/UNI (VDI 4640; UNI 11466/11467/11468).

6.6. Piano di implementazione

Il percorso di realizzazione è articolato per fasi incrementalì, con rilasci verificabili e tracciabilità verso i requisiti funzionali (F1–F7) e non funzionali (N1–N7). Le attività sono organizzate in *epiche* e *user stories*, con gestione del rischio e dipendenze tecniche/organizzative. L'adozione di configurazioni dichiarative per MCDA e di *pipeline* ETL ripetibili consente iterazioni rapide e auditabili (ISO 19115:2014; INSPIRE, 2007).

Roadmap e deliverable

Fase 0 – Setup & Governance (M1–M2). Istituzione del Comitato di indirizzo, policy di *data governance*, piano QA, definizione IAM, design logico del GeoDB e *skeleton* API (*Deliverable*: Piano di governance, Schema GeoDB v0.1, API contract v0.1).

Fase 1 – Ingestione & Catalogo (M2–M5). ETL dei dataset prioritari (geologia/idrogeologia, vincoli, domanda, rete), metadati ISO 19115, validazioni topologiche/attributive, *tiling* raster COG (*Deliverable*: GeoDB v1.0 con domini base; Catalogo metadati; report QA).

Fase 2 – MCDA v1 (M4–M7). Configurazione indicatori/funzioni di valore/pesi, prime *run* su aree pilota, produzione di classi operative per GSHP/GWHP/UTES e validazione interna (*Deliverable*: Classi MCDA v1 pilota; report robustezza).

Fase 3 – Viewer & API pubblicazione (M6–M8). Viewer cartografico, servizi OGC/OGC API, export GeoPackage/GeoTIFF, *feature info* e *split view* (*Deliverable*: Portale pilota; manuale utente).

Fase 4 – Modello geoeconomico v1 (M7–M9). Implementazione LCOH/VAN/TIR, scenari Base/Alto/Stress, moduli rischio GWHP; integrazione *what-if* nel viewer (*Deliverable*: Modulo geoeconomico v1; dashboard KPI).

Fase 5 – Estensione & Hardening (M9–M12). Allargamento regionale, ottimizzazioni performance, *hardening* sicurezza, procedure di *backup/restore* e *disaster recovery* (*Deliverable*: Sistema v1.0 regionale; esiti test DR).

Fase 6 – Test integrati & Go-Live (M12). Collaudo con dataset indipendenti, test di carico, *acceptance* multi-ente; messa in esercizio e *handover* operativo (*Deliverable*: Verbale di accettazione; piano esercizio).

6.6.1. *Backlog*

Il backlog è interpretato attraverso quattro chiavi: **valore** (priorità per impatto), **rischio** (tecnico/organizzativo), **dipendenze** (sequenza e blocchi) e **criteri di accettazione** (DoR/DoD). La Tabella 24 riporta epiche e user stories ordinate secondo queste dimensioni.

Definition of Ready (DoR). Story con requisiti chiari, fonti dati identificate, schema/contract API concordato, criteri di accettazione testabili, *owner* e dipendenze esplicite.

Definition of Done (DoD). Test unit/integration passati; metadati ISO 19115 aggiornati; changelog; documentazione utente e *runbook* operativi; sicurezza/IAM verificata su ruolo target.

Tabella 24. Backlog (epiche e user stories, valore/risco, DoR/DoD)

ID	Epica / User Story	Valore	Rischio	Dipendenze	DoR / DoD
E1	ETL & Catalogo dati prioritari (geologia, falda, vincoli, domanda)	Alto	Medio	Governance (F0)	DoR: fonti e licenze; DoD: GeoDB v1, ISO19115, QA report
E2	MCDA v1 su aree pilota (indicatori, funzioni, pesi)	Alto	Medio	E1	DoR: indicatori; DoD: classi MCDA v1 + robustezza
E3	Viewer & OGC API	Alto	Basso	E2	DoR: contract API; DoD: portale pilota, manuale
E4	Modello geoeconomico v1 (LCOH/VAN/TIR)	Alto	Medio	E2-E3	DoR: parametri economici; DoD: dashboard KPI, export
E5	Rischio idrochimico GWHP e prescrizioni	Medio	Medio	E1-E2	DoR: serie idrochimiche; DoD: regole derating e report
E6	Estensione regionale & performance	Alto	Medio	E1-E4	DoR: risorse; DoD: tempi target, test carico
E7	Hardening sicurezza & DR	Alto	Basso	E3-E6	DoR: policy IAM; DoD: test DR, audit trail

6.6.2. Piano di test e validazione

Il piano si fonda su quattro assi operativi: (1) definizione di **metriche chiave** misurabili, (2) impiego di **dataset indipendenti e benchmark** per la verifica esterna, (3) **test di componente** per ciascun modulo e (4) **test di sistema** end-to-end sull'intera catena ingestione→MCDA→viewer→modello geoeconomico→export, cui si affiancano tracciamento delle non conformità e miglioramento continuo.

Metriche chiave. (i) **Accuratezza** geospaziale/attributiva (errori posizionali, completezza, coerenza topologica); (ii) **Robustezza MCDA** (stabilità del punteggio/classi con variazioni pesi $\pm 10\text{--}20\%$); (iii) **Prestazioni** (latenza query e ricalcoli «what-if»); (iv) **Coerenza normativa** (ΔT di restituzione, interassi, distanze da captazioni); (v) **Affidabilità** (RPO/RTO); (vi) **Validazione geoeconomica** (LCOH rispetto a benchmark).

Dataset indipendenti e benchmark. Prove TRT non usate in taratura, portate GWHP da casi reali, misure piezometriche non impiegate in fase di costruzione dei layer, gradienti e modelli 3D termici regionali disponibili in letteratura (Floridia et al., 2022); confronti con esperienze di microzonazione e pianificazione geotermica a scala mediterranea (Viccaro et al., 2016; Floridia & Viccaro, 2019).

Test di componente. ETL (controlli schemi, unità, domini); geoprocessing (overlay/zonal/statistiche); motore MCDA (normalizzazione/pesi/aggregazioni); API (filtri, paginazione, formati); viewer (feature-info, rendering); modello geoeconomico (CRF, LCOH, VAN/TIR, scenari, derating GWHP).

Test di sistema. *End-to-end* su aree pilota: ingestione→MCDA→viewer→modello geoeconomico→export. Test di carico (≥ 100 richieste concorrenti) e *stress* (ricalcoli simultanei). Validazione normativa con check automatici e revisione esperta (VDI 4640; UNI 11466/11467/11468; DM 30/09/2022).

Tracciamento non conformità e miglioramento. Ogni difformità genera un *ticket* con gravità, cause, rimedio e *owner*; la chiusura richiede *retest* e aggiornamento documentazione. Indicatori di qualità e *trend* sono pubblici (ENEA RAEE, 2024).

Tabella 25. Matrice test/accettazione (estratto)

Ambito	Caso di prova	Metodologia	Criterio di accettazione
MCDA	Stabilità classi	Sensibilità pesi $\pm 20\%$	$\geq 90\%$ celle stabili nella stessa classe o contigue
Geoeconomico	LCOH GSHP 50–150 m	Confronto benchmark e casi reali	Deviazione $\leq \pm 15\%$
GWHP	ΔT restituzione e portata	Simulazione idraulico-termica	Rispetto limiti e derating applicato
API	Filtri bbox/datetime/where	Test unit & integration	100% test pass; latenza < 2 s
Viewer	Render classi/legend	Prove utente	No errori; WCAG colore
Sicurezza/DR	Backup/restore & IAM	Esercitazioni trimestrali	RPO ≤ 24 h; RTO ≤ 4 h

6.6.3. Replicabilità e scalabilità

Gli aspetti che garantiscono replicabilità e scalabilità del sistema sono: **standardizzazione e portabilità, scalabilità prestazionale, qualità e sicurezza in scala, condizioni per il riuso.**

Standardizzazione e portabilità. Il sistema adotta formati aperti e standard OGC/INSPIRE, schema logico documentato e *IaC* per ambienti (dev/test/prod). Il *packaging* dei dataset (GeoPackage/COG) e delle configurazioni MCDA/geoeco consente la migrazione verso altre regioni con adattamenti minimi (INSPIRE, 2007; ISO 19115:2014).

Scalabilità prestazionale. Indici spaziali e *tiling* per raster; *caching* e *materialized views* per query ripetute; job asincroni per ricalcoli. Architettura *cloud-ready* con *auto-scaling* di servizi stateless e *replica* per PostGIS; obiettivi di latenza come in N2 (prestazioni).

Qualità e sicurezza in scala. Politiche IAM federabili (SAML/OIDC), log/audit centralizzati, *secret management* e *hardening* degli endpoint. Linee guida per l'anonimizzazione dei dati sensibili (coordinate pozzi privati, ubicazione captazioni). Procedure DR su più **zone** geografiche.

Condizioni per il riuso. Documentazione completa (manuali, runbook, data dictionary, esempi di configurazione MCDA/geoeco), *sample data* e *notebook* riproducibili. Contratti API stabili e versionati; licenze d'uso e *disclaimer* chiari.

7. DISCUSSIONE

La transizione verso un sistema energetico regionale più efficiente e resiliente richiede che i risultati tecnico-scientifici e gestionali ottenuti nei capitoli precedenti siano letti in chiave integrata, ponendo in relazione la microzonazione geotermica, l'architettura informativa GIS-MCDA, il modello geo-economico e il quadro regolatorio. In Sicilia, la coesistenza di domini vulcanici e sedimentari/carbonatici, la stagionalità dei carichi termici e la varietà degli usi finali impongono un approccio che ottimizzi il rapporto domanda-risorsa preservando la sostenibilità idraulica e termica del sottosuolo. Il blueprint proposto — che combina GeoDatabase regionale, metodi di scoring multicriterio, regole di matching domanda/offerta, strumenti di governance e monitoraggio — deve essere valutato per robustezza rispetto a incertezze sui dati e variabilità dei parametri, per capacità di riduzione del rischio nelle decisioni pubbliche e private, e per allineamento con standard tecnici e policy europee e nazionali (ENEA RAEE 2024; DM 30/09/2022; UNI 11466/67/68).

Le evidenze tecniche ed economiche raccolte indicano che: (i) il sottosuolo siciliano consente la diffusione di GSHP con performance più favorevoli in litologie vulcaniche fratturate e in acquiferi granulari; (ii) configurazioni ibride con reti di 5a generazione e accumuli stagionali riducono fabbisogni energetici e costi livellati in presenza di carichi sbilanciati; (iii) i rischi dominanti riguardano interferenze termiche in aree dense e criticità idrochimiche nei sistemi open-loop, mitigabili con M&V e scelte progettuali conservative; (iv) un GeoDB interoperabile alimentato da misure e un MCDA auditabile abilitano graduatorie domanda-risorsa e programmazione selettiva. Conclusioni coerenti con la letteratura disponibile su Sicilia e arcipelaghi vulcanici e studi condotti con i metodi G.POT/TAP (Floridia et al., 2022; Floridia & Viccaro, 2019; Casasso & Sethi, 2016).

7.1. Evidenze e robustezza del blueprint

Sul piano tecnico, le analisi condotte indicano che, alla scala “shallow”, il sottosuolo siciliano è ampiamente compatibile con la diffusione di sistemi GSHP in configurazione closed-loop, con prestazioni più favorevoli nei contesti a litologia vulcanica fratturata e negli acquiferi granulari ben sviluppati, a condizione di un corretto dimensionamento e dell'impiego di materiali per il grouting ad alta conducibilità (Floridia et al., 2022; Casasso & Sethi, 2014). In domini vulcanici

attivi e nelle aree insulari mediterranee, l'esperienza accumulata suggerisce soluzioni ibride e la clusterizzazione delle utenze per bilanciare i carichi stagionali, con benefici tangibili quando si integra BTES/ATES o si adottano reti di 5a generazione con pompe di calore (Calise et al., 2021; Buonomano et al., 2015; Beernink et al., 2022). In queste condizioni, le rese specifiche e i fattori di prestazione stagionali rientrano negli intervalli riportati dagli studi mediterranei, con vantaggio comparato rispetto a chiller aria-acqua nei periodi caldi, mentre l'impiego di grout ad alta λ consente di contenere la lunghezza equivalente del campo sonda a parità di carico (Calise et al., 2021; Buonomano et al., 2015; Casasso & Sethi, 2014).

Dal punto di vista idrogeologico, la fattibilità degli open-loop (GWHP/ATES) rimane fortemente sito-specifica e dipende da portate sostenibili, qualità chimica e limiti sugli scarichi termici. In ambienti vulcanici, una geochemica talora aggressiva — ricca in CO₂, solfati e specie come Fe-Mn — impone scelte oculate sui materiali e un monitoraggio attento, come evidenziato da casi in sistemi vulcanici e in contesti termali dell'Italia meridionale (Bellia et al., 2015; Apollaro et al., 2012). In ambiti urbani complessi, aspetti microbiologici e fenomeni di incrostazione possono condizionare l'operatività dei GWHP, rafforzando la centralità di protocolli di misura e verifica e di piani di gestione adattativa (Barnett et al., 2023; Cappellari et al., 2022). Quando gli indicatori idrochimici o microbiologici risultano sfavorevoli, la riconfigurazione in closed-loop elimina il percorso idraulico e mantiene l'opzione geotermica con rischio controllato (VDI 4640; UNI 11466/67/68).

Sul versante della domanda e dei benefici energetico-ambientali, la stagionalità siciliana — con raffrescamento estivo in crescita e riscaldamento invernale moderato — valorizza GSHP reversibili e reti di condivisione termica. Le simulazioni disponibili su reti di 5a generazione con integrazione solare e scambi geotermici mostrano riduzioni dei consumi e dei costi livellati coerenti con gli obiettivi RED/EPBD, fornendo un quadro di riferimento per gli indicatori energetici e ambientali da adottare nei cruscotti (Calise et al., 2021; ENEA RAEE 2024). In termini di esiti energetici ed economici, questo profilo domanda-risorsa conferisce un vantaggio strutturale al blueprint, che indirizza le priorità verso cluster turistici costieri ed edilizia pubblica con carichi estivi, dove l'ibridazione con accumuli stagionali amplifica i risparmi (Calise et al., 2021; ENEA RAEE 2024).

Sotto il profilo metodologico, il motore MCDA — popolato con indicatori termici (λ , $\rho \cdot c$, profondità utile), idrogeologici e ambientali (permeabilità, gradienti, vulnerabilità e vincoli), oltre a domanda e cantierabilità — mostra la capacità di produrre mappe di idoneità coerenti e auditabili. L'adozione di approcci consolidati (G.POT per la componente conduttiva; TAP per gli acquiferi; metodi di pesatura/aggregazione e sensitivity testing) riduce il rischio di arbitrarietà e consente confronti trasparenti tra scenari territoriali (Casasso & Sethi, 2016; Böttcher et al., 2019; Angelotti & Sterpi, 2024). Le verifiche di sensibilità multi-scenario confermano la stabilità delle graduatorie entro variazioni ragionevoli dei pesi e delle funzioni di valore; dove emergono componenti sensibili, il blueprint prevede consultazioni mirate con gli stakeholder per la taratura di contesto (Casasso & Sethi, 2016; Angelotti & Sterpi, 2024). L'impostazione recepisce gli standard INSPIRE/ISO per metadati e interoperabilità del GeoDB, garantendo tracciabilità e riuso dei dataset (Direttiva INSPIRE; ISO 19115).

Nel quadro geologico-strutturale, per i contesti etnei l'integrazione di layer di pericolosità tettonica superficiale e di deformazione del suolo — derivati da reti GNSS/InSAR e dalla letteratura geodinamica — indirizza cautele localizzate sul layout delle perforazioni e sulle soluzioni open-loop, riducendo le interferenze con strutture attive. L'esperienza di Salina e le modellazioni termiche 3D regionali indicano che la variabilità termo-fisica a piccola scala può essere gestita mediante funzioni di valore e spaziature adeguate dei campi sonda, preservando le prestazioni nel medio periodo (Floridia & Viccaro, 2019; Floridia et al., 2022). Questo presidio consente di mantenere il rischio geotecnico entro livelli accettabili senza sacrificare il potenziale locale, privilegiando layout compatti e profondità utili compatibili con i vincoli.

Sul piano regolatorio e della governance, le semplificazioni per le piccole utilizzazioni geotermiche introdotte dal DM 30/09/2022, se integrate con linee guida UNI/VDI e con una cabina di regia regionale, definiscono un perimetro chiaro per pianificazione e qualità progettuale: sportello unico, tempi certi, checklist e layer pubblici aggiornati riducono incertezza e costi transattivi, facilitando l'adozione da parte di pubbliche amministrazioni e operatori (DM 30/09/2022; UNI 11466/67/68; VDI 4640; ENEA RAEE 2024). La combinazione tra mappe MCDA e requisiti tecnici omogenei si traduce in percorsi autorizzativi più prevedibili e in migliore bancabilità dei progetti per ESCo e finanziatori (ENEA RAEE 2024; VDI 4640).

Quanto alle obiezioni ricorrenti, le perplessità su eterogeneità termo-fisica, interferenze in aree dense e rischi dei GWHP trovano risposta nel disegno del blueprint: la densificazione mirata dei dati con TRT e carotaggi in sotto-aree critiche alimenta un ciclo M&V che aggiorna funzioni di valore e pesi; lo zoning della capacità e lo spacing dinamico riducono il thermal mining; nei siti sfavorevoli sotto il profilo idrochimico la riconfigurazione in closed-loop consente l'uso geotermico senza pathway idraulico diretto, accompagnata da piani di esercizio per prevenire incrostazioni e biofouling (Dalla Santa et al., 2020; Angelotti & Sterpi, 2024; Casasso & Sethi, 2019; Barnett et al., 2023; Cappellari et al., 2022).

In termini di solidità complessiva emergono convergenze tra dati, metodi e output (mappe di idoneità e priorità), un allineamento agli standard tecnici e di policy, una maggiore capacità di riduzione del rischio informativo su scala regionale e locale grazie a indicatori e M&V dedicati, e un'elevata adattabilità a domini geologici e a scenari di domanda differenti. Tali evidenze sostengono la scalabilità del blueprint e l'evoluzione verso un sistema operativo regionale orientato alla programmazione e alla rendicontazione.

Restano tuttavia aperti alcuni fronti: la calibrazione operativa degli indicatori in aree a forte eterogeneità termica di micro-scala; la misurazione sistematica delle interferenze termiche cumulative in contesti urbani densi; la definizione di soglie condivise per ΔT di restituzione in open-loop e per lo spacing minimo dei campi BTES in funzione delle classi di contesto; l'adozione di protocolli di long-term testing per valutare drift termico e bilanci stagionali. Sono aspetti tecnicamente affrontabili con piani di monitoraggio e dataset indipendenti, in linea con le raccomandazioni della letteratura su interferenze/ATES e sulle cartografie del potenziale urbano (Angelotti & Sterpi, 2024; Bloemendal et al., 2014; Bayer et al., 2019).

7.2. Punti di forza e margini di miglioramento

Alla luce delle evidenze emerse, i principali punti di forza del blueprint e i corrispondenti margini di miglioramento sono sintetizzati per orientare priorità d'azione, mitigazione dei rischi e qualità progettuale nelle applicazioni siciliane.

Punti di forza

1. **Coerenza e tracciabilità dei dati.** Il GeoDatabase regionale è strutturato secondo standard INSPIRE/ISO, con domini, metadati e regole topologiche esplicite: ciò consente

-
- controlli qualità, versionamento e audit dei layer, fattori abilitanti per decisioni trasparenti e replicabili (Direttiva INSPIRE; ISO 19115).
2. **Metodo MCDA adattivo e verificabile.** L'adozione di funzioni di valore calibrate per classi di contesto (vulcanico, sedimentario, carbonatico; urbano vs. rurale), combinata con pesi testati in sensibilità, riduce il rischio di bias e permette aggiornamenti periodici in funzione di nuovi dati e priorità (Casasso & Sethi, 2016; Angelotti & Sterpi, 2024).
 3. **Allineamento con la pratica impiantistica.** Le regole operative (spacing, profondità utili, grout ad alta λ , ΔT ammissibili) sono coerenti con UNI/VDI e con le evidenze su interferenze e sostenibilità a lungo termine, migliorando l'affidabilità dei dimensionamenti e la prevedibilità delle prestazioni (VDI 4640; UNI 11466/67/68; Angelotti & Sterpi, 2024).
 4. **Presidio dei rischi in domini vulcanici.** L'inclusione di layer di deformazione e lineamenti attivi etnei, supportata da studi geodinamici e parossistici, indirizza scelte conservative su layout e tecnologie, contenendo rischi geotecnici e geochimici (Bellia et al., 2015).
 5. **Valorizzazione della domanda reale.** La classificazione in classi operative e l'indice di priorità domanda–risorsa abilitano graduatorie per progetti pilota nelle PA, nel turismo e nei distretti produttivi, connessi a strumenti di sostegno e a reti di 5a generazione dove conveniente (ENEA RAEE 2024; Calise et al., 2021).
 6. **Governance e semplificazione.** La proposta di uno sportello geotermico unico e di una cabina di regia riduce tempi e incertezze; l'aggiornamento dei layer pubblici raccorda pianificazione energetica, tutela delle acque e paesaggio (DM 30/09/2022; ENEA RAEE 2024).

Spunti di miglioramento per lo sfruttamento della risorsa

1. **Densificazione mirata dei dati.** In aree a forte eterogeneità termo-fisica (es. alternanze piroclastiti/lave colonnari, coperture risedimentate), il blueprint beneficia di campagne di Thermal Response Test (TRT) e di carotaggi mirati per stimare meglio λ e $\rho \cdot c$ locale e ridurre l'incertezza degli input (Floridia et al., 2022; Dalla Santa et al., 2020).
2. **Monitoraggio e M&V.** L'adozione sistematica di sensori in foro, piezometri e bilanci termici annuali deve diventare requisito nei bandi e nei permessi, con protocolli di data sharing per alimentare il GeoDB e aggiornare le funzioni di valore (Casasso & Sethi, 2019; Bayer et al., 2019).

3. **Gestione delle interferenze termiche.** In ambiti urbani densi occorre una pianificazione proattiva delle distanze minime e dei carichi stagionali, con simulazioni di lungo periodo e, se necessario, zoning della capacità termica disponibile per evitare “thermal mining” (Angelotti & Sterpi, 2024; Baralis & Barla, 2024).
4. **Open-loop e qualità dell’acqua.** Per GWHP, ATEs e miniera d’acqua occorrono protocolli di prova che includano qualità chimico-fisica e microbiologia, con piani di esercizio che prevedano filtraggi, anti-incrostanti e gestione delle variazioni stagionali: le esperienze italiane e UK mostrano criticità ma anche soluzioni operative (Barnett et al., 2023; Banks et al., 2019; Cappellari et al., 2022).
5. **Interoperabilità applicativa.** L’apertura di API per consultazione e analisi (GeoJSON/WMS/WFS), con controlli di sicurezza e tracciabilità, deve accompagnare dashboard KPI e viewer cartografici per favorire riuso da parte di PA, ESCo e progettisti (schema in cap. 6.3) (Indice capitolo 6; proposta di API e UI).
6. **Allineamento incentivi-KPI.** La reportistica standardizzata su SPF_H/SPF_C, kWh rinnovabili, LCOH, tCO₂ evitate, disponibilità d’impianto e indicatori d’impatto su falda deve essere collegata agli strumenti di sostegno e alle priorità PEARS/PAESC, premiando progetti che condividono dati e risultati (ENEA RAEE 2024; GSE/Conto Termico).

Tabella 26. Matrice sintetica rischi-contromisure del blueprint

Area	Rischio principale	Driver	Impatto atteso	Contromisure prioritarie
Dati/GeoDB	Eterogeneità input termofisici	Variabilità litologica a micro-scala	Classificazione instabile	TRT mirati; carotaggi selettivi; metadattazione qualità (A/B/C)
Metodo/MCDA	Bias di pesatura	Preferenze locali non esplicite	Mappe poco accettate	Sensitivity su pesi; workshop stakeholder; pubblicazione funzioni di valore
Ingegneria	Interferenze termiche	Densità impianti, carichi sbilanciati	Degrado prestazioni	Spacing minimo dinamico; zoning capacità; BTES/solare per bilanci
Idrogeologia	Drift termico/idrico	ΔT e portate non ottimali	Impatto su falde	Prove di portata termica; limiti ΔT siti-specifici; M&V obbligatorio
Qualità acqua	Incrostazioni/microbiologia	Fe-Mn, CH ₄ , biofilm	Outage e costi O&M	Filtri, pretrattamenti; piani di spurgo; monitoraggi periodici
Governance	Permitting incerto	Sovrapposizione competenze	Ritardi e costi transattivi	Sportello unico; checklist e tempi standard; open-layer aggiornati
Mercato	Bassa bancabilità	Incertezza prestazioni	Investimenti rinviati	KPI condivisi; contratti EPC; incentivi legati a performance

7.3. Implicazioni per policy e filiere

Regolazione e semplificazione intelligente. Le semplificazioni introdotte per le piccole utilizzazioni geotermiche vanno applicate in modo coordinato, con modulistica standard e condivisione di layer pubblici: vincoli alla perforazione, vulnerabilità, pericolosità sismica, buffer paesaggistici e archeologici. Una cabina di regia che coinvolga Assessorato dell'Energia, ARPA Sicilia, Autorità di bacino, Soprintendenze, Città metropolitane e Comuni può curare sportello unico, aggiornamento cartografie e linee guida operative per progettazione, cantiere e M&V (DM 30/09/2022; ENEA RAEE 2024).

Incentivi e criteri di priorità. L'allocazione efficiente degli strumenti (Conto Termico, eventuali bandi regionali) dovrebbe premiare: (i) progetti con dati aperti che alimentano il GeoDB, (ii) reti di 5a generazione che integrano accumuli stagionali (BTES/ATES) e ottimizzano il bilancio stagionale, (iii) interventi su edifici pubblici e cluster turistico-ricettivi in aree ad alta idoneità, (iv) soluzioni che dimostrano riduzioni misurate di LCOH e tCO₂ evitate. La convergenza tra criteri tecnici e KPI di governance migliora bancabilità e accountability. (ENEA RAEE 2024; Calise et al., 2021; Beernink et al., 2022).

Supply chain e competenze. La crescita della filiera richiede: competenze geologiche e idrogeologiche per microzonazione e progettazione (indagini, TRT, modellazione termica/idraulica), imprese di perforazione qualificate all'uso di grout ad alta λ e a procedure di qualità UNI/VDI, progettisti impiantisti con esperienza in sistemi reversibili e integrazione con solare e reti di condivisione termica, gestori con capacità di M&V e data governance. L'adozione di protocolli comuni e la diffusione di strumenti analitici standardizzati riducono gli asimmetrici informativi e stabilizzano il mercato (VDI 4640; UNI 11466/67/68; Casasso & Sethi, 2019).

Capacity building e collaborazione pubblico-privato. Programmi regionali di formazione per PA, progettisti e operatori — centrati su lettura delle mappe MCDA, uso dei cruscotti KPI, requisiti di M&V e criteri di sostenibilità idraulico-termica — abilitano scelte informate e riducono il rischio di progetti sub-ottimali. Accordi quadro con università e centri di ricerca possono alimentare una pipeline di misure (TRT, piezometria, campionamenti) e contribuire ad aggiornare indicatori e pesi. Le esperienze mediterranee e le modellazioni 3D regionali dimostrano che investire in conoscenza ha ritorni rapidi sulla qualità dei progetti (Floridia et al., 2022; Floridia & Viccaro, 2019).

Tutela delle acque e criteri ambientali. La gestione sostenibile richiede indicatori di pressione e stato, soglie guida per classi di contesto e strumenti di monitoraggio in esercizio: sensori in foro, piezometri, bilanci termici annuali e reporting pubblico sintetico. Per i GWHP occorrono limiti ΔT di restituzione coerenti con gli obiettivi di qualità del corpo idrico, mentre nei closed-loop l'attenzione si concentra su interferenze cumulative e rigenerazione stagionale. Tali criteri allineano la pratica con la letteratura su sostenibilità e pianificazione della subsurface (Casasso & Sethi, 2019; Bloemendal et al., 2014; Böttcher et al., 2019).

Domini vulcanici e fasce costiere. In ambito etneo e nelle isole minori, si raccomanda: (i) esclusione o cautela per open-loop in aree con rischio di intrusione salina o con deformazione superficiale attiva; (ii) preferenza per closed-loop con grout ad alta λ e layout compatti; (iii) cluster di utenze con bilanci stagionali supportati da BTES; (iv) piani M&V rinforzati e raccordo con reti di monitoraggio geodinamico. Queste indicazioni fanno tesoro delle evidenze geochemiche e geodinamiche citate (Apollaro et al., 2012; Bellia et al., 2015).

Mercato e modelli di business. La disponibilità di mappe di idoneità e di priorità, con KPI monetizzabili (LCOH; tCO₂ evitate), riduce il costo del capitale e facilita contratti EPC/servizi energia. I casi su reti ibridate e trigenerazione in contesti mediterranei mostrano spazi per modelli “as-a-service” a domanda stagionale, con ruolo di ESCo e utility nella gestione di portafogli geotermici (Calise et al., 2021; Buonomano et al., 2015).

Roadmap attuativa. Priorità: 1) attivare la cabina di regia e lo sportello geotermico unico; 2) finanziare un pacchetto di misure (TRT, piezometri, test open-loop) in aree ad alta incertezza; 3) lanciare progetti pilota PA/turismo in cluster ad alta priorità MCDA; 4) pubblicare le API del GeoDB e i cruscotti KPI; 5) consolidare lo schema incentivi-performance e i protocolli M&V. In 12–24 mesi, questi passi possono innalzare la qualità media dei progetti, generare dati per il miglioramento continuo e accelerare l'adozione.

8. CONCLUSIONI

L'insieme dei risultati tecnici, cartografici ed economico-gestionali conseguiti lungo il percorso di ricerca consente di delineare con chiarezza la maturità del blueprint proposto: un sistema gestionale integrato che coniuga microzonazione geotermica operativa in ambiente GIS, modello geoeconomico con indicatori comparabili e un impianto di data governance pensato per aggiornarsi con nuovi dati e casi d'uso. La prospettiva è esplicitamente regionale e, al contempo, fortemente site-specific: l'asse Sicilia—con i suoi domini vulcanici (Etna, Isole Eolie), sedimentari e carbonatici—ha guidato la scelta degli indicatori termici e idrogeologici, delle regole di normalizzazione e pesi nell'MCDA, nonché la definizione delle classi applicative per ATES, BTES/BHE e GWHP, con attenzione a ΔT , R_b , λ e $\rho \cdot c$, ai vincoli di restituzione e alle interferenze in campo (Casasso & Sethi, 2016; Bayer et al., 2019). Ciò non ne compromette, in ogni caso, la scalabilità e la replicabilità.

In parallelo, la rilettura delle politiche e degli standard eurounitari e nazionali ha dato cornice stabile ai requisiti di interoperabilità (INSPIRE/ISO 19115), ai profili di permitting per la bassa entalpia (DM 30/09/2022, UNI 11466/11467/11468; VDI 4640) e agli strumenti di sostegno alla diffusione delle pompe di calore e delle reti di 5a generazione (RED II/III, EPBD, Conto Termico), favorendo la traducibilità del metodo in prassi implementative replicabili a scala comunale e intercomunale (ENEA, 2024; DM 30/09/2022; Direttive RED/EPBD).

Sul piano geologico-energetico, la modellazione termica 3D e le indagini di campo condotte e/o tratte da letteratura su contesti vulcanici siciliani rafforzano l'idea di un potenziale differenziato ma significativo per usi termici a bassa entalpia, anche in domini apparentemente "ordinari" fuori dalle aree a maggiore anomalia, purché siano ben governati i vincoli idrogeologici e ambientali (Floridia et al., 2022; Floridia & Viccaro, 2019).

La componente idrogeochimica—centrale per gli open-loop e le interazioni con ATES—indica che la sostenibilità idraulico-termica dipende tanto dalla qualità del disegno di sistema (portate, ΔT , tempi di residenza) quanto dal controllo di fenomeni secondari (incrostazioni, microbiologia, ossidoriduzione), richiedendo monitoraggi mirati e protocolli di avviamento e esercizio condivisi (Apollaro et al., 2012; Casasso & Sethi, 2019; Angelotti & Sterpi, 2024).

Ne emerge un quadro coerente: i criteri MCDA tarati sulla domanda e sulle condizioni di sottosuolo, la catena ETL e il GeoDatabase regionale, il modello geoeconomico e i profili normativi possono e dovrebbero convergere verso un'architettura capace di trasformare

mappe e indicatori in priorità d'azione, cantierabilità e percorsi di investimento differenziati per contesto, con aperture naturali verso soluzioni ibride e reti 5GDHC.

Gli obiettivi previsti dal progetto di ricerca sono stati fissati in (i) un sistema di microzonazione geotermica in GIS basato su MCDA trasparente e auditabile; (ii) un'integrazione strutturata con un modello geoeconomico in grado di confrontare alternative localizzative e tecnologiche tramite KPI energetici, ambientali ed economico-finanziari; (iii) un disegno di governance e interoperabilità conforme agli standard e alle prassi regolatorie più aggiornate; (iv) l'allineamento con i fabbisogni termici regionali e la possibilità di accoppiamento con reti e tecnologie complementari. Le analisi condotte e la progettazione del sistema per la pianificazione dello sfruttamento delle risorse geotermico caratterizzano un grado di raggiungimento del livello TRL 3–4.

In sintesi, i contributi raggiunti si articolano lungo tre direttrici principali: Primo, la definizione degli indicatori e dei pesi per l'MCDA, con particolare attenzione agli indici termo-fisici (λ , $\rho \cdot c$, diffusività), ai parametri idrogeologici (permeabilità, gradienti, vulnerabilità), ai vincoli ambientali e alle interferenze tra sonde/campi, ha prodotto mappe di idoneità comparabili e “azionabili” in termini di soglie operative per ATES, BTES/BHE e GWHP. La struttura dei dati, del workflow e delle regole topologiche del GeoDatabase regionale, conforme a INSPIRE/ISO 19115, assicura tracciabilità, versionamento e allineamento semantico fra stratigrafie, misure, vincoli e layer tematici. Secondo, l'analisi delle prestazioni attese e delle condizioni d'uso—derivata da letteratura e da casi comparabili in contesti urbani e insulari—ha permesso di specificare regole di appartenenza alle classi applicative e criteri di matching domanda-risorsa, riducendo ex-ante il rischio di retrofit o di performance gap. La letteratura su interferenza termica in aree dense, pianificazione del sottosuolo e potenziale geotermico urbano rafforza la scelta di funzioni di valore e pesi a favore dell'equilibrio fra sostenibilità a lungo termine e sfruttamento effettivo nelle zone ad alta domanda. Terzo, il modello geoeconomico collegato al GIS consente confronti con KPI omogenei (LCOH, costi totali attualizzati, CO₂ evitata, frazione di autoconsumo termico, riduzione picchi elettrici), integra incentivi e profili regolatori e abilita valutazioni di sensitività su parametri critici (prezzi energia, tassi, prestazioni, perforazione), in linea con i requisiti di robustezza stabiliti nei capitoli precedenti e con le metriche dei programmi nazionali e comunitari (ENEA, 2024; RED III/EPBD).

I principali risultati coincidono con le attese: a) la riproducibilità delle mappe di idoneità e la loro capacità di orientare la progettazione preliminare; b) l'affidabilità degli esiti economici su fasce parametriche ampie, con differenze prevedibili fra contesti acquiferi (open-loop/ATES) e

massivi (BTES/BHE). Alcuni aspetti richiedono tuttavia ulteriori e più approfondite indagini: (i) la qualità e granularità dei dati litostratigrafici in aree poco indagate, che suggerisce ulteriori campagne mirate; (ii) la variabilità locale dell'idrogeochimica in domini vulcanici e costieri, che richiede early-warning e protocolli di monitoraggio adattivi; (iii) la non uniforme disponibilità di metadati e licenze d'uso per strati informativi chiave, con necessità di accordi di data sharing. Questi aspetti sono certamente gestibili tramite lo sviluppo di ricerche mirate, ma progredirebbero in maniera più decisa e rapida entro il disegno di governance e con piani di miglioramento iterativi. Rispetto al quadro mediterraneo e ai casi italiani, tali conclusioni sono coerenti con evidenze su open-loop, ATES e reimpiego in reti geotermiche a bassa temperatura. Le metriche comparative ricostruite su scenari rappresentativi — aree urbane dense, isole minori e aree produttive — convergono su alcuni esiti ricorrenti: il LCOH risulta inferiore ai riferimenti fossili con payback tecnici coerenti con i cicli di programmazione locale; le reti 5GDHC riducono le perdite di distribuzione e, insieme a UTES/ATES, abilitano funzioni di demand-response termico; la gestione stagionale e l'ottimizzazione delle pompe di calore attenuano i picchi elettrici. Tali risultati sono in linea con applicazioni europee già documentate (Bayer et al., 2019; Beernink et al., 2022; Blázquez et al., 2018).

Le medesime evidenze suggeriscono estensioni operative e sinergie concrete: l'integrazione con reti 5GDHC e comunità energetiche termiche; il riuso di pozzi industriali o di idrocarburi dismessi come scambiatori per reti urbane; l'ibridazione con fotovoltaico e solare termico; l'impiego di algoritmi di ottimizzazione per la gestione di campi BHE e hub ATES; il rafforzamento del monitoraggio con sensoristica low-cost e protocolli standardizzati (Alimonti & Scrocca, 2023; Calise et al., 2021; Bayer et al., 2014).

Nel loro insieme, tali elementi confermano l'adeguatezza del blueprint e l'importanza che uno strumento di questo tipo può rivestire a supporto della transizione green siciliana, mettendo a sistema disponibilità della risorsa, domanda locale e fattibilità tecnico-economica, con un impianto decisionale capace di governare la complessità.

Roadmap verso il prototipo (TRL)

Il passaggio dal blueprint al prototipo operativo richiede un percorso incrementale che coniughi consolidamento dei dati, validazione tecnica sul campo e messa in esercizio di funzioni gestionali per destinatari diversi (PA, progettisti, EScO/utility). Una roadmap TRL consente di scandire le milestone, riducendo il rischio tecnologico e organizzativo. I primi livelli si

concentrano su robustezza dei dati e replicabilità delle analisi; i livelli intermedi su dimostratori in scenari reali; gli ultimi sulla messa in servizio di un servizio regionale con SLA e governance definiti. Per tale ragione si riportano di seguito gli step principali di una potenziale roadmap TRL verso il livello prototipale del sistema e la sua validazione in ambiente operativo.

Milestone tecniche.

- **TRL 5→6 — prototipo integrato in ambiente preoperativo.** Consolidamento del GeoDB regionale (metadati completi, licenze, versionamento), implementazione del motore MCDA in GIS con template di progetti e funzioni di audit, integrazione del modello geoeconomico via API e pannelli KPI; validazione interna con dataset indipendenti e test di sensitività su pesi/funzioni di valore.
- **TRL 6→7 — dimostratori locali.** Attivazione di almeno tre “living lab” rappresentativi (contesto vulcanico periurbano etneo; isola minore; distretto urbano/produttivo) con protocolli di monitoraggio geologico-idrogeologico e termico, verifica di interferenze in campo e calibrazione delle mappe di idoneità con misure in situ.
- **TRL 7→8 — pre-esercizio con reti e hub termici.** Integrazione con micro-reti 5GDHC, moduli UTES/ATES e campi BHE in esercizio, definendo criteri di dispatch termico e di energy sharing, KPI di CO₂ evitata e indicatori di resilienza dei carichi.
- **TRL 8→9 — servizio regionale.** Rilascio del sistema come piattaforma gestita, con workflow autorizzativi, politiche di accesso e auditing, manuali operativi, help-desk e reporting periodico su stato della risorsa e performance dei progetti, in coerenza con UNI/VDI e con gli obiettivi RED/EPBD.

Tra le integrazioni prioritarie spiccano tre azioni complementari: l'inclusione sistematica di layer idrogeochimici e idrobiologici per gli open-loop e per i sistemi ATES, corredati da pacchetti di rischio e soglie di esercizio; la modellazione delle interferenze cumulative tra impianti in aree dense con adeguati strumenti di pianificazione del sottosuolo per prevenire congestioni termiche; la connessione nativa a database energetici territoriali (domanda termica, fattori emissivi) e ai registri di incentivi e regolazione, così da automatizzare gli scenari di LCOH e di payback (Angelotti & Sterpi, 2024; ENEA, 2024).

Nel passaggio ai living lab, il successo sarà misurato con indicatori chiari: accuratezza cartografica valutata tramite AUC e sensibilità/specificità sulle classi di idoneità; scarti contenuti tra le prestazioni stimate e quelle misurate in esercizio; riduzioni del LCOH rispetto al riferimento fossile locale; attenuazione dei picchi elettrici grazie a UTES/ATES stagionale;

trasparenza nella governance del dato e degli accessi; riscontri di accettabilità sociale e ambientale (Bayer et al., 2019; Bloemendal et al., 2014).

Tabella 27. Roadmap TRL: milestones, dimostratori, criteri di successo e requisiti organizzativi

TRL	Milestone tecnica	Integrazioni prioritarie	Dimostratori	Criteri di successo	Requisiti organizzativi
5→6	GeoDB completo; MCDA in GIS con audit; API modello geoeconomico; pannelli KPI	Metadati/INSPIRE; versionamento; dataset idrogeochimici; profili di rischio	Test in ambiente preoperativo	AUC $\geq 0,80$; sensibilità/specificità per classe $\geq 0,75$; riproducibilità pesi/funzioni	Team dati+GIS; accordi di licenza; manuali utente
6→7	Tre living lab (vulcanico, isola minore, urbano/produttivo); sensori e protocolli	Monitoraggio ΔT , portate, qualità acqua; interferenze; early-warning	Reti pilota open-/closed-loop e ATES/BTES	Scarto prestazioni stima/misura $\leq \pm 10-15\%$; $\Delta LCOH$ vs fossile $\geq 15\%$	Cabina di regia; formazione utenti; template permessi
7→8	Integrazione 5GDHC/UTES; energy sharing termico; contabilità CO ₂	Dispatch termico; domanda oraria; incentivi/Conto Termico	Quartiere o area produttiva	CO ₂ evitata; riduzione picchi elettrici; SLA qualità dati	Accordi PA-utility; governance accessi; aggiornamento semestrale pesi
8→9	Piattaforma regionale con SLA; workflow autorizzativi	UNI/VDI; DM 30/09/2022; EPBD/RED	Servizio in esercizio	KPI pubblici e auditabili; report semestrali	Help-desk; audit; budget O&M

Per il trasferimento all'esercizio si rende necessario un assetto organizzativo dedicato: una cabina di regia che coordini PA regionali, ENEA/ISPRA, università/centri di ricerca e operatori privati (progettisti, perforatori, ESCo, utility), definendo accordi di scambio dati, percorsi di formazione per utenti e officer, procedure per l'aggiornamento semestrale dei pesi MCDA e delle funzioni di valore, capitolati minimi per sonde e bacini ATES/open-loop allineati a UNI/VDI e alle semplificazioni del DM 30/09/2022, oltre a uno schema di comunicazione pubblica sullo stato della risorsa e sulle prestazioni (ENEA, 2024; DM 30/09/2022).

Sviluppi futuri: estensioni e integrazioni

La natura distribuita della bassa entalpia e la sua forte compatibilità con le logiche di energy sharing rendono naturale l'integrazione con reti di calore/raffrescamento a bassa temperatura di 5a generazione (5GDHC) e con altre FER. Tali reti operano a ΔT ridotti e temperature prossime all'ambiente, consentendo a più utenze di fungere alternativamente da sorgente e pozzo, con una "logica a hub" che massimizza scambi locali, riduce perdite e abilita accumuli stagionali (UTES/ATES).

Integrazione con 5GDHC. L'inserimento delle classi di idoneità geotermica nel disegno di reti 5GDHC abilita pianificazioni che sottraggono metri di trincea e megawattore a soluzioni centralizzate, con la possibilità di attivare moduli ATES/BTES distribuiti come "batterie termiche" di quartiere. In contesti vulcanici periurbani, l'accoppiamento con open-loop ben presidiati dal punto di vista idrogeochimico amplia la flessibilità stagionale; in contesti urbani densi e prive di acquiferi sfruttabili, l'ottimizzazione dei campi BHE e la gestione delle interferenze salvaguardano la sostenibilità a lungo termine (Angelotti & Sterpi, 2024; Böttcher et al., 2019; Beernink et al., 2022).

Soluzioni ibride e demand response termico. I pattern di carico e i profili stagionali suggeriscono ibridazioni con solare termico e fotovoltaico (per l'alimentazione delle pompe di calore), con eventuale integrazione di recuperi termici di processo laddove disponibili. L'uso di UTES/ATES, specie nelle isole minori e nei distretti produttivi, abilita funzioni di demand response termico utili a ridurre il picco elettrico estivo, migliorando la stabilità del sistema e la bancabilità dei progetti. Il coordinamento fra hub geotermici e 5GDHC è coerente con casi europei di poligenerazione ibrida e con la prospettiva di comunità energetiche termiche (Buonomano et al., 2015; Blázquez et al., 2018; Calise et al., 2021).

Gestione dei rischi e dei vincoli. L'integrazione non elide i vincoli: per gli open-loop, i rischi idrogeochimici e microbiologici impongono monitoraggi e soglie operative (pH, alcalinità, Fe/Mn, Eh, biocida/UV), oltre a piani di manutenzione preventiva; per ATES, le interferenze e i fenomeni di "riciclo termico" devono essere contenuti attraverso distanze e geometrie calcolate, pianificazione del sottosuolo e gestione coordinata della temperatura di falda (Apollaro et al., 2012; Casasso & Sethi, 2015; Baquedano et al., 2022).

Governance e policy. L'adozione su scala regionale richiede strumenti regolatori che favoriscano mercati d'uso dei diritti geotermici superficiali, sportelli unici digitali per le autorizzazioni "entro soglia", cataloghi pubblici degli impianti con indicatori di performance e impatto, nonché regole di priorità tra domanda e risorsa per la cogestione di interferenze e hotspot di densità di carico (Alcaraz et al., 2016; Alcaraz et al., 2017; Cerutti, 2024/2025).

Prospettive per la Sicilia. L'adozione integrata delle soluzioni descritte può accelerare la decarbonizzazione dei consumi termici regionali, in particolare: (i) nei comuni dell'area metropolitana etnea, con reti 5GDHC e hub geotermici accoppiati a ATES/BTES; (ii) nelle isole minori, con assetti autarchici e gestione attiva degli scambi; (iii) nei distretti produttivi, con pooling di carichi e recuperi di calore di processo. A monte, l'allineamento regolatorio e l'adozione di strumenti digitali per il permitting e la pianificazione del sottosuolo riducono tempi e rischi e abilitano economie di apprendimento (ENEA, 2024; Cerutti, 2024/2025).

In definitiva, l'integrazione fra geoscambio a bassa entalpia, sorretta da un impianto GIS/MCDA trasparente e da una governance del dato coerente con gli standard, permette di passare dalla cartografia di idoneità alla cantierabilità, seguendo una progressione TRL programmata. La sostenibilità tecnica ed economica si gioca su tre condizioni: qualità e aggiornamento del GeoDatabase con monitoraggi mirati (ΔT , portate, qualità chimico-biologica); pianificazione del sottosuolo che governi interferenze e distanze, salvaguardando prestazioni di lungo periodo di campi BHE e hub ATES; regole autorizzative chiare e mercati d'uso dei diritti geotermici superficiali, capaci di premiare la buona progettazione. In queste condizioni, la riduzione del LCOH, l'attenuazione dei picchi elettrici e il miglioramento del profilo emissivo diventano risultati ricorrenti e misurabili, con benefici che si riflettono su resilienza di sistema e competitività locale.

Per la Sicilia, una sequenza ordinata di azioni può trasformare questo quadro in pratica: living lab in contesti rappresentativi (periurbano s.l., isola minore, distretto urbano/produttivo); investimenti selettivi sul GeoDatabase e sulla standardizzazione dei flussi; accompagnamento

istituzionale al permitting e percorsi di formazione per gli attori; impiego sistematico di MCDA calibrato sulla domanda reale, nel rispetto dei vincoli di restituzione (ΔT), dei parametri termo-fisici (R_b , λ , $\rho \cdot c$) e delle condizioni idrogeologiche. Così si consolida un'infrastruttura termica rinnovabile, adattiva e verificabile, capace di contribuire alla neutralità climatica regionale, alla sicurezza energetica e alla qualità dell'abitare e del produrre. L'avanzamento verso fasi successive si misurerà su obiettivi semplici e pubblici: affidabilità delle mappe, performance in esercizio e valore creato per i territori.

BIBLIOGRAFIA

Abate, S., Angelino, A., Balasco, M., Botteghi, S., Bruno, P., Caielli, G., Caputi, A., Cardellicchio, N., Catalano, R., Contino, A., 2014. VIGOR: Sviluppo geotermico nella regione Sicilia – Studi di fattibilità a Mazara del Vallo e Termini Imerese. Valutazione geotermica con geofisica elitrasportata. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4496.7449>.

Ahmed, A. A., Assadi, M., Kalantar, A., Śliwa, T., & Sapińska-Śliwa, A. (2022). A Critical Review on the Use of Shallow Geothermal Energy Systems for Heating and Cooling Purposes. *Energies*, 15, 4281.

Alcaraz, M., García-Gil, A., Vázquez-Suñé, E., & Velasco, V. (2016). Use rights markets for shallow geothermal energy management. *Applied Energy*, 172, 34–46.

Alcaraz, M., Vives, L., & Vázquez-Suñé, E. (2017). The T-I-GER method: a graphical alternative to support the design and management of shallow geothermal energy exploitations at the metropolitan scale. *Renewable Energy*, 109, 213–221.

Alimonti, F., Vitali, A., & Scrocca, D. (2023). Reuse of Oil Wells in Geothermal District Heating Networks. *Energies*, 17, 169.

Angelotti, A., & Sterpi, D. (2024). Shallow geothermal systems in dense urban areas: the issue of thermal interference and long-term sustainability. *E3S Web of Conferences*, 52, 05001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452305001>

Apollaro, C., et al. (2024). Hydrogeochemical risk assessment for GWHP systems: a review and operational framework. *Energies*, 17(12), 2936. <https://doi.org/10.3390/en17122936>.

Apollaro, C., et al. (2012). Chemical and isotopic characterization of the thermomineral water of Terme Sibarite springs (Northern Calabria, Italy). *Geochemical Journal*, 46, 117–129.

Arola, T., Eskola, L., Hellen, J. & Korkka-Niemi, K. Mapping the low enthalpy geothermal potential of shallow Quaternary aquifers in Finland. *Geothermal Energy* vol. 2 1–20 (2014).

Banks D 2012 An introduction to thermogeology: ground source heating and cooling WileyBlackwel (Hoboken, New Jersey) pp 526

Banks, D., Athresh, A. P., Al-Habaibeh, A., & Burnside, N. (2019). Water from abandoned mines as a heat source: practical experiences of open- and closed-loop strategies, United Kingdom. *Sustainable Water Resources Management*, 5, 29–50.

Baralis, M., & Barla, M. (2024). rOGER: A method for determining the geothermal potential in urban areas. *Geothermics*. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2024.103148>

Barnett, M. J., Farr, G., Shen, J., & Gregory, S. (2023). Groundwater microbiology of an urban open-loop ground source heat pump with high methane. *Groundwater*, 61.

Barron, F. H., & Barrett, B. E. (1996). Decision quality using ranked attribute weights. *Management Science*, 42(11), 1515–1523.

Basilici, M., Mazzoli, S., Megna, A., Santini, S., Tavani, S., 2019. Geothermal Model of the Shallow Crustal Structure across the "Mountain Front Fault" in Western Lurestan, Zagros Thrust Belt, Iran. *Geosciences* 9, 301. <https://doi.org/10.3390/geosciences9070301>.

Basilici, M., Mazzoli, S., Megna, A., Santini, S., Tavani, S., 2020. 3-D Geothermal Model of the Lurestan Sector of the Zagros Thrust Belt, Iran. *Energies* 13, 2140. <https://doi.org/10.3390/en13092140>.

Bayer, P., Attard, G., Blum, P., & Menberg, K. (2019). The geothermal potential of cities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 106, 17–30.

Bayer, P., Attard, G., Blum, P., & Menberg, K. (2019). The geothermal potential of cities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 106, 17–30.

Beernink, S., Bloemendal, M., Kleinlugtenbelt, R., & Hartog, N. (2022). Maximizing the use of ATEs systems in urban areas: effects on primary energy use and GHG emissions. *Applied Energy*, 118587.

Bellia, A., Gallardo, M., Yasuhara, M., & Kazahaya, K. (2015). Geochemical characterization of groundwater in a volcanic system. *Resources*, 4, 358–377.

Blázquez, C., Martín, A. F., Nieto, I. M., & González-Aguilera, D. (2018). Economic and environmental analysis of district heating systems aided by geothermal energy. *Energies*, 11, 1265.

-
- Bloemendal, M., Olsthoorn, T., & Boons, F. (2014). How to achieve optimal and sustainable use of the subsurface for ATES. *Energy Policy*, 66, 104–114.
- Böttcher, F., Casasso, A., Götzl, G., & Zosseder, K. (2019). TAP – Thermal aquifer Potential: A quantitative method to assess the spatial potential for the thermal use of groundwater. *Renewable Energy*.
- Böttcher, F., et al. (2019). Subsurface planning and shallow geothermal mapping in urban areas. *Geothermics*, 82, 102–115.
- Brans, J.-P., & Vincke, P. (1985). A preference ranking organization method: The PROMETHEE method. *Management Science*, 31(6), 647–656.
- Brandl, H. Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Geotechnique* vol. 56 81–122 (2006).
- BUILD UP (2025). EU share of renewables in H&C at 26.2% – news/analysis.
- Bulté, M. et al. Numerical Modeling of the Interference of Thermally Unbalanced Aquifer Thermal Energy Storage Systems in Brussels (Belgium). *Energies* (2021) doi:10.3390/en14196241.
- Buonomano, F., Calise, F., Palombo, A., & Vicidomini, M. (2015). Energy and economic analysis of geothermal–solar trigeneration systems: a hotel case (Ischia). *Applied Energy*, 138, 224–241.
- Cacace, M., Jacquey, A.B., 2017. Flexible parallel implicit modelling of coupled thermal–hydraulic–mechanical processes in fractured rocks. *Solid Earth* 8, 921–941. <https://doi.org/10.5194/se-8-921-2017>.
- Calise, F., Cappiello, F. L., d’Accadia, M. D., Petrakopoulou, F., & Vicidomini, M. (2021). A solar-driven 5th-generation district heating and cooling network with ground-source heat pumps: a thermo-economic analysis. *Sustainable Cities and Society*.
- Cappellari, D., Piccinini, L., Pontin, A., & Fabbri, P. (2022). Sustainability of an open-loop GWHP system in an Italian Alpine valley. *Sustainability*, 15, 10270.
- Casasso, A., & Sethi, R. (2014). Efficiency of closed-loop geothermal heat pumps: a sensitivity analysis. *Renewable Energy*, 62, 737–746.

Casasso, A., & Sethi, R. (2016). G.POT: A quantitative method for the assessment and mapping of the shallow geothermal potential. *Energy*, 106, 765–773.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.053>

Casasso, A., & Sethi, R. (2017). Assessment and mapping of the shallow geothermal potential in the province of Cuneo (NW Italy). *Renewable Energy*, 102, 306–315.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.055>

Casasso, A., & Sethi, R. (2019). Groundwater-related issues of GSHP systems: assessment, good practices and proposals from the European experience. *Water*, 11, 1573.

<https://doi.org/10.3390/w11081573>

Casasso, A. & Sethi, R. Sensitivity Analysis on the Performance of a Ground Source Heat Pump Equipped with a Double U-pipe Borehole Heat Exchanger. *Energy Procedia* vol. 59 301–308 (2014).

Casasso, A. & Sethi, R. Territorial Analysis for the Implementation of Geothermal Heat Pumps in the Province of Cuneo (NW Italy). *Energy Procedia* vol. 78 1159–1164 (2015).

Casasso, A., De Carli, M., Emmi, G., Cultrera, M., & Sethi, R. (2018). Shallow geothermal potential mapping at regional scale: Methodological approach and application. *Energies*, 11(7), 1834. <https://doi.org/10.3390/en11071834>

Casasso, A.; Taddia, G.; Basso, S.; Bozzano, A.; Sethi, R. (2020). How Can We Make Pump-and-Treat Systems More Energetically Sustainable? Possible Synergies with Groundwater Heat Pumps (GWHPs). *Water*, 12(1), 67.

<https://doi.org/10.3390/w12010067>.

Casasso, A. et al. Ground Source Heat Pumps in Aosta Valley (NW Italy): assessment of existing systems and planning tools for future installations. *Rendiconti Online della Società Geologica Italiana* (2018) doi:10.3301/ROL.2018.53.

Casasso, A. et al. Assessment and mapping of the closed-loop shallow geothermal potential in Cerkno (Slovenia). *Energy Procedia* vol. 125 335–344 (2017).

Castaldo, R., et al. (2017). Thermo-rheological properties beneath Ischia Island and ground deformation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 344, 154–173.

Catalano, R., Lo Cicero, G., Sulli, A., 2002. Geology of Sicily: an introduction. In: *General Field Trip Guidebook, 6th International Symposium on the Jurassic System*, pp. 12–22.

-
- Cataldi, R., Mongelli, F., Squarci, P., Taffi, L., Zito, G., Calore, C., 1995. Geothermal ranking of Italian territory. *Geothermics* 24, 115–129. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(94\)00026-9](https://doi.org/10.1016/0375-6505(94)00026-9).
- Cerutti, P. (2024). Closed loop low enthalpy geothermal systems for underground heat exchange: public records, available data, implications for planning. *Acque Sotterranee – Italian Journal of Groundwater*. <https://doi.org/10.7343/as-2024-823>
- Cerutti, P. (2024; 2025). Contributi su sistemi geotermici a bassa entalpia e governance/monitoraggio in Italia. *Acque Sotterranee – Italian Journal of Groundwater*.
- Cerutti, P. (2025). Low-enthalpy geothermal systems and regulation: the monitoring of closed loop. *Acque Sotterranee – Italian Journal of Groundwater*. <https://doi.org/10.7343/as-2025-880>
- Chicco, J., & Mandrone, G. (2022). Modelling the energy production of a Borehole Thermal Energy Storage (BTES) system. *Energies*.
- Claessonj Eskilson P 1987 Conductive heat extration to a deep borehole: Thermal analyses and dimensioning rules (University of Lund, Sweden)
- Clauser, C., Huenges, E., 1995. Thermal Conductivity of Rocks and Minerals. *Rock Physics & Phase Relations*. American Geophysical Union (AGU), pp. 105–126. <https://doi.org/10.1029/RF003p0105>.
- Consiglio dell'Unione europea (2024). Conclusions on the promotion of geothermal energy.
- D.Lgs. 152/2006. Norme in materia ambientale. Parte terza – tutela delle acque.
- D.Lgs. 199/2021. Attuazione della direttiva (UE) 2018/2001 (RED II) sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili.
- Dalla Santa, G., De Carli, M., Emmi, G., Galgaro, A., et al. (2020). An updated ground thermal properties database for GSHP applications. *Geothermics*, 85, 101758. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101758>
- Di Sipio E Chiesa S Destro E Galgaro A Giarretta A Gola G Manzella 2013 A rock thermal conductivity as key parameter for geothermal numerical models EGU General Assembly
-

- Di Sipio, E., Galgaro, A., Destro, E., Giaretta, A., Chiesa, S., Team, V., 2013. Thermal conductivity of rocks and regional mapping. In: Proceedings of European Geothermal Conference 2013.
- Direttiva (UE) 2023/2413 (RED III). Gazzetta Ufficiale dell'Unione europea, L 2023/2413. Quadro rinnovabili 2030; misure per il calore e raffrescamento.
- Direttiva (UE) 2024/1275 (EPBD). Requisiti edilizi, ZEB e strumenti abilitanti.
- DM 30 settembre 2022. Prescrizioni tecniche per piccoli impianti geotermici e semplificazioni procedurali per la climatizzazione. G.U. 14/10/2022.
- DM 30/09/2022 (G.U. 14/10/2022). Semplificazioni per piccole utilizzazioni geotermiche. Ministero della Transizione Ecologica.
- DM 30/09/2022. Linee guida nazionali per sistemi geotermici a bassa entalpia (estratti pertinenti).
- Eastman, J. R. (2009). Decision Support and Geographic Information Systems. In Geographic Information Systems (pp. 501–516). MA: Clark University / IDRISI.
- European Geothermal Energy Council, 2019. EGEC Geothermal Market Report, 2018 20. <https://www.egec.org/media-publications/egec-geothermal-market-report-2018/>.
- European Geothermal Energy Council, 2020. The geothermal energy market grows exponentially, but needs the right market conditions to thrive 2019, 2018–2019. <https://www.egec.org/the-geothermal-energy-market-grows-exponentially-but-needs-the-right-market-conditions-to-thrive/>.
- ENEA (2024). Rapporto Annuale Efficienza Energetica (RAEE). Roma: ENEA
- ENEA/GSE e atti nazionali: DM 30/09/2022 (G.U. 14/10/2022) Semplificazioni per piccole utilizzazioni geotermiche; PNIEC (MASE, 2024).
- Eurostat (2025). Share of energy from renewable sources for heating and cooling (H&C).
- Floridia, G., & Viccaro, M. (2019). Geological field investigation for the assessment of the low-grade geothermal resources from volcanic terrains of the Island of Salina (Aeolian Islands, Italy). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 367, 012007. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/367/1/012007>

Floridia, G., & Viccaro, M. (2019). Low-grade geothermal resources from volcanic terrains of Salina (Aeolian Islands). *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 367, 012007.

Floridia, G., Cacace, M., Scheck-Wenderoth, M., Bott, J., & Viccaro, M. (2022). 3D thermal model of Sicily (Southern Italy) and perspectives for new exploration campaigns for geothermal resources. *Global and Planetary Change*, 218, 103976.

<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103976>

Floridia, G.; Blandini, F.; Iuculano, S.; Belfiore, G.M.; Viccaro, M. (2021). Innovative Solutions for Improving the Heat Exchange in Closed-Loop Shallow Geothermal Systems. *Energies*, 14, 108. <https://doi.org/10.3390/en14010108>

Floridia, G.; Urso, S.; Belfiore, G.M.; Viccaro, M. (2022). Thermal and Mechanical Improvement of Filling Mixture for Shallow Geothermal Systems by Recycling of Carbon Fiber Waste. *Energies*, 15, 5806. <https://doi.org/10.3390/en15165806>

Galgaro, A.; Di Sipio, E.; Teza, G.; Destro, E.; De Carli, M.; Chiesa, S.; Zarrella, A.; Emmi, G.; Manzella, A. (2015). Empirical modeling of maps of geo-exchange potential for shallow geothermal energy at regional scale. *Geothermics*, 57, 173–186.

<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.06.017>

Galgaro, A., Di Sipio, E., Destro, E., Chiesa, S., Uricchio, V., Bruno, D., Masciale, R., Lopez, N., Iaquinta, P., Teza, G., Iovine, G., Montanari, D., Manzella, A., Soleri, S., Greco, R., di Bella, G., Monteleone, S., Sabatino, M., Iorio, M., Petruccione, E., Giaretta, A., Tranchida, G., Trumpy, E., Gola, G., D'Arpa, S., 2012. Methodological approach for evaluating the geo-exchange potential: VIGOR Project. *Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater* 1, 43–53. <https://doi.org/10.7343/as014-12-0029>.

García-Céspedes, J., et al. (2022). 5th-Generation DHC Networks Based on Shallow Geothermal: A Review and Solutions for Mediterranean Europe. *Energies*.

Gizzi, M., et al. (2023). A review of groundwater heat pump systems in the Italian framework: Technological potential and environmental limits. *Energies*.

Gola, G., Manzella, A., Trumpy, E., Montanari, D., van Wees, J.D., 2013. Deep-seated Geothermal Resource Assessment of the VIGOR Project Regions. Italy. *European Geothermal Congress* 3–7.

GSE – Conto Termico 2.0. Regole applicative e PortalTermico.

GSE - Conto Termico 2.0 – Vademecum e dati statistici.

Giuliano A 1994 Studio geologico per i piani particolareggiati di recupero del P.R.G zona A (Santa Marina Salina, Aeolian Island).

Hellstrom G 1998 Thermal Performance of borehole heat exchangers International Geothermal Conference (Stockton).

Hwang, C.-L., & Yoon, K. (1981). Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. Berlin: Springer.

Huttrer, G.W., 2020. Geothermal Power Generation in the World 2015-2020 Update Report. Proceedings World Geothermal Congress 2020, 1–17.

INSPIRE — Parlamento Europeo e Consiglio (2007). Direttiva 2007/2/CE che istituisce un'infrastruttura per l'informazione territoriale nella Comunità Europea.

Iorio, M., A. Carotenuto, A. Corniello, S. D. Fraia, N. Massarotti, A. Mauro, R. Somma, and L. Vanoli. 2020. "Low Enthalpy Geothermal Systems in Structural Controlled Areas: A Sustainability Analysis of Geothermal Resource for Heating Plant (The Mondragone Case in Southern Appennines, Italy)." *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en13051237>

ISO (2014). ISO 19115:2014 – Geographic information — Metadata. Geneva: International Organization for Standardization.

ISPRA – Documentazione e banche dati su risorse geotermiche “shallow”.

Jenks, G. F. (1967). The data model concept in statistical mapping. *International Yearbook of Cartography*, 7, 186–190.

Jodeiri, A. M., et al. (2022). Sustainable heat sources in 4th-generation district heating – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

Jorand R Clauser C Marquart G 2015 Pechnig R Statistically reliable petrophysical properties of potential reservoir rocks for geothermal energy use and their relation to lithostratigraphy and rock composition: The NE Rhenish Massif and the Lower Rhine Embayment (Germany) *Geothermics Journal* vol 53 pp 413–428

-
- Kuang, Y., et al. (2016). Renewable energy utilization in islands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 504–513.
- Limberger, J., Boxem, T., Pluymaekers, M., Bruhn, D., Manzella, A., Calcagno, P., Beekman, F., Cloetingh, S., van Wees, J.D., 2018. Geothermal energy in deep aquifers: a global assessment of the resource base for direct heat utilization. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 82, 961–975. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.084>.
- Lund, H., 2007. Renewable energy strategies for sustainable development. *Energy* 32, 912–919. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.10.017>.
- Lund J W Freeston D H Boyd T.L 2011 Direct utilization of geothermal energy *Geothermics Journal* vol 40 pp. 159 – 180
- Malczewski, J. (1999). *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. New York: Wiley.
- Midttømme, K., Banks, D., Ramstad, R. K., Sæther, O. M., & Skarphagen, H. (2008). Ground-source heat pumps and underground thermal energy storage—Energy for the future. In T. Slagstad (Ed.), *Geology for Society* (NGU Special Publication 11, pp. 93–98). Trondheim: Geological Survey of Norway.
- Ministero dell’Ambiente e della Sicurezza Energetica (2024). PNIEC – Piano Nazionale Integrato per l’Energia e il Clima (aggiornamento).
- Ministero della Transizione Ecologica (2022). DM 30/09/2022 — Linee guida nazionali per sistemi geotermici a bassa entalpia (estratti pertinenti).
- Moeck, I., 2014. Catalog of geothermal play types based on geologic controls. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 37, 867–882. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.032>.
- Montanari, D., Albanese, C., Catalano, R., Contino, A., Fedi, M., Gola, G., Iorio, M., la Manna, M., Monteleone, S., Trumpy, E., Valenti, V., Manzella, A., 2015. Contour map of the top of the regional geothermal reservoir of Sicily (Italy). *Journal of Maps* 11, 13–24. <https://doi.org/10.1080/17445647.2014.935503>.
- Montanari, D., Minissale, A., Doveri, M., Gola, G., Trumpy, E., Santilano, A., Manzella, A., 2017. Geothermal resources within carbonate reservoirs in western Sicily (Italy): a review. *Earth Sci. Rev.* 169, 180–201. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.04.016>.

- Nicotra E Viccaro M De Rosa R Sapienza M 2014 Volcanological evolution of the Rivi - Capo Volcanic Complex at Salina, Aeolian Islands: magma storage processes and ascent dynamics, *Bull Volcanol* vol 76 art. number 840 doi:10.1007/s00445-014-0840-8
- Piga, B., Casasso, A., Pace, F., Godio, A., & Sethi, R. (2017). Thermal Impact Assessment of Groundwater Heat Pumps (GWHPs): Rigorous vs. Simplified Models. *Energies*, 10(9), 1385. <https://doi.org/10.3390/en10091385>
- Ristuccia, G., P. Bonfanti, S. Giammanco, and G. Stella. 2019. "Assessment of the Geochemical Potential in a Complex Tectonic Environment of South-East Sicily: New Insights From Hydrochemical Data." *Frontiers in Earth Science*. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00088>
- Ristuccia, G., P. Bonfanti, and S. Giammanco. 2021. "A hydrogeochemical approach to the characterization of low-enthalpy geothermal systems: the Scordia – Lentini graben (Sicily, Italy)." *Unknown Journal*.
- Ristuccia, G. M., P. Bonfanti, and S. Giammanco. 2021. "A hydrogeochemical approach to the characterization of low-enthalpy geothermal systems: the Scordia – Lentini graben (Sicily, Italy)." *Annals of Geophysics*. <https://doi.org/10.4401/ag-8536>
- Robertson E C 1988 Thermal properties of rocks U.S. Geological survey.
- Romano, S., Cozzi, M., Di Napoli, F., & Viccaro, M. (2013). Building Agro-Energy Supply Chains in the Basilicata Region: Technical and Economic Evaluation of Interchangeability between Fossil and Renewable Energy Sources. *Energies*, 6(10), 5259-5282. <https://doi.org/10.3390/en6105259>
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw-Hill.
- Sanner, B., 2017. Ground Source Heat Pumps – history, development, current status, and future prospects. In: 12th IEA Heat Pump Conference 2017, pp. 1–14.
- Santilano, A., Donato, A., Galgaro, A., Montanari, D., Menghini, A., Viezzoli, A., Di Sipio, E., Destro, E., Manzella, A., 2016. An integrated 3D approach to assess the geothermal heat-exchange potential: the case study of western Sicily (southern Italy). *Renew. Energy* 97, 611–624. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.072>.
- Santini, S., Basilici, M., Invernizzi, C., Mazzoli, S., Megna, A., Pierantoni, P.P., Spina, V., Teloni, S., 2020. Thermal Structure of the Northern Outer Albanides and Adjacent Adriatic Crustal

Sector, and Implications for Geothermal Energy Systems. *Energies* 13, 6028.

<https://doi.org/10.3390/en13226028>.

Santini, S., Basilici, M., Invernizzi, C., Jablonska, D., Mazzoli, S., Megna, A., Pierantoni, P.P., 2021. Controls of Radiogenic Heat and Moho Geometry on the thermal setting of the Marche Region (Central Italy): an Analytical 3D Geothermal Model. *Energies* 14, 6511.

<https://doi.org/10.3390/en14206511>.

Sippel, J., Meeßen, C., Cacace, M., Mechie, J., Fishwick, S., Heine, C., ScheckWenderoth, M., Strecker, M.R., 2017. The Kenya rift revisited: insights into lithospheric strength through data-driven 3-D gravity and thermal modelling. *Solid Earth* 8, 45–81.

<https://doi.org/10.5194/se-8-45-2017>.

Spooner, C., Scheck-Wenderoth, M., Cacace, M., Götze, H.-J., Luijendijk, E., 2020. The 3D thermal field across the Alpine orogen and its forelands and the relation to seismicity.

Glob. Planet. Chang. 193, 103–288. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103288>.

Tinti F 2009 Geotermia per a climatizzazione applicazioni, tecnologia, analisi costi-benefici (Palermo)

Tonarini, S., D’Orazio, M., Armienti, P., Innocenti, F., Scribano, V., 1996. Geochemical features of eastern Sicily lithosphere as probed by Hyblean xenoliths and lavas. *Eur. J. Mineral.* 8, 1153–1174. <https://doi.org/10.1127/ejm/8/5/1153>.

Trumpy, E., Manzella, A., 2017. Geothopica and the interactive analysis and visualization of the updated Italian National Geothermal Database. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 54, 28–37. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.09.004>.

Trumpy, E., Donato, A., Gianelli, G., Gola, G., Minissale, A., Montanari, D., Santilano, A., Manzella, A., 2015. Data integration and favourability maps for exploring geothermal systems in Sicily, southern Italy. *Geothermics* 56, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.03.004>.

Trumpy, E., Botteghi, S., Caiozzi, F., Donato, A., Gola, G., Montanari, D., Pluymaekers, M., Santilano, A., Van Wees, J., Manzella, A., 2016. Geothermal potential assessment for a low carbon strategy: a new systematic approach applied in southern Italy. *Energy* 103, 167–181. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.144>.

UNI (2012). UNI 11466/11467/11468 — Impianti geotermici a pompa di calore – Dimensionamento/Installazione/Ambiente. Milano: UNI.

UNI 11466 (2012). Sistemi geotermici a pompa di calore: Requisiti per il dimensionamento e la progettazione.

UNI 11467 (2012). Impianti geotermici a pompa di calore – Requisiti ambientali

UNI 11468 (2012). Impianti geotermici a pompa di calore – Requisiti ambientali.

VDI (2019). VDI 4640 — Thermal use of the underground — Ground source heat pump systems. Düsseldorf: VDI Verein Deutscher Ingenieure. Verlag.

Vespasiano, G.; Cianflone, G.; Taussi, M.; De Rosa, R.; Dominici, R.; Apollaro, C. (2023). Shallow Geothermal Potential of the Sant'Eufemia Plain (South Italy) for Heating and Cooling Systems: An Effective Renewable Solution in a Climate-Changing Society. *Geosciences*, 13, 110. <https://doi.org/10.3390/geosciences13040110>

Viccaro, M. (2018). Doped bentonitic grouts for implementing performances of low-enthalpy geothermal systems. *Geothermal Energy*, 6. <https://doi.org/10.1186%2Fs40517-018-0090-7>

Viccaro, M., Pezzino, A., Belfiore, G. M., & Campisano, C. (2016). The significance of “geothermal microzonation” for the correct planning of low-grade source geothermal systems. *Geophysical Research Abstracts*, 18, EGU General Assembly, Vienna.

Viesi, D.; Galgaro, A.; Visintainer, P.; Crema, L. (2018). GIS-supported evaluation and mapping of the geo-exchange potential for vertical closed-loop systems in an Alpine valley: the case study of Adige Valley (Italy). *Geothermics*, 71, 70–87. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.08.008>

Waples, D.W., 2001. A New Model for Heat Flow in Extensional Basins: Radiogenic Heat, Asthenospheric Heat, and the McKenzie Model. *Nat. Resour. Res.* 10, 227–238. <https://doi.org/10.1023/A:1012521309181>.

Yager, R. R. (1988). On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making. *Fuzzy Sets and Systems*, 18(1), 49–74.

Zangheri, M.; Paci, D.; Bertoldi, P. (2014). Heating and cooling energy demand and loads for building types in different countries of the EU. ENTRANZE Working Paper, European Commission—JRC.

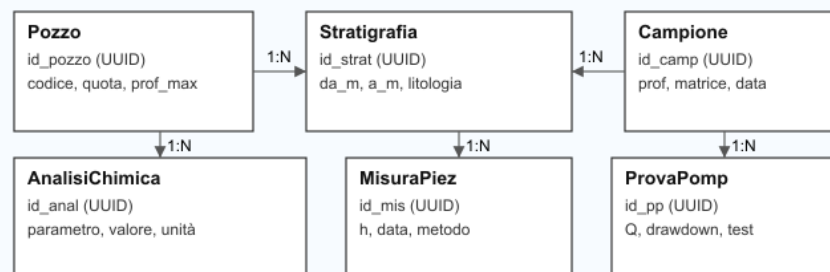
Zeleny, M. (1982). Multiple Criteria Decision Making. New York: McGraw-Hill.

APPENDICE A — DATI & MODELLO (ER GeODB + MCDA)

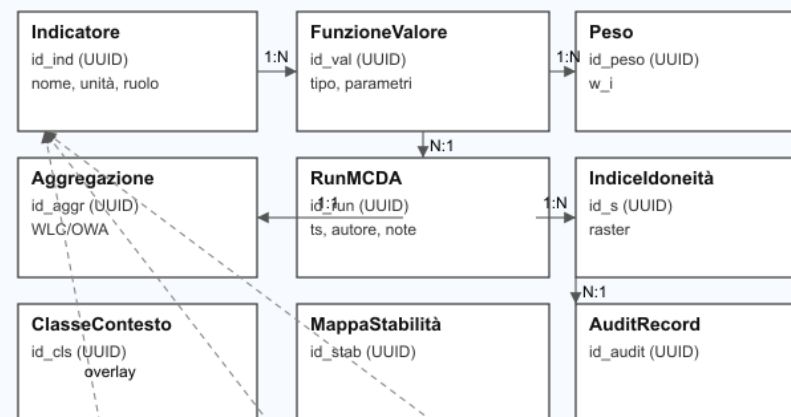
A.1 Schema ER del geodatabase

Schema concettuale del GeoDatabase a supporto delle analisi MCDA per la mappatura d'idoneità. Sono indicati domini, entità, attributi chiave e relazioni con cardinalità. Le chiavi primarie sono UUID; le chiavi naturali sono riportate nei metadati. Le relazioni spaziali (overlay) con vincoli/uso del suolo/rete sono esterne e non violano l'integrità referenziale. Rimandi: cfr. §6.2.1; §6.3.

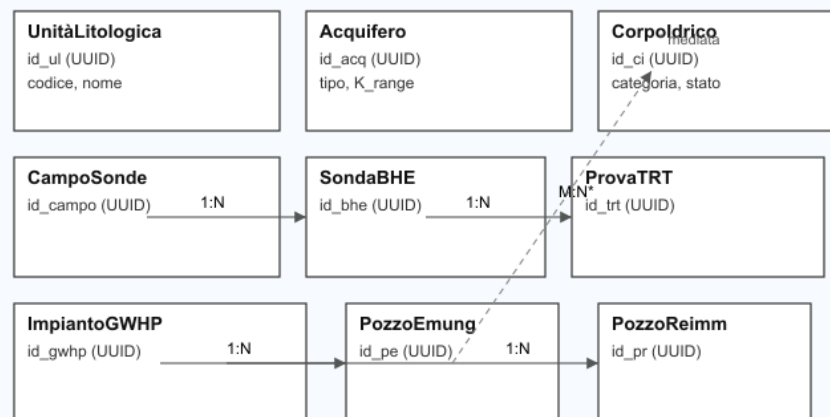
Osservazioni Misure



MCDA Prodotti



Geologia/Idrogeologia Opere



Vincoli, Uso del suolo Rete



Cardinalità principali: Pozzo 1:N Stratigrafia/Campione/Misure/Prove; CampoSonde 1:N Sonda 1:N ProvaTRT; ImpiantoGWHP 1:N (PozzoEmung, PozzoReimm); RunMCDA 1:N (Indicatore, Peso) → 1:1 Aggregazione → 1:N Indiceldoneità → N:1 ClasseContesto. Relazioni spaziali (overlay) tra Vincolo/UsoSuolo/Rete e gli altri domini.

A.2 Indicatori/KPI (sintesi) — Template

Struttura di sintesi per gli indicatori/KPI (sintesi, template).

Compilazione prevista a valle della definizione del set definitivo (progettazione futura).

Rimandi: cfr. §6.2.1; §6.3.

Nome indicatore	Definizione breve	Unità	Fonte primaria	Ruolo (benefit/costo)	Normalizzato [0-1]
I1	— (da compilare)	—	—	[benefit costo]	[Sì No]
I2	— (da compilare)	—	—	[benefit costo]	[Sì No]
I3	— (da compilare)	—	—	[benefit costo]	[Sì No]
I4	— (da compilare)	—	—	[benefit costo]	[Sì No]
I5	— (da compilare)	—	—	[benefit costo]	[Sì No]
I6	— (da compilare)	—	—	[benefit costo]	[Sì No]
I7	— (da compilare)	—	—	[benefit costo]	[Sì No]
I8	— (da compilare)	—	—	[benefit costo]	[Sì No]
I9	— (da compilare)	—	—	[benefit costo]	[Sì No]
I10	— (da compilare)	—	—	[benefit costo]	[Sì No]
I11	— (da compilare)	—	—	[benefit costo]	[Sì No]
...					

A.3 Matrici MCDA finali: pesi e funzioni di valore — Template

Tabelle di progetto per la raccolta dei pesi finali w_i , della tipologia di funzione di valore e degli intervalli di input. Nessuna derivazione inclusa. Per audit si consiglia di indicare una fascia di sensibilità (es.: $\pm 10-20\%$).

Indicatore	w_i (baseline)	Funzione di valore	Intervallo input (unità)	Output [0-1]	Sensibilità pesi
I1	—	{crescente decrecente plateau soglia cap}	—	0→1	$\pm __\%$
I2	—	{crescente decrecente plateau soglia cap}	—	0→1	$\pm __\%$
I3	—	{crescente decrecente plateau soglia cap}	—	0→1	$\pm __\%$
I4	—	{crescente decrecente plateau soglia cap}	—	0→1	$\pm __\%$
I5	—	{crescente decrecente plateau soglia cap}	—	0→1	$\pm __\%$
I6	—	{crescente decrecente plateau soglia cap}	—	0→1	$\pm __\%$
I7	—	{crescente decrecente plateau soglia cap}	—	0→1	$\pm __\%$
I8	—	{crescente decrecente plateau soglia cap}	—	0→1	$\pm __\%$
...	—	{crescente decrecente plateau soglia cap}	—	0→1	$\pm __\%$

Nota operativa (template): 1) assicurare somma $w_i = 1$; 2) documentare origine e normalizzazione degli input (min-max o z-score→[0-1]); 3) registrare il vettore w_i e i parametri delle funzioni in un record di audit del run.

APPENDICE B — INTERFACCE & UX (API + WIREFRAME)

Rappresentazione del “core” necessario a rendere implementabili le interfacce.

Rimandi: cfr. §6.3.1; §6.3.2.

B.1 Core endpoints API

Focus sugli endpoint “happy path” (nessun edge-case/gestione errori; rimando al repository tecnico).

Meto do	Path	Sintesi payload	Uso	Auth
GET	/api/v1/suitability	?bbox=&indicators=& weights_id=std_v1	Restituisce classi idoneità/tiles per mappa	Public (read) / Bearer
POST	/api/v1/mcda/run	{ "area": "AOI", "weights_id": "std_v1" }	Avvia calcolo MCDA sull’area selezionata	Bearer
GET	/api/v1/mcda/{job_id}/ result	{ "status": "done", "raster_id": "R001" }	Recupera esito e riferimento raster	Bearer
GET	/api/v1/sites/{site_id}	{ "site_id": "ID", "context": "GWHP" }	Dettaglio sito/cella con contesto tecnologico	Public (read)
GET	/api/v1/kpi/summary	?area_id=A001	KPI sintetici (LCOH, GHG, Payback)	Bearer
POST	/api/v1/scenarios/comp are	{ "scenarios": [...] }	Confronto scenari e ranking	Bearer

Esempi di risposta (estratti, 3-5 righe):

```
{"classes":[{"id":1,"label":"Alta","pct":42.1}, {"id":2,"label":"Media","pct":38.7}]}
```

```
{"job_id":"MCDA-2025-001"}
```

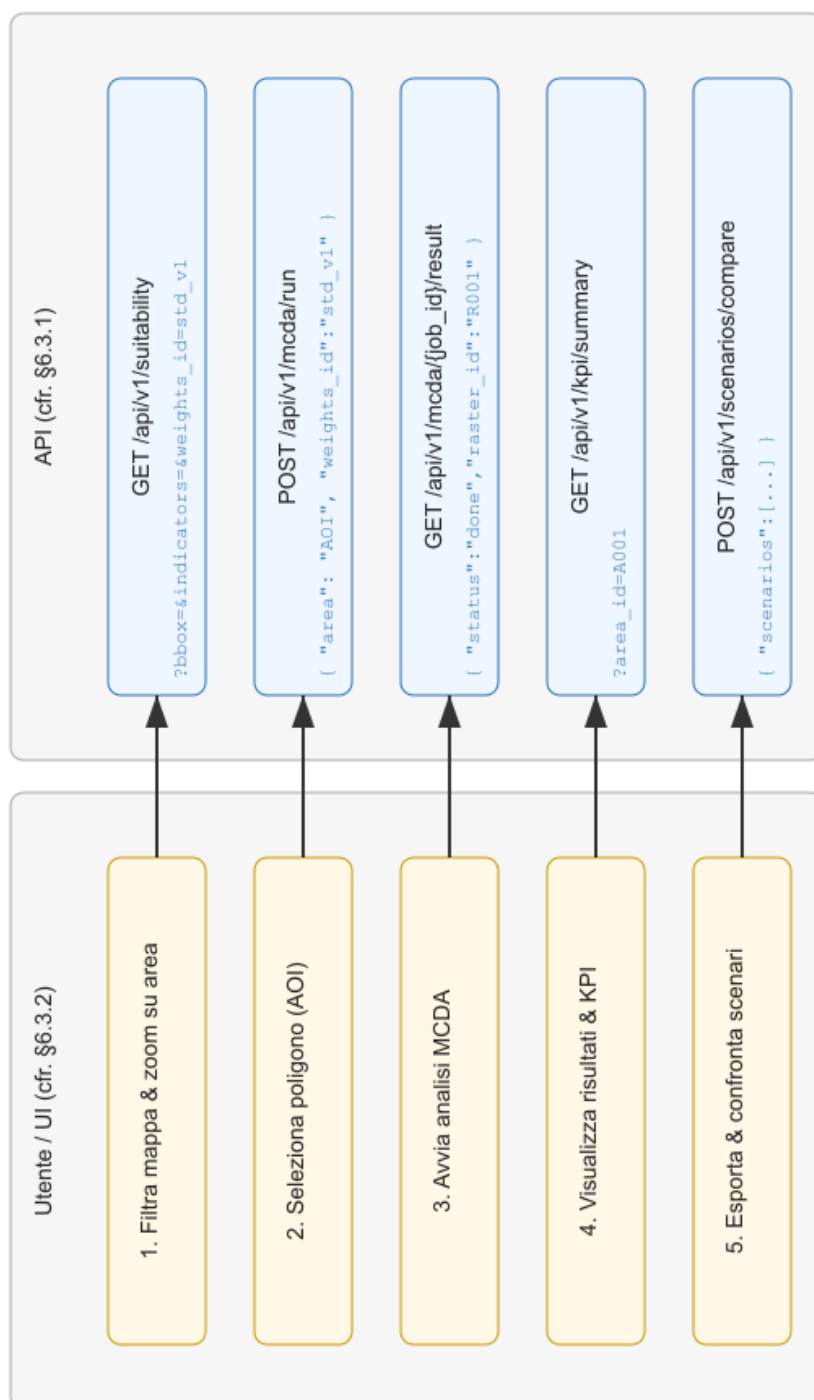
```
{"status":"done","raster_id":"R001"}
```

B.2 Flusso UX “utente→API”

Sequenza principale dall’azione utente all’invocazione endpoint

Rimandi: cfr. §6.3.1; App. B.1.

Flusso UX “utente→API”.



B.3 Wireframe (storyboard 4-up)

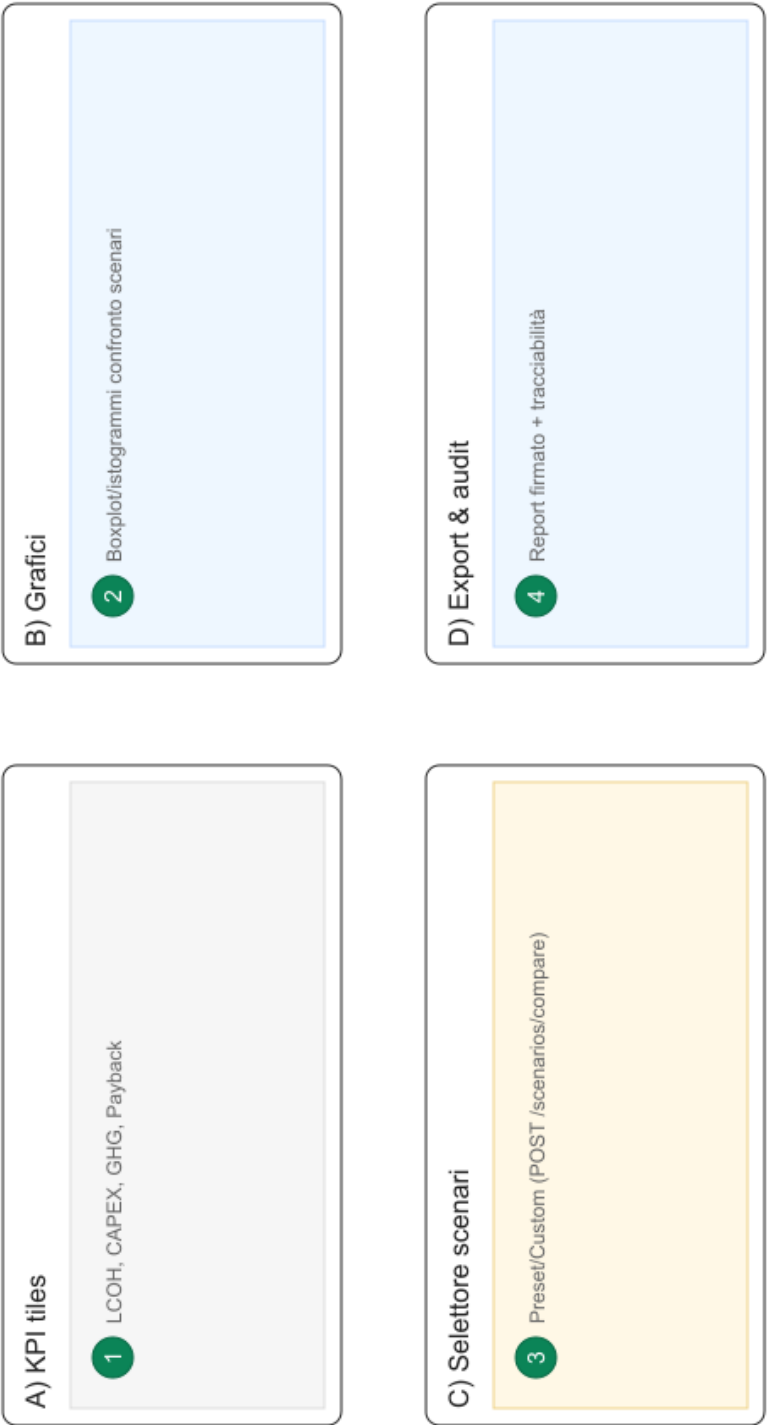
Due storyboard 4-up per le viste chiave: Viewer cartografico e Dashboard decisionale

Rimandi: cfr. §6.3.2.

Wireframe “Viewer Cartografico”.



Wireframe “Dashboard decisionale”.



Legenda numerata: 1 KPI, 2 Grafici, 3 Scenari, 4 Export/audit.

B.4 Backlog sintetico & governance

Epiche e storie prioritarie, dipendenze e Definition of Done (DoD).

Epic	Titolo	Priorità	Dipendenze	DoD (estratto)
EP1	API core (§6.3.1)	P1	—	• Spec con OpenAPI 3.x approvata Test unit (≥80%) CI/CD build+deploy su staging Audit log base attivo
EP2	Viewer WebGIS (§6.3.2)	P1	EP1	• Layer base e tematismi AOI draw & upload Richiami endpoint GET /suitability
EP3	MCDA run & result	P1	EP1, EP2	• POST /mcda/run funzionante Polling GET /mcda/{id}/result Raster/tiles serviti
EP4	Dashboard KPI & scenari	P2	EP1, EP3	• GET /kpi/summary POST /scenarios/compare Grafici e export CSV/PDF
EP5	AuthN/Z & IAM	P1	—	• OAuth2/OIDC attivo Ruoli Reader/Analyst/Admin Rotazione secret e log accessi
EP6	QA, A11y & SecOps	P2	EP2-EP5	• WCAG 2.1 AA su viste chiave SAST/DAST eseguiti Pen-test base chiuso

Esempi di user stories (MoSCoW):

US-01 – Come Progettista voglio disegnare l'AOI sulla mappa per lanciare l'analisi MCDA (Must). DoD: AOI valida → job_id, stato 200 in <3s.

US-02 – Come Decisore voglio vedere KPI sintetici su un'area per confrontare rapidamente soluzioni (Must). DoD: 4 tile KPI con fonte e timestamp.

US-03 – Come Analista voglio confrontare due scenari parametrici e scaricare il ranking (Should). DoD: CSV firmato + hash SHA-256.

US-04 – Come Utente autenticato voglio accedere con SSO aziendale (Must). DoD: OIDC, ruoli applicati ai dataset.

Accessibilità & usabilità: tastiera completa, contrasto AA, alternative testuali alle mappe, etichette esplicite e focus visibile.

APPENDICE C — DELIVERY (BACKLOG + TEST/VALIDAZIONE)

Governare sviluppo e qualità: cosa costruire e come accettarlo.

Rimandi: cfr. §6.6.1 (Backlog), §6.6.2 (Test).

C.1 Epiche prioritarie (Top-20)

Sintesi delle epiche con Valore/Rischio, Definition of Ready (DoR) e Definition of Done (DoD).

ID	Epic	Valore	Rischio	DoR	DoD	Note
E1	ETL & Catalogo dati prioritari (geologia, falda, vincoli, domanda)	Alto	Medio	Fonti/licenze definite; mapping campi; schemi con unità/domini.	GeoDB v1, metadati ISO 19115 completi, QA report senza errori bloccanti.	Dip.: Governance (F0)
E2	MCDA v1 su aree pilota (indicatori, funzioni, pesi)	Alto	Medio	Indicatori e funzioni di valore dichiarati; pesi iniziali; aree pilota scelte.	Classi MCDA v1 + report robustezza (sensibilità $\pm 20\%$).	Dip.: E1
E3	Viewer & OGC API (Features/WMS/WCS/WMTS)	Alto	Basso	Contract API definito; wireframe approvati.	Portale pilota pubblicato; manuale utente; 0 errori 4xx/5xx in uso nominale.	Dip.: E2
E4	Modulo geoeconomico v1 (LCOH/VAN/TIR, scenari)	Alto	Medio	Parametri economici; scenari Base/Alto/Stress ; dataset di benchmark.	Dashboard KPI attiva; export CSV/XLSX; coerenza con benchmark $\pm 15\%$.	Dip.: E2–E3
E5	Rischio idrochimico GWHP e prescrizioni operative	Medio	Medio	Serie idrochimiche/po	Regole di derating documentate;	Dip.: E1–E2

				rtate; limiti normativi e ΔT .	report prescrizioni sito-tipo.	
E6	Estensione regionale & performance hardening	Alto	Medio	Piano risorse; target prestazioni.	Tempi target rispettati; test carico ≥ 100 richieste concorrenti superati.	Dip.: E1– E4
E7	Sicurezza, IAM & Disaster Recovery	Alto	Basso	Policy IAM; ruoli; piano DR.	RPO $\leq 24h$; RTO $\leq 4h$; audit trail verificato.	Dip.: E3– E6
E8	Data Governance & Catalogo metadati (automation)	Medio	Basso	Profilo metadati; vocabolari controllati; DOI interni.	Catalogo aggiornato; validazioni metadati 100% pass.	Dip.: F0, E1
E9	Robustezza MCDA (sensibilità/Monte Carlo)	Medio	Medio	Range parametri; n- run; criteri stabilità.	Mappa stabilità e tornado; $\geq 90\%$ celle stabili/contigue.	Dip.: E2
E10	Caching & rate limiting API	Medio	Basso	Metriche baseline; design cache.	p95 latenza $< 5s$; hit ratio $\geq 70\%$; nessun 429 in uso nominale.	Dip.: E3

E1 1	Viewer Accessibilità & WCAG 2.1 AA	Medio	Basso	Linee guida accessibilità; elenco componenti.	Contrasto $\geq 4.5:1$; navigazione tastiera completa; esiti test utenti $\geq 80/100$.	Dip.: E3
E1 2	KPI Dashboard servizio (SLO/SLA)	Alto	Medio	Definizione KPI; pipeline metriche.	SLO pubblici: disponibilità $\geq 99.5\%$, p50 latenza ≤ 2 s, p95 ≤ 5 s.	Dip.: E3–E4
E1 3	UI scenari «what-if» (MCDA + geoeco)	Alto	Medio	Parametri variabili; limiti e guardrail.	Ricalcolo subprovinciale ≤ 10 s; differenze versionate.	Dip.: E2–E4
E1 4	Versioning & Audit end-to-end (run MCDA/geoeco)	Alto	Basso	Schema manifest; storage.	Manifest per ogni run con hash input/output; diff tra run disponibile.	Dip.: E1–E4
E1 5	Playbook DR & esercitazioni trimestrali	Medio	Basso	Runbook; tabella responsabilità.	2 esercitazioni/anno concluse; report con tempi misurati.	Dip.: E7

E1 6	Packaging per replicabilità (GPKG/COG + config)	Medio	Basso	Template pacchetti; checklist portabilità.	Bundle export funzionante; import in ambiente «test» OK.	Dip.: E1–E4
E1 7	Permitting overlay & checklist vincoli	Alto	Medio	Regole «nogo» e condizionali; buffer normativi.	Overlay coerenti; export GeoPackage vincoli; 0 incongruenze note.	Dip.: E1–E3
E1 8	Privacy & anonimizzazione dati sensibili	Alto	Basso	Policy PII; masking/anonymize.	Nessun dato sensibile in open; test re-identificazione: 0 casi.	Dip.: E1–E7
E1 9	Monitoraggio prestazionale impianti (M&V) minimo	Medio	Medio	Schema misure (COP/EER, ΔT , portate).	Formato dati standard ingestibile; 3 siti pilota attivi.	Dip.: E4
E2 0	Formazione & handover operativo	Medio	Basso	Piano formativo; materiali.	Sessioni completate; verbali di accettazione e competenza.	Dip.: E3–E7

C.2 Classi di test

Per ciascuna classe si riportano casi, obiettivi, precondizioni, passi chiave, criteri di accettazione con verbi/misure e l'evidenza attesa.

Integrazione dati

Caso	Obiettivo	Precondizioni	Passi chiave	Criterio di accettazione	Evidenza attesa
ETL-01	Validare schemi, unità e domini	Schema mapping definito; dataset grezzi disponibili	Eseguire pipeline ETL su dataset prioritari	100% controlli schema passati; 0 errori bloccanti; warning $\leq 2\%$ record	Report QA (CSV, log)
ETL-02	Verificare coerenza topologica/geometrica	GeoDB armonizzato v1	Eseguire validazioni topologiche (self-intersect, overlaps, gaps)	Errori topologici corretti $\leq 0,1\%$ della geometria totale	Report topologico; lista fix
ETL-03	Completare metadati ISO 19115	Profilo metadati definito	Compilare campi obbligatori; validare profilo	Completezza = 100% campi obbligatori	Schede metadati; validatore OK
ETL-04	Versionare run MCDA/geoeco	Manifest schema pronto	Generare manifest con hash input/output	Manifest presente; hash verificabile; diff tra run generato	Manifest .json e diff HTML
ETL-05	Controllare unità di misura/CRS	Lista CRS/unità	Eseguire check unità (m, °C, W/mK) e CRS	0 mismatch unità; CRS coerente con EPSG target	Checklist unità/CRS

Performance

Caso	Obiettivo	Precondizi oni	Passi chiave	Criterio di accettazione	Evidenza attesa
PERF -01	Misurare latenza query API	Ambiente test; dataset indicizzati	Eseguire 1000 query bbox/datetime/w here	$p50 \leq 2 \text{ s}$, $p95 \leq 5 \text{ s}$; errori $4xx/5xx = 0$	Log JMeter/Locus t; grafici
PERF -02	Ricalcolo scenari «what- if»	Parametri scenario definiti	Eseguire ricalcoli subprovinciali	Tempo ricalcolo $\leq 10 \text{ s}$; memoria picco $\leq$ soglia; nessun errore	Report prestazioni; metriche sistema
PERF -03	Test di carico concorrente API	Harness carico pronto	Simulare ≥ 100 richieste concorrenti per 10 minuti	Tasso successo $\geq 99\%$; throughput stabile; coda $\leq$ soglia	Grafici carico; SLO report
PERF -04	Export GeoPackage/ GeoTIFF	Layer pronti all'export	Eseguire export su 3 layer grossi (multi-GB)	Tempo export $\leq$ N min/layer; checksum valido	File export + checksum
PERF -05	Cache & rate limiting	Cache configurata ; limiti definiti	Eseguire burst di richieste	Hit ratio $\geq 70\%$; nessun 429 in uso normale; degradazione controllata in burst	Report cache; log gateway

Usabilità

Caso	Obiettivo	Precondizioni	Passi chiave	Criterio di accettazione	Evidenza attesa
UX-01	Leggibilità e legenda	Build viewer	Test con 5 utenti e scala colori	Comprensione corretta $\geq 90\%$; contrasto $\geq 4.5:1$ (WCAG AA)	Questionari SUS; screenshot
UX-02	Navigazione da tastiera	Build viewer con focus states	Percorrere tutte le funzioni via tastiera	Copertura funzionale = 100%; nessun trap di focus	Checklist WCAG; video test
UX-03	Feature info e tooltip	Layer e schede info pronte	Aprire 30 feature info su classi diverse	Completezza campi $\geq 95\%$; tempo medio ≤ 3 s	Registri test; screenshot
UX-04	Scenari «what-if» discoverability	UI parametri abilitata	Task di modifica pesi/parametri	Tasso successo utenti $\geq 85\%$; tempo task ≤ 60 s	Report test con timestamp
UX-05	Messaggi di errore chiari	Forzare 5 errori noti	Elicitare errori e leggere messaggi	Messaggi comprensibili (Likert $\geq 4/5$); presenza ID errore/log	Screenshot; log correlati

Sicurezza

Caso	Obiettivo	Precondizioni	Passi chiave	Criterio di accettazione	Evidenza attesa
SEC-01	IAM ruoli e permessi (least privilege)	Ruoli configurati; utenti di prova	Testare accessi per ruolo (pubblico, viewer, analyst, editor, admin)	Nessuna escalation; accessi negati correttamente; log completo	Report IAM; audit trail
SEC-02	OWASP API (authz, rate limit, input)	Gateway sicuro; test suite	Eseguire batteria OWASP	0 vulnerabilità critiche/alte; medium ≤ 2 con workaround	Report OWASP firmato
SEC-03	Backup/restore e DR	Backup giornalieri; warm standby	Eseguire drill di ripristino	RPO ≤ 24 h; RTO ≤ 4 h; integrità dati verificata	Verbale drill; checksum; tempi misurati
SEC-04	Anonimizzazione e dati sensibili	Policy PII; dataset campione	Tentare re-identificazione su dataset open	Tasso re-identificazione = 0; mascheramento conforme	Report privacy; script anonimizzazione
SEC-05	Audit trail e immutabilità log	Sistema di log centralizzato	Verificare catena di custodia log	Log firmati e a prova di manomissione; retention ≥ 12 mesi	Estratti log; verifica firma

Nota: i KPI di servizio (es. disponibilità, latenza, RPO/RTO) sono integrati nei criteri di accettazione; ogni esito è tracciato in un registro di audit con evidenze allegate.

APPENDICE D — GOVERNANCE & SITI (CHECKLIST + SCHEDE)

Rimandi: cfr. §6.4 (sicurezza & governance); cfr. §5 (schede).

D.1 Checklist autorizzative/compliance

Ente	Atto/Permesso	Prerequisiti	Tempi tipici	Note operative
Comune (SUAP/SUE)	Titolo edilizio: Edilizia Libera/PAS (closed loop; opere superficiali open loop)	Relazione geologica/geotecnica; progetto esecutivo (layout sonde, materiali, grout, R_b attesa); piano cantiere (protezione acquiferi, gestione fanghi); piano M&V (baseline/collaudo/esercizio).	EL: contestuale a deposito; PAS: ~30–60 gg*	Verifiche su scavi e sottoservizi; rispetto distanze e norme locali.
Autorità di bacino / Regione (Risorsa idrica)	Concessione di derivazione (open loop)	Bilancio idrico; prova di pompaggio; qualità chimico-fisica; analisi interferenze con altri usi.	~90–180 gg*	Limiti su portate e sostenibilità; coordinamento con ARPA.
Autorità di bacino / Regione (Risorsa idrica)	Autorizzazione alla restituzione/ricarica (open loop, ATES)	Modellazione plume termico; ΔT ammissibile; rete piezometri e piano M&V.	~90–180 gg*	Parametri di esercizio (ΔT , portate) da definire in collaudo;

				reporting periodico.
ARPA (Ambiente)	Parere/N.O. ambientale e validazione piano M&V	Piano monitoraggi (livelli, qualità, temperatura); baseline; frequenze e punti di misura.	~60- 120 gg*	Controlli in esercizio; audit su dati e prestazioni.
Soprintendenza /Ente paesaggistico	Parere paesaggistico/beni culturali (ove vincoli)	Inquadramento paesaggistico; mitigazioni; elaborati grafici e fotografici.	~45-90 gg*	Aree protette/Na tura 2000: misure low impact; coordiname nto con Comune.
Comune	Occupazione suolo pubblico e viabilità di cantiere	POS/PSC; planimetrie; cronoprogramma; misure sicurezza.	7-30 gg*	Cantieri in aree urbane: fasature e rumore; orari; ripristini.
Gestori sottoservizi (multiutility/en ti)	Nulla osta interferenze/scavi/perf orazioni	Tavole con tracciati; distanze minime; metodo di perforazione.	7-30 gg*	Aggiornare tracciati as- built; chiamate sottoservizi prima dello scavo.
Direzione Lavori / Collaudatore	Collaudo tecnico- funzionale	Prove integrità/tenuta; TRT ove richiesto;	A fine lavori	Consegna dati di collaudo; registro

		parametri di accettazione.		prove e schede materiali.
Registro impianti / Catasto sonde/pozzi (regionale)	Iscrizione e consegna dati	Georeferenziazione; parametri di progetto/collaudato; run M&V iniziali.	Post- collaudo	Alimenta GeoDB regionale e dashboard KPI.

* Tempi indicativi: adeguare a prassi locale e a specifici vincoli.

D.2 Schede siti (formato standard)

Sito A — contesto vulcanico

- Comune/Area: Archetipo A — area vulcanica etnea (pedemontana)
- Contesto geologico: Lave fratturate + coperture piroclastiche; K elevata ma discontinua; falde locali/circuiti in fratture
- Potenziale kWth/ha: 648–1152 (proxy: spaziatura 6–8 m; 45 W/m; L=100 m)
- Vincoli critici: ΔT restituzione/open loop; tutela acque; vincoli paesaggistici/locali; interferenze termiche

Punti chiave (5):

- Opportunità: GSHP verticali con grout ad alta λ ; BTES per bilanci stagionali.
- Rischi: aggressività idrochimica (Fe–Mn/CO₂), microdeformazioni locali, interferenze termiche cumulative.
- Priorità d'azione: spaziature minime sito-specifiche; piano M&V; catasto sonde e regole di clusterizzazione.
- Replicabilità: alta con standard dati/IAM e template permitting; utile per altri vulcani mediterranei.
- Rimando: cfr. Cap. 5 (Sito A).

Sito B — isola minore

- Comune/Area: Archetipo B — isola minore mediterranea (turistica)
- Contesto geologico: Vulcaniti/riempimenti costieri; λ variabile; attenzione a salinità in fascia costiera
- Potenziale kWth/ha: 648–1800 (proxy: spaziatura 5–8 m; 45 W/m; L=100 m)
- Vincoli critici: Paesaggio/aree protette; risorsa idrica scarsa; logistica/cantieri stagionali

Punti chiave (5):

- Opportunità: GSHP + micro-BTES; valutare ATES su sabbie ad alta K; opzione seawater-HP per utenze costiere.
- Rischi: intrusione salina e biofouling negli open loop; vincoli paesaggistici stringenti; rete elettrica debole.
- Priorità d'azione: preferire closed loop; presidio ΔT /qualità; pianificazione cantieri extra-stagione.
- Replicabilità: media-alta con modulistica standard e layer vincoli aggiornati.
- Rimando: cfr. Cap. 5 (Sito B).

Sito C — tessuto urbano/produttivo

- Comune/Area: Archetipo C — tessuto urbano/produttivo (piana costiera)

- Contesto geologico: Riempimenti/alluvionali; falde superficiali continue ma vulnerabili; fitti sottoservizi
- Potenziale kWth/ha: 450–1152 (proxy: spaziatura 6–10 m; 45 W/m; L=100 m)
- Vincoli critici: Distanze da sottoservizi/fondazioni; interferenze termiche; regole su scavi/perforazioni

Punti chiave (5):

- Opportunità: campi GSHP multi-utenza e reti 5GDHC; ATES in sedimenti ad alta K.
- Rischi: interferenze tra lotti; vulnerabilità acquiferi; cantierabilità complessa.
- Priorità d'azione: zoning capacità e interassi; catasto sonde/pozzi; standard M&V e regole ATES comunali.
- Replicabilità: alta se esiste governance locale (viewer vincoli + checklist §4.4).
- Rimando: cfr. §5 (Sito C).

APPENDICE E — ROADMAP TRL

Roadmap TRL: milestones, dimostratori, criteri di successo e requisiti organizzativi

TRL	Milestone tecnica	Integrazioni prioritarie	Dimostratori	Criteri di successo	Requisiti organizzativi
5→6	GeoDB completo; MCDA in GIS con audit; API modello geoeconomico; pannelli KPI	Metadati/INSPIRE ; versionamento; dataset idrogeochimici; profili di rischio	Test in ambiente pre-operativo	AUC $\geq 0,80$; sensibilità/specificità per classe $\geq 0,75$; riproducibilità pesi/funzioni	Team dati+GIS; accordi di licenza; manuali utente
6→7	Tre living lab (vulcanico, isola minore, urbano/produttivo); sensori e protocolli	Monitoraggio ΔT , portate, qualità acqua; interferenze; early-warning	Reti pilota open-/closed-loop e ATES/BTES	Scarto prestazioni stima/misura $\leq \pm 10-15\%$; $\Delta LCOH$ vs fossile $\geq 15\%$	Cabina di regia; formazione utenti; template permessi
7→8	Integrazione 5GDHC/UTES; energy sharing termico; contabilità CO ₂	Dispatch termico; domanda oraria; incentivi/Conto Termico	Quartiere o area produttiva	CO ₂ evitata; riduzione picchi elettrici; SLA qualità dati	Accordi PA-utility; governance accessi; aggiornamenti o semestrale pesi
8→9	Piattaforma regionale con SLA; workflow autorizzativi	UNI/VDI; DM 30/09/2022; EPBD/RED	Servizio in esercizio	KPI pubblici e auditabili; report semestrali	Help-desk; audit; budget O&M