



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DELLA BASILICATA
Dipartimento di Scienze
CORSO DI LAUREA IN GEOSCIENZE E GEORISORSE – GEOSCIENCES AND
GEORESOURCES

Tesi sperimentale in Geologia Applicata ed Idrogeologia

“Vulnerabilità intrinseca all’inquinamento delle falde idriche
sotterranee contenute negli acquiferi posti nel settore nord-
orientale della Val d’Agri (Basilicata, Italia)”

Relatore:
Prof. Salvatore Grimaldi

Candidato:
Nicola Costantino
Matricola n. 61359

Correlatore:
Prof. Giacomo Prosser

Anno Accademico: 2021/2022

INDICE

INDICE.....	2
CAP.1 INTRODUZIONE.....	10
CAP.2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO, GEOGRAFICO ED IDROGEOLOGICO DELL'AREA DI STUDIO.....	12
2.1 Appennino Meridionale.....	12
2.2 Alta Val d'Agri.....	17
2.3 Unità Stratigrafiche.....	25
2.4 Inquadramento morfologico ed idrogeologico degli acquiferi.....	31
2.4.1 Acquifero del Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola.....	32
2.4.2 Acquifero Volturino Est.....	35
2.4.3 Acquifero del Monte di Viggiano.....	37
2.4.4 Acquifero Alli.....	40
CAP.3 VULNERABILITÀ DEGLI ACQUIFERI.....	43
3.1 Acque sotterranee.....	43
3.2 Prevenzione dell'inquinamento delle acque sotterranee.....	44
3.2.1 La difesa di punto.....	45
3.2.2 La difesa a tutto campo.....	48
3.3 Tipologie di vulnerabilità.....	48
3.4 Vulnerabilità Intrinseca.....	50
3.5 Carta della Vulnerabilità Intrinseca.....	51

CAP.4 METODOLOGIE.....	54
4.1 Metodi per la valutazione della Vulnerabilità Intrinseca..	54
4.1.1 Zonazione per aree omogenee.....	54
4.1.1.1 Metodo Base GNDCl-CNR.....	55
4.1.2 Valutazione per modelli numerici.....	58
4.1.3 Valutazione per sistemi parametrici.....	58
4.2 Il Metodo SINTACS.....	61
4.2.1 Soggiacenza (S).....	62
4.2.2 Infiltrazione (I).....	63
4.2.3 Effetto di autodepurazione del Non saturo (N)....	66
4.2.4 Tipologia di copertura (T).....	68
4.2.5 Caratteristiche idrogeologiche dell'Acquifero (A).....	70
4.2.6 Conducibilità idraulica dell'acquifero (C).....	71
4.2.7 Acclività della Superficie topografica (S).....	72
4.2.8 Stringhe di Pesi.....	73
4.2.9 L'indice di Vulnerabilità.....	77
4.3 Il Metodo EPIK.....	79
4.3.1 Acquifero carsico.....	80
4.3.2 Epicarso (E).....	84
4.3.3 Copertura Protettiva (P).....	85
4.3.4 Condizioni d'Infiltrazione (I).....	87
4.3.5 Sviluppo del network Carsico (K).....	89
4.3.6 Fattore di Protezione e Grado di Vulnerabilità....	91
4.4 Il Metodo GOD.....	94
4.4.1 Il Fattore G.....	95
4.4.2 Il Fattore O.....	96
4.4.3 Il Fattore D.....	97

4.4.4 Indice GOD.....	97
4.5 Approccio Combinato.....	98
4.6 Bilancio Idrogeologico.....	100
4.6.1 Implementazione GIS.....	101
CAP.5 CALCOLO DEL BILANCIO IDROGEOLOGICO DI ALCUNI DEGLI ACQUIFERI.....	103
5.1 Porzione medio-alta del bacino idrografico – T. Alli.....	111
5.2 Sistema acquifero Alli.....	118
5.3 Sistema acquifero Volturino Est.....	123
5.4 Sistema acquifero Poroso della Piana alluvionale.....	127
CAP.6 METODICHE DI ELABORAZIONE E APPLICAZIONI NELLA VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ IN ALCUNI ACQUIFERI DELL’ALTA VAL D’AGRI: SINTESI DEI DATI.....	131
6.1 Preparazione del database.....	132
6.2 Determinazione dei parametri e relativi punteggi nel metodo SINTACS.....	134
6.2.1 Acquifero Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola.....	135
6.2.1.1 Soggiacenza (S).....	136
6.2.1.2 Infiltrazione efficace (I).....	139
6.2.1.3 Effetto di autodepurazione del Non saturo (N).....	143
6.2.1.4 Tipologia di copertura (T).....	145
6.2.1.5 Caratteristiche idrogeologiche dell’Acquifero (A).....	146
6.2.1.6 Conducibilità idraulica dell’acquifero (C).....	148

6.2.1.7 Acclività della Superficie topografica (S).....	149
6.2.1.8 Carta della Vulnerabilità Intrinseca.....	152
6.2.2 Acquifero Volturino Est.....	155
6.2.2.1 Soggiacenza (S).....	156
6.2.2.2 Infiltrazione efficace (I).....	158
6.2.2.3 Effetto di autodepurazione del Non saturo (N).....	161
6.2.2.4 Tipologia di copertura (T).....	161
6.2.2.5 Caratteristiche idrogeologiche dell'Acquifero (A).....	162
6.2.2.6 Conducibilità idraulica dell'acquifero (C).....	163
6.2.2.7 Acclività della Superficie topografica (S).....	165
6.2.2.8 Carta della Vulnerabilità Intrinseca.....	167
6.2.3 Acquifero del Monte di Viggiano.....	168
6.2.3.1 Soggiacenza (S).....	169
6.2.3.2 Infiltrazione efficace (I).....	171
6.2.3.3 Effetto di autodepurazione del Non saturo (N).....	174
6.2.3.4 Tipologia di copertura (T).....	174
6.2.3.5 Caratteristiche idrogeologiche dell'Acquifero (A).....	175
6.2.3.6 Conducibilità idraulica dell'acquifero (C).....	176
6.2.3.7 Acclività della Superficie topografica (S).....	178
6.2.3.8 Carta della Vulnerabilità Intrinseca.....	180

6.2.4 Acquifero Alli.....	181
6.2.4.1 Soggiacenza (S).....	182
6.2.4.2 Infiltrazione efficace (I).....	184
6.2.4.3 Effetto di autodepurazione del Non saturo (N).....	187
6.2.4.4 Tipologia di copertura (T).....	187
6.2.4.5 Caratteristiche idrogeologiche dell'Acquifero (A).....	188
6.2.4.6 Conducibilità idraulica dell'acquifero (C).....	189
6.2.4.7 Acclività della Superficie topografica (S).....	191
6.2.4.8 Carta della Vulnerabilità Intrinseca.....	193
6.2.5 Acquifero Poroso della Piana alluvionale.....	194
6.2.5.1 Soggiacenza (S).....	195
6.2.5.2 Infiltrazione efficace (I).....	199
6.2.5.3 Effetto di autodepurazione del Non saturo (N).....	202
6.2.5.4 Tipologia di copertura (T).....	203
6.2.5.5 Caratteristiche idrogeologiche dell'Acquifero (A).....	204
6.2.5.6 Conducibilità idraulica dell'acquifero (C).....	204
6.2.5.7 Acclività della Superficie topografica (S).....	206
6.2.5.8 Carta della Vulnerabilità Intrinseca.....	208
6.3 Determinazione dei parametri e relativi punteggi nel metodo EPIK.....	209

6.3.1 Acquifero Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola.....	209
6.3.1.1 Epicarso (E).....	210
6.3.1.2 Copertura Protettiva del suolo (P).....	213
6.3.1.3 Condizioni d’Infiltrazione (I).....	215
6.3.1.4 Grado di sviluppo della rete Carsica (K).....	217
6.3.1.5 Carta della Vulnerabilità Intrinseca.....	219
6.3.2 Acquifero Volturino Est.....	221
6.3.2.1 Epicarso (E).....	221
6.3.2.2 Copertura Protettiva del suolo (P).....	223
6.3.2.3 Condizioni d’Infiltrazione (I).....	224
6.3.2.4 Grado di sviluppo della rete Carsica (K).....	225
6.3.2.5 Carta della Vulnerabilità Intrinseca.....	227
6.3.3 Acquifero del Monte di Viggiano.....	228
6.3.3.1 Epicarso (E).....	228
6.3.3.2 Copertura Protettiva del suolo (P).....	230
6.3.3.3 Condizioni d’Infiltrazione (I).....	231
6.3.3.4 Grado di sviluppo della rete Carsica (K).....	232
6.3.3.5 Carta della Vulnerabilità Intrinseca.....	234
6.3.4 Acquifero Alli.....	235
6.3.4.1 Epicarso (E).....	235
6.3.4.2 Copertura Protettiva del suolo (P).....	237
6.3.4.3 Condizioni d’Infiltrazione (I).....	238

6.3.4.4 Grado di sviluppo della rete Carsica (K).....	239
6.3.4.5 Carta della Vulnerabilità Intrinseca.....	241
6.4 Determinazione dei parametri e relativi punteggi nel metodo GOD.....	242
6.4.1 Acquifero Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola.....	242
6.4.1.1 Grado di confinamento acquifero (G)....	243
6.4.1.2 Strati Sovrastanti (O).....	244
6.4.1.3 Soggiacenza (D).....	246
6.4.1.4 Carta della Vulnerabilità Intrinseca.....	247
6.4.2 Acquifero Volturino Est.....	248
6.4.2.1 Grado di confinamento acquifero (G)....	248
6.4.2.2 Strati Sovrastanti (O).....	249
6.4.2.3 Soggiacenza (D).....	250
6.4.2.4 Carta della Vulnerabilità Intrinseca.....	252
6.4.3 Acquifero del Monte di Viggiano.....	253
6.4.3.1 Grado di confinamento acquifero (G)....	253
6.4.3.2 Strati Sovrastanti (O).....	254
6.4.3.3 Soggiacenza (D).....	255
6.4.3.4 Carta della Vulnerabilità Intrinseca.....	257
6.4.4 Acquifero Alli.....	258
6.4.4.1 Grado di confinamento acquifero (G)....	258
6.4.4.2 Strati Sovrastanti (O).....	259
6.4.4.3 Soggiacenza (D).....	260

6.4.4.4 Carta della Vulnerabilità Intrinseca.....	262
6.4.5 Acquifero Poroso della Piana alluvionale.....	263
6.4.5.1 Grado di confinamento acquifero (G)....	263
6.4.5.2 Strati Sovrastanti (O).....	264
6.4.5.3 Soggiacenza (D).....	265
6.4.5.4 Carta della Vulnerabilità Intrinseca.....	270
6.5. Metodo Base GNDCI-CNR.....	271
CAP.7 DISCUSSIONI E CONCLUSIONI.....	275
BIBLIOGRAFIA.....	280
RINGRAZIAMENTI.....	297
ALLEGATI.....	300

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE

Il presente lavoro di Tesi è stato realizzato al fine di definire, quantificare e valutare la Vulnerabilità Intrinseca degli acquiferi sotterranei, ovvero la facilità con cui un contaminante introdotto in superficie o direttamente nel sottosuolo, idroveicolato, può raggiungere e diffondersi nelle acque sotterranee (Margat, 1968), posti in sinistra idrica dell'Alta Val d'Agri. L'area di studio è stata scelta sulla base di diverse considerazioni: L'importanza che questi acquiferi hanno nell'approvvigionare buona parte dei centri abitati localizzati nell'area ed al di fuori di essa e nel fornire acqua per uso irriguo alle numerose aziende agricole; la presenza di centri urbanizzati, attività commerciali e di aziende molto diversificate fra loro ed infine la conoscenza idrogeologica sufficiente alla valutazione.

La vulnerabilità intrinseca è definita come la suscettibilità specifica dei sistemi acquiferi, nelle loro diverse parti componenti e nelle diverse situazioni geometriche ed idrodinamiche, ad ingerire e diffondere, anche mitigandone gli effetti, un inquinante fluido o idroveicolato tale da produrre impatto sulla qualità dell'acqua sotterranea, nello spazio e nel tempo (Civita, 1987). Le acque sotterranee rivestono oggi un ruolo fondamentale nella definizione di criteri affidabili per la gestione del territorio. La salvaguardia di un corpo idrico sotterraneo assume un peso notevole se lo si considera come risorsa da cui trarre approvvigionamento per uso potabile, agricolo, industriale; per tale motivo, risulta ormai fondamentale circoscrivere, su un dato territorio, le aree maggiormente suscettibili alla contaminazione. Ogni tipologia di acquifero presenta un grado di sensibilità alla propagazione di contaminanti in funzione di differenti fattori, sia intrinseci all'acquifero, sia legati alle caratteristiche fisico-chimiche del contaminante. La valutazione della vulnerabilità degli acquiferi è uno strumento determinante per la pianificazione di metodi di salvaguardia delle risorse ambientali. In questo lavoro è stata effettuata una comparazione fra quattro metodologie per la valutazione delle vulnerabilità intrinseca dei sistemi acquiferi approcciando la stessa in modo "combinato". Nel dettaglio, rispettivamente, a punteggi e pesi (PCSM) sono stati applicati il metodo SINTACS R5 (Civita & De Maio, 2000) ed il metodo EPIK

(Doerfliger et al., 1999); a punteggio semplice (RS) il metodo GOD (Foster, 1987; Foster & Hirata, 1988; Foster et al., 2002); il Metodo Base Analogico GNDICI-CNR (Zonazione per aree omogenee) il quale si base sul confronto di situazioni idrogeologiche (Civita M. in: AA.VV., 1988; Civita M., 1990). L'applicazione delle sopracitate metodologie, opportunamente implementate in ambiente QGIS (software Opensource), ha portato alla creazione di una serie di "Carte delle Vulnerabilità Intrinseca" dei principali acquiferi presenti nel settore nord-est dell'Alta Val d'Agri.

CAPITOLO 2

INQUADRAMENTO GEOLOGICO, GEOGRAFICO ED IDROGEOLOGICO DELL'AREA DI STUDIO

2.1 Appennino Meridionale

L'area di studio ricade all'interno dell'Appennino Meridionale, il quale è formato da una catena a pieghe e sovrascorrimenti con vergenza orientale (Fig.1). La catena è costituita dalla sovrapposizione di diverse unità tettono-stratigrafiche, originatesi a partire dal Triassico Superiore in differenti domini paleogeografici del margine continentale passivo adriatico e dell'adiacente bacino oceanico della Neotetide.

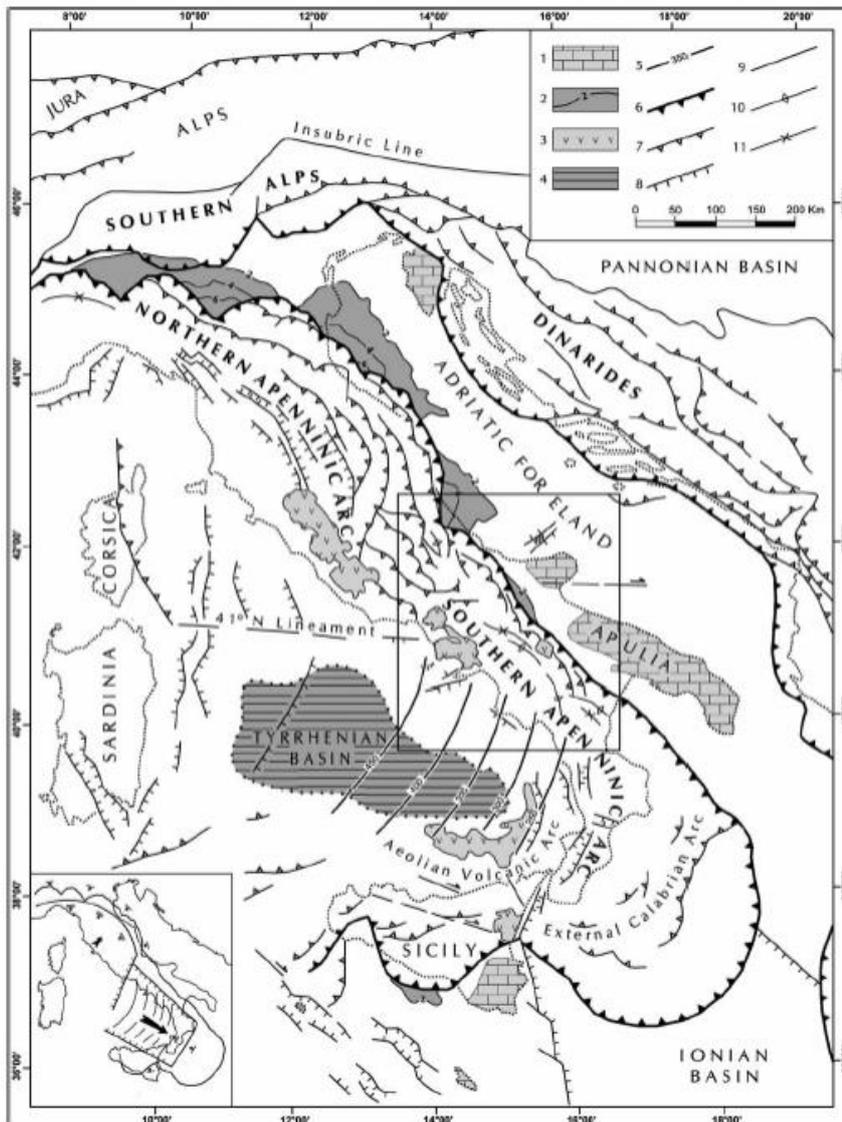


Figura 1. Schema tettonico dell'Italia (Patacca & Scandone, 2007).

Partendo da quello più occidentale, in letteratura sono stati riconosciuti i seguenti domini paleogeografici (Fig.2) (Mostardini & Merlini, 1986; Monaco et alii, 1988):

- Il Bacino Liguride consiste in una successione sedimentaria di mare profondo, ed in accordo con schemi di diversi autori (Monaco & Tortorici, 1955; Invernizzi et alii, 2008; Cavalcante et alii, 2012), sono state distinte due unità: 1) L'unità inferiore non metamorfica, al cui interno sono presenti basalti a pillow ricoperti dalle radiolariti del Giurassico Superiore, argilliti e quarzareniti (Formazione di Timpa delle Murge), argilliti nere (Formazione delle Crete Nere), torbiditi calcareo-silicoclastiche (Formazione del Saraceno). 2) L'unità superiore metamorfosata invece include corpi lenticolari di rocce mafiche ed ultramafiche (Unità del Frido);
- La piattaforma Campano-Lucana è formata da una pila di rocce carbonatiche di mare poco profondo del Mesozoico-Cenozoico, le quali si sono deposte in ambienti deposizionali da periditali a lagunari (Unità Alburno-Cervati-Pollino), e sono delimitati lateralmente da bacini marini composti da materiale bioclastico-detritico ridepositato (D'Argenio et alii, 1973; Scandone & Bonardi, 1968; Marsella & Pappone, 1992; Carannante et alii, 1988; Pescatore et alii, 1999; Iannace et alii, 2005);
- Il Bacino Lagonegrese è composto da rocce sedimentarie Mesozoiche-Cenozoiche da mare poco profondo a pelagiche, che hanno registrato la progressiva subsidenza al di sotto della CCD (profondità di compensazione dei carbonati) (Scandone, 1967). Nella parte superiore, il bacino, è formato da depositi silicoclastici di mare poco profondo (Formazione di Monte Facito), calcari silicei pelagici (Formazione degli Scisti Silicei) e da marne ed argille silicizzate (Formazione dei Galestri);
- La Piattaforma Apula rappresenta l'unità più profonda e si compone di una pila di rocce carbonatiche di mare poco profondo, di età Mesozoica-Cenozoica, che sovrasta la successione Permiano-Triassica delle evaporiti silicoclastiche (Crescenti, 1975; Mostardini & Merlini, 1986, Ricchetti et alii, 1988).

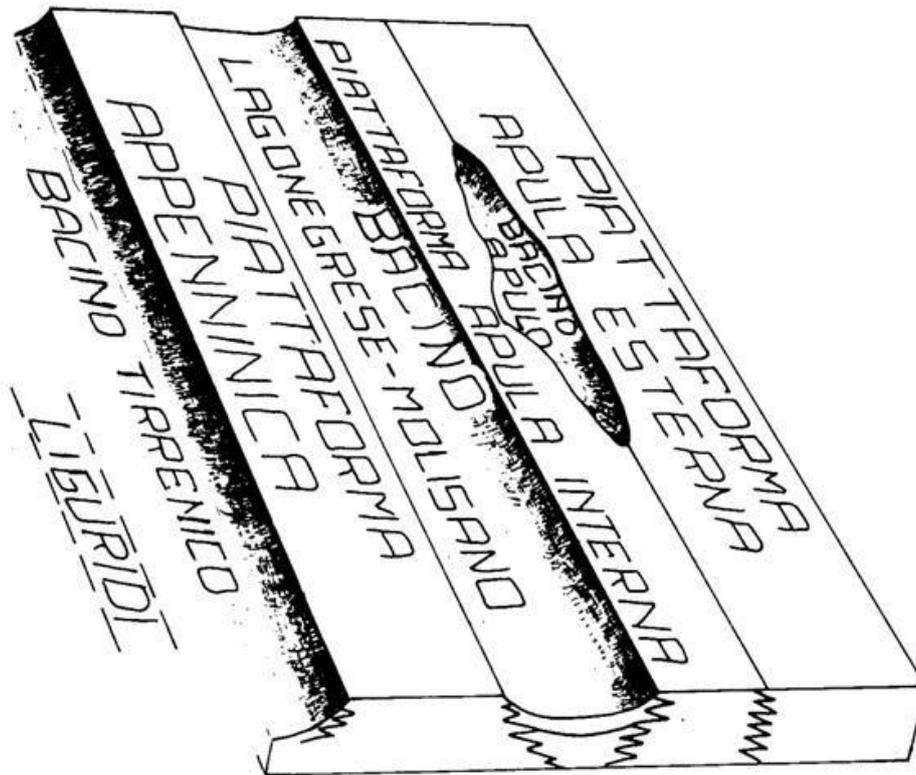


Figura 2. Domini paleogeografici dell'Appennino Meridionale (Mostardini & Merlini, 1986).

I limiti tra i sopracitati domini paleogeografici erano principalmente di natura tettonica, costituiti da faglie dirette sin-sedimentarie attive durante gli stadi di rifting (Fig.3) che hanno preceduto ed accompagnato l'apertura della Neotetide nel Giurassico. La presenza delle suddette faglie è stata dedotta sulla base dell'analisi delle variazioni di spessore e di facies delle successioni sedimentarie di età Mesozoica (cf. Mazzoli et alii, 2001), mentre le informazioni di carattere strutturale sono perlopiù frammentarie (Marchegiani et alii, 2006). L'apertura del bacino neotetideo ha determinato il conseguente allontanamento dei margini continentali Africano ed Europeo (Scandone, 1975; D'argenio & Alvarez, 1980; Mazzoli et alii, 2001).

A partire dall'Eocene (Knott, 1994), la deformazione contrazionale, riferibile alla chiusura della Neotetide, ha causato il raccorciamento del margine passivo adriatico, coinvolgendo i domini paleogeografici oggi affioranti nell'Appennino Meridionale (Monaco et alii, 1998). Una semplice schematizzazione bidimensionale delle diverse fasi tettoniche che hanno caratterizzato il rifting/driftting Mesozoico, il

raccorciamento orogenico neogenico e la dissezione quaternaria della catena a pieghe e sovrascorrimenti è riportata in Figura 3.

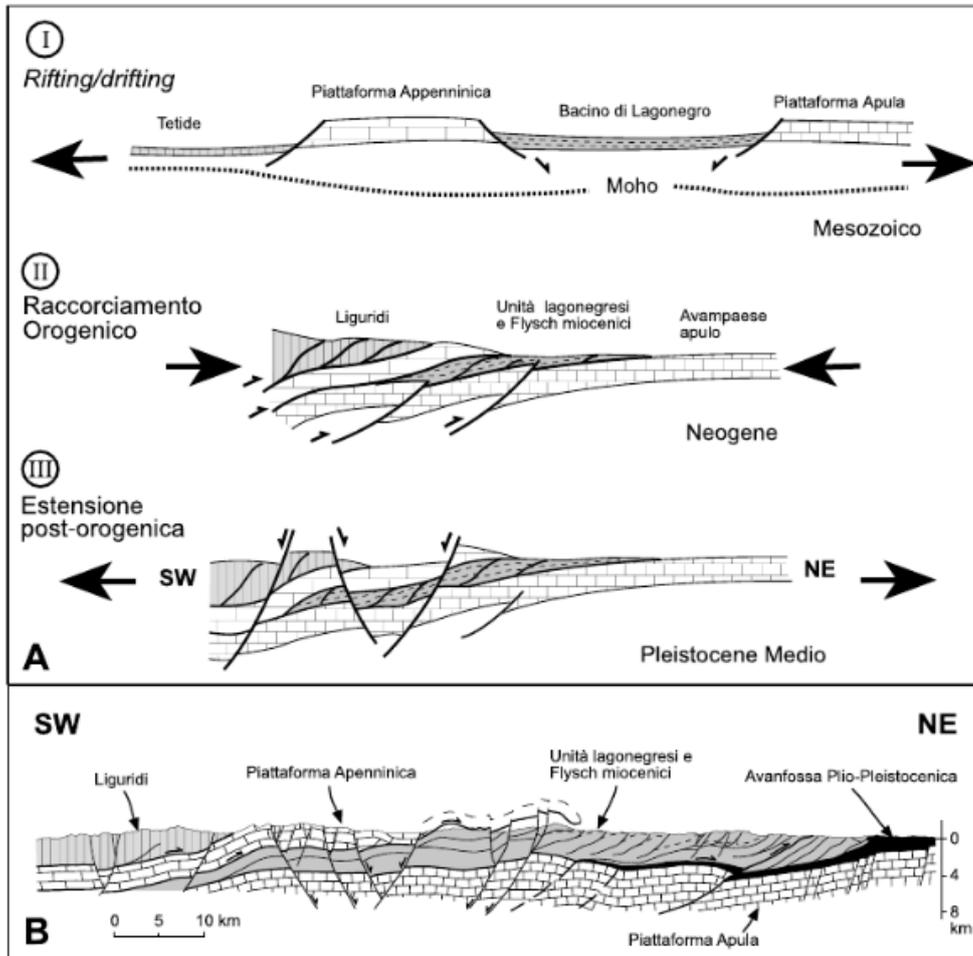


Figura 3. Schematizzazione, nelle sue diverse fasi, dell'evoluzione dell'Appennino Meridionale (Tavernelli et alii, 2003).

Le faglie dirette sin-sedimentarie sono state progressivamente riattivate e/o troncate da parte dei più recenti sovrascorrimenti e faglie inverse, le quali hanno determinato la strutturazione dell'edificio orogenico sud appenninico. I sovrascorrimenti sono caratterizzati da una geometria complessa, con presenza di rampe frontali, oblique e laterali la cui espressione cartografica è rappresentata da una configurazione arcuata in pianta (Scandone, 1967). La fase di deformazione contrazionale si è protratta per tutto l'intervallo Oligocene-Pleistocene, con una progressiva migrazione del fronte della catena verso l'avampaese Apulo ed una direzione di migrazione delle falde orogeniche verso i quadranti orientali e nord-orientali (Roure et alii, 1991). A partire dal Miocene Superiore

(Kastens et alii, 1988), il raccorciamento al fronte dell'orogene è stato accompagnato dalla deformazione distensiva delle porzioni più interne coincidenti con lo sviluppo assiale con direzione NO-SE della catena (Malinverno & Ryan, 1986; Royden et alii, 1987).

La dissezione della catena orogenica è quindi associata all'attività di faglie dirette ad alto angolo, molte delle quali ancora caratterizzate da un comportamento sismogenetico, che hanno interessato l'Appennino Meridionale a partire dal Pleistocene Medio (Hippolyte et alii, 1995). Lo sviluppo di queste strutture distensive è riferito all'apertura ed all'evoluzione del Tirreno Meridionale (Doglioni et alii, 1996), oppure al collasso gravitativo dell'orogene (Hippolyte et alii, 1995). Altre strutture tettoniche sono state attive durante il Neogene-Quaternario, come le faglie dirette debolmente inclinate (LANF, Low Angle Normal Faults) del Miocene Superiore-Pliocene Inferiore (Oldow et alii, 1993) e le faglie trascorrenti del Pliocene Inferiore (Catalano et alii, 1993).

In profondità, la struttura attuale dell'Appennino Meridionale viene interpretata come un complesso sistema di tipo multi-duplex, in cui l'attivazione di diversi sovrascorrimenti fuori sequenza all'interno di una propagazione di tipo piggy back ha portato alla formazione di numerosi roof thrust che bordano al tetto le diverse scaglie tettoniche (horses) corrispondenti ad unità tettoniche derivate da domini paleogeografici più esterni (Casero et alii, 1988; Patacca e Scandone, 1989, 2007; Lentini et alii, 1990). Le unità di provenienza paleogeografica più interna, Liguridi e Sicilidi, hanno avuto origine in un'area oceanica ed hanno iniziato a sovrapporsi non prima del Miocene Inferiore (Di Stasio & Giardini, 2002), formando un prisma d'accrezione sigillato da una successione sedimentaria deposta in bacini di thrust-top. Questa successione sedimentaria è formata da (Oceano Lucano in Bonardi et alii, 2000):

- Successioni bacinali pre-orogeniche del Giurassico-Oligocene superiore, che si sono deposte su crosta oceanica o continentale assottigliata e comprese nelle Unità Liguridi e Sicilidi;
- I depositi pre-collisionali dell'Aquitano-Burdigaliano corrispondenti alla porzione superiore arenacea della Formazione del Saraceno per le Unità Liguridi ed alle Arenarie

- di Corleto, alle Tufiti di Tusa ed alle Arenarie di Albanella per le Unità Sicilidi;
- I depositi di bacino del thrust-top del Gruppo del Cilento di età Burdigaliano Superiore-Langhiano-Serravalliano, poggianti in discordanza sulle Unità Liguridi e probabilmente anche sulle Unità Sicilidi;
 - I successivi depositi di bacino di thrust-top del Tortoniano della Formazione di Monte Sacro.

Successivamente, questo prisma d'accrezione è sovrascorso sui domini di piattaforma carbonatica impostati su crosta continentale. Tali domini sono stati denominati come Piattaforma Sud-Appenninica (Mostardini & Merlini, 1986; Pescatore, 1988), Piattaforma Campano-Lucana (Scandone, 1972; D'argenio et alii, 1973, 1975), Piattaforma Laziale-Campano-Lucana e Campano-Lucana-Calabrese separate dal bacino del M. Foraporta (Sgrosso, 1986, 1998), e Piattaforme Appenniniche separate dal bacino del M. Foraporta (Van Dijk et alii, 2000). Nel Miocene Superiore, il prisma tettonico si è ulteriormente spostato verso l'esterno coinvolgendo nella deformazione le successioni deposte all'interno dell'ampio bacino Lagonegrese e, quindi, tutti i domini paleogeografici più esterni (Piattaforma Abruzzese-Campana e bacino Molisano, D'argenio et alii, 1973; Piattaforme Abruzzese-Laziale-Campana, Abruzzese-Molisana ed Abruzzese, intercalate dai bacini "Molisani", Sgrosso, 1986, 1998; Piattaforme Apule interne ed esterne separate dal bacino Apulo, Mostardini & Merlini, 1986; Piattaforme Apule separate da un bacino, Van Dijk et alii, 2000; un'articolazione di piattaforme e bacini tra una piattaforma Appenninica ed una piattaforma Apula, Patacca & Scandone, 2007), sino alla Piattaforma Apula interna.

2.2 Alta Val D'Agri

L'alta Val d'Agri è collocata in un'area cruciale della catena a pieghe e sovrascorrimenti dell'Appennino meridionale, che corrisponde alla sua porzione assiale (Menardi Noguera & Rea, 2000). Il bacino intermontano dell'Alta Val D'Agri presenta una orientazione ONO-ESE, ed è delimitato da faglie bordiere dirette con direzione circa N120-140E e rappresenta una delle maggiori depressioni di origine

tettonica dell'Appennino Meridionale (Fig.5), riempita da una spessa coltre di depositi quaternari (Giano et al., 2000; Giano, 2011). Il substrato pre-Quaternario è ben esposto lungo entrambi i versanti della valle ed è stato perforato da una serie di pozzi realizzati per l'esplorazione di idrocarburi (Shiner et al., 2004). L'alta Val D'Agri è delimitata verso est da una soglia morfostrutturale rappresentata da una serie di rilievi localizzati tra l'abitato di Montemurro ed il torrente Armento e, litologicamente costituiti dai terreni silicoclastici della formazione del Gorgoglione. Quest'area di soglia coincide con la zona assiale di un'anticlinale con asse orientato NNO-SSE strutturalmente associata al sovrascorrimento dell'Armento (Fig.4).

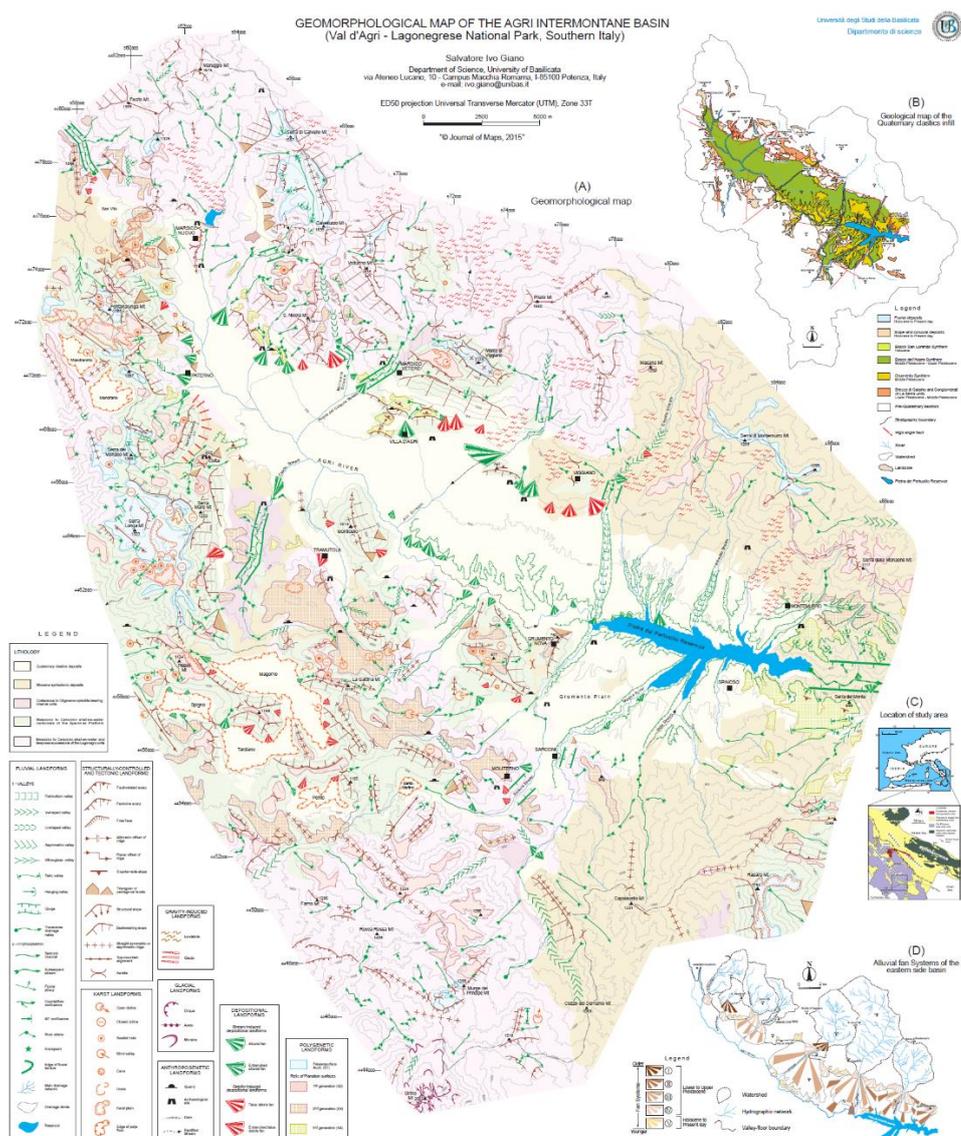


Figura 4. Carta Geomorfologica dell'Alta Val D'Agri (Giano S.I., 2006).

Questa struttura fa parte di una serie di sovrascorrimenti principali che caratterizzano il quadro strutturale dell'Alta Val D'Agri e che

mostrano una geometria generalmente arcuata con convessità verso est e con una direzione media N150, coincidente con l'andamento dell'intera dorsale appenninica. Il bacino risulta essere limitato orograficamente ad oriente dal gruppo montuoso del Monte Calvelluzzo-Monte Volturino-Madonna di Viggiano, la quale lo separa dall'adiacente bacino intermontano del Vallo di Diano.

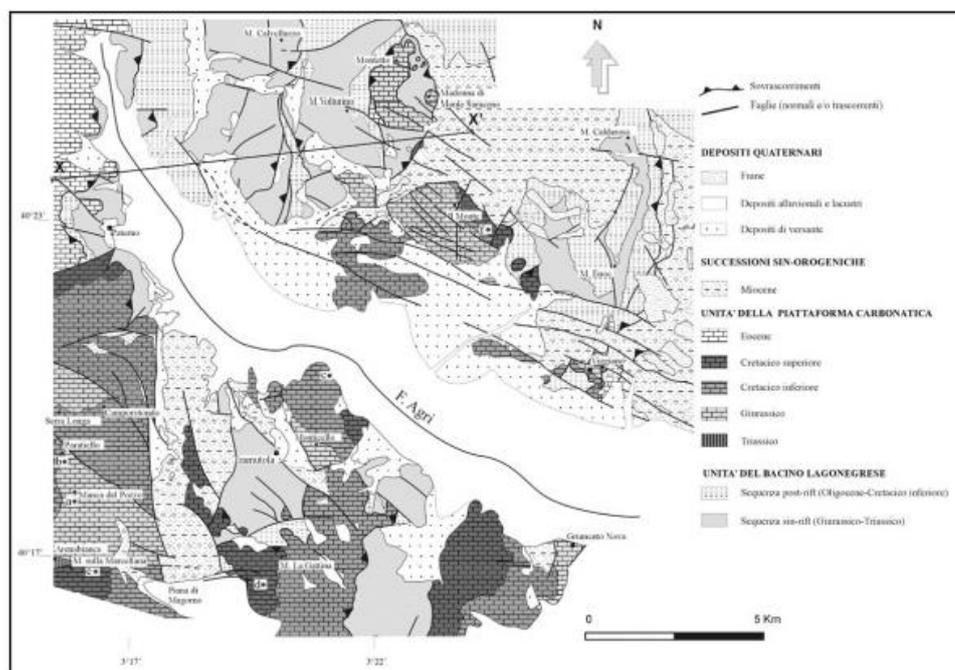


Figura 5. Schema geologico dell'Alta Val D'Agri, la linea $\overline{XX'}$ rappresenta la traccia della sezione geologica riportata in Figura 6 (Cello et alii, 2003).

I depositi del bacino si sono sedimentati su unità tettoniche derivanti dalla deformazione dei domini deposizionali Mesozoici-Terziari del paleo-margine passivo della placca Africano-Adriatica e, in misura minore, da unità tettoniche derivanti dalla deformazione di domini oceanici tetidei. L'esumazione ha avuto luogo principalmente durante il Tardo Pliocene-Pleistocene ed è stata guidata principalmente da faglie normali a basso angolo (Mazzoli et al., 2008; Bucci et al., 2014). Un sistema di faglie Quaternarie disseca le strutture pre-esistenti, formate da pieghe e sovrascorrimenti che hanno completamente sradicato le successioni sedimentarie dal loro substrato originario (Mostardini & Merlini, 1986; Cello et alii, 1990; Carbone et alii, 1991; Cinque et alii, 1993). In superficie, i sovrascorrimenti hanno determinato la sovrapposizione di unità tettoniche costituite da rocce

carbonatiche di mare poco profondo e di rampa, di età Mesozoico-Paleogene sulle unità Lagonegresi.

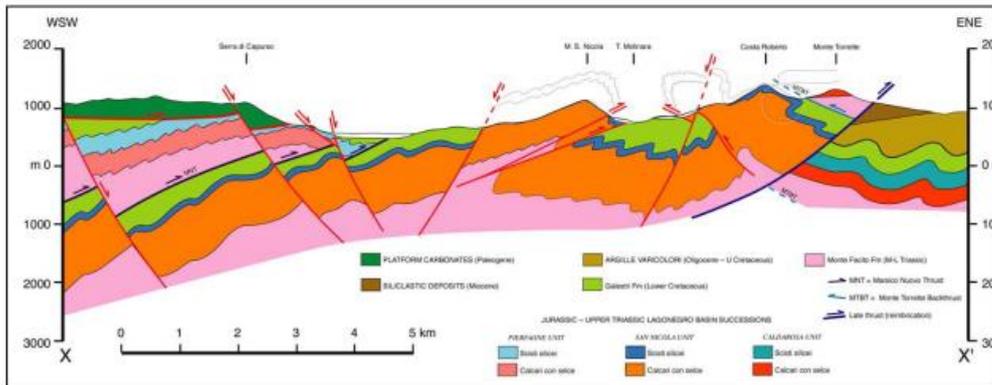


Figura 6. Sezione geologica interpretativa (traccia in Fig.2; Cello et alii, 2003).

Nell'area della Val D'Agri, il contratto tettonico contrazionale primario tra l'Unità Lagonegrese (Lagonegro II) ed il dominio della Piattaforma Appenninica è rappresentato dal sovrascorrimento dei Monti della Maddalena (MMT, FIG. 7). L'Unità della Lagonegro II ricopre tettonicamente l'Unità della Lagonegro I con un contatto esposto nell'area di Marsico Nuovo. Le Unità Lagonegresi sono a loro volta ricoperte tettonicamente da calcari Mesozoici/Terziari della Piattaforma Campano-Lucana e dalle successioni silico-clastiche dell'Unità Liguride. Lo spessore totale del carapace contrazionale al di sopra delle Unità Lagonegresi raggiunge spessori fino a circa 5-6 Km. Nel settore occidentale della valle, il sovrascorrimento regionale è caratterizzato dai prodotti della deformazione avvenuta in regime fragile-duttile, i quali sono ubicati nella porzione superiore del contatto ed hanno interessato principalmente le dolomie bianche del Triassico Superiore e, subordinatamente, i calcari Liassici della Piattaforma Appenninica (Fig.7).

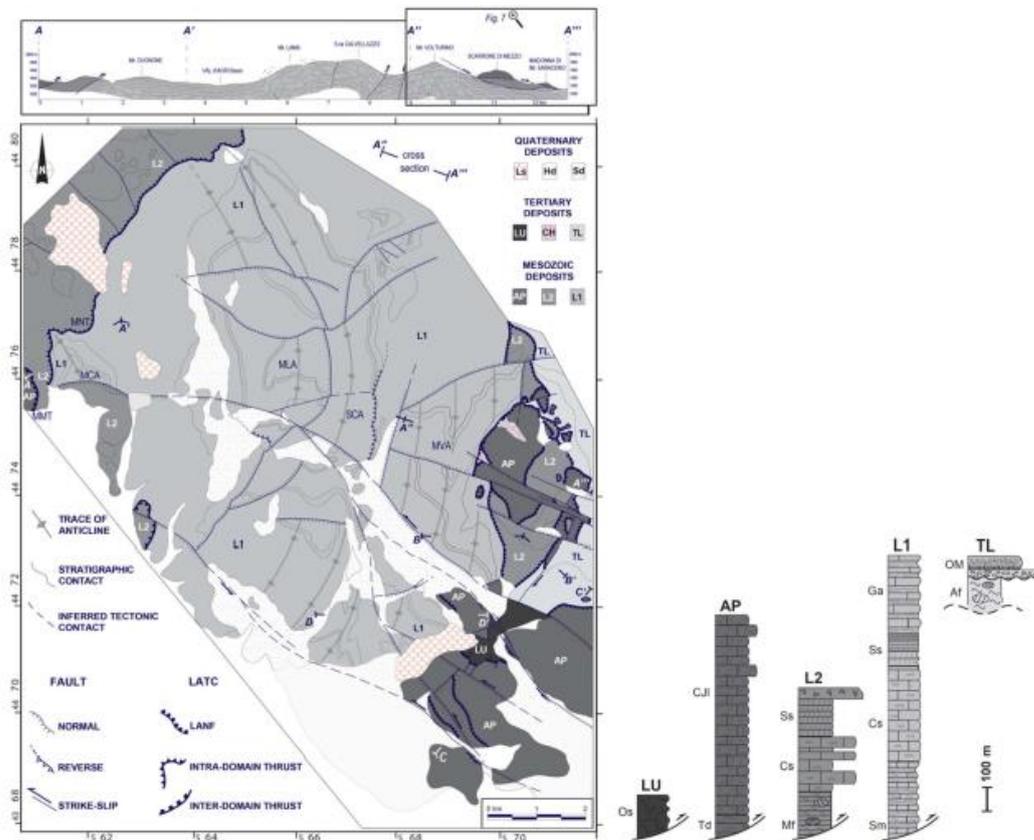


Figura 7. Schema geologico dell'Alta Val D'Agri con sezioni A-A' ed A''-A''' (LU – Unità Liguride; AP – Unità della Piattaforma Appenninica; L2 – Unità della Lagonegro II; L1 – Unità della Lagonegro I; TL – Sequenza di età Cretaceo–Terziario della Lagonegro. (Novellino et alii, 2010).

Al letto delle MMT, le Unità Lagonegresi sono intensamente deformate. Le faglie a basso angolo delimitano al letto i klippe della Piattaforma Appenninica e della Lagonegro II (Fig.8). In accordo con Lentini et alii (1991), i klippe, inizialmente, sono stati interpretati come relitti della deformazione contrazionale ma, successivamente, indagini geologiche e strutturali hanno documentato e messo in evidenza come il raddoppio delle Unità Lagonegresi sia avvenuto prima della formazione dei klippe, i quali sono stati quindi associati ad una fase deformativa più recente caratterizzata da faglie normali a basso angolo (LANF, Bucci et alii, 2012; Bucci et alii, 2014). Nella Val D'Agri le LANFs sono tagliate da due diversi set di faglie ad alto angolo (HANF) da normali ad oblique. Le prime (HANF N30-40) possono aver accomodato il dislocamento e producendo, localmente, depressioni morfologiche. Il secondo sistema di faglie è rappresentato dal sistema di faglie della Val D'Agri (AVFs) caratterizzate da faglie ad alto angolo da normali ad oblique (N110-120) (Fig.8). Le AVFs rappresentano la

principale caratteristica della Val D'Agri ed hanno favorito la formazione e sviluppo del bacino sedimentario attuale.

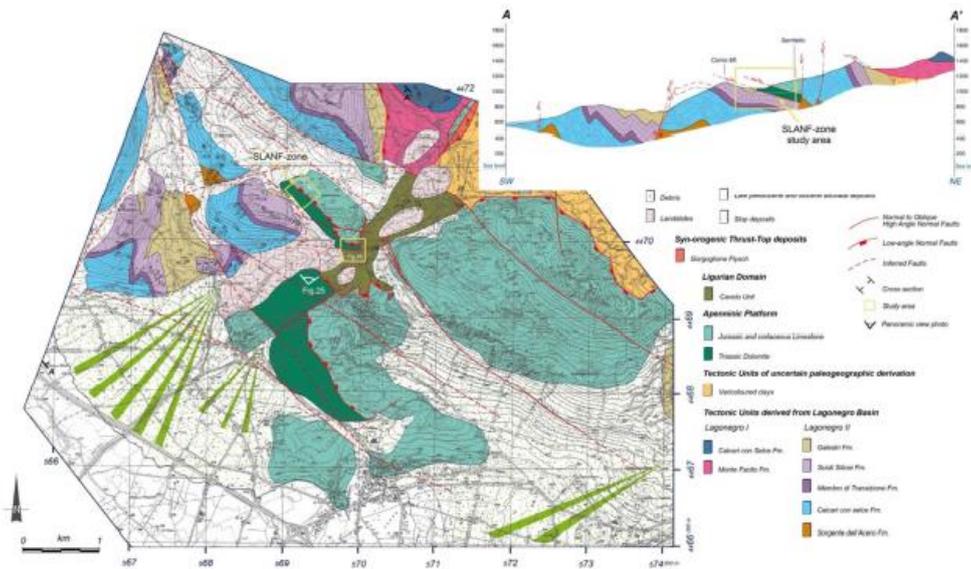


Figura 8. Dettaglio della carta geologica e sezione del settore orientale della Val D'Agri (A-A'; Novellino et alii, 2010).

Le principali unità tettono-stratigrafiche di origine lagonegrese sono due, con quella superiore che coinvolge i termini originariamente più prossimi, formanti pieghe e sovrascorrimenti con assi da NO-SE a N-S (Scandone, 1972; Carbone et alii, 1991). L'assetto strutturale delle Unità Mesozoiche-Terziarie costituisce, nell'insieme, un arco con convessità vergente ad est, rappresentato da piccole branchianticlinali ad andamento meridiano (Scandone, 1967) la cui disposizione è strettamente connessa alla tettonogenesi appenninica iniziata nel Miocene Inferiore (D'Argenio et alii, 1973 e 1975). Le principali strutture di tipo contrazionale sono dissecate ad alto angolo da diversi sistemi di faglie estensionali e trascorrenti, riferibili alle fasi tettoniche tardo-orogeniche del Pleistocene. Il più importante tra questi sistemi strutturali borda il bacino intermontano nel quale si sviluppa l'Alta Val D'Agri ed è formato da faglie a direzione media N120° (Fig.4), caratterizzate da una cinematica trascorrente sinistra durante il Pleistocene Medio (Giano et alii, 2000). Durante la più recente fase Plio-Pleistocenica e, precisamente, durante la riattivazione in regime estensionale di età Medio Pleistocenica che ha determinato la formazione delle faglie bordiere orientate N120°, si è sviluppato il bacino della Val D'Agri.

Gli studi geologici e geofisici integrati, effettuati durante l'ultima decade, richiesti principalmente dall'esplorazione di idrocarburi, hanno contribuito fortemente alla conoscenza e comprensione del contesto tettonico dell'area (Patacca & Scandone, 2007; Mazzoli et al., 2001). Questi studi hanno permesso la suddivisione del substrato in differenti falde alloctone sovrapposte e del riempimento Quaternario della valle in differenti unità stratigrafiche (Zembo, 2010; Giano, 2011; Giano, 2016).

L'organizzazione tettono-stratigrafica del substrato, dalle unità tettoniche geometricamente superiori a quelle inferiori, può essere schematizzata come segue:

- Complesso Liguride, rappresenta le unità tettoniche più superficiali. Consiste in una successione Meso-Cenozoica fortemente deformata appartenente al dominio Alpino-Tetideo, che originariamente si era depositata sopra la crosta oceanica (Bonardi et al., 1988). La successione, che rappresenta i resti del prisma di accrezione Liguride, composta principalmente da rocce metamorfiche e non metamorfiche; al di sopra di esse ritroviamo torbiditi di mare profondo (Cavalcante et al., 2012; Prosser et al., 2021).
- Unità Sicilidi, formate da una successione Meso-Cenozoica depositatasi in un bacino collocato tra il dominio Tetideo ed il paleo-margine settentrionale Africano (Ogniben, 1969b; Lentini, 1979; Patacca & Scandone, 2007). Questa unità consiste principalmente in argille bacinali e torbiditi.
- Unità della Piattaforma Appenninica, rappresentata da una successione di calcari Meso-Cenozoici originariamente ubicati nel margine settentrionale della placca Africana (Scandone & Bonardi, 1968; D'Argenio et al., 1973; Patacca & Scandone, 2007). Questa unità è composta principalmente da calcari di mare poco profondo di età Mesozoica, con la porzione più giovane rappresentata, invece, da depositi silicoclastici Miocenici, da continentali a bacinali, che testimoniano la separazione ed annegamento della piattaforma carbonatica (Patacca et al., 1992).
- Unità della Lagonegro II (Scandone, 1967; Scandone, 1972), è formata da una successione Meso-Cenozoica che si è deposta nel settore prossimale del Bacino di Lagonegro, ad Est della Piattaforma Appenninica. La successione registra la progressiva

apertura e subsidenza del bacino e la sua transizione da successioni di mare poco profondo a quelle di mare profondo (al di sotto della CCD) (Miconnet, 1988).

- Unità della Lagonegro I (Scandone, 1967; Scandone, 1972), è composta da una successione Meso-Cenozoica depositatasi nel settore assiale del Bacino di Lagonegro. La successione condivide caratteristiche simili con l'Unità della Lagonegro II; tuttavia, vi è la mancanza, alla base, dei depositi di mare poco profondo.

Infine, localmente il substrato è composto da torbiditi silicoclastiche che vanno da basali di versante a bacinali, di età Miocenica appartenenti alla Formazione di Gorgoglione, la quale rappresenta i depositi sin-orogenici di thrust-top che giacciono in discordanza sulle unità tettoniche sopra menzionate (Selli, 1962; Boiano, 1997).

Il riempimento Quaternario del versante sinistro della Val d'Agri consiste in uno spesso pacco di depositi di piana alluvionale e di conoide alluvionale, alimentati sia longitudinalmente che trasversalmente dalla valle, i quali si sono depositati sul bedrock Meso-Cenozoico.

2.3 UNITÀ STRATIGRAFICHE

In questo paragrafo viene effettuata una breve descrizione, sulla base della letteratura precedente, di tutte le unità affioranti nell'area di studio:

- Unità Liguride:

Nella nostra area di studio abbiamo riconosciuto soltanto le formazioni più giovani, rappresentate dalle formazioni del Saraceno e di Albidona. La Formazione del Saraceno (**FSC**) è stata trovata solo in un affioramento a Nord di Viggiano. Essa è caratterizzata da un'alternanza di argille, calcilutiti e calcareniti. Sulla base di Torricelli & Amore (2003) l'età ha un range che va dal Medio al Tardo Cretaceo. La Formazione di Albidona (**FAB, FABa, MRN**) affiora ampiamente lungo il settore sud-orientale dell'area di studio. Consiste in un'alternanza di argille, marne, arenarie e conglomerati. L'età della formazione è ancora oggetto di dibattito (Bonardi et al., 1985; Baruffini et al., 2000); tuttavia, la stratigrafia della successione di Albidona esposta al Monte dell'Agresto è stata recentemente rivista, fornendo un'età Eocenica (Prosser et al., 2021).

- Unità Sicilide:

Questa unità è composta principalmente da argille varicolori con intercanalazioni di diverse litologie più competenti. In base alle osservazioni di campo è stato possibile differenziare due unità principali. La prima unità, rappresentata dalle Argille Varicolori (**AVA**) dell'Oligocene (Bucci et al., 2012), la quale affiora immediatamente a NW di Marsicovetere. Essa consiste principalmente in argille varicolori alternate con arenarie e calcareniti da centimetriche a metriche. Questa unità, localmente, include micro-conglomerati formati da clasti di filladi e calcari di piattaforma, e spessi livelli di marne biancastre. La seconda unità, l'unità del Torrente Cerreto (**TCU**) (Lentini et al., 1979), è formata da argille varicolori ed argille che contengono blocchi isolati, le quali derivano rispettivamente dall'Unità del Monte Sant'Arcangelo (**MSA**) e dal Flysch Numidico (**FYN**). Nel primo caso i blocchi sono costituiti da calcilutiti grigio chiaro, calcareniti e marne. Nell'ultimo caso sono formate da quarzareniti grossolane. Questa unità affiora maggiormente ad est del Monte Volturino.

- Unità della Piattaforma Appenninica:

I depositi della Piattaforma Appenninica affiorano lungo il versante nord-orientale della Val d'Agri e sono caratterizzati da carbonati Meso-Cenozoici, appartenenti all'Unità dei Monti della Maddalena, che formano una successione discontinua con un range di età che va dal Triassico all'Eocene (Scandone & Bonardi, 1968; Scandone, 1971; D'Argenio et al., 1973; Pescatore et al., 1999). I depositi Oligocenici spesso non sono preservati, mentre le successioni silicoclastiche Mioceniche coprono in modo discordante le unità carbonatiche inferiori (Patacca et al., 1992).

La successione carbonatica inizia con le Dolomie del Triassico Superiore (**DOL**), in facies di piattaforma interna, che sono state riconosciute in diversi affioramenti collocati nelle aree del Vallone Melaggio, Monte Volturino, Monte di Viggiano e Monte Caldarosa.

Le unità Giurassiche sono rappresentate da Calcari a Palaeodasycladus e Lithiosis (**CPL**) (Inizio Giurassico) e Calcari a Cladocoropsis e Clypeina (**CCC**) (Medio-Tardo Giurassico). Queste unità mostrano facies di mare aperto di piattaforma interna ad alta energia (sabbie oolitiche di shoal) e sono state riconosciute principalmente nelle aree dello Scarrone di Mezzo e del Monte di Viggiano.

Le unità del Cretaceo consistono in Calcari a Requieriidi e Gasteropodi (**CRG**) (Cretaceo Inferiore), appartenenti alla piattaforma carbonatica in senso stretto, in Calcari con Radiolitidi (**RDT**) (Cretaceo Superiore) connessi ad ambienti da marginali a di versante (Cestari & Laviano, 2012) e, in Calcari Pseudosaccaroidi (**CCR**) (Cretaceo Superiore) (Marsella & Pappone, 1987), che si sono depositati in un ambiente di versante calcareo, formati principalmente da depositi gravitativi da medi a grossolani. I migliori affioramenti delle unità Cretaciche sono stati riconosciuti ad Ovest di Marsico Nuovo e del Monte di Viggiano.

I carbonati Eocenici sono rappresentati da Breccie e Calcareni Eocenici (**BCE**) (Eocene) i quali, similmente alle precedenti unità, sono relazionate ad ambienti di versante calcareo. Gli affioramenti chiave sono nelle aree di Castello di Lepre, a NW di Marsico Nuovo.

La successione termina con i depositi calciclastici e silicoclastici della Formazione del Monte Sierio (**FMS**) (Inizio Miocene) (Castellano &

Sgrosso, 1996; Palladino et al., 2008), tipici di un'ambiente che va dalla base di versante a quello bacinale.

Gli iati del Triassico Superiore, Giurassico Superiore, Cretaceo Superiore, Paleocene ed Oligocene sono ben documentati dalle discordanze riconosciute alla base di queste formazioni.

- Unità della Lagonegro II:

L'Unità della Lagonegro II include tutte le formazioni che si sono depositate nei settori prossimali del Bacino di Lagonegro. Le unità più antiche sono rappresentate dalla Formazione della Monte Facito (Triassico Medio) (Scandone, 1967; Wood, 1981; Miconnet et al., 1988; Ciarapica & Passeri, 2000), la quale è stata suddivisa in due membri distinti sulla base delle caratteristiche litologiche. L'unità manca della sua base stratigrafica originale; tuttavia, essa non può essere considerata come una formazione ideata formalmente. I membri più antichi sono rappresentati dalle Arenarie della Monte Facito (**AMF**), che consistono in argilliti di mare poco profondo ed arenarie (Panzanelli Fratoni, 1991). Il membro dei Calcari di Cerchiara (**CRL**) (Ciarapica & Passeri, 2000; Palladino, 2015), il quale è composto principalmente da calcari di scogliera, che seguono i precedenti membri verso l'alto. Il membro più giovane è rappresentato dal Mélange Sedimentario (**MSD**), formato da una matrice argillosa-silicea che include materiale risedimentato proveniente dai membri più antichi (Marsella et al., 1993; Palladino, 2015; Palladino et al., 2019). In questo membro sono stati differenziati gli Olistoliti Carbonatici (**OMF**) che derivano dai precedenti calcari di scogliera in situ. Il membro superiore della Formazione della Monte Facito è rappresentato dal membro di Petina Chiana (**MPC**) (Panzanelli Fratoni, 1991), che è formato da un'alternanza di argille rosse e calcari sottilmente stratificati che passano verso l'alto ai calcari silicei della formazione sovrastante.

La formazione dei Calcari con Selce è formata da due membri, definiti in base allo schema stratigrafico proposto da Bertinelli et al. (2005) e da Giordano et al. (2011). Il membro inferiore, Calcari con Selce 2 (**CCS2**) (Carnico-Norico), consiste in calcari silicei pelagici finemente stratificati, con locali dolomitizzazioni secondarie, e rari intervalli di breccia. Alla base, anche se deformati, localmente riconosciamo

intervalli di argille radiolaritiche verdi, relazionate all'Evento Pluviale Carnico (Rigo et al., 2007). Il membro superiore, ben esposto al Torrente Allì, è stato identificato come Intervallo Transizionale 2 (**CCS2a**) (Tardo Norico-Inizio Retico) ed è delimitato alla base da un caratteristico intervallo di argille rosse (Bertinelli et al., 2005; Giordano et al., 2011).

La Formazione degli Scisti Silicei è composta da due membri. Gli Scisti Silicei 2 Inferiori (**SCS2a**) (Tardo Triassico-Inizio Giurassico) è il membro più antico ed è formata principalmente da argilliti alternate con calcari marnosi e strati isolati di radiolariti. Gli Scisti Silicei 2 (**SCS2**) (Giurassico) è il membro più giovane. Essa corrisponde al membro Chiatamone definito da Amodeo et al. (1999) ed è formato prevalentemente da selce rossa, radiolariti e sottili orizzonti di argille silicizzate.

La Formazione dei Galestri 2 (**GAL2**) (Cretaceo Inferiore) è formata da argilliti marroni e marne silicizzate con rari livelli di calcari. Il Flysch Rosso (**FYR**) (Tardo Cretaceo-Eocene) è caratterizzato da un'alternanza di argille rosse, calcareniti e calciruditi inerenti ad ambiente di versante. Le Argille del Torrente Serrapotamo (**ATS**) (Oligocene Superiore) rappresentano la formazione più giovane dell'Unità della Lagonegro II (Foglio Geologico 505 "Moliterno", 2014). Essa è formata prevalentemente da argilliti, arenarie micacee, calcari torbiditici e conglomerati. Nell'area di studio, le ultime due formazioni non sono delimitate da contatti stratigrafici con le formazioni sottostanti, ma piuttosto da superfici di scollamento nette.

- Unità della Lagonegro I:

L'Unità della Lagonegro I racchiude le formazioni che si sono depositate nei settori distali del Bacino di Lagonegro. La successione inizia con un'alternanza di argille marroni, calcari e calcari marnosi del Membro Sorgente Acero (**USA**) della Formazione dei Calcari con Selce 1 (Patacca & Scandone, 2007). Questo membro contiene le *Halobia superba* (Scandone, 1967) e quindi può essere relazionato al Carnico. Verso l'alto si ritrovano le formazioni dei Calcari con Selce 1 (**CCS1**), dell'Intervallo di Transizione 1 (**CCS1a**), degli Scisti Silicei 1 (**SCS1**, **SCS1a**) e dei Galestri 1 (**GAL1**) che mostrano caratteristiche distali rispetto alle corrispondenti unità descritte per l'Unità della Lagonegro

II. La successione termina con una nuova unità stratigrafica introdotta informalmente per la prima volta nell'area dell'Alta Val d'Agri da Palladino et al., (in preparazione), chiamata Marne di Piana del Lago (**UMI**). La formazione è caratterizzata da un'alternanza di argille, marne ed arenarie. L'età è Oligocene Superiore- Miocene Inferiore e probabilmente corrisponde alle Argille del Torrente Serrapotamo dell'Unità della Lagonegro II.

- Unità Sin-orogenica:

Questa unità è rappresentata dalla Formazione del Gorgoglione (**FGO**), la quale è formata da un'alternanza ritmica di conglomerati, arenarie torbiditiche ed argille, spesso organizzate in sequenze thinning e thickening upward. Nell'area di studio questa formazione giace in discordanza sulla Formazione dell'Albidona. L'ambiente deposizionale varia da scarpata, base di scarpata fino a bacinale. L'età è Miocene Medio-Superiore (Giannandrea et al., 2016).

- Successione Quaternaria di riempimento del bacino:

I depositi Quaternari, rappresentano il riempimento della valle dell'Agri, e sono formati da sedimenti fluviali non consolidati da grossolani a fini che hanno un range d'età che va da Pleistocene Inferiore all'attuale. Le unità più antiche che affiorano nell'area di studio sono rappresentate dall'Unità delle Breccie di Galaino (**GALB**, **GALM**) aventi un'età che va dall'inizio del Pleistocene Medio, e sono composte da breccie grossolane clasto- e matrice-supportate con interstrati di paleosuoli. La forma dei clasti è da angolare a sub-angolare mentre la matrice va da sabbiosa a siltosa con un colore dal marrone al rossastro. I depositi di breccia sono stratificati o localmente massivi, i quali formano conoidi detritiche al pedemonte dei versanti. Esse rappresentano la generazione di conoidi più antiche della valle e lo sviluppo di un paleosuolo rossastro nella superficie deposizionale superiore suggerisce condizioni climatiche biostatiche e non deposizionali all'interno delle conoidi (Giano, 2011).

Le unità Alluvionali, che rappresentano il cuore del riempimento del bacino, sono largamente distribuite al letto della valle e verso i rilievi, localmente sono sovrapposte all'unità di breccia più antica. Queste

unità sono state raggruppate nel Supersintema del Pertusillo che include successioni fluviali e lacustri dal Medio Pleistocene all'Olocene. Dalla base al top, il Supersintema del Pertusillo è formato da tre sintemi: Il Sintema di Grumento (**GRUG, GRUM, GRUF**) del Tardo Pleistocene, il Sintema di Bosco dell'Aspro (**VDAG, VDAF, SARG, SARF**) che va dal Medio al Tardo Pleistocene, ed il Sintema di Bosco di San Lorenzo (**SLOG, SLOM**) dell'Olocene.

Le unità del Sintema di Grumento (**GRUG, GRUM, GRUF**) sono presenti principalmente nel settore centrale ed inferiore della valle e sono composte da tre facies deposizionali: 1) Conoidi alluvionali da prossimali a distali; 2) Piana alluvionale; 3) Lacustri. I depositi di conoide sono formati da conglomerati che vanno da bene a poco cerniti, ghiaie con clasti con una granulometria da ciottoli a blocchi ed una matrice siltosa-argillosa da marrone a rossastra. Le ghiaie che si alternano con le sabbie mostrano livelli con laminazione incrociata al piede delle conoidi. I depositi di paleo-piana alluvionale sono costituiti da litofacies ghiaiose sabbiose che suggeriscono locali paleo-canali, da argille siltose e livelli di sabbie argillose che rappresentano le lithofacies planari del letto. I clasti delle ghiaie sono ben arrotondati e composti da calcari e rocce silicee, e sono immersi in una matrice siltosa-argillosa. Infine, i depositi lacustri sono presenti soltanto nel settore meridionale della valle e sono formati da argille grigie ed argille siltose marroni con interstrati di lenti di sabbia argillosa fine. Localmente, sono presenti livelli di pochi centimetri costituiti da argilla nera, che testimoniano la presenza di un'alta concentrazione di materia organica.

Il Sintema di Bosco dell'Aspro (**VDAG, VDAF, SARG, SARF**) è formato dai sub-sintemi di Sarconi e di Villa d'Agri localizzati, rispettivamente, lungo i versanti e nel letto della valle. Il Sub-sintema di Sarconi (**SARG, SARF**) del Pleistocene medio è caratterizzato da conoidi alluvionali e depositi di piana alluvionale grossolani formati da conglomerati monomittici e massivi o grossolanamente stratificati. La granulometria dei clasti va da ciottoli a blocchi con una forma caratterizzata da una bassa sfericità, da sub-angolare ad arrotondata. I silt e le sabbie in strati lenticolari, senza strutture sedimentarie o normalmente gradati, sono intercalati nei conglomerati che mostrano clasti embricati. Le lenti di sabbia, localmente, mostrano una stratificazione incrociata da basso ad alto angolo. Il Sub-sintema di Villa d'Agri (**VDAG, VDAF**) del Tardo Pleistocene è formato da depositi

di conoide alluvionale che passano lateralmente ad argille lacustri/palustri fini. La successione di conoide alluvionale grossolana è composta da ghiaie massive da sub-angolari ad arrotondate con una matrice argillosa-sabbiosa che include lenti sabbiose-siltose. La sottile successione lacustre/palustre è formata da argille grigie e marroni, ed argille siltose con intercalazioni di sabbie siltose e lenti di ghiaie poligeniche. Questi depositi non sono affioranti e sono stati riconosciuti nei pozzi.

Il Sintema di Bosco di San Lorenzo (**SLOG, SLOM**) rappresenta il sintema più giovane dell'area ed è formato da depositi alluvionali dell'Olocene. Esso ha portato alla formazione dei terrazzi alluvionali più giovani della piana alluvionale dell'Agri, ed il sistema deposizionale varia da piana fluviale a conoide. I depositi sono costituiti da ghiaie poligeniche supportate da matrice e ghiaie massive da rosse a marroni con una matrice che va da sabbiosa a sabbiosa-argillosa. La forma dei clasti varia da sub-angolare a poco arrotondata. I livelli di sabbia fine e silt argillosi sono localmente intercalati in successioni grossolane. Essi mostrano strutture sedimentarie, come laminazione incrociata obliqua.

Infine, i depositi ubiquitari recenti, non appartenenti alle unità del Supersintema, sono presenti in tutta la valle. Essi sono rappresentati da terrazzi fluviali del Tardo Olocene, depositi di piana alluvionale attuali (**FA**), e da successioni palustri (**DLG, DLF**). I depositi massivi di versante recenti matrice supportati (**DT**) sono distribuiti nell'area pedemontana. Le successioni eluviali e colluviali (**EC**) insieme ai depositi di frana (**CF**) sono presenti lungo i versanti (Bentivenga et al., 2012; Bentivenga et al., 2022; Gueguen et al., 2015).

2.4 Inquadramento morfologico ed idrogeologico degli acquiferi

All'interno dell'Alta Val d'Agri sono stati individuati ed oggetto di studio 4 acquiferi: Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola, Volturino Est, Monte di Viggiano, Alli (Cotecchia V. et al., 1988; D'anisi C. et al., 1991; D'ecclesiis G. et al., 1994; D'ecclesiis G. et al., 1994-1995; AA.VV. – Le risorse idriche sotterranee dell'Alta Val d'Agri – Agrifluid, 2003; Grimaldi S., Summa G., 2005). Di seguito vediamo una

descrizione più dettagliata delle caratteristiche morfologiche ed idrogeologiche dei diversi acquiferi.

2.4.1 Acquifero del Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola

Il sistema acquifero, della struttura idrogeologica dei Monti Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola, risulta essere abbastanza complesso ed è formato dal gruppo montuoso che parte dal Monte Lama-Serra di Calvello (1566 m s.l.m.), si estende attraverso Monte Calvelluzzo (1699 m s.l.m.) e Monte Volturino (1835 m s.l.m.) scendendo fino al Monte S. Nicola (1314 m s.l.m.) e Monte Farneta (1047 m s.l.m.) e si chiude in corrispondenza del bordo nord-orientale della Val d'Agri.

Dal punto di vista morfologico (Di Niro & Giano; 1995) si possono distinguere due gruppi di forme terrazzate: nel primo rientrano i lembi di differenti paleomorfologie mature poste in posizione topografica sommitale; nel secondo, invece, rientrano due ordini di superfici terrazzate lungo i versanti che bordano la valle. La paleosuperficie più antica è stata individuata alla sommità dei rilievi di Monte Calvelluzzo e Serra di Calvello; questo passaggio presenta un assetto sub-orizzontale con una morfologia valliva. L'azione erosiva regressiva ha esposto la struttura ad anticlinale del Monte Lama. Inoltre, sono stati osservati versanti regolarizzati, il che testimonia l'elevato grado di maturità della paleosuperficie sommitale. Invece, le paleosuperficie di seconda generazione sono esposte alla sommità di Monte S. Nicola e correlate alle superfici terrazzate presenti lungo il versante sud-occidentale del Monte Volturino. In corrispondenza delle litologie carbonatiche è evidente l'azione del carsismo che ha portato alla formazione di forme tipiche come inghiottitoi.

Le unità tettono-stratigrafiche che compongono il sistema acquifero sono:

- UNITÀ QUATERNARIE,
 - o Breccie di Galaino;
 - o Conoidi;
 - o Alluvioni recenti ed attuali.
- UNITÀ SICILIDI,
 - o Argille Varicolori;
 - o Calcari Marnosi.
- UNITÀ DI PIATTAFORMA APPENNINICHE

- UNITÀ DELLA LAGONEGRO I,
 - Unità di Sorgente Acero;
 - Formazione dei Calcari con Selce;
 - Intervallo di Transizione dei Calcari con Selce;
 - Formazione degli Scisti Silicei;
 - Formazione dei Galestri.

Il sistema acquifero dei Monti Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola, è caratterizzato da una complessa interazione tra assetto geologico ed assetto strutturale (l'area è caratterizzata dalle strutture anticlinali del Monte Volturino e del Monte Lama, le quali sono dissecate da importanti faglie dirette). L'acquifero viene delimitato dal Flysch Galestrino, che risulta essere praticamente impermeabile, che cinge la dorsale calcareo-silicea, permeabile per fessurazione, e che ospita le acque sotterranee che vengono a giorno in corrispondenza delle sorgenti. Le litologie presenti e l'assetto strutturale hanno determinato la costituzione di un sistema acquifero, quasi totalmente carbonatico, che alimenta tutte le principali sorgenti dell'area. L'idrostruttura (Fig.9) è suddivisa in quattro strutture minori da due allineamenti di faglia: il primo con direttrice all'incirca NNW-SSE, il secondo E-W e dal sovrascorrimento tra le due unità lagonegresi.

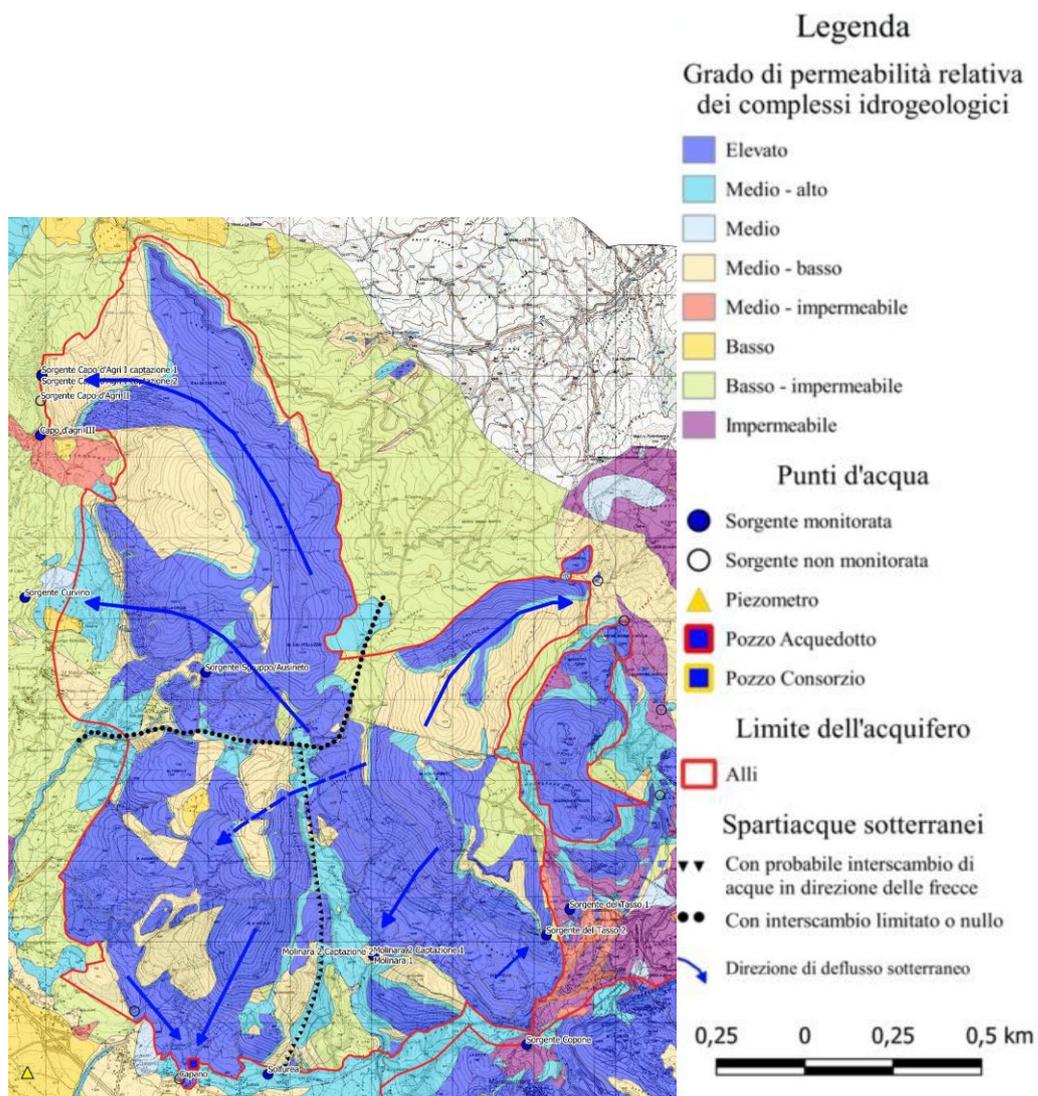


Figura 9. Schema idrogeologico del sistema acquifero dei Monti Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola (Grimaldi S. et al., in preparazione).

La circolazione idrica sotterranea si espleta, principalmente, in due direzioni, entrambe orientate verso la valle del Fiume Agri. La prima verso le sorgenti del gruppo Agri e Curvino, la seconda verso le sorgenti Capano-Zolfata. Ci sono alte probabilità che una certa aliquota di acque sotterranee si sversi al di sotto della copertura quaternaria fluvio-lacustre della Valle dell'Agri e dei depositi flyschoidi posti alla base, nei calcari con selce costituenti il substrato della valle.

Le acque sotterranee del Monte Volturino, nel loro flusso in direzione SW, incontrano la lineazione tettonica ad andamento NW-SE che ribassa a sud i litotipi impermeabili e quindi determina, anche a causa dell'intenso disturbo tettonico dei litotipi calcareo-dolomitici, uno spartiacque sotterraneo aperto. Particolari per posizione e caratteri

chimico-fisici sono le due sorgenti sulfuree individuate nell'area, infatti entrambe sono poste in corrispondenza di lineazioni tettoniche. Le caratteristiche chimico-fisiche mostrano una comunanza con circuiti più profondi caratterizzata anche da maggiori tempi di permanenza delle acque nell'acquifero, oltre ad un mescolamento delle acque provenienti da circuiti profondi con le acque superficiali.

La stima del bilancio idrogeologico è stata effettuata valutando le precipitazioni, l'evapotraspirazione ed il surplus idrico annuale disponibile per il ruscellamento e l'infiltrazione efficace. In media, nell'area dell'acquifero, si verifica un surplus pari a 524 mm/anno per unità di superficie. Le differenze tra l'ingresso (Ricarica attiva media annua) e l'uscita delle sorgenti monitorate sono in gran parte da attribuire sia ai prelievi da alcuni pozzi posti in località Galaino-Capano, sia alle uscite sotterranee verso i terreni quaternari della piana alluvionale in direzione dei calcari con selce che costituiscono una parte del substrato della valle.

2.4.2 Acquifero Volturino Est

L'acquifero Volturino Est comprende il Monte San Nicola, dove affiora la successione della Lagonegro II, ed il Monte Scarrone di mezzo, che costituisce un klippe formato dalla Piattaforma Appenninica.

Le unità tettono-stratigrafiche che compongono il sistema acquifero sono:

- UNITÀ DELLA PIATTAFORMA APPENNINICA,
 - o Calcari a *Cladocoropsis* e *Clypeina*.
- UNITÀ DELLA LAGONEGRO II,
 - o Formazione di Monte Facito;
 - o Formazione di Calcari con Selce;
 - o Formazione degli Scisti Silicei;
 - o Formazione dei Galestri.

Il settore di Scarrone di Mezzo è posto immediatamente ad est del Monte Volturino, le cui acque di ruscellamento lo alimentano, agevolate dall'intensa fratturazione che interessa le rocce carbonatiche affioranti in corrispondenza di un klippe costituito dalle

successioni della Piattaforma Appenninica e dei Calcari con Selce dell'Unità Lagonegrese II, in sovrascorrimento sui litotipi silicei dell'Unità Lagonegro I (Fig.10).

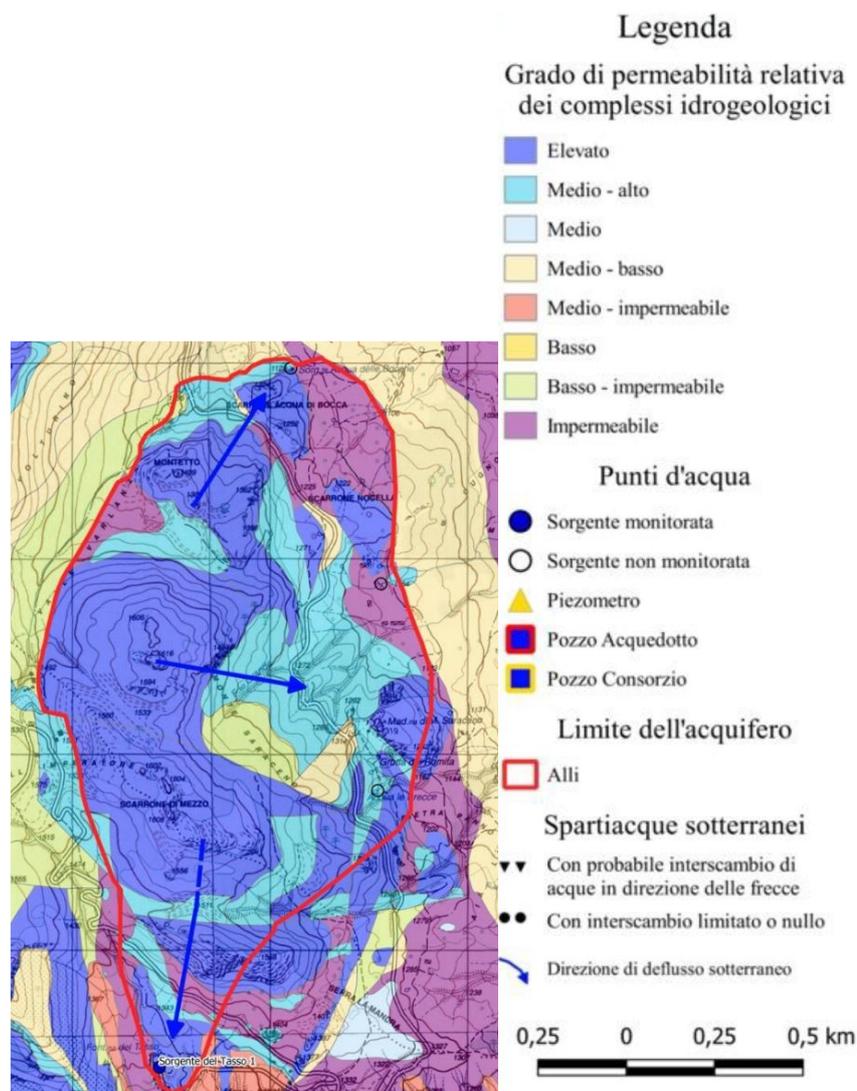


Figura 10. Schema idrogeologico dell'acquifero Volturino Est (Grimaldi S. et al., in preparazione).

Le principali sorgenti alimentate dallo Scarrone di Mezzo sono: Acqua delle bocche, Acqua di Colantonio, Romito.

L'idrostruttura alimenta almeno tre sorgenti, che costituiscono le principali emergenze dell'acquifero, e sono la sorgente Tasso I posta a sud, la sorgente Acqua di Bocca a nord, e le sorgenti Colantonio 1-2 ad est.

2.4.3 Acquifero del Monte di Viggiano

L'idrostruttura carbonatica del Monte di Viggiano rappresenta un settore del margine orientale della depressione tettonica della Val d'Agri; l'area è compresa tra il Torrente Molinara a nord-ovest, i rilievi di Madonna di Viggiano (1724 m s.l.m.) ed il Monte (1727 m s.l.m.) a nord-est, il Torrente Alli a sud-est ed il Fiume Agri a sud-ovest. I rilievi sono costituiti principalmente da litotipi appartenenti alle Unità della Piattaforma carbonatica campano-lucana. Numerosi studi recenti hanno dimostrato che la genesi ed evoluzione del bacino dell'Alta Val d'Agri sono legate a strutture tettoniche complesse attivate nel corso del Pleistocene, con differenti cinematiche (Carbone et al., 1988, 1991, 1991; Di Niro & Giano, 1995; Giano et alii, 1997; Schiattarella et alii, 1998; Cello et alii, 2000; Prosser et al., 2021). Le forme del rilievo ed i suoi caratteri morfostrutturali sono già stati studiati, con dettaglio, lungo l'intera fascia nord-orientale dell'alta valle, la quale è interessata dalle strutture della deformazione fragile quaternaria (Di Niro & Giano, 1995; Giano et alii, 1997; Giano et alii, 2000; Cello et alii, 2000; Prosser et al., 2021). Tutta l'area risulta essere interessata da processi legati all'azione delle acque correnti superficiali con depositi associati a tale processo, rappresentati da estese conoidi alluvionali presenti alla base del Torrente Molinara e del Torrente Acqua del Course, il quale ha inciso fortemente i calcari portando alla formazione di una tipica morfologia "a forra". I corpi di frana, imputabili a fenomeni di tipo gravitativo, sono presenti nel margine nord-occidentale dell'idrostruttura carbonatica, classificabili in termini di attività come quiescenti ed attivi. In quest'area è molto sviluppata la morfogenesi carsica, con varie forme tipologiche legate all'intensità dei processi di dissoluzione, alle caratteristiche tessiturali e mineralogiche dei calcari interessati ed all'idrodinamica delle acque di ruscellamento.

Le unità tettono-stratigrafiche che compongono il sistema acquifero sono:

- UNITÀ QUATERNARIE,
 - o Depositi detritici stratificati;
 - o Depositi fluvio-lacustri;
 - o Depositi alluvionali;
 - o Corpi di frana.
- UNITÀ DELLA PIATTAFORMA APPENNINICA,

- Calcari a Paleodasylicadus e Lithiotis;
 - Calcari a Requeenie e Gasteropodi;
 - Calcari a Radiolitidi;
 - Formazione del Bifurto.
- UNITÀ DELLA LAGONEGRO II,
- Calcari con Selce;
 - Intervallo di Transizione dei Calcari con Selce;
 - Formazione degli Scisti Silicei;
 - Membro Inferiore degli Scisti Silicei;
 - Formazione dei Galestri;
 - Flysch Rosso;
 - Argilliti del Torrente Serrapotamo.

L'idrostruttura carbonatica di Madonna di Viggiano, la cui falda di base alimenta la sorgente denominata Peschiera di Pedale, coincide con la geometria di una delle principali strutture carbonatiche presenti in sinistra orografica della Val d'Agri. I limiti dell'idrostruttura (Fig.11) sono facilmente individuabili poiché corrispondono al contatto tra i calcari ed i sedimenti flyschoidi, il quale è collegato ad un importante piano di sovrascorrimento della piattaforma appenninica. Nel settore occidentale dell'area, il limite corrisponde al passaggio tra i litotipi carbonatici e la conoide del Torrente Molinara; verso S-O il confine si identifica con il contatto stratigrafico tra i calcari ed i depositi alluvionali quaternari.

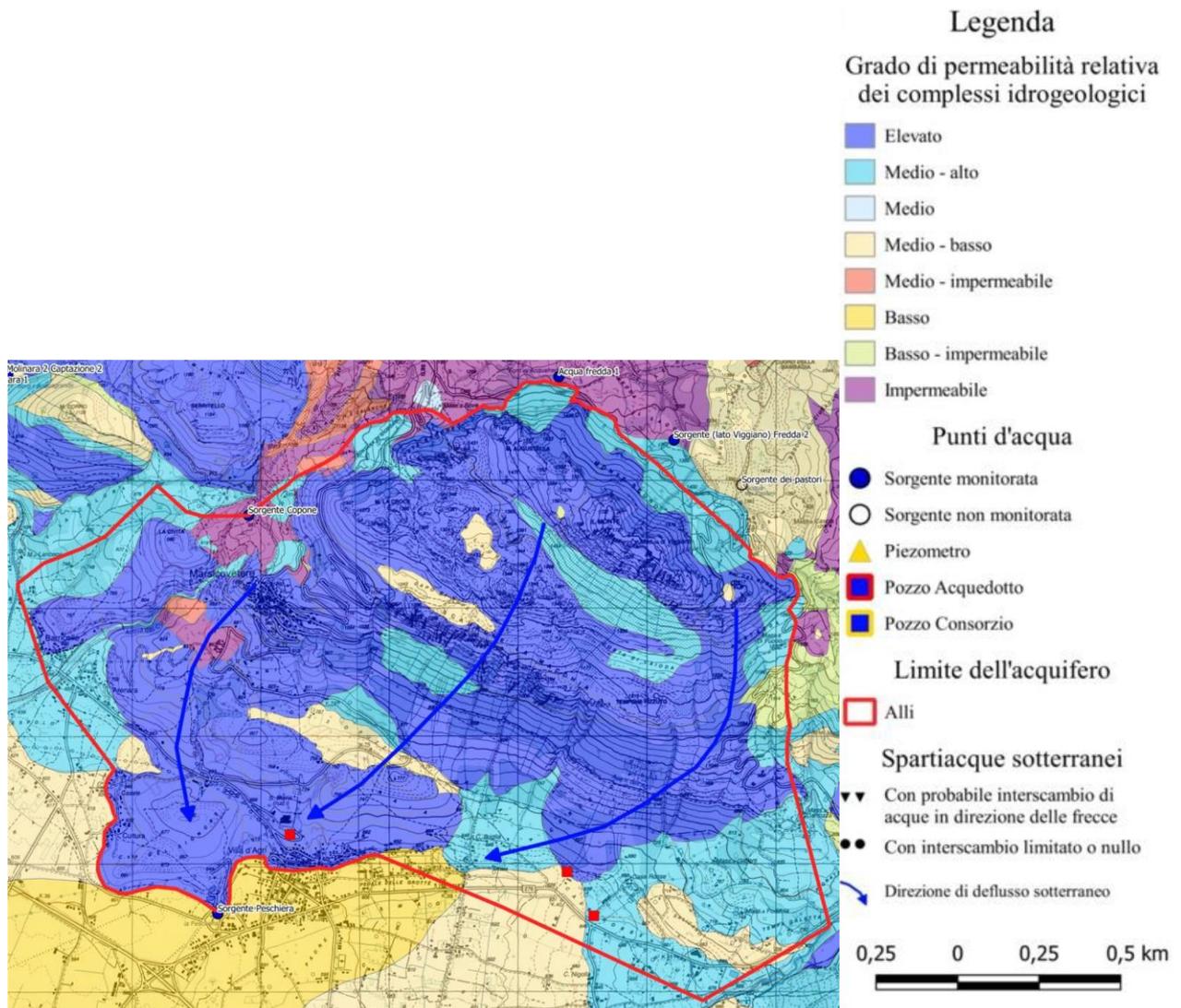


Figura 11. Schema idrogeologico dell'acquifero del Monte di Viggiano (Grimaldi S. et al., in preparazione).

La morfologia dell'area assorbente è caratterizzata da ampie superfici di carso nudo, con scarsa vegetazione spontanea, intervallate da scoscese pareti calcaree (Civita et al., 2003; Giano, 2016).

Secondo Cotecchia et al., (1988): "Il Klippe del Monte Madonna di Viggiano risulta incastonato in una brachisclinale sepolta della unità lagonegresi e costituisce serbatoi di un acquifero a sé stante dell'Alta Val d'Agri, alimentante la sorgente Peschiera di Pedale". Ad ovest, lungo il Fosso Salicone, si ha l'anticlinale del Monte Volturino; a sud, è presente un tampone di valle dell'acquifero formato dai sedimenti fluvio-lacustri pleistocenici di Casale e Villa d'Agri; ad est, si ha la brachianticlinale del Torrente Allì; a nord, si rileva il parziale accavallamento tettonico del Klippe carbonatico sull'Unità delle Argille Varicolori. L'assetto e le caratteristiche idrogeologiche, come elevato grado di permeabilità per fessurazione e carsismo dei litotipi, del serbatoio carbonatico assicura una rapida ricarica dell'acquifero

con una veloce immissione nel sottosuolo di gran parte delle precipitazioni; infatti il recapito della falda idrica circolante (la sorgente di Peschiera del Pedale) si manifesta nel punto più basso del serbatoio carbonatico affiorante, in presenza del contatto con i sedimenti fluvio-lacustri dell'Alta Val d'Agri che fungono da tampone parziale di valle.

L'intenso grado di fratturazione lungo le fasce corrispondenti alle principali lineazioni tettoniche e l'elevato grado di carsismo riscontrato in numerosi affioramenti nei rilievi calcarei, condizionano fortemente la permeabilità dei litotipi carbonatici che costituiscono l'acquifero principale (essendo caratterizzati da permeabilità per fessurazione e carsismo). La valutazione del bilancio idrogeologico conferma una notevole differenza tra le infiltrazioni efficaci stimate che alimentano l'acquifero, le quali ammontano a circa $10 \text{ Mm}^3/a$ contro i $1.48 \text{ Mm}^3/a$ evacuati dalla sorgente.

2.4.4 Acquifero Alli

L'idrostruttura è posta ad est dell'acquifero carbonatico di Madonna di Viggiano, occupando la porzione medio bassa del piccolo sottobacino idrografico del Torrente Alli. Dal punto di vista geologico, l'idrostruttura costituisce un'anticlinale ad asse N-S fortemente dissecata da faglie orientate prevalentemente da E-W a N 110°. La struttura idrogeologica (Fig.12) è in gran parte formata da Scisti Silicei, caratterizzati da una forte fratturazione, che insieme ad una porzione di Calcari con Selce (affioranti nel nucleo della piega anticlinalica) costituiscono la roccia serbatoio principale.

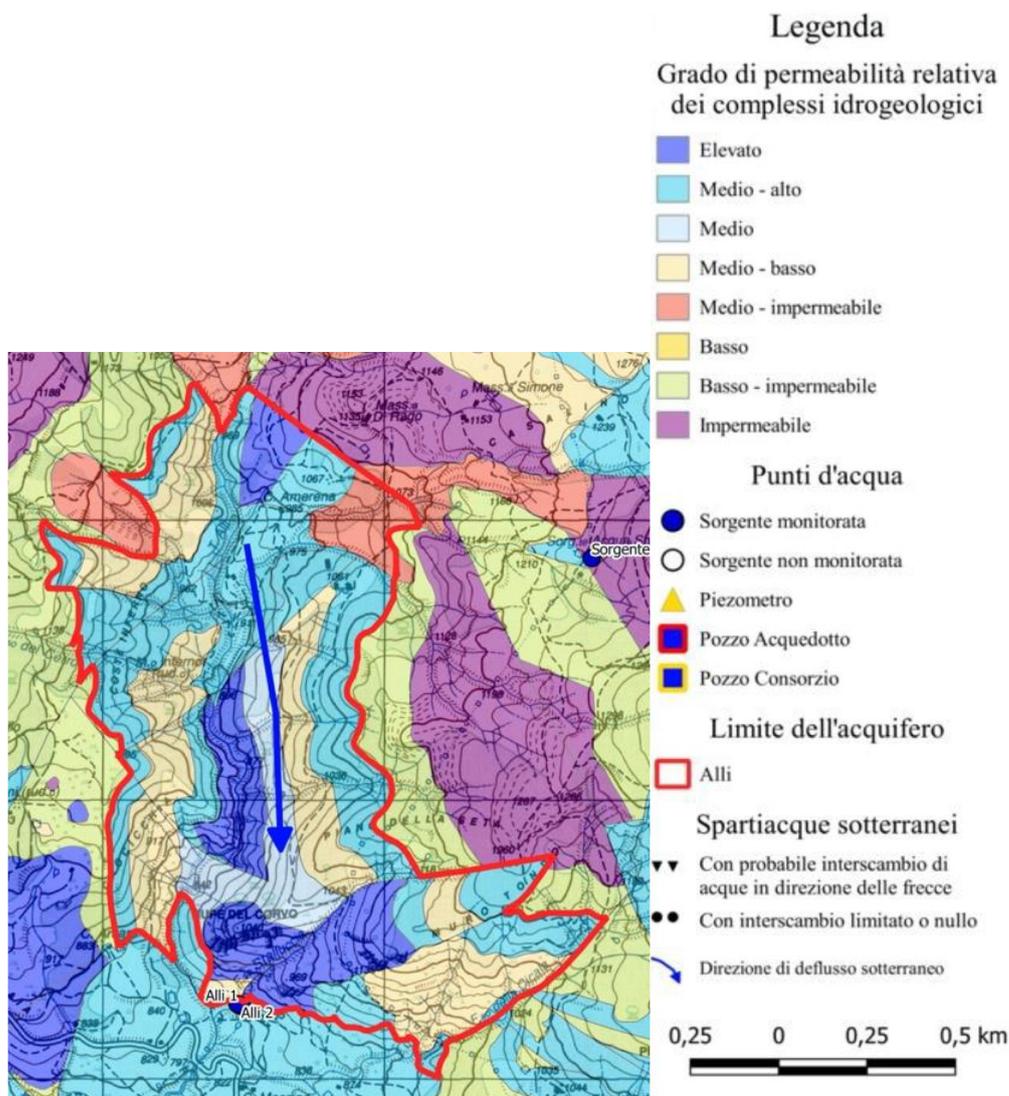


Figura 12. Schema idrogeologico del sistema acquifero Alli (Grimaldi S. et al., in preparazione).

L'intero sistema è formato da una complessa struttura costituita dalla Formazione Lagonegrese a contatto tettonico con i depositi Eocenici della Formazione di Albidona. È stato considerato come limite del serbatoio, il contatto stratigrafico tamponante fra gli Scisti Silicei ed i Galestri. A sud il limite dell'idrostruttura è caratterizzato da una faglia sub-verticale, orientata NW-SE. L'area di alimentazione dell'acquifero, che in parte è esterna al serbatoio, è costituita dagli affioramenti di Scisti Silicei e Calcari con Selce e dalla porzione alta del bacino imbrifero del Torrente Alli.

L'abbondante ruscellamento del settore alto del bacino idrografico del Torrente Alli s'incanala nell'asta torrentizia che, verso valle, interessa l'asse dell'anticlinale, scorrendo sui terreni carbonatici e scisto-silicei abbondantemente fratturati ed assorbenti.

L'idrostruttura alimenta le due sorgenti Allì 1-2, che costituiscono le uniche emergenze importanti dell'acquifero ed entrambe sono captate ed utilizzate per scopi idropotabili.

CAPITOLO 3

VULNERABILITÀ DEGLI ACCQUIFERI

3.1 Acque sotterranee

Le risorse idriche sotterranee delle zone montane sono, spesso, rappresentate dalle acque che circolano all'interno di mezzi rocciosi fratturati/carsici. La qualità naturale delle acque sotterranee, dipende dalle caratteristiche idrogeologiche del sistema acquifero, dall'origine delle acque (generalmente meteorica), e dal tipo e dalla velocità di flusso che interessa sia il suolo che le rocce del sistema acquifero. Durante il flusso avvengono processi chimici, fisici e biologici che cambiano le caratteristiche chimico-fisiche originarie dell'acqua infiltratasi e circolante nell'acquifero. L'acqua nella sua permanenza sotterranea subisce degli scambi geochemici con il serbatoio (rocce) che ne modificano di continuo le caratteristiche fisiche, chimiche e batteriologiche date al momento dell'infiltrazione nel suolo: temperatura, conducibilità elettrica, salinità e pH (dissoluzione e precipitazione di Sali). Il comportamento idrogeochemico determina la qualità chimico-fisica delle acque sotterranee. Essa ha una funzione di trasporto di sostanze minerali ed organiche, di microorganismi e di calore dall'infiltrazione (area di alimentazione) verso l'uscita dall'acquifero (naturale come sorgenti e/o artificiali come pozzi d'acqua). Nella zona non satura il serbatoio talvolta svolge un ruolo idrobiologico per il potere autodepurante dei suoli. Oltre a questi fenomeni naturali, anche le attività antropiche potrebbero determinare variazioni delle caratteristiche chimico-fisiche e microbiologiche delle acque e, nella maggior parte dei casi, provocarne un peggioramento della qualità.

Quando si registrano delle concentrazioni, di sostanze disciolte, che superano i limiti massimi imposti dalle norme nazionali o internazionali, le acque circolanti nell'acquifero vengono considerate inquinate; i limiti dipendono dagli usi a cui è destinata la risorsa idrica, come l'uso potabile, agricolo o industriale. Per garantire la qualità e quantità delle acque sotterranee, specialmente di quelle destinate al consumo umano, è necessario definire metodi per la protezione delle risorse idriche che prevedano, in particolare nelle aree di ricarica,

limitazioni alle attività ed agli insediamenti antropici ai fini di tutelare le acque sotterranee.

3.2 Prevenzione dell'inquinamento delle acque sotterranee

Senza prendere in considerazione la cosiddetta prevenzione strategica (che si compendia in tutte le diverse misure e norme di previsione e prevenzione dei fenomeni d'impatto previste dalla legislazione comunitaria e nazionale), è necessario evidenziare che il suddetto sistema acquifero richiede due diversi livelli di protezione tattica, la difesa di punto, da mettere in essere per ciascuna fonte d'approvvigionamento, e la difesa a tutto campo che abbraccia l'intera area di alimentazione e di flusso degli acquiferi sfruttati, principalmente, a scopo idropotabile e, secondariamente, a scopo agricolo ed industriale (Civita, 2005; Fig.13).

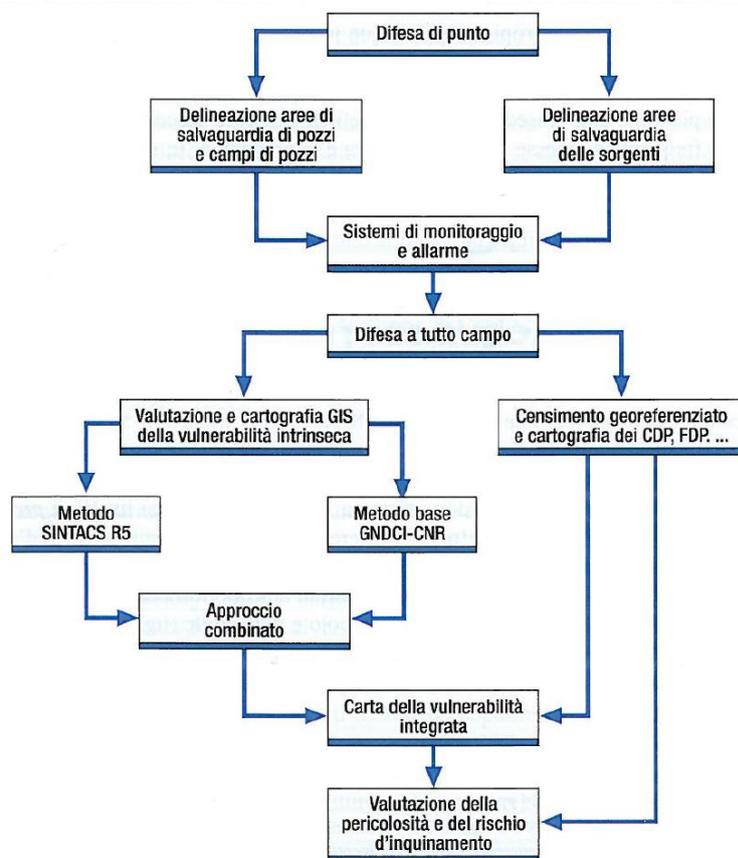


Figura 13. Diagramma di flusso dei metodi e delle tecniche per la difesa territoriale delle risorse idriche sotterranee (Civita, 2005).

3.2.1 La difesa di punto

La difesa di punto, termine mutato dal lessico militare, consiste in tutti gli interventi strutturali e non strutturali che le leggi vigenti, nel nostro Paese e negli altri Paesi europei, prevedono per la salvaguardia delle captazioni, in quanto tali, delle acque sotterranee destinate al consumo umano. La delimitazione delle aree di salvaguardia è una delle applicazioni più importanti dell'Idrogeologia moderna. Essa prevede una serie approfondita di studi, di rilevamenti, misure e censimenti, di cartografie tematiche, lo scavo ed il condizionamento corretto dei pozzi e dei campi-pozzi. Le diverse operazioni e tappe necessarie alla progettazione delle aree di salvaguardia sono sintetizzate nel diagramma di flusso in Figura 14 (Civita, 2005).

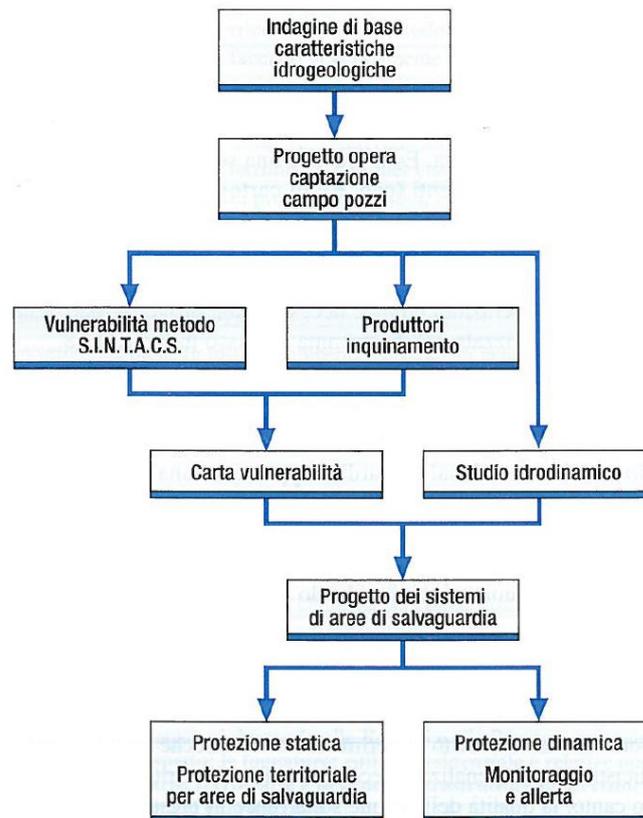


Figura 14. Diagramma di flusso degli studi per la delimitazione e gestione dei sistemi di aree di salvaguardia (Civita, 2005).

L'introduzione delle aree di salvaguardia rappresenta una misura di protezione passiva (o statica) delle captazioni. La delimitazione delle aree di salvaguardia può essere condotta secondo diversi criteri:

Criterio geometrico, consiste nel tracciamento di fasce concentriche rispetto alla captazione. Un tale concetto di perimetrazione, oltreché

molto semplice, è tuttavia semplicistico e può penalizzare eccessivamente il territorio, senza salvaguardare, d'altro canto, la qualità delle acque sotterranee in presenza di inquinanti non degradabili (AA.VV., Proposta di una normativa per l'istituzione delle fasce di rispetto delle opere di captazione di acque sotterranee; 1988). Il criterio geometrico è evidentemente arbitrario se si considerano le infinite situazioni idrogeologiche che si possono incontrare sul territorio, in grado di vanificare anche i limiti geometrici più cautelativi, togliendo, di fatto, ogni efficacia alla funzione di protezione statica della fascia di rispetto. L'inaffidabilità di una difesa di punto basata sul solo criterio geometrico emerge chiaramente quando si prende in considerazione il flusso sotterraneo, funzione delle caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero e completamente ignorato all'atto del tracciamento dei limiti geometrici. Questo criterio può, quindi, essere adottato con reale efficacia limitatamente alla delimitazione dell'area di protezione dell'opera di approvvigionamento.

Criterio idrogeologico, non offre alcuna guida tecnica o metodologica per la delimitazione delle fasce di rispetto. Esso, infatti è finalizzato alla caratterizzazione dell'acquifero studiato attraverso il maggior numero di dati disponibili o reperibili con studi generali e prove in situ. Tale criterio è basato sui seguenti elementi idrogeologici, idrologici ed idrochimici:

- Valutazione dell'estensione e della struttura geologica dell'acquifero ed individuazione delle aree di alimentazione;
- Determinazione della velocità di circolazione delle acque nel sottosuolo e definizione delle interazioni tra i corpi idrici superficiali e gli acquiferi;
- Determinazione delle facies idrochimiche dell'acquifero;
- Valutazione della compatibilità tra portata prelevata e disponibilità delle risorse e degli effetti indotti dalle opere di captazione sull'acquifero e sui corpi idrici superficiali;
- Individuazione dei potenziali centri di pericolo.

Questo criterio è quindi in grado di fornire i parametri idraulici essenziali e le conoscenze delle strutture geologiche ospitanti l'acquifero che, se correttamente interpretate ed utilizzate, permettono di valutare la vulnerabilità dell'acquifero stesso.

Criterio temporale, esso si fonda sul concetto di tempo di sicurezza, ossia il tempo necessario per attuare le opportune misure di difesa della captazione. Naturalmente il tempo di sicurezza deve essere minore del cosiddetto time of travel, il tempo impiegato da un inquinante idroportato per raggiungere l'opera di captazione idropotabile. Quest'ultimo è evidentemente funzione della velocità con cui l'inquinante può spostarsi nell'acquifero e dipende dalla sinergia di molteplici fattori:

- Le caratteristiche idrogeologiche ed idrogeochimiche dell'acquifero;
- La velocità del flusso sotterraneo;
- La capacità dell'acquifero di neutralizzare l'inquinante o attenuarne la concentrazione.

Questo criterio è, certamente, il più efficace, soprattutto se la valutazione dei tempi è condotta discriminando i vari inquinanti in funzione delle tipologie dei centri di pericolo (CDP) e delle fonti diffuse di pericolo (FDP) che possono minacciare le acque sotterranee captate. Per ogni tipo d'inquinante, infatti, si hanno diversi tempi di degrado, ossia diversi risultati nelle interazioni con l'acquifero, con l'acqua che in esso fluisce, nonché con le sostanze disciolte nell'acqua stessa. Il tempo di sicurezza più cautelativo, nell'ambito del quadro di rischio d'inquinamento per un determinato acquifero, corrisponde al tempo di percorrenza di quell'inquinante avente il più lungo tempo di degrado tra tutti i potenziali agenti inquinanti individuati sull'area d'alimentazione. La delimitazione delle fasce di rispetto è, quindi, condotta sulla base delle conoscenze idrogeologiche acquisite, che definiscono inoltre l'attendibilità e l'efficacia stessa del metodo.

Gli approcci di calcolo più utilizzati, per la delimitazione delle fasce di rispetto nel criterio temporale, sono (Civita, 2005):

1. Il calcolo mediante modello alle differenze finite (Bear, 1979);
2. Il calcolo mediante l'abaco BRGM (Sauty & Thiery, 1975);
3. Il calcolo mediante il codice WHPA (Well Head Protection Areas – USE – PA, 1991, 1993 e 1994).

3.2.2 La difesa a tutto campo

La zona esterna dei sistemi di salvaguardia delle captazioni rappresenta l'anello di congiunzione tra la difesa di punto e la difesa a tutto campo. La stessa zona di protezione coincide con tutta o con parte dell'area di ricarica dell'acquifero captato. In questa zona si prevede di valutare la pericolosità delle attività e degli insediamenti esistenti, sulla scorta di dati specifici di carattere idrogeologico ed idrochimico, sul censimento e sulla tipizzazione dei centri di pericolo. La difesa di grandi estensioni territoriali è dunque basata sulla conoscenza approfondita della suscettibilità all'inquinamento degli acquiferi e di quelle attività effettivamente presenti che sono fonte reale e potenziale di pericolo. Tale conoscenza è sintetizzata in un moderno documento di piano, ricco di contenuti scientifici: la Carta della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento (Civita, 2005).

3.3 Tipologie di vulnerabilità

Esistono numerosissime e differenti definizioni della vulnerabilità naturale o intrinseca di un acquifero, dal mento recente al più recente:

- La possibilità di penetrazione e propagazione, in condizioni naturali, nei serbatoi naturali ospitanti la prima falda, di inquinanti provenienti dalla superficie (Albinet & Margat, 1970);
- Il complesso di condizioni naturali, superficiali e sotterranee, che influenzano il moto di in un inquinante verso un acquifero sottostante (Vrana, 1981);
- La suscettibilità specifica dei sistemi acquiferi (in sostanza la loro "danneggiabilità"), nelle loro diverse parti componenti e nelle diverse situazioni geometriche ed idrodinamiche ad ingerire e diffondere, mitigandone gli effetti, un inquinante fluido o idroveicolato ("generalmente antropicamente introdotto"), tale da produrre impatto sulla qualità dell'acqua sotterranea nello spazio e nel tempo (Civita, 1987);
- La V.I. degli acquiferi all'inquinamento rappresenta la facilità o meno con cui le sostanze contaminanti si possono introdurre, si possono propagare e possono persistere in un determinato sistema acquifero (Celico, 1988);

- La misura del rischio incombente sulle acque sotterranee dovuto ad attività umane ed alla presenza di inquinanti (Palmquist, 1991).

Gli autori più recenti però concordano nel considerare la vulnerabilità di un corpo idrico sotterraneo come dipendente da diversi parametri quali l'idrolitologia e struttura del sistema idrogeologico, la tipologia del suolo, il fenomeno di ricarica, il flusso sotterraneo ed i processi di interazione idrogeochimica. Secondo una definizione che comprende l'insieme di tutti questi parametri, la vulnerabilità intrinseca è *“la suscettibilità specifica dei sistemi acquiferi, nelle loro diverse parti componenti e nelle diverse situazioni geometriche ed idrodinamiche, ad ingerire e diffondere, anche mitigandone gli effetti, un inquinante fluido o idroveicolato tale da produrre un impatto sulla qualità dell'acqua sotterranea, nello spazio e nel tempo”* (Civita, 1987). Secondo questa definizione la vulnerabilità intrinseca di un acquifero dipende esclusivamente dalle sue condizioni naturali, superficiali e sotterranee, prescindendo quindi dalla effettiva presenza di fonti di inquinamento e dalla loro tipologia.

Quando alla vulnerabilità intrinseca di una zona è associata la presenza di CDP, ossia centri di pericolo (potenziali fonti di inquinamento), esistenti o dei quali è prevista la futura realizzazione, la vulnerabilità intrinseca acquista carattere applicativo e si parlerà allora di vulnerabilità integrata. Tale concetto sottintende l'interazione tra le condizioni naturali di un sistema idrogeologico ed i centri di pericolo ad esso associati, coincidendo quindi con il concetto di potenziale di inquinamento.

Per vulnerabilità specifica si intende, invece, la vulnerabilità valutata in rapporto ad una singola tipologia di inquinante, in termini di composizione chimica, mobilità e persistenza nel sistema acquifero. Concettualmente una valutazione di vulnerabilità specifica trova giustificazione nel fatto che il potenziale di attenuazione di ogni sistema acquifero, cioè la sua capacità di autodepurazione, dipende dalle sue caratteristiche intrinseche ma anche dalla tipologia di inquinante, dalla sorgente, dal meccanismo di rilascio, dalla quantità e dalla velocità di immissione. Tuttavia, realizzare una valutazione di vulnerabilità specifica per ogni singolo inquinante non è conveniente in termini di dispendio temporale e di risorse finanziarie, inoltre bisogna considerare che spesso non è possibile conoscere a priori

quale sarà il tipo di inquinamento per una data area, dipendendo questo fenomeno da numerosissimi fattori anche accidentali.

Si preferisce, quindi, una valutazione generalizzata attraverso una carta di vulnerabilità integrata, la quale costituisce uno strumento dinamico di prevenzione e previsione generale nel campo della pianificazione territoriale. La dinamicità è espressione della possibilità di un continuo aggiornamento della vulnerabilità, essendo i fattori che la determinano (sensibilità intrinseca dell'acquifero e carico potenziale di inquinante), suscettibili di una determinata variabilità temporale (Civita, 2005).

3.4 Vulnerabilità intrinseca

L'inquinamento di un corpo idrico (Fig.15) viene definito come *“l'impatto volontario o involontario, di qualunque attività antropica, che comporti uno sversamento in uno o più dei sottosistemi componenti il sistema ambiente, di sostanze tali da causare una variazione negativa di tipo chimico e/o fisico della qualità naturale delle acque tale da mettere in pericolo la salute dell'uomo e degli esseri viventi”* (Civita, 1987).

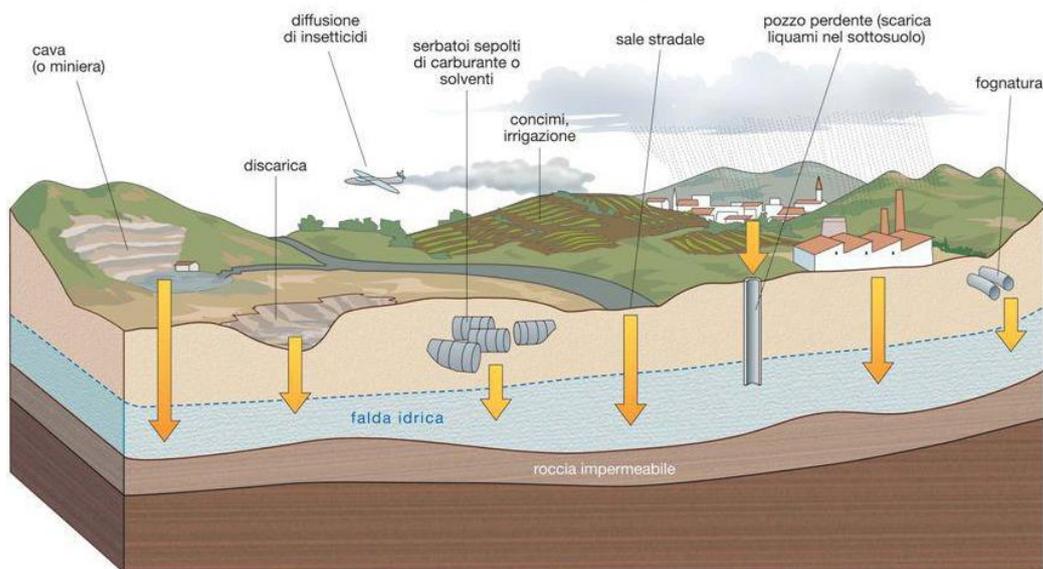


Figura 15. Schematizzazione inquinamento falda idrica (Lupia Palmieri, 2010).

La vulnerabilità intrinseca di un acquifero all'inquinamento, dipende da una lunga serie di fenomeni che si producono sia all'interno del sistema sottosuolo e sia al di sotto del punto e/o zona d'impatto.

Questo insieme di processi può essere suddiviso in tre principali fenomeni:

- Spostamento dell'acqua e dell'inquinante fluido o idroportato nella zona di saturazione dell'acquifero sottostante;
- Dinamica del flusso sotterraneo e dell'inquinante fluido o idroportato nella zona di saturazione dell'acquifero sottostante;
- Abbattimento della concentrazione dell'inquinante fluido o idroportato nella zona di saturazione che determina la capacità di attenuazione dell'impatto inquinante propria del sistema acquifero.

Questi tre processi sono regolati da parametri caratteristici della situazione idrogeologica ed antropica, e quindi funzione della zona d'interesse. L'azione di attenuazione esercitata dall'insaturo è dovuta alle numerose interazioni chimiche, fisiche e biologiche tra suolo, acque sotterranee ed inquinanti, il cui impatto viene notevolmente mitigato. Un'ulteriore azione di mitigazione avviene nel momento in cui l'inquinante, la cui concentrazione è già notevolmente diminuita, va a diluirsi nella zona di saturazione in funzione della velocità, del valore della portata unitaria di flusso e della dispersione che opera il mezzo (Civita, 2005).

3.5 Carta della vulnerabilità intrinseca

Nel presente studio, per la realizzazione delle carte di vulnerabilità viene presa in considerazione soltanto la vulnerabilità intrinseca. La Carta di Vulnerabilità Intrinseca (Fig.16) è stata costruita elaborando i dati provenienti da più mappe tematiche che vengono sovrapposte in modo da ottenere i valori di vulnerabilità.

Secondo la definizione di Massimo Civita (1987), *“una carta della vulnerabilità intrinseca offre uno scenario statico che territorializza la suscettibilità specifica del sistema acquifero, nelle sue diverse parti e componenti e nelle diverse situazioni geometriche ed idrodinamiche, ad ingerire e diffondere, anche mitigandone gli effetti, un contaminante fluido idroveicolato tale da produrre impatto sulla qualità dell'acqua sotterranea, nello spazio e ne tempo”*.

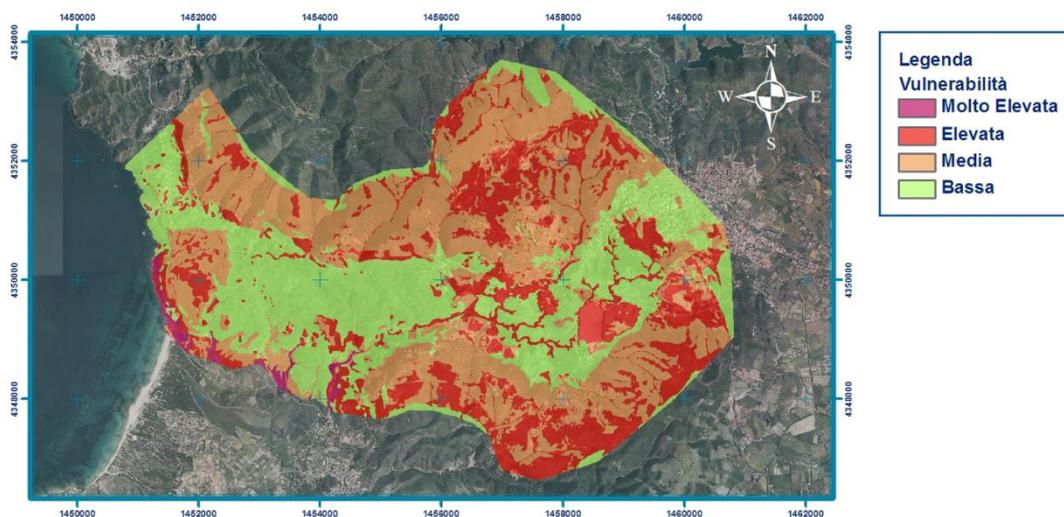


Figura 16. Esempio di Carta della Vulnerabilità Intrinseca con il metodo SINTACS (Secci R. & Uras G., 2011).

Questa territorializzazione deve essere integrata con il censimento (con georeferenziazione per la rappresentazione in Carta) di una serie di informazioni comunemente utilizzate in passato per tracciare un quadro dell'uso reale del territorio ma che, di fatto, comprendono tutte le trasformazioni e le sovrapposizioni che l'uomo ha imposto e impone alla superficie del suolo e nel sottosuolo più immediato. Alcune di queste sono classificate come produttori reali e potenziali di inquinamento: si tratta dei centri di pericolo (CDP) o fonti, puntuali e non-puntuali, dai quali è possibile venga generato un impatto tale da compromettere la qualità di base delle acque sotterranee soggiacenti. Altre informazioni da censire riguardano quelle trasformazioni antropiche o quelle caratteristiche geomorfologiche naturali che possono favorire l'impatto, diminuendo o azzerando il tempo di transito di un inquinante idroportato dalla superficie all'acquifero vero e proprio (potenziali ingestori e viacoli d'inquinamento); e, soprattutto, quelle opere che l'uomo mette in campo per mitigare i possibili impatti all'origine (preventori e/o riduttori di inquinamento).

La conoscenza della vulnerabilità intrinseca dell'acquifero soggiacente, unitamente ai fattori dinamici del flusso sotterraneo, alla posizione ed all'importanza dei punti di utilizzo delle acque sotterranee da parte della comunità (soggetti a rischio), integrata dalle informazioni appena elencate e presentata in forma cartografica, diviene uno strumento di previsione (preventiva e/o

correttiva), essa diventa, finalmente, uno strumento di prevenzione e di identificazione delle priorità di interventi strutturali e non-strutturali e quindi di pianificazione territoriale ampiamente considerata nelle più avanzate normative vigenti in Italia.

Al fine di garantire una risorsa ed una riserva duratura nel tempo e rilevante sia dal punto di vista qualitativo che quantitativo, la tutela delle acque sotterranee rappresenta un nodo fondamentale. Il **Decreto Legge 152/1999 “Disposizioni sulla Tutela delle Acque all’Inquinamento”** evidenzia l’importanza di:

- **Vulnerabilità intrinseca degli acquiferi;**
- **Metodi di valutazione;**
- **Relativa cartografia.**

...” Le carte della vulnerabilità sono un importante ed operativo documento cartografico di sintesi, da realizzare ai fini di una corretta pianificazione territoriale ed ambientale e di una efficace tutela delle RIS” ... D.lgs. 152/99-152/2006.

CAPITOLO 4

METODOLOGIE

4.1 Metodi per la valutazione della vulnerabilità intrinseca

A partire dagli anni '60 sono stati sviluppati diversi metodi per la valutazione della vulnerabilità intrinseca degli acquiferi all'inquinamento, basati sulla elaborazione generalizzata dei dati di base normalmente disponibili, e che sono raggruppabili in tre grandi famiglie:

- **Metodi Qualitativi:** prevedono la zonizzazione per aree omogenee, valutando la vulnerabilità per complessi e situazioni idrogeologiche (CSI) generalmente attraverso la tecnica della sovrapposizione cartografica;
- **Metodi Numerici:** si basano sulla stima di un indice di vulnerabilità estrapolato da relazioni matematiche di diversa complessità;
- **Metodi Parametrici:** sono basati sulla valutazione di parametri fondamentali dell'assetto del sottosuolo. Permettono di valutare quantitativamente la vulnerabilità mediante la stima di indici numerici che opportunamente suddivisi in intervalli possono essere correlati ad altrettanti gradi di vulnerabilità.

4.1.1 Zonazione per aree omogenee

Questi metodi valutano la vulnerabilità per complessi e situazioni idrogeologiche (CSI), utilizzando in genere la tecnica di sovrapposizione cartografica.

Questi sono considerati generalmente metodi universali, adatti ad essere utilizzati su territori vasti ed articolati morfologicamente ed idrogeostrutturalmente. Sono adatti a generare cartografia a grande denominatore di scala, quindi per la copertura di interi territori nazionali. I parametri presi in considerazione sono quasi sempre gli stessi: caratteristiche idrolitologiche dal saturo e dell'insaturo, soggiacenza, permeabilità, velocità di percolazione degli acquiferi. A questi possono essere aggiunte altre caratteristiche fisico-chimiche dei suoli, generalmente molto meno agevoli da reperire o

determinare in campagna. La valutazione della vulnerabilità è fornita in termini qualitativi, per intervalli opportunamente descritti o preordinati per situazioni-tipo. In genere si utilizzano laddove la densità di dati è medio-scarso (mediamente oltre i 600m s.l.m.) in zone orograficamente complesse.

Un metodo di zonazione per aree omogenee, basato sul riconoscimento di complessi e situazioni idrogeologiche (CSI), impiegato per la valutazione delle aree collinari e montane è il Metodo base GNDCI-CNR.

4.1.1.1 Metodo Base GNDCI-CNR

Questo metodo (AA.VV., Civita M., Proposta di una normativa per l'istituzione delle fasce di rispetto delle opere di captazione di acque sotterranee; Civita M., 1990) non richiede alcun parametro d'ingresso specifico di tipo numerico. Viene fornito un protocollo dove viene riportato un buon numero di situazioni idrogeologiche collegate ai complessi idrogeologici presenti nell'ambito del territorio italiano in particolare.

Si deve dunque identificare la situazione idrogeologica d'interesse tra quelle elencate, ognuna collegata con la relativa valutazione del grado di vulnerabilità intrinseca. Il metodo è molto flessibile e può essere, ove fosse necessario, adattato a quelle situazioni specifiche che non sono elencate nel protocollo metodologico, basandosi sui dati di rilevamento e telerilevamento. Vengono considerati un certo numero di indici litologici, strutturali, piezometrici ed idrodinamici, non rigorosamente quantificati, che identificano circa venti situazioni idrogeologiche differenti. Queste situazioni fanno diretto riferimento alla geometria degli acquiferi ed alle caratteristiche di porosità e di permeabilità primaria o secondaria dei litotipi che sono stati considerati (Fig.21).

Un esame generale delle situazioni geologiche ed idrogeologiche italiane ha permesso di identificare quelle che meglio rappresentano un intorno idrogeologico ben definito. Per ogni situazione-tipo sono stati individuati i principali fattori che influenzano la vulnerabilità degli acquiferi (per esempio la soggiacenza, le caratteristiche di porosità, fratturazione e carsificazione, la posizione del livello piezometrico rispetto ai corsi d'acqua ecc.). Infine, usando un principio di

comparazione già alla base delle precedenti esperienze (Albinet & Margat, 1970), sono stati attribuiti alle diverse situazioni 6 differenti gradi di vulnerabilità intrinseca, tenendo conto anche della dinamica di casi di inquinamento noti e della frequenza relativa degli stessi.

Le situazioni idrogeologiche selezionate, contrassegnate da colorazioni o tratteggi standard, sono immesse in uno schema di legenda a 6 colonne, ciascuna relativa ad uno dei gradi di vulnerabilità intrinseca previsti. Ciò rende la legenda schematica e direttamente interpretativa, utilizzabile quindi sia in fase di redazione della Carta, sia per la sua interpretazione e lettura (Fig.17).

Nonostante il buon numero di situazioni idrogeologiche previste, come per tutti i metodi di questo tipo, si riscontrano condizioni che non rientrano tra quelle previste o che richiedono un ulteriore e più profondo livello di discriminazione. Era per tanto insito nella relativa semplicità e duttilità della metodologia la possibilità di aggiustamenti a giudizio dell'operatore. Nella Figura 21 è riportata la metodologia/legenda. I colori servono ad uniformare la cartografia in modo che Carte contigue possano essere facilmente confrontate. I singoli rettangoli contenenti i colori (o la retinatura a colori) sono incolonnati in modo da corrispondere alla valutazione della vulnerabilità secondo i noti 6 diversi livelli (EE= Estremamente elevata; E= Elevata; A= Alta; M= Media; B= Bassa; BB= Bassissima).

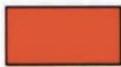
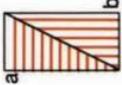
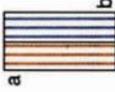
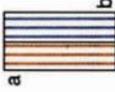
CARATTERISTICHE DEGLI ACQUIFERI				
E _E	A	M	B	B _B
				
				
				
				
				
				
				
				
				
				
				
				
<p>Falda libera in materiali alluvionali (da grossolani a medi) senza alcuna protezione.</p> <p>Falda libera in materiali alluvionali con: a) corsi d'acqua sospesi rispetto alla piezometrica media della falda (alimentazione naturale); b) campi-pozzi deprimenti la piezometrica al di sotto del livello dei corsi d'acqua (realimentazione indotta).</p> <p>Falda o rete acquifera, in pressione, semi-libera o libera, protetta in superficie da una copertura poco permeabile.</p> <p>Rete acquifera in materiali carbonatici a carsismo completo ed altamente sviluppato (holokarst ad elevato i.c.).</p> <p>Rete acquifera in calcari fessurati, ma con i.c. basso o nullo: a) con piezometrica media poco profonda (< 50 m) rispetto al p.c.; b) con piezometrica media profonda (> 50 m) rispetto al p.c.</p> <p>Rete acquifera in dolomie fessurate e poco carsificate: a) con piezometrica media poco profonda (< 50 m) rispetto al p.c.; b) con piezometrica media profonda (> 50 m) rispetto al p.c.</p> <p>Falda acquifera in sabbie più o meno fini.</p> <p>Rete acquifera in arenarie più o meno fessurate ed in conglomerati a cemento non carbonatico.</p>				
<p>RETE ACQUIFERE IN ROCCE IGNEE INTRUSIVE NORMALMENTE FESSURATE.</p> <p>RETE ACQUIFERA E/O CORPI IDRICI MULTIFALDA (ALTERANZE O FLYSCH ARENACEI E CALCAREI) CON PROPAGAZIONE VARIABILE DA MEMBRO A MEMBRO.</p> <p>RETE E FALDA ACQUIFERA IN VULCANITI (BASALTI, TRACHITI, ECC.) ED IN ROCCE IGNEE INTRUSIVE MOLTO TETTONIZZATE.</p> <p>COMPLESSI MARMOSI ED ARGILIOSI (FLYSCH, ARGILLE SOVRACONSOLIDATE) PRACTICAMENTE PRIVI DI CIRCOLAZIONE IDRICA SOTTERRANEA (L'INQUINAMENTO RAGGIUNGE DIRETTAMENTE LE ACQUE SUPERFICIALI).</p> <p>FALDA IDRICA IN MATERIALI MORENICI CON: a) MATERIALI PREVALENTEMENTE GROSSOLANI; b) MATERIALI PREVALENTEMENTE FINI.</p> <p>COMPLESSI SEDIMENTARI A GRANA FINE (ARGILLE, LIMI, TORBE, ECC.) PRACTICAMENTE PRIVI DI CIRCOLAZIONE IDRICA SOTTERRANEA (L'INQUINAMENTO RAGGIUNGE DIRETTAMENTE LE ACQUE SUPERFICIALI).</p> <p>CORPI IDRICI MULTIFALDA IN PIROCLASTITI SCIOLTE; PROPAGAZIONE DI UN INQUINANTE VARIABILE DA MEMBRO A MEMBRO A SECONDA DELLA GRANULOMETRIA.</p> <p>COMPLESSI SEDIMENTARI METAMORFASATI E/O TETTONIZZATI (ARGILLE VARICOLORI), COMPLESSI METAMORFICI DI EPIZONA (FILLADI) PRIVI DI CIRCOLAZIONE IDRICA SOTTERRANEA (INQUINAMENTO LIMITATO ALLE ACQUE SUPERFICIALI).</p> <p>CIRCOLAZIONE IDRICA NELLE FRATTURE DELLE ROCCE METAMORFICHE DI MESO-CATAZONA.</p>				

Figura 17. Protocollo per l'effettuazione della valutazione della vulnerabilità Intrinseca degli acquiferi all'inquinamento con il Metodo Base GNDCI-CNR (Civita, 1990).

4.1.2 Valutazione per modelli numerici

Tramite delle espressioni analogico-matematiche più o meno semplici, si valuta un indice di vulnerabilità intrinseca I_V . Ad es., l'espressione proposta da Marcolongo e Pretto (1987):

$$I_V = \frac{K \frac{Q_i}{S_i}}{MS}$$

Dove K è la conducibilità idraulica media dell'intero spessore insaturo (S_i), MS è la ritenzione specifica del suolo, Q_i è la quantità di infiltrazione per unità di superficie.

Molte espressioni sono state messe a disposizione a partire dagli anni '60 ad oggi, ognuna delle quali considerava un numero variabile di parametri. Si tratta dunque, di costruire ed applicare modelli matematici che richiedono un gran varietà di dati specialistici ottenibili per aree di piccole o piccolissime dimensioni. Il più delle volte, tali modelli non sono esportabili in realtà territoriali diverse da quelle nelle quali sono stati concepiti risultando poco utili per la cartografia tematica di area vaste (con denominatore di scala grande). Questo tipo di valutazione della vulnerabilità è applicabile universalmente per la redazione di mappe a piccolo denominatore di scala.

4.1.3 Valutazione per sistemi parametrici

I sistemi parametrici si suddividono in:

- Sistemi a matrice (MS);
- Sistemi a punteggio semplice (RS);
- Sistemi a punteggi e pesi (PCSM);
- Sistemi di valutazione d'impatto ambientale (EES).

I sistemi parametrici si sviluppano tutti secondo il seguente schema: vengono selezionati i parametri sui quali effettuare la valutazione della vulnerabilità; quindi a questi parametri viene assegnato un punteggio arbitrario in funzione dell'importanza che esso assuma nella valutazione complessiva. Ogni parametro possiede un suo range di variabilità, che viene suddiviso in intervalli di valori. Dalla combinazione lineare dei parametri viene fuori il valore finale della

vulnerabilità, valore che può essere più o meno quantitativo e qualitativo a seconda del sistema utilizzato.

I sistemi a matrice (MS) hanno un utilizzo quasi sempre locale e si basano su pochi parametri opportunamente mirati.

I sistemi a punteggio semplice (RS) traggono più o meno tutti spunto dal sistema LeGrand (1964, 1983). A ciascuno dei parametri prescelti come necessari e sufficienti per la valutazione della vulnerabilità intrinseca è attribuito un intervallo di punteggio, quasi sempre fisso. La valutazione desiderata è ottenuta, per ciascun punto o area presa in considerazione, dalla sommatoria dei punteggi.

Particolare importanza, anche ai fini del presente lavoro di Tesi, assumono i sistemi a punteggi e pesi (PCSM). Questi sono una evoluzione dei sistemi a punteggio semplice (RS). In questi ultimi, ad ogni parametro viene assegnato un punteggio in funzione del suolo significato e/o valore fisico. Nei sistemi a punteggi e pesi, questo parametro viene moltiplicato per un fattore moltiplicatore (peso) che evidenzia l'importanza che lo stesso assume nel contesto della valutazione della vulnerabilità.

Il primo PCSM (Point Count System Model) messo a punto per la valutazione di vulnerabilità degli acquiferi è il metodo DRASTIC dell'USEPA (1983, 1987): il nome del metodo è un acronimo formato con le iniziali dei sette parametri che lo caratterizzando, ossia Depth to water, net Recharge, Aquifer media, Soil media, Topography, Impact of vadose zone, hydraulic Conductivity of the aquifer.

I pesi moltiplicatori sono usati per ogni fattore per bilanciare ed enfatizzare la loro importanza. L'indice finale di vulnerabilità (D_I) è una somma pesata dei sette fattori e può essere calcolata utilizzando:

$$D_I = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w$$

Dove D, R, A, S, T, I, C sono i sette parametri, r è il valore del punteggio della sub-area analizzata, e w è il peso associato ad ogni singolo parametro. Il DRASTIC fornisce due classificazioni pesate, una per condizioni normali ed un'altra per condizioni con una forte attività agricola. Questo metodo è influenzato maggiormente dalla Profondità della tavola d'acqua e dalla Tipologia di suolo.

La metodologia DRASTIC, non si adatta all'ambiente carsico in quanto non prende in considerazione le caratteristiche tipiche di questi

ambienti. Per questo motivo, un lavoro di Ruiz L.B. & Velazquez D.P. del 2020 ha proposto un adattamento del metodo DRASTIC, per minimizzare le differenze con il metodo COP (il quale si adatta bene agli ambienti carsici). L'indice DRASTIC è stato ricalcolato variando i range dei punteggi e pesi relativi ai parametri (soddisfando alcuni limiti per mantenere una definizione razionale) e di conseguenza anche i range di valori dell'indice di vulnerabilità stesso. La modifica dei range è stata effettuata sulla base di un criterio statistico in relazione alla distribuzione dei dati nell'area di studio portando ad avere diverse possibili combinazioni; le modifiche hanno interessato solo i parametri D (Soggiacenza), T (Topografia), C (Conduktività).

Nella Tabella 1 sono rappresentate tutte le possibili classificazioni dei parametri fuoriuscite dall'adattamento del metodo DRASTIC.

Vulnerability	DR1	DR2	DR3	DR4	DR5	DR6	DR7	DR8	DR9	DR10	DR11	DR12	DR13	DR14	DR15	DR16
Very low	<70	<70	<70	<80	<80	<90	<90	<90	<100	<100	<100	<100	<110	<120	<120	<130
Low	80	90	100	90	100	100	100	110	110	115	120	130	120	130	130	140
Moderate	90	110	130	100	120	110	115	130	120	125	140	140	130	140	145	150
High	100	130	160	110	140	120	130	150	130	140	160	150	140	150	160	160
Very high	>100	>130	>160	>110	>140	>120	>130	>150	>130	>140	>160	>150	>140	>150	>160	>160
D (m) rate	D*	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15
10	1.5	5	5	10	10	13	15	15	20	20	25	25	30	30	30	35
9	5	10	10	15	20	21	20	30	25	40	30	50	35	55	60	70
7	10	15	20	20	30	30	25	45	30	60	35	75	40	80	90	105
5	15	20	40	25	40	37	30	60	35	80	40	100	45	100	120	140
3	23	25	80	30	50	54	35	75	40	100	45	125	50	127	150	175
2	30	30	160	35	60	88	40	90	45	120	50	150	55	160	180	210
1	>30	>30	>160	>35	>60	>88	>40	>90	>45	>120	>50	>150	>55	>160	>180	>210
T (%) rate	T*	T1	T2	T3	T4											
10	2	1	<3	4	9											
9	6	2	7	8	18											
5	12	4	14	12	27											
3	18	8	22	20	36											
1	>18	>8	>22	>20	>36											
C (m/day)	C*	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8							
1	0.04-4	≤0.1	≤2	≤2	≤3	≤3	≤5	≤6	≤15							
2	4-12	3	5	6	6	12	12	15	30							
4	12-28	6	12	15	15	25	25	30	45							
6	28-40	15	25	30	30	40	40	75	60							
8	40-80	30	40	40	75	80	80	80	75							
10	>80	>30	>40	>40	>75	>80	>80	>80	>75							

* Original classification of DRASTIC parameters.

Tabella 1. Classificazioni proposte per i parametri ed indice DRASTIC (Ruiz L.B. & Velazquez D.P., 2020).

Nella Tabella 2, invece è rappresentata la differenza dei pesi utilizzati dal DRASTIC adattato rispetto all'originale.

DRASTIC Parameters	D	R	A	S	T	I	C
W (original DRASTIC)	5	4	3	2	1	5	3
W (O-DRASTIC)	1	5	5	5	1	5	1

Tabella 2. Pesi dei parametri del DRASTIC originale e del DRASTIC adattato (Ruiz L.B. & Velazquez D.P., 2020).

Di seguito saranno descritti gli altri metodi a punteggi e pesi applicati nel presente lavoro di Tesi.

4.2 Il metodo SINTACS

L'acronimo SINTACS deriva dalle denominazioni dei parametri che vengono presi in considerazione, corrispondenti agli stessi parametri del modello DRASTIC:

- **S**= Soggiacenza;
- **I**= Infiltrazione efficace;
- **N**= Effetto di autodepurazione del **N**on saturo;
- **T**= Tipologia di copertura;
- **A**= Caratteristiche idrogeologiche dell'**A**cquifero;
- **C**= Conducibilità idraulica dell'**a**cquifero;
- **S**= Acclività della **S**uperficie topografica.

Il territorio in studio deve essere discretizzato, generalmente per elementi finiti quadrati (EFQ) attraverso una griglia regolare, e per ogni area discretizzata devono essere calcolati i valori dei suddetti parametri.

Il SINTACS presenta delle caratteristiche, rispetto ad altri modelli, che lo rendono adattabile a diversi contesti e più agevole nella sua applicazione. Queste caratteristiche sono:

- I dati di input possono essere codificati in funzione della situazione effettivamente identificata nell'area di interesse;
- Vengono utilizzate diverse linee di pesi, in parallelo, per estrinsecare la reale situazione idrogeologica e di impatto;
- Gli indici di vulnerabilità risultanti vengono percentualizzati e suddivisi in intervalli (identificati sperimentalmente sulla base di circa 500 test effettuati su tutte le più importanti situazioni idrogeologiche italiane) ed abbinati ad una valutazione esplicita del grado di vulnerabilità (Civita, 1994);
- I parametri utilizzati da questo PCSM sono in gran parte derivabili da dati normalmente reperibili sul terreno, il che limita notevolmente i costi di realizzazione e ne fa uno strumento adatto a qualsiasi livello di Ente tutore del territorio;
- La struttura dell'input e dell'output è di tipo modulare, basata sulla griglia di discretizzazione, il che rende informatizzabile il metodo e la produzione della cartografia tematica relativa.

4.2.1 Soggiacenza (S)

Si definisce soggiacenza la profondità della superficie piezometrica valutata rispetto al piano-campagna. Questo parametro ha una notevole influenza sulla vulnerabilità degli acquiferi: dal suo valore assoluto e dalle caratteristiche idrogeologiche dell'insaturo dipende, in buona misura, il tempo di transito di un qualsiasi inquinante idroportato e la durata delle azioni autodepurative dell'insaturo. Il punteggio SINTACS relativo è massimo (uguale a 10) per valori bassi di soggiacenza, cioè per livelli piezometrici prossimi alla superficie topografica o per zone di affioramento della falda, e tende asintoticamente al valore minimo pari ad 1 per valori di soggiacenza superiori ai 60m. La soggiacenza viene valutata sulla base di misure effettuate sui punti d'acqua presenti nell'area in esame oppure può essere dedotta da Carte piezometriche eventualmente esistenti; i dati puntuali devono poi essere territorializzati mediante interpolazione.

La soggiacenza viene valutata diversamente in relazione alle diverse tipologie di acquifero:

- Acquifero confinato, corrisponde sempre alla profondità del letto del confinante superiore, misurata da piano-campagna;
- Acquifero semi-confinato, in questo caso è necessario stabilire, in base ai dati disponibili, se sussistono travasi attivi tra la superficie (o/e l'eventuale acquifero libero) ed il semiconfinato o se si è in presenza di fenomeni di leakage inverso (Villumsen et al., 1984). Ove sussista il primo caso, il mezzo semiconfinante viene considerato parte dell'insaturo e la sua presenza influirà sul punteggio da attribuire a tale parametro. Nel secondo caso, la pressione dell'acquifero si oppone alla penetrazione degli inquinanti e pertanto il punteggio da assegnare alla soggiacenza deve tenerne conto.
- Acquiferi liberi, per questa tipologia di acquiferi è possibile derivare e territorializzare le misure di soggiacenza da Carte piezometriche eventualmente esistenti. Un problema che si presenta frequentemente è generato da eventuali corpi idrici sospesi rispetto alla superficie dell'acquifero principale, sostenuti da impermeabili lenticolari. In questi casi, è necessario assumere che gli inquinanti idroportati, raccolti da corpi idrici sospesi più prossimi alla superficie, vengono soltanto ritardati nel loro percorso verso l'acquifero libero

principale. Di contro, sovente si generano accumuli a concentrazione anche elevata che, prima o poi, vengono scaricati nell'acquifero; in questi casi, se documentabili, è consigliabile tenere conto della soggiacenza effettivamente misurata;

- Falde sospese, spesso presenti all'interno di sistemi acquiferi in rocce fessurate, in generale, e carbonatiche, in particolare, le quali sovente altro non sono che effimeri corpi idrici in zone intensamente fessurate o corrispondono a volumi di infiltrazione che si spostano in profondità con velocità pari alla permeabilità verticale del mezzo (Schoeller, 1974). In questi casi, effettuati i doverosi controlli sulla geometria del sistema, è il caso di ripetere nel tempo le misure di soggiacenza (Secci R. & Uras G., 2011).

L'attribuzione del punteggio al parametro **S** si effettua sulla base dell'abaco in Figura 18:

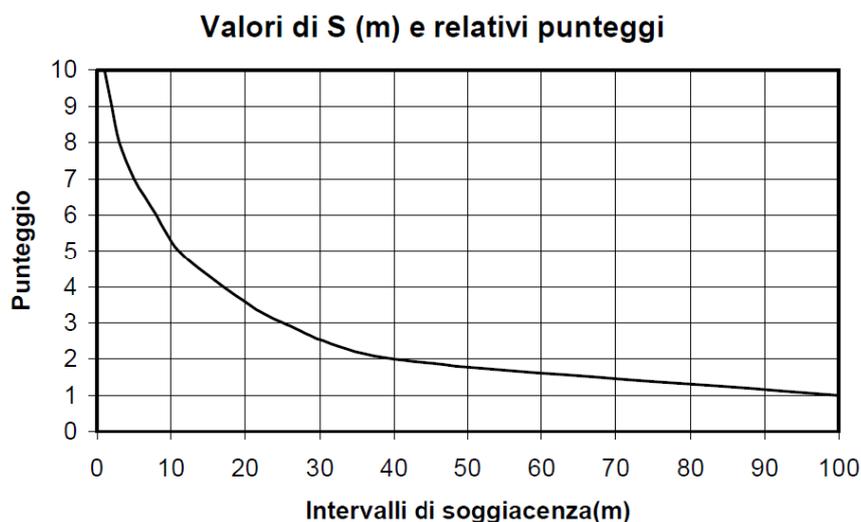


Figura 18. Valori di soggiacenza e relativi punteggi nel metodo SINTACS (Civita M., De Maio M., 2000).

4.2.2 Infiltrazione Efficace (I)

L'importanza dell'infiltrazione efficace, nella valutazione di vulnerabilità, è dovuta all'azione di trascinamento in profondità che le acque meteoriche svolgono nei confronti di inquinanti liquidi o idroportati, ma anche ad un'azione di diluizione sia nell'insaturo che nella zona satura. Dove non sussistono scambi tra corpi idrici

superficiali ed acquiferi sotterranei, oppure in aree non irrigue, l'infiltrazione efficace rappresenta l'unica componente di ricarica attiva per l'acquifero. Il calcolo del parametro è basato sui valori di piovosità efficace e su un coefficiente di infiltrazione potenziale (c.p.i.= χ), caratteristico delle condizioni idrogeologiche superficiali; per le zone in cui sia lecito supporre l'esistenza di scambi con corpi idrici superficiali (aste fluviali, zone lacustri ecc.), o per aree agricole in cui si utilizzano grandi volumi d'acqua d'irrigazione, a rigore si dovrebbe correggere, incrementandolo, il valore dell'infiltrazione calcolata sulla base della sola piovosità. Tuttavia i dati necessari per attuare questa correzione sono generalmente non disponibili o difficilmente territorializzabili, pertanto, nelle zone interessate da tali fenomeni, si preferisce agire sul peso che il parametro infiltrazione ha sulla valutazione complessiva di vulnerabilità, piuttosto che sul valore del parametro stesso.

Il calcolo dell'infiltrazione efficace I (mm/anno) viene condotto in maniera differente nel caso di rocce nude o poco coperte ed in quello di suolo potente. Nel primo caso (copertura scarsa o assente), per ogni elemento discretizzato del territorio, si calcola il valore delle precipitazioni efficaci medie annue \bar{Q} :

$$\bar{Q} = \bar{P} - \bar{E}_r \text{ (mm/a)}$$

\bar{P} è il valore delle precipitazioni medie annue ragguagliate, \bar{E}_r è il valore dell'evapotraspirazione reale media annua; questi valori devono essere calcolati sulla base di serie storiche almeno ventennali, continue o ricostruite, di dati termo-pluviometrici mensili, misurati nelle stazioni di interesse per l'area in esame.

Il valore di \bar{Q} deve essere moltiplicato per l'indice χ proprio del tipo di roccia affiorante nell'area considerata, ottenendo così il valore dell'infiltrazione efficace:

$$\bar{I} = \bar{Q} * \chi \text{ (mm/a)}$$

Vengono riportati nella Tabella 3 seguente gli intervalli di valori dell'indice χ , per rocce affioranti o sotto scarsa copertura:

Complessi Idrogeologici	χ
Alluvioni grossolane	0.65-1
Calcari carsificati	0.75-1
Calcari fessurati	0.5-0.85

Dolomie fessurate	0.48-0.65
Alluvioni medio-fini	0.15-0.48
Complessi sabbiosi	0.75-0.88
Arenarie, conglomerati	0.3-0.5
Plutoniti fessurate	0.05-0.35
Alternanze (flysch)	0.2-0.45
Vulcaniti fessurate	0.75-1
Marne, Argilliti	0.12-0.18
Morene grossolane	0.48-0.7
Morene medio-fini	0.12-0.22
Argille, limi, torbe	0-0.25
Piroclastiti diverse	0.2-0.65
Metamorfiti	0.2-0.28

Tabella 3. Intervalli di valori dell'indice χ per rocce affioranti o sotto scarsa copertura (Civita M., De Maio M., 2000).

Tale indice è determinato, oltre che dalla litologia affiorante, dal grado di fratturazione e carsismo, dall'acclività della superficie topografica e da una serie di parametri correttivi quali soggiacenza, uso del suolo, densità della rete drenante superficiale. Nel caso di suoli spessi si utilizza invece il valore intero di \bar{P} e si ricava l'infiltrazione efficace dalla relazione:

$$\bar{I} = \bar{P} * \chi \text{ (mm/a)}$$

L'indice χ dipende in questo caso dalla tessitura dei suoli presenti; gli intervalli di valore assunti sono riportati nella Tabella 4 seguente:

Tessitura dei suoli	χ
Ghiaia pulita	0.4-0.55
Sabbia pulita	0.5-0.55
Sabbioso	0.3-0.5
Torba	0.2-0.4
Argillo-sabbioso	0.15-0.4
Franco sabbioso	0.1-0.3
Franco-sabbioso-limoso	0.1-0.3
Franco	0.05-0.2
Franco limoso	0.03-0.15
Franco-limoso-argilloso	0.03-0.1
Franco-argilloso	0-0.025
Argillo-limoso	0-0.025
Suolo humifero	0-0.02

Argilloso	0-0.02
-----------	--------

Tabella 4. Intervalli di valori dell'indice χ per la tessitura dei suoli (Civita M., De Maio M., 2000).

Una volta ricavato il valore dell'infiltrazione efficace, per ogni elemento discretizzato del territorio, si attribuisce un punteggio (Fig.19) sulla base del seguente diagramma:

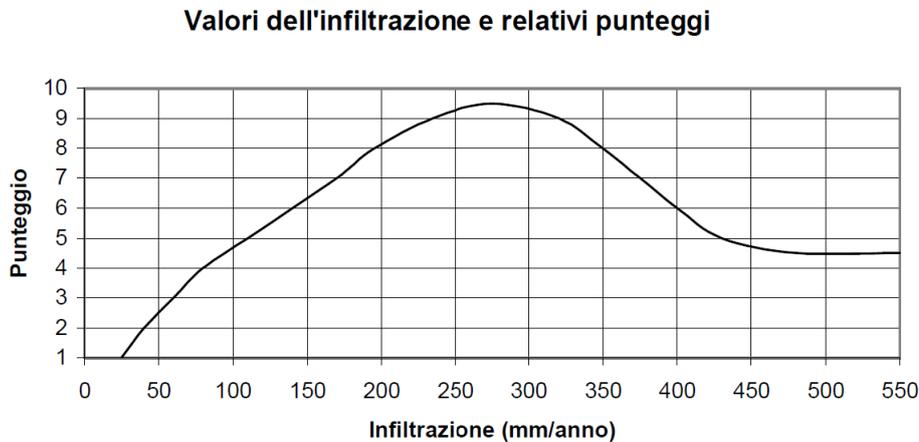


Figura 19. Valori dell'infiltrazione e relativi punteggi nel metodo SINTACS (Civita M., De Maio M., 2000).

Il punteggio massimo si ha in corrispondenza dell'intervallo di infiltrazione 250-300 mm/a, oltre tali valori tende a diminuire per tenere conto dei fenomeni di diluizione e dispersione attraverso l'insaturo, più accentuati per elevati volumi di infiltrazione, e del ruscellamento superficiale, che si genera anche in terreni ad elevata permeabilità in occasione di precipitazioni particolarmente intense e frequenti (Secci R. & Uras G., 2011).

4.2.3 Effetto di autodepurazione del Non saturo (N)

La zona insatura è costituita dalla parte di sottosuolo compresa tra la base del suolo e la zona saturata dell'acquifero (o base del livello confinante superiore per acquiferi in pressione). Da tale definizione traspare chiaramente che, mentre lo spessore insaturo di un acquifero in pressione è fisso per ciascun punto di osservazione, esso varia ed anche in modo notevole per gli acquiferi liberi seguendo le fluttuazioni della superficie piezometrica. In tale zona avvengono spostamenti prevalentemente verticali e tutta una serie di processi

fisici e chimici che favoriscono il fenomeno dell'attenuazione. Tra questi, importanti sono la filtrazione e la dispersione che dipendono essenzialmente dalle caratteristiche granulometriche, dallo spessore e dal grado di diagenesi dei mezzi rocciosi; la reattività chimica dei minerali componenti i mezzi, che influenza processi come gli scambi cationici, le reazioni acido-base, la complessazione, l'adsorbimento-desorbimento; i processi di biodegradazione e volatilizzazione che sono controllati dalla profondità e, dunque, dallo spessore insaturo. Per i mezzi a permeabilità matriciale la valutazione di tutti questi fattori è abbastanza agevole, più difficile appare la stima dell'azione di mitigazione dell'insaturo quando questo comprende rocce fessurate. In questi casi, molto importanti sono la luce delle discontinuità, la loro geometria, orientazione, densità (indice di fratturazione) ed interconnessione.

L'effetto di autodepurazione del non saturo si valuta a partire dalle condizioni litologiche dello spessore insaturo: litologia, granulometria, presenza di argille e limi, per rocce permeabili, fratturazione o carsismo nel caso di rocce compatte. Si attribuisce un punteggio alla litologia del parallelepipedo avente per base l'area della singola maglia discretizzata considerata ed altezza coincidente con lo spessore insaturo. Se lo spessore insaturo è costituito da diversi tipi litologici è necessario calcolare il punteggio come media ponderale riferita agli spessori delle singole litologie: ciò è possibile solo se si dispone di dati adeguati (stratigrafie). Dove l'acquifero è certamente confinato da uno o più livelli impermeabili, il valore del punteggio da attribuire all'azione mitigatrice dell'insaturo si assume pari ad 1. Lo stesso punteggio può attribuirsi ai casi di acquiferi semiconfinati da un mezzo privo di immagazzinamento proprio (Fetter, 1994) mentre, quando il semiconfinante è dotato di un proprio immagazzinamento, esso deve essere considerato come una parte dell'intero spessore insaturo sovrastante l'acquifero considerato (Secci R. & Uras G., 2011).

Gli intervalli di punteggi per il parametro **N** in base alla litologia sono indicati nella Tabella 5 seguente:

Complessi idrogeologici	N
Alluvioni grossolane	6-9
Calcari carsificati	8-10
Calcari fessurati	4-9

Dolomie fessurate	2-5
Alluvioni medio-fini	3-6
Complessi sabbiosi	4-7
Arenarie, conglomerati	5-8
Plutoniti fessurate	3-5
Alternanze (flysch)	2-5
Vulcaniti fessurate	5-10
Marne, argilliti	1-2
Morene grossolane	4-6
Morene medio-fini	2-4
Argille, limi, torbe	1-2
Piroclastiti diverse	2-5
Metamorfiti fessurate	2-6

Tabella 5. Intervalli di punteggi per il parametro N in base alla litologia (Civita M., De Maio M., 2000).

4.2.4 Tipologia di copertura (T)

La tipologia dei suoli di copertura riveste un ruolo di massima importanza nella valutazione di vulnerabilità, avendo il suolo una capacità notevole di mitigazione dell’impatto degli inquinanti: esso costituisce la prima linea di difesa di un sistema acquifero. Il suolo si sviluppa per alterazione fisico-chimica e biologica dei litotipi del substrato e delle sostanze organiche che vi si accumulano. I parametri pedologici che influenzano il potenziale di attenuazione del suolo possono essere divisi in due gruppi; il primo gruppo è costituito da quei parametri che caratterizzano processi di assorbimento, filtrazione, capacità di drenaggio, grado di umidità, velocità di infiltrazione, ecc... e sono:

- Granulometria;
- Tessitura;
- Spessore effettivo;
- Massa volumica apparente;
- Porosità totale;
- Quantità d’acqua disponibile per la vegetazione;
- Conducibilità idraulica.

Alcuni possono essere valutati mediante campionamenti ed analisi in laboratorio (ad esempio la granulometria), altri si calcolano attraverso una serie di relazioni empiriche.

I parametri del secondo gruppo influiscono invece sul grado di adsorbimento di un composto chimico da parte del suolo e sono:

- Il pH;
- La capacità di scambio cationico (CSC);
- Il contenuto di sostanza organica;
- Il contenuto di argilla.

Il pH del suolo (unitamente al potenziale di ossidoriduzione, Eh) influisce notevolmente sull'adsorbimento della maggior parte dei metalli pesanti e radioattivi, che è massima per pH=6 o superiore, tranne per Se ed Hg che vengono adsorbiti meglio in ambiente acido. La capacità di scambio cationico (CSC) del suolo è ritenuta essenziale nella valutazione del potenziale di attenuazione del suolo e dell'insaturo (Villumsen et al., 1983; Breeuwsma et al., 1986).

La capacità di scambio cationico rappresenta la quantità massima di cationi metallici adsorbibili da un suolo, essa viene valutata attraverso relazioni empiriche funzioni dei contenuti di sostanza organica e di argilla, i quali sono invece valutabili sperimentalmente per campionamento. Talvolta queste informazioni possono ricavarsi dalle cartografie pedologiche su scala operativa, ma più di frequente esistono solo dati puntuali non territorializzabili: in questi casi si fa riferimento alle caratteristiche tessiturali dei suoli, allo spessore ed ai parametri disponibili tra quelli elencati, al fine della determinazione del parametro **T** per ogni elemento discretizzato del territorio in esame (Secci R. & Uras G., 2011).

Nella Tabella 6 si riportano gli intervalli di punteggio relativi alle diverse classi tessiturali del suolo:

Suoli	Punteggio T
Sottile o assente	10
Ghiaia pulita	9.5-10
Sabbia pulita	8.9-9.5
Sabbioso	8-8.5
Torba	7.5-8.2
Argillo-sabbioso	6.2-7
Franco sabbioso	5.5-6
Franco-sabbioso-limoso	4.5-5.2
Franco	4-5
Franco-limoso	3.5-4.2
Franco-limoso-argilloso	3-4

Franco-argilloso	2-3
Argillo-limoso	1.4-2
Suolo humifero	1.2-2
Argilloso	1-1.3

Tabella 6. Intervalli di punteggio relativi alle diverse classi tessiturali del suolo (Civita M., De Maio M., 2000).

4.2.5 Caratteristiche idrogeologiche dell'Acquifero (A)

Il parametro **A** dipende essenzialmente dalle caratteristiche del complesso idrogeologico che contiene l'acquifero e più precisamente la zona satura: al di sotto della superficie piezometrica, quando un inquinante idroveicolato giunge a mescolarsi con l'acqua sotterranea dopo che esso ha superato le due linee di difesa costituite dalla copertura e dall'insaturo, avvengono ulteriori processi di abbattimento più o meno rilevanti della concentrazione iniziale, in seguito a quelli che si verificano nello spessore del suolo e dell'insaturo. Tali processi sono:

- Diluzione;
- Dispersione;
- Assorbimento;
- Reazioni chimiche.

La diluzione dipende dalla ricarica e dalla portata dell'acquifero; la dispersione cinematica è influenzata dalla lunghezza e tortuosità dei percorsi che il fluido segue nella zona satura e dipende da granulometria e grado di compattazione, per i mezzi porosi, dallo stato di fratturazione o carsismo, per rocce fessurate. Le reazioni chimiche sono determinate dalla reattività della roccia acquifera e quindi dalla sua composizione chimica e dalla permeabilità dell'acquifero (Secci R. & Uras G., 2011).

Sulla base dei dati disponibili si individua il valore del punteggio **A** all'interno degli intervalli elencati nella Tabella 7, in corrispondenza dei diversi complessi idrogeologici:

Complessi idrogeologici	Punteggio A
Alluvioni grossolane	8-9
Calcari carsificati	9-10
Calcari fessurati	6-9

Dolomie fessurate	4-7
Alluvioni medio-fini	6-8
Complessi sabbiosi	7-9
Arenarie, conglomerati	4-9
Plutoniti fessurate	2-4
Alternanze (flysch)	5-8
Vulcaniti fessurate	8-10
Marne, Argilliti	1-3
Morene grossolane	6-8
Morene medio-fini	4-6
Argille, limi, torbe	1-3
Piroclastiti diverse	4-8
Metamorfiti fessurate	2-5

Tabella 7. Punteggio relativo ai diversi complessi idrogeologici (Civita M., De Maio M., 2000).

4.2.6 Conducibilità idraulica dell'acquifero (C)

La conducibilità idraulica indica la capacità di spostamento dell'acqua nel mezzo saturo e, dunque, di un inquinante idroveicolato che abbia un valore di densità paragonabile a quello dell'acqua sotterranea. Questo parametro nel contesto SINTACS regge, a parità di gradiente e di sezione retta attraversata, la portata unitaria dell'acquifero e la velocità di spostamento verso i punti di recapito o le capitazioni. Generalmente si calcola attraverso prove di pompaggio in cui si determina la trasmissività T dell'acquifero (m^2/s) e noto il valore di H (spessore dell'acquifero in m), si ricava la conducibilità $C = T/H$ (m/s).

Dati di conducibilità idraulica che caratterizzino affidabilmente gli acquiferi sono molto raramente disponibili, per questo motivo il modello SINTACS offre un metodo di stima indiretta, indicando l'ordine di grandezza della conducibilità idraulica in base al complesso idrogeologico che contiene l'acquifero (Tab.8). Il punteggio per il parametro **C** (Fig.20) si individua entrando nel grafico seguente:

Conducibilità idraulica e relativi punteggi

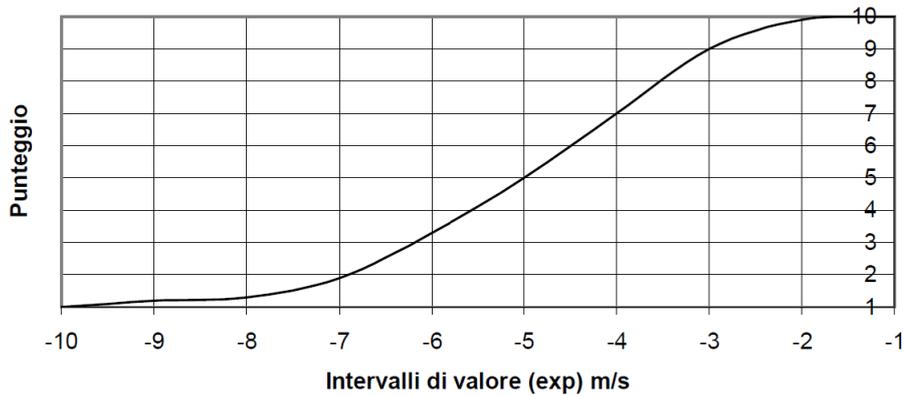


Figura 20. Conducibilità idraulica e relativi punteggi nel metodo SINTACS (Civita M., De Maio M., 2000).

Complessi idrogeologici	C (m/s)
Ghiaie	$10^{-3} - 0$
Sabbie pulite	$10^{-6} - 10^{-2}$
Sabbie limose	$10^{-7} - 10^{-3}$
Limi	$10^{-10} - 10^{-5}$
Depositi glaciali	$10^{-12} - 10^{-6}$
Argille	$10^{-13} - 10^{-9}$
Piroclastiti	$10^{-10} - 10^{-5}$
Argilliti-marne	$10^{-13} - 10^{-9}$
Dolomie	$10^{-9} - 10^{-6}$
Calcari e marmi	$10^{-9} - 10^{-2}$
Arenarie	$10^{-10} - 10^{-6}$
Vulcaniti	$10^{-12} - 10^{-2}$
Rocce cristalline	$10^{-13} - 10^{-4}$

Tabella 8. Complessi idrogeologici e relativi intervalli di conducibilità (Civita M., De Maio M., 2000).

Per i mezzi porosi devono essere scelti valori di **C** più bassi all'interno dell'intervallo se si tratta di materiali fini, e valori più alti per granulometrie grossolane; nel caso di rocce massive i parametri discriminanti saranno i gradi di fessurazione, carsismo, alterazione o compattazione (Secci R. & Uras G., 2011).

4.2.7 Acclività della Superficie topografia (S)

Dalla acclività della superficie topografica dipendono, a parità di precipitazioni, la quantità di ruscellamento e la velocità di

spostamento dell'acqua (e dunque, di un inquinante fluido o idroveicolato) sulla superficie. Si attribuisce un punteggio elevato a zone in cui la pendenza è molto bassa o zone pianeggianti, nelle quali l'infiltrazione è favorita dalla limitata capacità di spostamento dell'acqua (o degli inquinanti) in superficie sotto l'azione della gravità, con conseguente possibilità di ristagno. Alle zone con elevato gradiente topografico si attribuiscono punteggi minimi, data la scarsa attitudine per tali zone ad assorbire i fluidi che vengono a trovarsi sulla superficie, essendo questi più facilmente trasportabili dalla forza di gravità sulla superficie stessa (Secci R. & Uras G., 2011).

Per l'attribuzione del punteggio si stabiliscono delle classi di pendenza comprese tra 0 e 30%, ricavabili dalla Carta topografica o dedotte da un DEM (Digital Elevation Model), e si assegnano i valori secondo il grafico seguente (Fig.21):

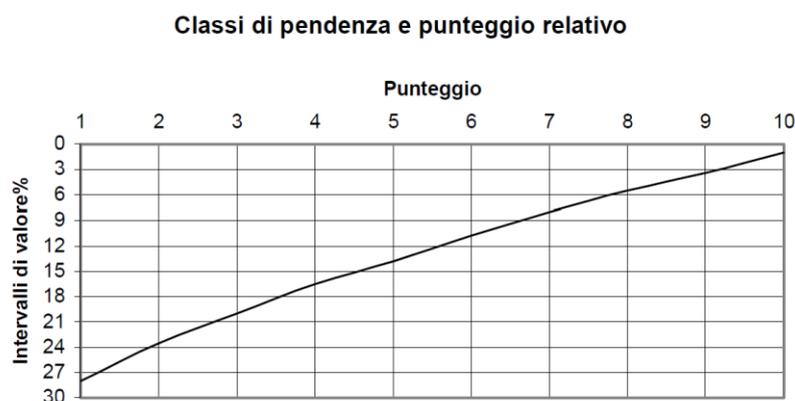


Figura 21. Classi di pendenza e relativo punteggio nel metodo SINTACS (Civita M., De Maio M., 2000).

4.2.8 Stringhe di pesi

La struttura modulare (per maglie) dell'input del SINTACS è stata concepita per poter usare varie stringhe (linee di pesi moltiplicatori) in alternativa ed in parallelo. Le stringhe sono elaborate in modo da esaltare più o meno i singoli parametri alla base del metodo, onde descrivere di fatto il tipo di situazione idrogeologica e di impatto risultante dalla serie di dati. In effetti, le linee di pesi sono un potente strumento che permette di modellare la metodologia sulla situazione effettiva identificata (scenario) per ciascuno elemento di maglia, esaltando l'importanza di alcuni parametri rispetto ad altri ma lasciando all'analista un ben calibrato spazio decisionale che va speso sulla base di attente sintesi dei dati. L'identificazione può essere

realizzata mediante l'utilizzo di Carte d'uso reale del territorio, Geologia, Pedologia o rilievi in loco. Le possibili stringhe di pesi (W) saranno tante quanti sono gli scenari individuati, purché siano rispettati i vincoli:

$$\sum_{i=1}^7 W_i = cost. = 26$$

$$W_{i\max} = 5$$

L'indice i è relativo ad ognuno dei 7 parametri.

Il modello SINTACS propone cinque diverse stringhe di pesi (Tab.9, Fig.22) associate alle situazioni di:

- Impatto Normale (IN);
- Impatto Rilevante (IR);
- Drenaggio (D);
- Carsismo (C);
- Fessurato (F).

Parametro	IN	IR	D	C	F
S	5	5	4	2	3
I	4	5	4	5	3
N	5	4	4	1	3
T	3	5	2	3	4
A	3	3	5	5	4
C	3	2	5	5	5
S	3	2	2	5	4

Tabella 9. Valori dei pesi relativi ad ognuno dei parametri SINTACS (Civita M., De Maio M., 2000).

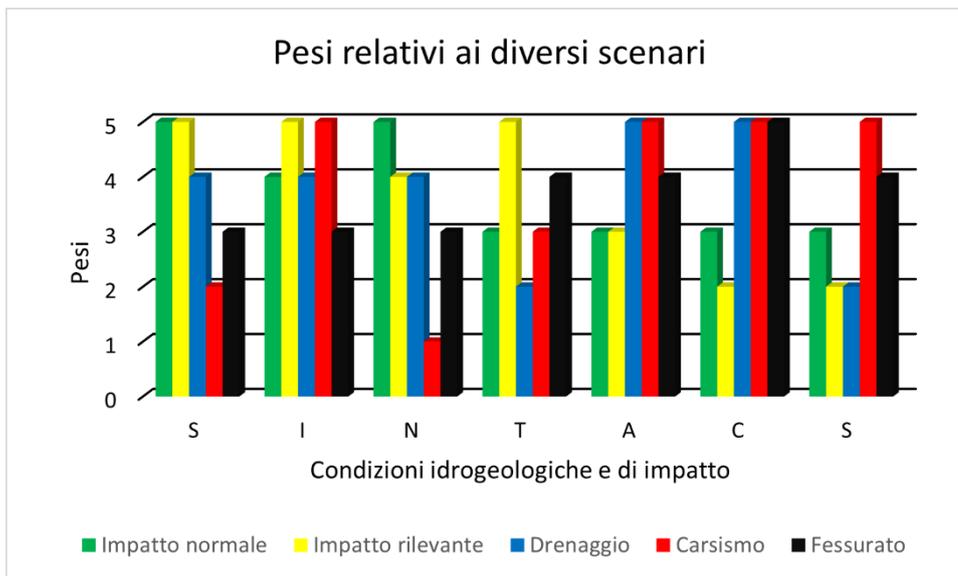


Figura 22. Rappresentazione dei pesi assunti da ciascun parametro nelle diverse situazioni idrogeologiche e/o di impatto (Civita M., De Maio M., 2000).

Possono essere classificate aree soggette ad impatto normale quelle caratterizzate da scarso gradiente topografico (pianura, pedemonte, pianalto, conche intermontane, ecc...), con insaturo a prevalente permeabilità matriciale, non soggette a particolari situazioni di impatto antropico o con uso del territorio contenuto.

Rientrano in questa tipologia le aree sterili, incolte, con colture spontanee o che non richiedono uso di fitofarmaci e fertilizzanti, in cui sia praticato l'allevamento brado con un numero limitato di capi. La stringa corrispondente esalta al massimo i pesi assunti da soggiacenza ed insaturo, strettamente collegati alla effettiva penetrabilità del sistema da parte di un inquinante fluido. Assegna un'elevata importanza alla ricarica dell'acquifero, mentre gli altri parametri assumono un peso minore e quindi saranno determinati nella valutazione globale solo se il loro punteggio è elevato.

Le aree soggette ad impatto rilevante comprendono invece tutte quelle situazioni territoriali in cui siano presenti fonti diffuse di inquinamento potenziali, insediamenti antropici, colture trattate con abbondante uso di fitofarmaci, fertilizzanti chimici, fertirrigazione, aree di discarica incontrollata, aree industriali e minerarie (sia attive che dismesse). Si tratta di territori con un insaturo costituito in prevalenza da mezzi a permeabilità matriciale. In queste condizioni è evidente che il sottosistema insaturo gioca un ruolo altamente preponderante, qualsiasi sia la tipologia dell'acquifero soggiacente e

la sua conducibilità idraulica. La stringa è stata dunque, strutturata in modo da esaltare notevolmente la funzione della soggiacenza e dell'insaturo combinati, ma anche quella fondamentale del suolo come primo e potente baluardo contro l'inquinamento. Notevole enfasi viene attribuita anche al parametro dell'infiltrazione per tenere conto delle pratiche irrigue, mentre gli altri parametri giocano un ruolo minore.

Le aree soggette a drenaggio sono quelle in cui si ha un continuo o frequente travaso di acqua da corpi idrici superficiali a quelli sotterranei soggiacenti, aree soggette a forte rischio di esondazione dei corsi d'acqua in regime di piena, aree di irrigazione con grandi volumi d'acqua per sommersione o per scorrimento, aree di affioramento della superficie piezometrica. Questa linea di pesi è stata calibrata fondamentalmente sulla forte riduzione se non sull'annullamento della soggiacenza in corrispondenza dei punti nei quali può sussistere un collegamento tra acquifero e reticolo drenante superficiale. I parametri fondamentali che caratterizzano l'insaturo ed i processi che in esso avvengono vengono meno esaltati dai moltiplicatori, mentre forte rilevanza viene attribuita al tipo di acquifero ed alla sua conducibilità idraulica. Ciò per esaltare l'importanza di tempi di transito veloci, l'alta capacità di ingestione e di diluzione del corpo idrico sotterraneo. Gli altri parametri hanno un'importanza minore.

Le aree carsiche sono tipiche dei massicci carbonatici (calcarei e dolomitici), sono caratterizzate da collegamenti molto rapidi tra superficie ed acquifero attraverso pozzi carsici ed inghiottitoi; sono piuttosto diffusi in tutto il territorio italiano. La stringa assegna il massimo valore ai pesi relativi all'infiltrazione (per questo tipo di rocce si ha spesso $\chi=1$), alla conducibilità idraulica, alla pendenza della superficie (in modo da tener conto le zone assorbenti o perdenti a scarsa pendenza che favoriscono il ristagno se non l'allagamento temporaneo o continuativo), alle caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero, mentre nulla o quasi è l'importanza della soggiacenza e del non saturo (le acque superficiali si riversano nel sottosuolo con velocità elevatissime, perciò è pressoché nulla l'azione di mitigazione).

La stringa fessurato si applica ad aree il cui sistema idrogeologico è costituito in prevalenza da rocce permeabili per fessurazione, non

carsificate o con carsismo superficiale. Il peso maggiore è attribuito alla conducibilità idraulica, data l'elevata mobilità dei fluidi in mezzi particolarmente fessurati; pesi inferiori ma non bassissimi sono assegnati agli altri parametri, volendo considerare in questo caso un'azione globale di mitigazione dell'intero sistema, non strettamente connessa con i singoli parametri (Secci R. & Uras G., 2011).

4.2.9 L'indice di vulnerabilità

Per ciascun elemento di maglia della griglia che discretizza l'area d'interesse si calcolano i pesi relativi ai 7 parametri del metodo, si identifica una delle cinque situazioni-scenario descritte e si assume la stringa relativa. L'indice di vulnerabilità intrinseca $I_{SINTACS}$, per ogni area discretizzata del territorio, si ottiene dalla relazione:

$$I_{SINTACS} = \sum_{i=1}^7 P_i * W_i$$

Essendo P_i il punteggio di ciascuno dei sette parametri considerati e W_i il peso relativo.

L'integrazione dei valori così ottenuti fornisce, per ogni maglia, un valore numerico rappresentante la vulnerabilità intrinseca dell'acquifero di riferimento. I valori dell'indice variano da un minimo pari a 26 ad un massimo di 260 punti; il valore ottenuto viene poi normalizzato in un intervallo di valori compresi tra 0 e 100 per renderne più agevole la lettura e la restituzione cartografica secondo delle classi di vulnerabilità.

L'indice normalizzato si calcola con la relazione:

$$IS_{NO} = \frac{IS_{GR} - IS_{MIN}}{IS_{MAX} - IS_{MIN}} * 100$$

Dove IS_{GR} è l'indice SINTACS "grezzo", cioè quello calcolato con la sommatoria dei prodotti tra punteggi e pesi, $IS_{MIN} = 26$, $IS_{MAX} = 260$.

Le classi di vulnerabilità sono state individuate attraverso un'analisi statistica basata sul confronto delle vulnerabilità calcolate per oltre 500 aree campione con il metodo SINTACS ed il Metodo-base CNDICI-CNR (Secci R. & Uras G., 2011).

Tali classi (Tab.10) corrispondono ai seguenti intervalli di punteggi normalizzati:

Grado di Vulnerabilità	Intervallo di punteggio
Bassissima (Bb)	0-24
Bassa (B)	25-35
Media (M)	36-49
Alta (A)	50-69
Elevata (E)	70-79
Molto elevata (Ee)	80-100

Tabella 10. Punteggi e relativi gradi di vulnerabilità del metodo SINTACS (Civita M., De Maio M., 2000).

Il modello concettuale è sintetizzato nella Figura 23:

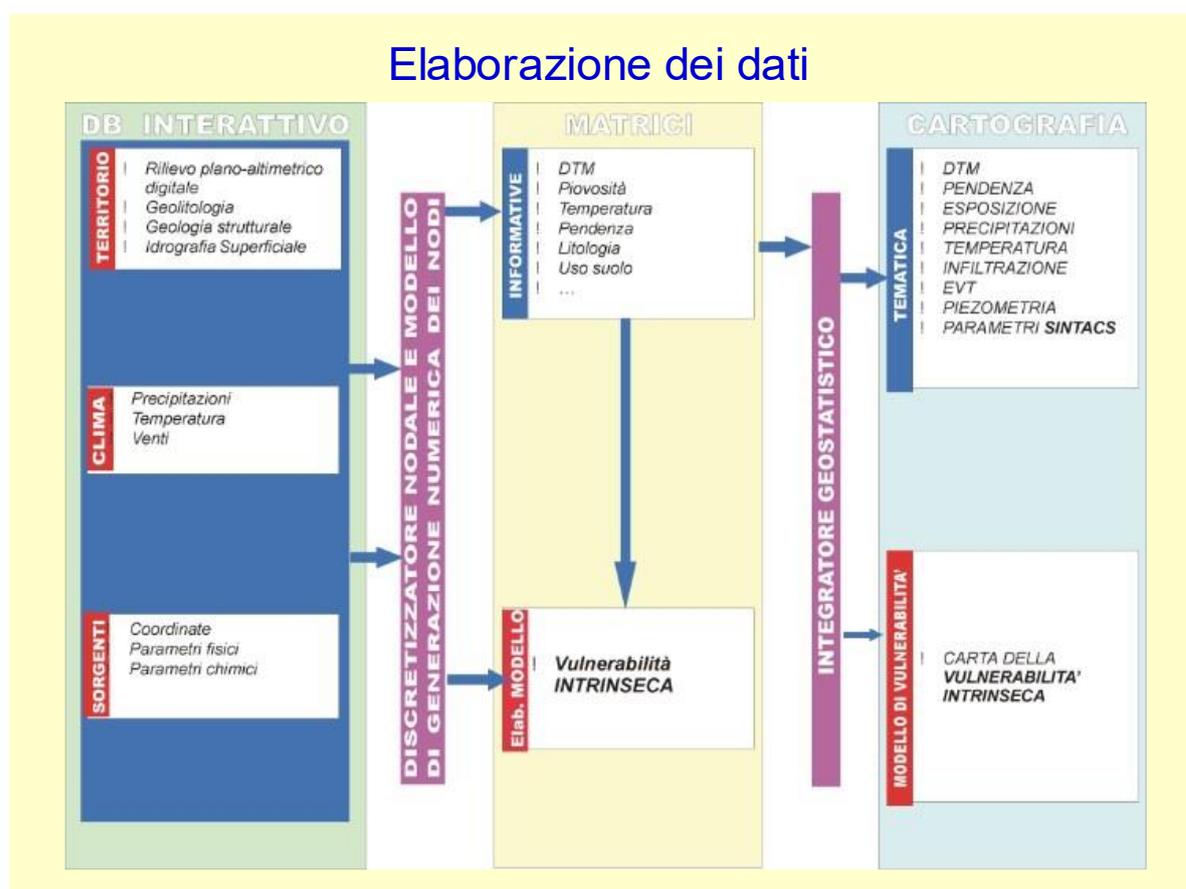


Figura 23. Flow chart dell'elaborazione dei dati finalizzata alla valutazione della Vulnerabilità Intrinseca attraverso il Metodo SINTACS.

4.3 Il metodo EPIK

In Svizzera, allo scopo di migliorare la conoscenza delle aree di protezione dall'inquinamento, gli organi federali preposti hanno deciso di effettuare uno studio per mappare la vulnerabilità intrinseca utilizzato, cosiddetto EPIK (Doerfliger N. et al., 1999), è l'acronimo dei quattro parametri utilizzati per la sua valutazione. È un metodo che prende in considerazione lo specifico comportamento idrogeologico degli acquiferi carsici, ed è basato su un particolare modello concettuale di sistema idrogeologico carsico.

In generale, gli acquiferi carsici (Fig. 28, 29, 30) sono considerati particolarmente vulnerabili all'inquinamento, a causa della loro particolare struttura, fortemente eterogenea. Essa può essere considerata come una rete di condotti ad alta permeabilità circondanti un gran volume di roccia a bassa permeabilità (dovuta essenzialmente alla porosità della roccia stessa). Questo significa che una grossa quantità di acqua di ricarica si infila direttamente nella rete di condotti, cosicché l'attenuazione dei contaminanti da parte del terreno è molto ridotta rispetto agli acquiferi porosi. La nascita del metodo EPIK è una diretta conseguenza del particolare ambiente carsico, in particolare dell'epicarso, e del suo determinante comportamento che favorisce i processi d'infiltrazione e di propagazione degli inquinanti; quest'ultimi, infatti, sono totalmente differenti da quelli in ambiente poroso, per i quali sono stati sviluppati numerosi metodi di valutazione della vulnerabilità all'inquinamento, necessitando appositi metodi di valutazione.

Il metodo EPIK è un metodo parametrico a punteggi e pesi (PCSM), sviluppato e finalizzato alla valutazione della vulnerabilità intrinseca degli *acquiferi carsici* all'inquinamento. Il metodo è basato su caratteristiche geologiche, geomorfologiche ed idrogeologiche tipiche degli acquiferi carsici. Nel metodo vengono considerati quattro parametri: Epikarst (E), Protective Cover (P), Infiltration Condition (I), Karst Network Development (K), che corrispondono a quattro caratteristiche che influenzano il flusso dell'acqua e le condizioni di trasporto attraverso il sistema carsico (Gattinoni P., 2015).

4.3.1 Acquifero carsico

La schematizzazione del sistema carsico (Fig.24) con un modello idrogeologico concettuale, permette di utilizzare i più significativi parametri di questo modello come parametri del metodo EPIK. Il modello concettuale di un acquifero carsico include una rete di condotti ad elevata conducibilità idraulica ($K > 10^{-1} m/s$), che occupa un piccolo volume (la rete carsica), connessa ad uno o più punti di fuoriuscita dell'acqua, che possono essere ad esempio delle sorgenti. La rete carsica è inglobata da un grosso volume di roccia fratturata e fessurata con basso valore di conducibilità idraulica ($10^{-7} < K < 10^{-3} m/s$). La sua rete carsica, da un lato ricarica lo stesso acquifero, convogliando le acque dalla superficie sino alla zona satura, e dall'altro drena l'acqua al di fuori della roccia che la circonda, attraverso i punti di fuoriuscita della stessa.

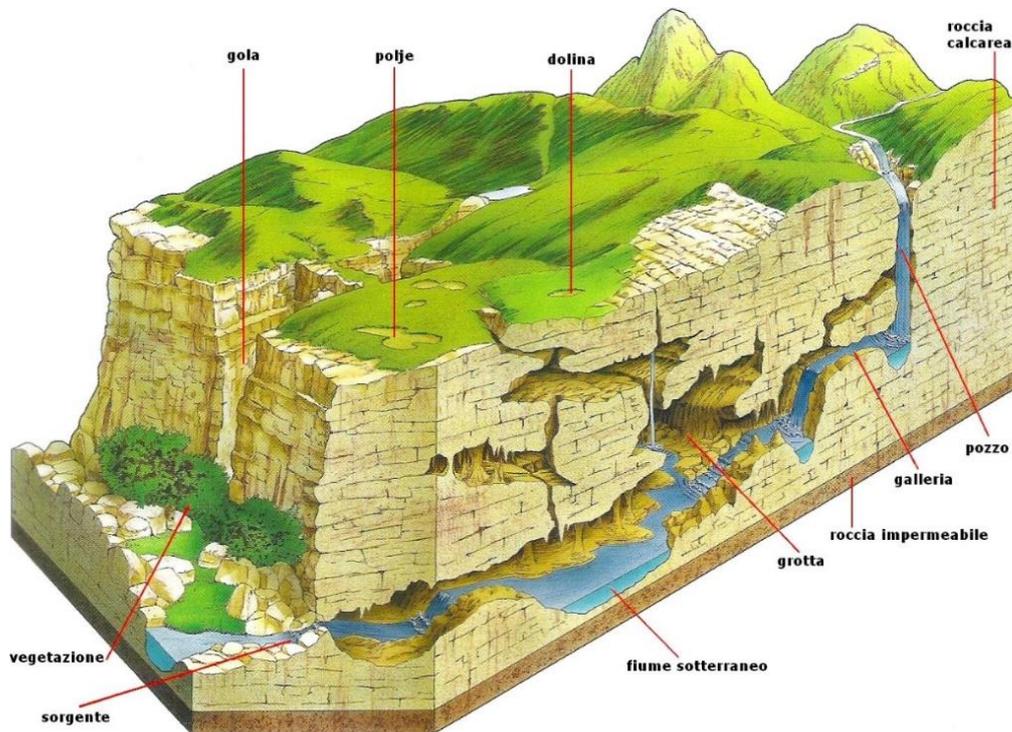


Figura 24. Schematizzazione di un acquifero carsico (Masiello F., 2020).

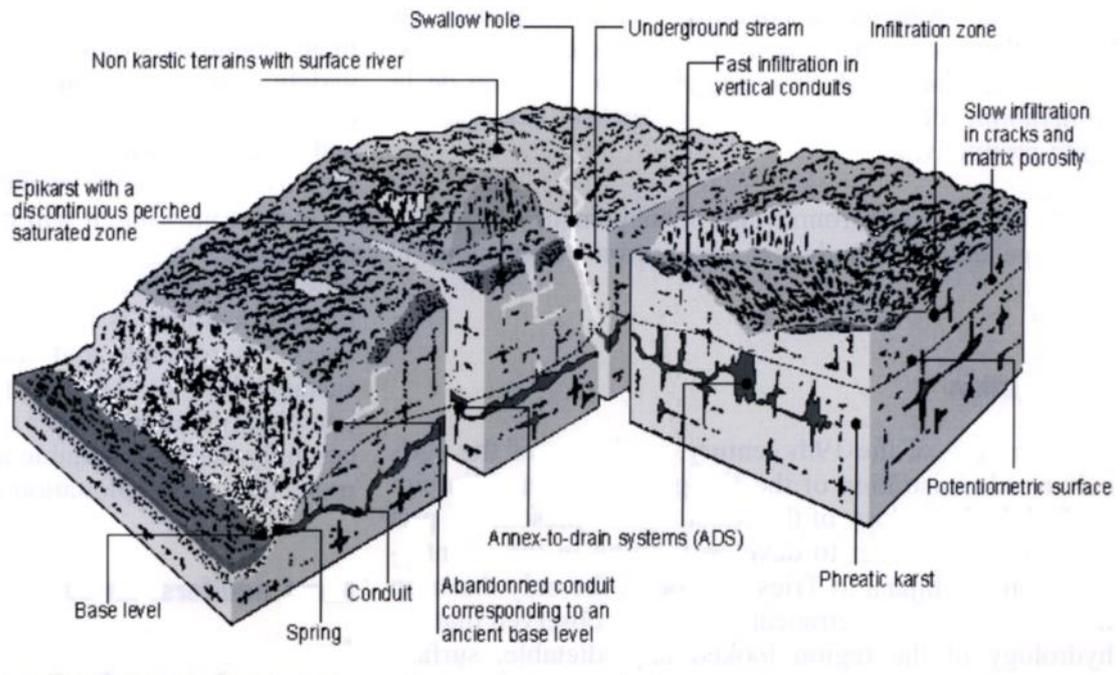


Figura 25. Modello del sistema carsico proposto da Mangin (Bakalowicz M., 2005).

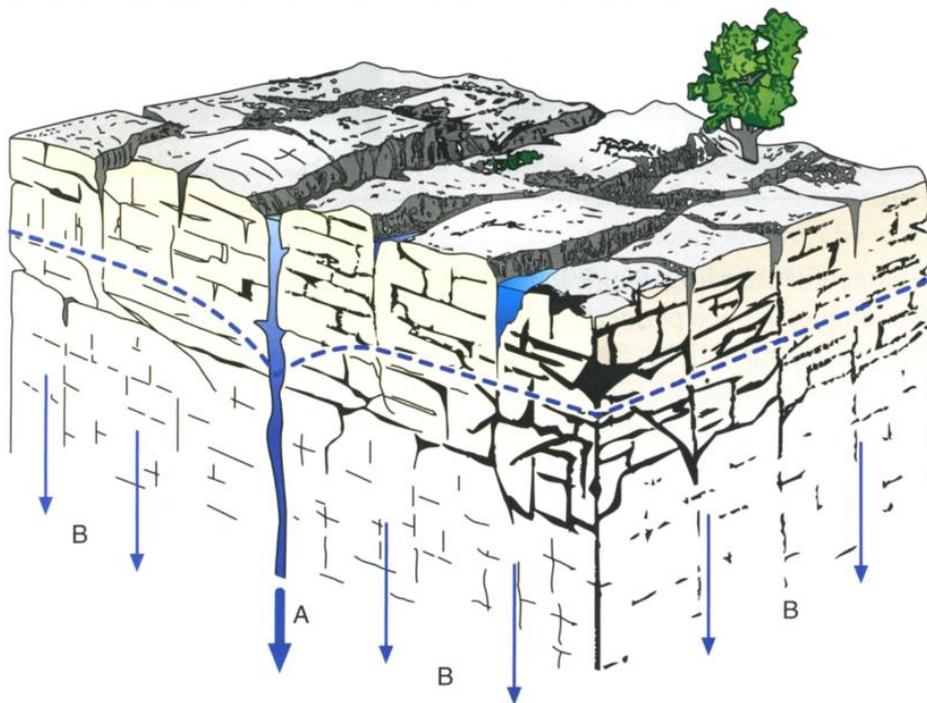


Figura 26. Schematizzazione di una zona saturata carsificata in superficie (Mangin, 1975).

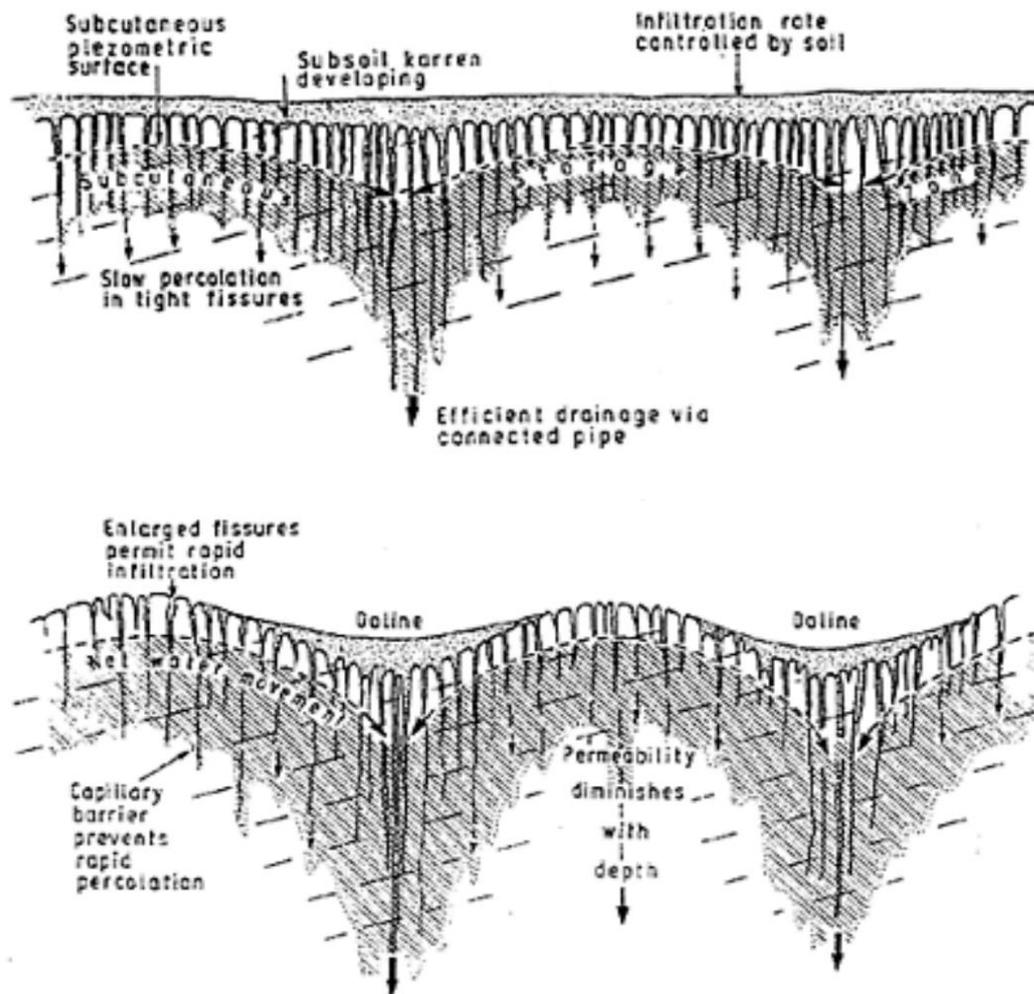


Figura 27. Doline da soluzione sviluppatesi nell'Epicarso (Ford D.C. & Williams P., 2007).

Poiché la ricarica d'acqua non è dovuta alla porzione di acquifero a bassa conducibilità idraulica (la roccia che circonda i condotti), ci possono essere alcuni punti d'infiltrazione concentrata, come ad esempio inghiottitoi o punti di assorbimento direttamente connessi alla rete carsica attraverso i quali si ha un'elevata ricarica dell'acquifero. Il resto della ricarica dell'acquifero arriva alla rete carsica attraverso l'Epicarso.

L'Epicarso, chiamato anche zona sottocutanea, è una zona che si trova immediatamente al di sotto del suolo, è altamente fessurata, e la sua formazione è dovuta alla dissoluzione delle rocce ed alla formazione di pressioni in prossimità della superficie del terreno. Mangin (1973, 1975) definì l'epicarso come "un temporaneo acquifero posato su una base che è essenzialmente una barriera capillare (caratterizzata da lenta percolazione in fessure strette, a causa della roccia sotto l'epicarso stesso che possiede bassa conducibilità idraulica), ma che

include anche condotti tra loro interconnessi che prevedono l'effettivo drenaggio dell'acqua sino alla zona satura" (Fig.25,26).

Il piano alla base dell'epicarso non è necessariamente continuo e la sua profondità può essere pari anche a dieci metri.

La vulnerabilità dell'acquifero carsico è funzione dei processi di trasferimento della massa da una parte all'altra dello stesso acquifero. Questi processi sono governati da parametri fisici quali diffusione molecolare, dispersione e capacità d'assorbimento e da parametri di flusso come il campo della velocità di flusso. Dall'analisi di questi parametri, si evince che la vulnerabilità dell'acquifero carsico dipende essenzialmente dal tempo di residenza (o dalla velocità di flusso) del sistema. In particolare, in base alla velocità del flusso, e quindi al tipo di flusso (condizioni di flusso di base o flusso di piena), si possono assumere le seguenti posizioni:

- 1) Durante il periodo di minimo livello idrico (flusso di base), il flusso dell'acqua dalla sorgente è dovuto principalmente all'acqua contenuta all'interno del volume di roccia a bassa permeabilità. Quest'acqua è stata all'interno dell'acquifero per molto tempo. La vulnerabilità dell'acqua che fluisce dalla sorgente durante questa fase del ciclo idrogeologico, è relativamente bassa.
- 2) Durante il periodo in cui il livello dell'acqua è alto (periodo di piena), le precipitazioni si infiltrano nei condotti dell'epicarso e quindi fluiscono attraverso la rete di condotti carsici. Quest'acqua raggiunge la sorgente molto rapidamente. I processi depurativi di filtrazione sono meno importanti che nel caso di basso livello idrico, ma compensati dalla diluizione degli inquinanti in una grande quantità d'acqua.

Si è detto che la vulnerabilità all'inquinamento dipende dal tempo di residenza, e questo è funzione della zona dell'acquifero in cui si trova l'acqua, pertanto si possono distinguere nell'acquifero stesso tre zone caratteristiche:

- L'endocarso, che è la parte più profonda dell'acquifero, caratterizzata dallo sviluppo della rete di condotti carsici, dove la velocità del flusso dell'acqua è alta, mentre la stessa è bassa all'interno del volume di roccia che circonda i condotti.

Maggiore sarà lo sviluppo della rete carsica, maggiore sarà la vulnerabilità dell'acquifero;

- L'epicarso, che si trova al di sopra dell'endocarso, è quella porzione di acquifero dove una parte dell'acqua è rilasciata lentamente, e questa è caratterizzata da bassa vulnerabilità all'inquinamento, ed il resto dell'acqua viene concentrata rapidamente nella rete di condotti dell'endocarso;
- La copertura protettiva, rappresentata dai sedimenti sovrapposti al calcare, dove il tempo di residenza dipende essenzialmente dalla permeabilità della copertura stessa e dal suo spessore.

La distinzione fra le parti dell'acquifero, acquista maggiore significato in caso di ricarica diffusa, e minore significato nel caso di ricarica concentrata (ad esempio inghiottitoi). In base alle caratteristiche fisiche ed idrauliche dell'acquifero carsico, vengono definiti quattro parametri utilizzati nel metodo di valutazione della vulnerabilità intrinseca all'inquinamento (Fig.25,26).

4.3.2 Epicarso (E)

Come già visto l'epicarso è localizzato al di sotto del suolo consolidato, se questo è presente. Se il suolo non è presente, l'epicarso assume caratteristiche morfologiche simili ai campi carreggiati (karren). Purtroppo, non esistono oggi strumenti di classificazione che permettano la mappatura dei differenti tipi di epicarso in funzione delle specifiche caratteristiche geomorfologiche ed idrogeologiche. L'epicarso, può essere fortemente eterogeneo ed è difficile realizzare studi di dettaglio delle differenti tipologie in cui si presenta. Per questo motivo l'epicarso è stato, nel nostro caso, caratterizzato indirettamente, basandosi su quelle caratteristiche geomorfologiche rilevabili dalla cartografia disponibile. L'attributo E è stato così suddiviso in tre classi di vulnerabilità (Tab.11):

Epicarso	Classe "Epikarst"	Morfologia Carsica
Altamente sviluppato	E1	Shaft, sinkholes o doline, polje, campi karren, sorgenti, grotte, inghiottitoi.

Moderatamente sviluppato	E2	Zone intermedie all'allineamento di doline, valli secche, codule.
Piccolo o Assente	E3	Assenza di fenomeni morfologici dell'ambiente carsico.

Tabella 11. Classi dell'attributo E (Epikarst) nel metodo EPIK (Doerfliger N. et al., 1999).

Come si vede dalla tabella precedente, per attribuire alle celle del territorio una delle tre classi E1-E3, bisogna rilevare le caratteristiche geomorfologiche. Questo può essere fatto con l'utilizzo di strumenti quali le carte topografiche (1:25000). In una prima fase, con le fotografie aeree, che permettono la precisa definizione degli elementi geomorfologici evidenziati dalle carte topografiche. Per esempio, dall'analisi delle fotografie aeree, può risultare che osservate intersezioni di lineamenti, corrispondano a zone altamente fratturate. Se a queste non sono associate tipiche caratteristiche carsiche, possono essere mappate in classe E2 invece che in classe E3, per una maggiore cautela (Gattinoni P., 2015).

4.3.3 Copertura Protettiva (P)

In questo attributo viene incluso sia il suolo che altri strati geologici di copertura, come depositi quaternari (depositi periglaciali, silt, loess, detriti di falda) ed altri orizzonti non carsici, come argilla ed arenarie. Il terreno non consolidato al di sopra dell'acquifero è comunemente considerato come uno dei più importanti attributi nella valutazione della vulnerabilità delle acque sotterranee. Questo perché il suolo e gli altri orizzonti geologici, hanno una grande capacità di attenuazione degli inquinanti, in funzione di parametri quali tessitura/struttura, spessore, contenuto di sostanze organiche e minerali d'argilla, grado di saturazione dell'acqua e conducibilità idraulica, in genere variabili da contaminante a contaminante. Lo spessore del suolo è fortemente legato al tempo di residenza, nel senso che più sottile è il suolo, più alta è la vulnerabilità. Come elementi base per la classificazione di questo attributo, vengono considerati lo spessore della copertura e la sua conducibilità idraulica. Vengono distinti due casi, in accordo o

meno alla presenza di orizzonti geologici al di sopra del calcare, ed alla loro conducibilità idraulica, utilizzando quattro intervalli di spessore del suolo (Tab.12):

Copertura del suolo	Classi "Protection Cover"	Caratterizzazione	
		Suolo direttamente giacente sul calcare o su strutture geologiche ad alta permeabilità, per esempio detriti di falda e depositi glaciali.	Suolo giacente su strutture geologiche a bassa permeabilità, per esempio argilla e silt.
Assente	P1	0-20 cm di suolo.	0-20 cm di suolo su strutture che hanno uno spessore minore di 1 m.
Intermedia P1-P3	P2	20-100 cm di suolo.	20-100 cm di suolo su strutture che hanno uno spessore minore di 1 m.
Intermedia P2-P4	P3	100-200 cm di suolo.	<100 cm di suolo o >100 cm di suolo e spessore della struttura geologica a bassa permeabilità >1 m.
Presente	P4	>200 cm di suolo	>100 cm di suolo e struttura detritica di bassissima conducibilità idraulica o spessore dello strato impermeabile >8 m.

Tabella 12. Classi dell'attributo P (Protection Cover) nel metodo EPIK (Doerfliger N. et al., 1999).

La valutazione di questo attributo richiederebbe verifiche di campo, con l'utilizzo di trivellazioni e pozzi per le analisi di campagna. Con l'utilizzo di carte geologiche, pedologiche e topografiche, e l'ausilio di studi regionali, si possono definire le aree di territorio coperte o meno dagli orizzonti geologici. Anche le fotografie aeree e le immagini

satellitari si possono utilizzare per determinare la presenza del suolo e lo spessore, se accompagnate da verifiche di campo. Avendo a disposizione una trivella, lo spessore del suolo si potrebbe misurare direttamente in campagna, ma i costi di perforazione sarebbero altissimi, tanto più quanto maggiore è il dettaglio che si cerca, perché bisognerebbe seguire una griglia di perforazione tanto più regolare quanto più cresce lo stesso dettaglio, cioè con i punti in cui si eseguono le perforazioni ravvicinati tra loro. Inoltre, maggiore è l'estensione del territorio d'interesse, maggiore sarà l'estensione della singola cella. In tal caso, lo spessore del suolo misurato in un punto della cella, deve essere rappresentativo dell'intera cella, ottenendo così un'approssimazione che cresce col crescere della dimensione del territorio e quindi delle celle nel quale esso è suddiviso (Gattinoni P., 2015).

4.3.4 Condizioni d'Infiltrazione (I)

Questo parametro riguarda il tipo di ricarica dell'acquifero carsico. La ricarica viene suddivisa in diffusa e concentrata, le due tipologie influiscono in maniera completamente differente sulla vulnerabilità di un acquifero carsico. Si possono identificare quattro classi per questo parametro d'infiltrazione, come riportato nella Tabella 13 seguente:

Condizioni di Infiltrazione	Classi "Infiltration Condition"	Caratterizzazione
Concentrata	I1	Correnti temporanee o perenni – correnti temporanee o perenni alimentanti inghiottitoi e doline – aree d'influenza (codule) di queste correnti appena menzionate, includenti sistemi di drenaggio superficiale.
Intermedia I1-I3	I2	Aree d'infiltrazione concentrata (senza sistemi di drenaggio artificiale) con pendenza >10% per campi coltivati, e >25% per prati e pascoli.
Intermedia I2-I4	I3	Aree d'infiltrazione concentrata (senza sistemi di drenaggio artificiale) con

		pendenza <10% per campi coltivati, e <25% per prati e pascoli.
Diffusa	I4	Il resto del territorio.

Tabella 13. Classi dell'attributo I (Infiltration Condition) nel metodo EPIK (Doerfliger N. et al., 1999).

Riconoscere i punti di ricarica concentrata è la parte più complicata della valutazione di questo parametro. Le aree a cui appartengono i punti di ricarica concentrata si assegnano alla classe I1 cui corrisponde il valore di protezione minore, cioè vulnerabilità maggiore, per poi diminuire il valore per ricarica che si avvicina sempre più a quella diffusa, o assente, come per la classe I4. A quest'ultima classe appartengono tutte quelle porzioni di territorio che non ricadono in nessuna delle classi I1, I2, I3, e nella tabella seguente (Tab.14) vengono indicate come "foresta". Le classi I2 ed I3 vengono valutate in funzione dell'uso del suolo e della pendenza del territorio. L'acqua di precipitazione tende a concentrarsi lungo delle direzioni preferenziali dando luogo a corsi d'acqua perenni o meno che danno al territorio stesso una maggiore vulnerabilità. Questi elementi rientrano così nella classe I1. L'acqua di precipitazione che non si concentra lungo delle direzioni preferenziali, costituisce la ricarica diffusa per l'acquifero carsico. Questa ricarica è tanto più importante quanto più le condizioni di infiltrazione sono favorevoli. Queste condizioni sono dettate dalla pendenza del territorio e dalla copertura vegetale, ovvero l'uso del suolo. La combinazione di queste due condizioni dà luogo ad un coefficiente di deflusso, come evidenziato dalla seguente Tabella 14:

Pendenza (%)	Foresta	Prato-Pascolo	Campi coltivati
0.5	-	0.005	0.12
1	0.01	0.020	0.13
2	0.02	0.040	0.14
4	0.04	0.070	0.23
6	0.05	0.090	0.27
8	0.06	0.110	0.31
10	0.07	0.130	0.34
15	0.08	0.170	0.40
20	0.10	0.190	0.45
25	0.12	0.220	0.50
30	0.13	0.250	0.55

35	0.14	0.270	0.59
40	0.15	0.290	0.62
45	0.16	0.310	0.65
50	0.17	0.330	0.69

Tabella 14. Coefficienti di deflusso in funzione dell'uso del suolo e della pendenza nel metodo EPIK (Doerfliger N. et al., 1999).

Come possiamo vedere, elevata pendenza e povera copertura vegetale comportano un valore elevato del coefficiente di deflusso, stabilito su basi empiriche, e quindi un'elevata vulnerabilità, perché queste condizioni generano un flusso più concentrato dell'acqua verso le aree di più basso rilievo dove l'acqua si infiltra con maggiore efficacia, che non nel caso di debole pendenza e consistente copertura vegetale. Quindi in questo metodo parametrico, contrariamente agli altri, la vulnerabilità aumenta all'aumentare della pendenza, assumendo che la superficie di deflusso è direttamente connessa a punti d'infiltrazione concentrata.

L'appartenenza dei coefficienti di deflusso alle classi IE ed I3 viene stabilito in maniera totalmente arbitraria, con un limite che stabilisce la separazione fra le suddette classi. Questo studio viene effettuato con carte topografiche e carte dell'uso del suolo (Gattinoni P., 2015).

4.3.5 Sviluppo del network Carsico (K)

Questo attributo rappresenta il grado di sviluppo della rete carsica del sistema acquifero. La rete può essere più o meno ben sviluppata ed i condotti interconnessi a seconda dell'acquifero carsico considerato. Ogni rete carsica può rientrare in una delle tra classi di appartenenza stabilite per il parametro K, come specificato nella Tabella 15:

Rete carsica	Classi "Karst Network Development"	Caratterizzazione
Rete carsica ben sviluppata	K1	Presenza di rete carsica ben sviluppata (rete con ampiezza dei canali dal decimetro al metro).
Rete carsica poco sviluppata	K2	Presenza di una rete carsica poveramente sviluppata (piccola rete

		di condotti o poveramente connessi o apertura dei condotti minore del decimetro).
Solo acquifero fratturato	K3	Presenza di sorgenti di emergenza attraverso terreni porosi.

Tabella 15. Classi dell'attributo K (Karst Network Development) nel metodo EPIK (Doerfliger N. et al., 1999).

Lo sviluppo della rete carsica gioca un ruolo molto importante nella valutazione della vulnerabilità, perché ne influenza notevolmente la velocità del flusso dell'acqua e quindi il tempo di residenza. La maggior parte delle situazioni carsiche, non è accompagnata da uno studio dettagliato dello sviluppo della rete carsica, sia per questioni economiche che per questioni logistiche, perché si tratterebbe di percorrere chilometri e chilometri di grotte di non facile, se non di impossibile, accesso. Per questi motivi si può utilizzare un solo valore del parametro K per l'intero territorio d'interesse. Inoltre caratteristiche come faglie o cavità che conducono a labirinti speleologici, non sempre possono essere rilevati in superficie. In questi casi possono essere utilizzati dei metodi indiretti di analisi. Tra i più utilizzati, uno di quelli che porta a soddisfacenti risultati, è sicuramente quello che prevede l'utilizzo di test con traccianti artificiali. Con questo metodo si studia direttamente la velocità del flusso dei traccianti immessi all'interno della rete carsica e trasportati dall'acqua. I valori delle velocità del flusso, ottenuti con questi metodi, possono così identificare e caratterizzare la rete carsica. La velocità di transito è calcolata considerando, come intervallo di tempo, quello che intercorre tra l'istante d'immissione del tracciante nella rete carsica, e l'istante in cui tale tracciante comincia a fuoriuscire dal punto di uscita stabilito della rete carsica. La velocità di transito dipende dalle condizioni idrodinamiche esistenti nel sottosuolo carsico, e dallo sviluppo stesso della rete carsica. Si può così affermare che se la velocità di transito è maggiore di 15 m/h in condizioni di basso regime di flusso d'acqua, o maggiore di 75 m/h in condizioni di flusso di piena, questo implica, se non altro, la presenza della rete carsica. Se invece le due condizioni non sono verificate, ovvero se nelle due condizioni del flusso dell'acqua sopra esposte, la

velocità della stessa è minore ai valori indicati, questo comunque non implica automaticamente la sua assenza (Gattinoni P., 2015).

4.3.6 Fattore di Protezione e Grado di vulnerabilità

Sino ad ora la valutazione degli attributi è stata solo di carattere qualitativo, ma per dare un significato a tale metodo, è necessario valutarli quantitativamente, ossia assegnare ad ogni classe un punteggio. Tale quantificazione è resa esplicita nella seguente tabella (Tab.16):

Attributo	Classe	Punteggio
Epikarst	E1	1
	E2	3
	E3	4
Protection Cover	P1	1
	P2	2
	P3	3
	P4	4
Infiltration Condition	I1	1
	I2	2
	I3	3
	I4	4
Karst Network Development	K1	1
	K2	2
	K3	3

Tabella 16. Punteggi delle classi degli attributi E, P, I, K. Minore è il valore numerico maggiore sarà la suscettibilità alla contaminazione (Doerfliger N. et al., 1999).

Infine, bisogna quantificare anche l'influenza che ogni parametro esercita ai fini della vulnerabilità finale, e nella tabella che segue sono riportati i valori di ogni coefficiente di peso per ogni attributo (Tab.17):

Attributo	Coefficiente	Peso
Epikarst	a	3
Protection Cover	b	1
Infiltration Condition	c	3
Karst Network Development	d	2

Tabella 17. Coefficienti moltiplicatori (pesi) relativi agli attributi E, P, I, K (Doerfliger N. et al., 1999).

Come già messo precedentemente in evidenza, analizzando attentamente il significato fisico che assumono gli attributi, si evince che per punteggi elevati si ha una vulnerabilità minore dell'acquifero carsico, mentre, al decrescere del punteggio, tale vulnerabilità aumenta. Così, invece di calcolare il valore dell'indice di vulnerabilità, è più conveniente calcolare il fattore di protezione F_p , più semplicemente trattabile analiticamente. Il fattore di protezione è calcolato per ogni cella della griglia, con la seguente formula:

$$F_{pi} = a * E_i + b * P_i + c * I_i + d * K_i$$

Con:

$i = 1, \dots, n$; dove n è il numero di celle della griglia;

E_i, P_i, I_i, K_i = punteggi assunti dagli attributi nella cella i -esima;

a, b, c, d = pesi relativi agli attributi;

F_{pi} = fattore di protezione relativo alla cella i -esima.

Il metodo EPIK, è un metodo multi-attributo a punteggi e pesi che può essere classificato tra i metodi di valutazione per sistemi parametrici. Il territorio in studio viene suddiviso in un numero n di celle di lato 10 m ; per ogni cella viene assegnato un punteggio per ogni parametro, in funzione del valore o significato fisico che lo stesso parametro assume nella stessa cella. Quindi, ad ogni parametro, viene assegnato un peso moltiplicatore che riflette la maggiore o minore importanza che l'attributo assume nel metodo di valutazione della vulnerabilità.

Per ogni cella e per ognuno dei quattro attributi, si effettua il prodotto tra il punteggio ed il suo peso, e la sommatoria dei quattro prodotti ci dà il punteggio finale che rappresenta l'indice di vulnerabilità. Maggiore sarà il punteggio dell'indice maggiore sarà da considerarsi la protezione dell'area, e minore la vulnerabilità, perché agli attributi viene assegnato un valore decrescente all'aumentare della vulnerabilità dell'acquifero. L'intervallo di valori che può assumere l'indice viene suddiviso in un numero finito di classi (generalmente quattro), a decrescente grado di vulnerabilità (quindi a crescente grado di protezione), come mostrato nella Tabella 18 seguente:

Classe	Vulnerabilità
1	Molto Elevata

2	Elevata
3	Media
4	Bassa

Tabella 18. Classi di vulnerabilità del metodo EPIK (Doerfliger N. et al., 1999).

Il punteggio finale dell'indice cadrà all'interno di una di queste quattro classi di vulnerabilità. In sintesi:

- 1) Le mappe risultanti per i quattro attributi E, P, I, K sono digitalizzate ed integrate in un GIS. L'attributo K può essere valutato globalmente per l'intero bacino (un solo punteggio per tutto il territorio in analisi), ma può essere anche valutato in accordo col contesto tettonico e geologico, o con le conoscenze speleologiche. Il GIS può calcolare il valore di vulnerabilità per ognuna delle "n" celle nelle quali è stato suddiviso il territorio;
- 2) Sulla base delle mappe ottenute, che mostrano la distribuzione spaziale della vulnerabilità, possiamo definire le differenti zone di protezione;

Riepilogando, F_p restituisce il fattore di protezione di ogni cella della griglia dell'acquifero carsico; un basso valore di tale indice, corrispondendo a bassa protezione, sta a significare una elevata vulnerabilità dello stesso acquifero, mentre un elevato valore dell'indice significa un basso grado di vulnerabilità. Il fattore di protezione può assumere un valore compreso nell'intervallo [9-34]. Questo intervallo di valori viene suddiviso in un numero di classi pari a tre, e ad ogni classe viene assegnata una definizione qualitativa di vulnerabilità, come evidenziato in tabella (Tab.19):

Classe di Vulnerabilità	Intervallo di Vulnerabilità	Aree di Protezione
Molto Elevata	$9 < F_p < 19$	S1
Elevata	$20 < F_p < 25$	S2
Media	$F_p > 25$	S3
Bassa	Presenza di P4	Il resto del territorio

Tabella 19. Fattore di protezione – Vulnerabilità Intrinseca (Doerfliger N. et al., 1999).

La valutazione del fattore di protezione ha delle implicazioni importanti. Ad esempio, in accordo con la definizione degli attributi e delle loro classi, una dolina, un'area carsica non coperta da vegetazione, una zona d'infiltrazione concentrata, una rete carsica

ben sviluppata, costituiscono il caso peggiore di vulnerabilità. Ancora, dalle tabelle dei pesi e punteggi, si evince che i parametri E ed I possono giocare un importante ruolo di protezione nei confronti dell'acquifero carsico, a causa dell'elevato valore del peso degli stessi attributi. Poiché il ruolo che assume l'attributo P nella protezione dell'acquifero, considerandolo solo in funzione del suo spessore, è sovrastimato, ad esso è attribuito uno scarso peso (il più basso). Anche l'attributo K gioca un ruolo poco importante nella protezione dell'acquifero, e quindi anche il suo peso è minore di quelli degli attributi E ed I. È importante ribadire come la scelta dei punteggi e dei pesi assegnati agli attributi sia caratterizzata da una totale soggettività (Gattinoni P., 2015).

4.4 Il metodo GOD

Il metodo GOD (Fig.28) è l'acronimo di Groundwater confinement, Overlaying strata, Depth to groundwater table (Foster 1987, Foster & Hirata 1988, Foster et al. 2002). È un sistema empirico per la rapida valutazione della vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi. Tale metodo valuta la vulnerabilità intrinseca di un acquifero come il prodotto di tre fattori (Bove A. et alii; 2005).

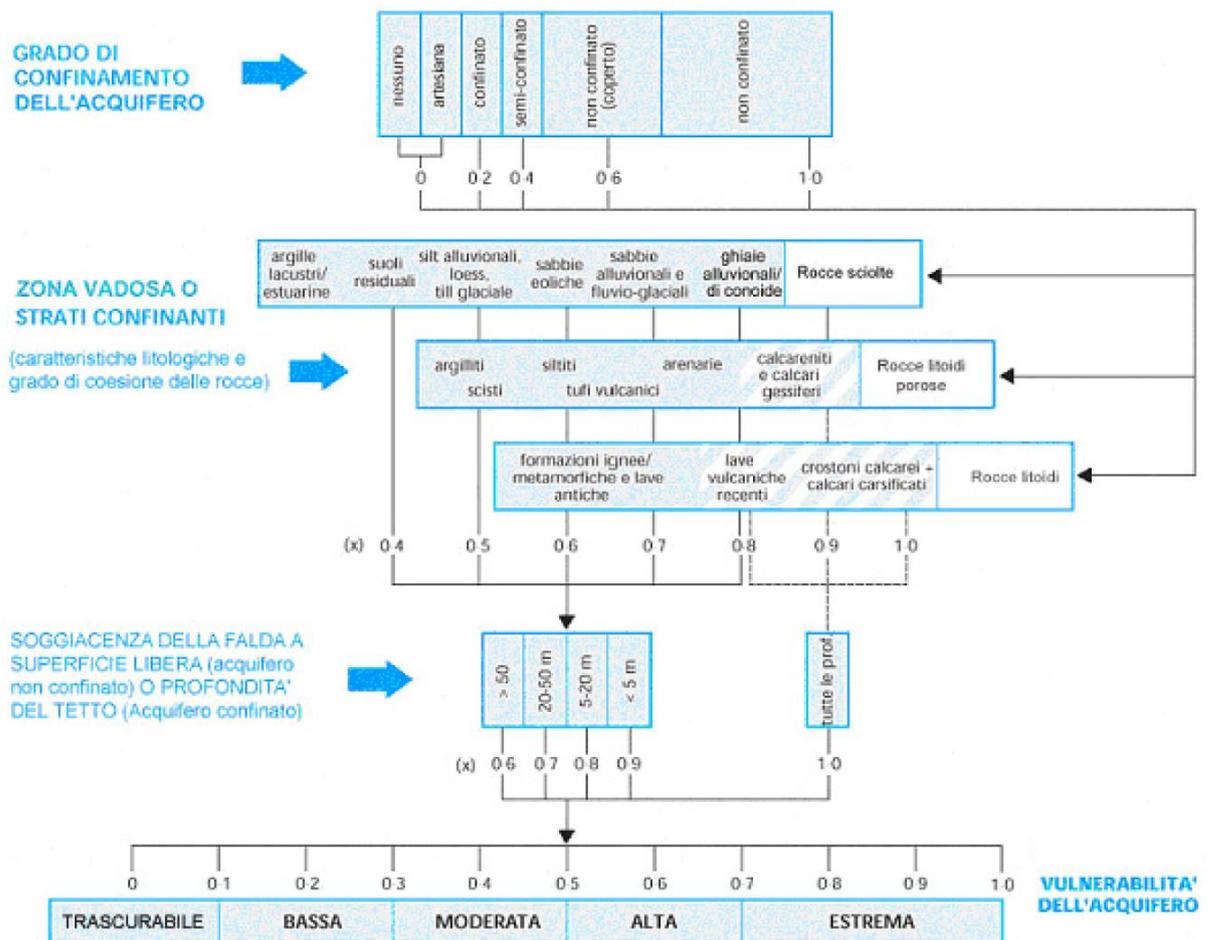


Figura 28. Schema metodo empirico GOD (Foster et al. 2002).

4.4.1 Il fattore G

Rappresenta il grado di confinamento dell'acquifero. È possibile scegliere tra sei classi alle quali vengono attribuiti punteggi tra 0 ed 1 (acquifero non confinato). L'acquifero è considerato coperto quando lo spessore del materiale fine nella zona non satura risulta maggiore o uguale a 3 metri. Nel caso in cui la soggiacenza della falda sia inferiore a 3 metri, l'acquifero è considerato sempre non confinato, per qualsiasi spessore del materiale fine (Bove A. et alii; 2005).

Nella seguente Tabella 20 sono riportati i valori relativi al fattore G:

Tipologia confinamento	Valore di "G"
Nessuno	0
Artesiano	0
Confinato	0.2
Semi-confinato	0.4
Non-confinato (coperto)	0.6

Non-confinato	1.0
---------------	-----

Tabella 20. Valori del parametro “G” in relazione alla tipologia di confinamento (Foster et al. 2002).

4.4.2 Il fattore O

Esprime le caratteristiche litologiche e grado di coesione delle rocce della zona non satura (per gli acquiferi non confinati) e dei livelli confinati a tetto (per gli acquiferi confinati). Possono essere assegnati punteggi variabili tra 0.4 ed 1. Vengono presi in considerazione i valori relativi alle rocce sciolte ottenute da campionamenti (Bove A. et alii; 2005). A ciascuno dei punti terra considerati è stato attribuito un valore stimato sulla base della seguente relazione:

$$O = \sum V * S/S_{ZNS}$$

Dove:

- V= valore del parametro O relativo ad ogni livello costituente la stratigrafia della zona non satura, sulla base dei valori previsti dal metodo GOD per le differenti litologie;
- S= spessore del singolo livello;
- S_{ZNS} = spessore della zona non satura.

Di seguito (Tab.21) sono riportati i valori del parametro **O** per le diverse litologie:

Rocce	Litologia	Valore di “O”
Sciolte	Argille lacustri/estuarine	0.4
	Suoli residuali	0.4
	Silt alluvionali	0.5
	Sabbie eoliche	0.6
	Sabbie alluvionali	0.7
	Ghiaie alluvionali/conoide	0.8
Litoidi porose	Argilliti, Scisti	0.5
	Siltiti	0.6
	Arenarie	0.7-0.8
	Calcareniti	0.8-0.9
Litoidi	Formazioni ignee	0.6-0.7
	Formazioni metamorfiche	0.6-0.7
	Lave vulcaniche recenti	0.8

	Calcari carsificati	0.9-1.0
--	---------------------	---------

Tabella 21. Valori del parametro "O" per le diverse litologie presenti nella zona non satura (Foster et al., 2002).

4.4.3 Il fattore D

Rappresenta la soggiacenza della falda a superficie libera nel caso di acquifero non confinato o tetto dell'acquifero per gli acquiferi confinati. Possono essere assegnati punteggi compresi tra 0.6 ed 1 (Bove A. et alii; 2005).

I valori utilizzati per questo parametro sono espressi in Tabella 22:

Intervallo di Soggiacenza (m)	Valore di "D"
>50	0.6
20-50	0.7
5-20	0.8
<5	0.9
Altre profondità	1.0

Tabella 22. Valori del parametro "D" per intervalli di soggiacenza (Foster et al. 2002).

4.4.4 L'indice GOD

Questo metodo è basato sull'identificazione di:

- Insorgenza di acqua sotterranea;
- Classe complessiva degli acquiferi in termini di grado di consolidazione e caratteristiche litologiche;
- Profondità della tavola d'acqua o direzione.

Ogni step permette di classificare su una scala fino all'unità e l'indice di vulnerabilità è il prodotto dei valori assegnati ai tre parametri:

$$\text{Indice GOD} = G * O * D$$

Ai parametri possono essere assegnati valori da 0 ad 1 e corrisponde a sei gradi di vulnerabilità. Il risultato può essere uguale al valore di un parametro solo nel particolare caso in cui gli altri due parametri abbiano un valore pari ad 1. Il GOD è influenzato maggiormente dall'insorgenza di acqua sotterranea e dalla profondità della tavola d'acqua (Bove A. et alii; 2005).

Nella seguente Tabella 23 sono riportati i valori dell'indice GOD:

Classe	Indice GOD
Estrema	0.7-1
Alta	0.5-0.7
Moderata	0.3-0.5
Bassa	0.1-0.3
Trascurabile	0-0.1

Tabella 23. Classi di vulnerabilità secondo il metodo GOD (Foster et al. 2002).

4.5 APPROCCIO COMBINATO

In aree molto vaste, i modelli parametrici evoluti non sono applicabili per insufficienza di dati nelle zone in cui si passa da una morfologia pianeggiante a zone collinari e montuose. In queste ultime situazioni si è scelto spesso il Metodo base che fornisce una valutazione meno raffinata e dettagliata ma, comunque, applicabile con buoni risultati. Di recente, però, si è riconsiderato il problema dal punto di vista metodologico dal momento che non si vuole rinunciare al dettaglio offerto dai modelli parametrici a punteggi e pesi nelle aree a moderato rilievo. In aree con una morfologia mista, si pone, come s'è visto, la necessità di eseguire le valutazioni di vulnerabilità e di rischio d'inquinamento anche per aree a forte soggiacenza, le quali sono descrivibili solo con una metodologia basata sui complessi e situazioni idrogeologiche.

La soluzione trovata e testata è l'approccio combinato che consiste nel combinare, appunto, il Metodo base GNDCI-CNR con il PCSM SINTACS senza soluzione di continuità. Il secondo viene utilizzato nelle aree dove sono presenti i dati necessari e sufficienti all'applicazione del modello parametrico; il primo, invece, viene utilizzato nelle zone dove le forti soggiacenze, la complessità idrolitologica ed idrostrutturale e la mancanza di dati certi su alcune tipologie di suoli, conducibilità idraulica e ricarica attiva non permettono un dettaglio paragonabile a quello che si ottiene utilizzando il SINTACS.

Il collegamento necessario, sia concettuale, sia cartografico, tra zone adiacenti dove si devono applicare metodologie diverse, è fornito dalle valutazioni parametriche. Per quei complessi dove sussiste già una valutazione parametrica, si applicano gli stessi gradi di vulnerabilità, tenuto conto, però, delle mutate condizioni d'acclività e di soggiacenza. Tutto ciò è reso possibile dal fatto che la calibrazione del SINTACS è stata eseguita confrontando, come si è detto, la

valutazione SINTACS con quella effettuata con il Metodo base GNDI-CNR. L'esplicazione dell'indice numerico in 6 gradi di vulnerabilità, gli stessi del Metodo base, rende confrontabili i due metodi e combinabili perfettamente i risultati (Civita M., 2005).

4.6 Bilancio Idrogeologico

Quantificare la ricarica attiva degli acquiferi rappresenta un fattore di grande valenza in molti problemi dell'Idrogeologia Applicata ed in particolare nella pianificazione del corretto utilizzo delle risorse idriche sotterranee e globale. Nel campo idrogeologico-ambientale diviene un fattore imprescindibile per la valutazione preventiva (analisi del rischio d'inquinamento) e nella progettazione della bonifica di condizioni inquinate. La quantificazione diretta della ricarica attiva di un acquifero non può essere esente dalla complessità e dalla grande massa di dati necessari per la redazione di un bilancio idrogeologico globale (Lerner et al., 1990), che tenga conto non solo degli afflussi ed efflussi naturali, ma anche dell'interscambio con i corpi idrici superficiali e sotterranei, delle ricariche artificiali e dei relativi prelievi.

Per molte problematiche idrogeologico-ambientali, può essere sufficiente una valutazione accurata delle quantità in gioco, in particolare laddove il modello idrogeologico concettuale non sia sufficientemente noto ed il processo di ricarica-discarda degli acquiferi non sia intricato da azioni e reazioni di sinergia. La tecnica di valutazione inversa (Lerner et al., 1990) permette di stimare le risorse idriche medie annue di una determinata struttura idrogeologica, sufficiente a quantificare l'importanza della stessa. La metodologia di valutazione utilizzata, si basa sulla tecnica del bilancio idrogeologico inverso proposta da Civita (2005). Con questa tecnica, implementata attraverso un modello numerico ottenuto in ambiente QGIS, è stato possibile stimare la ricarica attiva media annua dell'acquifero partendo dalla piovosità efficace e dalle condizioni idrogeologiche, le quali vengono inglobate nell'indice d'infiltrazione, che viene determinato in base alle caratteristiche litologiche superficiali. I risultati confrontati con i dati di uscita del sistema idrogeologico aiutano, oltre che a quantificare la ricarica, a definire la tipologia di sistema idrogeologico (idrogeologicamente chiuso o aperto). Inoltre la modellizzazione di questo processo renderà possibile reiterare ed aggiornare, in futuro, il bilancio idrogeologico sia in relazione al miglioramento dei dati termo-pluviometrici che in relazione a nuove e più precise misure di portata delle sorgenti.

4.6.1 Implementazione GIS

I modelli numerici di bilancio idrogeologico dei principali acquiferi individuati e studiati nell'area di studio, sono stati elaborati in ambiente GIS utilizzando il software QGIS 2.18.28. L'approccio di geoprocessing del software GIS utilizzato consiste in un insieme di strumenti operativi per l'analisi geografica e l'elaborazione dell'informazione; in particolare le funzioni di geoprocessing, a partire da dataset geografici esistenti precedentemente inseriti, consentono di applicare ad essi delle funzioni analitiche, le quali permettono di ottenere nuovi dataset intermedi funzionali al calcolo finale. Automatizzando il flusso di lavoro (Fig.29) del processo sarà possibile, nel corso del tempo, aggiornare la stima della valutazione delle risorse idriche sotterranee e, attraverso l'acquisizione ed implementazione di dati aggiornati, permetterà di migliorarne i risultati. Il modello numerico aggiornato può consentire la pianificazione della risorsa idrica annua ed un suo utilizzo razionale nel tempo oppure una valutazione di possibili scenari futuri.

Al fine di valutare la ricarica attiva dell'acquifero, come detto in precedenza, sono state effettuate una serie di step:

1. Reperimento dei dati termo-pluviometrici dell'area (da letteratura);
2. Ricostruzione delle equazioni caratteristiche piovosità-quota e temperatura corretta-quota (da letteratura);
3. Attribuzione dei coefficienti d'infiltrazione potenziale (C.I.P.) ad ogni litologia e relativa elaborazione della carta dei coefficienti d'infiltrazione potenziali dei complessi idrogeologici che costituiscono l'area in studio;
4. Acquisizione del DTM (Digital Terrain Model) dell'area in cui ricade l'acquifero;
5. Elaborazione della Carta della Piovosità Specifica;
6. Elaborazione della Carta della Temperatura Corretta;
7. Elaborazione della Carta del Potere Evaporante dell'Atmosfera;
8. Elaborazione della Carta dell'Evapotraspirazione Reale;
9. Elaborazione della Ricarica Media Annuale;
10. Elaborazione della Carta della Piovosità Efficace Specifica;
11. Elaborazione della Carta del Ruscamento Superficiale Medio Annuo.

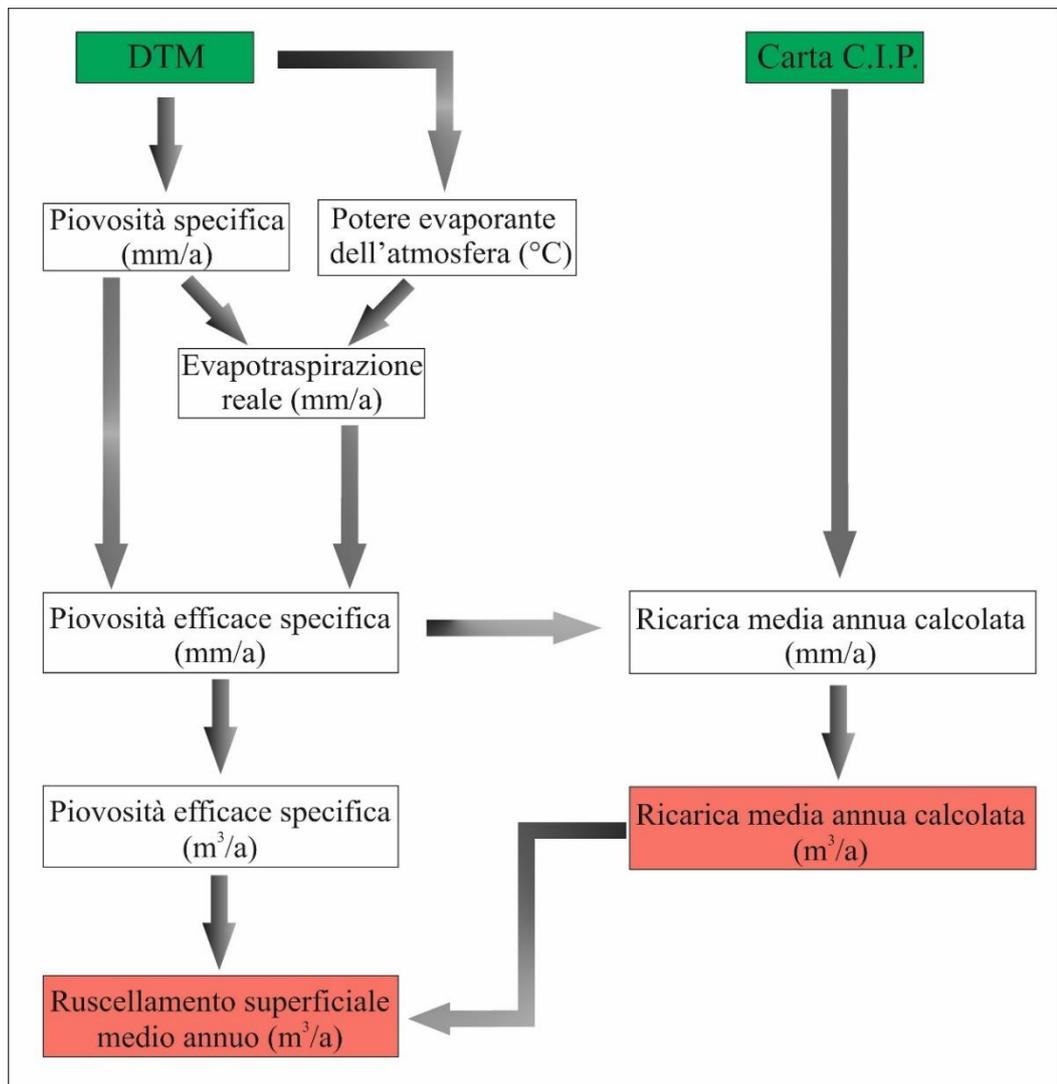


Figura 29. Workflow per il calcolo del bilancio idrogeologico.

CAPITOLO 5

CALCOLO DEL BILANCIO IDROGEOLOGICO DI ALCUNI DEGLI ACQUIFERI

La valutazione delle risorse idriche sotterranee (bilancio idrogeologico) ha come obiettivo primario la quantificazione della ricarica media annuale che perviene all'acquifero o alla struttura idrogeologica individuata o ancora ad un bacino idrografico. Secondariamente si ottengono conferme o smentite sulla individuazione spaziale della struttura ed indicazioni su eventuali interscambi sotterranei con bacini sotterranei contigui (Fig.30). La ricarica attiva media annua di un determinato intorno territoriale si calcola partendo dalla piovosità efficace e dalle condizioni idrogeologiche che vengono conglobate nell'indice d'infiltrazione, determinato in base alle caratteristiche litologiche superficiali (se le rocce sono affioranti o sotto scarsa copertura di suolo) e/o alle caratteristiche idrauliche del suolo. I risultati vengono paragonati ai dati d'uscita del sistema idrogeologico noto, anche se sommari, o sono utilizzati per fornire una stima del potenziale di risorse idriche medie di aree prive di dati. Inoltre la modellizzazione numerica (Fig.34) di questo processo ci rende possibile reiterare e aggiornare in futuro il bilancio idrogeologico sia in relazione al miglioramento dei dati termo-pluviometrici che in relazione a nuove e più precise misure di portata delle sorgenti (confronto input-output dell'idrostruttura). I dati in Input, hanno permesso in tempo reale di calcolare il bilancio idrogeologico dell'acquifero. In questo lavoro il bilancio inverso è stato implementato in un modello numerico costruito appositamente per le aree relative ai cinque acquiferi considerati nel lavoro di tesi.

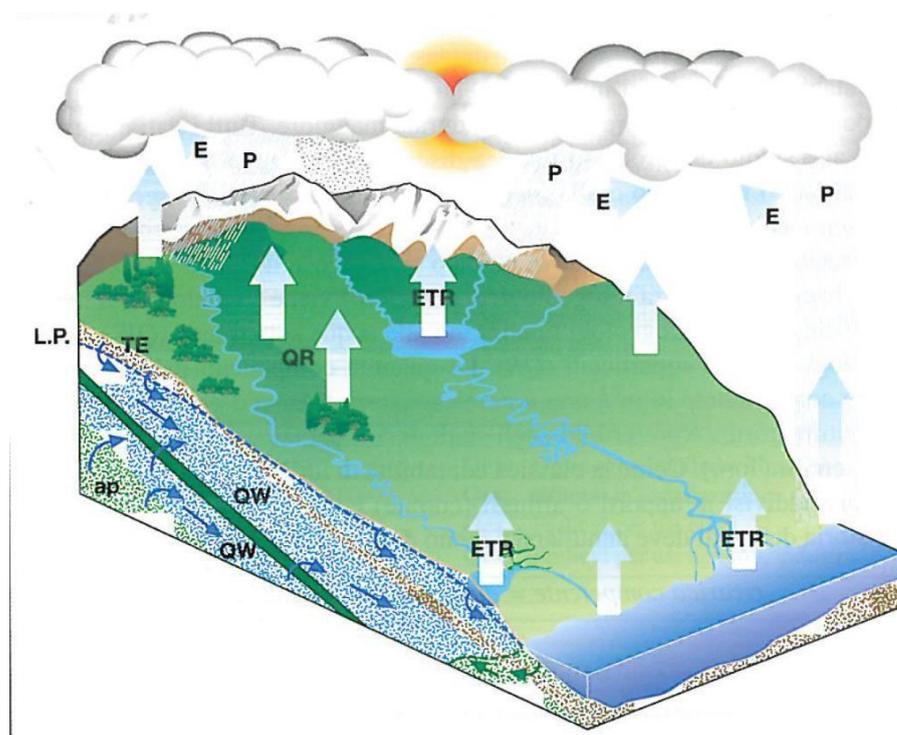


Figura 30. Schematizzazione del ciclo idrogeologico con i termini del Bilancio Idrogeologico (Civita, 2005).

Il calcolo del bilancio idrogeologico, collegato al ciclo idrogeologico (Fig.30) può essere sintetizzato attraverso la seguente relazione:

$$P = ET_R + R + I$$

Dove:

P = Esprime le precipitazioni, ovvero i volumi d'acqua meteorica che una determinata area riceve nel tempo;

ET_R = Rappresenta l'evapotraspirazione reale, ovvero il volume effettivo d'acqua che evapora nel tempo dagli specchi d'acqua liberi ma anche dall'acqua di precipitazione intercettata dagli apparati fogliacei delle piante, la quale evapora senza giungere al suolo;

R = Esprime il ruscellamento superficiale, ovvero l'aliquota delle acque di precipitazione che "scorre" sulla superficie del suolo;

I = Rappresenta l'infiltrazione, ovvero l'aliquota delle acque di precipitazione che penetra all'interno del suolo e delle rocce fino a raggiungere la zona satura del sistema acquifero.

I dati necessari al calcolo sono quelli climatici di un arco temporale sufficientemente ampio: decennale-trentennale per una valutazione

media pluriennale, oppure annuale. Inoltre sarebbe opportuno avere i dati di uscita del sistema (portate medie delle sorgenti pluriennali o almeno annuali) in sincronia con i dati d'ingresso (piogge e temperature)

Nella Figura 31 è rappresentata l'ubicazione delle stazioni meteorologiche utilizzate. Sono stati acquisiti dati di temperatura dell'aria e di precipitazione (fonte: servizio idrografico della Protezione Civile della Basilicata).

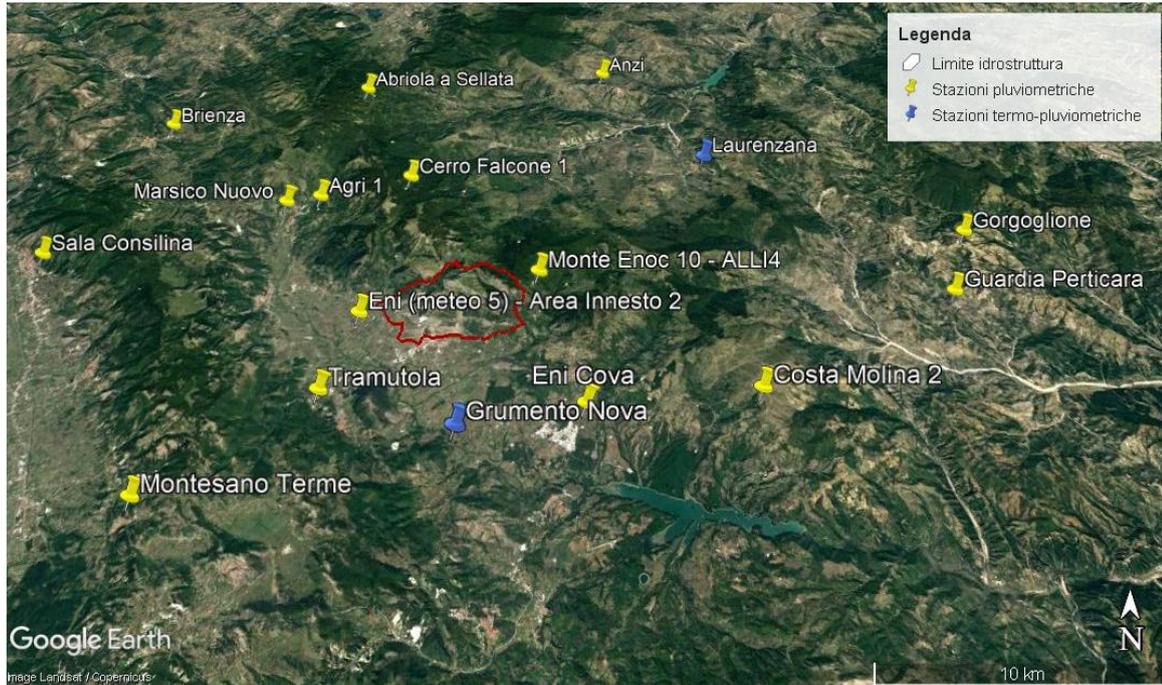


Figura 31. Localizzazione delle stazioni termo-pluviometriche utilizzate per il calcolo del bilancio idrogeologico.

La raccolta dei dati pluviometrici, ed in parte nivometrici, delle stazioni interne e confinanti all'Alta Val d'Agri (Tab.24), è stato possibile valutare la quantità di precipitazioni giornaliere e mensili E LE MEDIE ANNUALI. L'arco temporale preso in considerazione va dal 2008 al 2020. Il dato delle piogge è influenzato fortemente dall'esposizione e dalla quota in cui si trovano le stazioni di misura.

Stazione	Quota (metri)	Fonte
Brienza	801	Protezione Civile Basilicata
Grumento Nova	554	Protezione Civile Basilicata
Marsico Nuovo	765	Protezione Civile Basilicata
Tramutola	654	Protezione Civile Basilicata

Abriola	1475	Protezione Civile Basilicata
Guardia Perticara	792	Protezione Civile Basilicata
Montesano Terme	973	Protezione Civile Basilicata
Sala Consilina	640	Protezione Civile Basilicata

Tabella 24. Elenco stazioni pluviometriche.

I dati acquisiti hanno consentito di calcolare le precipitazioni medie mensili ed annuali nei 13 anni considerati necessarie ad implementare il modello di calcolo del bilancio idrogeologico inverso (Civita M., 2005). Il calcolo è stato eseguito per ogni singola stazione pluviometrica. I dati di pioggia opportunamente elaborati hanno permesso di ottenere la retta rappresentativa quota-precipitazioni che permette di delineare la tendenza della variazione delle piogge con le quote; tale retta rappresentativa e la sua relativa equazione (Fig.32) rappresentano uno dei dati necessari DI INPUT all'implementazione del modello digitale di valutazione delle risorse idriche sotterranee.

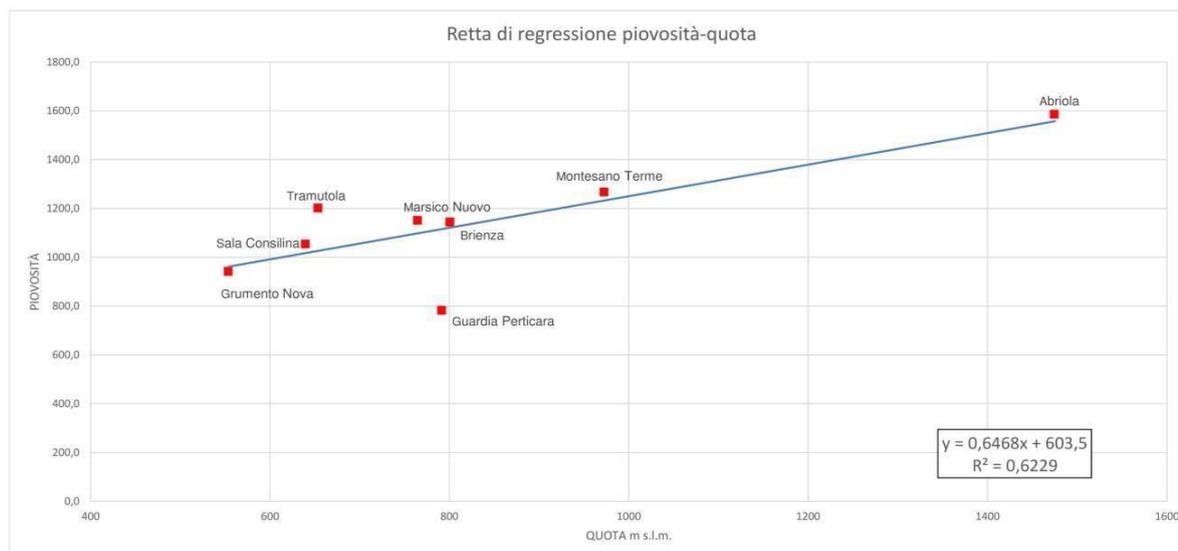


Figura 32. Retta rappresentativa dell'andamento quota-precipitazioni nell'area dell'Alta Val d'Agri per il periodo 2008-2020.

Le caratteristiche delle temperature in un'area sono fortemente influenzate principalmente dalla quota e risentono, in misura minore, delle precipitazioni e dell'umidità dell'area; non risentono dell'esposizione del versante. Le precipitazioni e l'altimetria sono dei fattori che uniti insieme vengono utilizzati per la determinazione della temperatura media corretta, il quale è un parametro necessario per il calcolo dell'evapotraspirazione

Reale con la formula di Turca (Civita M., 2005). La temperatura media corretta (T_C) è la temperatura media calcolata in funzione della piovosità media mensile, attraverso la seguente formula:

$$T_C = \frac{\sum P_i * T_i}{\sum P_i}$$

Dove:

P_i , è la piovosità mensile (mm)

T_i , è la temperatura media mensile (°C)

I dati di temperatura delle stazioni in cui risulta presente il termometro sono stati interamente riportati nella Tabella 25, compreso il valore della temperatura media corretta (T_C).

Stazione	Quota	Fonte
Brienza	801	Protezione Civile Basilicata
Marsico Nuovo	765	Protezione Civile Basilicata
Tramutola	654	Protezione Civile Basilicata
Abriola	1475	Protezione Civile Basilicata
Guardia Perticara	792	Protezione Civile Basilicata
Montesano Terme	973	Protezione Civile Basilicata
Sala Consilina	640	Protezione Civile Basilicata

Tabella 25. Elenco delle stazioni termometriche.

Con la medesima metodologia utilizzata per le piogge sono state ricavate le rette rappresentative della tendenza temperatura-quote (Fig.33).

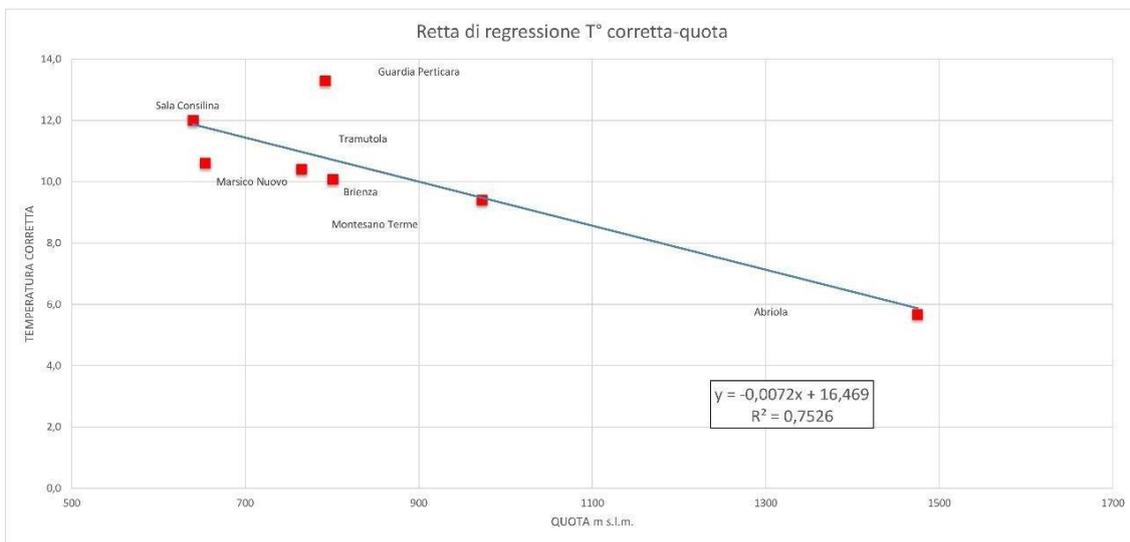


Figura 33. Retta rappresentativa dell'andamento quota-temperatura nell'area dell'Alta Val d'Agri per il periodo 2008-2020.

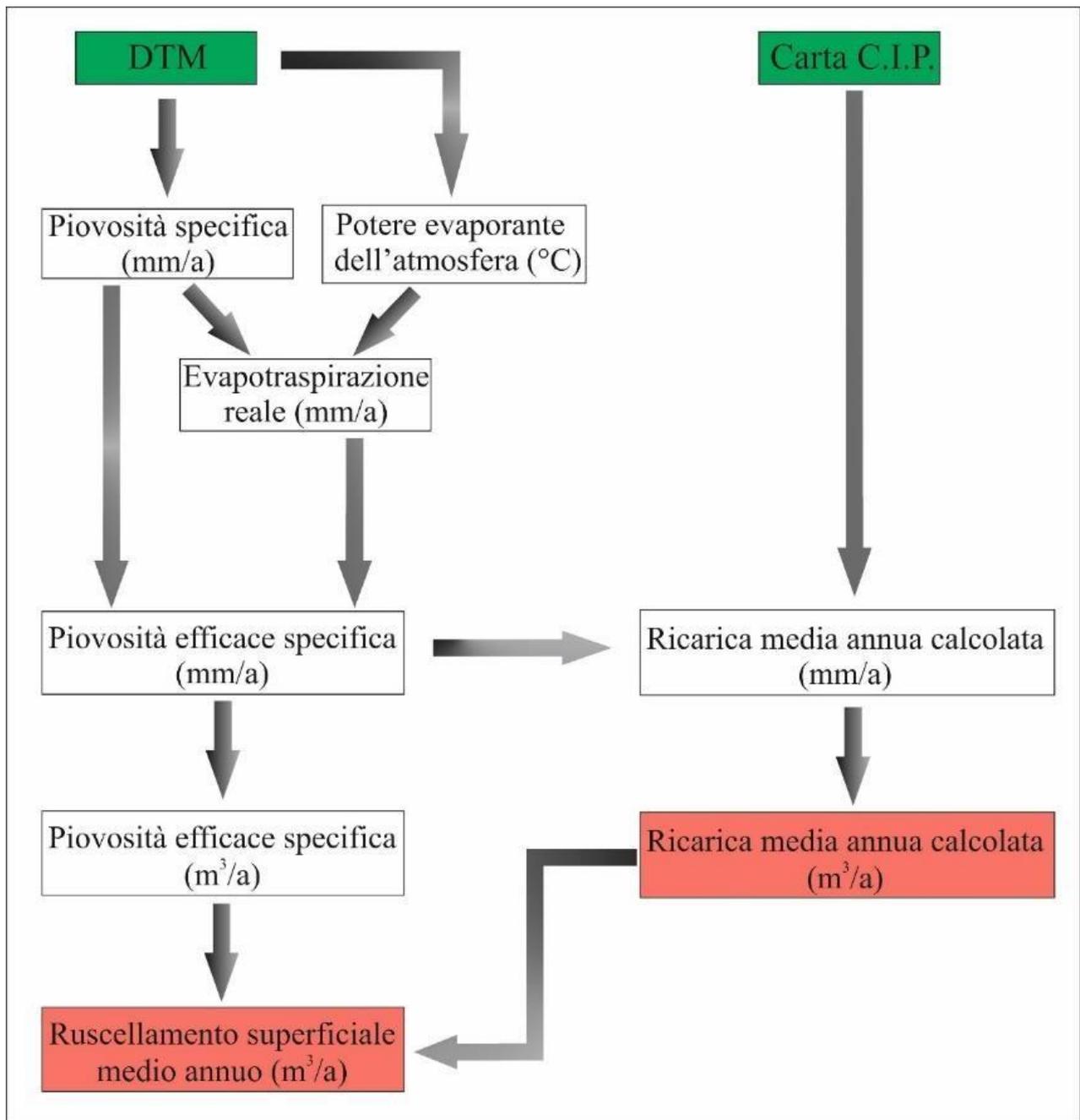


Figura 34. Schema del modello NUMERICO (Work flow) sviluppato in ambiente QGIS per il calcolo del bilancio idrogeologico inverso.

La valutazione del bilancio idrogeologico è stata eseguita per tre acquiferi differenti:

- Idrostruttura acquifera del torrente Alli;
- Idrostruttura acquifera Volturino Est;
- Acquifero Poroso della Piana alluvionale del fondo valle dell'Alta Val d'Agri.

Per quanto attiene l'idrostruttura acquifera del torrente Alli, studi precedenti dimostrano che l'idrostruttura alimenta due sorgenti, Alli 1-2, le uniche emergenze importanti dell'acquifero, entrambe captate e utilizzate per scopi idropotabili (acquedotto lucano, ex consorzio di bonifica di Basilicata). Il volume di risorse idriche stimato in uscita, nell'anno monitorato, è di circa 1.3 milioni di m³/a (circa 41 l/s); il dato è probabilmente sottostimato, in quanto molto spesso, specie durante la stagione di morbida, le captazioni presentavano abbondanti e diffuse fuoriuscite d'acqua non misurate che si riversavano direttamente in un fosso confluyente con il T. Alli. la componente di alimentazione esterna proveniente dalla porzione medio-alta del bacino idrografico del torrente Alli, non stimata in questo studio, può sicuramente contribuire ad avvicinare le stime di ricarica attiva media annua a quelle del volume annuo defluito dalle due sorgenti che attualmente sono valutate al 27 % (Fig.35).

Piovosità efficace specifica (milioni di m ³ /a)	Ricarica attiva media annua (milioni di m ³ /a)	Ruscigliamento superficiale medio annuo (milioni di m ³ /a)
1.70	0.95	0.75
	56%	44%
Volume d'acqua immagazzinato/ defluito dalle sorgenti (milioni di m ³ /a)	Ricarica attiva media annua (milioni di m ³ /a)	Differenza
1.31 [41.4 l/s]	0.95 [30 l/s]	27%

I valori sono stati ottenuti utilizzando i dati di precipitazione delle stazioni ARPAB per il periodo 2008-2020

Figura 35. Quadro di sintesi del bilancio idrogeologico dell'acquifero T. Alli.

In questa sede quindi si è ricalcolato il bilancio idrogeologico della idrostruttura modificandone l'estensione a sud-est delle scaturigini (sorgenti Alli 1-2) e si è valutato il bilancio idrogeologico della parte medio-alta del bacino idrografico. Lo scorrere dell'asta fluviale di quest'ultimo all'interno dell'area di alimentazione dell'idrostruttura, e in particolare in una zona fortemente

assorbente rende più robusta l'ipotesi di un discreto contributo in termini di alimentazione esterna alla ricarica attiva riducendo, anche se ancora in linea teorica le differenze tra il volume immagazzinato (1,3 milioni di m^3/a) e defluito dalle sorgenti e la ricarica attiva media annua (0,8 milioni di m^3/a).

5.1 Porzione medio-alta del bacino idrografico - T. Alli

Il bacino idrografico del Torrente Alli (Fig.36) è localizzato a Nord dell'abitato di Viggiano ed ha un'area di circa 14 Km^2 . La delimitazione del bacino è stata effettuata attraverso la cartografia IGM, a scala 1: 25.000. La topografia è verificata attraverso il modello digitale del terreno ad alta risoluzione (DTM) dell'area; il tutto è stato poi implementato nel GIS del progetto (QGIS 2.18).

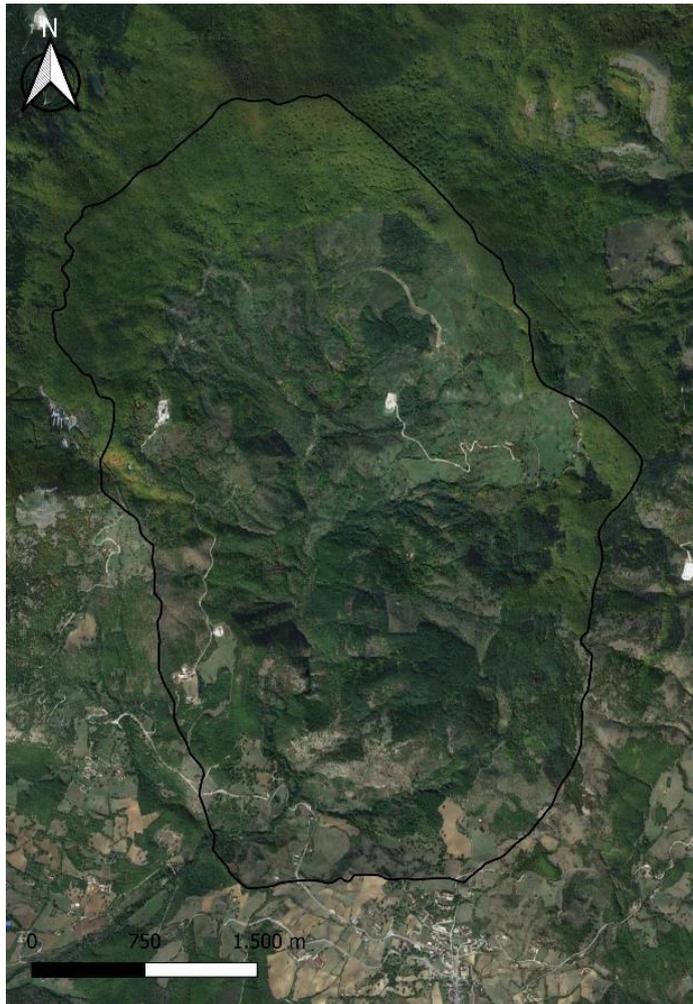


Figura 36. Limite del bacino idrografico del Torrente Alli.

Per il calcolo del bilancio idrogeologico, si è scelto di prendere in considerazione soltanto la porzione superiore del bacino dove sono presenti, quasi esclusivamente, formazioni impermeabili. È stata effettuata questa scelta perché, da precedenti studi, si è riscontrata una discrepanza tra le entrate/ricarica attiva nell'acquifero carbonatico del T. Alli e le uscite sorgive (sorgenti Alli 1-2).

La realizzazione del calcolo del bilancio idrogeologico in ambiente GIS, ha richiesto due parametri di input (Fig.34). Il primo parametro è la carta dei C.I.P. (coefficienti d'infiltrazione potenziale), per poter realizzare questa cartografia tematica è necessario avere la conoscenza geologica (Carta geologica) dell'area (Fig.37).

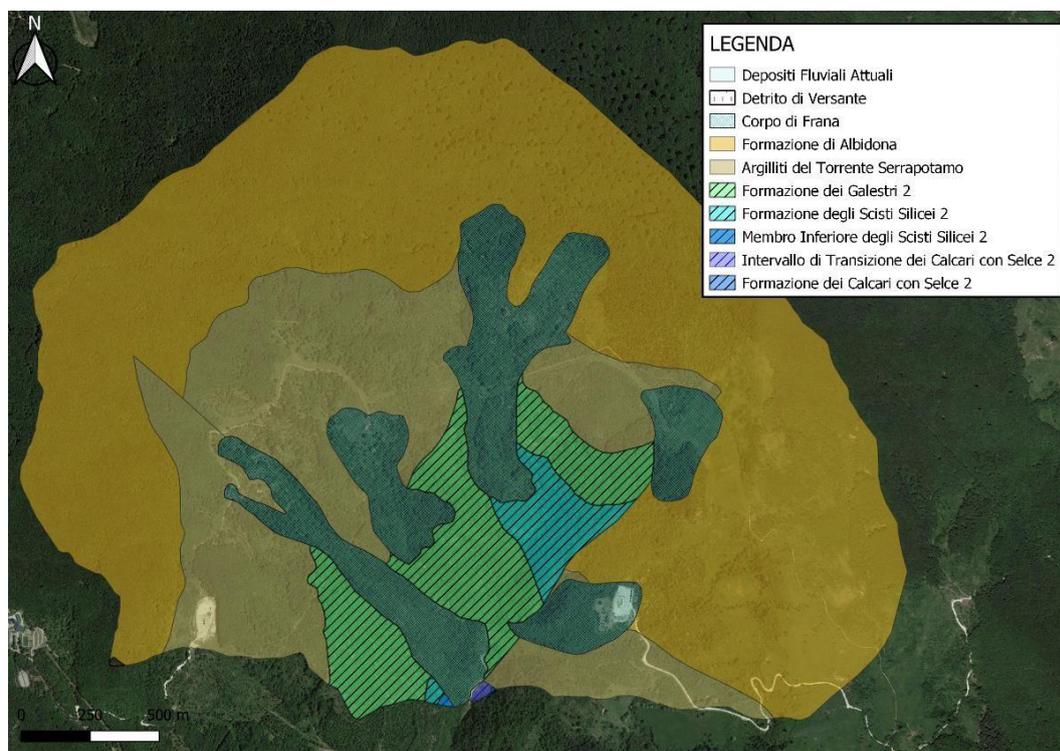


Figura 37. Carta geologica della porzione superiore del bacino del Torrente Alli (Palladino G. et al., in preparazione).

La Tabella 26 ottenibile dalla letteratura di settore (p.e. Civita, 2005) ha permesso di assegnare, attraverso delle valutazioni in parte soggettive, ad ogni litologia il proprio coefficiente d'infiltrazione efficace (χ - CIP).

Litologie	χ
Alluvioni Grossolane	0,68 - 1
Sabbie pure	0,96 - 1
Sabbie addensate	0,76 - 0,88
Alluvioni medio-fini	0,12 - 0,46
Alluvioni limo-argillose	0 - 0,24
Morene a grana fine	0,16 - 0,22
Morene grossolane	0,48 - 0,7
Argille- Marne argillose	0 - 0,14
Piroclastiti	0,12 - 0,22
Vulcaniti miste (acide)	0,28 - 0,7
Vulcaniti miste (basiche)	0,76 - 0,94
Basalti	0,88 - 1
Plutonidi	0,06 - 0,32
Filladi, Scisti	0,06 - 0,26

Gneiss	0,1 - 0,3
Arenarie	0,32 - 0,5
Marmi	0,96 - 1
Dolomie	0,5 - 0,7
Calcari (serie mista)	0,5 - 0,9
Calcari (serie continua)	0,8 - 1
Terrigeni calcareo-marnosi	0,16 - 0,5
Terrigeni marnoso	0,2 - 0,4
Terrigeni marno-argillosi	0,1 - 0,14
Gessi- Marne	0,6 - 0,7

Tabella 26. Campi di variazione dei coefficienti d'infiltrazione potenziale delle principali sequenze idrogeologiche (Civita, 2005).

La carta geologica è stata convertita in formato raster sulla base dei valori dei coefficienti d'infiltrazione potenziale delle singole litologie affioranti, ottenendo la carta dei C.I.P. (Fig.38).

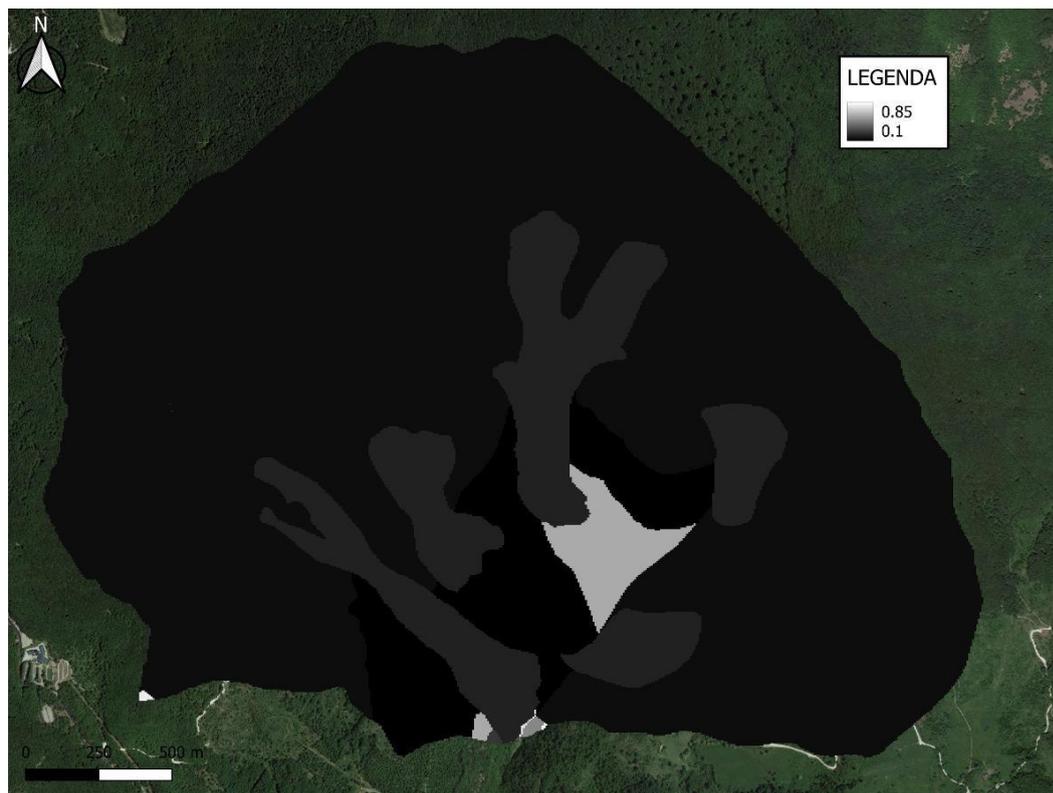


Figura 38. Carta dei Coefficienti d'Infiltrazione Potenziale (C.I.P.) della porzione superiore del bacino del Torrente Alli.

Il secondo parametro necessario per il calcolo del bilancio idrogeologico è il DTM (Fig.39) dell'area.

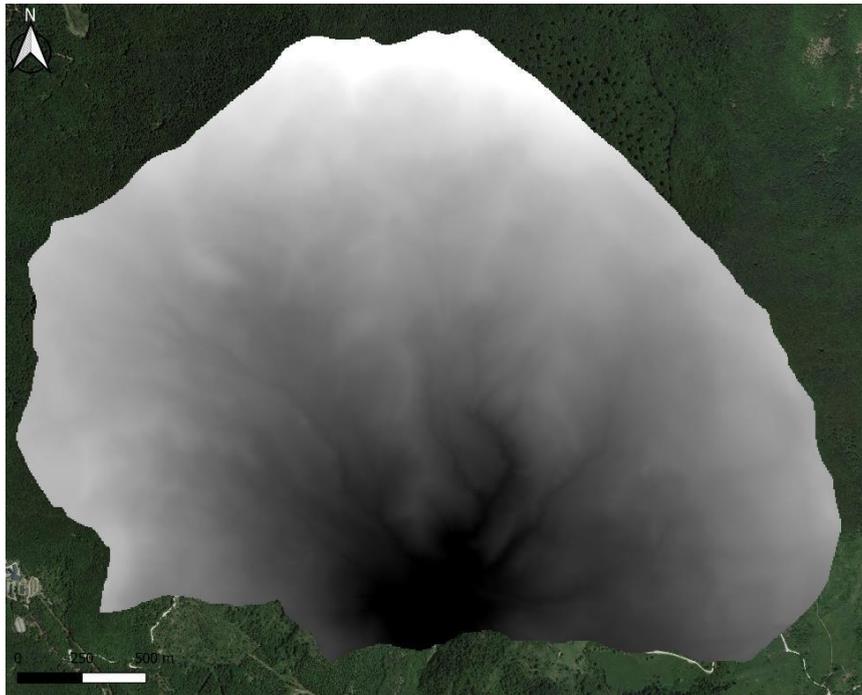


Figura 39. DTM della porzione superiore del bacino del Torrente Alli.

Dopo aver generato entrambi i file di input, si è impostato il modello di calcolo del bilancio idrogeologico, sulla base del workflow (Fig.34), in modo da poter ottenere tutti i parametri necessari alla stima del bilancio dell'area in esame.

L'algoritmo è stato scritto, attraverso il modulo *Geoprocessing* (QGIS 2.18) (Fig.40), ed implementato nel sistema di calcolo costituendo il modello numerico per il calcolo della ricarica attiva dell'area interessata. Per la generazione della Carta della Piovosità Specifica e per la Carta della Temperatura Corretta sono state utilizzate le rette rappresentative della loro variazione con la quota viste, rispettivamente, in Figura 32 e 33. L'Evapotraspirazione Reale è stata calcolata attraverso la formula empirica di Turc (1954), anch'essa implementata nel modulo di calcolo del GIS (*geoprocessing*), ampiamente utilizzata in queste valutazioni:

$$ET_R = \frac{P}{\sqrt{0, P + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Dove:

ET_R = Evapotraspirazione Reale;

P = Precipitazioni;

L = Potere evaporante dell'atmosfera ($L = 300 + 25 * T + 0,05 * T^3$).

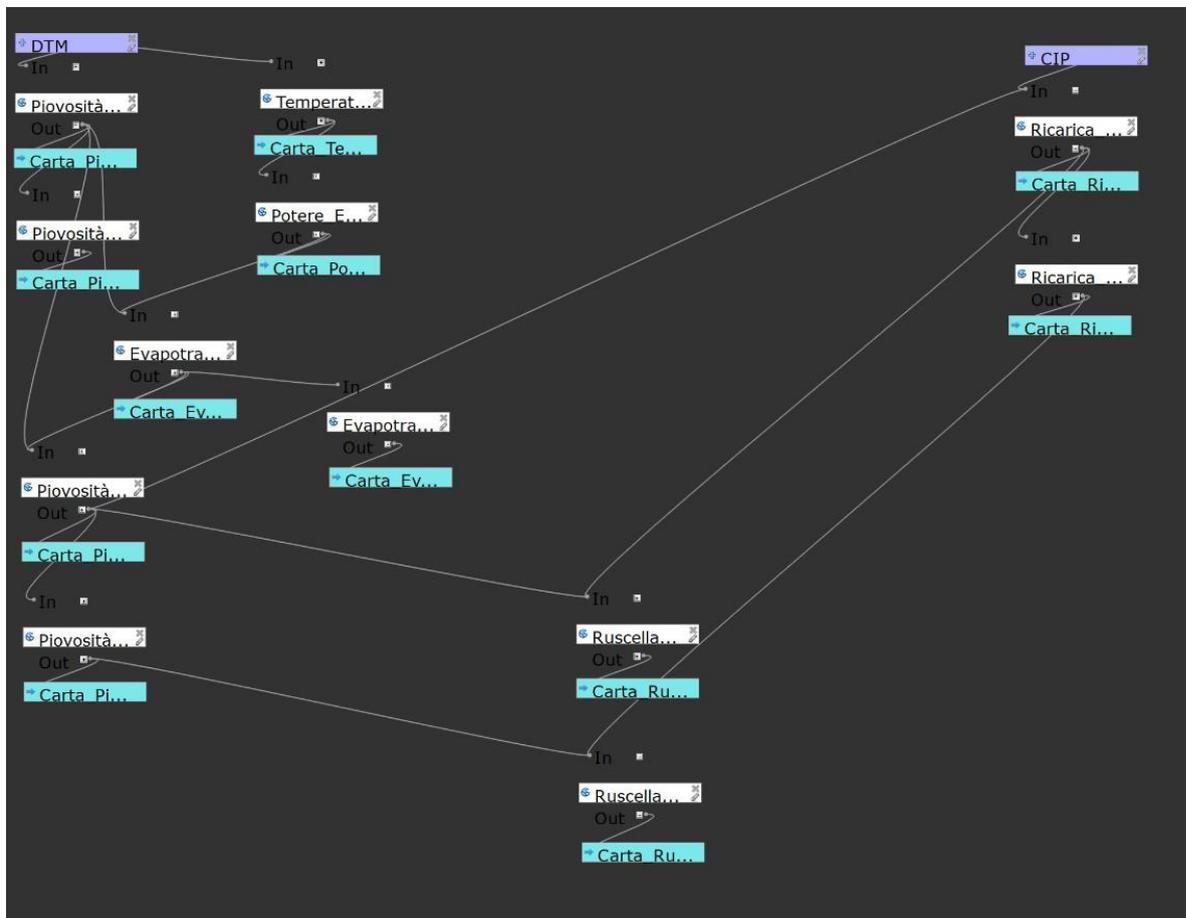


Figura 40. Algoritmo utilizzato per il calcolo del bilancio idrogeologico.

Questo algoritmo (Figura 40) permette di calcolare in sequenza ed automaticamente tutti i parametri previsti; il grande vantaggio di utilizzare questo modello è che si può facilmente aggiornare o applicare ad altri acquiferi modificando i parametri di input.

Le carte tematiche intermedie più importanti sono:

- La Carta della Piovosità Specifica (Fig.41);
- La Carta della Temperatura Corretta (Fig.42);
- La Carta dell'Evapotraspirazione Reale (Fig.43);
- La Carta della Piovosità Efficace Specifica (Fig.44);
- La Carta della Ricarica Media Annuale (Fig.45);
- La Carta del Ruscellamento superficiale medio annuo (Fig.46).

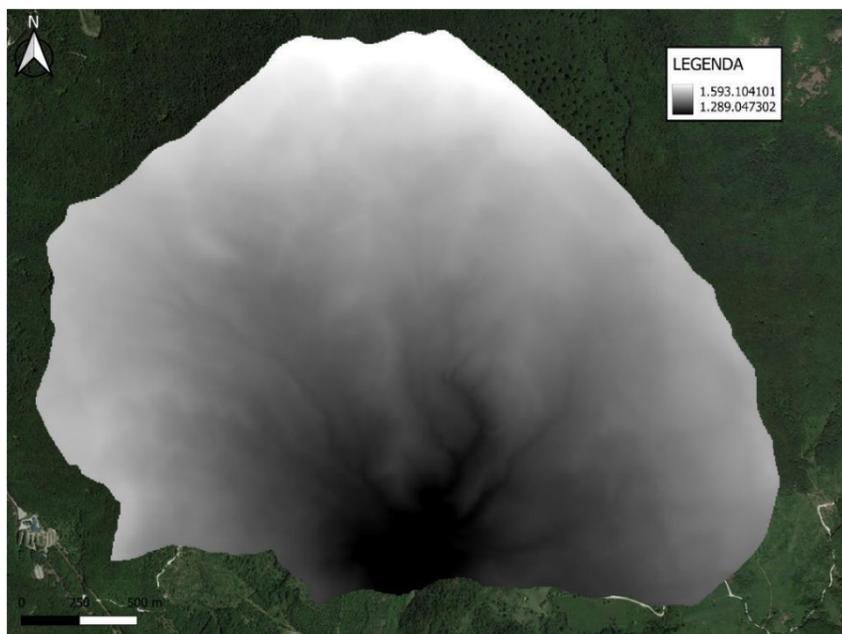


Figura 41. Carta della Piovosità Specifica della porzione superiore del bacino del Torrente Alli.

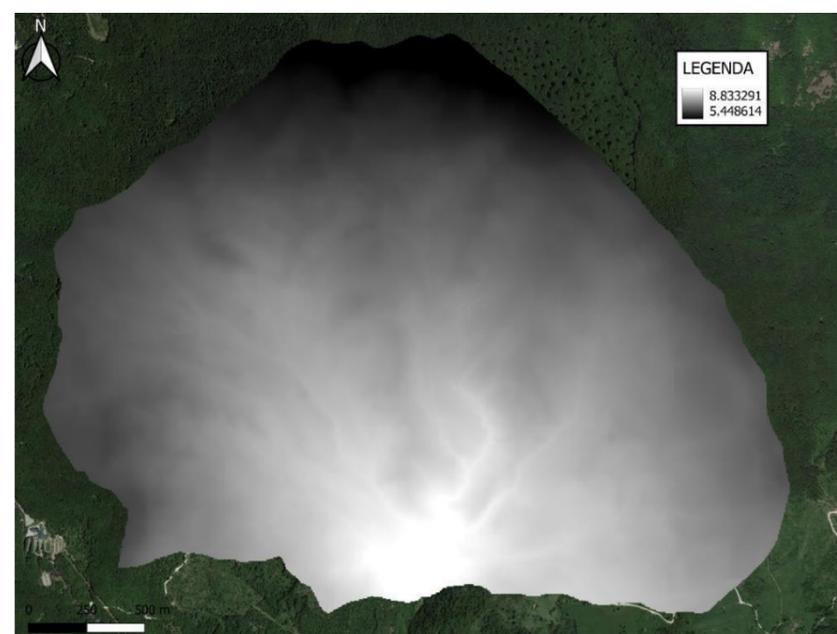


Figura 42. Carta della Temperatura Corretta della porzione superiore del bacino del Torrente Alli.

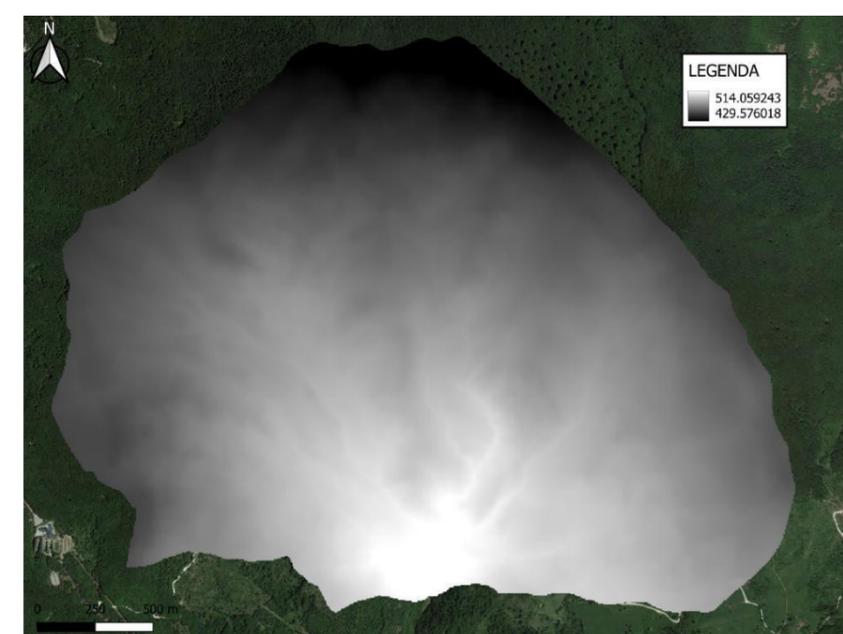


Figura 43. Carta dell'Evapotraspirazione Reale della porzione superiore del bacino del Torrente Alli.

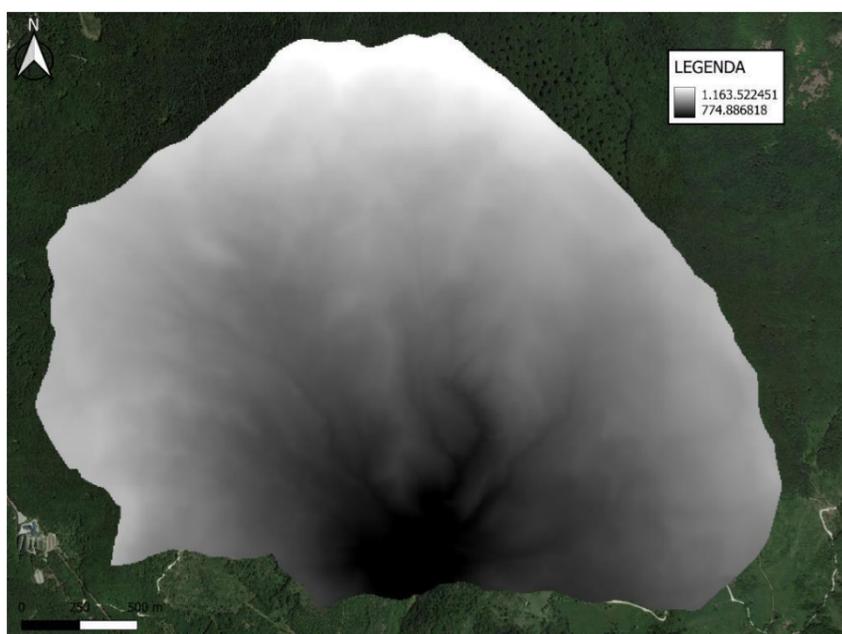


Figura 44. Carta della Piovosità Efficace Specifica della porzione superiore del bacino del Torrente Alli.

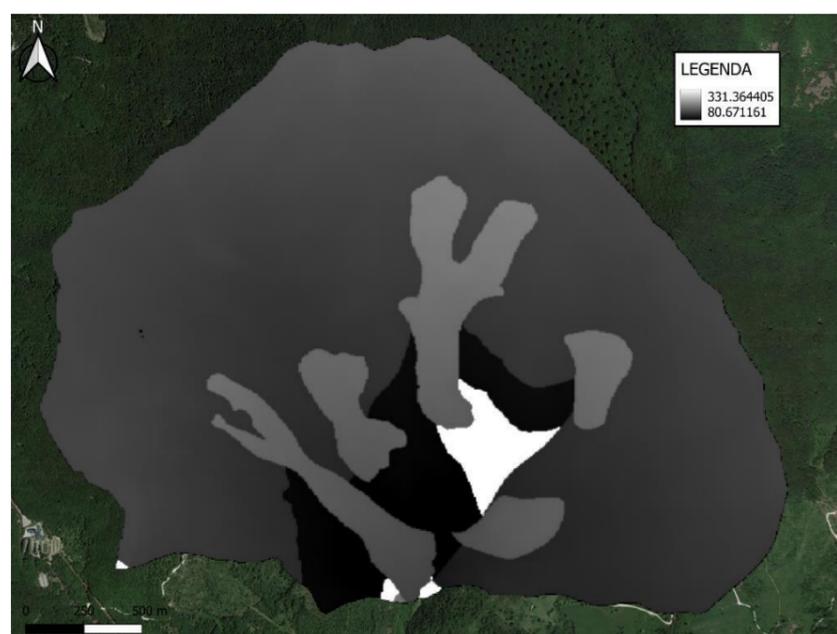


Figura 45. Carta della Ricarica Media Annua della porzione superiore del bacino del Torrente Alli.

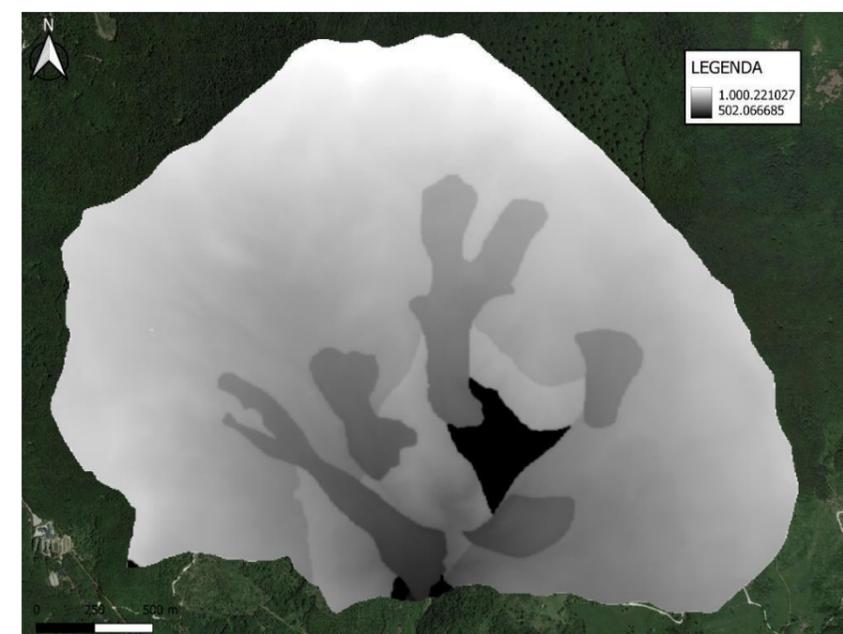


Figura 46. Carta del Ruscellamento Superficiale Medio Annuo della porzione superiore del Torrente Alli.

La stima del bilancio idrogeologico è stata effettuata valutando ingressi (precipitazioni), perdite (evapotraspirazione reale), il ruscellamento ed infiltrazione efficace.

Nella Tabella 27, vengono riportati i risultati numerici dell'analisi del bilancio idrogeologico:

Piovosità Specifica	8,35 milioni di m^3
Piovosità Efficace Specifica	5,61 milioni di m^3
Evapotraspirazione Reale	2,74 milioni di m^3
Ricarica Media Annuale	0,86 milioni di m^3
Ruscellamento Superficiale	4,75 milioni di m^3

Piovosità Efficace Specifica (milioni di m^3/a)	Ricarica Attiva Media Annuale (milioni di m^3/a)	Ruscellamento Superficiale Medio Annuo (milioni di m^3/a)
5,61	0,86	4,75
100%	14,30%	85,70%

Tabella 27. Risultati del calcolo del bilancio idrogeologico per la porzione superiore del Bacino Alli.

Dal calcolo del bilancio idrogeologico è evidente che la maggior parte delle piogge ruscella anziché infiltrarsi all'interno del terreno, ciò è dovuto alla grande presenza di formazioni poco permeabili quali la Formazione di Albidona, la Formazione dei Galestri e le Argilliti del Torrente Serrapotamo.

5.2 Sistema acquifero Alli

Il sistema acquifero del Torrente Alli (Fig.47) ha un'area di circa 2 Km^2 , ed è localizzato a N-W dell'abitato di Viggiano. Per il calcolo del bilancio idrogeologico si è utilizzato lo stesso procedimento utilizzato in precedenza.

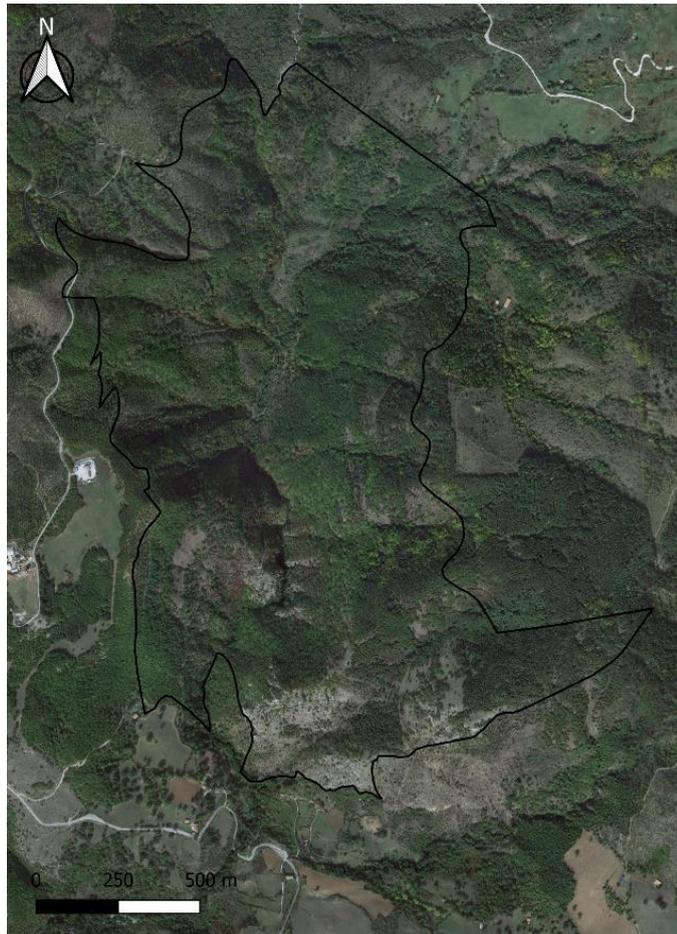


Figura 47. Limite del sistema acquifero Alli.

In seguito sono stati calcolati i due parametri di input, ovvero la Carta dei C.I.P. (Fig.48) ed il DTM (Fig.49).

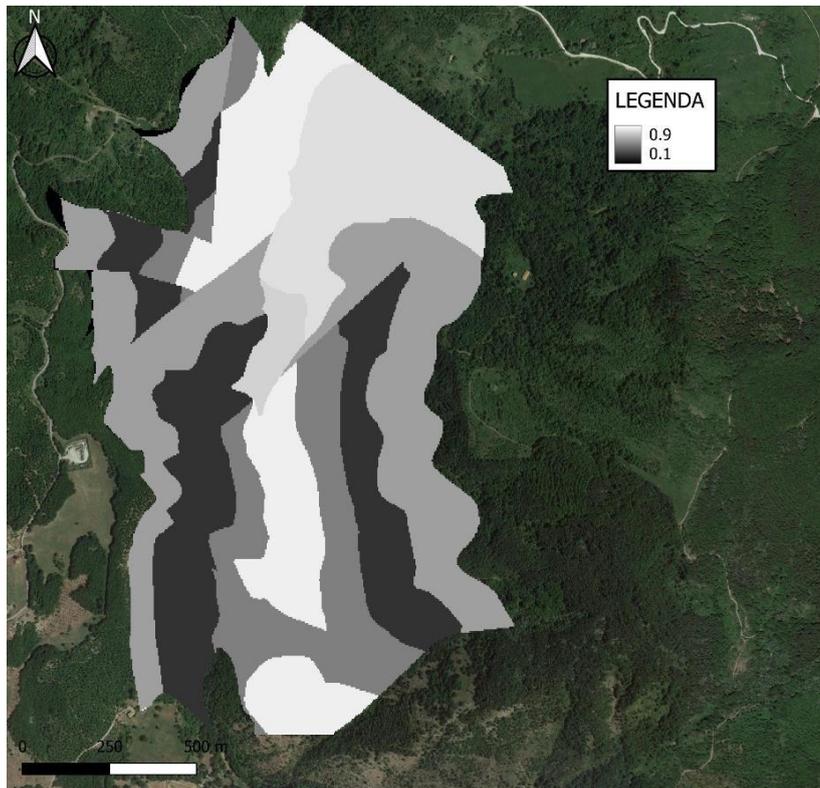


Figura 48. Carta dei C.I.P. del sistema acquifero Allè.

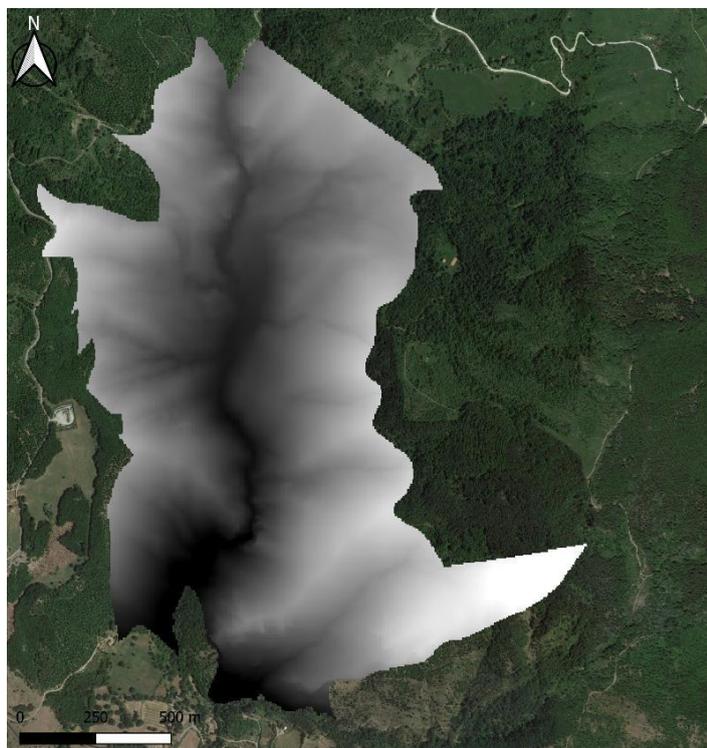


Figura 49. DTM del sistema acquifero Allè.

Infine è stato lanciato l'algoritmo per il calcolo di tutti i parametri. Le carte tematiche fondamentali fuoriuscite dall'algoritmo sono:

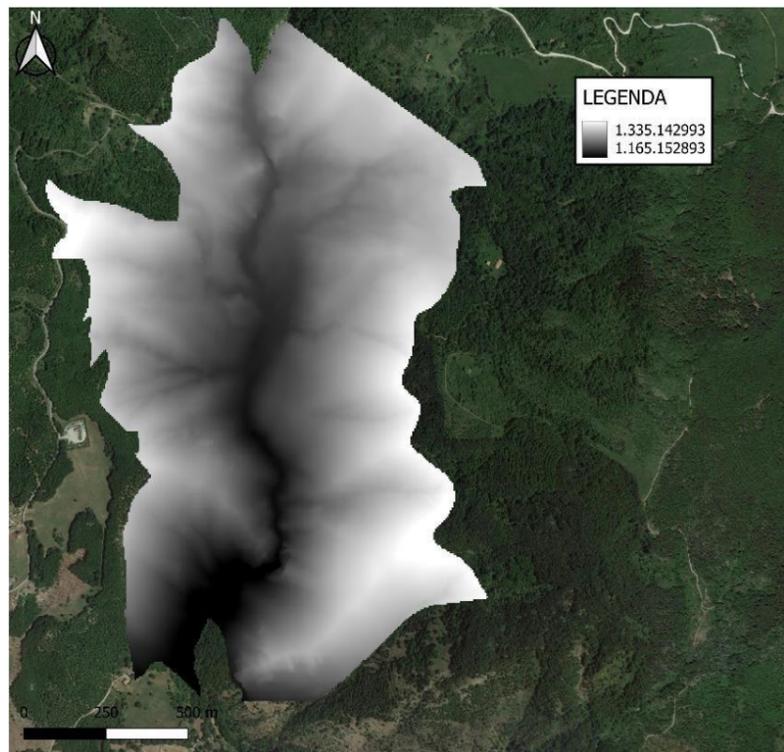


Figura 50. Carta della Piovosità Specifica del sistema acquifero Alli.

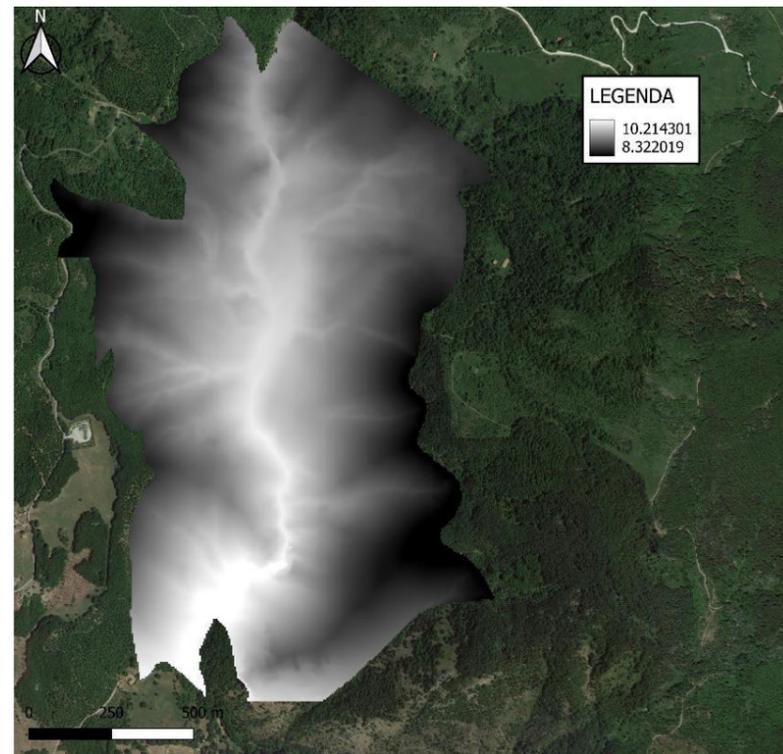


Figura 51. Carta della Temperatura Corretta del sistema acquifero Alli.

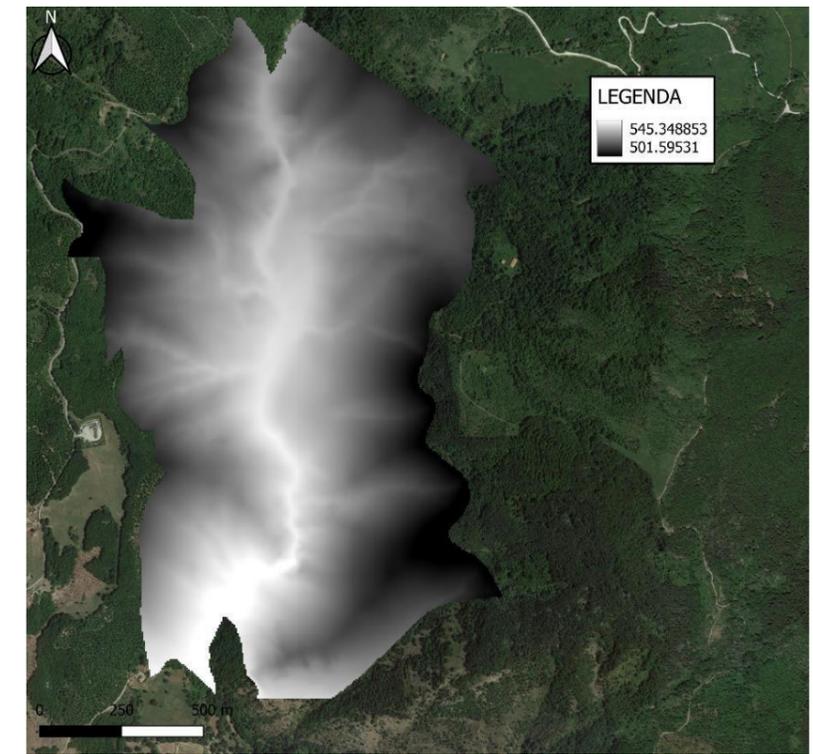


Figura 52. Carta dell'Evapotraspirazione Reale del sistema acquifero Alli.

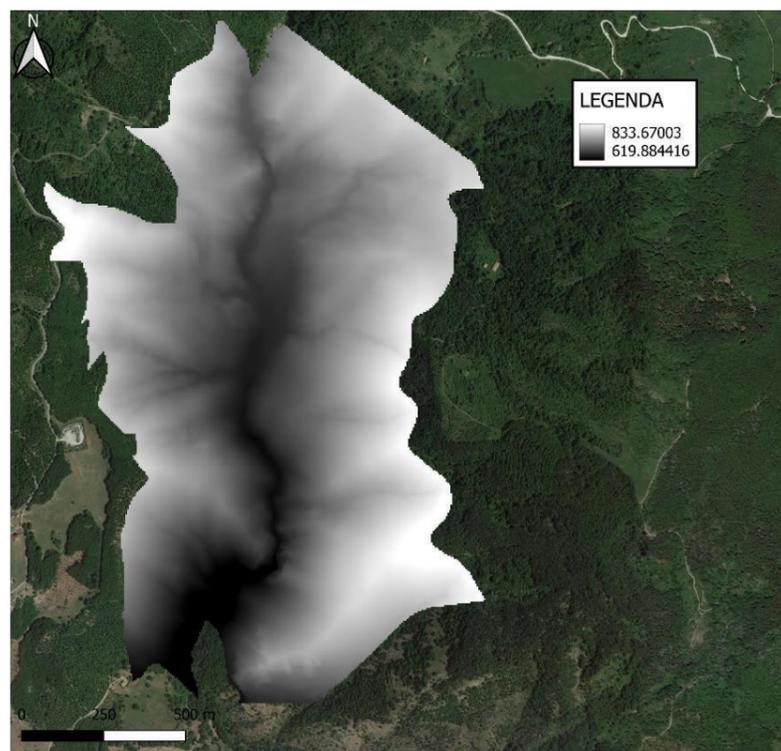


Figura 53. Carta della Piovosità Efficace Specifica del sistema acquifero Alli.

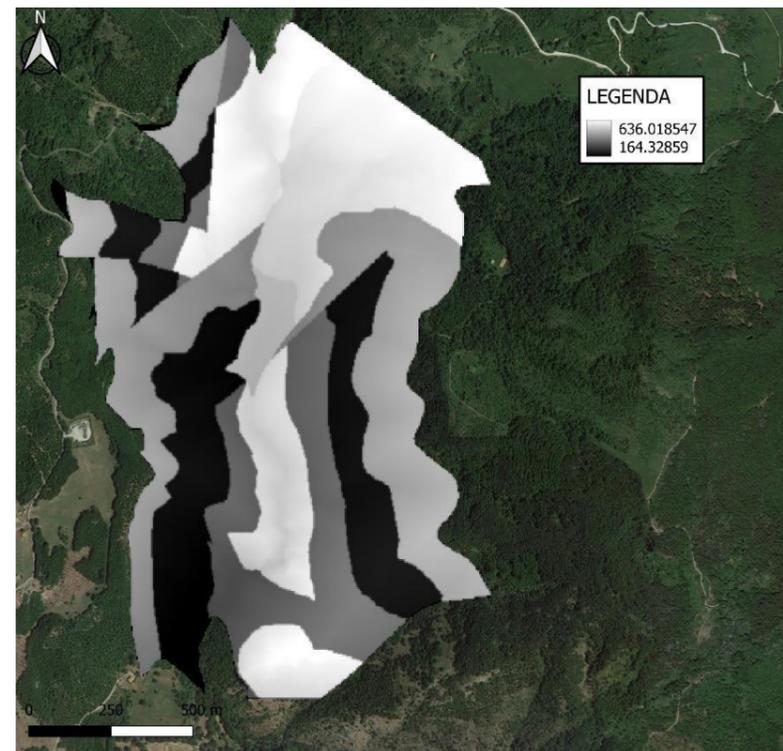


Figura 54. Carta della Ricarica Media Annua del sistema acquifero Alli.

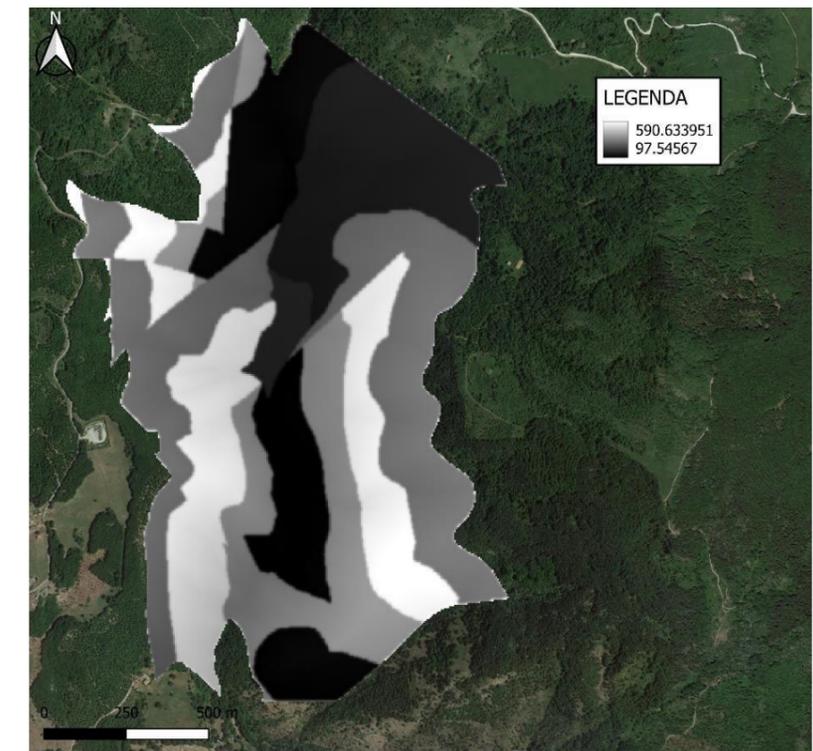


Figura 55. Carta del Ruscellamento Superficiale Medio Annuo del sistema acquifero Alli.

La stima del bilancio idrogeologico è stata effettuata valutando ingressi (precipitazioni), perdite (evapotraspirazione reale), il ruscellamento ed infiltrazione efficace. Nella Tabella 28, vengono riportati i risultati numerici dell'analisi del bilancio idrogeologico:

Piovosità Specifica	2,22 milioni di m^3
Piovosità Efficace Specifica	1,29 milioni di m^3
Evapotraspirazione Reale	0,92 milioni di m^3
Ricarica Media Annua	0,75 milioni di m^3
Ruscellamento Superficiale	0,54 milioni di m^3

Piovosità Efficace Specifica (milioni di m^3/a)	Ricarica Attiva Media Annua (milioni di m^3/a)	Ruscellamento Superficiale Medio Annuo (milioni di m^3/a)
1,29	0,75	0,54
100%	61,50%	38,50%

Tabella 28. Risultati del calcolo del bilancio idrogeologico per l'acquifero Alli.

Il calcolo del bilancio idrogeologico dell'acquifero Alli è stato eseguito in seguito ad una variazione del limite dell'acquifero congruente ad una diversa interpretazione idrogeologica relativa all'estensione dell'area di ricarica. I risultati del calcolo del bilancio idrogeologico evidenziano una componente dominante di ricarica, rispetto al ruscellamento, delle acque piovane. Dall'analisi del Carta della Ricarica Media pare probabile una maggiore ricarica dell'acquifero nella porzione centrale dell'anticlinale dovuta alla presenza della Formazione dei Calcari con Selce 2 e dell'Intervallo di Transizione dei Calcari con Selce. Nelle porzioni marginali abbiamo bassi valori di ricarica a causa della presenza della Formazione degli Scisti Silicei 2 e del suo Membro Inferiore.

5.3 Sistema acquifero Volturino Est

L'acquifero Volturino Est è localizzato a circa 3 Km dall'abitato di Marsicovetere (Fig.56) ed ha un'area di circa 5 Km². Per il calcolo del bilancio idrogeologico si è utilizzato lo stesso procedimento utilizzato in precedenza.

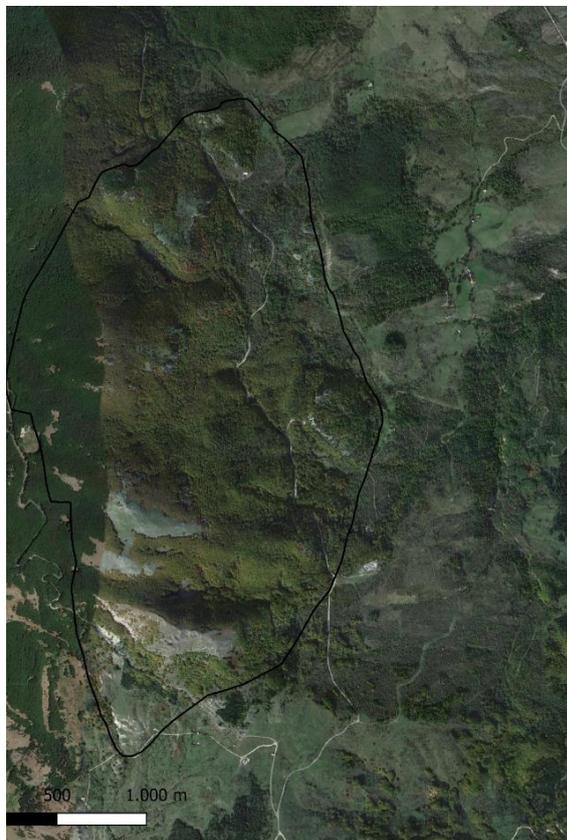


Figura 56. Limite del sistema acquifero Volturino Est.

In seguito sono stati calcolati i due parametri di input, ovvero la Carta dei C.I.P. (Fig.57) ed il DTM (Fig.58).

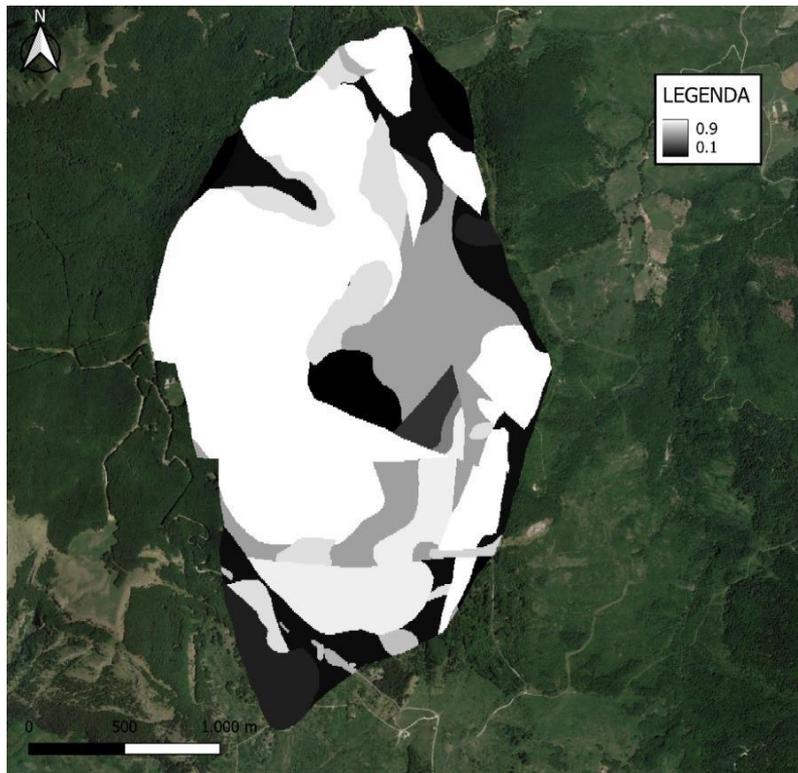


Figura 57. Carta dei C.I.P. del sistema acquifero Volturino Est.

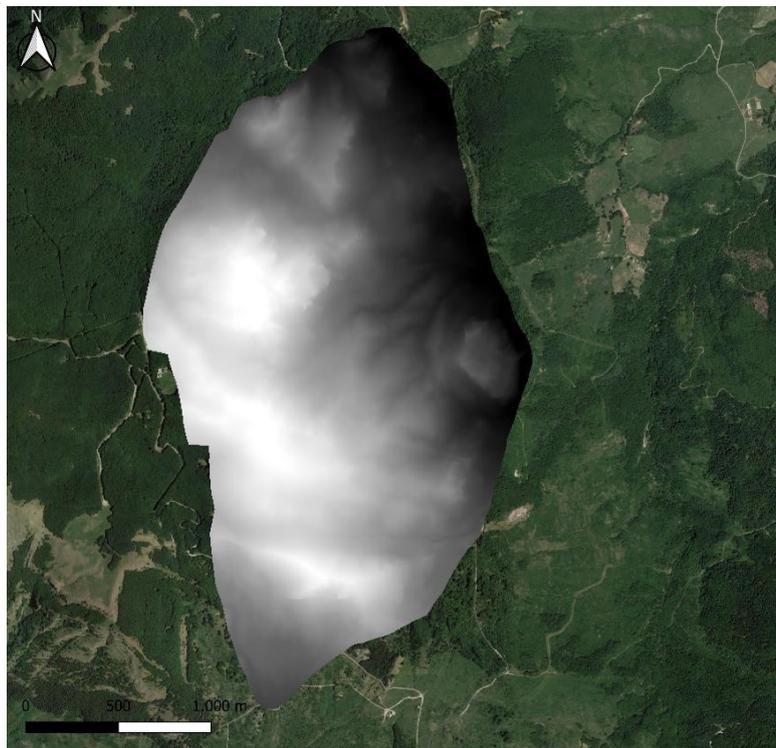


Figura 58. DTM del sistema acquifero Volturino Est.

Infine è stato lanciato l'algoritmo per il calcolo di tutti i parametri. Le carte tematiche fondamentali fuoriuscite dall'algoritmo sono:

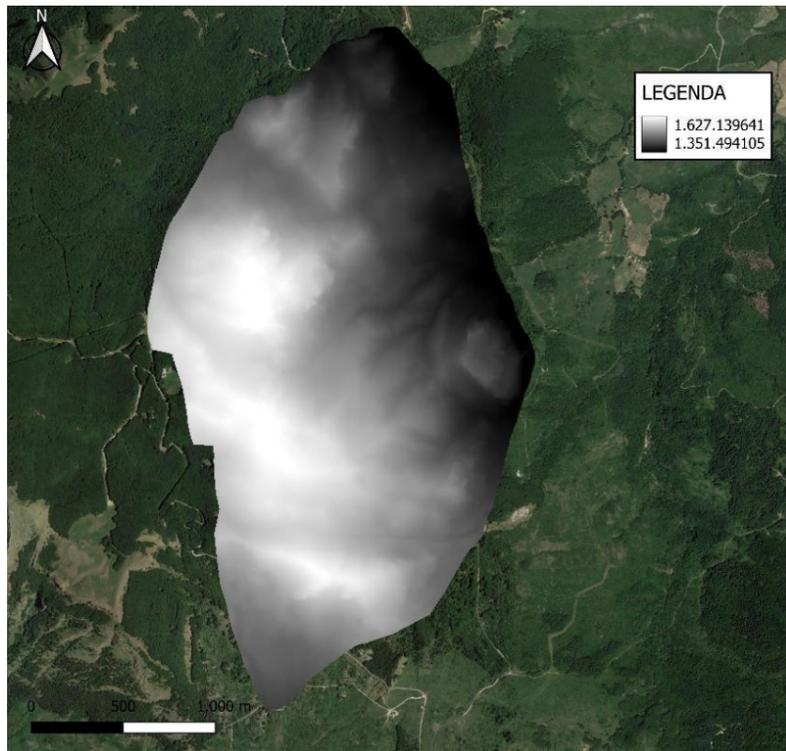


Figura 59. Carta della Piovosità Specifica del sistema acquifero Volturino Est.

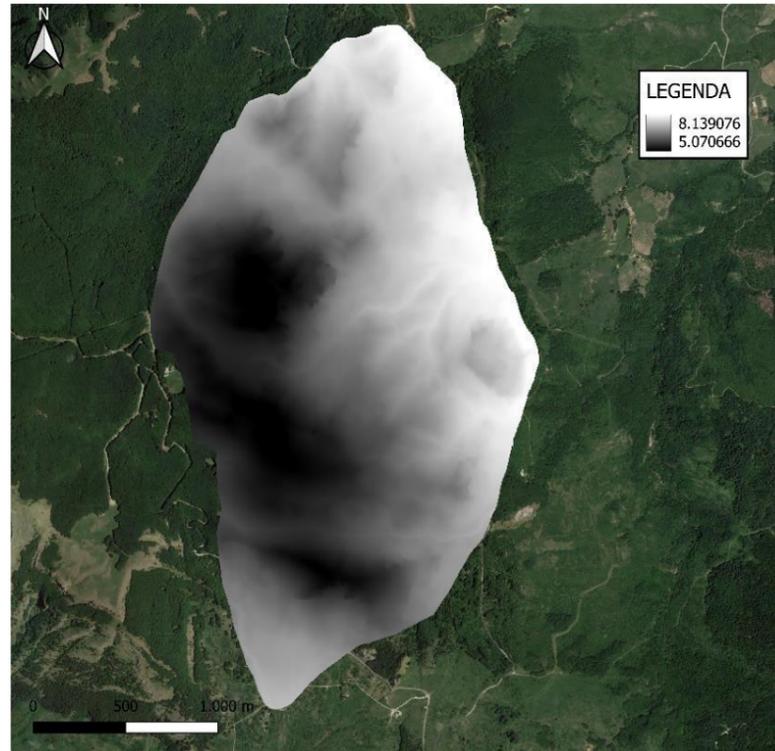


Figura 60. Carta della Temperatura Corretta del sistema acquifero Volturino Est.

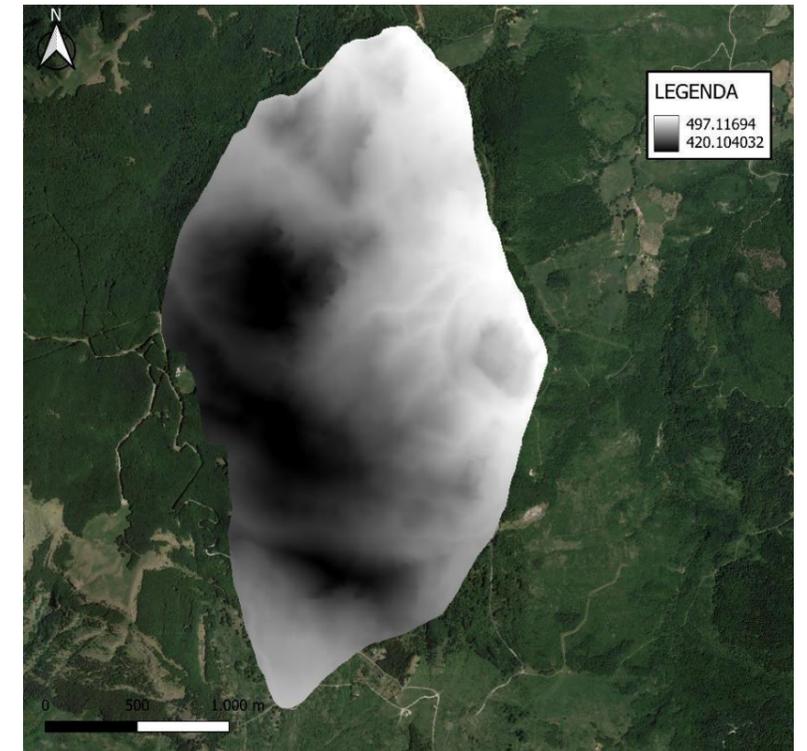


Figura 61. Carta dell'Evapotraspirazione Reale del sistema acquifero Volturino Est.

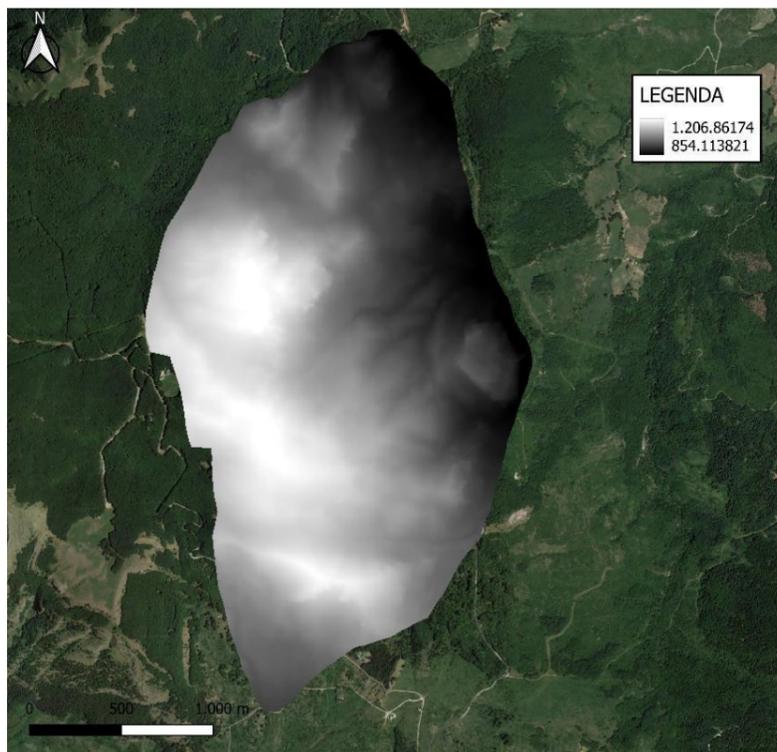


Figura 62. Carta della Piovosità Efficace Specifica del sistema acquifero Volturino Est.

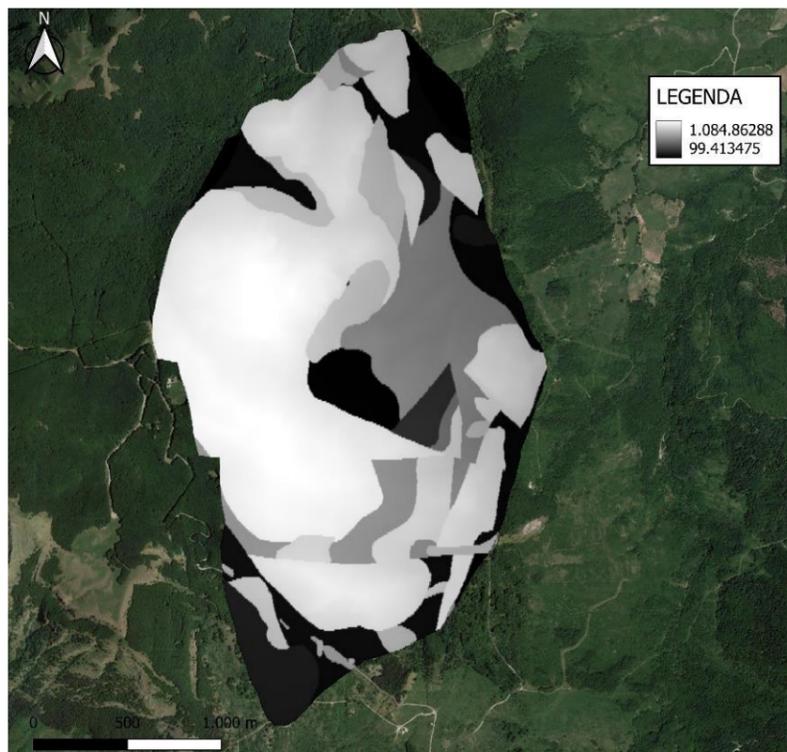


Figura 63. Carta della Ricarica Media Annua del sistema acquifero Volturino Est.

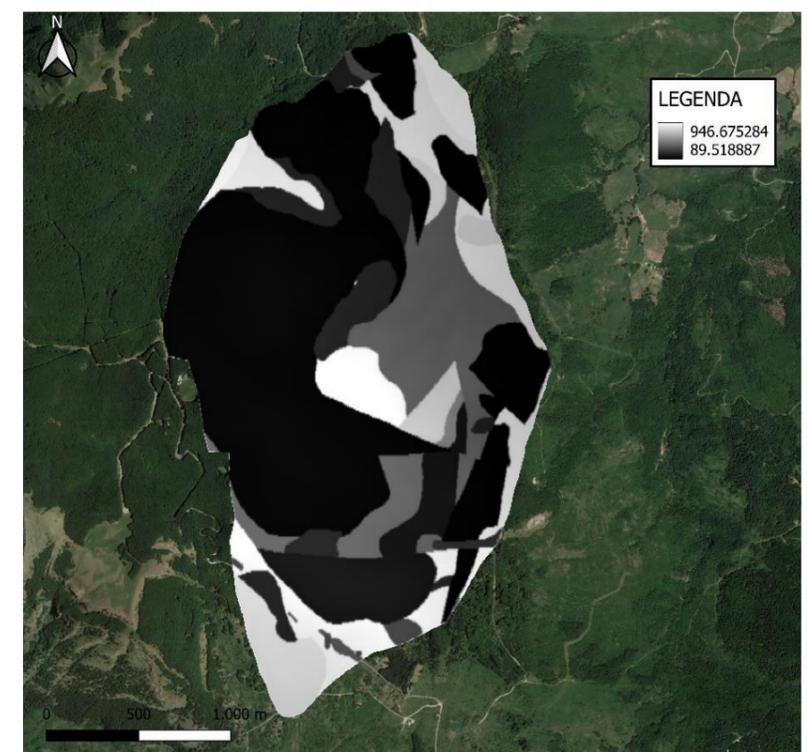


Figura 64. Carta del Ruscellamento Superficiale Medio Annuo del sistema acquifero Volturino Est.

La stima del bilancio idrogeologico è stata effettuata valutando ingressi (precipitazioni), perdite (evapotraspirazione reale), il ruscellamento ed infiltrazione efficace. Nella Tabella 29, vengono riportati i risultati numerici dell'analisi del bilancio idrogeologico:

Piovosità Specifica	7,48 milioni di m^3
Piovosità Efficace Specifica	5,19 milioni di m^3
Evapotraspirazione Reale	2,29 milioni di m^3
Ricarica Media Annuale	3,62 milioni di m^3
Ruscellamento Superficiale	1,58 milioni di m^3

Piovosità Efficace Specifica (milioni di m^3/a)	Ricarica Attiva Media Annuale (milioni di m^3/a)	Ruscellamento Superficiale Medio Annuo (milioni di m^3/a)
5,19	3,62	1,57
100%	69,20%	30,80%

Tabella 29. Risultati del calcolo del bilancio idrogeologico per l'acquifero Volturino Est.

Dai risultati del calcolo del bilancio idrogeologico è evidente come la ricarica attiva abbiamo un'influenza maggiore rispetto al ruscellamento delle acque piovane. Ciò è confermato dalla presenza rilevante dei Calcari a Cladocoropsis e Clypeina e dalla presenza della Formazione dei Calcari con Selce 2, entrambe molto permeabili grazie all'intensa fratturazione e grado di carsismo.

5.4 Sistema acquifero Poroso della Piana alluvionale

Il sistema acquifero Poroso della Piana alluvionale (Fig.65) ha un'area di circa 155 Km^2 , ed è localizzato nella porzione centrale dell'Alta Val d'Agri. Per il calcolo del bilancio idrogeologico si è utilizzato lo stesso procedimento utilizzato in precedenza.

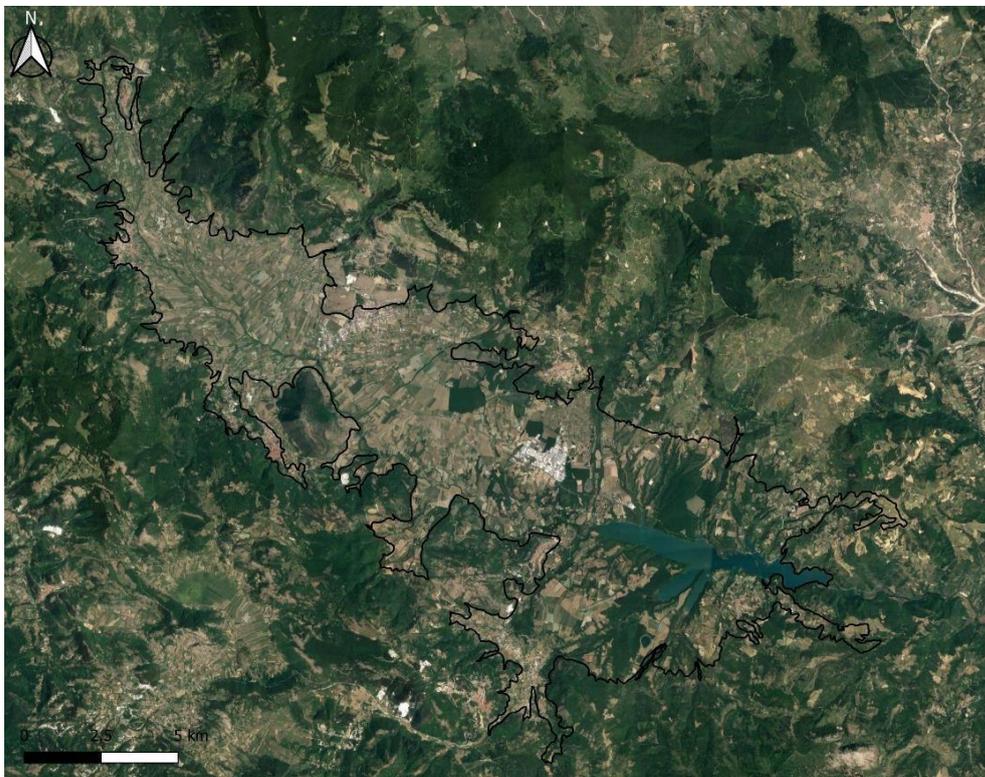


Figura 65. Limite del sistema acquifero Poroso della Piana alluvionale.

In seguito sono stati calcolati i due parametri di input, ovvero la Carta dei C.I.P. (Fig.66) ed il DTM (Fig.67).

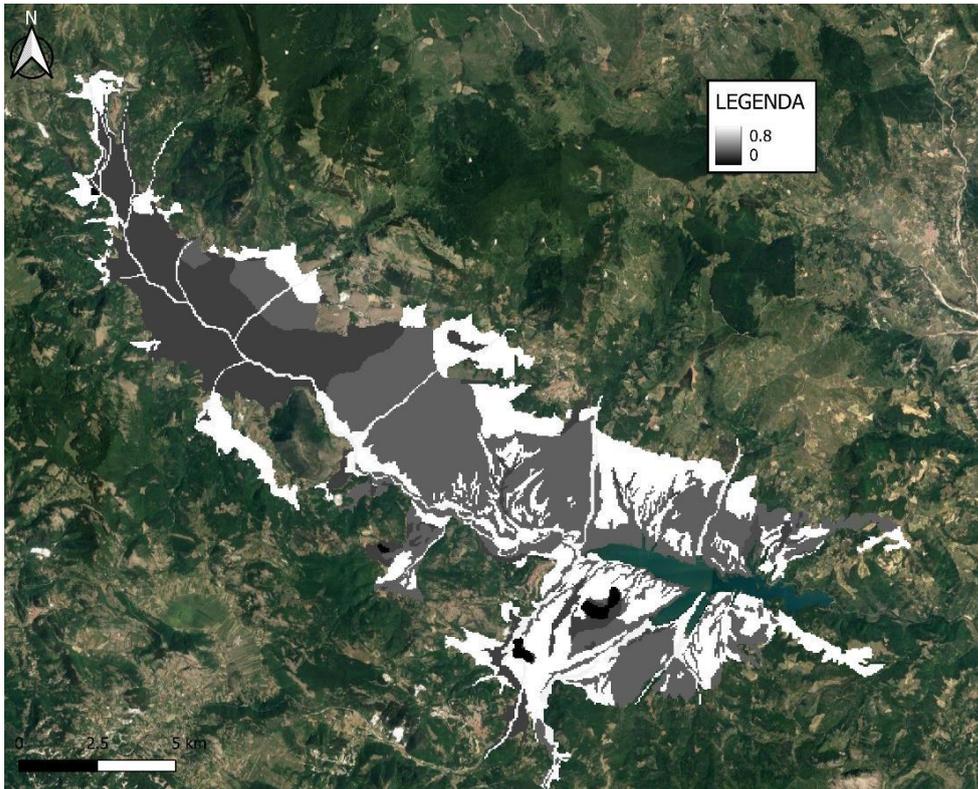


Figura 66. Carta dei C.I.P. del sistema acquifero Poroso della Piana alluvionale.

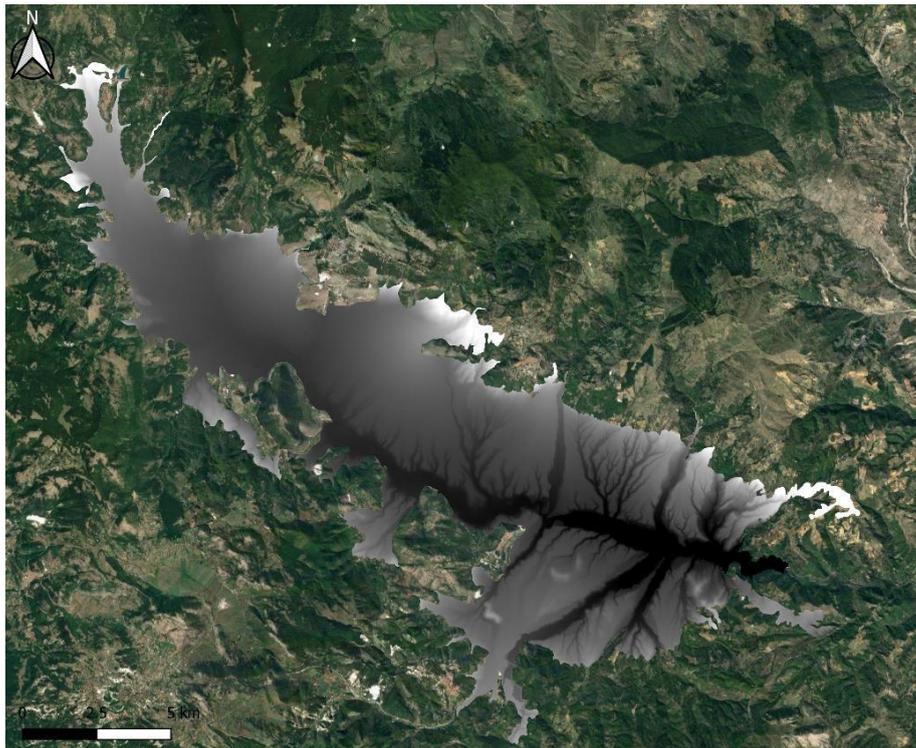


Figura 67. DTM del sistema acquifero Poroso della Piana alluvionale.

Infine è stato lanciato l'algoritmo per il calcolo di tutti i parametri. Le carte tematiche fondamentali fuoriuscite dall'algoritmo sono:

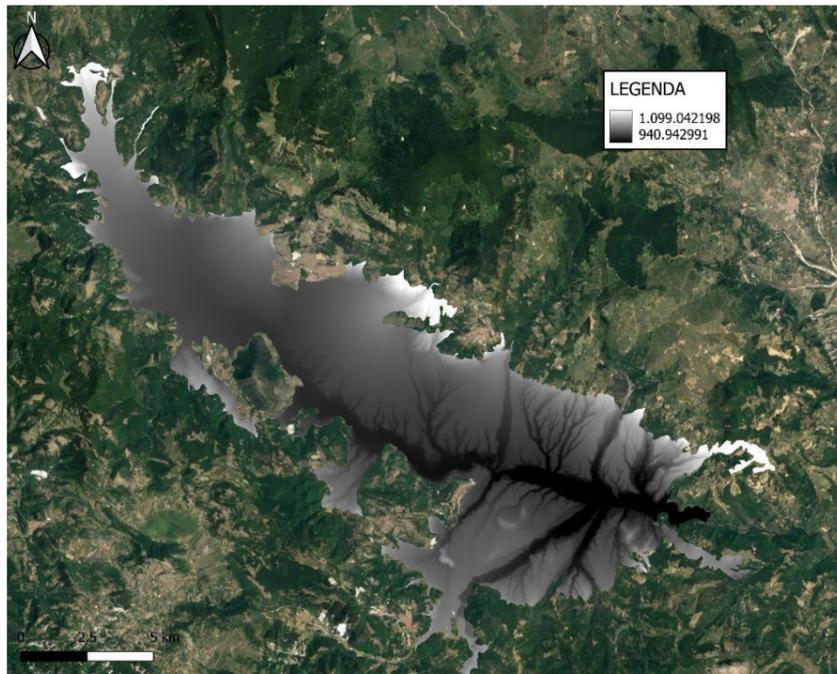


Figura 68. Carta della Piovosità Specifica del sistema acquifero Poroso della Piana alluvionale.

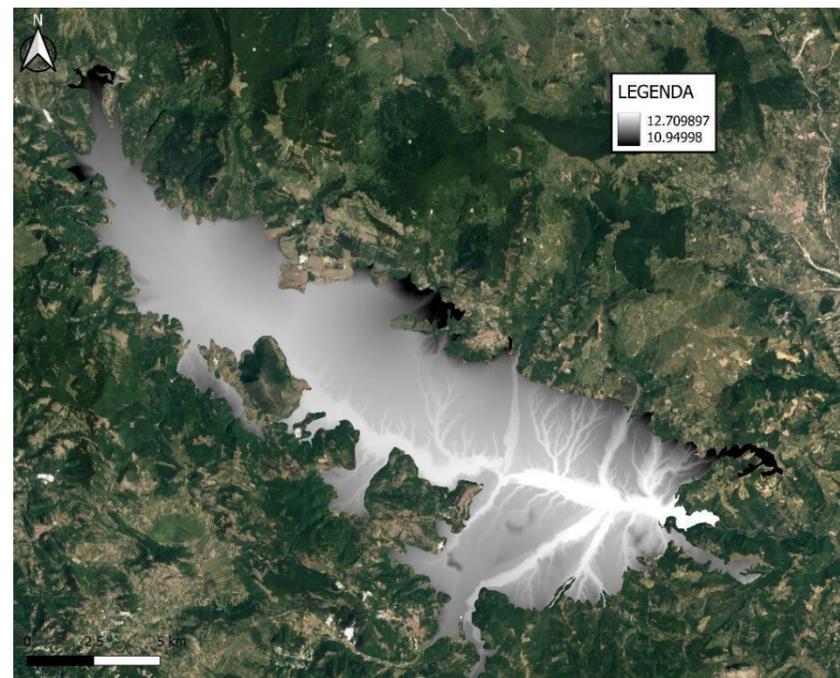


Figura 69. Carta della Temperatura Corretta del sistema acquifero Poroso della Piana alluvionale.

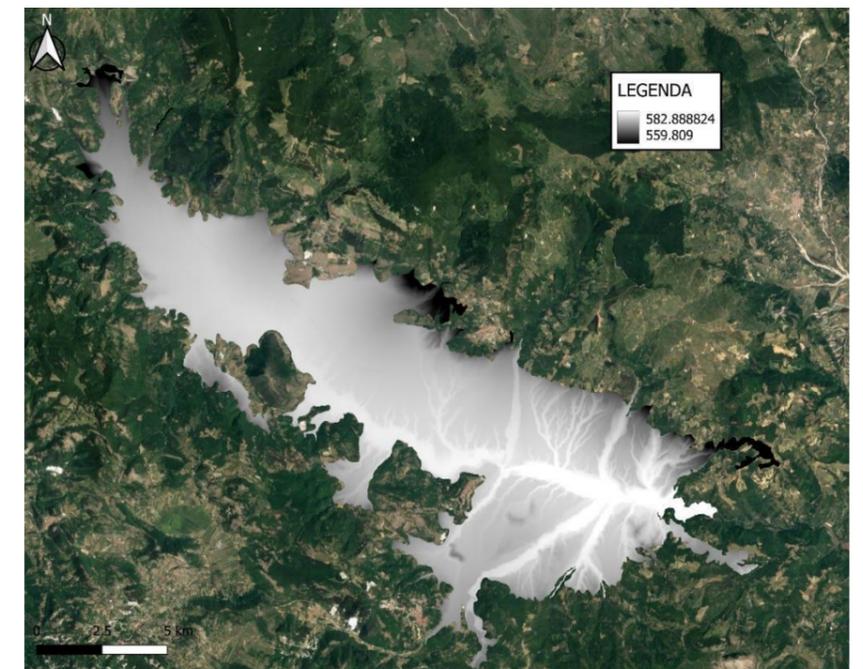


Figura 70. Carta dell'Evapotraspirazione Reale del sistema acquifero Poroso della Piana alluvionale.

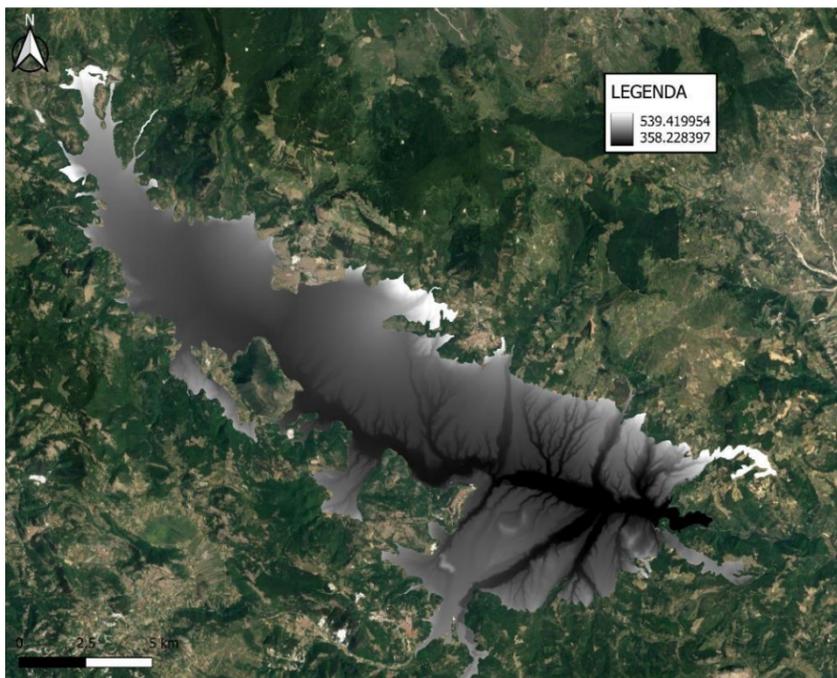


Figura 71. Carta della Piovosità Efficace Specifica del sistema acquifero Poroso della Piana alluvionale.

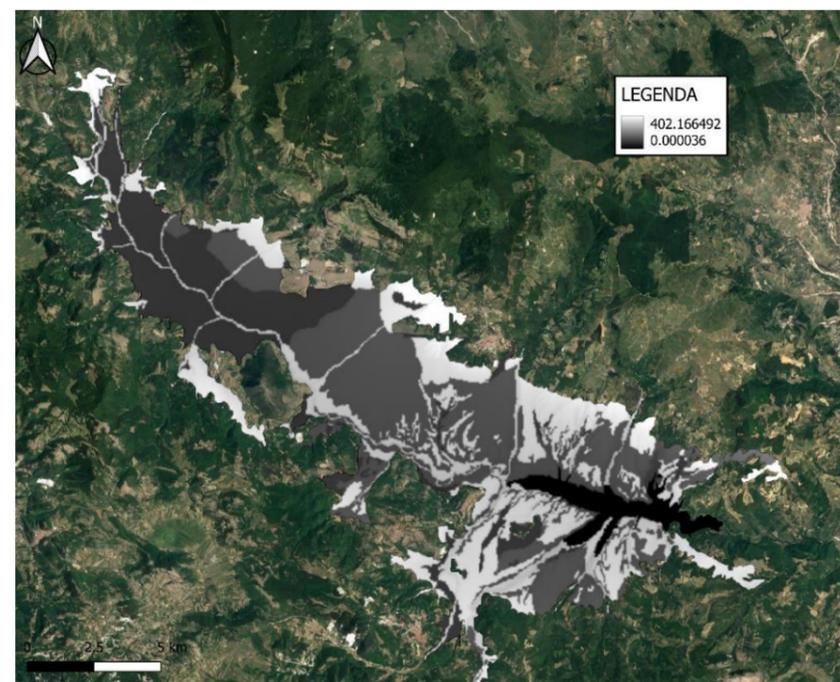


Figura 72. Carta della Ricarica Media Annua del sistema acquifero Poroso della Piana alluvionale.

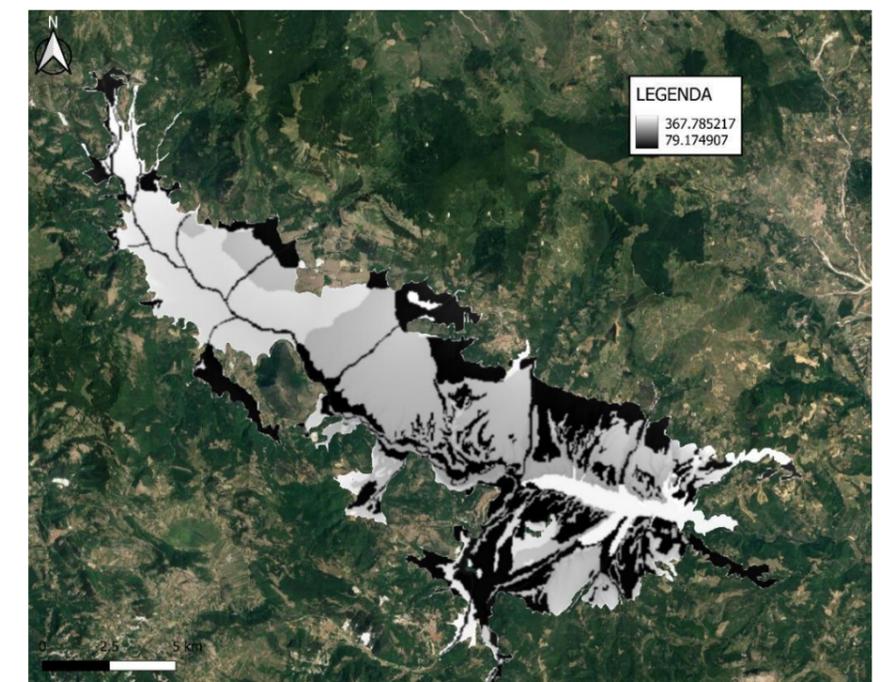


Figura 73. Carta del Ruscellamento Superficiale Medio Annuo del sistema acquifero Poroso della Piana alluvionale.

La stima del bilancio idrogeologico è stata effettuata valutando ingressi (precipitazioni), perdite (evapotraspirazione reale), il ruscellamento ed infiltrazione efficace. Nella Tabella 30, vengono riportati i risultati numerici dell'analisi del bilancio idrogeologico:

Piovosità Specifica	149,24 milioni di m^3
Piovosità Efficace Specifica	62,85 milioni di m^3
Evapotraspirazione Reale	86,39 milioni di m^3
Ricarica Media Annuale	27,72 milioni di m^3
Ruscellamento Superficiale	35,13 milioni di m^3

Piovosità Efficace Specifica (milioni di m^3/a)	Ricarica Attiva Media Annuale (milioni di m^3/a)	Ruscellamento Superficiale Medio Annuo (milioni di m^3/a)
62,85	27,72	35,13
100%	44,10%	55,90%

Tabella 30. Risultati del calcolo del bilancio idrogeologico per l'acquifero Poroso della Piana alluvionale.

I risultati del calcolo del bilancio idrogeologico evidenziano una quota di ricarica e ruscellamento pressoché simile; questo può essere associato alla presenza di sedimenti alluvionali quaternari fini, quindi poco permeabili, nella porzione occidentale ed alla presenza di sedimenti alluvionali quaternari grossolani, più permeabili, nella porzione orientale. Questa distinzione è evidente, oltre che dalla geologia, anche dalla carta tematica della ricarica media in Figura 72.

CAPITOLO 6

METODICHE DI ELABORAZIONE E APPLICAZIONI NELLA VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ IN ALCUNI ACQUIFERI DELL'ALTA VAL D'AGRI: SINTESI DEI DATI

L'area di studio è situata all'interno dell'Appennino Meridionale, il quale è caratterizzato da una catena a pieghe e sovrascorrimenti con vergenza orientale (Patacca & Scandone, 2007). Più nello specifico, l'area di studio ricade all'interno del bacino intermontano dell'Alta Val d'Agri di cui sono state analizzate in dettaglio le aree in sinistra idrica del fiume Agri (Fig.74).

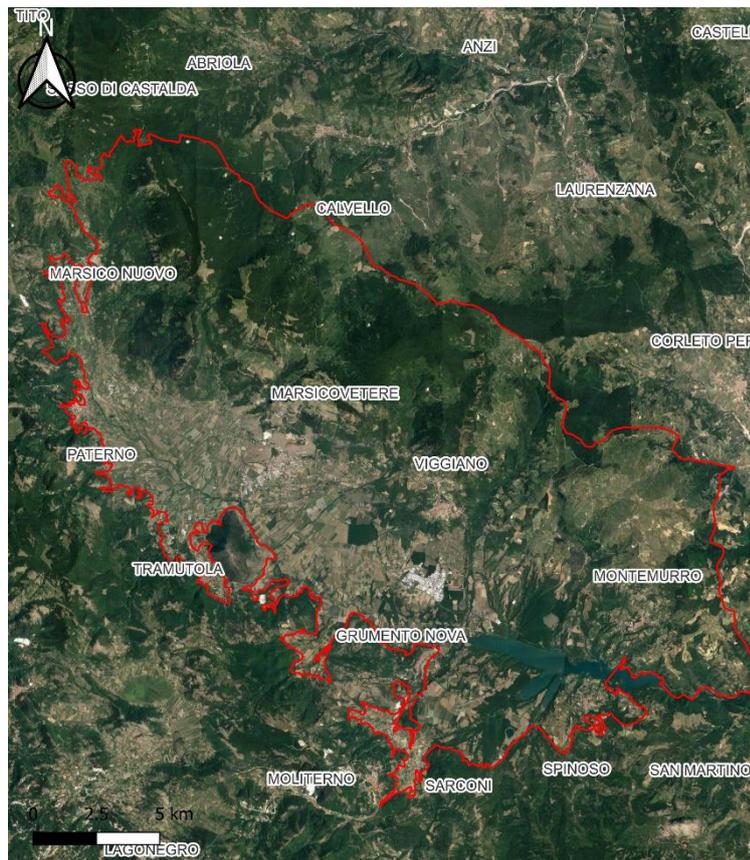


Figura 74. Ubicazione dell'area di studio.

L'area presa in esame ha un'estensione di circa 380 Km². In quest'area sono stati individuati 5 acquiferi principali, sui quali è stata effettuata la valutazione di Vulnerabilità Intrinseca attraverso il metodo SINTACS (Civita & De Maio, 2000), EPIK (Doerfliger et al., 1999), GOD (Foster et al., 2002); mentre per le altre porzioni dell'area è stato utilizzato un approccio combinato (Civita M., 2005).

Gli acquiferi presi in considerazione (Fig.75) sono:

1. Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola che comprende un'area di circa 42 Km²;
2. Volturino Est; con un'estensione di circa 5 Km²;
3. Madonna di Viggiano; con un'estensione di circa 20 Km²;
4. Allì; con un'estensione di circa 2 Km²;
5. Acquifero Poroso della Piana alluvionale; con un'area di circa 150 Km².

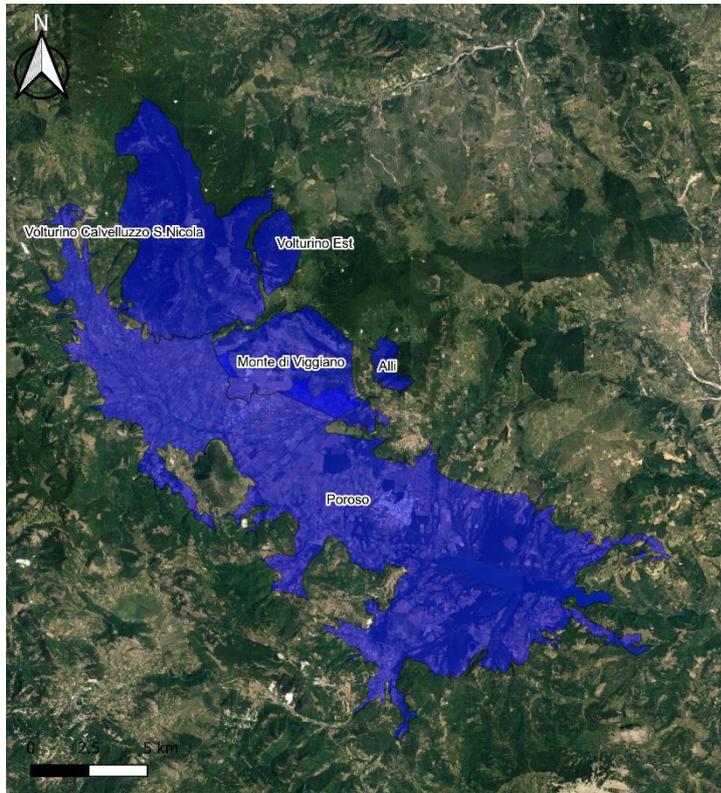


Figura 75. Visualizzazione su Google Earth degli acquiferi presi in esame.

6.1 PREPARAZIONE DEL DATABASE

Individuata l'area di studio si è proceduto all'implementazione del GIS attraverso la fase di acquisizione dei dati e pre-elaborazione degli stessi, necessari alle operazioni di analisi spaziale ed elaborazioni successive (i. digitalizzazione dei dati a disposizione; ii. Georeferenziazione in unico sistema di riferimento, in modo che siano uniformati e trattabili spazialmente tra loro). Come Sistema di Riferimento si è scelto il WGS84 (World Geodetic System 1984), il quale è un sistema di coordinate geografiche geodetico, mondiale, che si basa su un ellissoide di riferimento elaborato nel 1984. Dal punto di vista geometrico, il WGS84 è un particolare sistema terrestre

convenzionale (CTS, Conventional Terrain System), ovvero un sistema di riferimento cartesiano usato per descrivere la Terra, le cui caratteristiche sono:

- Centro: nel centro di massa della Terra
- Asse Z: passante per il polo Nord
- Asse X: scelto in modo che il meridiano di Greenwich giaccia sul piano XZ
- Asse Y: scelto in modo da dare una terna destrorsa, ovvero tale che un osservatore posto lungo l'asse Z veda l'asse X sovrapporsi ad Y con moto antiorario.

Al sistema CTS WGS84 è associato l'ellissoide WGS84, descritto dai seguenti parametri:

- Semiasse maggiore: $a = 6.378.137,000000$ m
- Semiasse minore: $c = 5.356.753,314245$ m
- Schiacciamento: $f = 1/298,257223563$
- Costante gravitazionale geocentrica: $u = 3.986.005 \times 10^8 - \text{m}^3/\text{s}^2$.

Il sistema WGS84 non ha associata una rappresentazione cartografica ufficiale, ma comunemente viene utilizzata la rappresentazione UTM (la proiezione universale trasversa di Mercatore), che assume la denominazione UTM-WGS84 (Fig.76).

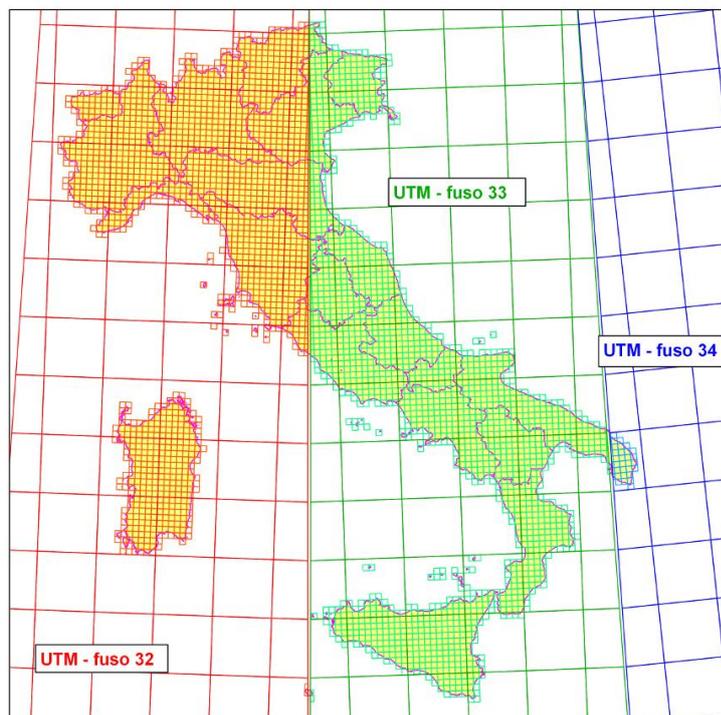


Figura 76. Zone UTM dell'Italia.

In sintesi, il sistema di coordinate utilizzato presenta le seguenti caratteristiche:

- Datum: WGS84
- Proiezione: UTM
- Zona: 33N
- EPSG: 32633

Per ogni acquifero, e per le restanti aree, sono stati realizzati i layer necessari, ovvero le carte tematiche dei parametri specifici per ogni metodologia, e sono state arricchite ed aggiornate le tabelle attributi contenenti i dati necessari, come i punteggi corrispondenti per tutti i parametri dei diversi metodi, per le operazioni di analisi attraverso le diverse metodologie.

6.2 Determinazione dei parametri e relativi punteggi nel metodo SINTACS

Al fine di costruire le cartografie tematiche relative ai parametri del metodo SINTACS, è necessario suddividere il territorio in esame in aree discrete. Si è scelto di attuare tale suddivisione attraverso una griglia regolare a maglie quadrate da 500 m di lato. L'area studiata risulta, quindi, discretizzata in elementi finiti quadrati (EFQ).

Per la costruzione dei tematismi sono stati utilizzati, principalmente, i software QGIS 3.26.1 ed Excel, con l'ausilio dei database di calcolo associati sui quali sono stati esportati i dati parametrici di interesse relativi ad ogni cella elementare di discretizzazione, mediante i quali sono stati poi determinati i punteggi relativi. Per i parametri, autodepurazione del **Non saturo**, **Tipologia di copertura**, **caratteristiche idrogeologiche dell'Acquifero** e **Conducibilità idraulica**, l'attribuzione del punteggio SINTACS è stata realizzata direttamente su QGIS sulla base della cartografia pedologica o geologica. Questi tipi di carte infatti offrono una zonazione del territorio per aree omogenee, secondo la litologia presente o il tipo di suolo, ed è quindi possibile attribuire il punteggio scelto per un certo parametro ad ognuna di queste aree. Per i parametri **Soggiacenza**, **Infiltrazione efficace** ed **acclività della Superficie topografica** la procedura è stata più complessa, essendo questi parametri variabili con continuità nello spazio. In questo caso il punteggio è stato attribuito cella per cella, a seconda dei valori di

soggiacenza, infiltrazione o pendenza della superficie ricavati da elaborazioni grafiche e numeriche; tali punteggi sono stati poi riferiti a mappe costruite con QGIS, permettendo quindi una costruzione automatizzata delle carte dei punteggi. Questo passaggio è stato reso possibile dalla georeferenziazione dei dati: ad ogni cella infatti, oltre al dato parametrico o al punteggio, sono associate informazioni quali coordinate geografiche, dimensione e numero delle celle, che permettono quindi di stabilire una diretta corrispondenza tra le celle e gli elementi finiti quadrati della griglia di discretizzazione.

Nei paragrafi successivi vengono illustrate in maniera più dettagliata le procedure seguite per la determinazione dei parametri e dei punteggi corrispondenti, in relazione a tutti e 5 gli acquiferi studiati.

6.2.1 Acquifero Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola

L'acquifero del Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola è localizzato a NW dell'abitato di Marsicovetere (Fig.77) ed ha un'area di circa 42 Km².

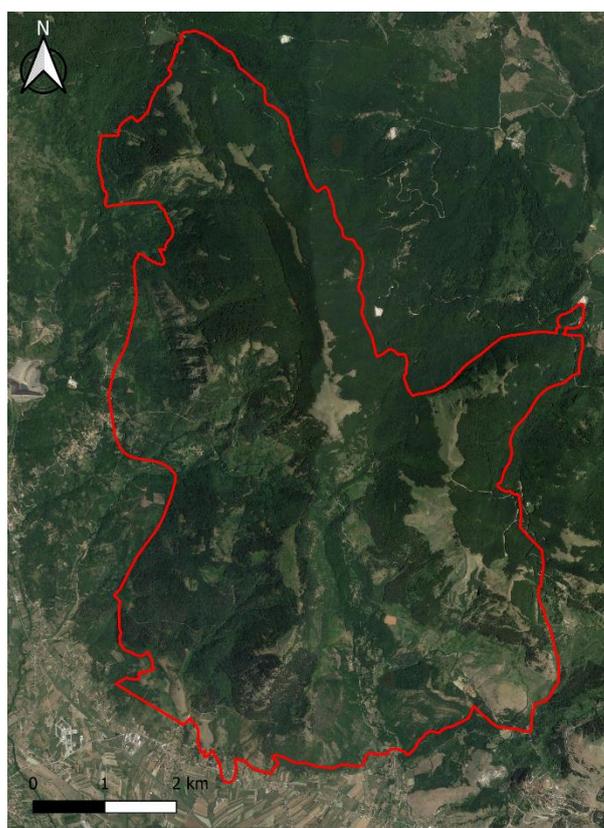


Figura 77. Acquifero Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola.

Prima di procedere alla realizzazione delle carte tematiche relative ai parametri del Metodo SINTACS, sono state digitalizzate le informazioni geologiche e strutturali inerenti l'acquifero (Fig.78). Le informazioni geologiche saranno poi fondamentali nella realizzazione dei successivi tematismi.

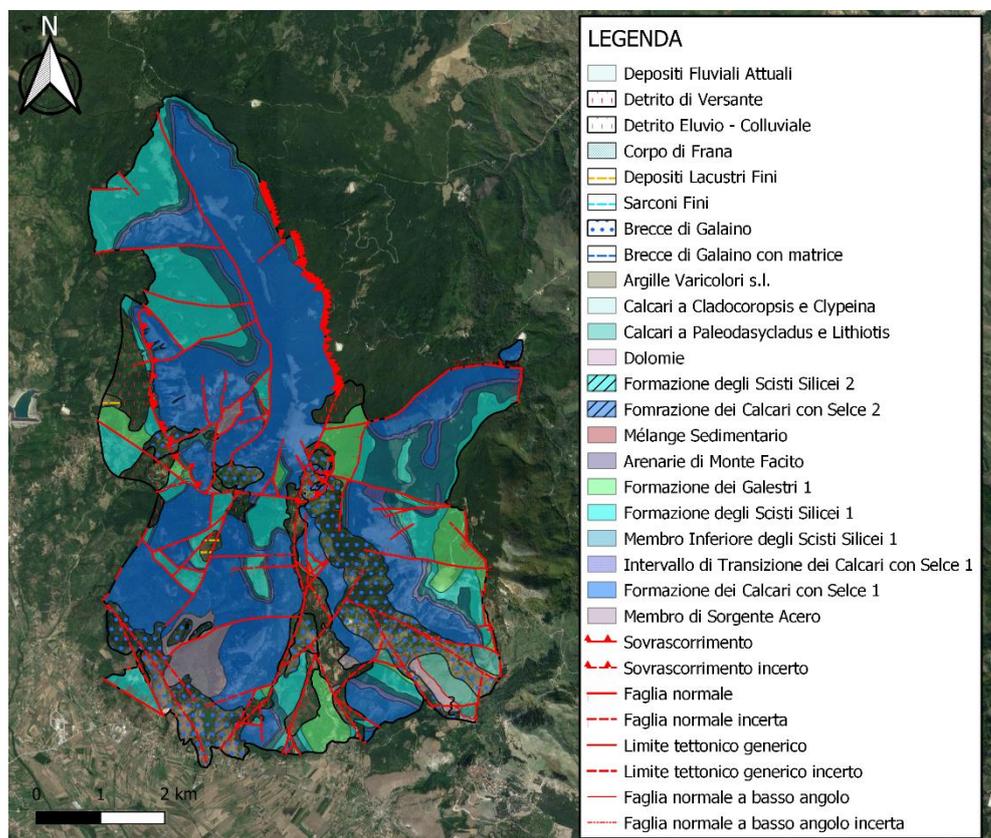


Figura 78. Carta Geologica dell'acquifero di Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola (Palladino G. et al., in preparazione).

6.2.1.1 Soggiacenza (S)

Per la determinazione dei valori di soggiacenza è necessario conoscere, per ogni EFQ, il valore della quota della superficie topografica sul livello medio del mare Z , e quello della superficie piezometrica H ; il valore della soggiacenza S si determina per differenza:

$$S = Z - H \text{ (m)}$$

La quota della superficie topografica è stata ottenuta dai DTM (Digital Terrain Model) (RSDI- Geoportale della Regione Basilicata). Questa tipologia di dati ha una risoluzione della cella elementare di 5m (Fig.79).

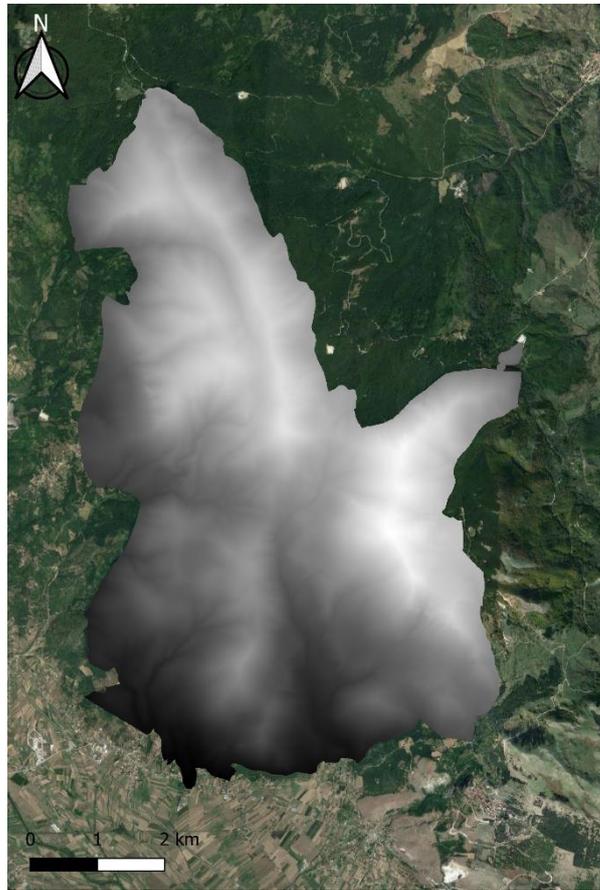


Figura 79. DTM dell'acquifero di Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola.

Per la quota della superficie piezometrica in mancanza di dati diretti, il criterio adottato per la stima si basa sull'individuazione di sorgenti, pozzi e piezometri all'interno dell'acquifero e nella creazione di un buffer di 250m nell'intorno degli stessi. All'interno del buffer è stato assegnato un valore di soggiacenza <50m, mentre nelle aree al di fuori è stato assegnato un valore >50 m. Per poter assegnare questi valori, è stata prodotta una griglia regolare a maglie quadrate (250mX250m). La Figura 80 mostra l'area dell'acquifero discretizzata secondo la maglia descritta in precedenza. È necessario sottolineare che questi valori sono indicativi e sono soggetti ad una certa soggettività dell'operatore e della sua conoscenza del territorio.

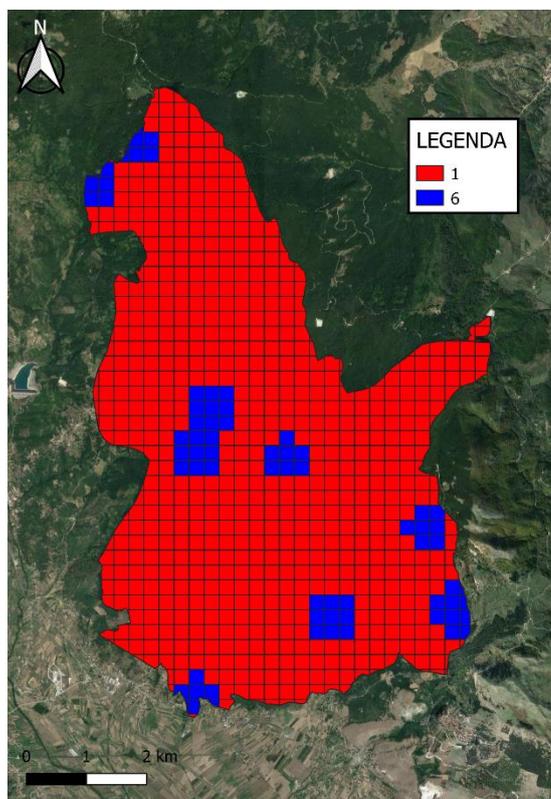


Figura 80. Carta dei punteggi del parametro Soggiacenza per dell’acquifero di Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola.

In Tabella 31 sono rappresentati i punteggi attribuiti ai valori di soggiacenza.

Valori di Soggiacenza	Punteggio
<50m	6
>50 m	1

Tabella 31. Punteggi della Soggiacenza in relazione al valore.

6.2.1.2 Infiltrazione Efficace (I)

La valutazione dell'infiltrazione efficace è stata eseguita sulla base della cartografia geologica e pedologica, necessarie per la determinazione dei coefficienti di infiltrazione potenziale χ , ed in funzione dei valori di precipitazione media annua ed evapotraspirazione calcolati (Cap.5). Tali coefficienti dipendono dalle caratteristiche tessiturali dei suoli, nel caso di coperture abbastanza spesso, o dalla litologia affiorante, nel caso di assenza di suolo. L'infiltrazione efficace rappresenta una delle componenti di ricarica attiva dell'acquifero, cioè quella parte di risorse idrica che si infila in profondità nell'acquifero.

Il fatto che il valore dell'infiltrazione efficace sia elevato comporta sia un'azione di trascinalimento in profondità degli inquinanti idroportati sia un'azione di diluizione.

Nella Carta Pedologica utilizzata (Fig.81) (da basilicatanet.it, in scala 1: 50.000).

La maggior parte dei suoli possiedono una tessitura di tipo franco limosa argillosa e franco argillosa, nel settore settentrionale e meridionale ritroviamo, rispettivamente, una tessitura di tipo franco sabbiosa ed argillosa limosa.

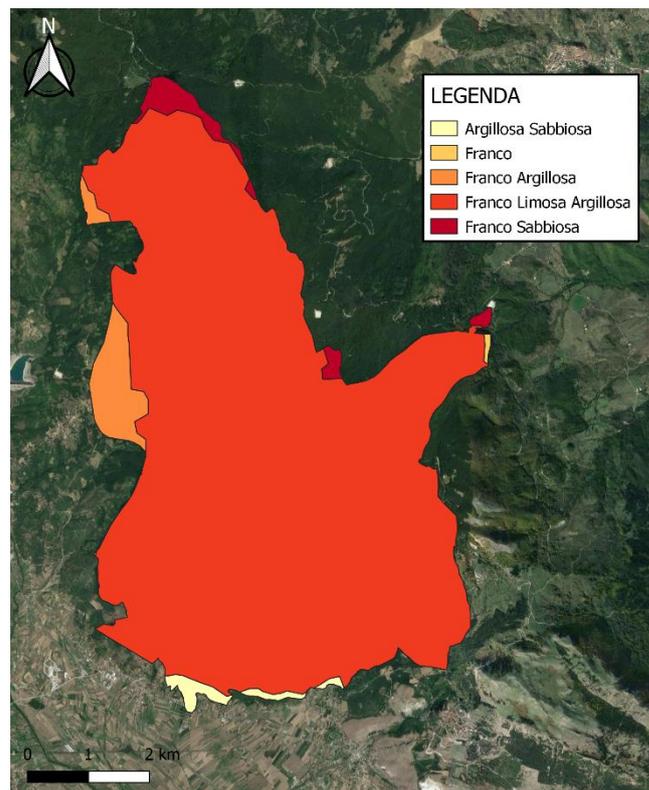


Figura 81. Carta pedologica dell'acquifero di Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola.

La carta geologica utilizzata per l'elaborazione è la carta geologica dell'Alta Val d'Agri (ritagliata rispetto al limite dell'acquifero) (Palladino G. et al., 2022; in preparazione) (Fig.78). Essa è stata confrontata con la carta idrogeologica per trarne informazioni necessarie alle analisi successive (Fig.82).

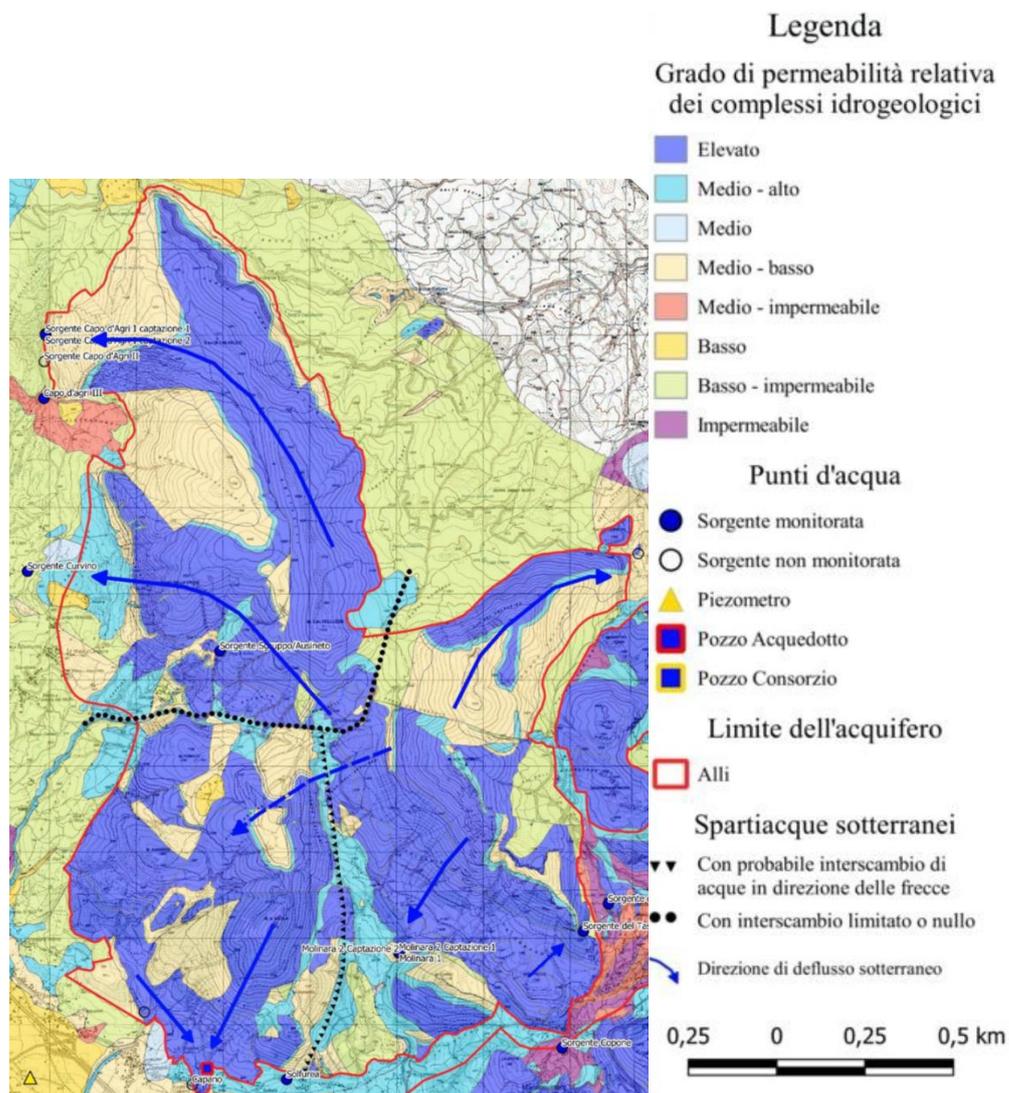


Figura 82. Carta Idrogeologica dell'acquifero di Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola (Grimaldi S. et al., in preparazione).

Il calcolo dell'infiltrazione si effettua sulla base dei coefficienti di infiltrazione potenziale χ che dipendono dalla tessitura dei suoli e dalla litologia. Per la stima del coefficiente χ si è tenuto conto delle seguenti caratteristiche:

1. Tessitura dei suoli, attraverso la quale si individua, per ogni tipo di suolo, un intervallo di valori all'interno del quale ricade il coefficiente χ cercato;

2. Pendenza media dell'area coperta da ogni singola unità pedologica: si attribuiscono valori elevati, all'interno dell'intervallo individuato al punto precedente, per zone pianeggianti; valori basse per zone a forte pendenza dove l'infiltrazione non è favorita;
3. Contenuto di particelle fini (limo, argilla) le quali tendono a far abbassare il valore del coefficiente χ all'interno del range individuato, riducendo, ove presenti, le caratteristiche di permeabilità sia dei suoli che dei complessi idrogeologici.

Per le zone sotto scarsa copertura, la valutazione di χ deriva dall'analisi incrociata tra la carta geologica e la carta dei suoli.

Infine si è proceduto poi con il calcolo dell'infiltrazione potenziale, per ogni cella, secondo le formule:

$$I = \bar{P} * \chi \text{ (mm/a), per zone con potente copertura di suolo;}$$

$$\bar{I} = (\bar{P} - \bar{E}_r) * \chi \text{ (mm/a) per roccia nuda o sotto scarsa copertura.}$$

In questo modo è stato possibile ottenere la carta tematica dell'infiltrazione efficace (Fig.83) dell'acquifero di Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola.

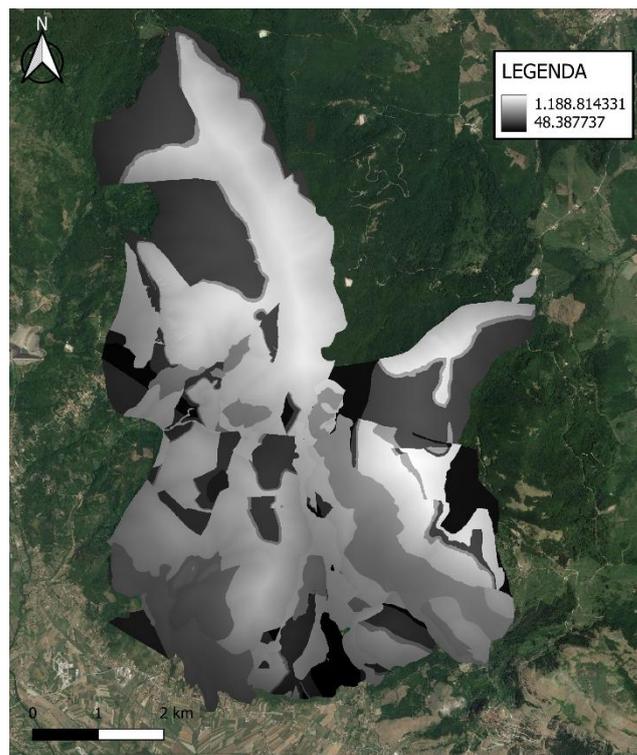


Figura 83. Carta dell'infiltrazione efficace dell'acquifero di Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola.

Dopodiché, è stato necessario attribuire ad ogni valore di infiltrazione efficace il relativo punteggio sulla base del grafico proposto da Civita & De Maio (2000) mostrato in Figura 84.

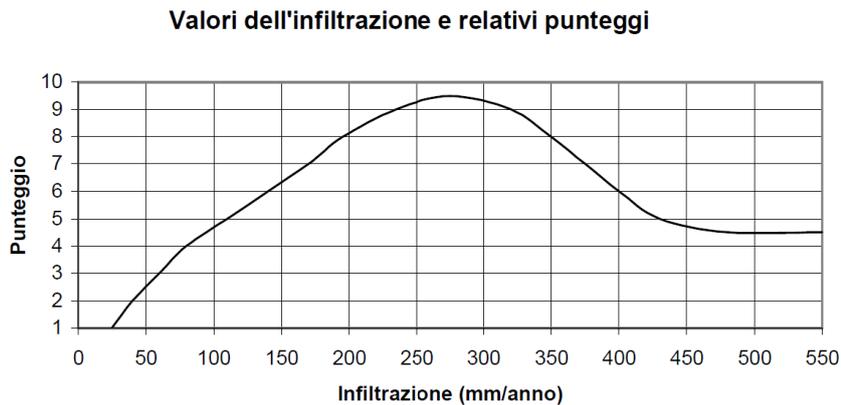


Figura 84. Valori dell'infiltrazione e relativi punteggi nel metodo SINTACS (Civita M., De Maio M., 2000).

Per poter assegnare i punteggi ad ogni cella della carta dell'infiltrazione efficace, è stato necessario ricavare l'equazione rappresentativa della curva. Ciò è stato possibile grazie al software Excel, che ha permesso di ricreare la curva e visualizzarne l'equazione (Fig.85). L'equazione è una polinomiale di 6° grado con un valore del coefficiente di correlazione R quasi pari ad 1.

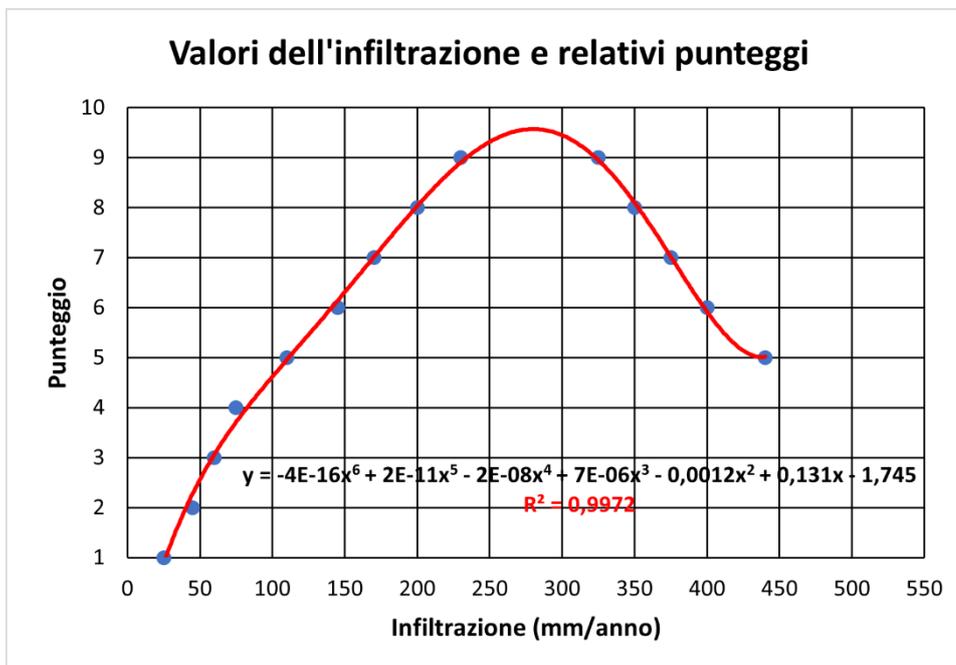


Figura 85. Visualizzazione della curva e della relativa equazione rappresentativa dei punteggi dell'infiltrazione efficace.

Infine per ottenere la carta dell'infiltrazione efficace con i relativi punteggi (Fig.86), attraverso il calcolatore raster di QGIS, l'equazione della curva è stata associata al file raster dei valori dell'infiltrazione efficace.

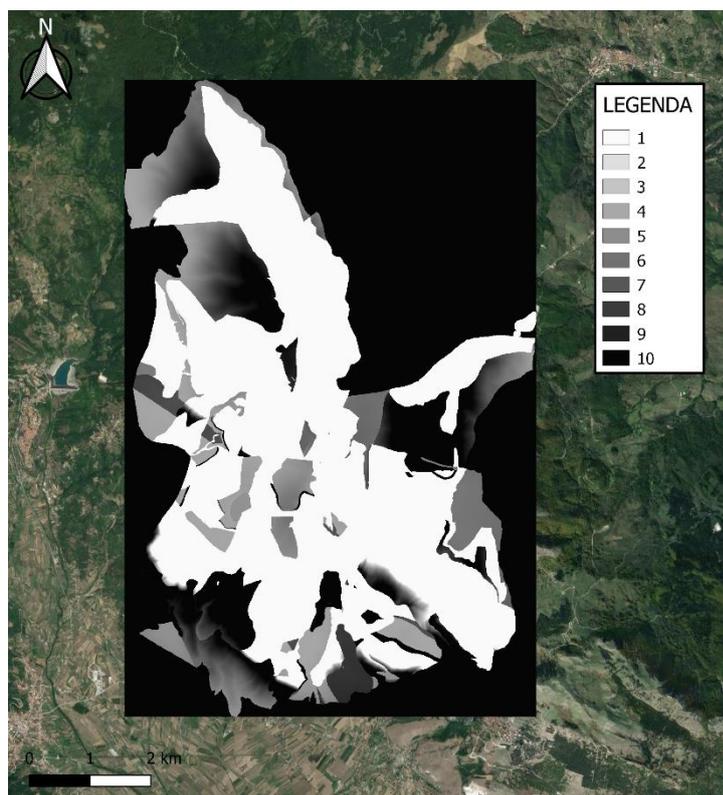


Figura 86. Carta dei punteggi dell'infiltrazione efficace relativa all'acquifero di Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola.

6.2.1.3 Effetto di autodepurazione del Non saturo (N)

Questo parametro è stato valutato sulla base delle litologie affioranti dell'area studiata. In particolare, si è tenuto anche conto della presenza di materiali argillo-limosi che favoriscono l'adsorbimento e quindi l'attenuazione, nei confronti di un discreto numero di sostanze inquinanti. Molta importanza è stata data anche alle zone che presentano fenomeni di carsismo ed alle zone fratturate che favoriscono l'ingresso degli inquinanti velocemente all'interno della falda sotterranea. I valori sono stati assegnati in base alla Tabella 32:

Complessi idrogeologici	N
Alluvioni grossolane	6-9
Calcari carsificati	8-10
Calcari fessurati	4-9
Dolomie fessurate	2-5
Alluvioni medio-fini	3-6

Complessi sabbiosi	4-7
Arenarie, Conglomerati	5-8
Plutoniti fessurate	3-5
Alternanze (flysch)	2-5
Vulcaniti fessurate	5-10
Marne, Argilliti	1-2
Morene grossolane	4-6
Morene medio-fini	2-4
Argille, Limi, Torbe	1-2
Piroclastiti diverse	2-5
Metamorfiti fessurate	2-6

Tabella 32. Intervalli di punteggi per il parametro N (Non saturo) in base alla litologia (Civita M., De Maio M., 2000).

Sulla base dei valori presenti nella tabella, ad ogni litologia presente nell'area sono stati assegnati i relativi punteggi in modo da ottenere la carta dei punteggi relativa al parametro **N** (Fig.87).

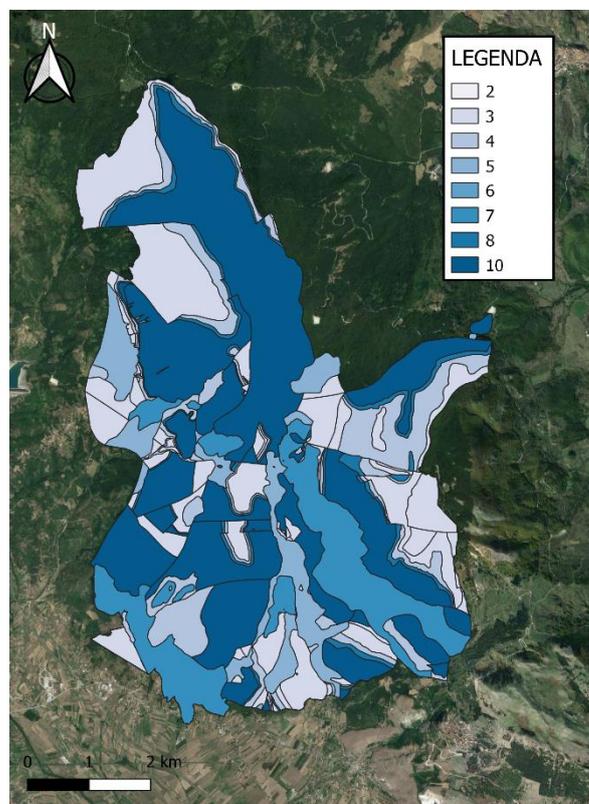


Figura 87. Carta dei punteggi relativi al parametro N (Non saturo) dell'acquifero di Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola.

Come si evince dall'immagine, la maggior parte dell'area presenta punteggi elevati dovuti alla presenza della Formazione dei Calcari

con Selce, i quali presentano delle evidenze di carsismo e di fessurazione; i valori più bassi sono associati alla Formazione degli Scisti Silicei ed alla Formazione dei Galestri.

6.2.1.4 Tipologia di copertura (T)

Il parametro **T** è indicativo della capacità di attenuazione dei suoli; ed è stato valutato sulla base della cartografia pedologica, tenendo conto in particolar modo della tessitura del suolo e seguendo una procedura analoga a quella descritta per il parametro **N**. In questo caso, importante è la presenza di classi tessiturali argillose e limose, le quali hanno capacità d'attenuazione massima e quindi determinano un punteggio molto basso, come mostrato nella Tabella 33, invece per suoli assenti o in presenza di zone evidentemente fratturate abbiamo valori molto alti poiché, in questi casi, la capacità di attenuazione è quasi nulla.

Suoli	T
Sottile o assente	10
Ghiaia pulita	9,5-10
Sabbia pulita	8,9-9,5
Sabbioso	8-8,5
Torba	7,5-8,2
Argillo-sabbioso	6,2-7
Franco sabbioso	5,5-6
Franco-sabbioso-limoso	4,5-5,2
Franco	4-5
Franco-limoso	3,5-4,2
Franco-limoso-argilloso	3-4
Franco-argilloso	2-3
Argillo-limoso	1,4-2
Suolo humifero	1,2-2
Argilloso	1-1,3

Tabella 33. Intervalli di punteggi per il parametro T (Tipologia di copertura) in base alla tessitura dei suoli (Civita M., De Maio M., 2000).

In base ai valori in tabella, sono stati associati i punteggi corrispondenti alle diverse classi tessiturali ed è stato possibile realizzare la carta dei punteggi relativa al parametro **T** (Fig.88).

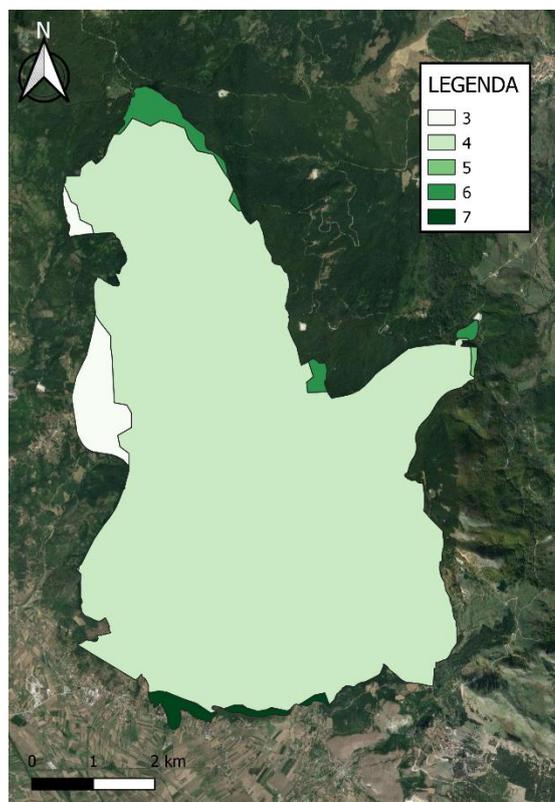


Figura 88. Carta dei punteggi relativi al parametro T (Tipologia di copertura) dell’acquifero di Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola.

Come si può vedere dall’immagine, la quasi totalità del territorio in esame presenta un punteggio basso, dovuto alla forte presenza della classe tessiturale franco limosa argillosa e franco argillosa (come discusso e visto in precedenza).

6.2.1.5 Caratteristiche idrogeologiche dell’Acquifero (A)

Per il parametro **A**, sono essenzialmente le caratteristiche litologiche della roccia costituente l’acquifero a determinare il punteggio. Il procedimento è analogo a quello utilizzato per il parametro **N**. Sulla base della Tabella 34 sono stati assegnati i punteggi alle diverse litologie presenti nell’area.

Complessi idrogeologici	A
Alluvioni grossolane	8-9
Calcari carsificati	9-10
Calcari fessurati	6-9
Dolomie fessurate	4-7
Alluvioni medio-fini	6-8

Complessi sabbiosi	7-9
Arenarie, Conglomerati	4-9
Plutoniti fessurate	2-4
Alternanze (flysch)	5-8
Vulcaniti fessurate	8-10
Marne, Argilliti	1-3
Morene grossolane	6-8
Morene medio-fini	4-6
Argille, Limi, Torbe	1-3
Piroclastiti diverse	4-8
Metamorfiti fessurate	2-5

Tabella 34. Intervalli di punteggi per il parametro A (Caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero) in base alla litologia (Civita M., De Maio M., 2000).

Successivamente è stata generata la carta dei punteggi relativa al parametro **A** (Fig.89), utilizzando come base la carta geologica dell'area.

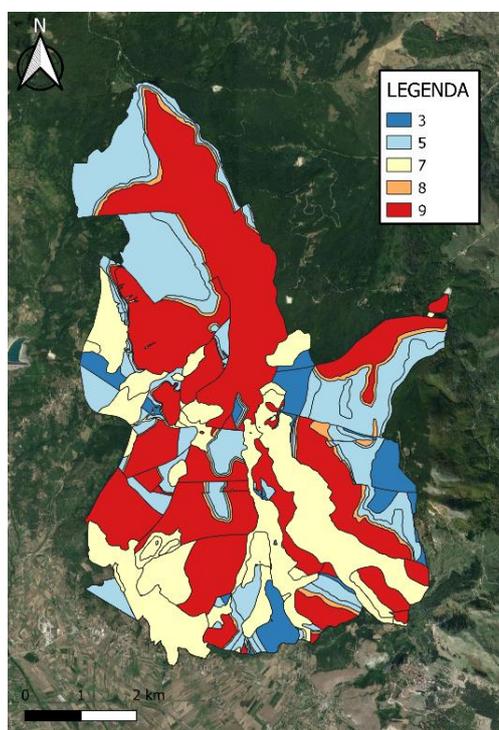


Figura 89. Carta dei punteggi relativi al parametro A (Caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero) dell'acquifero di Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola.

Dall'immagine è evidente una forte presenza di punteggi elevati dovuta alla presenza della Formazione dei Calcari con Selce, delle Breccie e dei depositi non consolidati.

6.2.1.6 Conducibilità idraulica dell'acquifero (C)

Per l'attribuzione del punteggio relativo alla conducibilità idraulica è necessario conoscere l'ordine di grandezza assunto da tale parametro. L'ordine di grandezza è stato valutato sulla base dei valori forniti dal metodo SINTACS, mostrati in Tabella 35, per la stima indiretta di **C**, in funzione del complesso idrogeologico contenete l'acquifero.

Complessi idrogeologici	C (m/s)
Ghiaie	$10^{-3} - 0$
Sabbie pulite	$10^{-6} - 10^{-2}$
Sabbie limose	$10^{-7} - 10^{-3}$
Limi	$10^{-10} - 10^{-5}$
Depositi glaciali	$10^{-12} - 10^{-6}$
Argille	$10^{-13} - 10^{-9}$
Piroclastiti	$10^{-10} - 10^{-5}$
Argilliti-Marne	$10^{-13} - 10^{-9}$
Dolomie	$10^{-9} - 10^{-6}$
Calcari e Marmi	$10^{-9} - 10^{-2}$
Arenarie	$10^{-10} - 10^{-6}$
Vulcaniti	$10^{-12} - 10^{-2}$
Rocce cristalline	$10^{-13} - 10^{-4}$

Tabella 35. Intervalli di punteggi per il parametro C (Conducibilità idraulica) in base alla tessitura dei suoli (Civita M., De Maio M., 2000).

In seguito, ad ogni litologia presente nell'area è stato attribuito il corrisponde valore di conducibilità idraulica ed in funzione del grafico in Figura 90, sono stati assegnati i relativi punteggi.

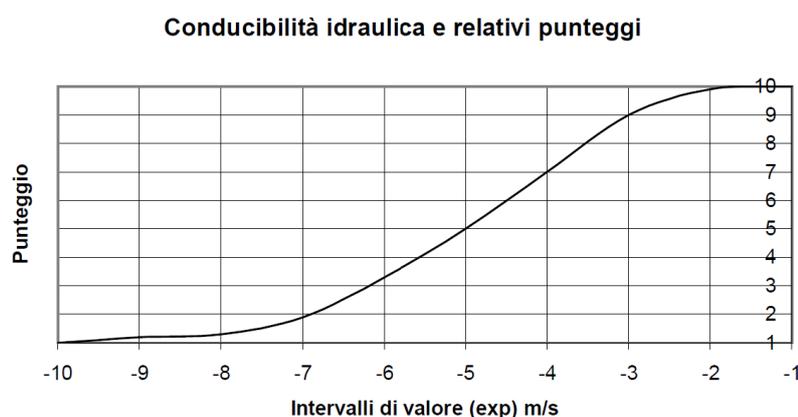


Figura 90. Valori della conducibilità idraulica e relativi punteggi nel metodo SINTACS (Civita M., De Maio M., 2000).

Una volta assegnati tutti i punteggi corrispondenti, è stato possibile realizzare la carta dei punteggi del parametro **C** (Fig.91).

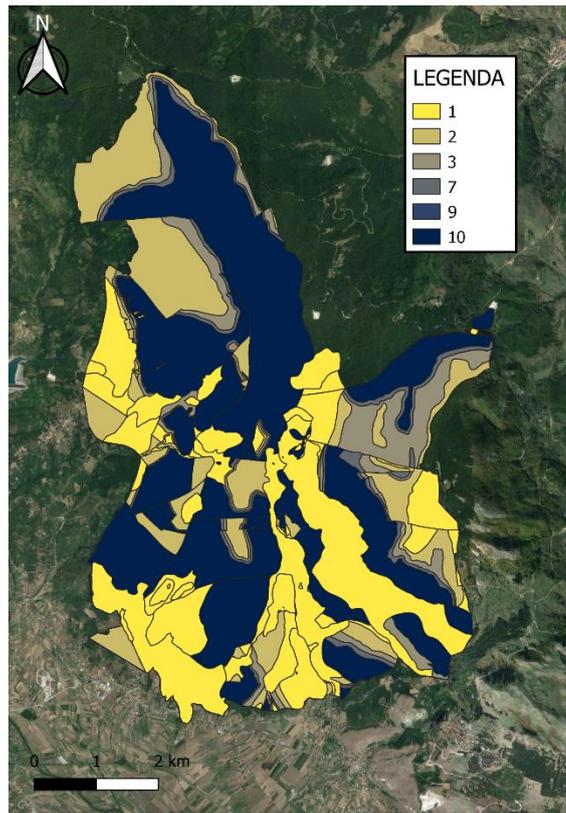


Figura 91. Carta dei punteggi relativi al parametro C (Conducibilità idraulica) dell’acquifero di Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola.

Alti punteggi sono stati assegnati alle aree in cui affiora la Formazione dei Calcari con Selce, mentre bassi punteggi alle aree in cui affiora la Formazione dei Calcari con Selce e la Formazione dei Galestri.

6.2.1.7 Acclività della Superficie topografica (S)

Per la valutazione di questo parametro è stato necessario costruire una carta divisa per classi di pendenza, elaborata a partire dal modello digitale del terreno (DTM); si è ottenuta in questo modo una carta in cui ad ogni EFQ corrisponde un determinato valore di pendenza espresso in percentuale (Fig.92).

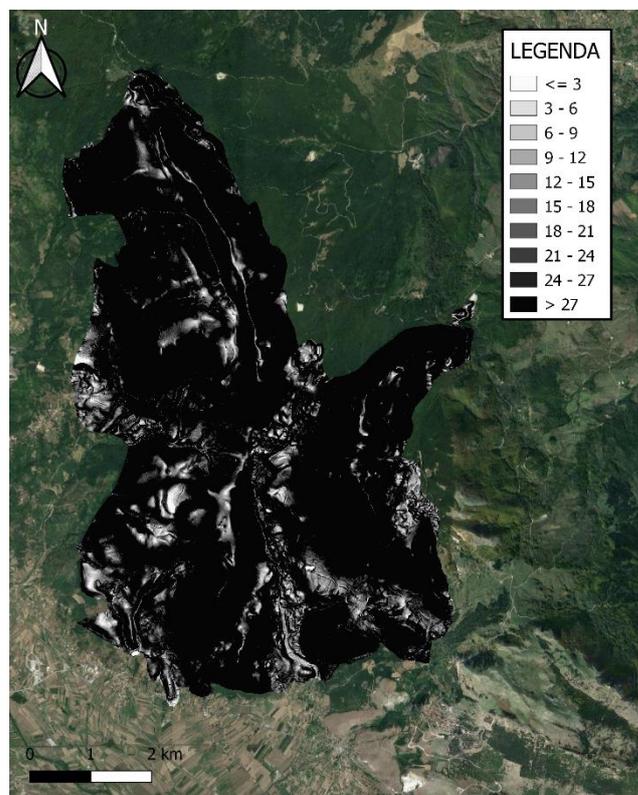


Figura 92. Carta della pendenza (S) dell’acquifero di Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola.

Successivamente, è stato necessario attribuire ad ogni valore di pendenza il relativo punteggio sulla base del grafico proposto da Civita & De Maio (2000) mostrato in Figura 93.

Classi di pendenza e punteggio relativo

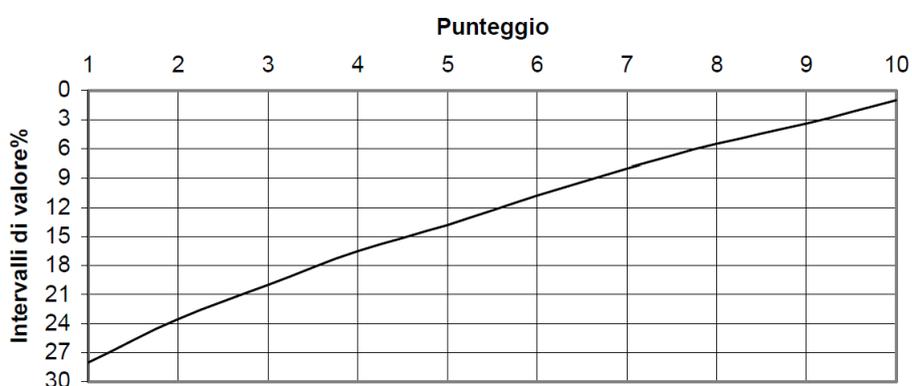


Figura 93. Valori di pendenza (S) e relativi punteggi nel metodo SINTACS (Civita M., De Maio M., 2000).

Per poter assegnare i punteggi ad ogni cella della carta della pendenza, è stato necessario ricavare l’equazione rappresentativa della curva. Ciò è stato possibile grazie al software Excel, che ha

permesso di ricreare la curva e visualizzarne l'equazione (Fig.94). L'equazione è una polinomiale di 6° grado con un valore del coefficiente di correlazione R molto prossimo ad 1.

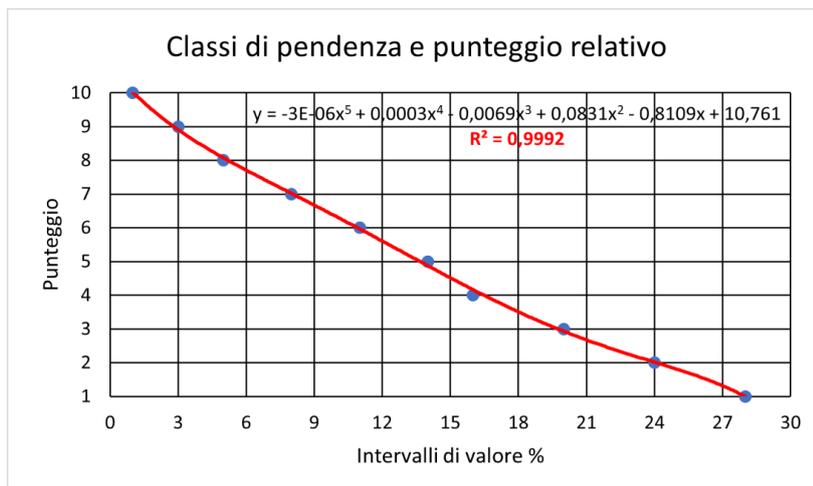


Figura 94. Visualizzazione della curva e della relativa equazione rappresentativa dei punteggi della pendenza (S).

Per poter ricavare l'equazione è stato necessario invertire gli assi X ed Y. Infine per ottenere la carta della pendenza con i relativi punteggi (Fig.95), attraverso il calcolatore raster di QGIS, l'equazione della curva è stata associata al file raster dei valori della pendenza.

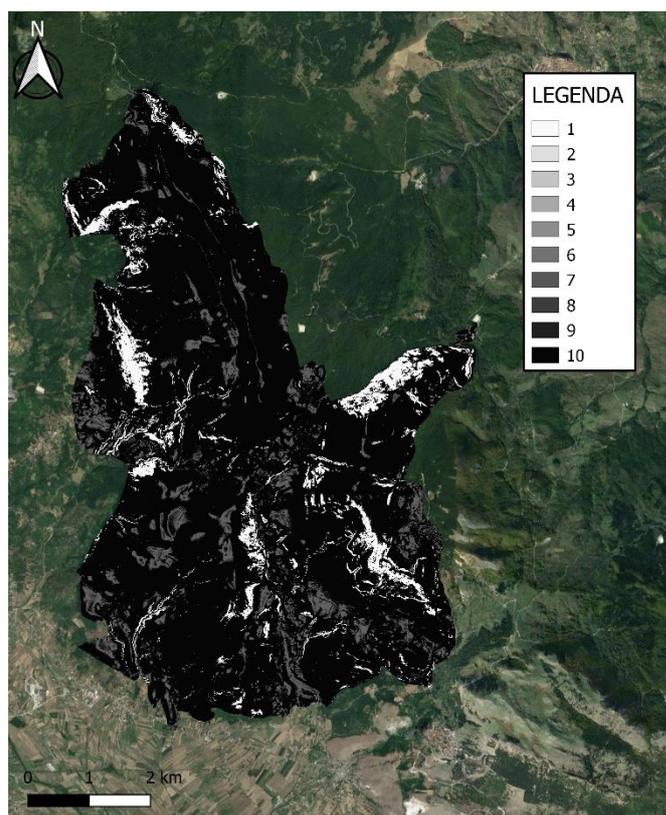


Figura 95. Carta dei punteggi (S) della pendenza relativa all'acquifero di Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola.

6.2.1.8 Carta della Vulnerabilità Intrinseca

La valutazione finale della vulnerabilità intrinseca ha reso necessario trasformare in raster tutte le carte tematiche, usando come parametro di rasterizzazione il valore dei punteggi assegnati in precedenza. Prima di procedere alla realizzazione della Carta della Vulnerabilità Intrinseca, è necessario individuare lo scenario di impatto da attribuire alla nostra area, e di conseguenza conoscere i relativi pesi da assegnare ai parametri del modello. Sulla base di Civita & De Maio (2000), nella Tabella 36 sono rappresentate le stringhe di pesi moltiplicatori relative ai differenti scenari.

PARAMETRO	IN	IR	D	C	F
S	5	5	4	2	3
I	4	5	4	5	3
N	5	4	4	1	3
T	3	5	2	3	4
A	3	3	5	5	4
C	3	2	5	5	5
S	3	2	2	5	4

Tabella 36. Punteggi relativi alle stringhe di pesi moltiplicatori (Civita & De Maio, 2000).

Per l'acquifero di Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola è stato scelto di utilizzare uno scenario "Carsico" sull'intera area. Quindi, per ciascun elemento della griglia di discretizzazione dell'area sono stati calcolati i pesi relativi ai sette parametri del metodo.

L'indice di vulnerabilità intrinseca **I**, per ciascun elemento finito quadrato della maglia, si ottiene con la sommatoria:

$$I_{SINTACS} = \sum_{i=1}^7 P_i * W_i$$

In cui **P** è il punteggio di ciascuno dei sette parametri considerati dal metodo e **W** il peso relativo della stringa prescelta. Il valore dell'indice semplice, che varia da un minimo pari a 26 ad un massimo di 260, viene poi normalizzato in un intervallo di valori compresi tra 0 e 100 per rendere più agevole la lettura e la restituzione cartografica secondo delle classi di vulnerabilità intrinseca.

L'indice normalizzato si calcola con la relazione:

$$IS_{NO} = \frac{IS_{GR} - IS_{MIN}}{IS_{MAX} - IS_{MIN}} * 100$$

Dove IS_{GR} è l'indice SINTACS grezzo, cioè quello calcolato con la sommatoria dei prodotti tra punteggi e pesi, $IS_{MIN} = 26$, $IS_{MAX} = 260$.

Le classi di vulnerabilità (Tab.37) sono state individuate attraverso un'analisi statistica basata sul confronto delle vulnerabilità calcolate per oltre 500 aree campione con il metodo SINTACS e con il Metodo-base GNDCI-CNR.

Grado di vulnerabilità	Intervallo di punteggio
Bassissima (Bb)	0-24
Bassa (B)	25-35
Media (M)	36-49
Alta (A)	50-69
Elevata (E)	70-79
Elevatissima (Ee)	80-100

Tabella 37. Intervalli di punteggio assegnati dal metodo SINTACS ai vari gradi di vulnerabilità (Civita & De Maio, 2000).

Il risultato di queste elaborazioni è una carta della vulnerabilità intrinseca (Fig.96) dalla quale si evince che la quasi totalità del territorio ha una vulnerabilità all'inquinamento elevatissima ed elevata. Ciò mette in luce la fragilità del territorio ed il pericolo che un'inquinante possa compromettere la qualità delle acque di falda dell'acquifero molto facilmente.

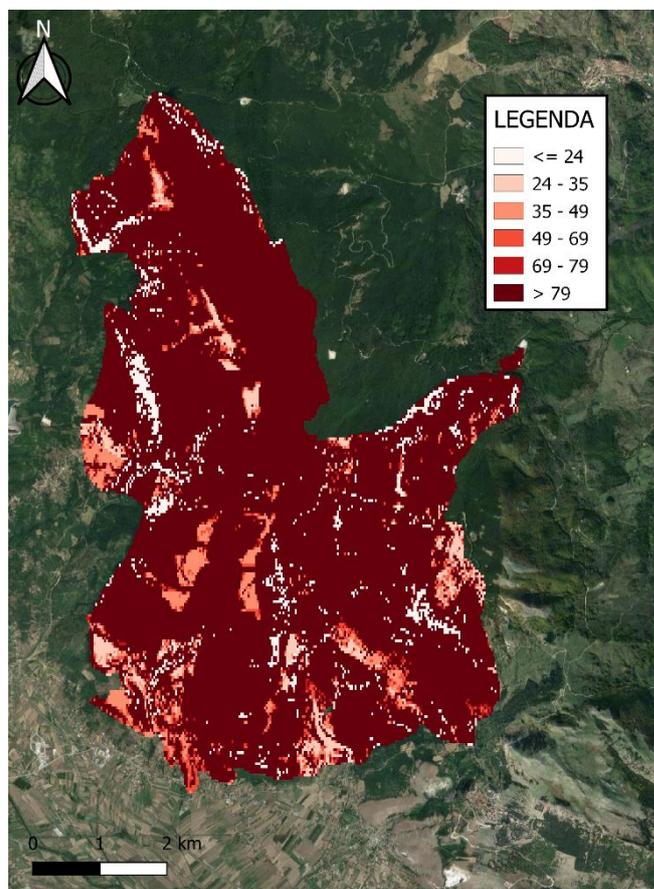


Figura 96. Carta della vulnerabilità intrinseca dell'acquifero di Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola ottenuta con la stringa dei pesi dello scenario "carsismo".

6.2.2 Acquifero Volturno Est

L'acquifero Volturino Est (Fig.97) ha un'estensione di circa 5 Km².



Figura 97. Acquifero Volturino Est.

Anche per questo acquifero, prima di procedere alla realizzazione delle carte tematiche relative ai parametri del Metodo SINTACS, sono state digitalizzate le informazioni geologiche e strutturali (Fig.101). Le informazioni geologiche saranno poi di fondamentale importanza nella realizzazione dei successivi tematismi, e verranno confrontate con la carta idrogeologica dell'area (Fig.98) per ottenere informazioni utili per le future analisi.

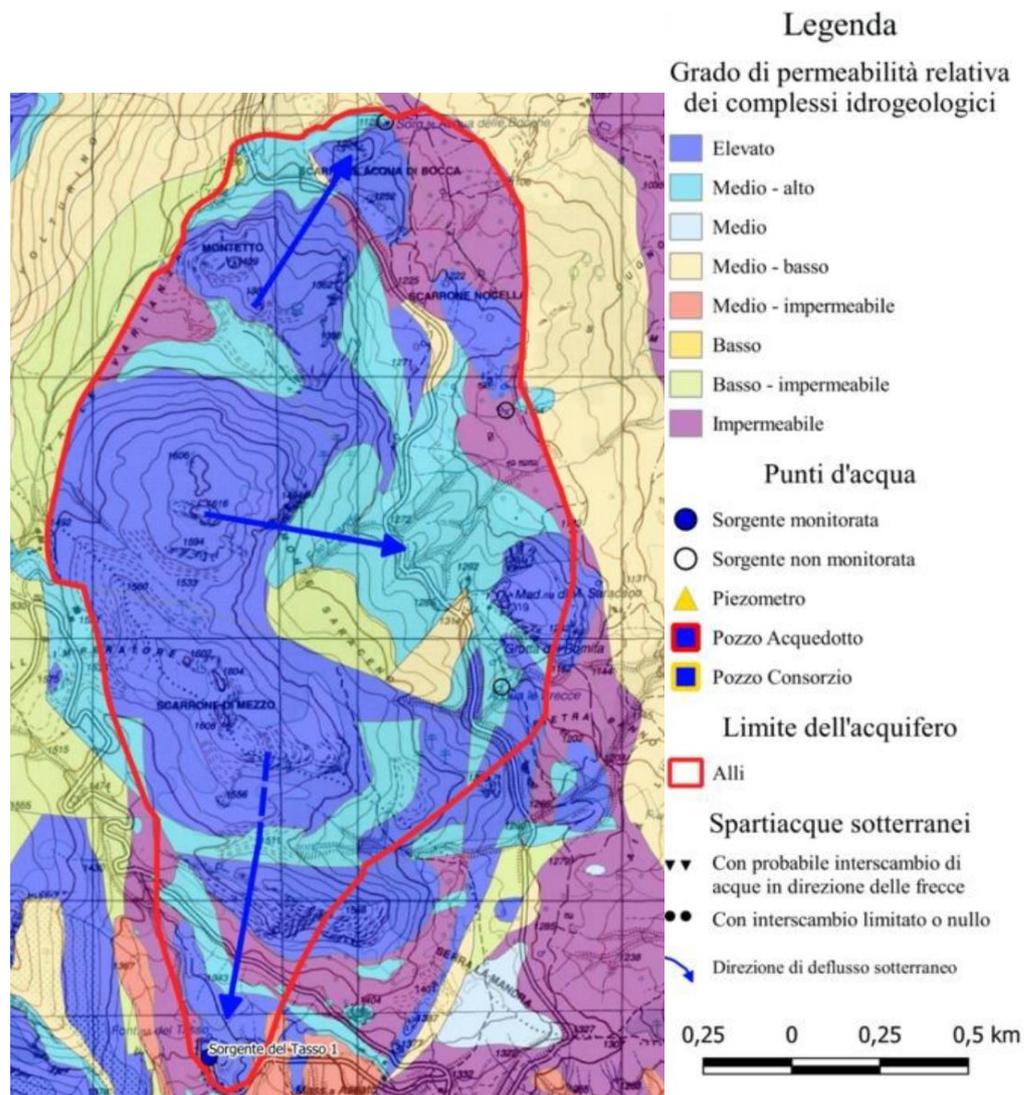


Figura 98. Carta Idrogeologica dell'acquifero Volturino Est (Grimaldi S. et al., in preparazione).

6.2.2.1 Soggiacenza (S)

Per il calcolo della soggiacenza, è stata utilizzata l'identica procedura adoperata per l'acquifero di Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola. Come primo passaggio, si è ottenuto il modello digitale del terreno (Fig.99).

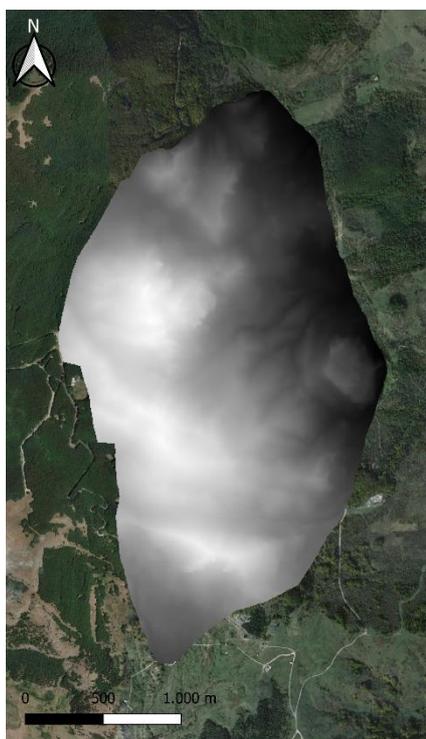


Figura 99. DTM dell'acquifero Volturino Est.

Per la quota della superficie piezometrica, in mancanza di dati, si è utilizzata la stessa caratterizzazione utilizzata precedentemente; ovvero assegnando un valore di soggiacenza <50m, in un'intorno di 250m dai punti d'acqua, ed assegnando un valore >50m, nelle restanti aree. In questo modo è stato possibile ottenere la carta tematica (in forma vettoriale) della soggiacenza (Fig.100).

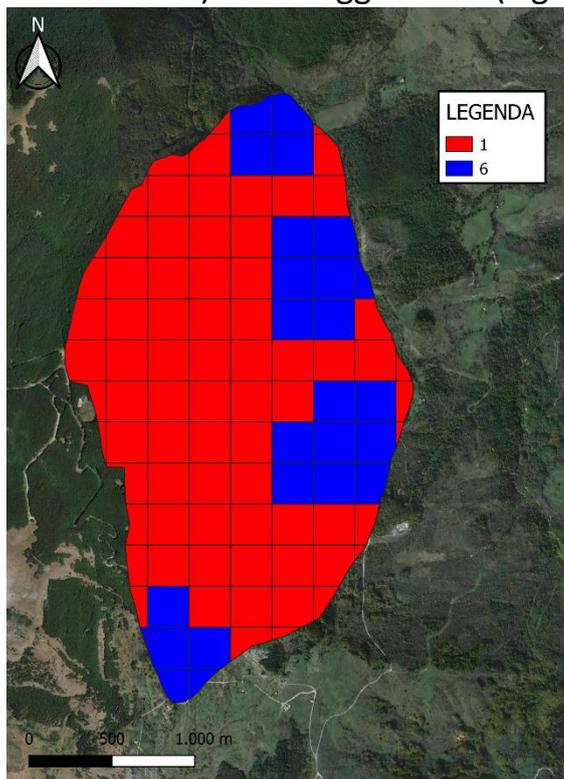


Figura 100. Carta dei punteggi del parametro Soggiacenza per dell'acquifero Volturino Est.

Nella seguente Tabella 38, sono rappresentati i punteggi attribuiti ai valori di soggiacenza.

Valori di Soggiacenza	Punteggio
<50m	6
>50 m	1

Tabella 38. Punteggi della Soggiacenza in relazione al valore.

6.2.2.2 Infiltrazione Efficace (I)

Come per l'acquifero precedente, il calcolo dell'infiltrazione efficace necessita della carta geologica (Fig.101) e della carta pedologica.

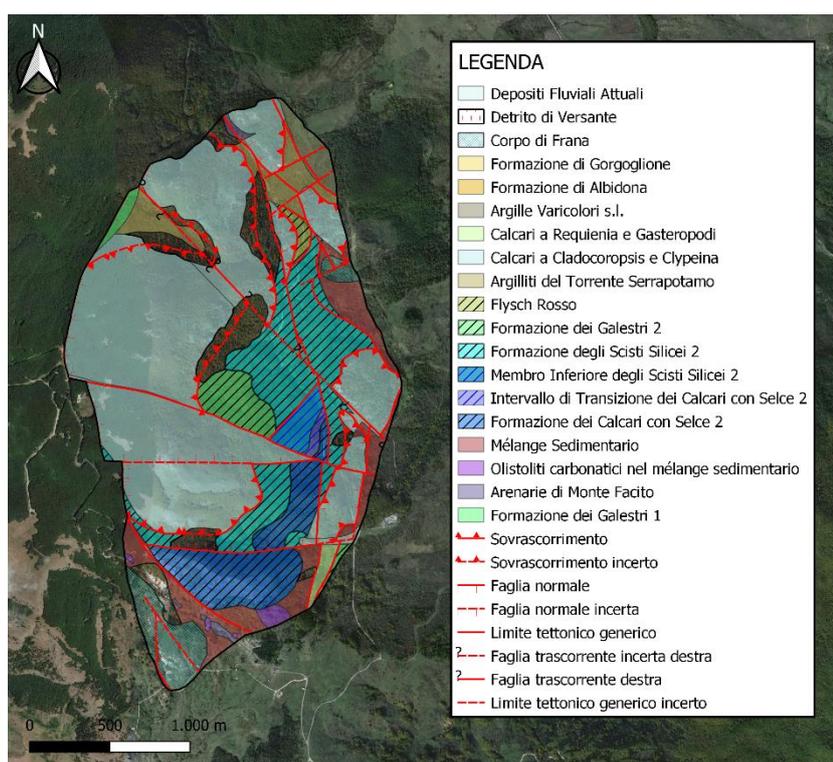


Figura 101. Carta Geologica dell'acquifero Volturino Est (Palladino G. et al., in preparazione).

Dalla carta pedologica (da Basilicata.net, in scala 1: 50.000) in Figura 102, si evince che la quasi totalità dell'area presenta una tessitura franco limosa argillosa.

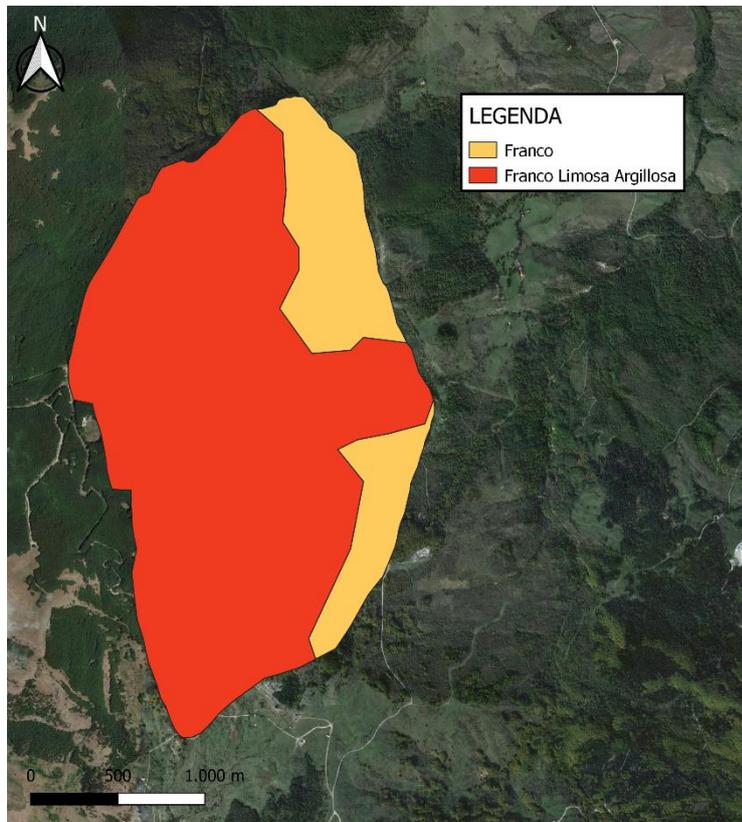


Figura 102. Carta pedologica dell'acquifero Volturino Est.

La carta geologica e pedologica sono state necessarie per la stima dei coefficienti di infiltrazione potenziale χ , utili per la successiva realizzazione della carta dell'infiltrazione efficace (Fig.103).

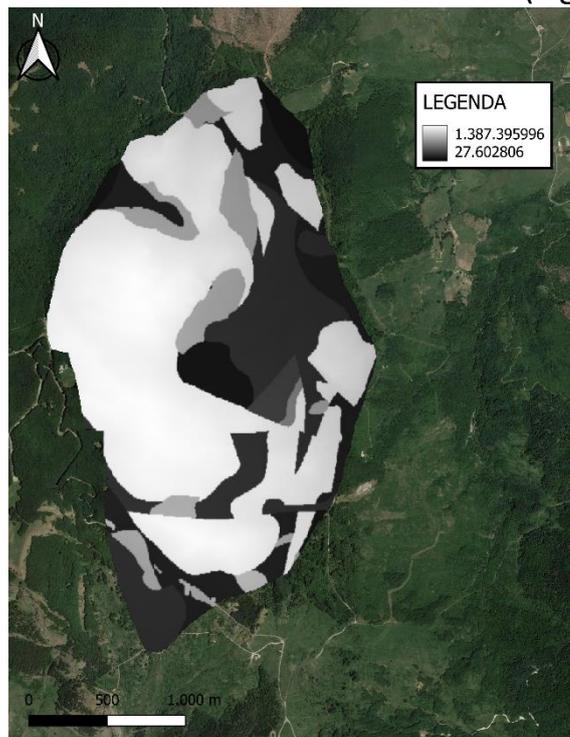


Figura 103. Carta dell'infiltrazione efficace dell'acquifero Volturino Est.

Successivamente dal grafico proposto da Civita & De Maio (2000), è stata ricavata l'equazione rappresentante la curva che correla i valori di infiltrazione ai relativi punteggi (Fig.104).

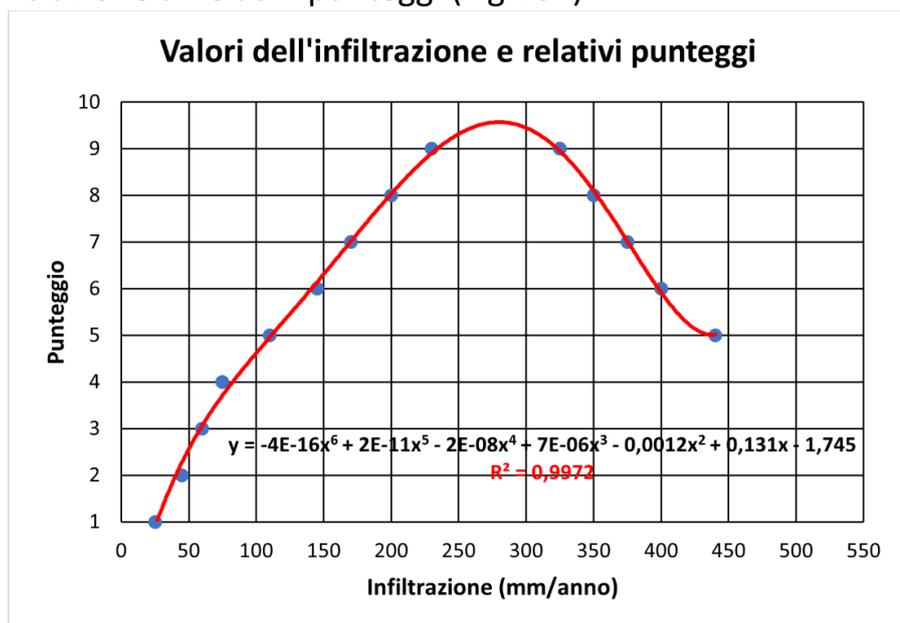


Figura 104. Visualizzazione della curva e della relativa equazione rappresentativa dei punteggi dell'infiltrazione efficace.

Per ottenere la carta dei punteggi dell'infiltrazione efficace (Fig.105), l'equazione della curva precedentemente ricavata è stata associata al file raster dei valori di infiltrazione efficace.

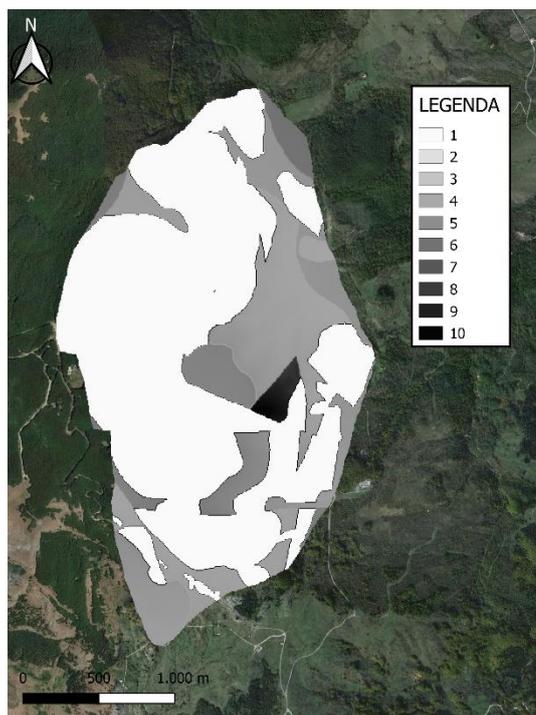


Figura 105. Carta dei punteggi dell'infiltrazione efficace relativa all'acquifero Volturino Est.

6.2.2.3 Effetto di autodepurazione del Non saturo (N)

Come per l'acquifero precedente, la valutazione di questo parametro si basa sulle litologie affioranti nell'area. La tabella di valori è la stessa utilizzata in precedenza (Tab.32).

Ad ogni litologia dell'area è stato associato il corrispondente valore, in modo da ottenere la carta dei punteggi del parametro non saturo (Fig.106).

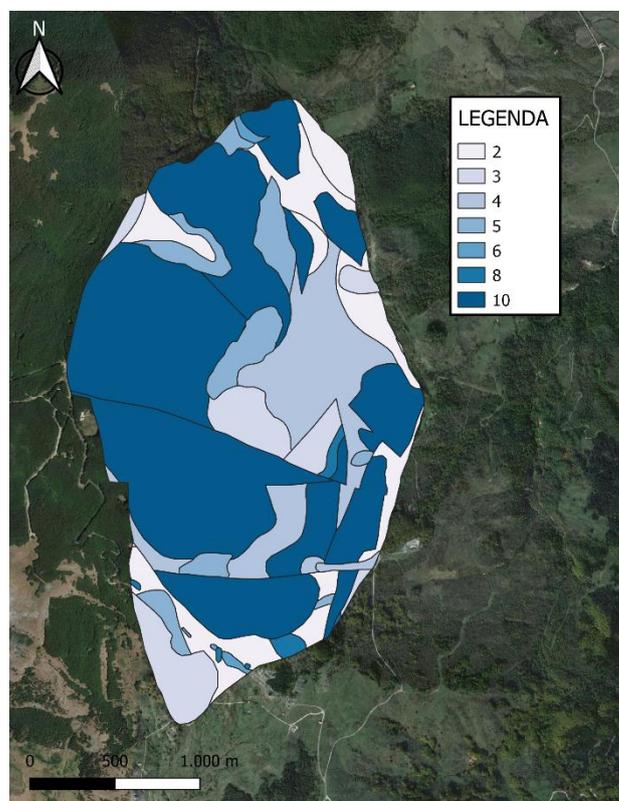


Figura 106. Carta dei punteggi relativi al parametro N (Non saturo) dell'acquifero Volturino Est.

L'area è caratterizzata da punteggi molto elevati, dovuti alla presenza dei Calcari a Cladocoropsis e Clypeina ed alla Formazione dei Calcari con Selce 2. I valori più bassi sono associati alle formazioni terrigene.

6.2.2.4 Tipologia di copertura (T)

Per il parametro T, si è tenuto conto della tessitura dei suoli che è stata ricavata dalla carta pedologica. Individuata la classe tessiturale, sulla base della Tabella 33 si sono individuati i relativi punteggi.

Ad ogni classe tessiturale presente nell'area è stato associato il corrispondente punteggio, in modo da ottenere la carta dei punteggi della tipologia di copertura (Fig.107).

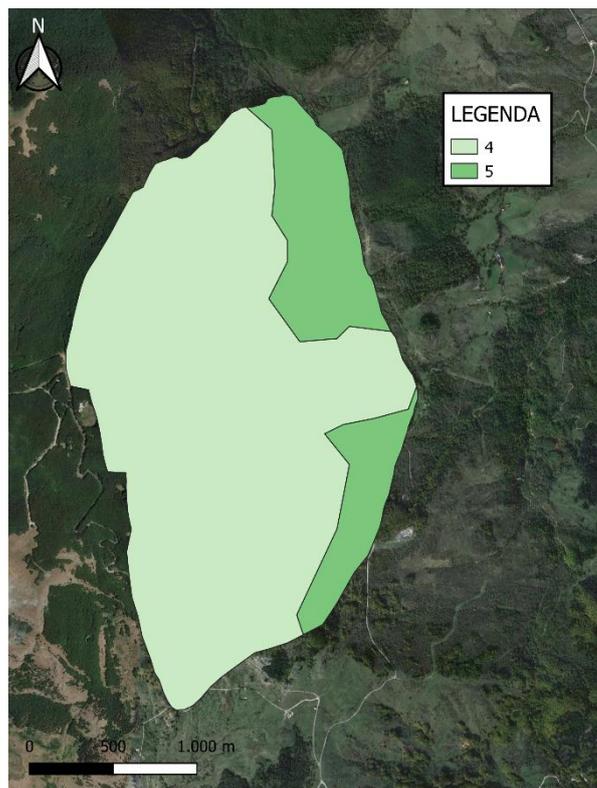


Figura 107. Carta dei punteggi relativi al parametro T (Tipologia di copertura) dell'acquifero Volturino Est.

Dall'immagine si nota che la maggior parte del territorio presenta un valore basso, ciò è collegato alla presenza preponderante della classe tessiturale franco limosa argillosa (come visto anche in precedenza).

6.2.2.5 Caratteristiche idrogeologiche dell'Acquifero (N)

Come per il parametro **N**, la caratterizzazione di questo parametro si basa sulle caratteristiche litologiche della roccia contenente l'acquifero. Tutti i punteggi sono messi in evidenza nella Tabella 34.

Ad ogni litologia affiorante nell'area è stato assegnato il punteggio corrispondente, ottenendo così la carta dei punteggi delle caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero (Fig.108).

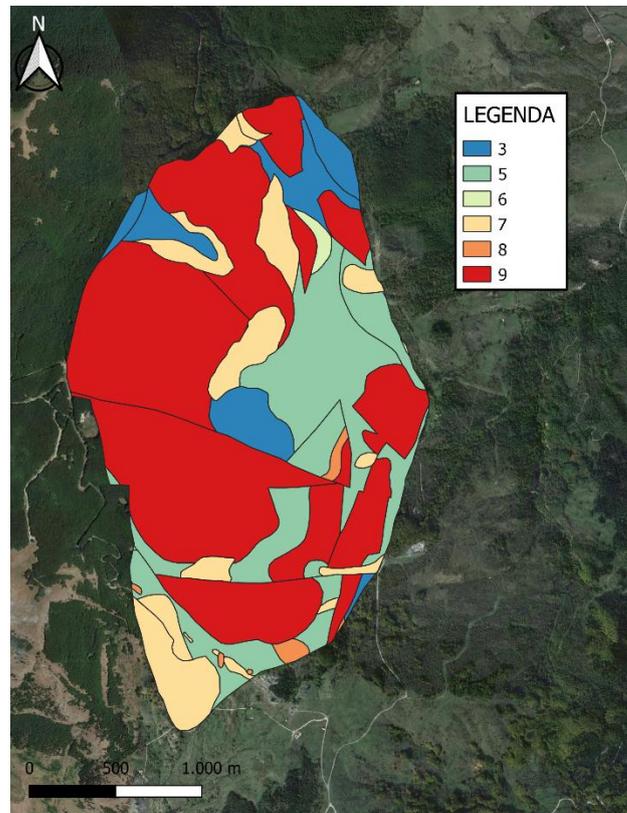


Figura 108. Carta dei punteggi relativi al parametro A (Caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero) dell'acquifero Volturino Est.

Come per il parametro **N**, la maggior parte del territorio risulta avere un punteggio elevato dovuto alla forte presenza dei Calcari a Cladocoropsis e Clypeina ed alla Formazione dei Calcari con Selce 2. Valori bassi invece corrispondono a formazioni terrigene.

6.2.2.6 Conducibilità idraulica dell'acquifero (C)

Per la valutazione del punteggio, è stato necessario conoscere l'ordine di grandezza assunto dalla conducibilità idraulica; la sua valutazione è avvenuta attraverso la Tabella 35, la quale assegna ad ogni complesso idrogeologico il corrispondente ordine di grandezza. Per l'assegnazione dei punteggi si è fatto riferimento alla Figura 109, proposta da Civita & De Maio nel 2000.

Conducibilità idraulica e relativi punteggi

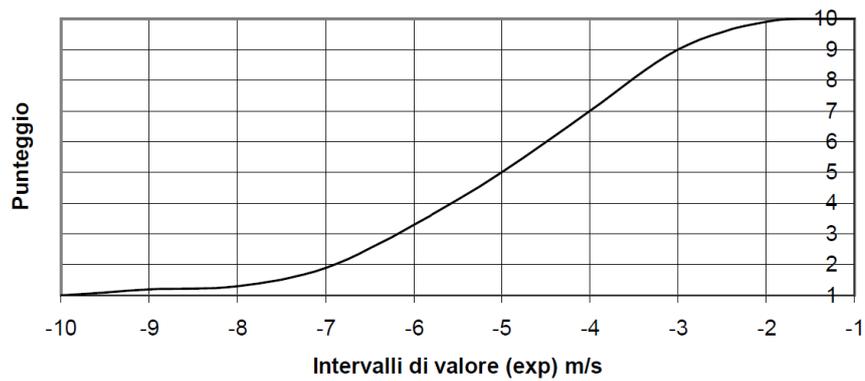


Figura 109. Valori della conducibilità idraulica e relativi punteggi nel metodo SINTACS (Civita M., De Maio M., 2000).

Dopo aver ricavato i punteggi, sono stati assegnati alle corrispondenti litologie in modo da ottenere la carta dei punteggi della conducibilità idraulica (Fig.110).

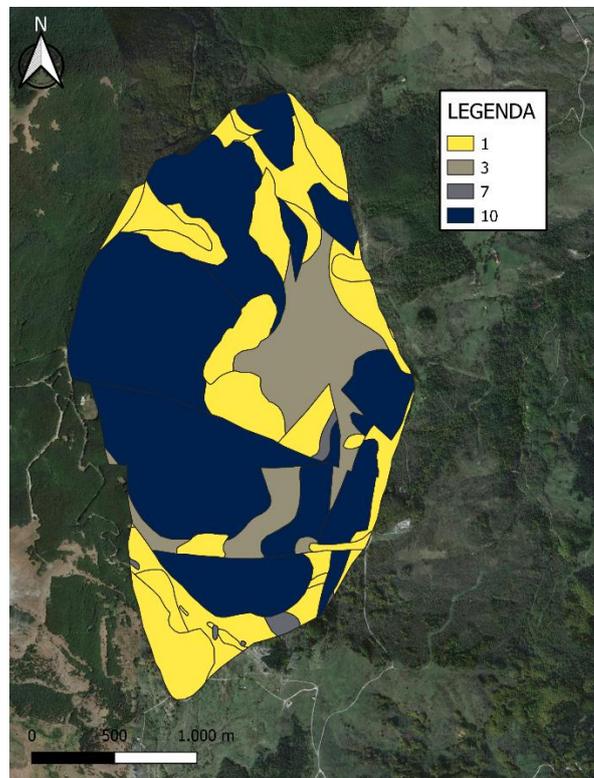


Figura 110. Carta dei punteggi relativi al parametro C (conducibilità idraulica) dell'acquifero Volturino Est.

Anche in questo caso, gli alti valori assunti dal parametro C, sono dovuti alla presenza dei Calcari a Cladocoropsis e Clypeina ed alla formazione dei Calcari con Selce 2.

6.2.2.7 Acclività della Superficie topografica (S)

La valutazione di questo parametro, ha richiesto l'elaborazione della carta della pendenza ottenuta a partire dal modello digitale del terreno (DTM). La carta delle pendenze (Fig.111) esprime i valori in percentuale.

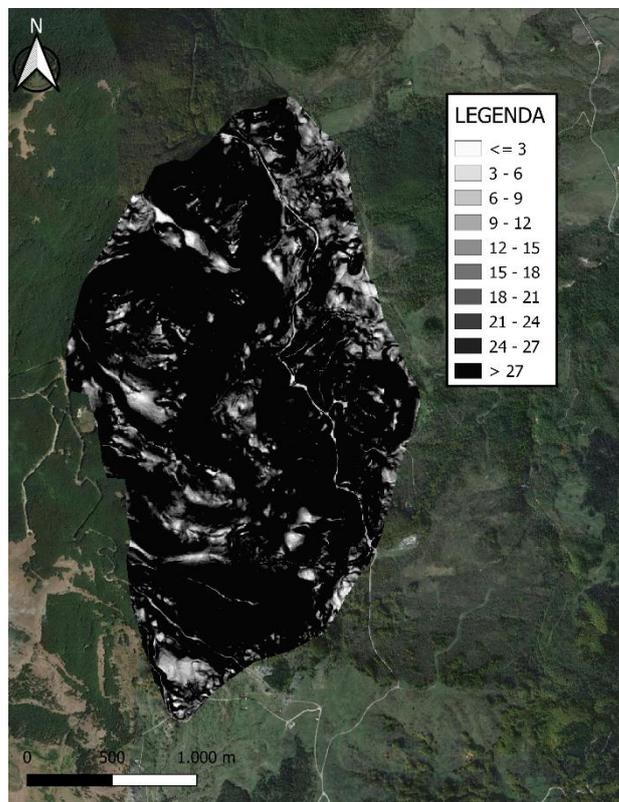


Figura 111. Carta della pendenza (S) dell'acquifero Volturino Est.

In seguito, dal grafico proposto da Civita & De Maio (2000) è stata ricavata l'equazione della curva (Fig.112) che rappresenta la relazione tra valori di pendenza e punteggi.

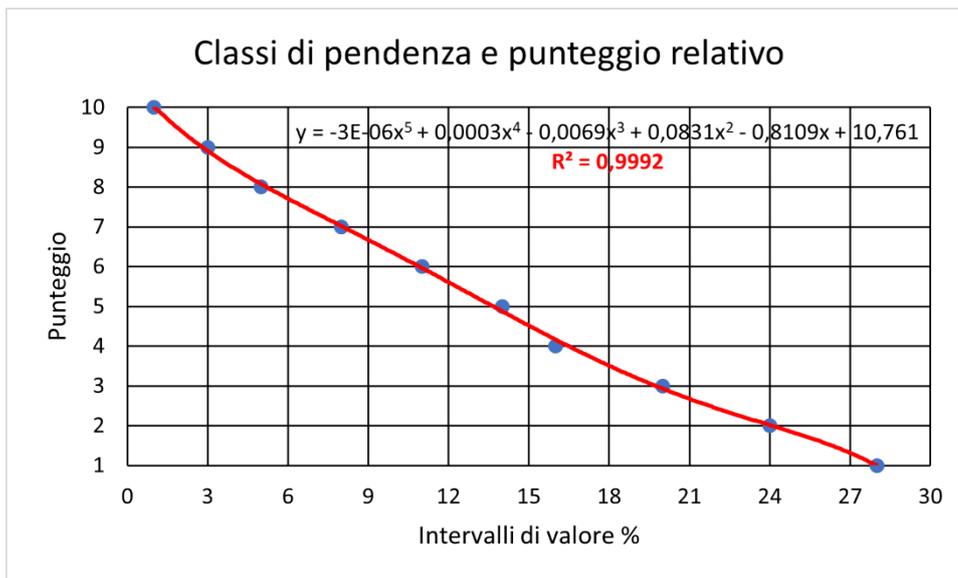


Figura 112. Visualizzazione della curva e della relativa equazione rappresentativa dei punteggi della pendenza (S).

Infine, per ottenere la carta dei punteggi della pendenza (Fig.113), l'equazione ricavata è stata associata al file raster dei valori della pendenza.

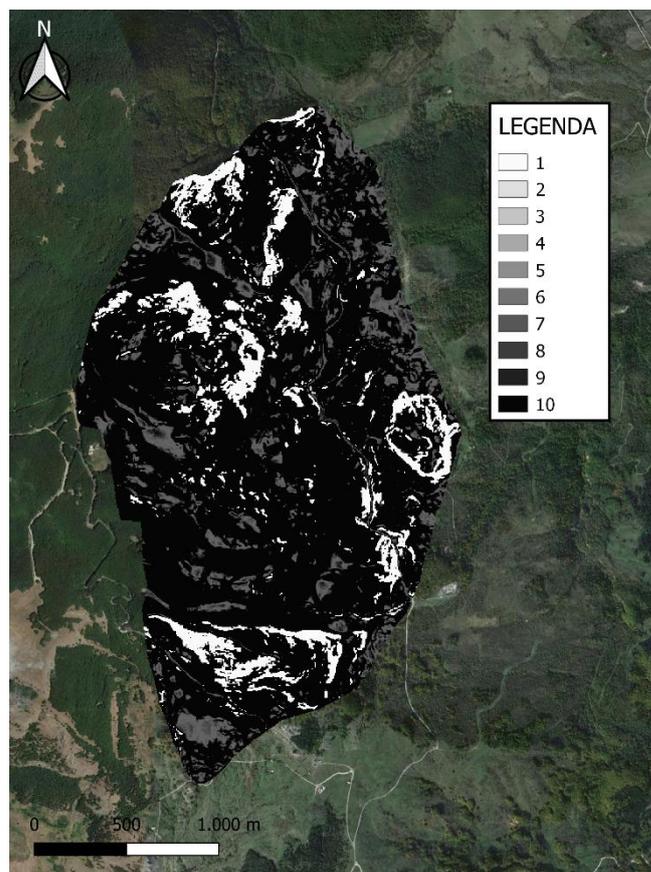


Figura 113. Carta dei punteggi della pendenza (S) relativa all'acquifero Volturino Est.

6.2.2.8 Carta della Vulnerabilità Intrinseca

Per ottenere la carta della vulnerabilità intrinseca, è stato necessario trasformare tutte le carte tematiche in formato raster e poi associare ad ogni parametro il corrispondente peso moltiplicatore dello scenario. Come scenario è stato preso in considerazione quello “carsico”.

Dopodiché, è stato calcolato l'indice SINTACS grezzo e poi normalizzato. In base alle classi di vulnerabilità espresse nella Tabella 37, è stata realizzata la Carta della Vulnerabilità Intrinseca (Fig.114).

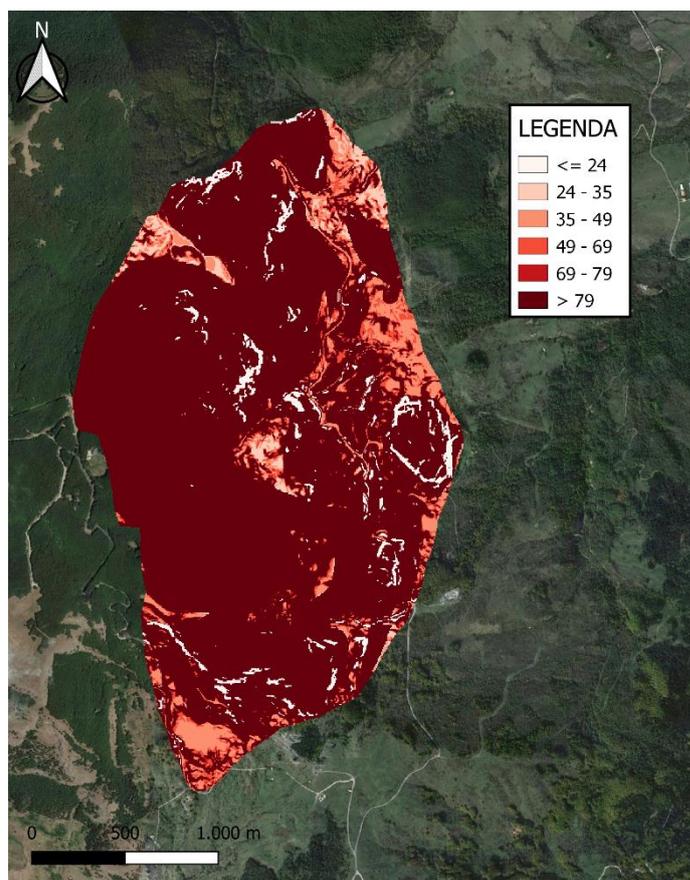


Figura 114. Carta della vulnerabilità intrinseca dell'acquifero Volturino Est ottenuta con la stringa dei pesi dello scenario “carsismo”.

Dalla carta, si evince che la maggior parte del territorio presenta una vulnerabilità che va da elevatissima ad elevata, con alcune porzioni di vulnerabilità media, bassa e bassissima.

6.2.3 Acquifero del Monte di Viggiano

L'acquifero del Monte di Viggiano (Fig.115) ha un'estensione di circa 20 Km².



Figura 115. Acquifero Monte di Viggiano.

Anche per questo acquifero, prima di procedere alla realizzazione delle carte tematiche relative ai parametri del Metodo SINTACS, sono state digitalizzate le informazioni geologiche e strutturali (Fig.119). Le informazioni geologiche saranno poi di fondamentale importanza nella realizzazione dei successivi tematismi, e verranno confrontate con la carta idrogeologica dell'area (Fig.116) per ottenere informazioni utili per le future analisi.

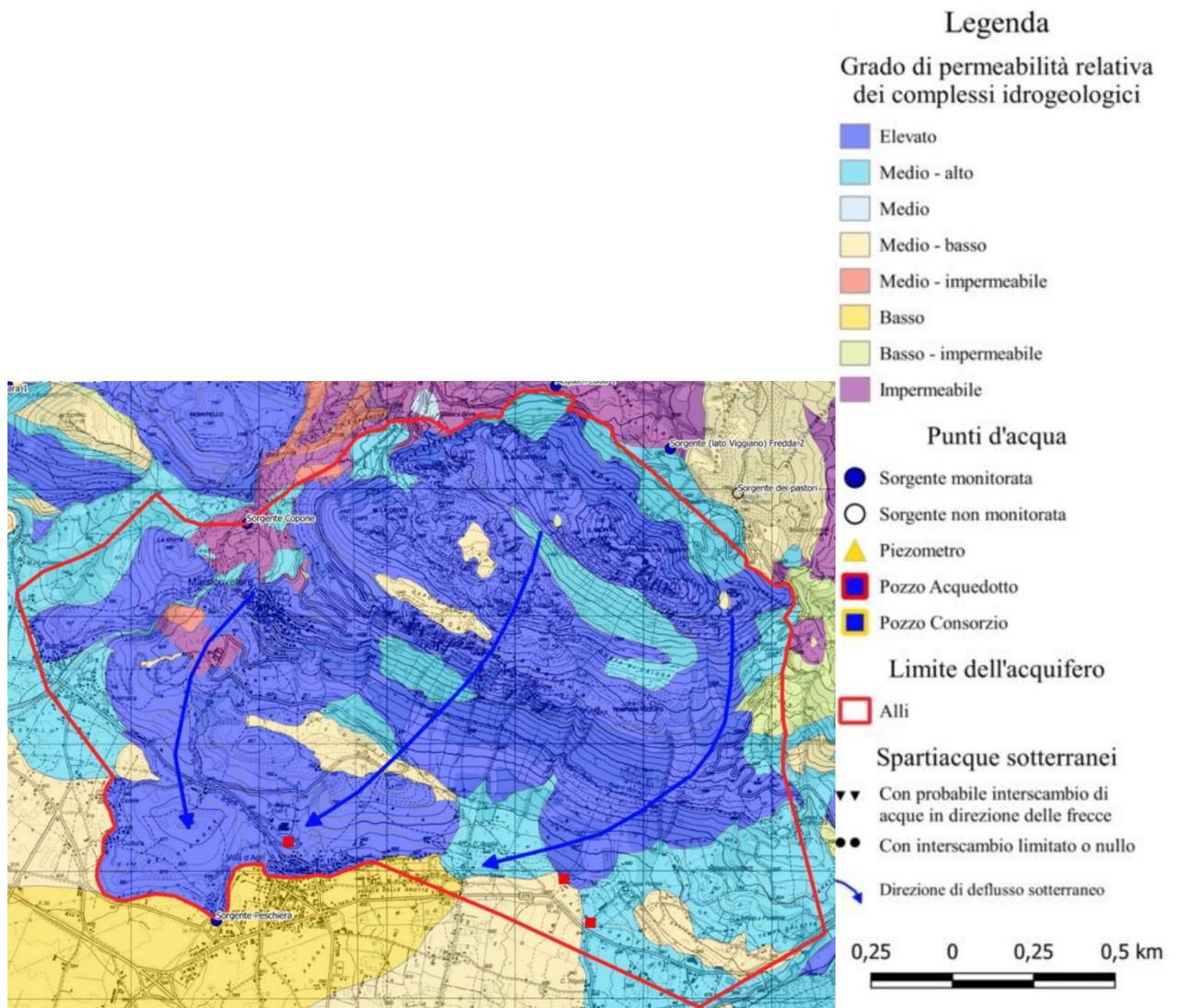


Figura 116. Carta Idrogeologica dell'acquifero Monte di Viggiano (Grimaldi S. et al., in preparazione).

6.2.3.1 Soggiacenza (S)

Per il calcolo della soggiacenza, è stata utilizzata l'identica procedura adoperata per i precedenti acquiferi. Come primo passaggio, si è ottenuto il modello digitale del terreno (Fig.117).

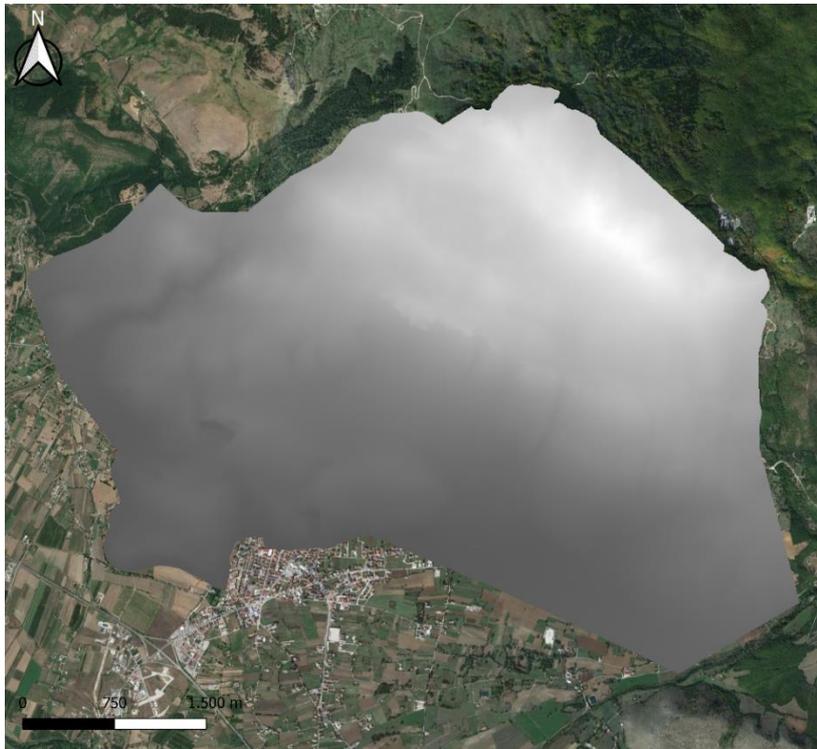


Figura 117. DTM dell'acquifero Monte di Viggiano.

Per la quota della superficie piezometrica, in mancanza di dati, si è utilizzata la stessa caratterizzazione utilizzata precedentemente; ovvero assegnando un valore di soggiacenza <50m, in un'intorno di 250m dai punti d'acqua, ed assegnando un valore >50m, nelle restanti aree. In questo modo è stato possibile ottenere la carta tematica (in forma vettoriale) della soggiacenza (Fig.118).

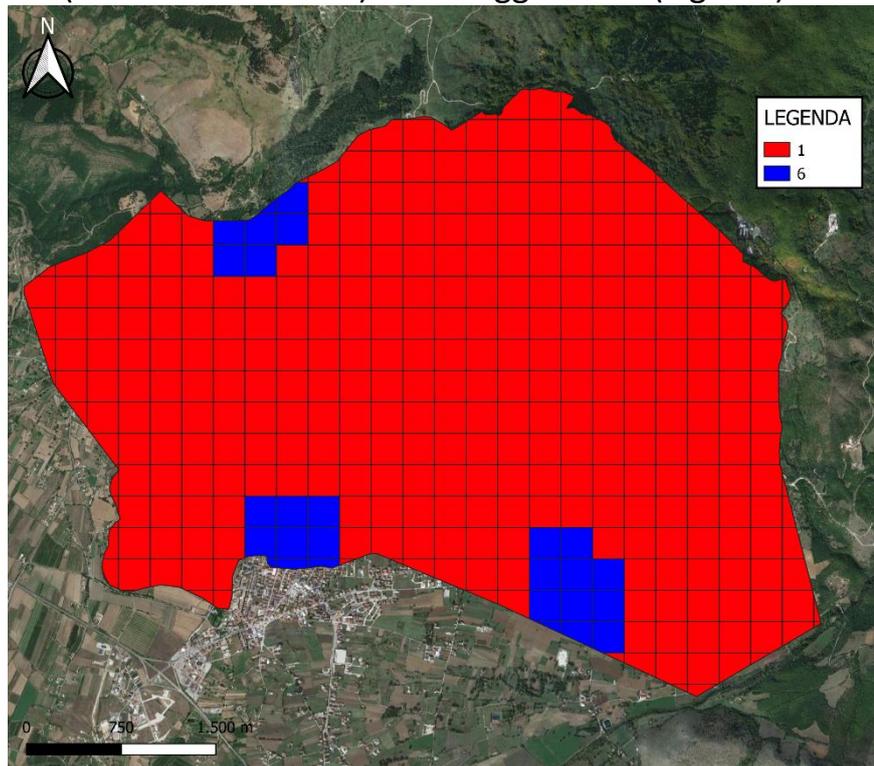


Figura 118. Carta dei punteggi del parametro Soggiacenza per dell'acquifero di Monte di Viggiano.

Nella seguente Tabella 39, sono rappresentati i punteggi attribuiti ai valori di soggiacenza.

Valori di Soggiacenza	Punteggio
<50m	6
>50 m	1

Tabella 39. Punteggi della Soggiacenza in relazione al valore.

6.2.3.2 Infiltrazione Efficace (I)

Come per gli acquiferi precedenti, il calcolo dell'infiltrazione efficace necessita della carta geologica (Fig.119) e della carta pedologica.

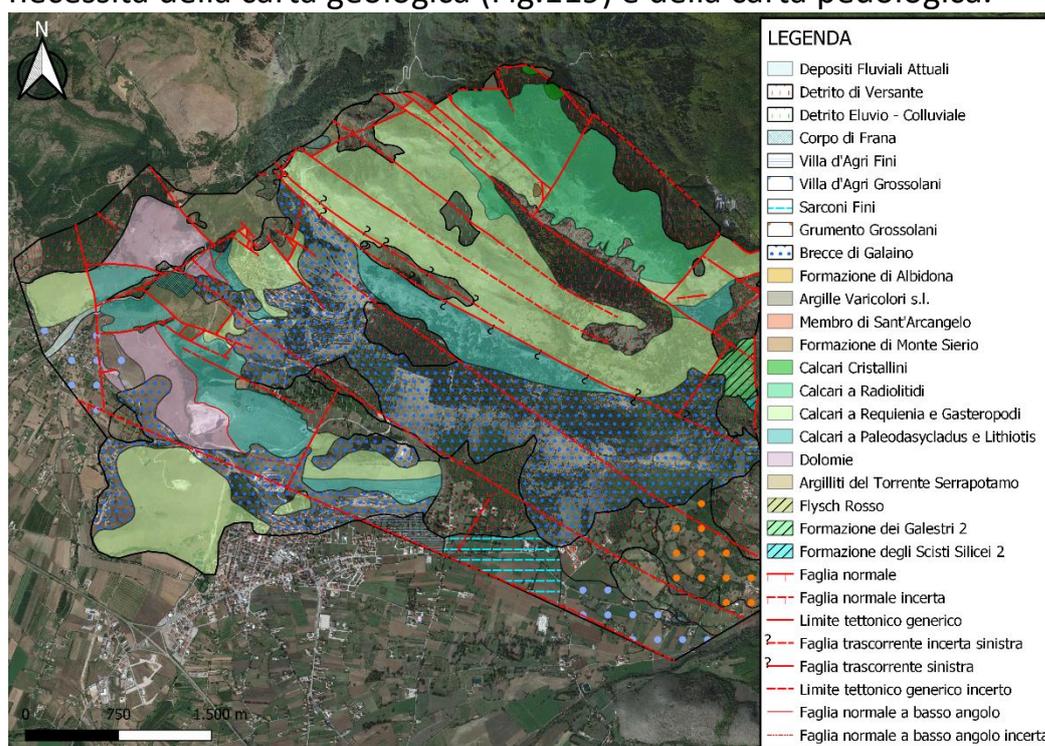


Figura 119. Carta Geologica dell'acquifero Monte di Viggiano (Palladino G. et al., in preparazione).

Dalla carta pedologica (da Basilicata.net, in scala 1: 50.000) in Figura 120, si evince che la quasi totalità dell'area presenta una tessitura franco sabbiosa e franco argillosa, andando verso la valle diventa argillosa sabbiosa.

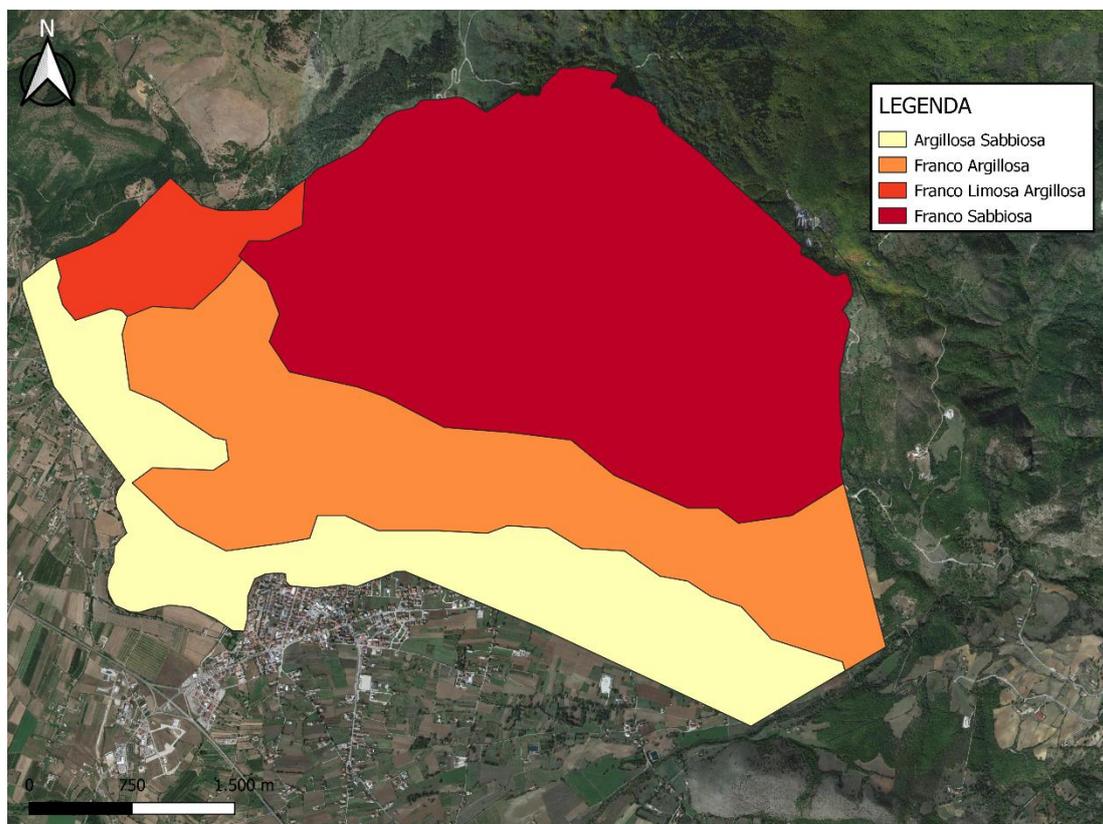


Figura 120. Carta pedologica dell'acquifero Monte di Viggiano.

La carta geologica e pedologica sono state necessarie per la stima dei coefficienti di infiltrazione potenziale χ , utili per la successiva realizzazione della carta dell'infiltrazione efficace (Fig.121).

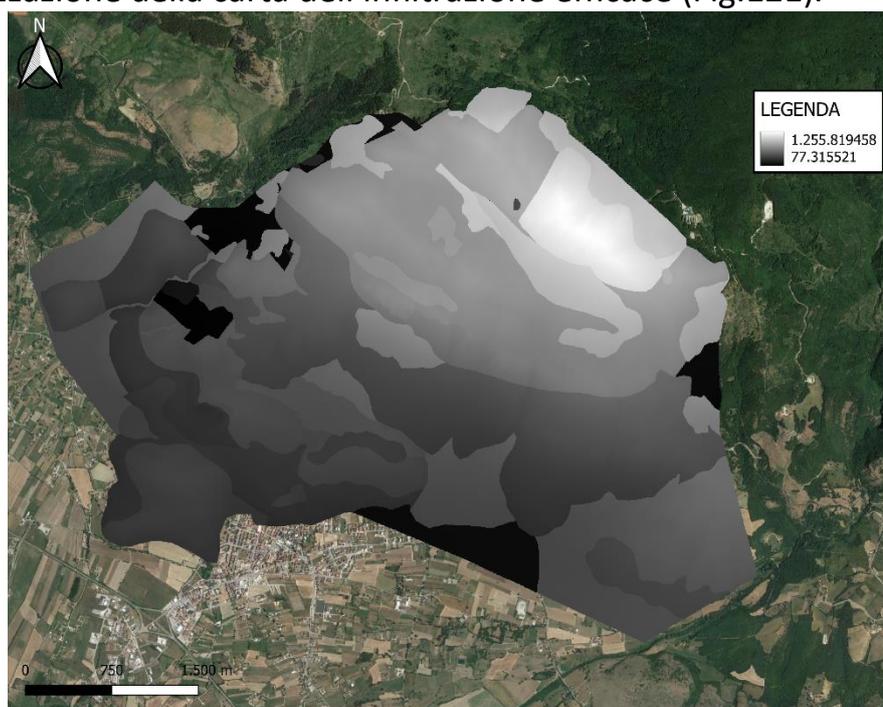


Figura 121. Carta dell'infiltrazione efficace dell'acquifero Monte di Viggiano.

Successivamente dal grafico proposto da Civita & De Maio (2000), è stata ricavata l'equazione rappresentante la curva che correla i valori di infiltrazione ai relativi punteggi (Fig.122).

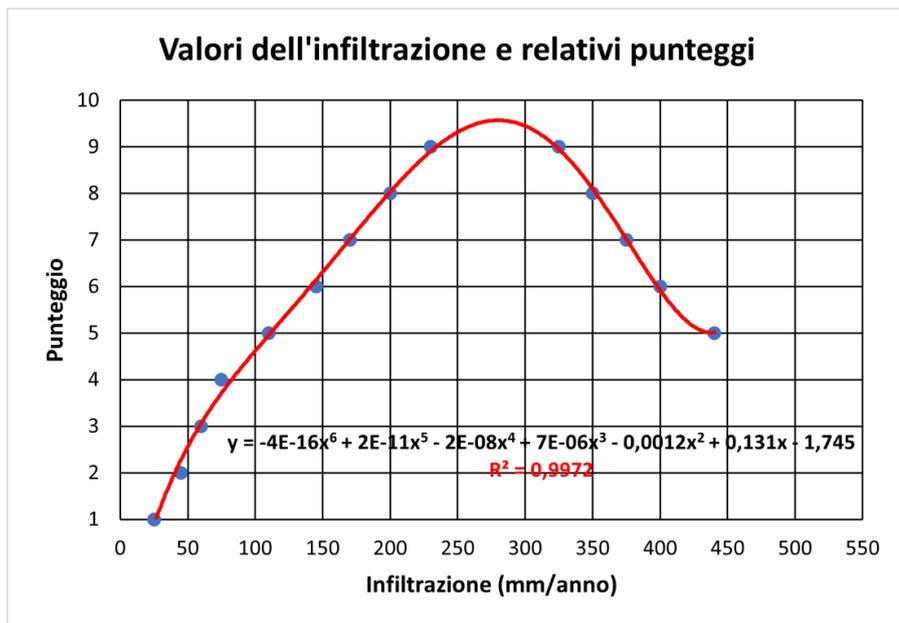


Figura 122. Visualizzazione della curva e della relativa equazione rappresentativa dei punteggi dell'infiltrazione efficace.

Per ottenere la carta dei punteggi dell'infiltrazione efficace (Fig.123), l'equazione della curva precedentemente ricavata è stata associata al file raster dei valori di infiltrazione efficace.

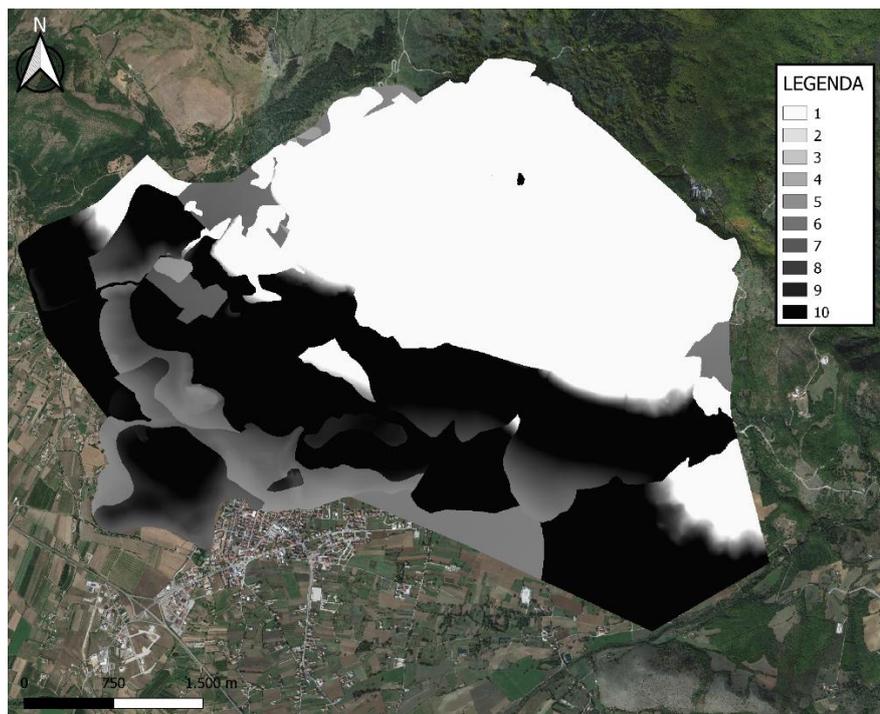


Figura 123. Carta dei punteggi dell'infiltrazione efficace relativa all'acquifero Monte di Viggiano.

6.2.3.3 Effetto di autodepurazione del Non saturo (N)

Come per gli acquiferi precedenti, la valutazione di questo parametro si basa sulle litologie affioranti nell'area. La tabella di valori è la stessa utilizzata in precedenza (Tab.32).

Ad ogni litologia dell'area è stato associato il corrispondente valore, in modo da ottenere la carta dei punteggi del parametro non saturo (Fig.124).

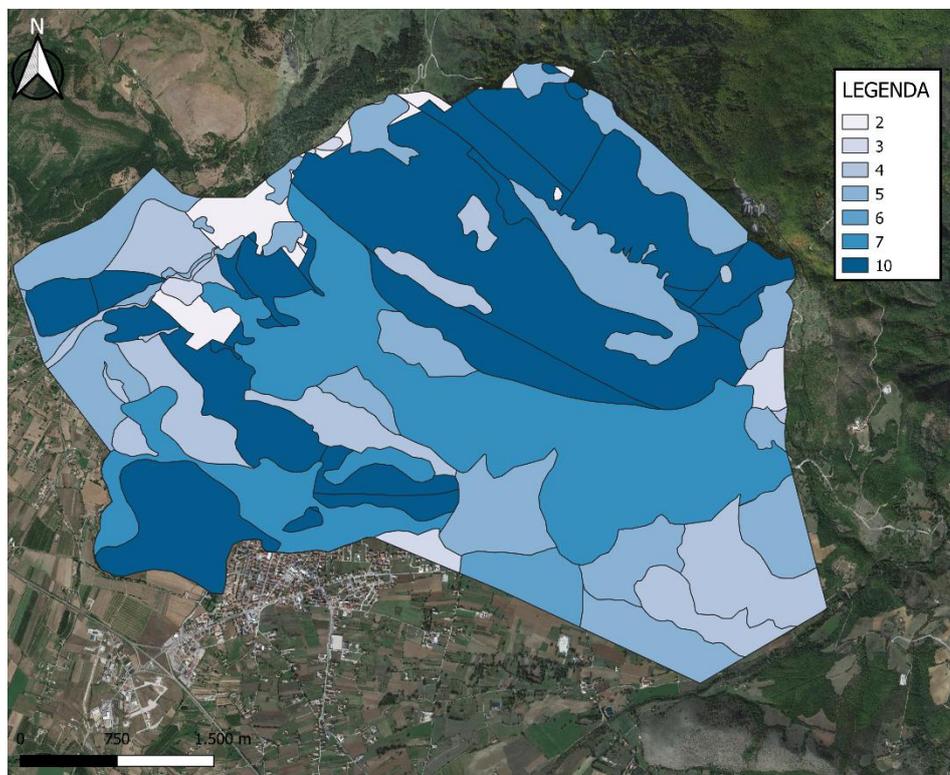


Figura 124. Carta dei punteggi relativi al parametro N (Non saturo) dell'acquifero Monte di Viggiano.

Nella porzione superiore, l'area è caratterizzata da alti valori dovuti alla presenza dei Calcari a Palaeodasycladus e Lithiosis e dei Calcari a Requenie e Gasteropodi.

6.2.3.4 Tipologia di copertura (T)

Per il parametro T, si è tenuto conto della tessitura dei suoli che è stata ricavata dalla carta pedologica. Individuata la classe tessiturale, sulla base della Tabella 33 si sono individuati i relativi punteggi.

Ad ogni classe tessiturale presente nell'area è stato associato il corrispondente punteggio, in modo da ottenere la carta dei punteggi della tipologia di copertura (Fig.125).

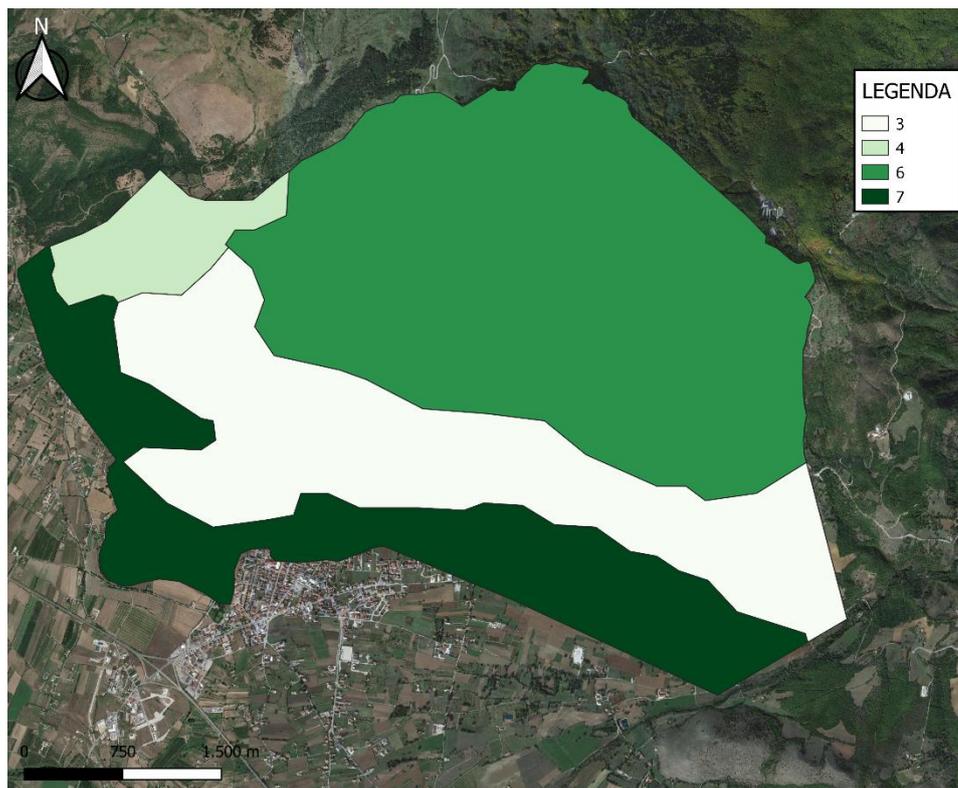


Figura 125. Carta dei punteggi relativi al parametro T (Tipologia di copertura) dell'acquifero Monte di Viggiano.

Gli alti valori sono associati alle classi tessiturali franco sabbiosa ed argillosa sabbiosa, il valore più basso invece è da attribuire alla classe tessiturale franco argillosa.

6.2.3.5 Caratteristiche idrogeologiche dell'Acquifero (A)

Come per il parametro **N**, la caratterizzazione di questo parametro si basa sulle caratteristiche litologiche della roccia contenente l'acquifero. Tutti i punteggi sono messi in evidenza nella Tabella 34.

Ad ogni litologia affiorante nell'area è stato assegnato il punteggio corrispondente, ottenendo così la carta dei punteggi delle caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero (Fig.126).

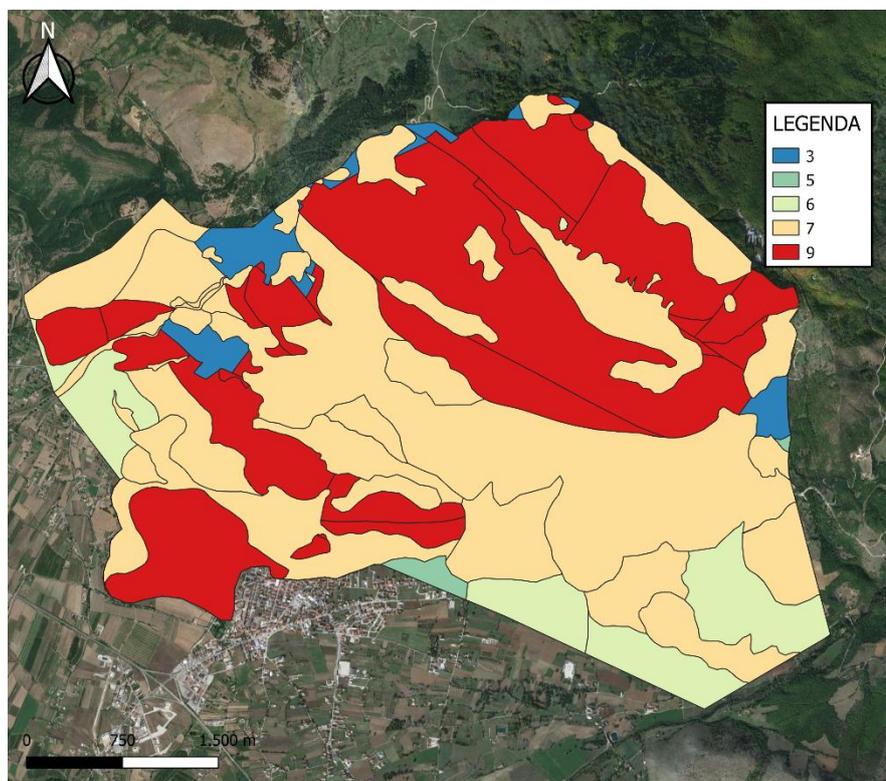


Figura 126. Carta dei punteggi relativi al parametro A (Caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero) dell'acquifero Monte di Viggiano.

Come per il parametro **N**, la maggior parte del territorio risulta avere un punteggio elevato dovuto alla presenza dei Calcari a Palaeodasycladus e Lithiosis e dei Calcari a Requenie e Gasteropodi.

6.2.3.6 Conducibilità idraulica dell'acquifero (C)

Per la valutazione del punteggio, è stato necessario conoscere l'ordine di grandezza assunto dalla conducibilità idraulica; la sua valutazione è avvenuta attraverso la Tabella 35, la quale assegna ad ogni complesso idrogeologico il corrispondente ordine di grandezza. Per l'assegnazione dei punteggi si è fatto riferimento alla Figura 127, proposta da Civita & De Maio nel 2000.

Conducibilità idraulica e relativi punteggi

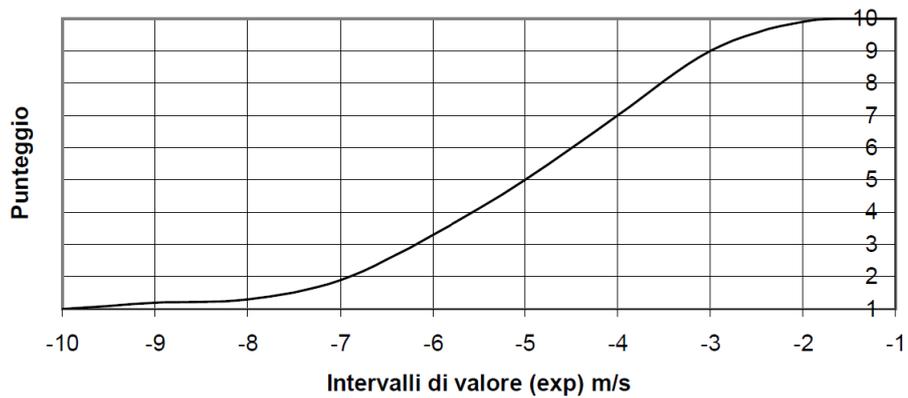


Figura 127. Valori della conducibilità idraulica e relativi punteggi nel metodo SINTACS (Civita M., De Maio M., 2000).

Dopo aver ricavato i punteggi, sono stati assegnati alle corrispondenti litologie in modo da ottenere la carta dei punteggi della conducibilità idraulica (Fig.128).

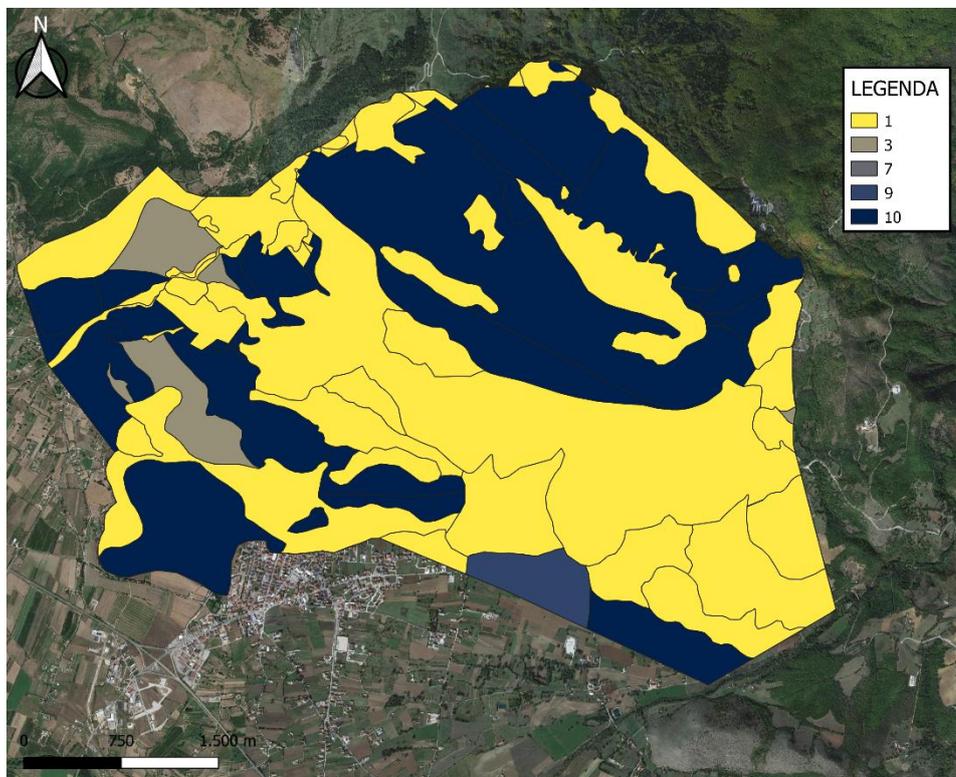


Figura 128. Carta dei punteggi relativi al parametro C (Conducibilità idraulica) dell'acquifero Monte di Viggiano.

Anche in questo caso, gli alti valori assunti dal parametro **C**, sono dovuti alla presenza dei Calcari a Palaeodasycladus e Lithiosis e dei Calcari a Requenie e Gasteropodi.

6.2.3.7 Acclività della Superficie topografica (S)

La valutazione di questo parametro, ha richiesto l'elaborazione della carta della pendenza ottenuta a partire dal modello digitale del terreno (DTM). La carta delle pendenze (Fig.129) esprime i valori in percentuale.

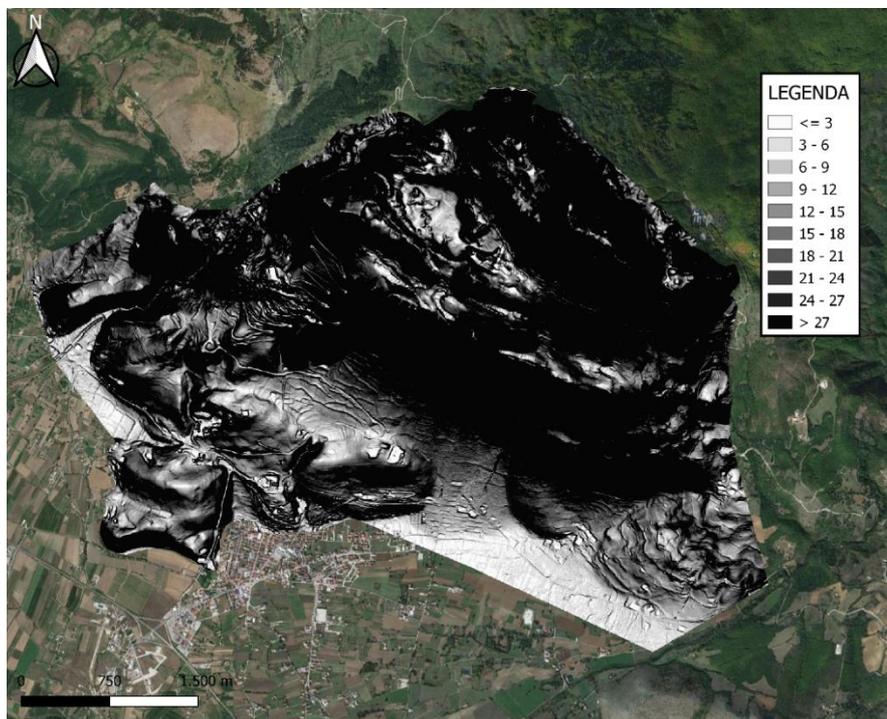


Figura 129. Carta della pendenza (S) dell'acquifero Monte di Viggiano.

In seguito, dal grafico proposto da Civita & De Maio (2000) è stata ricavata l'equazione della curva (Fig.130) che rappresenta la relazione tra valori di pendenza e punteggi.

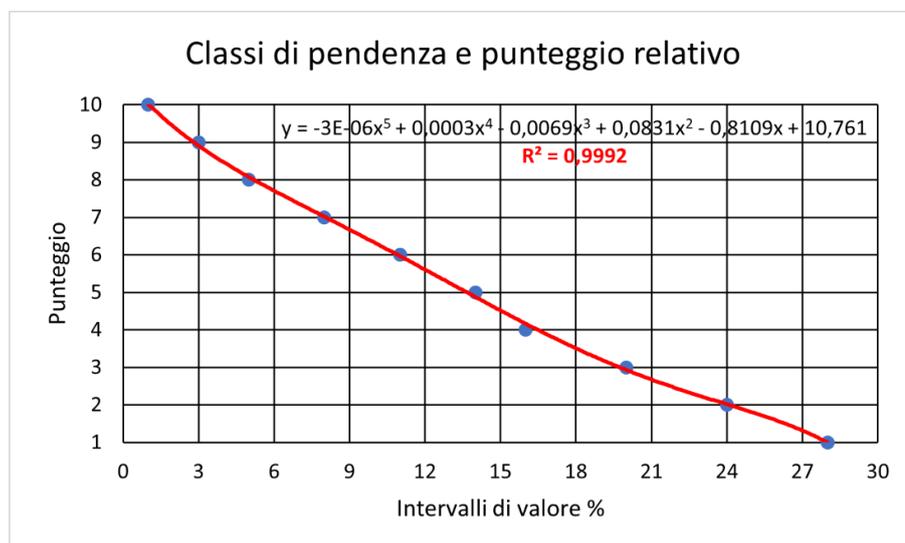


Figura 130. Visualizzazione della curva e della relativa equazione rappresentativa dei punteggi della pendenza (S).

Infine, per ottenere la carta dei punteggi della pendenza (Fig.131), l'equazione ricavata è stata associata al file raster dei valori della pendenza.

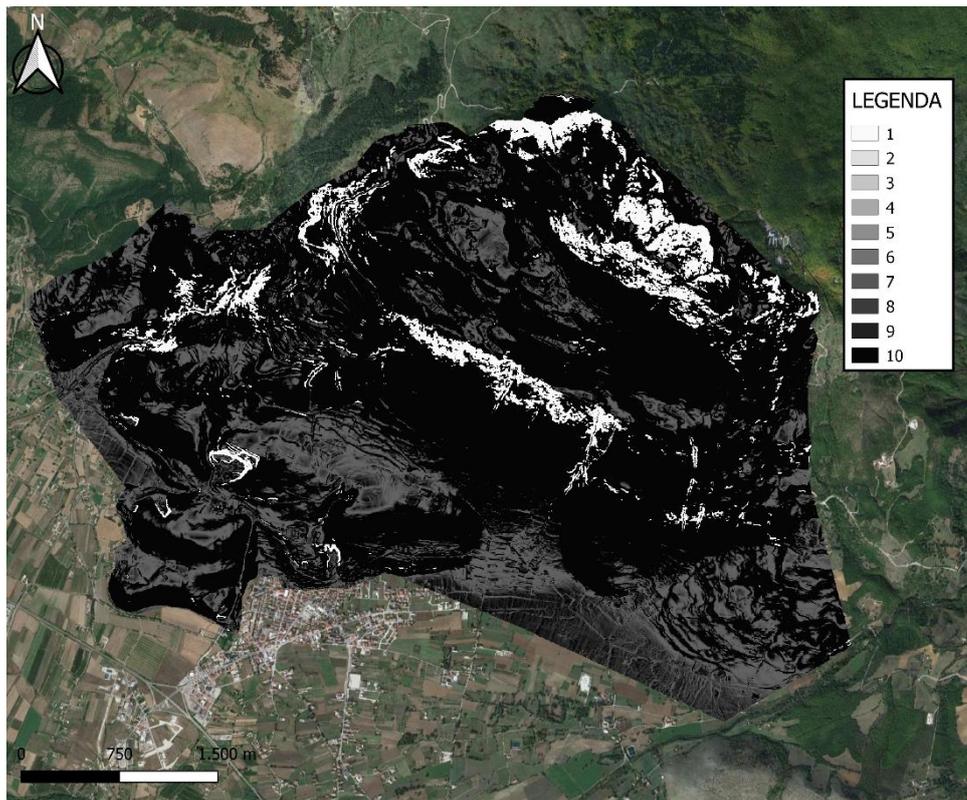


Figura 131. Carta dei punteggi della pendenza (S) relativa all'acquifero Monte di Viggiano.

6.2.3.8 Carta della Vulnerabilità Intrinseca

Per ottenere la carta della vulnerabilità intrinseca, è stato necessario trasformare tutte le carte tematiche in formato raster e poi associare ad ogni parametro il corrispondente peso moltiplicatore dello scenario. Come scenario è stato preso in considerazione quello “carsico”.

Dopodiché, è stato calcolato l'indice SINTACS grezzo e poi normalizzato. In base alle classi di vulnerabilità espresse nella Tabella 37, è stata realizzata la Carta della Vulnerabilità Intrinseca (Fig.132).

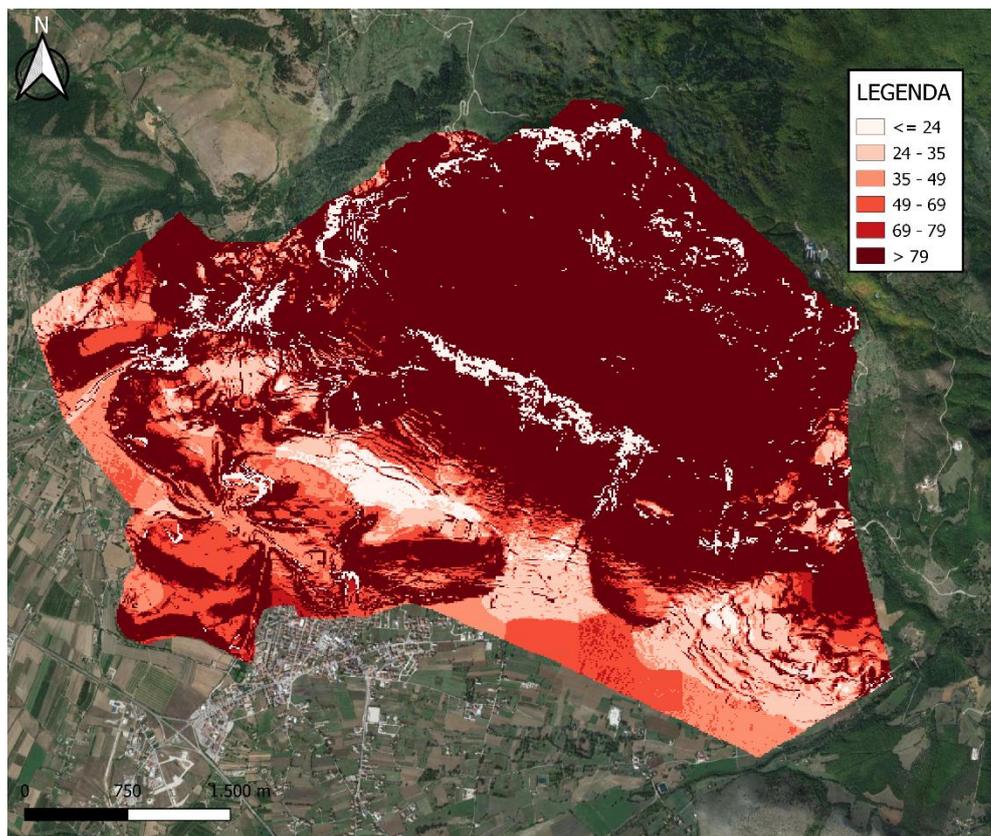


Figura 132. Carta della vulnerabilità intrinseca dell'acquifero Monte di Viggiano ottenuta con la stringa dei pesi dello scenario “carsismo”.

Dalla carta, si può notare che nella porzione settentrionale ed in alcune porzioni meridionali abbiamo un'altissima vulnerabilità (associata alle formazioni calcaree), mentre il resto del territorio ha una vulnerabilità media-bassa.

6.2.4 Acquifero Alli

L'acquifero Alli (Fig.133) ha un'estensione di circa 2 Km².

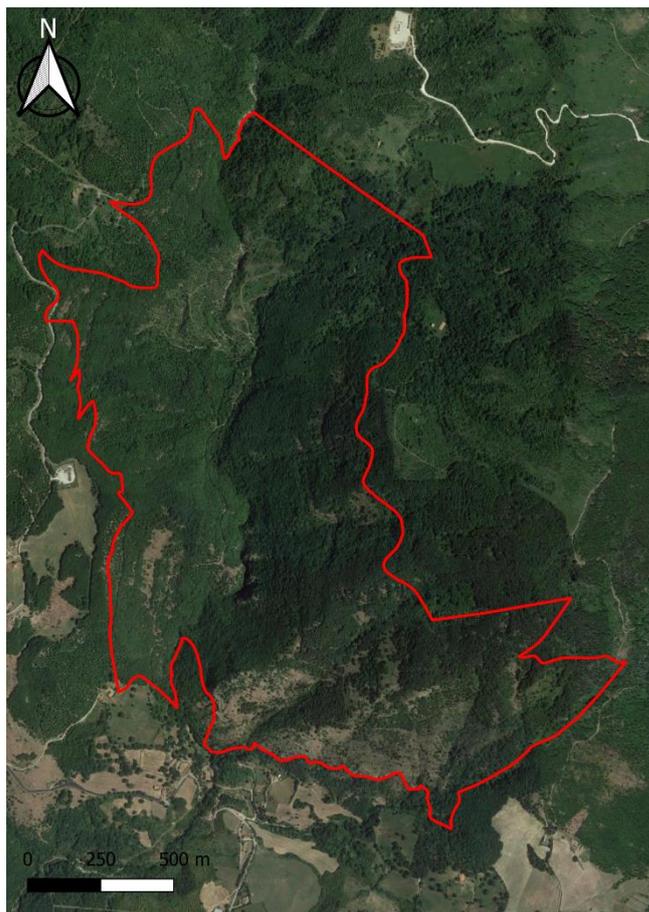


Figura 133. Acquifero Alli.

Anche per questo acquifero, prima di procedere alla realizzazione delle carte tematiche relative ai parametri del Metodo SINTACS, sono state digitalizzate le informazioni geologiche e strutturali (Fig.137). Le informazioni geologiche saranno poi di fondamentale importanza nella realizzazione dei successivi tematismi e verranno confrontate con la carta idrogeologica dell'area (Fig.134) per ottenere informazioni utili per le future analisi.

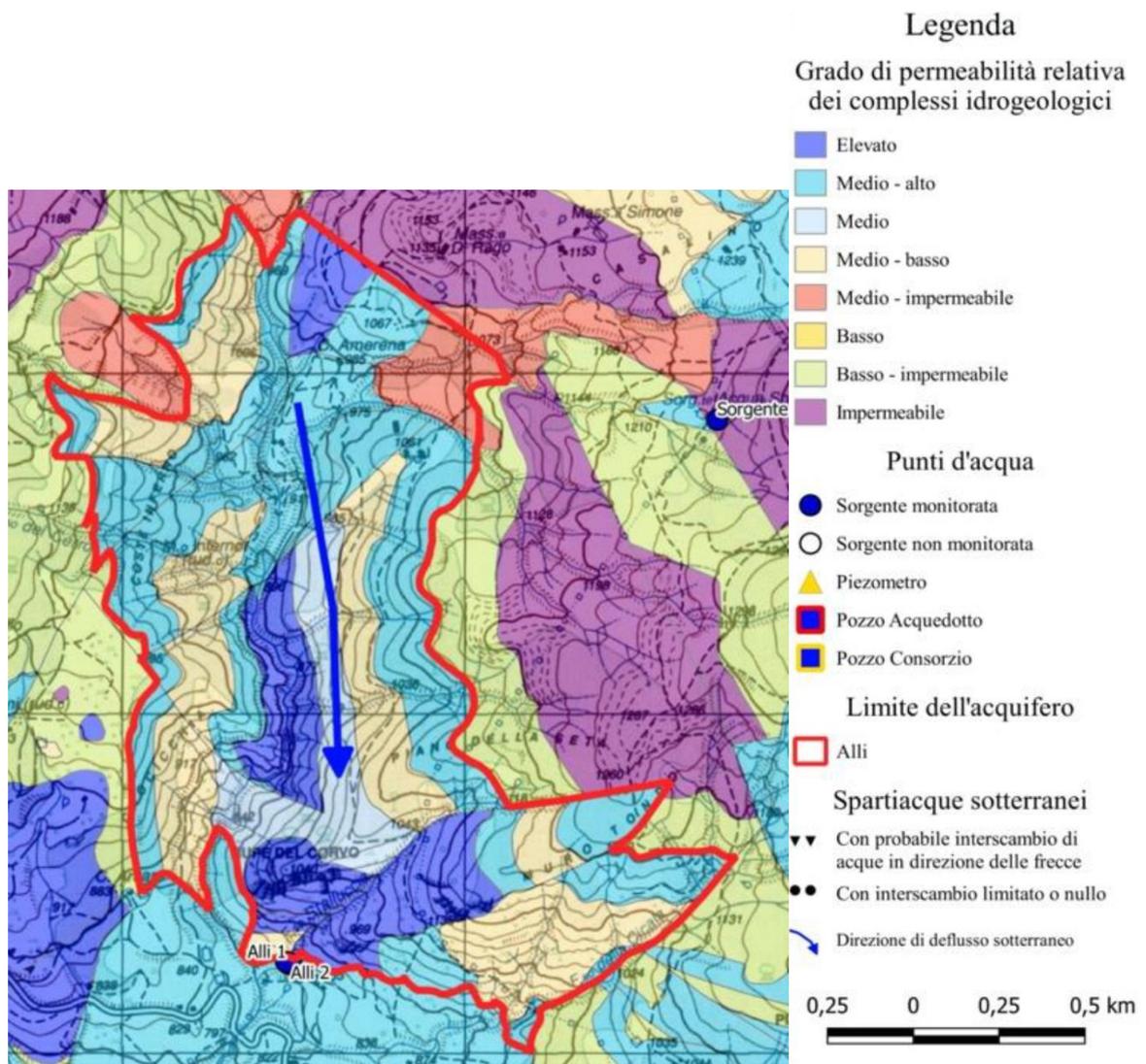


Figura 134. Carta Idrogeologica dell'acquifero Alli (Palladino G. et al., in preparazione).

6.2.4.1 Soggiacenza (S)

Per il calcolo della soggiacenza, è stata utilizzata l'identica procedura adoperata per tutti i precedenti acquiferi. Come primo passaggio, si è ottenuto il modello digitale del terreno (Fig.135).



Figura 135. DTM dell'acquifero Alli.

Per la quota della superficie piezometrica, in mancanza di dati, si è utilizzata la stessa caratterizzazione utilizzata precedentemente; ovvero assegnando un valore di soggiacenza <50m, in un'intorno di 250m dai punti d'acqua, ed assegnando un valore >50m, nelle restanti aree. In questo modo è stato possibile ottenere la carta tematica (in forma vettoriale) della soggiacenza (Fig.136).

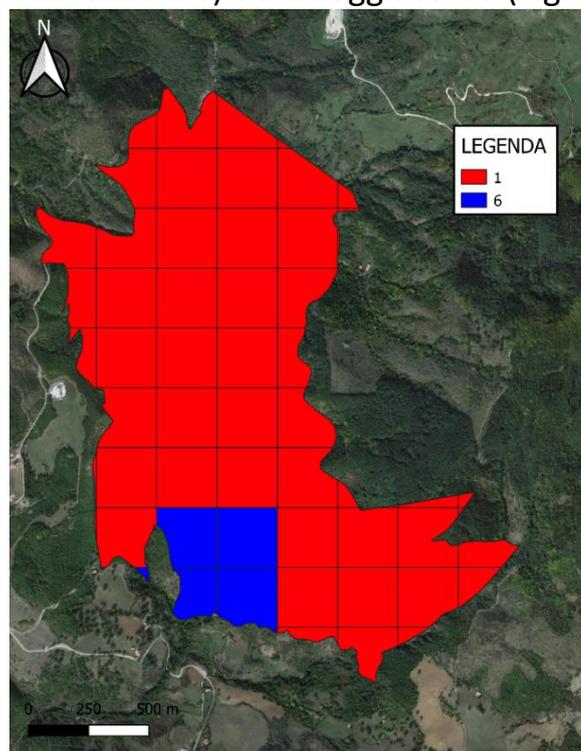


Figura 136. Carta dei punteggi del parametro Soggiacenza per dell'acquifero Alli.

Nella seguente Tabella 40, sono rappresentati i punteggi attribuiti ai valori di soggiacenza.

Valori di Soggiacenza	Punteggio
<50m	6
>50 m	1

Tabella 40. Punteggi della Soggiacenza in relazione al valore.

6.2.4.2 Infiltrazione Efficace (I)

Come per tutti gli acquiferi precedenti, il calcolo dell'infiltrazione efficace necessita della carta geologica (Fig.137) e della carta pedologica.

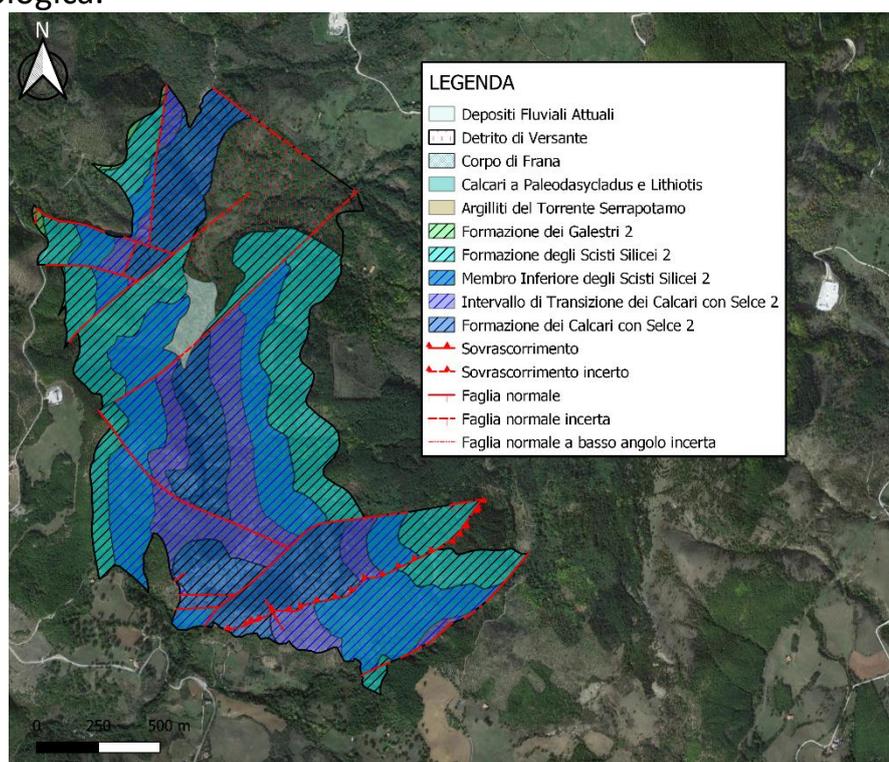


Figura 137. Carta Geologica dell'acquifero Alli (Palladino G. et al., in preparazione).

Dalla carta pedologica (da Basilicata.net, in scala 1: 50.000) in Figura 138, si evince che la quasi totalità dell'area presenta una tessitura franco sabbiosa.

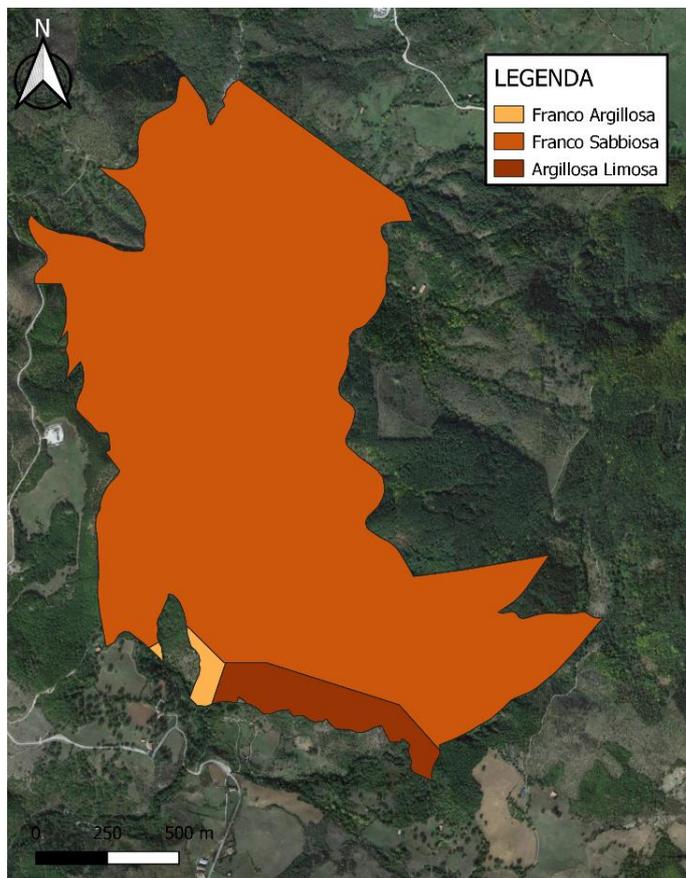


Figura 138. Carta pedologica dell'acquifero Alli.

La carta geologica e pedologica sono state necessarie per la stima dei coefficienti di infiltrazione potenziale χ , utili per la successiva realizzazione della carta dell'infiltrazione efficace (Fig.139).

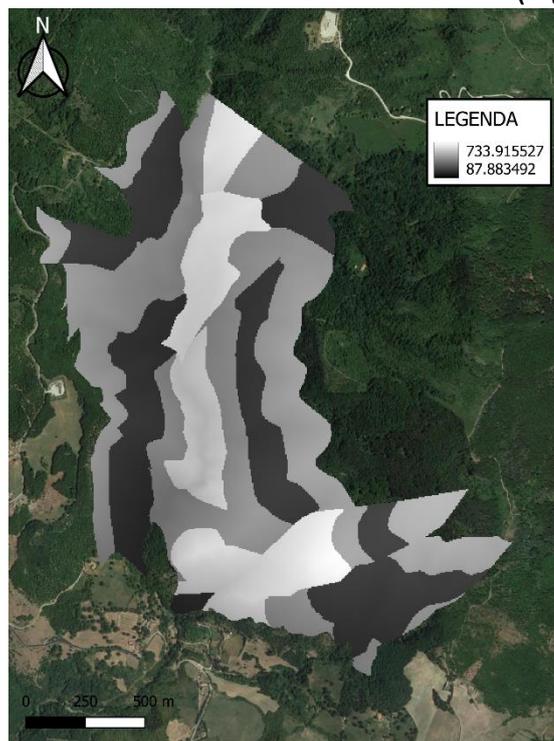


Figura 139. Carta dell'infiltrazione efficace dell'acquifero Alli.

Successivamente dal grafico proposto da Civita & De Maio (2000), è stata ricavata l'equazione rappresentante la curva che correla i valori di infiltrazione ai relativi punteggi (Fig.140).

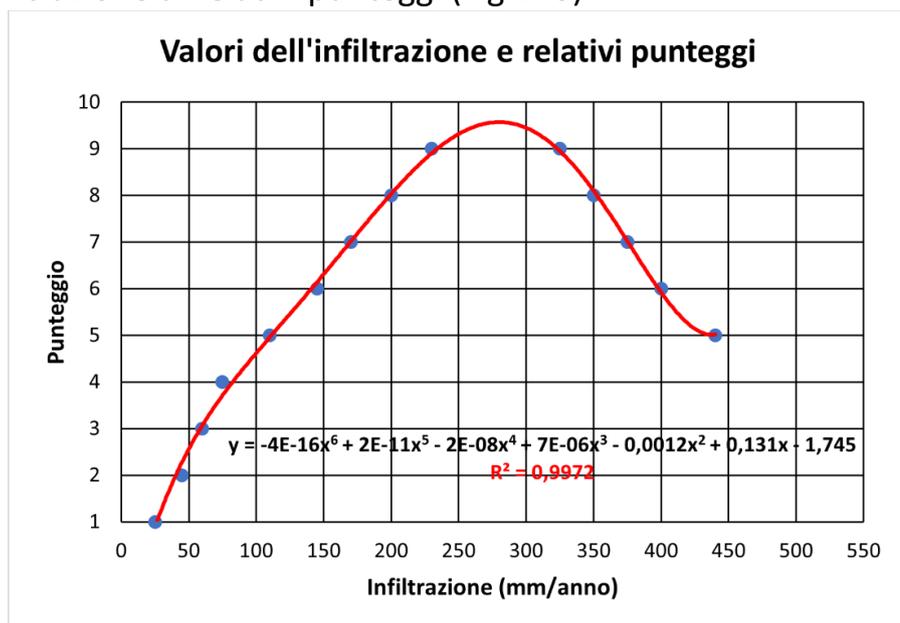


Figura 140. Visualizzazione della curva e della relativa equazione rappresentativa dei punteggi dell'infiltrazione efficace.

Per ottenere la carta dei punteggi dell'infiltrazione efficace (Fig.141), l'equazione della curva precedentemente ricavata è stata associata al file raster dei valori di infiltrazione efficace.

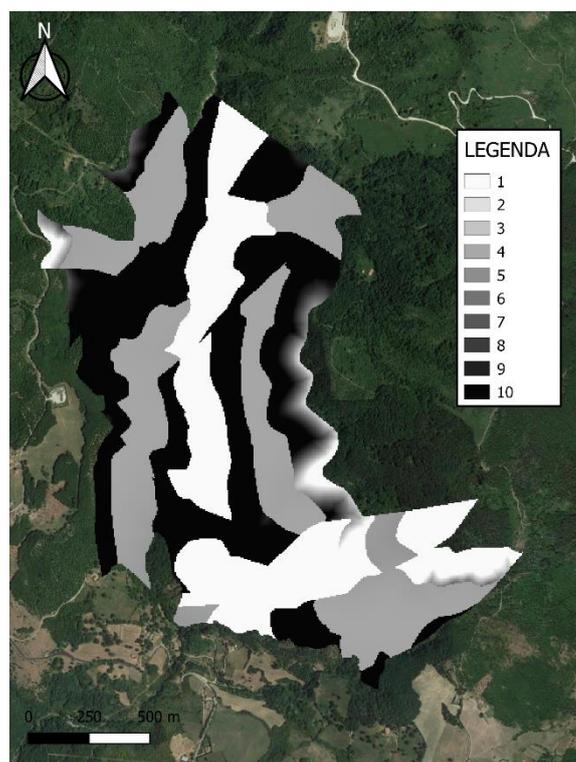


Figura 141. Carta dei punteggi dell'infiltrazione efficace relativa all'acquifero Allé.

6.2.4.3 Effetto di autodepurazione del Non saturo (N)

Come per gli acquiferi precedenti, la valutazione di questo parametro si basa sulle litologie affioranti nell'area. La tabella di valori è la stessa utilizzata in precedenza (Tab.32).

Ad ogni litologia dell'area è stato associato il corrispondente valore, in modo da ottenere la carta dei punteggi del parametro non saturo (Fig.142).

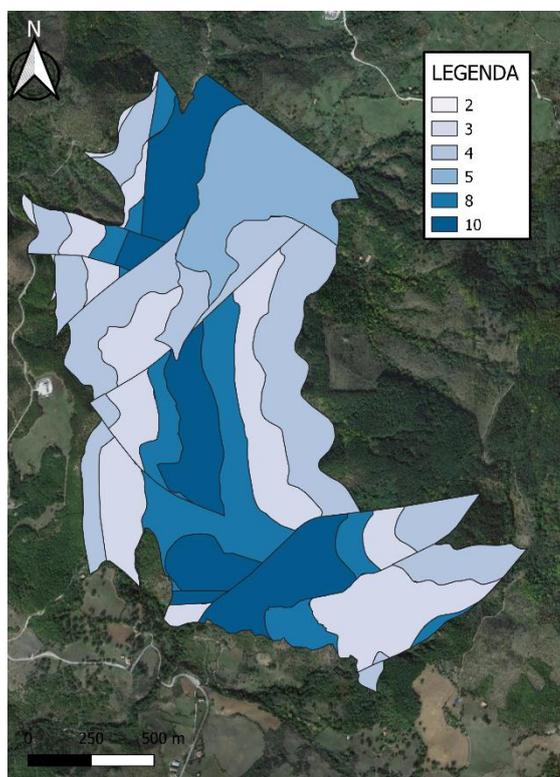


Figura 142. Carta dei punteggi relativi al parametro N (Non saturo) dell'acquifero Alli.

Gli alti valori del parametro **N** sono associati alla presenza della Formazione dei Calcari con Selce 2, mentre i valori più bassi sono attribuiti principalmente alla presenza della Formazione dei Galestri 2 ed alla Formazione degli Scisti Silicei 2.

6.2.4.4 Tipologia di copertura (T)

Per il parametro **T**, si è tenuto conto della tessitura dei suoli che è stata ricavata dalla carta pedologica. Individuata la classe tessiturale, sulla base della Tabella 33 si sono individuati i relativi punteggi.

Ad ogni classe tessiturale presente nell'area è stato associato il corrispondente punteggio, in modo da ottenere la carta dei punteggi della tipologia di copertura (Fig.143).

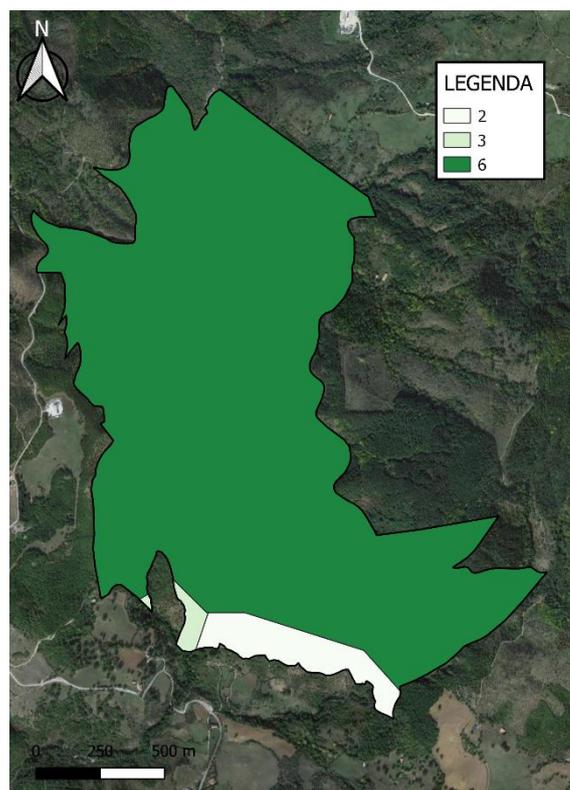


Figura 143. Carta dei punteggi relativi al parametro T (Tipologia di copertura) dell'acquifero Alli.

Dall'immagine si nota che la maggior parte del territorio presenta un valore intermedio, ciò è collegato alla presenza preponderante della classe tessiturale franco sabbiosa (come visto anche in precedenza).

6.2.4.5 Caratteristiche idrogeologiche dell'Acquifero (A)

Come per il parametro **N**, la caratterizzazione di questo parametro si basa sulle caratteristiche litologiche della roccia contenente l'acquifero. Tutti i punteggi sono messi in evidenza nella Tabella 34.

Ad ogni litologia affiorante nell'area è stato assegnato il punteggio corrispondente, ottenendo così la carta dei punteggi delle caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero (Fig.144).

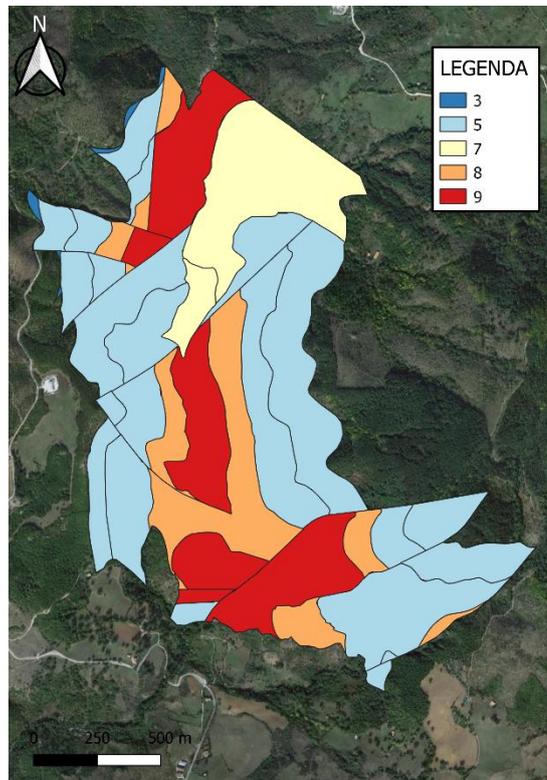


Figura 144. Carta dei punteggi relativi al parametro A (Caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero) dell'acquifero Alli.

Come per il parametro **N**, gli alti valori sono associati alla presenza della Formazione dei Calcari con Selce 2, mentre i valori più bassi sono attribuiti principalmente alla presenza della Formazione dei Galestri 2 ed alla Formazione degli Scisti Silicei 2.

6.2.4.6 Conducibilità idraulica dell'acquifero (C)

Per la valutazione del punteggio, è stato necessario conoscere l'ordine di grandezza assunto dalla conducibilità idraulica; la sua valutazione è avvenuta attraverso la Tabella 35, la quale assegna ad ogni complesso idrogeologico il corrispondente ordine di grandezza. Per l'assegnazione dei punteggi si è fatto riferimento alla Figura 145, proposta da Civita & De Maio nel 2000.

Conducibilità idraulica e relativi punteggi

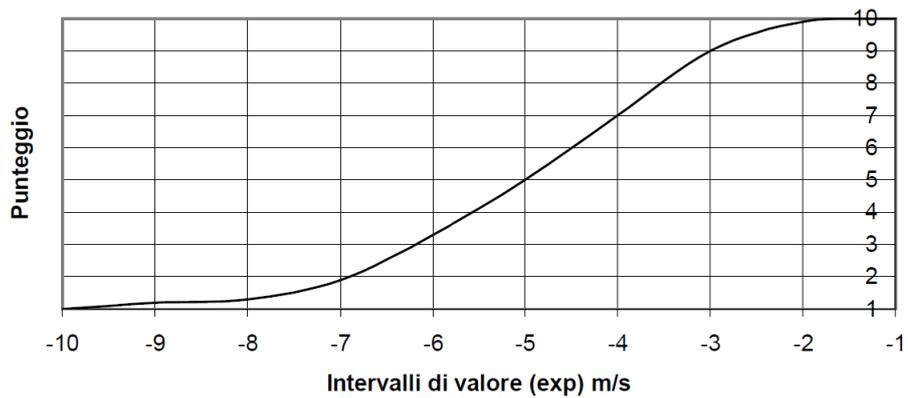


Figura 145. Valori della conducibilità idraulica e relativi punteggi nel metodo SINTACS (Civita M., De Maio M., 2000).

Dopo aver ricavato i punteggi, sono stati assegnati alle corrispondenti litologie in modo da ottenere la carta dei punteggi della conducibilità idraulica (Fig.146).

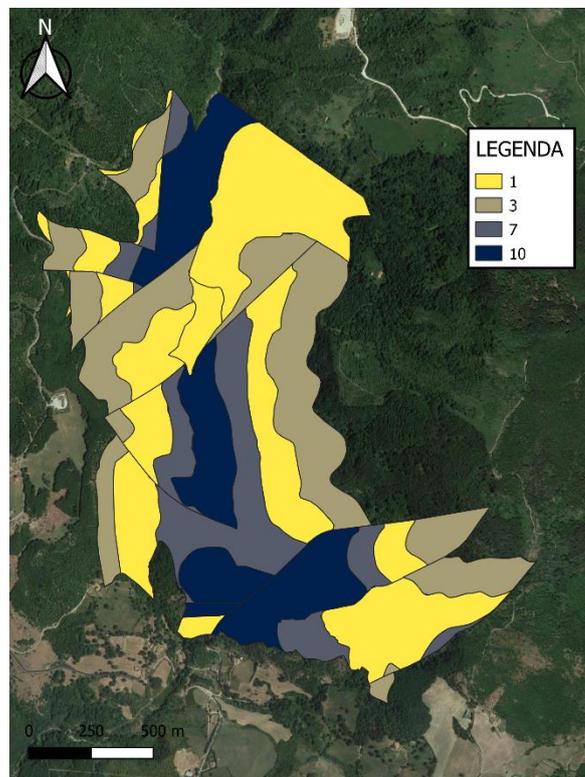


Figura 146. Carta dei punteggi relativi al parametro C (Conducibilità idraulica) dell'acquifero Alli.

Anche in questo caso, gli alti valori assunti dal parametro C, sono associati alla presenza della Formazione dei Calcari con Selce 2, mentre i valori più bassi sono attribuiti principalmente alla presenza

della Formazione dei Galestri 2 ed alla Formazione degli Scisti Silicei 2.

6.2.4.7 Acclività della Superficie topografica (S)

La valutazione di questo parametro, ha richiesto l'elaborazione della carta della pendenza ottenuta a partire dal modello digitale del terreno (DTM). La carta delle pendenze (Fig.147) esprime i valori in percentuale.

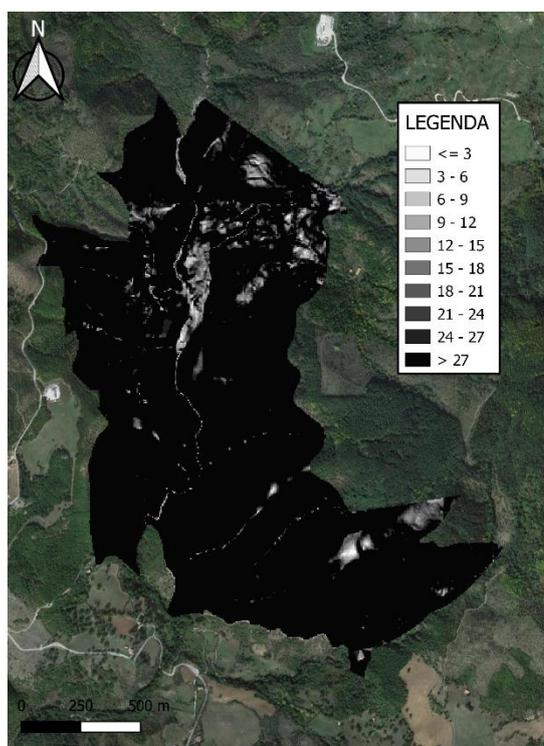


Figura 147. Carta della pendenza (S) dell'acquifero Allì.

In seguito, dal grafico proposto da Civita & De Maio (2000) è stata ricavata l'equazione della curva (Fig.148) che rappresenta la relazione tra valori di pendenza e punteggi.

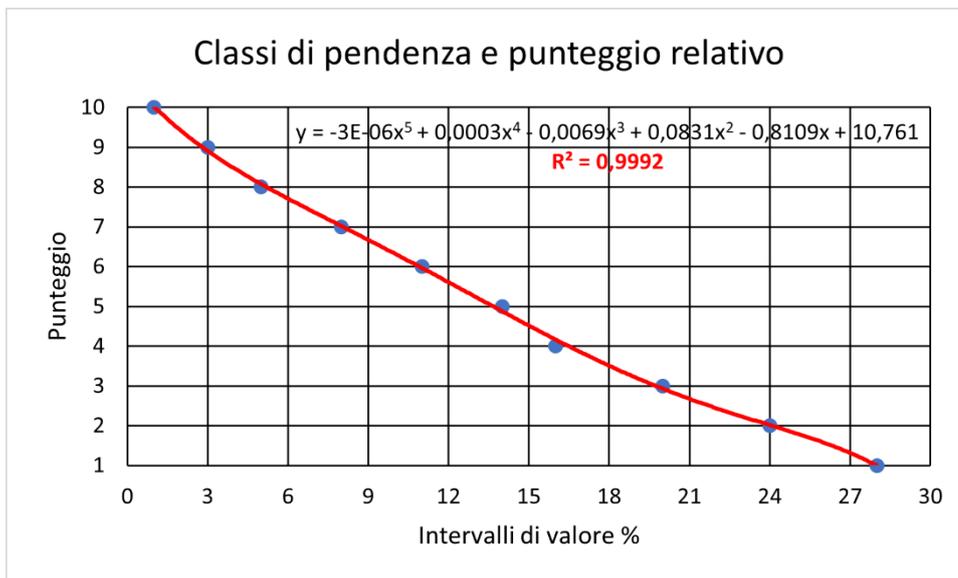


Figura 148. Visualizzazione della curva e della relativa equazione rappresentativa dei punteggi della pendenza (S).

Infine, per ottenere la carta dei punteggi della pendenza (Fig.149), l'equazione ricavata è stata associata al file raster dei valori della pendenza.

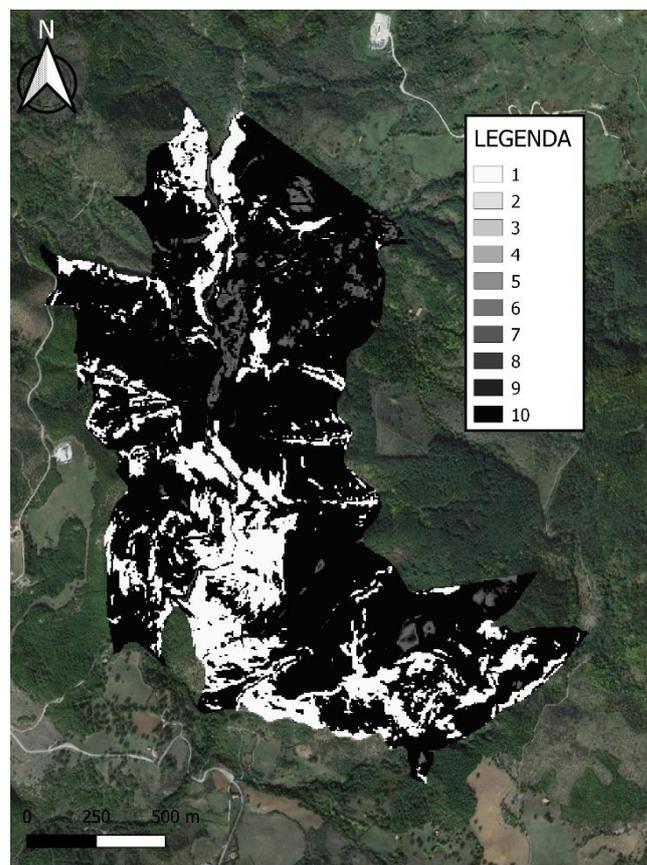


Figura 149. Carta dei punteggi della pendenza (S) relativa all'acquifero Allè.

6.2.4.8 Carta della Vulnerabilità Intrinseca

Per ottenere la carta della vulnerabilità intrinseca, è stato necessario trasformare tutte le carte tematiche in formato raster e poi associare ad ogni parametro il corrispondente peso moltiplicatore dello scenario. Come scenario è stato preso in considerazione quello “carsico”.

Dopodiché, è stato calcolato l'indice SINTACS grezzo e poi normalizzato. In base alle classi di vulnerabilità espresse nella Tabella 37, è stata realizzata la Carta della Vulnerabilità Intrinseca (Fig.150).

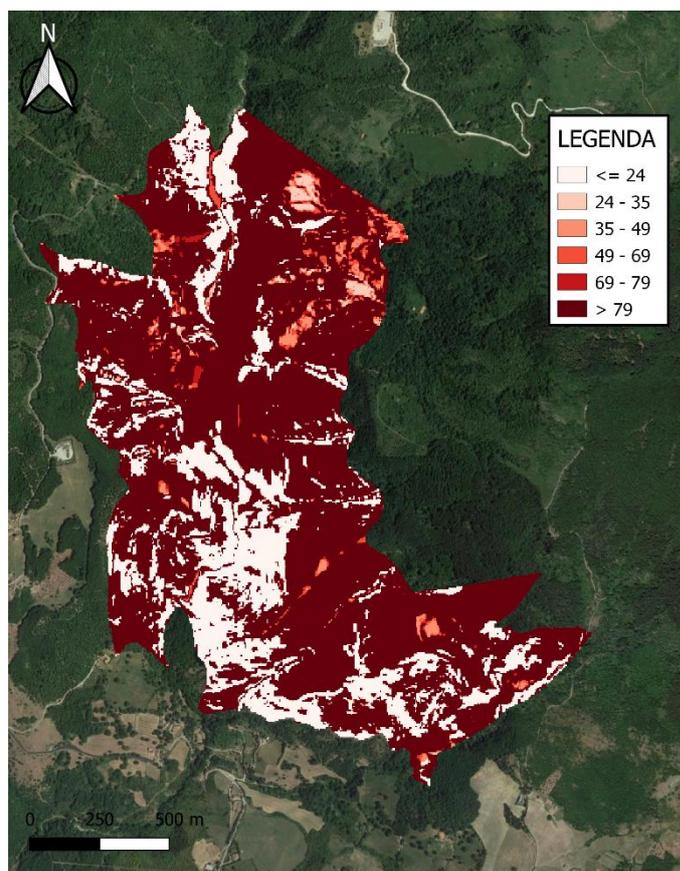


Figura 150. Carta della vulnerabilità intrinseca dell'acquifero Alli ottenuta con la stringa dei pesi dello scenario “carsismo”.

Come si può vedere dall'immagine, una buona parte del territorio presenta una vulnerabilità altissima mentre una percentuale minore di territorio presenta una vulnerabilità bassissima.

6.2.5 Acquifero Poroso della Piana alluvionale

L'acquifero Poroso della Piana alluvionale (Fig.151) ha un'estensione di circa 150 Km².

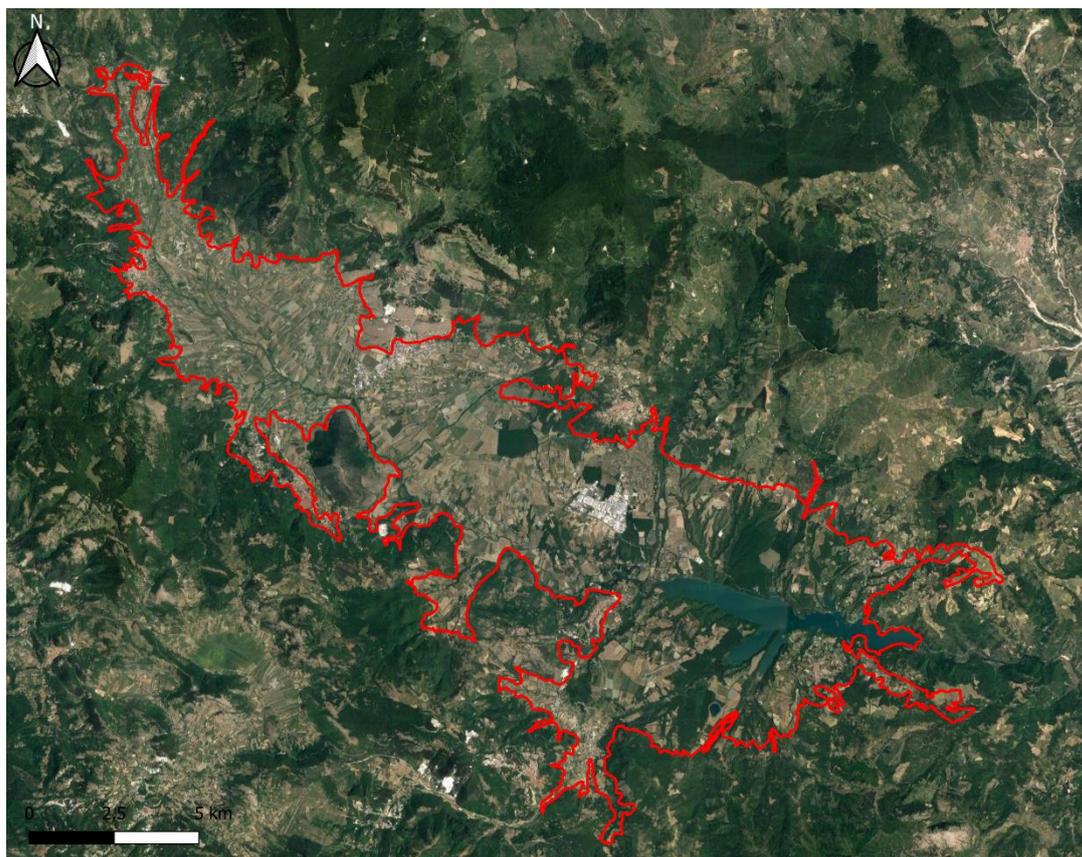


Figura 151. Acquifero Poroso della Piana alluvionale.

Anche per questo acquifero, prima di procedere alla realizzazione delle carte tematiche relative ai parametri del Metodo SINTACS, sono state digitalizzate le informazioni geologiche e strutturali (Fig.152). Per l'acquifero della Piana alluvionale sono state prese in considerazioni anche le formazioni Quaternarie presenti in destra idraulica del fiume Agri, per una migliore e più completa caratterizzazione. Le informazioni geologiche saranno poi di fondamentale importanza nella realizzazione dei successivi tematismi.

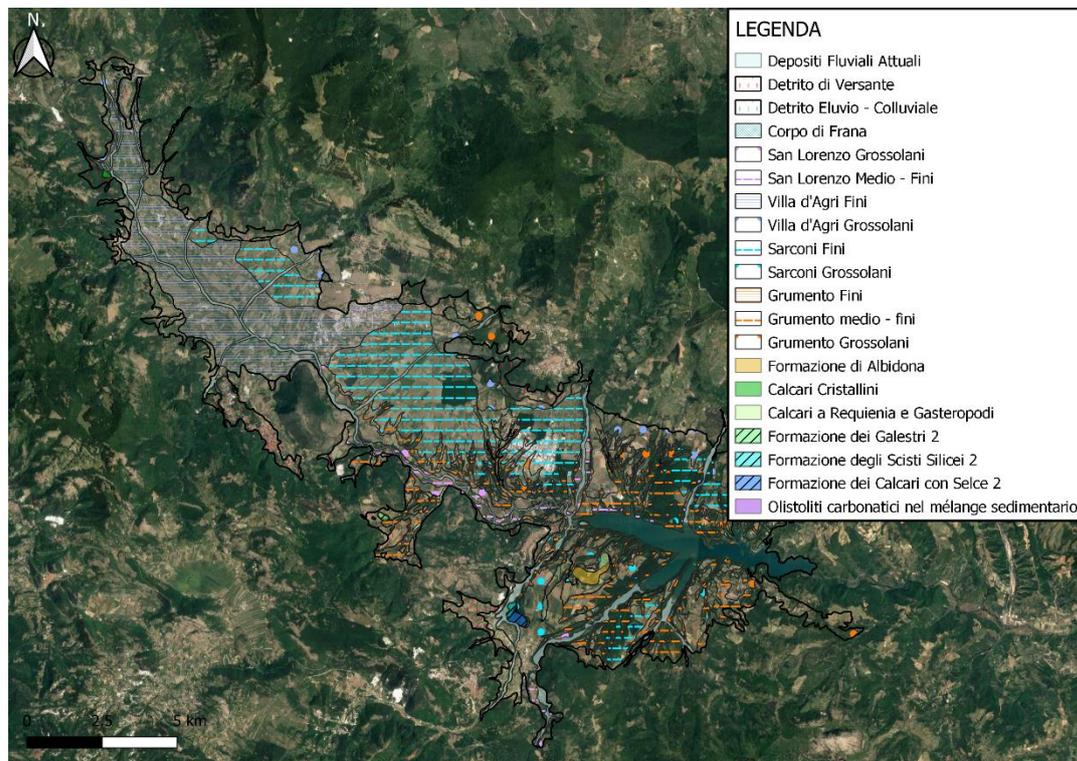


Figura 152. Carta Geologica dell'acquifero Poroso della Piana alluvionale (Palladino G. et al., in preparazione).

6.2.5.1 Soggiacenza (S)

Per il calcolo della soggiacenza è stato possibile usufruire di misure dirette (riferite agli anni 2020 e 2021) del livello di falda di pozzi, pozzi privati, piezometri e sorgenti presenti nell'area. Oltre alle misure dirette, le quali non sono molto numerose e distribuite omogeneamente in riferimento all'estensione dell'area, è stato necessario ricavare un quantitativo maggiore di punti di controllo "vincolanti"; per la loro individuazione si è tenuto conto delle aste fluviali presenti nell'area (RSDI Geoportale della Regione Basilicata), le quali da file vettoriali lineari sono state trasformate in file puntuali ed unite con i punti di controllo delle misure dirette. In questo modo sono stati ottenuti una serie numerosa di punti di controllo "vincolanti" la superficie freatica della falda idrica (Fig.153).

I livelli della falda dei punti di controllo diretto sono stati sottratti alla quota del DTM (Fig.154) per ottenere il livello della piezometrica riferita al livello medio del mare. Per i punti di controllo ricavati dalle aste fluviali invece è stato assegnato, come livello della piezometrica, il valore di quota ricavato dal DTM.

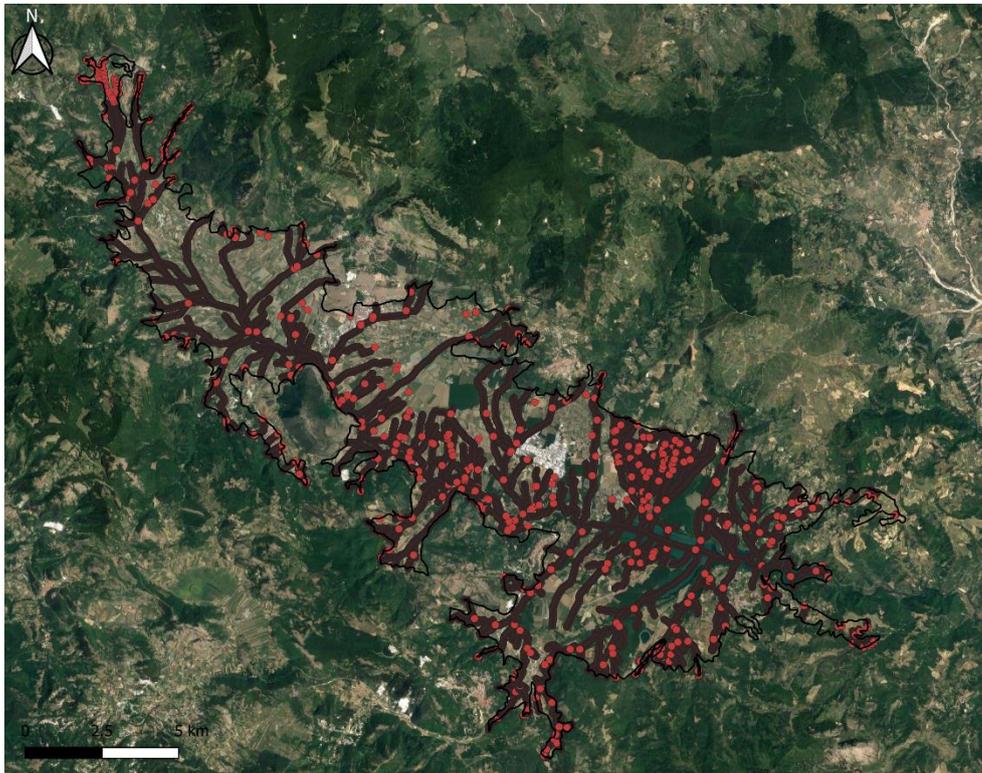


Figura 153. Punti di controllo “vincolanti” all’interno dell’acquifero Poroso della Piana alluvionale.

L’interpolazione dei punti di controllo reali e fittizi (quote freatiche e quote dei corsi d’acqua principali), ha consentito di ottenere una superficie continua e distribuita per l’intera area. Effettuando prove con diverse metodologie di interpolazione (IDW, TIN, ecc.), quella che ha prodotto risultati migliori è stata l’interpolazione TIN. Il TIN (Triangular Irregular Network) è un modello di rappresentazione dei dati in cui l’area in oggetto è tassellata mediante una serie connessa di triangoli di dimensione variabile, disposti irregolarmente nello spazio. Un metodo comunemente utilizzato per la creazione di un TIN si avvale dell’algoritmo di triangolazione di Delaunay, il quale si basa sull’assunto per il quale: “Dato un insieme di N punti sul piano, t è un triangolo di Delaunay se soddisfa la condizione che il cerchio circoscritto al triangolo non contiene altri punti di N ”.

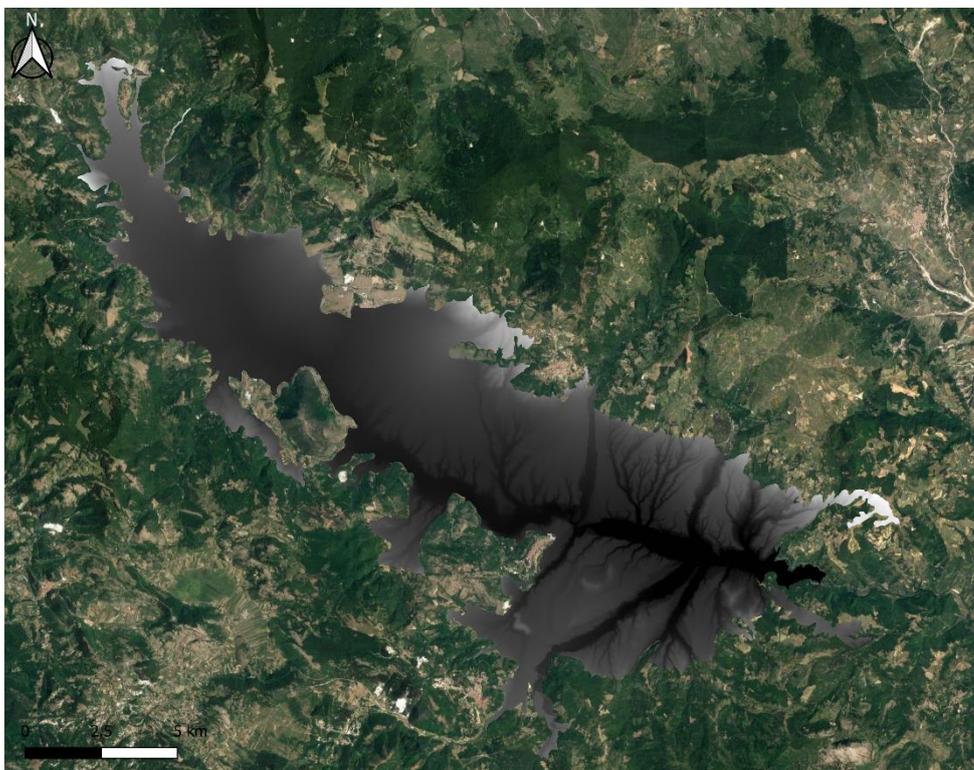


Figura 154. DTM dell'acquifero Poroso della Piana alluvionale.

Dopo aver generato l'interpolazione, essa è stata ritagliata rispetto all'area dell'acquifero Poroso della Piana alluvionale, eliminando le porzioni esterne che generalmente danno degli errori maggiori (insiti nel metodo) (Fig.155).

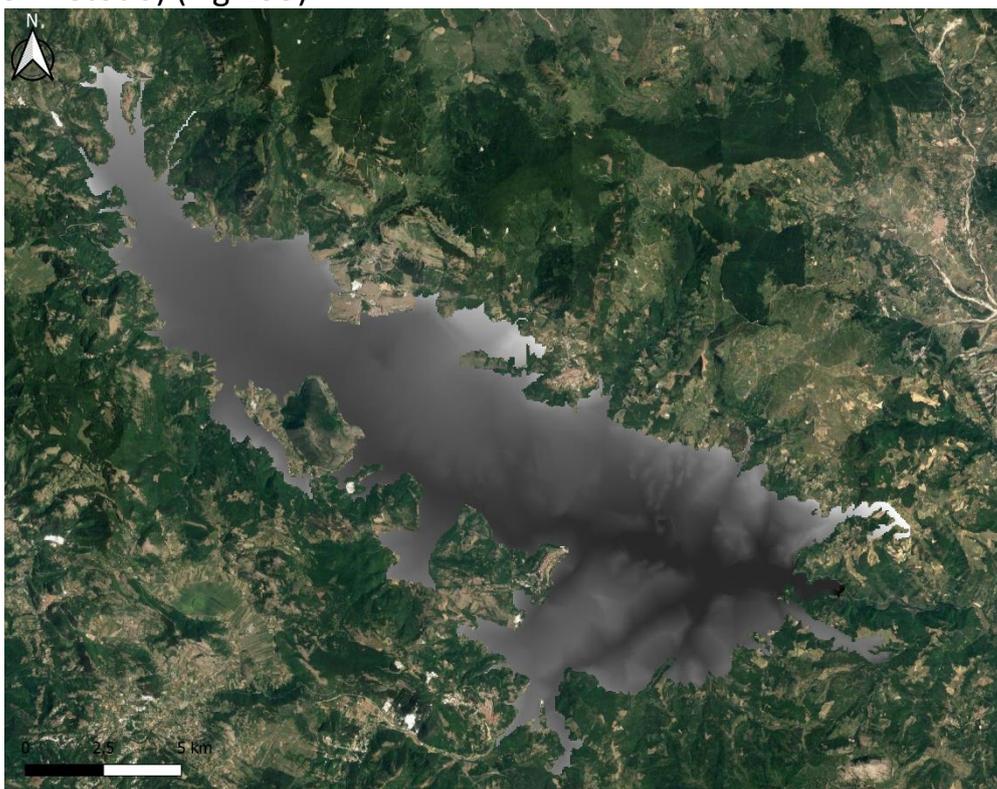


Figura 155. Interpolazione TIN ritagliata rispetto al limite dell'acquifero Poroso della Piana alluvionale.

Successivamente è stata effettuata una differenza tra il DTM (Fig.154) dell'acquifero Poroso della Piana alluvionale e l'interpolazione TIN, ottenendo in questo modo la carta tematica della soggiacenza (Fig.156).

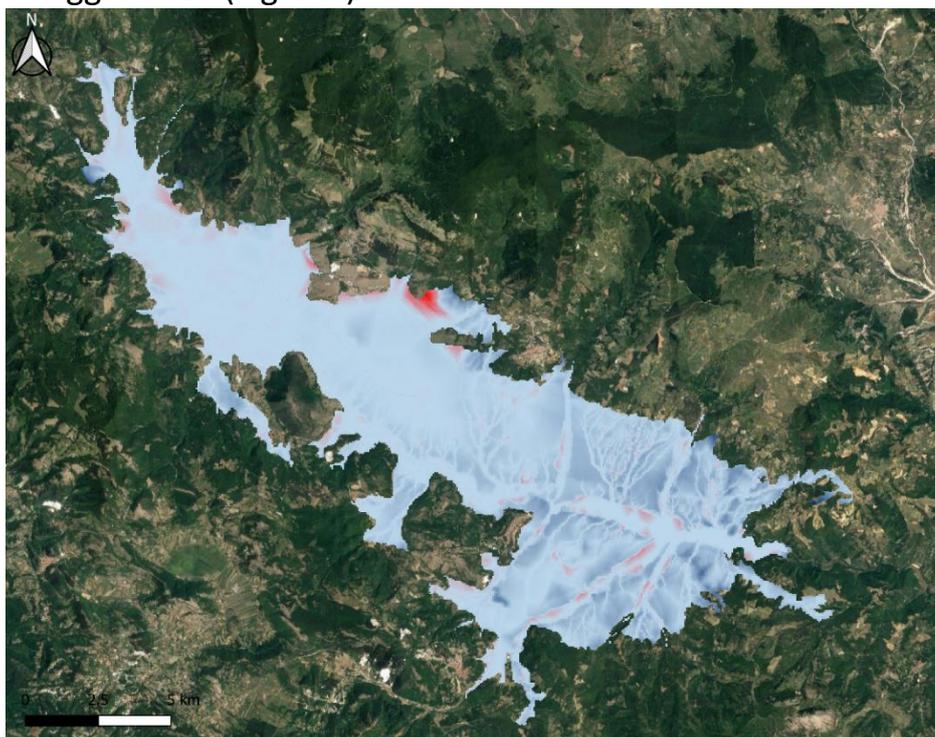


Figura 156. Carta della Soggiacenza dell'acquifero Poroso della Piana alluvionale.

Le aree colorate di rosso sono rappresentative di zone anomale in cui la piezometrica risulta essere irrealisticamente al di sopra della superficie topografica, la maggior parte di queste aree sono localizzate tra due aste fluviali e quindi associate, probabilmente, alla presenza di emergenze d'acqua.

Dal grafico proposto da Civita & De Maio (2000), è stata ricavata l'equazione rappresentante la curva che correla i valori di soggiacenza ai relativi punteggi (Fig.157).

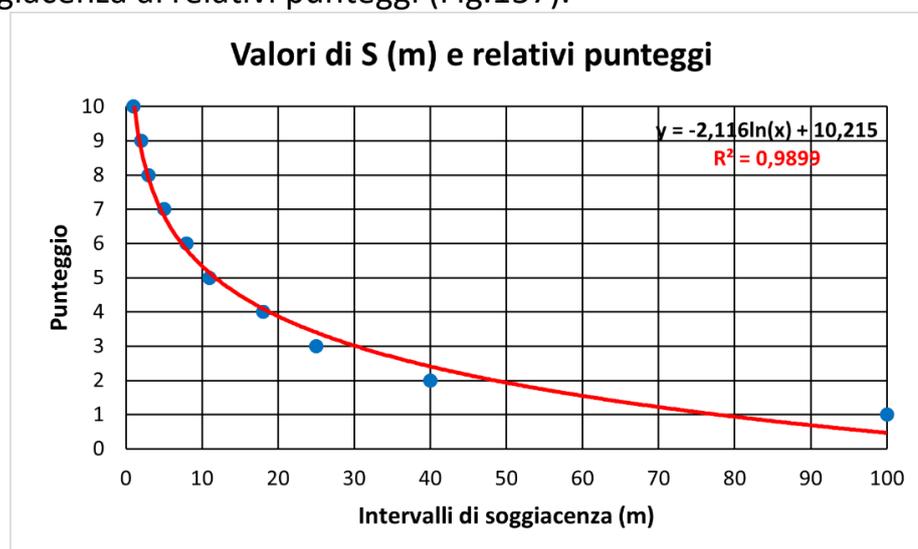


Figura 157. Visualizzazione della curva e della relativa equazione rappresentativa dei punteggi della soggiacenza (S).

Infine, per ottenere la carta dei punteggi della soggiacenza (Fig.158), l'equazione della curva precedentemente ricavata è stata associata al file raster dei valori di soggiacenza.

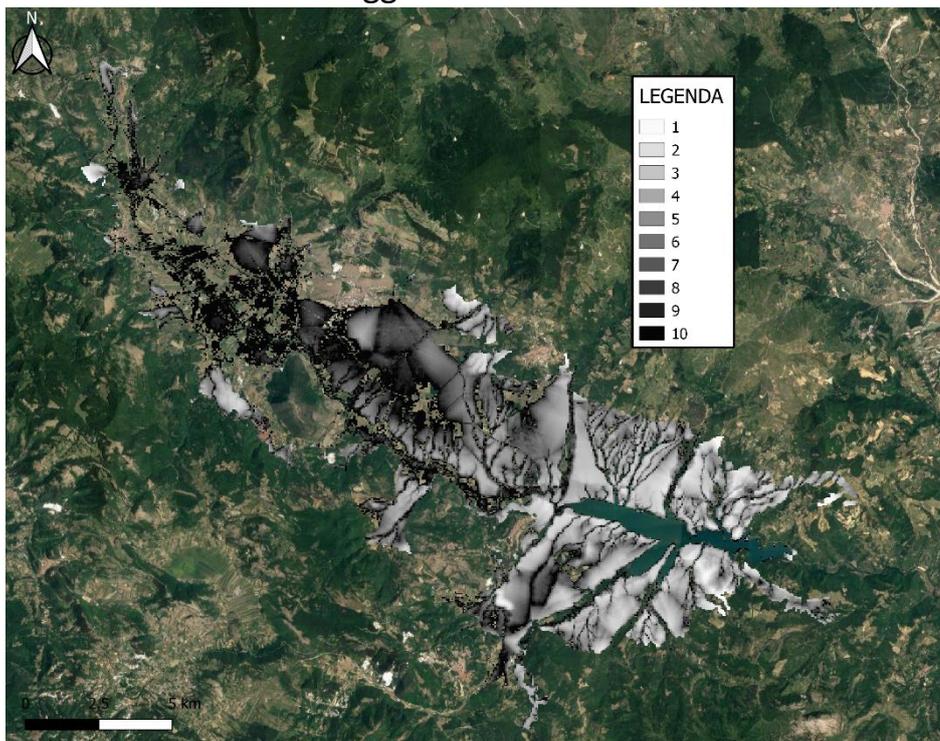


Figura 158. Carta dei punti della soggiacenza (S) relativa all'acquifero Poroso della Piana alluvionale.

Come è possibile notare dall'immagine, sono presenti aree in cui non si ha alcun punteggio, ciò è probabilmente riconducibile alla presenza di aree con valori di soggiacenza negativa (corrispondenti ad aree di affioramento della superficie freatica) che avranno ripercussioni nella valutazione finale della carta della vulnerabilità intrinseca.

6.2.5.2 Infiltrazione Efficace (I)

Come per tutti gli acquiferi precedenti, il calcolo dell'infiltrazione efficace necessita della carta geologica (Fig.152) e della carta pedologica.

Dalla carta pedologica (da Basilicata.net, in scala 1: 50.000) in Figura 159, si evince che la quasi totalità dell'area presenta una tessitura franco sabbiosa.

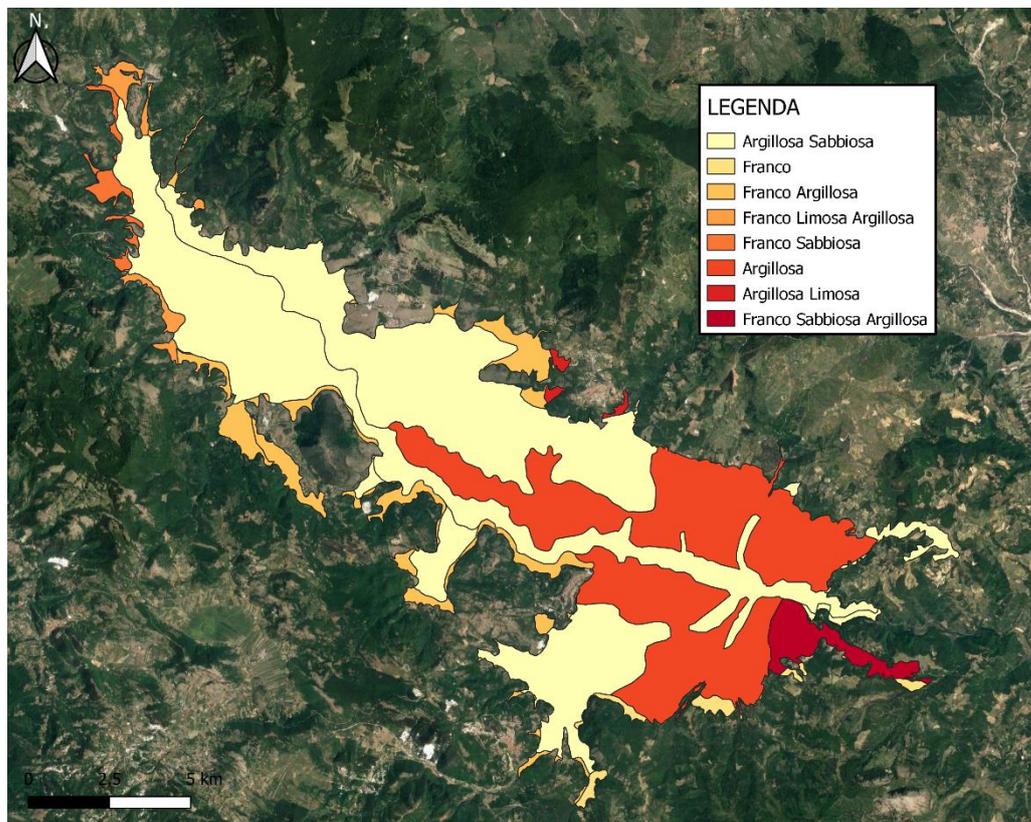


Figura 159. Carta pedologica dell'acquifero Poroso della Piana alluvionale.

La carta geologica e pedologica sono necessarie per la stima dei coefficienti di infiltrazione potenziale χ , utili per la successiva realizzazione della carta dell'infiltrazione efficace (Fig.160).

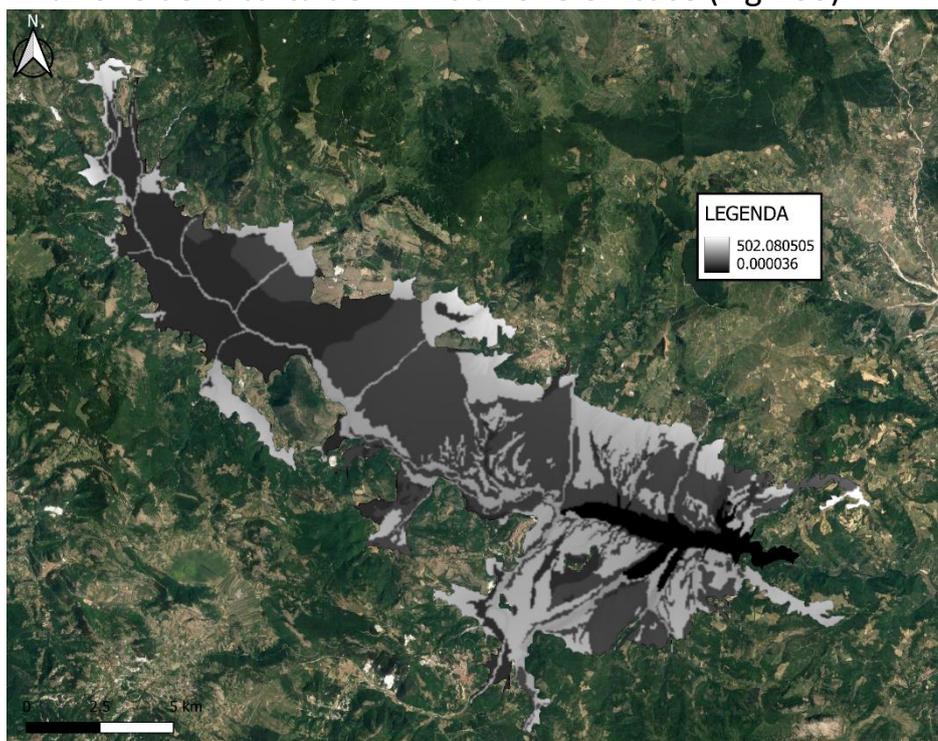


Figura 160. Carta dell'infiltrazione efficace dell'acquifero Poroso della Piana alluvionale.

Successivamente dal grafico proposto da Civita & De Maio (2000), è stata ricavata l'equazione rappresentante la curva che correla i valori di infiltrazione ai relativi punteggi (Fig.161).

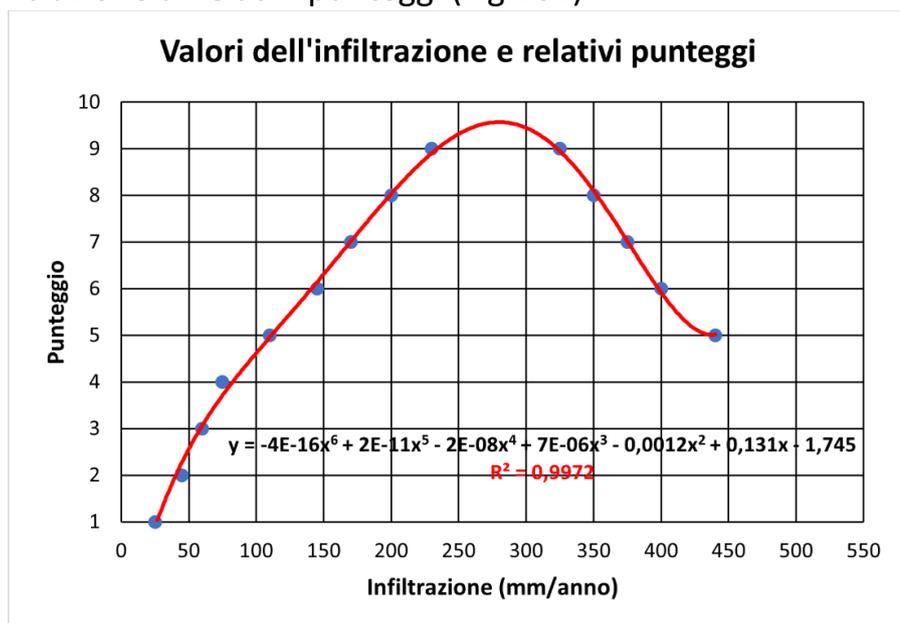


Figura 161. Visualizzazione della curva e della relativa equazione rappresentativa dei punteggi dell'infiltrazione efficace.

Per ottenere la carta dei punteggi dell'infiltrazione efficace (Fig.162), l'equazione della curva precedentemente ricavata è stata associata al file raster dei valori di infiltrazione efficace.

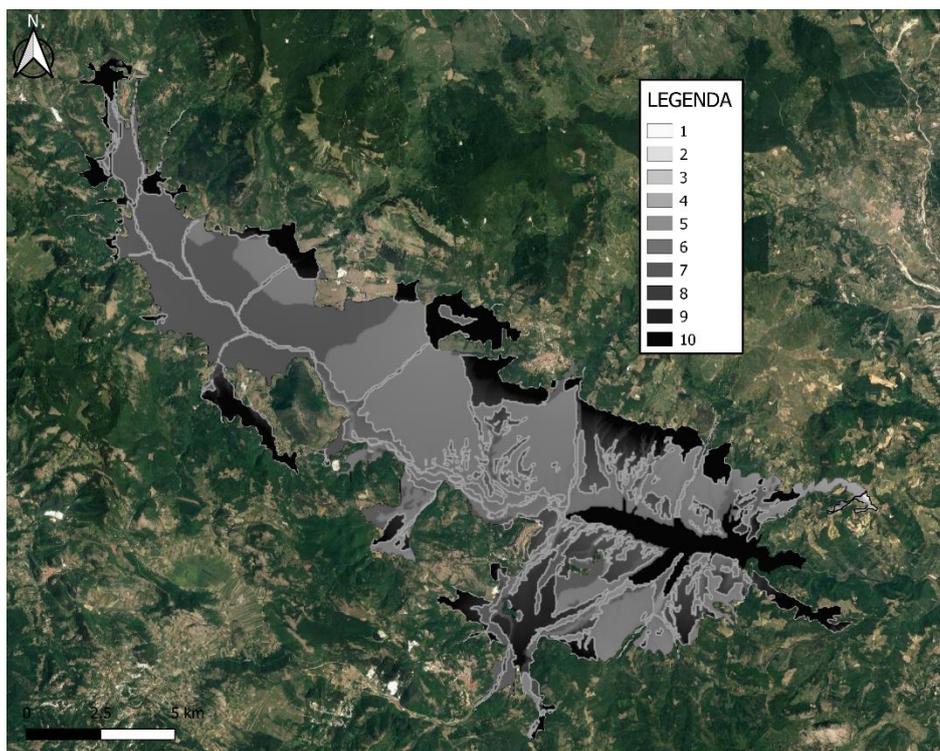


Figura 162. Carta dei punteggi dell'infiltrazione efficace relativa all'acquifero Poroso della Piana alluvionale.

6.2.5.3 Effetto di autodepurazione del Non saturo (N)

Come per gli acquiferi precedenti, la valutazione di questo parametro si basa sulle litologie affioranti nell'area. La tabella di valori è la stessa utilizzata in precedenza (Tab.32).

Ad ogni litologia dell'area è stato associato il corrispondente valore, in modo da ottenere la carta dei punteggi del parametro non saturo (Fig.163).

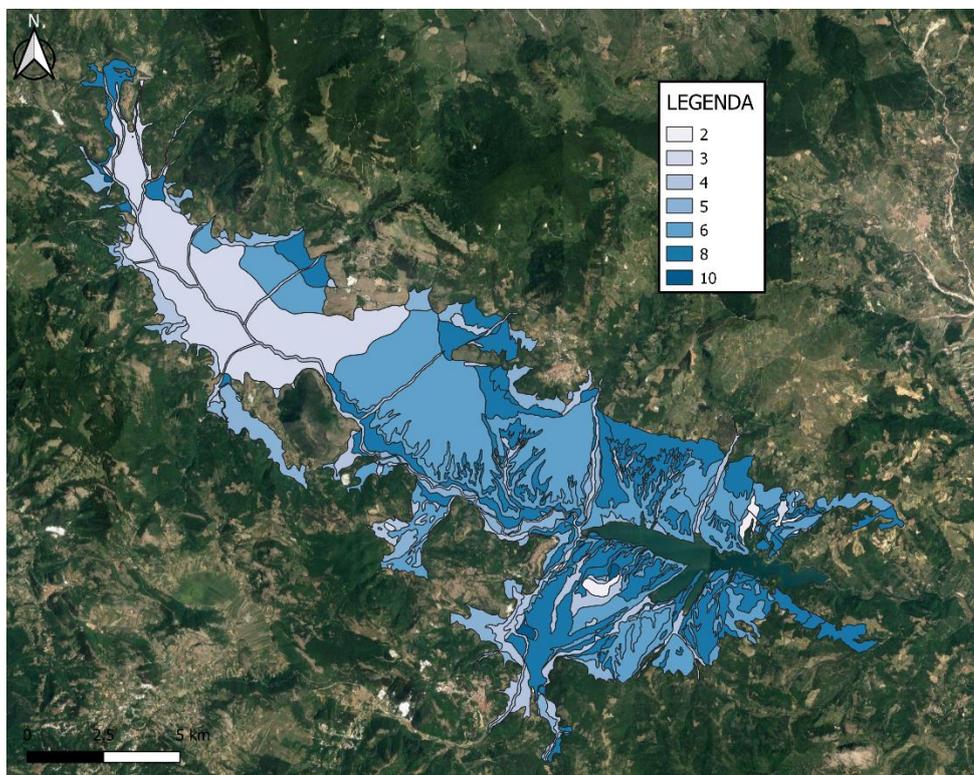


Figura 163. Carta dei punteggi relativi al parametro N (Non saturo) dell'acquifero Poroso della Piana alluvionale.

Gli alti valori del parametro **N** sono associati alla presenza di sedimenti Quaternari grossolani (specialmente nella porzione occidentale); i bassi valori sono associati alla presenza di sedimenti Quaternari a granulometria da media-fini a fini (Fig.159).

6.2.5.4 Tipologia di copertura (T)

Per il parametro T, si è tenuto conto della tessitura dei suoli che è stata ricavata dalla carta pedologica. Individuata la classe tessiturale, sulla base della Tabella 33 si sono individuati i relativi punteggi.

Ad ogni classe tessiturale presente nell'area è stato associato il corrispondente punteggio, in modo da ottenere la carta dei punteggi della tipologia di copertura (Fig.164).

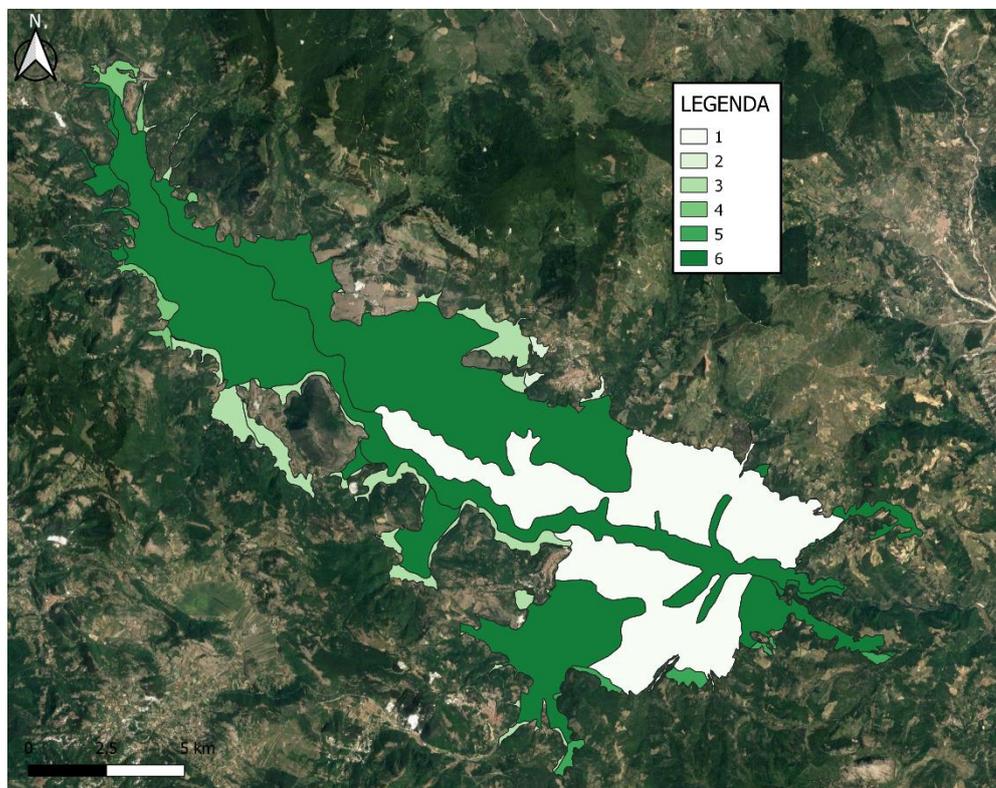


Figura 164. Carta dei punteggi relativi al parametro T (Tipologia di copertura) dell'acquifero Poroso della Piana alluvionale.

Dall'immagine si nota che la maggior parte del territorio presenta una classe tessiturale Argillosa Sabbiosa ed Argillosa, ed in alcune porzioni Franco Argillosa (Fig.159). Assumendo quindi alti punteggi (5-6) nelle porzioni nord-ovest della piana e punteggi molto bassi (1) in concomitanza dei versanti che si affacciano sullo specchio d'acqua del Lago Pertusillo.

6.2.5.5 Caratteristiche idrogeologiche dell'Acquifero (A)

Come per il parametro **N**, la caratterizzazione di questo parametro si basa sulle caratteristiche litologiche della roccia contenente l'acquifero. Tutti i punteggi sono messi in evidenza nella Tabella 34.

Ad ogni litologia affiorante nell'area è stato assegnato il punteggio corrispondente, ottenendo così la carta dei punteggi delle caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero (Fig.165).

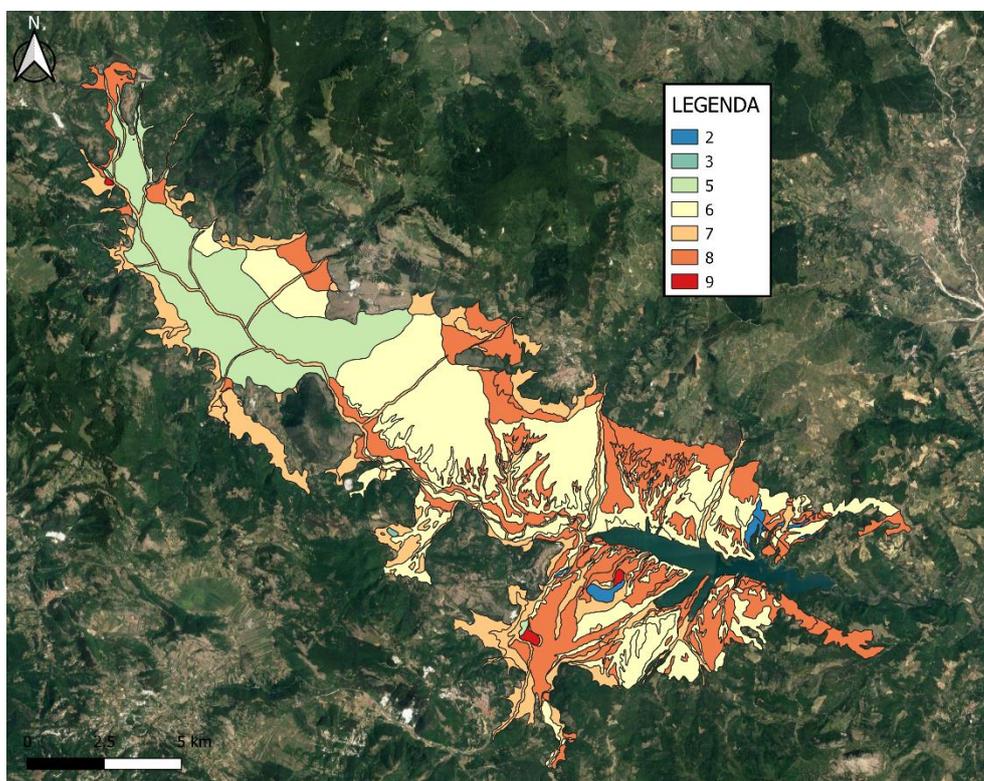


Figura 165. Carta dei punteggi relativi al parametro A (Caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero) dell'acquifero Poroso della Piana alluvionale.

Come per il parametro **N**, gli alti valori sono associati alla presenza di sedimenti quaternari grossolani; i bassi valori, anche per questo parametro, sono associati alla presenza di sedimenti Quaternari da medi-fini a fini.

6.2.5.6 Conducibilità idraulica dell'acquifero (C)

Per la valutazione del punteggio, è stato necessario conoscere l'ordine di grandezza assunto dalla conducibilità idraulica; la sua valutazione è avvenuta attraverso la Tabella 35, la quale assegna ad ogni complesso idrogeologico il corrispondente ordine di grandezza.

Per l'assegnazione dei punteggi si è fatto riferimento alla Figura 166, proposta da Civita & De Maio nel 2000.

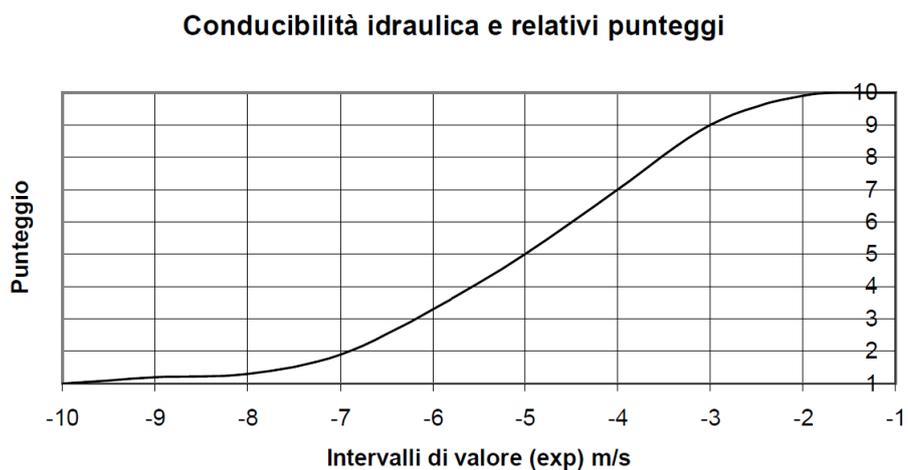


Figura 166. Valori della conducibilità idraulica e relativi punteggi nel metodo SINTACS (Civita M., De Maio M., 2000).

Dopo aver ricavato i punteggi, sono stati assegnati alle corrispondenti litologie in modo da ottenere la carta dei punteggi della conducibilità idraulica (Fig.167).

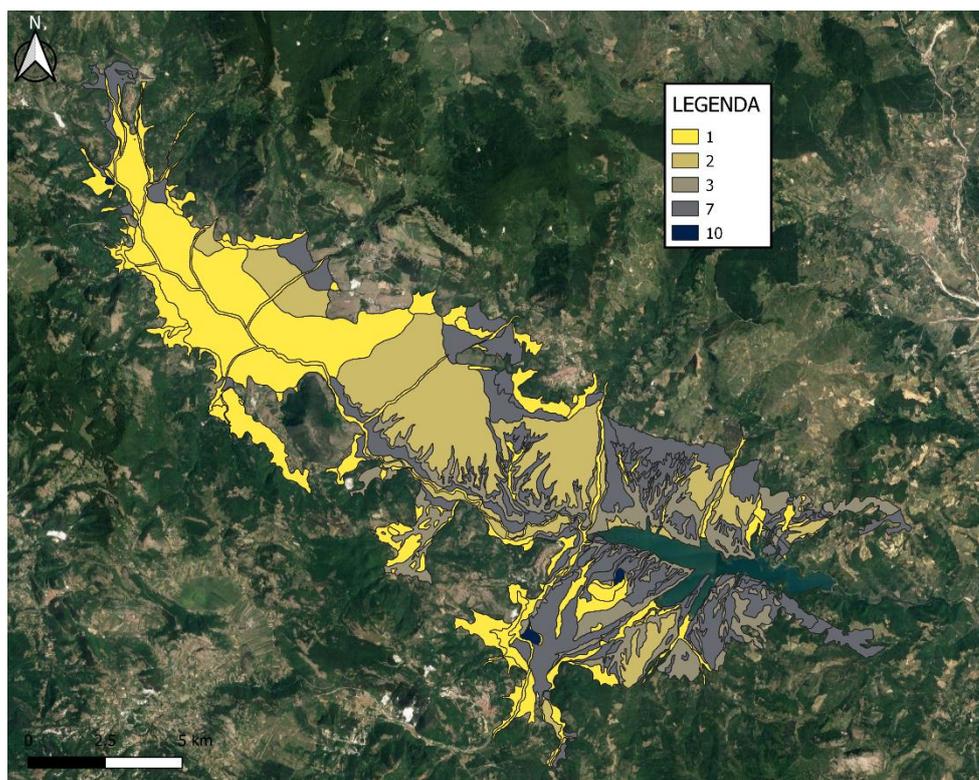


Figura 167. Carta dei punteggi relativi al parametro C (Conducibilità idraulica) dell'acquifero Poroso della Piana alluvionale.

Anche in questo caso, gli alti valori assunti dal parametro **C**, sono associati alla presenza di sedimenti Quaternari grossolani.

6.2.5.7 Acclività della Superficie topografica (S)

La valutazione di questo parametro, ha richiesto l'elaborazione della carta della pendenza ottenuta a partire dal modello digitale del terreno (DTM). La carta delle pendenze (Fig.168) esprime i valori in percentuale.

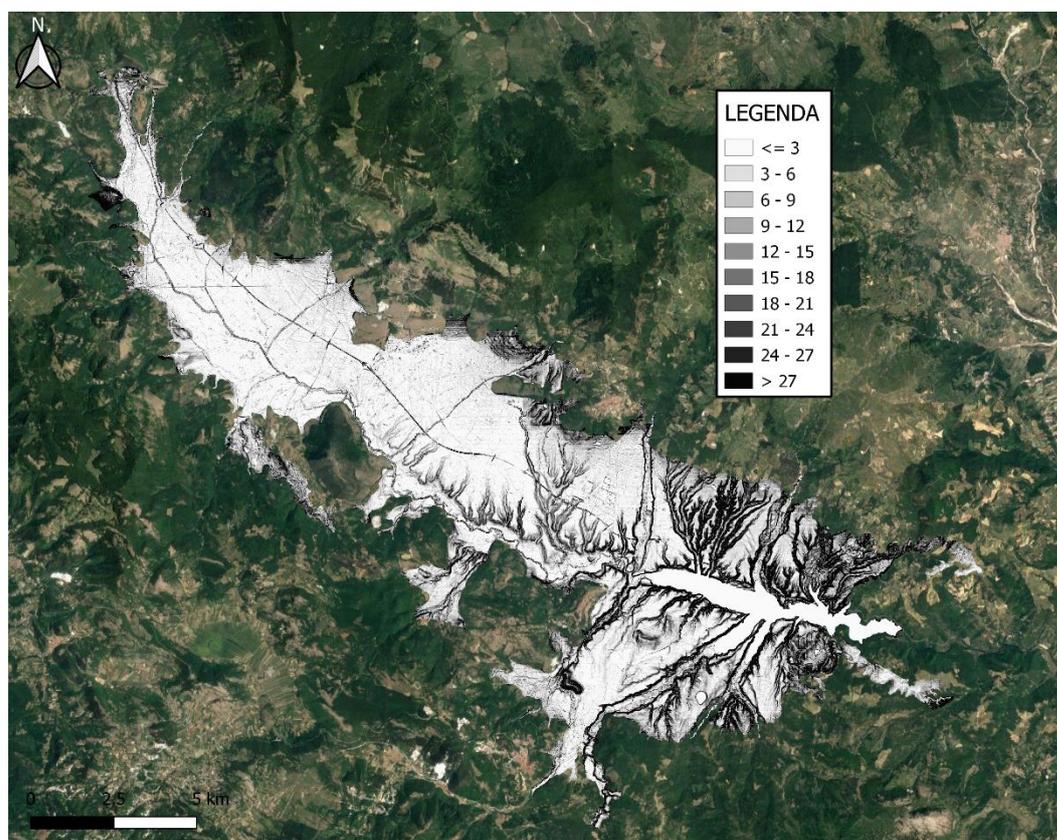


Figura 168. Carta della pendenza (S) dell'acquifero Poroso della Piana alluvionale. I valori sulla legenda sono espressi in percentuale.

In seguito, dal grafico proposto da Civita & De Maio (2000) è stata ricavata l'equazione della curva (Fig.169) che rappresenta la relazione tra valori di pendenza e punteggi.

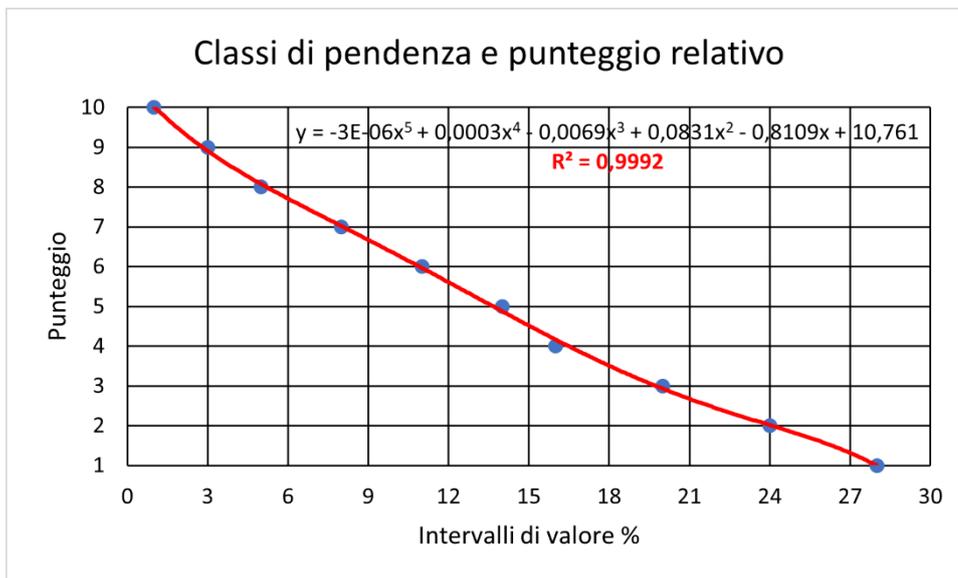


Figura 169. Visualizzazione della curva e della relativa equazione rappresentativa dei punteggi della pendenza (S).

Infine, per ottenere la carta dei punteggi della pendenza (Fig.170), l'equazione ricavata è stata associata al file raster dei valori della pendenza.

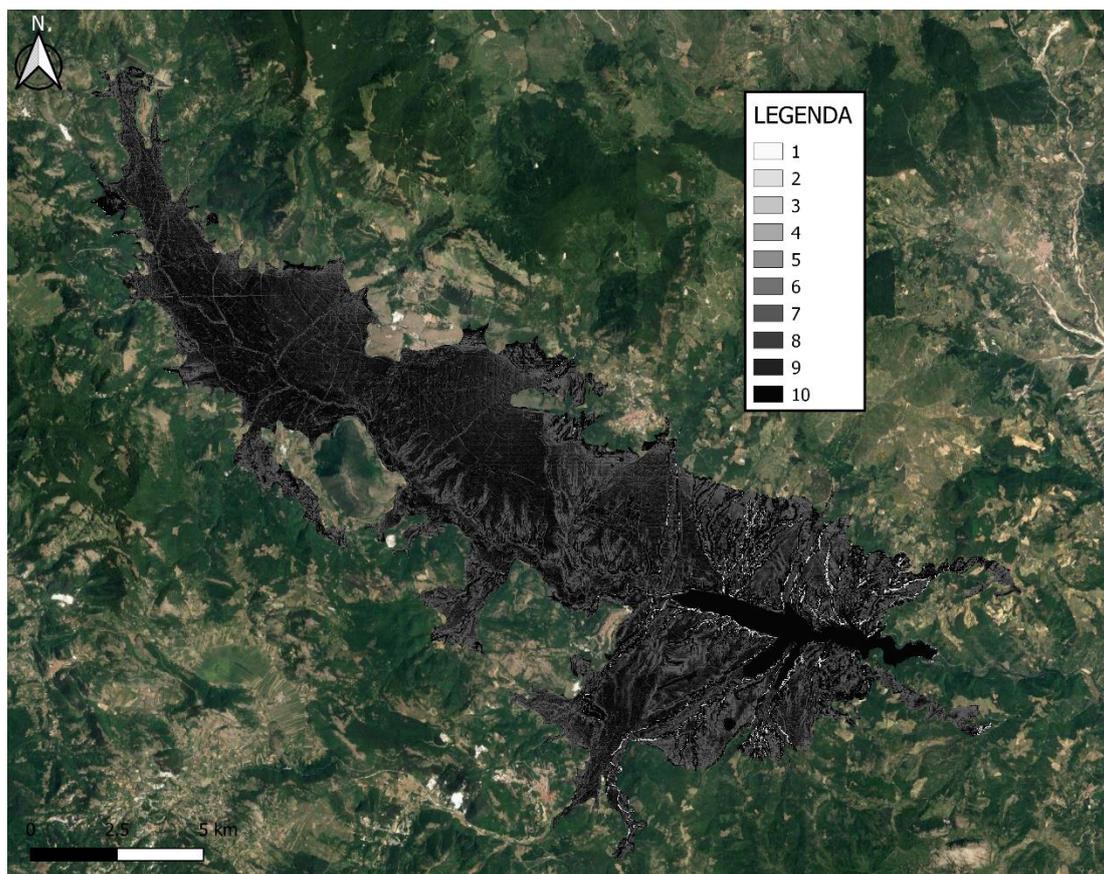


Figura 170. Carta dei punteggi della pendenza (S) relativa all'acquifero Poroso della Piana alluvionale.

6.2.5.8 Carta della Vulnerabilità Intrinseca

Per ottenere la carta della vulnerabilità intrinseca, è stato necessario trasformare tutte le carte tematiche in formato raster e poi associare ad ogni parametro il corrispondente peso moltiplicatore dello scenario. Come scenario è stato preso in considerazione quello “impatto rilevante”.

Dopodiché, è stato calcolato l'indice SINTACS grezzo e poi normalizzato. In base alle classi di vulnerabilità espresse nella Tabella 37, è stata realizzata la Carta della Vulnerabilità Intrinseca (Fig.171).

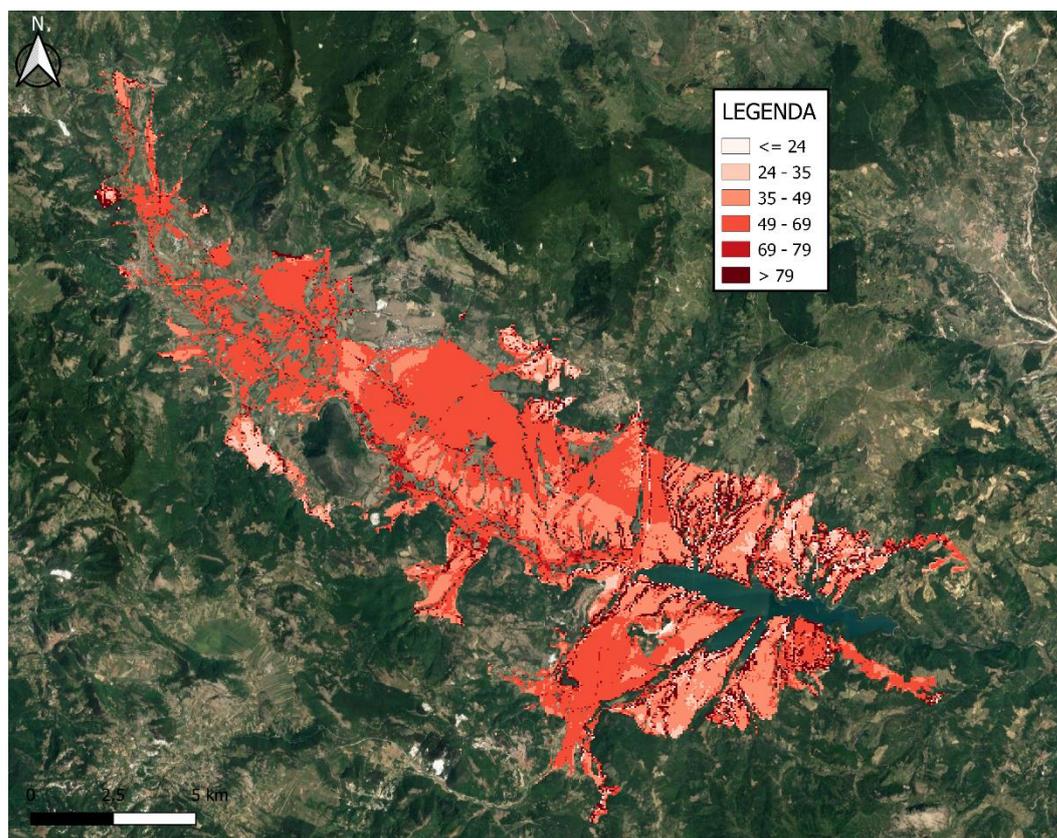


Figura 171. Carta della vulnerabilità intrinseca dell'acquifero Poroso della Piana alluvionale ottenuta con la stringa dei pesi dello scenario “impatto rilevante”.

Come si può vedere dall'immagine, l'intero acquifero ha un grado di vulnerabilità che va da medio ad alto con alcune porzioni di vulnerabilità elevata, dovute alla presenza di sedimenti Quaternari più grossolani. È da sottolineare che il risultato finale è inficiato dal calcolo del parametro della soggiacenza, il quale non è stato possibile realizzare con la precisione dovuta a causa dei limiti del software.

6.3 Determinazione dei parametri e relativi punteggi nel metodo EPIK

Il metodo EPIK è stato applicato per il calcolo dei parametri, utilizzando una metodologia analoga a quella applicata per il SINTACS. Come già descritto nel Capitolo 4, il metodo EPIK si basa sui seguenti quattro parametri:

- E Epicarso
- P Copertura protettiva del suolo
- I Condizioni d'infiltrazione
- K Grado di sviluppo della rete carsica

Per tutti e quattro i parametri del metodo si sono costruite le rispettive mappe, utilizzando, per un'analisi dettagliata un modello raster che prevede la suddivisione del territorio in celle quadrato di lato pari a 5m.

6.3.1 Acquifero Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola

L'acquifero del Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola (Fig.172) ha un'estensione di circa 42 Km².



Figura 172. Acquifero Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola.

6.3.1.1 Epicarso (E)

Il metodo prevede che la determinazione di questo parametro avvenga attraverso dei parametri morfologici facilmente rilevabili dall'analisi territoriale di superficie. Infatti non esistono oggi degli studi approfonditi che riguardano proprio lo sviluppo dell'epicarso, quindi l'unico modo per valutarne l'influenza ai fini della valutazione della vulnerabilità, è proprio quello di eseguire un'analisi sui parametri direttamente collegati all'epicarso, e facilmente rilevabili dall'analisi morfologica, e valutarlo il base ad esso.

Nel nostro caso, utilizzando un file LIDAR (Fig.173) che possiede una risoluzione altissima pari ad 1m, sono state individuate tutte le forme associate all'ambiente carsico (in particolare la presenza di doline). Oltre alle doline, sono state anche prese in considerazione i punti di intersezione tra le strutture tettoniche, essendo potenzialmente vie di concentrazione delle acque.

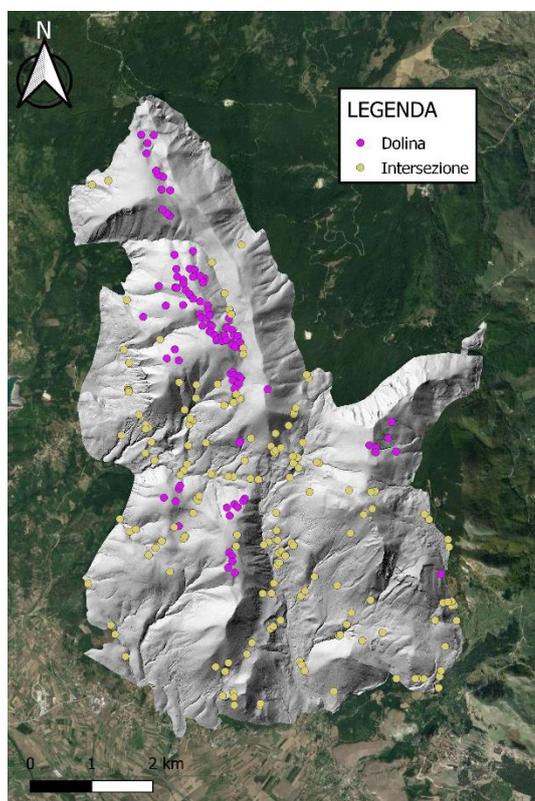


Figura 173. Doline ed intersezioni dell'acquifero Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola.

Una volta che sono stati digitalizzati gli elementi morfologici dell'ambiente carsico, sono stati associati alle corrispondenti formazioni geologiche, sulla base della Carta Geologica (Fig.174) di Palladino G. et al. (in preparazione). Ed è stata data maggiore enfasi

a quelle formazioni calcaree al cui interno ricadono doline o intersezione tra strutture tettoniche.

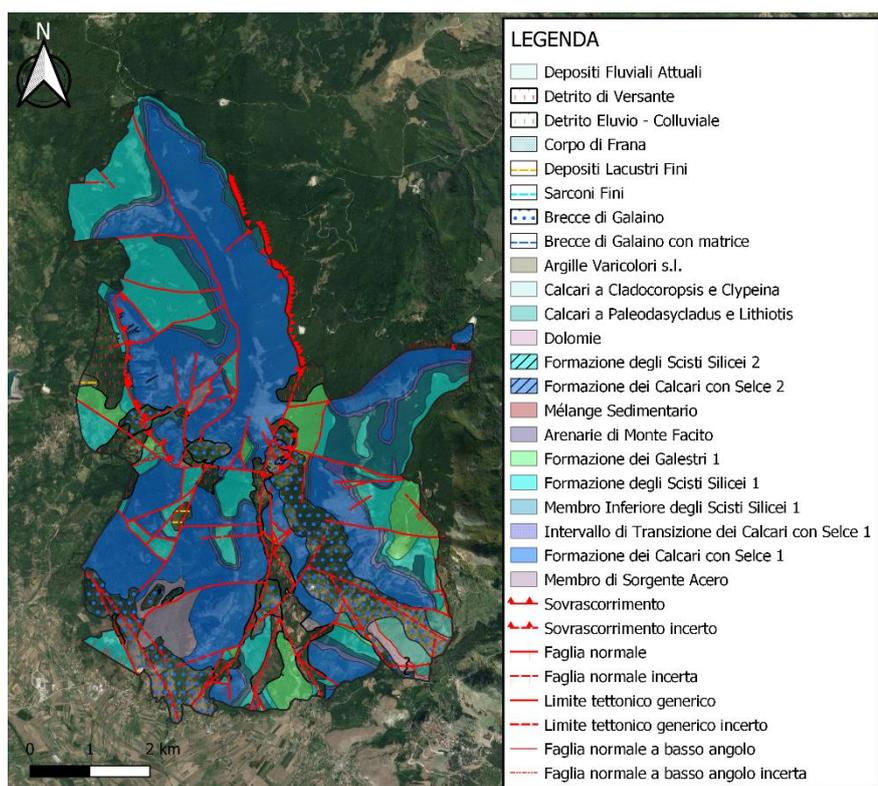


Figura 174. Carta Geologica dell’acquifero di Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola (Palladino G. et al., in preparazione).

Successivamente si è proceduto all’elaborazione tramite GIS, al fine di assegnare ad ognuna delle formazioni presenti, una delle tre classi nella quali è stato suddiviso l’attributo E (Tab.41).

Epicarso	Classe	Morfologia Carsica	Punteggio
Altamente sviluppato	E1	Shaft, sinkholes o doline, polje, campi karren, sorgenti, grotte, inghiottitoi	1
Moderatamente sviluppato	E2	Zone intermedie all'allineamento di doline, valli secche, codule	3
Piccolo o	E3	Assenza di	4

assente	fenomeni morfologici dell'ambiente carsico
---------	--------------------------------------------

Tabella 41. Classi dell'attributo E (Epicarso) (Doerfliger et al., 1999).

L'elaborazione in ambiente GIS ha prodotto una carta dei punteggi del parametro dell'epicarso (Fig.175), in cui sono evidenziate le tre diverse aree appartenenti alle relative classi.

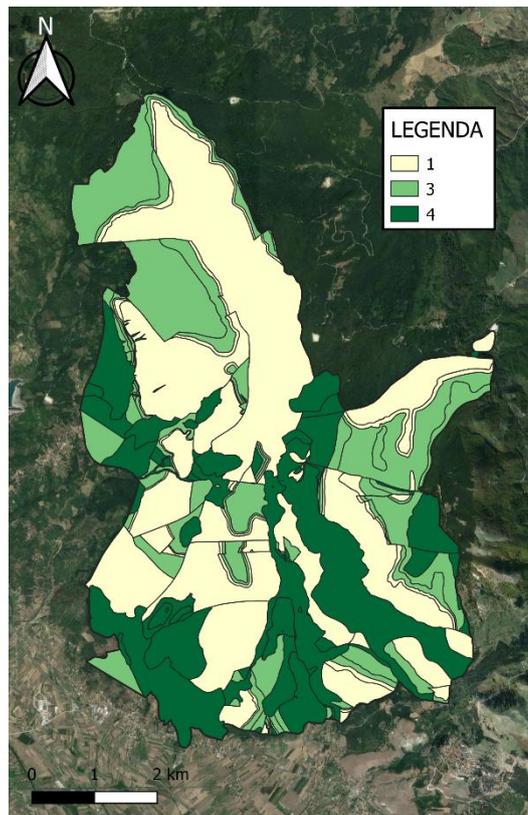


Figura 175. Carta dei punteggi dell'epicarso relativa all'acquifero Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola.

I punteggi più bassi, che esprimono una vulnerabilità alta, sono ovviamente associati alla Formazione dei Calcari con Selce ed ai Calcari a Cladocropsis e Clypeina.

6.3.1.2 Copertura Protettiva del suolo (P)

La determinazione di questo parametro sarebbe dovuta avvenire su basi esclusivamente pedologiche. Sarebbe stato necessario avere cioè, dei dati di base completi sulle caratteristiche rappresentative del suolo nel territorio in esame in termini di spessore ed orizzonti geologici, e da questi, in base alla Tabella 42, riportata di seguito, determinare le classi di vulnerabilità.

Copertura del suolo	Classi di protezione	Caratterizzazione		Punteggio
		Suolo direttamente giacente sul calcare o su strutture geologiche ad alta permeabilità, per esempio detriti di falda e depositi glaciali	Suolo giacente su strutture geologiche a bassa permeabilità, per esempio argilla e silt	
Assente	P1	0-20 cm di suolo	0-20 cm di suolo su strutture che hanno uno spessore minore di 1 m	1
Intermedia P1-P3	P2	20-100 cm di suolo	20-100 cm di suolo su strutture che hanno uno spessore di 1 m	2
Intermedia P2-P4	P3	100-200 cm di suolo	<100 cm di suolo o >100 cm di suolo e spessore della struttura geologica a bassa permeabilità >1 m	3
Presente	P4	>200 cm di	>100 cm di	4

		suolo	suolo e struttura detritica di bassissima conducibilità idraulica o spessore dello strato impermeabile >8 m
--	--	-------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Tabella 42. Classi dell'attributo P (Copertura protettiva) (Doerfliger et al., 1999).

La mancanza di dati così tanto specifici, ci ha costretto ad utilizzare un approccio più soggettivo ma tenendo, comunque, in considerazione la suddivisione riportata nella tabella. Come prima cosa, sono state isolate tutte le formazioni calcaree dal file della Carta Geologica e sono state unite con file della Tipologia di Copertura (RSDI Geoportale della Regione Basilicata).

Dove sono presenti boschi, coltivazioni o aree antropizzate è stata assegnata la classe P4, questo perché in queste aree lo spessore del suolo non può essere limitato. Laddove, invece, è presente roccia nuda, specchi d'acqua oppure aree estrattive, lo spessore del suolo è praticamente assente e quindi è stata assegnata la classe P1. Per le aree di pascoli, prati ecc... è stata assegnata la classe P2, poiché in queste aree lo spessore del suolo è abbastanza limitato. In base a questa classificazione, è stato possibile produrre la carta dei punteggi del parametro della copertura protettiva (Fig.176).

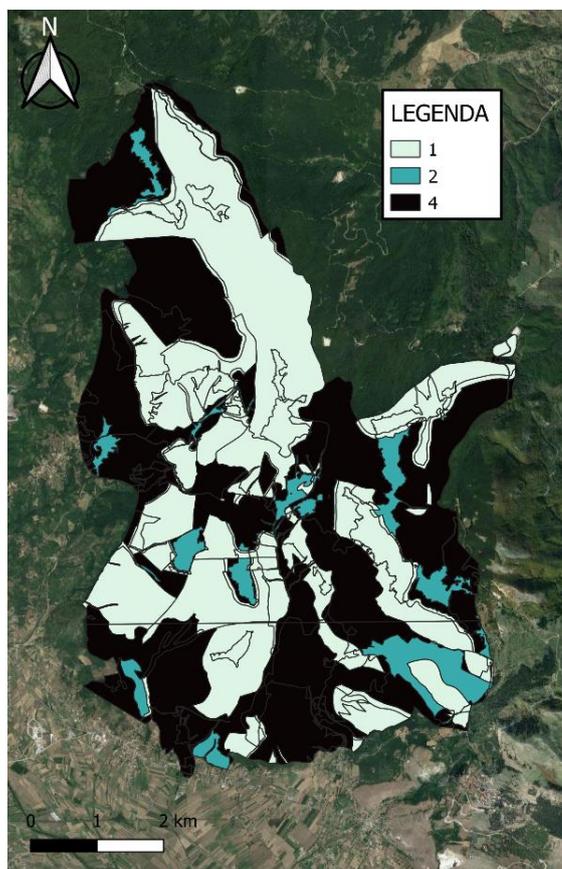


Figura 176. Carta dei punteggi della copertura protettiva relativa all’acquifero Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola.

6.3.1.3 Condizioni d’Infiltrazione (I)

Si è già visto in precedenza che il parametro **I** riguarda le condizioni di infiltrazione nell’acquifero carsico, condizioni d’infiltrazione che possono passare da concentrata a diffusa (Tab.43).

Condizioni di infiltrazione	Classi di infiltrazione	Caratterizzazione	Punteggio
Concentrata	I1	Correnti temporanee o perenni - correnti temporanee o perenni alimentanti inghiottitoi e doline - aree d'influenza (codule) di queste correnti appena menzionate, includenti sistemi di drenaggio superficiale	1
Intermedia I1-I3	I2	Aree d'infiltrazione concentrata (senza	2

		sistemi di drenaggio artificiale) con pendenza >10% per campi coltivati, e >25% per prati e pascoli.	
Intermedia I2-14	I3	Aree d'infiltrazione concentrata (senza sistemi di drenaggio artificiale) con pendenza <10% per campi coltivati, e <25% per prati e pascoli	3
Diffusa	I4	Il resto del territorio	4

Tabella 43. Classi dell'attributo I (Infiltrazione efficace) (Doerfliger et al., 1999).

Anche per questo parametro, come per il parametro **P**, sono state isolate tutte le formazioni calcaree dal file della Carta Geologica e sono state unite con file della Tipologia di Copertura.

Alle aree in cui affiorano le formazioni calcaree è stata assegnata la classe I1, dal momento che si assume che queste formazioni siano fratturate e presentino forme carsiche superficiali. Per le aree come prati, pascoli e coltivazioni è stata assegnata la classe I2 poiché la maggior parte del territorio presenza pendenze abbastanza elevate. Per tutte le restanti categorie è stata assegnata la classe I4. Sulla base di questa caratterizzazione è stato possibile produrre la carta dei punteggi del parametro delle condizioni d'infiltrazione (Fig.177).

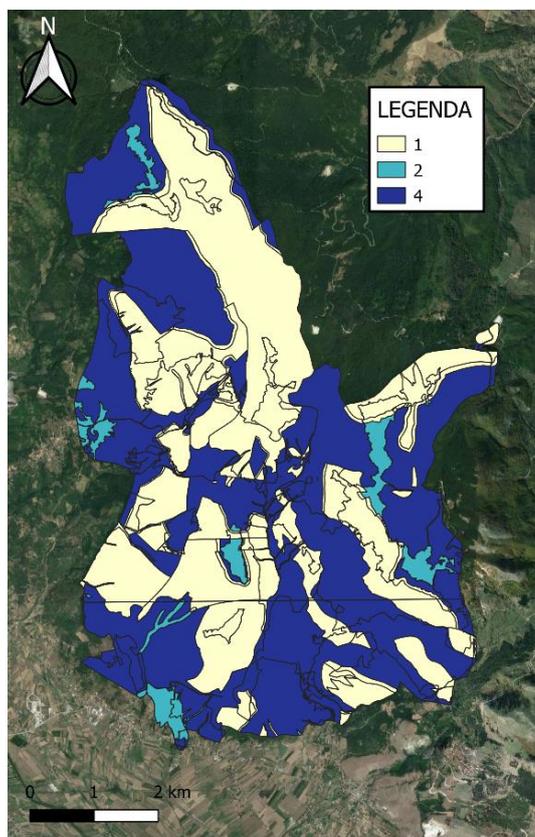


Figura 177. Carta dei punteggi delle condizioni d’infiltrazione relativa all’acquifero Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola.

6.3.1.4 Grado di sviluppo della rete Carsica (K)

Per la valutazione di questo attributo, bisognerebbe prendere in considerazione lo sviluppo della rete carsica dell’area, ma le conoscenze a disposizione non hanno un’impronta tale da spiegare con chiarezza assoluta come sia realmente la struttura della rete carsica, ma ci sono comunque delle indicazioni di massima sufficienti tali da poter valutare l’attributo. Sulla base della Tabella 44, sono state effettuate alcune considerazioni.

Rete carsica	Classi rete carsica	Caratterizzazione	Punteggio
Rete carsica ben sviluppata	K1	Presenza di rete carsica ben sviluppata (rete con ampiezza dei canali dal decimetro al metro)	1
Rete carsica poco sviluppata	K2	Presenza di una rete carsica poveramente sviluppata (piccola rete di condotti o poveramente connessi o	2

		apertura dei condotti minore del decimetro	
Solo acquifero fratturato	K3	Presenza di sorgenti di emergenza attraverso terreni porosi	3

Tabella 44. Classi dell'attributo K (Rete carsica) (Doerfliger et al., 1999).

Si è presa in considerazione, come base, la Carta Geologica dell'area. Dal momento che l'area in esame non presenta un carsismo estremamente sviluppato, è stato deciso di assegnare la classe K2 a tutte quelle aree dove sono presenti formazioni calcaree; invece per il resto dell'area è stata assegnata la classe K3. In questo modo è stato possibile ottenere la carta dei punteggi del grado di sviluppo della rete carsica (Fig.178).

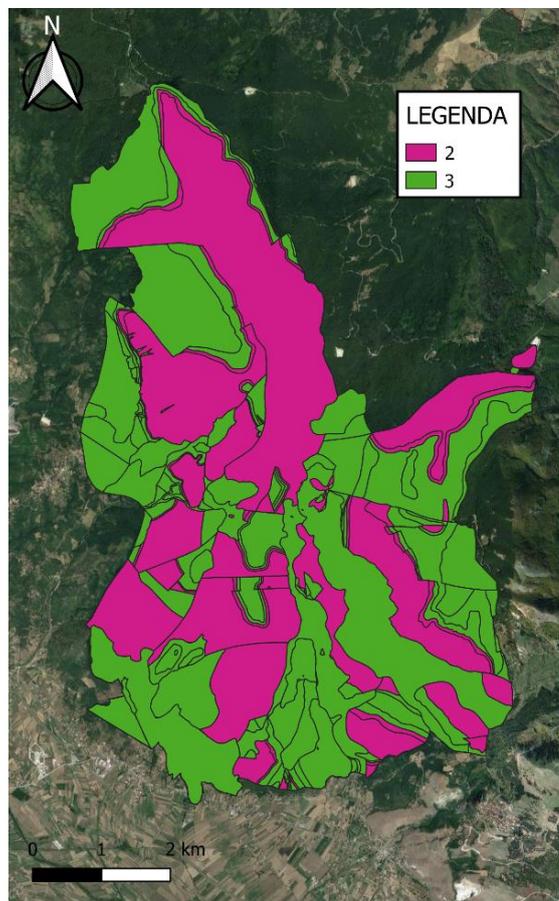


Figura 178. Carta dei punteggi del grado di sviluppo della rete carsica relativa all'acquifero Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola.

6.3.1.5 Carta della Vulnerabilità Intrinseca

L'ultimo passo prima del calcolo dell'indice finale di vulnerabilità, è quello dell'assegnazione dei moltiplicatori agli attributi. Questi rendono conto dell'importanza che l'attributo assume nella valutazione dell'indice finale, e vengono stabiliti su basi totalmente empiriche. Ai parametri epicarso e condizioni d'infiltrazione, si è attribuita una maggiore importanza rispetto agli altri due. In particolare, l'attributo P è associato il peso minore, quindi a questo è associata l'influenza minore nella valutazione dell'indice finale di vulnerabilità. Nella Tabella 45 sono riportati i valori attribuiti ai pesi relativi a ciascun parametro.

Attributo	Coefficiente	Peso
Epicarso	a	3
Copertura protettiva	b	1
Condizioni d'infiltrazione	c	3
Sviluppo rete carsica	d	2

Tabella 45. Pesi moltiplicatori relativi agli attributi E, P, I, K (Doerfliger et al., 1999).

La valutazione dell'indice finale di vulnerabilità prevede l'applicazione della formula seguente:

$$F_{pi} = a * E_i + b * P_i + c * I_i + d * K_i$$

Con:

$i = 1, \dots, n$; dove n è il numero di celle della griglia;

E_i, P_i, I_i, K_i = punteggi assunti dagli attributi nella cella i -esima;

a, b, c, d = pesi relativi agli attributi;

F_{pi} = fattore di protezione relativo alla cella i -esima.

Il fattore di protezione viene calcolato per ogni cella della griglia, ed indica, all'aumentare del punteggio, un crescente grado di protezione dell'acquifero, e quindi, inversamente, minore è il punteggio di tale indice, maggiore sarà la vulnerabilità dell'acquifero, così come evidenziato nella Tabella 46.

Classe di Vulnerabilità	Intervallo di Vulnerabilità	Aree di Protezione
-------------------------	-----------------------------	--------------------

Molto Elevata	$9 < F_p > 19$	S1
Elevata	$20 < F_p > 25$	S2
Media	$F_p > 25$	S3
Bassa	Presenza di P4	Il resto del territorio

Tabella 46. Intervalli di vulnerabilità e corrispondenti classi nel metodo EPIK (Doerfliger et al., 1999).

Questa operazione di semplice sovrapposizione delle mappe dei singoli attributi, precedentemente trasformate in formato raster, e di moltiplicazione per il loro peso, ha prodotto la Carta della Vulnerabilità Intrinseca (Fig.179).

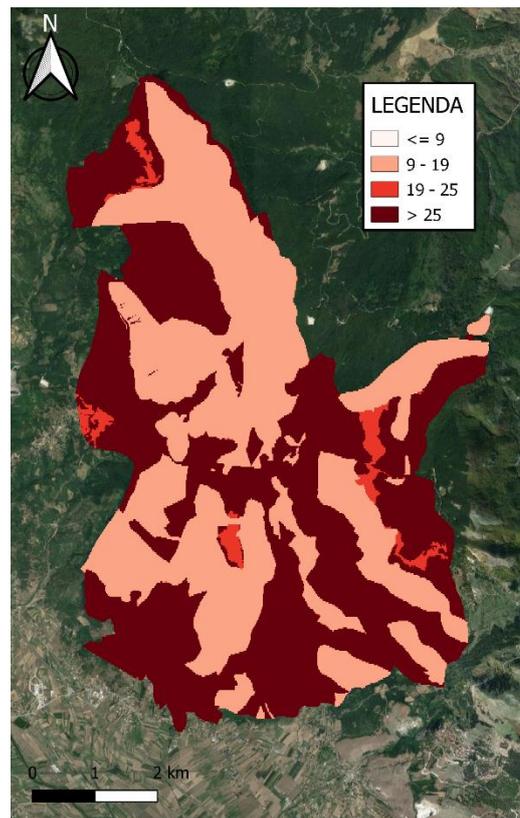


Figura 179. Carta della vulnerabilità intrinseca ottenuta con il metodo EPIK.

Come si evince dall'immagine, sono presenti delle aree che presentano un fattore di protezione molto basso, associato alla presenza delle formazioni calcaree. Le aree con un fattore di protezione molto elevato, invece, sono associate alle Formazione dei Galestri e degli Scisti Silicei.

6.3.2 Acquifero Volturino Est

L'acquifero Volturino Est (Fig.180) ha un'estensione di circa 5 Km².

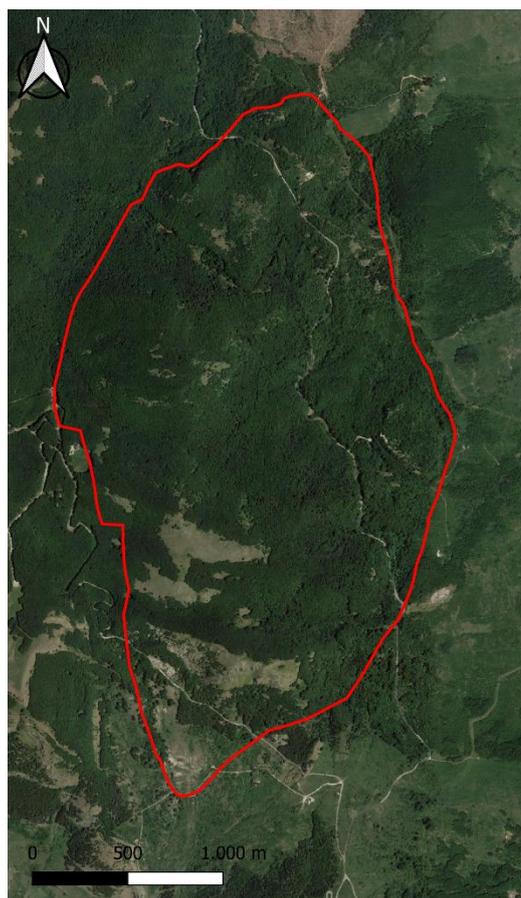


Figura 180. Acquifero Volturino Est.

6.3.2.1 Epicarso (E)

Per la valutazione di questo parametro, è stata utilizzata una procedura identica adoperata per il precedente acquifero. Sono state identificate le forme carsiche, in particolare le doline, presenti nell'area sulla base del file LIDAR (Fig.181).

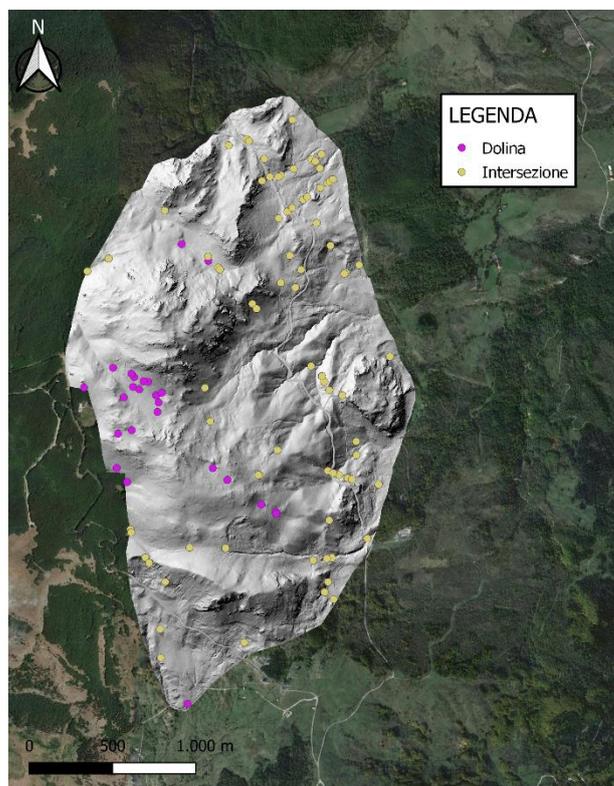


Figura 181. Doline ed intersezioni dell'acquifero Volturino Est.

Dopodiché, gli elementi morfologici dell'ambiente carsico sono stati digitalizzati ed associati alle corrispondenti formazioni geologiche, basandoci sulla Carta Geologica (Fig.182).

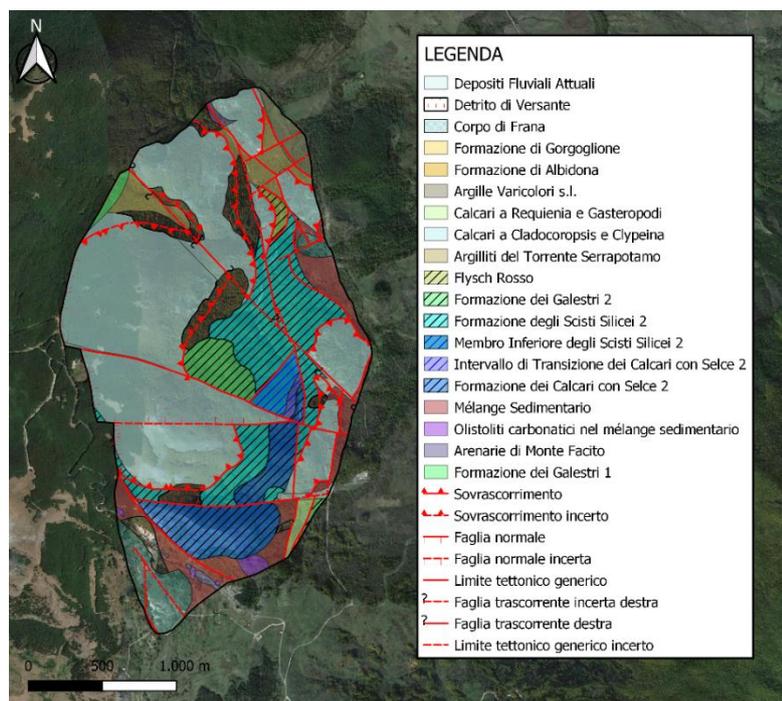


Figura 182. Carta Geologica dell'acquifero Volturino Est (Palladino G. et al., in preparazione).

Infine, sulla base della Tabella 41, sono state assegnate le rispettive classi alle diverse formazioni geologiche per produrre la carta dei punteggi del parametro dell'epicarso (Fig.183).

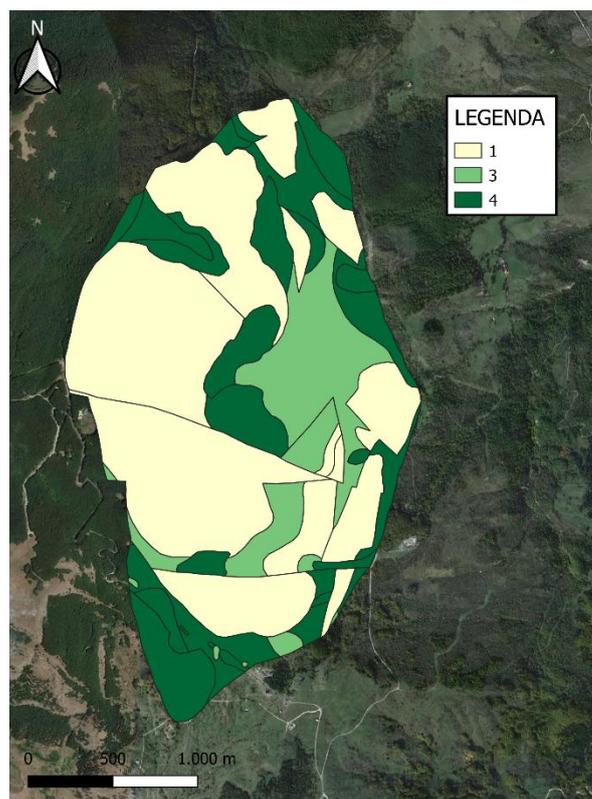


Figura 183. Carta dei punteggi dell'epicarso relativa all'acquifero Volturino Est.

I punteggi più bassi, corrispondenti ad una vulnerabilità più alta, sono associati alla presenza dei Calcari a Cladocoropsis e Clypeina ed alla Formazione dei Calcari con Selce 2. Al contrario valori alti corrispondono alle formazioni terrigene.

6.3.2.2 Copertura Protettiva del suolo (P)

Come per il precedente acquifero, per la valutazione di questo parametro, sono state isolate tutte le formazioni calcaree ed unite con il file della tipologia di copertura. Sfruttando le considerazioni fatte per l'acquifero Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola, e sulla base della Tabella 42, è stato possibile realizzare la carta dei punteggi del parametro della copertura protettiva del suolo (Fig.184).

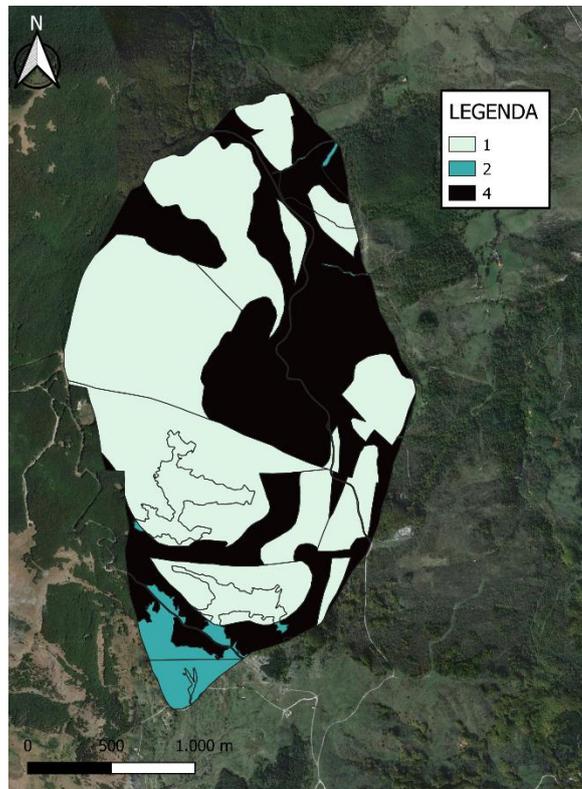


Figura 184. Carta dei punteggi della copertura protettiva relativa all'acquifero Volturino Est.

I punteggi più bassi (vulnerabilità più elevata) sono associati alla presenza dei Calcari a Cladocoropsis e Clypeina ed alla Formazione dei Calcari con Selce 2.

6.3.2.3 Condizioni d'Infiltrazione (I)

Per la valutazione di questo parametro, come per il precedente, sono state isolate tutte le formazioni calcaree ed unite con il file della tipologia di copertura. Per poter assegnare una delle classi espresse nella Tabella 43, sono state effettuate le stesse considerazioni utilizzate per l'acquifero Monte Volturno-Calvelluzzo-S. Nicola. Dopo aver assegnato le rispettive classi, è stato possibile realizzare la carta dei punteggi del parametro delle condizioni d'infiltrazione (Fig.185).

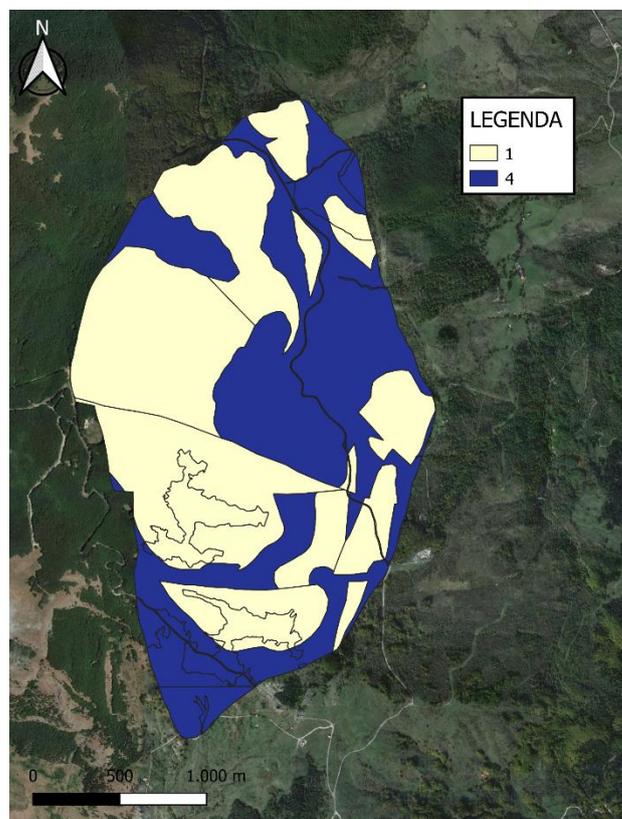


Figura 185. Carta dei punteggi delle condizioni d'infiltrazione relativa all'acquifero Volturino Est.

I punteggi più bassi (vulnerabilità elevata), sono associati alla presenza dei Calcari a Cladocoropsis e Clypeina ed alla Formazione dei Calcari con Selce 2. Al contrario valori alti corrispondono alle formazioni terrigene.

6.3.2.4 Grado di sviluppo della rete Carsica (K)

Come per il precedente acquifero, sulla base della Tabella 44 e prendendo in considerazione che l'area non mostra un carsismo estremamente sviluppato, si è deciso di assegnare la classe K2 alle formazioni calcaree e di assegnare la classe K3 a tutte le altre formazioni. In questo modo è stata ottenuta la carta dei punteggi del parametro del grado di sviluppo della rete carsica (Fig.186).

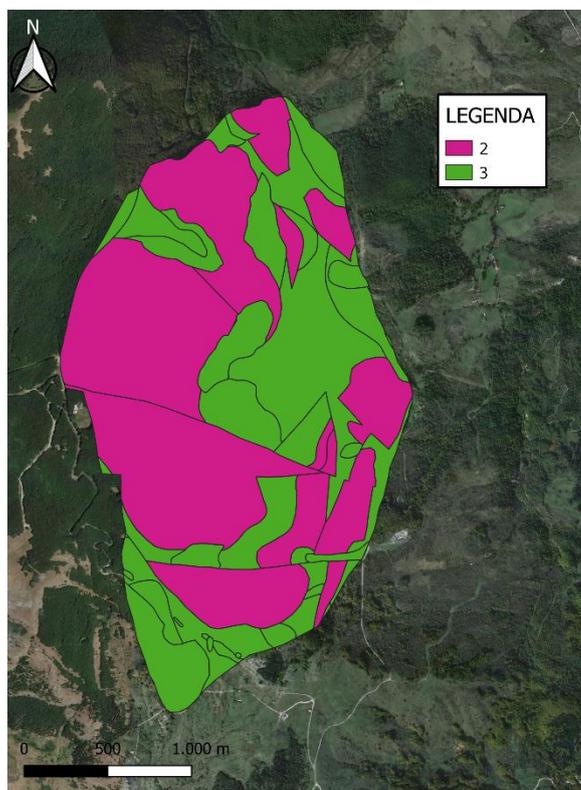


Figura 186. Carta dei punteggi del grado di sviluppo della rete carsica relativa all'acquifero Volturino Est.

6.3.2.5 Carta della Vulnerabilità Intrinseca

Per ottenere la carta della vulnerabilità intrinseca, è stato necessario trasformare tutte le carte tematiche in formato raster e poi associare ad ogni parametro il corrispondente peso moltiplicatore. Infine è stato calcolato il fattore di protezione, e sulla base della Tabella 46, sono state definite le classi di vulnerabilità in modo da poter realizzare la Carta della Vulnerabilità Intrinseca (Fig.187).

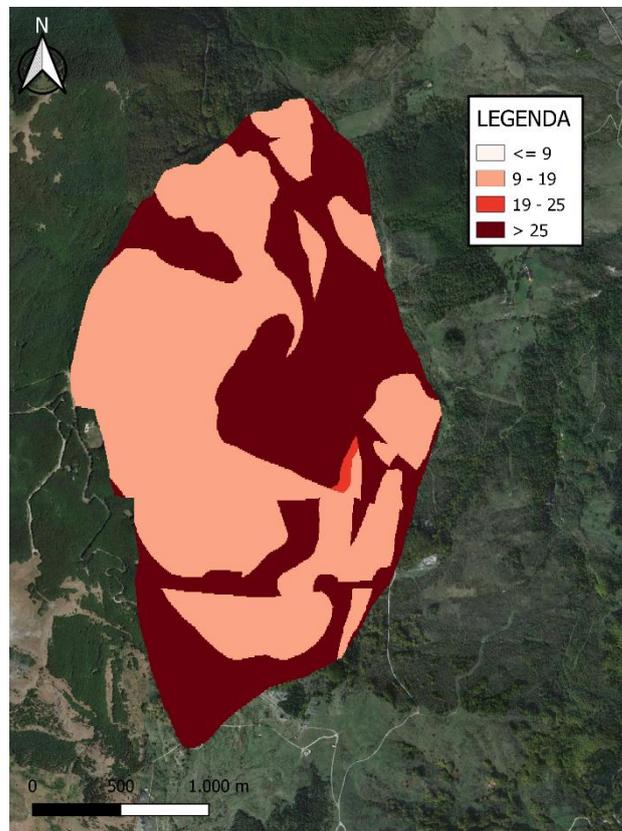


Figura 187. Carta della vulnerabilità intrinseca ottenuta con il metodo EPIK.

Dalla mappa si può notare che la maggior parte del territorio presenta un fattore di protezione basso e quindi una vulnerabilità molto elevata, ciò è associato alla presenza dei Calcari a Cladocoropsis e Clypeina ed alla Formazione dei Calcari con Selce 2. Invece le aree che presentano un fattore di protezione molto elevato e quindi una vulnerabilità medio-bassa sono caratterizzata dalla presenza della Argilliti del Torrente Serrapotamo e dalle altre formazioni terrigene.

6.3.3 Acquifero del Monte di Viggiano

L'acquifero del Monte di Viggiano (Fig.188) ha un'estensione di circa 20 Km².



Figura 188. Acquifero Monte di Viggiano.

6.3.3.1 Epicarso (E)

Per la valutazione di questo parametro, è stata utilizzata una procedura identica adoperata per i precedenti acquiferi. Sono state identificate le forme carsiche, in particolare le doline, presenti nell'area sulla base del file LIDAR (Fig.189).

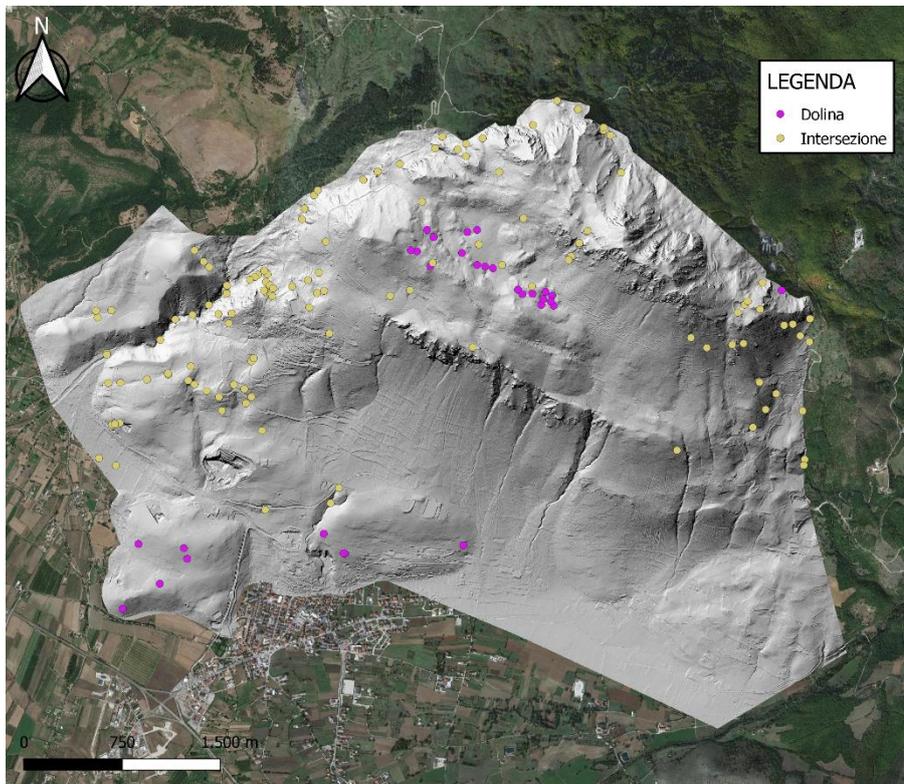


Figura 189. Doline ed intersezioni dell'acquifero Monte di Viggiano.

Dopodiché, gli elementi morfologici dell'ambiente carsico sono stati digitalizzati ed associati alle corrispondenti formazioni geologiche, basandoci sulla Carta Geologica (Fig.190).

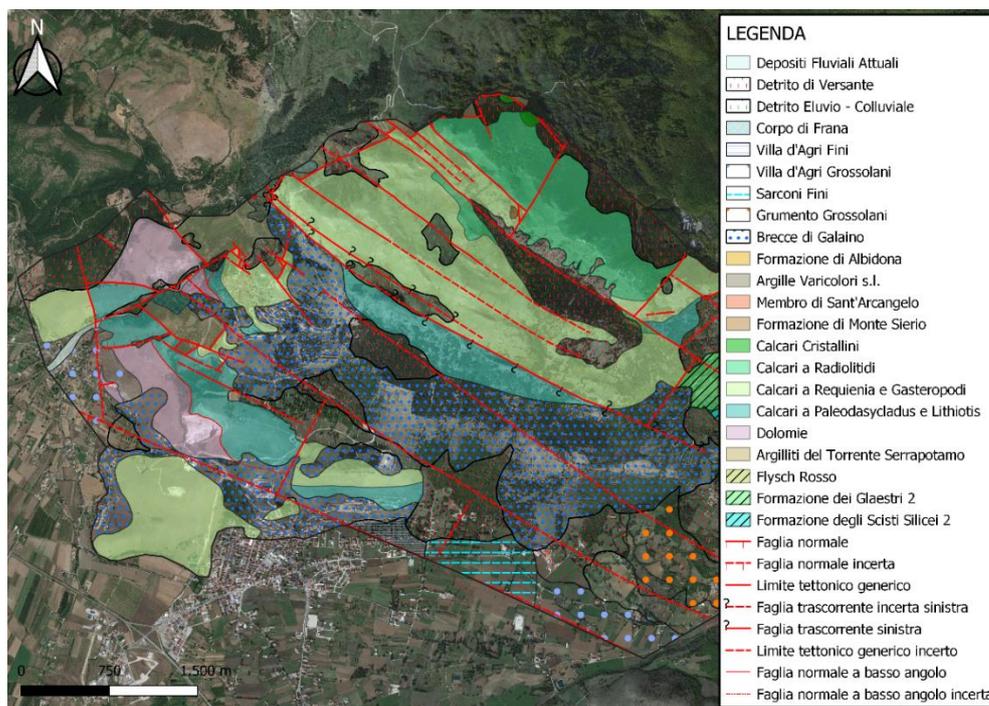


Figura 190. Carta Geologica dell'acquifero Monte di Viggiano (Palladino G. et al., in preparazione).

Infine, sulla base della Tabella 41, sono state assegnate le rispettive classi alle diverse formazioni geologiche per produrre la carta dei punteggi del parametro dell'epicarso (Fig.191).

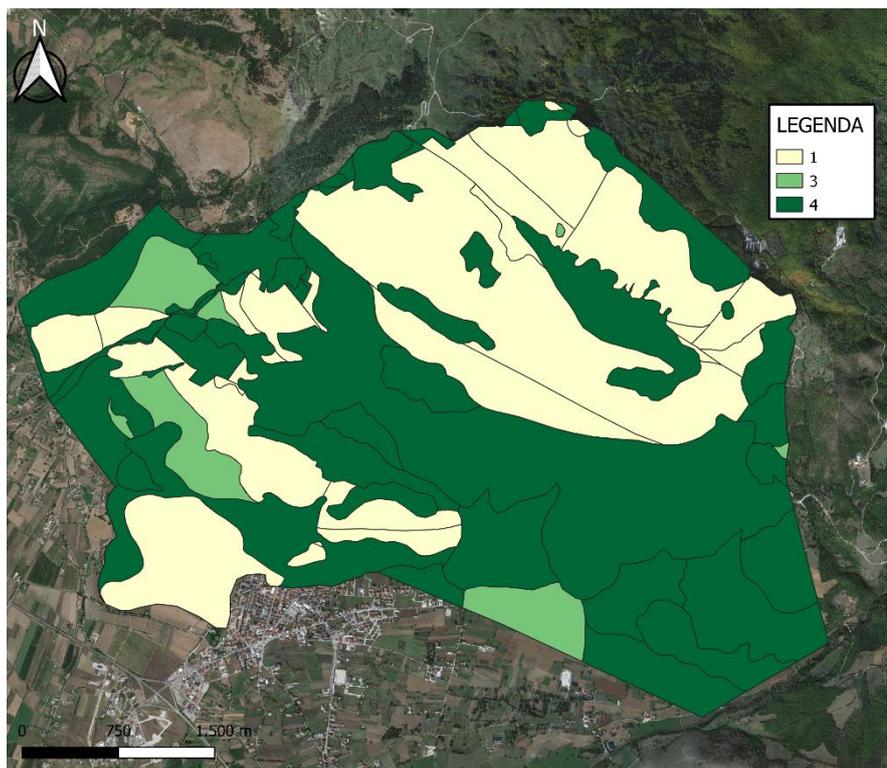


Figura 191. Carta dei punteggi dell'epicarso relativa all'acquifero Monte di Viggiano.

I punteggi più bassi, corrispondenti ad una vulnerabilità più alta, sono associati alla presenza dei Calcari a *Palaeodasycladus* e *Lithiosis* e dei Calcari a *Requenie* e *Gasteropodi*.

6.3.3.2 Copertura Protettiva del suolo (P)

Come per i precedenti acquiferi, per la valutazione di questo parametro, sono state isolate tutte le formazioni calcaree ed unite con il file della tipologia di copertura. Sfruttando le considerazioni fatte per l'acquifero Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola, e sulla base della Tabella 42, è stato possibile realizzare la carta dei punteggi del parametro della copertura protettiva del suolo (Fig.192).

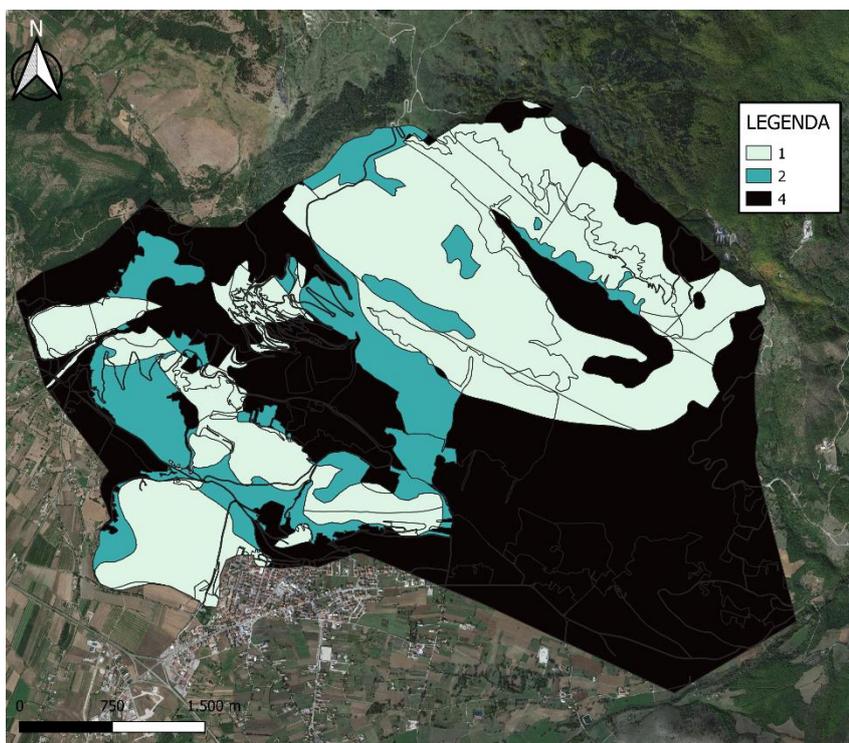


Figura 192. Carta dei punteggi della copertura protettiva relativa all'acquifero Monte di Viggiano.

6.3.3.3 Condizioni d'Infiltrazione (I)

Per la valutazione di questo parametro, come per il precedente, sono state isolate tutte le formazioni calcaree ed unite con il file della tipologia di copertura. Per poter assegnare una delle classi espresse nella Tabella 43, sono state effettuate le stesse considerazioni utilizzate per l'acquifero Monte Volturno-Calvelluzzo-S. Nicola. Dopo aver assegnato le rispettive classi, è stato possibile realizzare la carta dei punteggi del parametro delle condizioni d'infiltrazione (Fig.193).

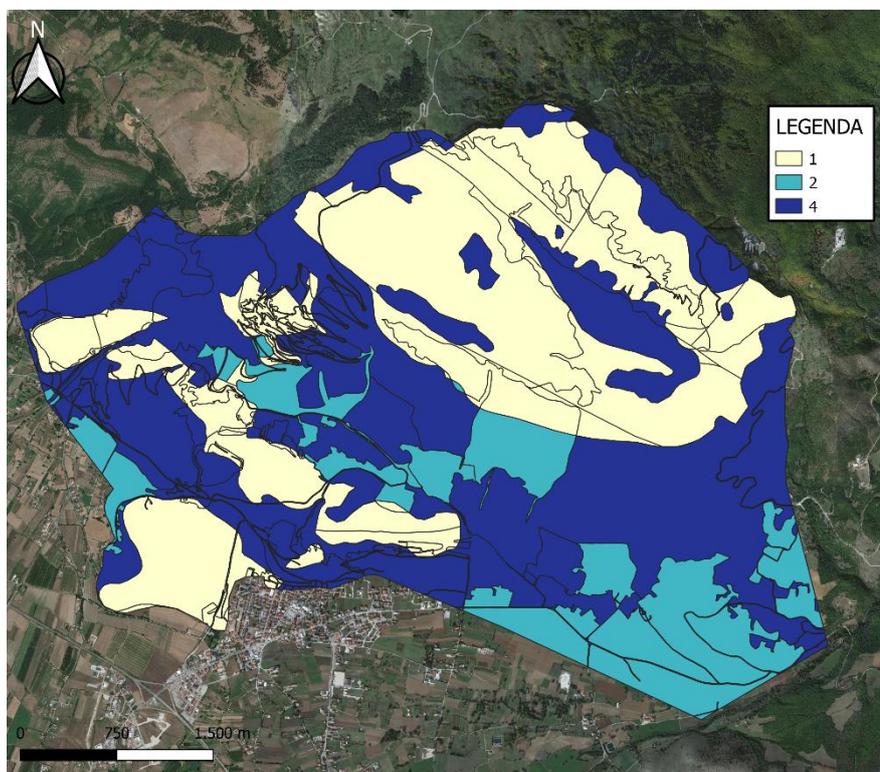


Figura 193. Carta dei punteggi delle condizioni d’infiltrazione relativa all’acquifero Monte di Viggiano.

6.3.3.4 Grado di sviluppo della rete Carsica (K)

Come per i precedenti acquiferi, sulla base della Tabella 44 e prendendo in considerazione che l’area non mostra un carsismo estremamente sviluppato, si è deciso di assegnare la classe K2 alle formazioni calcaree e di assegnare la classe K3 a tutte le altre formazioni. In questo modo è stata ottenuta la carta dei punteggi del parametro del grado di sviluppo della rete carsica (Fig.194).

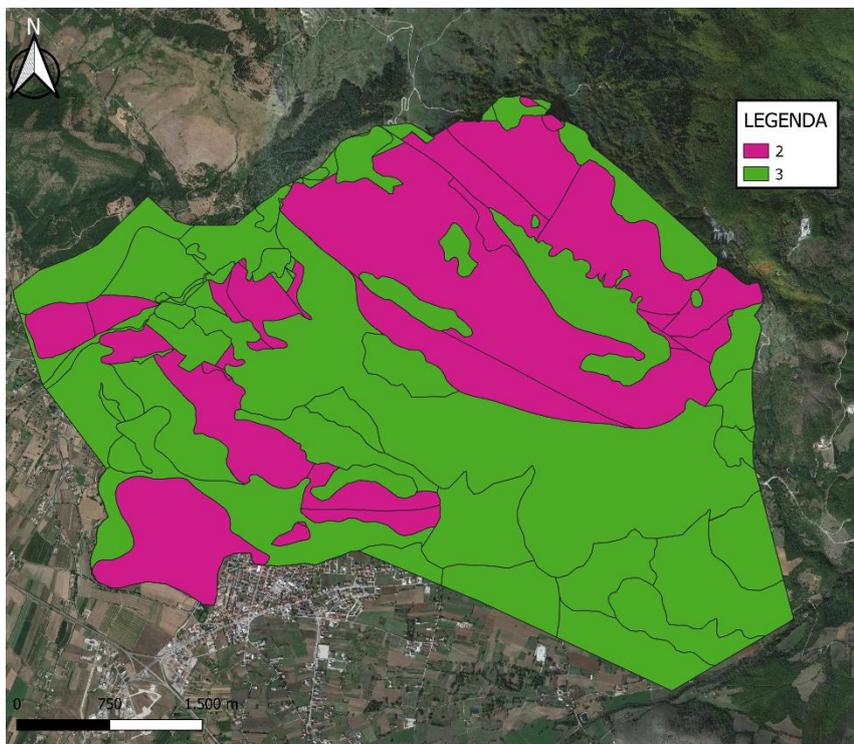


Figura 194. Carta dei punteggi del grado di sviluppo della rete carsica relativa all'acquifero Monte di Viggiano.

6.3.3.5 Carta della Vulnerabilità Intrinseca

Per ottenere la carta della vulnerabilità intrinseca, è stato necessario trasformare tutte le carte tematiche in formato raster e poi associare ad ogni parametro il corrispondente peso moltiplicatore. Infine è stato calcolato il fattore di protezione, e sulla base della Tabella 46, sono state definite le classi di vulnerabilità in modo da poter realizzare la Carta della Vulnerabilità Intrinseca (Fig.195).

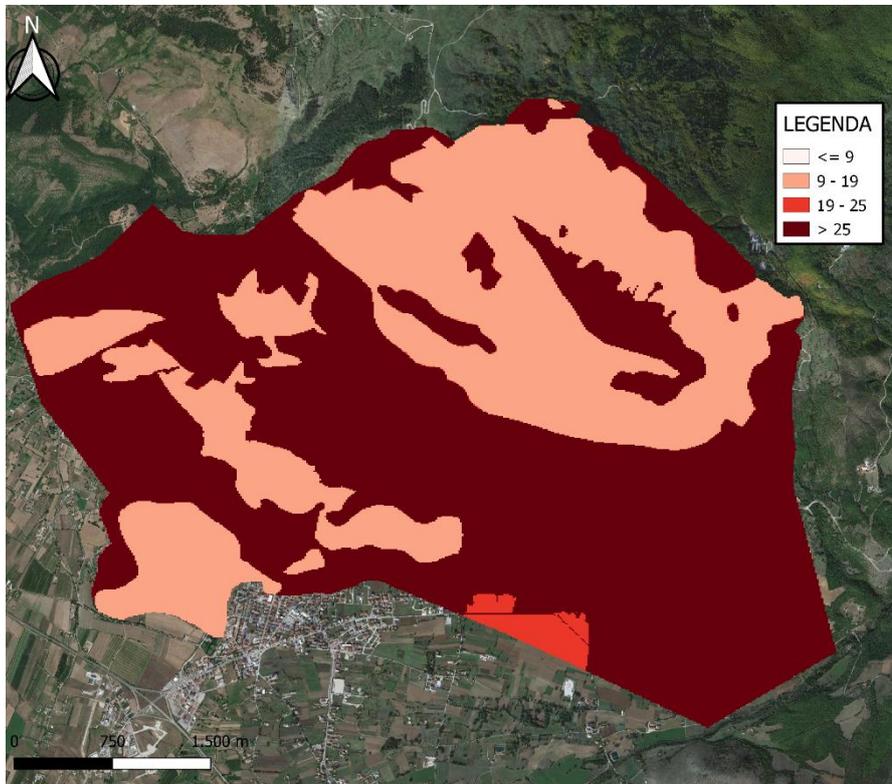


Figura 195. Carta della vulnerabilità intrinseca ottenuta con il metodo EPIK.

Come si evince dalla mappa, la maggior parte del territorio ha un fattore di protezione elevato e quindi una vulnerabilità bassa, ciò è dovuto alla grande presenza dei depositi detritici. Al contrario, le aree con una vulnerabilità più alta sono associate alla presenza dei Calcari a Palaeodasycladus e Lithiosis e dei Calcari a Requenie e Gasteropodi.

6.3.4 Acquifero Alli

L'acquifero Alli (Fig.196) ha un'estensione di circa 2 Km².

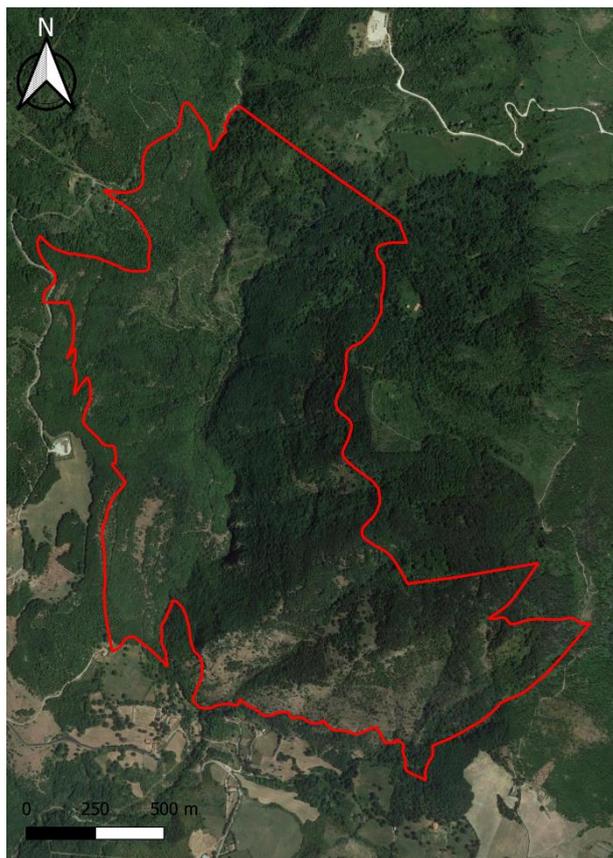


Figura 196. Acquifero Alli.

6.3.4.1 Epicarso (E)

Per la valutazione di questo parametro, è stata utilizzata una procedura identica adoperata per i precedenti acquiferi. Sono state identificate le forme carsiche, in particolare le doline, presenti nell'area sulla base del file LIDAR (Fig.197).

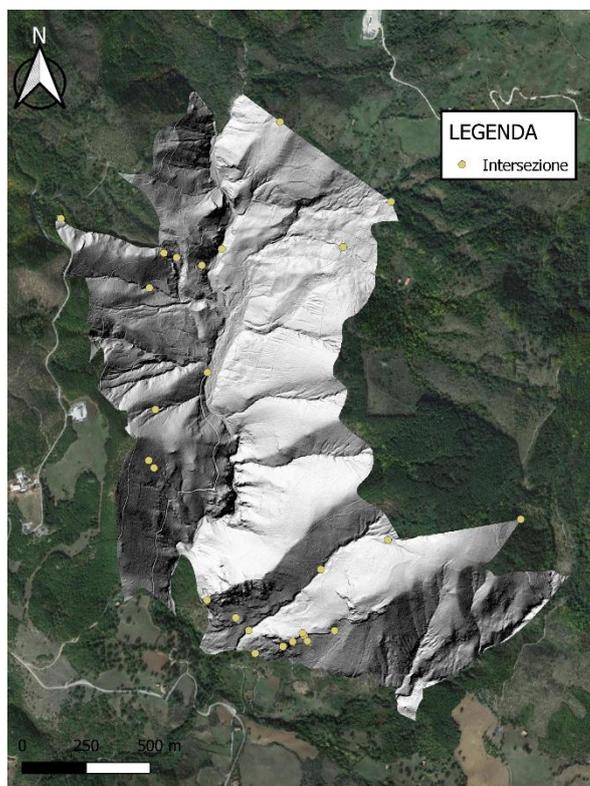


Figura 197. Doline ed intersezioni dell'acquifero Ali.

Dopodiché, gli elementi morfologici dell'ambiente carsico sono stati digitalizzati ed associati alle corrispondenti formazioni geologiche, basandoci sulla Carta Geologica (Fig.198).

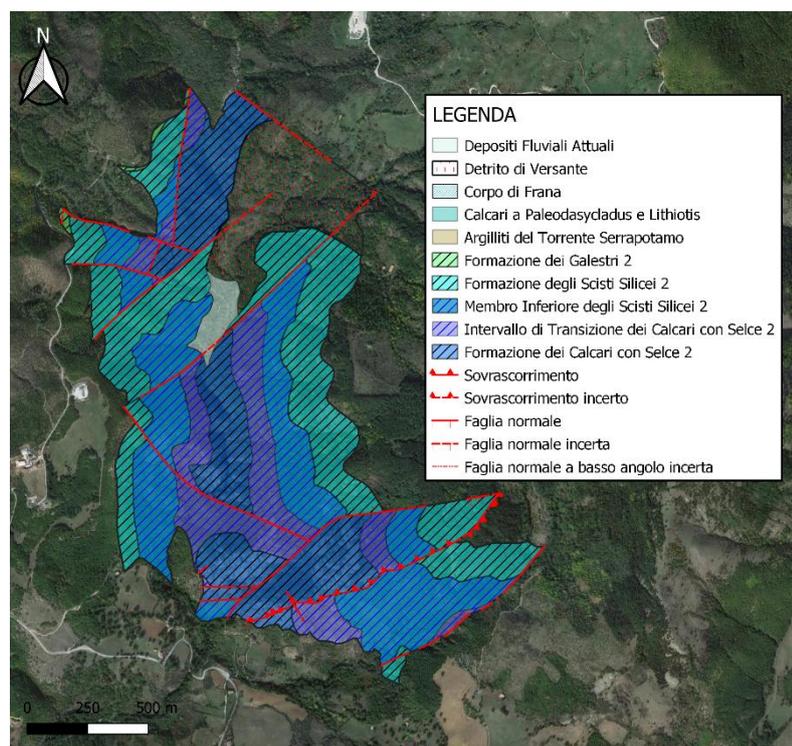


Figura 198. Carta Geologica dell'acquifero Ali (Palladino G. et al., in preparazione).

Infine, sulla base della Tabella 41, sono state assegnate le rispettive classi alle diverse formazioni geologiche per produrre la carta dei punteggi del parametro dell'epicarso (Fig.199).

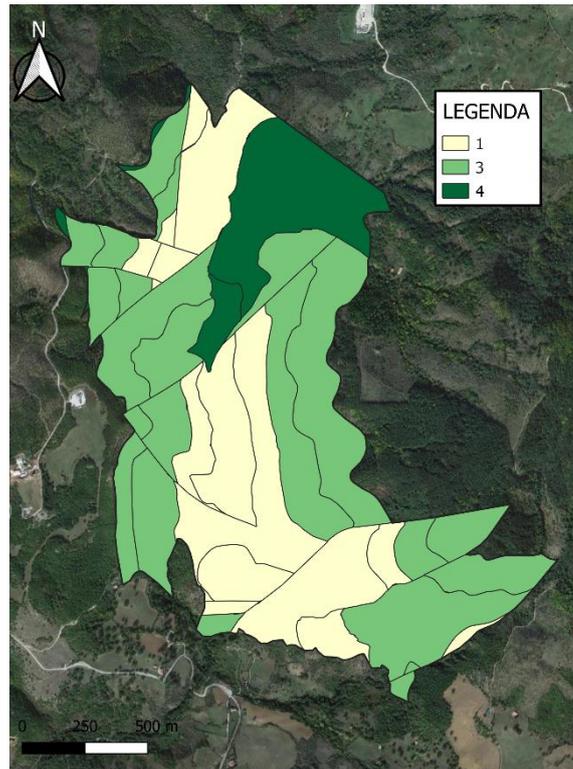


Figura 199. Carta dei punteggi dell'epicarso relativa all'acquifero Alli.

I punteggi più bassi, corrispondenti ad una vulnerabilità più alta, sono associati alla presenza della Formazione dei Calcari con Selce 2. I valori intermedi sono associati alla presenza della Formazione degli Scisti Silicei 2, mentre i valori più bassi ai depositi detritici.

6.3.4.2 Copertura Protettiva del suolo (P)

Come per i precedenti acquiferi, per la valutazione di questo parametro, sono state isolate tutte le formazioni calcaree ed unite con il file della tipologia di copertura. Sfruttando le considerazioni fatte per l'acquifero Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola, e sulla base della Tabella 42, è stato possibile realizzare la carta dei punteggi del parametro della copertura protettiva del suolo (Fig.200).

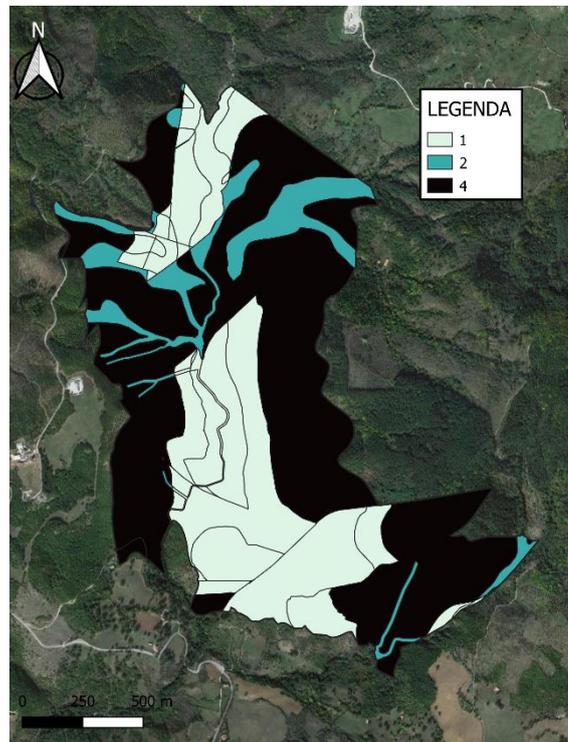


Figura 200. Carta dei punteggi della copertura protettiva relativa all'acquifero Alli.

6.3.4.3 Condizioni d'Infiltrazione (I)

Per la valutazione di questo parametro, come per il precedente, sono state isolate tutte le formazioni calcaree ed unite con il file della tipologia di copertura. Per poter assegnare una delle classi espresse nella Tabella 43, sono state effettuate le stesse considerazioni utilizzate per l'acquifero Monte Volturno-Calvelluzzo-S. Nicola. Dopo aver assegnato le rispettive classi, è stato possibile realizzare la carta dei punteggi del parametro delle condizioni d'infiltrazione (Fig.201).

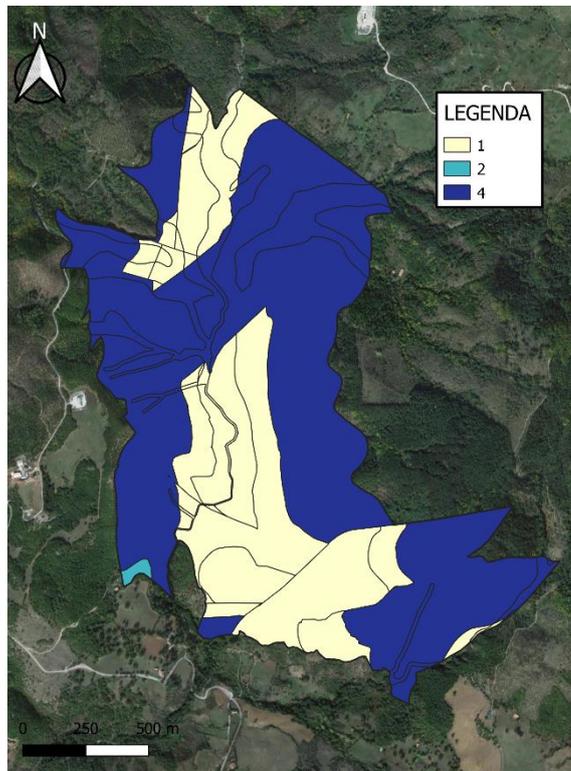


Figura 201. Carta dei punteggi delle condizioni d’infiltrazione relativa all’acquifero Allè.

6.3.4.4 Grado di sviluppo della rete Carsica (K)

Come per i precedenti acquiferi, sulla base della Tabella 44 e prendendo in considerazione che l’area non mostra un carsismo estremamente sviluppato, si è deciso di assegnare la classe K2 alle formazioni calcaree e di assegnare la classe K3 a tutte le altre formazioni. In questo modo è stata ottenuta la carta dei punteggi del parametro del grado di sviluppo della rete carsica (Fig.202).

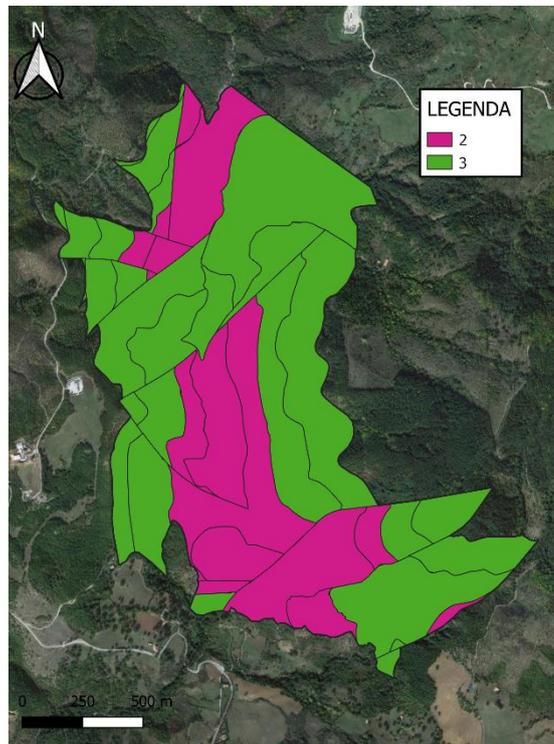


Figura 202. Carta dei punteggi del grado di sviluppo della rete carsica relativa all'acquifero Alli.

6.3.4.5 Carta della Vulnerabilità Intrinseca

Per ottenere la carta della vulnerabilità intrinseca, è stato necessario trasformare tutte le carte tematiche in formato raster e poi associare ad ogni parametro il corrispondente peso moltiplicatore. Infine è stato calcolato il fattore di protezione, e sulla base della Tabella 46, sono state definite le classi di vulnerabilità in modo da poter realizzare la Carta della Vulnerabilità Intrinseca (Fig.203).

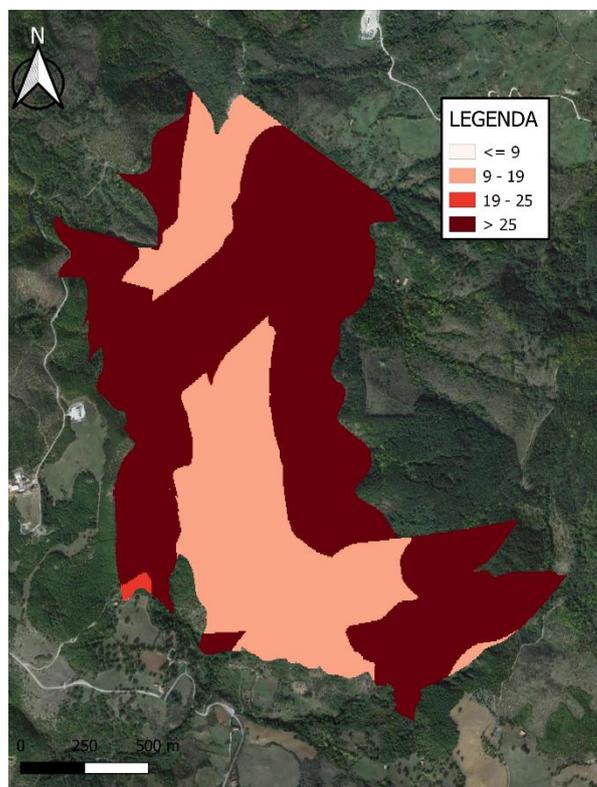


Figura 203. Carta della vulnerabilità intrinseca ottenuta con il metodo EPIK.

Dalla mappa si può notare che gran parte del territorio presenta un fattore di protezione molto elevato, e quindi una vulnerabilità bassa, ciò è dovuto alla presenza della Formazione degli Scisti Silicei 2 e dei depositi detritici. Invece le aree che presentano una vulnerabilità elevata sono associate alla presenza della Formazione dei Calcari con Selce 2.

6.4 Determinazione dei parametri e relativi punteggi nel metodo GOD

Il nome di questo metodo è l'acronimo dei parametri presi in considerazione, ovvero Groundwater confinement, Overlaying strata, Depth to groundwater table (Foster et al., 2002). Permette una rapida valutazione della vulnerabilità all'inquinamento.

6.4.1 Acquifero Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola

L'acquifero del Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola (Fig.204) ha un'estensione di circa 42 Km².

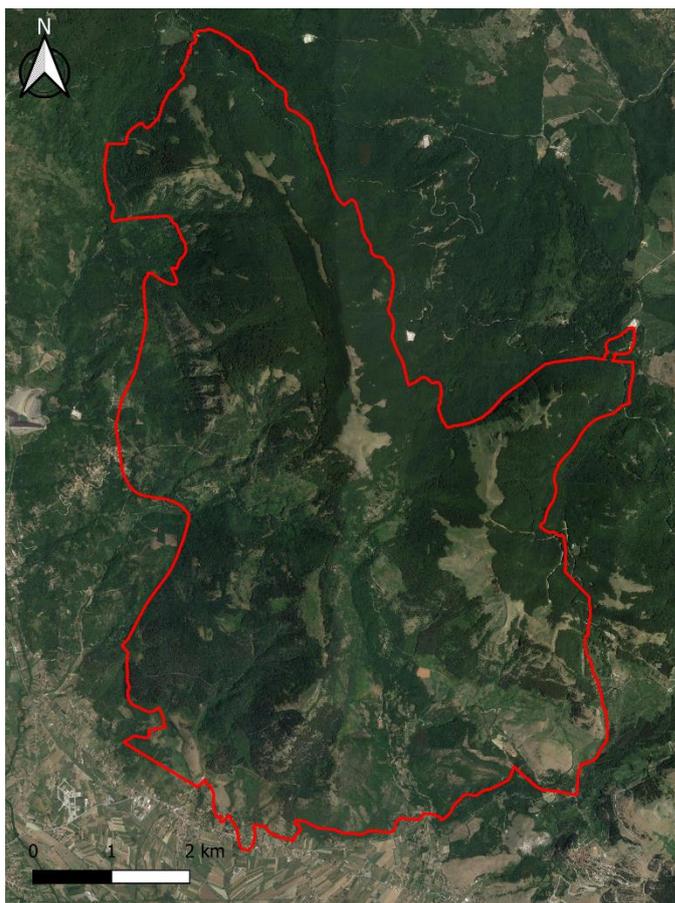


Figura 204. Acquifero Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola.

6.4.1.1 Grado confinamento acquifero (G)

Questo parametro può avere un range di valori che va da 0 ad 1, in base al grado di confinamento dell'acquifero. I valori che il parametro **G** può assumere sono mostrati nella Tabella 47.

Tipologia confinamento	Valore di "G"
Nessuno	0
Artesiano	0
Confinato	0.2
Semi-confinato	0.4
Non-confinato (coperto)	0.6
Non-confinato	1.0

Tabella 47. Valori del parametro "G" (Grado di confinamento) in relazione alla tipologia di confinamento (Foster et al. 2002).

Il nostro acquifero rientra nella tipologia non-confinato e quindi è stato attribuito, a tutta l'area, un valore pari ad 1. In questo modo è stato possibile ottenere la carta dei punteggi del parametro grado di confinamento dell'acquifero (Fig.205).



Figura 205. Carta dei punteggi del grado di confinamento relativa all'acquifero Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola.

6.4.1.2 Strati Sovrastanti (O)

Questo parametro si basa sulle caratteristiche litologiche e grado di coesione delle rocce della zona non saturata e dei livelli confinati a tetto. Quindi per poter assegnare i valori corrispondenti, è stata presa in considerazione la Carta Geologica di Palladino G. et al. (in preparazione) (Fig.206).

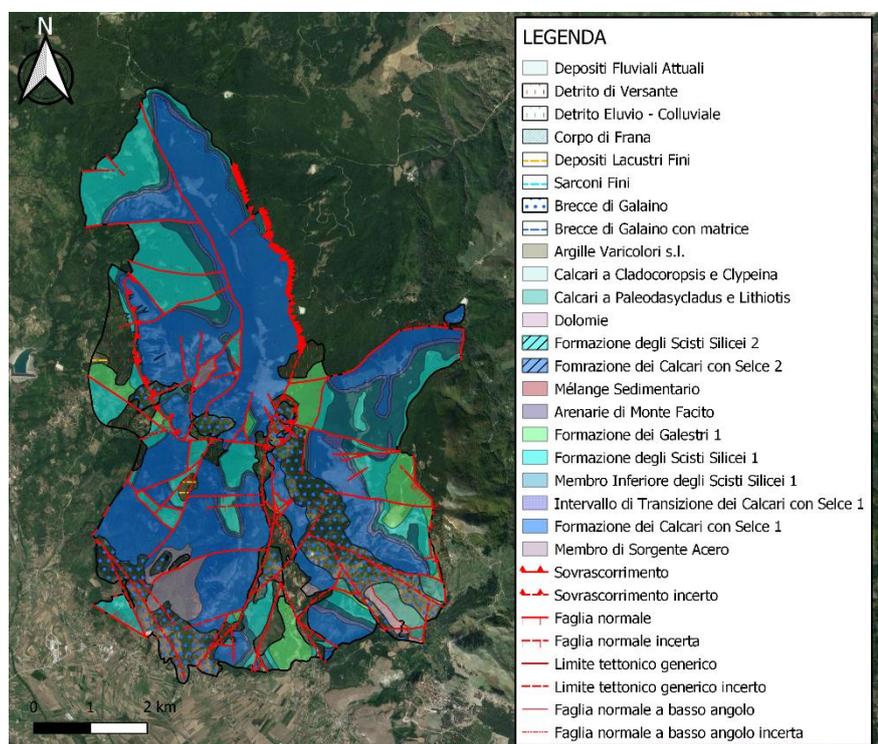


Figura 206. Carta Geologica dell'acquifero di Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola (Palladino G. et al., in preparazione).

I valori che il parametro **O** può assumere, in base alle caratteristiche litologiche, sono espressi nella Tabella 48 (Foster et al., 2002).

Rocce	Litologia	Valore di "O"
Sciolte	Argille lacustri/estuarine	0.4
	Suoli residuali	0.4
	Silt alluvionali	0.5
	Sabbie eoliche	0.6
	Sabbie alluvionali	0.7
	Ghiaie alluvionali/conoide	0.8
Litoidi porose	Argilliti, Scisti	0.5
	Siltiti	0.6
	Arenarie	0.7-0.8
	Calcareniti	0.8-0.9
Litoidi	Formazioni ignee	0.6-0.7

	Formazioni metamorfiche	0.6-0.7
	Lave vulcaniche recenti	0.8
	Calcari carsificati	0.9-1.0

Tabella 48. Valori del parametro "O" (Strati sovrastanti) per le diverse litologie presenti nella zona non satura (Foster et al., 2002).

Dopo aver assegnato a tutte le litologie presenti i corrispettivi punteggi, è stato possibile realizzare la carta dei punteggi degli strati sovrastanti (Fig.207).

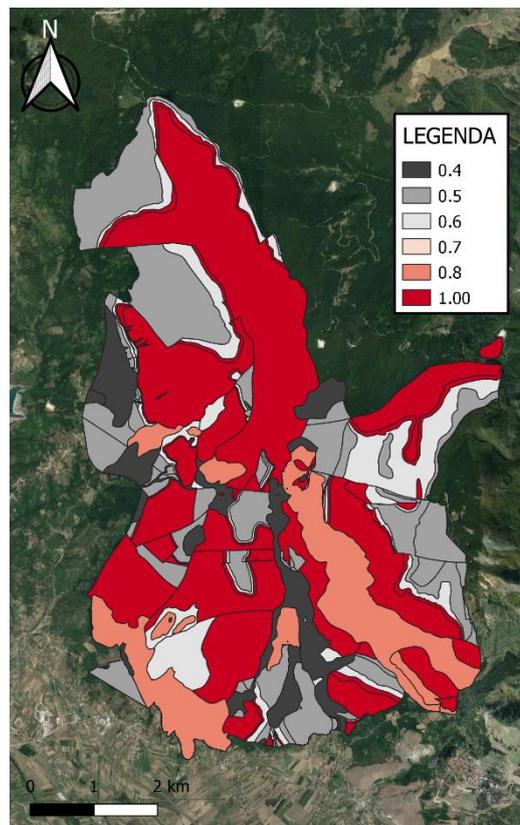


Figura 207. Carta dei punteggi degli strati sovrastanti relativa all'acquifero Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola.

I valori più elevati sono associati alla Formazione dei Calcari con Selce 1/2, mentre i valori più bassi si riferiscono alla Formazione degli Scisti Silicei 1/2 ed alla Formazione dei Galestri 1.

6.4.1.3 Soggiacenza (D)

Per il calcolo della quota della superficie piezometrica in mancanza di dati diretti (pozzi, piezometri e sondaggi), il criterio adottato per la stima si basa sull'individuazione delle sorgenti, pozzi e piezometri all'interno dell'acquifero e nella creazione di un buffer di 250m nell'intorno delle stesse. All'interno del buffer è stato assegnato un valore di soggiacenza <50m, mentre nelle aree al di fuori è stato assegnato un valore >50 m. Per poter assegnare questi valori, è stata inevitabile la creazione di una griglia regolare a maglie quadrate (250mX250m). La Figura 208 mostra la carta tematica (in forma vettoriale) fuoriuscita da questa tipologia di analisi. È necessario sottolineare che questi valori sono indicativi e soffrono di una grande soggettività dell'operatore.

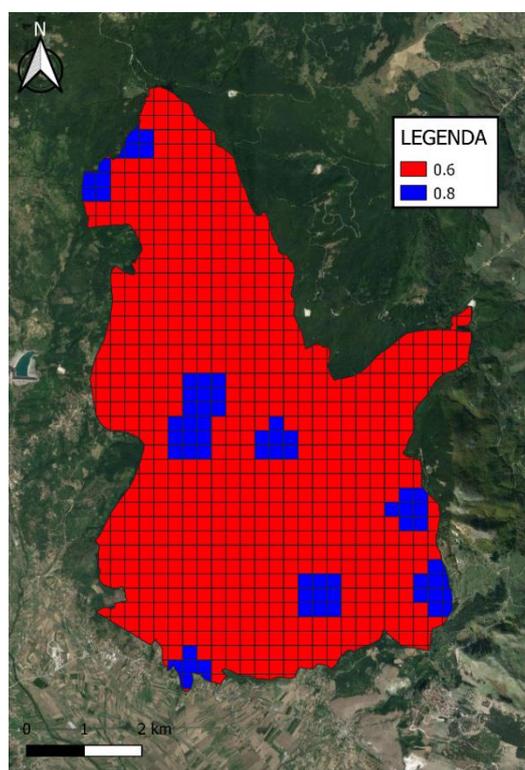


Figura 208. Carta dei punteggi del parametro Soggiacenze per dell'acquifero di Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola.

In Tabella 49 sono rappresentati i punteggi attribuiti ai valori di soggiacenza.

Valore di Soggiacenza	Punteggio
<50m	0.8
>50m	0.6

Tabella 49. Punteggio attribuito alla Soggiacenza in relazione al valore.

6.4.1.4 Carta della Vulnerabilità Intrinseca

Dopo aver generato tutti i tematismi necessari, tutte le carte tematiche sono state trasformate in file raster. Questo passaggio è stato necessario per la generazione della Carta della Vulnerabilità Intrinseca (Fig.209) secondo il metodo GOD. Le classi di vulnerabilità sono espresse nella Tabella 23.

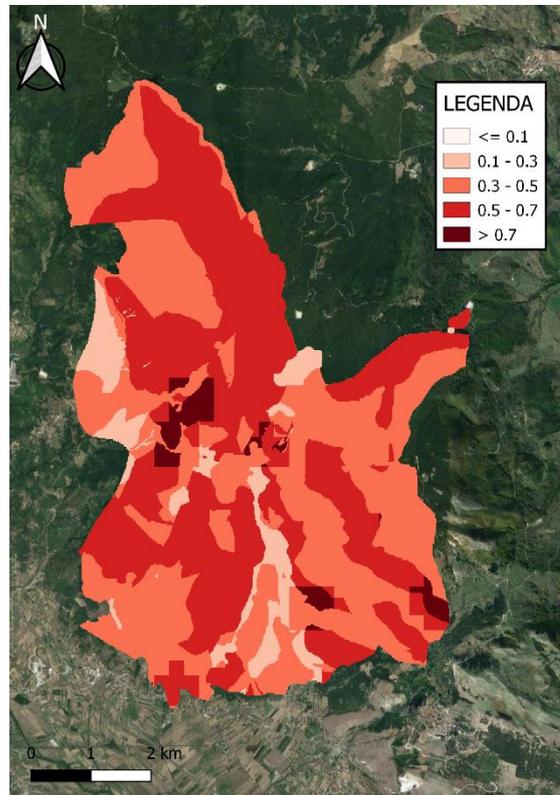


Figura 209. Carta della vulnerabilità intrinseca ottenuta con il metodo GOD.

Come si evince dalla figura, gran parte dell'area ha una vulnerabilità alta e questo è relazionato alla presenza dei Calcari con Selce 1/2, invece le aree con una vulnerabilità moderata e bassa sono associate alla Formazione degli Scisti Silicei 1/2 ed alla Formazione dei Galestri 1.

6.4.2 Acquifero Volturino Est

L'acquifero Volturino Est (Fig.210) ha un'estensione di circa 5 Km².



Figura 210. Acquifero Volturino Est.

6.4.2.1 Grado confinamento acquifero (G)

Come per il precedente acquifero, tenendo in considerazione la Tabella 47, è stato assegnato un valore al parametro **G** pari ad 1; quindi considerando l'acquifero come non-confinato. Digitalizzando questa informazione è stato possibile ottenere la carta dei punteggi del grado di confinamento dell'acquifero (Fig.211).



Figura 211. Carta dei punteggi del grado di confinamento relativa all'acquifero Volturino Est.

6.4.2.2 Strati Sovrastanti (O)

Anche per questo acquifero, come per il precedente, per la valutazione del parametro **O**, si è presa in considerazione la Carta Geologica (Fig.212).

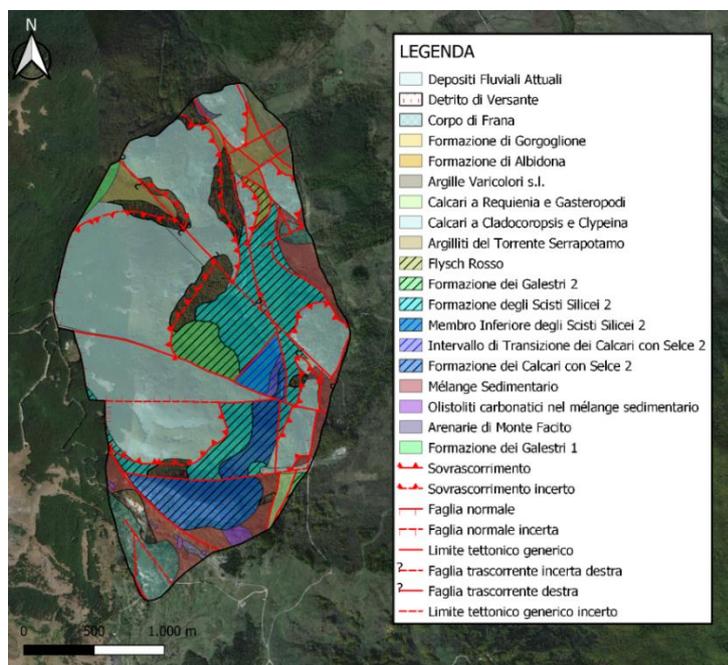


Figura 212. Carta Geologica dell'acquifero Volturino Est (Palladino G. et al., in preparazione).

Dopodiché, in base alla Tabella 48, sono stati assegnati tutti i punteggi alle corrispondenti litologie in modo da ottenere la carta dei punteggi degli strati sovrastanti (Fig.213).

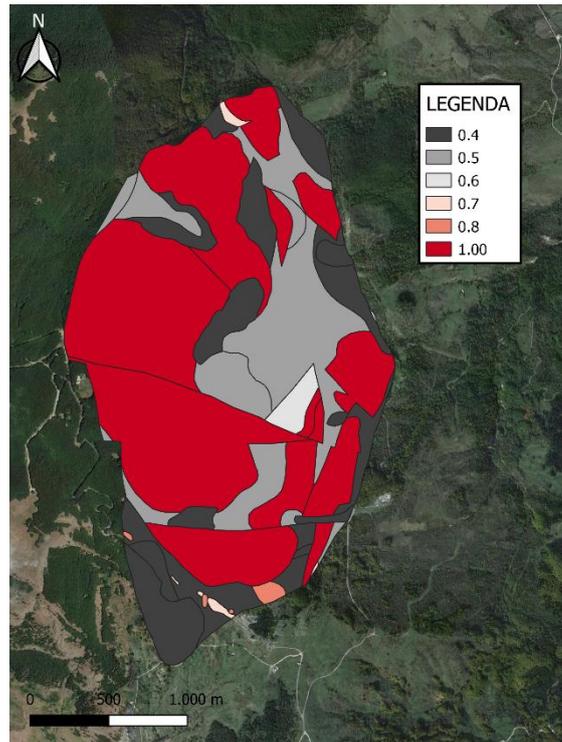


Figura 213. Carta dei punteggi degli strati sovrastanti relativa all'acquifero Volturino Est.

La maggior parte dell'area ha un punteggio molto elevato a causa della presenza preponderante dei Calcari a Cladocoropsis e Clypeina e della Formazione dei Calcari con Selce 2. Invece, punteggi bassi corrispondono alle formazioni terrigene e degli Scisti Silicei 2.

6.4.2.3 Soggiacenza (D)

Il metodo di valutazione di questo parametro è lo stesso del precedente, cioè sull'individuazione dei punti d'acqua all'interno dell'acquifero e nella creazione di un buffer di 250m nell'intorno degli stessi. All'interno del buffer è stato assegnato un valore di soggiacenza <50m, mentre nelle aree al di fuori è stato assegnato un valore >50 m. La Figura 214 mostra la carta tematica (in forma vettoriale) fuoriuscita da questa tipologia di analisi.

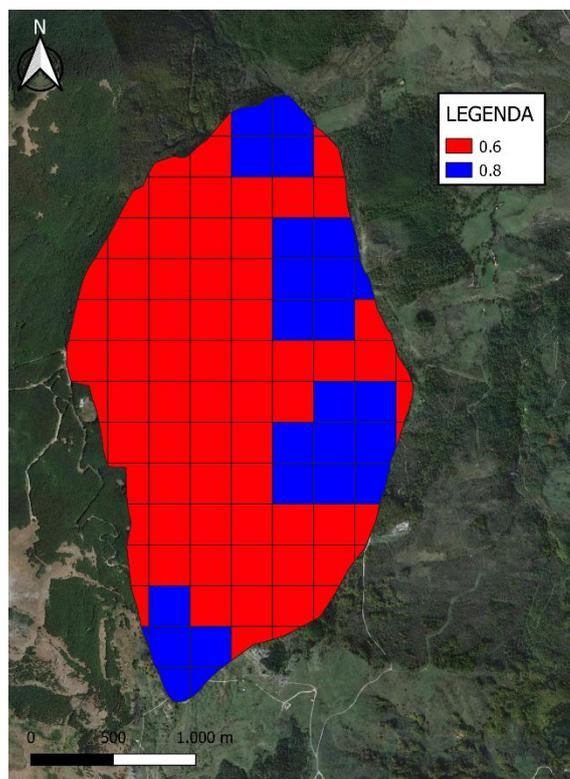


Figura 214. Carta dei punteggi del parametro Soggiacenze per dell'acquifero Volturino Est.

In Tabella 50 sono rappresentati i punteggi attribuiti ai valori di soggiacenza.

Valore di Soggiacenza	Punteggio
<50m	0.8
>50m	0.6

Tabella 50. Punteggio attribuito alla Soggiacenza in relazione al valore.

6.4.2.4 Carta della Vulnerabilità Intrinseca

Infine, tutti i tematismi ottenuti sono stati trasformati in file raster e sulla base della Tabella 23, è stato possibile realizzare la Carta della Vulnerabilità Intrinseca (Fig.215) secondo il metodo GOD.

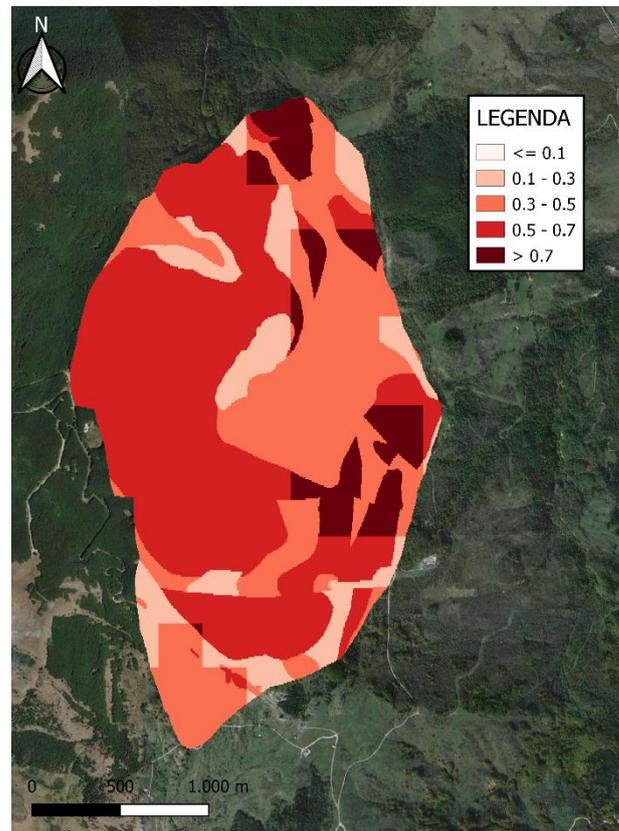


Figura 215. Carta della vulnerabilità intrinseca ottenuta con il metodo GOD.

Dalla figura si evince che la quasi totalità dell'area presenta una vulnerabilità estrema, dovuta alla presenza molto forte dei Calcari a Cladocoropsis e Clypeina ed alla Formazione dei Calcari con Selce. Invece, valori più bassi di vulnerabilità sono associati alle Argilliti del Torrente Serrapotamo, alla Formazione degli Scisti Silicei 2 ed alle altre formazioni terrigene.

6.4.3 Acquifero del Monte di Viggiano

L'acquifero del Monte di Viggiano (Fig.216) ha un'estensione di circa 20 Km².



Figura 216. Acquifero Monte di Viggiano.

6.4.3.1 Grado confinamento acquifero (G)

Come per i precedenti acquiferi, tenendo in considerazione la Tabella 47, è stato assegnato un valore al parametro **G** pari ad 1; quindi considerando l'acquifero come non-confinato. Digitalizzando questa informazione è stato possibile ottenere la carta dei punteggi del grado di confinamento dell'acquifero (Fig.217).



Figura 217. Carta dei punteggi del grado di confinamento relativa all'acquifero Monte di Viggiano.

6.4.3.2 Strati Sovrastanti (O)

Anche per questo acquifero, come per i precedenti, per la valutazione del parametro **O**, si è presa in considerazione la Carta Geologica (Fig.218).

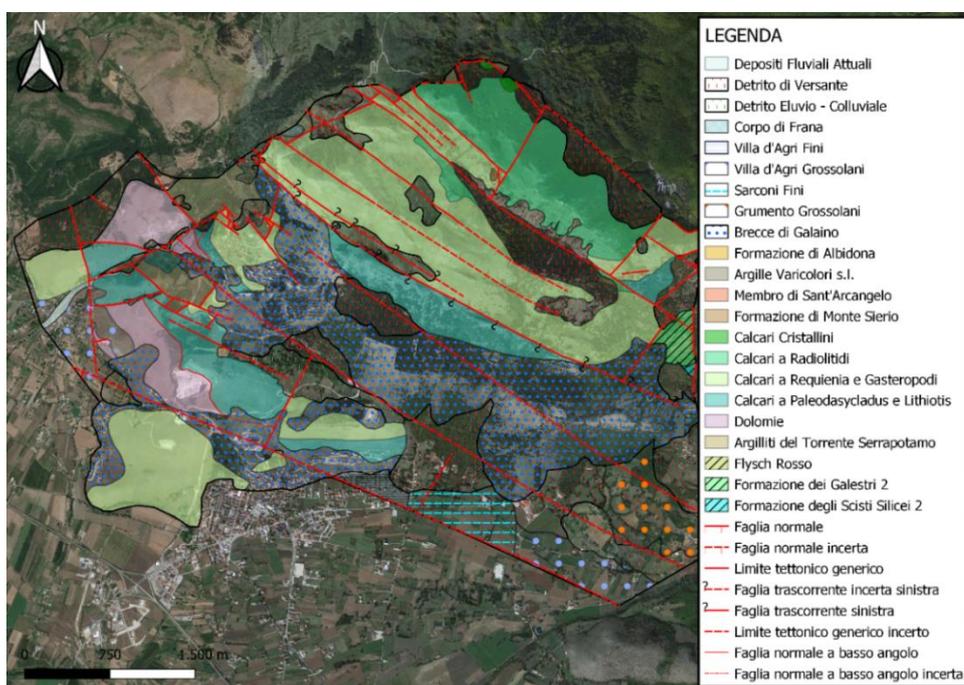


Figura 218. Carta Geologica dell'acquifero Monte di Viggiano (Palladino G. et al., in preparazione).

Dopodiché, in base alla Tabella 48, sono stati assegnati tutti i punteggi alle corrispettive litologie in modo da ottenere la carta dei punteggi degli strati sovrastanti (Fig.219).

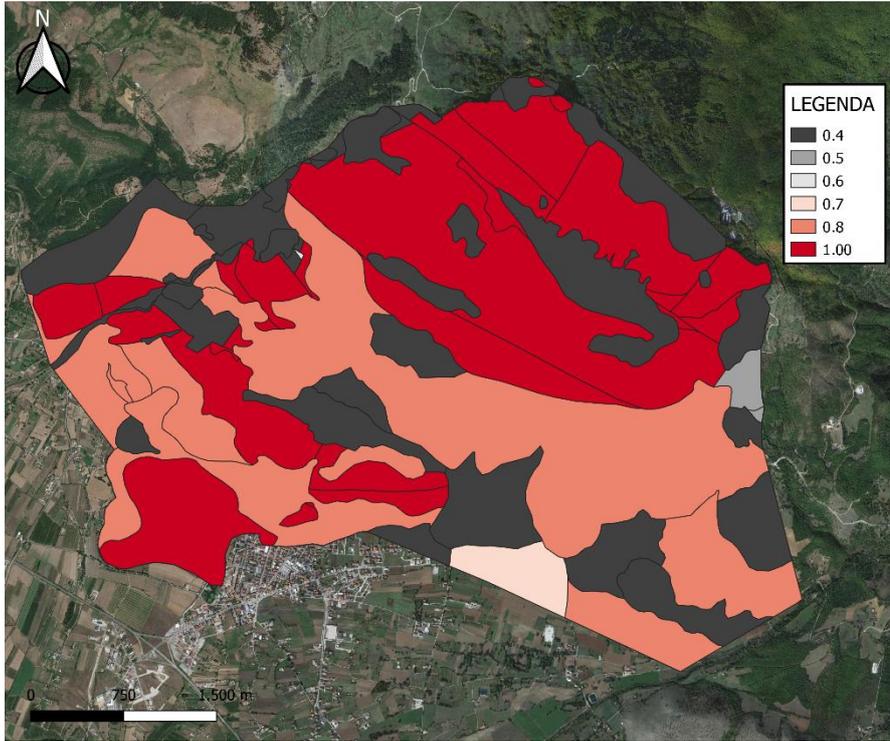


Figura 219. Carta dei punteggi degli strati sovrastanti relativa all'acquifero Monte di Viggiano.

Dall'immagine si evince una buona presenza di aree con un punteggio molto elevato che sono associate alla presenza dei Calcari a Palaeodasyclus e Lithiosis e dei Calcari a Requenie e Gasteropodi. Le aree con un punteggio minore, invece, sono associate alle Argille Varicolori ed ai depositi detritici molto presenti nell'area.

6.4.3.3 Soggiacenza (D)

Il metodo di valutazione di questo parametro è lo stesso del precedente, cioè sull'individuazione dei punti d'acqua all'interno dell'acquifero e nella creazione di un buffer di 250m nell'intorno degli stessi. All'interno del buffer è stato assegnato un valore di soggiacenza <50m, mentre nelle aree al di fuori è stato assegnato un valore >50 m. La Figura 220 mostra la carta tematica (in forma vettoriale) fuoriuscita da questa tipologia di analisi.

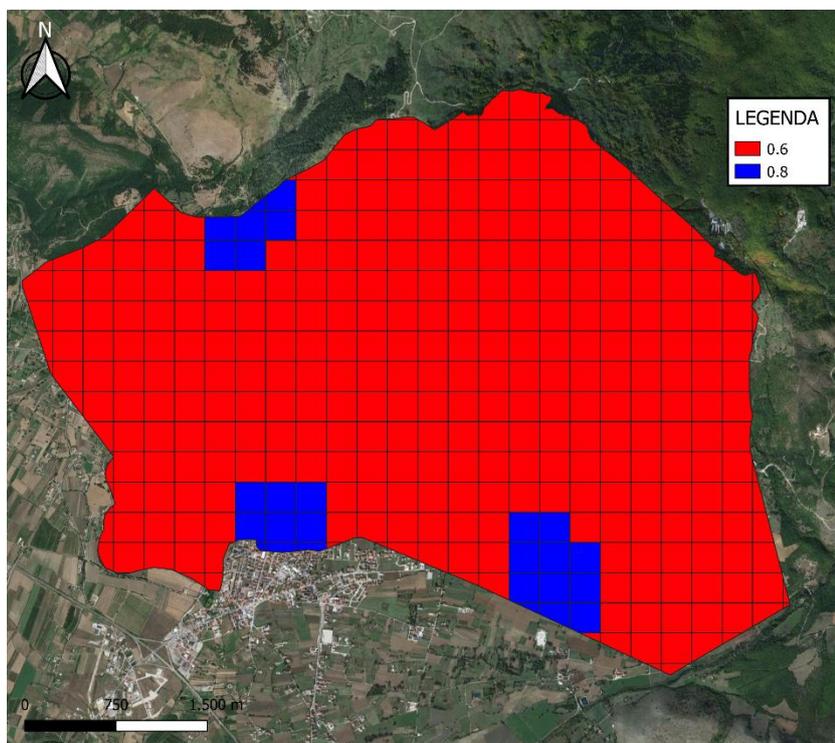


Figura 220. Carta dei punteggi del parametro Soggiacenze per dell'acquifero di Monte di Viggiano.

In Tabella 51 sono rappresentati i punteggi attribuiti ai valori di soggiacenza.

Valore di Soggiacenza	Punteggio
<50m	0.8
>50m	0.6

Tabella 51. Punteggio attribuito alla Soggiacenza in relazione al valore.

6.4.3.4 Carta della Vulnerabilità Intrinseca

Infine, tutti i tematismi ottenuti sono stati trasformati in file raster e sulla base della Tabella 23, è stato possibile realizzare la Carta della Vulnerabilità Intrinseca (Fig.221) secondo il metodo GOD.

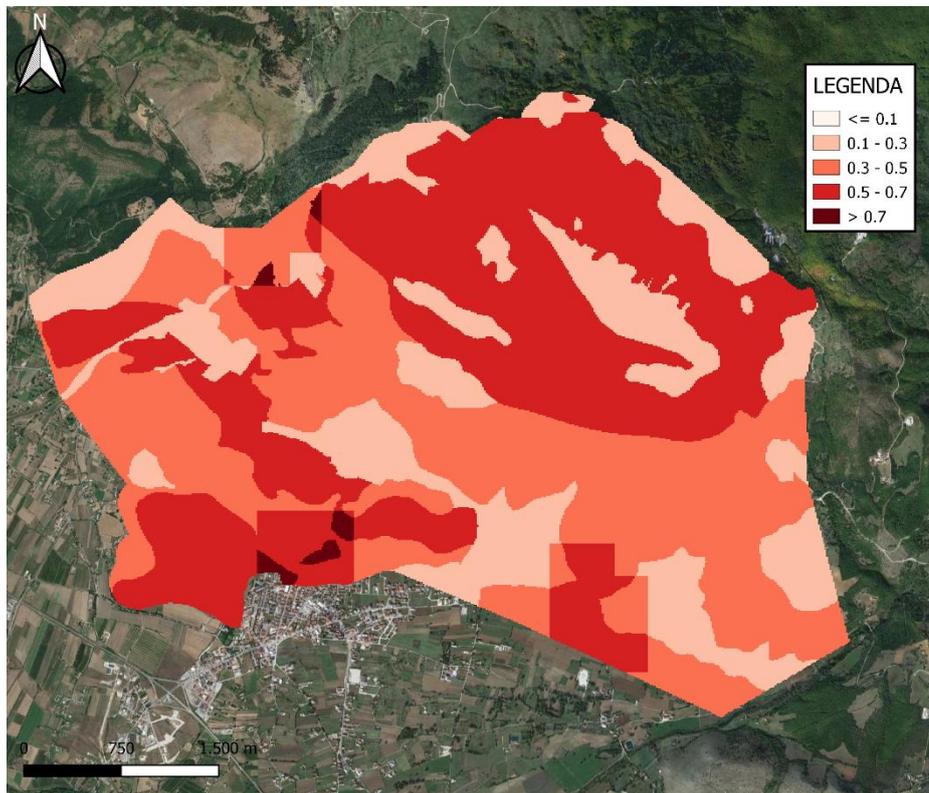


Figura 221. Carta della vulnerabilità intrinseca ottenuta con il metodo GOD.

Dalla figura si può notare che la maggior parte dell'area ha una vulnerabilità alta e moderata, il che è associato alla presenza dei Calcari a Palaeodasycladus e Lithiosis e dei Calcari a Requenie e Gasteropodi. Le aree con una vulnerabilità bassa o trascurabile, invece, sono associate alle Argille Varicolori ed ai depositi detritici molto presenti nell'area.

6.4.4 Acquifero Alli

L'acquifero Alli (Fig.222) ha un'estensione di circa 2 Km².

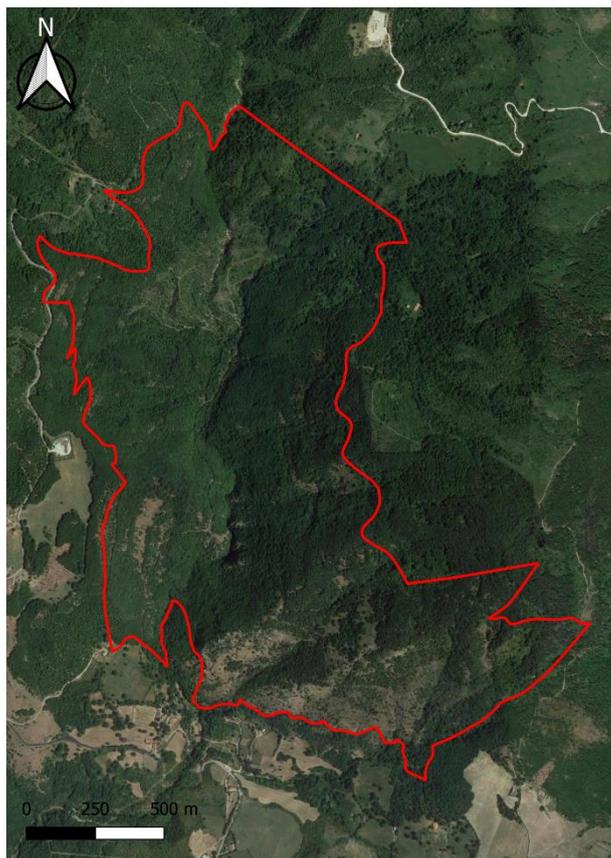


Figura 22. Acquifero Alli.

6.4.4.1 Grado confinamento acquifero (G)

Come per i precedenti acquiferi, tenendo in considerazione la Tabella 47, è stato assegnato un valore al parametro **G** pari ad 1; quindi considerando l'acquifero come non-confinato. Digitalizzando questa informazione è stato possibile ottenere la carta dei punteggi del grado di confinamento dell'acquifero (Fig.223).



Figura 223. Carta dei punteggi del grado di confinamento relativa all'acquifero Alli.

6.4.4.2 Strati Sovrastanti (O)

Anche per questo acquifero, come per i precedenti, per la valutazione del parametro **O**, si è presa in considerazione la Carta Geologica (Fig.224).

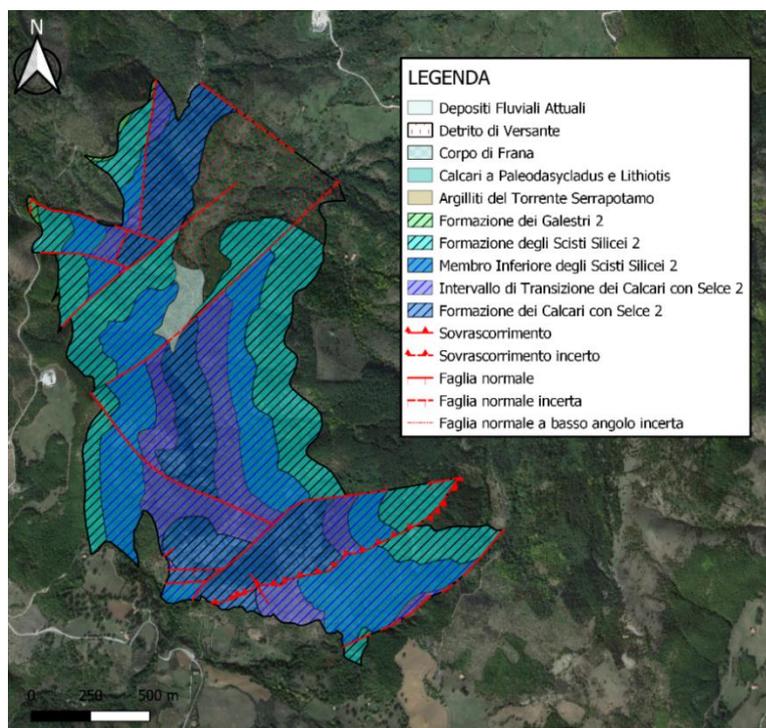


Figura 224. Carta Geologica dell'acquifero Alli (Palladino G. et al., in preparazione).

Dopodiché, in base alla Tabella 48, sono stati assegnati tutti i punteggi alle corrispondenti litologie in modo da ottenere la carta dei punteggi degli strati sovrastanti (Fig.225).

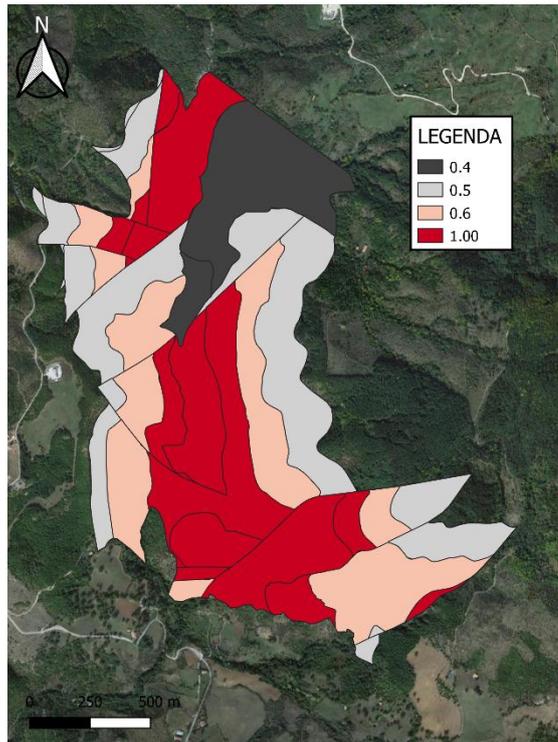


Figura 225. Carta dei punteggi degli strati sovrastanti relativa all'acquifero Alli.

Il punteggio più elevato è stato associato alla Formazione dei Calcari con Selce 2; mentre le aree con un punteggio più basso si riferiscono alla presenza della Formazione degli Scisti Silicei 2.

6.4.4.3 Soggiacenza (D)

Il metodo di valutazione di questo parametro è lo stesso del precedente, cioè sull'individuazione dei punti d'acqua all'interno dell'acquifero e nella creazione di un buffer di 250m nell'intorno degli stessi. All'interno del buffer è stato assegnato un valore di soggiacenza <50m, mentre nelle aree al di fuori è stato assegnato un valore >50 m. La Figura 226 mostra la carta tematica (in forma vettoriale) fuoriuscita da questa tipologia di analisi.

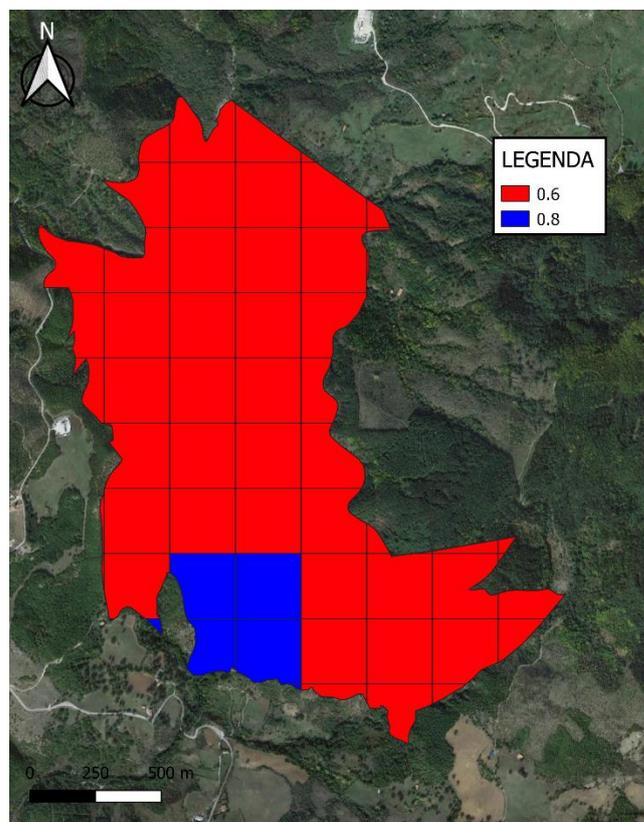


Figura 226. Carta dei punteggi del parametro Soggiacenze per dell'acquifero Alli.

In Tabella 52 sono rappresentati i punteggi attribuiti ai valori di soggiacenza.

Valore di Soggiacenza	Punteggio
<50m	0.8
>50m	0.6

Tabella 52. Punteggio attribuito alla Soggiacenza in relazione al valore.

6.4.4.4 Carta della Vulnerabilità Intrinseca

Infine, tutti i tematismi ottenuti sono stati trasformati in file raster e sulla base della Tabella 23, è stato possibile realizzare la Carta della Vulnerabilità Intrinseca (Fig.227) secondo il metodo GOD.

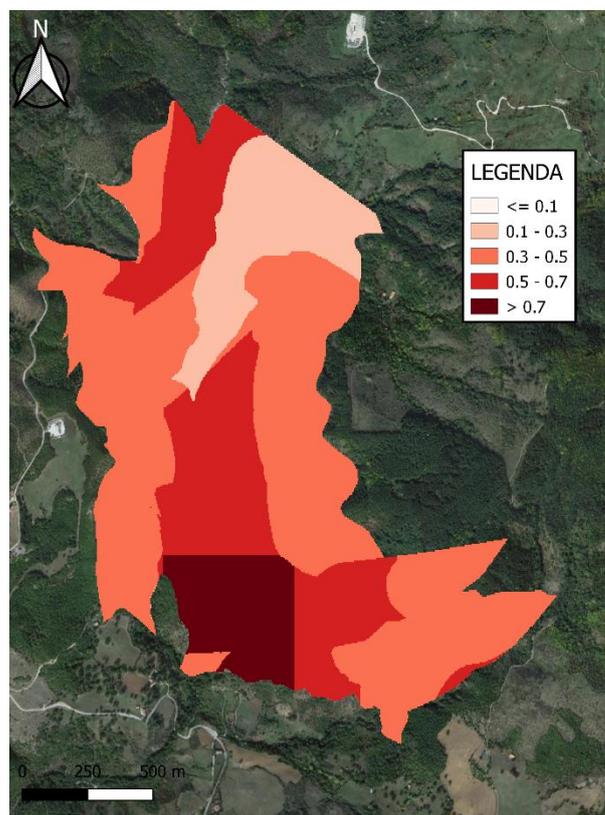


Figura 227. Carta della vulnerabilità intrinseca ottenuta con il metodo GOD.

Una buona parte dell'area presenta una vulnerabilità moderata, associata alla presenza della Formazione degli Scisti Silicei 2 e dei depositi detritici e fluviali. Le aree con una vulnerabilità alta, invece, sono associate alla presenza della Formazione dei Calcari con Selce 2.

6.4.5 Acquifero Poroso della Piana alluvionale

L'acquifero Poroso della Piana alluvionale (Fig.228) ha un'estensione di circa 150 Km².

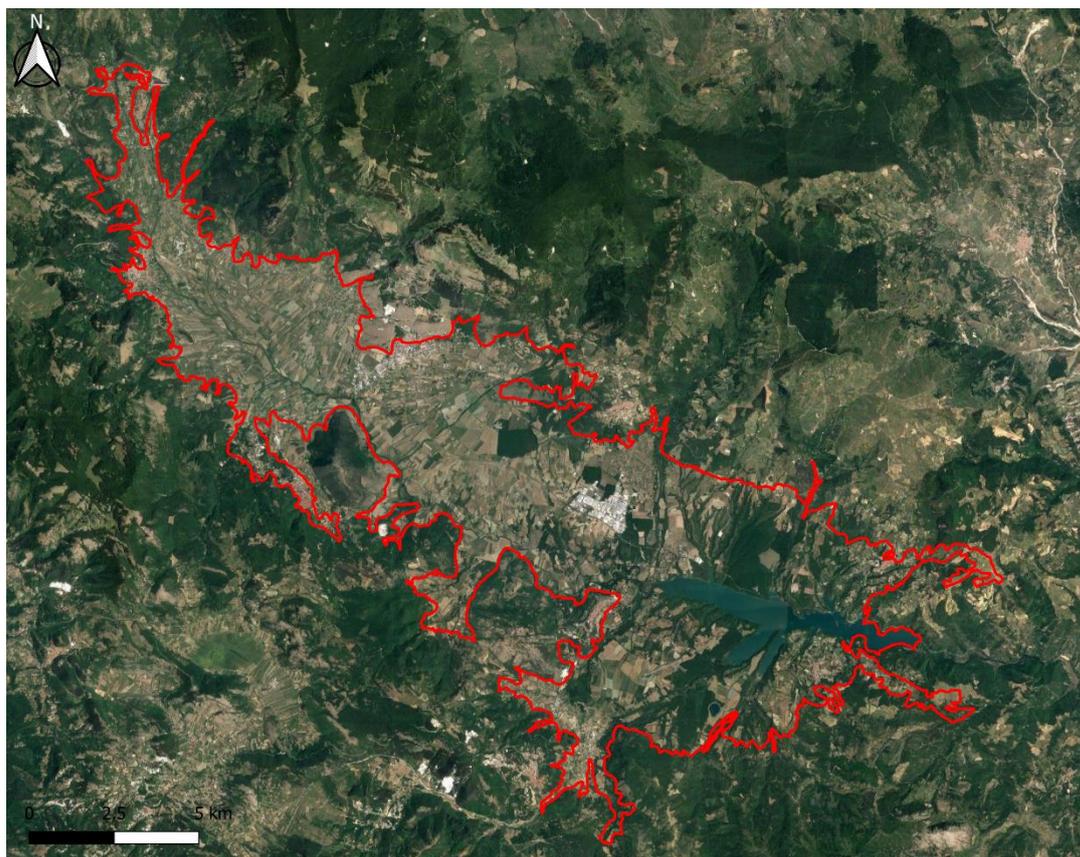


Figura 228. Acquifero Poroso della Piana alluvionale.

6.4.5.1 Grado confinamento acquifero (G)

Come per i precedenti acquiferi, tenendo in considerazione la Tabella 47, è stato assegnato un valore al parametro **G** pari ad 0.4; quindi considerando l'acquifero come semi-confinato. Digitalizzando questa informazione è stato possibile ottenere la carta dei punteggi del grado di confinamento dell'acquifero (Fig.229).

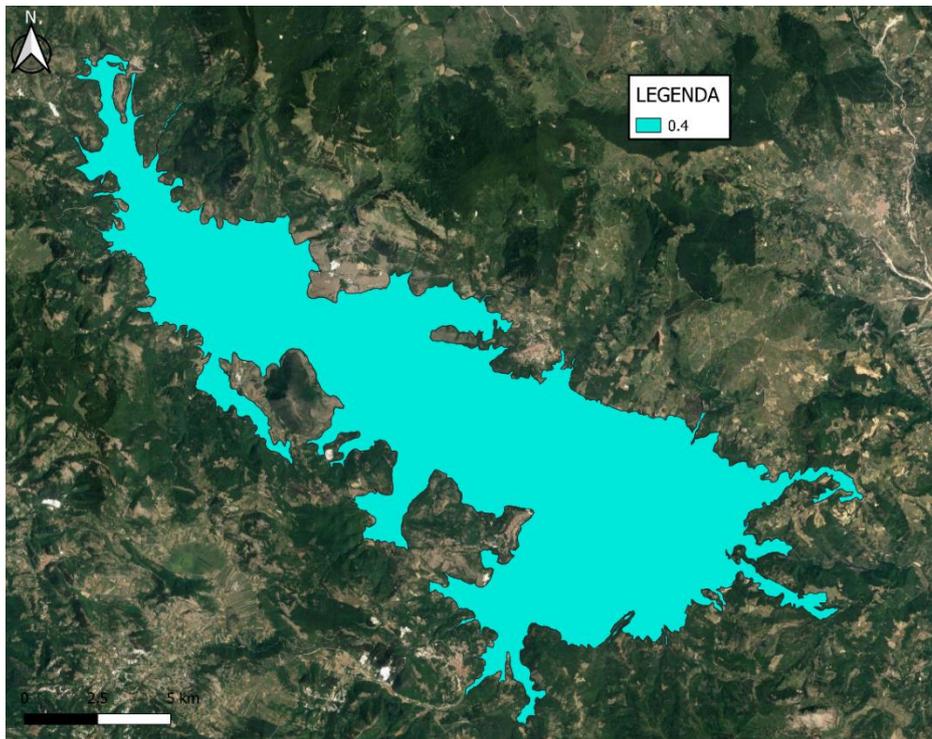


Figura 229. Carta dei punteggi del grado di confinamento relativa all'acquifero Poroso della Piana alluvionale.

6.4.5.2 Strati Sovrastanti (O)

Anche per questo acquifero, come per i precedenti, per la valutazione del parametro **O**, si è presa in considerazione la Carta Geologica (Fig.230).

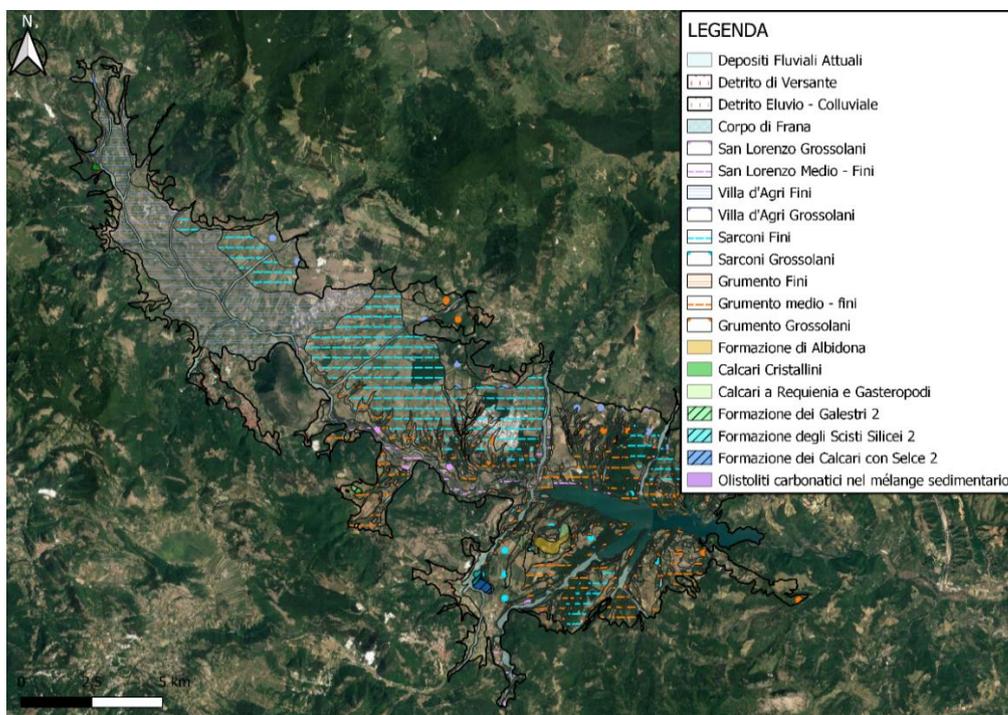


Figura 230. Carta Geologica dell'acquifero Poroso della Piana alluvionale (Palladino G. et al., in preparazione).

Dopodiché, in base alla Tabella 48, sono stati assegnati tutti i punteggi alle corrispondenti litologie in modo da ottenere la carta dei punteggi degli strati sovrastanti (Fig.231).

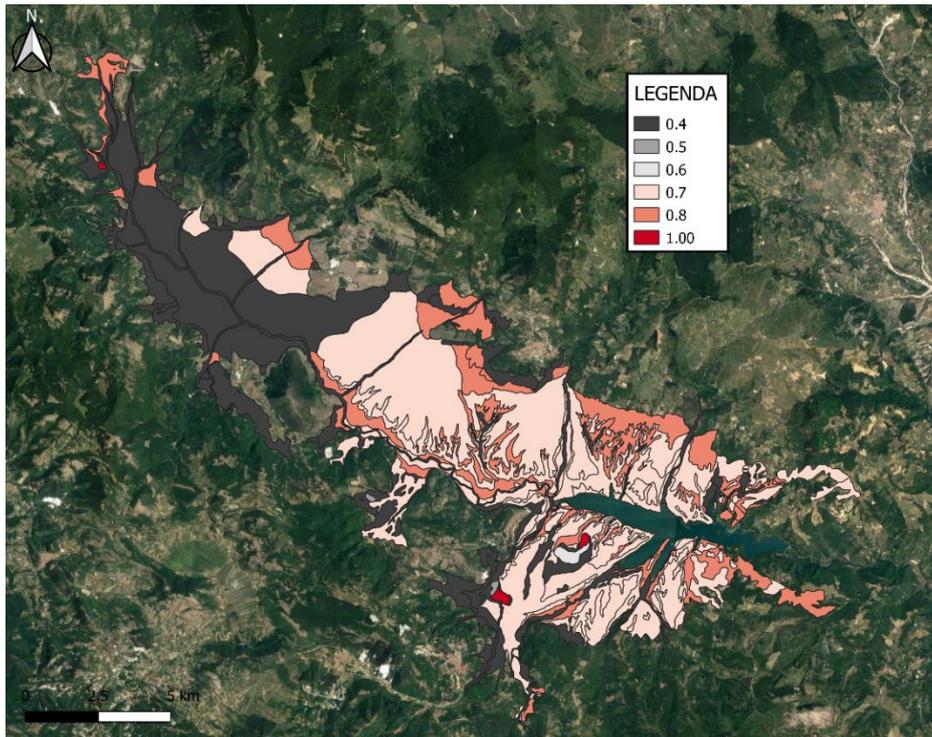


Figura 231. Carta dei punteggi degli strati sovrastanti relativa all’acquifero Poroso della Piana alluvionale.

6.4.5.3 Soggiacenza (D)

Per il calcolo della soggiacenza è stato possibile usufruire di misure dirette (riferite agli anni 2020 e 2021) del livello di falda di pozzi, pozzi privati, piezometri e sorgenti presenti nell’area. Oltre alle misure dirette, le quali non sono molto numerose e distribuite omogeneamente in riferimento all’estensione dell’area, è stato necessario ricavare un quantitativo maggiore di punti di controllo “vincolanti”; per la loro individuazione si è tenuto conto delle aste fluviali presenti nell’area (RSDI Geoportale della Regione Basilicata), le quali da file vettoriali lineari sono state trasformate in file puntuali ed unite con i punti di controllo delle misure dirette. In questo modo sono stati ottenuti una serie numerosa di punti di controllo “vincolanti” la superficie freatica della falda idrica (Fig.232).

I livelli della falda dei punti di controllo diretto sono stati sottratti alla quota del DTM (Fig.233) per ottenere il livello della piezometrica riferita al livello medio del mare. Per i punti di controllo ricavati dalle aste fluviali invece è stato assegnato, come livello della piezometrica, il valore di quota ricavato dal DTM.

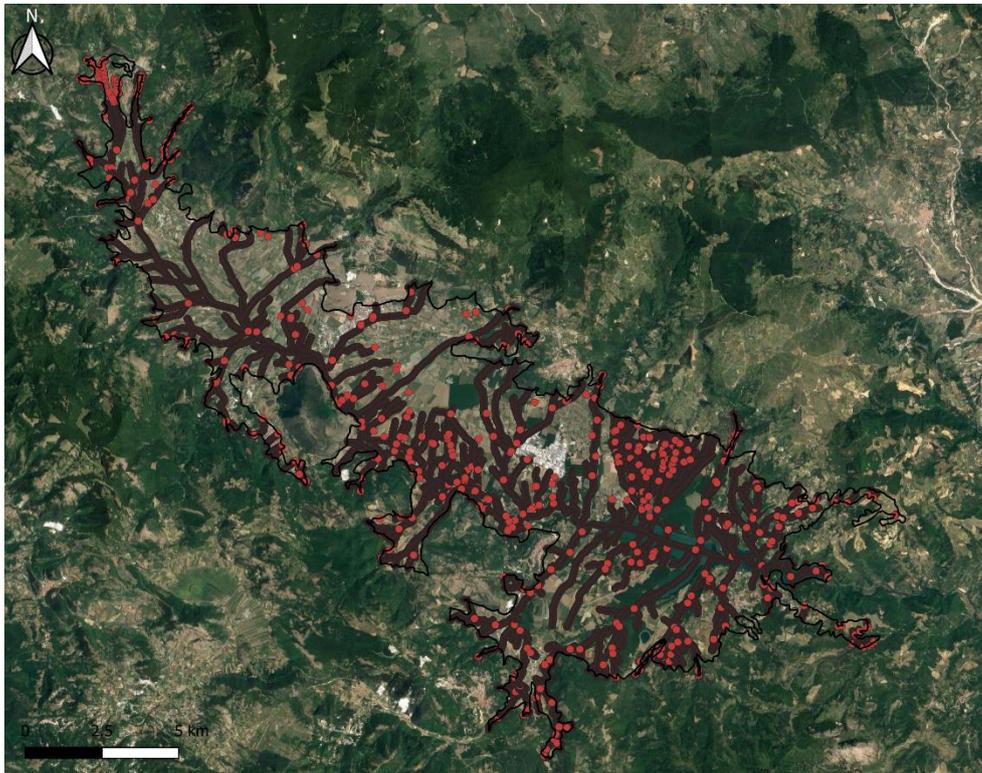


Figura 232. Punti di controllo “vincolanti” all’interno dell’acquifero Poroso della Piana alluvionale.

L’interpolazione dei punti di controllo reali e fittizi (quote freatiche e quote dei corsi d’acqua principali), ha consentito di ottenere una superficie continua e distribuita per l’intera area. Effettuando prove con diverse metodologie di interpolazione (IDW, TIN, ecc.), quella che ha prodotto risultati migliori è stata l’interpolazione TIN. Il TIN (Triangular Irregular Network) è un modello di rappresentazione dei dati in cui l’area in oggetto è tassellata mediante una serie connessa di triangoli di dimensione variabile, disposti irregolarmente nello spazio. Un metodo comunemente utilizzato per la creazione di un TIN si avvale dell’algoritmo di triangolazione di Delaunay, il quale si basa sull’assunto per il quale: “Dato un insieme di N punti sul piano, t è un triangolo di Delaunay se soddisfa la condizione che il cerchio circoscritto al triangolo non contiene altri punti di N ”.

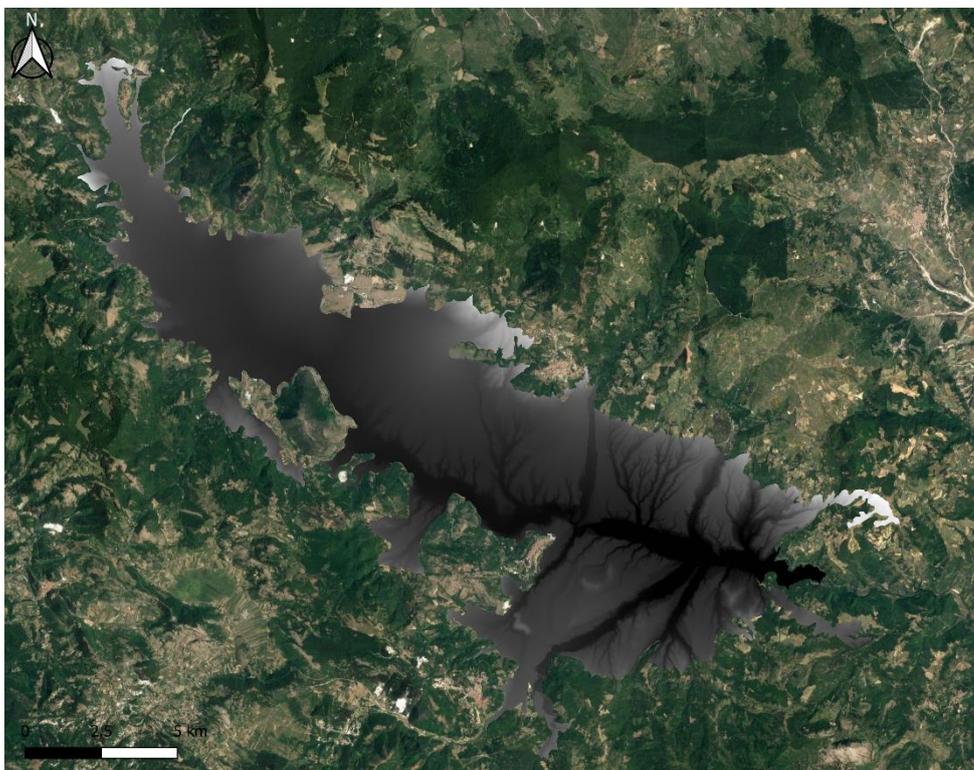


Figura 233. DTM dell'acquifero Poroso della Piana alluvionale.

Dopo aver generato l'interpolazione, essa è stata ritagliata rispetto all'area dell'acquifero Poroso della Piana alluvionale, eliminando le porzioni esterne che generalmente danno degli errori maggiori (insiti nel metodo) (Fig.234).

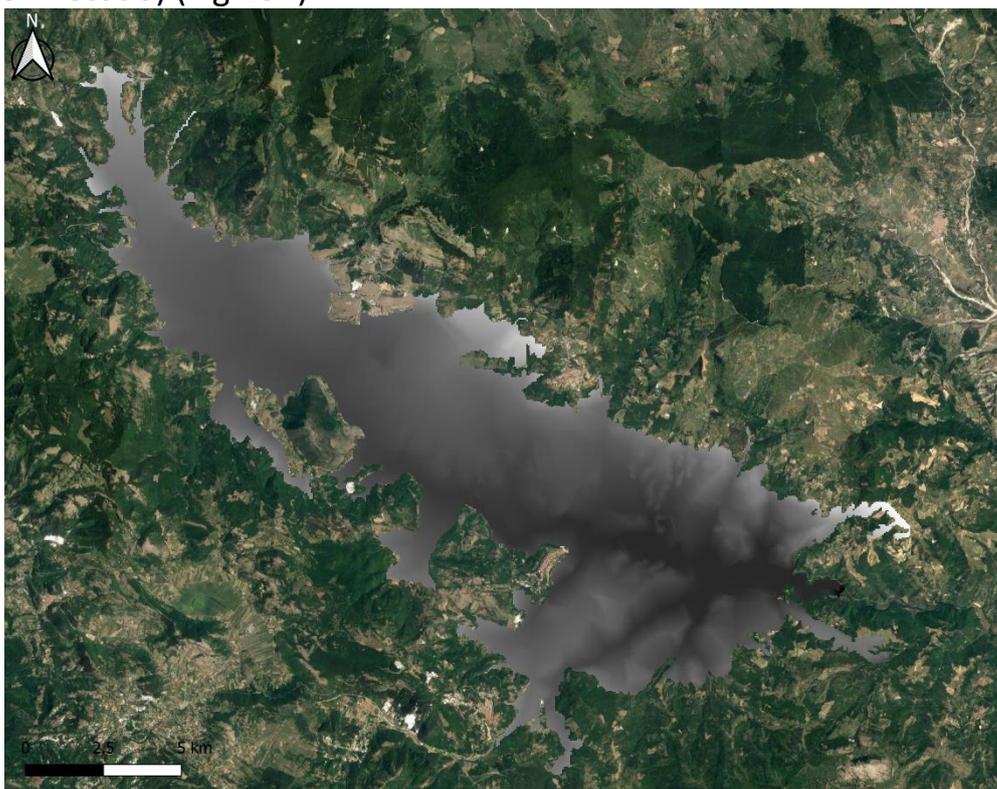


Figura 234. Interpolazione TIN ritagliata rispetto al limite dell'acquifero Poroso della Piana alluvionale.

Successivamente è stata effettuata una differenza tra il DTM (Fig.233) dell'acquifero Poroso della Piana alluvionale e l'interpolazione TIN, ottenendo in questo modo la carta tematica della soggiacenza (Fig.235).

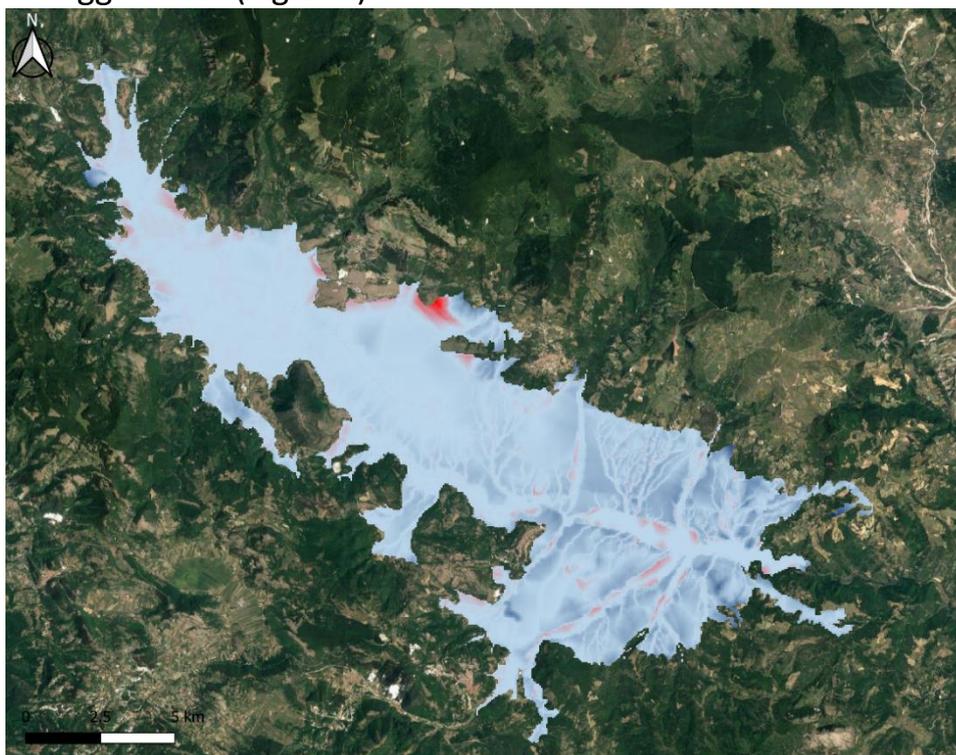


Figura 235. Carta della Soggiacenza dell'acquifero Poroso della Piana alluvionale.

Le aree colorate di rosso sono rappresentative di zone anomale in cui la piezometrica risulta essere irrealisticamente al di sopra della superficie topografica, la maggior parte di queste aree sono localizzate tra due aste fluviali e quindi associate, probabilmente, alla presenza di emergenze d'acqua.

Dal grafico proposto da Civita & De Maio (2000), è stata ricavata l'equazione rappresentante la curva che correla i valori di soggiacenza ai relativi punteggi (Fig.236).

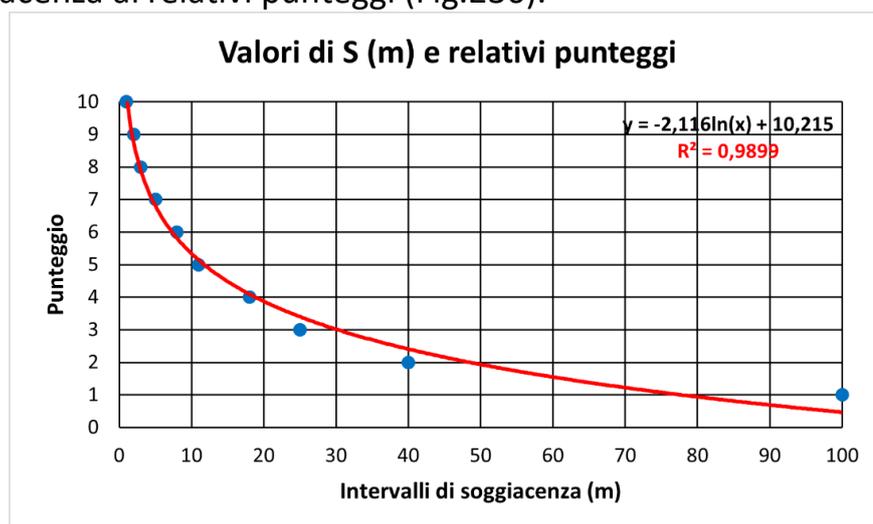


Figura 236. Visualizzazione della curva e della relativa equazione rappresentativa dei punteggi della soggiacenza (S).

Infine, per ottenere la carta dei punteggi della soggiacenza (Fig.237), l'equazione della curva precedentemente ricavata è stata associata al file raster dei valori di soggiacenza.

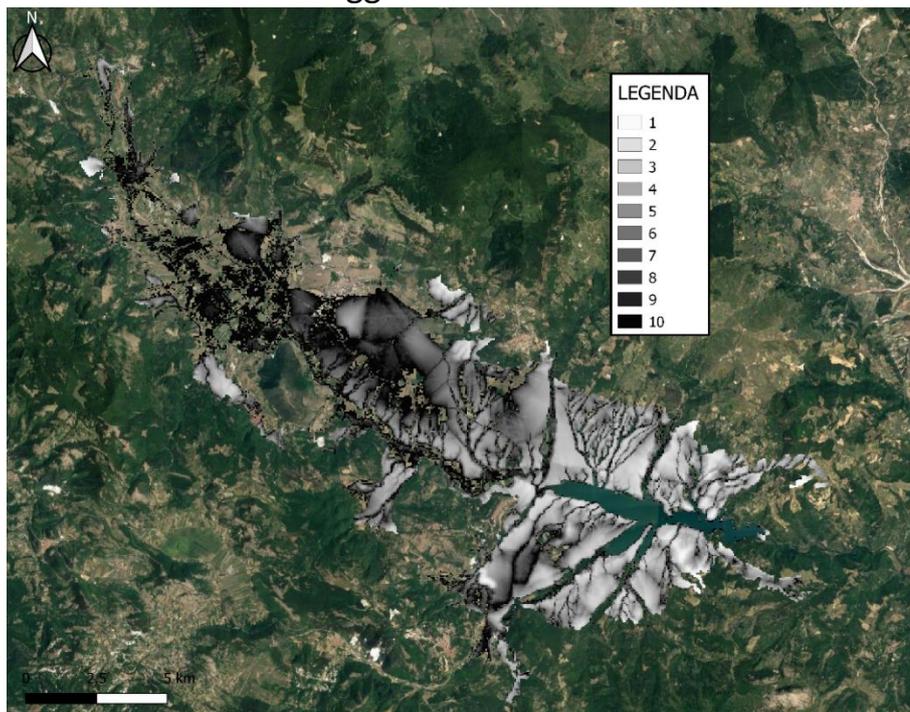


Figura 237. Carta dei punti della soggiacenza (S) relativa all'acquifero Poroso della Piana alluvionale.

Come è possibile notare dall'immagine, sono presenti aree in cui non si ha alcun punteggio, ciò è probabilmente riconducibile alla presenza di aree con valori di soggiacenza negativa (corrispondenti ad aree di affioramento della superficie freatica) che avranno ripercussioni nella valutazione finale della carta della vulnerabilità intrinseca.

6.4.5.4 Carta della Vulnerabilità Intrinseca

Infine, tutti i tematismi ottenuti sono stati trasformati in file raster e sulla base della Tabella 23, è stato possibile realizzare la Carta della Vulnerabilità Intrinseca (Fig.238) secondo il metodo GOD.

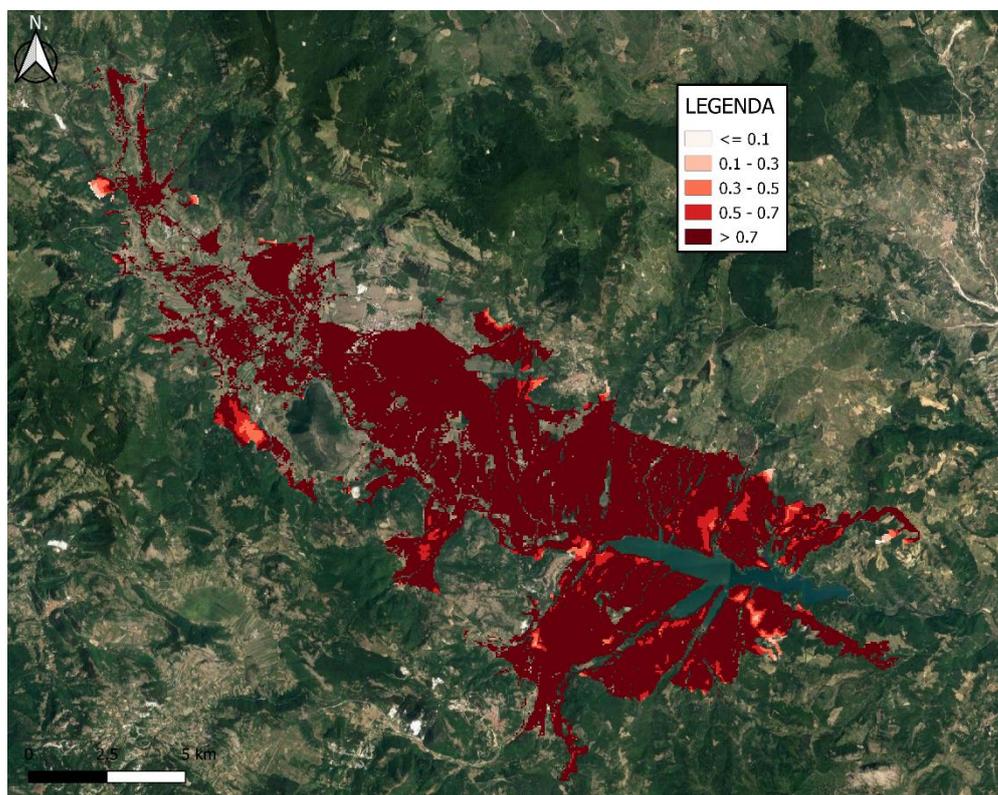


Figura 238. Carta della vulnerabilità intrinseca ottenuta con il metodo GOD.

Come si può vedere dall'immagine, l'intero acquifero ha un grado di vulnerabilità estremo ed un grado di vulnerabilità che va da alto a moderato soltanto in alcune piccole porzioni. Il parametro della soggiacenza assume una notevole rilevanza condizionando il risultato finale in modo marcato.

6.5 Metodo Base GNDCI-CNR

Questa metodologia per zonazione ad aree omogenee (CSI) proposta da Civita (1990), non richiede nessun parametro di tipo numerico in ingresso. Per la valutazione della vulnerabilità, sulla base delle diverse situazioni idrogeologiche proposte dal metodo vengono assegnati 6 gradi di vulnerabilità, da estremamente elevata a bassissima. Nella Figura 17 (Cap.4) vengono rappresentate le diverse situazioni idrogeologiche con i relativi gradi di vulnerabilità. Questa metodologia di valutazione della vulnerabilità, è stata applicata su tutta l'area in esame. Sono state prese in considerazione tutte le formazioni geologiche presenti nell'area (Fig.239), e sulla base della Figura 17 sono assegnati i corrispettivi gradi di vulnerabilità.

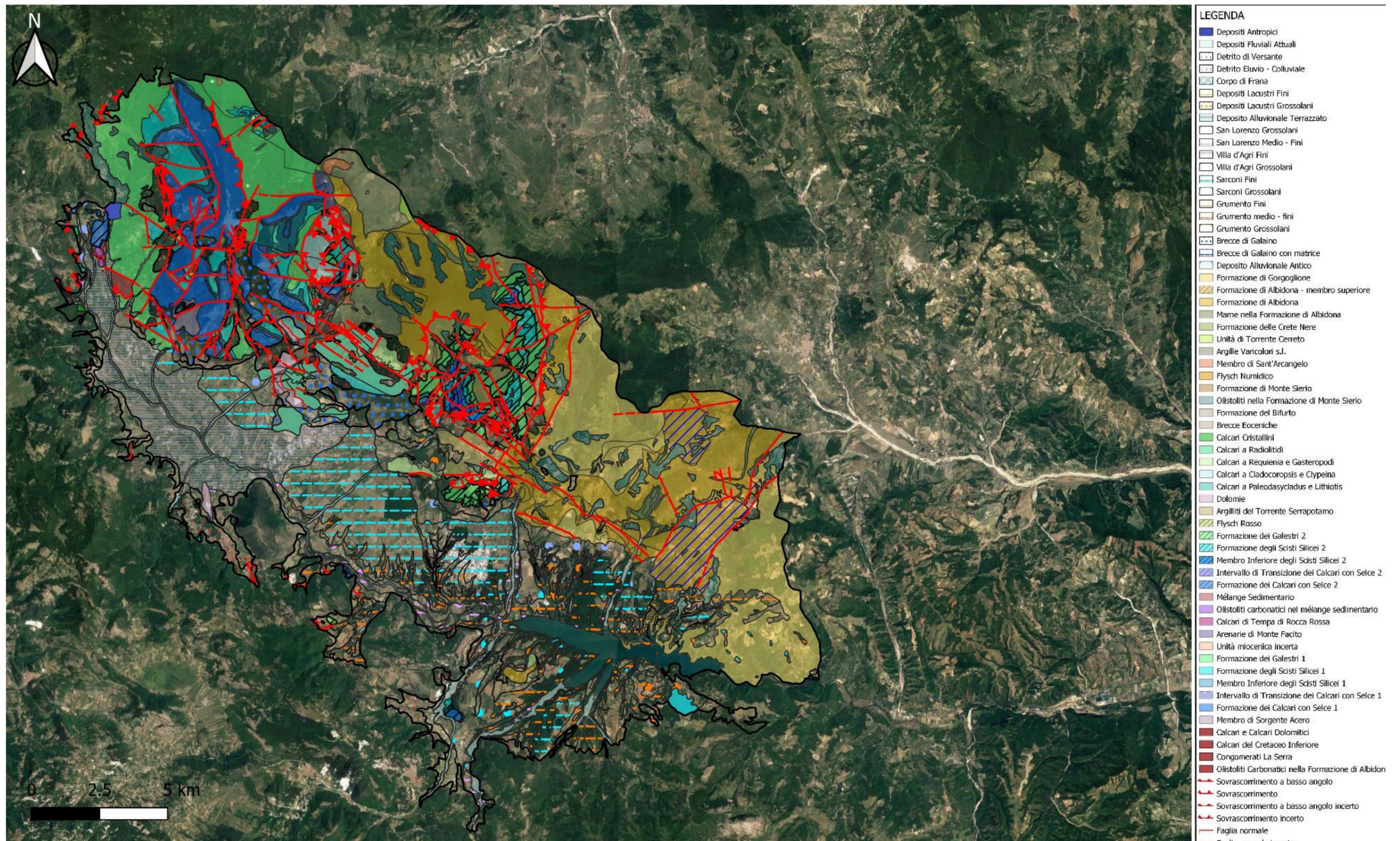


Figura 239. Carta geologica dell'area di studio (Palladino G. et al., in preparazione)

Dopo aver assegnato i corrispettivi gradi di vulnerabilità, si è proceduto alla realizzazione della Carta di Vulnerabilità Intrinseca con il Metodo Base GNDCI-CNR (Fig.240).

È possibile notare come, nella porzione settentrionale dell'area abbiamo una distribuzione della vulnerabilità abbastanza eterogenea, dovuta alla presenza dei sistemi acquiferi carbonatici citati in precedenza. Invece nella porzione inferiore (corrispondente all'acquifero Poroso della piana Alluvionale), si ha una netta distinzione della vulnerabilità. In particolare nella porzione sud-occidentale abbiamo una vulnerabilità bassissima, associata alla presenza dei sedimenti alluvionali quaternari fini; al contrario nella porzione sud-orientale riscontriamo una vulnerabilità elevata, dovuta alla presenza dei sedimenti alluvionali quaternari grossolani.

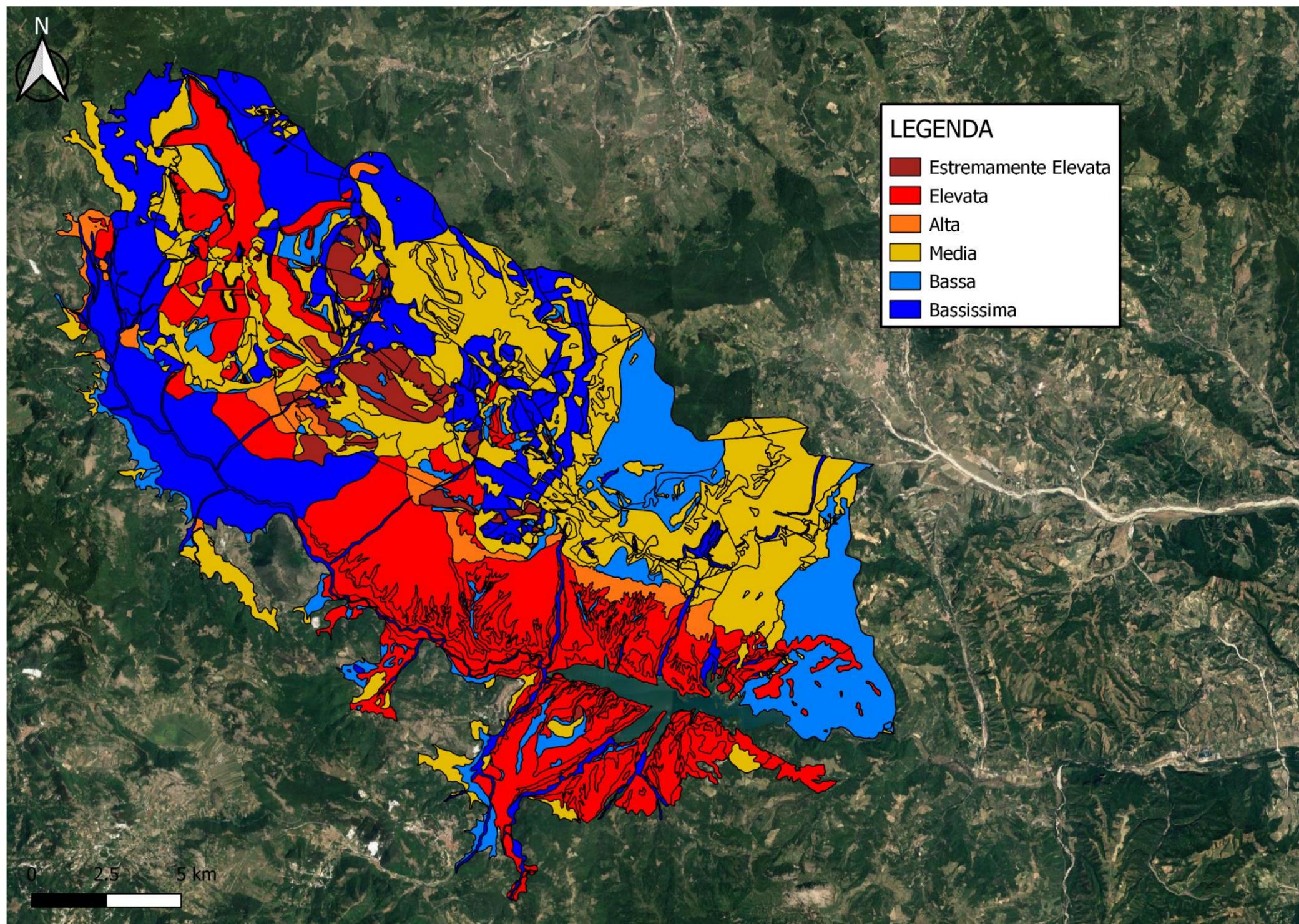


Figura 240. Carta della vulnerabilità intrinseca dell'area di studio ottenuta con il Metodo Base GNDCI-CNR (CSI).

CAPITOLO 7

DISCUSSIONI E CONCLUSIONI

Negli Allegati 1-2-3-4-5 sono sintetizzati i risultati dall'analisi della vulnerabilità intrinseca, con le quattro metodologie applicate, suddivise per acquifero. I risultati saranno discussi di seguito.

Nell'allegato 1 sono riportati risultati ottenuti per il sistema acquifero Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola. Le aree in cui sono presenti la Formazione dei Calcari con Selce (All.1a), la quale ha una permeabilità elevata (All.1b), ed i detriti di versante, i quali hanno una permeabilità relativa medio-alta, nelle Carte di Vulnerabilità Intrinseca, ottenute con i metodi SINTACS, EPIK e GOD (All.1c,d,e), risultano avere una vulnerabilità molto elevata. Nelle aree dove affiorano le Formazioni degli Scisti Silicei, dei Galestri o le Argille Varicolori, le quali hanno un grado di permeabilità relativa medio-bassa e bassa-impermeabile, la vulnerabilità risultante dalle analisi ha valori intermedi e bassi. È necessario ricordare che il metodo EPIK (All.1d), fornisce una stima del fattore di protezione anziché della vulnerabilità, e quindi, bassi valori (rappresentati dai colori più chiari) corrispondono ad alti valori di vulnerabilità; quindi perfettamente concordi con i risultati delle altre due metodologie. Ed il metodo EPIK prende in considerazione parametri che sono stati tarati appositamente per lo studio degli acquiferi di tipo carbonatico e che, pertanto, assegnano un punteggio elevato ai parametri strettamente dipendenti dal carsismo.

Nell'allegato 2, sono riportati i risultati ottenuti per il sistema acquifero Volturino Est. Le aree in cui sono presenti i Calcari di età Giurassica e la Formazione dei Calcari con Selce (All.2a), i quali hanno un grado di permeabilità relativa elevata (All.2b), nelle Carte di Vulnerabilità Intrinseca (All.2c,d,e) riscontriamo un grado molto elevato in tutte e tre le metodologie utilizzate. Nelle aree in cui affiorano la Formazione degli Scisti Silicei, dei Galestri, le Argille Varicolori ed il Mélange Sedimentario, le quali hanno una permeabilità relativa decisamente inferiore, abbiamo un grado di vulnerabilità molto più basso. Nella Carta della Vulnerabilità Intrinseca ottenuta con il metodo GOD (Foster et al., 2002) (All.2e), è evidente l'influenza del parametro della soggiacenza; ciò deriva dalle

caratteristiche proprie della metodologia in quanto prende in considerazione molti meno parametri rispetto ai metodi PCSM.

All'interno dell'allegato 3, sono riportati i risultati ottenuti per il sistema acquifero del Monte di Viggiano. Nelle aree in cui sono presenti i Calcari di età Giurassica e le Breccie di Galaino (All.3a), le quali hanno una permeabilità relativa elevata (All.3b), nelle Carte di Vulnerabilità Intrinseca (All.3c,d,e) è possibile notare come la vulnerabilità abbia un grado elevato. Nelle aree in cui affiorano le formazioni più terrigene, le quali hanno un grado di permeabilità relativa più basso, è possibile notare una diminuzione netta del grado di vulnerabilità. Nella Carta della Vulnerabilità Intrinseca ottenuta con il metodo SINTACS (All.3c), è evidente l'influenza che ha il parametro dell'acclività della superficie topografica (infatti il peso, nella stringa dello scenario carsico, è pari a 5); ed è evidente anche la migliore visualizzazione in quanto la vulnerabilità viene discretizzata in un maggior numero di classi. L'applicazione di questo metodo è molto più complessa di quelli precedenti e che, pertanto, sia per la mole di dati da elaborare che per la complessità delle analisi da effettuare, sia per le caratteristiche prestazionali dell'elaboratore che del software, è impensabile che questo metodo possa essere utilizzato in aree molto estese

Nell'allegato 4, sono riportati i risultati ottenuti per il sistema acquifero Alli. Le aree in cui ritroviamo la Formazione dei Calcari con Selce e l'Intervallo di Transizione dei Calcari con Selce (All.4a), i quali hanno una permeabilità relativa, rispettivamente, elevata e medio-alta (All.4b), nelle Carte di Vulnerabilità Intrinseca (All.4c,d,e) risultano avere un grado di vulnerabilità molto elevato. Nelle aree in cui affiorano la Formazione degli Scisti Silicei e dei Galestri, le quali hanno una permeabilità relativa inferiore, risultano avere anche un grado di vulnerabilità inferiore. Nella Carta della Vulnerabilità Intrinseca ottenuta con il metodo SINTACS (All.4c), è evidente la grande influenza che la pendenza ha nel calcolo dell'indice di vulnerabilità; infatti l'area centrale di colore bianco in cui si ha una vulnerabilità molto bassa, è influenzata dalla presenza del corso d'acqua del torrente Alli.

Nell'allegato 5, sono riportati i risultati ottenuti per il sistema acquifero Poroso della Piana alluvionale (All.5a). Le Carte di Vulnerabilità Intrinseca ottenute con i metodi SINTACS (Civita M., De

Maio M., 2000) (All.5c) ed GOD (Foster et al., 2002) (All.5d), hanno portato a dei risultati simili tra loro. Nella Carta della Vulnerabilità Intrinseca ottenuta con il Metodo Base GNDCI-CNR (Civita M., 1990) (All.5b), riscontriamo una netta distinzione della vulnerabilità; nella porzione nord-occidentale abbiamo un grado di vulnerabilità bassissima, associata alla presenza dei sedimenti alluvionali quaternari fini, al contrario nella porzione nord-orientale abbiamo un grado di vulnerabilità elevata, associata alla presenza dei sedimenti alluvionali quaternari grossolani. Ciò evidenzia che, nonostante i metodi CSI siano molto meno raffinati, in alcune aree essi possono portare a risultati che ci possono dare un'idea generale della distribuzione della vulnerabilità più immediata rispetto alle metodologie PCSM o RS.

Sintetizzando, nonostante le differenze esistenti tra le metodologie utilizzate, tutte quante hanno portato a dei risultati confrontabili e quindi hanno confermato la bontà delle analisi effettuate per ogni singolo acquifero. Infatti per tutti gli acquiferi, le aree con un maggiore grado di vulnerabilità sono quelle in cui affiorano le formazioni calcaree, le quali sono maggiormente fratturate e/o carsificate, e le aree in cui affiorano formazioni più permeabili. Dal momento che tutti gli acquiferi carbonatici sono "non confinati" e non è presente una copertura protettiva importante, l'unica protezione è rappresentata dalla porzione insatura dell'acquifero che, nei nostri casi, è formata quasi totalmente da calcari carsificati/fratturati e quindi si ha una protezione quasi nulla; il che corrisponde ad un'elevata vulnerabilità poiché le acque di precipitazione e/o circolazione (insieme ad un possibile inquinante) possono raggiungere direttamente e velocemente la falda acquifera.

In questo lavoro di Tesi sono stati approfonditi alcuni aspetti legati alla salvaguardia delle risorse idriche contenute nell'Alta Val d'Agri (Fig.247), ricadente all'interno dell'Appennino meridionale.

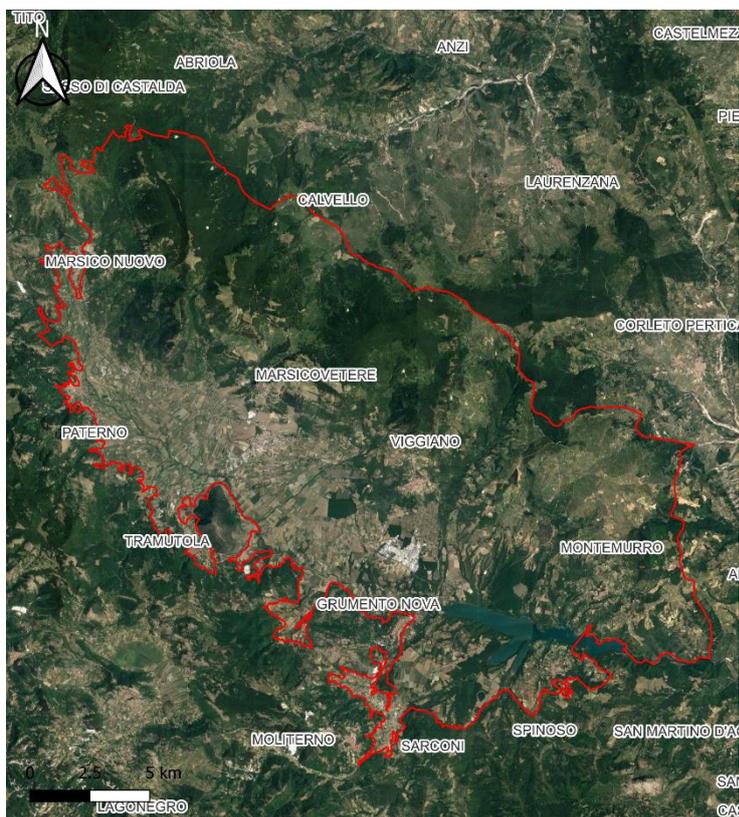


Figura 247. Inquadramento geografico dell'area di studio.

In particolare si è cercato di definire un modello di valutazione della vulnerabilità (sensibilità naturale) degli acquiferi mirata alla salvaguardia degli stessi; l'approccio fa parte della strategia "di area vasta" intesa a guidare la pianificazione delle risorse idriche e delle attività antropiche, al fine di individuare le zone a maggior rischio di contaminazione. Tale valutazione necessita di conoscenze mature di tipo geologico e idrogeologico, e rappresenta una tappa verso il percorso della valutazione del rischio di inquinamento delle falde sotterranee. Le Carte della Vulnerabilità Intrinseca rappresentano quindi un essenziale strumento di pianificazione territoriale, in quanto definiscono il grado di idoneità di un'area a supportare lo sviluppo di attività umane. Il passaggio successivo comporta l'interfacciarsi delle condizioni di vulnerabilità naturale dell'acquifero, derivanti da caratteristiche litologiche ed idrogeologiche, con i fattori di sviluppo antropico (vedi centri di pericolo: Carta della Vulnerabilità Integrata e Carta della Vulnerabilità Specifica. Per poi arrivare alla cartografia del rischio di inquinamento delle falde idriche sotterranee (Fig.23). In questo lavoro sono stati utilizzati, nell'ambito dei cinque diversi acquiferi individuati nell'area, quattro metodi di valutazione della vulnerabilità intrinseca; rispettivamente due metodi a punteggi e pesi

(PCSM, SINTACS ed EPIK), un metodo a punteggio semplice (RS, GOD) ed un metodo di zonazione per aree omogenee (CSI, Metodo Base GNDICI-CNR); quest'ultimo applicato per l'intera area di studio. L'applicazione delle diverse metodologie sui singoli acquiferi ha consentito un confronto ed un'analisi sull'affidabilità, nei vari contesti idrogeologici, dei metodi utilizzati.

BIBLIOGRAFIA

- **AA.VV.**, 1988. Proposta di una normativa per l'istituzione delle fasce di rispetto delle opere di captazione di acque sotterranee-Francani V. & Civita M. editori, GeoGraph, Milano.
- **AA.VV.**, 2003. Le risorse idriche sotterranee dell'Alta Val d'Agri (Agrifluid, 2003). Autorità Interregionale di Bacino della Basilicata – Collana Editoriale di Studi e Ricerche n.3.
- **ALBINET M., MARAGAT J.**, 1970. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. Bull. BRGM, Paris, 2, 3, 4, pp. 13-22.
- **ALLER L. ET ALII.**, 1987. DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. Report 600/2-87/036, U.S. Environmental Protection Agency Ada. Oklahoma (2001).
- **AMODEO F.**, 1999. Il Triassico terminale – Giurassico del Bacino Lagonegrese. Studi stratigrafici sugli Scisti Silicei della Basilicata (Italia meridionale). Mem. Geol. (Lausanne), 22, 121pp.
- **BAKALOWICZ.**, 2005. Karst groundwater: a challenge for new resources. Hydrogeology Journal, 13, 148-60.
- **BARUFFINI L. ET ALII.**, 2000. Stratigraphic revision of the Eocene Albidona Formation in the type locality (Calabria, southern Italy). Riv. Ital. Paleontol. Stratigr. 106, 73-98.
- **BEAR J.**, 1979. Hydraulics of groundwater. McGraw Hill Inc.
- **BENTIVENGA M. ET ALII.**, 2012. Development of the Pietra Maura landslide and interaction with the Marsico Nuovo dam (Basilicata – Italy). Geografia Fisica e Dinamica del Quaternario. 35, 13-22. DOI 10.4461/GFDQ.2012.35.2.

- **BENTIVENGA M. ET ALII.**, 2022. Multisource and Multilevel Investigations on a Historical Landslide: The 1907 Servigliano Earth Flow in Montemurro (Basilicata, Southern Italy). *Land*, 11, 408. <https://doi.org/10.3390/land1103048>.

- **BERTINELLI A. ET ALII.**, 2005. Stratigraphic evolution of the Triassic – Jurassic Sasso di Castalda succession (Lagonegro basin, southern Apennines, Italy). *Boll. Soc. Geol. Ital.*, 124, 161-175.

- **BOIANO U.**, 1997. Anatomy of a siliciclastic turbidite basin: The Gorgoglione Flysch, Upper Miocene, Southern Italy: Physical stratigraphy, sedimentology and sequence-stratigraphic framework. *Sediment. Geol.*, 107, 231-262, doi: 10.1016/s00370738(96)00023-1.

- **BONARDI G. ET ALII.**, 1985. La Formazione di Albidona dell'Appennino calabro-lucano: Ulteriori dati stratigrafici e relazioni con le unità esterne appenniniche. *Boll. Soc. Geol. Ital.*, 104, 539-549.

- **BONARDI G. ET ALII.**, 1988. Il complesso liguride auct: stato delle conoscenze e problemi aperti sulla sua evoluzione pre-appenninica ed i suoi rapporti con l'Arco Calabro. *Mem. Soc. Geol. Ital.*, 41, 17-35.

- **BONARDI G. ET ALII.**, 2001. Calabria-Peloritani Terrane and Northern Ionian Sea. In: Vai G.B & Martini I.P. (eds.) – Anatomy of an Orogen: The Apennines and Adjacent Mediterranean Basins, 287-306, r.

- **BREEUWSMA A. ET ALII.**, 1986. Derivation of land quality to assess environmental problems from soil surveys. *Sci. Soc. Am. J. Am. J.* 50, pp. 186-190.

- **BUCCI F. ET ALII.**, 2012. Geological map of the Northern-Eastern sector of the High Agri Valley, Southern Apennine (Basilicata, Italy). *Journal Maps*, VOL.8; pag. 282-292.

- **BUCCI F. ET ALII.**, 2014. Frontal collapse during thrust propagation in mountain belts: A case study in the Lucanian Apennines, Southern Italy. *Journal of the Geological Society*, London, Vol.171; 571-581.
- **CARANNANTE G. ET ALII.**, 1988. Carbonate lithofacies as paleolatitudindicators: problems and limitations. *Sedimentary Geology*, Vol.60; 333-346.
- **CARBONE S. ET ALII.**, 1991. Presentazione della carta geologica del bacino del fiume Agri (Basilicata). *Memori della Società Geologica Italiana*, Vol.41; 109-120.
- **CASERO P. ET ALII.**, 1988. Neogene geodinamic evolution of the Southern Apennines. *Memorie della Società Geologica Italiana*, Vol.41; 109-120.
- **CASTELLANO M.C., SGROSSO I.**, 1996. Età e significato dei depositi miocenici della Formazione di Monte Sierio e possibile evoluzione cinematica dell'Unità Monti della Maddalena nell'Appennino campano-lucano. *Mem. Soc. Geol. It.*, 51, 239-249.
- **CATALANO S. ET ALII.**, 1993. Pleistocene strike-slip tectonics in the Lucania Apennine (Southern Italy). *Tectonics*, Vol.12; 656-665.
- **CAVALCANTE F. ET ALII.**, 2012. P-T constrains from phyllosilicates of the Liguride Complex of the Pollino area (Southern Apennines, Italy): Geological inferences. *Ofioliti*, Vol.37; 65-75.
- **CELICO P.**, 1988. *Prospezioni Idrogeologiche Vol. 2. Napoli.*
- **CELLO G., LENTINI F. & TORTORICI L.**, 1990. La struttura del settore calabro-lucano e suo significato nel quadro dell'evoluzione tettonica del sistema a thrust sud-appenninico. *Studi Geologici Camerti*, Vol. spec.; 27-34.

- **CELLO G. ET ALII.**, 2000. Fault zone characteristics and scaling properties of the Val d'Agri Fault System (Southern Apennines, Italy). *Journ. Geodynamics*, 29, 293-307.

- **CELLO G. ET ALII.**, 2003. Active tectonics and earthquake source in the epicentral area of the 1857 Basilicata earthquake (Southern Italy). *Journal of Geodynamics*, Vol.36; 37-50.

- **CESTARI R., LAVIANO A.**, 2012. Rudist facies distribution in the late Cretaceous of Cilento and western Basilicata. *Rivista Italiana di Paleontologia e stratigrafia*, 118, 277-294.

- **CIARAPICA G., PASSERI L.**, 2000. Le facies del Triassico inferiore e medio (fm. di Monte Facito Auctt.) nelle aree di Sasso di Castalda e Moliterno (Basilicata). *Bollettino della Società Geologica Italiana*, 119, 339-78.

- **CINQUE A. ET ALII.**, 1993. Quaternary kinematic evolution of the Southern Apennines. Relationship between surface geological features and deep lithospheric structures. *Annali di Geofisica*, Vol.36; 249-260.

- **CIVITA M.**, 1987. La previsione e la prevenzione del rischio d'inquinamento delle acque sotterranee a livello regionale mediante le Carte di Vulnerabilità. *Atti Conv. "Inquinamento delle Acque Sotterranee: Previsione e Prevenzione"*, Mantova, pp. 9-18.

- **CIVITA M.**, 1988. Una metodologia per la definizione ed il dimensionamento delle aree di salvaguardia delle opere di presa delle sorgenti normali. *Boll. Ass. Min. Subalpina*, 24, 4, pp. 423-440.

- **CIVITA M.**, 1990. Legenda unificata per le Carte della vulnerabilità dei corpi idrici sotterranei/ Unified legend for the aquifer pollution vulnerability Maps. *Studi sulla Vulnerabilità degli Acquiferi*, 1 (Append.), Pitagora, Bologna.

- **CIVITA M.**, 1994. Le carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento: Teoria & Pratica. Pitagora Editrice, Bologna, 325 pp.
- **CIVITA M.**, 2005. Idrogeologia applicata e ambientale. Casa Editrice Ambrosiana.
- **CIVITA M. & DE MAIO M.**, 2000. SINTACS R5. Quaderni di tecniche di protezione ambientale. Pitagora Editrice, Bologna, Italia.
- **CIVITA M. ET ALII.**, 2003. Studio delle risorse sorgive degli acquiferi carbonatici dell'Alta Val d'Agri. In "le risorse idriche sotterranee dell'Alta Val d'Agri. Editore L'Aquilone. La bottega della stampa.
- **COTECCHIA V. ET ALII.**, 1988. Studi idrogeologici sulla sorgente "La Peschiera di Pedale" di Marsico Vetere (Potenza – Italia Meridionale) nell'Alta Val d'Agri. Geologia Applicata e Idrogeologia, 23, 117-174.
- **CRESCENTI U.**, 1975. Sul substrato pre-pliocenico dell'avanfossa appenninica dalle Marche allo Ionio. Bollettino della Società Geologica Italiana, Vol.94; 583-634.
- **D'ANISI C. ET ALII.**, 1991. Studio idrogeologico degli acquiferi dei Monti Volturino e Serra di Calvelluzzo (Alta Val d'Agri – Basilicata). Presentato nella sessione poster della riunione annuale delle U.O. del GNDCl. Roma, 1991.
- **D'ARGENIO B. ET ALII.**, 1973. Schema geologico dell'Appennino Meridionale (Campania e Lucania). Atti dell'Accademia Nazionale dei Lincei, Vol.183; 49-72.
- **D'ARGENIO B. ET ALII.**, 1975. Structural pattern of the Campania-Lucania Apennines. Quaderni di Ricerca Scientifica, Vol.90; 313-327.
- **D'ARGENIO B. & ALVAREZ W.E.**, 1980. Stratigraphic evidence for crustal thickness changes on the Southern Tethyan margin

during the Alpine cycle. Geological Society of American Bulletin, Vol.91; 681-689.

- **D’ECCLESIIIS G. ET ALII.**, 1994. Condizioni di emergenza di alcune tra le principali sorgenti della Basilicata. *Geologica Romana*, 30, 105-112.
- **D’ECCLESIISS G. ET ALII.**, 1994. Carta della Vulnerabilità intrinseca degli acquiferi dei M. ti Volturino e Serra di Calvelluzzo (Alta Valle del F. Agri – Basilicata) Pubblicazione n. 1-141 del GNDCI, presentata nella riunione annuale delle U.O. del GNDC-CNR, Roma 12-15 dicembre 1994.
- **D’ECCLESIIIS G. ET ALII.**, 1995. Potenzialità e vulnerabilità delle risorse idriche dei monti Volturino e Calvelluzzo (Alta Valle dell’Agri, Basilicata). *Quaderni di Geologia Applicata. Atti del 2° Convegno nazionale sulla protezione e gestione delle acque sotterranee: metodologie, tecnologie ed obiettivi. Nonantola (Modena) 17-18-19 Maggio 1995.*
- **DI NIRO A. & GIANO S.I.**, 1995. Evoluzione geomorfologica del bordo orientale dell’Alta Val d’Agri (Basilicata). *Studi Geol. Camerti*, vol. spec. 1995/2, 207-218.
- **DI STASIO A. & GIARDINO S.**, 2002. New integrate biostratigraphic data about the Saraceno Formation (North-Calabrian Unit; Southern Apennines). *Bollettino della Società Geologica Italiana*, Vol. spec.1; 517-526.
- **DOERFLIGER N. ET ALII.**, 1999. Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). *Environmental Geology* 39 (2), 165-176, Springer-Verlag.
- **DOGLIONI C. ET ALII.**, 1996. A geodynamic model for the Southern Apennines accretionary prism. *Terra Nova*, Vol.8; 547-850.

- **FETTER C.W.**, 1994. Applied Hydrogeology. 3° Edition, Macmillan College Pub. Comp., New York, 691 pp.
- **FORD D.C. & WILLIAMS P.**, 2007. Karst hydrogeology and geomorphology. John Wiley & Sons, Chichester.
- **FOSTER S.S.D.**, 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy”. Proc. Int. Conf. vulnerability of soil and groundwater to pollutants, Noordwijk, The Netherlands, 69-86.
- **FOSTER S., HIRATA R.**, 1988. Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. WHO-PAHO-CEPIS, Lima.
- **FOSTER S. ET ALII.**, 2002. Groundwater Quality Protection: A Guide for Water Utilities, Municipal Authorities and Environment Agencies. World Bank Publication: Washington D.C, USA, pp. 103.
- **GATTINONI P.**, 2015. Studio idrogeologico dell’acquifero carsico dell’Altopiano dei Sette Comuni (Provincia di Vicenza). Tesi di Laurea, Politecnico di Milano.
- **GIANNANDREA P. ET ALII.**, 2016. Geological map of the eastern sector of the Gorgoglione Basin (southern Italy). Italian Journal of Geosciences (2016) 135 (1): 120-141. <https://doi.org/10.3301/IJG.2015.05>.
- **GIANO S.I. ET ALII.**, 1997. Nuovi dati geologici e geofisici sull’assetto strutturale dei depositi continentali quaternari dell’Alta Val d’Agri (Basilicata). Il Quaternario, 10, 591-596.
- **GIANO S.I. ET ALII.**, 2000. Radiocarbon dating of active faulting in the High Agri Valley, Southern Italy. Journal of Geodynamics, Vol.29; 371-386.
- **GIANO S.I.**, 2011. Quaternary alluvial fan system of the Agri intermontane basin (southern Italy): Tectonic and climatic

controls. *Geologica Carpathica*, February 2011, 62, 1, 65-75 doi: 10.2478/v10096-011-0006-y.

- **GIANO S.I.**, 2016. Geomorphology of the Agri intermontane basin (Val d'Agri-Lagonegrese National Park, Southern Italy). *Journal of maps*. 12:(4), 639-648, doi: 10.1080/17445647.2015.1068715.
- **GIORDANO N. ET ALII.**, 2011. The Norian – Rethian interval in two sections of the Lagonegro area: the transition from carbonate to siliceous deposition. *Italian Journal of Geosciences*, 130, 380-393.
- **GRIMALDI S., SUMMA G.**, 2005. Caratteri idrogeologici ed idrogeochimici del settore meridionale dei M. ti della Maddalena (Appennino Meridionale, Basilicata). [6659] – 2005 – *Giornale di Geologia Applicata*. 10.1474/GGA.2005-02.0-51.0077.
- **GUEGUEN E. ET ALII.**, 2015. The Verdesca landslide in the Agri Valley (Basilicata, Southern Italy): a new geological and geomorphological framework. *NHESS*. DOI: 10.5194/nhess-15-2585-2105.
- **HARRY E. LEGRAND.**, 1964. System for Evaluation of Contamination Potential of Some Waste Disposal Sites. *Journal AWWA / Volume 56, Issue 8 / pp. 959-974*.
- **HARRY E. LEGRAND.**, 1983. A standardized system for evaluating waste disposal sites. Worthington, Ohio: National Ground Water Association.
- **HIPPOLYTE J.C. ET ALII.**, 1995. Compressional and extensional tectonics in an arc system: example of the Southern Apennines. *Journal of Structural Geology*, Vol.17; 1725-1740.
- **IANANNCE A. ET ALII.**, 2005. Structural setting and tectonic evolution of the Apennine Units of the Northern Calabria. *Comptes Rendus Geosciences*, 337(16): 1541-1550.

- **INVERNIZZI C. ET ALII.**, 2008. New thermobaric constrains on the exhumation history of the Liguride accretionary wedge, Southern Italy. *Ofioliti*, Vol.33; 21-32.
- **ISPRA**, 2014. Carta Geologica d'Italia alla Scala 1:50.000, Foglio 505 "Moliterno".
- **KASTENSK A. ET ALII.**, 1988. ODP Leg.107 in the Tyrrhenian Sea: Insights into passive margin and back arc basin evolution. *Geological Society of American Bulletin*, Vol.100; 1140-1156.
- **KNOTT S.**, 1994. Structure, kinematics and metamorphism in the Liguride Complex, Southern Apennines, Italy. *Journal of Structural Geology*, Vol-16; 1107-1120.
- **LEGRAND H.E.**, 1964. System for evaluating the contamination potential of some waste sites. *Amer. Wat. Works Assoc. Journ.*, 56, 8, 1964, pp. 959-974.
- **LEGRAND H.E.**, 1983. A standardized system for evaluating waste-disposal sites, National Water Well Association Worthington, Ohio.
- **LENTINI F.**, 1979. Le unità Sicilidi della Val d'Agri. *Geologica Romana*, 18, 215-224.
- **LENTINI F. ET ALII.**, 1990. Tettonica a thrust neogenica nella catena appennino-maghrebide: esempi dalla Lucania e dalla Sicilia. *Studi Geologici Camerti*, Vol. suppl.1990; 19-26.
- **LENTINI F. ET ALII.**, 1991. Carta Geologica del Bacino del Fiume Agri, Regione Basilicata, Università di Catania, scale 1/50.000, Selca, Firenze.
- **LERNER D.N. ET ALII.**, 1990. *Groundwater Recharge A Guide to Understanding and Estimating Natural Recharge*. Heise, Hannover, Vol. 8, 1-345.

- **MALINVERNO A. & RYAN W.B.F.**, 1986. Extension in the Tyrrhenian Sea and shortening in the Apennines as result of arc migration driven by sinking of the lithosphere. *Tectonics*, Vol.5; 227-245.
- **MANGIN A.**, 1973. Sur la dynamique des transferts en aquifères karstique : Procs 6 International Congress of Speleology (Olomouc, Czechoslovakia), v. 3, 157-162.
- **MANGIN A.**, 1975. Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. 3 Constitution et fonctionnement des aquifères karstiques : *Annales de Spéléologie*, v. 30, n. 1, 21-124 (also available as These de l'Université de Dijon).
- **MARCHEGIANI L. ET ALII.**, 2006. Scaling properties of the dimensional and spatial characteristics of fault and fracture system in the Maiella Mountain, Central Italy. In: **CELLO G. & MALAMUD B.** (eds.). *Fractal analysis for the natural hazards*. Geological Society, London, Special Publications, Vol.261; 113-131.
- **MARCOLONGO B., PRETTO L.**, 1987. Vulnerabilità degli acquiferi nella pianura a nord di Vicenza. Padova; Vicenza: Consiglio nazionale delle ricerche.
- **MARGAT J.**, 1968. Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution. – BRGM Publication 68 SGL 198 HYD. Orléans, Francia.
- **MARSELLA E., PAPPONE G.**, 1987. Sediment gravity flows on a Mesozoic carbonate slope. Monti della Maddalena (Southern Apennines). *Rend. Soc. Geol. It.*, 9, 219-224.
- **MARSELLA E. ET ALII.**, 1992. L'origine interna dei terreni lagonegresi e l'assetto tettonico dell'Appennino Meridionale. *Rendiconti dell'Accademia delle Scienze Fisiche e Naturali*, Vol.58; 73-101.
- **MARSELLA E. ET ALII.**, 1993. Monte Facito Formation (Schitian-middle Carnian). A deposit of the ancestral Lagonegro Basin in

the Southern Apennines. *Bollettino del Servizio Geologico d'Italia*, 110, 225-48.

- **MASIELLO F.**, 2020. Carsismo, una descrizione del fenomeno. Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale.
- **MAZZOLI S. ET ALII.**, 2001. Reconstruction of continental margin architecture deformed by the contraction of the Lagonegro Basin, Southern Apennines, Italy. *Journal of the Geological Society*, Vol.158; 309-319.
- **MAZZOLI S. ET ALII.**, 2008. Tectonic burial and “young” (<10 Ma) exhumation in the southern Apennines fold-and-thrust belt (Italy). *Geology*, 36, 243-246.
- **MENARDI-NOGUERA A., REA G.**, 2000. Deep structure of the Campanian-Lucanian Arc (Southern Apennine, Italy). *Tectonophysics*, 324, 239-265, doi:10.1016/S0040-1951(00)00137-2.
- **MICONNET P.**, 1988. Evolution mésozoïque du secteur de Lagonegro. *Memorie della Società Geologica Italiana*, 41, 321-30.
- **MONACO C. ET ALII.**, 1998. Structural evolution of the Lucanian Apennines, Southern Italy. *Journal of Structural Geology*, Vol.20; 617-638.
- **MONACO C., & TORTORICI L.**, 1995. Tectonic role of ophiolite-bearing terranes in the development of the Southern Apennines orogenic belt. *Terra Nova*, Vol.7; 253-160.
- **MOSTARDINI F. & MERLINI S.**, 1986. Appennino centro-meridionale. Sezioni geologiche e proposta di modello strutturale. *Memorie della Società Geologica Italiana*. Vol.35; 177-202.
- **NOVELLINO R.**, 2010. From Low-Angle Normal Faults (LANF) to High-Angle Normal Faults (HANF), the post-orogenic history of the Southern Apennines in High Agri Valley, Basilicata (Italy).

Journal of the Geological Society, v.171; p.571-581. DOI: 10.1144/jgs2013-103.

- **OGNIBEN L.**, 1969b. Schema introduttivo alla geologia del confine calabro-lucano. Mem. Soc. Geol. Ital., 8, 453-763.
- **OLDOW J.S. ET ALII.**, 1993. Large-scale longitudinal extension in the Southern Apennines contractional belt, Italy. *Geology*, Vol.21; 1123-1126.
- **PALLADINO G. ET ALII.**, 2008. Tectonic control on the deposition of the Lower Miocene sediments of the Monti della Maddalena ridge (Southern Apennines): synsedimentary extensional deformation in a foreland setting. *Boll. Soc. Geol. It.* 127, 2, 317-335.
- **PALLADINO G.**, 2015. Determining the way-up of the Monte Facito Formation using new sedimentological data from the “La Cerchiara” succession, Southern Apennines. *Italian Journal of Geosciences*, 124, 120-33.
- **PALLADINO G. ET ALII.**, 2019. Mass transport deposits overprinted by contractional tectonics: a case study from the southern Apennines of Italy. *Geological Magazine*, 156, 849-873.
- **PALLADINO G. ET ALII.**, 2022. Geological map of the north-eastern sector of the Agri Valley (Basilicata, Italy). In fase di pubblicazione.
- **PANZANELLI FRATONI R.**, 1991. Analisi stratigrafica della “Formazione del M. Facito” Auctt. (serie Lagonegro-Appennino Meridionale). Proposta di istituzione del Gruppo di Monte Facito. Unpublished thesis, Università degli Studi di Perugia, Perugia, Italy.
- **PALIMIERI E.L., PARROTTO M.**, 2005. Capire la terra. Zanichelli.

- **PALMIERI E.L., PAROTTO M.**, 2010. Osservare e capire la terra. Immagini ed itinerari del sistema terra.
- **PALMQUIST R.B. & WU Z.**, 1991. Synthesis and biohydrogenation of fatty acids by ruminal microorganism in vitro. *J. Dairy Sci. Sep*; 74(9):3035-46.
- **PATACCA E. & SCANDONE P.**, 1989. Post-Tortonian mountain building in the Apennines. The role of the passive sinking of a relict lithospheric slab. In: **BORIANIA., BONAFEDE M., PICCARDO G.B & VAI** (Eds.). *The lithosphere in Italy. Advances in Earth Science Research. Atti dell'Accademia Nazionale dei Lincei, Vol.80*; 157-176.
- **PATACCA E. ET ALII.**, 1992. Numidian sand event in the Southern Apennines. *Mem. Soc. Geol. Padova*, 43, 297-337.
- **PATACCA E. & SCANDONE P.**, 2007. Geology of Southern Apennines. CROP-04 (ed. by **MAZZOTTI A., PATACCA E. & SCANDONE P.**). *Bollettino della Società Geologica Italiana, Spec. Issue, Vol.7*; 75-119.
- **PESCATORE T.**, 1988. La sedimentazione miocenica nell'Appennino Campano-Lucano. *Memorie della Società Geologica Italiana, Vol.41*; 37-46.
- **PESCATORE T. ET ALII.**, 1999. Stratigraphic and Structural relationship between Meso-Cenozoic Lagonegro basin and coeval carbonate platforms in southern Apennines, Italy. *Tectonophysics*, 315, 269-286.
- **PROSSER G. ET ALII.**, 2021. Stratigraphic and Tectonic Setting of the Liguride Units Cropping Out along the Southeastern Side of the Agri Valley (Southern Apennines, Italy). *Geosciences*, 11, 125. <https://doi.org/10.3390/geosciences11030125>.
- **RICCHETTI G. ET ALII.**, 1988. Geodinamica ed evoluzione sedimentaria e tettonica dell'avampaese Apulo. *Memorie della Società Geologica Italiana, Vol.41*; 57-82.

- **RIGO M. ET ALII.**, 2007. A rise in the Carbonate Compensation of western Tethys in the Carnian (Late Triassic): deepwater evidence for the Carnian pluvial event. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 246, 188-205.
- **ROURE F. ET ALII.**, 1991. Growth processes and mélange formation in the southern Apennines accretionary wedge. *Earth and Planetary Science letters*, 102, 395-412.
- **ROYDEN L. ET ALII.**, 1987. Segmentation and configuration on subducted lithosphere in Italy: an important control on thrust-belt and foredeep-basin evolution. *Geology*, Vol.15; 714-717.
- **RUIZ L.B., VELAZQUEZ D.P.**, 2020. A novel approach to harmonize vulnerability assessment in carbonate and detrital aquifers at basin scale. Spanish Geological Survey (IGME), Urb. Alcàzar del Genil, 4.
- **SAUTY J.P., THIERY D.**, 1975. Utilisation d'abaques pour la détermination de périmètres de protection. Note technique au géologue agréé en matière d'eau et d'Hygiène publique, 6, BRGM, 75 SGN 430 AME.
- **SCANDONE P.**, 1967. Studi di geologia lucana: la serie calcareo-silico-marnosa e suoi rapporti con l'Appennino calcareo. *Bollettino della Società dei Naturalisti in Napoli*, Vol.76; 1-175.
- **SCANDONE P.**, 1971. Note illustrative della Carta Geologica d'Italia 1:100.000 Fogli 199-210, Potenza e Lauria.
- **SCANDONE P.**, 1972. Studi di Geologia Lucana: carta dei terreni della serie calcareo-silico-marnosa e note illustrative. *Bollettino della Società dei Naturalisti in Napoli*, Vol.81; 225-300.
- **SCANDONE P. & BONARDI G.**, 1968. Synsedimentary tectonics controlling deposition of mesozoic and Tertiary carbonatic sequences of areas surrounding "Vallo di Diano" (Southern

- Apennines). Memorie della Società Geologica Italiana, Vol.7; 1-10.
- **SCANDONE P.**, 1975. The preorogenic history of the Lagonegro Basin (Southern Apennines). In: **SQUYRES C.** (ed) “Geology of Italy”. The Earth Sciences Society of the Lybian Arab Republic, 305-315.
 - **SCHIATTARELLA M. ET ALII.**, 1998. Evoluzione Tettonica Quaternaria dell’Alta Val d’Agri (Appennino Meridionale). Atti 79° Congr. Soc. Geol. It., Palermo, 21-23 Settembre.
 - **SCHOELLER H.**, 1974. Sur les conditions de circulation dans les calcaires : capacité d’ingestion, capacité d’infiltration. Mem. Cong. Int. IAH Montpellier, 10 (1), 251-252.
 - **SECCI R., URAS G.**, 2011. Comparazione fra metodiche per la valutazione della vulnerabilità all’inquinamento degli acquiferi. Applicazione all’acquifero del Sulcis Iglesiente (Sardegna meridionale). Atti 15° Conferenza Nazionale ASITA – Reggio di Colorno 15-18 Novembre 2011.
 - **SELLI R.**, 1962. Il paleogene nel quadro della geologia dell’Italia meridionale. Mem. Soc. Geol. It., 3, 737-789.
 - **SERVIZIO IDROGRAFICO ITALIANO.**, 1941. Le sorgenti Italiane. Calabria e Lucania (14, 5 e 6). Ministero dei LL.PP. (1937 e 1941), Sezione Idrografica di Catanzaro. Roma.
 - **SGROSSO I.**, 1986. Criteri ed elementi per una ricostruzione paleogeografica delle zone esterne dell’Appennino centro-meridionale. Memorie della Società Geologica Italiana, Vol.35; 203-219.
 - **SGROSSO I.**, 1998. Possibile evoluzione cinematica miocenica nell’orogene Centro-Sud Appenninico. Bollettino della Società Geologica Italiana, Vol.117; 679-724.
 - **SHINER P. ET ALII.**, 2004. Thin-skinned versus thick-skinned structural models for the Apulian carbonate reservoirs:

constraints from the Val d'Agri Fields, S. Apennines, Italy. *Marine and Petroleum Geology*, 21, 805-827.

- **TAVERNELLI E. ET ALII.**, 2003. La storia deformativa dell'Appennino Meridionale ricostruita in un affioramento metrico nei dintorni di San Fele (Potenza). *Bollettino della Società Geologica Italiana*, Vol.122; 327-335.
- **TURC L.**, 1954. Le bilan d'eau sols: relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. *La Houille blanche*, 3 journées de l'hydraulique de la Société Hydrotechnique de France, Paris, 36-44.
- **USEPA.**, 1983. Water Quality Criteria for the Protection of Aquatic Life and Its Uses: Ammonia (Final Draft). Office of Research and Development, Duluth, Minnesota.
- **USEPA.**, 1987. Guidelines for Delineation of Wellhead Protection Areas. US EPA/440/6-87/010 Report, 212 p.
- **USEPA.**, 1991. WHPA 2.0: A modular semi-analytical model for the delineation of wellhead protection areas. Prepared by Blendford T.N., Huyakorn P.S. Office of Ground Water Protection, Washington DC.
- **USEPA.**, 1993. Addendum to the WHPA Code version 2.0 user's guide: implementation of Hydraulic head computation and display into the WHPA code. Prepared by Blandford T.N. & Yushu Wu. Office of Ground Water Protection, Washington DC.
- **USEPA.**, 1994. Handbook of groundwater and wellhead protection, Washington DC.
- **VAN DIJK J.P. ET ALII.**, 2000. Tectonic model and three-dimensional fracture network analysis of Monte Alpi (Southern Apennines). *Tectonophysics*, Vol.324; 203-237.
- **VILLUMSEN A. ET ALII.**, 1984. Mapping the vulnerability of ground water reservoirs with regard to surface pollution. *Danm. Geol. Unders. Arbog 1982*, pp. 17-38, 2 Tavole.

- **VRANA K. ET ALII.**, 1981. Erosion and Water Quality as Modeled by Creams: A Case Study of the Sedlicky Catchment. IIASA Collaborative Paper. IIASA, Laxenburg, Austria: CP-81-035.
- **WOOD A.W.**, 1981. Extensional tectonics and the birth of the Lagonegro Basin (Southern Italian Apennines). *Neues Jahrbuch für Geologie und Palaeontologie Abhandlungen*, 161, 93-131.
- **ZEMBO I.**, 2010. Stratigraphic architecture and Quaternary evolution of the Val d'Agri intermontane basin (Southern Apennines, Italy). *Sedimentary Geology*, 223, 06-234, doi: 10.1016/j.sedgeo.2009.11.011.

RINGRAZIAMENTI

Anziché per ultimo, questa volta voglio ringraziare in primis me stesso. Tutto ciò che ho ottenuto, tutti gli obiettivi che sono stato in grado di raggiungere, è stato grazie alla mia forza di andare avanti. Non sempre è stato facile, anzi quasi mai, ma nonostante le difficoltà e le lacrime sono riuscito ad andare avanti, e queste difficoltà mi hanno ancor di più temprato e reso in grado di affrontare sempre più sfide. Senza il mio impegno e senza la mia dedizione non avrei ottenuto nulla. E questi ultimi tempi, sono stati pieni di grandi cambiamenti e di crescita. Spesso me ne dimentico, ma ho la forza di affrontare tutte le difficoltà che mi si porranno davanti perché non ho nulla in meno rispetto a tante altre persone. Dal perdere molto peso all'essere riuscito a laurearmi nonostante molte persone mi avessero detto che non ci sarei mai riuscito. Valgo molto di più di ciò che pensate e molto di più di ciò che io stesso penso di me. Credere sempre in sé stessi e provarci sempre, magari si fallirà ma anche dal fallimento puoi imparare tanto.

Voglio dire un grandissimo grazie al mio relatore Salvatore Grimaldi, al mio correlatore Giacomo Prosser ed al mio tutor Gabriele Nolè per avermi aiutato nello svolgimento del mio lavoro di Tesi, per avermi insegnato il modo corretto di lavorare, per essere stati sempre presenti quando avevo bisogno di aiuto e per avermi spronato nell'andare avanti.

Vorrei ringraziare Antonio Napoliello, il quale mi ha dato una grande mano nel risolvere tutti i problemi che ho avuto nelle analisi che ho dovuto effettuare.

Voglio ringraziare tutti i docenti che ho incontrato nel mio percorso universitario, chi in un modo e chi in un altro mi hanno insegnato tante cose e mi hanno anche dato consigli di vita. Siete stata una grande famiglia per me, grazie mille ancora.

Vorrei ringraziare la mia famiglia che mi ha sopportato durante i miei cambi d'umore e nei miei comportamenti non sempre logici. Se non ci fosse stata la sicurezza della loro presenza sarebbe stato tutto molto più difficile. Vi voglio un bene infinito.

Carmela, la Leonessa, di nome e di fatto. Vorrei ringraziarti per aver reso questi 2 anni insieme i migliori che io abbia mai vissuto. Mi hai insegnato tanto, sei stata una certezza in ogni singolo giorno. Mi hai aiutato e tirato su anche nei momenti più tristi ed in cui tutto mi sembrava perso, mi hai insegnato a vedere tante cose da un'altra prospettiva, mi hai dato consigli per migliorarmi, mi hai insegnato ad avere il coraggio di affrontare le cose. L'insegnamento che più mi è rimasto impresso e forse uno tra i più importanti, sarà sicuramente che il mondo non è solo in bianco e nero ma che devo imparare a colorare la mia vita. Con le tue penne imparerò a farlo. Grazie infinite dal più profondo del mio cuore, ti voglio un mondo di bene ed avrai sempre un posto dentro di me.

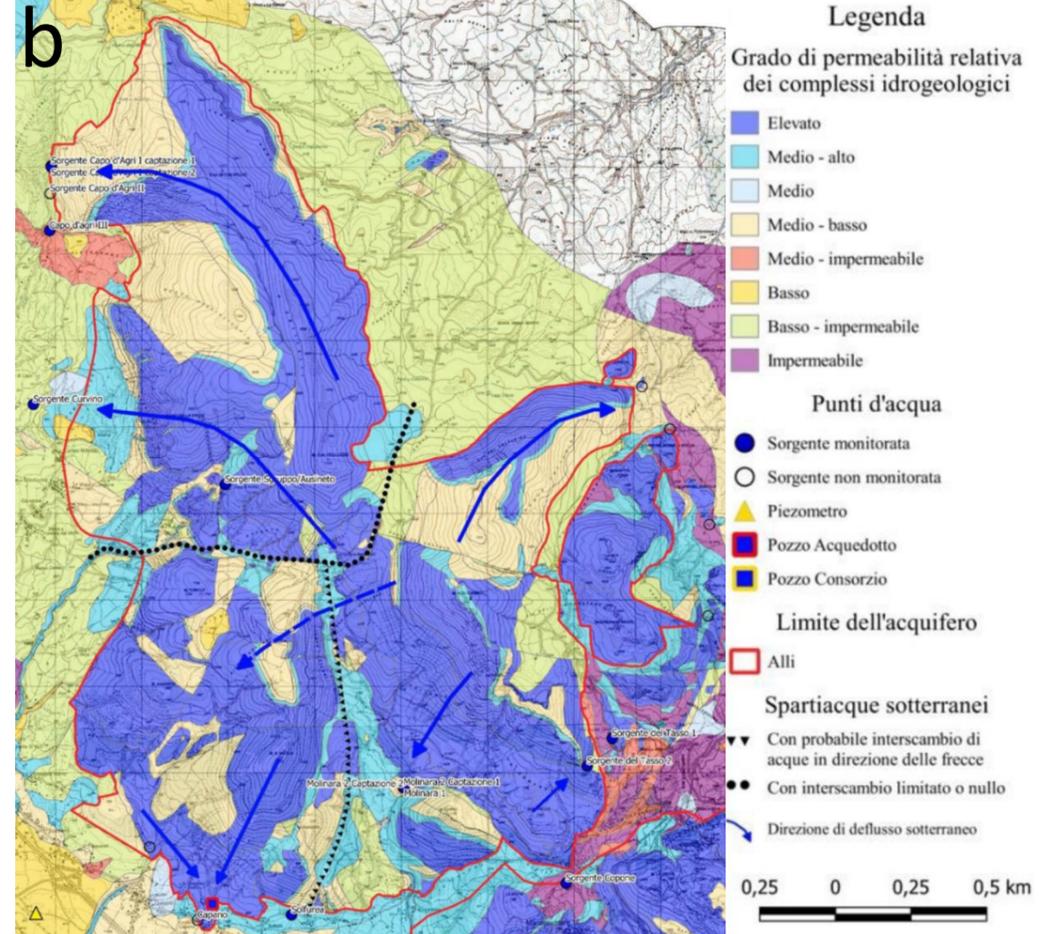
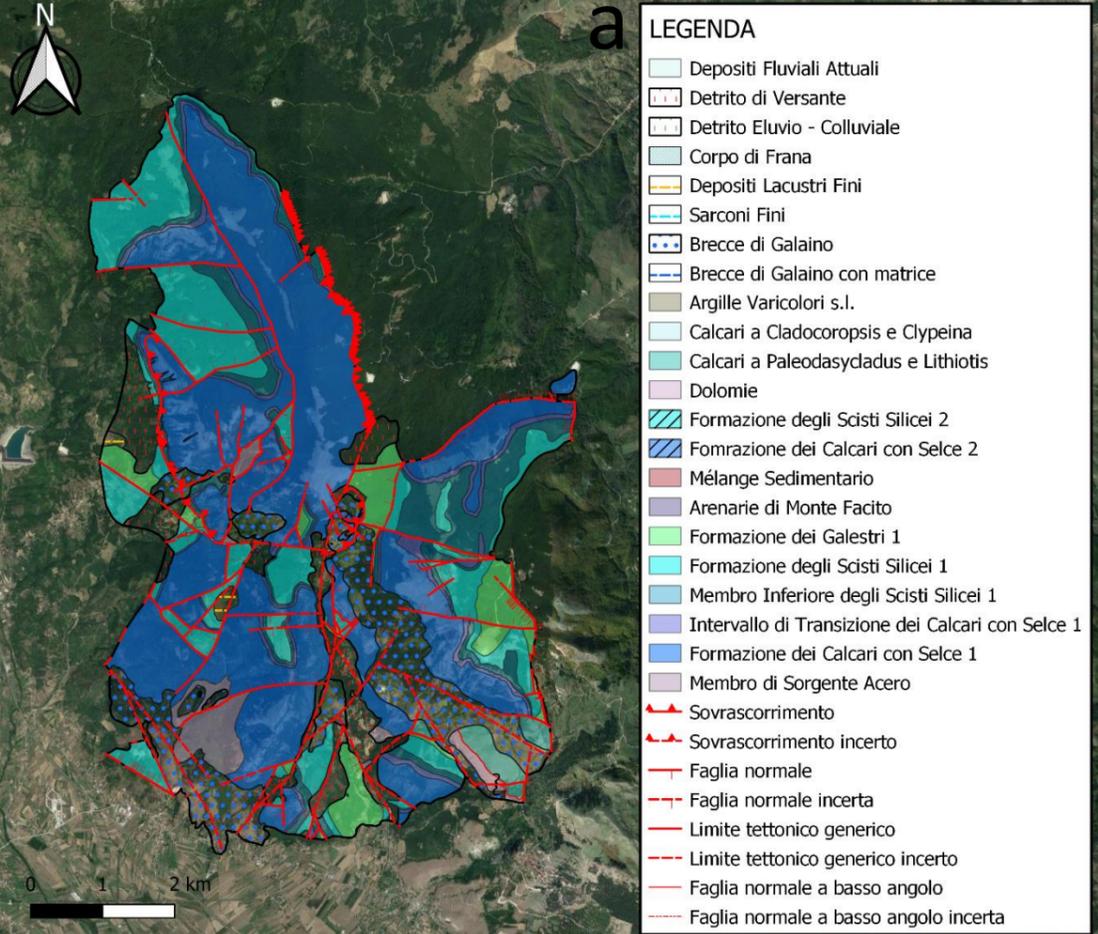
Carmela, o per meglio dire Izzy. Non so quanto io possa essere grato alla vita per avermi dato la possibilità di incontrarti e di starti vicino. Sei arrivata in un momento complicato della mia vita, ma già dalla nostra prima chiacchierata ho capito quanto bene e serenità mi avresti portato. Non mi sono sbagliato. Sei stata una benedizione nella mia vita, quando sono con te tutto diventa più leggero e semplice, riesci a trasmettere sicurezza soltanto con la tua presenza. Prima del tuo arrivo, in molte giornate avrei soltanto voluto avere il tasto "manda avanti" per andare direttamente al giorno successivo; ma da quando abbiamo iniziato a conoscerci, nonostante fossero giornate infernali, averi voluto che i secondi si fermassero per poter stare più tempo insieme a te che rendi tutto speciale. Ricorderò sempre con un sorriso i momenti passati con te, la tua risata, il tuo sorriso, i tuoi occhi, i tuoi capelli, i tuoi tic; tutti quei momenti in cui siamo stati ore seduti a parlare senza accorgerci di cosa succedeva intorno, in quei momenti c'eravamo solo noi due. Ogni singola cellula di te è speciale. Spero che la vita ti possa riservare tutto ciò che meriti, perché meriti tanto dalla vita. Non serve nemmeno che ti dica cosa sento per te e quanto ti sia affezionato. Sai già tutto ciò che dovresti sapere. Grazie per esserci e per avermi permesso di far parte della tua vita.

Vorrei ringraziare il mio nutrizionista Domenico Giordano, grazie al quale ho affrontato un cambiamento che mi ha portato più benefici di quanti ne potessi immaginare. Il grande cambiamento fisico, mi ha portato ad un profondo cambiamento mentale e comportamentale. Tutto ciò mi ha permesso di avere molta più fiducia in me stesso e nelle mie capacità, permettendomi di affrontare meglio tutte le difficoltà. Un grazie immenso per avermi aiutato in questo percorso, senza negarlo probabilmente mi avete svoltato la vita.

Un grande grazie va anche a te, Valentina. Sei stata l'unica persona che dall'inizio del mio percorso universitario c'è stata fino alla fine, nonostante le litigate che ci siamo fatti e gli scontri che abbiamo avuto siamo sempre tornati l'un dall'altro. Grazie per esserci stata nei momenti in cui più ne avevo bisogno, per avermi ascoltato, per avermi dato consigli e quando serviva anche per avermi fatto delle belle ramanzine. Sei stata una parte fondamentale della mia vita e son sicuro che lo rimarrai anche in futuro. Un grazie immenso per tutto, ti voglio bene.

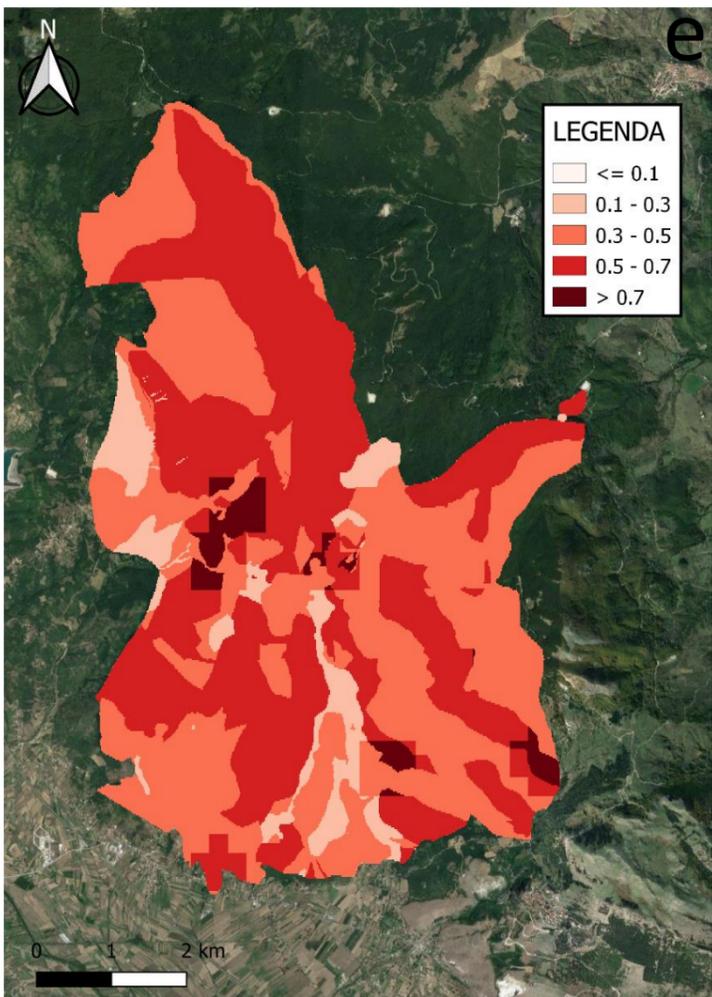
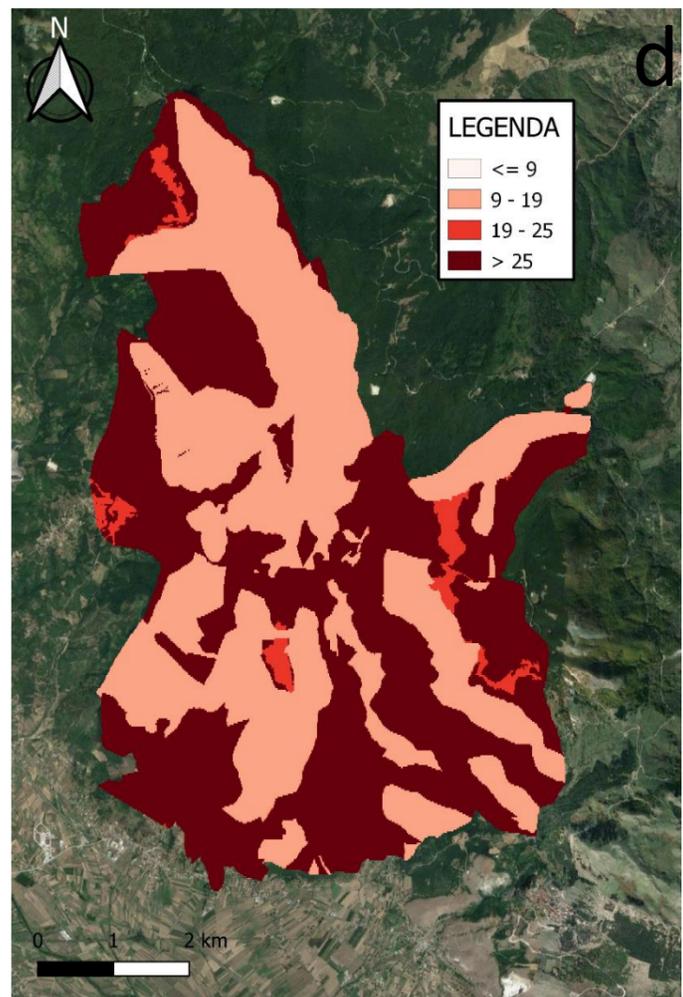
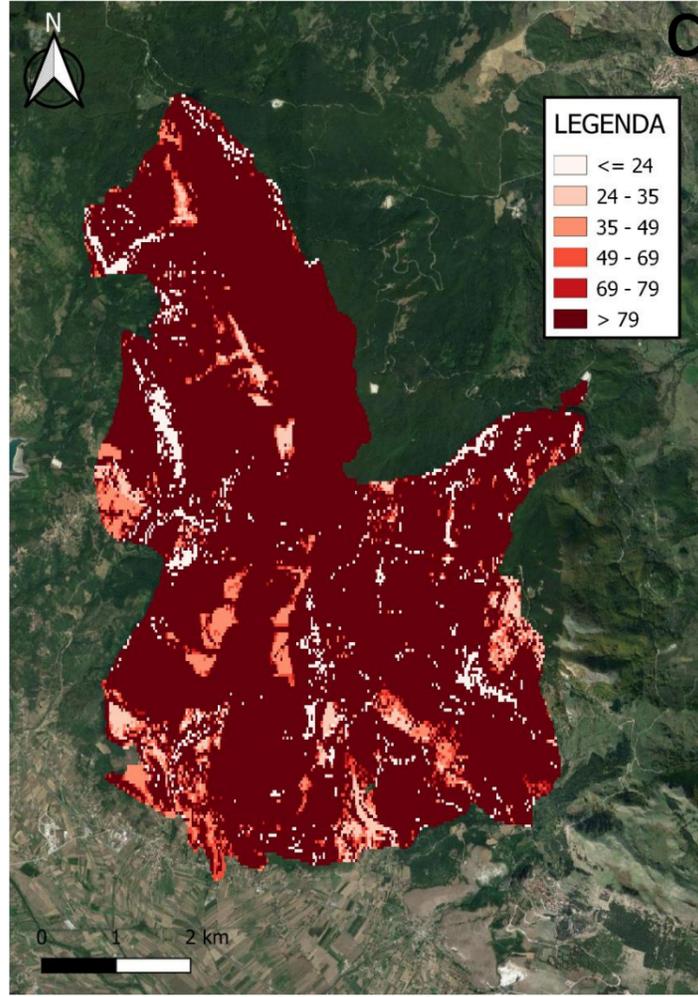
Rosalba, la mia tigrotta. Nonostante per più di un anno non ci siamo parlati, siamo riusciti a tornare insieme ed ancora più stretti di prima. Purtroppo non ti rendi conto di quanto tu sia speciale ed incredibilmente capace, molti cambiamenti che ho affrontato sono riusciti a farli grazie a te. Ammiro tantissime cose, ma la cosa più importante forse è quella che sei sempre te stessa, fregandotene di ciò che pensano gli altri. Sei un punto fermo nella mia vita, un punto che so che c'è sempre stato quando ne avevo bisogno ed anche se non ci sentivamo per giorni, il solo sapere che ci fossi mi dava sicurezza. Sei nella mia vita da quasi 6 anni e spero che ci sarai ancora per tanto tempo nella mia vita e sono sicuro che sarà così.

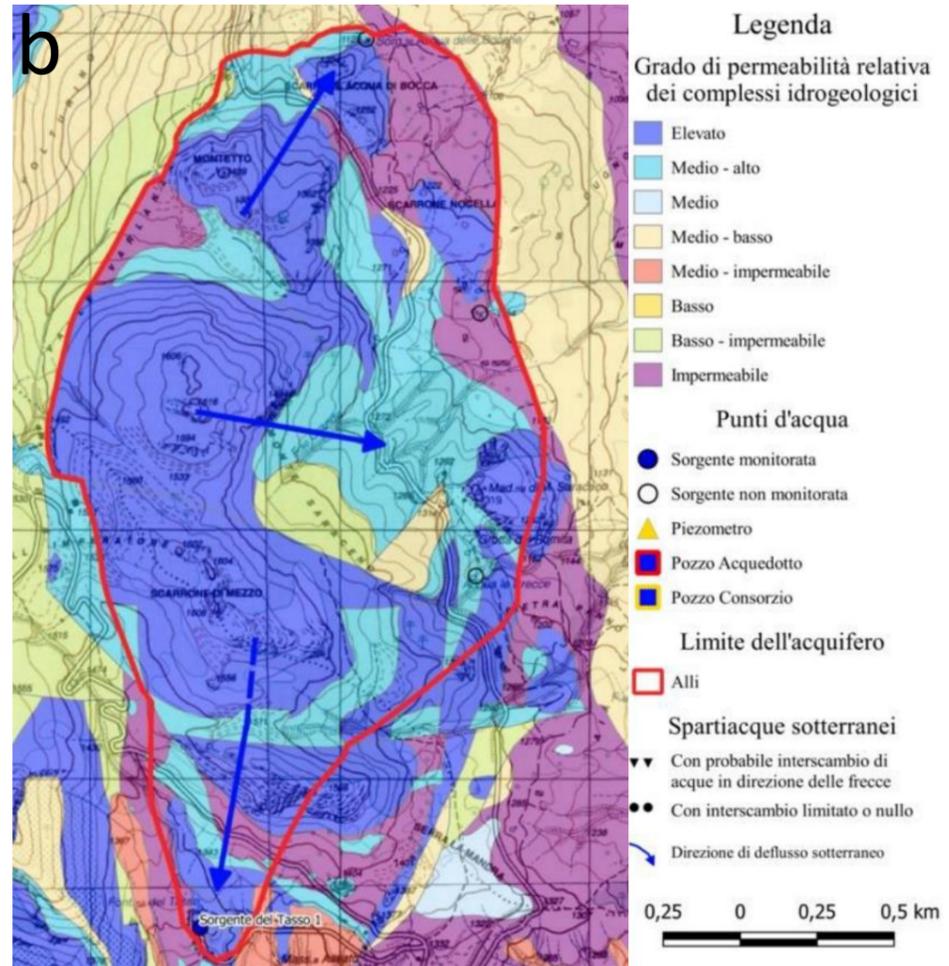
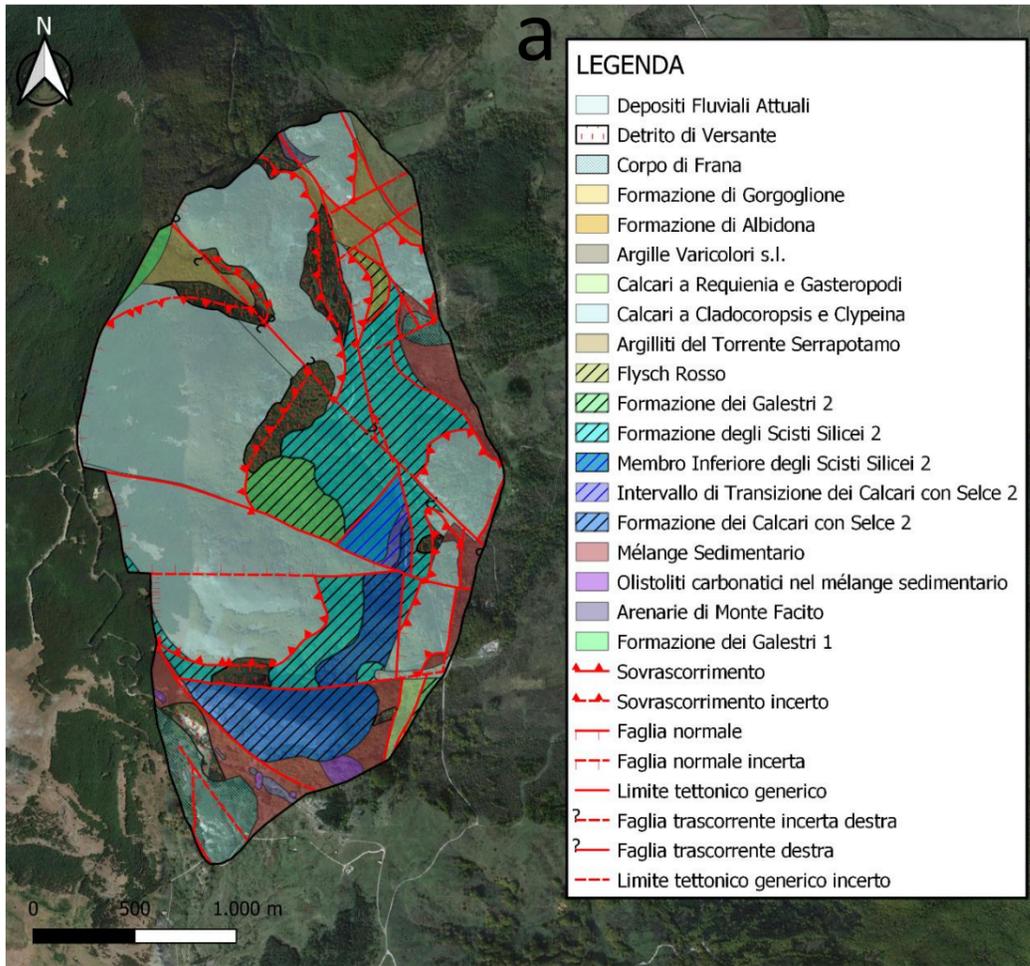
Infine vorrei ringraziare le tante persone che ho incontrato in Università in questi bellissimi anni. Con molti ho stretto dei bellissimi rapporti di amicizia nonostante la distanza. Grazie per aver reso le giornate in Università più leggere.



Allegato 1. Sintesi dei risultati ottenuti per il sistema acquifero Monte Volturino-Calvelluzzo-S. Nicola.

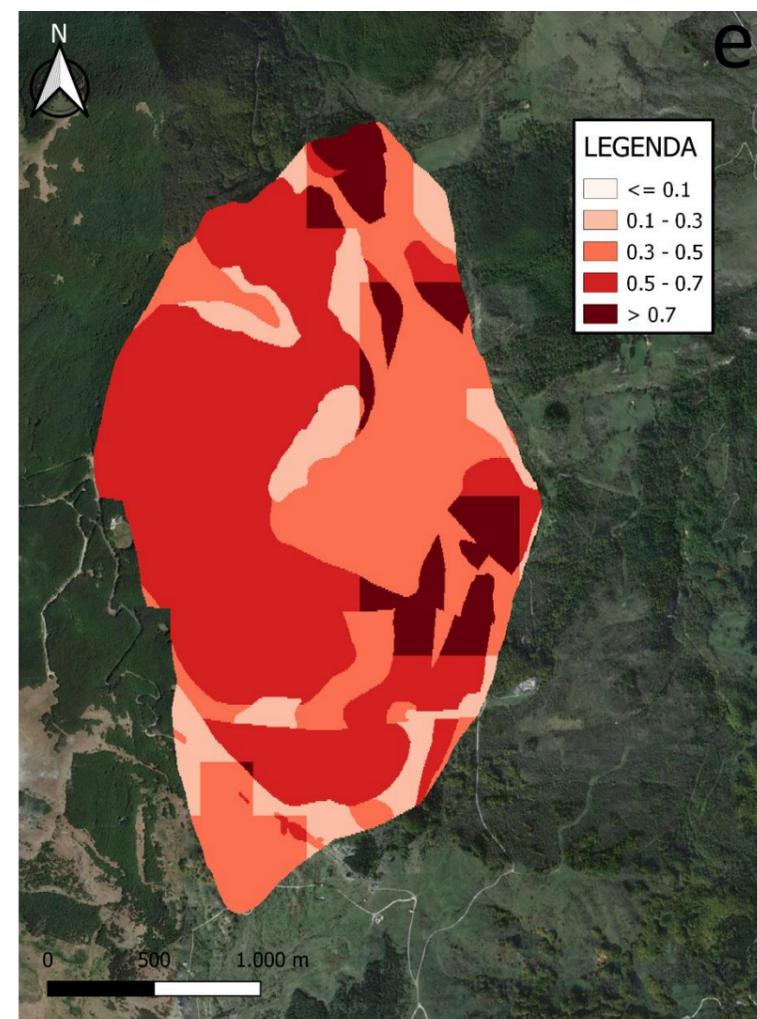
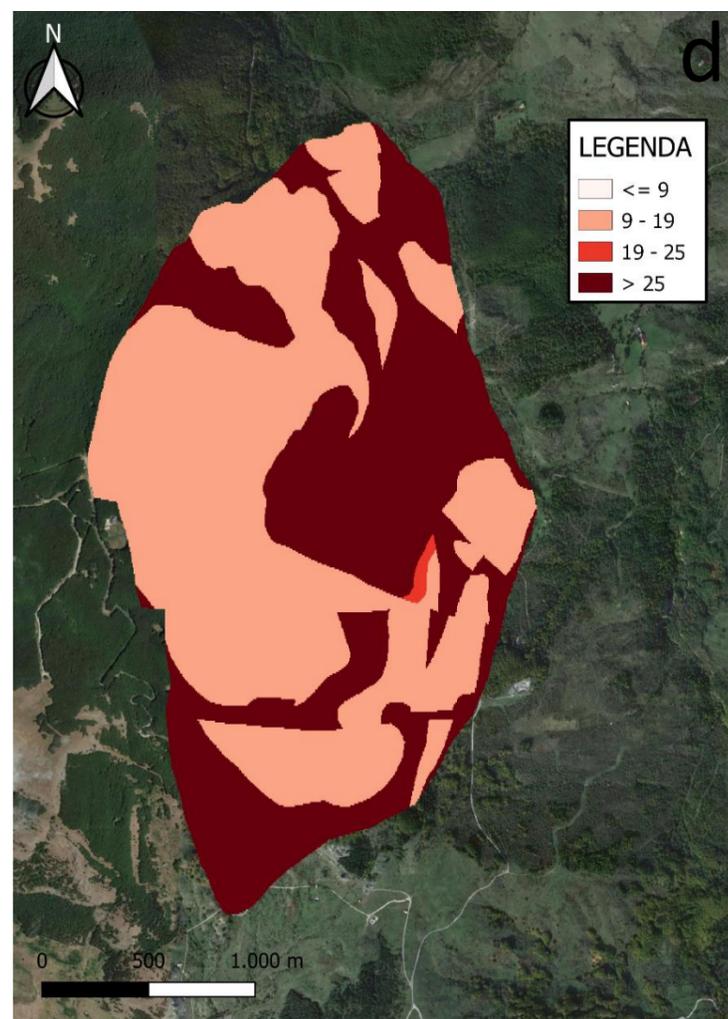
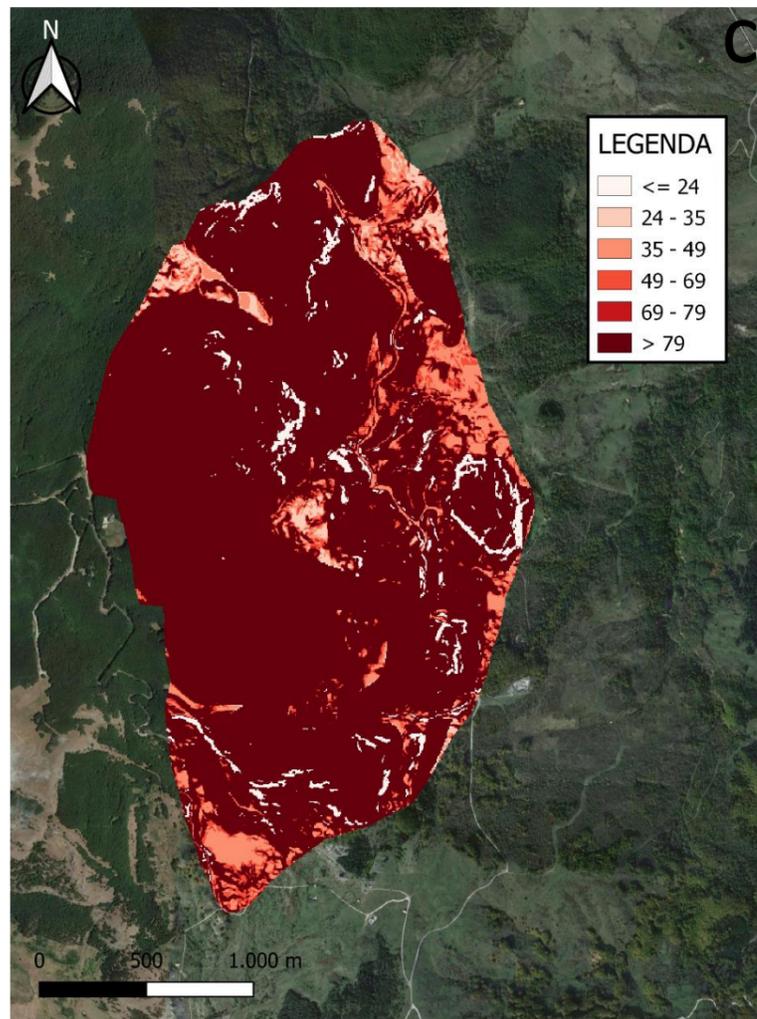
- a) Carta Geologica (Palladino G. et al., in preparazione).
- b) Carta Idrogeologica (Grimaldi S. et al., in preparazione).
- c) Carta della Vulnerabilità Intrinseca ottenuta con il metodo SINTACS.
- d) Carta della Vulnerabilità Intrinseca ottenuta con il metodo EPIK.
- e) Carta della Vulnerabilità Intrinseca ottenuta con il metodo GOD.





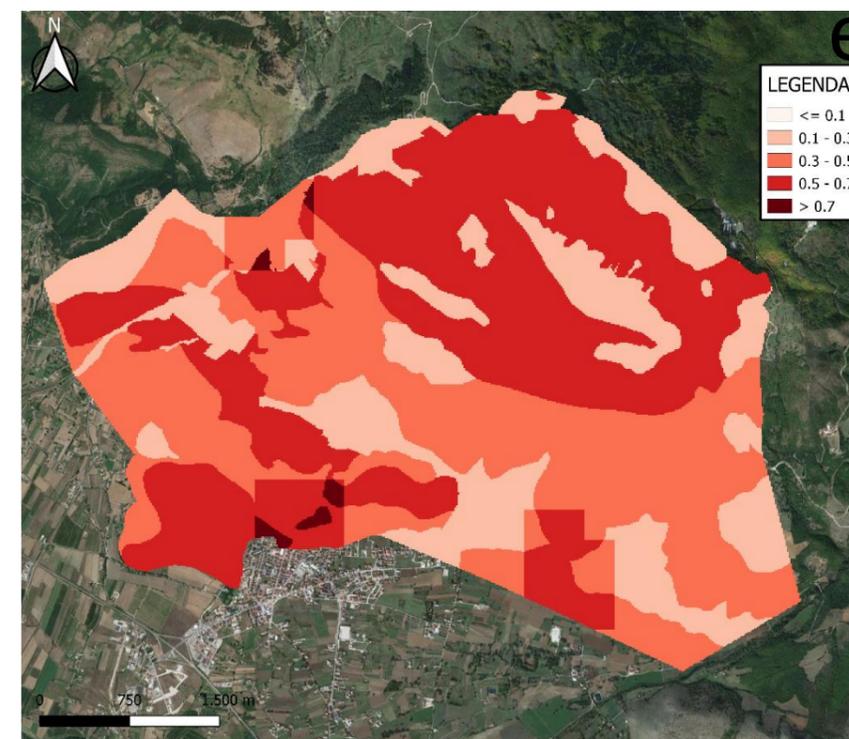
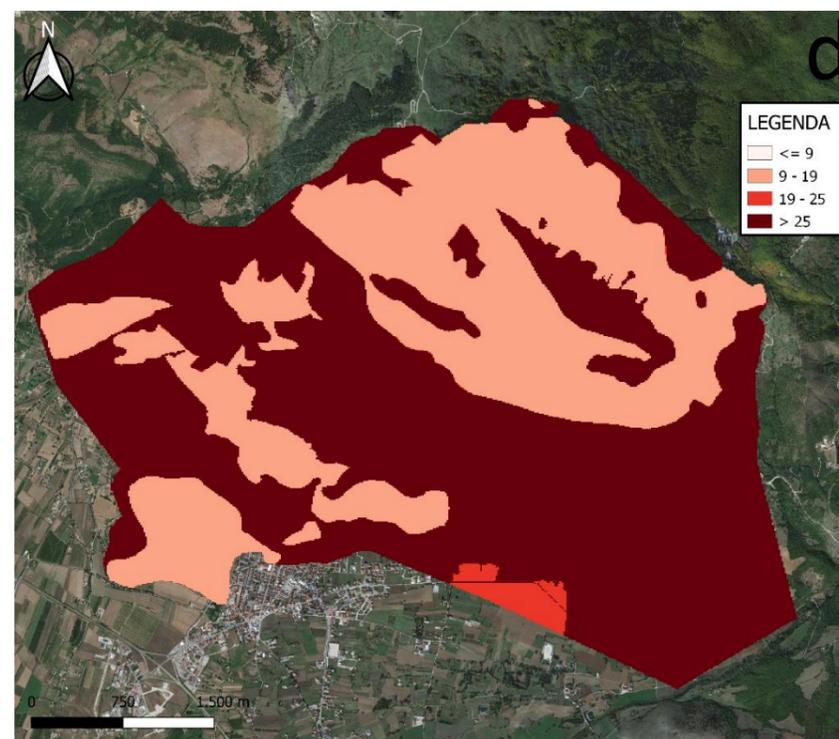
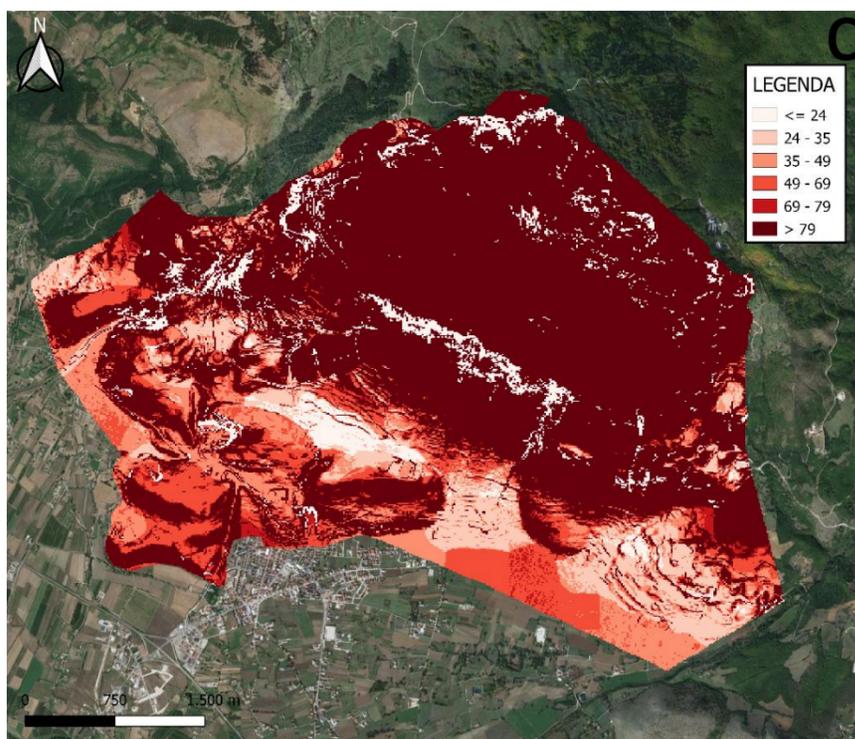
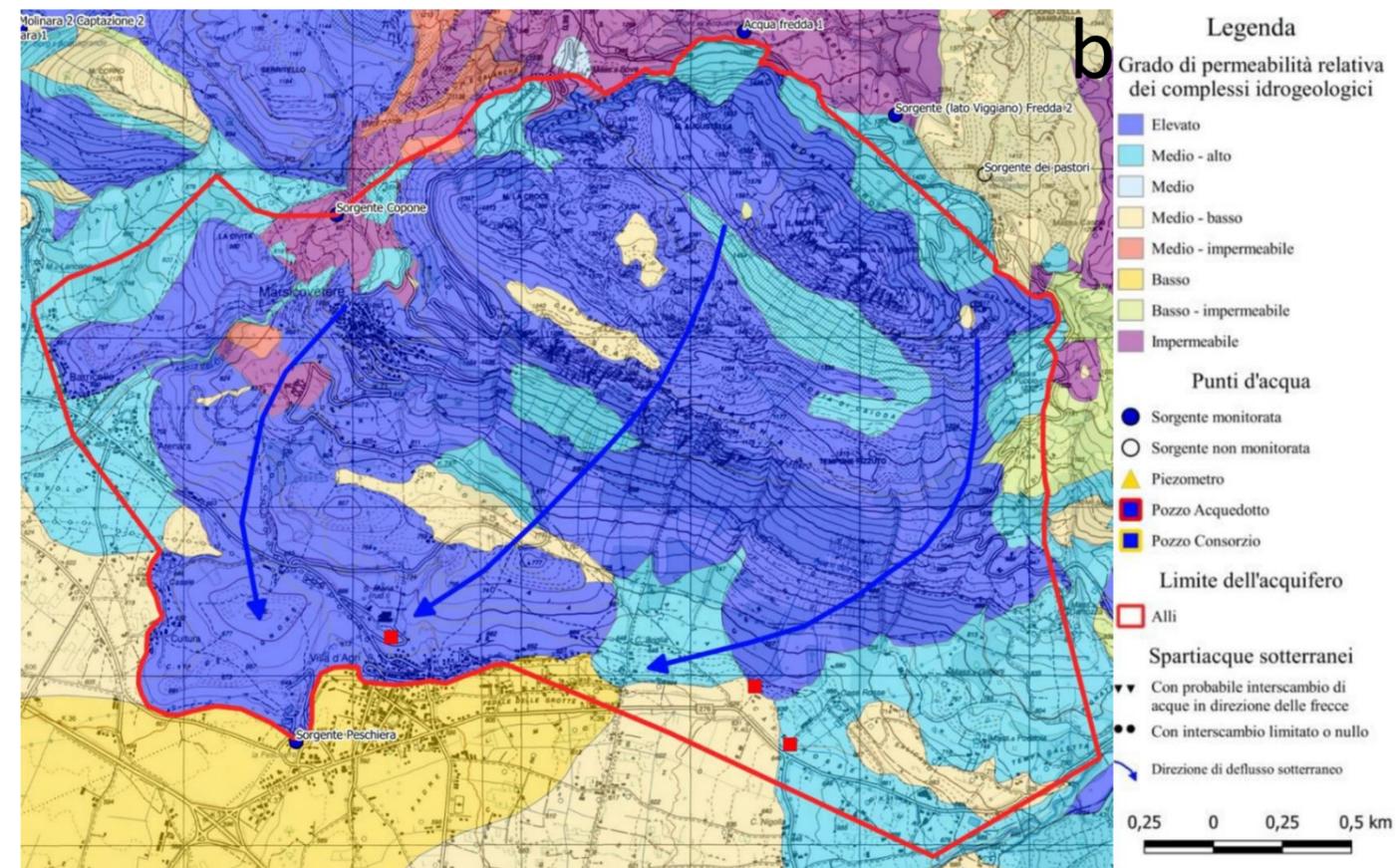
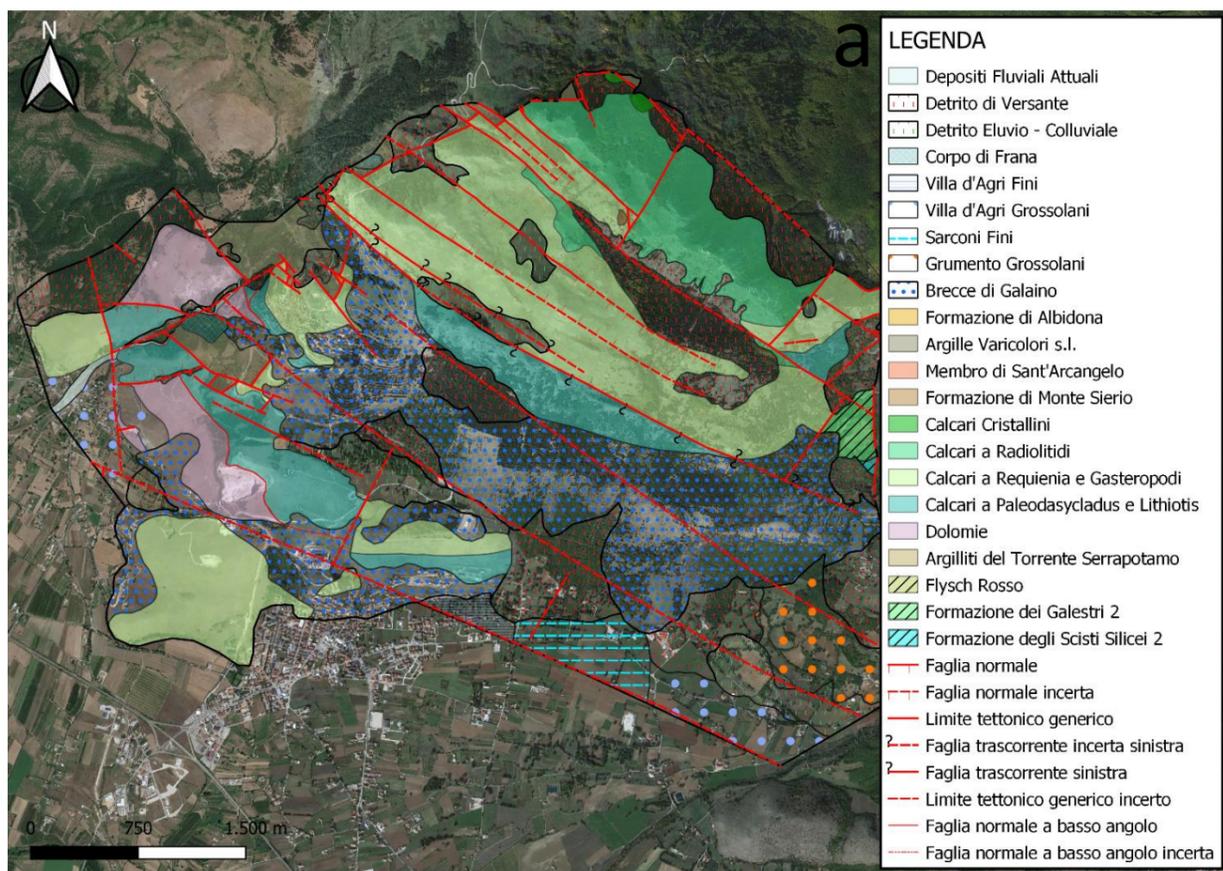
Allegato 2. Sintesi dei risultati ottenuti per il sistema acquifero Volturino Est.

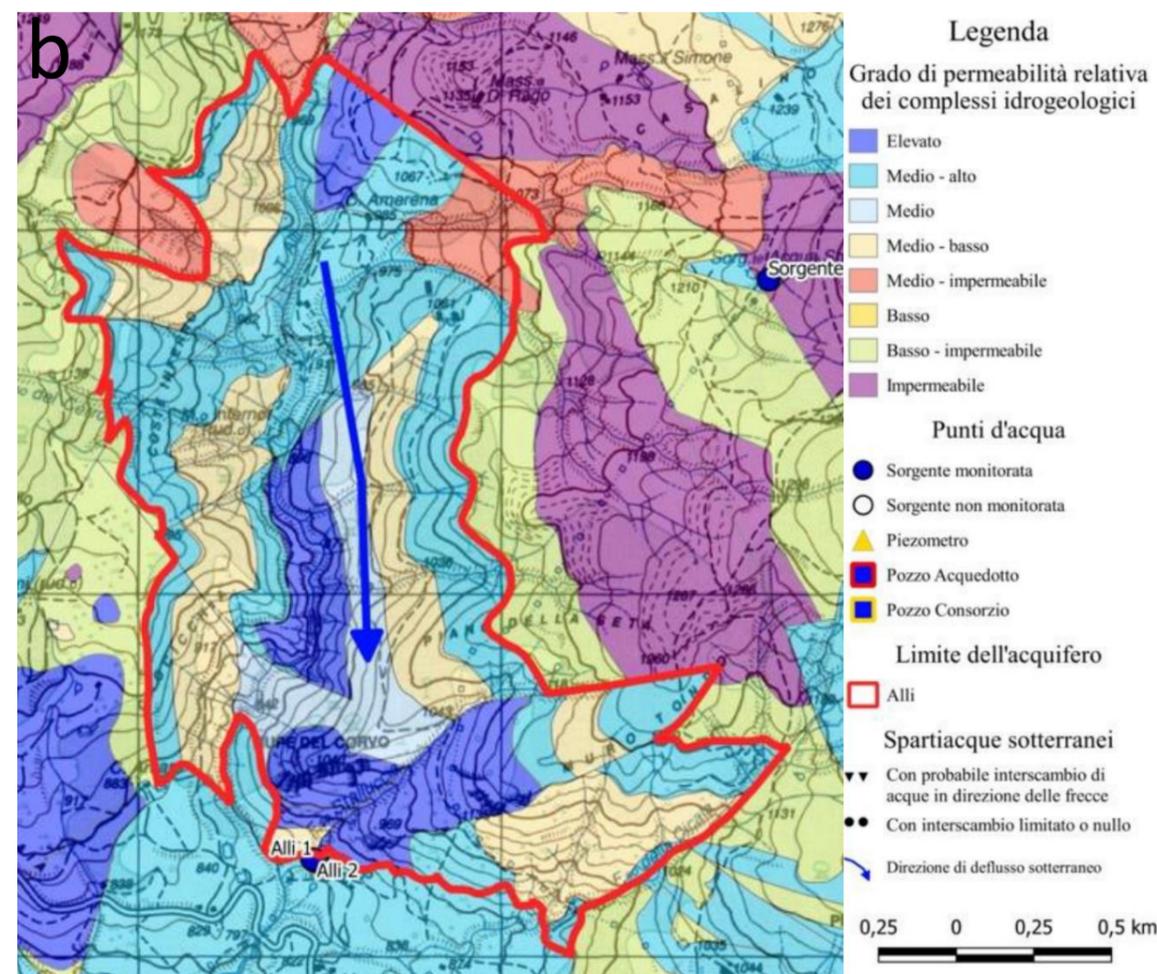
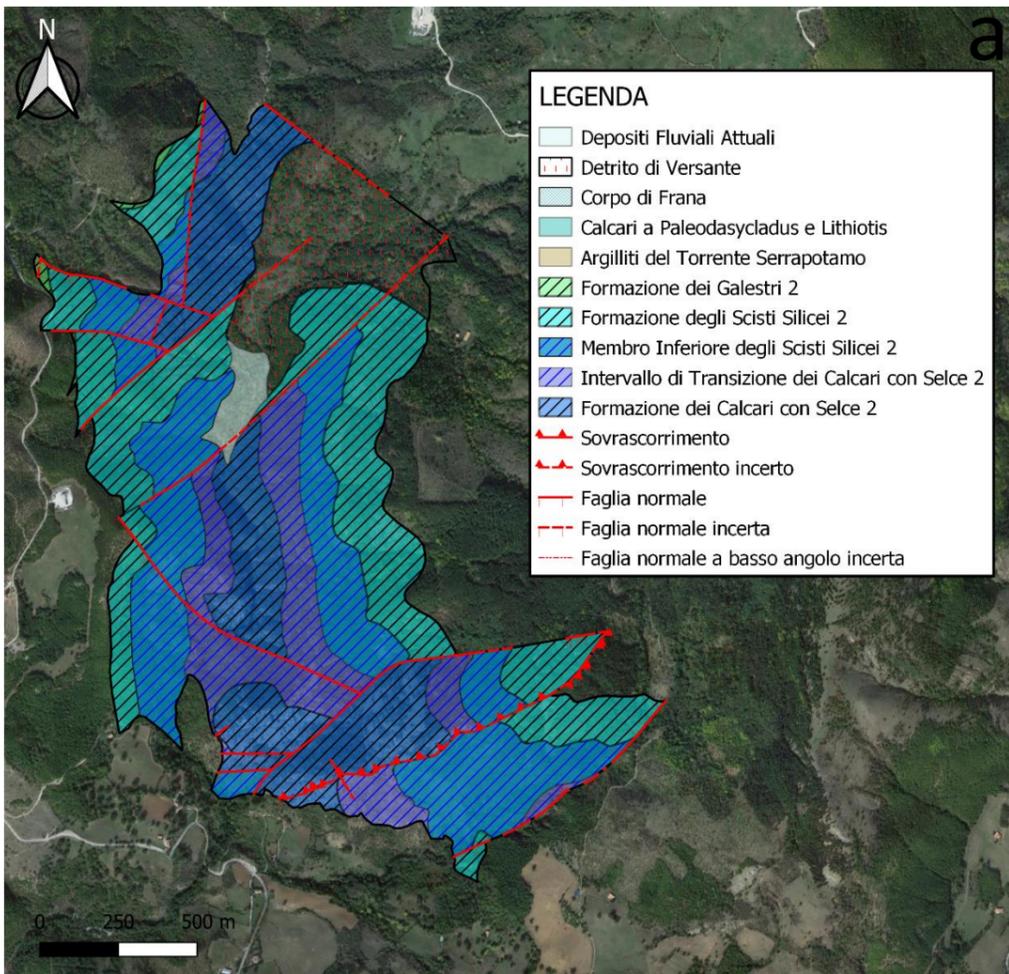
- a) Carta Geologica (Palladino G. et al., in preparazione).
- b) Carta Idrogeologica (Grimaldi S. et al., in preparazione).
- c) Carta della Vulnerabilità Intrinseca ottenuta con il metodo SINTACS.
- d) Carta della Vulnerabilità Intrinseca ottenuta con il metodo EPIK.
- e) Carta della Vulnerabilità Intrinseca ottenuta con il metodo GOD.



Allegato 3. Sintesi dei risultati ottenuti per il sistema acquifero del Monte di Viggiano.

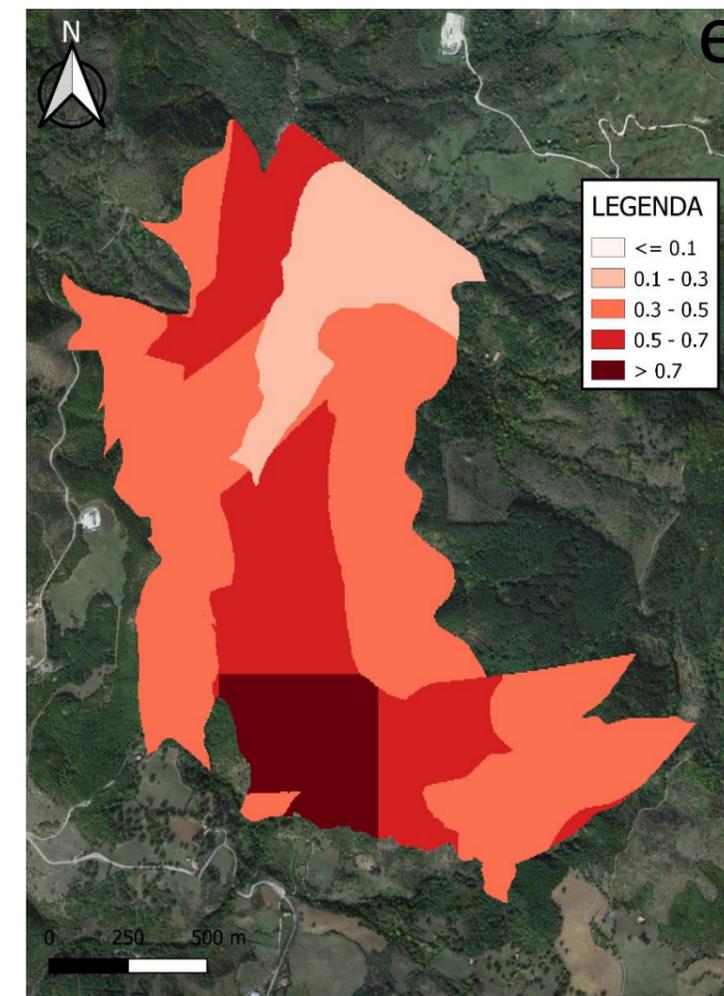
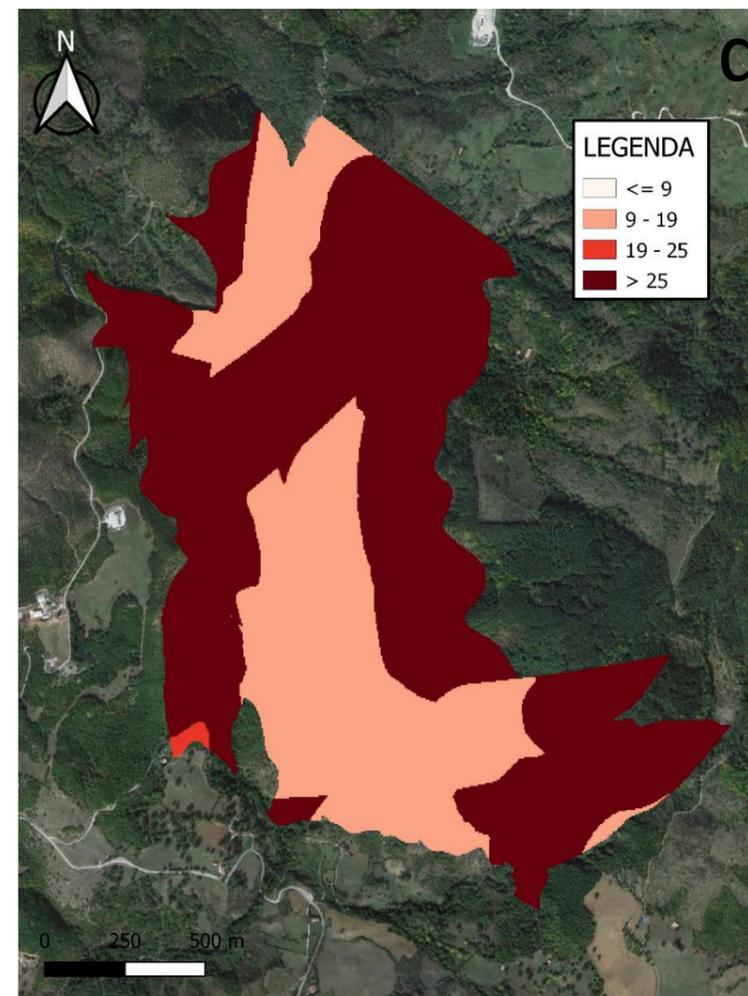
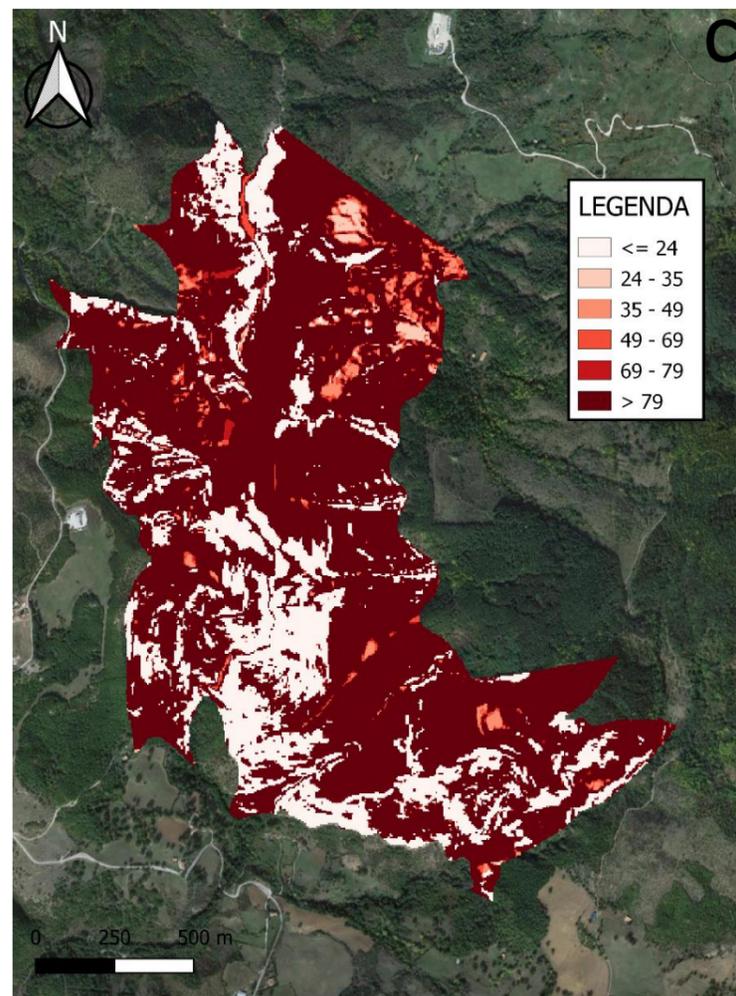
- a) Carta Geologica (Palladino G. et al., in preparazione).
- b) Carta Idrogeologica (Grimaldi S. et al., in preparazione).
- c) Carta della Vulnerabilità Intrinseca ottenuta con il metodo SINTACS.
- d) Carta della Vulnerabilità Intrinseca ottenuta con il metodo EPIK.
- e) Carta della Vulnerabilità Intrinseca ottenuta con il metodo GOD.

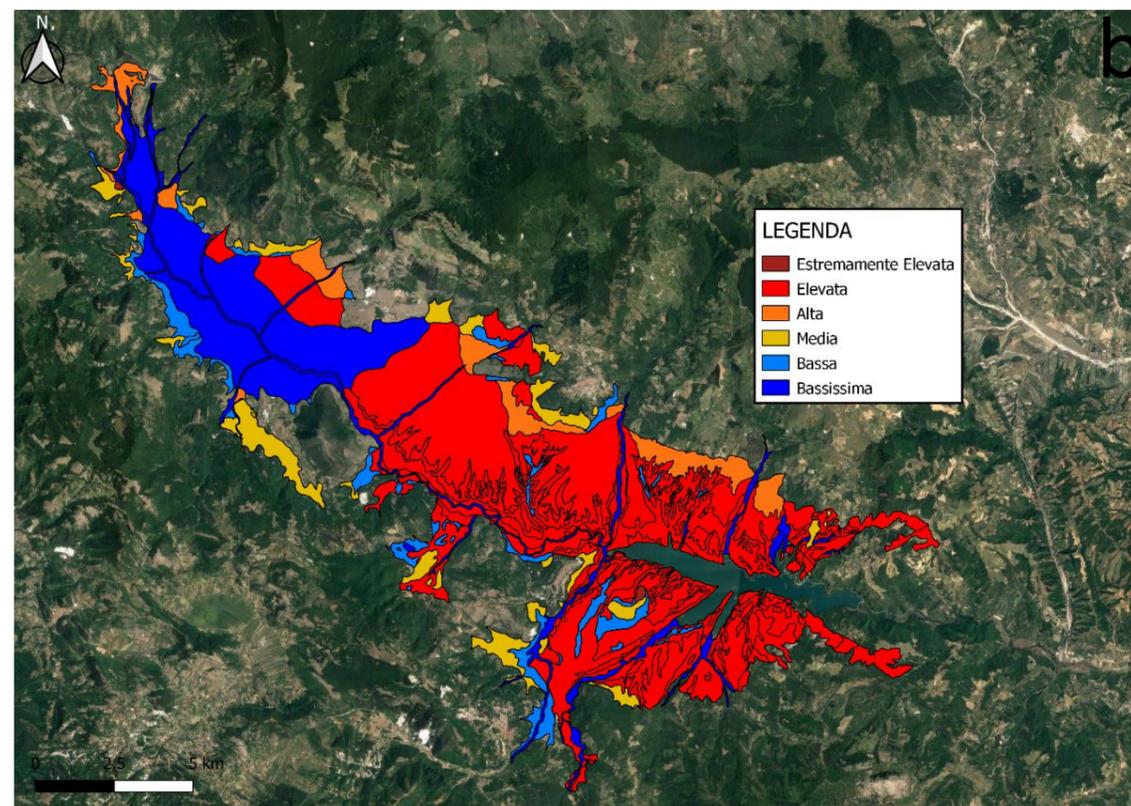
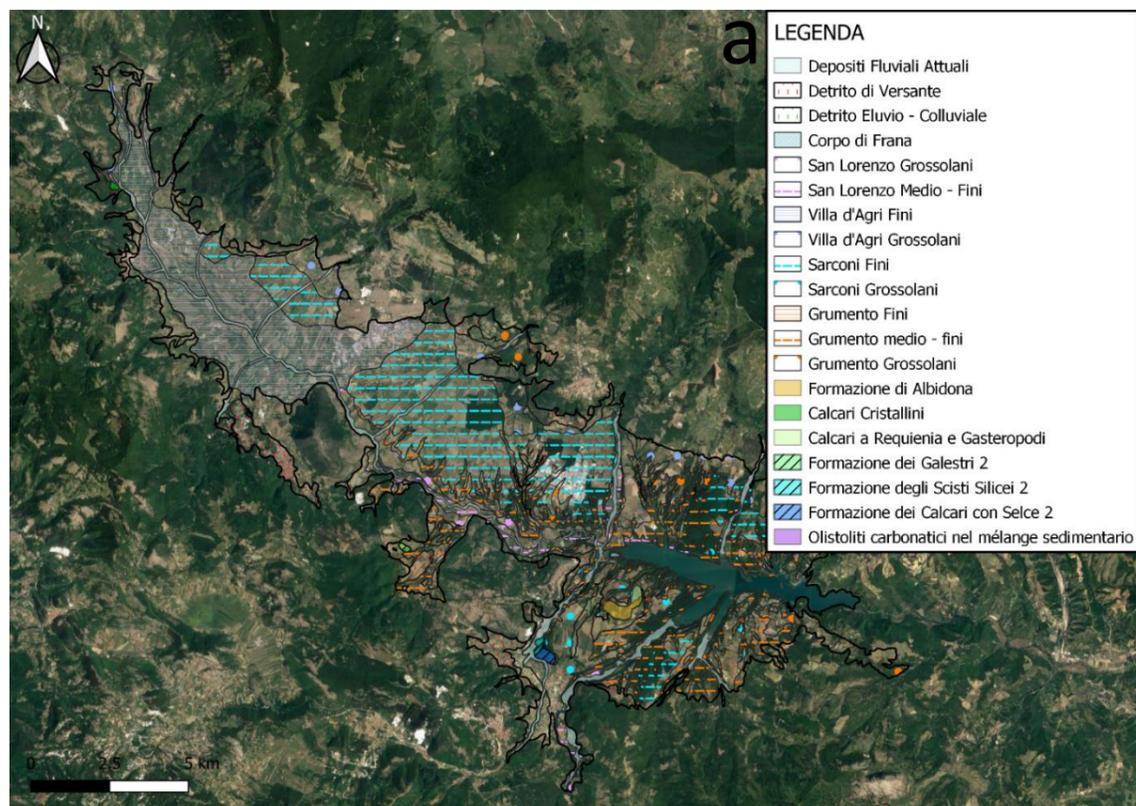




Allegato 4. Sintesi dei risultati ottenuti per il sistema acquifero Alli.

- a) Carta Geologica (Palladino G. et al., in preparazione).
- b) Carta Idrogeologica (Grimaldi S. et al., in preparazione).
- c) Carta della Vulnerabilità Intrinseca ottenuta con il metodo SINTACS.
- d) Carta della Vulnerabilità Intrinseca ottenuta con il metodo EPIK.
- e) Carta della Vulnerabilità Intrinseca ottenuta con il metodo GOD.





Allegato 5. Sintesi dei risultati ottenuti per il sistema acquifero Poroso della Piana alluvionale.

- a) Carta Geologica (Palladino G. et al., in preparazione).
- b) Carta della Vulnerabilità Intrinseca ottenuta con il Metodo Base GNDCI-CNR.
- c) Carta della Vulnerabilità Intrinseca ottenuta con il metodo SINTACS.
- d) Carta della Vulnerabilità Intrinseca ottenuta con il metodo GOD.

