

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



**DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO  
NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA**

**U.O. GEOLOGIA TECNICA, DELL'AMBIENTE E DEL TERRITORIO**

**PROGETTO DEFINITIVO**

**TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – DITTAINO  
LOTTO 4a: CALTANISSETTA XIRBI - ENNA**

**GEOLOGIA, GEOMORFOLOGIA E IDROGEOLOGIA**

RELAZIONE GEOLOGICA, GEOMORFOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA Progr. REV.

RS3U 40 D 69 RG GE0001 001 C

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione Esecutiva	Rocksoil	Dic. 19	F. Romano	Dic. 19	A. Barreca	Dic. 19	M. Comedini Apr. 20
B	Emissione Esecutiva	Rocksoil	Gen. 20	F. Romano	Gen. 20	A. Barreca	Gen. 20	
C	Emissione Esecutiva	Rocksoil	Apr. 20	F. Romano	Apr. 20	A. Barreca	Apr. 20	

## INDICE

1	PREMESSA .....	13
2	INQUADRAMENTO GEOGRAFICO.....	15
3	DATI DI BASE.....	17
3.1	ATTIVITÀ DI RILEVAMENTO GEOLOGICO GEOMORFOLOGICO.....	17
3.2	INDAGINI IN SITO .....	18
3.2.1	<i>Indagini precedenti - Italferr 2018</i> .....	18
3.2.2	<i>Campagna di indagini 2019-2020</i> .....	18
4	INQUADRAMENTO GEOLOGICO REGIONALE .....	22
4.1	CONTESTO GENERALE DELL'APPENNINO MERIDIONALE .....	22
5	ASSETTO LITOSTRATIGRAFICO DI DETTAGLIO NELL'AREA DI PROGETTO .....	52
5.1	STRATIGRAFIA DEL SUBSTRATO DEFORMATO .....	54
5.1.1	<i>Unità di Nicosia</i> .....	54
5.1.2	<i>Unità di Geraci Siculo (FYN5)</i> .....	56
5.2	STRATIGRAFIA DEL BACINO DI THRUST-TOP.....	57
5.2.1	<i>Formazione Terravecchia (TRV)</i> .....	57
5.2.2	<i>Formazione del Tripoli (TPL)</i> .....	60
5.2.3	<i>Gruppo della Gessoso-Solfifera</i> .....	60
5.2.1	<i>Gruppo di Geracello</i> .....	62
5.3	DEPOSITI CONTINENTALI QUATERNARI.....	65
5.3.1	<i>Depositi Alluvionali</i> .....	66
5.3.2	<i>Depositi detritici di versante</i> .....	67
5.3.3	<i>Coltre detritico-colluviale e/o eluvio-colluviale</i> .....	67
5.3.1	<i>Depositi antropici</i> .....	68
6	ASSETTO STRUTTURALE DI DETTAGLIO NELL'AREA DI PROGETTO .....	69
6.1	STRATIFICAZIONE .....	69
6.2	STRUTTURE DUTTILI .....	69
6.3	STRUTTURE FRAGILI .....	70
7	GEOMORFOLOGIA.....	73

7.1	INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO REGIONALE .....	73
7.1.1	<i>Dissesti e processi erosivi .....</i>	75
7.1.2	<i>Morfologia dei principali sistemi fluviali .....</i>	76
7.2	ASSETTO GEOMORFOLOGICO LOCALE .....	77
7.2.1	<i>Elementi idrografici .....</i>	77
7.2.2	<i>Forme, processi e depositi gravitativi.....</i>	78
7.2.3	<i>Forme, processi e depositi legati alle acque superficiali .....</i>	86
7.2.4	<i>Forme antropiche .....</i>	86
7.3	COMPATIBILITÀ DELL'OPERA CON L'ASSETTO GEOMORFOLOGICO DEL TERRITORIO .....	87
8	INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO .....	88
9	ASSETTO IDROGEOLOGICO DI DETTAGLIO DELL'AREA DI PROGETTO .....	89
9.1	DATI IDROGEOLOGICI PREESISTENTI .....	89
9.2	DATI IDROGEOLOGICI DI NUOVA ACQUISIZIONE .....	90
9.3	DEFINIZIONE DEI COMPLESSI IDROGEOLOGICI .....	100
9.3.1	<i>Conducibilità idraulica dei singoli litotipi .....</i>	100
9.3.2	<i>Complessi delle unità del substrato.....</i>	103
9.3.3	<i>Complessi delle unità nei depositi quaternari .....</i>	107
9.4	CONDIZIONI DI DEFLUSSO IDRICO SOTTERRANEO.....	108
10	VALUTAZIONE DELLE PORTATE ATTESE IN GALLERIA .....	113
10.1	METODOLOGIA .....	113
10.1.1	<i>Portate transitorie.....</i>	113
10.1.2	<i>Portate stabilizzate .....</i>	115
10.2	VALUTAZIONE DELL'INFILTRAZIONE EFFICACE .....	121
10.2.1	<i>Piovosità .....</i>	122
10.2.2	<i>Evapotraspirazione.....</i>	122
10.2.3	<i>Infiltrazione .....</i>	123
10.3	PERMEABILITÀ.....	124
10.4	POROSITÀ.....	125
10.5	RISULTATI DELLE VALUTAZIONI DI PORTATA .....	126
10.5.1	<i>GN01 – Galleria Montestretto.....</i>	126

10.5.2	GN02 – Galleria Salso.....	127
10.5.3	GN03 – Galleria Trinacria.....	128
<b>11</b>	<b>SISMICITÀ DELL'AREA.....</b>	<b>131</b>
11.1	PREMESSA.....	131
11.2	ASSETTO GEODINAMICO E TETTONICO.....	131
11.3	ASSETTO SISMOTETTONICO.....	134
11.4	ZONAZIONE SISMOGENETICA.....	137
11.5	FAGLIE SISMOGENETICHE E FAGLIE CAPACI NELL'AREA DI PROGETTO.....	138
11.6	SISMICITÀ DELL'AREA D'INTERVENTO.....	141
11.6.1	Distribuzione spazio-temporale degli eventi sismici a scala regionale.....	142
11.6.2	Distribuzione spazio-temporale degli eventi sismici a scala locale.....	144
<b>12</b>	<b>MODELLO GEOLOGICO DI RIFERIMENTO E POTENZIALI CRITICITÀ.....</b>	<b>161</b>
12.1	TRATTA ALL'APERTO, PK 0+000 ÷ 4+108.....	161
12.1.1	Sondaggi.....	161
12.1.2	Assetto geologico.....	161
12.1.3	Assetto geomorfologico.....	162
12.1.4	Assetto idrogeologico.....	162
12.1.5	Principali criticità.....	163
12.2	GN01 - IMBOCCO OVEST.....	163
12.2.1	Sondaggi.....	163
12.2.2	Assetto geologico.....	163
12.2.3	Assetto geomorfologico.....	163
12.2.4	Assetto idrogeologico.....	164
12.2.5	Criticità principali.....	164
12.3	GN01 - GALLERIA NATURALE MONTESTRETTO.....	164
12.3.1	Sondaggi.....	164
12.3.2	Assetto geologico.....	164
12.3.3	Assetto geomorfologico.....	166
12.3.4	Assetto idrogeologico.....	166
12.3.5	Criticità principali.....	167
12.4	GN01 - IMBOCCO EST.....	168

12.4.1	Sondaggi.....	168
12.4.2	Assetto geologico .....	168
12.4.3	Assetto geomorfologico .....	168
12.4.4	Assetto idrogeologico.....	169
12.4.5	Criticità principali .....	169
12.5	FINESTRA MONTESTRETTO.....	169
12.5.1	Sondaggi.....	169
12.5.2	Assetto geologico .....	170
12.5.3	Assetto geomorfologico .....	170
12.5.4	Assetto idrogeologico.....	170
12.5.5	Criticità principali .....	170
12.6	TRATTA ALL'APERTO PK 6+468 - 7+702.....	170
12.6.1	Sondaggi.....	171
12.6.2	Assetto geologico .....	171
12.6.3	Assetto geomorfologico .....	171
12.6.4	Assetto idrogeologico.....	172
12.6.5	Criticità principali .....	172
12.7	GN02 - IMBOCCO OVEST .....	172
12.7.1	Sondaggi.....	172
12.7.2	Sezioni sismiche.....	172
12.7.1	Assetto geologico .....	173
12.7.2	Assetto geomorfologico .....	173
12.7.1	Assetto idrogeologico.....	175
12.7.2	Criticità principali .....	175
12.8	GN02 - GALLERIA NATURALE SALSO.....	175
12.8.1	Sondaggi.....	175
12.8.2	Sezioni sismiche.....	175
12.8.3	Assetto geologico .....	176
12.8.4	Assetto geomorfologico .....	176
12.8.5	Assetto idrogeologico.....	177
12.8.6	Criticità particolari .....	177
12.9	GN02 - IMBOCCO EST .....	177

12.9.1	Sondaggi.....	177
12.9.2	Assetto geologico .....	177
12.9.3	Assetto geomorfologico .....	178
12.9.4	Assetto idrogeologico.....	178
12.9.5	Criticità principali .....	178
12.10	TRATTA ALL'APERTO PK 11+549 - 13+427 .....	178
12.10.1	Sondaggi.....	179
12.10.2	Assetto geologico .....	179
12.10.3	Assetto idrogeologico.....	179
12.10.4	Criticità principali .....	179
12.11	GN03 - IMBOCCO OVEST .....	179
12.11.1	Sondaggi.....	179
12.11.2	Assetto geologico .....	180
12.11.3	Assetto geomorfologico .....	180
12.11.4	Assetto idrogeologico.....	180
12.11.5	Criticità principali .....	180
12.12	GN03 - GALLERIA NATURALE TRINACRIA.....	180
12.12.1	Sondaggi.....	181
12.12.2	Assetto geologico .....	181
12.12.3	Assetto geomorfologico .....	181
12.12.4	Assetto idrogeologico.....	181
12.12.5	Criticità principali .....	182
12.13	GN03 - IMBOCCO EST .....	183
12.13.1	Sondaggi.....	183
12.13.2	Assetto geologico .....	183
12.13.3	Assetto geomorfologico .....	183
12.13.4	Assetto idrogeologico.....	183
12.13.5	Criticità particolari .....	183
12.14	TRATTA ALL'APERTO PK 26+928 - FINE LOTTO .....	183
12.14.1	Sondaggi.....	183
12.14.2	Dati geofisici.....	184
12.14.3	Assetto geologico .....	184

12.14.4	Assetto geomorfologico .....	185
12.14.5	Assetto idrogeologico.....	185
<b>13</b>	<b>SINTESI DELLE CRITICITÀ.....</b>	<b>186</b>
13.1	CRITICITÀ GENERALI.....	186
13.1.1	Caratteristiche litotecniche delle unità del substrato.....	186
13.1.2	Eterogeneità litologica .....	186
13.1.3	Fenomeni di rigonfiamento .....	187
13.1.4	Presenza di acquiferi produttivi.....	187
13.1.5	Carsismo e fenomeni di dissoluzione.....	187
13.1.6	Presenza di gas.....	188
13.1.7	Aggressività chimica delle acque .....	189
13.2	QUADRO DI SINTESI DELLE CRITICITÀ .....	189
<b>14</b>	<b>AFFIDABILITÀ DEL MODELLO GEOLOGICO PER LE GALLERIE PRINCIPALI .....</b>	<b>190</b>
14.1	PRINCIPI ALLA BASE DEL METODO GMR .....	190
14.2	CONSIDERAZIONI GENERALI SUI RISULTATI DELLE VALUTAZIONI .....	191
14.3	RISULTATI DELLE VALUTAZIONI.....	194
14.3.1	GN01 – Galleria Montestretto.....	194
14.3.2	GN02 – Galleria Salso.....	195
14.3.3	GN03 – Galleria Trinacria .....	196
<b>15</b>	<b>RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....</b>	<b>198</b>
<b>INDICE DELLE FIGURE</b>		
Figura 1	– Corografia dell’area di studio con individuazione della tratta ferroviaria in progetto (rosso). 14	
Figura 2	– Quadro di sintesi della campagna geognostica Italferr 2018. ....	18
Figura 3	– Domini strutturali nel Mediterraneo centrale (da Lentini et al. 1995, modificato). ....	22
Figura 4	– Schema tettonico della Sicilia (da Bosellini, 2005). ....	24
Figura 5	– Schema tettonico della Sicilia (da <a href="https://www.liceolussana.org/Sicilia19/2019/03/15/geografia-di-pantalica/">https://www.liceolussana.org/Sicilia19/2019/03/15/geografia-di-pantalica/</a> ). ...	24
Figura 6	– Schema dell’assetto paleogeografico riferito al Giurassico superiore, da cui evolverà successivamente la catena appenninica centro-meridionale (Lentini et al., 2004). ....	26
Figura 7	– Profilo schematico mostrante l’architettura strutturale dell’orogene siciliano (modificato da Finetti et al., 2015). ...	28
Figura 8	– Ricostruzione palinspastica della Tetide centrale nel Giurassico (da Scandone et al. 1974, modificato; rappresentazione alternativa e di maggior dettaglio rispetto a quella di Figura 6).....	31
Figura 9	– Areale di affioramento delle Unità Sicilidi s.l. (Lentini & Carbone, 2014). ....	32

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - DITTAINO</b> <b>LOTTO 4a: CALTANISSETTA XIRBI - ENNA</b>					
	<b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOMORFOLOGICA ED IDROGEOLOGICA</b>	<b>COMMESSA</b> RS3U	<b>LOTTO</b> 40	<b>CODIFICA</b> D69RG	<b>DOCUMENTO</b> GE 00 01 001	<b>REV.</b> C

Figura 10 – Schema rappresentativo della deposizione fluvio- deltizia della formazione Terravecchia (Grasso & Butler, 1991). .....	36
Figura 11 - A) Il modello classico di Decima & Wiesel (1971) della successione del Messiniano siciliano e della sua presunta correlazione con i bacini mediterranei profondi (“Trilogia Evaporitica”). B) il modello di Butler et al. (1995); l’unità inferiore registra un progressivo abbassamento del livello marino (regressione forzata) mentre l’unità superiore mostra un trend complessivamente trasgressivo, legato al graduale riempimento del Mediterraneo successivo al picco di prosciugamento (da Roveri et al., 2008). .....	40
Figura 12 - Sezione geologica schematica dei bacini di avanfossa e avampaese siciliani con una ricostruzione delle relazioni stratigrafiche (Roveri et al., 2008).M/P: limite Miocene/Pliocene; MES: superficie erosionale messiniana. ....	41
Figura 13 - Schema della distribuzione dei diversi tipi di tessiture e associazioni sedimentarie all’interno della formazione di Cattolica (Maniscalco et al., 2010). .....	43
Figura 14 - Caratteristiche della sedimentazione nella formazione di Pasquasia affiorante nel bacino sintettonico di Corvillo, a N di Caltanissetta (Maniscalco et al., 2010). Il Calcare di Base del Messiniano inferiore (tratteggio obliquo) è inciso da una superficie di erosione subaerea intramessiniana. a: conglomerati fluviali e di fan-delta; b: argille sterili; c: intercalazioni gessarenitiche di delta; d: corpi gessosi lenticolari. ....	45
Figura 15 – Carta strutturale della Sicilia .....	47
Figura 16 – Ricostruzione schematica della Catena Appenninico-Maghrebide (da Finetti et al. 2005, modificato da Figura 3). ..	50
Figura 17 – Schema tettonico della Sicilia e delle aree adiacenti con la ricostruzione dei principali sistemi di thrust e faglie trascorrenti (Finetti et al., 2005). .....	51
Figura 18 – Schema tettonico del Foglio 631 Caltanissetta (ISPRA, 2014). .....	52
Figura 19 - Colonna stratigrafica dell’area del bacino di Caltanissetta (Maniscalco et al., 2010), estrapolabile al settore di studio. Si noti che le sigle TRVa e TRVb indicate in figura e relative alla formazione Terravecchia, non corrispondono ai codici utilizzati nelle carte e nei profili di progetto, che sono TRV e TRVa rispettivamente; la sottounità TRVc non affiora nell’area di studio. ....	53
Figura 20 – Affioramento della litofacies argilloso-marnosa della formazione Terravecchia (TRV), in contrada Giumentarello nel comune di Enna. ....	58
Figura 21 – Affioramento della litofacies arenaceo-conglomeratica della formazione Terravecchia (TRVa), in località Castellana (S.S. 121 incrocio S.P. 112). .....	59
Figura 22 - Gesso selenitico della formazione di Cattolica (GTL2), versante NE del Monte Stretto (Enna). .....	61
Figura 23 - Affioramento della litofacies marnoso-calcareo dei Trubi, versante NE del Monte Stretto (Enna). .....	63
Figura 24 - Calcareni bioclastiche a resti di pettinidi, versante occidentale della Rocca di Enna. ....	65
Figura 25 - Litofacies sabbiosa della formazione di Enna (ENNb), ai margini dell’omonimo centro abitato. ....	65
Figura 26. Veduta prospettica da ovest tra le pk 4 e 6 (il tracciato, in rosso, è indicativo) dove questa interseca il rilievo arcuato del M. Stretto, impostato nelle successioni post-tortoniane piegate da una sinclinale con asse immergente verso	

SSW. Sulla sinistra la S.S. 640 a E di Caltanissetta. ....	74
Figura 27. Veduta prospettica da ovest tra le pk 7 e 10 (il tracciato, in rosso, è indicativo). A sud (sinistra) della linea è visibile la dorsale del M. Capodarso. con le successioni post-tortoniane immergenti verso sud. In primo piano il corso del Fiume Imera Meridionale, attraversato dalla Statale 626.....	74
Figura 28 - Esempio di rimodellamento antropico di un dissesto recente (frana composita, rotazionale + colamento) localizzata fuori dall’area rilevata. A: situazione ad agosto 2019; B: la stessa frana a ottobre 2019, dopo l’aratura. Il terreno viene progressivamente riportato in posto per non perdere l’estensione coltivabile e nel giro di due anni si perde gran parte dell’evidenza del dissesto.....	79
Figura 29 - Prove di permeabilità di tipo Lefranc realizzate nella campagna geognostica Italferr 2018. ....	90
Figura 30 – Caratteristiche dei piezometri installati nell’ambito della campagna geognostica Italferr 2018 e letture di soggiacenza. ....	90
Figura 31 - Prove di permeabilità realizzate nella campagna geognostica Italferr 2019. ....	91
Figura 32 – Caratteristiche dei piezometri installati nell’ambito della campagna geognostica 2019-20.....	94
Figura 33 – Letture di soggiacenza nei piezometri nel periodo dicembre 2019 - aprile 2020. ....	96
Figura 34 - Valori di conducibilità idraulica misurati in foro nelle Argille Variegate (AV) e nei Flysch di Nicosia (FYN4) nell’ambito del Progetto Definitivo (rombi) e del Preliminare (quadrati).....	100
Figura 35 - Valori di conducibilità idraulica misurati in foro nella Formazione di Terravecchia (TRV e TRVa) nell’ambito del Progetto Definitivo (rombi) e del Preliminare (quadrati). ....	101
Figura 36 - Valori di conducibilità idraulica misurati in foro nella Formazione di Cattolica (GTL1, GTL2 e GTL3) nell’ambito del Progetto Definitivo (rombi) e del Preliminare (quadrati). ....	101
Figura 37 - Valori di conducibilità idraulica misurati in foro nelle tre formazioni Tripoli (TPL), Pasquasia (GPQ) e Trubi (TRBa) nell’ambito del Progetto Definitivo. ....	102
Figura 38 - Valori di conducibilità idraulica misurati in foro nei depositi alluvionali (a2 e a3) e nel detrito di versante nell’ambito del Progetto Definitivo (rombi) e del Preliminare (quadrati).....	102
Figura 39 - Valori di conducibilità idraulica misurati in foro nei complessi idrogeologici CAM e CCA nell’ambito del Progetto Definitivo (rombi) e del Preliminare (quadrati).....	104
Figura 40 - Valori di conducibilità idraulica misurati in foro nei complessi idrogeologici CGM e CCM nell’ambito del Progetto Definitivo (rombi) e del Preliminare (quadrati).....	106
Figura 41 - Valori di conducibilità idraulica misurati in foro nel complesso idrogeologico CSL nell’ambito del Progetto Definitivo (rombi) e del Preliminare (quadrati).....	108
Figura 42 - Schema concettuale degli effetti di drenaggio di un tunnel. ....	117
Figura 43 - Schema concettuale per il calcolo delle portate stabilizzate con la formula proposta da Ribacchi et al. (2002). ....	120
Figura 44 – dati di piovosità annua media. ....	122
Figura 45 – calcolo dell’evapotraspirazione, relativa al 2005 .....	123

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - DITTAINO</b> <b>LOTTO 4a: CALTANISSETTA XIRBI - ENNA</b>					
	<b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOMORFOLOGICA ED IDROGEOLOGICA</b>	<b>COMMESSA</b> RS3U	<b>LOTTO</b> 40	<b>CODIFICA</b> D69RG	<b>DOCUMENTO</b> GE 00 01 001	<b>REV.</b> C

Figura 46 - Coefficienti di infiltrazione (Civita, 2014). .....	124
Figura 47 – Valori del coefficiente di infiltrazione stimato per le unità geologiche nell’area di progetto. Il dato è adimensionale. ....	124
Figura 48 – valori del coefficiente di permeabilità delle unità geologiche nell’area di progetto utilizzati per la stima delle portate delle venute in galleria. Il dato è in m/s. ....	125
Figura 49 - Porosità totale ed efficace definita per i diversi litotipi (Civita, 2014). ....	125
Figura 50 – valori della porosità efficace delle unità geologiche nell’area di progetto utilizzati per la stima delle portate delle venute in galleria. Il dato è adimensionale. ....	126
Figura 51 – Calcolo delle portate attese lungo la galleria GN01 Montestretto .....	127
Figura 52 – Calcolo delle portate attese lungo la galleria GN02 Salso .....	128
Figura 53 – Calcolo delle portate attese lungo la galleria GN03 Trinacria .....	129
Figura 54 – Carta geologico-strutturale della Sicilia (modificata da Catalano et al. 2013); in rosso è indicato il tracciato di progetto.....	132
Figura 55 – Carta strutturale della Sicilia desunta dal foglio n. 6 del Modello Strutturale d’Italia a scala 1:500.000 (Bigi et al. 1991, integrato da Lavecchia et al. 2007). In rosso è indicato il tracciato di progetto. ....	133
<i>Figura 56 – Principali domini sismogenetici della Sicilia, con evidenziati gli stili deformativi dominanti (diagrammi dei meccanismi focali; i quadranti in compressione sono indicati in nero, quelli estensionali in bianco) e i principali contatti tettonici regionali. Le lettere indicano i vari domini descritti nel testo; in rosso è evidenziato il tracciato di progetto (Lotti 3 e 4a). ....</i>	135
Figura 57 – Schema sismogenetico della Sicilia centrale con distribuzione dei meccanismi focali dei terremoti all’interno del dominio della Sicilia centrale (SBT). Nella sezione 1 è presentata un’interpretazione degli elementi strutturali e della possibile posizione degli ipocentri dei terremoti, suddivisi sulla base della loro cinematica. TF, piani a basso angolo; TS, piani a basso angolo con movimenti di trascorrenza; SS, strike-slip; NF, faglie normali; NS, faglie trascorrenti; UK, cinematismo sconosciuto; OEF, fronti estensionali esterni (da Sgroi et al., 2012). Nei diagrammi polari il bianco indica i quadranti in estensione, il colore pieno quelli in compressione. ....	136
<i>Figura 58 – Stralcio della Zonazione sismogenetica ZS9 dell’area di studio, con indicazione del tracciato di progetto. ....</i>	138
Figura 59 – Localizzazione delle potenziali sorgenti di terremoti nell’area di studio (ITHACA - Italy Hazard from Capable faults). In rosso le faglie sismogenetiche e/o capaci, in rosso il tracciato del lotto 4a. ....	139
Figura 60 – Localizzazione delle potenziali sorgenti di terremoti con M>5.5 nell’area di studio (DISS 2019, Database of Individual Seismogenic Sources). ....	139
Figura 61 – Localizzazione delle potenziali sorgenti di terremoti nell’area di studio (EDSF - European Database of Seismogenic Faults). In grigio le faglie sismogenetiche e/o capaci. ....	140
Figura 62 – Quadro riassuntivo delle sorgenti sismogeniche composite Sciacca-Gela (DISS-ID ITCS006) e Gela-Catania (DISS-ID ITCS029).....	141

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - DITTAINO</b> <b>LOTTO 4a: CALTANISSETTA XIRBI - ENNA</b>					
	<b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOMORFOLOGICA ED IDROGEOLOGICA</b>	<b>COMMESSA</b> RS3U	<b>LOTTO</b> 40	<b>CODIFICA</b> D69RG	<b>DOCUMENTO</b> GE 00 01 001	<b>REV.</b> C

Figura 63 – Localizzazione (quadrato nero) dell’evento sismico del 361 d.C. (da DBMI14; Boschi et al., 1997). .....	145
Figura 64 – Elenco dei principali terremoti storici che hanno interessato il centro abitato di Calascibetta (da Database Macrosismico Italiano, DBMI15). Legenda: Int. intensità al sito; NMDP: numero di osservazioni macrosismiche del terremoto; Io: intensità massima; Mw: magnitudo momento. ....	146
Figura 65 – Elenco dei principali terremoti storici che hanno interessato il centro abitato di Caltanissetta (da Database Macrosismico Italiano, DBMI15). Legenda: Int. intensità al sito; NMDP: numero di osservazioni macrosismiche del terremoto; Io: intensità massima; Mw: magnitudo momento. ....	147
Figura 66 – Elenco dei principali terremoti storici che hanno interessato il centro abitato di Enna-Castrogiovanni (da Database Macrosismico Italiano, DBMI15). Legenda: Int. intensità al sito; NMDP: numero di osservazioni macrosismiche del terremoto; Io: intensità massima; Mw: magnitudo momento. ....	148
Figura 67 – Elenco dei principali terremoti storici che hanno interessato il centro abitato di Leonforte (da Database Macrosismico Italiano, DBMI15). Legenda: Int. intensità al sito; NMDP: numero di osservazioni macrosismiche del terremoto; Io: intensità massima; Mw: magnitudo momento. ....	149
Figura 68 – Elenco dei principali terremoti storici che hanno interessato il centro abitato di Piazza Armerina (da Database Macrosismico Italiano, DBMI15). Legenda: Int. intensità al sito; NMDP: numero di osservazioni macrosismiche del terremoto; Io: intensità massima; Mw: magnitudo momento. ....	150
Figura 69 – Elenco dei principali terremoti storici che hanno interessato il centro abitato di Pietraperzia (da Database Macrosismico Italiano, DBMI15). Legenda: Int. intensità al sito; NMDP: numero di osservazioni macrosismiche del terremoto; Io: intensità massima; Mw: magnitudo momento. ....	151
Figura 70 – Elenco dei principali terremoti storici che hanno interessato il centro abitato di Santa Caterina Villarmosa (da Database Macrosismico Italiano, DBMI15). Legenda: Int. intensità al sito; NMDP: numero di osservazioni macrosismiche del terremoto; Io: intensità massima; Mw: magnitudo momento. ....	152
Figura 71 – Elenco dei principali terremoti storici che hanno interessato il centro abitato di Valguarnera Caropepe (da Database Macrosismico Italiano, DBMI15). Legenda: Int. intensità al sito; NMDP: numero di osservazioni macrosismiche del terremoto; Io: intensità massima; Mw: magnitudo momento.....	153
Figura 72 – Elenco dei principali terremoti storici che hanno interessato il centro abitato di Villarosa (da Database Macrosismico Italiano, DBMI15). Legenda: Int. intensità al sito; NMDP: numero di osservazioni macrosismiche del terremoto; Io: intensità massima; Mw: magnitudo momento. ....	154
Figura 73 – Distribuzione degli epicentri dei terremoti relativi al periodo 01/01/1985-30/11/2019, situati entro ad un raggio di 25-35 km circa dalla tratta principale del Lotto 4, per magnitudo $\geq 0,1$ e originatisi a profondità comprese tra 0/-1.000 km estrapolati dalla banca dati ISIDe. La linea rossa rappresenta la tratta d’interesse (Lotto 4a). ....	157
Figura 74 – Grafico della distribuzione della profondità degli ipocentri dei terremoti registrati per il periodo temporale 1985-2019, in corrispondenza dell’area d’indagine.....	158
Figura 75 – Distribuzione della magnitudo dei terremoti registrati per il periodo temporale 1985-2019, in corrispondenza	

dell'area d'indagine.....	158
Figura 76 – Distribuzione della magnitudo/profondità dei terremoti registrati per il periodo temporale 1985-2019, in corrispondenza dell'area d'interesse. In rosso sono evidenziate le profondità in corrispondenza delle quali si verifica una variazione nel numero degli eventi sismici registrati. ....	159
Figura 77 – Stralcio della carta strutturale della Sicilia di Figura 55, con indicati gli eventi sismici categorizzati in base alle classi di profondità degli ipocentri (verde: 0-14 km; giallo: 14-40 km; arancione: > 40 km). In trasparenza, in verde il settore delle Madonie e in arancione il bacino di Caltanissetta. In rosso il tracciato dell'opera (lotti 3 e 4a). ....	160
Figura 78 - Sezioni sismiche LS3 e LS4 realizzate tra l'imbocco della GN02 e la tratta all'aperto che lo precede in direzione Palermo (non in scala tra loro). A, B: Vp; D: Vs. Si può osservare l'andamento regolare del gradiente di velocità con la profondità. In D è stato ridisegnato in rosso il limite di Vs = 800 m/s (rapporto Progeo S.r.l., 2019).....	174
Figura 79 - Sezione sismica LS11, parallela al tracciato, nell'area della nuova stazione di Enna. A: velocità Vp; B: velocità Vs. ....	184
Figura 80 – Diagramma di valutazione dell'affidabilità del modello geologico (GMR) per la galleria GN01 Montestretto. DPQ, MPQ e GPQ sono le curve relative ai pesi dei tre parametri a, b, c. ....	195
Figura 81 –Diagramma di valutazione dell'affidabilità del modello geologico (GMR) per la galleria GN01 Salso. DPQ, MPQ e GPQ sono le curve relative ai pesi dei tre parametri a, b, c. ....	196
Figura 82 –Diagramma di valutazione dell'affidabilità del modello geologico (GMR) per la galleria GN03 Trinacria. DPQ, MPQ e GPQ sono le curve relative ai pesi dei tre parametri a, b, c. ....	197

## 1 PREMESSA

Nell'ambito dell'esecuzione dello studio "Direttrice ferroviaria Messina-Catania-Palermo – Nuovo collegamento Palermo-Catania", sono stati effettuati i rilievi e gli approfondimenti propedeutici alla redazione degli elaborati di sintesi previsti dal progetto stesso. In particolare, il presente studio riguarda il Lotto 4A della tratta Caltanissetta Xirbi - Dittaino, denominato "Caltanissetta Xirbi-Enna".

Questo rapporto presenta i risultati degli studi geologici, geomorfologici, idrogeologici e sulla sismicità eseguiti nell'ambito del progetto definitivo del raddoppio della linea ferroviaria Palermo-Catania, Lotto 4a della tratta Caltanissetta Xirbi - Dittaino, denominato "Caltanissetta Xirbi-Enna". Il tracciato in progetto è lungo circa 27.5 km e comprende tre gallerie naturali.

In Figura 1 è riportato lo sviluppo del tracciato in progetto; la pk 0+000 è ubicata in corrispondenza della stazione di Caltanissetta Xirbi, mentre il termine della tratta (pk 27+523 circa) è ubicato presso la nuova stazione di ENNA.

Lo studio si è basato su rilievi geologici e geomorfologici di terreno e sull'interpretazione dei risultati della campagna di indagini geognostiche realizzata nel 2019 nell'ambito del Progetto Definitivo. Sono inoltre state analizzate e integrate nel modello geologico le indagini eseguite nell'ambito del Progetto Preliminare. Le interpretazioni contenute nel presente lavoro si appoggiano inoltre su una base dati bibliografica comprendente sia pubblicazioni scientifiche sia materiale cartografico, di cui è dato un elenco completo nel capitolo 0.

I rilievi geologici di terreno sono stati eseguiti nell'estate-autunno 2019 e hanno riguardato sia la revisione della cartografia geologica del progetto preliminare, sia lo studio di dettaglio delle zone di imbocco delle gallerie, delle finestre e della viabilità complementare, nonché delle tratte all'aperto, con particolare attenzione alle potenziali interferenze tra le opere e la dinamica fluviale e di versante.

Pur se oggetto di revisione, localmente anche integrale, in relazione alla disponibilità di nuove indagini, il progetto preliminare (nel seguito per brevità PP) ha costituito comunque una base di partenza per la costruzione del modello geologico di riferimento progettuale. Alcune parti derivate dal PP sono quindi state mantenute invariate nel presente rapporto, in quanto validate dagli studi eseguiti, in particolare

per quanto riguarda la descrizione delle unità affioranti sul terreno.

Ai rilievi in sito si è affiancata una revisione dello studio aereofotogrammetrico eseguito nel PP, supportata dall'analisi del modello digitale del terreno a maglia 2 m della Regione Sicilia derivato dal volo LIDAR ATA 2007-2008.

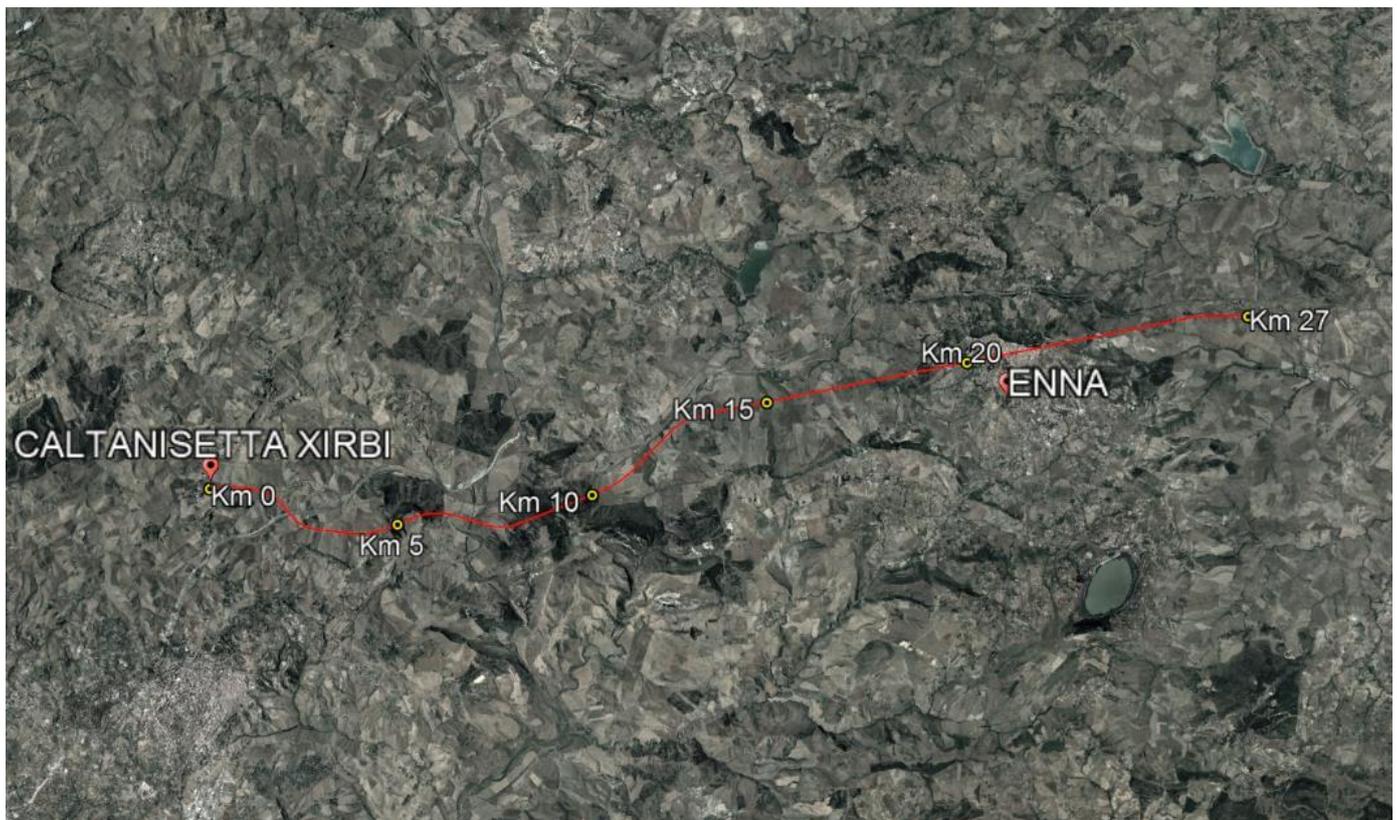


Figura 1 – Corografia dell'area di studio con individuazione della tratta ferroviaria in progetto (rosso).

## 2 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

L'area di studio si colloca nella porzione centrale della regione Sicilia, tra le province di Caltanissetta e Enna. In particolare, il tracciato ferroviario di progetto si sviluppa tra la stazione di Caltanissetta Xirbi e la nuova stazione di Enna, situata a est del nucleo urbano. I comuni attraversati dall'opera sono essenzialmente quelli dei due capoluoghi, anche se il tracciato lambisce, senza attraversarli, i territori comunali di S. Caterina Villarmosa e Villarosa. (cfr. Figura 1).

La lunghezza complessiva del tracciato in progetto è di circa 27.5 km, dei quali circa 19.3 in sotterraneo; è infatti prevista la realizzazione di tre gallerie naturali, in particolare GN01 (circa 2260 m), GN02 (circa 3730 m) e GN03 (circa 13400 m).

È prevista inoltre la realizzazione di una finestra per la galleria naturale GN02.

L'area interessata dallo sviluppo del tracciato si colloca all'interno del foglio della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50'000 nr. 631 (Caltanissetta).

Per quanto riguarda le basi topografiche disponibili l'area è rappresentata nella Carta Tecnica Regionale in scala 1:10'000, elementi n. 631030, 631040, 631050, 631060, 631070 e 632010. Per quanto concerne la Carta Topografica d'Italia alla scala 1:25'000 (IGM), l'area è rappresentata nelle Tavole 268-IV-SO (Xirbi), 268-I-SE (Calderari), 268-I-SO (Enna) e 268-IV-SE (Stazione di Imera).

Ai fini del completamento del Progetto Definitivo l'area è stata ricartografata nel 2019 mediante un volo LIDAR che ha coperto un corridoio di 500 m di lato rispetto al tracciato di progetto; tale base è stata utilizzata come topografia di riferimento per i rilievi geologici, per la localizzazione delle indagini geognostiche e per la redazione dei profili di progetto, costituendo quindi a tutti gli effetti la base topografica di riferimento progettuale.

Il tracciato di progetto si sviluppa attraverso settori del territorio la cui quota varia da un minimo di circa 280 m a un massimo di circa 990 m; la livelletta di progetto si colloca a quote comprese tra circa 318 m e circa 452 m.

Dal punto di vista morfologico, l'area di studio si caratterizza per la presenza di ampi rilievi collinari con estesi versanti, generalmente poco acclivi, corrispondenti ai settori di affioramento di terreni a

dominante componente pelitica e dalla presenza di pianure alluvionali relativamente strette. I rilievi maggiori, tra cui quelli su cui sorgono le città di Caltanissetta ed Enna, corrispondono a settori di affioramento di formazioni calcareo-marnose e calcarenitiche.

I maggiori corsi d'acqua che intersecano il tracciato ferroviario sono rappresentati, da ovest verso est, dai torrenti Arenella e Anghillà e dai fiumi Salso e Morello. Il reticolo idrografico secondario è costituito da una fitta rete di corsi d'acqua a carattere generalmente stagionale e/o torrentizio, che intersecano in diversi punti il tracciato ferroviario.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - DITTAINO</b> <b>LOTTO 4a: CALTANISSETTA XIRBI - ENNA</b>					
	<b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOMORFOLOGICA ED IDROGEOLOGICA</b>	<b>COMMESSA</b> RS3U	<b>LOTTO</b> 40	<b>CODIFICA</b> D69RG	<b>DOCUMENTO</b> GE 00 01 001	<b>REV.</b> C

### 3 DATI DI BASE

La base documentale del presente studio è costituita principalmente dagli elaborati del Progetto Preliminare della Linea Palermo-Catania, Lotto 4a, e in particolare dalla “Relazione geologica, geomorfologica ed idrogeologica” allegata al progetto, oltre che dalla documentazione in essa citata.

La cartografia geologica del Progetto Preliminare è stata revisionata e aggiornata sulla base dei nuovi rilievi di terreno e delle indagini geognostiche della campagna 2019, verificando gli elementi geologici (limiti delle formazioni, caratteristiche litostratigrafiche del substrato, stratigrafia dei depositi quaternari), strutturali (presenza e caratteristiche di faglie e sovrascorrimenti visibili) e geomorfologici (stato dei versanti, dissesti in atto e pregressi, dinamica fluviale).

Per quanto concerne i fenomeni franosi cartografati nell’ambito del Progetto Preliminare del tracciato del Lotto 4a e nei documenti del P.A.I. Regione Sicilia, si è provveduto a verificare e validare i diversi fenomeni e a eseguire modifiche e/o integrazioni puntuali inerenti la loro perimetrazione e caratterizzazione geomorfologica.

Le indagini geognostiche pregresse (campagne 2013 e 2018) o appositamente realizzate nell’ambito del presente studio (campagna 2019) consentono di supportare adeguatamente i dati derivati dai rilievi geologici di terreno, definendo un quadro di conoscenze adeguato in relazione alla specifica fase progettuale oggetto del presente rapporto, per quanto riguarda l’assetto litostratigrafico, geologico-strutturale, geomorfologico e idrogeologico dell’area interessata dal progetto.

#### 3.1 Attività di rilevamento geologico geomorfologico

Il rilevamento di terreno svolto nel 2019 ha avuto lo scopo di verificare in dettaglio l’assetto geologico-geomorfologico delle zone attraversate dalla linea ferroviaria, il cui tracciato è stato individuato in sede di PP con il preciso obiettivo di privilegiare le zone meno critiche dal punto di vista geomorfologico, evitando le aree interessate da dissesti importanti.

L’analisi dei singoli dissesti si è basata su un rilievo geomorfologico di dettaglio volto a individuare tutti gli elementi necessari alla comprensione dei fenomeni (meccanismo, stato di attività, estensione areale e in profondità), supportato dall’analisi dei dati delle indagini realizzate nella campagna 2019, in

particolare sondaggi a carotaggio continuo, inclinometri, prove down-hole e stendimenti sismici (MASW e linee a rifrazione).

È stato quindi possibile abbinare alle informazioni del rilevamento geologico anche dati di profondità di tipo quantitativo.

Nel corso dei rilievi di terreno sono stati effettuati diversi stop geologici finalizzati all'aggiornamento e alla verifica della cartografia geologica dell'area. Per l'ubicazione degli stop geologici e una sintesi descrittiva si rimanda alle tavole della carta geologico-geomorfologica e alle schede di rilevamento allegate.

### 3.2 Indagini in sito

#### 3.2.1 Indagini precedenti - Italferr 2018

Nell'ambito della campagna di indagini geognostiche del 2018, eseguita a supporto del Progetto Preliminare, sono stati eseguiti 10 sondaggi a carotaggio continuo, la cui posizione è riportata in Figura 2. Per l'ubicazione planimetrica si rimanda alla cartografia allegata al presente studio.

sigla	pk	Coordinate Monte Mario/Italy 2		quota m s.l.m.	strumentazione	prof m	C	prove in foro			
		X	Y					SPT	P	D	Ps
4S01	1+334	2438013	4154711	383.6	Piezometro	30.0	4	9	2	0	0
4S02	2+398	2438698	4153877	396.2	Piezometro	30.0	4	9	2	0	2
4S03	3+853	2440167	4153673	373.3	Piezometro	30.0	5	9	2	0	2
4S04	6+303	2442505	4153910	294.7	Piezometro	30.0	3	9	2	0	0
4S05	8+886	2444916	4154373	397.1	Piezometro	85.0	6	0	2	0	2
4S06	11+459	2447245	4155341	328.3	Piezometro	30.0	3	9	2	0	0
4S07	13+020	2448305	4156608	333.5	Piezometro	30.0	5	8	2	0	0
4S08	14+618	2449906	4157048	406.1	Piezometro	75.0	4	0	2	0	2
4S09	25+591	2460760	4158701	502.4	Piezometro	65.0	5	0	2	0	2
4S10	27+052	2462213	4158765	447.3	Non attrezzato	30.0	6	9	2	0	0
Totale							45	62	20	0	10

Figura 2 - Quadro di sintesi della campagna geognostica Italferr 2018.

#### 3.2.2 Campagna di indagini 2019-2020

Nell'ambito delle attività di indagine correlate alla progettazione definitiva è stata realizzata una nuova

campagna di indagini (2019-2020) comprendente sondaggi a carotaggio continuo, installazione di piezometri e inclinometri, e indagini geofisiche di superficie.

Nei fori di sondaggio sono state eseguite inoltre prove down-hole, prove SPT, prove pressiometriche, e prove di permeabilità tipo Lefranc e Lugeon ed è stato inoltre effettuato il rilievo dei gas in fase di perforazione. Sono stati altresì prelevati campioni rimaneggiati e indisturbati, inviati a laboratorio per prove geotecniche.

Nelle tabelle seguenti è riportato il quadro di sintesi delle indagini eseguite nella campagna 2019, con indicazione per ogni sondaggio della profondità raggiunta, dei campioni prelevati, delle prove in foro eseguite e della strumentazione installata.

LOTTO 4 - SONDAGGI DI LINEA											
ID	Profondità (m)	Rilievo gas	Prove permeabilità	Prove pressiometriche e dilatometriche	Piezometro			Prova Down Hole	MASW	HVSR	Inclinometro
					Norton	Casagrande	elettrico				
4a-S01	40		1	1		1			1	1	
4a-S02	40		1	1				1			
4a-S03	40		1	1		1					
4a-S04	40		1	1		1					
4a-S06	40		1								1
4a-S06bis	10					1					
4a-S07	40		1	1		1					
4a-S08	40		1	1		1					
4a-S09	40		1								1
4a-S11	40		1	1		1					
4a-S12	40		1	1		1					
4a-S13	40		1	1		1			1	1	
4a-S14	40		1	1		1					
4a-S15	40		1					1			
4a-S16	40		1	1		1			1	1	
4a-S17	40		1	1				1			
4a-GN1-S01	40	1	1	1		1			1	1	
4a-GN1-S02	85		1	1		1					
4a-GN1-S03	140	1	1	1		1					
4a-GN1-S04	135	1	1	1		1					
4a-GN1-S05	95					1					
4a-GN1-S06	30			1		1					
4a-GN1-S06a	30							1			
4a-GN1-S06b	30										1
4a-SIGN1	35										
4a-SIGN1a	35										1
4a-SIGN1b	20					1					
4a-S20	40		1	1		1					

LOTTO 4 - SONDAGGI DI LINEA											
ID	Profondità (m)	Rilievo gas	Prove permeabilità	Prove pressio-metriche e dilato-metriche	Piezometro			Prova Down Hole	MASW	HVSR	Inclino-metro
					Norton	Casagrande	elettrico				
4a-S21	40		1					1			
4a-S22	40		1			1					
4a-S24	40		1					1			
4a-GN2-S07	40	1	1	1		1					
4a-GN2-S07a	40							1			
4a-GN2-S07b	40										1
4a-GN2-S07bis	50	1		1							
4a-GN2-S09	70		1			1					
4a-GN2-S10	30					1					
4a-GN2-S10a	30										1
4a-GN2-S10b	30							1			
4a-S26	40		1	1		1					
4a-S27	40		1						1	1	
4a-S28	40		1			1					
4a-S28a	20										
4a-S29	40		1			1			1	1	
4a-GN3-S11	30	1	1	1		1					
4a-GN3-S11a	30							1			
4a-GN3-S12	75			1		1					
4a-GN3-S13	80		1								
4a-GN3-S13a	20					1					
4a-GN3-S14	85		1	1		1					
4a-GN3-S15	265		1	1		1	1				
4a-GN3-S16	280	1	1	1		1	1				
4a-GN3-S17	170		1	1		1	1				
4a-GN3-S19	35		1	1		1			1	1	
4a-GN3-S19b	30							1			
4a-S30	40			1		1					
4a-S31	30		1								
4a-S32	30		1			1					
4a-S33	40		1			1			1	1	

LOTTO 4 - SONDAGGI VIABILITÀ											
ID	Profondità (m)	Rilievo gas	Prove permeabilità	Prove pressiometriche e dilatometriche	Piezometro			Prova Down Hole	MASW	HVSR	Inclinometro
					Norton	Casagrande	elettrico				
4a-V01	40		1						1	1	
4aV02	30		1	1				1			
4aV03	30		1	1	1						
4aV05	30		1	1		1			1	1	
4aV06	30		1			1					
4a-V04	30		1		1				1	1	
4aV07	30										
4aV08	40			1		1					
4aV09	40							1			
4aV10	40										
4aV11	50							1	1	1	
4aV12	40							1			
4aV12a	12					1					
4a SI 01	30					1					
4a SI 01bis	30					1					
4a SI 02	30		1		1						
4a SI 03	30		1			1					
4a SI 04	30					1					
4a SI 06	30										1
4a SI 06a	18					1					
4a SI 07	30										1
4a SI 07a	15					1					
4a SI 08	30										1
4a SI 08a	18					1					
4a SI 08b	6					1					
4aV14	40							1			
4aV15	40										1
4aV15a	20					1					
4aV16	40										1
4aV16a	20					1					
4aV17	30				1						

LOTTO 4 - SONDAGGI FINESTRE											
ID	Profondità (m)	Rilievo gas	Prove permeabilità	Prove pressiometriche e dilatometriche	Piezometro			Prova Down Hole	MASW	HVSR	Inclinometro
					Norton	Casagrande	elettrico				
4a-F01	30		1	1		1					
4a-F01a	30								1		
4a-F01b	30										1
4a-F02	45		1	1		1					

## 4 INQUADRAMENTO GEOLOGICO REGIONALE

### 4.1 Contesto generale dell'Appennino meridionale

La Sicilia rappresenta un segmento della Catena Appenninico-Maghrebide in cui affiorano unità tettoniche di diversa attribuzione paleogeografica, che collega l'Appennino al Nordafrica attraverso l'Arco Calabro-Peloritano (Figura 3).

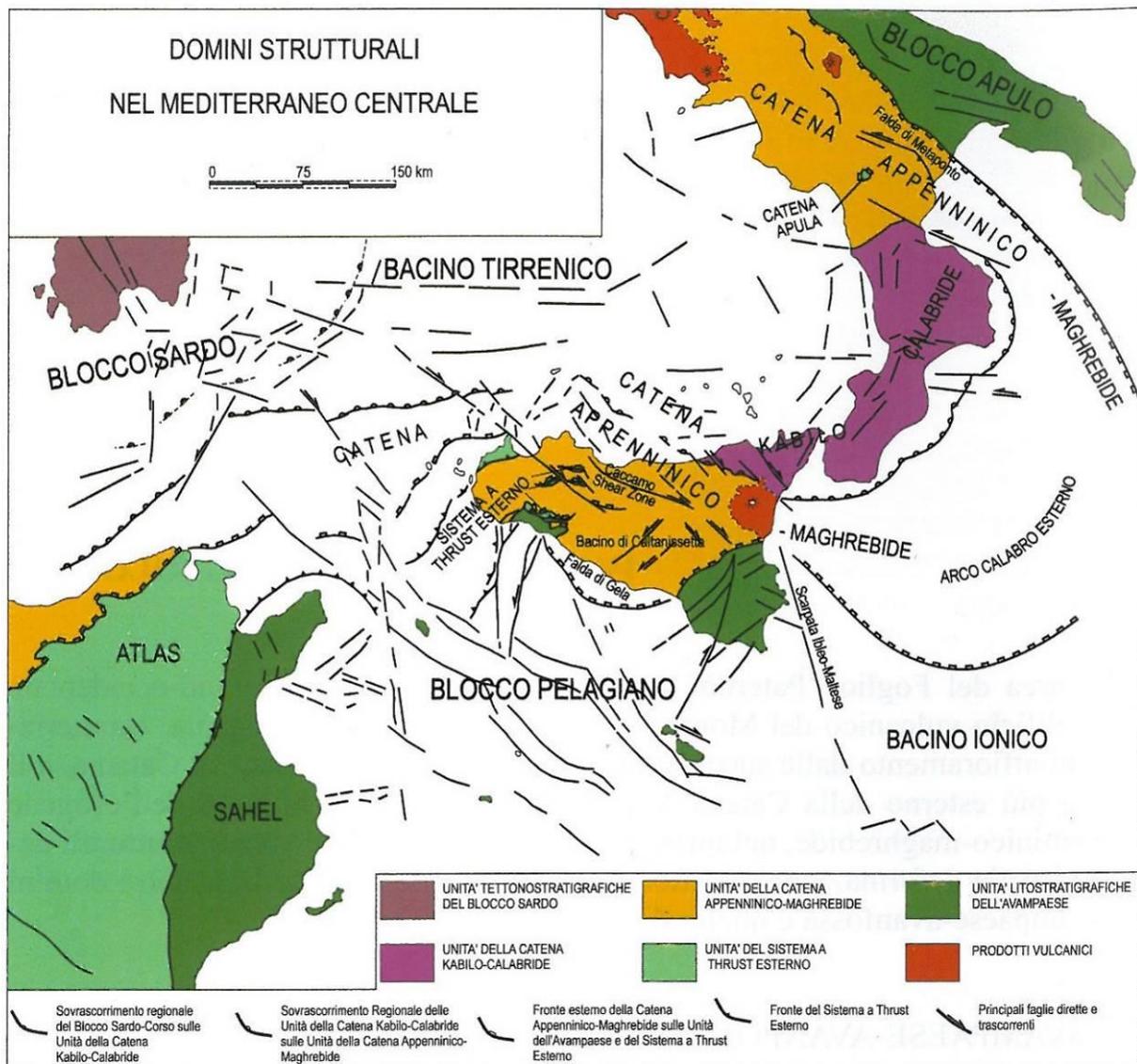


Figura 3 – Domini strutturali nel Mediterraneo centrale (da Lentini et al. 1995, modificato).

Nel Mediterraneo centrale si individuano essenzialmente tre grandi domini tettonici: i) il dominio di avampaese, ii) il dominio orogenico, iii) il dominio di hinterland.

- Il dominio di avampaese comprende le aree indeformate della placca nordafricana rappresentate dal cosiddetto Blocco Pelagiano (crosta continentale e relative coperture) e dal Bacino Ionico (crosta oceanica antica in subduzione; Figura 3).
- Il dominio orogenico comprende tre sistemi tettonici coalescenti: il sistema dei thrust esterni (o sistema a thrust siculo-pelagiano), il sistema, o catena, Appenninico-Maghrebide e il sistema, o catena, Kabilo-Calabride (Figura 3).
- Il dominio di hinterland è rappresentato dal Blocco Sardo-Corso e dal Bacino Tirrenico (Figura 3); quest'ultimo si è aperto a partire dal Serravalliano (fase di rifting continentale) ed è impostato, nella parte centrale, su crosta oceanica generatasi nel Plio-Quaternario.

I precedenti domini sono in parte sommersi al di sotto del mare e in parte affiorano nelle terre emerse che costituiscono la Sicilia e le isole minori adiacenti. Per quanto riguarda il territorio siculo, gli schemi di *Figura 3*, *Figura 4* e *Figura 5*, permettono di delineare la distribuzione di due dei tre domini sopra descritti, ovvero quello di avampaese e quello orogenico; da sud a nord si distinguono:

- l'**Avampaese Ibleo** (*dominio di avampaese*), affiorante nel settore sud-orientale dell'isola e caratterizzato da una potente successione carbonatica meso-cenozoica, con ripetute intercalazioni di vulcaniti basiche (Patacca et al. 1979; Lentini et al. 1984);
- l'**Avanfossa Gela-Catania** (limite tra il *dominio orogenico* e *dominio di avampaese*), affiorante nella porzione orientale della Sicilia e costituita da una spessa successione sedimentaria tardo-cenozoica, parzialmente sovrascorsa dalle coltri alloctone del sistema frontale della catena (Ogniben 1969; Di Geronimo et al. 1978; Lentini 1982; Torelli et al. 1998);
- la **Catena Appenninico-Maghrebide**, affiorante nella parte centro-settentrionale dell'isola, costituita da sequenze meso-cenozoiche sia di piattaforma sia di bacino, con le relative coperture flyschoidi mioceniche (Ogniben 1969; Amodio-Morelli et al. 1976; Mostardini & Merlini 1986; Cello et al. 1989; Catalano et al. 1996; Monaco et al. 1998);

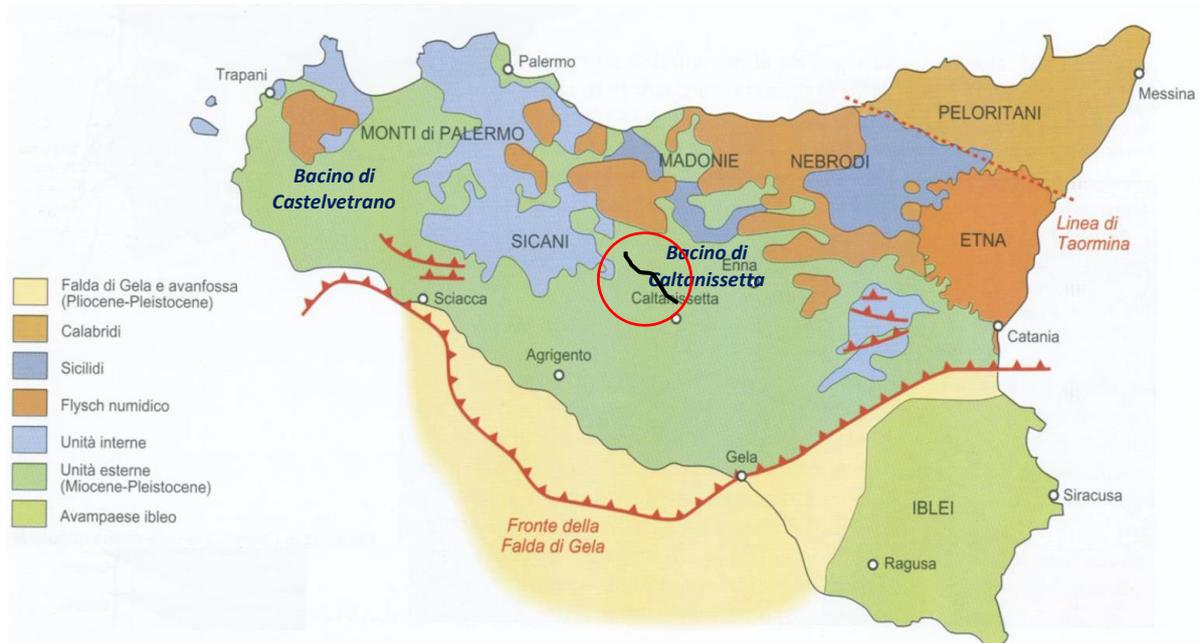


Figura 4 – Schema tettonico della Sicilia (da Bosellini, 2005).

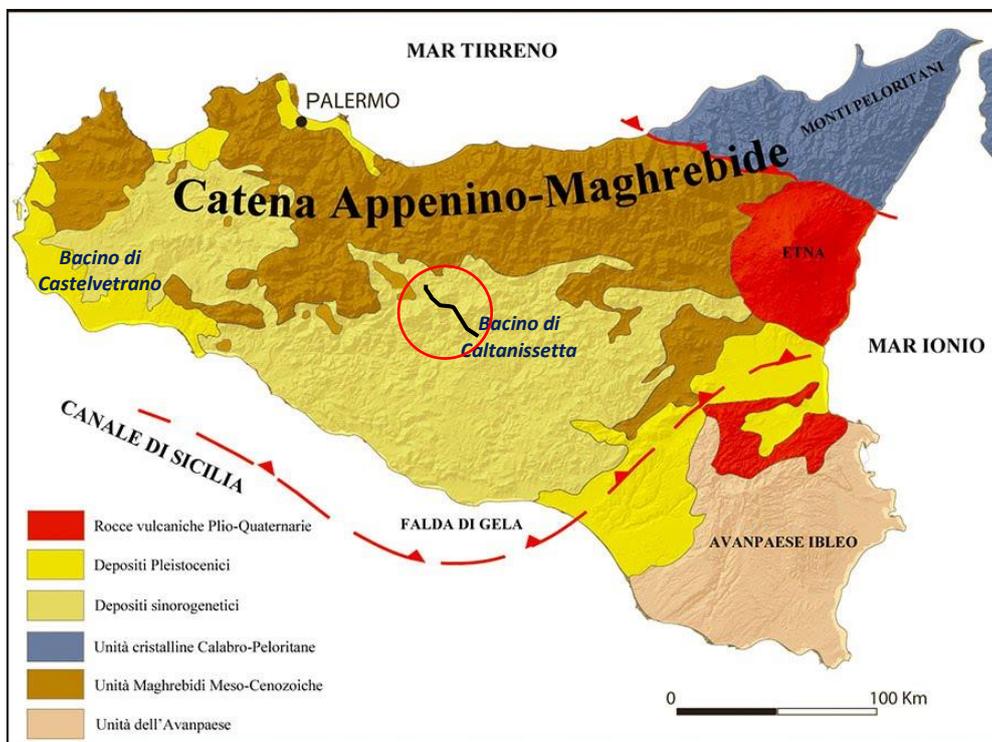


Figura 5 – Schema tettonico della Sicilia (da <https://www.liceolussana.org/Sicilia19/2019/03/15/geografia-di-pantalica/>).

- la **Catena Kabilo-Calabride**, affiorante nel settore nord-orientale e caratterizzata da un basamento con metamorfiti di vario grado e con le relative coperture sedimentarie meso-cenozoiche, cui si associano delle unità ofiolitiche riferibili al cosiddetto Complesso Liguride (Ogniben 1969; Amodio-Morelli et al. 1976; Bonardi et al. 1982; Tansi et al. 2007).

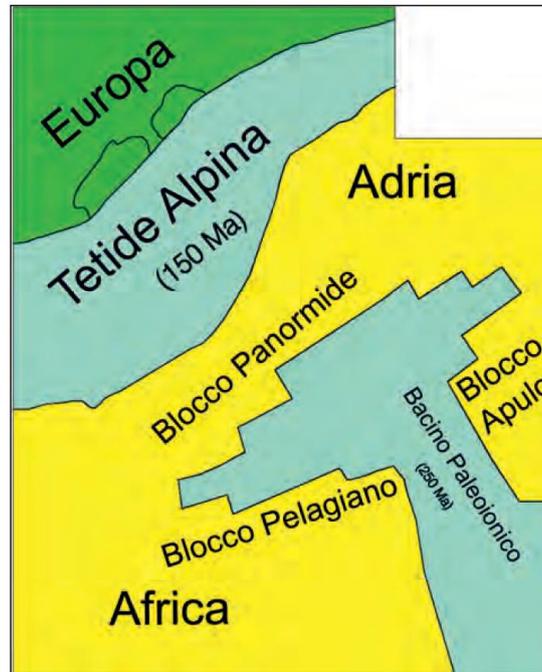
L'area di progetto è situata nel settore centrale della regione, all'interno della Catena Appenninico-Maghrebide (Figura 4 e Figura 5).

### a. La Catena Appenninico-Maghrebide

#### i. *Evoluzione generale*

La Catena Appenninico-Maghrebide è costituita da un sistema a thrust, che nel tratto siculo-maghrebide hanno vergenza verso SE e in quello appenninico verso ENE (Monaco et al. 2000; Carbone et al. 2010).

Il sistema comprende sequenze meso-cenozoiche sia di piattaforma sia di bacino, con spesse coperture flyschoidi mioceniche, probabilmente appartenenti al paleo-margine afro-adriatico (Ogniben 1969; Amodio-Morelli et al. 1976; Mostardini & Merlini 1986; Catalano et al. 1996; Monaco et al. 1998). Lo schema di *Figura 6* è utile per chiarire la possibile situazione paleogeografica al Giurassico superiore, da cui successivamente si sono sviluppati gli elementi tettonostratigrafici della Catena Appenninico-Maghrebide.



*Figura 6 – Schema dell'assetto paleogeografico riferito al Giurassico superiore, da cui evolverà successivamente la catena appenninica centro-meridionale (Lentini et al., 2004).*

La catena è costituita da una serie di falde più o meno alloctone di origine interna (Tetide, Blocco Panormide, parte del Bacino Paleoiónico), sovrapposte a un sistema di thrust più esterno che coinvolge elementi originariamente di pertinenza dell'avampaese (Blocco Pelagiano; Carbone et al. 2010).

Le falde di ricoprimento si sono originate a partire dal Miocene inferiore, in concomitanza con l'inizio della collisione continentale tra il margine europeo e quello afro-adriatico. In un periodo precoce rispetto alla collisione vera e propria (Oligocene superiore) si è verificato il sovrascorrimento verso sud delle Unità Kabilo-Calabridi e solo successivamente quello delle falde anzidette, che costituiscono la parte passiva della Catena Appenninico-Maghrebide, in quanto fanno parte di una catena più antica, detta appunto Kabilo-Calabride (cfr. paragrafo 4.1). Le Unità Kabilo-Calabridi (Peloritani in *Figura 4* e *Figura 5*) sono infatti generalmente interpretate come la testimonianza di una catena orogenetica sviluppatasi in epoca cretaceo-eocenica, che rappresentava la prosecuzione verso sud-ovest della Catena Alpina s.s. Tale catena era connessa alla subduzione intraoceanica lungo il ramo più occidentale del Bacino Tetideo. Il loro sovrascorrimento verso sud a partire dall'Oligocene superiore, al di sopra di un avampaese da cui originerà la futura Catena Appenninico-Maghrebide, è legato all'inversione della

subduzione all'interno del Bacino Tetideo da SE (fase eoalpina) a NW (fase balearica o prima fase appenninica; Finetti et al. 2005)

Le falde di ricoprimento originatesi dopo la messa in posto della Catena Kabilo-Calabride, facenti quindi parte della Catena Appenninico-Maghrebide vera e propria, sono principalmente costituite dalle unità note come Sicilidi (§ b.i.1; *Figura 4*); esse ricoprono la posizione strutturalmente più elevata dell'edificio appenninico e sono attribuite alla porzione del Bacino della Tetide non subdotta durante la fase eoalpina, che separava il margine europeo dal blocco paleoafricano all'inizio dell'inversione del piano di subduzione (Finetti et al. 2005; Carbone et al. 2010). Le Sicilidi sono quindi interpretate come i resti del cuneo di accrezione oceanico della fase orogenica balearica, sovrascorso sulle unità del Blocco Panormide (cfr. *Figura 6*) all'epoca della collisione continentale (chiusura definitiva del Bacino Tetideo) e rimobilizzato anche durante le fasi orogeniche successive, fino al raggiungimento dell'attuale fronte della catena.

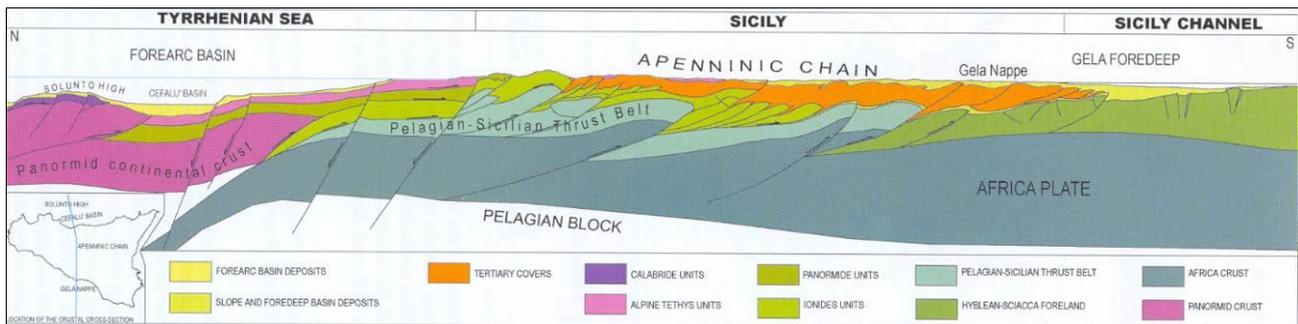
A partire dal Miocene medio-superiore, in concomitanza con l'inizio dell'apertura del Bacino Tirrenico a nord della catena formatasi nella fase balearica, si è instaurata anche la subduzione della crosta oceanica del Bacino Paleoionico e dei suoi bacini satellite, in corrispondenza della sua terminazione settentrionale (*Figura 6*). Tali eventi hanno portato all'instaurarsi di una nuova fase orogenetica, detta fase tirrenica, all'inizio della quale si è avuta la mobilizzazione delle coperture panormidi, che sono sovrascorse sulle coperture dei bacini ionici (Ionidi) e successivamente anche di questi ultimi, che sono sovrascorse sull'avampaese africano, trasportando passivamente anche le Unità Kabilo-Calabridi e le Sicilidi.

Negli stadi tardivi della fase tirrenica, a partire dal Miocene superiore, negli scollamenti sono state coinvolte anche le coperture dell'avampaese africano e si è così originato il Sistema dei Thrust Esterni, noto anche come Sistema a Thrust Siculo-Pelagiano (*Figura 3*, *Figura 7*). Il Sistema a Thrust Esterno coinvolge anche i sedimenti Tortoniani e post-Tortoniani che si sono depositi in bacini sviluppatasi sul fronte della prima catena formatasi nella fase di deformazione tirrenica precoce langhiano-serravalliana (messa in posto delle falde di pertinenza panormide e ionide).

L'evoluzione più recente pleistocenico-aternaria ha portato alla duplicazione di parte dei depositi di avanfossa da parte di un sovrascorrimento che individua la cosiddetta Falda di Gela (*Figura 4* e *Figura 5*),

che attualmente rappresenta l'elemento strutturale più esterno di tutto il complesso appenninico, suturato da depositi quaternari (Finetti et al. 2005).

L'architettura finale derivante dagli eventi descritti è visibile nella sezione di *Figura 7*.



*Figura 7 – Profilo schematico mostrante l'architettura strutturale dell'orogene siciliano (modificato da Finetti et al., 2015).*

**ii.           Precisioni sull'evoluzione tarso- post-tortoniana: assetto del Bacino di Caltanissetta**

L'evoluzione post-tortoniana dell'area sicula riveste una particolare importanza per il progetto infrastrutturale oggetto di questo rapporto, in quanto esso si colloca in uno dei settori in cui i depositi tortoniani e post-tortoniani hanno il loro maggiore sviluppo. Si tratta prevalentemente di depositi sinorogenici, successivamente coinvolti nella deformazione. Le porzioni più esterne della Catena Appenninico-Maghrebide, in cui prevalgono tali successioni di depositi sinorogenici sono rappresentate da due zone che sono state identificate con dei bacini deposizionali ben individuati, denominati "Bacino di Castelvetro" (verso ovest, talora anche detto Bacino del Belice) e "Bacino di Caltanissetta" (verso est), separati dalla dorsale dei Monti Sicani (*Figura 4, Figura 5*).

Il termine "bacino" viene utilizzato per questi due settori della catena attuale in ragione del fatto che essi sono costituiti da potenti successioni sedimentarie depositatesi all'interno di depressioni localizzate a sud della paleocatena Appenninico-Maghrebide legata alla fase tirrenica precoce (Miocene medio; cfr. paragrafo 4.1)

I depositi del Bacino di Caltanissetta, all'interno dei quali si sviluppa gran parte del tracciato di progetto, sono oggi distribuiti in un areale delimitato a nord dai Monti di Trabia e di Termini Imerese, e dalle dorsali delle Madonie e dei Nebrodi; verso ovest il confine con i Monti Sicani è rappresentato da un

importante elemento tettonico localizzato lungo la Valle del F. Platani; verso est l'areale del bacino si estende a comprendere l'intero settore centro-meridionale dell'Isola, attraverso l'area di Enna-Caltanissetta fino a Centuripe-M. Judica, e verso sud ai settori di Agrigento-Licata, fino ad includere il cuneo frontale della Catena Appenninico-Maghrebide (Falda di Gela).

Il Bacino di Caltanissetta, un tempo ritenuto rappresentare una profonda depressione, delimitata da faglie dirette e riempita da vari chilometri di olistostromi, come già in parte chiarito all'inizio del paragrafo, si è in realtà sviluppato al fronte (e in parte in ricoprimento) di un sistema a thrust regolare e geometricamente ben definito, parte della Catena Appenninico-Maghrebide, formato da Unità Sicilidi, Panormidi e Ionidi scollatesi dai relativi basamenti.

Nel Tortoniano superiore il fronte della catena a sovrascorrimenti Appenninico-Maghrebide era localizzato nell'area di deposizione delle diverse facies di sedimenti silicoclastici della formazione di Terravecchia, il principale corpo sedimentario sinorogenico di interesse per questo progetto. La sedimentazione era controllata non solo dall'evoluzione tettonica locale (innalzamento locale di anticlinali di sovrascorrimento in una regione in subsidenza flessurale) ma anche da variazioni del livello del mare.

Successivamente, nel Messiniano, è iniziata all'interno del Bacino di Caltanissetta la deposizione di evaporiti, la quale è stata influenzata dalla paleogeografia ereditata dalla situazione del tardo Tortoniano. Il bordo dei paleorilievi, rappresentati soprattutto da anticlinali di sovrascorrimento, erano sede di deposizione di facies evaporitiche marginali (*patch reefs*, Calcarea di Base) mentre i depocentri sub-bacinali sviluppati in un contesto di sinforme erano caratterizzati dalla deposizione di diatomiti, argille e potenti successioni di evaporiti.

### **b. Evoluzione tettonostratigrafica della catena Appenninico-Maghrebide**

In questo paragrafo si forniscono alcuni approfondimenti sull'evoluzione tettonostratigrafica della Catena Appenninico-Maghrebide, utili a inquadrare il contesto dell'area di progetto. Pur senza entrare nei dettagli delle varie fasi tettoniche e deposizionali che si sono succedute esse verranno di seguito sinteticamente ricordate. Un riferimento particolare verrà fatto alle unità tettonostratigrafiche che costituiscono l'area di progetto, ovvero le Sicilidi, il Flysch Numidico e i depositi sinorogenici tortoniani e

post-tortoniani

*i. Evoluzione dal Giurassico al Miocene medio (Langhiano)*

Durante il Giurassico, con il processo di rifting continentale che porta all'apertura del settore meridionale dell'oceano della Tetide, si individua un importante bacino intra-cratonico a sedimentazione prevalentemente terrigena, denominato Bacino di Lercara (Scandone et al. 1974; Catalano et al. 1996). Questo dominio evolve successivamente in due distinte unità paleogeografiche, rappresentate dal Bacino Imerese a nord e dal Bacino Sicano a sud, separati dalla Piattaforma Nord-Trapanese, a sua volta passante verso sud al dominio paleogeografico dei *Seamounts* Trapanesi (*Figura 8*; Scandone et al. 1974; Bonardi et al. 1976). Si tratta sostanzialmente di bacini di pertinenza del Bacino della Tetide Ionica (*Figura 6*).

Tra il Giurassico e l'Oligocene inferiore si verifica un processo di dissezione in blocchi della piattaforma carbonatica Panormide, collocata tra la Tetide alpina e la Tetide ionica, a nord dei precedenti domini paleogeografici (Scandone et al. 1974).

La deformazione dei domini più interni a partire dall'Oligocene superiore (fase balearica precoce; cfr. 4.1) porta alla formazione di un bacino di avanfossa primordiale, collocato al bordo del margine africano. L'età di questo bacino a sedimentazione prevalentemente terrigena, noto come "Bacino Numidico", va dall'Oligocene superiore al Miocene inferiore (Scandone et al. 1974; Bonardi et al. 1982; Bianchi et al. 1987).

I più antichi sedimenti di avanfossa coinvolti nella deformazione regionale (Benomran et al., 1987) sono le argilliti e argille varicolori di età cretacico-oligocenica e le torbiditi del Flysch Numidico (§ 0), di età da tardo-oligocenica a tardo-burdigaliana.

Tra l'Aquitano e il Langhiano la sedimentazione nel Bacino Numidico, ovvero nell'avanfossa della catena appenninica che si sta formando a nord (fase balearica), ha carattere regressivo, con depositi prevalentemente pelitici che caratterizzano la porzione sommitale di tutte le successioni (Bianchi et al. 1987; Lentini et al. 1991). Nello stesso tempo, nel Bacino Sicano (*Figura 8*) si instaurano le condizioni per una sedimentazione di ambiente profondo (Catalano et al. 1996).

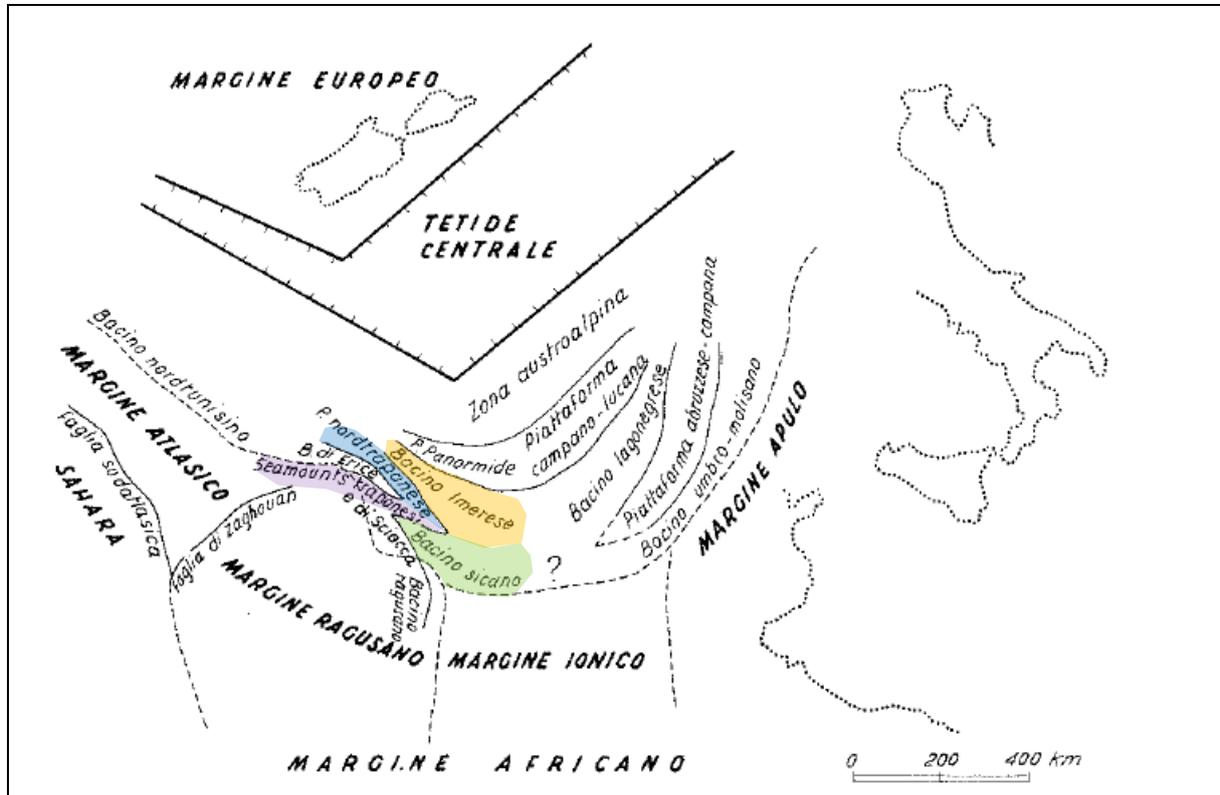


Figura 8 – Ricostruzione palinspastica della Tetide centrale nel Giurassico (da Scandone et al. 1974, modificato; rappresentazione alternativa e di maggior dettaglio rispetto a quella di Figura 6).

Subito dopo la deposizione delle torbiditi del Flysch Numidico, nel Langhiano, le sequenze di piattaforma e di bacino mesozoiche deposte sul margine passivo africano sovrascorrono verso sud, sviluppando il segmento siculo dell'arco Appenninico-Maghrebide (fase tirrenica iniziale; cfr. paragrafo 4.1). I terreni più interni (settentrionali) della Piattaforma Panormide sovrascorrono in direzione sud su quelli più esterni del Bacino Imerese e questi ultimi sovrascorrono a loro volta sugli elementi più esterni dello stesso bacino (Bianchi et al. 1987).

Su questa sequenza di unità deformate si depositano in discordanza depositi pelagici ed emipelagici del Langhiano superiore, mentre contemporaneamente le Unità Sicilidi sovrascorrono sull'insieme di falde sopra descritto (Bianchi et al. 1987; Catalano et al. 1996; Bello et al. 2000).

### 1. Le Unità Sicilidi

Nell'edificio a falde della catena il Complesso Sicilide di Ogniben (1960) raggruppava, nella sua accezione

originaria, le successioni di bacino alloctone e in posizione strutturale più elevata.

La prima fase deformativa che ha interessato tali unità nell’Oligo-Miocene, risulta particolarmente precoce rispetto alle fasi che coinvolgeranno via via le aree più esterne. A causa delle ripetute fasi tettoniche sovrapposte, attive fino al Quaternario e associate a una notevole mobilità tettonica, le Unità Sicilidi si sono progressivamente estese verso sud fino a raggiungere il cuneo frontale della catena (Figura 9), il che ha talora indotto ad assegnare erroneamente tali formazioni ad aree paleogeografiche esterne. Tuttavia, l’età precoce di questi depositi flyschoidi, testimoni delle prime fasi tettoniche e la loro posizione strutturale al di sopra di coperture terrigene recenti, consentono di collocare queste unità nell’originaria posizione paleogeografica e cioè relativamente interna.

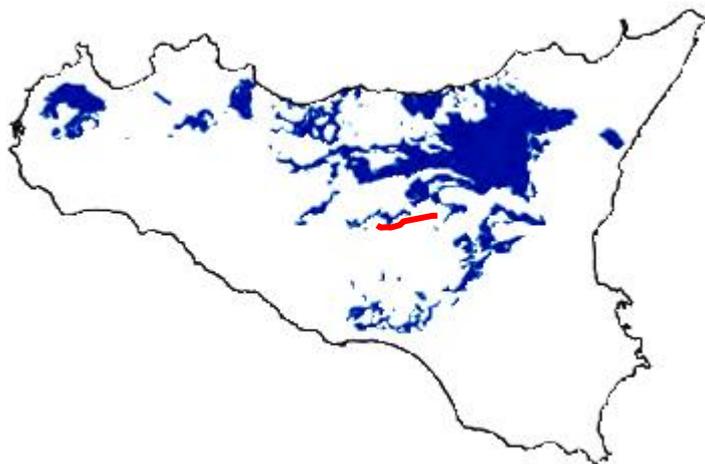


Figura 9 - Areale di affioramento delle Unità Sicilidi s.l. (Lentini & Carbone, 2014).

Nel tempo, pur mantenendo inalterato il significato e la posizione strutturale assegnati da Ogniben (1960), sono intervenute variazioni nelle attribuzioni cronologiche e sono state riferite al complesso delle Sicilidi unità prima assegnate ad altri complessi (ad es. il Flysch Numidico – membro di Nicosia).

Attualmente è confermato che si tratta di successioni sedimentarie che vanno dal Tortonico al Miocene inferiore, successivamente smembrate in unità o sottounità tettoniche, in parte sature dalle formazioni flyschoidi tardo-orogeniche del Miocene inferiore-medio.

Le litofacies tipiche sono rappresentate dalle Argille Scagliose e/o Varicolori estesamente affioranti in prevalenza nella parte settentrionale e centro-meridionale dell’Isola.

## 2. *Il Flysch Numidico*

Il Flysch Numidico è la formazione maggiormente rappresentata in Sicilia, essendo presente in differenti domini paleogeografici ed è caratterizzata da un notevole spessore (> 3'000 m) e da una grande estensione laterale (oltre 2'000 km, da Gibilterra all'Appennino meridionale).

Dal punto di vista litologico si tratta di un'alternanza di argille brune e quarzareniti, talora grossolane, in strati e banchi che nella parte alta prevalgono sulle peliti. L'intervallo basale a dominante componente argillosa è datato all'Oligocene superiore, mentre quello quarzarenitico è datato all'Aquitaniiano-Burdigaliano. Le quarzareniti passano più o meno gradualmente, verso l'alto, a depositi prevalentemente pelitico-marnosi del Burdigaliano superiore-Langhiano (formazione Tavernola e Marne di Castelbuono).

Il termine "Flysch Numidico" è in realtà poco appropriato e ha più che altro valenza storica, in quanto questa formazione non è correlata a una fascia orogenica e non ha le caratteristiche tipiche dei flysch. La sua collocazione paleogeografica e paleotettonica nell'ambito dell'orogene è stata oggetto di notevoli controversie nella letteratura geologica, che si sono tradotte in una serie di suddivisioni e denominazioni di volta in volta diverse.

Oggi appare accertato come questa formazione costituisca la copertura oligo-miocenica di successioni mesozoico-terziarie distribuite in diversi contesti paleogeografici e come il suo considerevole spessore sia in realtà determinato da ripetizioni tettoniche, con più orizzonti strutturali sovrapposti che isolano unità tettoniche distinte con nomi diversi.

Bianchi et al. (1987) hanno ordinato le diverse scaglie del Flysch Numidico, scollate dal loro originario substrato mesozoico, dal basso verso l'alto e (presumibilmente) da quelle più esterne a quelle più interne, nel modo seguente:

1. Unità Gagliano, nota solo in sottosuolo e relativamente radicata sul substrato di tipo imerese, costituisce la roccia serbatoio dei campi gassiferi di Gagliano (Enna).
2. Unità Serra del Bosco: forma delle culminazioni a nord di Leonforte (Enna); il tetto dell'unità include marne e quarzareniti glauconitiche del Langhiano che la apparenterebbero con le successioni terrigene delle Unità Maghrebidi più esterne (Unità di M. Judica).

3. Unità Maragone (“membro di Geraci Siculo” di Ogniben, 1960), affiorante estesamente nella dorsale dei Nebrodi, costituisce la copertura delle unità carbonatiche panormidi.
4. Unità di M. Salici: è costituita nella zona tipo (provincia di Enna), da circa 500 m di prevalenti argille nerastre passanti verso l’alto ad alcune centinaia di metri di quarzareniti in grossi banchi, con un intervallo apicale di 200 m ca. di argille marnose del Langhiano inferiore (Marne di Gagliano).
5. Unità di Nicosia, a composizione mista litarenitico-quarzosa, occupa una posizione strutturale più elevata e si rinviene associata alle Unità Sicilidi.

Revisioni stratigrafiche e strutturali più recenti (Bello et al., 2000) hanno consentito di identificare un vasto orizzonte strutturale basale costituito da scaglie embricate del flysch numidico dell’Unità di Maragone (equivalente all’Unità di Gagliano della zona di Enna), sul quale appoggiano tettonicamente unità numidiche completamente flottanti (Unità di Nicosia e M. Salici-M. Castelli).

Nella Carta Geologica della Sicilia in scala 1:250’000, Lentini & Carbone (2014), riprendendo una precedente sintesi del quadro strutturale, distinguono:

- un orizzonte strutturale più profondo denominato “Flysch Numidico esterno”, formato da scaglie embricate più o meno solidali con la piattaforma carbonatica panormide;
- un soprastante orizzonte strutturale ampiamente alloctono, che costituiva la parziale copertura della Tetide Alpina e che forma le sottounità di Nicosia e di M. Salici, conservate nelle depressioni strutturali della catena e in genere direttamente ricoperte dai depositi tortoniani (formazione Terravecchia).

Nell’ambito del Progetto CARG l’unità numidica di Nicosia, più interna e geometricamente superiore, ha assunto la denominazione di “Flysch Numidico - membro di Nicosia”, mentre l’unità di M. Salici - M. Castelli è stata denominata “Flysch Numidico - membro di M. Salici” (Serv. Geol. It., 2010a; 2012a; 2013e). Al Flysch Numidico esterno, strutturalmente più profondo, è stato assegnato il termine di “membro di Portella Colla” per l’intervallo oligocenico, mentre le quarzareniti del Miocene inferiore sono raggruppate sotto il “membro di Geraci Siculo” (corrispondente all’Unità Maragone di Bianchi et al., 1987), a prescindere che si tratti di copertura imerese o panormide.

Le successioni numidiche di Nicosia e di M. Salici, maggiormente coinvolte nel processo orogenico, sarebbero quindi totalmente sradicate, sovrapponendosi ad altre successioni di Flysch Numidico (membro di Geraci Siculo), parzialmente scollate ma nel complesso solidali con diversi substrati mesozoici, che culminano nelle dorsali delle Madonie e dei Nebrodi.

Lentini & Carbone (2014) riferiscono il membro di Geraci Siculo principalmente alla copertura oligo-miocenica delle unità panormidi, sulla base della presenza di brecce risedimentate e, nelle argilliti brune, di noduli algali e cespi di coralli che dimostrano la contiguità con le successioni carbonatiche panormidi.

**ii. Evoluzione dal Serravalliano al Tortoniano (Miocene medio-superiore)**

A partire dal Serravalliano e fino a tutto il Tortoniano, il parziale sollevamento delle zone più interne della catena in fase di strutturazione determina la creazione di un'avanfossa in posizione più esterna (meridionale). Inizia quindi la sedimentazione delle molasse della Formazione Terravecchia, che vanno a ricoprire le unità già deformate. Questa sedimentazione avveniva in due contesti distinti:

- verso sud, al fronte delle unità in sovrascorrimento (avanfossa s.s.);
- verso nord, all'interno di piccoli bacini di piggy-back, colmati da conglomerati, sabbie e argille di ambiente fluvio-deltizio (*Figura 10*), provenienti dallo smantellamento delle aree emerse della catena (paleo-Madonie) e dal basamento cristallino (unità calabridi).

Il bacino di sedimentazione della formazione Terravecchia può quindi essere diviso in due grandi settori:

- uno meridionale di paleo-avanfossa, con sedimenti argillosi marini depositi in discordanza angolare su un substrato debolmente deformato;
- uno settentrionale, il cui assetto tettonico (substrato costituito da unità alloctone a thrust), determina lo sviluppo di bacini satellite caratterizzati da sistemi deposizionali fluvio-deltizi.

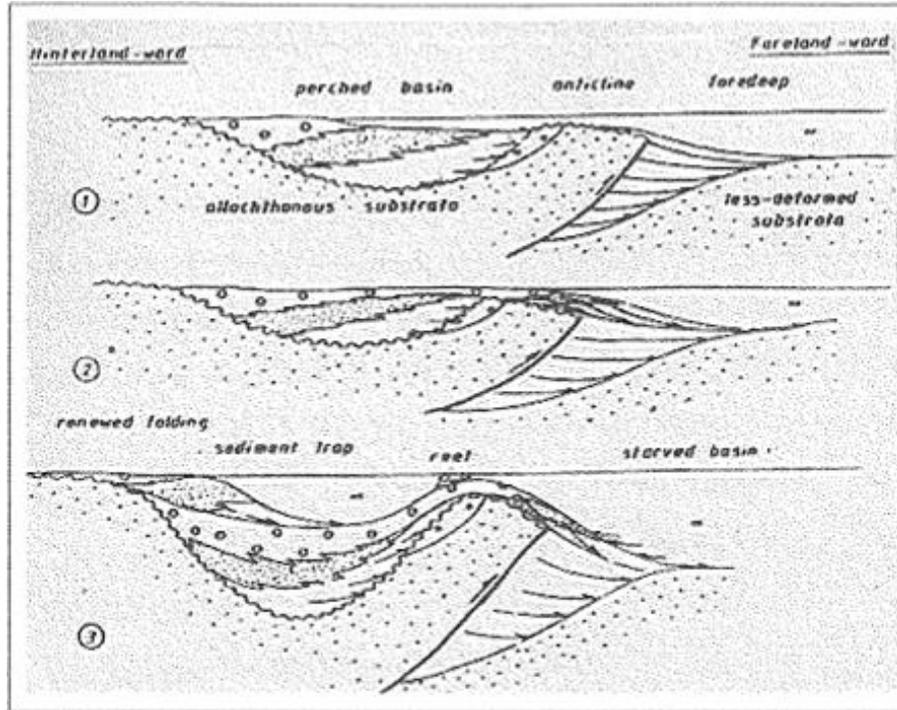


Figura 10 – Schema rappresentativo della deposizione fluvio- deltizia della formazione Terravecchia (Grasso & Butler, 1991).

Il passaggio verso l'alto a sedimenti marini suggerisce una fase di trasgressione databile al Tortoniano superiore.

Ancora più a sud, depositi analoghi coltavano un'altra depressione strutturale piuttosto estesa, il Bacino di Caltanissetta che, come si è visto (paragrafo ii), attualmente occupa una vasta zona della Sicilia centrale, delimitata dai Monti di Trabia-Termini Imerese e dalle dorsali delle Madonie e dei Nebrodi.

### **iii. Evoluzione dal Tortoniano superiore alla fine del Miocene (Messiniano)**

La fine del Tortoniano è segnata da condizioni di massima ingressione marina e da un substrato deformato, che viene ereditato dalle fasi successive (Butler & Grasso 1993). Inoltre, nel Tortoniano superiore la distribuzione delle facies di sedimenti silicoclastici della formazione Terravecchia, localizzata al fronte della thrust-belt appenninico-maghrebide, inizia ad essere controllata non solo dall'evoluzione tettonica (innalzamento locale di fronti di thrust con geometria anticlinale all'interno di una regione in subsidenza flessurale) ma anche da variazioni del livello del Mare Mediterraneo (Grasso & Butler, 1991; Butler & Grasso, 1993), correlate all'insorgere di limitazioni della circolazione marina conseguenti alla

progressiva chiusura dello stretto di Gibilterra e quindi dello scambio con l'Atlantico (transizione stratigrafica dal Tortoniano al Messiniano). In questa fase si ha la deposizione locale di laminiti diatomitiche e torbaniti<sup>1</sup> della formazione Tripoli (Ogniben, 1957).

Le condizioni paleogeografiche della fine del Messiniano determinano quindi la formazione di un'area con ridotta circolazione d'acqua, che porta a un progressivo abbassamento del livello del mare e alla formazione di complessi sistemi di scogliera (Lentini et al. 1991). Questi ultimi, in seguito al verificarsi della crisi di salinità, vengono ricoperti dalla sedimentazione delle successioni gessoso-evaporitiche mioceniche (*Figura 11B*; Bianchi et al. 1987; Lentini et al. 1991).

### 1. Caratteri stratigrafici della sequenza messiniana

Butler et al. (1995) propongono per la stratigrafia delle evaporiti siciliane un modello regionale con differenti bacini satellite separati da piccole soglie che delimitano ambienti con condizioni idrodinamiche e batimetria differenti, favorevoli all'accumulo di evaporiti.

In effetti, la deposizione delle evaporiti (formazione Gessoso-Solfifera; Ogniben, 1957; Decima & Wezel, 1971, 1973) si sviluppa su una paleogeografia già definita alla fine del Tortoniano:

- le zone topograficamente più elevate, rappresentate principalmente dalle anticlinali di sovrascorrimento, possono oggi essere ricostruite in base alla distribuzione delle facies evaporitiche marginali (patch reefs, Calcare di Base).
- Analogamente, i depocentri dei sottobacini sviluppatasi in corrispondenza di zone di sinclinale, possono oggi essere ricostruiti in base alla distribuzione di diatomiti, argille e di potenti successioni evaporitiche (Maniscalco et al., 2010; Butler et al., 1995b; Roveri et al., 2008).

Le facies marginali, sviluppate al bordo dei bacini, sono rappresentate principalmente da rocce carbonatiche (membro del Calcare di Base) che appoggiano in transizione o sulle argille della formazione Terravecchia, oppure, intorno ai rilievi topografici maggiori, direttamente sul più antico Flysch Numidico.

---

<sup>1</sup> Con il termine di torbanite si indica una varietà di oil shale ricca in materia organica (oltre 60% di sostanze volatili) e in carbonati. Dalla località-tipo di Torban Hill, Scozia.

In sostanza, la stratigrafia dei bacini messiniani sviluppati alla sommità dei fronti di sovrascorrimento (come ad esempio i bacini di Corvillo e Mandre, situati tra Caltanissetta ed Enna) è fortemente controllata da variazioni del livello eustatico marino e dal tasso di sedimentazione, oltre che dall'attività tettonica (Maniscalco et al. 2010) e da variazioni cicliche dei parametri orbitali.

Il Messiniano va da 7.25 a 5.33 Ma, ma la crisi di salinità del messiniano copre un intervallo molto più breve, di circa 700'000 anni, corrispondente al tardo Messiniano. Gli enormi depositi di evaporiti accumulati sotto al fondo dei bacini profondi del Mediterraneo sono classicamente suddivisi in tre unità sismiche principali (la cosiddetta "Trilogia Messiniana"; Roveri et al., 2008 e op. cit.) cioè, in ordine stratigrafico ascendente: i) Evaporiti Inferiori, ii) Sale, iii) Evaporiti Superiori (*Figura 11A*). Le superfici di separazione sono nette, localmente irregolari e con evidenze di erosione e dissoluzione. Esse convergono verso la superficie in un'unica discordanza che taglia i margini continentali mediterranei (Superficie Erosionale Messiniana - MES), con canyon profondamente incisi alla foce dei fiumi maggiori.

Carote estratte dalle Evaporiti Superiori mostrano una successione di anidriti, salgemma e marne interstratificate, originariamente attribuita ad acque molto poco profonde. Dall'altro lato, le Evaporiti Inferiori sono ancora un oggetto molto enigmatico, la cui natura evaporitica oppure mista silicoclastica/evaporitica è stata dedotta solamente da caratteristiche geofisiche, mentre genesi (primaria o clastica) e ambiente deposizionale (acque basse o acque profonde) rimangono ancora materia speculativa (Roveri et al., 2008).

La "Trilogia Messiniana" del Mediterraneo occidentale è stata storicamente correlata alla successione affiorante in Sicilia, riassunta nello schema stratigrafico di Decima & Wezel (1971; *Figura 11A*) che mostra tre unità evaporitiche sovrapposte:

- 1) Evaporiti inferiori ("Lower Evaporites") alla base, costituite da spessi accumuli di gesso selenitico primario di acque poco profonde (*Figura 11A*, in giallo), passanti lateralmente ai calcari evaporitici del membro del "Calcere di Base" (*Figura 11A*, in azzurro); questa successione corrisponde grosso modo alla formazione di Cattolica (Roveri et al. 2008). La porzione gessosa viene talora anche denominata in letteratura "membro selenitico inferiore".
- 2) Sale ("Salt"; talora citato in letteratura anche come "membro salifero"), costituito

principalmente da salgemma con subordinati anidrite e sali di K e Mg; (Figura 11A, in arancio); localmente tale livello è assente e sostituito da uno hiatus.

- 3) Evaporiti superiori (“Upper Evaporites”), costituite da livelli di gesso selenitico e laminato ciclicamente interstratificato con spessi orizzonti marnosi e associazioni fossili di acque da salmastre ad aperte. Alcuni documenti riportano una suddivisione di questo livello in due formazioni dette “formazione di Pasquasia” e “formazione dell’Arenazzo” (Figura 11A, in verde). In letteratura tale livello viene talora denominato “membro selenitico superiore”.

Una discordanza angolare regionale (“discordanza intra-Messiniana”, in rosso in Figura 11A) separa le Evaporiti superiori o membro Selenitico Superiore dalle unità sottostanti. In particolare, come già sopra ricordato, in corrispondenza di questa discordanza il livello intermedio di sali può essere completamente eroso, per cui spesso la successione gessoso-solfifera è sostanzialmente costituita solo dalle Evaporiti superiori e inferiori, identificate nelle già citate formazioni di Pasquasia e di Cattolica rispettivamente. La discontinuità è caratterizzata da chiari indizi di emersione ed esposizione aerea (paleocarsismo) delle sottostanti evaporiti del primo ciclo.

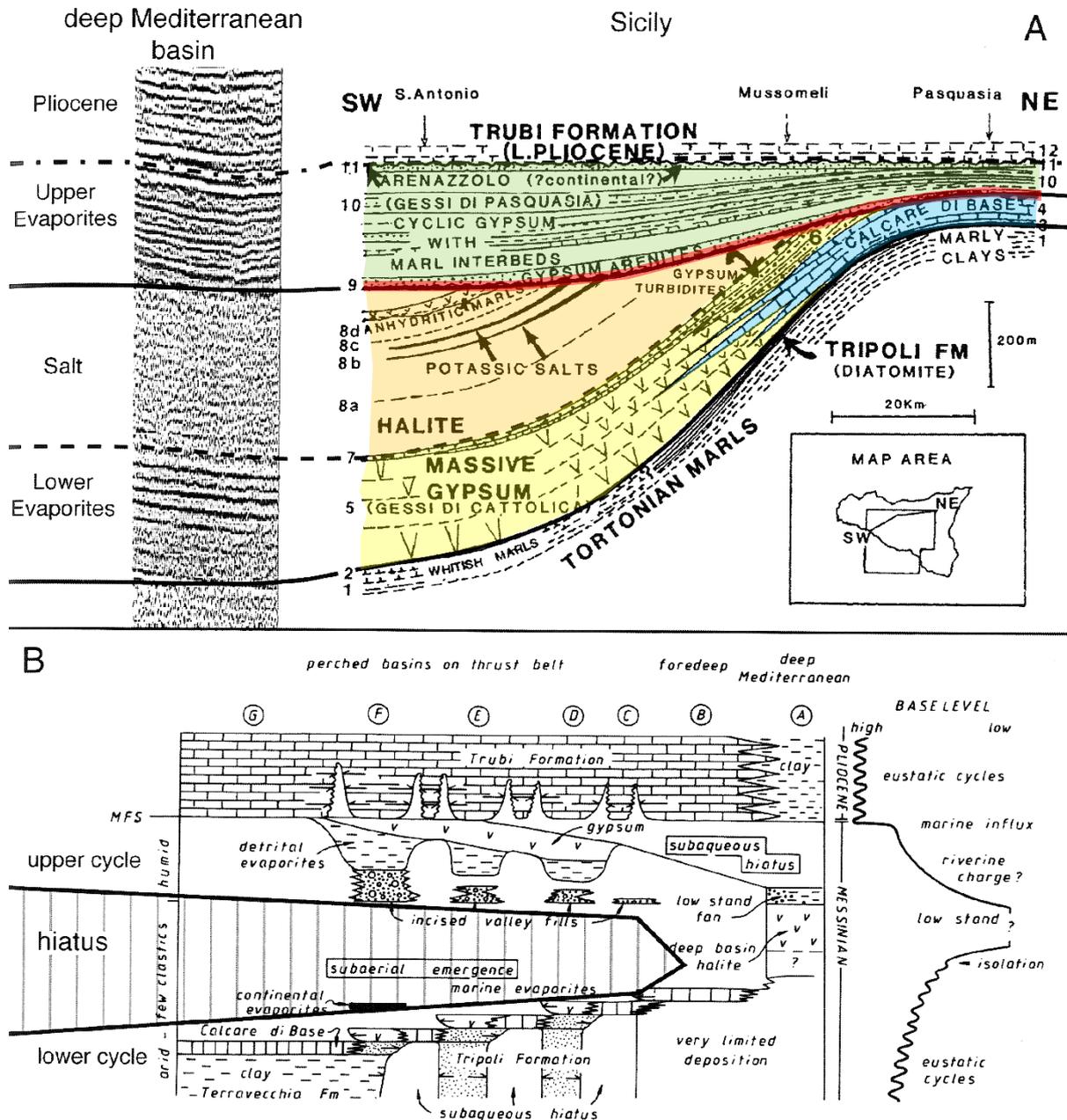


Figura 11 - A) Il modello classico di Decima & Wiezel (1971) della successione del Messiniano siciliano e della sua presunta correlazione con i bacini mediterranei profondi ("Trilogia Evaporitica"). B) il modello di Butler et al. (1995); l'unità inferiore registra un progressivo abbassamento del livello marino (regressione forzata) mentre l'unità superiore mostra un trend complessivamente trasgressivo, legato al graduale riempimento del Mediterraneo successivo al picco di prosciugamento (da Roveri et al., 2008).

Evaporiti inferiori: membro Selenitico Inferiore

Il sistema di avanfossa siciliano-maghrebide include depocentri di acque sia superficiali sia profonde, il

che si traduce in un assetto stratigrafico molto complesso. Nei bacini siciliani il membro Selenitico Inferiore è effettivamente composto da facies evaporitiche sia primarie (gesso selenitico massivo) sia risedimentate, accumulate in depocentri differenti, pertanto riferibili a due unità stratigrafiche distinte: il gesso inferiore primario (Primary Lower Gypsum, PLG) e il gesso inferiore risedimentato (Resedimented Lower Gypsum, RLG; Roveri et al., 2008).

I depositi PLG in posto appoggiano in discordanza su depositi di acque basse e di scogliera in corrispondenza dei bacini di *wedge-top* più interni e della scarpata dell'avampaese (*foreland ramp*) che bordano i sistemi di avanfossa siciliani (Figura 12).

I depositi RLG si trovano invece sui bacini di *wedge-top* esterni e nei principali depocentri dell'avanfossa e sono costituiti da depositi gessosi derivanti da flussi gravitativi in acque profonde, che vanno da olistostromi a torbiditi gessose finemente stratificate.

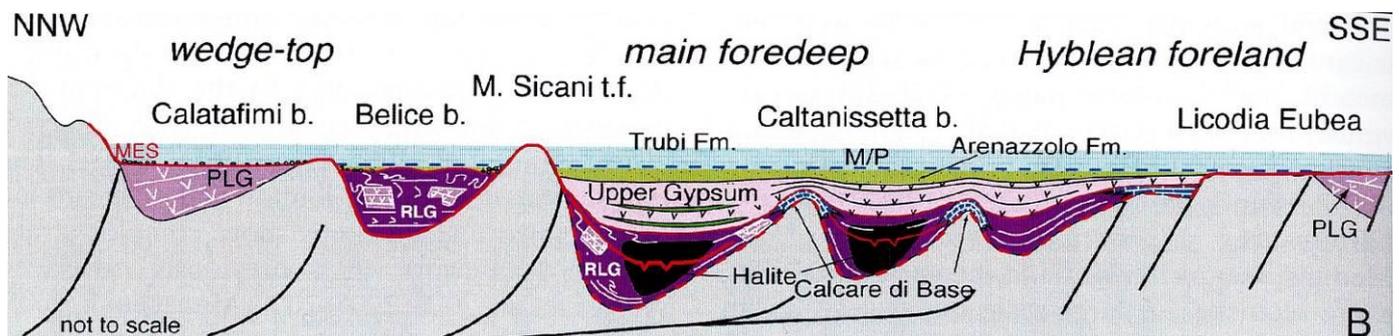


Figura 12 - Sezione geologica schematica dei bacini di avanfossa e avampaese siciliani con una ricostruzione delle relazioni stratigrafiche (Roveri et al., 2008). M/P: limite Miocene/Pliocene; MES: superficie erosionale messiniana.

I depositi RGL non sono mai associati ai PLG, che si rinvencono solo nei punti topograficamente più elevati, alla sommità dei fronti di sovrascorrimento. La base è netta e localmente erosionale, sulle diatomiti, dolomie e argille organiche interstratificate della parte alta della formazione Tripoli; una certa complicazione a livello stratigrafico deriva dal fatto che spesso, in Sicilia, i PLG si rinvencono associati a formazioni saline e al Calcare di Base.

Evaporiti inferiori: membro del Calcare di Base

Le facies evaporitiche del membro Selenitico Inferiore passano lateralmente, in eteropia, al membro del Calcare di Base (Figura 11A).

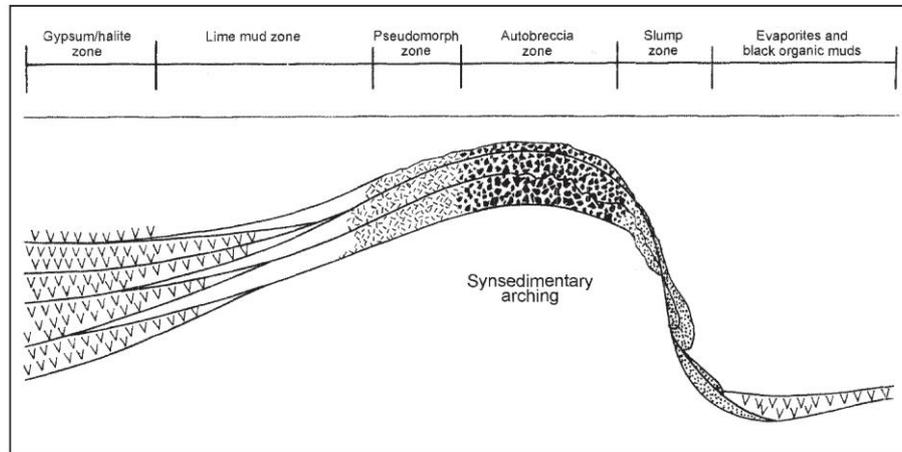
La facies più diffusa del Calcarea di Base è costituita da rocce carbonatiche autoclastiche interessate da un diffuso carsismo interstrato. La stratificazione del Calcarea di Base testimonia il ripetersi di cicli di trasgressione-regressione marina a piccola scala. Depositi di gesso selenitico primario (tipo rose del deserto) testimoniano locali situazioni di emersione temporanea, con sviluppo di carsismo. I singoli strati del Calcarea di Base, separati spesso da sottili livelli di laminita gessose, aumentano di spessore in direzione del bacino. Il membro è troncato dalla “discordanza intra-Messiniana” (Figura 11A).

Più in dettaglio, il membro del Calcarea di Base è composto da calcari dolomitici e calcari marnosi peloidali, intercalati ad argille marnose e argilliti, con facies spesso brecciate contenenti pseudomorfi di salgemma e livelli di gesso laminato (“balatino”) e di gessareniti. Il Calcarea di Base è solitamente associato a mineralizzazioni a zolfo derivati dalla trasformazione diagenetica per riduzione batterica del gesso.

La tipica facies brecciata del Calcarea di Base è riferibile a processi autoclastici indotti dalla dissoluzione delle intercalazioni saline e gessose ad opera delle acque meteoriche di infiltrazione, con conseguente locale franamento e/o collasso in posto della sequenza stratificata (Pedley & Grasso, 1993). I debris flow che localmente ne derivavano si originavano generalmente in prossimità dei paleorilievi coevi con la deposizione dei sedimenti.

Tutte le tessiture sono controllate da una combinazione di tettonica locale e fasi di prosciugamento, all’interno di bacini sospesi tra loro strettamente interconnessi. Durante le fasi di innalzamento marino, i margini dei bacini erano diffusamente sede di deposizione di fango calcareo biomedata da batteri (Lime Mud Zone in *Figura 13*).

Lungo i margini meno profondi del bacino prossimale, l’intensa evaporazione ha prodotto condizioni di salinità molto elevata. In queste zone la crescita di gesso pseudomorfo era onnipresente nei sedimenti prima della diagenesi carbonatica (Pseudomorph Zone, *Figura 13*). A livello locale, possono essere presenti anche sottili strati di gesso intercalati.



*Figura 13 - Schema della distribuzione dei diversi tipi di tessiture e associazioni sedimentarie all'interno della formazione di Cattolica (Maniscalco et al., 2010).*

L'incarcamento sinsedimentario dei margini del bacino superficiale (Figura 13), con o senza abbassamento eustatico, causava l'emersione dei fanghi carbonatici. Se già diagenizzati, questi calcari venivano interessati dalla dissoluzione meteorica degli pseudomorfi, cui potevano seguire dei collassi in sito (Autobreccia Zone in Figura 13). Il locale franamento lungo paleo-pendii, innescato dalla tettonica o dalle piogge che agivano su questi depositi semiconsolidati, è probabilmente all'origine della formazione di debris flows subaerei lobati, localmente ispessiti, intorno alle paleo-scarpate più ripide (Slump Zone in Figura 13).

Dall'altro lato, quando le fasi di evaporazione erano particolarmente prolungate, l'abbassamento eustatico causava il temporaneo isolamento dei bacini sospesi, che aveva come conseguenza un prosciugamento alla scala dell'intero bacino. All'interno dei bacini ossigenati (Gypsum/Halite Zone in Figura 13) avveniva la tipica precipitazione di gesso selenitico (a coda di rondine) associata a sottili intercalazioni di fanghi carbonatici.

Laddove i bacini profondi risultavano impoveriti in ossigeno, era più frequente la deposizione di fanghi neri solforosi ricchi di materia organica, in associazione a sottili livelli di evaporiti (Evaporites and Black Organic Muds, Figura 13).

Il Calcarea di Base sovrasta transizionalmente la formazione del Tripoli (quando presente) ma può anche trovarsi in transizione sulle argille della formazione di Terravecchia. L'età messiniana è determinata in

base alla posizione stratigrafica. Lo spessore arriva fino a 50 m circa.

Evaporiti superiori: membro Selenitico Superiore

Il membro selenitico superiore è legato all'ulteriore abbassamento (post-Calcare di Base) del livello marino intra-messiniano, che è stato concomitante all'evoluzione di un substrato in continuo movimento tettonico. Localmente, attorno ai fianchi delle anticlinali di thrust in emersione, si sono formati dei debris-flow costituiti da brecce carbonatiche e megaruditi gessose derivanti dal collasso, verso il bacino, delle successioni marginali.

I depocentri del Messiniano superiore si sovrappongono generalmente alle strutture del Messiniano inferiore. In tal modo, le aree sopraelevate vengono bypassate dalla sedimentazione, oppure sviluppano superfici di scivolamento profonde.

Il membro superiore (Messiniano superiore; Figura 11A, in verde) è caratterizzato da spessi accumuli di gesso risedimentato e da successioni argillose che contengono interstrati ciclici di gesso balatino e selenitico. La geometria degli strati testimonia la continua deformazione tettonica della regione interessata da una lenta trasgressione.

Evaporiti superiori: la formazione di Pasquasia

La deposizione della formazione di Pasquasia, facente parte del ciclo evaporitico superiore inizia con conglomerati fluviali e di fan-delta ("a" in Figura 14), la cui attuale giacitura è dovuta alla successiva subsidenza tettonica del bacino. Essi passano stratigraficamente verso l'alto ad una spessa successione data da argille sterili ("b" in Figura 14) contenenti intercalazioni gessarenitiche di delta ("c", Figura 14) che diventano più sottili e spariscono verso sud. Corpi gessosi lenticolari ("d", Figura 14) occupano le parti più distali del bacino e probabilmente sono il risultato di brevi eventi di disseccamento. La fauna a molluschi presente nelle argille siltose sommitali intercalate alle gessareniti nelle aree distali del bacino, indica un paleoambiente iposalino.

L'unità è costituita da conglomerati e quarzareniti ciottolose alla base della successione, passanti verso l'alto ad arenarie bruno-rossastre a grana media o fine, in gruppi di strati tabulari da sottili a spessi (unità di delta-top) con base erosiva, gradazione normale, stratificazione interna da orizzontale a leggermente inclinata e stratificazione incrociata a dune. Corpi lenticolari di gesso selenitico e strati di

gesso alabastrino, intercalati ad argille e marne, sono sviluppati nella parte superiore della successione e occupano le aree più distali del bacino (Figura 14).

La fauna a foraminiferi e ostracodi è stata descritta in dettaglio da Maniscalco et al. (2010) per il bacino di Corvillo: la parte inferiore contiene *Cyprideis agrigentina* dominante e/o presente insieme a *Loxococoncha mülleri* e *Candoninae indet.*, correlabili ad acque mesoaline con profondità massima di 10-15 m. La parte superiore è caratterizzata da una fauna oligotipica di ostracodi con *C. agrigentina*, *Candoninae indet.* e *Ammonia tepida*; al top di questo intervallo (calcari micritici fossiliferi) è registrata un'abbondante associazione monospecifica di ostracodi composta da *C. agrigentina* e *A. tepida* (Associazione "Cyprideis-Ammonia", Grossi et al., 2008) che indicano un paleoambiente iperalino con salinità stimata intorno al 70 ‰.

I silt e le argille del Messiniano superiore ("c" in Figura 14) contengono una fauna a molluschi oligotipica (*Dreissena rostriformis*, *Melanopsis sp.* e *Melanopsis curvicosta*) indicativa di un ambiente iposalino. L'età è tardo-messiniana.

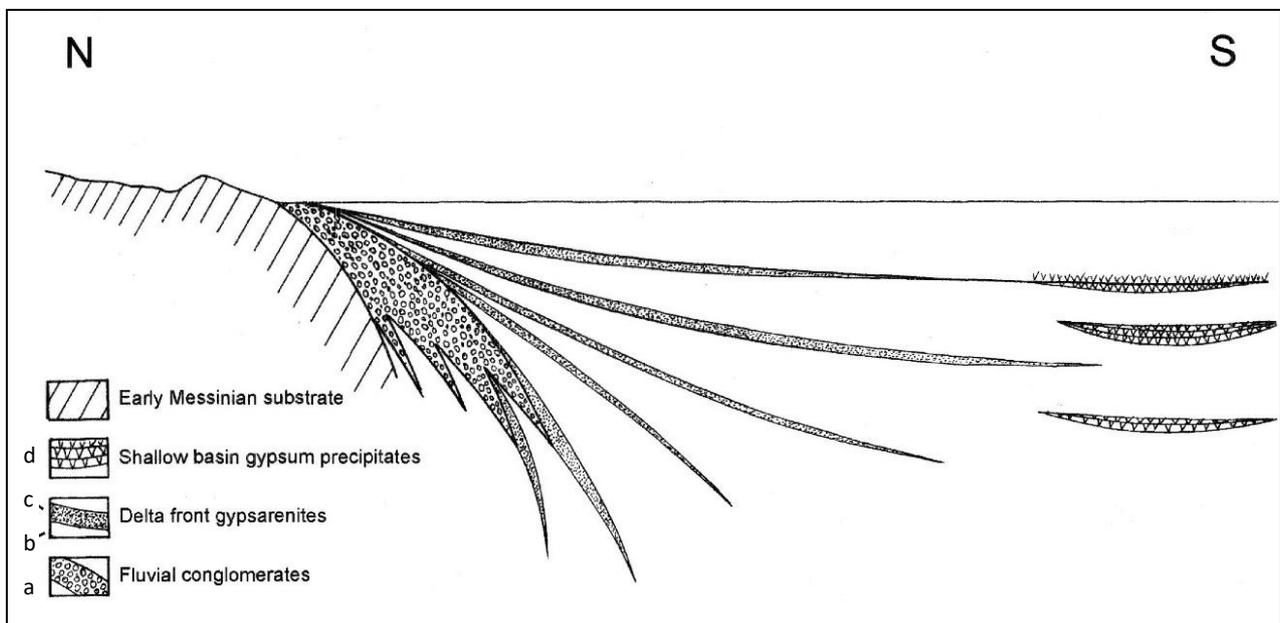


Figura 14 - Caratteristiche della sedimentazione nella formazione di Pasquasia affiorante nel bacino sintettonico di Corvillo, a N di Caltanissetta (Maniscalco et al., 2010). Il Calcare di Base del Messiniano inferiore (tratteggio obliquo) è inciso da una superficie di erosione subaerea intramessiniana. a: conglomerati fluviali e di fan-delta; b: argille sterili; c: intercalazioni gessarenitiche di delta; d: corpi gessosi lenticolari.

#### *iv. Evoluzione dal Pliocene al Pleistocene*

Nel Pliocene inferiore si instaurano nuovamente condizioni marine normali; i sedimenti del Pliocene, depositi anch'essi al di sopra e al fronte delle strutture della catena in fase di evoluzione, rappresentano una singola megasequenza, definita alla base da una superficie di massima sommersione (Pliocene inferiore) che segue il ricongiungimento del Mediterraneo con il livello marino globale, avvenuto verso la fine del Messiniano.

La stratigrafia interna di questa megasequenza comprende:

- i) la formazione dei Trubi, rocce marnoso-calcaree tipiche di un ambiente marino relativamente profondo (Bianchi et al. 1987; Lentini et al. 1991);
- ii) la formazione delle Marne Azzurre;
- iii) una successione costiera di calcareniti con subordinate sabbie silicoclastiche.

La megasequenza registra una fase regressiva forzata dalla tettonica, in risposta al sollevamento regionale iniziato a partire dal Pliocene superiore e associato all'alleggerimento isostatico dell'hinterland dell'orogene dovuto al collasso tettonico delle falde di sovrascorrimento più interne e all'apertura del Mar Tirreno (Butler & Grasso, 1993; Butler et al., 1995a; Speranza et al., 2003).

Tra il Pliocene superiore ed il Pleistocene inferiore si ha dunque un sollevamento complessivo dell'area, mentre la porzione più settentrionale della catena subisce un generale sollevamento e un successivo smembramento in blocchi lungo linee tettoniche ad andamento NW-SE e NE-SW (Ghisetti & Vezzani 1984), che determinano sollevamenti differenziati da luogo a luogo (Bianchi et al. 1987; Lentini et al. 1991).

Alla fine del Pleistocene si verifica la definitiva emersione della catena, in concomitanza con un sollevamento regionale che coinvolge anche ampi settori di avanfossa e avampaese (Bianchi et al. 1987; Monaco et al. 2002).

I terrazzi quaternari distribuiti a varie quote lungo la fascia costiera testimoniano le oscillazioni eustatiche del livello marino medio e i movimenti tettonici a prevalente componente verticale

verificatisi in questo ultimo periodo (Lentini et al. 1991; Monaco et al. 2002).

### c. Caratteri strutturali

Dal punto di vista strutturale, la Catena Appenninico-Maghrebide è un sistema a pieghe e sovrascorrimenti (*thrust-and-fold belt*) sviluppatosi a partire dal Miocene inferiore che, come si è visto nei paragrafi precedenti, è essenzialmente costituito da successioni sedimentarie meso-cenozoiche di ambiente marino (Bianchi et al. 1987; Catalano et al. 1996; Monaco et al. 2000; Bello et al. 2000; Lavecchia et al. 2007).

La propagazione della catena a sovrascorrimenti ha interessato il dominio di avampese fino all'area di Sciacca, dove intersecherebbe una zona deformazione crostale di cui si dirà brevemente più avanti (Ghissetti & Vezzani 1984; Lavecchia et al. 2007). Come rappresentato in *Figura 15*, il livello basale dei *thrust* della catena si estende quindi a partire dall'estremità occidentale dell'isola, forma un arco convesso che attraversa il Canale di Sicilia tra Sciacca e Gela e rientra quindi nella parte sudorientale dell'isola proseguendo da Gela fino a Catania (Bonardi et al. 1976; Lentini et al. 1995; Catalano et al. 1996; Finetti et al. 1996; Monaco et al. 2000).

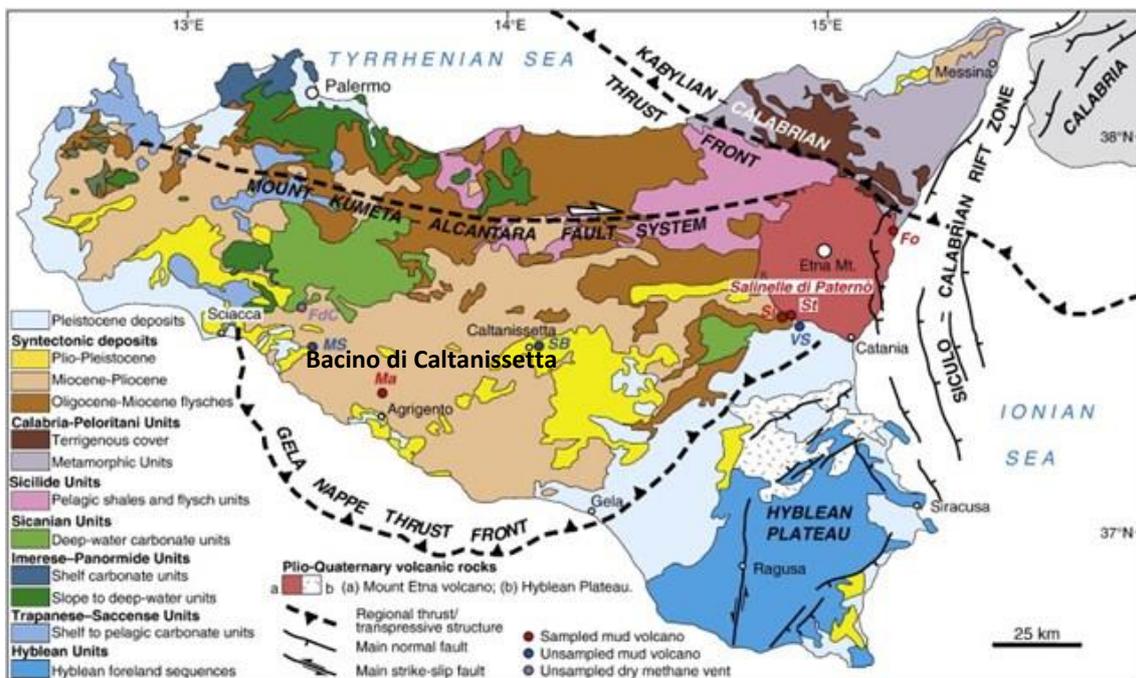


Figura 15 – Carta strutturale della Sicilia

La configurazione regionale della catena e i rapporti geometrici tra le differenti successioni tettonostratigrafiche affioranti, si sono delineati nell'arco di tutta la storia deformativa polifasica.

I contatti tettonici di sovrascorrimento sono essenzialmente di due tipi, distinguibili in base al loro significato tettonico e alla geometria delle strutture:

- I **contatti di ricoprimento tettonico** corrispondono a superfici a geometria suborizzontale, estese decine di chilometri, associate a una notevole traslazione tra successioni di diversa origine paleogeografica. Queste strutture sono associate a grandi fenomeni di scollamento, che si propagano dagli elementi litosferici più profondi agli orizzonti cristallini superficiali, tra le coperture sedimentarie e il basamento, o tra le sequenze flyschoidi e il loro substrato carbonatico.

Questi sovrascorrimenti possono verificarsi a varie scale, localmente anche all'interno delle singole successioni meso-cenozoiche, con la caratteristica comune di mantenere inalterati i rapporti tra le unità al letto e al tetto della struttura, anche per grandi distanze.

L'età dei ricoprimenti varia, con un generale ringiovanimento verso le aree esterne della catena.

Nell'assetto attuale i ricoprimenti non conservano sempre la giacitura originaria, essendo ripiegati e dislocati da strutture contrazionali più recenti che si sono costantemente succedute agli eventi di ricoprimento. La geometria dei piegamenti all'interno dei ricoprimenti sembra seguire le lunghezze d'onda delle pieghe delle unità a letto, mentre le strutture plicative delle unità al tetto sono, nella maggior parte dei casi, totalmente disarmoniche rispetto a quelle del contatto tettonico basale.

- I **sovrascorrimenti secondari** derivano dall'attivazione di faglie inverse che tagliano i contatti di ricoprimento e possono dare origine a sovrapposizioni fuori sequenza rispetto ai rapporti tettonostratigrafici originari. Queste strutture possono essere confuse con superfici di sovrascorrimento ad alto angolo radicate nei sovrascorrimenti basali dei ricoprimenti tettonici.

Sono anche frequenti fenomeni di retrovergenza che generano sistemi sia di thrust sia di pieghe con fianchi rovesciati verso nord.

Come già detto, i fenomeni di scollamento hanno comportato la migrazione di notevoli volumi di terreni

flyschoidi verso le aree esterne della catena. Il Sistema a Thrust Esterno, legato alle fasi più recenti, ha notevolmente influenzato l'evoluzione delle coltri soprastanti, che tendono a rimobilizzarsi, subendo ulteriori fenomeni di trasporto orogenico, o ad adeguarsi in varia maniera al cambiamento di geometria della catena.

Meccanismi di adeguamento di elementi superficiali alla tettonica profonda, sovente espressa da culminazioni strutturali, possono spiegare l'estensione chilometrica delle coltri argillose come le Sicilidi, le Argille Brecciate, o le alternanze argilloso-arenacee del Flysch Numidico alloctono.

L'intero sistema a thrust è inoltre interrotto da numerose faglie inverse e transpressive (Lavecchia et al. 2007). In particolare, l'interpretazione dei profili sismici CROP (Finetti et al. 2005) ha permesso di evidenziare come la tettonica trascorrente osservata in superficie sia radicata in profondità, ove la sua espressione è rappresentata da discontinuità ad alto angolo che interrompono l'edificio a falde e giungono anche a dislocare la crosta profonda. Le principali faglie di questo tipo hanno direzione da NW-SE a WNW-ESE e presentano localmente un sistema coniugato NE-SW (*Figura 16*). A tali faglie principali sono associate strutture transpressive a direzione E-W (Linea Kumeta-Alcantara), originariamente ritenute strutture principali (Ghisetti e Vezzani, 1984) e recentemente reinterpretate come correlabili alle principali NW-SE.

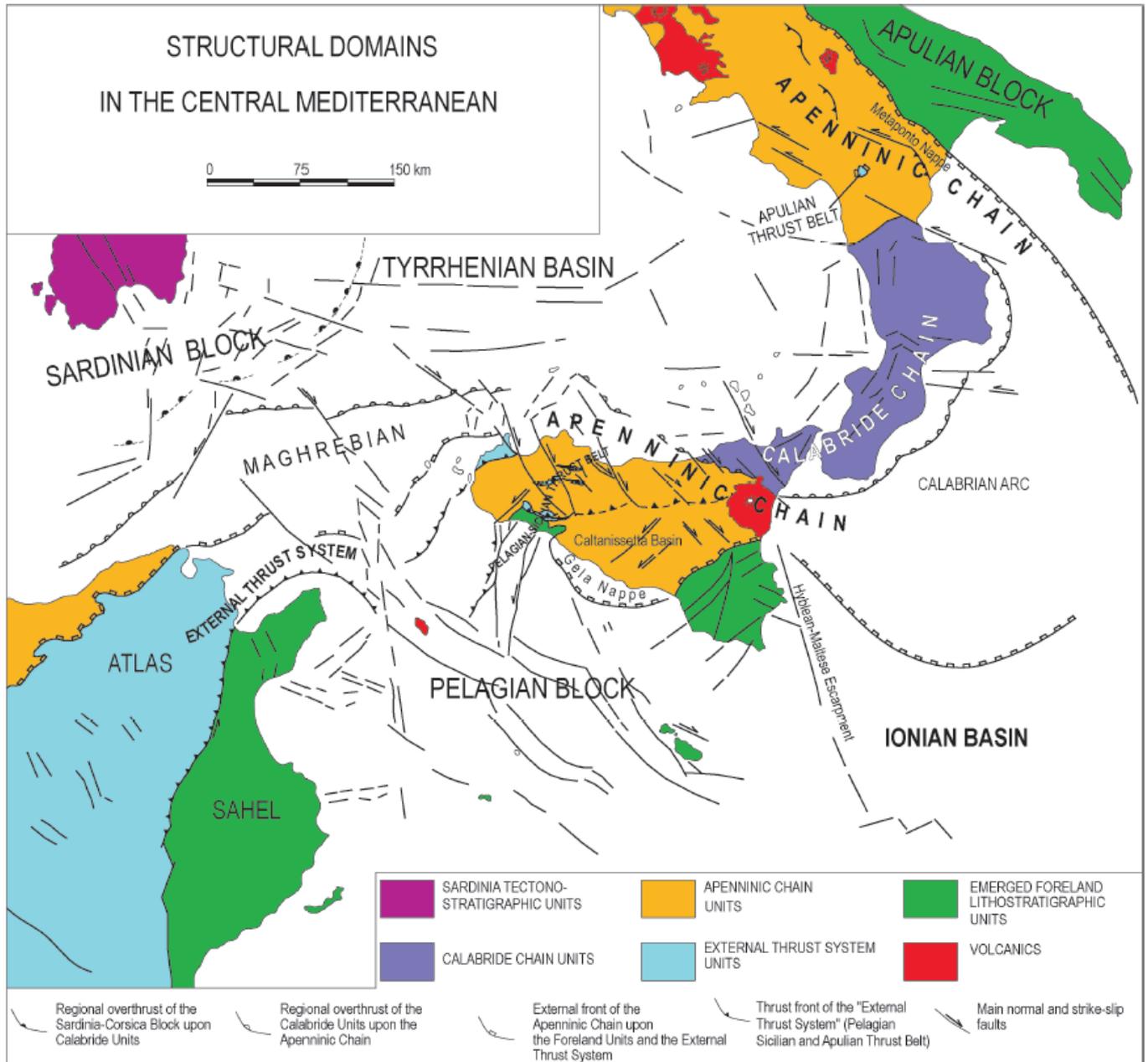
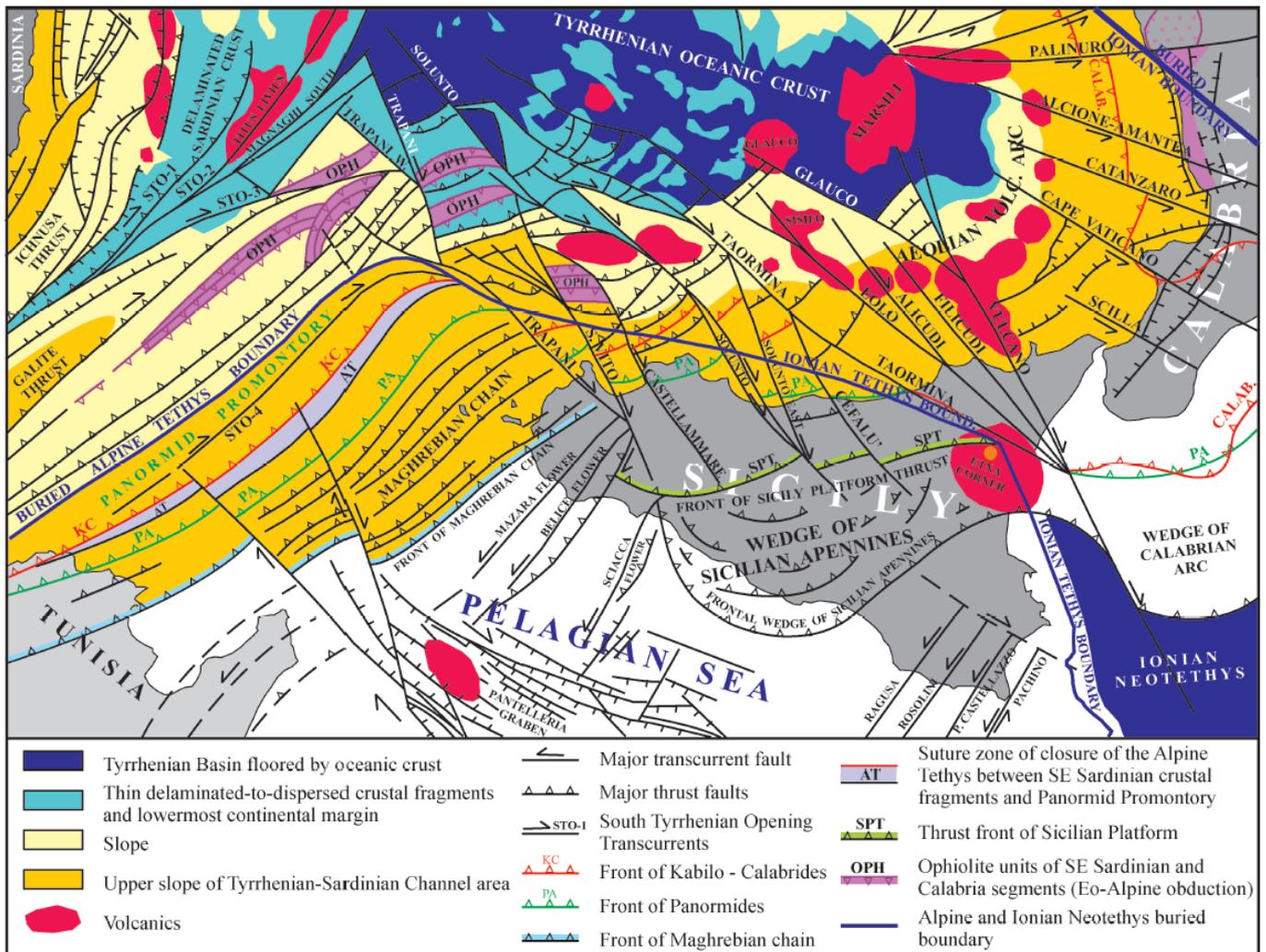


Figura 16 – Ricostruzione schematica della Catena Appenninico-Maghrebide (da Finetti et al. 2005, modificato da Figura 3).

Il thrust basale di cui si è detto in precedenza, nella zona di Sciacca sembra interrompersi contro un fascio di strutture trascorrenti ad alto angolo con direzione NW-SE nel settore a nord del thrust e NNE-SSW a sud del thrust. Queste strutture dovrebbero costituire delle discontinuità primarie a livello di tutta la crosta che svincolano lateralmente settori di catena attigui ma con evoluzione strutturale

reciprocamente indipendente. Lo schema di *Figura 17* permette di chiarire in maggior dettaglio la situazione appena illustrata e più in generale l'assetto strutturale del settore siculo.



*Figura 17 – Schema tettonico della Sicilia e delle aree adiacenti con la ricostruzione dei principali sistemi di thrust e faglie trascorrenti (Finetti ed al., 2005).*

## 5 ASSETTO LITOSTRATIGRAFICO DI DETTAGLIO NELL'AREA DI PROGETTO

L'assetto litostratigrafico dell'area di progetto è stato ricostruito integrando i dati bibliografici disponibili con le informazioni dedotte da fotointerpretazione e da rilievi geologici di terreno, oltre che attraverso il confronto con i dati delle indagini in sito, eseguite sia nella presente fase di progettazione definitiva, sia nella precedente fase di progettazione preliminare.

Lo schema strutturale generale di Figura 18, derivato dal foglio CARG "Caltanissetta" e quindi riferito all'estremità orientale del tracciato di progetto, ma tuttavia valido nei suoi caratteri generali per l'intero lotto in esame, mostra una serie di unità di substrato, formatesi a partire dal Burdigaliano inferiore, strutturate in sovrascorrimenti con vergenza meridionale che formano l'ossatura della catena.

La successione stratigrafica è riassunta schematicamente nella colonna di *Figura 19*, anche questa riferita al solo bacino di Caltanissetta (Maniscalco et al., 2010), ma estrapolabile, per quanto riguarda la schematizzazione dei rapporti stratigrafici, all'intero corridoio di progetto.

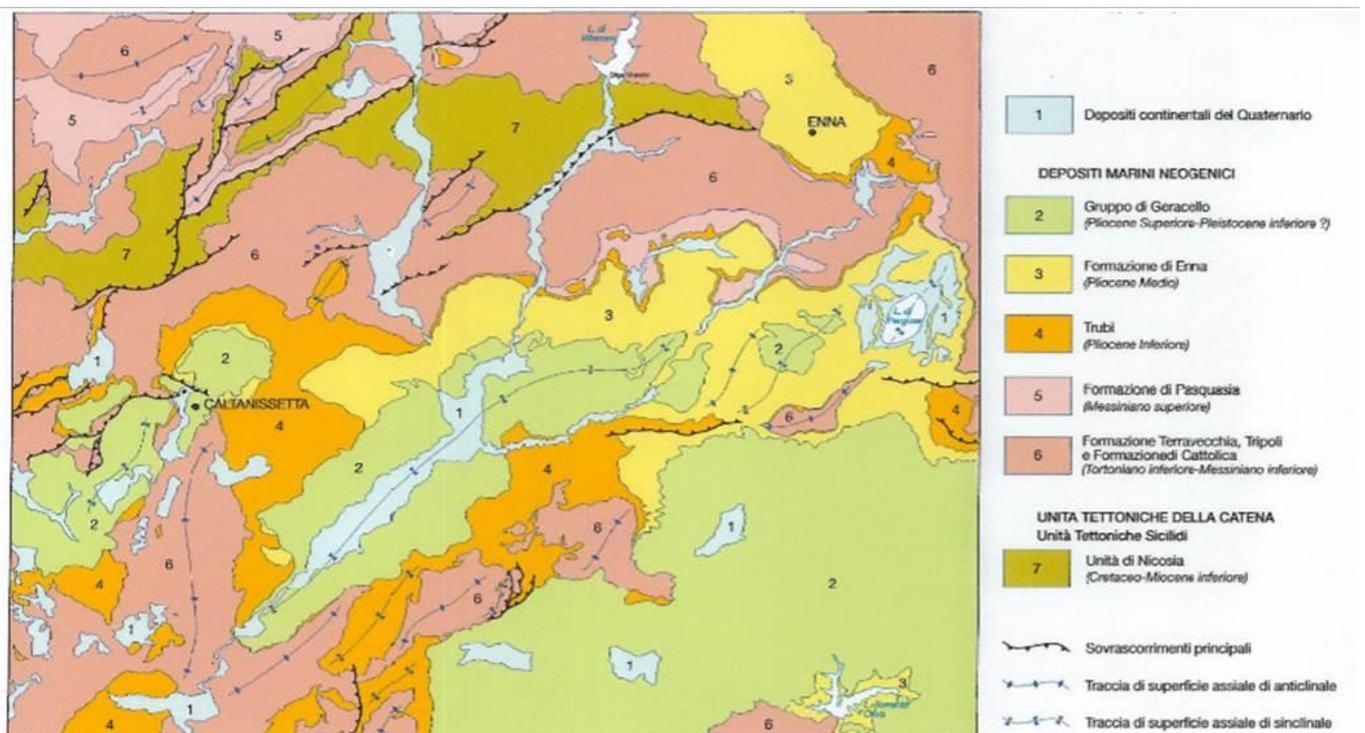


Figura 18 – Schema tettonico del Foglio 631 Caltanissetta (ISPRA, 2014).

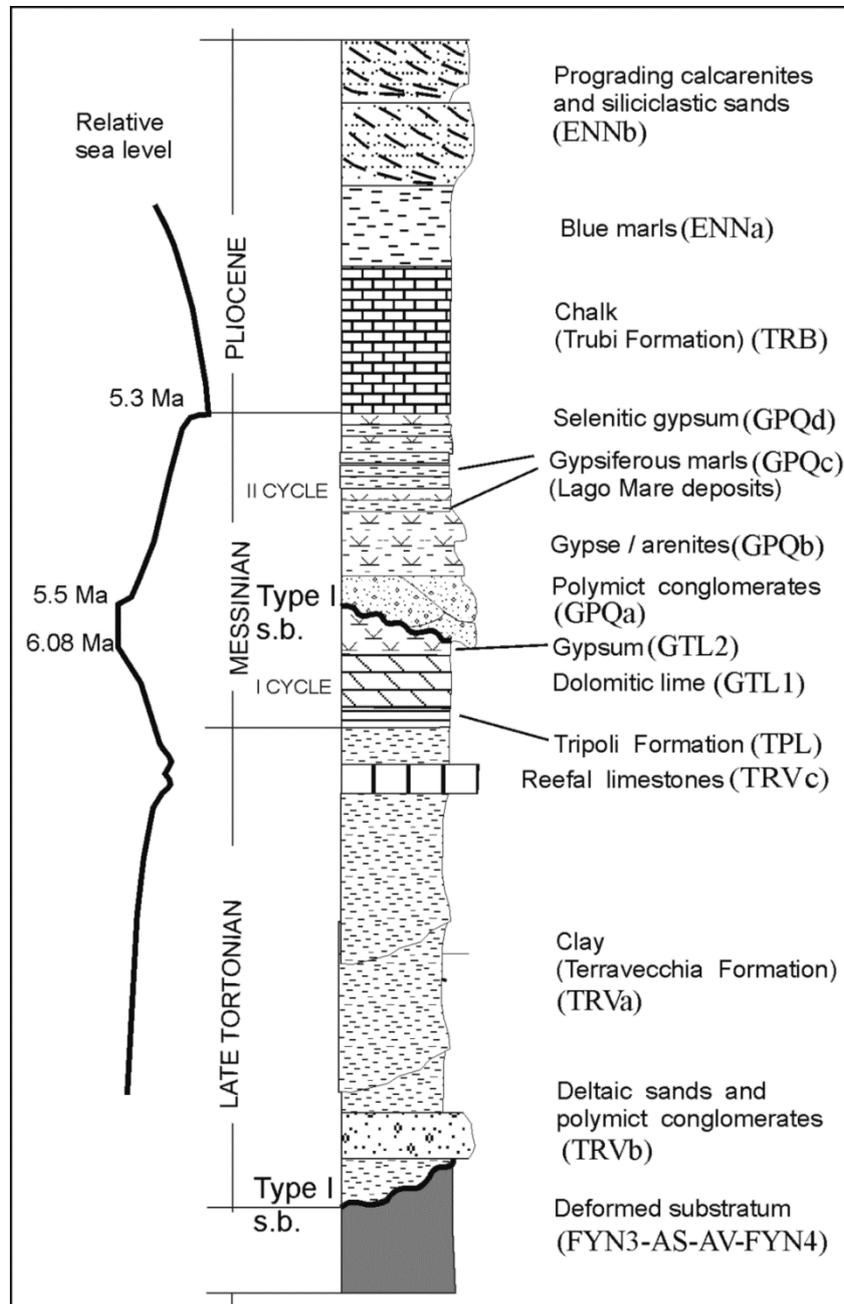


Figura 19 - Colonna stratigrafica dell'area del bacino di Caltanissetta (Maniscalco et al., 2010), estrapolabile al settore di studio. Si noti che le sigle TRVa e TRVb indicate in figura e relative alla formazione Terravecchia, non corrispondono ai codici utilizzati nelle carte e nei profili di progetto, che sono TRV e TRVa rispettivamente; la sottounità TRVc non affiora nell'area di studio.

Si distinguono in sostanza due elementi principali: i) il substrato deformato cretaco-burdigaliano a dominante componente argillosa, esposto lungo i margini meridionali e settentrionali dei bacini e

localmente al nucleo di alcune delle anticlinali maggiori e ii) la sequenza stratigrafica dei bacini di *thrust-top*.

Il termine substrato viene qui riferito alle successioni tettonostratigrafiche della Catena Appenninico-Maghrebide già impilate per sovrascorrimento prima o durante la sedimentazione dei depositi sin-orogenici (ovvero dei termini del cosiddetto Bacino di Caltanissetta). Nel settore in esame esso è costituito da elementi sicilidi e numidici.

I bacini di *thrust-top* sono invece quelli in cui si sono formati i depositi sin-orogenici, la cui stratigrafia è dominata dalle argille e marne della formazione Terravecchia (Tortoniano superiore), dalle evaporiti messiniane e dalle marne e calcareniti plioceniche che chiudono la successione.

## 5.1 Stratigrafia del substrato deformato

Il substrato deformato della regione comprende due principali unità tettoniche appartenenti al Bacino del Flysch Numidico: a) Unità di Nicosia e b) Unità di Geraci Siculo.

### 5.1.1 Unità di Nicosia

L'unità di Nicosia è un'unità di pertinenza Sicilide. Essa è costituita, dal basso verso l'alto, dalle seguenti formazioni (Maniscalco et al., 2010):

- Argille Scagliose (AS)
- Argille Variegate (AV)
- Flysch Numidico - membro di Nicosia (FYN4).

Solo le ultime due formazioni sono rappresentate nell'area di studio.

#### 5.1.1.1 Argille scagliose (AS)

Le Argille Scagliose sono costituite da argille da grigie a rosse e verdi, mal stratificate e con struttura caotica a scala decimetrica, con interstrati di radiolariti grigio-verdi e rosse e interstrati da centimetrici a decimetrici di quarzareniti e calcareniti. Contengono associazioni di foraminiferi del Cretacico superiore con *Rotalipora spp.*, *Globigerinelloides spp.*, *Hedbergella spp.*, *Heterohelix spp.* L'età è compresa tra il Cretacico superiore e, dubitativamente, l'Eocene inf. (Carbone et al., 1990). Vengono qui citate solo a

scopo di completezza e perché affiorano in aree molto prossime a quella rilevata, ma di fatto nella zona di studio non sono presenti.

#### 5.1.1.1 Argille Variegata (AV).

Questi depositi sono costituiti da argille grigio-verdi e rosse scagliettate e debolmente stratificate, a struttura caotica, con intercalazioni decimetriche di radiolariti grigio-verdi e rossastre a frattura prismatica, silt micacei, quarzareniti fini, calcisiltiti e calcareniti grigie e nocciola con patine manganesifere e interstrati di microconglomerati. Verso l'alto passano gradualmente ad argille rosse con *Tubotumaculum*. Le Argille Varicolori (o Argille Variegata) si presentano in affioramenti poco estesi, generalmente alla base del Flysch Numidico.

Il contenuto faunistico comprende foraminiferi agglutinati come *Cyclammina acutidorsata*, *Glomerina sp.* e *Hyperammina sp.* I livelli superiori contengono una fauna con *Globorotalia opima nana*, *Catapsydrax stainforthi*, *Globigerinoides trilobus immaturus*.

Si tratta di una successione estremamente tettonizzata caratterizzata dalla presenza di numerose zone di taglio, al cui interno si possono rinvenire, inclusi tettonicamente, blocchi di dimensioni variabili da poche decine di metri fino a qualche chilometro, riferibili a formazioni appartenenti a differenti domini paleogeografici. In particolare, blocchi di basalti afirici ( $\gamma$ ), calcari detritici di piattaforma con frammenti di echinidi, rudiste e alghe (cr), calcari marnosi biancastri e marne rosate tipo "Scaglia" con associazioni a foraminiferi planctonici (sc) e blocchi di arenarie glauconitiche grigio-verdastre con intercalati livelli di marne grigio-brune (ag).

La formazione affiora localmente nei settori centrale e occidentale dell'area di studio, in corrispondenza del versante NW del Cozzo del Corvo (Monte Capodarso) e presso la stazione di Caltanissetta-Xirbi. Lo spessore di questa successione è difficilmente definibile e in affioramento è comunque superiore a 300 metri. L'ambiente di deposizione è riferibile a una piana batiale e base scarpata; l'età è Cretacico - Oligocene inferiore.

#### 5.1.1.2 Flysch Numidico - membro di Nicosia (FYN4).

Il membro di Nicosia è composto da prevalenti argille e argille siltose di colore bruno, con interstrati

siltitici di spessore da decimetrico a centimetrico e di quarzoareniti torbiditiche bruno-giallastre e conglomerati giallo-marroni in strati spessi 1-2 m. Questi livelli silicoclastici torbiditici mostrano frequenti strutture di flusso (groove, load cast) e strati gradati.

Le argille contengono i seguenti foraminiferi planctonici del Miocene inferiore (burdigaliano): *Globoquadrina dehiscens*, *Globigerinoides subquadratus*, *Globigerinoides trilobus* e *Paragloborotalia acrostoma*.

I litotipi che compongono le bancate più competenti sono molto fratturati e sono frequenti livelli di breccie di frizione concentrati lungo numerose strutture di taglio. In affioramento la formazione presenta spessori massimi di circa 300 metri, mentre è stata attraversata al di sotto dei sedimenti tortoniani della formazione Terravecchia, per circa 700 metri dal sondaggio Caltanissetta 001<sup>2</sup> e per circa 2000 metri dal sondaggio Morello 001<sup>3</sup>.

### 5.1.2 Unità di Geraci Siculo (FYN5)

Benché questa unità sia stata formalizzata nell'ambito di questo lavoro, essa non è ufficialmente definita in letteratura, poiché include solo il così detto membro di Geraci Siculo (FYN 5) del Flysch Numidico. Tale membro costituisce una parte del Flysch Numidico originariamente più esterno che rappresentava la copertura oligo-miocenica delle Unità Panormidi e corrisponde al membro di Geraci di Ogniben (1960) ("Unità Maragone" di Bianchi et al., 1987). L'unità è strutturata in una serie di duplicazioni tettoniche embricate, che tendono a radicarsi in profondità al tetto delle piattaforme carbonatiche panormidi.

La successione è caratterizzata da litofacies pelitiche o pelitico-arenacee fino a esclusivamente arenitiche. L'intervallo basale è costituito da argilliti nerastre a stratificazione indistinta, passanti verso l'alto a sottili alternanze di argilliti nerastre e quarzosiltiti brunastre e ad argille brune, cui si intercalano quarzoareniti giallastre in grossi banchi, più frequenti nella parte medio-alta della successione. Le areniti hanno grana da fine a grossolana; sono inoltre presenti livelli e passate di conglomerati gradati e/o

---

<sup>2</sup> [http://www.videpi.com/deposito/pozzi/profilo/pdf/caltanissetta\\_001.pdf](http://www.videpi.com/deposito/pozzi/profilo/pdf/caltanissetta_001.pdf)

<sup>3</sup> [http://www.videpi.com/deposito/pozzi/profilo/pdf/morello\\_001.pdf](http://www.videpi.com/deposito/pozzi/profilo/pdf/morello_001.pdf)

caotici in abbondante matrice quarzosa.

La porzione argillosa basale della formazione contiene diatomee, radiolari e rari foraminiferi planctonici tra cui *Catapsydrax cf. dissimilis* e *Globorotalia opima nana* di età Oligocene superiore. Nei livelli sommitali sono presenti *Paragloborotalia siakensis* e *Globigerinoides trilobus* riferibili al Burdigaliano superiore, e nannofossili caratterizzati da *Helicosphaera ampliapertura* e *Sphenolithus heteromorphus*. I livelli quarzoarenitici sono sterili o contengono rare forme di foraminiferi agglutinanti.

L'età della formazione è Oligocene superiore–Burdigaliano. La successione è più volte scagliata tettonicamente, simulando uno spessore apparente tra 400 e 800 m. L'ambiente è riferibile a una conoide torbidity.

## 5.2 Stratigrafia del bacino di thrust-top

### 5.2.1 Formazione Terravecchia (TRV).

La formazione Terravecchia è composta nella parte basale da conglomerati fluvio-deltizi e da sabbie di ambiente marino poco profondo (TRVa), cui segue un'unità a grana più fine, argilloso-marnosa (TRV), spesso caratterizzata da un'associazione faunistica francamente marina. Localmente si rinvencono facies argilloso-limose a struttura brecciata, scagliosa o indistinta (TRVb), con livelli di sabbie limose grigie, ghiaie poligeniche da angolose a subangolose, argille marnose e argilliti di colore grigio-verdastro, a struttura brecciata o finemente scagliosa, e olistoliti eterometrici di quarzareniti derivanti dal Flysch Numidico e argille variegata.

Nella carta del CARG (Foglio Caltanissetta) queste tre facies principali sono descritte come segue:

- TRV: membro pelitico argilloso (Figura 20). Argille limose e argille marnose di colore grigio, grigio-azzurro e grigio-verdastro, marrone per alterazione, a struttura scagliosa o sottilmente stratificata, talora laminate e con strati irregolari e lentiformi, con frequenti livelli millimetrici di sabbie e sabbie limose grigie e giallastre; a luoghi si rinvencono passaggi di marne, marne argillose e argilliti di colore grigio e grigio-verdastro, a struttura scagliosa o sottilmente stratificata.
- TRVa: membro sabbioso–conglomeratico (Figura 21). Arenarie e conglomerati a clasti poligenici

ad elementi eterometrici carbonatici, silicei, cristallini, graniti e porfiriti dacitico-andesitiche, da sub-arrotondati ad arrotondati, in matrice sabbiosa e sabbioso-limosa di colore grigio, rosso e giallastro, generalmente abbondante, da poco a ben cementata; a luoghi sono presenti intercalazioni di arenarie giallastre e livelli di sabbie grossolane grigie e rossastre, in strati da sottili a spessi.

- TRVb: membro brecciato. Argille, argille limose e limi argillosi di colore grigio e marrone, a struttura brecciata o a blocchetti poliedrici, talora scagliosa o indistinta, con locali livelli di sabbie limose grigie e frequenti ghiaie poligeniche da angolose a sub-angolose; a luoghi si rinvencono passaggi di argille marnose e argilliti di colore grigio-verdastro, a struttura brecciata o finemente scagliosa, e olistoliti eterometrici di quarzareniti derivanti dal Flysch Numidico e argille variegata.



*Figura 20 – Affioramento della litofacies argilloso-marnosa della formazione Terravecchia (TRV), in contrada Giumentarello nel comune di Enna.*



Figura 21 – Affioramento della litofacies arenaceo-conglomeratica della formazione Terravecchia (TRVa), in località Castellana (S.S. 121 incrocio S.P. 112).

L'unità mostra brusche variazioni laterali di facies e di spessore, essendosi depositata alla sommità e al fronte degli alti strutturali in fase di innalzamento. Essa include anche formazioni di patch-reef che occupano la sommità di paleorilievi locali, non affioranti nell'area di studio.

La formazione Terravecchia affiora con continuità nell'area di studio e appoggia in discordanza sopra alle unità del substrato deformato (Argille Variegata e Flysch Numidico). Le argille e argille marnose della formazione Terravecchia sono caratterizzate da associazioni di microfauna a *Neogloboquadrina acostaensis*, *Globigerinoides obliquus extremus*, *Globorotalia suterae* e *G. saheliana* della Zona a *Globigerinoides obliquus extremus* del Tortoniano superiore (Iaccarino, 1985).

La parte superiore della formazione Terravecchia, poggiante sugli alti strutturali e passante superiormente alla formazione del Calcere di Base, contiene i foraminiferi planctonici *Globorotalia conomiozea* e *Globorotalia mediterranea* indicanti un'età Messiniana inferiore (Zona a *Globorotalia conomiozea*), coeva con la base della formazione del Tripoli.

Lo spessore in affioramento è di 100-150 m e l'età va dal Tortoniano superiore al Messiniano inferiore.

### 5.2.2 Formazione del Tripoli (TPL)

Localmente, la formazione di Terravecchia passa superiormente alla formazione nota come Tripoli, rappresentata da depositi di bacino euxinico del Messiniano inferiore, costituiti da diatomiti e marne diatomitiche laminate e fissili da bianche a grigio chiaro con resti di pesci, alternate a marne laminate con abbondanti foraminiferi planctonici, talora bituminose, torbaniti (sapropel) e calcari marnosi. Lo spessore non supera di norma i 40 metri.

I depositi del Tripoli, formati all'interno di bacini marini confinati o isolati, sono parzialmente equivalenti nel tempo alla formazione di Terravecchia e sono caratterizzati da una ciclicità litologica ben sviluppata. L'analisi della microfauna mostra associazioni dominate da foraminiferi planctonici, abbondanti diatomee e coccoliti, meno frequentemente da radiolari, spicole di spugna e resti di pesci (*Bregmaceros sp.*, *Myctophum sp.* e *Syngnathus sp.*; Grasso et al., 1990) e dinoflagellati.

La presenza di *Globigerinoides obliquus extremus*, *Turborotalita multiloba* e *Neogloboquadrina acostaensis destrorsa* è indicativa del Messiniano pre-evaporitico (Iaccarino et al., 2008). Gli spessori arrivano fino a 40 m, raggiungendo localmente 70-80 m (Contrada Gaspa, Grasso et al., 1990).

### 5.2.3 Gruppo della Gessoso-Solfifera

Il termine "Gruppo della Gessoso-Solfifera" è qui utilizzato informalmente per riunire in un unico elemento tutti i depositi riferibili al ciclo evaporitico messiniano. L'area di progetto include termini di entrambe le formazioni principali del Gruppo della Gessoso-Solfifera, ovvero:

- la formazione di Cattolica, che include a sua volta il Calcare di Base, il membro Selenitico Inferiore e il membro Salino Inferiore;
- La formazione di Pasquasia.

L'unica unità affiorante lungo il tracciato di progetto è il Membro Selenitico della Formazione di Cattolica.

#### 5.2.3.1 Formazione di Cattolica (GTL).

##### Membro del Calcare di Base (GTL1).

In affioramento il Membro del Calcare di Base comprende calcari cristallini bianco-grigiastri massivi,

calcari laminati e calcari stromatolitici in banchi talora disarticolati, contenenti livelli lenticolari di calcari brecciati, separati a luoghi da livelli centimetrici di peliti grigiastre.

Talora, all'interno dei banchi carbonatici sono presenti pseudomorfi di cristalli di salgemma e lamine di gesso le quali possono a luoghi costituire livelli lenticolari potenti fino a circa 2 metri.

Lo spessore di questa litofacies è variabile da pochi metri fino a circa 50 metri.

Membro Selenitico (GTL2).

Il membro è costituito da gesso selenitico primario (Figura 22), dominato da grandi cristalli geminati a coda di rondine e da laminiti gessose ("Gessi di Cattolica", Decima & Wezel, 1971) in strati fino a 2 m di spessore. Questi si alternano a strati a scala decimetrica di gessi microcristallini sottilmente laminati argille gessose da bianche a grigio-nere, marne bituminose spesso prive di foraminiferi e locali intercalazioni di laminiti algali e gessosiltiti di colore grigio e biancastro, in strati da molto sottili a sottili.



Figura 22 - Gesso selenitico della formazione di Cattolica (GTL2), versante NE del Monte Stretto (Enna).

Il membro Selenitico si trova in posizione stratigrafica sia al di sopra del Calcarea di Base sia in eteropia con quest'ultimo, o anche direttamente sopra alle formazioni di Terravecchia o del Tripoli. È spesso ampiamente coperto da depositi antropogenici derivanti dall'attività estrattiva presso diverse miniere

abbandonate. Nell'area di studio si rinviene in affioramento a intorno ai rilievi del Monte Stretto e della Rocca di Enna.

Lo spessore varia da pochi metri fino a circa 80-100 metri ma localmente il membro può ridursi fino a scomparire. L'età è messiniana.

#### Membro Salifero (GTL3).

Queste evaporiti non affiorano in superficie nell'area di studio, ma sono state incontrate in diversi sondaggi a carotaggio continuo nell'area a SE dell'imbocco SE della Galleria Marianopoli. In generale, anche quando potrebbero essere presenti in affioramento, esse sono in genere completamente smantellate da fenomeni di dissoluzione superficiale e mascherate da depositi di versante. La loro presenza in sottosuolo è spesso testimoniata dalla diffusa presenza di sorgenti, con portata estremamente ridotta, da cui fuoriescono acque sature in sali e brine.

Le evaporiti sono principalmente costituite da NaCl (salgemma) con intercalati livelli di sali potassico-magnesiaci (kainite). La roccia è caratterizzata da un agglomerato cristallino, con tipici cristalli di cloruro di sodio a morfologia cubica e talvolta con mineralizzazioni solfifere. A luoghi si riconoscono intercalazioni di anidriti (1-10 cm) e argilliti rosse. Lo spessore varia da pochi metri fino ad un massimo di circa 500 metri.

I log dei pozzi minerari spesso non raggiungono la base dei sali. Tuttavia, in alcuni pozzi è possibile trovare sedimenti riferiti alle formazioni di "Cattolica" e "Tripoli" (argille, gesso, sedimenti bituminosi). L'età è messiniana.

### **5.2.1 Gruppo di Geracello**

I depositi che seguono il ciclo messiniano e che concorrono a costituire la megasequenza pliocenico-pleistocenica sono stati qui informalmente inclusi nel Gruppo di Geracello.

#### *5.2.1.1 Formazione dei Trubi (TRB)*

La formazione dei Trubi è rappresentata da depositi marini di scarpata e di bacino pelagico profondo del Pliocene inferiore (Zancleano), poggianti in discordanza sulla Formazione di Pasquasia e costituiti da due differenti litofacies a composizione marnoso-calcareo (TRB) e argilloso-brecciata (TRBa).

La litofacies marnoso-calcareo (TRB) consiste di marne calcaree (Figura 23) e calcari micritici marnosi di colore biancastro, talora bruno e giallastro, in strati da sottili a medi (decimetrici), in genere intensamente fratturati e a frattura concoide, con abbondanti foraminiferi planctonici. Localmente si rinvencono livelli calcareo-marnosi in strati di spessore metrico e strutture da deformazione sinsedimentaria, quali livelli caoticizzati e brecce intraformazionali.

La litofacies argilloso-brecciata (TRBa) comprende argille, argille limose e limi argillosi di colore grigio, grigio-verdastro e marrone, a struttura brecciata o a blocchetti poliedrici, talora scagliosa o indistinta, con locali livelli di sabbie limose grigie e frequenti ghiaie poligeniche da angolose a sub-angolose; localmente si rinvencono livelli di argille marnose e argilliti di colore grigio-verdastro, a struttura brecciata o finemente scagliosa e olistoliti eterometrici di gessi, calcari evaporitici e argille variegata.

L'abbondante associazione planctonica alla base della formazione è caratterizzata dalla concomitante presenza di *Globorotalia margaritae* e *G. puncticulata*.

Lo spessore massimo riconosciuto della formazione è di circa 100 m.



Figura 23 - Affioramento della litofacies marnoso-calcareo dei Trubi, versante NE del Monte Stretto (Enna).

### 5.2.1.1 Formazione di Enna

Si tratta di depositi marini di piattaforma continentale e piana fluvio-deltizia, costituiti da due differenti litofacies a composizione arenaceo-sabbiosa e argilloso-marnosa. Poggiano in contatto stratigrafico discordante sui Trubi, sul Gruppo della Gessoso-Solfifera e sulla Formazione Terravecchia. Lo spessore massimo è di circa 320 m.

La formazione di Enna è costituita da un intervallo basale di marne azzurre (Marne di Enna, ENNa) e nella parte superiore da una successione di calcareniti costiere con subordinati apporti di sabbie silicoclastiche (Calcareniti di Capodarso, ENNb; Roda, 1967).

Le Marne di Enna (ENNa) sono argille marnose e marne di colore grigio e grigio-azzurro, grigio-biancastre all'alterazione, a frattura concoide e stratificazione poco evidente, con locali passaggi di marne grigie; localmente si rinvengono sottili intercalazioni di sabbie, sabbie limose e arenarie grigie e giallastre, più frequenti verso il top della successione, gradualmente passante verso il membro soprastante. Le marne contengono un'associazione di foraminiferi planctonici con *Globigerina bulloides*, *Globigerinoides elongatus*, *Globorotalia bononiensis*, *G. crassaformis aemiliana* e rara *Sphaeroidinellopsis seminulina*.

Lo spessore massimo è di 200 m, l'età è riferibile al Pliocene medio.

Le Calcareniti di Capodarso (ENNb) sono costituite da calcareniti e arenarie a cemento calcareo di colore grigio e giallastro, clinostratificate e a stratificazione incrociata, con diffusi livelli di biocalcareni a frammenti di molluschi (Figura 24), rodoliti ed echinodermi; localmente si rinvengono passaggi di sabbie silicoclastiche e sabbie limose grigie e giallastre, in strati da molto sottili a medi con laminazione incrociata e clinoformi, da sciolte a poco cementate (Figura 25).

Contengono una ricca fauna (non diagnostica) a *Pecten sp.*, *Venus sp.*, *Lucina sp.*, *Ostrea sp.* Lo spessore è di 50-70 m. L'età è dubitativamente assegnata al Pliocene superiore data l'assenza di fauna distintiva.



*Figura 24 - Calcareniti bioclastiche a resti di pettinidi, versante occidentale della Rocca di Enna.*



*Figura 25 - Litofacies sabbiosa della formazione di Enna (ENNb), ai margini dell'omonimo centro abitato.*

### 5.3 Depositi continentali quaternari

I depositi quaternari che si rinvergono lungo il corridoio di progetto sono costituiti essenzialmente da

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - DITTAINO</b> <b>LOTTO 4a: CALTANISSETTA XIRBI - ENNA</b>					
	<b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOMORFOLOGICA ED IDROGEOLOGICA</b>	<b>COMMESSA</b> RS3U	<b>LOTTO</b> 40	<b>CODIFICA</b> D69RG	<b>DOCUMENTO</b> GE 00 01 001	<b>REV.</b> C

depositi alluvionali di diverse età e da depositi detritico-colluviali derivanti dall'accumulo dei prodotti della disgregazione e alterazione dei litotipi del substrato.

### **5.3.1 Depositi Alluvionali**

#### *5.3.1.1 Depositi alluvionali antichi*

I depositi alluvionali antichi (Pleistocene sup. - Olocene) si rinvencono in genere lungo superfici subpianeggianti e a morfologia attenuata, sopraelevate rispetto all'alveo attuale dei corsi d'acqua. Si tratta di depositi di alveo fluviale, piana esondabile, meandro e conoide alluvionale, a dominante composizione sabbioso-ghiaiosa, di spessore massimo inferiore a 20 m.

Comprendono:

- ghiaie poligeniche ed eterometriche, a clasti da subangolosi ad arrotondati, con tessitura da clast- a matrix-supported in matrice sabbiosa e sabbioso-limosa di colore marrone, bruno e giallastro, da scarsa ad abbondante;
- limi sabbiosi e sabbioso-argillosi, con livelli di argille e argille limose nei quali la frazione grossolana è subordinata o assente.
- locali paleosuoli nerastri poco evoluti e livelli di sabbie limose, limi sabbiosi e limi argillosi di colore marrone, con diffuse ghiaie poligeniche da subangolose ad arrotondate.

#### *5.3.1.2 Depositi alluvionali recenti*

I depositi alluvionali recenti (Olocene) costituiscono la maggior parte delle piane alluvionali dei fondovalle attuali (sia principali sia secondari); nei fondovalle principali i depositi recenti risultano sovente terrazzati o incisi da paleoalvei non riattivabili. Sono inclusi in questo gruppo depositi di alveo fluviale, piana esondabile, meandro e conoide alluvionale a dominante composizione sabbioso-ghiaiosa, con spessore massimo dedotto dalle stratigrafie dei sondaggi dell'ordine dei 15 m ca.

Dal punto di vista litologico comprendono limi e limi argillosi con subordinate sabbie e sabbie limose di colore marrone, grigio e giallastro, a stratificazione più o meno ben definita, talora con laminazione incrociata, con abbondanti ghiaie poligeniche da subangolose ad arrotondate; sovente si rinvencono lenti e livelli da metrici a plurimetrici di ghiaie poligeniche ed eterometriche, da subangolose ad

arrotondate, in matrice sabbiosa e sabbioso-limosa di colore marrone e grigio-giallastro, da scarsa ad abbondante.

### 5.3.1.3 *Depositi alluvionali attuali*

I depositi alluvionali attuali costituiscono il riempimento degli alvei di piena attuali, anche temporaneamente abbandonati, e di piana esondabile. Lo spessore massimo è dell'ordine di alcuni metri.

Comprendono ghiaie eterometriche a ciottoli poligenici da arrotondati a subarrotondati, con tessitura clast-supported in matrice sabbiosa e sabbioso-limosa di colore grigio e giallastro, da scarsa a abbondante; sabbie e sabbie limose in matrice limoso-argillosa con intercalazioni di argille limose e locali livelli ghiaiosi. Il colore è generalmente da marrone a ocra, la tessitura è massiva o laminata.

### 5.3.2 *Depositi detritici di versante*

Il materiale sciolto classificato come “depositi detritici di versante” deriva dal trasporto ed accumulo, lungo i versanti e alla loro base, dei prodotti di disgregazione/alterazione del substrato, in particolare se di natura litoide (calcari, calcareniti, ecc.). Possono essere localmente eteropici con i depositi della coltre eluvio-colluviale, o essere da questa ricoperti. Lo spessore massimo è di circa 5-8 m.

Si tratta di depositi a tessitura massiva da clast- a matrix-supported, costituiti da ciottoli, blocchi e ghiaie poligeniche ed eterometriche, con clasti da angolosi a subangolosi, immersi in matrice sabbiosa e sabbioso-limosa di colore grigio, bruno e giallastro. Localmente passano a prevalenti sabbie limose e limi sabbiosi di colore marrone e giallastro, a tessitura massiva, con subordinate ghiaie poligeniche.

### 5.3.3 *Coltre detritico-colluviale e/o eluvio-colluviale*

Depositi sottili derivanti dalla degradazione meccanica e in parte dall'alterazione dei litotipi del substrato, che ricoprono in maniera pressoché ubiquitaria. Lo spessore massimo è di circa 2-3 m, localmente maggiore al piede dei versanti, laddove possono essere presenti accumuli più consistenti; nei primi 1-1.5 m dalla superficie sono spesso intensamente rimaneggiati dalle attività agricole (aratura).

Comprendono argille limose e argille sabbiose, localmente passanti a sabbie argillose e a limi argilloso-

sabbiosi, con frequenti livelli sabbioso-ghiaiosi a clasti poligenici da angolosi a subarrotondati. Il colore varia a seconda del litotipo di origine da grigio a marrone e bruno-rossastro; la tessitura è massiva, con abbondanti resti vegetali.

### 5.3.1 *Depositi antropici*

Pur non rientrando nella stratigrafia geologica s.s., questi depositi vengono qui sinteticamente citati in quanto costituiscono localmente alcuni accumuli di dimensioni rilevanti, nel settore a est di Enna dove è presente una discarica autorizzata di terre e rocce da scavo in cui il materiale stoccato è in fase di rinaturalizzazione.

Si tratta in genere di depositi caotici, costituiti da frammenti (blocchi, ciottoli e ghiaie) eterolitologici, da angolosi a subangolosi, immersi in una matrice dalle caratteristiche molto variabili, da sabbioso-limosa ad argillosa, da scarsa ad abbondante.

Altri corpi detritici di origine artificiale possono essere rappresentati da rilevati stradali e ferroviari, discariche di terre e rocce da scavo, discariche di RSU. In generale questi materiali non interferiscono con il tracciato in progetto.

## 6 ASSETTO STRUTTURALE DI DETTAGLIO NELL'AREA DI PROGETTO

La geometria delle unità di substrato affioranti nell'area riflette la strutturazione tettonica della catena, tuttavia la maggior parte delle strutture tettoniche di cui si suppone l'esistenza è mascherata al di sotto dei depositi continentali quaternari e della coltre eluvio-colluviale che ricopre i versanti con continuità.

Inoltre, le caratteristiche litologiche delle formazioni affioranti, in cui prevalgono nettamente le facies argilloso-siltose e la ridotta percentuale di affioramento che caratterizza il corridoio di progetto non consentono di individuare con precisione la presenza di strutture tettoniche, neanche con l'ausilio della fotointerpretazione.

Fanno eccezione rari casi in cui è stato possibile osservare direttamente delle zone di deformazione fragile in affioramento oppure in alcune delle carote estratte dai sondaggi.

In generale quindi, l'esatta definizione dei rapporti geometrici tra le varie unità geologiche lungo il corridoio di progetto è ipotetica e non facile da definire in dettaglio, data la scarsità di affioramenti chiave che permettano di analizzare la deformazione tettonica che ha interessato l'area.

### 6.1 Stratificazione

Alla scala dell'intera area di studio si osserva nelle diverse unità tettonostratigrafiche una stratificazione sedimentaria, mal definita nelle litofacies a dominante componente argilloso-marnosa, molto più evidente nelle facies sabbioso-arenacee e conglomeratiche, soprattutto grazie alla presenza di corpi lenticolari di arenarie e/o conglomerati più cementati all'interno della formazione di Terravecchia (membro arenaceo). La giacitura della stratificazione immerge generalmente a basso-medio angolo con direzione di immersione mediamente verso E e verso W ma con una notevole variabilità che riflette probabilmente ondulazioni a scala ettometrico-chilometrica all'interno delle unità tettonostratigrafiche, legate alla fase di sovrascorrimento reciproco tra le unità.

### 6.2 Strutture duttili

Non sono molte le strutture a grande scala chiaramente osservabili. L'unica struttura ben definita, nell'ambito dell'area cartografata, è rappresentata da una grande sinclinale che interessa i litotipi delle

unità del Tripoli, della Gessoso-Solfifera e dei Trubi tra le pk di progetto 4+900 e 6+100 ca. La sinclinale ha piano assiale subverticale e asse mediamente immergente verso SSW ed è chiaramente visibile sul terreno e in foto aerea grazie alla relativa minore erodibilità delle formazioni interessate, rispetto alle argille marnose circostanti; ciò fa sì che la geometria della piega sia delineata da una sorta di barra rocciosa che è possibile seguire con continuità per tutto lo sviluppo della struttura (Figura 26), che sembra aprirsi e annullarsi in direzione sud (fuori dall'area rilevata).

Le caratteristiche geometriche della sinclinale fanno propendere per una struttura isolata, legata a una deformazione locale probabilmente correlabile alla fase di messa in posto delle falde della catena, ma non a uno stile deformativo generalizzato a scala regionale.

Non è certo fino a che punto i litotipi della sottostante formazione di Terravecchia siano interessati da questa deformazione, poiché date le sfavorevoli condizioni di affioramento non è possibile fare un'analisi accurata della geometria delle strutture sedimentarie. È verosimile che in prossimità della piega anche la formazione di Terravecchia risulti deformata e che la deformazione vada smorzandosi man mano che ci si allontana dal nucleo della piega in direzione est, ovest e nord.

La struttura della sinclinale alla quota di progetto (galleria naturale "Montestretto") è ben delineata grazie ai sondaggi 4a-GN1-S03 e S04, che hanno intercettato in profondità le varie formazioni interessate a est del nucleo della piega, e ai dati di terreno, che permettono di circoscriverne con precisione i limiti laterali. Inoltre, i due fori 4a-GN1-S02 e S05, realizzati all'interno delle formazioni argilloso-marnose, forniscono un ulteriore controllo indiretto sulla geometria profonda della piega.

La presenza di questa struttura in profondità comporta che la transizione Terravecchia/Tripoli/Gessoso-Solfifera/Trubi sarà attraversata due volte lungo il tracciato della galleria, in senso normale e inverso e che, più in dettaglio, litotipi gessosi (GTL2) e/o contenenti idrocarburi (TPL, GTL2, TRB) saranno attraversati in galleria tra le pk 5+150 e 5+950.

### **6.3 Strutture fragili**

In base ai dati bibliografici, l'area risulta interessata da sovrascorrimenti e faglie inverse con direzione media circa NE-SW, oltre che da faglie ad alto angolo, da normali a trascorrenti, con direzione variabile da SSE-NNW a E-W.

In linea generale i sovrascorrimenti non risultano visibili date le condizioni geomorfologiche e di affioramento locali, se non in base ai rapporti litologici a grande scala tra le unità. In alcuni casi si sono mantenute invariate le informazioni derivate dalla cartografia CARG, mentre in altri è stata ipotizzata la presenza di un contatto anomalo in base a rapporti di sovrapposizione geometrica, laddove si è riscontrata un'unità più vecchia in posizione soprastante a un'unità più recente; questa circostanza può risultare più o meno evidente, a seconda se le differenze litologiche siano più o meno marcate.

In particolare, si localizzano dei presunti sovrascorrimenti nelle posizioni seguenti:

- nella zona circostante la stazione di Caltanissetta (pk 0+200 ca.), dove le Argille Varicolori (AV) sormontano i terreni del Membro di Nicosia (FYN4), con un contatto di direzione circa SSW-NNE.
- Intorno alla pk 1+800, dove in base alla cartografia CARG sembrerebbe delinearci un contatto interno all'unità TRV, con direzione SW-NE, tra le località Masseria Appannati e Arenella.
- Intorno alla pk 8+400, dove un lembo dell'unità AV si sovrappone in maniera evidente alle peliti marnose di Terravecchia TRV; la geometria del corpo di Argille Varicolori a contatto con l'unità TRV suggerisce che si tratti di una scaglia tettonica allungata, campionata lungo la superficie di sovrascorrimento. Questa è evidente in particolare a sud del tracciato, dove delle argille varicolori con una struttura della stratificazione caotica, interessata da numerose pieghe disarmoniche a tutte le scale, sono a diretto contatto con le peliti marnose di Terravecchia. Il contatto è meno evidente a N del tracciato, dove le AV scompaiono e dove vengono a trovarsi a contatto facies sabbiose e marnose della medesima formazione TRV, rendendo molto incerta l'identificazione della struttura, come anche indicato dalla cartografia CARG.
- A nord del tracciato di progetto, indicativamente tra le pk 11+700 e 13+600, dove l'unità AV si trova nuovamente sovrapposta all'unità TRV; il contatto, con direzione WSW-ENE, è in gran parte sepolto sotto ai depositi alluvionali del F. Morello. Questo contatto parrebbe costituire il prolungamento di quello sopra descritto alla pk 8+400, a seguito di uno step strutturale che ha sfalsato le superfici di scorrimento di almeno 6-700 m.

Per quanto riguarda la presenza di zone di faglia, sia osservate sia presunte, per maggiore chiarezza di esposizione esse sono state numerate in ordine progressivo crescente (F1, F2, ecc.) in base alla

progressiva chilometrica di intersezione (cfr. carta geologica e profilo geologico allegati al presente rapporto). Non sono comunque molte le strutture di questo tipo identificabili sul terreno. Una struttura con direzione circa WSW-ENE (F1) è ipotizzata lungo l'asse del V.ne di Anghillà, secondo l'interpretazione contenuta nelle carte del Progetto Preliminare. Non vi sono tuttavia affioramenti e marker stratigrafici utili a identificarne la presenza (la faglia interesserebbe peliti marnose omogenee dell'unità TRV) per cui la struttura rimane ipotetica.

Alcune zone di faglia presunte interessano le pareti impostate nei litotipi post-tortoniani in corrispondenza della piega sinclinale del Monte Stretto; le strutture sono come sempre poco visibili in affioramento, e la loro presenza è stata supposta in base alla fotointerpretazione. Una struttura maggiore (F3) sembrerebbe tagliare il fianco ovest della sinclinale, spingendosi probabilmente fino a quota progetto. Una seconda struttura (F5), non rappresentata nei profili di progetto in quanto localizzata fuori asse, è stata ipotizzata a sud della linea ferroviaria in base ad alcune evidenze morfologiche e fotogeologiche, per spiegare la presenza di una falda in pressione registrata dai sondaggi nei gessi messiniani che formano la piega di Monte Stretto. Per ulteriori dettagli si rimanda al capitolo relativo all'idrogeologia del tracciato.

## 7 GEOMORFOLOGIA

### 7.1 Inquadramento geomorfologico regionale

L'evoluzione geomorfologica dell'area oggetto di studio è strettamente legata ai caratteri ereditati nel corso dell'evoluzione geodinamica della catena Appenninico-Maghrebide e dell'avanfossa Gela-Catania (Lentini et al. 1995; Finetti et al. 1996; Monaco et al. 2000), evoluzione che è stata particolarmente intensa nel Pleistocene medio-superiore e nell'Olocene (Carbone et al. 2010).

Le aree montuose sono caratterizzate da un'orografia relativamente aspra e sono generalmente delimitate da versanti da mediamente a fortemente inclinati. In questi settori il controllo stratigrafico sulla morfologia è piuttosto accentuato: i rilievi principali formano delle bastionate rocciose impostate nei litotipi meno erodibili delle sequenze sedimentarie post-tortoniane, rappresentate in particolare da formazioni calcaree, gessose e calcarenitiche (Tripoli, Gessoso-Solfifera, Trubi, Formazione di Enna), che spiccano sui sottostanti e più antichi depositi argilloso-marnosi e flyschoidi (Formazione di Terravecchia, Flysch Numidico s.l.).

Ne sono un esempio i rilievi su cui sorgono le città di Enna e Caltanissetta, ma anche tutti i principali rilievi che formano la dorsale che collega in direzione WSW-ENE i due capoluoghi e che comprende i monti Sabucina (706 m), Capodarso (799 m), Cannarella (819 m) e Bruchito (872 m).

A scala locale, nell'ambito del corridoio di progetto, è da segnalare il rilievo del Monte Stretto (505 m), tra Caltanissetta e il corso del Fiume Imera Meridionale, impostato in una grande struttura sinclinale di terreni post-tortoniani (§ 0 e Figura 26). Gli altri rilievi importanti attraversati dalla linea sono costituiti dalle pendici settentrionali del M. Capodarso (Figura 27) e il rilievo articolato del M. Enna (quota massima 975 m) su cui sorge il capoluogo omonimo.



Figura 26. Veduta prospettica da ovest tra le pk 4 e 6 (il tracciato, in rosso, è indicativo) dove questa interseca il rilievo arcuato del M. Stretto, impostato nelle successioni post-tortoniane piegate da una sinclinale con asse immergente verso SSW. Sulla sinistra la S.S. 640 a E di Caltanissetta.



Figura 27. Veduta prospettica da ovest tra le pk 7 e 10 (il tracciato, in rosso, è indicativo). A sud (sinistra) della linea è visibile la dorsale del M. Capodarso, con le successioni post-tortoniane immergenti verso sud. In primo piano il corso del Fiume Imera Meridionale, attraversato dalla Statale 626.

Al di fuori dei rilievi citati, la restante parte del tracciato attraversa un territorio collinare, attraversando le valli dei Fiumi Salso (o Imera Meridionale) e Morello, caratterizzato da una morfologia poco accentuata condizionata dall'affioramento diffuso di unità litostratigrafiche a dominante componente pelitica, cioè le unità di Terravecchia e le unità di pertinenza del Flysch Numidico s.l.

L'evoluzione di queste aree, caratterizzate da rilievi collinari poco acclivi, è essenzialmente controllata dall'azione dei corsi d'acqua che hanno generato ampie vallate a morfologia pianeggiante dove i corsi d'acqua hanno la tendenza a sviluppare, almeno localmente, un andamento meandriforme.

Fra le forme fluviali sono frequenti le incisioni, anche profonde, connesse all'abbassamento del livello di base dell'erosione, come valli a V, vallecole a fondo concavo e brevi gole fluviali; queste forme sono particolarmente sviluppate lungo il reticolato idrografico minore. Si osservano inoltre forme legate all'erosione laterale durante le fasi di stazionamento del livello di base, come meandri, scarpate di erosione, terrazzi e superfici di spianamento.

### **7.1.1 Dissesti e processi erosivi**

I versanti dei settori collinari sono spesso interessati da processi di dilavamento ed erosione superficiale e dal frequente innesco di movimenti franosi superficiali, che interessano i primi metri dei terreni di copertura ma che molto raramente vanno a incidere i litotipi del substrato (Alfieri et al. 1994; Agnesi et al. 2000; Contino, 2002).

Le forme di ruscellamento consistono solitamente in forme di erosione superficiale diffusa, rappresentate da rivoli e solchi sul cui fondo si depositano accumuli colluviali, oppure da aree a calanchi in stadio da embrionale a evoluto, particolarmente frequenti nelle litofacies a prevalente componente argilloso-marnosa.

I dissesti superficiali costituiscono un agente morfogenetico importante. I fenomeni più comuni sono rappresentati da frane di colamento e frane composite, cioè frane caratterizzate dalla concomitanza di più meccanismi evolutivi, tipicamente una combinazione di movimento rotazionale iniziale che evolve in colamento. La maggior parte delle frane cartografate lungo il corridoio di progetto appartiene a queste due categorie.

Nei settori di rilievo montuoso più accentuato, dove affiorano le successioni sedimentarie post-

tortoniane (es.: Gessoso-Solfifera, Gruppo di Enna), la relativa minore erodibilità dei litotipi determina la creazione di forme più aspre e acclivi, con sviluppo di barre rocciose, talora quasi verticali e con altezze di diverse decine di metri, come nel caso del rilievo su cui sorge la città di Enna.

In questi contesti l'energia del rilievo e la natura litoide del substrato favoriscono l'insorgere di dissesti per crollo che talora possono coinvolgere estesi settori di versante. Localmente, soprattutto nei movimenti franosi di maggiori dimensioni in cui vengono coinvolti anche terreni argilloso-marnosi delle formazioni sottostanti, la componente iniziale di crollo evolve successivamente, o in maniera concomitante, in colamento.

Alcune di queste frane, cartografate a livello regionale, possono generare forme di accumulo lunghe fino a un massimo di 3-4 km, con spessori che per i corpi di maggiore estensione possono superare 100 m; per i dissesti più circoscritti gli spessori tipici dell'accumulo sono generalmente compresi tra 2 e 10 m (Catalano et al. 2011).

### **7.1.2 Morfologia dei principali sistemi fluviali**

Le direzioni di deflusso dei principali corsi d'acqua sono indubbiamente condizionate dall'assetto circa E-W della catena Appenninico-Maghrebide, che ha favorito lo sviluppo di aste fluviali con direzione prevalente N-S (Contino 2002; Catalano et al. 2011). Alcune marcate deviazioni verso est o verso ovest sono probabilmente riferibili a un controllo strutturale sullo sviluppo della rete idrografica, dovuto ad esempio alla geometria regionale dei fronti di sovrascorrimento o alla tettonica disgiuntiva più recente.

Il reticolo fluviale locale ricade nel settore settentrionale del bacino del Fiume Imera Meridionale, che si estende per circa 2'000 km<sup>2</sup> tra le Madonie e il Mediterraneo, nella parte centrale della Sicilia. Il bacino comprende sette sottobacini con superficie superiore a 100 km<sup>2</sup>, di pertinenza dei fiumi Salso, Morello, Torcicoda, Buriana, Brami, Gibbosi e Mendola.

L'area di studio attraversa, nel settore orientale, parte del bacino del Fiume Morello, affluente di sinistra dell'Imera Meridionale.

Il regime di questi corsi d'acqua è caratterizzato da portate medie annue molto modeste, a dispetto dell'estensione del bacino idrografico, portate che quasi si annullano nella stagione secca. Sono però frequenti le piene improvvise in concomitanza con le precipitazioni di forte intensità che si verificano

soprattutto nel periodo autunnale.

## **7.2 Assetto geomorfologico locale**

Nell'area di studio sono comprese molte delle caratteristiche morfologiche descritte nei paragrafi precedenti. Forme e processi sono evidentemente condizionati dalle caratteristiche delle formazioni geologiche che costituiscono il substrato prequaternario.

Dall'altra parte, il controllo strutturale, sia pur importante a livello regionale, appare poco evidente alla scala del corridoio di progetto, se si escludono alcune situazioni particolari, soprattutto in confronto all'insieme dei processi di disgregazione ed erosione del substrato (anche di tipo fluviale o torrentizio) che si innescano lungo i versanti e che seguono un'evoluzione ciclica condizionata dall'andamento stagionale delle precipitazioni.

Di seguito vengono descritti i principali elementi geomorfologici presenti nell'area e i relativi fattori condizionanti, con riferimento a quanto riportato nella cartografia geologica allegata.

### **7.2.1 Elementi idrografici**

L'area di studio ricade all'interno del bacino idrografico del Fiume Imera Meridionale (o Salso Himeras): il settore occidentale attraversa il corso dell'Imera che in questa zona segue un andamento circa N-S; nel settore orientale l'area interseca invece la valle del Fiume Morello, affluente di sinistra dell'Imera, qui con andamento approssimativamente E-W.

Il fiume nasce nella catena delle Madonie in provincia di Palermo da tre sorgenti separate che generano tre rami: il ramo "Petràlia", il ramo "Pellizzara" e il ramo "Gangi". Il Pellizzara, ramo centrale, si carica di sali attraversando potassiche di Alimena, riceve poco più a valle il fiume Gangi e quindi confluisce con l'Imera Meridionale presso il confine tra le province di Palermo, Caltanissetta ed Enna, andando a formare l'Imera Meridionale - Salso propriamente detto.

Dalla confluenza il fiume prosegue verso sud costituendo per parecchi km il confine tra le province di Enna e Caltanissetta e ricevendo svariati affluenti, tra i quali, da sinistra, il fiume Morello.

Successivamente il fiume attraversa la provincia di Agrigento sviluppando un corso meandriforme e andando a sfociare nel Canale di Sicilia presso Licata.

Il Fiume Morello nasce dalle pendici del Monte Altesina e confluisce nell'Imera Meridionale in sinistra idrografia poco a valle di Ponte di Capodarso. Uno sbarramento artificiale costruito tra il 1968 e il 1973 ha dato origine lungo il corso del fiume al Lago Morello.

Oltre ai corsi d'acqua principali sopra descritti, sono presenti numerosi corsi d'acqua secondari a carattere marcatamente stagionale e/o torrentizio, con portate estremamente variabili e fortemente condizionate dal regime delle piogge. I bacini dei tributari presentano generalmente un andamento circa ortogonale a quello dei corsi d'acqua principali e sono caratterizzati da strette vallate incise nei litotipi del substrato. Ad essi si aggiungono, infine, numerosi valloni e solchi di erosione concentrata attivi solo in concomitanza di eventi meteorici particolarmente intensi.

### **7.2.2 Forme, processi e depositi gravitativi**

Nell'attuale contesto morfoclimatico i fenomeni gravitativi rappresentano un fattore di particolare importanza nell'evoluzione geomorfologica del territorio.

I processi gravitativi sono più diffusi in corrispondenza dei rilievi collinari caratterizzati dall'affioramento di litotipi a dominante componente pelitica, principalmente il membro pelitico-argilloso della Formazione Terravecchia (TRV), le argille che compongono a più livelli stratigrafici le formazioni messiniane di Cattolica (GTL2, GTL3) e Pasquasia (GPQ), infine le argille più o meno marnose di pertinenza del substrato deformato pre-Tortoniano (Argille Variegate, AV e Flysch Numidico, FYN).

I rilievi collinari sono in genere caratterizzati da fenomeni di deformazione viscosa delle coltri (soliflusso) e localmente dall'insorgere di movimenti franosi, generalmente di estensione e spessore alquanto ridotti, che coinvolgono principalmente la coltre eluvio-colluviale e localmente la porzione più superficiale del substrato alterato.

I movimenti franosi sono essenzialmente riconducibili a colamenti, scivolamenti e frane composite (o complesse) in terra (Varnes, 1978; Cruden & Varnes, 1996), per lo più attive o quiescenti, dove per "attivo" si intende un fenomeno di cui si abbiano evidenze morfologiche di movimenti avvenuti per lo meno nell'ultimo anno. Molti dei fenomeni osservati sono caratterizzati da un marcato rimodellamento che avviene sia per fattori naturali (progressiva erosione delle scarpate nella zona di distacco, redistribuzione e assestamento dell'accumulo, erosione al piede da parte dei corsi d'acqua, ecc.) sia per

fattori antropici, in particolare legati alle attività agricole intensive che caratterizzano la regione, tra cui le arature periodiche che tendono a obliterare completamente le tracce di eventuali dissesti più vecchi di 1-2 anni (Figura 28). Proprio in considerazione di questo rimodellamento continuo, e delle caratteristiche intrinseche dei versanti dal punto di vista sia litologico sia geotecnico, non si può del tutto escludere che aree riconosciute come prive di dissesti al momento dello studio possano evolvere sviluppando forme di dissesto di qualche tipo, in risposta, per esempio, a periodi di piogge intense e/o prolungate, particolarmente per quei versanti con pendenze superiori a 15°.

L'insieme delle frane identificate nell'area di studio è descritto in sintesi nei paragrafi seguenti, che riassumono i caratteri morfologici e geometrici distintivi, fornendo inoltre una valutazione sintetica del livello di interferenza che ciascun tipo di dissesto presenta nei confronti del tracciato. La terminologia e le descrizioni adottate fanno riferimento al manuale APAT (2006) e al Vol. 13 dei Quaderni ISPRA della Carta Geomorfologica d'Italia (2018).



*Figura 28 - Esempio di rimodellamento antropico di un dissesto recente (frana composta, rotazionale + colamento) localizzata fuori dall'area rilevata. A: situazione ad agosto 2019; B: la stessa frana a ottobre 2019, dopo l'aratura. Il terreno viene progressivamente riportato in posto per non perdere l'estensione coltivabile e nel giro di due anni si perde gran parte dell'evidenza del dissesto.*

### 7.2.2.1 Crolli crolli e/o ribaltamenti a carico di porzioni di affioramenti rocciosi fratturati e rilasciati

#### Profondità tipica osservabile:

variabile

#### Definizione:

Per crollo si intende il movimento di caduta in aria libera di materiali di qualunque dimensione e tipologia (rocce, detriti e terre). È un fenomeno da rapido a estremamente rapido, caratteristico di pendii molto acclivi. Generalmente il distacco avviene in corrispondenza di superfici di discontinuità preesistenti, ma non sono rare le superfici di neoformazione. Tali discontinuità sono costituite generalmente da giunti, stratificazione, piani di faglia, piani di scistosità o di laminazione, superfici di contatto tra materiali con caratteristiche geomeccaniche differenti.

I materiali spostati se la morfologia lo consente possono continuare il movimento a salti e rimbalzi lungo il versante. Il distacco iniziale e i successivi impatti possono provocare un'intensa frantumazione del materiale coinvolto, in diversi elementi di dimensioni molto variabili.

#### Localizzazione e principali caratteristiche osservate nell'area di studio

Nell'area di studio gli accumuli di crollo sono localizzati essenzialmente alla base delle, pareti impostate in materiali litoidi, che formano i rilievi su cui sorgono gli abitati di Marianopoli ed Enna.

I depositi di crollo sono in genere frammisti a depositi detritici di versante derivanti dalla disgregazione graduale e progressiva delle pareti, che avviene per distacco di singoli blocchi o piccole porzioni rocciose. Gli eventi di crollo vero e proprio di cui siano stati riconosciute le forme sono rari nell'area di studio e non interferiscono con il tracciato di progetto.

Nell'ambito del Lotto 3 è stato rilevato un unico fenomeno di crollo a carico di una parete in calcareniti e gessareniti all'interno della fm. di Pasquasia, nei pressi della PK 34+500. Il fenomeno non interferisce con il tracciato.

Nell'ambito del Lotto 4a accumuli di crollo sono visibili nei dintorni di Enna, alla base delle pareti che formano la rocca su cui sorge la città, senza che sia ipotizzabile alcuna interferenza con il tracciato.

### 7.2.2.2 Frana rotazionale

#### Profondità tipica osservabile:

Variabile

#### Definizione:

Gli scorrimenti rotazionali avvengono con un movimento di rotazione intorno a un punto o un asse esterno al versante, posto al di sopra del baricentro della massa spostata. La superficie di rottura ha di solito forma arcuata con concavità verso l'alto. La massa in movimento si scompone frequentemente in più blocchi ruotati in diverse direzioni, sia verso monte sia verso valle, che talvolta possono rimanere relativamente integri al proprio interno. La massa dislocata si muove oltre la superficie di rottura, sovrapponendosi al pendio sottostante indisturbato.

Nella parte bassa della frana si possono verificare rigonfiamenti e avvallamenti trasversali. Se lo scorrimento coinvolge litotipi prevalentemente argillosi e marnosi, l'alterazione delle caratteristiche geotecniche dei materiali coinvolti comporta la frequente evoluzione del movimento in un colamento lento (cfr. "frana complessa").

#### Localizzazione e principali caratteristiche osservate nell'area di studio

Nell'area di studio si osservano poche frane a carattere francamente rotazionale poiché, data la natura dei terreni affioranti, queste frane evolvono naturalmente verso altri tipi di processo, in primo luogo i colamenti lenti.

Sono in genere frane superficiali che coinvolgono solo la parte di coltre detritico-colluviale e in misura minore la porzione di substrato più alterata, per uno spessore che non supera i 5 m.

Frane rotazionali s.s. sono state osservate, nell'ambito del lotto 4a, in corrispondenza di alcuni orizzonti maggiormente sabbiosi all'interno della formazione Terravecchia, tra le pk 17+300 18+800; inoltre, una frana rotazionale coinvolge un preesistente accumulo detritico di versante a E di Enna, all'altezza della pk 22+400.

Nessuno di questi dissesti interferisce (anche solo marginalmente) con il tracciato in progetto.

### 7.2.2.3 Colamento lento

#### Profondità tipica osservabile:

Da 1 a 3 m

#### Definizione:

Fenomeno superficiale a lenta evoluzione che coinvolge la coltre detritica superficiale e localmente la parte alterata del substrato.

Questa tipologia di movimento interessa con maggiore diffusione detriti e terre, ed è tipica dei terreni ad elevato contenuto in argilla.

Il colamento è causato generalmente dalla saturazione del materiale per aumento del contenuto d'acqua e implica un'intensa deformazione plastica differenziale all'interno del corpo di frana.

Il movimento all'interno di una frana di colamento non è omogeneo: la distribuzione delle velocità e degli spostamenti all'interno della massa in movimento può essere paragonata a quella di un fluido viscoso, con velocità maggiori al centro rispetto ai bordi, e in superficie rispetto alle parti più profonde. Questa distribuzione genera la caratteristica morfologia del colamento.

La superficie di scorrimento può essere netta o può corrispondere a una zona di deformazione in cui l'entità dei movimenti tende a diminuire con la profondità.

Tali fenomeni sono caratterizzati da basse velocità di spostamento, comunque dipendenti dal contenuto in acqua e dalla pendenza del versante.

Elementi morfologici tipici dei colamenti sono avvallamenti, rigonfiamenti e contropendenze che favoriscono il ristagno d'acqua e aggravano di conseguenza le condizioni di equilibrio. I corpi di accumulo presentano una caratteristica morfologia allungata e lobata.

#### Localizzazione e principali caratteristiche osservate nell'area di studio

Nell'ambito dell'area di studio i colamenti lenti rappresentano la principale tipologia di dissesto riconosciuta, essendo caratteristici delle formazioni argillose come la formazione Terravecchia, che affiora in maniera continua lungo tutto il tracciato.

Si tratta invariabilmente di fenomeni superficiali, che interessano la coltre detritica che ricopre i versanti

e talora la parte superiore del substrato argilloso-marnoso in posto, laddove questa sia interessata da fenomeni di alterazione.

I colamenti osservati nell'area di studio non si propagano in profondità a causa della bassissima permeabilità del substrato argilloso su cui si sviluppano, che impedisce l'infiltrazione dell'acqua piovana a livelli profondi.

Lo spessore di materiale che può essere coinvolto in questi processi di dissesto è chiaramente determinabile in base ai numerosi sondaggi realizzati lungo il tracciato.

Un fenomeno di colamento lento allo stato quiescente è stato individuato a valle dell'imbocco lato Catania della galleria Montestretto.

Anche in questo caso si tratta di un fenomeno superficiale che non interessa il substrato in posto, ha spessore non superiore a 3 metri.

Dato il carattere superficiale, questo tipo di dissesti tende a venire progressivamente rimodellato e completamente obliterato dalle attività di aratura periodica dei campi, che si spingono fino 1.5 m ca. dalla superficie. L'aratura tende a riomogeneizzare il pendio in dissesto, di fatto mitigandone almeno in parte le condizioni di instabilità.

#### 7.2.2.4 *Movimenti complessi*

##### Profondità tipica osservabile:

Variabile

##### Definizione:

Combinazione di due o più tipi di movimento, generalmente scivolamenti rotazionali che evolvono in colamenti lenti o veloci.

Questi movimenti presentano caratteristiche di innesco ed evoluzione nel tempo e nello spazio non riconducibili a una sola delle categorie precedentemente descritte. Il relativo movimento deriva quindi dalla combinazione di due o più tipi di movimento, verificatisi in successione temporale.

Frane con movimento complesso sono piuttosto frequenti nell'area e si originano principalmente nei terreni a forte componente argillosa (formazione Terravecchia, Flysch Numidico, ecc.).

Analogamente ai colamenti s.s. osservati nell'area di studio anche questi fenomeni hanno carattere generalmente superficiale, interessando la coltre detritica ed eventualmente la parte superiore del substrato alterato (se presente), per una profondità fino a 2-3 m dal piano campagna.

Localizzazione e principali caratteristiche osservate nell'area di studio

Il fenomeno si origina tipicamente come scivolamento rotazionale, nel momento in cui uno strato di coltre si destabilizza lungo una superficie di distacco/scivolamento di forma arcuata e con coronamento pressoché.

L'elevato contenuto in acqua che caratterizza invariabilmente il materiale così destabilizzato e la perdita di coesione innescata dal movimento fanno sì che la massa spostata si destrutturi rapidamente fluidificandosi ed evolvendo a colamento.

Fenomeni di questo tipo sono stati individuati in corrispondenza dell'imbocco lato Catania della galleria Montestretto. Si tratta di fenomeni che interessano uno spessore di coltre detritica (in alcuni casi misurabile direttamente in corrispondenza del coronamento) di non più di 2,5-3 m.

Dato il carattere superficiale, questo tipo di dissesti tende a venire progressivamente rimodellato e completamente obliterato dalle attività di aratura periodica dei campi, che si spingono fino 1.5 m ca. dalla superficie.

**7.2.2.5 Aree a franosità diffusa**

Profondità tipica osservabile:

< 2 m

Definizione:

Il termine è utilizzato per descrivere aree caratterizzate da numerose piccole frane superficiali (generalmente con cinematismo di tipo colamento) di dimensioni generalmente non cartografabili, che coinvolgono uno spessore di terreno inferiore a 2 m.

Il tipo di cinematismo delle frane che interessano queste aree può variare da crolli, scivolamenti e colamenti.

Gli interventi in queste aree devono essere mirati a migliorare le condizioni di stabilità, agendo

soprattutto sulla regolarizzazione e il drenaggio delle acque superficiali ed il rinverdimento delle scarpate e delle aree denudate.

Localizzazione e principali caratteristiche osservate nell'area di studio

Aree a franosità diffusa si rinvengono in diversi punti lungo il tracciato ma non interferiscono con le opere in progetto e hanno, in ogni caso, un carattere estremamente superficiale.

Queste aree di solito non sono rimodellate dalle attività agricole in quanto corrispondono a settori di pendio troppo acclivi perché ne sia possibile l'aratura.

7.2.2.6 Aree in soliflusso

Profondità tipica osservabile:

< 1.5 m

Definizione:

Il soliflusso consiste in un movimento lento e discontinuo, che coinvolge le porzioni più superficiali del pendio senza una precisa superficie di scivolamento ma con un movimento viscoso rispetto al substrato integro. Il fenomeno aumenta significativamente durante le stagioni piovose.

È tipico di terreni poco permeabili, ricchi di limo e argilla e capaci di imbibirsi d'acqua.

Il movimento si verifica anche su pendii di modesta acclività; l'inclinazione minima, affinché avvenga il soliflusso si aggira intorno a 5°.

In generale coinvolge spessori modesti (1-2 metri) ed è caratterizzato da velocità dell'ordine di alcuni decimetri per anno.

Localizzazione e principali caratteristiche osservate nell'area di studio

Nell'area di studio il soliflusso è un fenomeno molto diffuso che interessa la maggior parte dei campi arati. L'aratura crea un disturbo superficiale nel terreno, fino a circa 1-2 m di profondità, che ne favorisce l'imbibizione e quindi l'insorgere di una lenta deformazione gravitativa determinata da scorrimenti intergranulari diffusi.

Trattandosi di un fenomeno estremamente lento ed estremamente superficiale, esso non interferisce in maniera significativa con le opere in progetto, fatta salva l'adozione degli opportuni accorgimenti per il

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - DITTAINO</b> <b>LOTTO 4a: CALTANISSETTA XIRBI - ENNA</b>					
	<b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOMORFOLOGICA ED IDROGEOLOGICA</b>	<b>COMMESSA</b> RS3U	<b>LOTTO</b> 40	<b>CODIFICA</b> D69RG	<b>DOCUMENTO</b> GE 00 01 001	<b>REV.</b> C

sostegno temporaneo e definitivo di tutti i fronti di scavo aperti su pendio e per il drenaggio delle acque di ruscellamento superficiale.

### **7.2.3 Forme, processi e depositi legati alle acque superficiali**

Nell'area esaminata le forme di accumulo connesse al deflusso idrico superficiale derivano essenzialmente dai processi di erosione e deposizione dei principali sistemi fluviali. I depositi che colmano i fondovalle presentano al loro interno notevoli variazioni granulometriche legate all'alternarsi di fasi di erosione e trasporto a energia differenziata.

Nei tratti vallivi con gradiente topografico meno accentuato si manifesta sovente la tendenza del corso d'acqua di fondovalle, sia esso un corso principale o un tributario laterale, a sviluppare un corso meandriforme che lo porta gradualmente a erodere i fianchi vallivi determinando la creazione di scarpate di meandro piuttosto acclivi, per lo più incise nel substrato prequaternario. Su queste scarpate si innesca frequentemente un'evoluzione di tipo calanchivo che porta al denudamento di porzioni sempre più estese di substrato, come si osserva ad esempio al piede dei versanti che bordano a est il corso del T. Belice.

Gli alvei secondari mostrano in generale una marcata tendenza all'approfondimento, andando a erodere spesso il substrato prequaternario; il trasporto solido abbastanza consistente che si verifica lungo queste aste torrentizie, spesso a carattere stagionale, determina localmente la formazione di apparati di conoide allo sbocco del tributario sul fondovalle principale.

In corrispondenza dei litotipi meno erodibili (Gessoso-Solfifera, Gruppo di Enna) si sviluppano versanti e rilievi più acclivi, interessati da fenomeni erosivi concentrati e dallo sviluppo di forme di microcarsismo locale, che comporta la formazione di un reticolo idrografico superficiale più irregolare e discontinuo.

### **7.2.4 Forme antropiche**

I principali elementi connessi con l'attività antropica derivano da opere di regimazione delle acque correnti superficiali, da interventi di sistemazione dei principali corsi d'acqua presenti nell'area, o da attività di scavo e discariche.

In genere, i riporti antropici costituiti da materiali provenienti da cave e sbancamenti localizzati hanno

estensione molto ridotta, data l'assenza, lungo il corridoio di progetto, di attività estrattive a livello industriale. Rare piccole cave abbandonate, di tipo artigianale, si possono rinvenire in corrispondenza di affioramenti rocciosi di gessi e calcareniti, principalmente nei dintorni di Marianopoli.

Da segnalare sono i consistenti accumuli di smarino che si osservano presso l'imbocco est della galleria ferroviaria di Marianopoli, una delle prime e più importanti opere in sotterraneo realizzate in Italia nella seconda metà dell'800.

Questi accumuli, oggi completamente rinaturalizzati, hanno profondamente modificato la morfologia dell'area circostante l'imbocco del tunnel ferroviario.

### **7.3 Compatibilità dell'opera con l'assetto geomorfologico del territorio**

In sintesi, allo stato attuale non sono stati identificati dissesti di grandi proporzioni in grado di interferire con il tracciato di progetto. I dissesti che possono in qualche misura interferire con il tracciato o con le opere accessorie (es. viabilità) sono frane a carattere superficiale, che interessano uno spessore di coltre eluvio-colluviale generalmente non superiore a 3 m. Questi dissesti sono descritti in dettaglio nelle schede presentate in allegato al presente rapporto (Elaborato "Schede di rilevamento dei dissesti e degli stop geologici").

Il tracciato in progetto ricade nel territorio di competenza dell'Autorità di Bacino della Regione Sicilia. Gli studi condotti nell'ambito della presente fase progettuale sono stati indirizzati, tra l'altro, a una verifica puntuale delle interferenze tra l'assetto geomorfologico della regione e l'opera in progetto nonché a una verifica puntuale dei dissesti indicati nella cartografia del Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) per i bacini idrogeologici del Fiume Torto e del fiume Patani.

I risultati di questa analisi sono presentati separatamente, nella "Relazione di compatibilità geomorfologica" allegata alla documentazione di progetto.

## 8 INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO

In generale, la variabilità geologica caratteristica dell'area in cui ricade il progetto genera la presenza di più complessi idrogeologici. Inoltre, la presenza di interventi antropici rilevanti nei confronti dell'andamento degli acquiferi (es. gallerie autostradali), determina un'ulteriore variabilità idrogeologica a livello locale.

Nell'area si riconoscono principalmente acquiferi impostati nelle unità costituenti il basamento prequaternario, caratterizzati generalmente da permeabilità medio-basse perché a composizione prevalentemente argilloso-marnosa, con eccezioni di limitata estensione nei depositi a granulometria maggiore e nei livelli a composizione carbonatica

Gli acquiferi impostati nelle unità quaternarie hanno generalmente limitato spessore e si rinvencono nelle aree dei fondovalle, all'interno dei depositi alluvionali, solitamente caratterizzati da significativa continuità laterale. Gli acquiferi all'interno dei depositi detritici (accumuli di frana) o nella coltre eluvio-colluviale mostrano potenze molto esigue e carattere locale.

Per quanto riguarda la produttività ai fini dell'utilizzo, gli acquiferi più significativi sono presenti nei livelli più grossolani e permeabili dei principali corsi d'acqua. La presenza dei litotipi appartenenti alle unità messiniane, caratterizzati da elevato contenuto in mineralizzazioni facilmente solubili, rende le acque sotterranee in taluni casi molto saline e pertanto poco utilizzabili.

Nei capitoli successivi si descrivono le caratteristiche più specifiche degli acquiferi nell'area di progetto, definite sulla base dei dati geologici acquisiti nel presente lavoro, e dei dati relativi ai punti di osservazione delle acque sotterranee (sorgenti, piezometri, pozzi) e delle acque superficiali (corsi d'acqua).

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - DITTAINO</b> <b>LOTTO 4a: CALTANISSETTA XIRBI - ENNA</b>					
	<b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOMORFOLOGICA ED IDROGEOLOGICA</b>	<b>COMMESSA</b> RS3U	<b>LOTTO</b> 40	<b>CODIFICA</b> D69RG	<b>DOCUMENTO</b> GE 00 01 001	<b>REV.</b> C

## 9 ASSETTO IDROGEOLOGICO LOCALE

La definizione del modello geologico di riferimento dell'area di progetto ha permesso di determinare anche l'assetto idrogeologico locale con maggior dettaglio rispetto a quanto definito negli studi precedenti.

Inoltre, durante la campagna di indagini geognostiche realizzata durante questa fase progettuale, sono stati acquisiti ulteriori dati relativi alla soggiacenza della falda e alle caratteristiche di permeabilità degli acquiferi lungo l'area interessata dal tracciato dell'opera principale. Questi dati sono stati analizzati e, insieme a quelli acquisiti nelle fasi progettuali precedenti, hanno permesso una miglior definizione del contesto idrogeologico.

Parallelamente all'acquisizione dei dati mediante indagini geognostiche, sono stati condotti rilevamenti di terreno finalizzati ad individuare le caratteristiche geologiche che influenzano fortemente l'assetto idrogeologico, quali ad esempio, l'individuazione delle lenti più grossolane nella Formazione di Terravecchia e della loro continuità laterale.

### 9.1 Dati idrogeologici preesistenti

Nell'ambito delle campagne di indagine eseguite nelle precedenti fasi progettuali condotte da Italferr nel 2018 e nel 2013, erano state effettuate prove di permeabilità in foro di tipo Lefranc, i cui risultati sono riportati nella Figura 29. Si specifica che l'individuazione dell'unità geologica a cui sono state riferite le prove è stata rivista sulla base del nuovo modello geologico realizzato nel presente progetto definitivo.

Inoltre, nei mesi di maggio e giugno 2018 erano state eseguite delle misure di soggiacenza nei sondaggi attrezzati con piezometro realizzati nel 2018. Sebbene i dati acquisiti allora non siano del tutto confrontabili con quelli della presente fase progettuale a causa del differente periodo stagionale in cui sono stati misurati questi ultimi, in Figura 30 si riportano per esaustività dell'informazione sia le letture che le caratteristiche dei piezometri installati.

Codice Sondaggio	Profondità (m da p.c.)	K (m/s)	Geologia
4S01	5.0 - 5.5	1.35E-07	TRV
4S01	20.0 - 20.5	2.30E-08	TRV
4S02	19.0 - 19.5	1.20E-08	TRV
4S02	25.0 - 25.5	1.11E-08	TRV
4S03	17.5 - 18.0	2.10E-08	TRV
4S03	24.5 - 25.0	2.23E-08	TRV
4S04	4.5 - 5.0	2.67E-05	a2
4S04	19.5 - 20.0	5.65E-08	TRV
4S05	70.9 - 71.4	4.94E-09	TRV
4S05	82.0 - 82.5	9.02E-10	TRV
4S06	5.0 - 5.5	1.29E-07	a2
4S06	19.0 - 19.5	1.81E-08	TRV
4S07	4.5 - 5.0	7.72E-07	a2
4S07	18.9 - 19.4	6.00E-08	TRV
4S08	50.0 - 50.5	2.57E-09	TRV
4S08	63.5 - 64.0	2.03E-09	TRV
4S09	50.2 - 50.7	7.51E-08	TRV
4S09	59.9 - 60.4	1.97E-08	TRV
4S10	5.2 - 5.7	7.51E-08	TRVa
4S10	20.1 - 20.6	4.76E-08	TRVa

Figura 29 - Prove di permeabilità di tipo Lefranc realizzate nella campagna geognostica Italferr 2018.

Sondaggio	Piezometro			Soggiacenza (m da p.c.)		
	Codice	Tipo	Tratto fenestrato (m da p.c.)	Tratto cieco (m da p.c.)	maggio 2018	maggio 2018
4S01	Norton	9.0 - 30.0	0.0 - 9.0	29.85	falda assente	29.76
4S02	Norton	15.0 - 24.0	0.0 - 15.0	7.55	16.53	15.98
4S03	Norton	13.0 - 22.0	0.0 - 13.0	2.55	14.21	14.08
4S04	Norton	3.0 - 24.0	0.0 - 3.0	1.64	5.69	1.64
4S05	Norton	69.0 - 78.0	0.0 - 69.0	41.5	71.28	70.89
4S06	Norton	15.0 - 18.0	0.0 - 15.0	7.9	15.11	15.1
4S07	Norton	3.0 - 12.0	0.0 - 3.0 e 12.0 - 15.0	2.1	5.66	2.1
4S08	Norton	63.0 - 75.0	0.0 - 63.0	23.2	65.81	65.22
4S09	Norton	56.0 - 65.0	0.0 - 56.0	29.5	57.25	57.19

Figura 30 – Caratteristiche dei piezometri installati nell'ambito della campagna geognostica Italferr 2018 e letture di soggiacenza.

## 9.2 Dati idrogeologici di nuova acquisizione

Nell'ambito della campagna di indagini eseguita nel Progetto Definitivo sono state realizzate ulteriori prove di permeabilità in foro, sia di tipo Lefranc che Lugeon, i cui risultati sono riportati nella Figura 31.

Si precisa che per le prove Lugeon i valori di conducibilità idraulica indicati derivano dall'interpretazione effettuata in considerazione dell'andamento della curva pressione-portata unitaria durante il ciclo di carico-scarico.

La posizione delle prove e i risultati delle stesse sono anche rappresentate sul profilo idrogeologico redatto in scala 1:5.000/1:500.

*Figura 31 - Prove di permeabilità realizzate nella campagna geognostica Italferr 2019.*

Codice Sondaggio	Profondità (m da p.c.)	Tipo prova	K (m/s)	Geologia
4A F01	11.5÷12	Lefranc	4.75E-08	TRV
4A F01	19.5÷20	Lefranc	1.09E-07	TRV
4A F01	4÷4.5	Lefranc	7.84E-07	Detrito di versante
4A F02	25.5÷26	Lefranc	7.69E-08	TRV
4A F02	31÷31.5	Lefranc	5.79E-08	TRV
4a GN1 S01	13÷17.95	Lugeon	6.50E-08	TRV
4a GN1 S01	19.5÷23	Lugeon	1.54E-07	TRV
4A GN1 S02	52÷52.5	Lefranc	3.34E-08	TRV
4A GN1 S02	60.5÷61.1	Lefranc	2.00E-08	TRV
4A GN1 S02	67.6÷68.1	Lefranc	2.00E-08	TRV
4a GN1 S03	97÷100	Lugeon	1.27E-09	TRBa
4a GN1 S03	108÷111	Lugeon	1.15E-09	TRBa
4a GN1 S03	116÷119.3	Lugeon	1.23E-09	TRBa
4a GN1 S04	106÷109	Lugeon	2.36E-09	GTL2
4a GN1 S04	118÷122	Lugeon	1.64E-09	GTL2
4a GN1 S04	127÷131	Lugeon	2.50E-09	GTL2
4a GN1 S05	54÷54.5	LE	1.50E-08	TRV
4a GN1 S05	60÷60.5	LE	2.37E-08	TRV
4a GN1 S05	67.6÷68.1	LE	2.71E-08	TRV
4a GN1 S05	78÷78.5	LE	4.24E-09	TRV
4a GN1 S06	6÷9	LE	1.14E-05	TRV
4a GN1 S06	15÷16.6	LE	2.56E-05	TRV
4a GN2 S07	12÷13.5	Lefranc	2.00E-07	TRV
4a GN2 S07	6÷8	Lefranc	5.03E-09	TRV
4a GN2 S07bis	12÷15	Lefranc	5.58E-08	TRV
4a GN2 S07bis	32÷35	Lefranc	2.86E-09	TRV
4a GN2 S07bis	40÷42	Lefranc	4.05E-09	TRV
4A GN2 S09	37÷37.5	Lefranc	6.92E-09	TRV
4A GN2 S09	44÷44.5	Lefranc	1.86E-08	TRV
4A GN2 S09	52÷52.5	Lefranc	1.27E-08	TRV
4a GN2 S10	10.6÷13	LE	6.69E-06	TRV
4a GN2 S10	17÷18.65	LE	4.64E-06	TRV

Codice Sondaggio	Profondità (m da p.c.)	Tipo prova	K (m/s)	Geologia
4A GN2 S14	63÷63.5	Lefranc	3.66E-08	TRV
4A GN2 S14	72÷72.5	Lefranc	2.04E-08	TRV
4A GN2 S14	79.5÷80	Lefranc	1.74E-08	TRV
4A GN3 S11	4.5÷6	Lefranc	2.43E-08	TRV
4A GN3 S11	9÷11	Lefranc	4.16E-08	TRV
4a GN3 S12	53÷58.4	Lugeon	3.00E-09	TRV
4a GN3 S12	62÷67	Lugeon	1.23E-09	TRV
4A GN3 S13	52.5÷53	Lefranc	3.25E-08	TRV
4A GN3 S13	62÷62.5	Lefranc	1.52E-08	TRV
4A GN3 S13	70÷70.5	Lefranc	8.62E-09	TRV
4A GN3 S15	242.6÷247.6	Lefranc	3.74E-08	TRV
4A GN3 S15	253.2÷258.2	Lefranc	9.51E-08	TRV
4A GN3 S15	260÷265	Lefranc	8.21E-08	TRV
4a GN3 S16	247÷252	Lugeon	4.45E-08	TRV
4a GN3 S16	254.5÷259.5	Lugeon	5.81E-08	TRV
4a GN3 S16	265÷270	Lugeon	5.25E-08	TRV
4a GN3 S17	143.5÷145	Lugeon	9.73E-09	TRV
4a GN3 S17	150.75÷152.25	Lugeon	8.08E-09	TRV
4a GN3 S17	158.5÷160	Lugeon	1.49E-08	TRV
4A GN3 S19	22÷22.5	Lefranc	1.95E-06	TRVa
4A GN3 S19	8.5÷9	Lefranc	5.74E-06	TRVa
4A S01	27÷27.5	Lefranc	1.05E-08	FYN4
4A S01	5÷5.5	Lefranc	4.02E-08	FYN4
4A S02	21÷22	Lefranc	1.72E-08	TRV
4A S02	3.5÷4.5	Lefranc	2.31E-08	a2
4A S03	18÷18.5	Lefranc	7.07E-08	TRV
4A S03	4.5÷5	Lefranc	2.08E-07	a2
4A S04	19÷19.5	Lefranc	2.47E-08	TRV
4A S04	4.5÷5	Lefranc	1.85E-07	TRV
4A S06	21÷21.5	Lefranc	1.36E-07	TRV
4A S06	4÷4.5	Lefranc	7.41E-07	TRV
4A S07	25.5÷26	Lefranc	8.04E-08	TRV
4A S07	7.5÷8	Lefranc	4.41E-07	TRV
4A S08	20÷20.5	Lefranc	1.25E-07	TRV
4A S08	6.5÷7	Lefranc	5.00E-07	TRV
4A S09	30÷30.5	Lefranc	1.02E-07	TRV
4A S09	6÷6.5	Lefranc	5.78E-07	TRV
4A S11	28÷28.5	Lefranc	1.35E-07	TRV
4A S11	6÷6.5	Lefranc	1.16E-06	a2
4A S12	25.5÷27	Lefranc	9.34E-08	TRV
4A S12	3.5÷4	Lefranc	5.73E-06	Detrito di versante
4A S13	20.5÷21	Lefranc	2.61E-08	TRV
4A S13	34.5÷35	Lefranc	1.11E-08	TRV

Codice Sondaggio	Profondità (m da p.c.)	Tipo prova	K (m/s)	Geologia
4A S13	4.5÷5.7	Lefranc	7.04E-08	TRV
4A S14	17÷17.5	Lefranc	9.08E-08	TRV
4A S14	32÷32.5	Lefranc	3.61E-08	TRV
4A S14	4.5÷5	Lefranc	2.74E-06	Detrito di versante
4A S15	17.5÷18	Lefranc	2.14E-08	TRV
4A S15	33.5÷34	Lefranc	5.71E-09	TRV
4A S15	4.5÷5	Lefranc	1.87E-05	a2
4A S16	16÷16.5	Lefranc	9.53E-09	TRV
4A S16	33÷33.5	Lefranc	8.82E-09	TRV
4A S16	4.5÷5.9	Lefranc	8.47E-08	TRV
4A S17	14.5÷15	Lefranc	8.36E-08	TRV
4A S17	34÷34.5	Lefranc	9.53E-09	TRV
4A S17	4.5÷5	Lefranc	4.49E-07	TRV
4A S22	31÷31.5	Lefranc	2.32E-08	TRV
4A S22	6÷7	Lefranc	3.79E-06	a2
4A S24	21÷21.5	Lefranc	1.21E-08	TRV
4A S24	28÷28.4	Lefranc	1.10E-08	TRV
4A S24	5÷5.5	Lefranc	2.01E-07	TRV
4A S26	20.5÷21	Lefranc	7.62E-08	TRV
4A S26	28÷28.5	Lefranc	7.01E-08	TRV
4A S26	5÷5.5	Lefranc	7.06E-05	a3
4A S27	21÷21.5	Lefranc	2.55E-07	TRV
4A S27	32÷32.5	Lefranc	1.26E-06	TRV
4A S27	5÷5.5	Lefranc	1.59E-06	a2
4A S28	21÷21.5	Lefranc	9.33E-08	TRV
4A S28	5÷5.5	Lefranc	4.03E-05	a3
4A S29	16÷16.5	Lefranc	1.21E-06	TRV
4A S29	28÷28.5	Lefranc	6.13E-07	TRV
4A S29	5÷5.5	Lefranc	6.10E-06	TRV
4A S30	13÷13.5	Lefranc	5.80E-07	TRV
4A S30	28÷28.5	Lefranc	4.12E-08	TRV
4A S30	5÷6	Lefranc	2.01E-07	TRV
4A S31	12÷12.5	Lefranc	2.95E-07	TRV
4A S31	4.5÷5	Lefranc	5.48E-06	a2
4A S32	12÷12.5	Lefranc	2.37E-06	0
4A S32	4÷4.5	Lefranc	3.04E-07	0
4A S33	17.5÷18	Lefranc	9.52E-09	0
4A S33	6÷6.5	Lefranc	3.03E-08	0
4A V01	22÷22.5	Lefranc	3.20E-08	TRV
4A V01	4.4÷5.5	Lefranc	3.56E-07	TRV
4A V02	23.5÷24	Lefranc	3.88E-08	TRV
4A V02	5.5÷6	Lefranc	4.33E-06	a2
4A V03	21÷21.3	Lefranc	6.58E-06	TRV

Codice Sondaggio	Profondità (m da p.c.)	Tipo prova	K (m/s)	Geologia
4A V03	3.5÷4	Lefranc	3.03E-06	a2
4A V04	21÷21.3	Lefranc	2.09E-08	TRV
4A V04	6÷6.5	Lefranc	6.40E-07	a2
4A V05	14.5÷15	Lefranc	1.67E-06	0
4A V05	4.5÷5	Lefranc	3.16E-06	0
4A V06	17.5÷18	Lefranc	2.55E-07	0
4A V06	5.5÷6	Lefranc	6.38E-06	0
4A V07	4÷4.5	LE	2.04E-06	TRV
4A V07	17÷17.5	LE	1.03E-07	TRV
4A V08	5.5÷6	LE	1.19E-06	TRVb
4A V08	19.5÷20	LE	6.91E-07	TRV
4AS20	26.5÷27	Lefranc	5.02E-08	TRV
4AS20	5.5÷6	Lefranc	2.80E-07	TRV
4AS21	20÷20.55	Lefranc	8.91E-08	TRV
4AS21	34÷34.5	Lefranc	2.02E-08	TRV
4AS21	4.5÷5	Lefranc	6.82E-07	a2

Inoltre la quasi totalità dei sondaggi è stata attrezzata a piezometro per il monitoraggio della falda, utilizzando i piezometri a tubo aperto tipo Norton, o per la misurazione del carico idraulico, mediante dispositivi elettrici (celle di Casagrande o a corda vibrante). L'ubicazione dei piezometri e i dati delle letture effettuate sono riportati nella carta e nel profilo idrogeologico. L'elenco dei sondaggi attrezzati e i risultati delle letture sono elencati nella Figura 32.

Figura 32 – Caratteristiche dei piezometri installati nell'ambito della campagna geognostica 2019-20.

	Codice sondaggio	Lunghezza (m)	Quota boccaforo (m s.l.m.)	Tipo piezometro	Profondità tratto fenestrato (m da p.c.)	Profondità cella Casagrande o elettrica (m da p.c.)
<b>SONDAGGI IN LINEA</b>	4a-GN1-S01	40	374	Cella di Casagrande		18
	4a-GN1-S02	85	418	Cella di Casagrande		65
	4a-GN1-S03	140	454	Cella di Casagrande		131
	4a-GN1-S04	135	455	Norton	108÷126	
	4a-GN1-S05	95	410	Cella di Casagrande		75
	4a-GN1-S06	30	325	Cella di Casagrande		14
	4a-SIGN1	20	346	Cella di Casagrande		18
	4a-GN2-S07	40	327	Cella di Casagrande		12
	4a-GN2-S09	70	210	Cella di Casagrande		52
	4a-GN2-S10	30	346	Cella di Casagrande		15
	4a-GN3-S11	30	364	Norton	2÷12	

	Codice sondaggio	Lunghezza (m)	Quota boccaforo (m s.l.m.)	Tipo piezometro	Profondità tratto fenestrato (m da p.c.)	Profondità cella Casagrande o elettrica (m da p.c.)
	4a-GN3-S12	75	407	Cella di Casagrande		62
	4a-GN3-S13	80	413	Cella di Casagrande		20
	4a-GN3-S13	80	413	Cella di Casagrande		66
	4a-GN3-S14	85	456	Cella di Casagrande		78
	4a-GN3-S15	265	632	Cella elettrica e Norton	200÷235 e 245÷265	255
	4a-GN3-S16	280	681	Cella elettrica e Norton	233÷254 e 263÷275	270
	4a-GN3-S17	170	598	Cella elettrica e Norton	110÷130	150
	4a-GN3-S19	35	469	Cella di Casagrande		30
	4a-S01	40	400	Cella di Casagrande		15
	4a-S03	40	396	Cella di Casagrande		30
	4a-S04	40	392	Cella di Casagrande		20
	4a-S06bis	10	398	Cella di Casagrande		9
	4a-S07	40	374	Cella di Casagrande		28
	4a-S08	40	376	Cella di Casagrande		9
	4a-S11	40	375	Cella di Casagrande		30
	4a-S12	40	396	Cella di Casagrande		21
	4a-S13	40	402	Cella di Casagrande		22
	4a-S14	40	376	Cella di Casagrande		28
	4a-S16	40	365	Cella di Casagrande		25
	4a-S20	40	293	Cella di Casagrande		35
	4a-S22	40	298	Cella di Casagrande		35
	4a-S26	40	323	Cella di Casagrande		19
	4a-S28	40	330	Cella di Casagrande		19
	4a-S29	40	331	Cella di Casagrande		10
	4a-S30	40	455	Cella di Casagrande		30
	4a-S32	30	380	Cella di Casagrande		18
	4a-S33	30	370	Norton	0÷15	
VIABILITA'	4a-V01	40	393	Cella di Casagrande		28
	4a-V03	30	349	Norton	0÷30	
	4a-V04	30	336	Norton	0÷30	
	4a-V05	30	418	Cella di Casagrande		30
	4a-V06	30	344	Cella di Casagrande		28
	4a-V07	40	521	Cella di Casagrande		10
	4a-V08	40	554	Cella di Casagrande		40
	4a-V09	40	571	Cella di Casagrande		
	4aV10	40	596	Cella di Casagrande		18
	4aV11	40	367	Cella di Casagrande		9

	Codice sondaggio	Lunghezza (m)	Quota boccaforo (m s.l.m.)	Tipo piezometro	Profondità tratto fenestrato (m da p.c.)	Profondità cella Casagrande o elettrica (m da p.c.)
	4aV12	12	670	Cella di Casagrande		9
	4aV15	20	345	Cella di Casagrande		15
	4aV15	20	345	Cella di Casagrande		5
	4aV16	20	339	Cella di Casagrande		20
	4aV16	20	339	Cella di Casagrande		6
	4aV17	30	335	Norton	0÷30	
	4a SI 01	30	423	Cella di Casagrande		15
	4a SI 01bis	30	436	Cella di Casagrande		12
	4a-Si02	30	402	Norton	0÷6	
	4a-Si03	30	402	Cella di Casagrande		15
	4a-Si04	30	419	Cella di Casagrande		20
	4a SI 06a	18	346	Cella di Casagrande		18
	4a SI 07a	15	338	Cella di Casagrande		15
	4a SI 08a	18	348	Cella di Casagrande		18
	4a SI 08b	6	348	Cella di Casagrande		6
<b>FINESTRE</b>	4a-F01	30	382	Cella di Casagrande		20
	4a-F02	45	400	Cella di Casagrande		28

Figura 33 – Letture di soggiacenza nei piezometri nel periodo dicembre 2019 - aprile 2020.

	Codice sondaggio	novembre 2019		gennaio 2020		febbraio 2020		marzo 2020		aprile 2020	
		soggiacenza (m dal p.c.)	data								
<b>SONDAGGI IN LINEA</b>	4a-GN1-S01	-3.90	06-12-19	-4.20	20-01-20						
	4a-GN1-S02	falda non osservata	06-12-19	falda non osservata	20-01-20	falda non osservata	20-02-20	falda non osservata	17-03-20	falda non osservata	23-04-20
	4a-GN1-S03	-4	06-12-19	-4.20	20-01-20	-15.80	20-02-20	-20.20	17-03-20	-24.08	23-04-20
	4a-GN1-S04	0 in pressione	06-12-19	0 in pressione	20-01-20	0 in pressione	20-02-20	0 in pressione	17-03-20	0 in pressione	23-04-20
	4a-GN1-S05	falda non osservata	06-12-19	falda non osservata	20-01-20	falda non osservata	20-02-20	falda non osservata	17-03-20	falda non osservata	23-04-20
	4a-GN1-S06			-12.20	20-01-20	-12.20	20-02-20	-12.25	17-03-20		
	4a-SIGN1										
	4a-GN2-S07					-3.60	20-02-20		17-03-20		23-04-20
	4a-GN2-S09	falda non osservata	06-12-19	falda non osservata	20-01-20	falda non osservata	20-02-20	falda non osservata	17-03-20	falda non osservata	23-04-20
	4a-GN2-S10	-6.5	06-12-19	-3.58	20-01-20	-4.00	20-02-20	-4.08	17-03-20	-7.26	23-04-20
	4a-GN3-S11			-3.29	20-01-20	-3.80	20-02-20	-3.90	17-03-20	-4.02	23-04-20
	4a-GN3-S12	-0.1	06-12-19	-0.60	20-01-20	-0.70	20-02-20	-0.80	17-03-20	-0.70	23-04-20

Codice sondaggio	novembre 2019		gennaio 2020		febbraio 2020		marzo 2020		aprile 2020	
	soggiacenza (m dal p.c.)	data								
4a-GN3-S13	-12.12	06-12-19	-11.02	20-01-20	-10.90	20-02-20	-10.98	17-03-20	-10.50	23-04-20
4a-GN3-S13	-13.27	06-12-19	-9.13	20-01-20	-9.20	20-02-20	-9.25	17-03-20	-9.16	23-04-20
4a-GN3-S14	-51	06-12-19	-43.25	20-01-20	-39.00	20-02-20	-41.00	17-03-20	-33.00	23-04-20
4a-GN3-S15	0 (N) e -254.01 (CE)	06-12-19	0 (N) e -254.10 (CE)	20-01-20	0 (N) e -254.12 (CE)	20-02-20	0 (N) e -254.13 (CE)	17-03-20	-0.00 (N) e -254.13 (CE)	23-04-20
4a-GN3-S16			-23 (N) e -65.46 (CE)	20-01-20	-23.70 (N) e -66.82 (CE)	20-02-20	-23.9 (N) e -69.84 (CE)	17-03-20	-25.40 (N) e -72.24 (CE)	23-04-20
4a-GN3-S17	-19.30 (N) e -35.31 (CE)	06-12-19	-20.60 (N) e -39.90 (CE)	20-01-20	-20.75 (N) e -41.13 (CE)	20-02-20	-20.4 (N) e -41.26 (CE)	17-03-20	-20.88 (N) e -41.20 (CE)	23-04-20
4a-GN3-S19	-10.06	06-12-19	-9.60	20-01-20	-9.60	20-02-20	-8.90	17-03-20	-9.33	23-04-20
4a-S01					-		-		-	
4a-S03	-17.9	06-12-19	-16.34	20-01-20	-16.60	20-02-20	-16.80	17-03-20	-14.69	23-04-20
4a-S04	-5.2	06-12-19	-2.60	20-01-20	-2.80	20-02-20	-3.00	17-03-20	-2.92	23-04-20
4a-S06bis	-3.2	06-12-19	-3.26	20-01-20	-3.40	20-02-20	-3.20	17-03-20	-2.54	23-04-20
4a-S07	-12.2	06-12-19	-11.00	20-01-20	-11.15	20-02-20	-10.90	17-03-20	-10.43	23-04-20
4a-S08	-4.95	06-12-19	-5.24	20-01-20	-5.15	20-02-20	-5.10	17-03-20	-5.43	23-04-20
4a-S11	-4.47	06-12-19	-4.30	20-01-20	-4.30	20-02-20	-4.30	17-03-20	-4.43	23-04-20
4a-S12	-13.1	06-12-19	-3.30	20-01-20	-2.77	20-02-20	-10.20	17-03-20	-8.78	23-04-20
4a-S13	falda non osservata	06-12-19	-4.51	20-01-20	-7.10	20-02-20	-7.90	17-03-20	-7.49	23-04-20
4a-S14	-13.25	06-12-19	-3.68	20-01-20	-7.00	20-02-20	-6.65	17-03-20	-5.51	23-04-20
4a-S16					-5.30	20-02-20	-5.55	17-03-20	-5.50	23-04-20
4a-S20						20-02-20		17-03-20	non accessibile	23-04-20
4a-S22						20-02-20		17-03-20	non accessibile	23-04-20
4a-S26			-1.35	20-01-20	0.50	20-02-20	-0.70	17-03-20	-0.60	23-04-20
4a-S28			-1.06	20-01-20	-1.30	20-02-20	-1.46	17-03-20	-1.33	23-04-20
4a-S29						20-02-20	-1.30	17-03-20	-1.20	23-04-20
4a-S30	-1.8	06-12-19	-1.35	20-01-20	-1.50	20-02-20	-2.00	17-03-20	-1.50	23-04-20
4a-S32	-2	06-12-19	-2.45	20-01-20	-3.00	20-02-20	-5.00	17-03-20	-5.41	23-04-20
4a-S33	-1.51	06-12-19	-3.00	20-01-20	-3.40	20-02-20	-4.00	17-03-20	-3.18	23-04-20
4a-V01	-2.15	06-12-19	-4.58	20-01-20	-2.80	20-02-20	-3.10	17-03-20	-2.87	23-04-20
4a-V03			-5.22	20-01-20	-6.00	20-02-20	-6.60	17-03-20	-7.27	23-04-20
4a-V04	-5.2	06-12-19	-4.90	20-01-20	-5.80	20-02-20	-6.20	17-03-20	-6.04	23-04-20
4a-V05	-5.28	06-12-19	-5.42	20-01-20	-6.00	20-02-20	-6.50	17-03-20	-4.55	23-04-20
4a-V06			-6.10	20-01-20	-6.00	20-02-20	-6.40	17-03-20	-5.90	23-04-20
4a-V07	-1.62	06-12-19	-1.45	20-01-20	-1.80	20-02-20	-1.90	17-03-20	-1.76	23-04-20
4a-V08	-9.84	06-12-19	-9.30	20-01-20	9.43	20-02-20	-9.30	17-03-20	-8.62	23-04-20
4a-V09									-12.63	23-04-20
4aV10							falda non osservata	17-03-20	falda non osservata	23-04-20
4aV11							-30.20	17-03-20	-28.97	23-04-20
4aV12					-8.55	20-02-20	falda non	17-03-20	-8.94	23-04-20

Codice sondaggio	novembre 2019		gennaio 2020		febbraio 2020		marzo 2020		aprile 2020		
	soggiacenza (m dal p.c.)	data	soggiacenza (m dal p.c.)	data	soggiacenza (m dal p.c.)	data	soggiacenza (m dal p.c.)	data	soggiacenza (m dal p.c.)	data	
							osservata				
4aV15									-2.50	23-04-20	
4aV15									-2.50	23-04-20	
4aV16									-2.60	23-04-20	
4aV16									-2.60	23-04-20	
4aV17									-2.49	23-04-20	
4a SI 01									-6.71	23-04-20	
4a SI 01bis									11.30	23-04-20	
4a-Si02					1.00	20-02-20	-1.04	17-03-20	-0.92	23-04-20	
4a-Si03					-2.70	20-02-20	-2.93	17-03-20	-2.52	23-04-20	
4a-Si04					falda non osservata	20-02-20	falda non osservata	17-03-20	-7.61	23-04-20	
4a SI 06a									-13.65	23-04-20	
4a SI 07a									-5.67	23-04-20	
4a SI 08a									-6.50	23-04-20	
4a SI 08b									falda non osservata	23-04-20	
FINESTRE	4a-F01	-9.3	06-12-19	-6.20	20-01-20	-9.30	20-02-20	-9.30	17-03-20	-7.66	23-04-20
	4a-F02	-2.75	06-12-19	-3.78	20-01-20	-3.20	20-02-20	-3.50	17-03-20	-4.16	23-04-20

Inoltre, da marzo 2020 sono state effettuate nuove letture sui piezometri realizzati nella campagna di indagini del Progetto Preliminare, elencati in Figura 30. I risultati sono i seguenti:

Codice sondaggio	marzo 2020		aprile 2020	
	soggiacenza (m dal p.c.)	data	soggiacenza (m dal p.c.)	data
<b>3S02</b>	-1.03	06-03-20	0.00	16-04-20
<b>3S04</b>	-5.15	06-03-20	-4.66	16-04-20
<b>3S05</b>	-1.53	06-03-20	-4.66	16-04-20
<b>3S06</b>	-47.87	06-03-20	-47.77	16-04-20
<b>3S07</b>	-5.32	06-03-20	-4.08	16-04-20
<b>3S10</b>	-5.80	06-03-20	-5.62	16-04-20
<b>3S11</b>	-9.30	06-03-20	-5.86	16-04-20

Tabella 1 – Letture di soggiacenza eseguite nel 2020 sui piezometri della campagna Italferr 2018.

### 9.3 Censimento pozzi e sorgenti

Nell'area oggetto di studio è stato eseguito un censimento dei punti delle acque sotterranee (sorgenti e pozzi), i cui risultati sono rappresentati sulle carte geologiche e idrogeologiche.

Sono stati censiti circa 15 pozzi, che generalmente si spingono a debole profondità circa 20 m. Si tratta di manufatti che captano l'acquifero che si sviluppa all'interno nei depositi alluvionali, oppure di pozzi che intercettano le lenti sabbiose all'interno della Formazione di Terravecchia.

Non sono state osservate sorgenti.

## 9.4 Definizione dei complessi idrogeologici

I diversi litotipi del substrato e dei depositi presenti nell'area di interesse sono stati raggruppati in complessi idrogeologici, ovvero in elementi idrogeologici che presentano caratteristiche di permeabilità analoghe. In ogni complesso possono pertanto ricadere litotipi appartenenti a formazioni differenti ma aventi caratteristiche idrogeologiche comparabili. Nel seguito si fornirà dapprima una sintesi dei dati di permeabilità derivanti da test idraulici per ogni singolo litotipo. Successivamente si passerà a descrivere i complessi in cui i litotipi con caratteristiche simili sono stati raggruppati.

### 9.4.1 Conducibilità idraulica dei singoli litotipi

Di seguito si riportano i valori di conducibilità idraulica misurati in situ e rappresentati su grafici in funzione della litologia a cui si riferiscono. Si precisa che nei grafici vengono rappresentati anche i dati acquisiti nel Progetto Preliminare. Inoltre, per completezza dell'analisi, vengono prese in considerazione anche le misure effettuate nei sondaggi dell'adiacente Lotto 3.

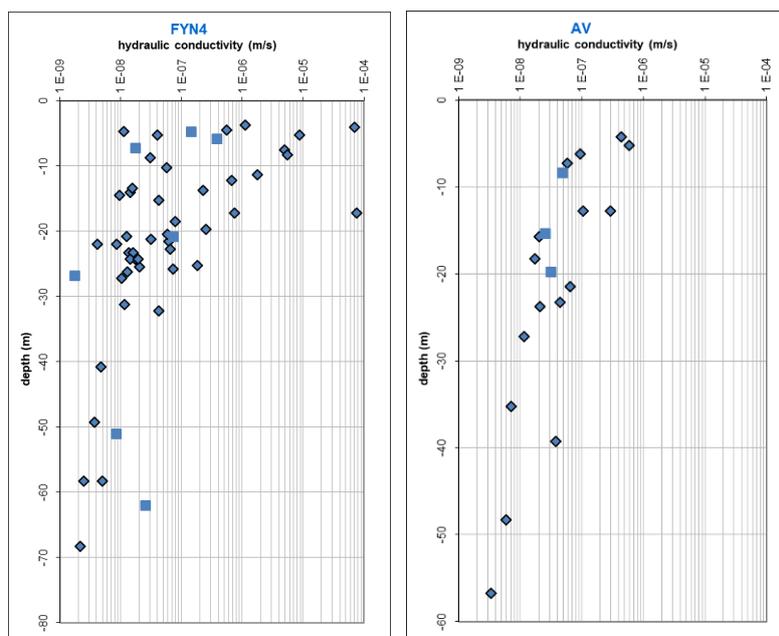


Figura 34 - Valori di conducibilità idraulica misurati in foro nelle Argille Variegata (AV) e nei Flysch di Nicosia (FYN4) nell'ambito del Progetto Definitivo (rombi) e del Preliminare (quadrati).

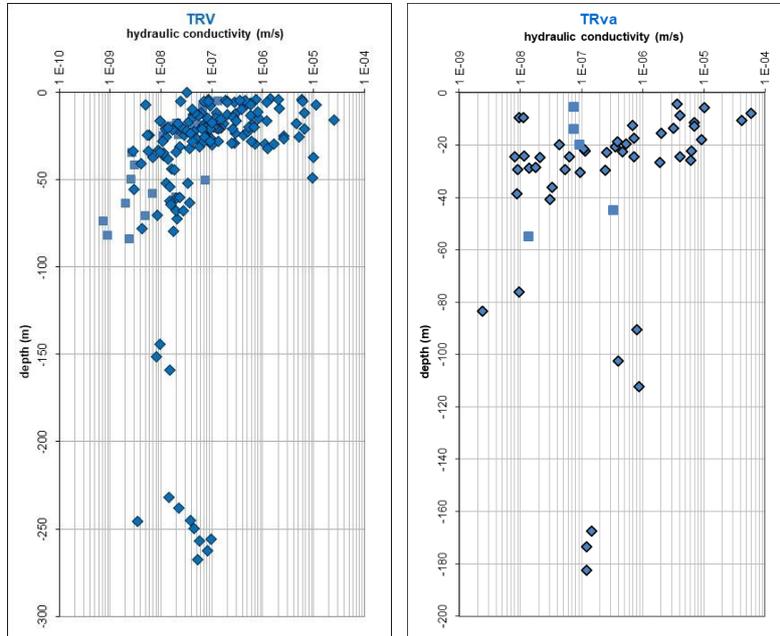


Figura 35 - Valori di conducibilità idraulica misurati in foro nella Formazione di Terravecchia (TRV e TRVa) nell'ambito del Progetto Definitivo (rombi) e del Preliminare (quadrati).

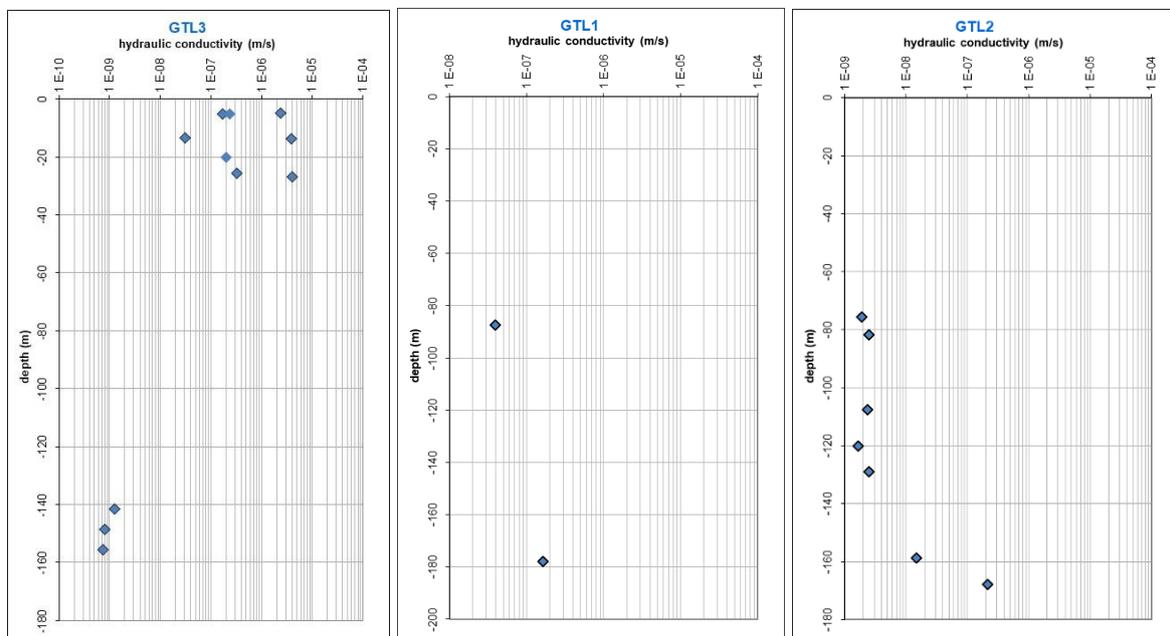


Figura 36 - Valori di conducibilità idraulica misurati in foro nella Formazione di Cattolica (GTL1, GTL2 e GTL3) nell'ambito del Progetto Definitivo (rombi) e del Preliminare (quadrati).

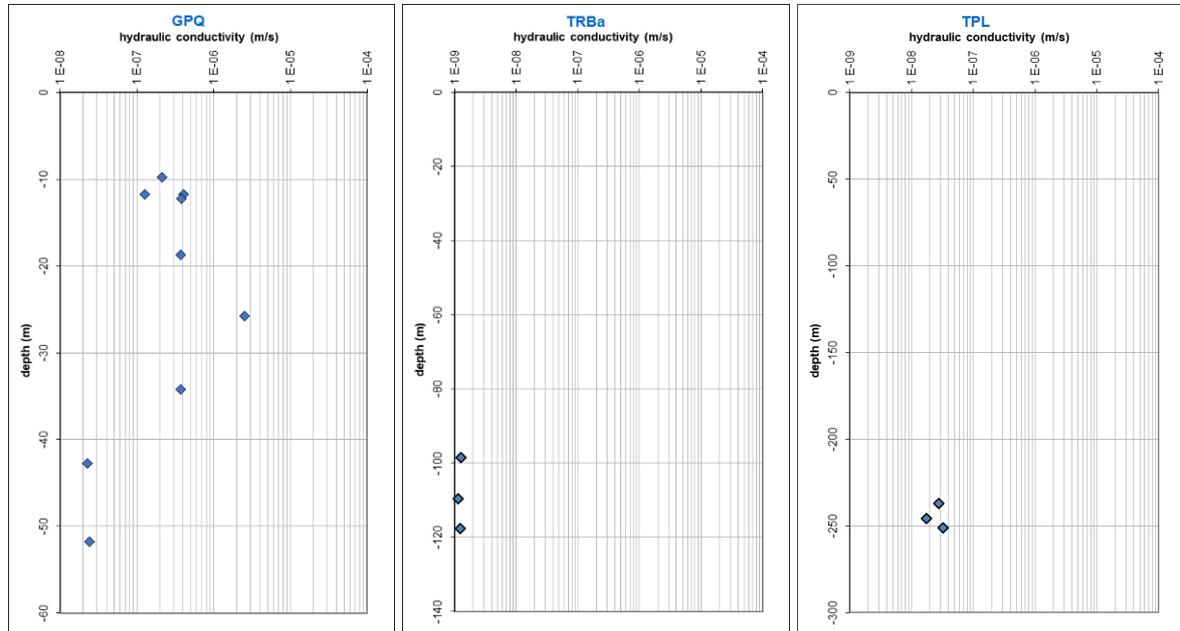


Figura 37 - Valori di conducibilità idraulica misurati in foro nelle tre formazioni Tripoli (TPL), Pasquasia (GPQ) e Trubi (TRBa) nell'ambito del Progetto Definitivo.

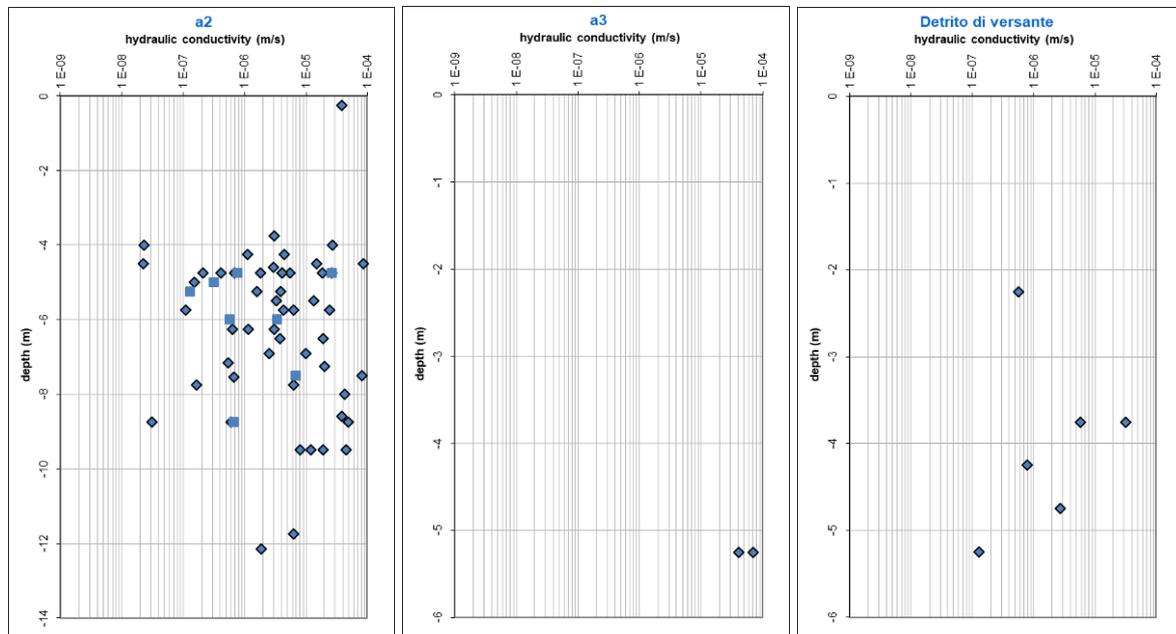


Figura 38 - Valori di conducibilità idraulica misurati in foro nei depositi alluvionali (a2 e a3) e nel detrito di versante nell'ambito del Progetto Definitivo (rombi) e del Preliminare (quadrati).

Sulla base dei dati analizzati, e in accordo con quanto già definito nel Progetto Preliminare, sono stati individuati sette complessi idrogeologici tenendo conto delle differenti caratteristiche di permeabilità e

del tipo di circolazione idrica che li caratterizza. Per i complessi idrogeologici in cui non è presente un numero sufficiente di misure, il range di variazione della conducibilità idraulica è stato definito considerando le caratteristiche sedimentologiche e litologiche, il grado di alterazione, fessurazione e carsismo osservati negli affioramenti sul terreno e nelle carote dei sondaggi, e per analogia con litotipi con caratteristiche simili.

#### **9.4.2 Complessi delle unità del substrato**

Le unità del substrato prequaternario sono state raggruppate in quattro complessi idrogeologici, che vengono descritti nei seguenti paragrafi. I diagrammi presentati derivano, per ogni complesso, dall'unione dei dati disponibili per ognuna delle formazioni o, più genericamente, litotipi che ne fanno parte. Sostanzialmente dunque i diagrammi dei complessi derivano dalla sovrapposizione dei diagrammi dei singoli litotipi.

##### **9.4.2.1 Complesso argilloso-marnoso (CAM)**

Il complesso argilloso-marnoso (CAM) è costituito dalle unità caratterizzate da depositi prevalentemente fini. Dal punto di vista litologico, si tratta di argille, argille limose, argille limoso-marnose e argille marnose a struttura scagliosa o indistinta, talora stratificata, brecciata o a blocchetti poliedrici, con sottili livelli di sabbie, sabbie limose e limi sabbiosi; intercalazioni di diaspri, radiolariti, calcari micritici, arenarie e marne; talora sono presenti olistoliti eterometrici di quarzareniti, gessi, calcari evaporitici e calcari detritici. Le unità geologiche che afferiscono a questo complesso sono **ENNa, TRBa, TPL, TRV, TRVb, AV, TAV, FYN4, URG, MUF, UPM.**

La permeabilità prevalente è legata alla primaria porosità e varia generalmente da molto bassa a bassa. Secondariamente può essere per fessurazione, rimanendo comunque bassa. Data la natura sedimentaria dei depositi, possono essere presenti localmente livelli più grossolani, caratterizzati da valori di conducibilità idraulica più elevati ma generalmente aventi scarsa continuità laterale e pertanto scarsa interconnessione a grande scala.

Date le caratteristiche dell'acquifero, si esclude che esso possa ospitare falde o corpi idrici sotterranei di importanza significativa. In ogni caso esiste pur sempre una zona satura, seppur non produttiva

determinante carichi indisturbati crescenti con la profondità che verosimilmente si approssimano ad un carico di tipo idrostatico, essendo i flussi sotterranei estremamente lenti.

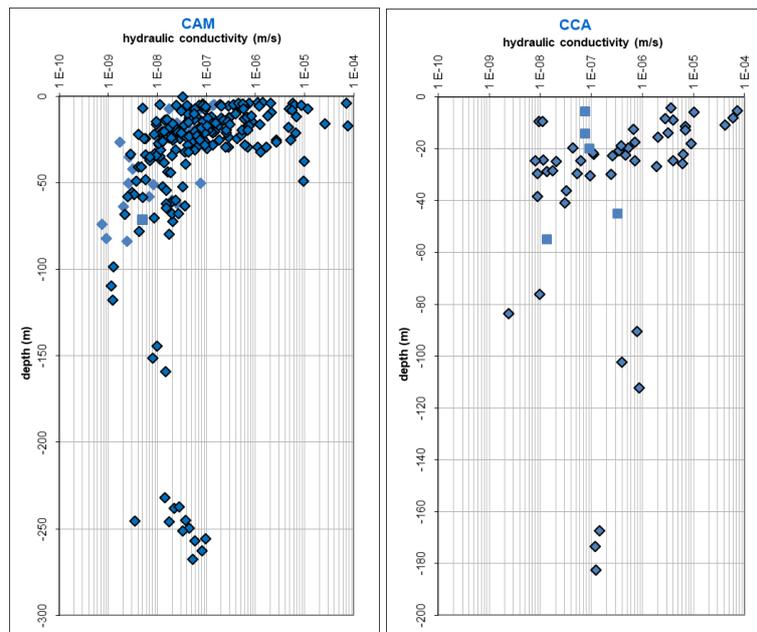


Figura 39 - Valori di conducibilità idraulica misurati in foro nei complessi idrogeologici CAM e CCA nell'ambito del Progetto Definitivo (rombi) e del Preliminare (quadrati).

A questo complesso, che è quello più rappresentato nell'area in esame e a quota galleria, si attribuisce un valore di conducibilità idraulica generalmente compreso tra  $5 \cdot 10^{-9}$  e  $1 \cdot 10^{-7}$  m/s, che può tuttavia raggiungere  $1 \cdot 10^{-10}$  m/s nei livelli più fini e  $1 \cdot 10^{-5}$  m/s nei livelli a granulometria più elevata. Considerata comunque la scarsa interconnessione dei livelli più permeabili, la permeabilità su grande scala, ovvero quella più significativa ai fini delle previsioni di drenaggio delle gallerie, si approssima ai valori dell'intervallo principale.

#### 9.4.2.2 Complesso conglomeratico-arenaceo (CCA)

In questo complesso ricadono i livelli grossolani, conglomeratico-arenacei, della Formazione di Terravecchia (**TRVa**), di Enna (**ENNb**) e di Pasquasia (**GPQa**). Si tratta prevalentemente di sabbie da medie a grosse e conglomerati a clasti poligenici ed eterometrici, da sub-arrotondati ad arrotondati, in matrice sabbiosa e sabbioso-limosa generalmente abbondante, da poco a ben cementata;

subordinatamente di calcareniti e arenarie clinostratificate e a stratificazione incrociata, con diffusi livelli biocalcarenitici.

Il complesso costituisce un acquifero misto, di buona trasmissività, piuttosto eterogeneo ed anisotropo, caratterizzato da permeabilità per porosità variabile da medio-bassa a media.

La conducibilità idraulica varia generalmente tra  $1 \cdot 10^{-7}$  e  $5 \cdot 10^{-6}$  m/s, pur mostrando valori più bassi fino a  $1 \cdot 10^{-8}$  m/s nei livelli caratterizzati da una maggior percentuale di matrice fine o più elevati ( $1 \cdot 10^{-4}$  m/s) in caso di matrice assente. A grande scala tuttavia la permeabilità si attesta sui valori intermedie più ricorrenti.

#### 9.4.2.3 Complesso gessoso-marnoso (CGM)

In questo complesso sono raggruppati i litotipi gessoso-marnosi delle unità di Pasquasia (**GPQ**) e di Cattolica (**GTL2** e **GTL3**). È costituito da litotipi di diversa natura:

- gessi selenitici microcristallini, in strati decimetrici sottilmente laminati, e dai gessi massivi ricristallizzati in grossi cristalli geminati, talora alternati ad argille gessose;
- marne, marne argillose e argille marnose in strati da molto sottili a sottili, con frequenti livelli centimetrici di sabbie;
- localmente, torbiditi gessose, gesso balatino, gessoareniti e laminiti algali.

Il complesso costituisce un acquifero misto fortemente eterogeneo ed anisotropo. La permeabilità, generalmente bassa, è per porosità e per fessurazione e secondariamente per carsismo, che tuttavia si sviluppa solo localmente ed in misura limitata. Vista la natura dei terreni è probabile che il carsismo in questo contesto si sviluppi soprattutto all'interfaccia tra livelli marnosi e gessosi, che rappresentano una zona di discontinuità ed eterogeneità lungo la quale le circolazioni sotterranee hanno maggior facilità ad instaurarsi. E' meno probabile che i fenomeni carsici si sviluppino direttamente all'interno delle bancate gessose che, dato il loro comportamento plastico, tendono a presentare poche discontinuità per fratturazione. In un simile contesto è quindi probabile che i fenomeni carsici si esprimano come orizzonti di modesto spessore ricchi in materiale residuale e con una permeabilità piuttosto alta per pseudo-porosità.

Le misure in foro indicano una conducibilità idraulica molto variabile anche in funzione della profondità a causa del minor grado di alterazione. Generalmente, si può attribuire un valore tra  $1 \cdot 10^{-9}$  e  $1 \cdot 10^{-8}$  m/s nei casi in cui i litotipi si trovino a profondità superiori a 50 m; la permeabilità può comunque aumentare fino a  $1 \cdot 10^{-6}$  m/s. A profondità inferiori a 50 m il grado di alterazione e i fenomeni di dissoluzione possono essere più significativi, con un conseguente aumento della conducibilità idraulica che può quindi essere assunta mediamente compresa tra  $1 \cdot 10^{-6}$  e  $1 \cdot 10^{-7}$  m/s; anche in queste condizioni si possono avere locali variazioni anche significative sia verso l'alto che verso il basso.

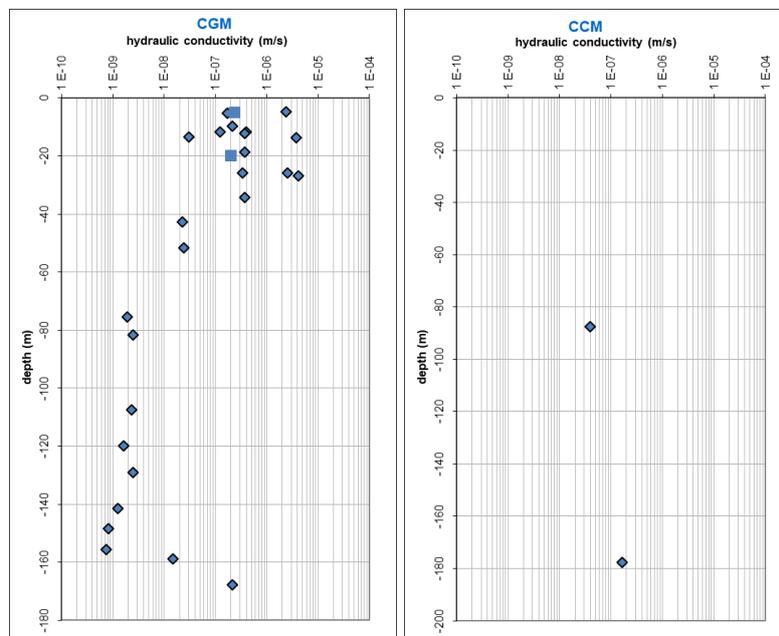


Figura 40 - Valori di conducibilità idraulica misurati in foro nei complessi idrogeologici CGM e CCM nell'ambito del Progetto Definitivo (rombi) e del Preliminare (quadrati).

#### 9.4.2.4 Complesso calcareo-marnoso (CCM)

A questo complesso si riferiscono i termini calcareo-marnosi delle Formazioni dei Trubi (**TRB**) e i calcari della formazione di Cattolica (**GTL1**). Si tratta di marne calcaree e calcari marnosi in strati da sottili a medi, in genere intensamente fratturati.

Anche in questo caso il complesso costituisce un acquifero molto eterogeneo ed anisotropo, con permeabilità da bassa a media per fessurazione e carsismo.

I pochi dati a disposizione non permettono di individuare valori di conducibilità significativi sulla base

delle sole misure in situ. Considerando le caratteristiche litologiche e composizionali, si ipotizza che i litotipi di questo complesso presentino perlopiù delle permeabilità modeste per fratturazione. Solo localmente, in corrispondenza di orizzonti a minor grado di cementazione è probabile l'esistenza di zone a elevata porosità efficace e permeabilità. E' altresì possibile, nei livelli calcarei, la presenza di fenomeni carsici che determinano anch'essi permeabilità localmente elevate.

La conducibilità ipotizzabile su grande scala è mediamente dell'ordine di  $1 \cdot 10^{-7}$  -  $1 \cdot 10^{-6}$  m/s; tuttavia, alla luce delle precedenti considerazioni sui fattori di incremento locale, si deve tenere in conto la possibile presenza di incrementi che possono condurre all'esistenza di livelli con conducibilità fino a  $1 \cdot 10^{-4}$  m/s. Inoltre, la presenza di livelli più marcatamente marnosi porta a locali variazioni della conducibilità fino a  $1 \cdot 10^{-8}$  m/s.

#### **9.4.3 Complessi delle unità nei depositi quaternari**

I depositi quaternari sono stati suddivisi in due complessi idrogeologici. Si precisa che i depositi di origine antropica non sono inseriti nei complessi idrogeologici, sia per l'estensione generalmente ridotta che non permette lo sviluppo di acquiferi significativi e continui al loro interno, sia per la composizione granulometrica estremamente variabile.

##### **9.4.3.1 Complesso argilloso-limoso (CAL)**

In questo complesso sono compresi i depositi della coltre eluvio-colluviale (*ec*), dove presente e di spessore significativo (superiore a 3 m). Si tratta in prevalenza di argille limose e argille sabbiose a struttura caotica e indistinta (coltre), con abbondanti resti vegetali e frequenti ghiaie poligeniche da angolose a sub-arrotondate.

Si tratta di un complesso eterogeneo ed anisotropo e generalmente comunque poco esteso tanto da non originare corpi idrici sotterranei di importanza significativa. Esso ospita falde poco rilevanti e talora a carattere stagionale. La permeabilità, esclusivamente per porosità, è variabile da molto bassa a bassa.

In questo complesso non sono state effettuate prove di permeabilità in foro: sulla base delle caratteristiche litologiche, la conducibilità idraulica è stimata tra  $1 \cdot 10^{-9}$  e  $1 \cdot 10^{-7}$  m/s.

#### 9.4.3.2 Complesso sabbioso-limoso (CSL)

In questo complesso sono compresi i depositi alluvionali, il detrito di versante (**d**) e in generale le aree occupate dai **depositi di frana**. Si tratta prevalentemente di sabbie e sabbie limose a stratificazione indistinta o incrociata, con lenti di ghiaie poligeniche da sub-angolose ad arrotondate in matrice sabbiosa e sabbioso-limoso da scarsa ad abbondante.

Il complesso è fortemente eterogeneo ed anisotropo, generalmente poco esteso. Ospita le falde dei fondovalle alluvionali. La permeabilità, esclusivamente per porosità, è variabile per effetto delle differenze granulometriche, rimanendo generalmente medio-bassa.

Sulla base delle caratteristiche litologiche e delle prove di permeabilità in foro, la conducibilità idraulica si attesta mediamente tra  $1 \cdot 10^{-7}$  e  $1 \cdot 10^{-5}$  m/s, con possibili valori estremi fino a  $1 \cdot 10^{-7}$  e  $1 \cdot 10^{-4}$  m/s.

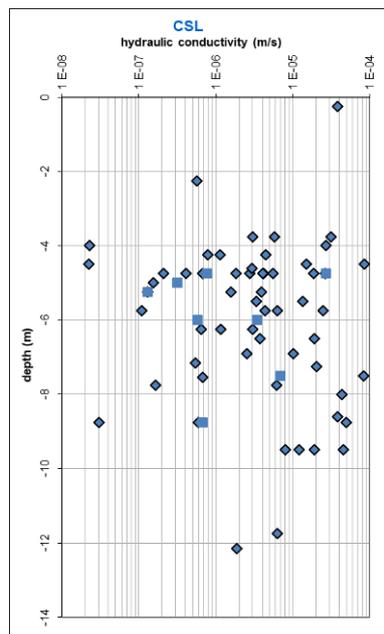


Figura 41 - Valori di conducibilità idraulica misurati in foro nel complesso idrogeologico CSL nell'ambito del Progetto Definitivo (rombi) e del Preliminare (quadrati).

## 9.5 Condizioni di deflusso idrico sotterraneo

I sondaggi effettuati nel Progetto Definitivo sono stati attrezzati con piezometro a tubo aperto, per il monitoraggio della soggiacenza della falda, o con cella elettrica generalmente tipo Casagrande, per valutare la pressione idraulica in corrispondenza della profondità di installazione. Nei mesi di settembre

e ottobre 2019 sono state effettuate alcune letture nei piezometri già realizzati, per avere un primo quadro di definizione delle condizioni del deflusso idrico sotterraneo. Trattandosi di misure non ancora complete e relative ad un solo periodo stagionale, le interpretazioni che derivano dalle letture saranno da approfondirsi nei successivi step progettuali.

I valori di lettura, già elencati nella Figura 32, sono riportati nella carta idrogeologica e sul profilo idrogeologico. Sulla base di queste letture sul profilo è stata tracciata una linea che rappresenta il limite superiore della zona satura, da interpretarsi come indicativa di una vera e propria superficie di falda solo nelle situazioni di fondovalle o in alcuni dei complessi.

In generale, si possono fare le seguenti considerazioni per quanto attiene agli acquiferi quaternari:

- nelle aree subpianeggianti dei fondovalle alluvionali gli acquiferi sono costituiti da depositi granulometricamente eterogeni. La falda che si imposta al loro interno è generalmente una falda libera, caratterizzata da soggiacenze medie dell'ordine dei 5 m dal p.c., il cui sviluppo è vincolato dalla presenza del substrato sottostante e dei fianchi vallivi dei versanti adiacenti. La potenza relativamente ridotta dei depositi non permette lo sviluppo di falde confinate.
- Questi acquiferi risultano alimentati dagli apporti superficiali e profondi dei principali corsi d'acqua dell'area, e la falda al loro interno risente presumibilmente di variazioni significative ancorché di breve durata per effetto delle precipitazioni.
- I gradienti piezometrici sono mediamente piuttosto bassi, anche se possono mostrare variazioni locali all'interno di livelli a granulometria maggiore legati alla presenza di paleoalvei.

Per gli acquiferi impostati nei depositi del substrato prequaternario valgono invece le considerazioni seguenti:

- Relativamente agli acquiferi impostati nei litotipi marnoso-argillosi del substrato prequaternario (complesso CAM, es. Formazione di Terravecchia), la permeabilità generalmente da bassa a molto bassa permette di escludere la presenza di falde a pelo libero e confinate caratterizzate da movimenti di flusso significativi. Tuttavia, le letture confermano che questo complesso idrogeologico risulta per buona parte saturo.

- Nei terreni costituenti il complesso idrogeologico CCA, si possono interpretare le letture dei piezometri come indicatori di una vera e propria falda, seppur caratterizzata da bassa velocità di deflusso in ragione delle basse porosità legate alla presenza di una matrice fine localmente anche molto rappresentata. Inoltre, data l'eterogeneità granulometrica di questo complesso, non si può escludere la presenza di falde confinate o in pressione, seppur presumibilmente di estensione limitata.
- Tra i litotipi del substrato prequaternario sono presenti anche livelli calcarei, gessosi e con mineralizzazioni a salgemma: date le caratteristiche di permeabilità, in questi litotipi possono essere presenti locali falde isolate.
- In corrispondenza della galleria GN01 (Montestretto), verranno attraversati differenti complessi idrogeologici strutturati in una sinclinale con asse inclinato ed immergente verso sud. In quest'area sono stati realizzati diversi piezometri, sia nei fianchi della sinclinale che all'interno del nucleo:
  - 4a-gn1-S02 e 4a-gn1-S05, ubicati rispettivamente nel fianco occidentale e orientale della sinclinale, entrambi attrezzati con cella di Casagrande alla quota di 65 m (S02) e 75 m (S05) dal p.c. Durante le campagne piezometriche non è mai stata osservata una falda all'interno di questi piezometri: questi dati non sembrano compatibili con gli altri piezometri presenti nell'area.
  - 4a-gn1-S03, realizzato interamente all'interno del nucleo della sinclinale (argille della Formazione di Trubi, TRBa), attrezzato con Cella di Casagrande a 131 m dal p.c. In questo piezometro è stata osservato un carico idraulico corrispondente ad una falda che oscilla tra pochi metri e 25 m dal p.c.
  - 4a-gn1-S04, realizzato nella parte alta del versante a circa 100 m dalla creata, attrezzato con tubo aperto tipo Norton con tratto fenestrato ubicato in corrispondenza del membro selenitico della Formazione di Cattolica (GTL2). In questo piezometro la falda è costantemente in pressione. Questa condizione è spiegabile mediante la presenza di un elemento di confinamento dell'acquifero a valle del piezometro: questo elemento

sembra essere costituito dalle faglie ad andamento SW-NE, non osservate direttamente in affioramento ma individuate dalla presenza di allineamenti morfologici e forme di erosione caratteristiche (es. faccette triangolari).

Si ritiene quindi che questa galleria sia realizzata interamente all'interno di terreni saturi.

- La galleria GN03 (Trinacria) verrà realizzata completamente all'interno dei terreni marnoso-argillosi della Formazione di Terravecchia, con coperture che vanno da pochi metri fino a 500 m. Per definire l'andamento della superficie della zona satura sono stati realizzati diversi piezometri.
  - 4a-gn3-S15, ubicato ad ovest della città di Enna, costituito da doppio piezometro realizzato con cella elettrica a 255 m dal p.c. e con tubo aperto tipo Norton fenestrato a profondità 200-235 m e 245-265 m dal p.c. La lettura nella cella elettrica indica un carico interpretabile come indicativo di un limite della zona satura ubicato a circa 255 m dal p.c. Al contrario, all'interno del Norton è stato misurato un livello di falda al piano campagna e in pressione, e si è osservata una forte presenza di gas in risalita.
  - 4a-gn3-S16, ubicato ad ovest della città di Enna, costituito da doppio piezometro realizzato con cella elettrica a 270 m dal p.c. e con tubo aperto tipo Norton fenestrato nei tratti 233-254 m e 263-275 m dal p.c. La lettura della cella elettrica indica un carico interpretabile come indicativo di un limite della zona satura ubicato mediamente a circa 68 m dal p.c. Al contrario, all'interno del Norton è stata misurato un livello di falda a circa 23 m dal p.c. Secondo quanto riportato nella stratigrafia del sondaggio, si osserva presenza di idrocarburi tra 40 e 150 m dal p.c.
  - 4a-gn3-S17, ubicato ad ovest della città di Enna, costituito da doppio piezometro realizzato con cella elettrica a 150 m dal p.c. e con tubo aperto tipo Norton fenestrato da 110 a 130 m dal p.c. La lettura della cella elettrica indica un carico interpretabile con una zona satura con limite ubicato mediamente a circa 40 m dal p.c. Al contrario, all'interno del Norton è stata misurato un livello di falda a circa 20 m dal p.c.

Questa discrepanza nelle misure osservate all'interno di ogni foro è stata interpretata come legata alla presenza di gas (presumibilmente CH<sub>4</sub> e/o H<sub>2</sub>S) nei litotipi intercettati da sondaggi, che genera conseguenze differenti sui due tipi di piezometri:

- La presenza di una significativa percentuale di gas all'interno del tubo Norton genera presumibilmente un aumento di volume significativo nella colonna d'acqua, che pertanto si spinge verso l'alto fino a raggiungere profondità inferiori. Il dato di lettura della soggiacenza effettuato all'interno del piezometro Norton risulta quindi falsato verso l'alto, in maniera tanto maggiore quanto più è elevata la percentuale di gas disciolto nell'acqua.
- Inoltre, per effetto della presenza di gas la densità dell'acqua risulta minore. Pertanto a parità di altezza, il carico agente sulla cella in queste condizioni è inferiore a quello che verrebbe misurato in caso di acquifero senza significativa presenza di gas. La riduzione del carico misurato potrebbe anche essere ulteriormente aumentata per effetto di bolle di gas fluenti in corrispondenza della cella elettrica. La lettura effettuata mediante cella elettrica risulta quindi falsata verso il basso, in maniera tanto maggiore quanto più è elevata la presenza di gas nell'acqua.

Alla luce di queste considerazioni, si ritiene che in corrispondenza di questi tre piezometri il limite superiore della zona satura sia ubicato in una posizione intermedia tra le due letture effettuate in foro.

## 10 VALUTAZIONE DELLE PORTATE ATTESE IN GALLERIA

### 10.1 Metodologia

La valutazione delle portate attese in galleria è stata effettuata utilizzando metodi analitici. Operando una distinzione tra la situazione di afflussi attesa in corso di scavo e quella attesa in regime stabilizzato. È importante premettere che le portate stimate in questo rapporto ipotizzano una condizione di drenaggio libero lungo le gallerie. Le scelte progettuali potranno invece assumere condizioni differenti, di drenaggio parziale o assente, sia in corso di scavo che in condizioni d'esercizio. Si ritiene tuttavia che la determinazione di portate in condizioni di drenaggio libero, seppur teorica, possa risultare utile per orientare le scelte progettuali e in particolare della tipologia di rivestimenti da adottare e del metodo di scavo opportuno o ammissibile.

#### 10.1.1 Portate transitorie

Per stimare le portate degli afflussi in regime transitorio di breve termine, quindi delle massime portate transitorie che si possono generare in fase di avanzamento dello scavo all'interno di un acquifero sono state utilizzate due formulazioni analitiche sviluppate per quantificare un flusso di tipo radiale. Si tratta di una formulazione descritta da Ribacchi et al. (2002) facendo riferimento a precedenti contributi di Panet (1973) e Fernandez & Alvarez (1994), e della più classica e utilizzata formulazione proposta da Jacob & Lohman (1952).

La formulazione proposta da Ribacchi et al. (2002) stabilisce che:

$$q_0 = \frac{2\pi k L h_0}{\ln(2h_0/r)} \quad q_t = \frac{2\pi k L h_0}{\ln(2h_0/r)} \quad (1)$$

dove  $q_t$  è la portata drenata ( $m^3/s$ ),  $k$  è la conducibilità idraulica ( $m/s$ ),  $L$  è la lunghezza della tratta di tunnel presa in considerazione,  $h_0$  è il carico idraulico in condizioni imperturbate ( $m$ ) e  $r$  è il raggio del tunnel ( $m$ ).

La formulazione proposta da Jacob & Lohman (1952) stabilisce invece che:

$$q_t = \frac{4\pi k L h_0}{2,3 \ln(2,25 k L t / S r^2)} \quad (2)$$

dove i simboli usati hanno lo stesso significato che per la formula precedente, mentre  $t$  è il tempo trascorso dall'inizio del drenaggio e  $S$  è il coefficiente di immagazzinamento legato alla risposta elastica del mezzo acquifero.

Si noti che la formulazione di Jacob & Lohman (1952) è una formulazione che origina da una modifica di un'espressione utilizzata per descrivere il flusso radiale in regime transitorio nell'intorno dei pozzi e per tale motivo implica l'introduzione di un fattore tempo. Ovviamente per stimare il flusso nei primi momenti dall'inizio del drenaggio è necessario scegliere un tempo breve; nel caso specifico di questo lavoro è stato utilizzato un tempo pari a 1 giorno. Allo stesso tempo questa formulazione implica la stima del coefficiente di immagazzinamento legato alla risposta elastica, che è un parametro tipico degli acquiferi confinati, poiché in tali acquiferi l'immagazzinamento è legato all'espulsione di acqua per decompressione dello scheletro litologico. Sarebbe quindi improprio applicare questa formulazione al caso di acquiferi a falda libera, come nella maggior parte dei casi cui ci si trova di fronte nel presente lavoro.

Tuttavia, secondo Loew (2002) l'utilizzo di questa espressione è appropriato, seppur per approssimazione, anche nel caso degli acquiferi a falda libera se il valore che si intende stimare è la portata nelle fasi iniziali di flusso radiale e senza abbattimento della falda, poiché in queste fasi la pressione dell'acquifero sostanzialmente non cambia e il suo comportamento a breve termine può essere considerato comparabile a quello di un acquifero a falda confinata.  $S$  elastico è comunque un parametro difficile da stimare per un acquifero a falda libera, o comunque in assenza di prove di pompaggio; generalmente la maggior parte degli autori riferisce che il suo valore può essere di due o tre ordini di grandezza inferiore rispetto alla porosità efficace e come tale è stato gestito in questo lavoro.

Le due formulazioni restituiscono perlopiù valori comparabili, anche se talora leggermente discordanti. Per questo motivo, una volta eseguito il calcolo è stato verificato che esistesse una corrispondenza di

massima tra i valori restituiti nei due casi ed è stato scelto come valore di riferimento un valore mediato, o comunque ragionato.

Va altresì tenuto in conto che le portate transitorie sono fortemente influenzate dalla velocità di avanzamento dello scavo. Posto che non è possibile stimare e prevedere l'entità di afflussi fortemente localizzati ed improvvisi, anche se di durata molto breve tramite delle funzioni analitiche, si è ritenuto significativo fornire un dato di venuta su una lunghezza di 10 m di galleria. Tale lunghezza, pur non essendo una lunghezza standard è un valore di entità di scavo giornaliera che può essere ragionevolmente ipotizzato per uno scavo meccanizzato con tecniche moderne. Ovviamente, nel caso di scavo tradizionale la velocità di avanzamento giornaliera può essere inferiore.

### 10.1.2 Portate stabilizzate

Per il caso di un tunnel ubicato in un settore di catena, come è per il caso in esame, si può fare riferimento a degli schemi concettuali del tipo di quelli riportati in Figura 42, che valgono per situazioni morfologiche e di posizionamento della galleria paragonabili a quelli del tracciato in esame. La peculiarità principale del tracciato in esame è che esso sottopassa numerose valli secondarie del reticolo idrografico, mentre si trova spesso relativamente distante da fondovalle importanti, con corsi d'acqua a portata elevata e caratterizzati da potenti e importanti acquiferi sede di falde con flusso consistente.

In condizioni imperturbate le linee di flusso nel substrato sono dirette verso le valli principali e verso la/le valli secondarie, con spartiacque che generalmente si collocano sotto le creste spartiacque tra i vari impluvi.

Come si osserva dalla figura, in presenza del tunnel sono possibili diverse situazioni. Nella situazione tipo A, il drenaggio del tunnel provoca un abbassamento pressoché simmetrico della superficie di falda nel suo intorno, con sdoppiamento dello spartiacque presente sul versante sinistro della valle secondaria. La zona di perturbazione della superficie piezometrica non arriva a interferire direttamente con i fondovalle, che quindi continuano a ricevere alimentazione dai versanti, seppur in quantità minore rispetto alla situazione originaria.

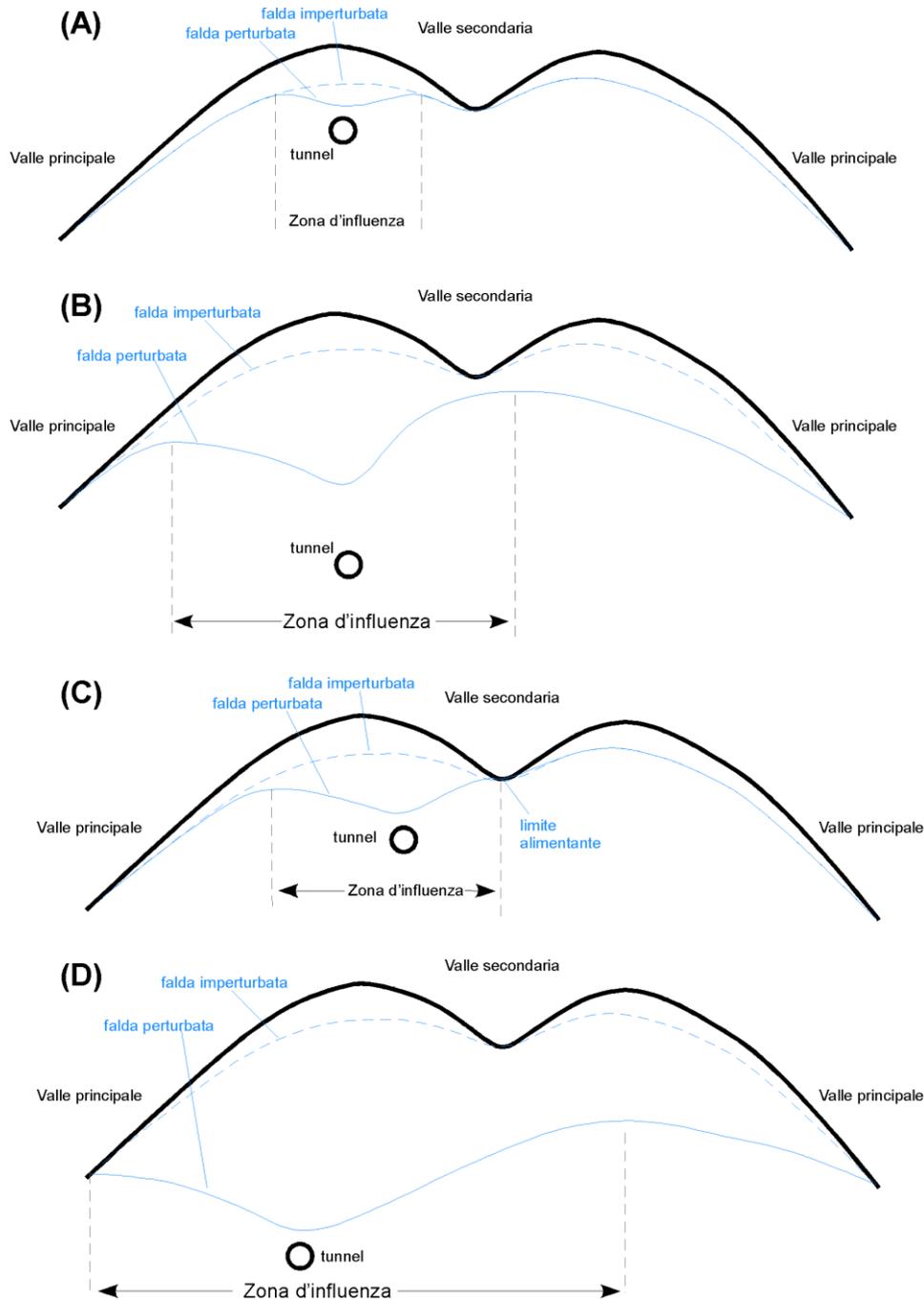
Nella situazione tipo B, con tunnel più profondo, si verifica un forte abbattimento generalizzato della superficie piezometrica, con formazione di due nuovi spartiacque sotterranei che separano la zona di

influenza del tunnel (in cui le linee di flusso sono dirette verso il tunnel stesso) dai settori in cui il deflusso delle acque rimane diretto verso le due valli principali. In questo caso la superficie piezometrica in regime perturbato può essere abbattuta (come nell'esempio schematizzato) a quote inferiori rispetto al corso d'acqua della valle secondaria. Va poi rimarcato che la superficie piezometrica perturbata nella zona di influenza può avere una geometria più o meno simmetrica rispetto al tunnel nella zona di influenza, a seconda della topografia e della posizione del tunnel rispetto alle valli secondarie e principali. Nel caso specifico dell'esempio è rappresentata una geometria asimmetrica, dovuta sia al disassamento del tunnel rispetto alla valle secondaria, sia al fatto che sul lato destro della zona di influenza, essendo presente un corso d'acqua secondario, esiste una maggior infiltrazione per perdite dal corso d'acqua, che possono essere più o meno accentuate a seconda della permeabilità del substrato, della rilevanza del corso d'acqua ecc.

La situazione tipo C differisce dalla precedente per il fatto che sul lato destro della zona di influenza la perturbazione non si estende ulteriormente perché il corso d'acqua secondario funziona da limite alimentante. La situazione tipo D è quella con maggior abbattimento, e in questo caso è possibile che la zona di influenza del drenaggio esercitato dal tunnel si estenda fino a incontrare un limite idrogeologico alimentante principale, costituito da un fondovalle di importanza rilevante.

Nel caso dell'opera in esame, come si vedrà, le condizioni più ricorrenti sono la A e la B, più rara è la C, mentre non si verifica mai la D.

Per valutare le portate su un gran numero di sezioni di galleria, è necessario identificare delle formulazioni analitiche che, seppur con delle ragionevoli approssimazioni, consentano di ottenere delle stime in modo relativamente rapido e attendibile. A questo scopo sono state identificate delle formulazioni proposte da Federico (1984) e successivamente riprese da Ribacchi et. al (2002). Esse si basano su uno schema concettuale a scatola chiusa, come quello rappresentato in Figura 43. Le semplificazioni rispetto a situazioni reali di catena montuosa del tipo di quelle illustrate in Figura 42 sono evidenti, ma l'applicazione delle formulazioni di Federico (1984) in diversi progetti di tunnel più o meno profondi hanno dimostrato che tali semplificazioni sono del tutto accettabili per ottenere indicazioni sugli ordini di grandezza degli afflussi, ovvero per ottenere l'informazione desiderata in questo rapporto per la maggior parte delle tratte.



*Figura 42 - Schema concettuale degli effetti di drenaggio di un tunnel.*

Le principali semplificazioni implicate dalle formulazioni di cui sopra rispetto alla situazione reale sono brevemente illustrate e commentate ai seguenti punti.

- Assunzione di mezzo poroso equivalente. Questa assunzione è ragionevole se si considera che le portate transitorie derivano da zone di influenza che coinvolgono grandi volumi di acquifero ove le eterogeneità a scala metrico-decаметrica vengono mediate e smorzate. Inoltre, in molti dei litotipi del substrato del progetto in oggetto la permeabilità è principalmente legata alla porosità primaria.
- Assunzione di conducibilità idraulica omogenea. Anche in questo caso vale l'osservazione di cui al punto precedente. Peraltro, se esistono disomogeneità di conducibilità su grande scala, nella zona di influenza, è possibile agire secondo tre criteri: i) se in corrispondenza del tunnel è presente il mezzo meno conduttivo si può utilizzare nelle formulazioni la conducibilità di tale mezzo, poiché sarà tale mezzo a rappresentare il fattore limitante per il drenaggio; ii) se in corrispondenza del tunnel è presente il mezzo più permeabile, ma esso è ovunque incluso nel mezzo meno permeabile, ancora una volta, per il calcolo si potrà procedere utilizzando la conducibilità del mezzo meno permeabile poiché quest'ultimo costituirà il fattore limitante; iii) se in corrispondenza del tunnel è presente il mezzo più permeabile, ed esso è solo parzialmente incluso nel mezzo meno permeabile, ovvero se esiste un collegamento parziale tra il tunnel e la superficie attraverso il mezzo più permeabile, per il calcolo si potrà procedere utilizzando la conducibilità del mezzo più permeabile e in tal modo si otterrà un valore a favore di cautela.
- Assunzione di topografia piana. Il modello concettuale su cui sono basate le formulazioni analitiche (come peraltro quasi tutti i modelli analitici esistenti in letteratura) parte dal presupposto che al di sopra del tunnel esista una topografia piana e quindi un livello piezometrico lateralmente invariabile e quindi anch'esso planare. Ciò ovviamente non è valido per una zona montuosa, ove i carichi idraulici possono variare lateralmente. Questo vincolo non condiziona comunque in modo particolarmente significativo i risultati dei calcoli. Infatti, anche in un modello a scatola, dopo le fasi iniziali di drenaggio, si iniziano teoricamente a determinare delle variazioni laterali di carico (cfr. Figura 42 "effective water table"). Non esistendo modo di simulare esattamente queste variazioni, lo stesso Federico (1984), afferma che è lecito approssimare le variazioni di piezometria a una piezometria media planare (cfr. Figura 43 "average water table"). Essendo lecito fare tale approssimazione per le variazioni di carico

indotte in fase di drenaggio su una falda inizialmente planare lo sarà in egual modo anche là ove già le condizioni di carico iniziali non erano omogenee, senza che ciò introduca errori elevati.

- Infiltrazione efficace omogenea. Il modello concettuale si basa su un tasso di infiltrazione omogeneo su tutta la superficie. È da intendersi che in un contesto di infiltrazione disomogenea, quale quello di versanti con pendenze e coperture vegetali e quaternarie variabili, sarà da prendere in considerazione un tasso di infiltrazione medio.

In situazioni del tipo B di Figura 42 si dovrà inoltre tenere conto dell'addizionale di infiltrazione fornita da corsi d'acqua non più in contatto con la falda e quindi in perdita. Tale addizionale andrà sommata all'infiltrazione media sul versante. In situazioni di tipo C di Figura 42 sarebbe in teoria necessario disporre di un modello analitico in grado di tenere conto di un carico imposto su uno dei lati della zona di influenza. In realtà il modello analitico proposto da Federico (1984) non consente di inserire tale variabile. Si tenga conto tuttavia che se si applica il modello senza limitazione laterale del raggio di influenza ma assumendo comunque un abbattimento della quota di falda al di sotto della quota del corso d'acqua, aggiungendo all'infiltrazione dal versante l'addizionale di infiltrazione derivante da perdite del corso d'acqua, si ottiene comunque un valore di portata cautelativo, poiché in questo caso l'infiltrazione disponibile dalla superficie sarà sicuramente la maggiore possibile.

- Assunzione di un limite impermeabile a distanza nota al di sotto del tunnel. Il modello concettuale assume che sotto la quota del tunnel sia presente un livello impermeabile posto a una distanza nota "b" (cfr. Figura 43). Nel caso del progetto in esame un tale limite non esiste praticamente mai poiché le formazioni attraversate si approfondiscono sovente per diverse centinaia di metri. Tale aspetto non risulta però particolarmente problematico poiché variazioni della distanza di questo limite dell'ordine dei 500 m implicano variazioni di portata dell'ordine di pochi punti percentuali (3-7%). Si è ritenuto che assumere la presenza di un limite impermeabile arbitrario a profondità di 500 m al di sotto del tunnel fosse sufficientemente cautelativo.

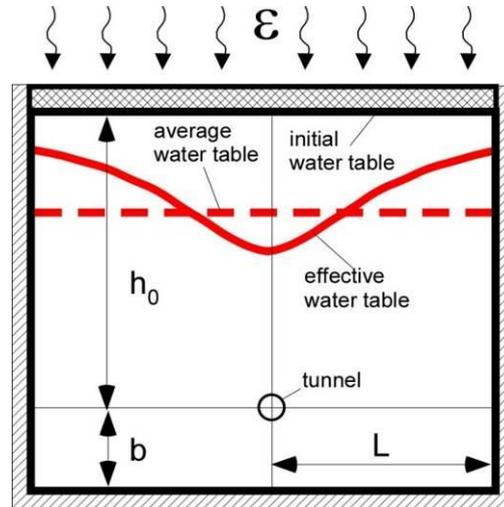


Figura 43 - Schema concettuale per il calcolo delle portate stabilizzate con la formula proposta da Ribacchi et al. (2002).

Il modello analitico di Federico (1984) fornisce poi stime delle portate secondo due funzioni differenti a seconda che:

- la superficie piezometrica sulla verticale dell'opera risulti abbattuta fino a quota galleria;
- la superficie piezometrica sulla verticale dell'opera sia abbattuta solo parzialmente.

Per il caso "a" è possibile calcolare la portata degli afflussi basandosi sulla seguente formulazione:

$$q_{fin} = kh_0 \sqrt{\frac{2\varepsilon}{k} (1 + 2b/h_0)} \quad (3)$$

in cui  $q_{fin}$  è la portata in regime stabilizzato,  $\varepsilon$  l'infiltrazione (m/s),  $b$  è la distanza tra il tunnel e il primo limite impermeabile presente in profondità al di sotto del tunnel stesso (Figura 43).

Per il caso "b", di abbattimento solo parziale della piezometrica è possibile utilizzare un'altra funzione, proposta da Federico (1984) e successivamente ripresa da Ribacchi et al (2002). Secondo tale funzione la portata drenata in un qualsiasi istante dal tunnel può essere calcolata come segue:

$$q(t) = Fk[h(t) - r_g] \quad (4)$$

dove  $q$  è la portata drenata,  $t$  è il tempo intercorso dall'inizio del drenaggio,  $h$  l'altezza media della colonna d'acqua al di sopra della galleria,  $k$  è la conducibilità idraulica e  $r_g$  è il raggio della galleria.  $F$  è un coefficiente di forma calcolato come segue:

$$\frac{4\pi}{F} = \ln \frac{\sinh(\pi h_0 / L) \cdot \sinh[\pi(h_0 + 2b) / L]}{4 \sinh(\pi r_g / L) \cdot \sinh(\pi b / L)} \quad (5)$$

Dove *sin* sta per la funzione seno iperbolico,  $h_0$  è l'altezza media della colonna d'acqua in regime imperturbato,  $L$  è sostanzialmente l'estensione per ogni lato del tunnel dell'area di ricarica,  $b$  è l'estensione in profondità dell'acquifero al di sotto della galleria.

L'utilizzo delle formule analitiche sin qui descritte presuppone la stima di numerosi aspetti non sempre facilmente determinabili. Tuttavia, tale passaggio, che introduce necessariamente una certa indeterminatezza, che si aggiunge a quella imposta dalle assunzioni precedentemente descritte, non è sfortunatamente aggirabile con nessun metodo analitico esistente. Il problema della definizione delle portate stabilizzate è infatti un problema in cui numerosi dei parametri determinanti sono interdipendenti e quindi si influenzano reciprocamente, senza la possibilità che se ne possa determinare uno senza determinare gli altri che lo influenzano e a loro volta ne vengono influenzati. Le interrelazioni maggiori esistono tra la dimensione della zona di influenza e il carico idraulico finale sulla galleria; il carico idraulico finale influenza tuttavia anche la riduzione di permeabilità connessa alle subsidenze indotte dalla diminuzione delle pressioni idrauliche nell'acquifero e così via.

Considerata tale complessità la gestione di questa problematica non può che essere risolta con delle ragionevoli assunzioni che non possono che partire da un'ipotesi di zona di influenza ragionevolmente stimata in funzione delle condizioni al contorno del tunnel. Assumendo poi che si riesca a stimare con buona approssimazione il tasso di infiltrazione (cfr. paragrafo 10.2), a partire dall'estensione della zona di influenza si potranno derivare delle altezze finali della colonna d'acqua sul tunnel che, se anch'esse ragionevoli potranno confermare che le portate ottenute sono realistiche.

## 10.2 Valutazione dell'infiltrazione efficace

Dalle considerazioni finali del precedente paragrafo emerge come il dato di infiltrazione rappresenti uno dei pochi vincoli relativamente certi nel processo di valutazione delle portate stabilizzate drenate da un tunnel. Il calcolo di questo dato assume pertanto un'importanza rilevante.

Nel presente paragrafo verranno forniti gli elementi essenziali per comprendere come è stata valutata l'infiltrazione efficace nella zona di interesse.

### 10.2.1 Piovosità

Per valutare la piovosità annuale nell'area di progetto è stato consultato il SIAS - Sistema Informativo Agrometeorologico Siciliano (sito web: [http://www.sias.regione.sicilia.it/frameset\\_pcum01.htm](http://www.sias.regione.sicilia.it/frameset_pcum01.htm)).

Per avere un valore di piovosità media annua sufficientemente rappresentativo, è stato necessario utilizzare i dati relativi a stazioni meteorologiche vicine all'area di progetto: sono state prese in considerazione le stazioni di Alia (provincia di Palermo), Caltanissetta e Mussomeli (provincia di Caltanissetta), Agira ed Enna (provincia di Enna).

Inoltre, per avere un valore medio significativo è necessario avere un periodo di misure esteso su più anni. Infine, l'utilizzo di dati storici riferiti ad anni troppo lontani dall'attuale non sarebbe rappresentativo del trend atteso per i prossimi anni, a causa delle variazioni climatiche che rappresentano la manifestazione locale del Global Warming. Si è scelto quindi di prendere i dati di piovosità media relativi al periodo 2003-2017.

Stazione meteorologica	Provincia	Piovosità annua media riferita al periodo 2003-2017 (mm)
Agira	Enna	653
Alia	Palermo	558
Caltanissetta	Caltanissetta	536
Enna	Enna	552
Mussomeli	Caltanissetta	561

*Figura 44 – dati di piovosità annua media.*

Pertanto, per l'area di studio è stato considerato il valore di piovosità di 550 mm/anno.

### 10.2.2 Evapotraspirazione

Sul sito web della Regione Sicilia sono disponibili, per alcuni anni, i valori di evapotraspirazione potenziale (ETP) giornaliera (es. [http://www.sias.regione.sicilia.it/analisi\\_2005/web/ETP\\_2005.htm](http://www.sias.regione.sicilia.it/analisi_2005/web/ETP_2005.htm)).

Tuttavia, al fine del calcolo della quantità di acque di pioggia che si infiltrano nel sottosuolo per alimentare gli acquiferi, questo dato non è rappresentativo poiché non collegato alle precipitazioni.

Si è ritenuto quindi opportuno confrontare il dato di evapotraspirazione potenziale con i valori delle precipitazioni, trasformando le informazioni sul periodo mensile. Ad esempio, per il 2005, anno di cui sono disponibili i valori di ETP, ancora sul sito web della Regione Sicilia sono stati reperiti i dati delle

precipitazioni mensili ([http://www.sias.regione.sicilia.it/analisi\\_2005/web/Meteoclima\\_2005.pdf](http://www.sias.regione.sicilia.it/analisi_2005/web/Meteoclima_2005.pdf)).

Dal confronto tra i dati si evidenziano due possibili situazioni:

- Il valore di evapotraspirazione potenziale del mese è superiore a quello delle precipitazioni nello stesso mese (es. agosto): in questo caso teoricamente il processo di evapotraspirazione può interessare l'intera quota della pioggia caduta, rendendo nulla l'infiltrazione nel terreno. In questi casi si è assunto che l'evapotraspirazione coincida con il valore delle precipitazioni.
- Il valore di evapotraspirazione potenziale del mese è inferiore a quello delle precipitazioni nello stesso mese (es. gennaio): in questo caso quindi non tutta l'acqua di pioggia può essere coinvolta dal processo di evapotraspirazione, e l'evapotraspirazione potenziale può manifestarsi nella sua totalità. In questa situazione si è considerato come valore di evapotraspirazione quello di ETP.

Pertanto, l'evapotraspirazione da considerarsi come valore reale per l'anno 2005 è pari 465 mm, che rappresenta una percentuale pari al 64% delle precipitazioni dello stesso anno (729 mm).

È stata quindi considerata un'evapotraspirazione pari al 60% delle precipitazioni.

	ETP		Precipitazioni mensili (mm)	Evapotraspirazione (mm)
	mm/giorno	mm/mese		
gennaio	1	31	63	31
febbraio	1.5	42	90	42
marzo	2.5	77.5	41	41
aprile	2.5	75	88	75
maggio	4.25	131.75	25	25
giugno	4	120	42	42
luglio	5.5	170.5	3	3
agosto	4.5	139.5	22	22
settembre	3.5	105	46	46
ottobre	2	62	67	62
novembre	1.5	45	54	45
dicembre	1	31	188	31

Figura 45 – calcolo dell'evapotraspirazione, relativa al 2005

### 10.2.3 Infiltrazione

Le acque delle precipitazioni pluviometriche (P) in parte si disperdono per l'evapotraspirazione (E), in parte defluiscono per ruscellamento superficiale (R) e la rimanente parte si infiltra nel terreno (I):

$$P = I + E + R$$

I valori di infiltrazione e ruscellamento sono strettamente collegati tra loro e dipendono dalla natura del terreno, e in superficie, dalla pendenza e dalla vegetazione di copertura. Per quanto riguarda la natura del terreno, la letteratura (es. Civita, 2014) individua coefficienti di infiltrazione ( $C_i$ ) specifici per i diversi litotipi (Figura 46), che permettono di semplificare la formula precedente in:

$$I = C_i \cdot (P - E)$$

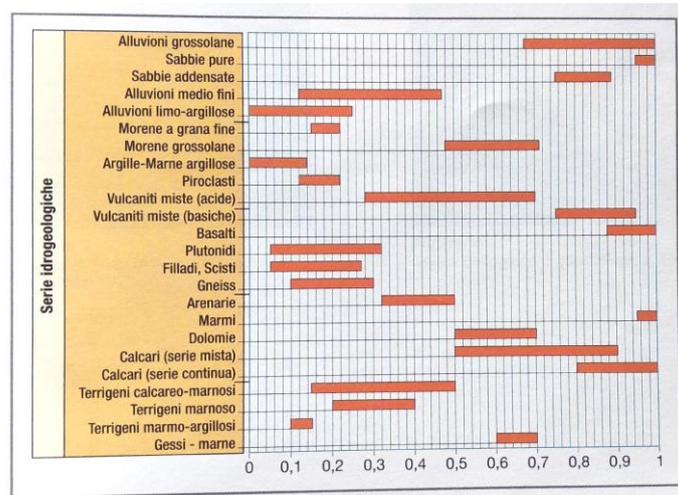


Figura 46 - Coefficienti di infiltrazione (Civita, 2014).

Per le unità geologiche presenti nell'area di progetto sono stati utilizzati i coefficienti riportati nella Figura 47. Si precisa che nei casi in cui la geologia in superficie differisce da quella a quota galleria, i coefficienti utilizzati per la valutazione delle portate attese sono stati localmente variati per tenere conto della disomogeneità.

AV	FYN4	TRV	TRVa	TPL	GTL1	GTL2	GTL3	GPQ	TRB	TRBa	ENNa	ENNb	a2
0.05	0.05	0.05	0.6	0.7	0.8	0.6	0.6	0.6	0.6	0.05	0.1	0.6	0.3

Figura 47 – Valori del coefficiente di infiltrazione stimato per le unità geologiche nell'area di progetto. Il dato è adimensionale.

### 10.3 Permeabilità

Per la valutazione delle portate attese in galleria è stato necessario individuare un valore di conducibilità idraulica medio rappresentativo per ogni unità geologica. I valori utilizzati, riportati nella

AV	FYN4	TRV	TRVa	TPL	GTL1	GPQ, GTL2, GTL3 <50 m da p.c.	GPQ, GTL2, GTL3 >50 m da p.c.	TRB	TRBa	ENNa	ENNb	a2
5E-08	5E-09	1E-08	5E-07	1E-07	1E-06	5E-07	5E-09	1E-06	1E-09	1E-08	5E-07	1E-07

Figura 48, derivano da un'analisi ragionata dei risultati delle prove di permeabilità in foro.

AV	FYN4	TRV	TRVa	TPL	GTL1	GPQ, GTL2, GTL3 <50 m da p.c.	GPQ, GTL2, GTL3 >50 m da p.c.	TRB	TRBa	ENNa	ENNb	a2
5E-08	5E-09	1E-08	5E-07	1E-07	1E-06	5E-07	5E-09	1E-06	1E-09	1E-08	5E-07	1E-07

Figura 48 – valori del coefficiente di permeabilità delle unità geologiche nell'area di progetto utilizzati per la stima delle portate delle venute in galleria. Il dato è in m/s.

#### 10.4 Porosità

Per la valutazione delle portate attese in galleria è stato necessario individuare un valore di porosità efficace medio rappresentativo per ogni unità geologica. Partendo dai range di variazione definiti dalla letteratura (Civita, 2014) e riportati in Figura 49, sono stati individuati i valori utilizzati riportati nella Figura 50.

**Tabella 2.4** Valori di porosità totale ( $n_t$ ) e di porosità utile ( $n_u$ ) per i principali mezzi rocciosi

Mezzo roccioso	$n_t$ (%)	$n_u$ (%)
Ghiaia grossolana	25 ÷ 40	10 ÷ 30
Ghiaia a grana media	25 ÷ 45	15 ÷ 25
Ghiaia fine	25 ÷ 40	20 ÷ 35
Alluvioni (ghiaia e sabbia)	30 ÷ 35	5 ÷ 25
Sabbia grossolana	35 ÷ 40	20 ÷ 35
Sabbia a grana media	20 ÷ 40	15 ÷ 20
Sabbia fine	30 ÷ 35	10 ÷ 25
Sabbia finissima	35 ÷ 40	2 ÷ 5
Sabbia argillosa	20 ÷ 40	1 ÷ 10
Limo	30 ÷ 50	2 ÷ 30
Argilla	40 ÷ 50	0 ÷ 5
Depositi morenici	15 ÷ 35	5 ÷ 30
Marna	10 ÷ 50	0,2 ÷ 5
Arenaria fessurata	5 ÷ 25	2 ÷ 15
Craie	10 ÷ 40	1 ÷ 5
Gesso	15 ÷ 40	0,5 ÷ 20
Calcere massiccio	0,5 ÷ 15	0 ÷ 1
Calcere fessurato	1 ÷ 10	2 ÷ 10
Dolomia	2 ÷ 10	0 ÷ 1
Granito fessurato	0,2 ÷ 4	0 ÷ 2
Basalto compatto	0,1 ÷ 5	0 ÷ 2
Basalto vacuolare	5 ÷ 30	1 ÷ 10
Tufo vulcanico	30 ÷ 40	0 ÷ 20
Metamorfiti	0,2 ÷ 10	0 ÷ 2

Figura 49 - Porosità totale ed efficace definita per i diversi litotipi (Civita, 2014).

AV	FYN4	TRV	TRVa	TPL	GTL1	GTL2	GTL3	GPQ	TRB	TRBa	ENNa	ENNb	a2
0.05	0.05	0.025	0.15	0.05	0.08	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.15	0.1

Figura 50 – valori della porosità efficace delle unità geologiche nell'area di progetto utilizzati per la stima delle portate delle venute in galleria. Il dato è adimensionale.

## 10.5 Risultati delle valutazioni di portata

Di seguito si riportano i risultati dei calcoli sia per la fase di scavo (transitorio) che per la fase di esercizio (stazionario). Si ricorda che questi risultati hanno carattere indicativo. Si precisa inoltre che i calcoli sono stati effettuati per fornire l'indicazione delle portate attese nel caso in cui le gallerie siano costruite in condizioni liberamente drenanti.

### 10.5.1 GN01 – Galleria Montestretto

Dal punto di vista geologico, questa galleria si sviluppa attraversando le Formazioni di Terravecchia (TRV), Tripoli (TPL), Cattolica (GTL2) e Trubi (TRB e TRBa) strutturate in una sinclinale.

Litotipo a quota galleria	Tratta (km)		Infiltrazione (m/anno)	Porosità (%)	Tempo di stabilizzazione (anni)	Carico idraulico iniziale (m)	Carico idraulico finale al limite della zona di ricarica (m)	Conducibilità idraulica iniziale (m/s)	Estensione laterale dell'acquifero (m)	Portata stabilizzata (l/s)	Portata transitoria (l/s*10m)
	da pk	a pk									
TRV	4.060	4.123	0.011	0.025	2	0	0	5.0E-08	0	0.000	0.00
TRV	4.123	4.384	0.011	0.025	2	14	11.2	5.0E-08	200	0.019	0.01
TRV	4.384	4.580	0.011	0.025	2	37	31.45	1.0E-08	500	0.130	0.01
TRV	4.580	4.760	0.011	0.025	2	52	44.2	1.0E-08	500	0.166	0.01
TRV	4.760	4.845	0.011	0.025	2	77	65.45	1.0E-08	750	0.112	0.02
TRV	4.845	4.935	0.011	0.025	2	80	68	1.0E-08	750	0.123	0.02
TRV	4.935	5.010	0.011	0.025	2	104	88.4	1.0E-08	750	0.125	0.03
TRV	5.010	5.165	0.011	0.025	2	106	90.1	1.0E-08	750	0.262	0.03
TRV	5.165	5.250	0.011	0.025	2	108	91.8	1.0E-08	750	0.145	0.03
TPL	5.250	5.340	0.132	0.05	2	100	75	1.0E-07	500	1.281	0.18
GTL2	5.340	5.400	0.132	0.025	2	90	85.5	1.0E-09	750	0.009	0.00
TRB	5.400	5.680	0.132	0.025	2	95	66.5	1.0E-06	1000	2.128	1.27
TRBa	5.680	5.730	0.011	0.025	2	103	97.85	1.0E-09	1000	0.008	0.01
TRB	5.730	5.850	0.132	0.025	2	111	77.7	1.0E-06	1000	1.053	1.48
GTL2	5.850	5.885	0.132	0.025	2	117	111.15	1.0E-09	750	0.006	0.01
TPL	5.885	5.928	0.132	0.05	2	118	88.5	1.0E-07	500	0.691	0.21
TPL	5.928	5.966	0.132	0.05	2	119	89.25	1.0E-07	500	0.614	0.21
TRV	5.966	5.999	0.011	0.025	2	110	93.5	1.0E-08	750	0.057	0.03

Litotipo a quota galleria	Tratta (km)		Infiltrazione (m/anno)	Porosità (%)	Tempo di stabilizzazione (anni)	Carico idraulico iniziale (m)	Carico idraulico finale al limite della zona di ricarica (m)	Conducibilità idraulica iniziale (m/s)	Estensione laterale dell'acquifero (m)	Portata stabilizzata (l/s)	Portata transitoria (l/s*10m)
	da pk	a pk									
TRV	5.999	6.040	0.011	0.025	2	86	73.1	1.0E-08	750	0.059	0.02
TRV	6.040	6.120	0.011	0.025	2	60	51	1.0E-08	500	0.084	0.02
TRV	6.120	6.177	0.011	0.025	2	35	29.75	1.0E-08	500	0.036	0.01
TRV	6.177	6.356	0.011	0.025	2	15	12.75	1.0E-08	500	0.034	0.00
TRV	6.356	6.480	0.011	0.025	2	0	0	5.0E-08	0	0.000	0.00

Figura 51 – Calcolo delle portate attese lungo la galleria GN01 Montestretto

Le portate transitorie attese sono più significative nei livelli che costituiscono i fianchi della sinclinale (TPL, TRB), con valori dell'ordine di 1-2 l/s per 10 m di lunghezza. Nei tratti esterni alla sinclinale (TRV) e al nucleo della stessa (TRBa) si attendono invece valori molto bassi a causa della bassa permeabilità. La presenza di alternanze di litotipi a differenti permeabilità genera repentini cambiamenti dei valori delle portate transitorie durante lo scavo della galleria.

Per quanto riguarda la fase stazionaria, i valori attesi sono dell'ordine dei 7 l/s.

### 10.5.2 GN02 – Galleria Salso

Questa galleria si sviluppa quasi completamente all'interno di litotipi caratterizzati da bassa permeabilità (TRV e AV), con l'eccezione di un breve tratto nel complesso sabbioso-arenaceo della Formazione di Terravecchia (TRVa), di lunghezza inferiore a 100 m nella parte iniziale della galleria.

Litotipo a quota galleria	Tratta (km)		Infiltrazione (m/anno)	Porosità (%)	Tempo di stabilizzazione (anni)	Carico idraulico iniziale (m)	Carico idraulico finale al limite della zona di ricarica (m)	Conducibilità idraulica iniziale (m/s)	Estensione laterale dell'acquifero (m)	Portata stabilizzata (l/s)	Portata transitoria (l/s*10m)
	da pk	a pk									
TRV	7.650	7.700	0.011	0.025	2	0	0	5.0E-08	0	0.000	0.00
TRV	7.700	7.850	0.011	0.025	2	15	12	5.0E-08	150	0.012	0.01
TRV	7.850	8.060	0.011	0.025	2	23	19.55	1.0E-08	250	0.072	0.01
TRVa	8.060	8.150	0.132	0.1	2	26	18.2	5.0E-07	250	0.131	0.19
AV	8.150	8.270	0.011	0.05	2	28	23.8	1.0E-08	250	0.057	0.01

Litotipo a quota galleria	Tratta (km)		Infiltrazione (m/anno)	Porosità (%)	Tempo di stabilizzazione (anni)	Carico idraulico iniziale (m)	Carico idraulico finale al limite della zona di ricarica (m)	Conducibilità idraulica iniziale (m/s)	Estensione laterale dell'acquifero (m)	Portata stabilizzata (l/s)	Portata transitoria (l/s*10m)
	da pk	a pk									
TRV	8.270	8.500	0.011	0.025	2	34	28.9	1.0E-08	300	0.131	0.01
TRV	8.500	8.645	0.011	0.025	2	44	37.4	1.0E-08	300	0.108	0.01
TRV	8.645	9.350	0.011	0.025	2	48	40.8	1.0E-08	350	0.581	0.01
TRV	9.350	9.640	0.011	0.025	2	49	41.65	1.0E-08	350	0.244	0.01
TRV	9.640	10.320	0.044	0.025	2	51	43.35	1.0E-08	400	0.649	0.01
TRV	10.320	10.660	0.011	0.025	2	47	39.95	1.0E-08	400	0.279	0.01
TRV	10.660	10.920	0.011	0.025	2	40	34	1.0E-08	350	0.180	0.01
TRV	10.920	11.120	0.011	0.025	2	30	25.5	1.0E-08	300	0.099	0.01
TRV	11.120	11.445	0.011	0.025	2	23	19.55	1.0E-08	250	0.111	0.01
TRV	11.445	11.545	0.011	0.025	2	8	6.4	5.0E-08	100	0.004	0.01
TRV	11.545	11.560	0.011	0.025	2	0	0	5.0E-08	0	0.000	0.00

Figura 52 – Calcolo delle portate attese lungo la galleria GN02 Salso

Le portate transitorie risultano generalmente piuttosto basse, con valori significativi solo all'interno dei livelli sabbioso-arenacei della Formazione di Terravecchia (TRVa).

I valori di portata nella fase stazionaria sono dell'ordine dei 3 l/s.

### 10.5.3 GN03 – Galleria Trinacria

Si tratta della galleria più lunga di questo lotto, superando i 13.5 km. Si sviluppa quasi completamente all'interno del membro argilloso-marnoso della Formazione di Terravecchia, e solo negli ultimi 0.4 km circa nel membro sabbioso-arenaceo della stessa formazione (TRVa). Questa galleria sottopassa il rilievo montuoso in cui è ubicata la città di Enna, caratterizzato dalla presenza di spessori rilevanti di litotipi appartenenti alle formazioni geologiche più recenti del Terravecchia, tra cui in particolare i livelli della Formazione di Enna (ENNa e ENNb). La parte alta di questo monte pertanto è presumibilmente caratterizzata dalla presenza di acquiferi più produttivi rispetto a quello impostato nel Terravecchia argilloso: si determina quindi un probabile flusso di acque provenienti dai livelli superficiali verso i litotipi argilloso-marnosi, che quindi in questi tratti ricevono un apporto superiore rispetto a quello generato dal solo contributo delle acque piovane laddove questi litotipi sono affioranti.

Litotipo a quota galleria	Tratta (km)		Infiltrazione (m/anno)	Porosità (%)	Tempo di stabilizzazione (anni)	Carico idraulico iniziale (m)	Carico idraulico finale al limite della zona di ricarica (m)	Conducibilità idraulica iniziale (m/s)	Estensione laterale dell'acquifero (m)	Portata stabilizzata (l/s)	Portata transitoria (l/s*10m)
	da pk	a pk									
TRV	13.350	13.365	0.011	0.025	2	0	0	5.0E-08	0	0.000	0.00
TRV	13.365	13.520	0.011	0.025	2	6	4.8	5.0E-08	100	0.005	0.01
TRV	13.520	13.820	0.011	0.025	2	22	18.7	1.0E-08	150	0.081	0.01
TRV	13.820	14.090	0.011	0.025	2	38	32.3	1.0E-08	250	0.168	0.01
TRV	14.090	14.460	0.011	0.025	2	66	56.1	1.0E-08	500	0.420	0.02
TRV	14.460	15.115	0.044	0.025	2	64	54.4	1.0E-08	500	0.766	0.02
TRV	15.115	15.370	0.011	0.025	2	56	47.6	1.0E-08	500	0.251	0.01
TRV	15.370	15.860	0.011	0.025	2	48	40.8	1.0E-08	300	0.395	0.01
TRV	15.860	16.090	0.011	0.025	2	42	35.7	1.0E-08	300	0.163	0.01
TRV	16.090	16.900	0.011	0.025	2	48	40.8	1.0E-08	500	0.694	0.01
TRV	16.900	17.940	0.011	0.025	2	62	52.7	1.0E-08	500	1.119	0.02
TRV	17.940	18.360	0.011	0.025	2	50	42.5	1.0E-08	750	0.384	0.01
TRV	18.360	18.780	0.011	0.025	2	63	53.55	1.0E-08	750	0.471	0.02
TRV	18.780	18.905	0.011	0.025	2	92	78.2	1.0E-08	1000	0.193	0.02
TRV	18.905	19.170	0.011	0.025	2	112	95.2	1.0E-08	1000	0.472	0.03
TRV	19.170	19.375	0.011	0.025	2	138	117.3	1.0E-08	1000	0.422	0.04
TRV	19.375	19.590	0.011	0.025	2	160	136	1.0E-08	1000	0.486	0.04
TRV	19.590	19.790	0.011	0.025	2	190	161.5	1.0E-08	1500	0.509	0.05
TRV	19.790	20.080	0.011	0.025	2	208	176.8	1.0E-08	1500	0.722	0.05
TRV	20.080	20.595	0.011	0.025	2	218	185.3	1.0E-08	1500	1.316	0.06
TRV	20.595	22.545	0.044	0.025	2	220	187	1.0E-08	1500	5.082	0.06
TRV	22.545	23.255	0.044	0.025	2	210	178.5	1.0E-08	1500	1.805	0.06
TRV	23.255	23.730	0.044	0.025	2	195	165.75	1.0E-08	1500	1.159	0.05
TRV	23.730	24.180	0.011	0.025	2	182	154.7	1.0E-08	1000	1.100	0.05
TRV	24.180	24.335	0.011	0.025	2	165	140.25	1.0E-08	1000	0.357	0.04
TRV	24.335	24.600	0.011	0.025	2	144	122.4	1.0E-08	1000	0.561	0.04
TRV	24.600	25.020	0.011	0.025	2	115	97.75	1.0E-08	1000	0.762	0.03
TRV	25.020	25.220	0.011	0.025	2	91	77.35	1.0E-08	750	0.302	0.02
TRV	25.220	25.415	0.011	0.025	2	63	53.55	1.0E-08	750	0.219	0.02
TRV	25.415	25.550	0.011	0.025	2	28	23.8	1.0E-08	500	0.066	0.01
TRV	25.550	26.275	0.011	0.025	2	20	17	1.0E-08	250	0.200	0.01
TRV	26.275	26.550	0.044	0.025	2	18	15.3	1.0E-08	150	0.075	0.00
TRVa	26.550	26.780	0.132	0.15	2	15	10.5	5.0E-07	100	0.195	0.11
TRVa	26.780	26.885	0.132	0.15	2	7	4.9	1.0E-06	100	0.063	0.09
TRVa	26.885	26.950	0.132	0.15	2	0	0	1.0E-06	0	0.000	0.00

Figura 53 – Calcolo delle portate attese lungo la galleria GN03 Trinacria

Le caratteristiche di bassa permeabilità e porosità dei livelli argilloso-marnosi attraversati dall'opera determinano valori di portata nella fase transitoria poco importanti. I valori più elevati sono attesi solo



DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO  
NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA  
TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - DITTAINO  
LOTTO 4a: CALTANISSETTA XIRBI - ENNA

RELAZIONE GEOLOGICA, GEOMORFOLOGICA ED  
IDROGEOLOGICA

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3U	40	D69RG	GE 00 01 001	C	130 di 209

nella parte terminale del tracciato, sviluppata nei livelli sabbioso-arenacei.

Le portate stazionarie previste sono dell'ordine di 20 l/s.

## 11 SISMICITÀ DELL'AREA

### 11.1 Premessa

Il presente studio riguarda la caratterizzazione sismica generale del settore in cui ricade il Lotto 4 della tratta Caltanissetta Xirbi - Dittaino, denominato "Caltanissetta Xirbi-Enna".

In particolare, sono stati affrontati i temi relativi all'assetto sismotettonico di questo settore, alla zonazione sismica e alla presenza di faglie sismogenetiche; la sismicità del sito di intervento è stata valutata sulla base dei dati messi a disposizione dagli enti pubblici nazionali, aggiornati al 30/11/2019.

### 11.2 Assetto geodinamico e tettonico

L'area di studio si colloca nella porzione centrale della regione Sicilia, tra le province di Palermo e Caltanissetta. L'assetto geologico-strutturale dell'area è descritto in dettaglio nei capitoli relativi all'inquadramento geologico e litostratigrafico, mentre nel presente capitolo sono messe in evidenza le caratteristiche tettonico-strutturali a scala regionale che maggiormente hanno condizionato e condizionano l'attività sismica dell'area.

Dal punto di vista strutturale, come già ricordato, la Sicilia costituisce un segmento del sistema alpino che si sviluppa lungo il limite tra la placca Nubiana (Africana p.p.) e quella Europea; questo segmento di catena collega le Maghrebidi nordafricane con l'Appennino meridionale, attraverso il cuneo di accrezione della Calabria (Figura 54). La catena e il suo prolungamento sommerso, verso ovest e verso nord, si estendono dal blocco sardo-corso, attraverso la Sicilia, fino al settore ionico (Mar Tirreno centro-meridionale).

La deformazione strutturale che ha interessato la regione può essere schematizzata in tre fasi tettoniche distinte:

- fase transtensiva (Cretacico – Eocene);
- fase compressiva (Oligocene superiore – Messiniano);
- fase finale (Pliocene – Quaternario), con riattivazione normale delle faglie preesistenti e importanti sollevamenti differenziali, testimoniati dalla presenza di numerosi bacini peri-tirrenici.

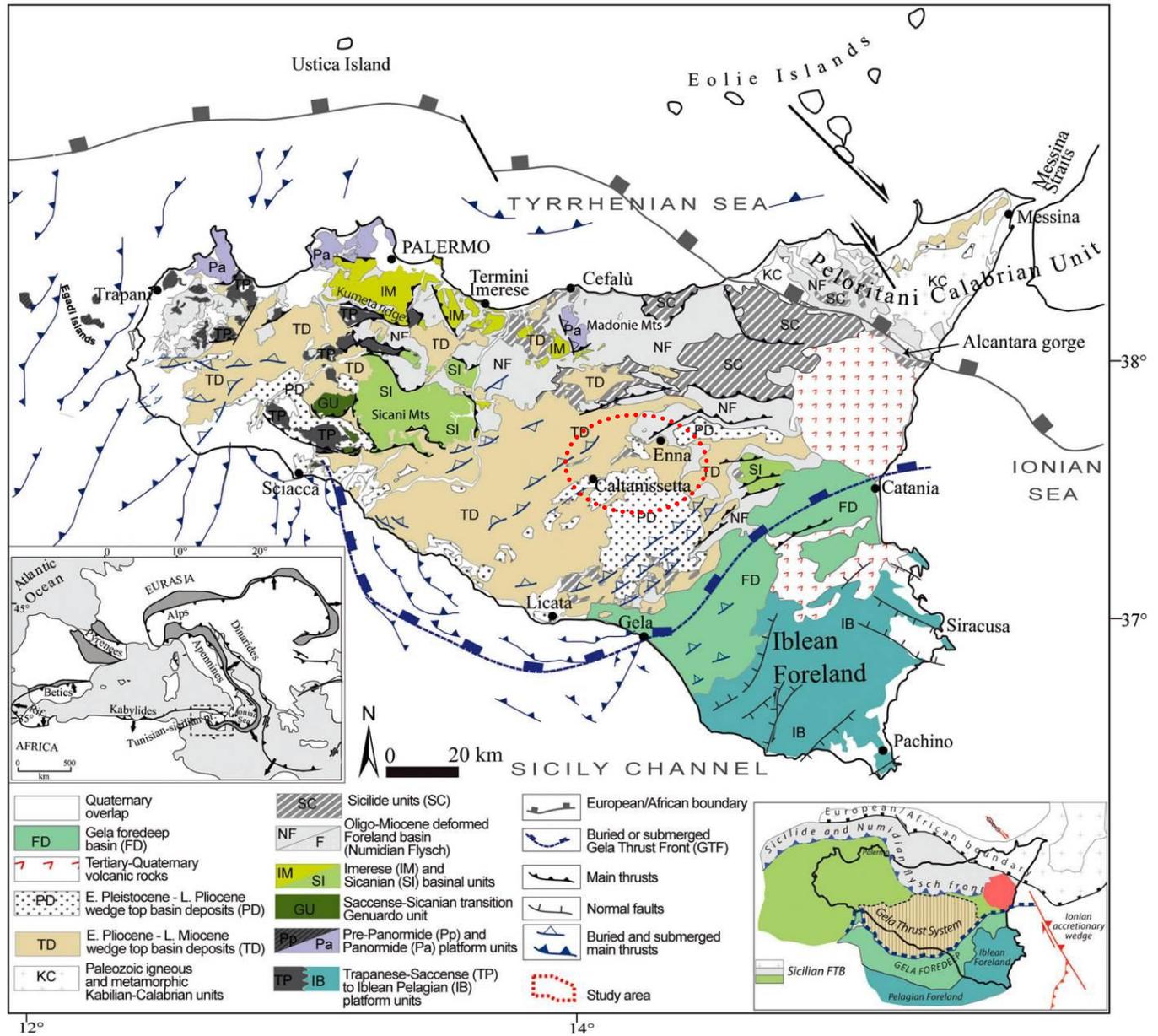


Figura 54 – Carta geologico-strutturale della Sicilia (modificata da Catalano et al. 2013); in rosso è indicato il tracciato di progetto.

Il tracciato corre all'interno della Catena Appenninico-Maghrebide, poche decine di chilometri a nord del suo fronte di sovrascorrimento sull'avanfossa Gela-Catania (Figura 55) e a sud dei sistemi di faglie normali e trascorrenti plio-quadernarie del sistema M. Kumeta-Madonie.

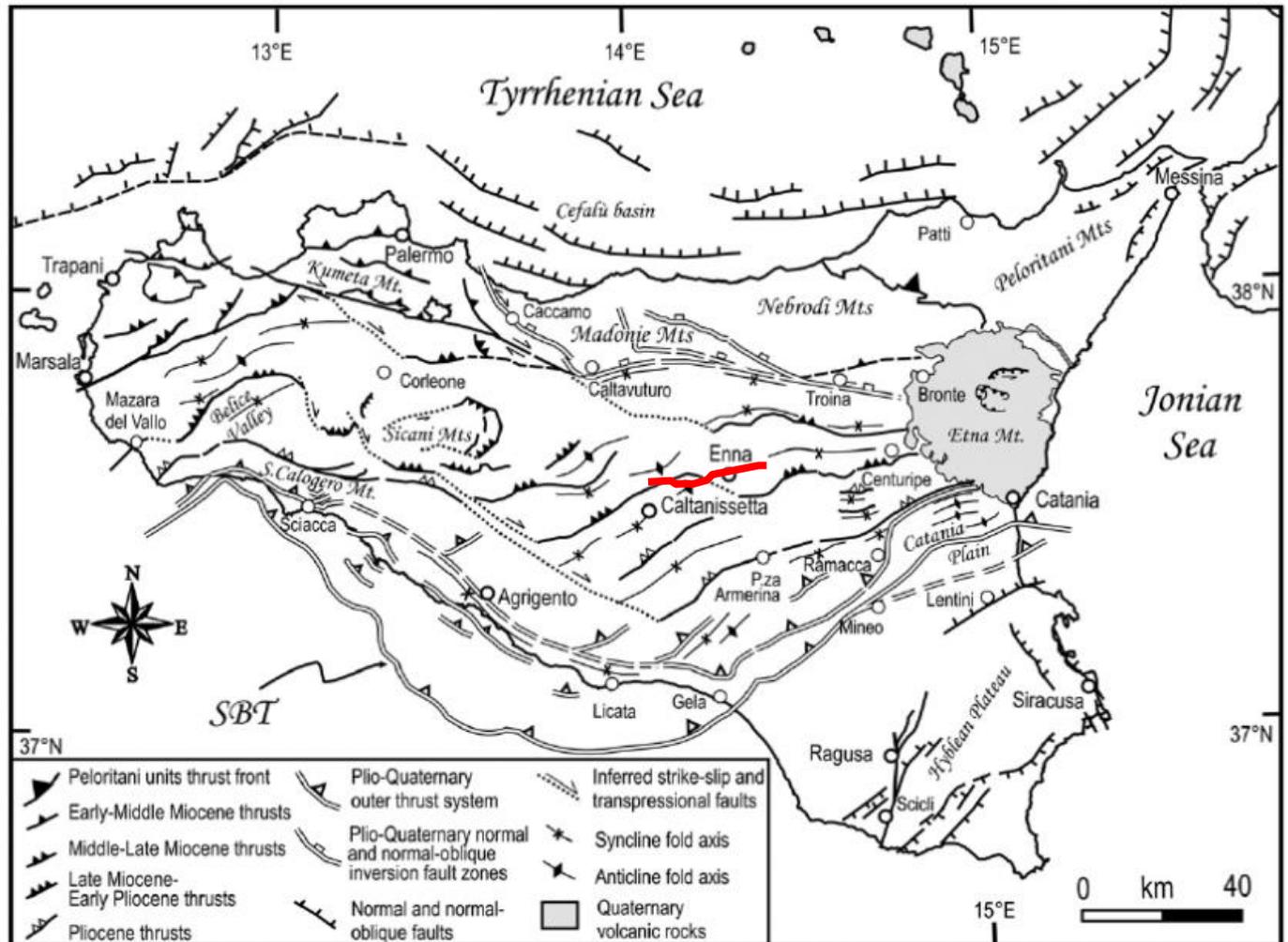


Figura 55 – Carta strutturale della Sicilia desunta dal foglio n. 6 del Modello Strutturale d’Italia a scala 1:500.000 (Bigi et al. 1991, integrato da Lavecchia et al. 2007). In rosso è indicato il tracciato di progetto.

La Catena Appenninico-Maghrebide è un *thrust-and-fold system* con vergenza verso SE, sviluppatosi a partire dal Miocene inferiore. Ai suoi margini meridionale e settentrionale sono presenti numerose faglie inverse e transpressive.

A scala crostale, la catena comprende diverse unità tettoniche cui sono associati dei thrust retrovergenti attivi fino all’Oligocene; le unità tettoniche più esterne e più recenti consistono invece di sistemi di pieghe e thrust sud-vergenti, di età da tardo-pliocenica a quaternaria, sviluppati alla sommità del thrust basale principale, che in superficie corrisponde al fronte Sciacca-Gela-Catania.

Il tracciato ricade nel bacino di Caltanissetta, che dal punto di vista strutturale ricade interamente nel dominio di avampaese della *fold-and-thrust belt*, con strutture crostali a deformazione prevalentemente fragile e strutture superficiali con stile di deformazione prevalentemente duttile (plicative).

La Fossa di Caltanissetta, un tempo ritenuta una profonda depressione, delimitata da faglie dirette e riempita da vari chilometri di olistostromi (Beneo, 1958), è in realtà caratterizzata da un regolare e geometricamente ben definito sistema a thrust, costituito da unità Ionidi, scollatesi dal proprio basamento oceanico in subduzione, riconoscibile nelle linee sismiche lungo la costa tirrenica (Lentini & Carbone, 2014). La profondità dei piani di scollamento tettonico, secondo i recenti studi sulla struttura crostale, dovrebbe essere compresa entro i primi 30 km e tendenzialmente in aumento verso nord (Lavecchia et al., 2007).

### 11.3 Assetto sismotettonico

In Sicilia, sulla base dell'analisi dei meccanismi che regolano i principali contatti tettonici correlati agli eventi sismici più rilevanti, sviluppati a scala crostale ( $M_w \geq 4.0$ , profondità  $\leq 40$  km), si possono distinguere geograficamente e cinematicamente cinque domini sismogenetici principali (Neri et al., 2005; Lavecchia et al., 2007; Billi et al., 2010; Visini et al., 2010). Da nord a sud questi domini sono (Figura 56):

- il dominio del Tirreno meridionale, localizzato al largo delle coste del nord della Sicilia, interessato da movimenti compressivi con asse di compressione diretto circa N-S;
- il dominio nord-siciliano che comprende le aree delle Madonie-Nebrodi (B1) e dei Monti Peloritani (B2), caratterizzati da movimenti per lo più estensionali con assi di estensione diretti rispettivamente N-S e WNW-ESE;
- il dominio della Sicilia centrale, soggetto a movimenti prevalentemente compressivi con assi di compressione diretti N-S nell'area Mazara-Belice-Etna (C1, C3) e con stili deformativi di tipo *strike-slip* nell'area di Caltanissetta (C2);
- il dominio della Sicilia meridionale, che si estende da Sciacca a Gela e Catania, non associato a eventi sismici strumentali di una qualche rilevanza;

- il bacino di avanfossa Ibleo, nel sud della Sicilia, caratterizzato principalmente da deformazioni di tipo *strike-slip*.

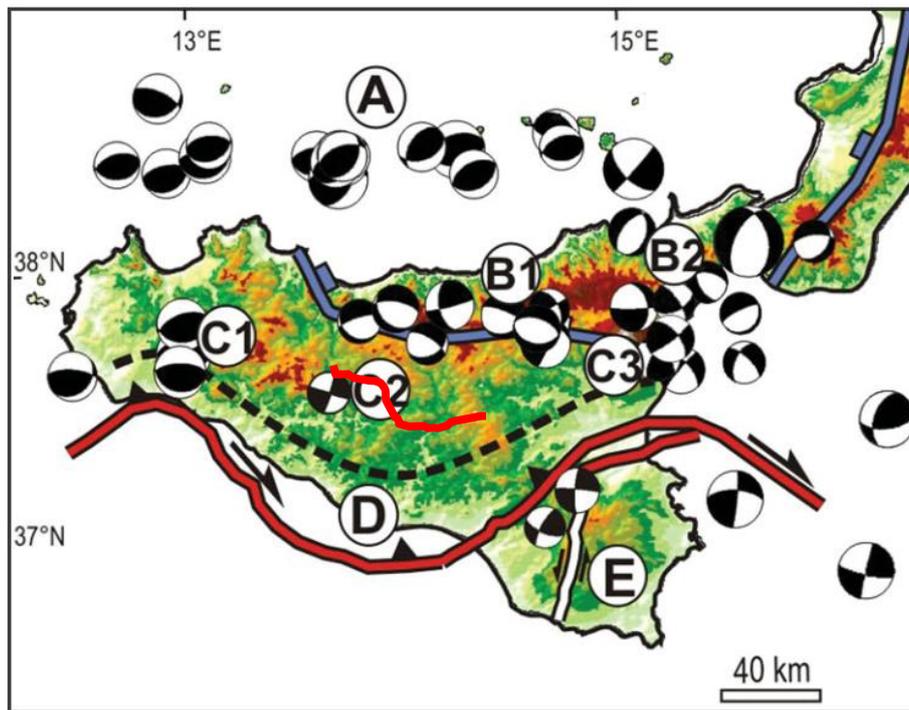


Figura 56 – Principali domini sismogenetici della Sicilia, con evidenziati gli stili deformativi dominanti (diagrammi dei meccanismi focali; i quadranti in compressione sono indicati in nero, quelli estensionali in bianco) e i principali contatti tettonici regionali. Le lettere indicano i vari domini descritti nel testo; in rosso è evidenziato il tracciato di progetto (Lotti 3 e 4a).

Il dominio della Sicilia centrale, che corrisponde al settore interessato dallo sviluppo del tracciato ferroviario in progetto, non è considerato come una zona sismogenetica; tuttavia, testimonianze storiche indicano che è avvenuto almeno un evento sismico di una certa rilevanza, con magnitudo > 6.6. Si tratta del terremoto del 361 d.C., il cui epicentro macrosismico è stato localizzato in prossimità di Caltanissetta, in accordo con le evidenze archeologiche rinvenute presso la villa romana del Casale, nella città di Piazza Armerina (SgROI et al., 2012). Sebbene alcuni autori (Jenny et al., 2006; Visini et al., 2010) proponano per questo evento dei meccanismi compressivi orientati N-S, altri (Barreca et al., 2010) sono più propensi a ricondurre l'evento a meccanismi di tipo estensionale riferibili al dominio Madonie-Nebrodi.

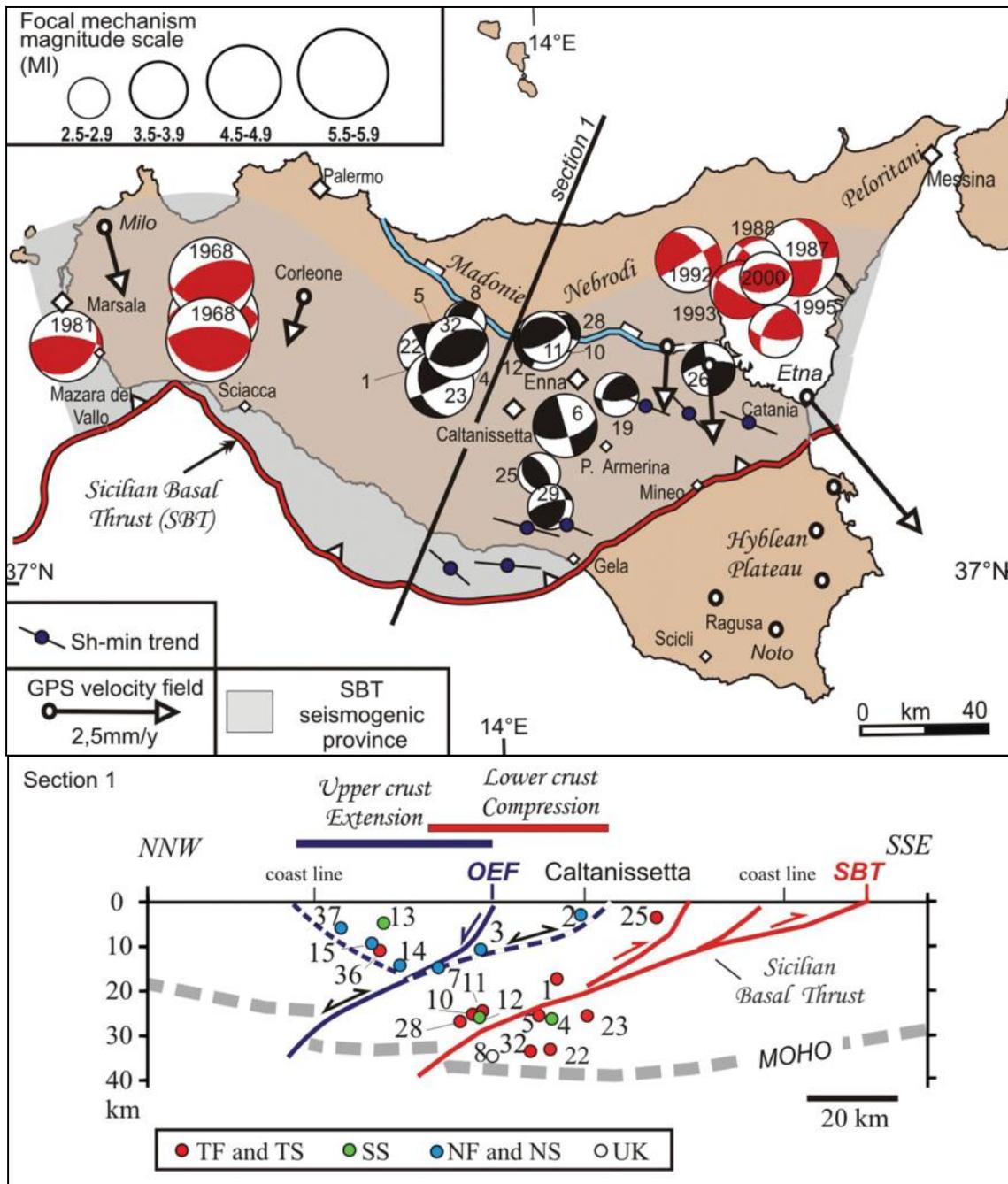


Figura 57 – Schema sismogenetico della Sicilia centrale con distribuzione dei meccanismi focali dei terremoti all'interno del dominio della Sicilia centrale (SBT). Nella sezione 1 è presentata un'interpretazione degli elementi strutturali e della possibile posizione degli ipocentri dei terremoti, suddivisi sulla base della loro cinematica. TF, piani a basso angolo; TS, piani a basso angolo con movimenti di trascorrenza; SS, strike-slip; NF, faglie normali; NS, faglie trascorrenti; UK, cinematicismo sconosciuto; OEF, fronti estensionali esterni (da Sgroi et al., 2012). Nei diagrammi polari il bianco indica i quadranti in estensione, il colore pieno quelli in compressione.

Uno studio specifico sulla sismicità del dominio della Sicilia centrale (SgROI et al., 2012) ha permesso, attraverso la definizione di un modello aggiornato di propagazione delle onde sismiche che ha portato alla ricollocazione degli ipocentri dei terremoti strumentali registrati nella zona dal 1983 al 2010, di definire le profondità dei limiti tra crosta superiore-media, crosta media-inferiore e crosta-mantello, che risulterebbero rispettivamente a 12, 22 e 37 km di profondità (cfr. sezione crostale di Figura 57).

Nello stesso studio è stato messo in evidenza inoltre come il Sicilian Basal Thrust (SBT, Figura 57), rappresenti una possibile fonte sismogenetica per il settore del bacino di Caltanissetta, con campi di stress compressivi orientati NNW-SSE, situati al tetto del SBT stesso, lungo piani di sovrascorrimento situati a profondità di 20-35 km circa.

A dispetto degli studi citati, secondo la zonazione sismica del territorio italiano (DISS) la Sicilia centrale risulta essere un settore da moderatamente sismico ad asismico, probabilmente sottovalutando il potenziale sismogenetico della SBT e confinando le zone in compressione esclusivamente alla parte più superficiale del sistema di thrust, in prossimità della loro emergenza lungo la fascia Sciacca-Gela-Catania.

#### **11.4 Zonazione sismogenetica**

Secondo la Zonazione Sismogenetica del territorio nazionale ZS9 (Meletti & Valensise, 2004), il settore d'intervento è situato in posizione intermedia tra la Zona 933 "Sicilia Settentrionale" e la Zona 935 "Iblei" (Figura 58), ma comunque ben al di fuori di entrambe le zone sismogenetiche.

In corrispondenza della Zona 933 sono attesi terremoti piuttosto profondi ( $P = 8-12$  km) e di elevata magnitudo ( $M_{max} = 6.14$ ), riconducibili allo sviluppo di faglie inverse (Meletti & Valensise, 2004). Invece la Zona 935 costituisce una delle aree a più elevata sismicità d'Italia: sulla base degli studi sismologici più aggiornati, in questa zona sono attesi terremoti profondi ( $P = 12-20$  km) e di elevata magnitudo ( $M_{max} = 7.29$ ), riconducibili allo sviluppo di faglie prevalentemente trascorrenti (Azzaro & Barbano, 2000; Meletti & Valensise, 2004; Carbone, 2011).

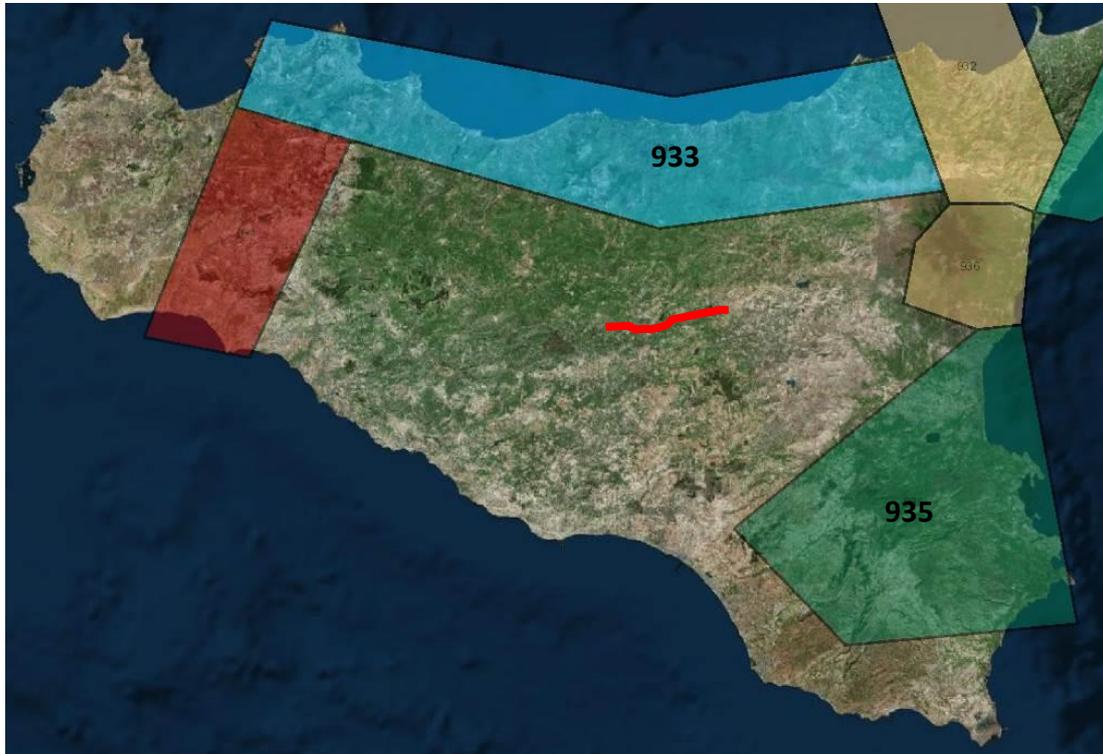


Figura 58 – Stralcio della Zonazione sismogenetica ZS9 dell’area di studio, con indicazione del tracciato di progetto.

### 11.5 Faglie sismogenetiche e faglie capaci nell’area di progetto

Gli epicentri dei terremoti sono frequentemente localizzati in corrispondenza di faglie sismiche o sismogenetiche, radicate nella porzione superiore della crosta terrestre; queste faglie attraverso movimenti di tipo “stick-slip” o “a scatti” generano eventi sismici di varia intensità che talora sono in grado di produrre una significativa deformazione tettonica permanente in superficie (faglie capaci).

Al fine di individuare gli specifici meccanismi di sviluppo e la precisa collocazione spaziale delle faglie sismogenetiche e delle faglie capaci situate in corrispondenza del settore d’intervento e in un suo intorno significativo, sono state consultate le principali banche dati disponibili per questo settore di territorio. In particolare, sono stati consultati:

- i dati relativi al progetto ITHACA (Italy Hazard from Capable faults) sviluppato dal Servizio Geologico d’Italia – ISPRA;
- il database DISS (Database of Individual Seismogenic Sources) realizzato dall’INGV;

- il database EDSF (European Database of Seismogenic Faults).

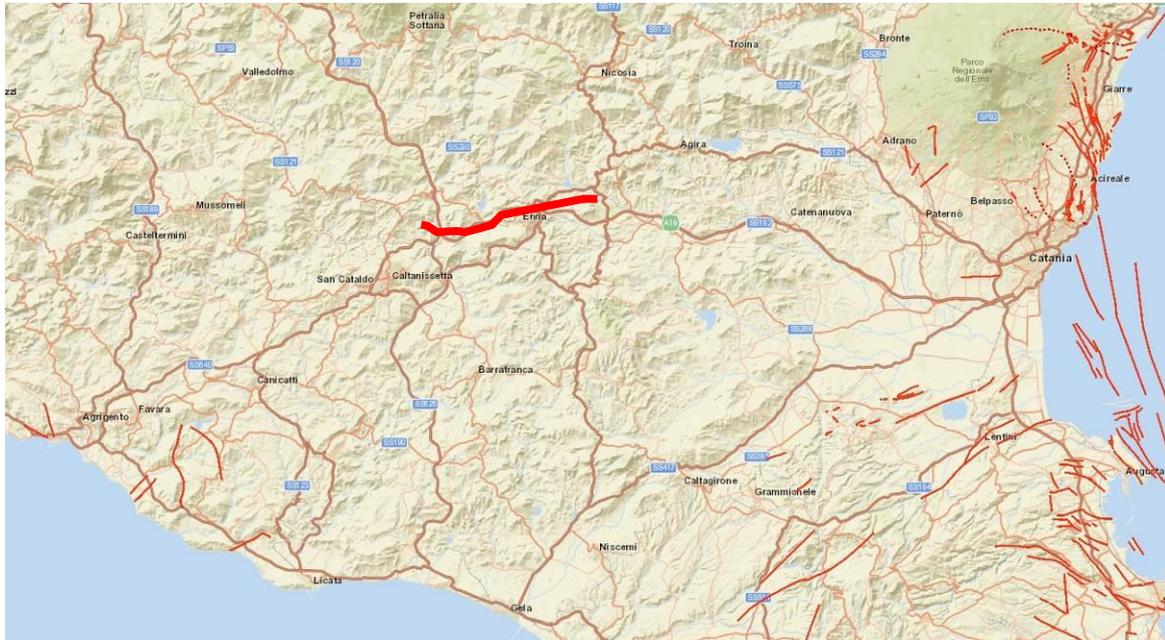


Figura 59 – Localizzazione delle potenziali sorgenti di terremoti nell’area di studio (ITHACA - Italy Hazard from Capable faults). In rosso le faglie sismogenetiche e/o capaci, in rosso il tracciato del lotto 4a.

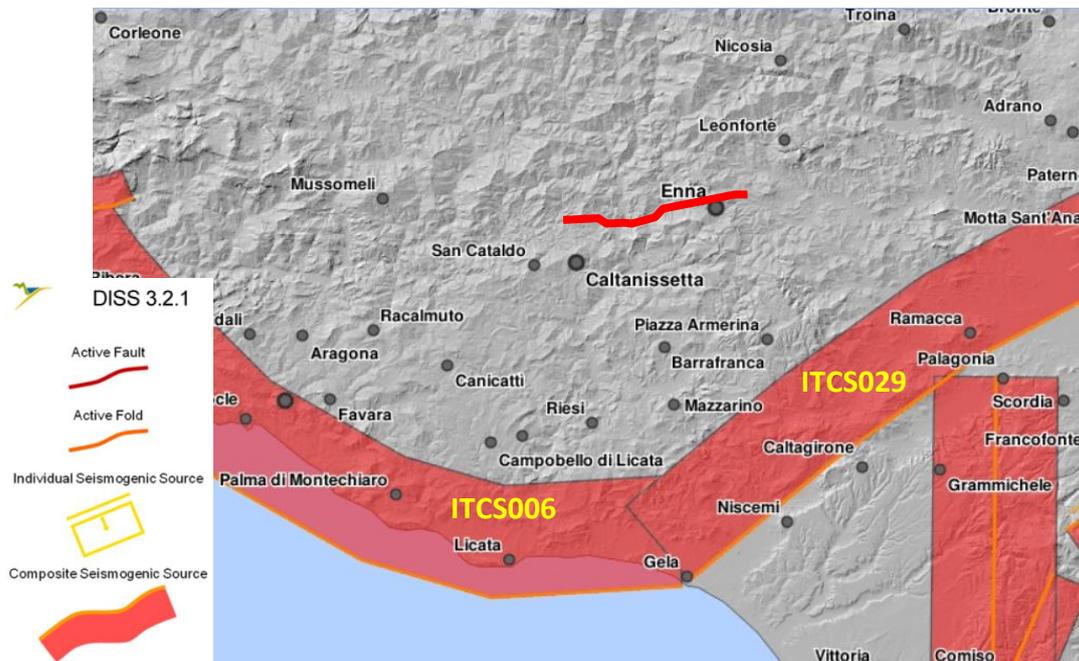


Figura 60 – Localizzazione delle potenziali sorgenti di terremoti con  $M > 5.5$  nell’area di studio (DISS 2019, Database of Individual Seismogenic Sources).

Dall’analisi delle fonti sopra citate, come osservabile in Figura 59, Figura 60 e Figura 61, è emerso che in corrispondenza dell’area interessata dallo sviluppo del tracciato del Lotto 4a della nuova linea Palermo-Catania non è segnalata la presenza di faglie sismogenetiche individuali o composite, né di faglie capaci. Le sorgenti sismogenetiche più prossime sono situate a distanze di 25-30 km circa dal tracciato di linea e sono legate ai grandi piani di scorrimento che attraversano in senso E-W la regione Sicilia.

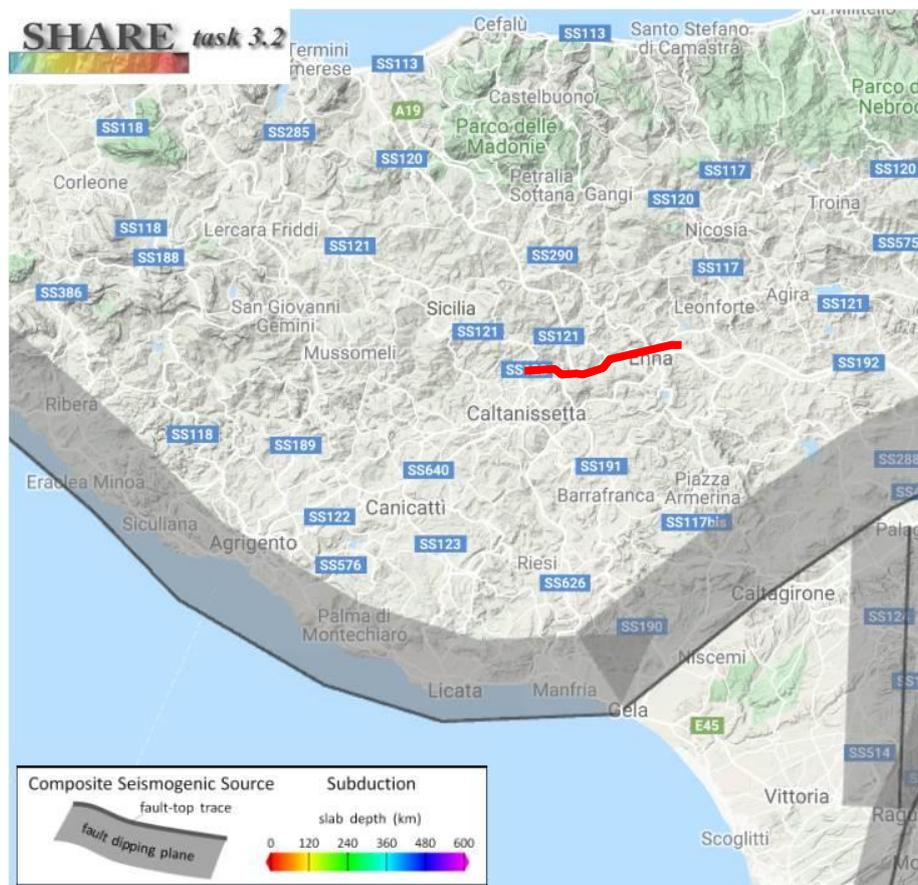


Figura 61 – Localizzazione delle potenziali sorgenti di terremoti nell’area di studio (EDSF - European Database of Seismogenic Faults). In grigio le faglie sismogenetiche e/o capaci.

In particolare, le zone sismogenetiche composite più prossime al tracciato sono il sistema Sciacca-Gela (DISS-ID ITCS006) e il sistema Gela-Catania (DISS-ID ITCS029), le cui caratteristiche parametriche sono riportate in Figura 62.

Nel complesso, i sistemi Sciacca-Gela (DISS-ID ITCS006) e Gela-Catania (DISS-ID ITCS029) costituiscono due tratti dell’insieme dei thrust che delimita verso sud la Catena Appenninico-Maghrebide (cfr. § 11.2).

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - DITTAINO</b> <b>LOTTO 4a: CALTANISSETTA XIRBI - ENNA</b>					
	<b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOMORFOLOGICA ED IDROGEOLOGICA</b>	<b>COMMESSA</b> RS3U	<b>LOTTO</b> 40	<b>CODIFICA</b> D69RG	<b>DOCUMENTO</b> GE 00 01 001	<b>REV.</b> C

Essi presentano caratteristiche parametriche molto simili, con profondità variabili tra 2 e 10 km, magnitudo massima compresa tra 6.0 e 6.2 e *slip rate* di 0.1-0.7 mm/anno (Argnani et al., 2013; Bonforte et al., 2015; Bousquet & Lanzafame, 1986; Branca et al., 2015).

Dall’analisi delle principali banche dati disponibili, risulta quindi che la sismicità del settore d’intervento non è direttamente riconducibile alla presenza di faglie sismogenetiche e/o di faglie capaci di una qualche rilevanza, ma è più probabilmente correlabile ad altri elementi strutturali a carattere regionale e locale; tuttavia come dimostrato dai recenti studi citati in precedenza (cfr. § 11.3), questi dati potrebbero anche sottovalutare il fenomeno, limitandosi all’analisi delle parti più superficiali dei sistemi Sciacca-Gela (DISS-ID ITCS006) e Gela-Catania (DISS-ID ITCS029) e trascurandone una loro possibile prosecuzione verso nord.

<b>Sciacca-Gela (DISS-ID ITCS006)</b>				<b>Gela-Catania (DISS-ID ITCS029)</b>			
PARAMETRIC INFORMATION				PARAMETRIC INFORMATION			
PARAMETER	QUALITY	EVIDENCE		PARAMETER	QUALITY	EVIDENCE	
Min depth [km]	2.0	EJ	Inferred from regional tectonic considerations.	Min depth [km]	3.0	OD	Based on regional tectonic considerations.
Max depth [km]	10.0	EJ	Inferred from regional tectonic considerations.	Max depth [km]	10.0	OD	Based on regional tectonic considerations.
Strike [deg] min... max	260... 320	LD	Based on regional geologic and tectonic data.	Strike [deg] min... max	225... 260	OD	Based on regional geologic and tectonic data.
Dip [deg] min... max	20...40	EJ	Inferred from regional geologic and tectonic data.	Dip [deg] min... max	20...40	OD	Based on regional geologic and tectonic data.
Rake [deg] min... max	75... 125	EJ	Inferred from geological and tectonic considerations.	Rake [deg] min... max	80... 100	EJ	Inferred from regional geologic and tectonic data.
Slip Rate [mm/y] min... max	0.1... 0.7	EJ	Unknown, values derived from preliminary modeling of terrace data.	Slip Rate [mm/y] min... max	0.1... 0.5	EJ	Unknown, values assumed from geodynamic constraints.
Max Magnitude [Mw]	6.2	EJ	Derived from preliminary modeling of terrace data.	Max Magnitude [Mw]	6.0	OD	Based on the strongest earthquake occurred in the region.

LD=LITERATURE DATA; OD=ORIGINAL DATA; ER=EMPIRICAL RELATIONSHIP; AR=ANALYTICAL RELATIONSHIP; EJ=EXPERT JUDGEMENT.

Figura 62 – Quadro riassuntivo delle sorgenti sismogeniche composite Sciacca-Gela (DISS-ID ITCS006) e Gela-Catania (DISS-ID ITCS029).

## 11.6 Sismicità dell’area d’intervento

Come sintetizzato nel § 11.3, la Sicilia centrale presenta un rischio sismico da medio a elevato, a causa del particolare assetto geologico-strutturale del territorio. Al fine di valutare la sismicità storica delle

aree in cui ricadrà l'opera in progetto, sono state consultate le banche dati inerenti sia i singoli comuni interessati dal tracciato, sia un areale più ampio, in un raggio di 60-65 km circa dal tracciato stesso.

### **11.6.1 Distribuzione spazio-temporale degli eventi sismici a scala regionale**

I documenti storici con riferimenti agli eventi sismici precedenti il 1700 circa sono in genere scarsi e lacunosi, anche se non mancano alcuni manoscritti che permettono di datare i terremoti più violenti e di avere un quadro, almeno parziale, degli effetti indotti sui centri urbani per lo meno a scala regionale.

#### *11.6.1.1 Sicilia orientale*

Per quanto riguarda il settore della Sicilia orientale e le città della costa ionica, i principali terremoti che nel corso dei secoli hanno interessato la regione sono:

- **terremoto del 4 febbraio 1169:** questo evento disastroso colpì la Sicilia orientale e parte della Calabria meridionale, distruggendo undici centri abitati e provocando danni ingenti in tutta l'area. Catania fu completamente distrutta (I = X MCS) e negli scarsi documenti dell'epoca si riportano il completo collasso di tutti gli edifici e circa 15'000 vittime. Il terremoto avvenne in concomitanza con l'eruzione dell'Etna, il cui cratere sul versante settentrionale collassò parzialmente. Tra gli effetti secondari si registra uno tsunami che provocò un abbassamento temporaneo 5 m delle acque nel porto e, successivamente, una vasta inondazione presso la foce del Simeto.
- **Terremoto del 10 dicembre 1542:** il sisma, distintamente avvertito in tutta la Sicilia, colpì in particolare l'entroterra degli Iblei, radendo al suolo centri come Lentini, Melilli ed Avola. A Catania si stima che il terremoto abbia avuto una intensità pari a VII-VIII MCS, con danni considerevoli e diffusi. Chiese e monasteri subirono gravi lesioni; molti edifici collassarono e altri dovettero subire ampi interventi di riparazione. Nella parte occidentale della città un intero quartiere fu distrutto, ma si registrano solamente 6 vittime, probabilmente perché la scossa avvenne in pieno giorno. Il terremoto causò un'onda di tsunami che ebbe gli effetti più devastanti nella città di Augusta. Manoscritti dell'epoca riportano la distruzione di edifici causati anche da fenomeni di liquefazione del terreno.
- **Terremoto del 9 gennaio del 1693:** questo terremoto, avvertito sensibilmente dalla Calabria settentrionale alla costa tunisina, rappresenta la più grave catastrofe sismica della Sicilia orientale, le

cui città furono sconvolte. L'evento distrusse circa quaranta centri abitati in una vastissima area compresa tra Catania, Siracusa e Ragusa. Si verificarono due scosse principali, a distanza di due giorni: la prima si verificò alle ore 4:30 del 9 gennaio e a Catania ebbe l'effetto di terrorizzare la popolazione distruggendo le case meno solide e danneggiando seriamente gli edifici più importanti quali monasteri e palazzi (I = VIII MCS); la seconda, delle ore 21:00, ebbe un effetto ancor più devastante poiché causò il collasso degli edifici già seriamente lesionati, distruggendo completamente la città (I = X-XI MCS). La statistica ufficiale redatta nel mese di maggio dello stesso anno, riporta circa 54'000 vittime in tutte le zone colpite dal terremoto. Solo a Catania si registrarono più di 12'000 vittime, pari al 63% della popolazione allora residente. Un'intensa attività dell'Etna accompagnò lo sciame sismico; in vaste aree si aprirono fratture nel terreno da cui fuoriuscivano gas, fango ed acqua calda. In tutta l'area colpita dal terremoto scomparvero molte sorgenti; altre comparvero o variarono portata, salinità e colorazione delle acque. Effetti di maremoto in occasione della seconda scossa furono segnalati in molte località costiere della Sicilia orientale.

- **Terremoto del 20 febbraio 1818:** il sisma del 20 febbraio 1818, avvertito anche Malta e in Calabria, ebbe il suo epicentro a nord di Catania e distrusse numerosi villaggi sul versante orientale dell'Etna, causando danni su una vasta area compresa tra Catania e la Sicilia settentrionale. Le vittime furono 72 e i feriti circa 100. A Catania l'intensità calcolata fu pari al VII grado MCS, con danni a più di 1'700 abitazioni, di cui oltre il 35% dovette essere puntellato o demolito. La città era stata completamente ricostruita dopo il sisma del 1693, era quindi "nuova" dal punto di vista della conservazione del patrimonio edilizio. Numerose fenditure si aprirono nel terreno in tutta l'area in cui si registrarono i massimi effetti; anche a Catania si aprirono profonde spaccature nel suolo. Effetti di maremoto si verificarono a Messina, dove il mare invase le strade cittadine.
- **Terremoto del 13 dicembre 1990:** si tratta di un sisma notturno con epicentro a sud di Castelluccio, definito il "terremoto dei silenzi" perché spesso dimenticato dai media. Il terremoto colpì le città di Augusta, Lentini, Carlentini, Melilli e Militello. I morti furono 17, gli sfollati 10'000. Il sisma fu seguito da uno *tsunami* che invase il viale a mare e il porto di Augusta, con danni comunque limitati.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - DITTAINO</b> <b>LOTTO 4a: CALTANISSETTA XIRBI - ENNA</b>					
	<b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOMORFOLOGICA ED IDROGEOLOGICA</b>	<b>COMMESSA</b> RS3U	<b>LOTTO</b> 40	<b>CODIFICA</b> D69RG	<b>DOCUMENTO</b> GE 00 01 001	<b>REV.</b> C

### 11.6.1.2 Sicilia nordoccidentale

I principali terremoti che hanno interessato la Sicilia nordoccidentale e i principali centri abitati presenti lungo il settore tirrenico dell'isola sono i seguenti:

- **Terremoto dell'8 settembre 1818:** questo sisma ebbe epicentro tra le due Petralie e Polizzi. A Palermo fece fermare il pendolo dell'osservatorio, mentre nei paesi circostanti i Monti delle Madonie causò moltissimi danni, soprattutto a Petralia Soprana e Sottana, a Polizzi, a Caltavuturo e Scillato. Si verificarono diverse repliche a settembre, ottobre e novembre ma senza alcun danno.
- **Terremoto del 5 marzo 1823:** il sisma, con epicentro tra Cefalù e Pollina, colpì la costa della Sicilia settentrionale, da Capo d'Orlando a Capo Calavà. Si registrarono danni ingenti a Palermo, Corleone e Cefalù, dove uno tsunami danneggiò diverse imbarcazioni. Si osservarono importanti lesioni a edifici anche a Patti, Naso, Godrano ed in diversi centri delle Madonie.
- **Terremoto del 15 gennaio 1968:** questo terremoto notturno ebbe epicentro nei pressi di Salaparuta, che fu praticamente distrutta. Furono gravemente colpite le province di Trapani e Agrigento, in particolare la valle del fiume Belice, e devastati i paesi di Montevago e Gibellina, dove crollò il 90% degli edifici. Ingenti danni si registrarono anche a Poggioreale, Salemi, S. Margherita, S. Ninfa, Partanna, Sciacca, Calatafimi e Palermo. Il sisma fu inizialmente sottovalutato, in quanto la zona era ritenuta non sismica, e causò quasi 400 vittime soprattutto tra anziani, donne e bambini e 70'000 sfollati. Gli effetti delle scosse furono fortemente amplificati dalla pessima qualità dei fabbricati e anche la seguente ricostruzione fu poco efficiente.

### 11.6.2 Distribuzione spazio-temporale degli eventi sismici a scala locale

Nell'intento di valutare l'incidenza degli eventi sismici in corrispondenza dell'area d'interesse, è stato consultato il Database Macrosismico Italiano 2015 (DBMI15), realizzato dall'INGV che fornisce un set omogeneo di intensità macrosismiche provenienti da diverse fonti e relativo ai terremoti con intensità massima  $\geq 1$ .

#### 11.6.2.1 Analisi dei dati storici

Nel settore di Enna-Caltanissetta sono disponibili i dati per la finestra temporale 1500-2014. Sono stati

estrapolati gli eventi significativi per i Comuni di: Calascibetta, Caltanissetta, Enna, Leonforte, Piazza Armerina, Pietraperzia, Santa Caterina Villarmosa, Valguarnera Caropepe, Villarosa, che si trovano in corrispondenza dell’opera in progetto o nel suo immediato intorno (Figura 64, Figura 65, Figura 66, Figura 67, Figura 68, Figura 69, Figura 70, Figura 71 e Figura 72).

Nel complesso, dal confronto degli eventi registrati nei vari comuni si può osservare che:

- Nel periodo temporale che va dal 1500 al 1700 circa non sono presenti informazioni specifiche per l’area di progetto. Alcuni rinvenimenti archeologici testimoniano ad esempio che nel 361 d.C. un disastroso terremoto con momento di Magnitudo stimato a 6.6 circa, colpì il territorio situato poco a W di Caltanissetta (Boschi et al. 1997, Figura 63); più recentemente, testimonianze storiche riportano che il 6 febbraio del 1169 l’abitato di Piazza Armerina, situato poco a sud di Enna, venne completamente raso al suolo.

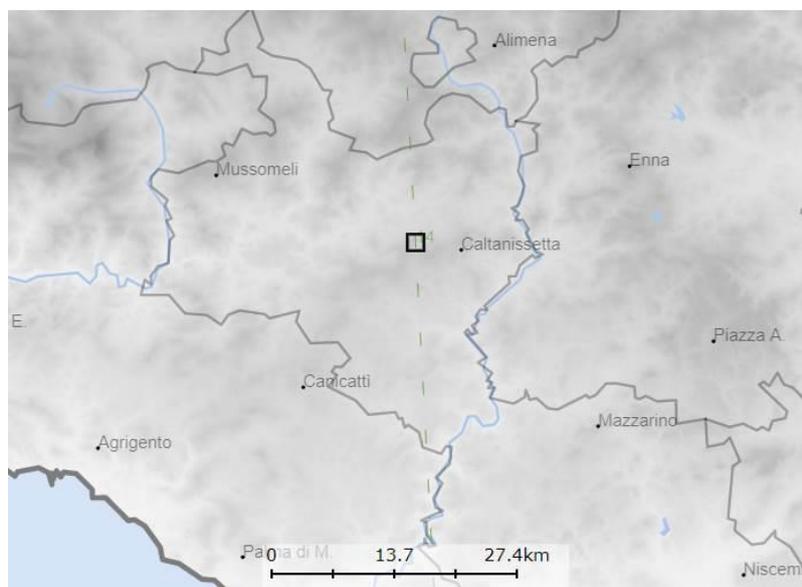


Figura 63 – Localizzazione (quadrato nero) dell’evento sismico del 361 d.C. (da DBMI14; Boschi et al., 1997).

- Nel periodo temporale che va dal 1700 al 1900, le testimonianze relative ad eventi sismici sono ancora molto scarse e si ha traccia soltanto dei terremoti che hanno provocato ingenti vittime e danni alle strutture, soprattutto in corrispondenza dei centri abitati maggiori. Ne sono alcuni esempi gli eventi sismici verificatisi a Calascibetta nel 1693 (intensità al sito 11) oppure a

Caltanissetta, Leonforte, e Santa Caterina Villarmosa nel 1818.

- Dal 1900 sino ai 2014 la banca dati presenta un set di dati più completo e a partire dagli ultimi 60 anni i valori corrispondono a dati strumentali.
- Nel periodo temporale 1900-2014, nei comuni analizzati, si sono verificati da 15 a 20 eventi sismici con intensità al sito di 6-7 e con numero di osservazioni macrosismiche del terremoto variabile, a seconda dei comuni, tra 800 e 1400 circa. L'intensità massima registrata e/o desunta da osservazioni indirette è di 11, con momento di magnitudo compresa tra 6,95 e 7,32.

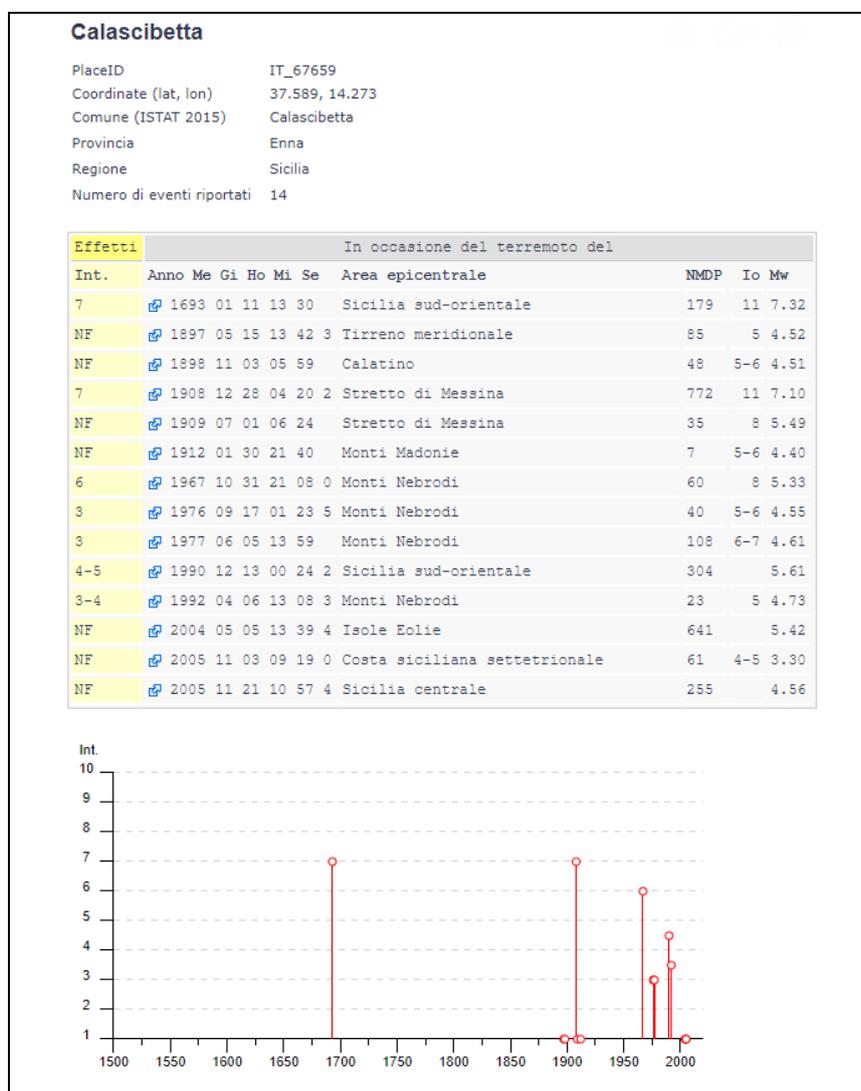


Figura 64 – Elenco dei principali terremoti storici che hanno interessato il centro abitato di Calascibetta (da Database Macrosismico Italiano, DBMI15). Legenda: Int. intensità al sito; NMDP: numero di osservazioni macrosismiche del terremoto; Io: intensità massima; Mw: magnitudo momento.

### Caltanissetta

PlaceID IT\_67594  
 Coordinate (lat, lon) 37.490, 14.063  
 Comune (ISTAT 2015) Caltanissetta  
 Provincia Caltanissetta  
 Regione Sicilia  
 Numero di eventi riportati 22

Effetti	In occasione del terremoto del									
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
NF	1818	09	08	09	50		Monti Madonie	24	7-8	5.34
NF	1819	02	24	23	20		Monti Madonie	24	7-8	5.37
5	1823	03	05	16	37		Sicilia settentrionale	107	8	5.81
3	1848	01	11	12			Golfo di Catania	41	7-8	5.51
6-7	1908	12	28	04	20	2	Stretto di Messina	772	11	7.10
NF	1912	12	22	08	05		Stretto di Messina	56	5-6	4.68
2	1934	09	11	01	19		Sicilia centro-settentrionale	28	5-6	4.84
NF	1940	01	15	13	19	2	Tirreno meridionale	60	7-8	5.29
5	1959	12	23	09	29		Piana di Catania	108	6-7	5.11
6	1967	10	31	21	08	0	Monti Nebrodi	60	8	5.33
5-6	1968	01	15	02	01	0	Valle del Belice	162	10	6.41
NF	1977	06	05	13	59		Monti Nebrodi	108	6-7	4.61
5	1978	04	15	23	33	4	Golfo di Patti	330	8	6.03
NF	1980	01	23	21			Monti Iblei	122	5-6	4.39
4-5	1980	05	28	19	51	2	Tirreno meridionale	44	5-6	5.66
5-6	1990	12	13	00	24	2	Sicilia sud-orientale	304		5.61
4	1994	05	06	19	09	4	Sicilia centrale	68	5	4.36
NF	1995	04	11	12	06	5	Sicilia centrale	43	3-4	4.03
3	2001	11	25	19	34	1	Monti Madonie	25	4-5	4.69
4	2002	09	06	01	21	2	Tirreno meridionale	132	6	5.92
NF	2004	05	05	13	39	4	Isole Eolie	641		5.42
NF	2005	11	21	10	57	4	Sicilia centrale	255		4.56

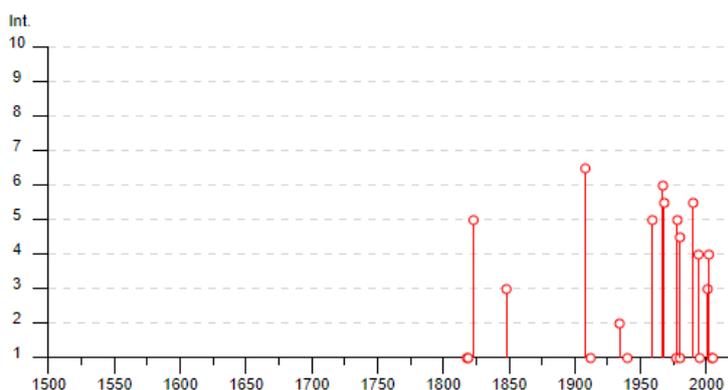


Figura 65 – Elenco dei principali terremoti storici che hanno interessato il centro abitato di Caltanissetta (da Database Macrosismico Italiano, DBMI15). Legenda: Int. intensità al sito; NMDP: numero di osservazioni macrosismiche del terremoto; Io: intensità massima; Mw: magnitudo momento.

### Enna [Castrogiovanni]

PlaceID IT\_67668  
 Coordinate (lat, lon) 37.566, 14.275  
 Comune (ISTAT 2015) Enna  
 Provincia Enna  
 Regione Sicilia  
 Numero di eventi riportati 21

Effetti	In occasione del terremoto del						NMDP	Io	Mw
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale		
6-7	1693	01	11	13	30		Sicilia sud-orientale	179	11 7.32
5	1818	02	20	18	15		Catanese	128	9-10 6.28
NF	1898	08	12				Sicilia nord-orientale	69	6-7 4.82
NF	1905	09	08	01	43		Calabria centrale	895	10-11 6.95
5	1908	12	28	04	20	2	Stretto di Messina	772	11 7.10
NF	1912	12	22	08	05		Stretto di Messina	56	5-6 4.68
4	1934	09	11	01	19		Sicilia centro-settentrionale	28	5-6 4.84
NF	1940	01	15	13	19	2	Tirreno meridionale	60	7-8 5.29
NF	1953	02	25	00	07	4	Vibonese	56	5-6 4.88
5	1959	12	23	09	29		Piana di Catania	108	6-7 5.11
5	1967	10	31	21	08	0	Monti Nebrodi	60	8 5.33
4	1968	01	15	02	01	0	Valle del Belice	162	10 6.41
4-5	1976	09	17	01	23	5	Monti Nebrodi	40	5-6 4.55
3	1977	06	05	13	59		Monti Nebrodi	108	6-7 4.61
5	1978	04	15	23	33	4	Golfo di Patti	330	8 6.03
2	1980	01	23	21			Monti Iblei	122	5-6 4.39
2-3	1980	11	23	18	34	5	Irpinia-Basilicata	1394	10 6.81
3-4	1987	02	02	16	08	4	Sicilia centro-orientale	22	4.44
3	1990	12	13	00	24	2	Sicilia sud-orientale	304	5.61
NF	1995	04	11	12	06	5	Sicilia centrale	43	3-4 4.03
4	2002	09	06	01	21	2	Tirreno meridionale	132	6 5.92

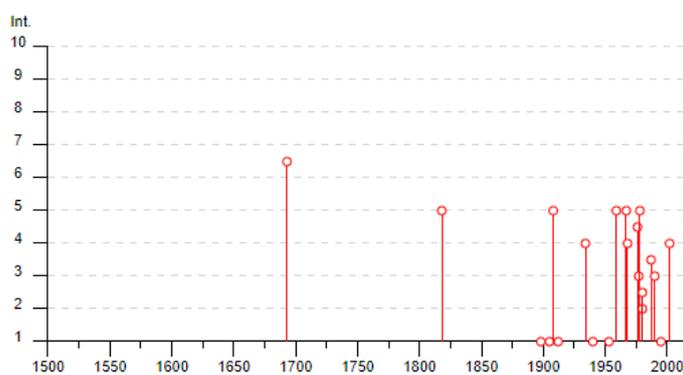


Figura 66 – Elenco dei principali terremoti storici che hanno interessato il centro abitato di Enna-Castrogiovanni (da Database Macrosismico Italiano, DBMI15). Legenda: Int. intensità al sito; NMDP: numero di osservazioni macrosismiche del terremoto; Io: intensità massima; Mw: magnitudo momento.

### Leonforte

PlaceID IT\_67672  
 Coordinate (lat, lon) 37.638, 14.393  
 Comune (ISTAT 2015) Leonforte  
 Provincia Enna  
 Regione Sicilia  
 Numero di eventi riportati 25

Effetti		In occasione del terremoto del						NMDP	Io	Mw
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale			
5	1818	02	20	18	15		Catanese	128	9-10	6.28
F	1818	09	08	09	50		Monti Madonie	24	7-8	5.34
3	1894	11	16	17	52		Calabria meridionale	303	9	6.12
NF	1905	09	08	01	43		Calabria centrale	895	10-11	6.95
NF	1912	01	30	21	40		Monti Madonie	7	5-6	4.40
4	1925	03	08	15	46		Monti Nebrodi	15	6-7	4.57
4	1925	08	21	19	11		Sicilia centro-settentrionale	14	6	4.51
2	1926	08	17	01	42		Isole Eolie	35	7-8	5.28
5	1934	09	11	01	19		Sicilia centro-settentrionale	28	5-6	4.84
NF	1949	10	08	03	08		Sicilia sud-orientale	32	7	5.10
6	1967	10	31	21	08	0	Monti Nebrodi	60	8	5.33
4	1976	09	17	01	23	5	Monti Nebrodi	40	5-6	4.55
4	1977	06	05	13	59		Monti Nebrodi	108	6-7	4.61
3	1978	04	15	23	33	4	Golfo di Patti	330	8	6.03
NF	1980	01	23	21			Monti Iblei	122	5-6	4.39
4-5	1990	12	13	00	24	2	Sicilia sud-orientale	304		5.61
4	1992	04	06	13	08	3	Monti Nebrodi	23	5	4.73
NF	1992	09	27	11	55	1	Sicilia centro-settentrionale	54		4.16
4	1994	05	06	19	09	4	Sicilia centrale	68	5	4.36
4	2002	09	06	01	21	2	Tirreno meridionale	132	6	5.92
NF	2004	05	05	13	39	4	Isole Eolie	641		5.42
NF	2005	11	03	09	19	0	Costa siciliana settentrionale	61	4-5	3.30
2	2005	11	21	10	57	4	Sicilia centrale	255		4.56
4	2009	11	08	06	51	1	Monti Nebrodi	28	5	4.52
4	2011	06	23	22	02	4	Monti Nebrodi	54	5-6	4.70

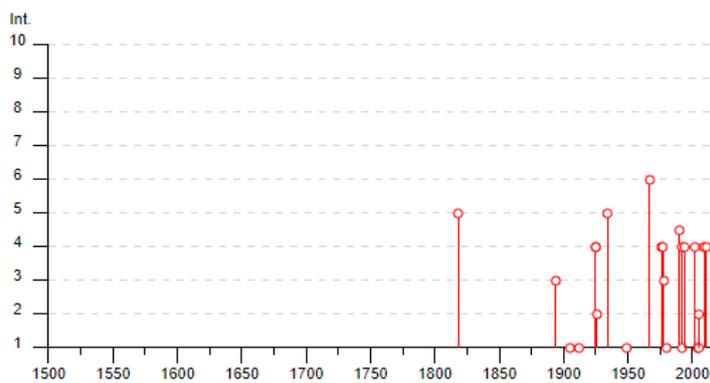


Figura 67 – Elenco dei principali terremoti storici che hanno interessato il centro abitato di Leonforte (da Database Macrosismico Italiano, DBMI15). Legenda: Int. intensità al sito; NMDP: numero di osservazioni macrosismiche del terremoto; Io: intensità massima; Mw: magnitudo momento.

### Piazza Armerina

PlaceID IT\_67679  
 Coordinate (lat, lon) 37.384, 14.368  
 Comune (ISTAT 2015) Piazza Armerina  
 Provincia Enna  
 Regione Sicilia  
 Numero di eventi riportati 19

Effetti	In occasione del terremoto del		Area epicentrale	NMDP	Io Mw
Int.	Anno	Me Gi Ho Mi Se			
7-8	1169	02 04 07	Sicilia sud-orientale	8	10 6.50
8	1693	01 11 13 30	Sicilia sud-orientale	179	11 7.32
6	1818	02 20 18 15	Catanese	128	9-10 6.28
5	1818	03 01 02 45	Monti Iblei	24	7-8 5.57
3-4	1823	03 05 16 37	Sicilia settentrionale	107	8 5.81
2-3	1894	11 16 17 52	Calabria meridionale	303	9 6.12
NF	1905	09 08 01 43	Calabria centrale	895	10-11 6.95
NF	1908	12 10 06 20	Monti Peloritani	64	7 5.11
4	1959	12 23 09 29	Piana di Catania	108	6-7 5.11
NF	1977	06 05 13 59	Monti Nebrodi	108	6-7 4.61
3	1978	04 15 23 33 4	Golfo di Patti	330	8 6.03
5-6	1990	12 13 00 24 2	Sicilia sud-orientale	304	5.61
2-3	1994	05 06 19 09 4	Sicilia centrale	68	5 4.36
4	2002	09 06 01 21 2	Tirreno meridionale	132	6 5.92
NF	2004	05 05 13 39 4	Isole Eolie	641	5.42
NF	2004	12 30 04 04 5	Monti Iblei	48	4 3.82
2	2005	11 21 10 57 4	Sicilia centrale	255	4.56
NF	2006	12 19 14 58 0	Etna - Versante nord-occidentale	28	6 4.19
NF	2009	12 19 09 01 1	Etna - Maletto	64	6 4.39

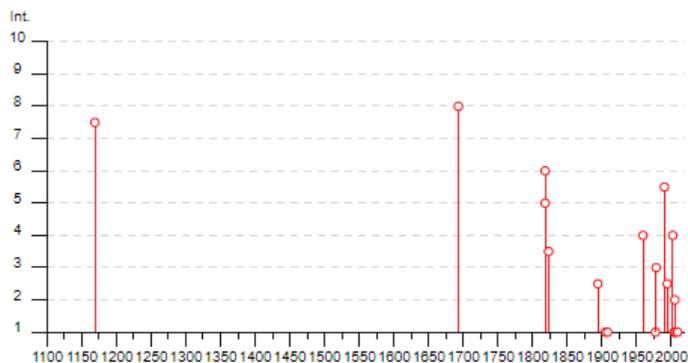


Figura 68 – Elenco dei principali terremoti storici che hanno interessato il centro abitato di Piazza Armerina (da Database Macrosismico Italiano, DBMI15). Legenda: Int. intensità al sito; NMDP: numero di osservazioni macrosismiche del terremoto; Io: intensità massima; Mw: magnitudo momento.

### Pietraperzia

PlaceID IT\_67682  
 Coordinate (lat, lon) 37.419, 14.137  
 Comune (ISTAT 2015) Pietraperzia  
 Provincia Enna  
 Regione Sicilia  
 Numero di eventi riportati 14

Effetti	In occasione del terremoto del								
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io Mw
NF	1897	02	11	23	33	0	Ionio meridionale	96	5 5.03
NF	1897	05	15	13	42	3	Tirreno meridionale	85	5 4.52
NF	1897	05	28	22	40	0	Ionio	132	6 5.46
4	1898	11	03	05	59		Calatino	48	5-6 4.51
NF	1905	09	08	01	43		Calabria centrale	895	10-11 6.95
6-7	1908	12	28	04	20	2	Stretto di Messina	772	11 7.10
NF	1909	07	01	06	24		Stretto di Messina	35	8 5.49
NF	1912	12	22	08	05		Stretto di Messina	56	5-6 4.68
5	1968	01	15	02	01	0	Valle del Belice	162	10 6.41
2	1980	01	23	21			Monti Iblei	122	5-6 4.39
4	1990	12	13	00	24	2	Sicilia sud-orientale	304	5.61
NF	1995	04	11	12	06	5	Sicilia centrale	43	3-4 4.03
4	2002	09	06	01	21	2	Tirreno meridionale	132	6 5.92
NF	2004	05	05	13	39	4	Isole Eolie	641	5.42

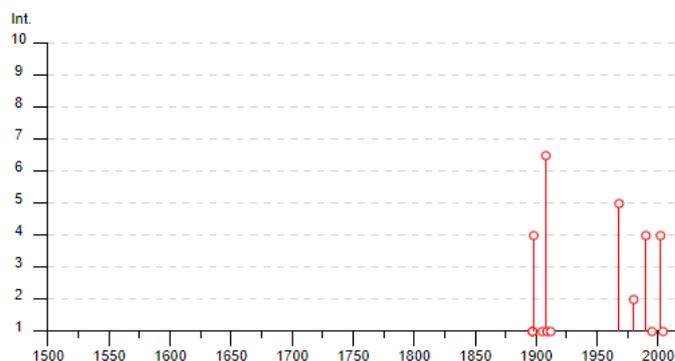


Figura 69 – Elenco dei principali terremoti storici che hanno interessato il centro abitato di Pietraperzia (da Database Macrosismico Italiano, DBMI15). Legenda: Int. intensità al sito; NMDP: numero di osservazioni macrosismiche del terremoto; Io: intensità massima; Mw: magnitudo momento.

### Santa Caterina Villarmosa

PlaceID IT\_67643  
 Coordinate (lat, lon) 37.590, 14.032  
 Comune (ISTAT 2015) Santa Caterina Villarmosa  
 Provincia Caltanissetta  
 Regione Sicilia  
 Numero di eventi riportati 11

Effetti	In occasione del terremoto del								
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io Mw
F	1818	09	08	09	50		Monti Madonie	24	7-8 5.34
F	1819	02	24	23	20		Monti Madonie	24	7-8 5.37
NF	1905	09	08	01	43		Calabria centrale	895	10-11 6.95
6-7	1908	12	28	04	20	2	Stretto di Messina	772	11 7.10
5	1968	01	15	02	01	0	Valle del Belice	162	10 6.41
4-5	1994	05	06	19	09	4	Sicilia centrale	68	5 4.36
NF	1995	04	11	12	06	5	Sicilia centrale	43	3-4 4.03
NF	1996	12	14	00	18	4	Monti Madonie	45	5 4.27
NF	2004	05	05	13	39	4	Isole Eolie	641	5.42
NF	2005	11	03	09	19	0	Costa siciliana settentrionale	61	4-5 3.30
NF	2005	11	21	10	57	4	Sicilia centrale	255	4.56

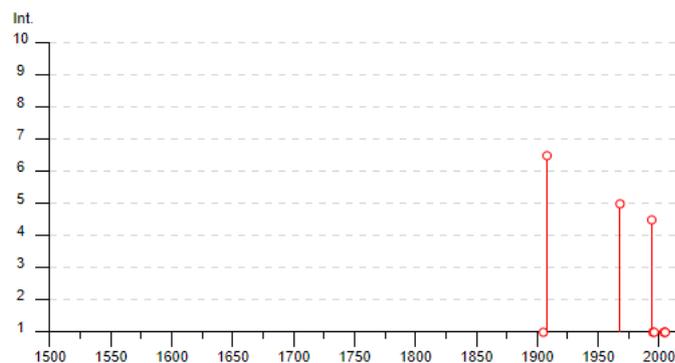


Figura 70 – Elenco dei principali terremoti storici che hanno interessato il centro abitato di Santa Caterina Villarmosa (da Database Macrosismico Italiano, DBMI15). Legenda: Int. intensità al sito; NMDP: numero di osservazioni macrosismiche del terremoto; Io: intensità massima; Mw: magnitudo momento.

### Valguarnera Caropepe

PlaceID IT\_67691  
 Coordinate (lat, lon) 37.495, 14.389  
 Comune (ISTAT 2015) Valguarnera Caropepe  
 Provincia Enna  
 Regione Sicilia  
 Numero di eventi riportati 13

Effetti	In occasione del terremoto del						NMDP	Io	Mw	
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale			
4	1823	03	05	16	37		Sicilia settentrionale	107	8	5.81
NF	1898	05	14	04	45		Etna - S. Maria Licodia	35	7-8	4.03
NF	1898	08	12				Sicilia nord-orientale	69	6-7	4.82
6-7	1908	12	28	04	20	2	Stretto di Messina	772	11	7.10
2-3	1949	10	08	03	08		Sicilia sud-orientale	32	7	5.10
5	1959	12	23	09	29		Piana di Catania	108	6-7	5.11
NF	1977	06	05	13	59		Monti Nebrodi	108	6-7	4.61
3	1978	04	15	23	33	4	Golfo di Patti	330	8	6.03
2	1980	01	23	21			Monti Iblei	122	5-6	4.39
3	1990	12	13	00	24	2	Sicilia sud-orientale	304		5.61
4	2002	09	06	01	21	2	Tirreno meridionale	132	6	5.92
NF	2005	11	21	10	57	4	Sicilia centrale	255		4.56
NF	2009	12	19	09	01	1	Etna - Maletto	64	6	4.39

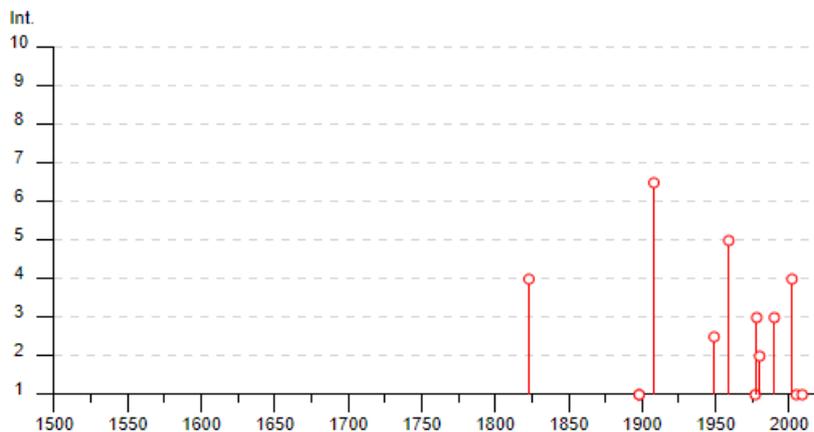


Figura 71 – Elenco dei principali terremoti storici che hanno interessato il centro abitato di Valguarnera Caropepe (da Database Macrosismico Italiano, DBMI15). Legenda: Int. intensità al sito; NMDP: numero di osservazioni macrosismiche del terremoto; Io: intensità massima; Mw: magnitudo momento.

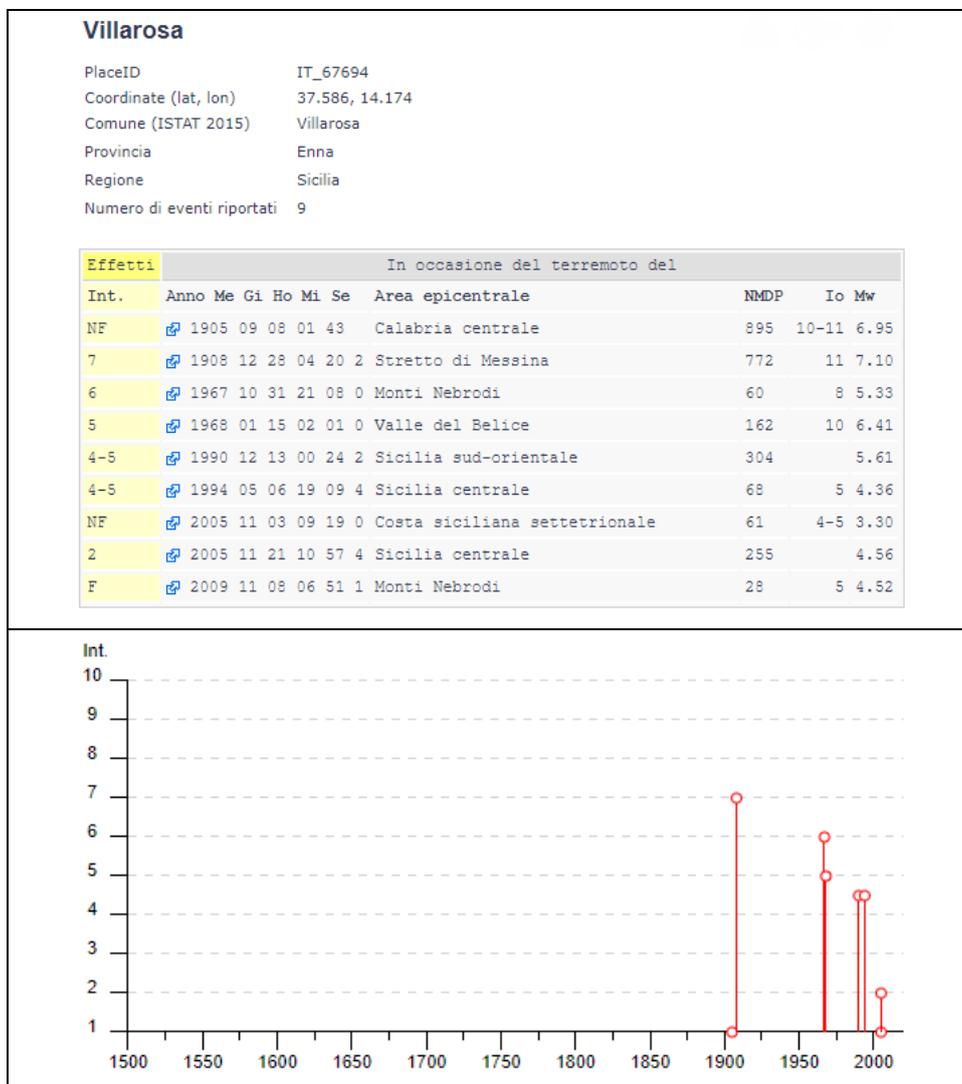


Figura 72 – Elenco dei principali terremoti storici che hanno interessato il centro abitato di Villarosa (da Database Macrosismico Italiano, DBMI15). Legenda: Int. intensità al sito; NMDP: numero di osservazioni macrosismiche del terremoto; Io: intensità massima; Mw: magnitudo momento.

#### 11.6.2.1 Eventi sismici strumentali dal 1985 al 2019

A partire da 1985, gli eventi sismici registrati sono gestiti attraverso la banca dati ISIDe (Italian Seismological Instrumental and Parametric Database - versione 1.0) che contiene i dati parametrici di tutti i terremoti localizzati dalla sala di sorveglianza sismica dell'INGV di Roma. Si tratta di centinaia di migliaia di eventi avvenuti tra il 01/01/1985 e la data odierna. Per localizzare i terremoti vengono utilizzate più di 500 stazioni della Rete Sismica Nazionale gestita dall'INGV e di altre reti gestite da

istituzioni ed enti internazionali e regionali. Le localizzazioni di sala vengo riviste da operatori specializzati per produrre il Bollettino Sismico Italiano che contiene solo gli eventi di  $M \geq 1.5$ .

Dalla banca dati ISIDe sono stati estrapolati i dati degli eventi sismici relativi al periodo 01/01/1985-30/11/2019, situati entro un raggio di 25-35 km circa dal tracciato del Lotto 3, per magnitudo  $\geq 0,1$  e originatisi a profondità comprese tra 0 e 1'000 km.

#### *11.6.2.2 Distribuzione degli epicentri e degli ipocentri*

Per quanto riguarda la posizione geografica delle aree epicentrali dei terremoti, nell'area d'intervento sono riconoscibili (Tabella 2 - ) quattro grandi macrosettori che corrispondono ad altrettanti comparti geologico strutturali:

- Il settore dell'Arco Calabro/Stretto di Messina/Tirreno meridionale/Isole Eolie, connesso ad eventi sismici che possono raggiungere intensità massima di 10-11;
- Il settore della Sicilia sudorientale, connesso ad eventi sismici che sono stati registrati nella quasi totalità dei comuni del settore (evento del 1990);
- Il settore della Sicilia settentrionale/Madonie/Nebrodi, connesso ad eventi sismici con intensità massima di 6-7;
- il settore della Sicilia centro-occidentale/Piana di Catania, connesso ad eventi con intensità massima di 4-5, registrati in modo abbastanza omogeneo in tutta l'areale di territorio analizzata.

Per quanto riguarda gli eventi sismici strumentali individuati dal 1985 al 2019, le loro caratteristiche principali sono presentate in Tabella 2 - , dalla quale si può osservare che:

- la maggior parte degli eventi sismici registrati si concentra nei settori a nord e ad est del Lotto 4 in progetto,
- i terremoti con magnitudo maggiore sono distribuiti in modo pressoché omogeneo all'interno dell'intera area analizzata;
- la maggior parte degli eventi sismici registrati si è originata a profondità comprese tra 0 e 60 km, e in minor numero a profondità comprese tra 60 e 300 km;

- le profondità a cui si sono originati gli eventi sismici non sono distribuite in modo omogeneo nel settore indagato ma si possono individuare dei settori con ipocentri situati in prevalenza a profondità rispettivamente di 0-10 km, 10-20 km e 20-60 km.

Area epicentrale del terremoto																			
	Calabria centrale	Stretto di Messina	Stretto di Messina	Sicilia centro-settentr.	Piana di Catania	Monti Nebrodi	Sicilia occidentale	Monti Nebrodi	Monti Nebrodi	Golfo di Patti	Monti Iblei	Sicilia sud-orientale	Sicilia centrale	Sicilia centrale	Tirreno meridionale	Isole Eolie	Sicilia settentr.	Sicilia centrale	Monti Nebrodi
Calascibetta		1908	1912			1967		1976	1977			1990				2004	03/11/2005	21/11/2005	
Caltanissetta		1908	1912	1934	1959		1968		1977	1978	1980-01	1990	1994	1995	2002	2004		21/11/2005	
Enna	1905	1908	1912	1934	1959	1967	1968	1976	1977	1978	1980-01	1990	1994		2002	2004	03/11/2005	21/11/2005	2009
Leonforte	1905		1912	1934		1967		1976	1977	1978	1980-01	1990	1994		2002	2004	03/11/2005	21/11/2005	2009
Piazza Armerina	1905	1908			1959				1977	1978		1990	1994		2002	2004		21/11/2005	2009
Pietraperzia	1905	1908	1912				1968				1980-01	1990		1995	2002	2004			
Santa Caterina Villarmosa	1905	1908					1968						1994	1995		2004	03/11/2005	21/11/2005	
Valgarnera Caropepe		1908			1959				1977	1978	1980-01	1990			2002			21/11/2005	2009
Villarosa	1905	1908				1967	1968					1990	1994				03/11/2005	21/11/2005	2009

Tabella 2 - Tabella schematica delle aree epicentrali dei terremoti in funzione dell'anno di registrazione e del comune di riferimento. I colori fanno riferimento ai principali comparti geologico-strutturali individuati: azzurro, arco calabro; rosa, piattaforma iblea; verde, Monti Nebrodi/Sicilia settentrionale e giallo, Sicilia centro-occidentale/Piana di Catania.

Al fine di mettere in evidenza le caratteristiche dei principali eventi sismici verificatisi dal 1985 al 2019, per l'area in esame, i parametri di profondità, magnitudo e profondità/magnitudo sono stati proiettati graficamente (Figura 74, Figura 75 e Figura 76). Relativamente all'andamento delle profondità degli eventi sismici, dalla Figura 76, si può osservare come siano presenti due massimi compresi rispettivamente tra le profondità 2-12 km (circa 200 eventi) e 27-38 km (circa 210 eventi). Sebbene il secondo massimo sia meno pronunciato del primo, entrambe le curve presentano una certa asimmetria, con una diminuzione brusca e repentina di eventi in corrispondenza dei 12 km e dei 39 km. Questa particolarità è da mettersi probabilmente in relazione con le caratteristiche sismotettoniche dell'area.

Per quanto riguarda la magnitudo (Figura 75), la maggior parte dei valori si concentra nell'intervallo compreso tra 1,3-2,8 poco sopra la soglia di percezione e si tratta quindi di eventi sismici di intensità contenuta. Soltanto un limitato numero di eventi presenta valori di magnitudo compresi tra 2,8-4,8.

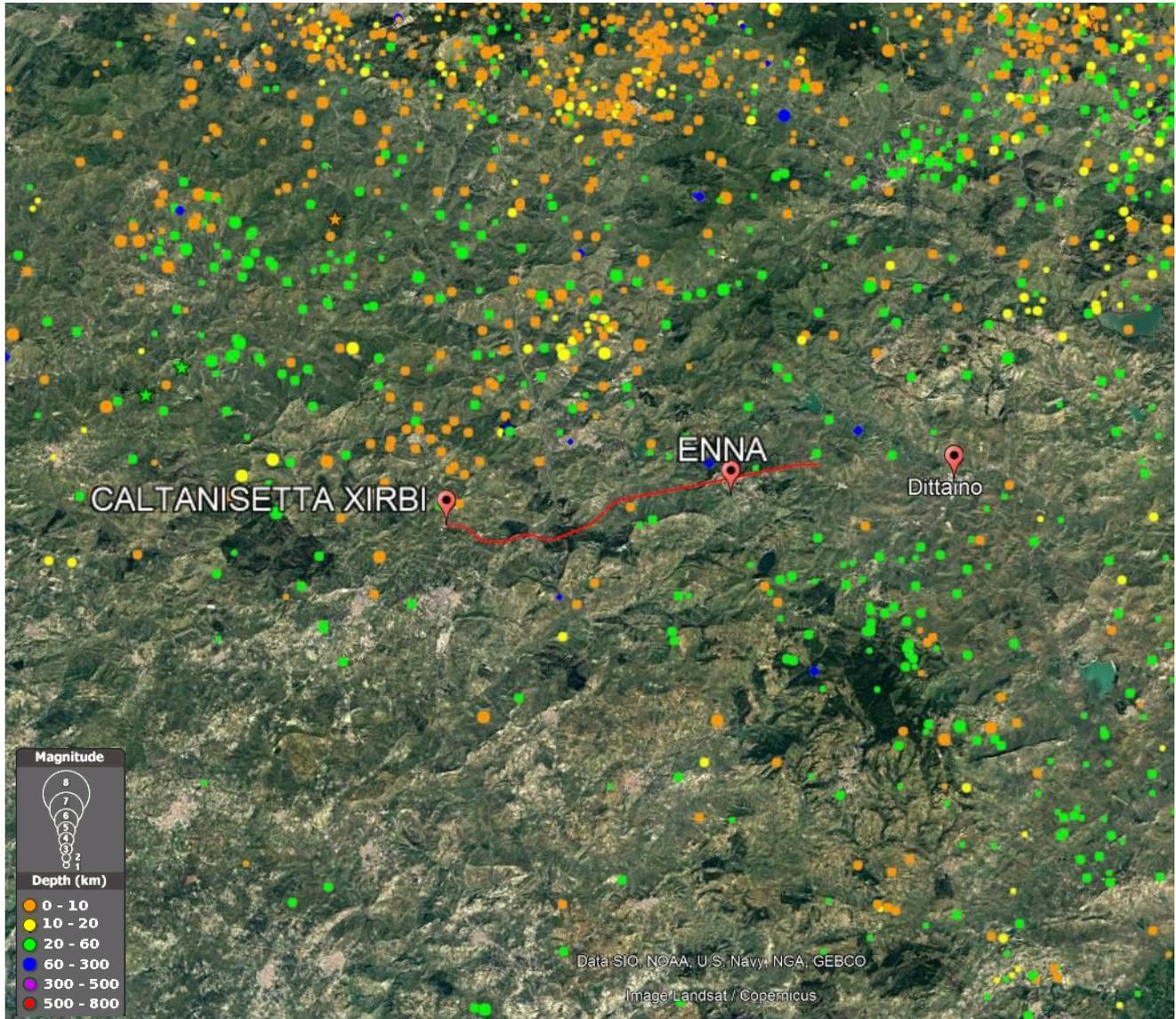


Figura 73 – Distribuzione degli epicentri dei terremoti relativi al periodo 01/01/1985-30/11/2019, situati entro ad un raggio di 25-35 km circa dalla tratta principale del Lotto 4, per magnitudo  $\geq 0,1$  e originatisi a profondità comprese tra 0/-1.000 km estrapolati dalla banca dati ISIDe. La linea rossa rappresenta la tratta d'interesse (Lotto 4a).

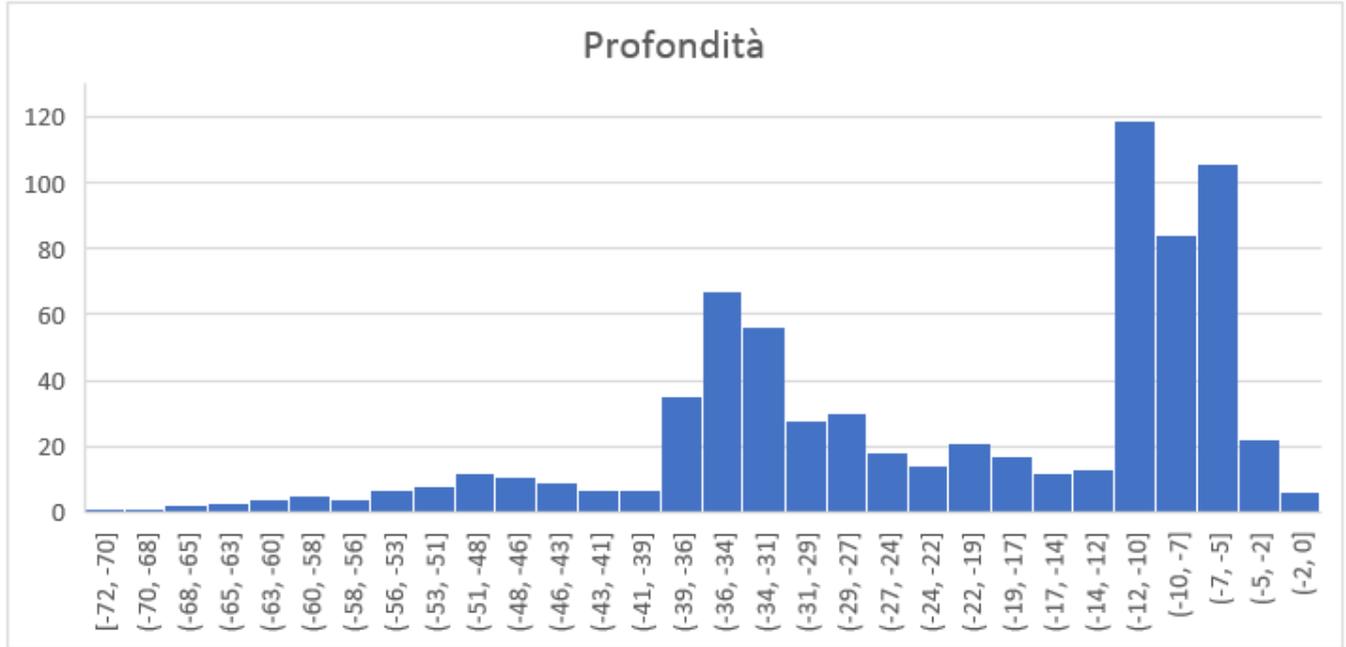


Figura 74 – Grafico della distribuzione della profondità degli ipocentri dei terremoti registrati per il periodo temporale 1985-2019, in corrispondenza dell'area d'indagine.

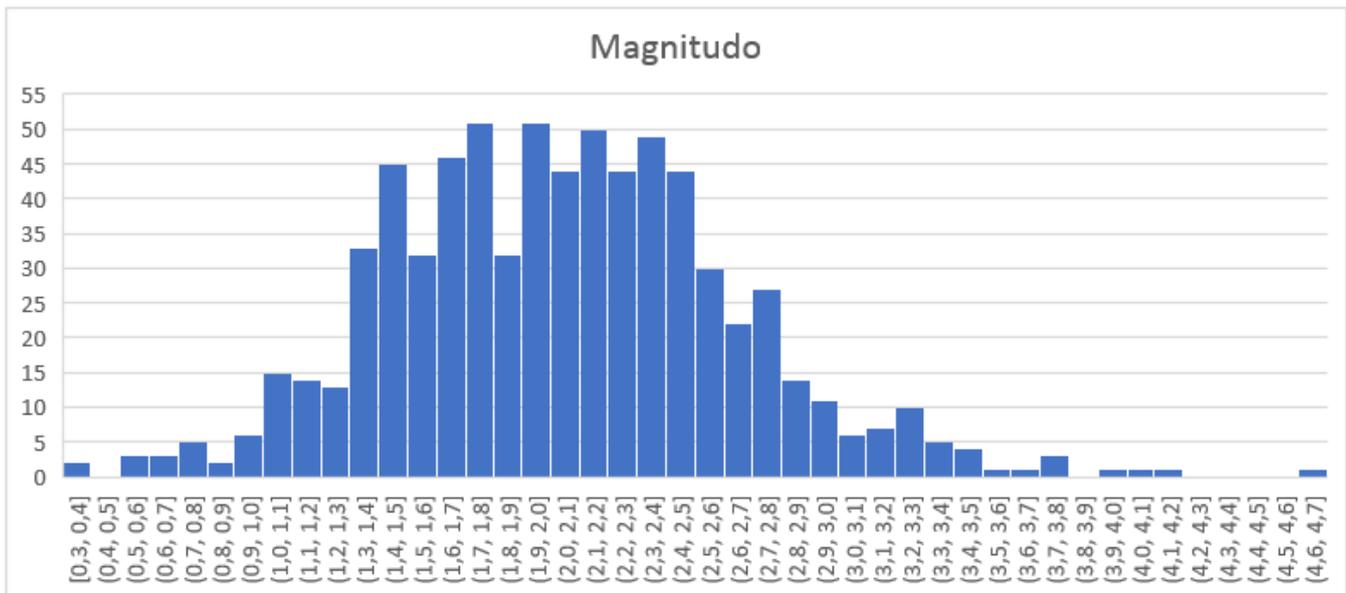


Figura 75 – Distribuzione della magnitudo dei terremoti registrati per il periodo temporale 1985-2019, in corrispondenza dell'area d'indagine.

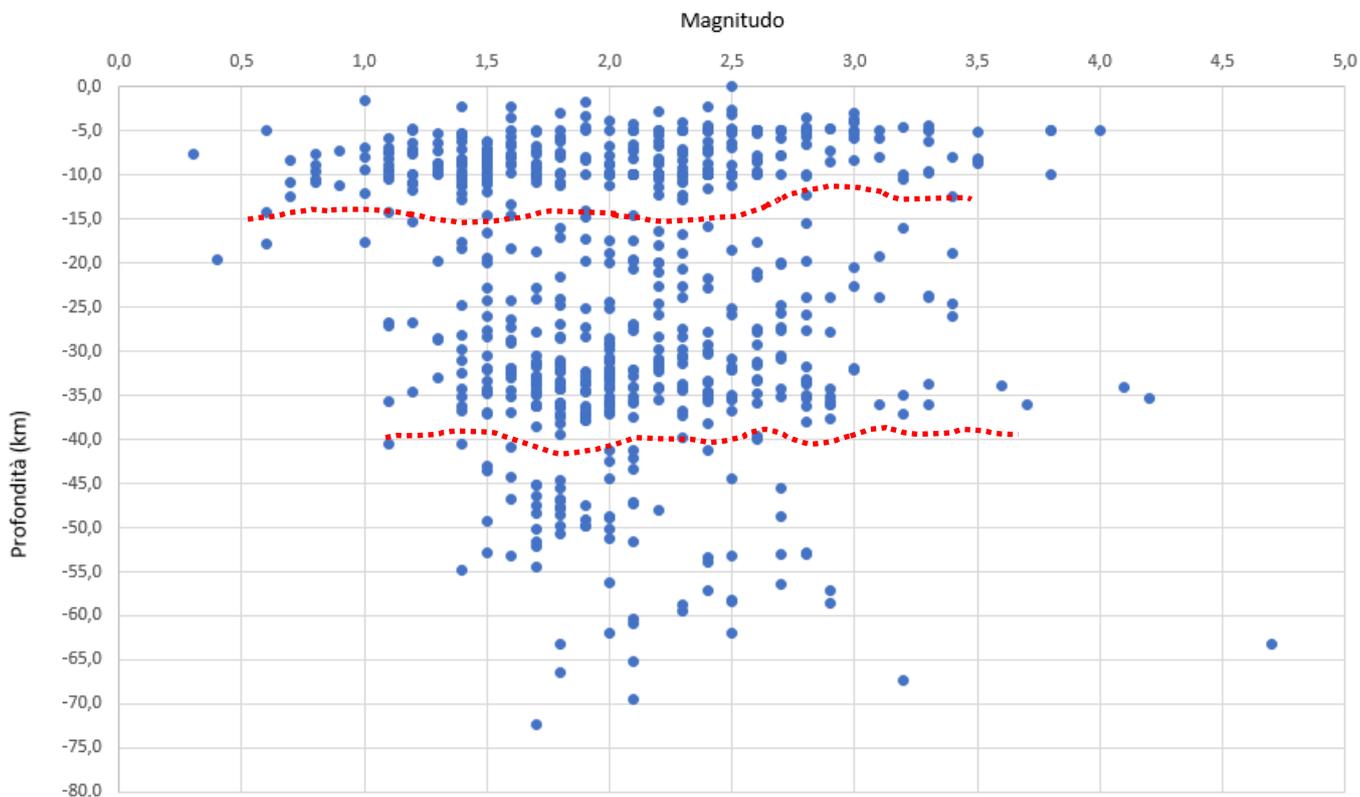


Figura 76 – Distribuzione della magnitudo/profondità dei terremoti registrati per il periodo temporale 1985-2019, in corrispondenza dell’area d’interesse. In rosso sono evidenziate le profondità in corrispondenza delle quali si verifica una variazione nel numero degli eventi sismici registrati.

Dal confronto tra i valori di magnitudo con le profondità degli ipocentri dei sismi risulta particolarmente evidente come a determinate profondità (12-14 km e 38-40 km circa.) si verifichi una netta riduzione nel numero degli eventi sismici registrati. Anche questa evidenza è probabilmente da mettersi in relazione con le caratteristiche sismotettoniche dell’area (Figura 76). A tale proposito, al fine di individuare un’eventuale correlazione tra le profondità degli eventi sismici e le strutture tettoniche esistenti (cfr. §3) gli epicentri dei terremoti sono stati categorizzati sulla base degli intervalli di profondità degli ipocentri, secondo quanto emerso dai grafici di Figura 74 e Figura 75. In particolare, sono stati individuati tre intervalli: 0-14 km, 14-40 km e >40 km.

I risultati del confronto sono riportati in Figura 77, dalla quale si possono individuare due aree distinte: il settore delle Madonie, a nord (in verde), caratterizzato da strutture transtensive e da faglie normali, in cui gli ipocentri sono molto concentrati e si sviluppano a profondità comprese tra 0 e 14 km; il settore

del bacino di Caltanissetta (in arancione), caratterizzato da strutture tettoniche compressive (sistemi a sovrascorrimenti e pieghe) in cui gli ipocentri, relativamente dispersi, si sviluppano a profondità sensibilmente maggiori, tra 14 e 40 km e talora anche a profondità > 40 km.

Queste evidenze sembrerebbero in accordo con quanto prospettato da Sgroi et al. (2012), secondo cui il Sicilian Basal Thrust (SBT, Figura 5) costituirebbe una possibile fonte sismogenetica per il settore del bacino di Caltanissetta, con campi di stress compressivo orientati NNW-SSE, situati al tetto del SBT stesso, lungo piani di sovrascorrimento situati a profondità di 20-35 km circa.

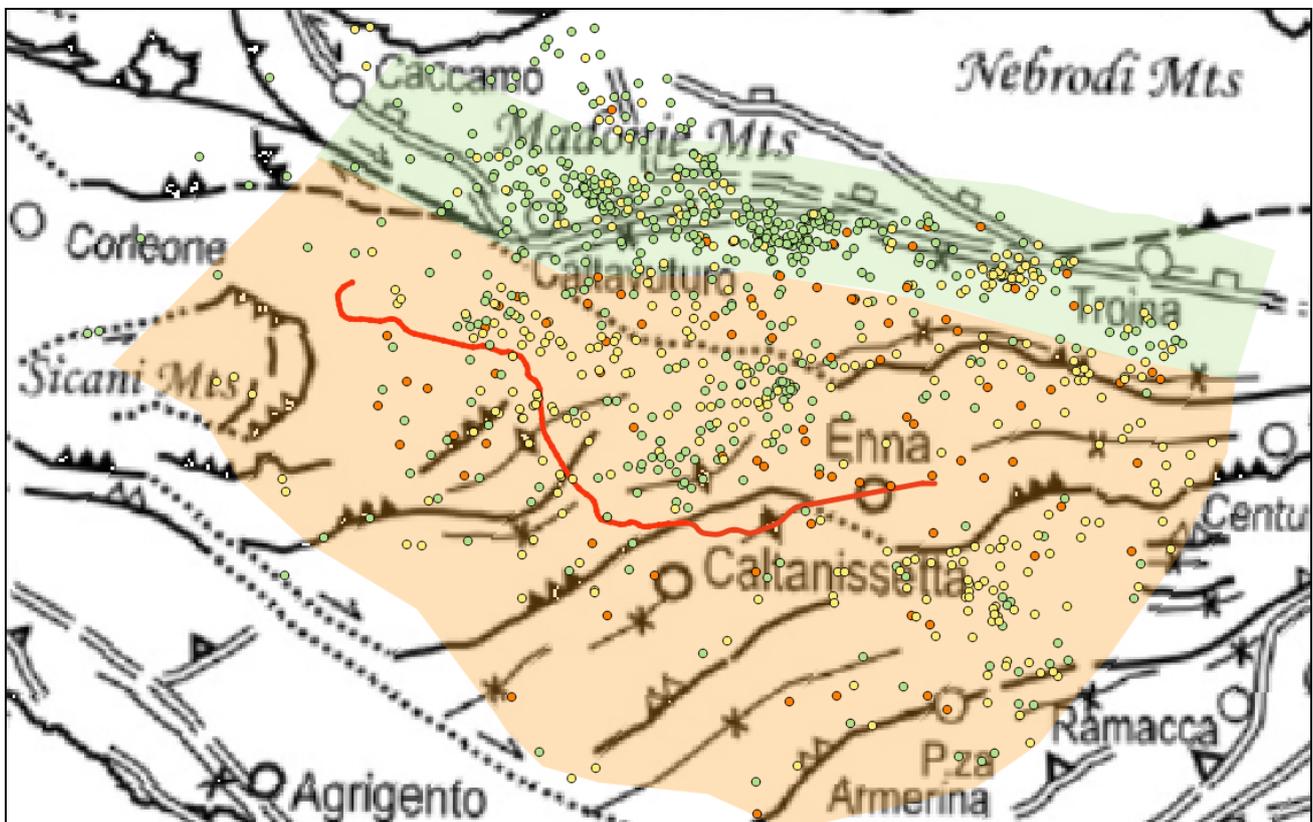


Figura 77 – Stralcio della carta strutturale della Sicilia di Figura 55, con indicati gli eventi sismici categorizzati in base alle classi di profondità degli ipocentri (verde: 0-14 km; giallo: 14-40 km; arancione: > 40 km). In trasparenza, in verde il settore delle Madonie e in arancione il bacino di Caltanissetta. In rosso il tracciato dell’opera (lotti 3 e 4a).

## 12 MODELLO GEOLOGICO DI RIFERIMENTO E POTENZIALI CRITICITÀ

In questo capitolo è sintetizzato il modello geologico di riferimento del tracciato di progetto, in relazione a quanto riportato nel profilo geologico generale in scala 1:5'000 allegato, seguendo una suddivisione per tratte omogenee, cioè caratterizzate da condizioni geologiche omogenee.

Le progressive chilometriche indicate nel testo fanno riferimento alla quota di progetto (“piano del ferro”).

### 12.1 Tratta all’aperto, pk 0+000 ÷ 4+108

La tratta inizia in corrispondenza della nuova stazione di Caltanissetta, a partire da 409.6 m ca. fino a 361 m ca. all’innesto con l’imbocco della galleria naturale GN01.

#### 12.1.1 Sondaggi

I sondaggi di riferimento utilizzati per la ricostruzione geologica sono: 4a-S01÷S06, 4A-S31, 4S1 (2018), 4a-S07÷S09, 4a-S11÷S17, 4a-V01, 4S2 e 4S3 (2018).

#### 12.1.2 Assetto geologico

Il tracciato si sviluppa a partire dalla testata del vallone del T. Arenella, affluente di destra del F. Salso, procedendo sui rilievi collinari in sinistra idrografica del corso d’acqua per poi attraversarlo alla pk 2+831 ca. spostandosi in destra e attraversando il vallone del T. Anghillà (pk 3+076 ca.), a sua volta affluente (di sinistra) del T. Arenella.

La stazione di Caltanissetta si colloca su substrato prequaternario è rappresentato dai litotipi a dominante componente argillosa del Flysch Numidico, membro di Nicosia (fino alla pk 1+000 circa), per poi passare ai terreni prevalentemente argillosi del membro pelitico della formazione Terravecchia (TRV).

La posizione del limite tra le due unità è incerta in quanto sia in superficie sia in sondaggio i litotipi argillosi che le compongono non sono facilmente distinguibili. Le distinzioni tra queste unità proposte nella cartografia CARG (Foglio Caltanissetta) si basano essenzialmente su analisi micropaleontologiche

per cui in assenza di elementi che ne suggeriscano una revisione, tali distinzioni vengono qui mantenute. Il tracciato attraversa in più punti impluvi e valloni il cui fondo è colmato da depositi alluvionali recenti a dominante componente limoso-argillosa, localmente sabbiosa o sabbioso-ghiaiosa. Un ampio impluvio viene attraversato in particolare con il rilevato RI01 (pk 0+853-1+155); il fondovalle è colmato da circa 6 m di depositi alluvionali limoso argillosi, con uno strato basale di ghiaie sabbiose di circa 1.5 m di spessore. I valloni di Arenella e Anghillà vengono invece attraversati in viadotto in due punti in cui lo sviluppo dei depositi alluvionali è molto ridotto, per cui i viadotti sono fondati direttamente nel substrato.

### **12.1.3 Assetto geomorfologico**

Non vi sono elementi geomorfologici di rilievo da segnalare. Lungo lo sviluppo del tracciato i versanti sono localmente interessati da processi di soliflusso a carico dello strato superficiale eluvio-colluviale. Intorno alla pk 1+350 il tracciato passa in prossimità del piede di un fenomeno di colamento lento attivo, senza venirne toccato (il dissesto non interseca il profilo di progetto). In questo tratto la linea si sviluppa in viadotto (VI02), le cui pile potrebbero essere interessate da un'eventuale futura evoluzione del colamento, sia pur maniera marginale.

Lungo il versante in cui si prevede la realizzazione dell'imbocco est della galleria GA01 sono evidenti elementi geomorfologici riconducibili a fenomeni di soliflusso. Al piede del versante è inoltre presente un accumulo di eluvio-colluviale che potrebbe tuttavia essere generato dal modellamento di pregressi fenomeni di colamento.

### **12.1.4 Assetto idrogeologico**

I dati relativi ai carichi idraulici misurati nei diversi sondaggi disponibili suggeriscono la presenza di una superficie di falda il cui andamento segue quello della superficie topografica, con soggiacenze comprese tra -7 e -13 m dal p.c.

Tuttavia, si rileva che il complesso idrogeologico CAM in cui si sviluppa la tratta all'aperto è caratterizzato da permeabilità basse, nella maggior parte dei casi dell'ordine di 1E-08, ma con locali valori fino a 1E-07.

In relazione alla bassa permeabilità dei litotipi argillosi che costituiscono il complesso CAM, i dati piezometrici non sono interpretabili come espressione di una falda vera e propria dotata di continuità laterale e correlabile direttamente da un piezometro all'altro. È probabile che in realtà ci si trovi di fronte a più falde locali di estensione laterale e verticale incerta, legate alla presenza di orizzonti anche saturi, ma generalmente poco o non produttivi.

### **12.1.5 Principali criticità**

Nessuna criticità di rilievo. Dal punto di vista della dinamica di versante, non si segnalano evidenze di fenomeni attivi, sebbene siano presenti aree caratterizzate da movimenti interpretabili come soliflussi e, localmente, ai piedi dei versanti, spessori di coltre eluvio-colluviale che possono essere in parte generati da fenomeni franosi pregressi.

## **12.2 GN01 - Imbocco ovest**

Il tratto corrisponde alla galleria artificiale che costituisce l'imbocco della galleria naturale GN02, lato Palermo. Il piano del ferro procede in discesa in direzione Catania.

### **12.2.1 Sondaggi**

Nei dintorni dell'imbocco sono disponibili i fori 4S3 (2018) e 4a-GN1-S01.

### **12.2.2 Assetto geologico**

La galleria verrà realizzata nei litotipi argilloso-marnosi del membro TRV della formazione di Terravecchia, in assenza di criticità geologiche di particolare rilievo. Il substrato in posto è coperto da una coltre eluvio-colluviale a dominante granulometria fine (limoso-argillosa) di spessore variabile tra 1.5 e 4 m.

### **12.2.3 Assetto geomorfologico**

In corrispondenza dell'imbocco non si rilevano criticità geomorfologiche di rilievo.

#### **12.2.4 Assetto idrogeologico**

L'imbocco è interamente impostato nel complesso idrogeologico CAM a bassa permeabilità ( $1E-09 < k < 1E-07$ ). In base al modello idrogeologico generale si ritiene probabile che il tetto del substrato saturo si collochi tra 7 e 10 m dal piano campagna, il che significa che probabilmente gran parte della galleria artificiale verrà scavata in un mezzo non saturo.

Lo strato superficiale argilloso-limoso riferibile alla coltre eluvio-colluviale (complesso CAL) suscettibile di essere saturato, in occasione di precipitazioni intense e/o prolungate, lungo l'interfaccia coltre/substrato, in relazione alla minore permeabilità relativa del substrato rispetto ai terreni sciolti della coltre.

#### **12.2.5 Criticità principali**

Nessuna criticità di rilievo.

### **12.3 GN01 - Galleria naturale Montestretto**

La galleria Montestretto attraversa un rilievo collinare pronunciato, raggiungendo una copertura topografica di circa 155 m intorno alla pk 5+000. La quota del piano del ferro scende da circa 361 m (imbocco lato Palermo) a circa 327 m (imbocco lato Catania).

Alla pk 4+760 ca. è presente l'innesto della Finestra Monte Stretto.

#### **12.3.1 Sondaggi**

La galleria GN01 è stata indagata attraverso i sondaggi 4S3 (2018), 4a-GN1-S01÷S06, 4a-F01 e 4a-F02.

#### **12.3.2 Assetto geologico**

La galleria GN01 attraversa un rilievo impostato in un'ampia struttura sinclinale con asse immergente in direzione WSW, delineata in maniera evidente da una barra di sedimenti messiniani e dalla soprastante formazione dei Trubi, che appoggiano in discordanza stratigrafica sulle argille ± marnose della formazione Terravecchia. Il tunnel attraversa il nucleo della sinclinale, costituito da litotipi argillosi della formazione TRBa per poi riattraversare in ordine inverso la sequenza fino ad incontrare nuovamente le

argille di Terravecchia.

I limiti geometrici della sinclinale sono definiti dalla distribuzione in affioramento delle unità che la compongono, e dai sondaggi 4a-GN1-S03 e 4a-GN1-S04: il primo incontra per tutta la lunghezza litotipi argillosi dell'unità TRBa; il secondo incontra le argille TRBa fino a circa 70 m di profondità, quindi i "Trubi" veri e propri per circa 25 m di spessore (apparente), infine i litotipi della formazione messiniana di Cattolica (gruppo della Gessoso-Solfifera, membro selenitico GTL2), caratterizzati dalla presenza di strati plurimetri di gesso selenitici o stratificato, laminiti gessose e interstrati argilloso-marnosi.

Una faglia ad alto angolo (F3, presunta; cfr. profilo geologico allegato) sembrerebbe tagliare il bordo occidentale della sinclinale, con direzione subparallela al fianco della piega, tendendo a ribassare leggermente la sequenza stratigrafica verso est.

Le formazioni attraversate dalla galleria sono, da ovest a est:

- Formazione Terravecchia, membro pelitico-marnoso (TRV), pk 4+198 - 5+170 ca.
- Zona di faglia F3 (presunta) pk 5+170 ca.
- Formazione del Tripoli (TPL), pk 5+170 - 5+250 ca.
- Formazione di Cattolica, membro selenitico (GTL2), pk 5+250 - 5+330 ca.
- Formazione dei Trubi, litofacies calcarenitica (TRB), pk 5+330 - 5+400 ca.
- Formazione dei Trubi, litofacies argillosa (TRB), pk 5+400 - 5+700 ca.
- Formazione dei Trubi, litofacies calcarenitica (TRB), pk 5+700 - 5+750 ca.
- Formazione di Cattolica, membro selenitico (GTL2), pk 5+750 - 5+850 ca.
- Formazione del Tripoli (TPL), pk 5+850 - 5+930 ca.
- Formazione Terravecchia, membro pelitico-marnoso (TRV), pk 5+930 - 6+413

Si riscontra quindi in galleria il passaggio da formazioni francamente argillose (TRV, TRBa), a unità con un comportamento litoide più pronunciato (TRB e in misura minore TPL), a unità molto eterogenee (GTL2). In generale, a parte le tratte caratterizzate dalla notevole omogeneità e monotonia che contraddistinguono la formazione di Terravecchia, è l'eterogeneità litologica a costituire l'elemento dominante che caratterizzerà lo scavo.

A ciò si aggiungono potenziali criticità geologiche legate alle caratteristiche litostratigrafiche delle unità attraversate:

- presenza di lenti di gesso, potenzialmente soggette a dissoluzione (GTL2);
- presenza di idrocarburi e di conseguenza di gas metano (TPL);
- presenza di acque chimicamente aggressive (GTL2, TRBa);
- possibili fenomeni di microcarsismo (TRB, GTL2).

### **12.3.3 Assetto geomorfologico**

Dal punto di vista geomorfologico non sono presenti elementi di particolare criticità per la galleria in progetto, che per la profondità alla quale si sviluppa non è interessata dagli effetti di eventuali dissesti superficiali. Al tempo stesso, si escludono lungo la tratta in esame fenomeni di dissesto estesi in profondità.

### **12.3.4 Assetto idrogeologico**

La galleria in esame attraversa i seguenti complessi idrogeologici delle unità del substrato:

- CAM (k variabile tra 5E-09 e 1E-07 m/s): formazione di Terravecchia, Tripoli, Trubi (litofacies argillosa);
- CCM (k variabile tra 1E-07 e 1E-05 m/s, con componente non trascurabile legata al carsismo): Trubi (litofacies calcarenitica);
- CGM (k variabile tra 1E-08 e 1E-09 m/s alle profondità in cui è realizzata l'opera, con possibile componente legata al carsismo): formazione di Cattolica, membro selenitico (GTL2).

All'interno del complesso CAM possibili variazioni della permeabilità verso valori più elevati si possono verificare in corrispondenza di facies a componente limoso-sabbiosa non trascurabile, la cui presenza è in genere sempre possibile; tuttavia la permeabilità generalmente bassa del complesso nel suo insieme riduce la possibilità che questi orizzonti a permeabilità relativamente più elevata possano costituire degli acquiferi significativi.

L'andamento del carico idraulico è definito sulla base dell'interpretazione delle letture effettuate nei

piezometri installati nei sondaggi di nuova realizzazione, che segnalano la presenza di una zona satura prossima alla superficie in prossimità di uno spartiacque idrografico. Pur trattandosi di una situazione di non chiara interpretazione, si è ipotizzato che queste letture testimonino la presenza di un carico idraulico fortemente influenzato dalla grande sinclinale con asse NNE-SSW e da alcune faglie subperpendicolari al piano assiale della sinclinale: il risultato sarebbe presumibilmente un sistema costituito da acquiferi saturi anche fino a basse profondità.

Si attendono venute d'acqua significative in fase transitoria, dell'ordine di 1-2 l/s\*10m, nei livelli a maggior permeabilità. Inoltre sono probabili cambiamenti significativi del flusso idrico al passaggio tra diversi litotipi, a causa delle diverse permeabilità.

A livello di rischi potenziali di natura idrogeologica, è già stato fatto cenno sia all'aggressività chimica di parte delle acque intercettate in galleria, sia alla possibile presenza di circuiti idrici sotterranei associati al microcarsismo sviluppato nei litotipi carbonatici. Gli effetti del carsismo sono comunque mitigati dalla ridotta estensione areale del bacino di ricarica.

### **12.3.5 Criticità principali**

In base al modello geologico e idrogeologico di riferimento, la galleria GN01 è caratterizzata da potenziali rischi geologici di diversa natura, in particolare:

- fenomeni di deformazione del cavo all'interno dei litotipi argilloso-marnosi nelle zone a copertura topografica più elevata (unità TRV).
- Possibile presenza di manifestazioni gassose in galleria (da sottolineare la presenza di idrocarburi nelle marne del Tripoli).
- Possibili fenomeni di microcarsismo tali da indurre la presenza di cavità localizzate, potenzialmente associate a venute d'acqua concentrate, ma in progressivo rapido esaurimento.
- Eterogeneità litologica e geomeccanica dell'ammasso, con tipi di risposta allo scavo molto diversi da zona a zona.
- Potenziale presenza di acque chimicamente aggressive per il calcestruzzo (solfuri), in corrispondenza dei litotipi gessosi; questo rischio è da considerare sia nella formazione di

Cattolica dove sono presenti livelli di gesso primario, sia in misura minore (solo potenziale) nella litofacies argillosa dei Trubi (TRBa) in cui dati di letteratura riportano la possibile presenza di olistoliti a composizione gessosa.

- Fenomeni di dissoluzione a medio-lungo termine negli orizzonti gessosi, anche se non direttamente intaccati dallo scavo della galleria.
- In bibliografia si rinvengono cenni relativi alla presenza di anidriti, localmente associate ai gessi della Formazione di Cattolica. Non si hanno conferme in tal senso dai sondaggi eseguiti lungo l'asse della galleria. La presenza di livelli di anidrite nell'unità GTL2 è molto basso, ma comunque da monitorare in fase di scavo.

#### **12.4 GN01 - Imbocco est**

Il tratto corrisponde alla galleria artificiale di imbocco lato Catania della GN01.

##### **12.4.1 Sondaggi**

L'assetto geologico dell'imbocco è descritto dai sondaggi 4a-GN1-S06 e 4a-SI1GN1.

##### **12.4.2 Assetto geologico**

La galleria artificiale è impostata nei litotipi argilloso-marnosi dell'unità TRV, che lungo il versante risultano ricoperti da una coltre eluvio-colluviale di spessore variabile tra 1 e 4 m ca.

##### **12.4.3 Assetto geomorfologico**

L'imbocco è inserito sul versante destro idrografico della valle del Fiume Salso, in un tratto in battuta di sponda, in cui il corso d'acqua sta erodendo il substrato; di conseguenza, il versante è inciso nei litotipi del substrato e presenta una morfologia piuttosto acclive e irregolare.

Immediatamente a monte dell'imbocco sono presenti alcuni fenomeni di frana composita in stato quiescente, che non intersecano direttamente l'asse del tracciato ma seguono un impluvio con orientazione da SW a NE che immette sul fondovalle circa 30 m a N dell'asse di linea. I dissesti, descritti in dettaglio nelle schede allegate (dissesti 29-30-31), interessano uno spessore di coltre eluvio-colluviale

di 2-3 m circa; il sondaggio 4a-GN1-S06 indica la presenza di una coltre di spessore pari a 3 m in asse al tracciato.

Il drenaggio superficiale risulta piuttosto caotico, con processi di ruscellamento erosivo che interessano porzioni di pendio a ridosso dell'imbocco e dietro a questo; a lato dell'imbocco, lungo il bordo destro dell'impluvio nel quale si convogliano i colamenti di terra, è presente il rilevato di una pista forestale che si innalza rispetto al pendio e che è in parte a sua volta interessato da cedimenti del ciglio, diretti però non verso valle ma verso l'impluvio a monte.

#### **12.4.4 Assetto idrogeologico**

L'imbocco è interamente impostato nel complesso idrogeologico CAM a bassa permeabilità ( $5E-09 < k < 1E-07$  m/s).

Lo strato superficiale argilloso-limoso riferibile alla coltre eluvio-colluviale (complesso CAL) suscettibile di essere saturato, in occasione di precipitazioni intense e/o prolungate, lungo l'interfaccia coltre/substrato, in relazione alla minore permeabilità relativa del substrato rispetto ai terreni sciolti della coltre.

#### **12.4.5 Criticità principali**

Interferenza marginale con i dissesti quiescenti che interessano il tratto di versante a nord e a monte dell'imbocco, principalmente in relazione alla realizzazione della viabilità di accesso all'imbocco.

Drenaggio superficiale privo di regimazione.

### **12.5 Finestra Montestretto**

La finestra Montestretto imbocca circa 230 m a nord dell'asse di linea, a 383 m ca. di quota in corrispondenza di una dorsale collinare. L'innesto sulla galleria di linea è in corrispondenza della pk 4+760 circa. La copertura topografica va da 0 a circa 100 m, la quota di intersezione è di circa 350 m.

#### **12.5.1 Sondaggi**

La galleria GN01 è stata indagata attraverso i sondaggi 4a-F01, 4a-F02 e 4a-GN1-S02.

### **12.5.2 Assetto geologico**

La galleria attraversa un rilievo interamente impostato nelle argille  $\pm$  marnose della formazione Terravecchia, membro pelitico-marnoso (TRV).

### **12.5.3 Assetto geomorfologico**

Dal punto di vista geomorfologico non sono presenti elementi di particolare criticità per la galleria il cui imbocco non è interessato da dissesti superficiali. Si escludono anche fenomeni di dissesto estesi in profondità in asse alla galleria.

### **12.5.4 Assetto idrogeologico**

La galleria in esame attraversa il complesso idrogeologico del substrato CAM (k variabile tra 1E-07 e 1E-09), al cui interno si possono verificare variazioni di permeabilità verso valori più elevati in corrispondenza di facies a componente limoso-sabbiosa non trascurabile, sempre possibili; tuttavia la permeabilità generalmente bassa del complesso nel suo insieme riduce la possibilità che questi orizzonti a permeabilità relativamente più elevata possano costituire degli acquiferi significativamente produttivi. L'andamento del carico idraulico va gradualmente crescendo fino a un massimo di circa 70 m in corrispondenza dell'innesto sull'asse di linea.

A livello di rischi potenziali di natura idrogeologica non si segnalano problemi di rilievo.

### **12.5.5 Criticità principali**

Data la ridotta estensione della galleria e il carico litostatico relativamente basso, l'unica potenziale criticità è rappresentata dalla possibile presenza di manifestazioni gassose, con un livello di rischio basso.

## **12.6 Tratta all'aperto pk 6+468 - 7+702**

In questo tratto la linea attraversa l'ampia piana alluvionale del Fiume Salso, con un tracciato in viadotto (VI06) che scende da 326.5 m ca. a 318.5 m ca.

### **12.6.1 Sondaggi**

I sondaggi di riferimento utilizzati per la ricostruzione geologica sono (in ordine di pk crescenti): 4a-S19, 4S4 (2018), 4a-S20÷S22 e 4a-S24.

### **12.6.2 Assetto geologico**

Il tracciato si sviluppa sulla piana alluvionale terrazzata di fondovalle e interessa i depositi alluvionali recenti e attuali del Fiume Salso, caratterizzati da uno spessore minimo di 3 m e massimo di circa 9 m. Nel tratto prossimo all'imbocco ovest della galleria GN02 sono presenti depositi alluvionali antichi che occupano una superficie poco acclive corrispondente a un antico terrazzo estesamente rimodellato.

Si tratta di limi sabbiosi con lenti di spessore da decimetrico a plurimetrico di sabbie e ghiaie ± limose; le ghiaie sabbioso-limose occupano di preferenza la base della sequenza dei depositi alluvionali recenti.

I depositi alluvionali sono coperti da uno stato discontinuo di terreno agrario, suolo e terreno rimaneggiato di spessore compreso tra 0.5 e 1.5 m.

Il substrato prequaternario è rappresentato dai litotipi argillosi e argilloso-marnosi, con subordinate sabbie fini limose, di pertinenza del membro argilloso della formazione Terravecchia (TRV).

### **12.6.3 Assetto geomorfologico**

La tratta all'aperto attraversa un ampio terrazzo alluvionale del F. Salso, definito da un'ampia curva verso sinistra del fiume, che va a erodere direttamente con una battuta di sponda il substrato del fianco destro della valle. Il corso d'acqua è stato interessato da un esteso intervento di regimazione e arginatura spondale che allo stato attuale ha l'effetto di ridurre fortemente l'azione erosiva della corrente contro il piede del versante.

All'estremità est del tratto all'aperto si osserva un fenomeno di cattura di genesi recentissima: i corsi d'acqua stagionali che scendono dal rilievo noto come Cozzo del Corvo e che originariamente, raggiunto il terrazzo, piegavano decisamente verso sinistra, mantenendosi sulla superficie del terrazzo e attraversando l'asse del tracciato ferroviario in progetto, sono stati catturati dal F. Salso, che erodendo la propria sponda sinistra, alla base del terrazzo, ne ha intersecato l'alveo.

Tra le pk 7+050 e 7+300 l'asse di linea passa, in viadotto, molto vicino al ciglio di questa scarpata fluviale

in erosione attiva. La distanza è in alcuni tratti inferiore a 40 m.

Al piede del versante, in direzione dell'imbocco della galleria naturale GN02, è presente un'ampia superficie subpianeggiante o poco acclive, caratterizzata dal subaffioramento di depositi alluvionali (presenza di ciottoli arrotondati fino a decimetrici), riferita a un antico terrazzo rimodellato (depositi fluviali antichi).

#### **12.6.4 Assetto idrogeologico**

I dati delle celle piezometriche installate nei sondaggi 4a-S20 e 4a-S22 restituiscono un carico idraulico con superficie posta sotto al limite dei depositi alluvionali e sembrano quindi essere riferibili alla posizione del tetto della superficie satura all'interno del substrato argilloso.

L'unico sondaggio che restituisce un livello piezometrico in equilibrio con quello del fiume è il 4S4 (dati relativi al 2018), con superficie di falda a 3 m dal p.c.; è quindi presumibile che i depositi alluvionali terrazzati ospitino una falda libera separata da quella presente nel substrato, con tetto a quota variabile tra 3 e 5 m dal p.c., in equilibrio con il fiume.

#### **12.6.5 Criticità principali**

Presenza di un ciglio di scarpata fluviale in erosione attiva a distanza dal tracciato localmente inferiore a 40 m.

### **12.7 GN02 - Imbocco ovest**

Il tratto comprende la galleria artificiale GA04 della lunghezza di 50 m ca., che corrisponde all'imbocco lato Palermo della GN02. In corrispondenza dell'imbocco la livelletta di base, precedentemente in piano, ricomincia a salire in direzione Catania.

#### **12.7.1 Sondaggi**

L'assetto geologico dell'imbocco è descritto dal sondaggio 4a-GN2-S07.

#### **12.7.2 Sezioni sismiche**

In corrispondenza dell'imbocco e della prima parte della galleria naturale sono state realizzate due

sezioni sismiche tra loro ortogonali (LS3 e LS4).

I risultati mostrano in generale una stratigrafia sismica regolare, con un aumento progressivo della  $V_p$  che segue l'andamento del versante senza disturbi significativi. I limiti di gradiente posti nelle sezioni geofisiche a  $V_p = 1.1$  km/s e  $V_p = 1.5$  km/s non corrispondono, nelle carote dei sondaggi 4a-GN2-S07/S07bis a orizzonti litologici definiti ma riflettono una graduale variazione dei parametri sismici con la profondità, all'interno di un substrato indisturbato (Figura 78A, B).

I valori di distribuzione delle onde  $V_s$  (Figura 78D) mettono peraltro in rilievo come il limite di  $V_s = 800$  m/s sia piuttosto profondo, al di sotto del limite raggiunto dai sondaggi stessi.

### **12.7.1 Assetto geologico**

La galleria artificiale è impostata nei litotipi argilloso-marnosi dell'unità TRV, che lungo il versante risultano ricoperti da una coltre eluvio-colluviale di spessore variabile tra 1 e 7 m ca. (gli spessori maggiori si registrano a monte dell'imbocco).

### **12.7.2 Assetto geomorfologico**

Dal punto di vista geomorfologico non sono presenti elementi di particolare criticità per le opere in progetto. L'imbocco si colloca in un settore di raccordo tra il grande terrazzo alluvionale del F. Salso e un versante colto, solcato da alcuni impluvi abbastanza marcati, talora con sponde interessate da fenomeni di erosione superficiale diffusa.

L'intero versante è interessato da processi di soliflusso a carico dello strato di terreno agrario e/o della coltre eluvio-colluviale.

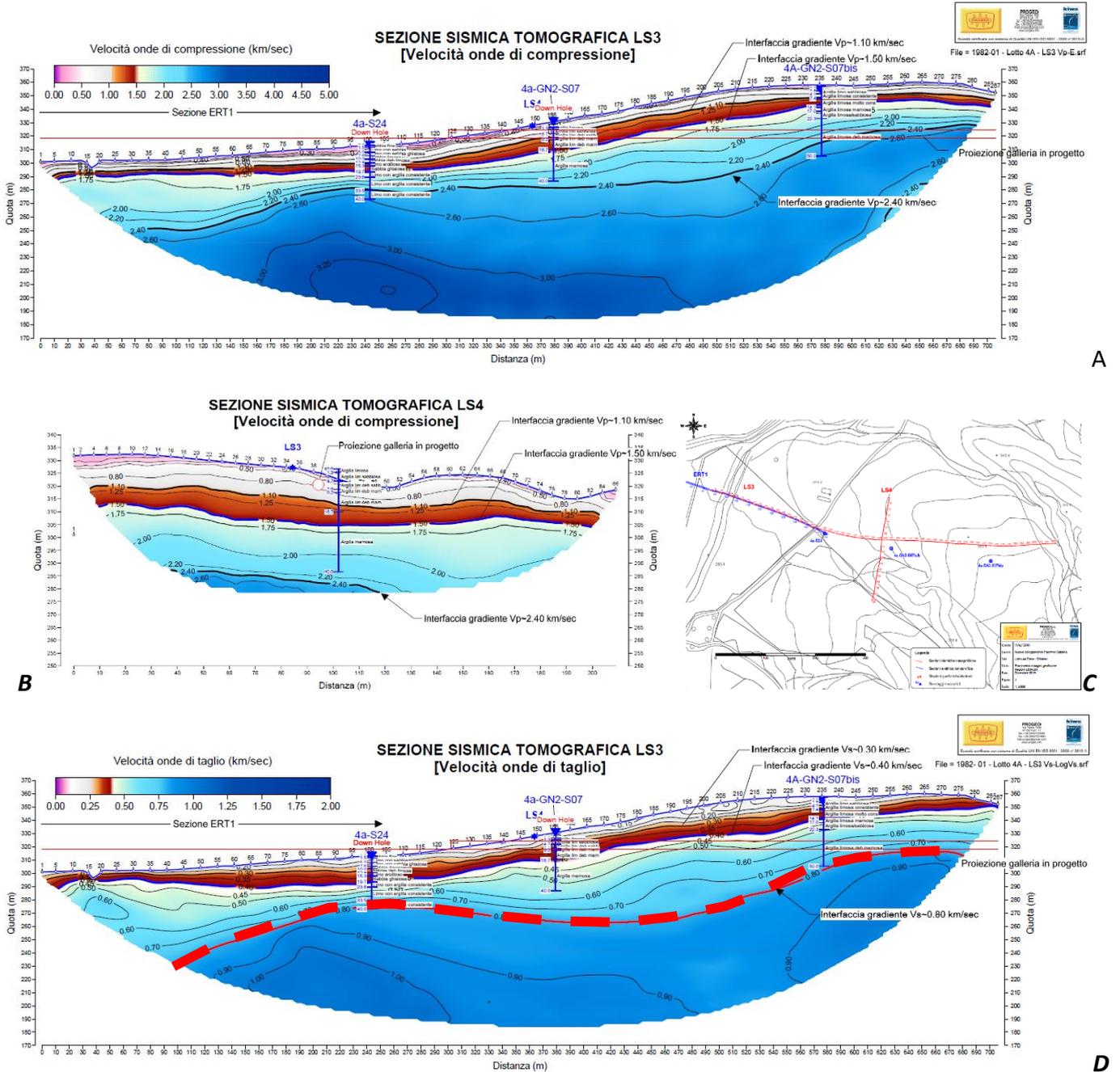


Figura 78 - Sezioni sismiche LS3 e LS4 realizzate tra l'imbocco della GN02 e la tratta all'aperto che lo precede in direzione Palermo (non in scala tra loro). A, B: Vp; D: Vs. Si può osservare l'andamento regolare del gradiente di velocità con la profondità. In D è stato ridisegnato in rosso il limite di Vs = 800 m/s (rapporto Progeo S.r.l., 2019).

### 12.7.1 *Assetto idrogeologico*

L'imbocco è interamente impostato nel complesso idrogeologico CAM a bassa permeabilità ( $5E-09 < k < 1E-07$  m/s). In base ai dati derivanti dal sondaggio 4a-GN2-S07 lo scavo della galleria artificiale avverrà in un mezzo parzialmente saturo, con quota della falda collocata tra 3 e 4 m dal piano campagna. Lo strato superficiale argilloso-limoso è riferibile alla coltre eluvio-colluviale (complesso CAL) suscettibile di essere saturato, in occasione di precipitazioni intense e/o prolungate, lungo l'interfaccia coltre/substrato, in relazione alla minore permeabilità relativa del substrato rispetto ai terreni sciolti della coltre.

### 12.7.2 *Criticità principali*

Nessuna criticità di rilievo. Lungo il versante è presente una coltre detritico-colluviale di spessore localmente superiore a 4 m, non soggetta a dissesti.

## 12.8 GN02 - Galleria naturale Salso

La galleria Salso, della lunghezza di circa 3711 m, sale in direzione di Enna da 318.5 m (imbocco lato Palermo) a 338.9 m ca. (imbocco lato Catania). La copertura topografica massima, circa 220 m, è raggiunta intorno alla pk 9+760.

### 12.8.1 *Sondaggi*

L'assetto geologico della galleria Salso è descritto dai sondaggi 4a-GN2-S07, 4a-GN2-S07bis, 4S5 (2018), 4a-GN2-S09 e 4a-GN2-S10.

### 12.8.2 *Sezioni sismiche*

In corrispondenza dell'imbocco e della prima parte della galleria naturale sono state realizzate due sezioni sismiche tra loro ortogonali (LS3 e LS4).

I risultati mostrano in generale una stratigrafia sismica regolare, con un aumento progressivo della  $V_p$  che segue l'andamento del versante senza disturbi significativi. I limiti di gradiente posti nelle sezioni geofisiche a  $V_p = 1.1$  km/s e  $V_p = 1.5$  km/s non corrispondono, nelle carote dei sondaggi 4a-GN2-

S07/S07bis a orizzonti litologici definiti ma riflettono una graduale variazione dei parametri sismici con la profondità, all'interno di un substrato indisturbato.

I valori di distribuzione delle onde Vs mettono peraltro in rilievo come il limite di Vs = 800 m/s sia piuttosto profondo, al di sotto del limite raggiunto dai sondaggi stessi.

### **12.8.3 Assetto geologico**

La galleria si sviluppa quasi interamente all'interno della formazione di Terravecchia, membro pelitico (TRV). Un possibile sovrascorrimento a basso angolo è riportato intorno alla pk 8+250 e in base ai dati di terreno porta a contatto le argille marnose grigie della formazione TRV una massa pluriettometrica di forma lenticolare, probabilmente una scaglia tettonica campionata lungo il piano di sovrascorrimento, costituita da argille variegata a struttura tettonizzata e interessata da piegamenti caotici a tutte le scale. Verso ovest le AV sono in contatto con litotipi sabbioso-arenacei riferiti alla formazione di Terravecchia (TRVa); questo secondo contatto è probabilmente di tipo stratigrafico, con il membro TRVa che appoggia in discordanza sulle argille variegata che formano il suo substrato.

In definitiva, la successione di litotipi attesa in galleria è la seguente:

- Formazione di Terravecchia, membro pelitico (TRV): pk 7+719 - 8+060
- Formazione di Terravecchia, membro arenaceo (TRVa): pk 8+060 - 8+150
- Argille Variegata (AV): pk 8+150 - 8+250
- Formazione di Terravecchia, membro pelitico (TRV): pk 8+250 - 11+480

Il posizionamento dei contatti tra le diverse unità è affetto da un certo margine di incertezza poiché non sono disponibili sondaggi nella zona in cui affiorano le argille variegata; si stima quindi che la posizione di questi contatti possa variare, rispetto a quanto ipotizzato in profilo, nell'ordine di  $\pm$  50-100 m.

### **12.8.4 Assetto geomorfologico**

Dal punto di vista geomorfologico non si riscontrano situazioni di particolare rilievo nei confronti della galleria, il cui tracciato si mantiene in posizione tale da non poter essere influenzato da dissesti superficiali.

La galleria corre per una tratta iniziale sotto a coperture relativamente basse, con uno strato di terreni detritici superficiali che potrebbe essere dell'ordine di alcuni metri di spessore.

### **12.8.5 Assetto idrogeologico**

La galleria attraversa il complesso idrogeologico CAM a permeabilità medio-bassa ( $5E-09 < k < 1E-07$ ) e, unicamente tra le pk 8+060 e 8+150, il complesso CCA a permeabilità medio-alta ( $1E-07 < k < 5E-06$ ). È possibile che il presunto contatto tettonico che potrebbe intersecare l'asse tunnel intorno alla pk 8+250 costituisca una zona a permeabilità relativamente più elevata rispetto ai complessi pelitici che esso attraversa. Un locale limitato incremento delle venute d'acqua potrebbe essere localizzato lungo la fascia di attraversamento di questo contatto.

Le informazioni relative ai sondaggi indicano la presenza di un carico idraulico variabile, la cui superficie segue approssimativamente l'andamento della topografia, con un valore massimo stimato in 100 m ca. dal piano del ferro.

### **12.8.6 Criticità particolari**

Carico idraulico potenzialmente elevato. Possibile presenza di gas (rischio basso) in base a dati di letteratura.

Presenza di coperture detritiche di alcuni metri di spessore in prossimità dell'imbocco lato Palermo.

## **12.9 GN02 - Imbocco est**

Il tratto comprende la galleria artificiale GA05 della lunghezza di 50 m ca., che corrisponde all'imbocco lato Catania della GN02 e immette sul tratto in trincea TR09.

### **12.9.1 Sondaggi**

L'assetto geologico dell'imbocco è descritto dal sondaggio 4a-GN1-S10.

### **12.9.2 Assetto geologico**

La galleria artificiale è impostata nei litotipi argilloso-marnosi dell'unità TRV, che lungo il versante risultano ricoperti da una coltre eluvio-colluviale di spessore variabile tra 1 e 2 m ca. Al piede del pendio,

presso il raccordo con la piana alluvionale del Fiume Morello, sono presenti alcuni accumuli di materiale detritico-colluviale che possono verosimilmente raggiungere uno spessore di alcuni metri.

### **12.9.3 Assetto geomorfologico**

L'imbocco è inserito sul versante destro idrografico della valle del Fiume Morello, in corrispondenza di una dorsale collinare che si raccorda indisturbata alla piana alluvionale.

I versanti sono localmente interessati da fenomeni di soliflusso a carico della coltre eluvio-colluviale ma non si riscontra la presenza di dissesti.

### **12.9.4 Assetto idrogeologico**

L'imbocco è interamente impostato nel complesso idrogeologico CAM a bassa permeabilità ( $5E-09 < k < 1E-07$  m/s). I dati del sondaggio 4a-GN1-S10 indicano una superficie piezometrica localizzata a circa 4.5 m dal piano campagna, il che indica che parte dell'imbocco verrà scavata in un substrato saturo, ancorché a permeabilità ridotta.

Lo strato superficiale argilloso-limoso riferibile alla coltre eluvio-colluviale (complesso CAL) suscettibile di essere saturato, in occasione di precipitazioni intense e/o prolungate, lungo l'interfaccia coltre/substrato, in relazione alla minore permeabilità relativa del substrato rispetto ai terreni sciolti della coltre.

### **12.9.5 Criticità principali**

Nessuna criticità di rilievo.

## **12.10 Tratta all'aperto pk 11+549 - 13+427**

L'asse di linea corre sulla piana alluvionale del Fiume Morello, il cui corso viene attraversato in viadotto (VI07) intorno alla pk 12+034. Successivamente il tracciato si sviluppa lungo la pianura al piede del versante sinistro della valle, fino all'imbocco della galleria GN03.

Il piano del ferro si innalza lievemente da circa 339 m a circa 341.3 m.

### **12.10.1 Sondaggi**

Nel tratto in esame sono disponibili i sondaggi 4a-V04, 4S6 (2018), 4a-S26÷S29, 4a-V06, 4a-V03 e 4S7 (2018).

### **12.10.2 Assetto geologico**

La linea si sviluppa interamente sui depositi alluvionali di fondovalle, lambendo appena il piede del versante sinistro della valle.

I sondaggi evidenziano la presenza di un materasso alluvionale a dominante componente limoso-argillosa, con alcune lenti maggiori di sabbie ± limose, la maggiore delle quali coincide con l'alveo attuale del fiume. Lo spessore massimo dei depositi alluvionali è di circa 13-14 m in corrispondenza dei fori 4S6 e 4a-S27.

Il substrato è rappresentato dalla formazione di Terravecchia, membro pelitico (TRV), con una successione omogenea e monotona di argille limose ± marnose, compatte, di colore grigio scuro.

### **12.10.3 Assetto idrogeologico**

Non si evidenziano criticità idrogeologiche particolari nella tratta in esame. In base ai dati disponibili l'acquifero alluvionale (complesso idrogeologico CSL) ospita una falda freatica dall'andamento abbastanza regolare, in sostanziale equilibrio con il corso d'acqua.

### **12.10.4 Criticità principali**

Nessuna criticità di rilievo.

## **12.11 GN03 - Imbocco ovest**

Il tratto comprende la galleria artificiale GA06 della lunghezza di 50 m ca., che corrisponde all'imbocco lato Palermo della GN03.

### **12.11.1 Sondaggi**

L'assetto geologico dell'imbocco è descritto dal sondaggio 4a-GN3-S11.

### **12.11.2 Assetto geologico**

La galleria artificiale è impostata nei litotipi argilloso-marnosi dell'unità TRV, che lungo il versante risultano ricoperti da una coltre eluvio-colluviale di spessore variabile tra 1 e 5-6 m ca. (il foro 4a-GN3-S11 ha attraversato una coltre di 5 m di spessore).

### **12.11.3 Assetto geomorfologico**

Dal punto di vista geomorfologico non sono presenti elementi di particolare criticità per le opere in progetto. L'imbocco si colloca al piede del versante, in un settore localmente interessato da processi di soliflusso a carico dello strato di terreno agrario e/o della coltre eluvio-colluviale.

### **12.11.4 Assetto idrogeologico**

L'imbocco è interamente impostato nel complesso idrogeologico CAM a bassa permeabilità ( $5E-09 < k < 1E-07$  m/s). In base ai dati derivanti dal sondaggio 4a-GN2-S07 lo scavo della galleria artificiale avverrà in un mezzo parzialmente saturo, con quota della falda collocata tra 3 e 4 m dal piano campagna.

Lo strato superficiale argilloso-limoso riferibile alla coltre eluvio-colluviale (complesso CAL) suscettibile di essere saturato, in occasione di precipitazioni intense e/o prolungate, lungo l'interfaccia coltre/substrato, in relazione alla minore permeabilità relativa del substrato rispetto ai terreni sciolti della coltre.

### **12.11.5 Criticità principali**

Nessuna criticità di rilievo. Lungo il versante è presente una coltre detritico-colluviale di spessore generalmente compreso tra 1 e 2 m, localmente superiore a 4 m, non soggetta a dissesti.

## **12.12 GN03 - Galleria naturale Trinacria**

La galleria Trinacria attraversa il rilievo montuoso su cui sorge la città di Enna, con una copertura topografica che raggiunge 580 m ca. Nei dintorni della pk 22+320. La quota del piano del ferro sale da 341.4 m ca. (imbocco lato Palermo) a 450.3 m ca. (imbocco lato Catania).

### **12.12.1 Sondaggi**

La galleria GN03 è stata indagata attraverso i sondaggi della serie 4a-GN3-S11÷S19, dai sondaggi 4S8 e 4S9 (2018) e dal foro 4SD1.

### **12.12.2 Assetto geologico**

La galleria attraversa quasi esclusivamente i terreni di natura argilloso-marnosa, riferibili al membro pelitico della formazione di Terravecchia (TRV), che costituiscono la parte basale della rocca su cui sorge la città di Enna; l'unità TRV viene attraversata dall'imbocco ovest fino alla pk 26+550 ca. Tra la pk 26+550 ca. e l'imbocco lato Catania ca si prevede che il tunnel attraversi i terreni sabbioso-limosi riferibili al membro arenaceo della medesima unità (TRVa), in contatto stratigrafico con il membro pelitico, evidenziati dalle stratigrafie dei sondaggi 4SD1 e 4a-GN3-S19.

La parte sommitale della rocca è impostata nelle sequenze messiniane e plioceniche (Gessoso-Solfifera e gruppo di Enna) che, data la loro giacitura suborizzontale a grande scala, non arrivano a quota tunnel.

Non vi sono indizi circa la possibile presenza di zone di faglia e/o contatti tettonici (sovrascorrimenti) a quota galleria.

È previsto lo scavo di un complesso fondamentalmente argilloso, con locali passaggi a facies marnose a comportamento più litoide, la cui distribuzione non può però essere assunta come una funzione della profondità a cui avviene lo scavo. L'alternanza di facies non litoidi, francamente argillose e facies litoidi marnose è di tipo stratigrafico, dipendendo da variazioni nelle condizioni di sedimentazione, e non dall'aumento del carico litostatico.

All'interno di alcuni sondaggi (4a-GN3-15 e 4a-GN3-16) è stata osservata una significativa presenza di idrocarburi.

### **12.12.3 Assetto geomorfologico**

Non vi sono interferenze ipotizzabili tra la geomorfologia di superficie e la galleria.

### **12.12.4 Assetto idrogeologico**

La galleria si sviluppa principalmente all'interno del complesso idrogeologico CAM a permeabilità medio-

bassa ( $1E-09 < k < 1E-07$ ). Solo nell'ultima parte, per circa 250-300 m, la galleria attraversa il complesso CAC a permeabilità media ( $1E-07 < k < 1E-05$ ).

L'assetto idrogeologico del substrato nella galleria GN03 e in particolare il modello di distribuzione dei carichi idraulici è affetto da un elevato margine di incertezza che riguarda i settori di galleria più profondi, dove non sono disponibili dati di sondaggio. Nei settori a minore copertura topografica i dati disponibili indicano la presenza di un carico idraulico che segue approssimativamente l'andamento della topografia, avvicinandosi molto alla superficie in corrispondenza delle valli principali. Fino approssimativamente alla pk 19+000 sembra ragionevole supporre, in base ai dati piezometrici, un carico che non supera i 50-60 m (rispetto al piano del ferro).

Nella parte centrale della Rocca di Enna le informazioni sono scarse. Le quote piezometriche registrate nei sondaggi 4a-GN3-S15, 4a-GN3-S16, 4a-GN3-S17 non sono di chiara interpretazione: tuttavia, sulla base delle considerazioni già riportate nel § 9.5, si prevede la presenza di un carico idraulico significativo. Si valuta che il carico idraulico al di sopra del tunnel nella tratta compresa abbia valori inferiori a 100 m solo prima della pk 19+000 e dopo la pk 25+000. Nella parte centrale del tunnel al contrario si prevede un carico piuttosto elevato, che aumenta progressivamente fino a superare i 200 m tra le pk 19+800 e 23-400 .

### **12.12.5 Criticità principali**

Le criticità principali che caratterizzano questa tratta sono legate essenzialmente alla natura argillosa della maggior parte dei litotipi attraversati e all'elevata copertura topografica, che da un lato incide sul comportamento allo scavo del materiale dall'altro, interagendo con le caratteristiche del complesso idrogeologico attraversato, e dall'altro può essere all'origine di carichi idraulici elevati, sia pur in condizioni di permeabilità bassa.

Infine, in base a dati di letteratura, all'interno della formazione di Terravecchia risulta un possibile rischio correlato alla presenza di metano. In sintesi, si possono ipotizzare i seguenti tipi di rischio:

- Presenza di litotipi argillosi non litoidi sotto elevato carico litostatico.
- Presenza di carichi idraulici > 60 m, fino a più di 200 m.
- Presenza di gas.

### 12.13 GN03 - Imbocco est

L'imbocco est della GN03 corrisponde alla galleria artificiale GA07, della lunghezza di 50 m.

#### 12.13.1 Sondaggi

Nelle immediate vicinanze dell'imbocco sono stati realizzati i sondaggi 4SD1 e 4a-GN3-S19.

#### 12.13.2 Assetto geologico

I sondaggi hanno attraversato una sequenza di sabbie fini  $\pm$  limose e limi sabbiosi, riferibili al membro arenaceo della formazione di Terravecchia (TRVa).

Una coltre eluvio-colluviale di spessore compreso fra 1 e 3 m copre il versante in maniera uniforme.

#### 12.13.3 Assetto geomorfologico

L'imbocco è posizionato in un settore di pendio a morfologia regolare, dove non si riscontrano dissesti. Non vi sono quindi criticità geomorfologiche di rilievo.

#### 12.13.4 Assetto idrogeologico

In base ai dati dei sondaggi e alle osservazioni di terreno, l'imbocco risulta posizionato in gran parte sopra falda o, al limite, all'interfaccia tra substrato saturo e non. La falda nel sondaggio 4a-GN3-S19 si colloca a circa 11 m dal piano campagna.

#### 12.13.5 Criticità particolari

Nessuna criticità di rilievo.

### 12.14 Tratta all'aperto pk 26+928 - fine lotto

La tratta in esame corrisponde all'ultimo segmento del lotto in progetto, con arrivo alla nuova stazione di Enna, a quota 450 m ca.

#### 12.14.1 Sondaggi

Sono disponibili nella zona i sondaggi 4a-S30 e 4S10 (2018).

### 12.14.2 Dati geofisici

Nell’area della nuova stazione di Enna, a cavallo dei sondaggi 4a-GN3-S19 e 4a-S30, sono state realizzate tre tomografie sismiche (LS11 in asse tracciato, LS21 e LS22 ortogonali). I risultati indicano l’esistenza di un gradiente di velocità sismica regolare, in progressivo aumento con la profondità, senza che vi siano elementi di disturbo tali da far supporre la presenza di strutture tettoniche o aree in dissesto. In Figura 79 è riportata la sezione LS11, in asse al tracciato. Si osserva come l’isolinea  $V_s = 800$  m/s sia piuttosto profonda, tra 70 e 100 m dalla superficie topografica.

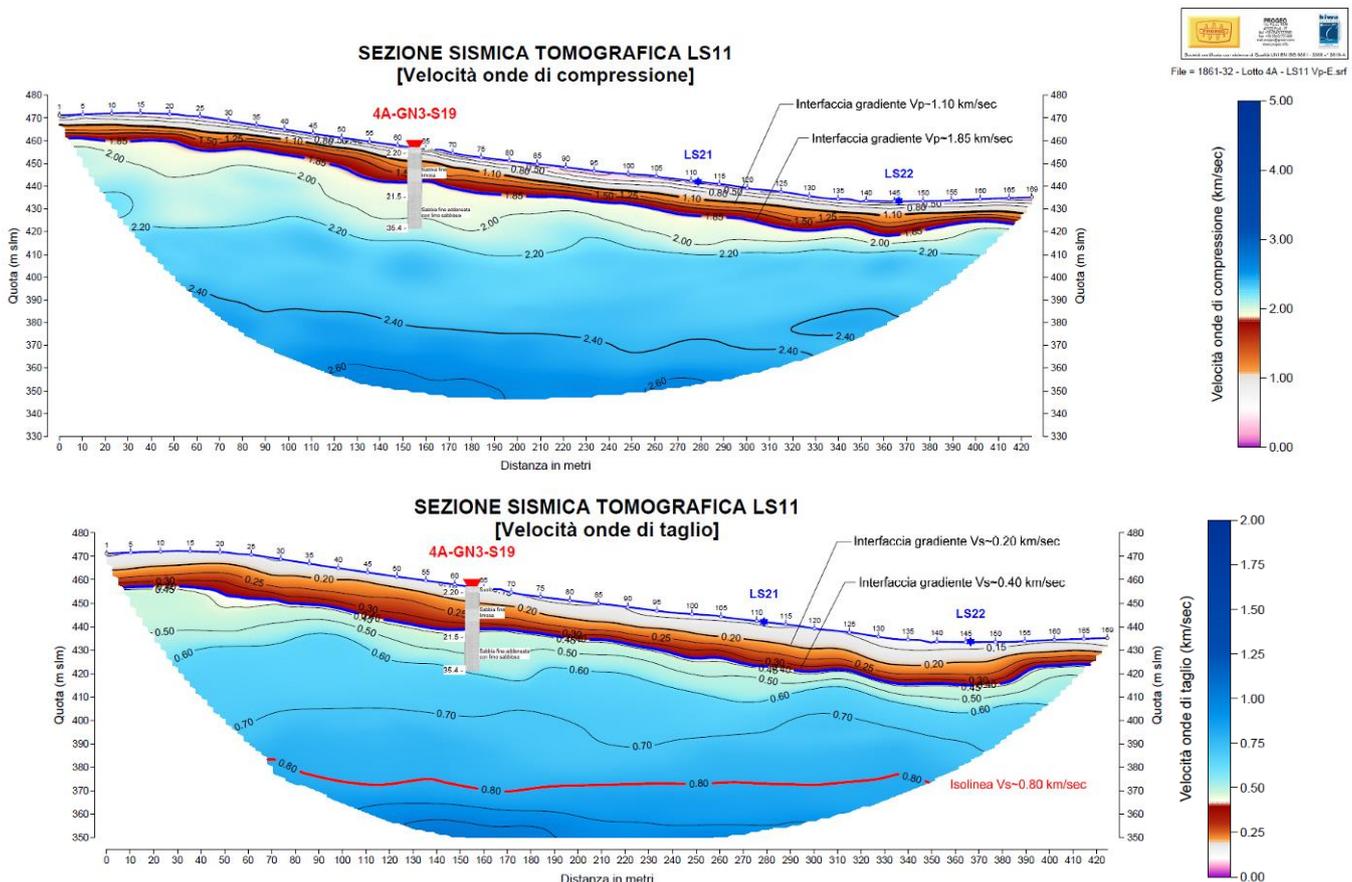


Figura 79 - Sezione sismica LS11, parallela al tracciato, nell’area della nuova stazione di Enna.  
 A: velocità  $V_p$ ; B: velocità  $V_s$ .

### 12.14.3 Assetto geologico

L’area è caratterizzata dall’affioramento della Formazione di Terravecchia, in particolare del membro arenaceo (TRVa) lungo i versanti e del membro pelitico (TRV) in corrispondenza dell’asse dell’ampio

vallone su cui si situerà la nuova stazione di Enna.

Depositi alluvionali antichi residuali, estesamente rimodellati e con spessore presumibilmente di alcuni metri, occupano la sommità di alcuni rilievi collinari subpianeggianti nei dintorni del tracciato.

Il substrato è coperto da una coltre eluvio-colluviale di spessore compreso tra 1 e 3 m ca.

I dati sismici citati nel paragrafo precedente confermano sostanzialmente questo modello geologico, indicando un substrato omogeneo e privo di disturbi significativi, anche se caratterizzato da valori piuttosto bassi della Vs.

#### **12.14.4 Assetto geomorfologico**

La nuova stazione di Enna si colloca alla testata di un ampio vallone che solca il versante orientale della Rocca di Enna, caratterizzato da una morfologia molto dolce, per la prevalenza di litotipi a componente argillosa e sabbioso-limosa. Si tratta di un'ampia area priva di dissesti, dove si osservano localmente processi di soliflusso a carico della coltre eluvio-colluviale.

#### **12.14.5 Assetto idrogeologico**

Non si segnalano situazioni di particolare criticità dal punto di vista idrogeologico. Le letture piezometriche nel sondaggio 4a-S3 confermano la presenza di una falda abbastanza superficiale (4 m dal piano campagna in corrispondenza dell'asse dell'impluvio).

## 13 SINTESI DELLE CRITICITÀ

Sulla base dei dati illustrati nel presente studio geologico, geomorfologico e idrogeologico, si sintetizzano di seguito le criticità rilevate per il tracciato in esame, descritte in dettaglio nel capitolo precedente.

### 13.1 Criticità generali

#### 13.1.1 *Caratteristiche litotecniche delle unità del substrato*

Queste criticità sono correlate alla natura essenzialmente argillosa o argilloso-limosa di gran parte dei litotipi incontrati lungo il tracciato, appartenenti alle seguenti unità geologiche:

- Formazione di Terravecchia, membro argilloso (TRV)
- Argille Variegate (AV)
- Trubi, litofacies argillosa (TRBa)

In base ai dati di terreno, di sondaggio e di laboratorio, i litotipi appartenenti a queste unità sono costituiti essenzialmente da argille, argille limose e argille marnose, a tessitura da stratificata a caotica.

#### 13.1.2 *Eterogeneità litologica*

Le formazioni facenti capo al gruppo della Gessoso-Solfifera sono caratterizzate da una notevole variabilità litologica legata alle caratteristiche dell'ambiente di sedimentazione. Si hanno quindi formazioni in cui si alternano a scala da metrica a pluridecmetrica litotipi molto diversi tra loro per composizione, granulometria, parametri geotecnici e geomeccanici: argille, brecce a matrice argillosa, siltiti, calcari, marne, gessi, livelli salini e sequenze fittamente stratificate di litofacies diverse.

In alcuni casi (ad es. nella formazione dei Trubi, litofacies argillosa TRBa) si possono trovare blocchi e masse da decametriche a ettometriche (olistoliti), generalmente stratiformi, a comportamento litoide (es. gessareniti, gessi) annegate in un mezzo a dominante componente argillosa.

### **13.1.3 Fenomeni di rigonfiamento**

In base ai dati bibliografici, nel gruppo della Gessoso-Solfifera possono essere presenti, associati ai gessi, dei livelli di anidriti ( $\text{CaSO}_4$  anidro) che potrebbero determinare fenomeni di rigonfiamento al contorno dello scavo, causati dalla loro progressiva idratazione a contatto con l'aria e con acque sotterranee, qualora venissero intercettate dalle gallerie. La presenza di anidriti non è tuttavia stata confermata dai sondaggi realizzati, per cui si ritiene che tale rischio sia trascurabile.

### **13.1.4 Presenza di acquiferi produttivi**

Nell'ambito delle formazioni geologiche attraversate dal tracciato in progetto non sono presenti corpi idrici molto produttivi, cioè caratterizzati da permeabilità media elevata e da grande estensione areale. Corpi produttivi di dimensioni ridotte sono localizzati essenzialmente all'interno del membro sabbioso-conglomeratico della Formazione di Terravecchia (complesso idrogeologico CCA,  $1\text{E}-07 < k < 5\text{E}-06$  m/s) e all'interno delle serie messiniana e pliocenica, nelle facies carbonatiche. Le portate più significative, dell'ordine del 1-2 l/s\*10 m, si verificano nella galleria GN01 all'interno dei livelli più carbonatici della formazione di Trubi (TRB), per una lunghezza complessiva di 400 m. Al di fuori di questa situazione non si attendono venute d'acqua significative.

### **13.1.5 Carsismo e fenomeni di dissoluzione**

I fenomeni di carsismo e dissoluzione interessano principalmente i litotipi del gruppo della Gessoso-Solfifera, in particolare calcari, gessi e livelli salini, e subordinatamente calcareniti e gessareniti.

L'estensione dei fenomeni di dissoluzione dipende molto dalla presenza di sistemi di flusso sotterraneo sufficientemente sviluppati. La formazione del Calcere di Base, l'unica probabilmente in grado di ospitare un acquifero carsico vero e proprio, non affiora nell'areale interessato dal tracciato e non è previsto che essa venga intercettata dalle gallerie in progetto.

Dall'altro lato, la maggior parte delle lenti e dei livelli gessosi o salini messiniani si ritrova imballata in un sedimento prevalentemente argilloso, marnoso o siltoso poco permeabile; questi orizzonti sono quindi interessati da fenomeni di dissoluzione molto lenti. Il membro selenitico GTL2 viene attraversato dalla galleria naturale Salso (GN02) per due tratti di estensione piuttosto ridotta, sotto una copertura

topografica superiore a 100 m e in un contesto geologico in cui predominano all'intorno litotipi argillosi a bassa permeabilità. In tali condizioni è poco probabile che si siano sviluppati fenomeni di dissoluzione significativi.

Questa condizione può ovviamente cambiare in maniera repentina nel momento in cui questi litotipi vengono intercettati dallo scavo di una galleria, che può determinare modificazioni locali del flusso idrico sotterraneo all'intorno del raggio plastico, oppure portare l'ammasso a contatto con umidità e/o acque provenienti da altri settori dello scavo.

### **13.1.6 Presenza di gas**

Dati bibliografici integrati con le osservazioni di terreno e misurazioni fatte in sondaggio sia nella presente fase progettuale sia in fase di progettazione preliminare confermano che la potenziale presenza di gas in galleria, metano in particolare, rappresenta un rischio non trascurabile.

Manifestazioni gassose che danno origine a vulcani di fango (le cosiddette "maccalube") sono note nell'area di Caltanissetta, alla cui periferia est si trova un campo di emanazioni gassose attivo. Da dati bibliografici sono considerate suscettibili alla presenza di gas metano la Formazione Terravecchia e le Argille Variegate, ma data la ridotta estensione di queste ultime (cfr. § 12.8.3) si ritiene che il rischio possa riguardare esclusivamente l'unità TRV/TRVa. I dati dei sondaggi realizzati nella zona di Enna (4a-GN3-S15 e 4a-GN3-S16) e le osservazioni effettuate durante le campagne piezometriche negli stessi fori indicano la presenza di fuoriuscite di gas anche significative.

I sondaggi realizzati nel corso della presente fase progettuale hanno messo in luce la presenza di idrocarburi anche all'interno dei litotipi del gruppo Gessoso-Solfifera e della formazione dei Trubi, sotto forma sia di spalmature bituminose sia di un forte odore di idrocarburi che permea le carote subito dopo la loro estrazione.

Il rischio legato alla presenza di gas dovrà essere tenuto in considerazione su tutta la tratta oggetto di intervento sia nelle aree sopracitate, in quanto la presenza di gas è documentata, sia in altre aree, caratterizzate comunque dagli stessi litotipi.

### 13.1.7 Aggressività chimica delle acque

La presenza di lenti saline all'interno della Gessoso Solfifera è stata confermata dai sondaggi eseguiti in fase di PD e dai dati di terreno (presenza diffusa di sorgenti saline, concrezioni di cloruri nei depositi alluvionali) in un'ampia area situata a ovest del settore oggetto del presente rapporto, lungo il tracciato dell'adiacente Lotto 3 (zona di Marianopoli e bacino del F. Salito).

La potenziale aggressività delle acque circolanti all'interno delle formazioni messiniane è confermata dai dati analitici che evidenziano a scala locale un ambiente altamente aggressivo legato alla presenza di solfati e cloruri disciolti.

### 13.2 Quadro di sintesi delle criticità

La tabella seguente presenta una sintesi delle criticità descritte nei paragrafi precedenti.

Macrotratta	Criticità	Incidenza
Tratta all'aperto, pk 0+000 ÷ 4+108	nessuna criticità di rilievo	-
GN01 - Galleria naturale Montestretto	deformazione del cavo in litotipi argillosi	media
	copertura topografica	media
	presenza di gas/idrocarburi	media
	eterogeneità litologica e geomeccanica	media
	acque chimicamente aggressive	media
	fenomeni di dissoluzione a medio-lungo termine	bassa
	venute d'acqua	media
	interferenza con dissesti quiescenti (viabilità imbocco E)	bassa
	drenaggio superficiale privo di regimazione (Imbocco E)	media
Finestra Montestretto	presenza di gas	bassa
Tratta all'aperto pk 6+468 - 7+702	ciglio di scarpata fluviale in erosione tra il km 7+000 e il km 7+300	alta
GN02 - Galleria naturale Salso	coltre detritico-colluviale localmente > 4 m (imbocchi)	bassa
	carico idraulico	alta
	presenza di gas	bassa
Tratta all'aperto pk 11+549 - 13+427	nessuna criticità di rilievo	-
GN03 - Galleria naturale Trinacria	coltre detritico-colluviale localmente > 4 m (imbocco W)	bassa
	litotipi argillosi / carico litostatico	alta
	carico idraulico > 60 m e fino a più di 200 m	alta
	presenza di gas	alta
Tratta all'aperto pk 26+928 - fine lotto	nessuna criticità di rilievo	-

Tabella 3 - Sintesi delle criticità relative allo sviluppo del Lotto 4a.

## 14 AFFIDABILITÀ DEL MODELLO GEOLOGICO PER LE GALLERIE PRINCIPALI

Nel lotto esaminato sono presenti alcune gallerie naturali di lunghezza significativa. Dal momento che per queste opere le ricostruzioni geologiche riguardano settori profondi del substrato, che spesso richiedono considerevoli estrapolazioni a partire dalla superficie, esse rappresentano gli elementi per i quali il modello geologico può presentare le maggiori incertezze.

Con lo scopo di fornire una quantificazione di tali incertezze, utile per supportare scelte progettuali più o meno conservative, l'incertezza del modello geologico previsionale è stata stimata tramite l'indice GMR ("Geological Model Rating"; Perello, 2011).

### 14.1 Principi alla base del metodo GMR

Il metodo permette la definizione di un indice numerico che assume il significato riportato nella tabella che segue.

Class	GMR	Reliability	Description
A	10–7.5	Good	(1) to be excluded; (2) possible: imprecision order of magnitude 0–50 m; (3) possible: imprecision order of magnitude 0–25%; (4) to be excluded; (5) to be excluded
B	7.5–5	Fair	(1) to be excluded; (2) possible: imprecision order of magnitude 0–100 m; (3) possible: imprecision order of magnitude 0–50%; (4) possible but not probable; (5) to be excluded
C	5–2.5	Poor	(1) possible but not probable; (2) possible: imprecision order of magnitude 0–200 m; (3) possible; imprecision order of magnitude 0–100%; (4) possible; (5) possible but not probable
D	2.5–0	Unreliable	(1) possible; (2) possible: imprecision order of magnitude >200 m; (3) possible: imprecision order of magnitude >100%; (4) possible; (5) possible

Points 1–5 in the description field refer to the following items: 1 significant deviation with regard to the RGM; 2 imprecision in the position of lithological or fault zones contacts; 3 imprecision in the thickness of lithological levels or fault zones; 4 presence of further critical geological elements of secondary importance besides the forecasted ones (metric to decametric faults/levels with poor geomechanical conditions); 5 presence of further critical geological elements of primary importance besides the forecasted ones (decametric to pluri-decametric faults/levels with poor geomechanical conditions)

Tabella 4 - Tabella esplicativa dell'indice GMR (Perello, 2011).

In sostanza, sulla base del GMR, il modello geologico previsionale può ricadere in una delle quattro classi di affidabilità riportate in tabella (A: buona; B: discreta; C: mediocre; D: inaffidabile). A ognuna di queste quattro classi corrisponde una diversa probabilità che gli elementi che compongono il modello geologico siano effettivamente presenti dove previsto, che non siano presenti, oppure che non sia da escludere la presenza di elementi diversi da quelli attesi e al tempo stesso critici dal punto di vista costruttivo.

La valutazione è fatta su base numerica, attribuendo dei punteggi (*rating*) a una serie di parametri

ritenuti significativi nella costruzione del modello geologico. L'attribuzione dei *rating* è guidata da alcune tabelle che tendono a incentivare la maggior oggettività possibile.

I parametri chiave da valutare riguardano la qualità delle indagini, ovvero:

- a. la qualità delle indagini dirette (sondaggi);
- b. la qualità dei rilievi geologici di superficie;
- c. la qualità delle indagini indirette, cioè delle indagini geofisiche.

Tali parametri vengono poi combinati attraverso specifici processi matriciali, valutando la loro efficacia nel determinare previsioni attendibili attraverso la stima di ulteriori aspetti che sono:

- d. la complessità del sistema geologico da modellizzare;
- e. i criteri di interpretazione e la capacità ed esperienza di chi ha condotto l'interpretazione;
- f. l'eterogeneità delle caratteristiche meccaniche del sistema geologico.

## 14.2 Considerazioni generali sui risultati delle valutazioni

Di seguito vengono presentati dei diagrammi che illustrano la variazione di affidabilità del modello geologico lungo lo sviluppo delle principali gallerie di linea. Nei diagrammi, in ascissa sono rappresentate le progressive chilometriche, sull'ordinata sinistra il valore dell'indice GMR e sull'ordinata destra il peso che i tre parametri relativi alle indagini (punti a-c del paragrafo precedente) hanno nel determinare l'esito della valutazione. Il peso è espresso con un valore che varia tra 0 e 1, ovvero sostanzialmente in percentuale; esso fornisce sostanzialmente una indicazione sull'entità dei contributi che i tre parametri forniscono alla affidabilità del modello. Tale dato può essere utile per comprendere in quale dei tre tipi di indagini il modello sia più carente e pertanto sia conveniente, in eventuali campagne future, investire maggiormente.

Per quanto riguarda la stima dei rating dei tre parametri riguardanti le indagini (punti a-c precedenti) si tenga conto dei commenti seguenti.

Per le indagini dirette (punto a nel § 14.1; Tabella 5 - Valutazione della qualità delle indagini dirette (Perello, 2011).);

- la quantità dei sondaggi è stata stimata tenendo conto di tutte le campagne di indagine

disponibili;

- la percentuale di sondaggi carotati è quasi sempre del 100%.
- La distanza media dal tunnel è stata attribuita tenendo conto della distribuzione dei sondaggi, ovvero quando esistevano situazioni in cui molti sondaggi erano concentrati su brevissime distanze e quando essi investigavano sostanzialmente sempre la medesima situazione, nel calcolo della distanza media essi sono stati considerati come un unico sondaggio.
- La profondità raggiunta dai sondaggi è quasi sempre superiore a quella delle gallerie e pertanto si ricade sempre nella condizione migliore tra quelle previste dalle tabelle di definizione del rating.

**Factors contributing to DPQ (drillholes potential quality)**

Factor	Value	Rating	Factor	Value	Rating	Factor	Value	Rating	Factor	Value	Rating
Drillholes quantity in an interval of 2 km	1	3	m% of cored drillhole	0%	1	Average distance from tunnel axis (m)	2000	1	Average drillholes depth vs. tunnel depth	0,25	1
	3	5		30%	3		500	4		0,75	5
	5	8		60%	5		250	8		1,00	9
	>7	10		100%	9		0	10		1,20	10
Add the rating (10-rating) × 0.5 if some of the drillholes are extrapolable with certainty to the considered stretch; rating 10 with 1 drillhole intersecting the stretch			Add the rating (10-rating) × 0.5 if BHTV is available; rating=10 for 100% cored drillhole + BHTV			Add the rating (10-rating) × 0.5 if some of the drillholes are extrapolable with certainty to the considered stretch; rating 10 with 1 drillhole intersecting the stretch			Rating 10 with 1 drillhole intersecting the stretch		

Tabella 5 - Valutazione della qualità delle indagini dirette (Perello, 2011).

Per quanto attiene ai rilevamenti di superficie (punto b nel § 14.1; Tabella 6):

- il *rating* attribuito rimane costante su tutta l'area esaminata. Ciò è dovuto al fatto che gli elementi che lo determinano non subiscono variazioni significative.
- La scala di rilevamento è costante pari a 1:5'000; l'area cartografata nell'intorno del tunnel è sempre di estensione tale da garantire il massimo *rating*.
- La percentuale di affioramento è sempre molto bassa.
- Il metodo di raccolta dei dati è di qualità omogenea e da considerarsi medio-alta.

**Factors contributing to MPQ (mapping potential quality) derivation**

Factor	Value	Rating	Factor	Value	Rating	Factor	Value	Rating	Factor	Value	Rating
Mapping scale	1:50000	1	Mapped area (km <sup>2</sup> ) vs. tunnel depth (km)	2	1	Outcrop percentage	<10%	1	Field data collection method	A	2
	1:25000	3		4	4		30%	4		B	5
	1:10000	7		10	8		60%	8		C	10
	1:5000	8		>20	10		>90%	10	See note (1) below		
			This parameter is not referred to a specific section, but to the whole tunnel layout			This parameter must be evaluated over a distance of some km (0.5–3) around the considered layout, depending on tunnel depth (see also note 2 below)					

Tabella 6 - Valutazione della qualità dei rilievi di superficie (Perello, 2011).

Per quanto attiene alle indagini geofisiche (punto c nel § 14.1; Tabella 7):

- Il rating per questo parametro è praticamente nullo nella maggior parte delle zone investigate; solo nelle zone di imbocco sono localmente presenti delle indagini geofisiche, che comunque contribuiscono in modo relativamente limitato.

**Factors contributing to GPQ (geophysic potential quality) derivation**

Factor	Value	Rating	Factor	Value	Rating	Factor	Value	Rating	Factor	Value	Rating
km of sampling lines in an interval of 2 km	<0,1	1	Method resolution	A	2	Average distance from tunnel axis (m)	2000	1	Average investigated depth vs. tunnel depth	0,25	1
	0,5	4		B	4		500	4		0,75	5
	1	7		C	7		250	7		1	9
	2	9		D	10		0	10		1,2	10
Add the rating (10-Rating) × 0.5 if some line is extrapolable with certainty to the considered stretch; rating 10 with 1 line intersecting the stretch			A=low resolution without validation drillholes; B=high resolution without validation drillholes; C=low resolution with validation drillholes; D=high resolution with validation drillholes			Add the rating (10-Rating) × 0.5 if some line is extrapolable with certainty to the considered stretch; rating 10 with 1 line intersecting the stretch			Rating 10 with 1 line intersecting the stretch		

Tabella 7 - Valutazione della qualità delle indagini geofisiche (Perello, 2011).

## 14.3 Risultati delle valutazioni

### 14.3.1 GN01 – Galleria Montestretto

L'esito dell'analisi GMR per questa galleria indica che l'affidabilità del modello varia da discreta (Fair) a scadente (Poor; Figura 80). Nei tratti ricadenti nella prima casistica, si può escludere che esistano significative deviazioni rispetto al modello previsionale e che esistano elementi geologici critici diversi da quelli previsti. Degli errori rispetto agli elementi geologici previsti possono verificarsi ma rimangono confinati all'ordine del centinaio di metri per quanto riguarda la posizione e del 50% per quanto riguarda gli spessori. Elementi geologici di rilevanza secondaria non prevedibili possono essere presenti, benché la probabilità che ciò si verifichi sia piuttosto bassa.

La seconda casistica è invece verificata tra pk 4+900 e 5+400. In questo caso degli scostamenti e la presenza di elementi geologici significativi diversi da quelli previsti sono possibili, seppur ciò non sia molto probabile. Anche gli errori sul posizionamento dei limiti geologici e sullo spessore degli elementi presenti possono essere maggiori che nelle altre tratte.

Come si osserva dal grafico, gli incrementi più significativi nell'indice GMR sono determinati dalla presenza di sondaggi nella tratta esaminata. Si può pertanto affermare che, se si volessero ulteriormente ridurre le zone di incertezza, il metodo di indagine più efficace per farlo sarebbe la realizzazione di nuovi sondaggi; gli approfondimenti cartografici porterebbero dei benefici ma di limitata entità, soprattutto in ragione della scarsa percentuale di affioramento che rende difficoltoso raggiungere dei buoni livelli di dettaglio nelle previsioni con questa metodologia. Approfondimenti geofisici porterebbero contributi molto limitati.

Va comunque osservato che anche in tratte coperte da un discreto numero di sondaggi si registra la tendenza ad avere previsioni, seppur discrete, tendenti allo scadente. Ciò è dovuto al contesto geologico, che presenta una complessità piuttosto elevata e che pertanto tende a rendere poco efficaci le estrapolazioni dei dati puntuali dei sondaggi. Pertanto, nel progettare eventuali nuovi approfondimenti di indagine si dovrà tenere conto di queste limitazioni e considerare che la densità di indagini deve essere piuttosto alta se si vuole ottenere un elevato grado di affidabilità.

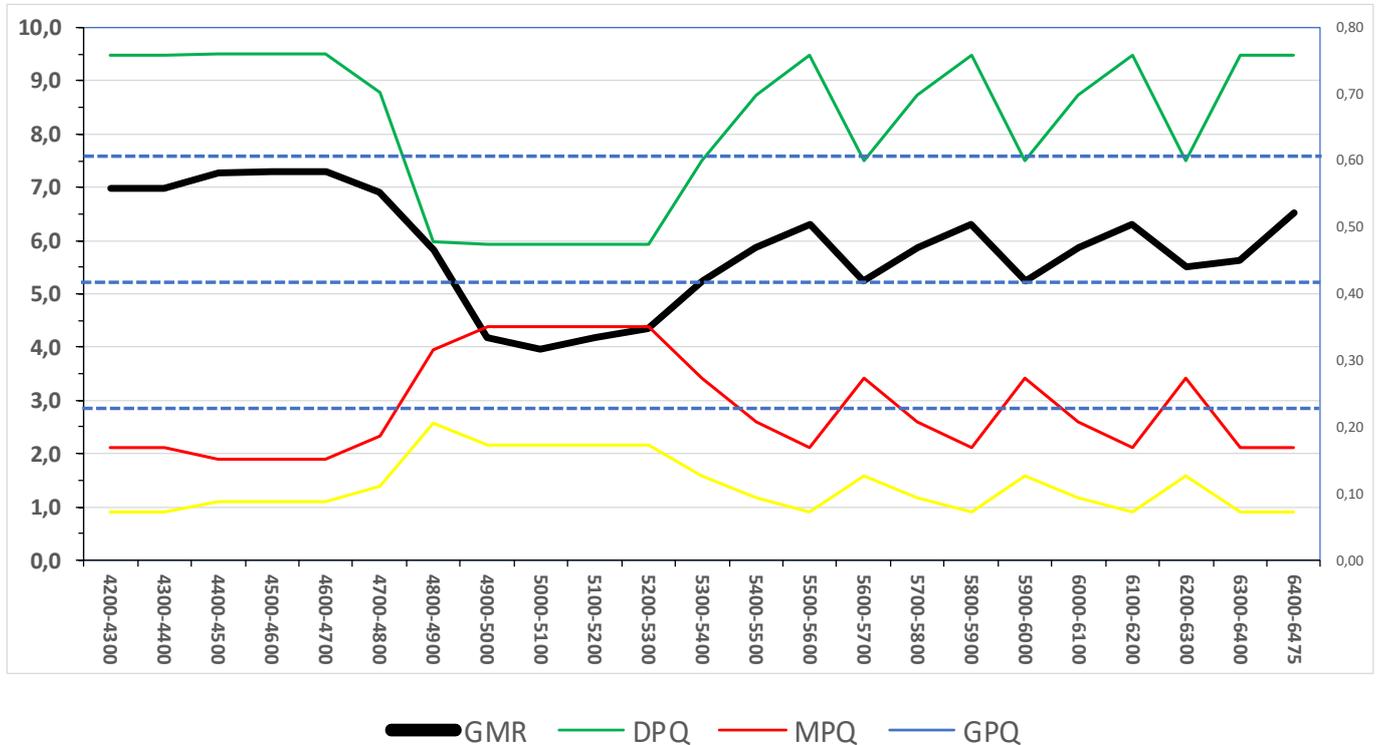
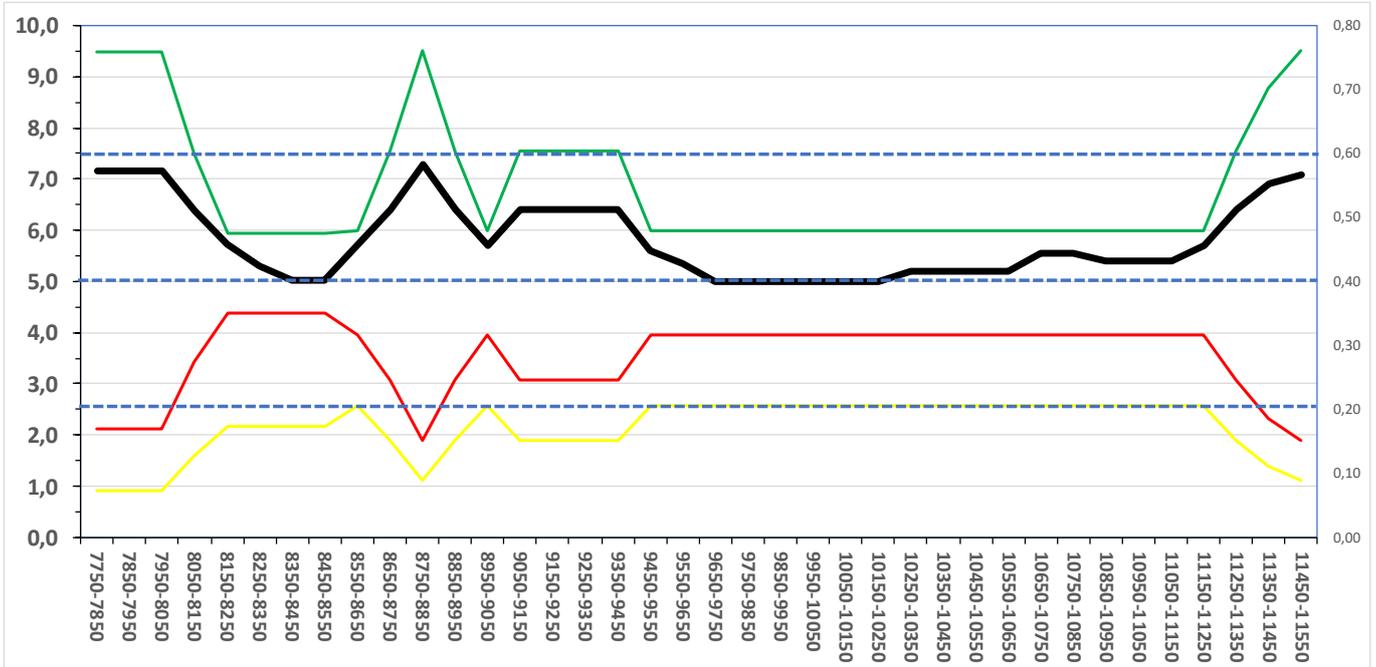


Figura 80 – Diagramma di valutazione dell'affidabilità del modello geologico (GMR) per la galleria GN01 Montestretto. DPQ, MPQ e GPQ sono le curve relative ai pesi dei tre parametri a, b, c.

### 14.3.2 GN02 – Galleria Salso

Per questa galleria l'analisi GMR indica sempre un grado di affidabilità discreto per il modello geologico previsionale (Figura 81). Pertanto, si può escludere che esistano significative deviazioni rispetto al modello previsionale e che esistano elementi geologici critici diversi da quelli previsti. Degli errori rispetto agli elementi geologici previsti possono verificarsi ma rimangono confinati all'ordine del centinaio di metri per quanto riguarda la posizione e del 50% per quanto riguarda gli spessori. Elementi geologici di rilevanza secondaria non prevedibili possono essere presenti, benché la probabilità che ciò si verifichi sia piuttosto bassa.

Va tuttavia notato che in larghe tratte l'indice GMR scende fino a collocarsi in corrispondenza del passaggio tra una classe discreta e scadente. Ciò è dovuto per la maggior parte dei casi alla diminuzione della densità di indagini dirette in tali settori; anche la realizzazione di un solo sondaggio di verifica in queste tratte contribuirebbe stabilire una maggior affidabilità previsionale.



— GMR — DPQ — MPQ — GPQ

Figura 81 – Diagramma di valutazione dell'affidabilità del modello geologico (GMR) per la galleria GN01 Salso. DPQ, MPQ e GPQ sono le curve relative ai pesi dei tre parametri a, b, c.

### 14.3.3 GN03 – Galleria Trinacria

Questa galleria presenta una tratta piuttosto estesa in cui l'indice GMR testimonia un grado di affidabilità scadente delle previsioni (Figura 82). Si tratta in particolare della tratta compresa fra le pk 16+200 e 23+200. All'interno di questo settore, localmente il grado di affidabilità cresce fino a discreto, ma si tratta di sezioni di limitata estensione, mentre esiste invece un'ulteriore sezione, compresa fra le pk 20+600 e 22+200 in cui l'indice testimonia condizioni prossime o addirittura collocate direttamente all'interno del campo tipico di modelli non affidabili (Unreliable).

Questa condizione è legata soprattutto alla bassa densità di indagini dirette, che si giustifica soprattutto per l'elevata copertura topografica della galleria.

In questo caso dunque larghe porzioni della galleria possono essere caratterizzate da scostamenti rispetto al modello previsionale, con eventuale presenza di elementi geologici significativi non previsti.

La presenza di tali scostamenti può essere più o meno probabile da zona a zona, ma comunque da

tenere in considerazione a livello generale.

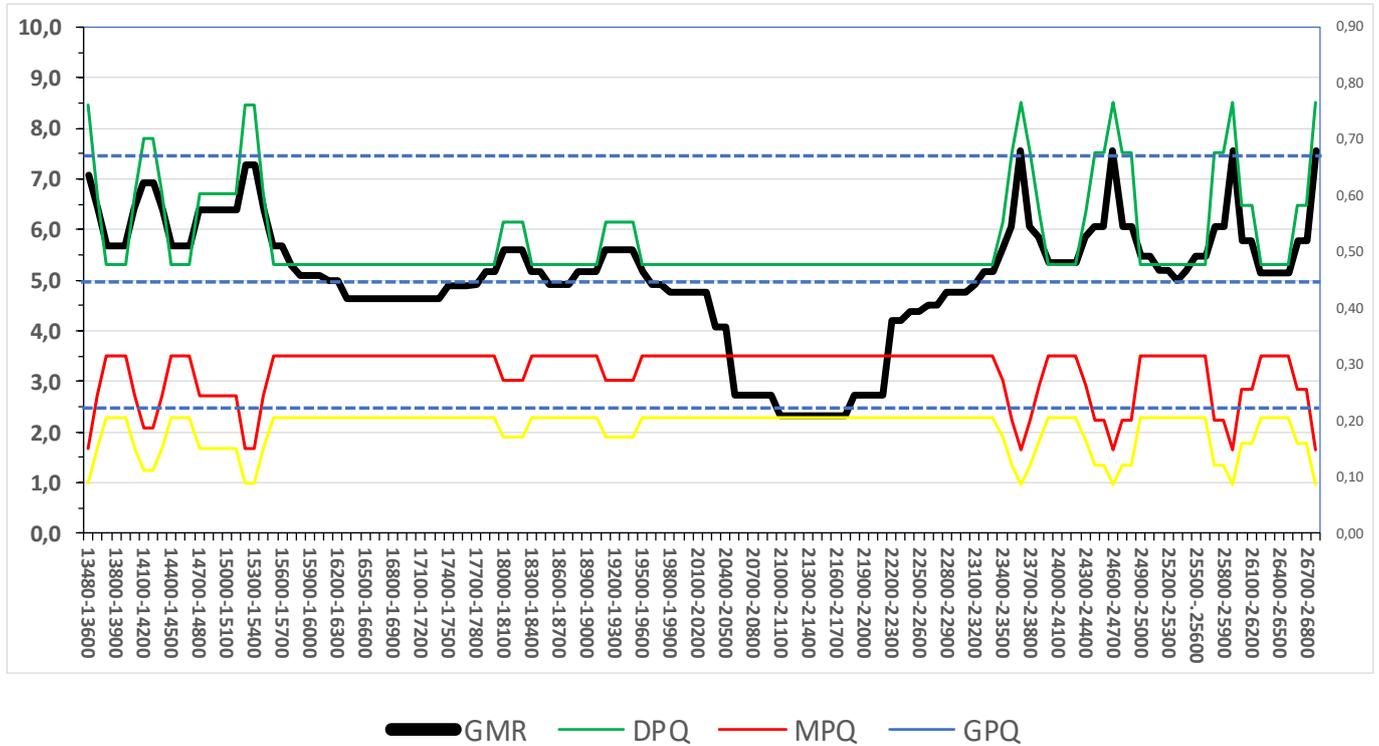


Figura 82 –Diagramma di valutazione dell’affidabilità del modello geologico (GMR) per la galleria GN03 Trinacria. DPQ, MPQ e GPQ sono le curve relative ai pesi dei tre parametri a, b, c.

Un miglioramento della previsione geologica può essere ottenuto solo attraverso la realizzazione di nuove indagini dirette.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - DITTAINO</b> <b>LOTTO 4a: CALTANISSETTA XIRBI - ENNA</b>					
	<b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOMORFOLOGICA ED IDROGEOLOGICA</b>	<b>COMMESSA</b> RS3U	<b>LOTTO</b> 40	<b>CODIFICA</b> D69RG	<b>DOCUMENTO</b> GE 00 01 001	<b>REV.</b> C

## 15 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- AA.VV. (1990) – Carta geologica della Sicilia centro-orientale (scala 1:50.000). S.EL.CA., Firenze.
- Abate B., Renda P. & Tramutoli M. (1988) – Note illustrative della carta geologica dei Monti di Termini Imerese e delle Madonie occidentali (Sicilia centro-settentrionale). Memorie della Società Geologica Italiana, 41, 475-505.
- Accordi B. (1958) – Relazione sui rilevamenti geologici del 1956 nei monti Nebrodi (Sicilia Settentrionale). Bollettino del Servizio Geologico d'Italia, 79, 929-949.
- Agnesi V., De Cristofaro D., Di Maggio C., Macaluso T., Madonia G. & Messana V. (2000) – Morphotectonic setting of the Madonie area (central northern Sicily). Memorie della Società Geologica Italiana, 55, 373-379.
- Alfieri A., Bafuno G., Collalti M., Giglio I., Renda S. & Ricco S. (1994) – I dissesti in Sicilia. Primi risultati del censimento dei dissesti nei centri abitati. Studio della franosità del bacino del Torrente Fichera (Fiume Imera Settentrionale). Rivista Mineraria Siciliana, 30, 51-65.
- Amodio-Morelli L., Bonari G., Colonna V., Dietrich D., Giunta G., Ippoliti F., Liguori V., Lorenzini S., Paglionico A., Perrone V., Piccarreta G., Russo M., Scandone P., Zanettin Lorenzini E. & Zuppata A. (1976) – L'arco Calabro-Peloritano nell'orogene Appenninico-Maghrebide. Memorie della Società Geologica Italiana, 17, 1-60.
- Antonioli F., Ferranti L., Lambeck K., Kershaw S., Verrubbi V. & Dai Pra G. (2006) – Late Pleistocene to Holocene record of changing uplift-rates in southern Calabria and northeastern Sicily (southern Italy, Central Mediterranean Sea). Tectonophysics, 422, 23-40.
- APAT (2006) - Fenomeni di dissesto geologico-idraulico sui versanti. Classificazione e simbologia. Manuali e Linee Guida 39/2006, 177 pp.
- APAT (2007) – Rapporto sulle frane in Italia: il Progetto IFFI. Metodologia, risultati e rapporti regionali. Rapporti APAT, 78, 681 pp.
- Argnani A., Mazarini F., Bonazzi C., Bisson M., Isola I., 2013. The deformation offshore of Mount Etna as imaged by multichannel seismic reflection profiles. Journal of Volcanology and Geothermal

Research 251: 50-64.

- Aurelli A., Contino A. & Cusimano G. (2008) – Aspetti idrogeologici e vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi delle Madonie (Sicilia centro-settentrionale). Note illustrative della "Carta delle Vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi delle Madonie", scala 1:50'000. Regione Siciliana-Azienda Regionale Foreste Demaniali, Università degli studi di Palermo, Dipartimento di Geologia e Geodesia.
- Aurelli A., Contino A., Cusimano G., Fazio F. & Silluzio C. (2001) – Groudwater vulnerability of the Madonie mountains. In: Mudry J. & Zwaler F. (Eds.), Proceeding of the 7th Conference on Limestone Hydrogeology and Fissured Media, Besançon, France, 20-22 Settembre 2001.
- Azzaro R. & Barbano M.S. (2000) – Analysis of seismicity of Southeastern Sicily: proposal of a tectonic interpretation. *Annali di Geofisica*, 43, 1-18.
- Azzaro R., Barbano M.S., Rigano R. & Antichi B. (2000) – Contributo alla revisione delle zone sismogenetiche della Sicilia. Le ricerche del GNNT nel campo della pericolosità sismica (1996-99), CNR-Gruppo Nazionale per la Difesa Terremoti, Roma 31-38.
- Baratta M. (1901) – I terremoti d'Italia. Arnaldo Forni, Bologna.
- Barbano M.S. & Rigano R. (2001) – Earthquake sources and seismic hazard in the south-eastern Sicily. *Annali di Geofisica*, 44, 723-738.
- Bello M., Franchino A. & Merlini S. (2000) – Structural model of eastern Sicily. *Memorie della Società Geologica Italiana*, 55, 61-70.
- Bianca M., Monaco C., Tortorici L. & Cernobori L. (1999) – Quaternary normal faulting in south-eastern Sicily (Italy): a seismic source for the 1693 large earthquake. *Geophysical Journal International*, 139, 370-394.
- Bianchi F., Carbone S., Grasso M., Invernizzi G., Lentini F., Longaretti G., Merlini S. & Monstardini F. (1987) – Sicilia orientale: profilo geologico Bebrodi-Iblei. *Memorie della Società Geologica Italiana*, 38, 429-458.
- Bonardi G., Cello G., Perrone V., Tortorici L., Turco E. & Zuppetta A. (1982) – The evolution of the northern sector of the Calabria-Peloritani arc in a semiquantitative palynspastic restoration.

Bollettino della Società Geologica Italiana, 101, 259-284.

Bonardi G., Giunta G., Liguori V., Perrone V., Russo M. & Zuppetta A. (1976) – Schema geologico dei Monti Peloritani. Bollettino della Società Geologica Italiana, 95, 49-74.

Bonforte A., Catalano S., Maniscalco R., Pavano F., Romagnoli G., Sturiale G., Tortorici G. (2015) - Geological and geodetic constraints on the active deformation along the northern margin of the Hyblean Plateau (SE Sicily). Tectonophysics 640-641: 80-89.

Boschi E., Ferrari G., Gasperini P., Guidoboni E., Smriglio G. & Valensise G. (1995) – Catalogo dei forti terremoti in Italia dal 461 a.c. al 1980. ING-S.G.A., Bologna, 970 pp., con database su CD-ROM.

Boschi E., Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Valensise L. & Gasperini P. (2000) – Catalogue of strong Italian Earthquakes from 461 B.C. to 1997. Annali di Geofisica, 43, 609-868.

Boschi E., Guidoboni E., Ferrari G., Valensise G. & Gasperini P. (1997) – Catalogo dei forti terremoti in Italia dal 461 a.C al 1980. ING-SGA, Bologna.

Branca S., Azzaro R., De Beni E., Chester D., Duncan A. (2015) - Impacts of the 1669 eruption and the 1693 earthquakes on the Etna Region (Eastern Sicily, Italy): An example of recovery and response of a small area to extreme events. Journal of Volcanology and Geothermal Research 303, Supplement C: 25-40.

Burollet P.F., Mugniot G.M. & Sweeney P. (1978) – The geology of the Pelagian Block: the margins and basins of southern Tunisia and Tripolitania. In: Narin A., Kaner W. & Stelhi F.G. (eds): The ocean basins and margins. Plenum Press, New York, 331-339.

Butler B.C.M. & Bell J.D. (1996) – Lettura e interpretazione delle carte geologiche. Zanichelli Editore, Bologna.

Butler et alii (1995) – Tectonic and sequence stratigraphy in Messinian basin Sicily: constraints on the initiation and termination on the Mediterranean salinity crisis – GSA Bull. Apr. 1995, v. 107; no. 4; p. 425-439.

Carbone S., Grasso M. & Lentini F. (1982) – Considerazioni sull'evoluzione geodinamica della Sicilia sud-orientale dal Cretacico al Quaternario. Memorie della Società Geologica Italiana, 24, 362-

386.

- Carbone S., Catalano S., Grasso M., Lentini F., Monaco C. (1990) - Carta geologica della Sicilia centro-orientale. Scala 1:50.000.
- Carbone S., Lentini F. & Branca S. (2010) – Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50,000. Foglio 633 Paternò. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale.
- Castello B., Selvaggi G., Chiarabba c. & Amato a. (2006) – CSI, Catalogo della sismicità italiana 1981-2002, versione 1.1. INGV-CNT, Roma. <http://www.ingv.it/CSI/>.
- Catalano R. & D'Argenio B. (1982) – Schema geologico della Sicilia occidentale. In: Catalano R. & D'Argenio B. (eds): Guida alla geologia della Sicilia Occidentale, Memorie Società Geologica Italiana, suppl. A, 24, 9-41, Palermo.
- Catalano R., Avellone G., Basilone L., Contino A. & Agate M. (2011) – Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50'000. Foglio 609 Termini Imerese – Capo Plaia. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale.
- Catalano R., Di Stefano P., Sulli A. & Vitale F.P. (1996) – Paleogeography and structure of the central Mediterranean: Sicily and its offshore area. *Tectonophysics*, 260, 291-323.
- Catalano R., Franchino A., Merlini S. & Sulli A. (2000) – Central western Sicily structural setting interpreted from seismic reflection profiles. *Memorie della Società Geologica Italiana*, 55, 5-16.
- Catalano S. & De Guidi G. (2003) – Late Quaternary uplift of north-eastern Sicily: relation with the active normal faulting deformation. *Journal of Geodynamics*, 36, 445-467.
- Catalano S., De Guidi G., Romagnoli G., Torrisi S., Tortorici G. & Tortorici L. (2007) – The migration of plate boundaries in SE Sicily: influence on the large-scale kinematic model of the African Promontory in Southern Italy. *Tectonophysics*, doi:10.1016/j.tecto. 2007.12.003.
- Cello G., Tortorici L., Martini N. & Paltrinieri W. (1989) – Structural styles in the frontal zones of the Southern Apennines, Italy: an example from the Molise district. *Tectonics*, 8, 753-768.
- Channell J.E.T., Oldow J., Catalano R., D'Argenio B. (1990) - Paleomagnetically Determined Rotations in the Western Sicilian Fold and Thrust Belt. *Tectonics* 9: 641-660.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - DITTAINO</b> <b>LOTTO 4a: CALTANISSETTA XIRBI - ENNA</b>					
	<b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOMORFOLOGICA ED IDROGEOLOGICA</b>	<b>COMMESSA</b> RS3U	<b>LOTTO</b> 40	<b>CODIFICA</b> D69RG	<b>DOCUMENTO</b> GE 00 01 001	<b>REV.</b> C

CNR-PFG (1985) – Catalogo dei terremoti italiani dall’anno 1000 al 1980. In: Postpischl D. (ed), CNR-PFG V. 2B, Bologna.

Cogan J., Rogo L., Grasso M. & Lerche I. (1989) – Flexural tectonics of southeastern Sicily. *Journal of Geodynamics*, 11, 189-241.

Contino A. (2002) – Geologia e Geomorfologia della bassa valle del fiume Imera settentrionale. In: Belvedere O., Bertini A., Boschian G., Burgio A., Contino A., Cucco R. M. & Lauro D., Himera I (eds) *Prospezione archeologica nella valle dell’Imera*. Dipartimento di Beni Culturali Storico – archeologici, Socio – antropologici e Geografici, Sezione Archeologica, Università degli Studi di Palermo, pp.25 – 48.

Cruden D.M. & Varnes D.J. (1996) – Landslide types and processes. In: Turner A.K. & Schuste R.L. (eds): *Landslide investigation and mitigation*. Special report 247, National Academy of Sciences. 36-75.

Dall’Aglia M. & Quattrocchi F. (1991) – Relazione preliminare sulle misure geochimiche effettuate dopo il terremoto del 13/12/1990 nella Sicilia orientale. In: Boschi E. & Basili A. (eds): *Contributi allo studio del terremoto della Sicilia orientale del 13 Dicembre 1990*. I.N.G., Pubbl. n 537, 127-144, Roma.

Di Geronimo I., Ghisetti F., Lentini F. & Vezzani L. (1978) – Lineamenti neotettonici della Sicilia orientale. *Memorie della Società Geologica Italiana*, 19, 543-549.

Di Grande A., Grasso M., Lentini F. & Scamarda G. (1976) – Facies e stratigrafia dei depositi pliocenici tra Leoforte e Centuripe (Sicilia centro-orientale). *Bollettino della Società Geologica Italiana*, 95, 1319-1345.

DISS Working Group (2010) – Database of individual Seismogenic Sources (DISS), version 3.1.1., disponibile in internet all’indirizzo <http://diss.rm.ingv.it/diss/index.html>).

DISS Working Group (2018) - Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.1: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

Ferrara V. & Marchese G. (1977) – Ricerche idrogeologiche su alcuni acquiferi alluvionali della Sicilia

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - DITTAINO</b> <b>LOTTO 4a: CALTANISSETTA XIRBI - ENNA</b>					
	<b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOMORFOLOGICA ED IDROGEOLOGICA</b>	<b>COMMESSA</b> RS3U	<b>LOTTO</b> 40	<b>CODIFICA</b> D69RG	<b>DOCUMENTO</b> GE 00 01 001	<b>REV.</b> C

orientale. Atti dell'Accademia Gioenia di Scienze Naturali di Catania, 9, 189-230.

Finetti I., Lentini F., Carbone S., Catalano S. & Del Ben A. (1996) – Il Sistema Appennino Meridionale-Arco Calabro-Sicilia nel Mediterraneo centrale: studio geologico-geofisico. Bollettino della Società Geologica Italiana, 115, 529-559.

Finetti I., Lentini F., Carbone S., Del Ben A., Di Stefano A., Forlin E., Guarnieri P., Pipan M. & Prizzon A. (2005) – Geological outline of Sicily and lithospheric tectono-dynamics of its Tyrrhenian Margin from new CROP seismic data. In: Finetti I. (ed), "CROP Deep Seismic exploration of the Mediterranean Region. Spec. Vol. Elsevier, chapter 15, 319-376.

Francaviglia A. (1960) – Appunti sulla geologia del M. Judica (Sicilia centro-orientale). Bollettino della Società Geologica Italiana, 79, 197-206.

Galadini F., Meletti C. & Vittori E. (2000) – Stato delle conoscenze sulle faglie attive in Italia: elementi geologici di superficie. Risultati del progetto 5.1.2. "Inventario delle faglie attive e dei terremoti ad esse associabili", CNE Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Roma, 1-30.

Gasparini C., Iannaccone G., Scandone P. & Scarpa R. (1982) – Seismotectonics of the Calabrian Arc. Tectonophysics, 82, 267-286.

Ghisetti F. & Vezzani L. (1980) – The structural features of the Iblean Plateau and of the Mount Judica area (South-Eastern Sicily): a microtectonic contribution to the deformational history of the Calabrian Arc. Bollettino della Società Geologica Italiana, 99, 57-102.

Ghisetti F. & Vezzani L. (1984) – Thin-skinned deformations of the western Sicily thrust belt and relationships with crustal shortening: Mesostructural data on the Mt. Kumeta-Alcàntara Fault Zone and related structures. Bollettino della Società Geologica Italiana, 103, 129-157.

GNDT (1996) – Zonazione sismogenetica del territorio nazionale ed aree limitrofe ZS 4.0. Atti del Convegno Annuale del Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, 1, 119-135.

Granath J.W. & Casero P. (2004) – Tectonic setting of the petroleum system of Sicily. In: Swenner R., Roure F. & Granath J.W. (eds): Deformation, fluid flow, and reservoir appraisal in foreland and thrust belts. AAPG Hedberg Series, n. 1, 391-411.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - DITTAINO</b> <b>LOTTO 4a: CALTANISSETTA XIRBI - ENNA</b>					
	<b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOMORFOLOGICA ED IDROGEOLOGICA</b>	<b>COMMESSA</b> RS3U	<b>LOTTO</b> 40	<b>CODIFICA</b> D69RG	<b>DOCUMENTO</b> GE 00 01 001	<b>REV.</b> C

Grasso M. & Butler R.W.H (1991) – “Tectonic controls on the deposition of late Tortonian sediments in the Caltanissetta Basin of central Sicily” MEM. SOC. GEOL. IT., 47 (1191), 313-324.

Gruppo di Lavoro CPTI (1999) – Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani. ING, GNDT, SGA, SSN. 92 pp.

Gruppo di Lavoro CPTI (2004) - Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, versione 2004 (CPTI04). INGV, Bologna.

Guerrera F. & Wezel F.C. (1974) – Nuovi dati stratigrafici sui flysch oligo-miocenici siciliani e considerazioni tettoniche relative. Rivista Mineraria Siciliana, 145-147, 27-51.

Hugonie G. (1979) – L'évolution géomorphologique de la Sicile septentrionale. Thèse Lettres (Géomorphologie). Université de Paris-Sorbonne, 2, 565-884.

Interbartolo F. (2013) - I bacini sin-orogenici al tetto della catena siciliana. Evoluzione tra il Serravalliano superiore e il Messiniano inferiore. Tesi di dottorato, Università di Palermo, 204 pp.

ISPRA (2010) – Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50'000. Foglio 610 (Castelbuono). Servizio Geologico d'Italia.

ISPRA (2010) – Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50'000. Foglio 633 (Paternò). Servizio Geologico d'Italia.

ISPRA (2011) – Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50'000. Foglio 609 (Termini Imerese). Servizio Geologico d'Italia.

ISPRA (2014) – Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50'000. Foglio 631 (Caltanissetta). Servizio Geologico d'Italia.

ISPRA (2018) – Aggiornamento ed integrazioni delle linee guida della Carta Geomorfologica d'Italia alla scala 1:50.000. Quaderni serie III, Vol. 13, Fascicolo I, 93 pp.

Jacques E., Monaco C., Tapponier P., Tortorici L. & Winter T. (2001) – Faulting and earthquake triggering during the 1783 Calabria seismic sequence. Geophysical Journal International, 147, 499-516.

Lanzafame G., Leonardi A. & Neri M. (1999) – Retrocoprimiento medio-pleistoceno di Argille Scagliose a Serra San Biagio (Sicilia orientale): evidenze stratigrafiche e tettoniche. Rend. Fis. Acc. Lincei, 9, 63-80.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - DITTAINO</b> <b>LOTTO 4a: CALTANISSETTA XIRBI - ENNA</b>					
	<b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOMORFOLOGICA ED IDROGEOLOGICA</b>	<b>COMMESSA</b> RS3U	<b>LOTTO</b> 40	<b>CODIFICA</b> D69RG	<b>DOCUMENTO</b> GE 00 01 001	<b>REV.</b> C

- Lavecchia G., Ferrarini F., De Nardis R., Visini F. & Barbano M.S. (2007b) – Active thrusting as a possible seismogenic source in Sicily (Southern Italy): Some insights from integrated structural–kinematic and seismological data. *Tectonophysics*, 445, 145-167.
- Lavecchia G., Ferrarini F., De Nardis R., Visini F., Barbano M.S. (2007) - Seismogenic evidence of ongoing compression in eastern-central Italy and mainland Sicily: a comparison. *Bollettino della Società Geologica Italiana* 126: 209-222.
- Lentini F. & Vezzani L. (1978) – Tentativo di elaborazione di uno schema strutturale della Sicilia orientale. *Memorie della Società Geologica Italiana*, 19, 495-500.
- Lentini F. (1974) – Caratteri stratigrafici e strutturali della zona di M. Judica (Sicilia Orientale). *Rivista Mineraria Siciliana*, 25, 1-22.
- Lentini F. (1982) – The geology of the Mt. Etna basement. *Memorie della Società Geologica Italiana*, 23, 7-25.
- Lentini F., Carbone S. & Grasso M. (1984) – Carta geologica della Sicilia sud-orientale, scala 1:100'000. S.EL.CA., Firenze.
- Lentini F., Carbone S., Catalano S., & Grasso M. (1995) – Principali lineamenti strutturali della Sicilia nord-orientale. *Studi Geologici Camerti*, vol. spec. 1995/2, 319-329.
- Lentini F., Carbone S., Catalano S., Grasso M. & Monaco C. (1990) – Principali elementi strutturali del thrust belt appenninico-maghrebide in Sicilia centro-orientale. *Memorie della Società Geologica Italiana*, 45, 495-502.
- Lentini F., Carbone S., Catalano S., Grasso M. & Monaco C. (1991) – Presentazione della carta geologica della Sicilia centro-orientale. *Memorie della Società Geologica Italiana*, 47, 145-156.
- Lentini F., Grasso M. & Carbone S. (1987) – Introduzione alla geologia della Sicilia e guida all'escursione. In: Lentini F., Grasso M. & Carbone S. (eds): *Sistemi avanfossa-avampaese lungo la Catena Appenninico-Maghrebide*. Convegno della Società Geologica Italia, Naxos-Pergusa, Aprile 1987, 60 pp.
- Lentini F & Carbone S. (2014) - *Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia in scala 1:250.000. Geologia della Sicilia*. Servizio Geologico d'Italia – ISPRA, Vol. XCV, 409 pp.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - DITTAINO</b> <b>LOTTO 4a: CALTANISSETTA XIRBI - ENNA</b>					
	<b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOMORFOLOGICA ED IDROGEOLOGICA</b>	<b>COMMESSA</b> RS3U	<b>LOTTO</b> 40	<b>CODIFICA</b> D69RG	<b>DOCUMENTO</b> GE 00 01 001	<b>REV.</b> C

- Lickorish H., Grasso M., Butler R.W.H., Argnani A. & Maniscalco R. (1999) – Structural styles and regional tectonic setting of the “Gela Nappe” and frontal part of the Maghrebian thrust belt in Sicily. *Tectonics*, 18, 655-668.
- Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D’Amico S., Conte S., Rocchetti E. (2016) - DBMI15, the 2015 version of the Italian Macroseismic Database. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.
- Maniscalco R., De Guidi G., Pedley M., Sturiale G. & Grasso M. (2010) - Geological map of the Corvillo and Mandre Basins (Caltanissetta Basin, Central Sicily): Explanatory notes. *Ital. J. Geosci. (Boll. Soc. Geol. It.)*, Vol. 129, No. 2 (2010), pp. 316-326, DOI: 10.3301/IJG.2010.04
- Makris J., Nicolich R. & Weigel W. (1986) – A seismic study in the western Ionian Sea. *Annals of Geophysics*, 6, 665-678.
- Meletti C. & Montaldo V. (2007) – Stime di pericolosità sismica per diverse probabilità di superamento in 50 anni: valori di ag. Progetto DPC-INGV S1.
- Meletti C. & Valensise G. (2004) – Zonazione sismogenetica ZS9 – App.2 al Rapporto Conclusivo. Gruppo di Lavoro per la redazione della mappa di pericolosità sismica, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.
- Meletti C., Patacca E. & Scandone P. (2000) – Construction of a seismo-tectonic model: the case of Italy. *Pure and Applied Geophysics*, 157, 11-35.
- Monaco C. & De Guidi G. (2006) – Structural evidence for Neogene rotations in the eastern Sicilian fold and thrust belt. *Journal of Structural Geology*, 28, 561-574.
- Monaco C. & Tortorici L. (2000) – Active faulting in the Calabrian arc and eastern Sicily. *Journal of Geodynamics*, 29, 407-424.
- Monaco C., Bianca M., Catalano S., De Guidi G. & Tortorici L. (2002) – Sudden change in the late Quaternary tectonic regime in eastern Sicily: evidences from geological and geomorphological features. *Bollettino della Società Geologica Italiana*, vol. spec. 1, 901-913.
- Monaco C., De Guidi G. & Ferlito C. (2010) – The Morphotectonic map of Mt. Etna. *Bollettino della Società Geologica Italiana*, 129, 408-428.

- Monaco C., Mazzoli S. & Tortorici L. (1996) – Active thrust tectonics in western Sicily (southern Italy): the 1968 Belice earthquake sequence. *Terra Nova*, 8, 372-381.
- Monaco C., Tortorici L. & Paltrinieri W. (1998) – Structural evolution of the Lucanian Apennines, southern Italy. *Journal of Structural Geology*, 20, 617-638.
- Mostardini F. & Merlini S. (1986) – Appennino centro-meridionale. Sezioni geologiche e proposta di un modello strutturale. *Memorie della Società Geologica Italiana*, 35, 177-202.
- Nigro F. & Renda P. (2000) – Un modello di evoluzione tettono-sedimentaria dell’avanfossa neogenico siciliana. *Bollettino della Società Geologica Italiana*, 119, 667-686.
- Ogniben L. (1953) – Argille Scagliose ed Argille Brecciate in Sicilia. *Bollettino del Servizio Geologico d’Italia*, 75, 281-289.
- Ogniben L. (1960) – Nota illustrativa dello Schema geologico della Sicilia nord-orientale. *Rivista Mineraria Siciliana*, 64-65, 183-212.
- Ogniben L. (1969) – Schema introduttivo alla geologia del confine calabro-lucano. *Memorie della Società Geologica Italiana*, 8, 453-763.
- Pasquarè G., Abbate E., Castiglioni G.B., Merenda M., Mutti E., Ortolani F., Parotto M., Pignone R., Polino R. & Sassi F.P. (1992) – Carta geologica d’Italia 1:50’000, Guida al Rilevamento. Quaderni serie III, 1, 203 pp.
- Patacca E., Scandone P., Giunta G. & Liguori V. (1979) – Mesozoic paleotectonic evolution of the Ragusa zone (southern Sicily). *Geologica Romana*, 18, 331-369.
- Perello P. (2011) - Estimate of the reliability in geological forecasts for tunnels: toward a structured approach. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 44, 6, 671-694.
- Pescatore T., Renda P. & Tramutoli M. (1978) – Facies ed evoluzione sedimentaria del Bacino Numidico nelle Madonie Occidentali (Sicilia). *Memorie della Società Geologica Italiana*, 38, 297-315.
- Postpischl D. (1985) – Catalogo dei forti terremoti italiani dall’anno 1000 al 1980. CNR, Progetto Finalizzato Geodinamica.
- Regione Sicilia (2005) – Piano stralcio Assetto Idrogeologico Regione Sicilia.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - DITTAINO</b> <b>LOTTO 4a: CALTANISSETTA XIRBI - ENNA</b>					
	<b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOMORFOLOGICA ED IDROGEOLOGICA</b>	<b>COMMESSA</b> RS3U	<b>LOTTO</b> 40	<b>CODIFICA</b> D69RG	<b>DOCUMENTO</b> GE 00 01 001	<b>REV.</b> C

Regione Sicilia (2007) – Piano di tutela delle acque della Sicilia.

Rigano R., Antichi B., Arena L., Azzaro R. & Barbano M.S. (1999) – Sismicità e zonazione sismogenetica in Sicilia occidentale. Atti del 17° Convegno Nazionale GNGTS.

Rigo M. & Cortesini A. (1961) – Contributo alla conoscenza strutturale della Sicilia sud-orientale. Bollettino del Servizio Geologico d'Italia, 81, 349-369.

Roveri M., Lugli S., Manzi V. & Schreiber B.C. (2008) - The Messinian salinity crisis: a sequence-stratigraphic approach. In: Amorosi A., Haq B.U. & Sabato L. (eds.) Advances in Application of Sequence Stratigraphy in Italy. GeoActa, Special Publication 1 (2008), pp. 117-138.

Rovida A., Camassi R., Gasperini P., Stucchi M. (2011) - Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, versione 2011. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Milano.

Saroli M., Stramondo S., Moro M. & Doumaz F. (2005) – Movements detection of deep seated gravitational slope deformations by means of InSAR data and photogeological interpretation: northern Sicily case study. Terra Nova, 17, 35-43.

Scalia S. (1909) – Il gruppo del Monte Judica. Bollettino della Società Geologica Italiana, 28, 269-340.

Scandone P., Giunta G. & Liguori V. (1974) – The connection between the Apulia and Sahara continental margins in the Southern Apennines and in Sicily. Memorie della Società Geologica Italiana, 13, 317-323.

Servizio Geologico d'Italia - ISPRA - ITHACA, Italy HAZARD from CAPABLE faults. Disponibile in internet all'indirizzo <http://www.isprambiente.gov.it/it/progetti/suolo-e-territorio-1/ithaca-catalogo-delle-faglie-capaci>.

SgROI T., de Nardis R. e Lavecchia G. (2012) - Crustal structure and seismotectonics of central Sicily (southern Italy): new constraints from instrumental seismicity. Geophys. J. Int. 189, 1237–1252.

Speranza F., Maniscalco R., Mattei M., Di Stefano A., Butler R.W.H., Funicello R. (1999) - Timing and magnitude of rotations in the frontal thrust systems of south-western Sicily. Tectonics 18: 1178-1197.

Stucchi M., Camassi R., Rovida A., Locati M., Ercolani E., Meletti C., Migliavacca P., Bernardini F. & Azzaro

R. (2007) – DBMI04, il Database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI04.

Tansi C., Muto F., Critelli S. & Iovine G. (2007) – Neogene-Quaternary strike-slip tectonics in the central Calabrian Arc (southern Italy). *Journal of Geodynamics*, 43, 393-414.

Tavarnelli E., Renda P., Pasqui V., Tramutoli M. (2003) - The effects of post-orogenic extension on different scales; an example from the Apennine–Maghrebide fold-and-thrust belt, SW Sicily, *Terra Nova*, 15, 1–7.

Torelli L., Grasso M., Mazzoldi G. & Peis D. (1998) – Plio-Quaternary tectonic evolution and structure of the Catania foredeep, the northern Hyblean Plateau and the Ionian shelf (SE Sicily). *Tectonophysics*, 298, 209-221.

Torrisi S., Catalano S., Romagnoli G. & Tortorici G. (2008) – Tettonica di indentazione ed estrusione laterale in Sicilia Orientale. *Rendiconti online della Società Geologica Italiana*, 1, 148-152.

Tortorici L., Cocina O., Monaco C. & Tansi C. (1995) – Recent and active tectonics of the Calabrian Arc (Southern Italy). *Tectonophysics*, 243, 37-55.

Valensise G. & D’Addezio G. (1994) – Il contributo della geologia di superficie all’identificazione delle strutture sismogenetiche della Piana di Gioia Tauro. *ING Publications*, 559, 34 pp.

Valensise G. & Pantosti D. (2001) – The investigation of potential earthquake sources in peninsular Italy: a review. *Journal of Seismology*, 5, 287-306.

Varnes D.J. (1976) – Slope movement types and processes. Special Report 176, National Academy of Sciences, Washington.

Wezel F.C. (1974) – Flysch successions and the tectonic evolution of Sicily during the Oligocene and Early Miocene. In: Alvarez W. & Gohrbandt K.H.A. (Eds.): *Geology and History of Sicily*. Petroleum Expl. Soc. Libya, pp.1-23.