



Università
Ca' Foscari
Venezia

Corso di Laurea Magistrale
in Scienze Ambientali

Classe LM-75 Scienze e Tecnologie per l'Ambiente e il Territorio

Tesi di Laurea

**Geomorfologia e geoarcheologia della
pianura costiera della laguna di Marano
e Grado attraverso sistemi informativi
geografici e telerilevamento**

Relatore

prof. Claudio Silvestri

Correlatori

prof. Alessio Rovere

dott.ssa Arianna Traviglia

Laureando

Pietro Sensi

Matricola 870515

Anno Accademico

2022 / 2023

Abstract

Gli ambienti di pianura costiera e lagunari sono da sempre contesti attrattivi per l'insediamento dell'uomo, ma il loro studio è reso problematico dagli alti livelli di antropizzazione che ad oggi insistono su questi territori, come l'impatto dei sistemi di coltivazione agricola moderna e dalle intense attività di bonifica che hanno reclamato ampie porzioni di suolo durante gli ultimi secoli. L'obiettivo principale di questo lavoro di tesi è la ricostruzione e l'interpretazione del paesaggio antico, inteso come palinsesto di eventi originati dalle dinamiche di interazione tra uomo e ambiente, dell'area della pianura costiera e della laguna di Marano e Grado (Udine, Italia). Tale obiettivo è stato perseguito adottando un approccio multidisciplinare caratterizzato dall'analisi comparata di dati di natura geo-morfologica e storico-archeologica. La prima parte di analisi è costituita dalla raccolta di dati di origine cartografica, telerilevamento e bibliografici e un'ampia analisi degli archivi archeologici disponibili per l'area in esame. I dati ambientali hanno permesso di produrre un nuovo modello digitale del terreno (DTM), mai sperimentato prima, che ha raccolto in un'unica visualizzazione la topografia lagunare, costiera e della pianura. I database archeologici, molto eterogenei tra di essi, sono stati quindi accorpati e normalizzati nel linguaggio e nella struttura in modo da permettere di esaminare l'evoluzione insediativa e la presenza umana nei vari ambienti attraverso cinque epoche storiche dalla preistoria fino al medioevo. Questo lavoro ha permesso di migliorare gli aspetti di precisione e accuratezza nella individuazione e caratterizzazione delle principali forme morfologiche che insistono sul territorio di studio e di analizzare la distribuzione e caratterizzazione funzionale dei siti archeologici durante i secoli. Inoltre, sono state create delle nuove mappe contenenti delle modellazioni del livello delle acque marine in relazione alla geomorfologia e ai record archeologici individuati. Quest'ultime vertono alla ricostruzione del paesaggio antico per alcuni dei periodi storici analizzati, aggiungendo delle informazioni preziose alle ricostruzioni che fino ad oggi sono state eseguite solamente sulla base di analisi di log sedimentologici eseguiti tramite carotaggi del terreno. L'approccio geoarcheologico adottato combina i livelli ambientale e archeologico, permettendo di avanzare delle ipotesi, per ogni periodo storico, riguardo le scelte insediative e di sfruttamento delle peculiarità dei vari ambienti come zone umide, zone sopraelevate morfologicamente al riparo da eventi di marea e di esondazioni e all'evoluzione dei sistemi fluviali, lagunari e marini che hanno caratterizzato l'ambiente di transizione della laguna di Marano e Grado.

Indice

1. Introduzione	1
2. Contesto Geologico e Geomorfologico	4
2.1 Area di studio	4
2.2 La bassa pianura friulana.....	5
2.2.1 Unità geologiche.....	7
2.3 Evoluzione dell'area lagunare di Marano e Grado.....	9
2.3.1 La laguna nel periodo preistorico: VIII millennio a.C. – metà III millennio a.C....	9
2.3.2 La laguna nel periodo protostorico: metà III millennio a.C. – VIII secolo a.C....	12
2.3.3 La laguna nel periodo romano: II secolo a.C. – V secolo d.C.	13
2.3.4 La laguna nel periodo tardoantico e altomedievale: V secolo d.C. – X secolo d.C.	13
2.3.5 La laguna nel periodo medievale: X secolo d.C. – XV secolo d.C.....	14
2.4 Analisi della variazione del livello del mare	15
3. Materiali e metodi	20
3.1 Strumenti di analisi remote sensing e GIS.....	20
3.1.1 I software GIS.....	20
3.1.2 Funzionamento LiDAR topografici e batimetrici	20
3.2 Analisi topografica e batimetrica dell'area di studio	21
3.2.1 Creazione del DTM della pianura costiera	21
3.2.2 Creazione del DTM batimetrico dell'area lagunare	22
3.2.3 Creazione del DTM batimetrico dell'area costiera.....	24
3.2.4 Creazione del DTM complessivo per l'area di studio	25
3.3 Creazione del nuovo database archeologico	27
3.4 Strumenti utilizzati per l'analisi geomorfologica	30
3.4.1 Cartografia storica	31
3.4.2 Carotaggi sedimentologici.....	31
3.4.3 Simulazione idrologica per la ricostruzione dei livelli antichi delle acque marine.....	32
4. Risultati	35
4.1 Analisi geomorfologica dell'area di studio.....	35
4.1.1 Sistemi dunali antichi.....	36
4.1.2 I sistemi fluviali.....	37
4.1.2.1 Analisi del settore 1	37
4.1.2.2 Analisi del settore 2	40

4.1.2.3 Analisi del settore 3	45
4.1.3 Morfologia della laguna	48
4.1.4 Morfologia dell'area costiera.....	49
4.2 Valutazione della distribuzione del record archeologico	51
4.2.1 Periodo preistorico: VIII millennio a.C. – metà III millennio a.C.	51
4.2.2 Periodo protostorico: metà III millennio a.C. – VIII secolo a.C.	52
4.2.3 Periodo romano: II secolo a.C. – V secolo d.C.	54
4.2.4 Periodo tardoantico e altomedievale: V secolo d.C. – X secolo d.C.....	60
4.2.5 Periodo medievale: X secolo d.C. – XV secolo d.C.....	62
5 Discussione	64
5.1 Analisi geoarcheologica.....	64
5.1.1 Periodo preistorico: VIII millennio a.C. – metà III millennio a.C.	64
5.1.2 Periodo protostorico: metà III millennio a.C. – VIII secolo a.C.	67
5.1.3 Periodo romano: II secolo a.C. – V secolo d.C.	69
5.1.3.1 Ricostruzione dell'ambiente in età romana tramite simulazione idrologica del livello dell'acqua	73
5.1.4 Periodo tardoantico e altomedievale: V secolo d.C. – X secolo d.C.....	76
5.1.5 Periodo medievale: X secolo d.C. – XV secolo d.C.....	78
6. Conclusioni	80
Bibliografia	85

Indice delle figure

Figura 1: Area studio Fonte: elaborazione QGIS e immagini satellitari Google satellite 2023. EPSG: 3004	4
Figura 2: Suddivisione in settori dell'area di studio Fonte: elaborazione QGIS, Google satellite 2023.....	5
Figura 3: megafan che caratterizzano l'area di studio 6) megafan Isonzo; 7) megafan Torre; 8) megafan Natisone; 9) megafan Cormor; 10) area di commistione. Fonte: Marocco (2009).....	6
Figura 4: Unità Geologiche che compongono la pianura costiera Fonte: rielaborazione QGIS da (Fontana et al. 2019), Google satellite 2023	9
Figura 5: Limite margine laguna linea viola massimo registrato e limite linea riva costiera massima registrata linea rossa Fonte: (Fontana et al. 2016).....	10
Figura 6: Profili dei log stratigrafici per i siti di Ca' Baredi, Ara del Gorgo e Muzzana Bonifica. Fonte: (Fontana et al. 2017)	11
Figura 7: Paleogeografia del litorale gradese 4.000 anni fa 1. presunti percorsi fluviali; 2. paleo linea di riva; 3. idrografia attuale; 4. attuale linea di riva; 5. paleo linea di riva proposta. Fonte: (Marocco et al. 2005).....	12
Figura 8: ricostruzione paleogeografica della linea di riva del golfo di Trieste per anno 2000 B.P. Le linee che incidono quelle di riva sono i probabili percorsi del Paleo Tagliamento ad Ovest e Paleo Isonzo (e/o Natisone) ad Est. Fonte: (Marocco 1991)	13
Figura 9: ricostruzione paleogeografica della linea di riva del golfo di Trieste per anno 1000 B.P. Le linee che incidono quelle di riva sono i probabili percorsi del Paleo Tagliamento ad Ovest e Paleo Isonzo (e/o Natisone) ad Est. Fonte: (Marocco 1991)	14
Figura 10: ricostruzione paleogeografica della linea di riva del golfo di Trieste per anno 500 B.P. Le linee che incidono quelle di riva sono i probabili percorsi del Paleo Tagliamento ad Ovest e Paleo Isonzo (e/o Natisone) ad Est. Fonte: (Marocco 1991)	14
Figura 11: particolare della pianura costiera e della laguna di Marano e Grado Fonte: cartografia storica "La nova descrizione di tutta la patria del Friuli – Roma MDLXIII" di Pirro Ligorio	15
Figura 12: schema del progressivo allargamento del mare Adriatico durante alcuni momenti tra il LGM e l'Olocene Fonte: (Fontana e Ronchi 2021)	16
Figura 13: schema morfologico del fondo marino del golfo di Trieste Fonte: (Caressa et al. 2001)	17
Figura 14: Soluzione per la funzione del livello marino eustatico (esl) e variazione del volume dei ghiacci. (A) Stime individuali del livello marino eustatico (esl) (blu) e la stima oggettiva della serie temporale con riduzione del rumore (linea rossa). I grafici rappresentano gli ultimi 9.000 anni. (B) La stessa stima del livello marino eustatico (esl) e i suoi valori limite di probabilità al 95%. Sono mostrati anche i principali eventi climatici dell'intervallo [Last Glacial Maximum (LGM), gli eventi di Heinrich da H1 a H3, il periodo caldo di Bølling-Allerød (B-A) e il periodo freddo dello Younger Dryas (Y-D)] e i tempi del MWP-1A, 1B e dell'evento di raffreddamento di 8,2 ka BP. (C) Stime di probabilità al 95% delle stime del livello marino eustatico (esl). (D) Stime del tasso di	

variazione del livello del mare. Fonte: (Lambeck et al. 2014)	18
Figura 15: Diagramma degli index point del livello marino relativo (RSL) del passato per la zona compresa tra la Laguna di Grado e Venezia (modificato da Fontana et al. 2017). La curva del livello marino teorico calcolato è indicata dall'area arancio compresa tra le linee ottenute dal calcolo effettuato per i siti di Venezia e Trieste tramite il modello geofisico (Lambeck et al. 2011). In alto a sinistra è riportato lo schema con significato degli indicatori del RSL passato (index point). Fonte: (Fontana e Ronchi 2021).....	19
Figura 16: Scanner laser topografici (NIR) e topo-batimetrici (verdi) montati sulla stessa piattaforma aerea; (a sinistra) riflessione del segnale NIR sulla superficie dell'acqua; (a destra) principio della batimetria laser aerea (rifrazione del raggio laser sulla superficie dell'acqua, echi provenienti dalla superficie dell'acqua vicina, colonna d'acqua e fondo dell'acqua). Fonte: (Szafarczyk e Toś 2023)	21
Figura 17: Risultato finale del DTM completo, immagine satellitare di sfondo fonte Google Satellite Immagini @2023.....	26
Figura 18: maschera di compilazione del nuovo database archeologico realizzato per il lavoro di tesi. Fonte: QGIS	27
Figura 19: Mappa risultato elaborazione tool TPI. Fonte: elaborazione QGIS	31
Figura 20: localizzazione dei sondaggi sedimentologici presi in esame. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023	32
Figura 21: bocche di porto e flussi marea in laguna. Fonte: da http://cmsarpa.regione.fvg.it/cms/tema/acqua/acque-marino-costiere-e-lagunari/approfondimenti/schede/Inquadramento-geomorfologico-e-idrologico-delle-lagune-di-Marano-e-di-Grado.html)	35
Figura 22: ritaglio DTM su formazione del paleo dune di Belvedere e San Marco. Fonte: elaborazione QGIS	36
Figura 23: morfologie identificate nel settore 1. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023.	38
Figura 24: porzione mappa “principali direttrici del Tagliamento in epoca post-LGM” con rappresentate: frecce in blu le direttrici fluviali. Fonte: Zanferrari et al. 2018.	38
Figura 25: particolare nei pressi della foce del Tagliamento settore 1. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023.....	39
Figura 26: morfologie identificate nel settore 2. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023.	40
Figura 27: sezione altimetrica trasversale dosso n2. Fonte: elaborazione QGIS	41
Figura 28: rappresentazione dosso fluviale semplificata. Fonte: Marocco 2009.....	41
Figura 29: sezione altimetrica trasversale dosso n4. Fonte: elaborazione QGIS	42
Figura 30: particolare del settore 2 con visibili i canali antichi in vallecole/bassi morfologici. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023.	44
Figura 31: morfologie identificate nel settore 3. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023.	45
Figura 32: particolare del settore 3 con visibili i canali antichi in vallecole/bassi morfologici. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023.	47
Figura 33: DTM della laguna di Marano e Grado. Fonte: Elaborazione QGIS.....	48

Figura 34: profilo altimetrico da Lignano Sabbiadoro fino a 3 km a largo. Fonte: elaborazione QGIS.....	49
Figura 35: profilo altimetrico Banco d’Orio fino a 3 km a largo. Fonte: elaborazione QGIS	49
Figura 36: DTM dell'area marina costiera cerchio verde formazione della Trezza Grande e in azzurro Mula di Muggia. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023.....	50
Figura 37: distribuzione record archeologico per il periodo preistorico. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023.....	51
Figura 38: distribuzione record archeologico per il periodo protostorico. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023.....	52
Figura 39: distribuzione record archeologico per il periodo romano. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023.....	54
Figura 40: edifici di culto/necropoli in età romana. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023.	55
Figura 41: strutture portuali in età romana. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023.	56
Figura 42: siti abitativi in età romana. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023.....	57
Figura 43: siti con resti di viabilità in età romana. Le frecce tratteggiate Via Annia in rosso e in verde tratto via ipotetico fino a Grado. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023, Mozzi et al. (2011), Gaddi (2001).	58
Figura 44: siti produttivi in età romana. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023.....	59
Figura 45: distribuzione record archeologico per il periodo tardoantico e altomedievale. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023.....	60
Figura 46: distribuzione record archeologico per il periodo medievale. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023.....	62
Figura 47: analisi geoarcheologica per il periodo preistorico con ricostruzione paleo riva ipotetica. Fonte: elaborazione QGIS modificata dopo Fontana e Ronchi (2021), mappa di base e dati di OpenStreetMap e OpenStreetMap Foundation (CC-BY-SA).....	66
Figura 48: analisi geoarcheologica per il periodo protostorico con ricostruzione paleo riva ipotetica. Fonte: elaborazione QGIS modificata dopo Marocco (2005), mappa di base e dati di OpenStreetMap e OpenStreetMap Foundation (CC-BY-SA).	68
Figura 49: Sezione litostratigrafica WSW-ENE ad Aquileia 1: torba; 2: ghiaia; 3: sabbia; 4: pelite; 5: materiale rielaborato; 6: piana alluvionale 18.030 ± 0,670 ka B.P. (traccia speculativa); 7: piana alluvionale 3490-3095 a.C. (traccia speculativa); 8: piana alluvionale 785-520 a.C. (traccia speculativa); 9: datazione al radiocarbonio (cal.); 10: datazione archeologica; 11: Sondaggio S.A.R.A (1994); 12: numero di paleocanali. Fonte: Arnaud-Fassetta et al. (2003)	70
Figura 50: analisi geoarcheologica per il periodo romano con ricostruzione paleo riva ipotetica. Fonte: elaborazione QGIS modificata dopo Marocco (1991) e Traviglia (2016), mappa di base e dati di OpenStreetMap e OpenStreetMap Foundation (CC-BY-SA).....	72

Figura 51: modellazione livello acqua marino per periodo romano. In azzurro chiaro livello mare a -0,8 m mentre in blu modellata a -1,4 metri, sono visibili, inoltre, il DTM complessivo e le evidenze archeologiche per il periodo romano. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023.....	75
Figura 52: analisi geoarcheologica per il periodo tardoantico e altomedievale con ricostruzione paleo riva ipotetica. Fonte: elaborazione QGIS modificata dopo Marocco (1991) e Traviglia (2016), mappa di base e dati di OpenStreetMap e OpenStreetMap Foundation (CC-BY-SA).....	77
Figura 53: analisi geoarcheologica per il periodo medievale con ricostruzione paleo riva ipotetica. Fonte: elaborazione QGIS modificata dopo Marocco (1991), “Nova descrizione di tutta la Patria del Friuli, Pirro Ligorio, 1563”, mappa di base e dati di OpenStreetMap e OpenStreetMap Foundation (CC-BY-SA).....	79

Indice delle tabelle

Tabella 1: vocabolario per il campo “interpretazioni” utilizzato per il nuovo database archeologico.	28
Tabella 2: suddivisione delle età e dei periodi storici analizzati.....	29
Tabella 3: distribuzione record archeologico per categoria nel periodo preistorico.....	52
Tabella 4: distribuzione record archeologico per categoria nel periodo protostorico....	53
Tabella 5: distribuzione record archeologico per categoria nel periodo romano	54
Tabella 6: distribuzione record archeologico per categoria nel periodo tardoantico e altomedievale.....	60
Tabella 7: distribuzione record archeologico per categoria nel periodo medievale	62
Tabella 8: distribuzione record archeologico per epoca storica	63

1. Introduzione

Lo studio del rapporto tra uomo e ambiente nel contesto delle pianure costiere nel tardo Olocene è un tema di grande complessità che deve tenere in considerazione le profonde mutazioni del territorio avvenute nel corso del tempo. Da un lato vi sono i numerosi fattori geomorfologici che includono le dinamiche di erosione e trasporto dei grandi sistemi fluviali, la ridistribuzione dei sedimenti lungo la fascia litoranea con la conseguente creazione di sistemi dunali e lagunari e la risalita eustatica del livello del mare (Fontana et al. 2017; Fontana e Ronchi 2021; Kaniewski et al. 2018). Dall'altra vi sono le modificazioni di tipo antropico che hanno alterato profondamente la topografia del territorio, già attraverso pratiche agricole e di bonifica nell'antichità, ma che si sono intensificate soprattutto a partire dall'età moderna (Fontana e Ronchi 2021; Muzzioli 2005). Dal punto di vista archeologico, è indubbio che questi fattori condizionano la visibilità del record archeologico di superficie, e la loro comprensione è fondamentale per ridurre il rischio di restituire un quadro parziale della distribuzione e dell'impatto antropico sul territorio nelle varie epoche storiche (Terrenato 2004).

Le potenzialità multidisciplinari della geoarcheologia, di cui si avvale l'ambiente di ricerca, grazie all'esplorazione e l'analisi delle dinamiche evolutive sia umane che ambientali, si possono ritrovare ad esempio: nelle analisi dell'area di Grozzana presso il comune di San Dorligo della Valle (Trieste) (Vinci, Bernardini, e Furlani 2019) nell'area archeologica di Metaponto (Matera) (Gioia et al. 2020), nella pianura costiera del fiume Cornia nella Toscana meridionale (Livorno) (Pieruccini et al. 2023; Poggi 2021) o anche nell'area dell'antico porto romano della città di Ostia (Roma) (Salomon et al. 2018) e in molte altre aree del mondo.

Questo elaborato di tesi vuole proporre una prima analisi geoarcheologica della pianura costiera e dell'area lagunare di Marano e Grado, situate nella bassa pianura del Friuli-Venezia Giulia. Rispetto allo stato dell'arte degli studi su questo territorio, si propone una forte integrazione multidisciplinare tra la geomorfologia e l'archeologia, allo scopo di investigare le relazioni tra uomo e ambiente nei secoli e proporre delle ipotesi ricostruttive aggiornate, più solide rispetto alla valutazione esclusiva del solo record archeologico.

Per fare ciò sono stati analizzati i numerosi studi geomorfologici presenti per quest'area, che hanno valutato la geologia e l'evoluzione degli ambienti della pianura costiera e

lagunare (Fontana et al. 2018; Fontana, Antonioli, e Bondesan 2016; Fontana e Ronchi 2021; Lenardon e Marocco 1994; Marocco 1988, 1989, 1991, 1992, 2009), insieme ai dati da remote sensing presenti per il territorio e combinati infine con le evidenze dei database archeologici (ERPAC, RAPTOR) oltre che a quelli presenti in letteratura.

In tale modo è stato possibile condurre sul territorio un'analisi comparativa di numerose serie di studi che fino a questo momento mancavano di un punto di vista integrato; per fare ciò, si è fatto ricorso, affiancandole, sia alle ricerche prettamente di carattere geomorfologico/sedimentologico, che agli studi umanistici realizzati sul territorio. È stata quindi proposta una nuova tipologia di studio che possa analizzare la coevoluzione del popolamento e delle trasformazioni ambientali, solo in parte esplorate da alcune ricerche effettuate su aree archeologiche di interesse, presenti nel territorio, come in Fontana et al. (2018), Fontana e Ronchi (2021), Traviglia (2016) e Visentini et al. (2018).

Tale analisi è stata eseguita sfruttando le enormi potenzialità offerte dai sistemi informativi geografici (Geographic Information System, GIS), in grado di organizzare, analizzare, elaborare e visualizzare un'ampia serie di dati geospaziali. Il volersi interfacciare con questo tipo di software e cercare di esplorare le potenzialità soprattutto in ambito multidisciplinare è stata una delle principali motivazioni che hanno animato questo lavoro di tesi.

Il presente elaborato di tesi è stato così strutturato:

dopo questo primo capitolo di introduzione, il secondo capitolo è dedicato ad una definizione del contesto geomorfologico e geologico dell'area di studio. Viene spiegata la composizione geologica dei suoli presenti nell'area di studio e riassunta brevemente la genesi generale del territorio. Inoltre, viene riassunta in modo schematico la storia evolutiva della formazione della laguna di Marano e Grado, suddivisa per le cinque epoche analizzate in questo studio. Infine, vengono discusse brevemente le variazioni del livello del mare che hanno interessato l'area a nord del mare Adriatico.

Nel terzo capitolo viene spiegato in modo approfondito il processo della raccolta dati, viene discussa la loro tipologia e viene spiegata la metodologia impiegata nell'analisi ed elaborazione dei dati utilizzati. Si entra nel dettaglio del processo che ha reso possibile la realizzazione della mappa DTM (Digital Terrain Model) e la modellazione idrologica del livello del mare, oltre che al procedimento impiegato nella creazione del nuovo database archeologico.

Il quarto capitolo è dedicato alla presentazione dei risultati suddivisi in due macrocategorie: l'analisi geomorfologica del territorio e l'analisi dell'archivio archeologico. Nella prima parte vengono presentate e descritte in breve le forme morfologiche riconosciute tramite l'utilizzo di immagini satellitari, DTM e TPI (Topographic Position Index), per l'ambiente della pianura alluvionale. Successivamente viene descritta la morfologia della Laguna e le sue caratteristiche batimetriche, e infine viene trattata l'area costiera e le strutture morfologiche in ivi riconosciute. Nella seconda macrocategoria invece viene presentata un'analisi puramente spaziale e una categorizzazione dei siti archeologici sul territorio, eseguite per ogni epoca storica.

Nel quinto capitolo viene esposta l'analisi geoarcheologica per le cinque epoche storiche, comprese tra l'VIII millennio a.C. e il XV secolo d.C.. In questo capitolo si cerca di approfondire il tema principale che ha guidato questo lavoro di tesi. Dapprima si è condotta un'analisi dello sviluppo insediativo delle popolazioni nelle diverse epoche analizzate; questa è stata poi confrontata per la prima volta con l'evoluzione del territorio dal punto di vista geomorfologico e ambientale; infine, si è tentato di chiarire se siano presenti o meno delle dinamiche di interazione tra eventi naturali e modificazioni antropiche nei tre ambienti caratterizzanti il paesaggio dell'area di studio.

Infine, nel capitolo conclusivo si cerca di integrare tra loro i risultati ottenuti analizzando criticamente quanto emerso da questo lavoro, identificando i limiti incontrati e proponendo dei nuovi aspetti di ricerca volti a migliorare e aumentare le conoscenze di questo campo di studi.

2. Contesto Geologico e Geomorfológico

2.1 Area di studio

L'area di studio (figura 1) è delimitata a sud dal limite dei dati batimetrici del Golfo di Trieste circa una ventina di chilometri a largo della costa, mentre il limite a nord è, indicativamente, la Strada Statale SS14. A ovest è delimitata dal confine della regione Friuli-Venezia Giulia, lungo il fiume Tagliamento e infine a est il limite è dato dal percorso del fiume Isonzo.

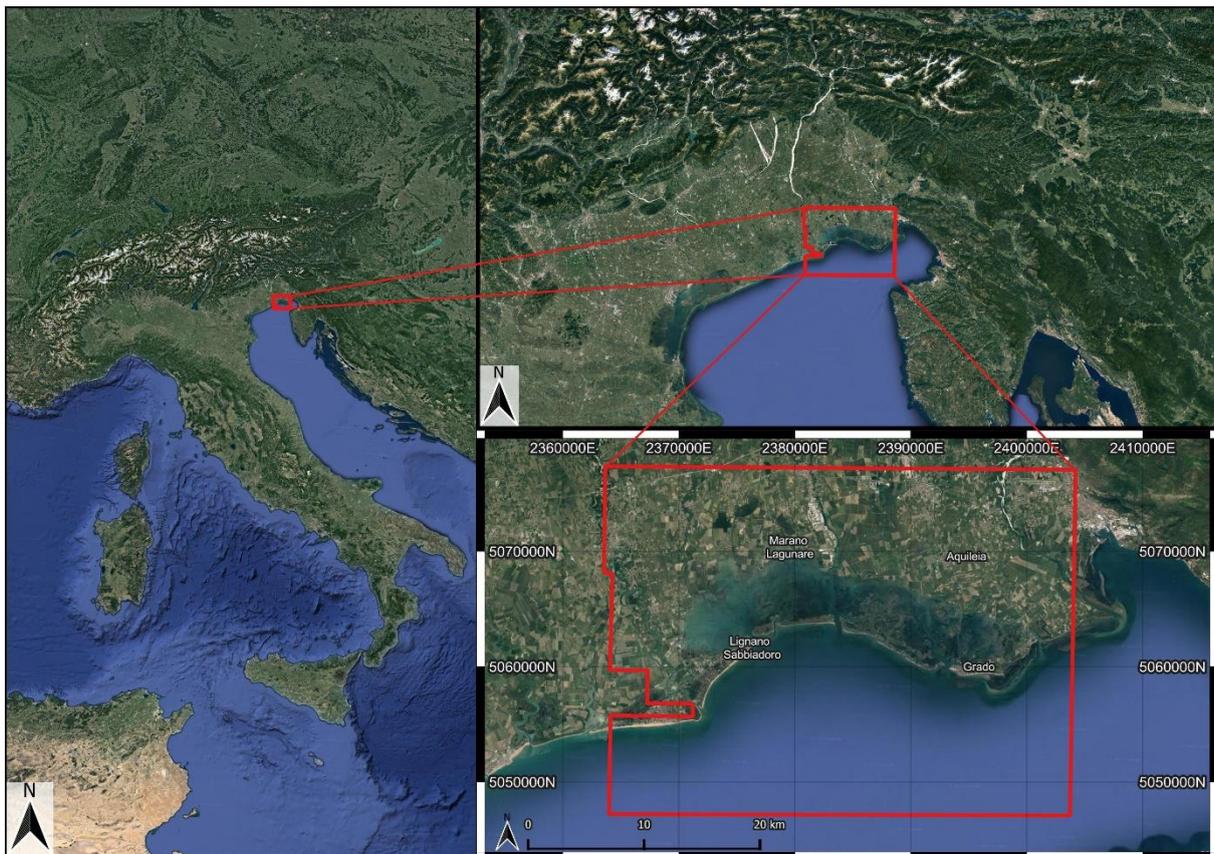


Figura 1: Area studio Fonte: elaborazione QGIS e immagini satellitari Google satellite 2023. EPSG: 3004

2.2 La bassa pianura friulana

Analizzando la carta geologica della bassa pianura del Friuli-Venezia Giulia (Fontana et al. 2019) si possono osservare le diverse unità geologiche che compongono il territorio. Sulla base di queste differenti tipologie di unità geologiche descritte brevemente nel paragrafo 2.1.1, è stato deciso, per questo lavoro di tesi, di suddividere l'area di studio della bassa pianura in tre distinte parti (figura 2), in base alla loro genesi sedimentologica. Il settore 1 più a occidente, composto da depositi formati in età post-LGM (Last Glacial Maximum¹), una parte centrale (che da ora in avanti sarà indicata come settore 2) composta da unità geologiche formatesi durante il LGM, Infine, il terzo settore, quello più a oriente, composto anch'esso da depositi formati in età Post-LGM. Per quanto concerne l'area lagunare invece è stato deciso di tenere la divisione ottenuta tra i settori 2 e 3 che riprende in modo abbastanza analogo i limiti della suddivisione amministrativa della laguna di Marano e quella di Grado.

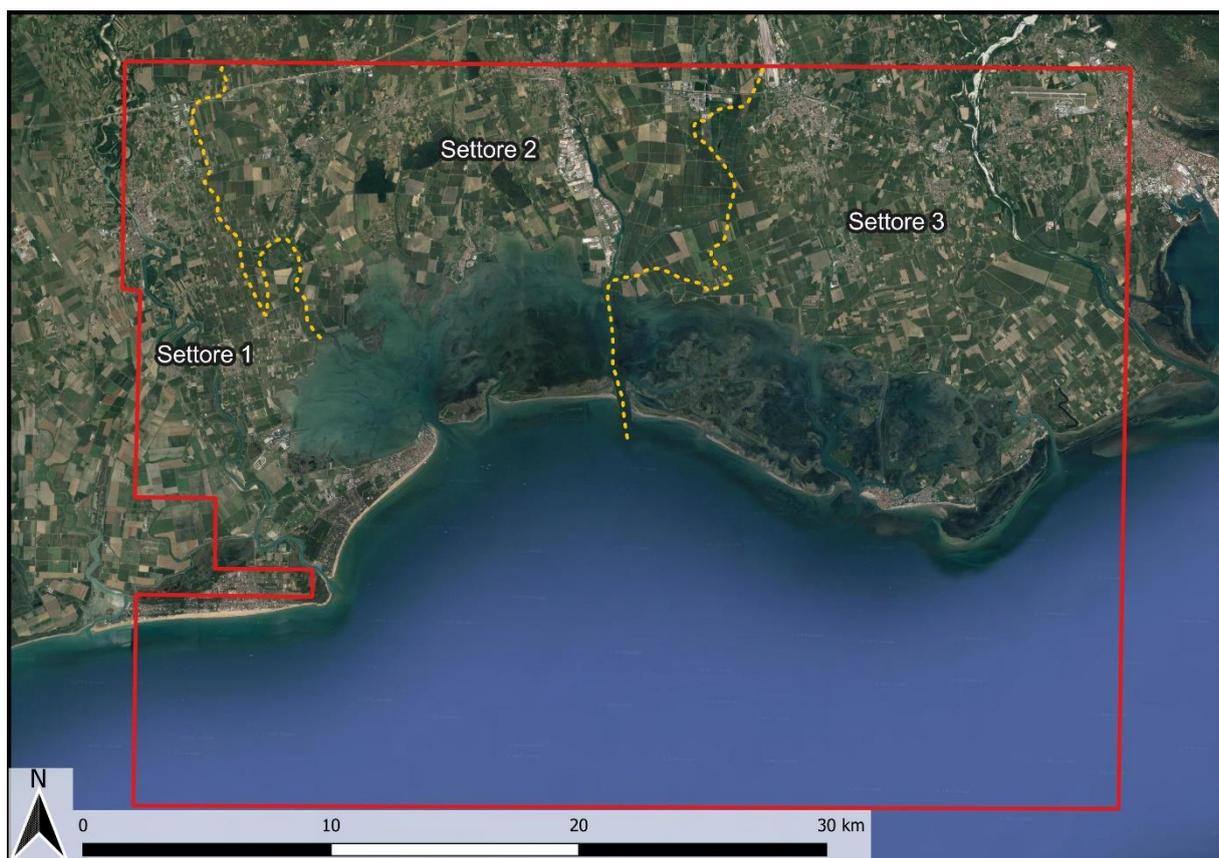


Figura 2: Suddivisione in settori dell'area di studio Fonte: elaborazione QGIS, Google satellite 2023.

¹ Periodo in cui i ghiacciai globali raggiunsero la loro massima estensione all'epoca dell'ultimo evento di glaciazione registrato sulla terra, tra i 24.000-14.500 anni BP. Periodo, questo, in cui si registrò inoltre un valore di minimo storico nelle serie di dati registrati sul cambiamento del livello del mare (Marocco, 2009; Hughes, Gibbard and Ehlers, 2013).

Le suddivisioni effettuate dell'area di studio sono in parte riscontrabili anche se si analizza la genesi alluvionale della bassa pianura friulana, che è stata costituita grazie all'apporto di quattro principali fiumi: da occidente a oriente si riconoscono, una porzione del Tagliamento, il Cormor, il Torre e l'Isonzo, tali fiumi hanno sorgente nell'area delle Prealpi Giulie e scorrono lungo tutta la pianura sfociando nell'area costiera seguendo prevalentemente un percorso nord-sud. Si possono identificare nell'area di studio tre megafan, quelli appartenenti ai fiumi Cormor, Torre e Isonzo, nella parte più occidentale; solo marginalmente si può osservare l'influenza del megafan del fiume Tagliamento (figura 3) (Marocco 2009).

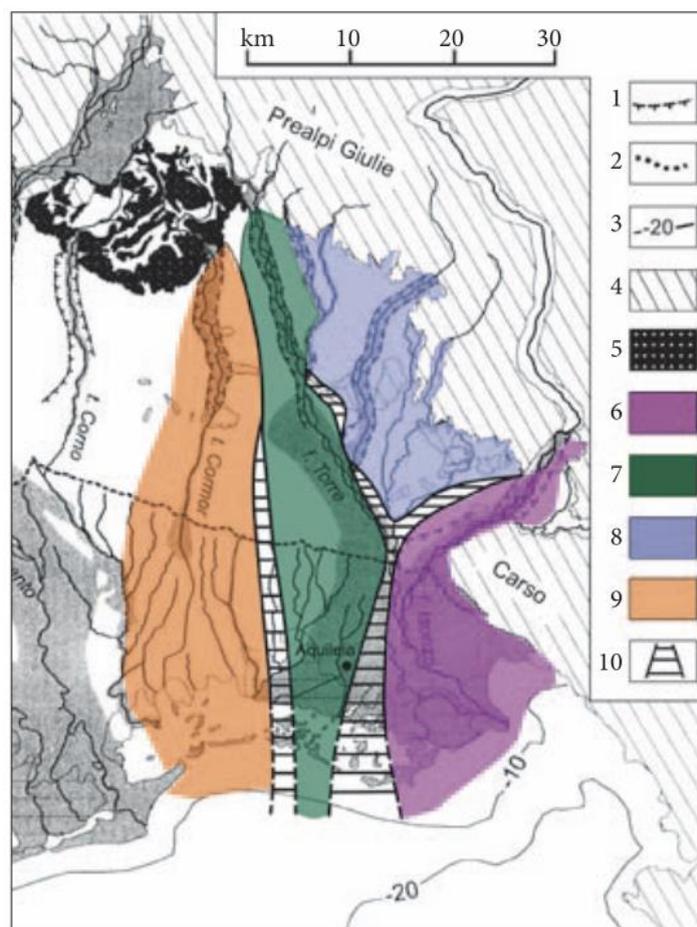


Figura 3: megafan che caratterizzano l'area di studio 6) megafan Isonzo; 7) megafan Torre; 8) megafan Natisone; 9) megafan Cormor; 10) area di commistione. Fonte: Marocco (2009).

2.1.1 Unità geologiche

Le unità che compongono il settore 2 sono: la subunità di Canodusso (SPB3) e la subunità di Remanzacco (SPB4) (vedasi figura 4).

La subunità (SPB3) è attribuibile al Pleistocene superiore nella fase anaglaciale del LGM, è composta dai sedimenti depositati dai fenomeni glaciali e fluvio-glaciali del ghiacciaio del Tagliamento. Nello specifico, la porzione della bassa pianura è composta da sedimenti ricollegabili alla parte distale del megafan dei fiumi Tagliamento, Cormor e Torre, che sono parzialmente coperti dalla subunità Remanzacco (SPB4) e dall'unità di Grado (GRA). Per quanto concerne l'ambiente deposizionale questa subunità è caratterizzata da alvei di tipo braided/intrecciato con depositi sedimentati in delle piane inondabili (Fontana et al. 2019).

La subunità (SPB4), invece, è cronologicamente attribuibile al Pleistocene superiore nella fase cataglaciale del LGM, è contraddistinta dalla presenza di paleoalvei, questi alti morfostrutturali sono inseriti in una piana alluvionale di basso spessore. Gli ambienti deposizionali sono caratterizzati da alvei con forme monocursali che passano a tipo intrecciato/transizionale (wandering) per arrivare, infine, vicino al margine lagunare con forme di tipo meandriforme (Fontana et al. 2019).

Nel settore 1 e 3 invece si riscontrano le unità (vedasi figura 4) descritte qui di seguito: L'unità di Gorizia (GOR), databile nel pleistocene superiore nel LGM, è presente prevalentemente nella parte orientale della bassa pianura, ed è composta da depositi alluvionali originati dal megafan del fiume Isonzo in età LGM (Fontana et al. 2019). Sono riscontrabili alcune porzioni di questa unità nelle zone adiacenti Aquileia e nelle subunità Belvedere (GOR1) che costituisce le dune di Belvedere e San Marco. L'ambiente deposizionale è riconducibile a depositi di piana alluvionale e talvolta da ambiente acquitrinoso (Fontana et al. 2019).

Subunità di Belvedere (GOR1): databile alla fine pleistocene medio e inizio del superiore, verso la fine del LGM; l'unità è composta da sabbie talvolta cementate, sabbie medio fini carbonatiche, sono presenti inoltre degli orizzonti petrocalcici chiamati "Maltoni". L'ambiente deposizionale è di tipo "duna continentale" depositata a breve distanza da alvei fluviali anticamente attivi (Fontana et al. 2019).

Unità di Grado (GRA): raggruppa i depositi di sedimento del post-LGM dal tardoglaciale fino ai giorni odierni, in questa unità generica sono raccolti tutti i sedimenti senza distinguerli nei diversi bacini alluvionali di appartenenza (Fontana et al. 2019). Inoltre, nell'unità GRA sono compresi anche i sedimenti della laguna e del mare. Questa unità è suddivisa sia su base dell'epoca storica di formazione, ovvero, preromana e post-romana, sia in subunità date dal bacino di appartenenza. Nel bacino dell'Isonzo-Torre vi sono comprese: la subunità di Aquileia (GRA1), la subunità di Monastero (GRA2). Mentre nel bacino del Tagliamento vengono comprese la subunità di San Vito al Tagliamento (GRA3) e la subunità di Latisana (GRA4). L'ambiente deposizionale tipico di questi sedimenti è di tipo alluvionale (Fontana et al. 2019).

Subunità di Aquileia (GRA1): composta da depositi alluvionali appartenenti al fiume Torre e al sistema di diversioni del fiume Isonzo, databile dal post-glaciale all'epoca romana compresa (Fontana et al. 2019). È differenziabile dalle altre subunità grazie alla presenza di ghiaie lungo i paleoalvei, vi sono presenti inoltre tracce paleoidrografiche meandriche e alcuni dossi fluviali (Fontana et al. 2019). Tali geomorfologie sono rilevabili in prossimità del sito archeologico di Ca' Baredi situato vicino ad un ramo del fiume Torre attivo probabilmente tra i 5.000 e i 3.600 anni fa (Fontana et al. 2018).

Subunità di Monastero (GRA2): databile alla fine dell'epoca romana fino al presente, è una subunità che comprende i sedimenti alluvionali del complesso Isonzo, Torre e Natisone, essa è databile verso la fine dell'epoca romana (Fontana et al. 2019). Vi sono comprese anche parti di aree golenali e alvei di fiumi presenti tutt'oggi. La distinzione con le altre subunità è possibile prevalentemente grazie alle evidenze archeologiche in ivi sepolte. Sono comprese, inoltre, anche le diversioni recenti verso est dell'Isonzo avvenute nel medioevo (Fontana et al. 2019).

Subunità di Latisana (GRA4): comprende i sedimenti alluvionali del Tagliamento in epoca post-romana. L'alveo fluviale attuale è caratterizzato dalla forma di dosso fluviale. Questa condizione ha ricoperto le eventuali tracce archeologiche presenti in questo tratto di pianura prima di questa fase di sedimentazione (Fontana et al. 2019).

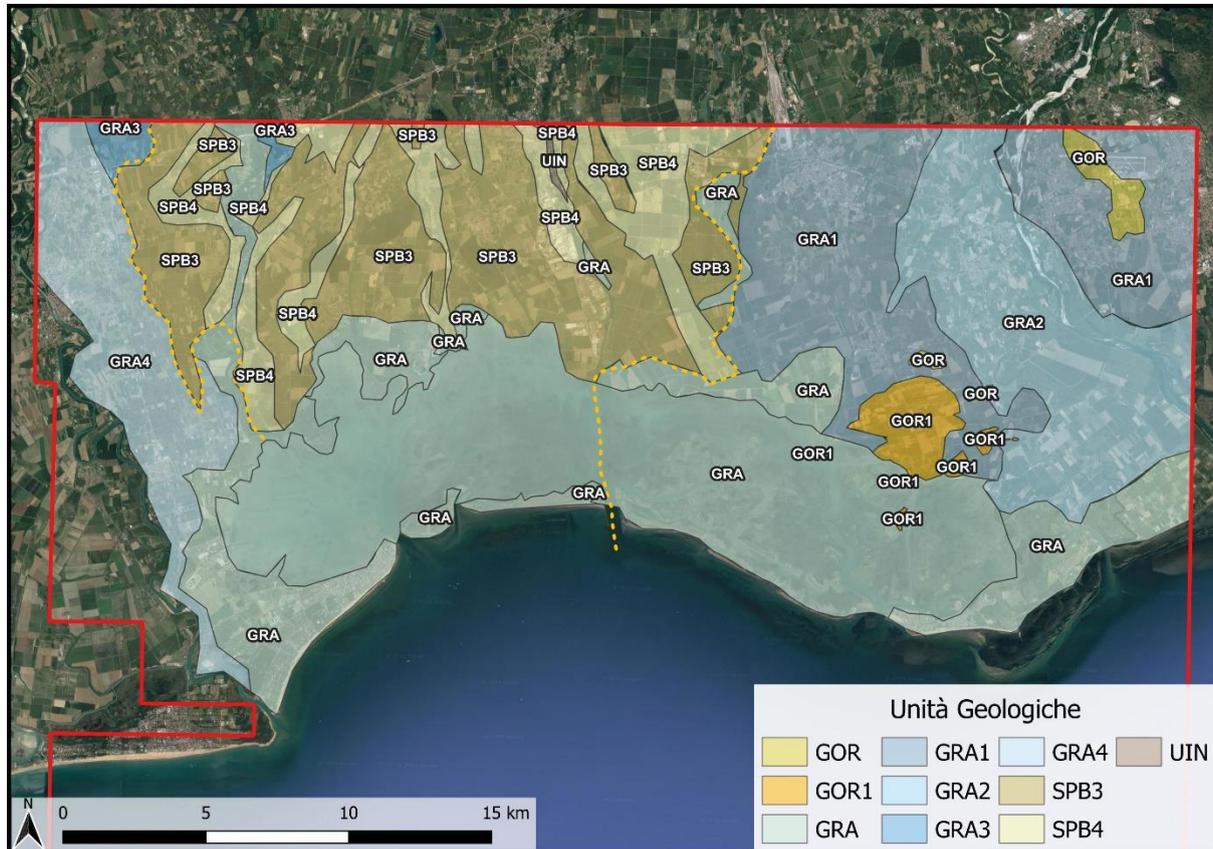


Figura 4: Unità Geologiche che compongono la pianura costiera Fonte: rielaborazione QGIS da (Fontana et al. 2019), Google satellite 2023.

2.3 Evoluzione dell'area lagunare di Marano e Grado

2.3.1 La laguna nel periodo preistorico: VIII millennio a.C. – metà III millennio a.C.

Questa epoca storica è stata interessata da un intenso e rapido fenomeno di trasgressione marina. La fusione delle calotte glaciali continentali e l'innalzamento delle temperature globali e le ulteriori trasformazioni ambientali trasformarono radicalmente l'aspetto dell'area a nord del mare adriatico, a partire dal IX millennio a.C. (evento che segna l'inizio del periodo chiamato Olocene). Dopo questo primo periodo di rapido innalzamento del livello del mare si instaurò una condizione di relativo stazionamento della risalita del livello delle acque, questo stato di equilibrio viene chiamato (*marine highstand*), e proprio in questa fase il mare raggiunse il suo massimo livello. Durante questo periodo, la linea di costa arrivava nell'area romagnola a circa 20 km nell'entroterra rispetto alla posizione

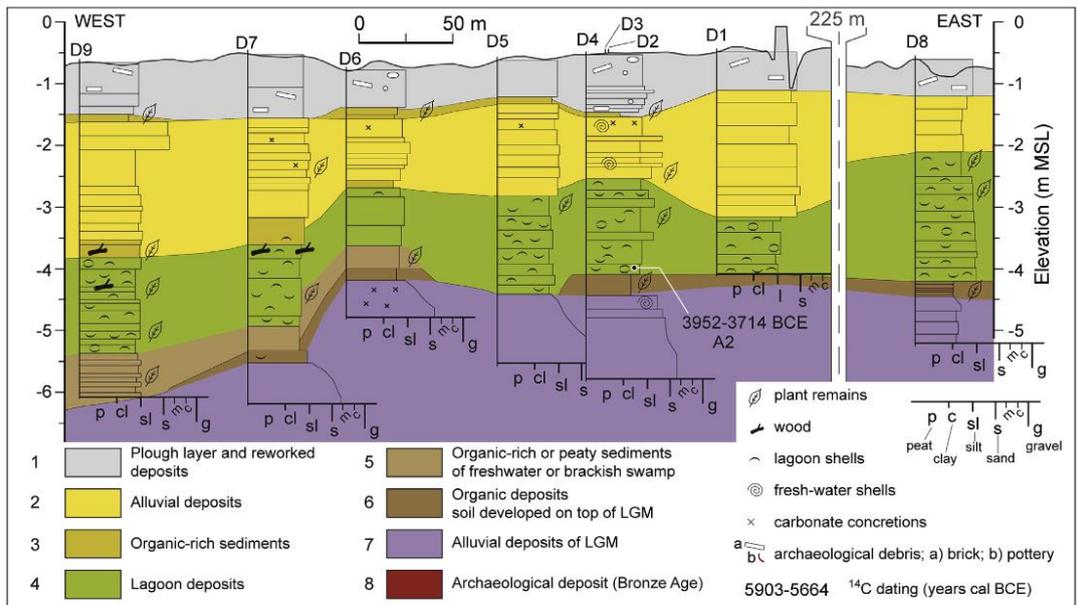
odierna, invece per l'area del delta del Po arrivava 35 km a ovest dell'attuale foce del fiume, situazione diversa invece per la pianura costiera veneta e friulana, dove il mare rientrava solo di pochi km nell'entroterra (Fontana et al. 2016). I driver ambientali complici di questa fase furono i fattori morfologici quali subsidenza, deformazioni tettoniche e aggiustamenti glacio-isostatici e soprattutto gli apporti dei sedimenti fluviali (Fontana e Ronchi 2021). Quest'ultimi ebbero un importante ruolo nel modificare la conformazione dell'area lagunare di Marano e Grado nei secoli a venire.

Il massimo livello raggiunto dalla trasgressione marina fu raggiunto intorno al IV - III millennio a.C. nell'area lagunare di Marano e Grado, tale evento si tradusse in un innalzamento del livello del mare che raggiunse approssimativamente il limite interno della attuale laguna visibile in figura 5 (Fontana e Ronchi 2021).

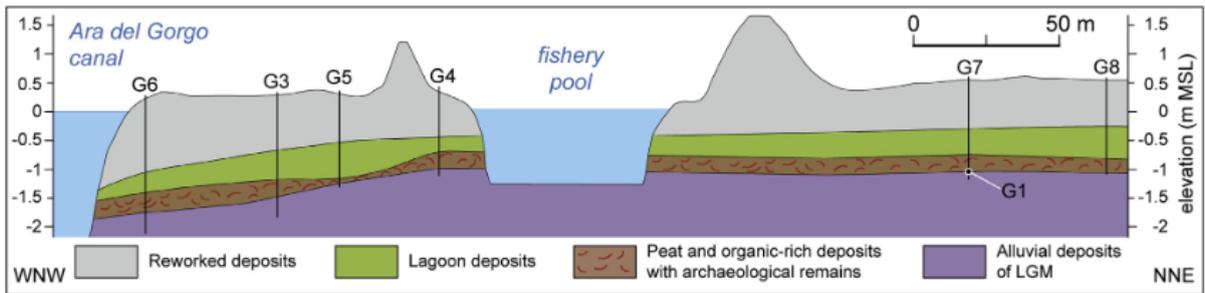


Figura 5: Limite margine laguna linea viola massimo registrato e limite linea riva costiera massima registrata linea rossa Fonte: (Fontana et al. 2016)

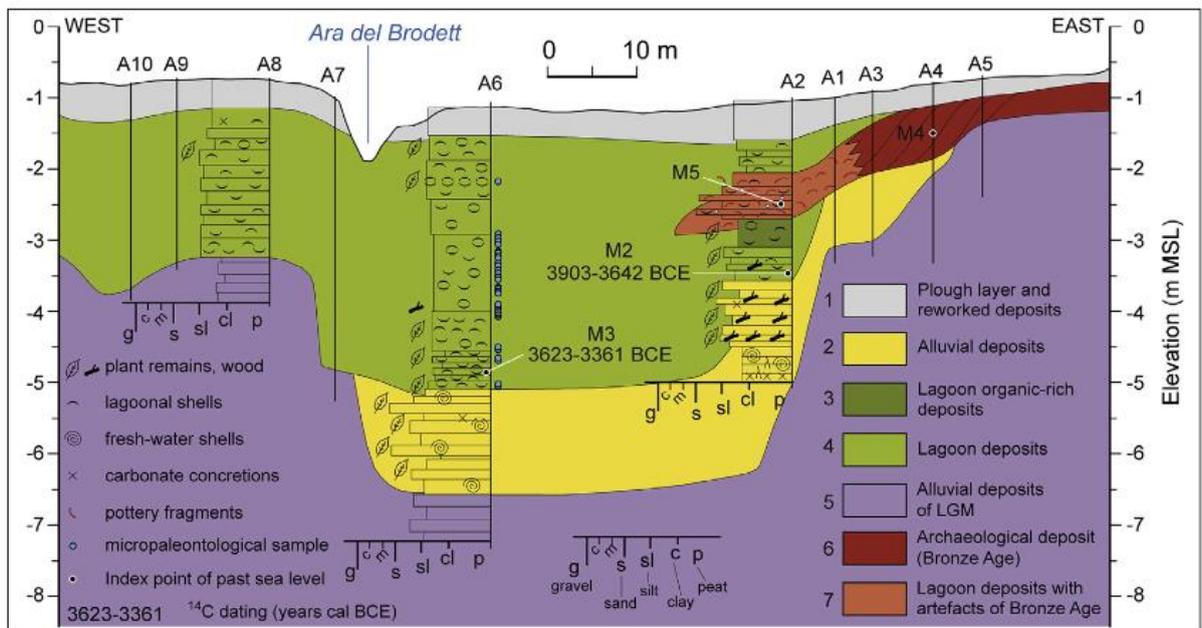
I probabili confini lagunari proposti nei lavori di (Fontana et al. 2016) illustrano una linea di margine interno di laguna, che vede sommerse le aree di pianura al di sotto dell'area aquileiese (figura 5), i transetti sedimentologici eseguiti a Ca' Baredi, infatti, identificano l'inizio della presenza dell'ambiente lagunare intorno al 3.952-3.714 a.C. condizione che a ovest viene confermata anche nei sondaggi del sito di Muzzana Bonifica, dove i depositi lagunari vengono datati intorno al 3.600-3.361 a.C. (vedasi figura 6) (Fontana et al. 2017).



Log stratigrafico del sito Ca' Baredi



Log stratigrafico del sito Ara del Gorgo



Log stratigrafico del sito Muzzana Bonifica

Figura 6: Profili dei log stratigrafici per i siti di Ca' Baredi, Ara del Gorgo e Muzzana Bonifica. Fonte: (Fontana et al. 2017)

2.3.2 La laguna nel periodo protostorico: metà III millennio a.C. – VIII secolo a.C.

Grazie al sondaggio S9 e a quelli recentemente eseguiti nelle vicinanze della chiesa di Santa Maria delle Grazie (Grado), e servendosi delle successioni sedimentologiche degli altri sondaggi (S) eseguiti nell'area lagunare (vedere figura 20 in paragrafo 3.5.2 con localizzazione di tutti i sondaggi analizzati) Marocco ha delineato l'antica linea di costa del 4.000 B.P. come è visibile in figura 7. Tale rappresentazione, infatti, è supportata dai nuovi dettagli delle sequenze stratigrafiche delle carote di Santa Maria delle Grazie che rilevano il susseguirsi di sequenze appartenenti ad ambienti di fondale marino che poi evolvono verso la superficie in ambienti infralitorali (Marocco et al. 2005). Nel periodo protostorico dunque partendo dalla foce dell'attuale Isonzo e andando in direzione ovest, la linea di costa si estendeva verso il mare con un'ansa interna che interessava tutta l'area della città di Grado. La linea di costa poi proseguiva definendo il limite interno della laguna passando poco più a sud del sito archeologico di Ca' Baredi. Per quanto concerne invece la parte occidentale si può affermare che la sua estensione sia simile a quella odierna (figura 7). Durante l'età del Bronzo, come sottolineano altri studi, intorno al 1850 a.C., il livello relativo del mare era all'incirca tra i $-2,8 \pm 0,4$ m, e mentre verso il 1250 - 1050 a.C. il valore più probabile si attestava intorno ai $-2,0 \pm 0,6$ m slm (Fontana et al. 2018).

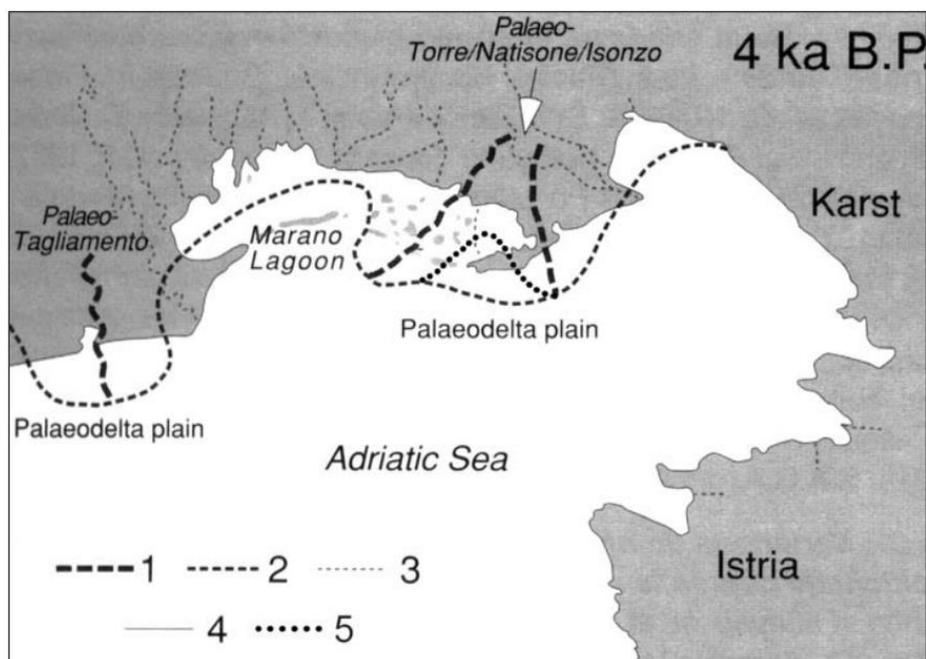


Figura 7: Paleogeografia del litorale gradese 4.000 anni fa 1. presunti percorsi fluviali; 2. paleo linea di riva; 3. idrografia attuale; 4. attuale linea di riva; 5. paleo linea di riva proposta. Fonte: (Marocco et al. 2005)

2.3.3 La laguna nel periodo romano: II secolo a.C. – V secolo d.C.

Grazie alle evidenze sedimentologiche del sondaggio S9 che rileva la presenza di un ambiente deposizionale lagunare databile al 550 d.C., insieme alle conoscenze storiche della fondazione della città di Grado in epoca romana, è possibile segnare la linea di costa come è visibile in figura 8 (Marocco 1991).

Si può descrivere una linea di costa che passa vicino a Grado, area ormai affiorata in questa epoca, rientra verso l'entroterra, raggiungendo quello che fu lo sbocco in laguna del canale Anfora antico, e proseguire nella laguna di Marano con un andamento che ricalca grossomodo i limiti individuati per le epoche precedenti (vedasi

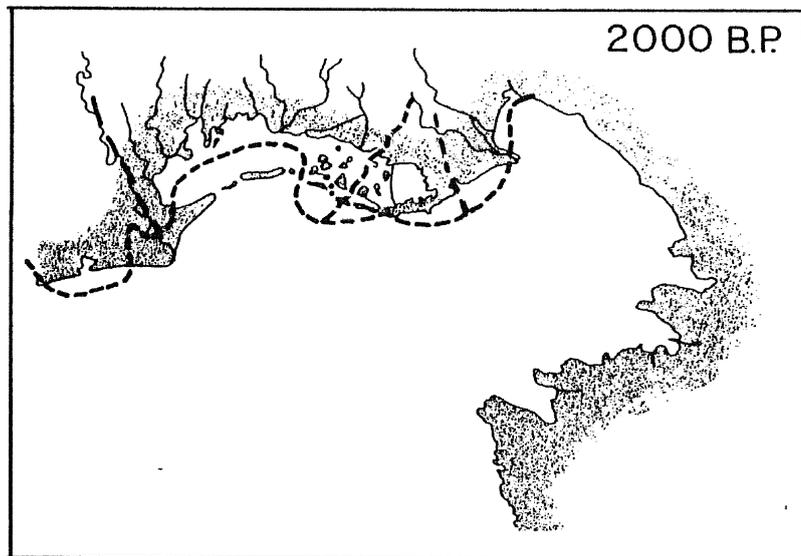


Figura 8: ricostruzione paleogeografica della linea di riva del golfo di Trieste per anno 2000 B.P. Le linee che incidono quelle di riva sono i probabili percorsi del Paleo Tagliamento ad Ovest e Paleo Isonzo (e/o Natissone) ad Est. Fonte: (Marocco 1991)

figura 7). Nell'area della foce del Tagliamento, i sondaggi S19 e S20 hanno rilevato il passaggio da un ambiente lagunare composto da sedimenti residuali databili nel 4.620 ± 160 B.P. ad un ambiente pro-deltizio circa nel 2.040 ± 70 B.P. (Marocco 1991).

2.3.4 La laguna nel periodo tardoantico e altomedievale: V secolo d.C. – X secolo d.C.

Nel periodo del tardoantico e altomedievale, la ricostruzione del tracciato della paleo linea costiera proposta da Marocco, delinea la parte occidentale della laguna come ormai stabilizzata nella posizione che si può osservare al tempo odierno, mentre nella parte orientale le diversioni del percorso fluviale del paleo-Isonzo hanno permesso l'instaurarsi di ambienti lagunari anche nella regione della laguna di Grado, grazie anche al contributo dei fenomeni di subsidenza del terreno, derivante dalla compressione e stabilizzazione dei sedimenti fini alluvionali (vedasi figura 9).

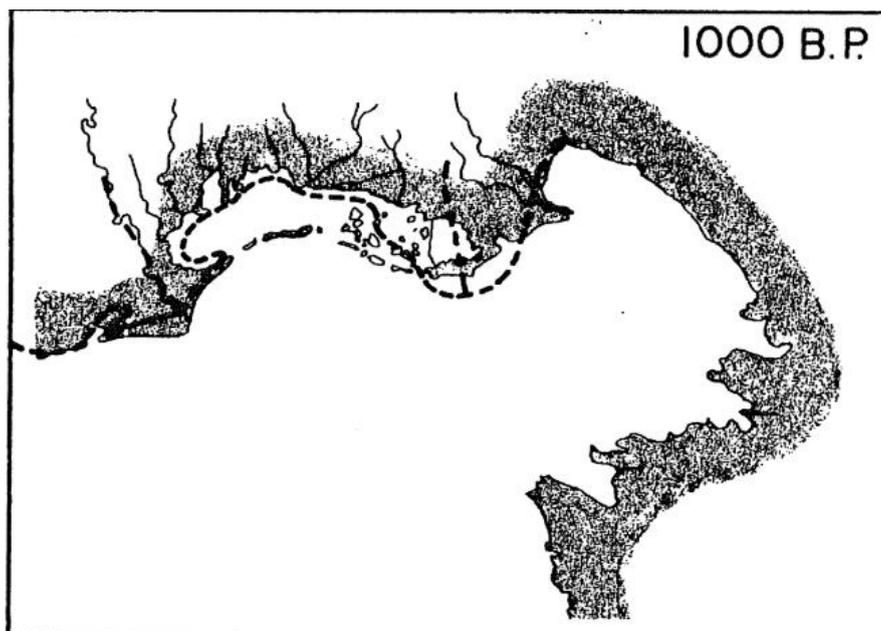


Figura 9: ricostruzione paleogeografica della linea di riva del golfo di Trieste per anno 1000 B.P. Le linee che incidono quelle di riva sono i probabili percorsi del Paleo Tagliamento ad Ovest e Paleo Isonzo (e/o Natisone) ad Est. Fonte: (Marocco 1991)

2.3.5 La laguna nel periodo medievale: X secolo d.C. - XV secolo d.C.

In questa fase i limiti interni e la linea di costa si avvicinano sempre di più a quelle che si possono osservare tutt'oggi. Grazie anche al supporto delle informazioni ricavabili dalla consultazione della cartografia antica (figura 11), è possibile avere una visione più accurata di quella che era la conformazione lagunare di questi secoli. La ricostruzione proposta in Marocco (1991) (figura 10) è stata infatti eseguita grazie anche al supporto di cartografie storiche databili al periodo bassomedievale e rinascimentale.

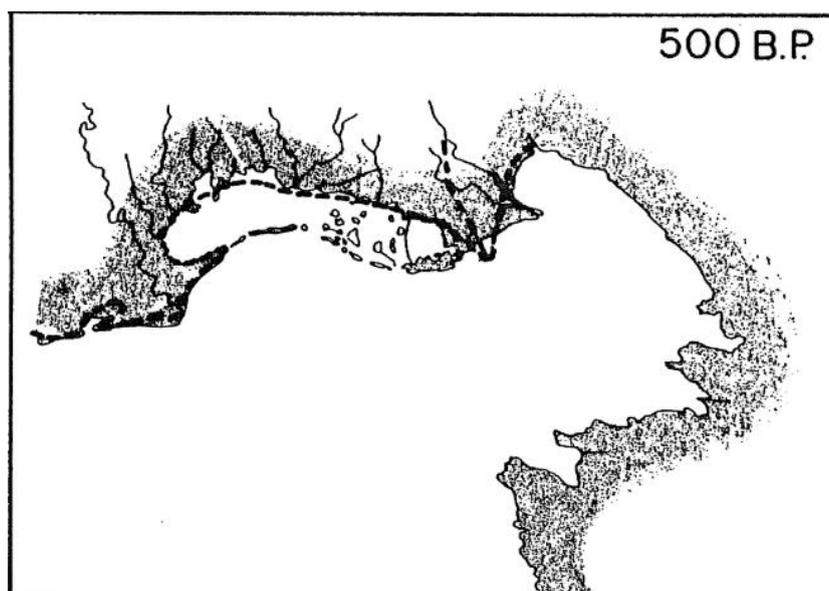


Figura 10: ricostruzione paleogeografica della linea di riva del golfo di Trieste per anno 500 B.P. Le linee che incidono quelle di riva sono i probabili percorsi del Paleo Tagliamento ad Ovest e Paleo Isonzo (e/o Natisone) ad Est. Fonte: (Marocco 1991)



Figura 11: particolare della pianura costiera e della laguna di Marano e Grado Fonte: cartografia storica “La nova descrizione di tutta la patria del Friuli – Roma MDLXIII” di Pirro Ligorio

2.4 Analisi della variazione del livello del mare

Si vuole analizzare in questo capitolo il cambiamento del livello del mare che ha interessato l'area del mare Adriatico settentrionale al fine di corroborare i risultati delle analisi geomorfologiche presentati nei capitoli precedenti. Alla fine del LGM la fusione dei ghiacciai portò ad un notevole incremento del livello del mare su scala globale arrivando ad innalzarsi di quasi 120 metri con una media annuale di circa 10 mm/anno (Benjamin et al. 2017). Due importanti avvenimenti accorsero nel post-LGM che diedero un importante input positivo nel bilancio dell'acqua. Questi fenomeni si chiamano Meltwater Pulse (MWP) e nel periodo temporale di interesse di questa ricerca sono identificati come MWP-1A e MWP-1B (Benjamin et al. 2017). Durante l'MWP-1A avvenuto circa tra gli 14.000 anni e i 13.000 anni fa, la cui datazione precisa è ancora dibattuta, si registrò in diversi posti del mondo un innalzamento repentino del livello del mare di circa 20 metri, con un probabile tasso di innalzamento di 40 mm/anno (Benjamin et al. 2017).

Una breve parentesi di raffreddamento climatico denominata “*Younger Dryas*” si interpose a questo fenomeno repentino di avanzamento marino decelerando di fatto il tasso di innalzamento del livello marino da 20 mm/anno a 4 mm/anno (Abdul et al. 2016). Verso la sua fine, circa 11.700 anni fa, si registrò un ulteriore moderato riscaldamento globale

che portò ad un altro fenomeno importante di risalita generale del livello del mare causando la deposizione e la formazione di morfologie associabili a quelle di cordoni litoranei sabbiosi lungo le coste adriatiche a protezione delle terre emerse (Fontana e Ronchi 2021). Tale evento è considerato l'inizio del periodo chiamato Olocene che perdura ancora tutt'oggi. Il livello del mare relativo che si poteva osservare nel nord del mare Adriatico, in questo periodo si attestava intorno ai -60 metri rispetto a quello odierno e raggiungeva le attuali aree costiere delle isole della Dalmazia (Fontana e Ronchi 2021). Per quanto concerne invece le coste italiane, che a causa della diversa morfologia delle sponde dovevano ancora essere raggiunte dal mare, questo perché composte da una piana alluvionale molto dolce formatesi nel LGM, in figura 12 è possibile vedere il cambiamento del livello del mare durante i secoli, inoltre sono rappresentati alcuni depositi formatisi durante questo periodo di trasgressione marina (Fontana e Ronchi 2021).

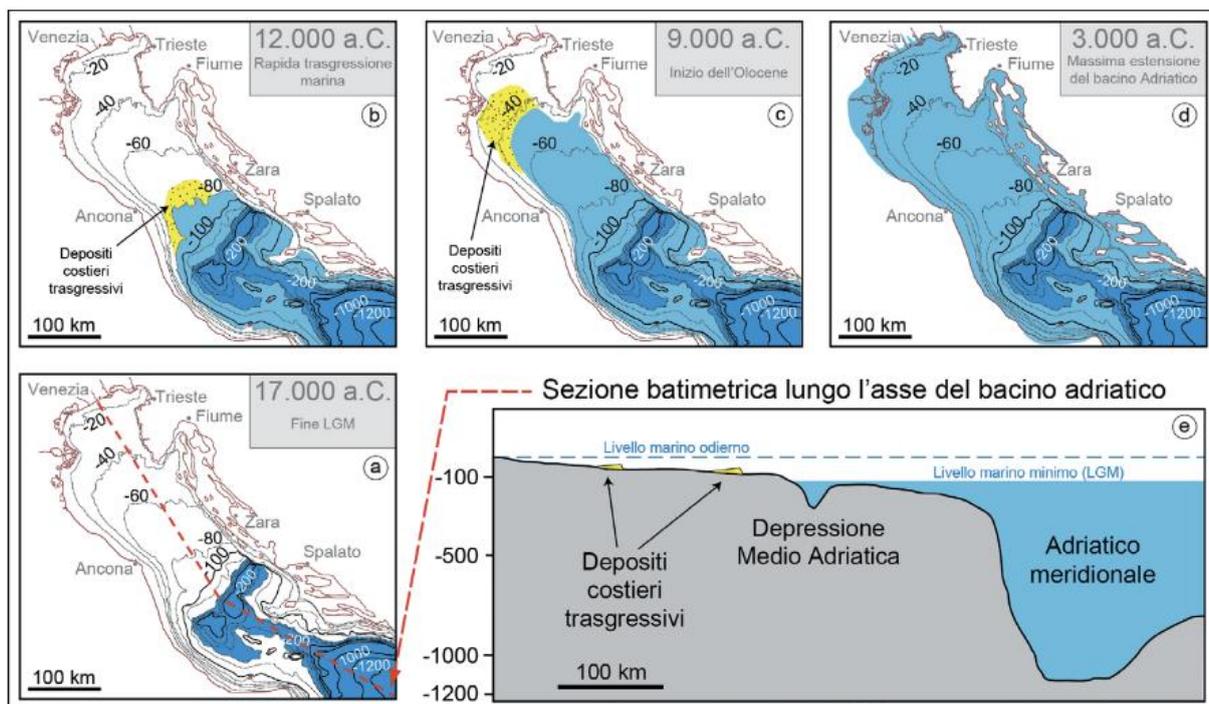


Figura 12: schema del progressivo allargamento del mare Adriatico durante alcuni momenti tra il LGM e l'Olocene
Fonte: (Fontana e Ronchi 2021)

Tali formazioni geomorfologiche, di cui un esempio visibile ad oggi si trova sul fondale marino al largo di Ravenna ad una profondità di circa 50 metri, sono composte da sabbie cementate e ormai modificate profondamente dall'azione marina (Fontana e Ronchi 2021). Altri esempi si rilevano anche vicino alle lagune di Venezia e a quella di Marano e Grado, in questo caso tali formazioni vengono definite con il nome di "Tegnue" nell'area veneziana e di "Trezze" per quanto riguarda l'area friulana (Fontana e Ronchi 2021). Nell'area di mare aperto analizzata si può osservare una di queste formazioni chiamata

“Trezza Grande” (vedasi figura 13), dove transetti stratigrafici attribuiscono a queste strutture sommerse un carattere di tipo lagunare (Marocco, Gordini, e Vio 2002). Tale classificazione è stata data sia per via della somiglianza morfologica con il delta del Tagliamento sia dall’influenza di acque dolci tipiche di un sistema deltizio rilevabili dalle indagini subacquee sul rilievo strutturale (Marocco et al. 2002).

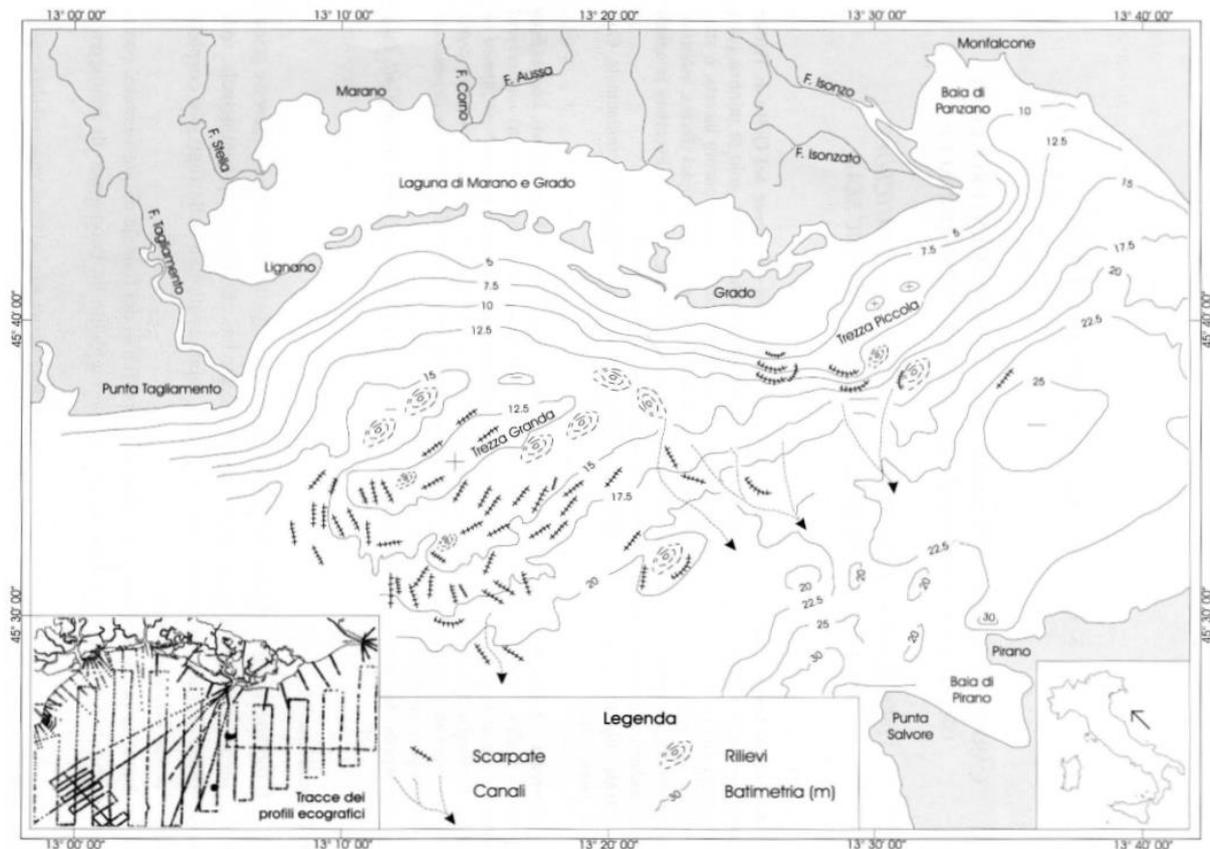


Figura 13: schema morfologico del fondo marino del golfo di Trieste Fonte: (Caressa et al. 2001)

Altro importante fattore che ha caratterizzato le aree costiere del nord adriatico è stata l’influenza dei sedimenti trasportati dai fiumi che hanno contrastato l’avanzamento del mare, originando aree che si possono definire vere e proprie lagune antiche formatesi nelle parentesi temporali di stasi della risalita del mare (Fontana e Ronchi 2021). I fiumi come l’Isonzo e il Tagliamento hanno infatti inciso profondamente le pianure della attuale regione Friuli che si estendeva per svariati chilometri oltre la linea di costa attuale, una prova ne sono i paleoalvei, ormai sepolti, al largo della bocca di porto Buso (Fontana e Ronchi 2021; Marocco 2009). Successivamente dopo la fine dello *Younger Dryas* si registrò un altro *meltwater pulse* denominato MWP-1B che ebbe un impatto minore rispetto al suo predecessore, registrando un innalzamento repentino di 14 metri (Abdul et al. 2016). In figura 14 è possibile osservare la ricostruzione dell’andamento globale del cambiamento

del livello del mare negli ultimi 35.000 anni, dove sono visibili gli apporti degli MWP-1A e MWP-1B e il periodo del LGM (Lambeck et al. 2014).

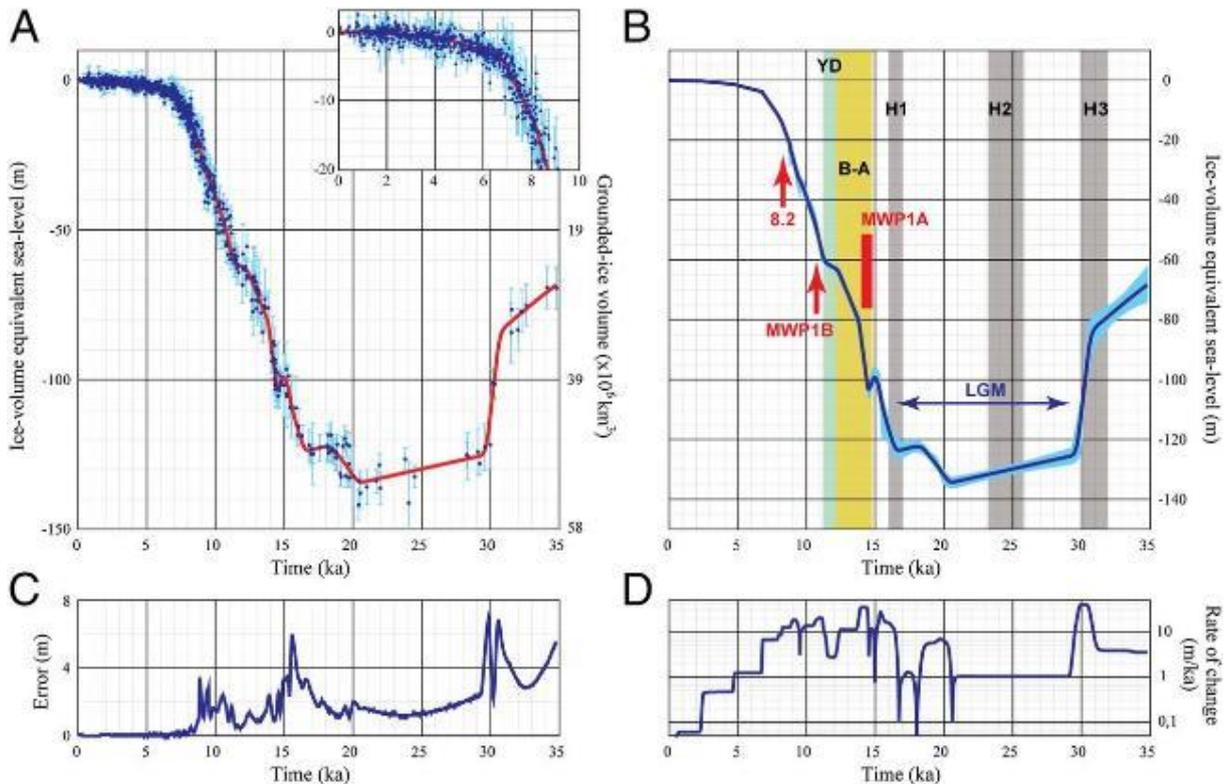


Figura 14: Soluzione per la funzione del livello marino eustatico (esl) e variazione del volume dei ghiacci. (A) Stime individuali del livello marino eustatico (esl) (blu) e la stima oggettiva della serie temporale con riduzione del rumore (linea rossa). I grafici rappresentano gli ultimi 9.000 anni. (B) La stessa stima del livello marino eustatico (esl) e i suoi valori limite di probabilità al 95%. Sono mostrati anche i principali eventi climatici dell'intervallo [Last Glacial Maximum (LGM), gli eventi di Heinrich da H1 a H3, il periodo caldo di Bølling-Allerød (B-A) e il periodo freddo dello Younger Dryas (Y-D)] e i tempi del MWP-1A, 1B e dell'evento di raffreddamento di 8,2 ka BP. (C) Stime di probabilità al 95% delle stime del livello marino eustatico (esl). (D) Stime del tasso di variazione del livello del mare. Fonte: (Lambeck et al. 2014)

Per quanto concerne invece i cambiamenti avvenuti negli ultimi millenni nell'area della laguna di Marano e Grado, sono stati utilizzati differenti proxies archeologici e ambientali (Fontana et al. 2017; Fontana e Ronchi 2021). Come è possibile vedere nella figura 15 sono evidenziati i siti di Ca' Baredi e Muzzana Bonifica e Ara del Gorgo, questi tre sono i principali siti archeologici che ci forniscono informazioni circa i cambiamenti avvenuti nel periodo preistorico. Dalla fase del Neolitico si riscontra un forte rallentamento della risalita del livello marino per poi arrivare ai tassi relativamente più bassi che si osservano oggi, con una risalita, seppur in continua accelerazione, di circa 1-3 mm/anno (Fontana e Ronchi 2021). Questo valore è tuttavia ancora oggi in mutamento a causa della condizione di riscaldamento globale recente che sta provocando anno dopo anno un aumento non solo della temperatura media globale ma anche del livello del mare (Meehl et al. 2005).

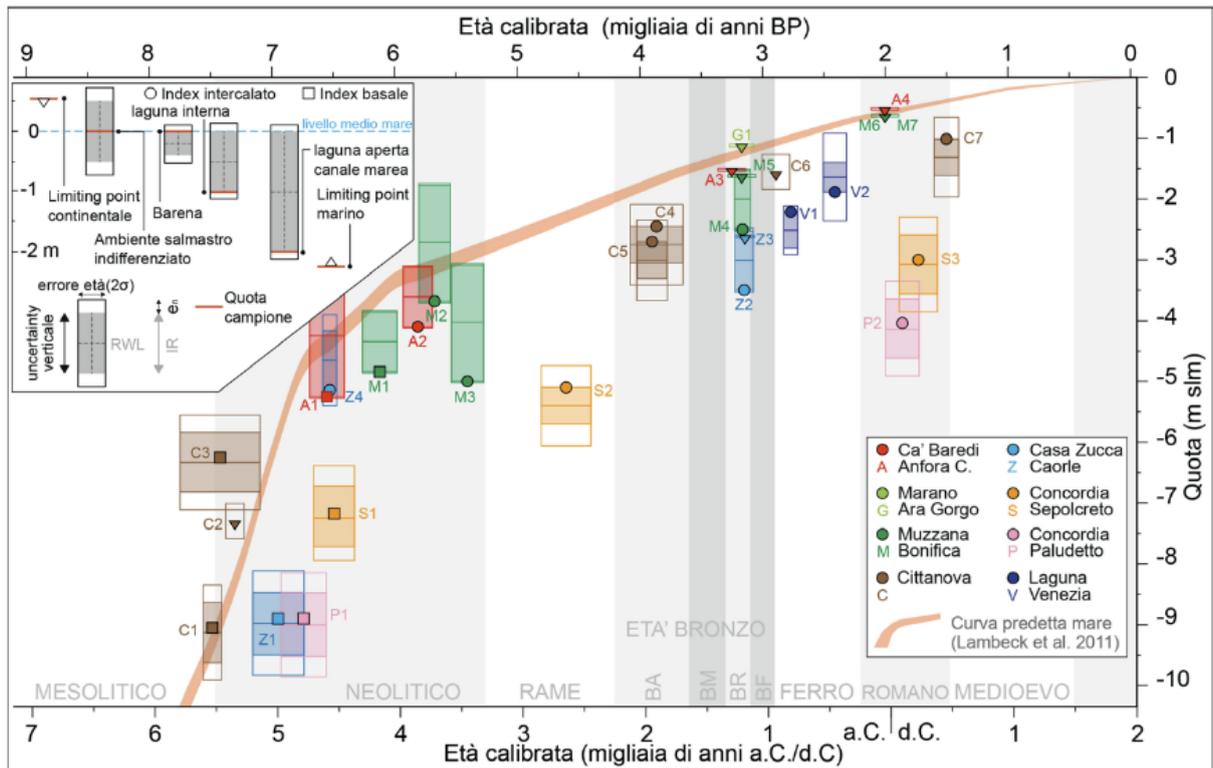


Figura 15: Diagramma degli index point del livello marino relativo (RSL) del passato per la zona compresa tra la Laguna di Grado e Venezia (modificato da Fontana et al. 2017). La curva del livello marino teorico calcolato è indicata dall'area arancione compresa tra le linee ottenute dal calcolo effettuato per i siti di Venezia e Trieste tramite il modello geofisico (Lambeck et al. 2011). In alto a sinistra è riportato lo schema con significato degli indicatori del RSL passato (index point). Fonte: (Fontana e Ronchi 2021)

3. Materiali e metodi

3.1 Strumenti di analisi remote sensing e GIS

3.1.1 I software GIS

In questa analisi geoarcheologica è stato utilizzato un software GIS, Sistema di Informazione Geografica Open Source, denominato Quantum GIS alla versione Long Term Release 3.28.4 “Firenze” e SAGA GIS alla versione 7.8.7 che hanno permesso la compilazione, elaborazione e produzione di dati sia vettoriali che raster. Tali strumenti hanno permesso inoltre l’organizzazione di database fondamentali per gestire tutte le informazioni ambientali e archeologiche trattate in questo lavoro.

3.1.2 Funzionamento LiDAR topografici e batimetrici

Ad oggi il metodo principale per ottenere dei Modelli di Elevazione Digitali DEM consiste nell’utilizzo della tecnologia LiDAR (Light Detection and Ranging). Per le analisi e produzione di mappe DTM e DEM in ambito di studi topografici viene utilizzato l’ALS (Airborne Laser Scanning) acronimo che descrive l’impiego di questa tecnologia sul campo mediante piattaforme aeree. Questo permette il telerilevamento di ampie aree di studio in modo efficiente e preciso (Căţeanu e Ciubotaru 2021). I sensori LiDAR riescono a determinare le quote del terreno misurando il tempo che trascorre dalla produzione di un impulso laser e il ritorno dello stesso al sensore dopo essere stato riflesso dal terreno. Ogni impulso viene corredato dalle coordinate geografiche e questo permette, dopo varie elaborazioni e calcoli di aggiustamento, la produzione dei modelli digitali della topografia del terreno. Le lunghezze d’onda prevalentemente utilizzate sono quelle dello spettro vicino al NIR, che riescono a penetrare la copertura vegetazionale e permettono una buona rilevazione topografica anche nelle aree urbane ricche di strutture e edifici (Awadallah, Juárez, e Alfredsen 2022).

Funzionamento LiDAR batimetrico

Per quanto concerne l’utilizzo di questa tecnologia nella raccolta di dati batimetrici si deve tenere conto del limite intrinseco che deriva dall’impiego di lunghezze d’onda appartenenti alla regione dell’infrarosso. Esse vengono prevalentemente assorbite dalla superficie d’acqua senza riuscire a penetrare fino al fondale (Chen, Gao, e Devereux 2017). Inoltre, vi è presente un altro fattore che complica le misure, ovvero la rugosità della superficie analizzata, che nel caso di quelle acquatiche, è data dalle increspature derivanti

dal moto ondoso. Quest'ultimo fattore provoca un fenomeno di scattering e di riflessione del segnale in differenti direzioni, alterando e riducendo quindi il segnale di ritorno processato dal sensore (Szafarczyk e Toś 2023).

Per poter analizzare la batimetria del fondale tramite questi sensori, quindi, è consigliato l'utilizzo di un LiDAR definito batimetrico che sfrutta una combinazione di due lunghezze d'onda: quelle a 1064 nm appartenenti alla regione del NIR e quelle a 532 nm nella regione del verde, quest'ultime in grado di penetrare le masse d'acqua (figura 16) (Szafarczyk e Toś 2023).

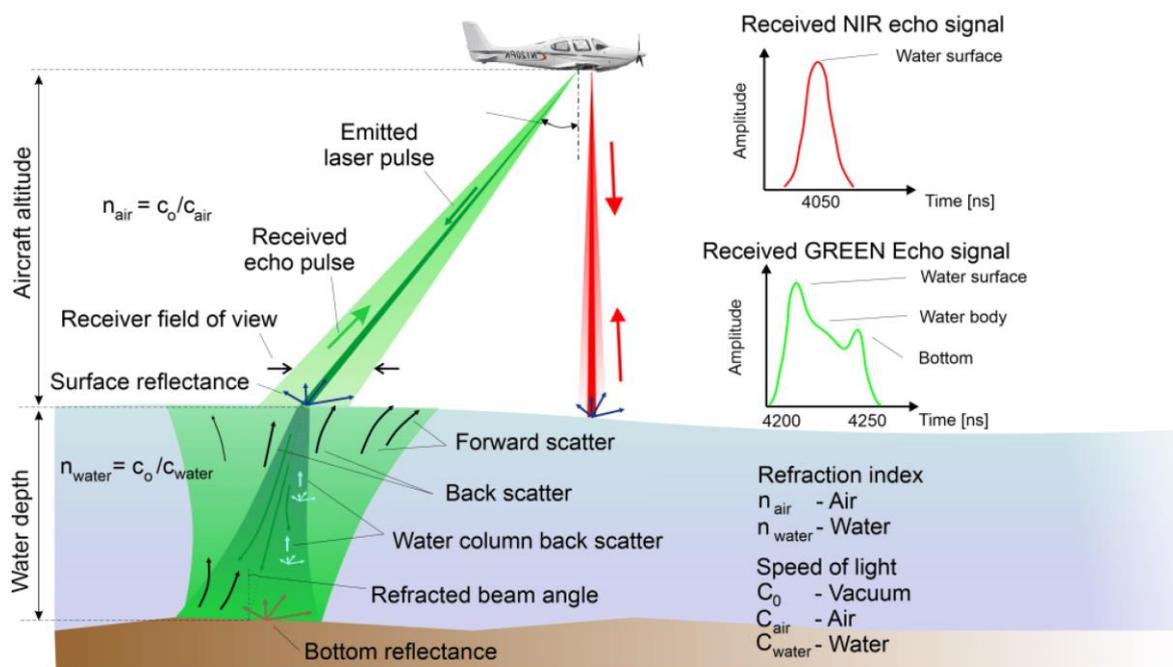


Figura 16: Scanner laser topografici (NIR) e topo-batimetrici (verdi) montati sulla stessa piattaforma aerea; (a sinistra) riflessione del segnale NIR sulla superficie dell'acqua; (a destra) principio della batimetria laser aerea (rifrazione del raggio laser sulla superficie dell'acqua, echi provenienti dalla superficie dell'acqua vicina, colonna d'acqua e fondo dell'acqua). Fonte: (Szafarczyk e Toś 2023)

3.2 Analisi topografica e batimetrica dell'area di studio

3.2.1 Creazione del DTM della pianura costiera

Per interpretare e studiare le caratteristiche geomorfologiche e geoarcheologiche della laguna di Marano e Grado è stata inizialmente presa in considerazione ed esaminata la piattaforma WEBGIS Eagle.fvg, che permette la consultazione e il download delle risorse informative cartografiche territoriali e ambientali georeferenziate, della regione del Friuli-Venezia Giulia. In particolare, per quanto concerne la parte topografica della pianura della laguna, è stata consultata la sezione relativa ai DTM (Digital Terrain Model). Sono stati

scelti e scaricati i dati raster (DTM) con griglia di passo 10 metri in formato ASCII (.asc). Questi dati derivano da un ricampionamento del (DTM) con passo a 1 metro, ottenuti dal rilievo LiDAR, effettuato nel periodo 2006 – 2010 dalle attività della Protezione Civile della Regione. La scelta di questa risoluzione rispetto ad altre deriva dal fatto che per le analisi geomorfologiche e topografiche su dati raster come DEM e DTM viene consigliato l'utilizzo di risoluzioni non maggiori di 10 metri. Nei casi in cui siano disponibili solo risoluzioni maggiori di 10 metri si consiglia di eseguire una operazione di ricampionamento dei dati raster in modo da diminuirne il dettaglio. Questo tipo di operazione permette di ridurre il rumore in visualizzazione, dato per esempio dalla presenza sul territorio di infrastrutture antropiche o forme paesaggistiche agricole date dalle lavorazioni del terreno come fossati e baulature. Tali elementi renderebbero difficile sia la visualizzazione che l'interpretazione delle forme geomorfologiche a scala più ampia (Verhagen e Drâguț 2012). Le risoluzioni utilizzate in questo lavoro risultano quindi un ottimo compromesso tra la risoluzione spaziale e la gestione dei dati per la maggior parte delle modellazioni geografiche, come ad esempio nelle analisi idrologiche o orogenetiche (Zhang e Montgomery 1994).

Sono state quindi scaricate le tavole raster² relative all'area di studio e successivamente tramite il tool *merge* presente in QGIS, sono state unite e poi ritagliate con l'utilizzo del tool *Raster by mask layer* utilizzando una maschera composta da un poligono rappresentante l'area di studio scelta.

3.2.2 Creazione del DTM batimetrico dell'area lagunare

La problematica principale riscontrata nella realizzazione del DTM relativo alla batimetria della laguna di Marano e Grado è la mancanza, nei vari geodatabase analizzati della regione FVG, di un dataset contenente questo tipo di informazione.

Dalla precedente elaborazione dei DTM, infatti, è possibile riscontrare una mancanza di dati relativi all'area lagunare, si evince quindi che la regione FVG ad oggi abbia utilizzato solamente sensori LiDAR topografici, utili allo scopo di raccolta dati in ambito terrestre ma non in quello acquatico.

² Nomenclatura delle tavole raster utilizzate: 86_SE, 87_SE, 87_SO, 88_SO, 108_NE, 108_NO, 108_SO, 109_NO, 109_SO.

La mancanza di dati raster riferiti alla topografia del bacino lagunare ha portato a ricercare dei dataset di altra natura da poter utilizzare. A tale scopo, sono stati utilizzati i dati raccolti per la creazione della Carta Batimetrica della Laguna di Marano e Grado, pubblicata sul sito della regione Friuli-Venezia Giulia (Triches et al. 2011).

Visto che la struttura di tali dati risulta essere vettoriale si è reso necessario l'utilizzo di un tool di interpolazione. In questo caso è stato deciso di utilizzare il tool di processing *Tin interpolation* che produce in output un raster di interpolazione Triangulated Irregular Network (TIN). Questo metodo di interpolazione sfrutta l'alta densità di dati permettendo la realizzazione di un raster DTM il più possibile vicino alla realtà ed esente da artefatti e distorsioni di vario genere, come suggerito anche nella relazione tecnica relativa alla Carta batimetrica (Triches et al. 2011).

Per ottenere però una rappresentazione veritiera e completa della laguna è stato necessario integrare i dati, già molto precisi, appartenenti alla carta batimetrica, con altri layer vettoriali, questo perché risultano assenti sia i dati delle quote riferite alle aree emerse e sia quelli delle aree grige (barene, velme e aree non navigabili). Inoltre, è stato necessario definire in modo corretto le forme dei canali più profondi, perché i soli dati della carta batimetrica non erano sufficienti, in questo modo è stato evitato l'insorgere di artefatti nella elaborazione del modello di interpolazione TIN. L'aggiunta di questi layer è stata resa possibile perché l'algoritmo di interpolazione TIN consente l'utilizzo di più layer in input contemporaneamente. Nei paragrafi seguenti viene spiegata brevemente la realizzazione di questi layer aggiuntivi.

Per permettere all'algoritmo di interpolazione di eseguire una rappresentazione più accurata della forma dei canali lagunari profondi e delle aree sommerse della laguna è stato quindi creato un layer di linee di struttura contenente delle geometrie lineari che rappresentano le isobate di profondità, esse sono state digitalizzate delimitando i contorni dei canali lagunari, con particolare attenzione per quelli aventi un dislivello molto ampio di profondità. Queste isobate sono state definite con un valore di profondità intermedio e graduale. Tale operazione ha permesso appunto una definizione del limite dei canali profondi eliminando eventuali distorsioni che si potevano creare dall'interpolazione tra un punto riferito alla profondità molto elevata di un canale e un altro punto adiacente che invece rappresentava la piana lagunare molto meno profonda. Inoltre, in questo layer sono

state aggiunte ulteriori isobate per le aree delle terre emerse, definite tutte con un valore pari a 0 metri.

Per poter aumentare ulteriormente le performance di interpolazione nelle aree delle terre emerse, si è sfruttato il raster “Water and Wetness” relativo all’anno 2018 a risoluzione di 10 metri, prodotto dell’Agenzia Europea dell’Ambiente (EEA) nell’ambito dei dataset che compongono l’inventario del CORINE Land Cover presente sul sito del progetto COPERNICUS.

Da questo raster, dopo una vettorializzazione tramite il tool “*Polygonize*”, sono stati estratti solo i poligoni inerenti alle terre emerse della laguna. Successivamente sono stati aggiunti a mano dei poligoni che raffiguravano ulteriori terre emerse presenti sulla carta batimetrica ma assenti sul raster del “Water & Wetness 2018”. Ultimata l’operazione precedente, sono stati generati dei punti casuali all’interno di essi, tutti aventi quota 0 metri.

Per quanto concerne invece le aree come barene e zone non navigabili, caratterizzate da assenza di dati sia batimetrici che da rilievo LiDAR, la soluzione adottata, più semplice e meno impattante a livello di interpolazione, è stata quella di generare dei punti aventi una batimetria definita dalla media tra il primo dato disponibile più vicino di profondità e la quota a 0 metri della terra emersa. Ciò ha permesso di avere una rappresentazione di queste aree che altrimenti sarebbero rimaste senza dati.

Infine, l’ultimo passaggio, è stato caratterizzato dall’utilizzo del tool *Interpolazione TIN*, impostando la risoluzione in output a 10 metri e selezionando in input tutti i layer precedentemente prodotti, in modo da ottenere il raster DTM della laguna.

3.2.3 Creazione del DTM batimetrico dell’area costiera

Per aggiungere un ulteriore livello di informazione, utile per le successive interpretazioni, è stato deciso di implementare un dataset, sempre di tipo raster, relativo alla batimetria dell’area costiera della laguna di Marano e Grado. Tale dataset proviene dai lavori di Trobec e Busetti (2017) e Trobec et al. (2018).

Questo dataset per poter essere utilizzabile e compatibile con le mappe raster precedentemente prodotte è stato inizialmente ricampionato e portato dalla risoluzione originale di 50 metri a quella di 10 metri. Per compiere questa operazione di ricampionatura è stato impiegato il tool Grass “*r.resample*” integrato in QGIS che sfrutta il

metodo del vicino più prossimo. Successivamente il raster della batimetria costiera è stato ritagliato in modo che si limitasse alla sola area di studio. Per porre rimedio alla disparità di risoluzione del raster batimetrico del golfo di Trieste e gli altri raster ad alta risoluzione, è stato deciso di eliminare una porzione di raster di circa 100 m a ridosso della costa. Quest'area sarà poi successivamente interpolata tramite il tool *SAGA "CloseGaps"* che sfrutta il metodo del vicino più prossimo per re-interpolare queste aree e quelle senza dati in modo da unificare i raster in unica mappa DTM.

3.2.4 Creazione del DTM complessivo per l'area di studio

Per poter avere una visione complessiva dell'area di studio della Laguna di Marano e Grado, è stato quindi deciso di unire: la topografia della laguna derivante dai dati della carta batimetrica del 2011, i rilievi LiDAR della protezione civile della regione e infine, la batimetria costiera derivante dallo studio di Trobec e Busetti (2017) e Trobec et al. (2018). Per procedere all'unione delle tre differenti mappe raster si è dovuto innanzitutto ottenere delle maschere poligonali in modo tale da poter ritagliare le aree di pertinenza del Raster DTM topografico e del raster della batimetria della laguna. È stata quindi eseguita una riclassificazione del raster DTM contenente l'interpolazione TIN della laguna tramite il tool *"Reclassify by table"*. La tabella è stata impostata in modo che il raster riclassificato rappresentasse le porzioni di terra emersa con un valore uguale a 0, mentre le porzioni sommerse dall'acqua con un valore uguale a 1. Pertanto, per ottenere tale risultato sono stati definiti nella tabella del tool due intervalli specifici: i valori compresi tra il valore minore di profondità registrato e i 0 metri, esclusi, corrispondevano al valore 1 mentre tutti i valori uguali a 0 metri e superiori corrispondevano al valore 0.

Il nuovo raster riclassificato è stato poi poligonizzato e trasformato in un layer poligonale vettoriale, così facendo sono state ottenute le due maschere, una per la terra ferma e l'altra per le parti sommerse. Il passo successivo è stato quello di utilizzare il tool *"Clip by mask layer"*, per ottenere i due DTM complementari. Bisogna precisare che, quando si eseguono questi tipi di operazioni di ritaglio con dati raster, è necessario tenere a mente che solo i pixel completamente compresi dalla sovrapposizione con la maschera poligonale vengono compresi nel nuovo raster ritagliato, mentre quelli solo parzialmente compresi vengono esclusi; tale effetto si nota specialmente ai bordi del raster in output. Per limitare questo problema, si è eseguita una operazione di *buffer* di 10 metri sulla maschera di riferimento

per il DTM topografico del terreno, in questo modo si è limitata quasi totalmente la perdita di pixel.

Ottenuti i tre raster, si è potuto procedere alle ultime operazioni che portano alla creazione del raster completo. I tre raster sono stati inizialmente fusi con il tool "merge", poi è stata eliminata la presenza di eventuali aree con dati mancanti tramite il tool "SAGA Close gaps" e infine ritagliato per far corrispondere il tutto all'area di studio designata, il risultato finale è visibile in figura 17.

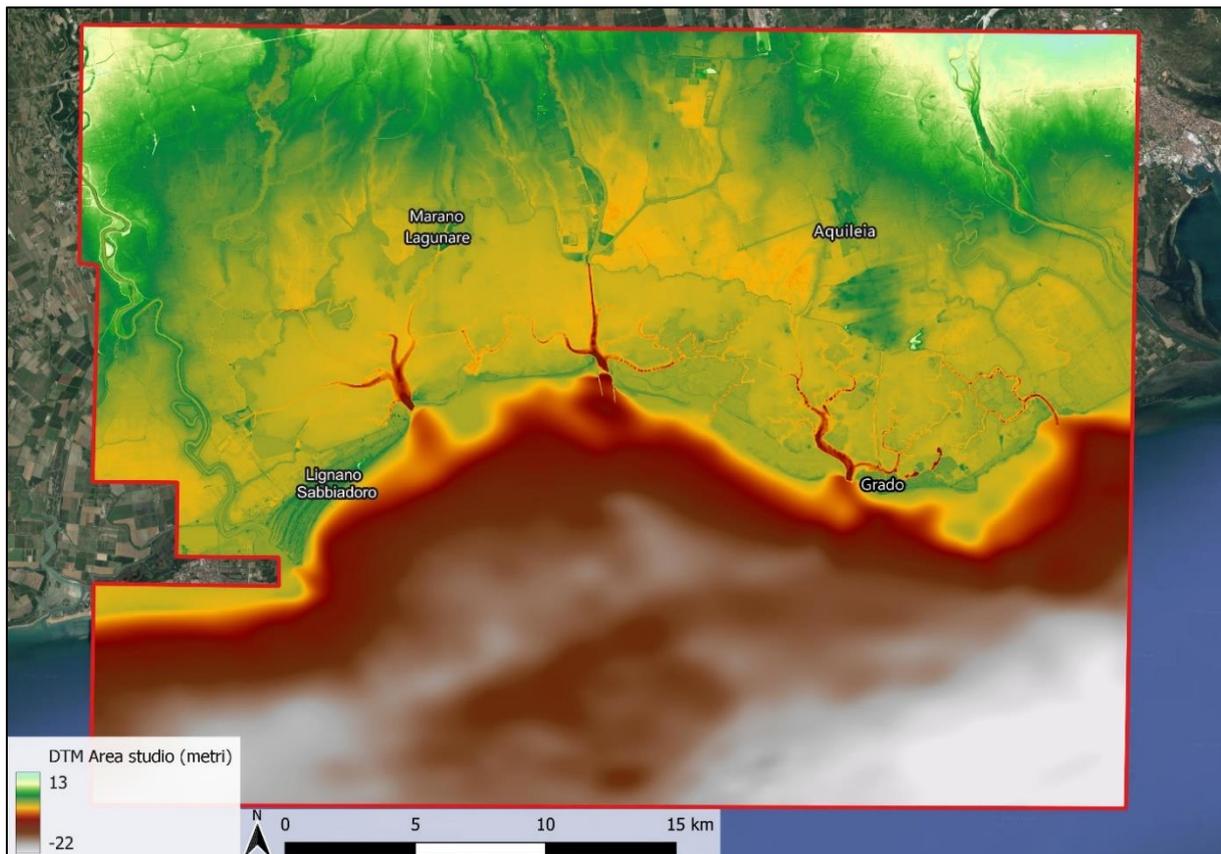


Figura 17: Risultato finale del DTM completo, immagine satellitare di sfondo fonte Google Satellite Immagini ©2023

Da precisare l'utilizzo di diversi datum geodetici, per esempio nel caso dei dati LiDAR della protezione civile le proiezioni e datum utilizzati sono i seguenti (Monte Mario/Italy Zone 2 (fuso E) – Datum: Roma 40 – Proiezione: Gauss-Boaga – Fuso: Est – EPSG: 3004) con rilievi effettuati nel periodo 2006 – 2010. Per quanto riguarda i dati relativi alla Carta Batimetrica della laguna di Marano e Grado è stato utilizzato il sistema di riferimento WGS 84 / UTM zone 33N poi convertito con sistema di riferimento verticale riferito allo zero IGM42, usato per tutta l'Italia peninsulare, insieme all' EPSG:3004 - Monte Mario / Italy zone 2, i rilievi in questo caso sono stati eseguiti tra gli anni 2009-2010-2011. Infine, per

i dati riferiti alla batimetria del Golfo Trieste è stato applicato l'EPSG:32633 - WGS 84 / UTM zone 33N con dati e rilievi raccolti tra il 2000 e il 2015.

Le proiezioni presenti nelle varie mappe sono state poi tutte uniformate nella produzione finale del raster topografico, portando tutte le proiezioni alla EPSG:3004 - Monte Mario/Italy zone 2 utilizzata nel progetto.

3.3 Creazione del nuovo database archeologico

Il database archeologico è stato progettato con la consultazione di vari archivi digitali come il RAPTOR (Ricerca Archivi e Pratiche per la Tutela Operativa Regionale) e l'ERPAC (Ente Regionale PATrimonio Culturale della Regione Friuli-Venezia Giulia) coadiuvati da altri siti archeologici presenti in letteratura e pubblicazioni edite e inedite.

Per ogni sito archeologico è stato realizzato un layer puntuale che specifichi le coordinate del sito, corredato da una scheda informativa di cui un esempio si può vedere in figura 18.

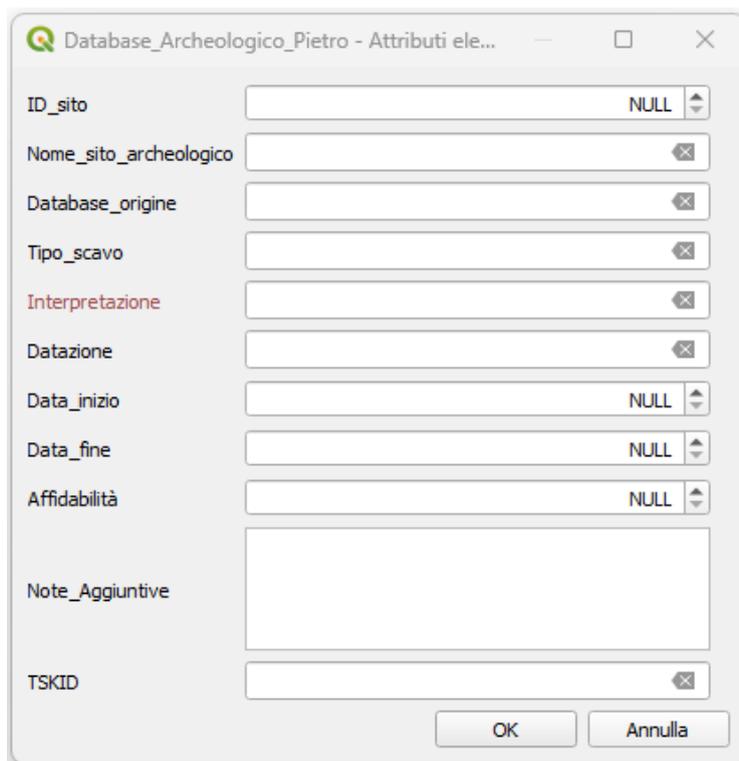


Figura 18: maschera di compilazione del nuovo database archeologico realizzato per il lavoro di tesi. Fonte: QGIS

Nella scheda viene riportato il nome del sito archeologico come definito dall'archivio di appartenenza, il nome del database di origine se da letteratura o da un dataset specifico online ERPAC o RAPTOR, il tipo di scavo che è stato eseguito, se ricognizione, scavo o entrambi. Per quanto concerne il campo relativo all'interpretazione è stato deciso di

utilizzare le descrizioni presenti nell'archivio online ERPAC in modo da semplificare e uniformare il nuovo database (vedasi tabella 1)

Tabella 1: vocabolario per il campo "interpretazioni" utilizzato per il nuovo database archeologico.

Nuovo vocabolario per il campo "Interpretazione"
AREA_AD_USO_FUNERARIO
AREA_DI_MATERIALE_MOBILE
DRENAGGI_BONIFICA
GIACIMENTO_SUBACQUEO
IMBARCAZIONE
INFRASTRUTTURA_DI_SERVIZIO
INFRASTRUTTURA_IDRICA
INFRASTRUTTURA_PORTUALE
INFRASTRUTTURA_PORTUALE_INFRASTRUTTURA_DI_SERVIZIO
INFRASTRUTTURA_VIARIA
INSEDIAMENTO
INSEDIAMENTO_AREA_AD_USO_FUNERARIO
INSEDIAMENTO_LUOGO_DI_ATTIVITA_PRODUTTIVA
LUOGO_AD_USO_PUBBLICO
LUOGO_DI_ATTIVITA_PRODUTTIVA
RITROVAMENTO_SPORADICO
SITO_NON_IDENTIFICATO
SITO_PLURISTRATIFICATO
SITO_POLIFUNZIONALE
STRUTTURA_ABITATIVA
STRUTTURA_ABITATIVA_INFRASTRUTTURA_DI_SERVIZIO
STRUTTURA_ABITATIVA_LUOGO_DI_ATTIVITA_PRODUTTIVA_INFRASTRUTTURA_VIARIA
STRUTTURE_PER_IL_CULTO

Per i campi "Datazione", "Data_inizio", "Data_fine" per il sito archeologico è stata decisa una suddivisione semplice ma efficace delle età storiche (vedasi tabella 2).

Tabella 2: suddivisione delle età e dei periodi storici analizzati

Periodo Storico	Età	Anni		
Preistoria	Neolitico	-8000	-2500	a.C.
Protostoria	Bronzo antico	-2500	-1600	a.C.
	Bronzo medio	-1600	-1300	a.C.
	Bronzo recente	-1300	-1000	a.C.
	Ferro	-1000	-700	a.C.
/	Preromano	-700	-200	a.C.
Romana	Repubblicana Romana	-200	0	a.C.
	Alto imperiale	0	180	d.C.
	Medio imperiale	180	300	d.C.
	Tardo imperiale	300	450	d.C.
Tardoantico e Altomedioevo	Tardoantico	450	700	d.C.
	Altomedioevo	700	1000	d.C.
Medioevo	Centrale/Classico Medioevo	1000	1200	d.C.
	Basso Medioevo	1200	1400	d.C.
/	Rinascimentale	1400	1600	d.C.
Incerta	Incerta	?	?	?

Sono stati esclusi dall'analisi i periodi preromano e Rinascimentale per via della bassa quantità di siti archeologici ricollegabili a queste epoche storiche.

Il nuovo database doveva contenere tutte le localizzazioni corrispondenti ai rinvenimenti dei reperti archeologici. Sulla base dell'interpretazione conferita al sito archeologico, si possono individuare una o più fasi cronologiche a cui corrispondono una o più possibili interpretazioni, tante quante sono stati i tipi di funzione che quel sito ha ricoperto nel tempo.

Questo tipo di dati a livello di gestione di database informatici può essere gestito seguendo due tipi di relazione. Con una relazione uno a molti ovvero che ad un'unica localizzazione vengono inserite tante fasi di occupazione quante ne vengono interpretate, oppure si può proseguire inserendo tanti record, sulla stessa localizzazione, quante sono le fasi di occupazione.

Per semplificare la gestione e lo studio dei dati ed avere quindi un'unica tabella in modo che sia semplice eseguire delle interrogazioni al database si è scelto la seconda strada.

È presente, inoltre, un campo denominato “Affidabilità” che contiene un valore da 1 a 5 scelto in modo soggettivo in base alla qualità, quantità e database di appartenenza del dato archeologico.

Il campo “Note aggiuntive” contiene alcuni appunti relativi al sito archeologico utili per una veloce identificazione delle evidenze trovate. Infine, è presente il campo “TSKID” in cui è stato inserito il link diretto alla scheda online, per gli archivi presenti in rete come l’ERPAC, in modo che, in caso di necessità, risulti immediato il raggiungimento della scheda archeologica originale.

3.4 Strumenti utilizzati per l’analisi geomorfologica

Per poter eseguire un’analisi geomorfologica sul territorio dell’area di studio è stata dapprima georeferenziata la carta delle unità geologiche della pianura del Friuli-Venezia Giulia alla scala 1:150.000 (Fontana et al. 2019). Successivamente sono stati digitalizzati dei poligoni con le unità geologiche presenti, in modo da avere una base geologica di riferimento per le interpretazioni geomorfologiche. È stato eseguito inoltre lo strumento TPI (Topographic Position Index) nel software SAGA GIS versione 7.8.7 che genera una mappa raster di tutta l’area di studio evidenziando quelle che sono le asperità del terreno. Le aree con un valore TPI maggiore di 0, rappresentate dalla gradazione rossa, indicano che il punto analizzato ha una altezza maggiore della media dei pixel considerati dal raggio di area selezionato, mentre un valore minore di 0 indica che il pixel possiede un valore di elevazione minore di quello della media, i pixel invece vicini allo zero indicano che l’area non ha particolari elevazioni ed è simile a quella media (Salinas-Melgoza, Skutsch, e Lovett 2018). In questo studio è stato deciso di utilizzare una scala a 1000 metri derivante da un approccio trial and error, in quanto a questa scala è possibile apprezzare in modo migliore le macro-forme della pianura costiera limitando le forme presenti a scale più piccole che possono arrecare disturbo nelle eventuali interpretazioni (vedasi figura 19). Inoltre, per il riconoscimento delle tracce dei paleoalvei sono state impiegate, le immagini satellitari, di Google Satellite (anno acquisizione immagini 2023) e le immagini satellitari di ESRI (Environmental System Research Institute) (anni acquisizioni immagini 2019-2020-2021-2022), aggiunte al progetto QGIS tramite il pannello “Quick Map Services”.

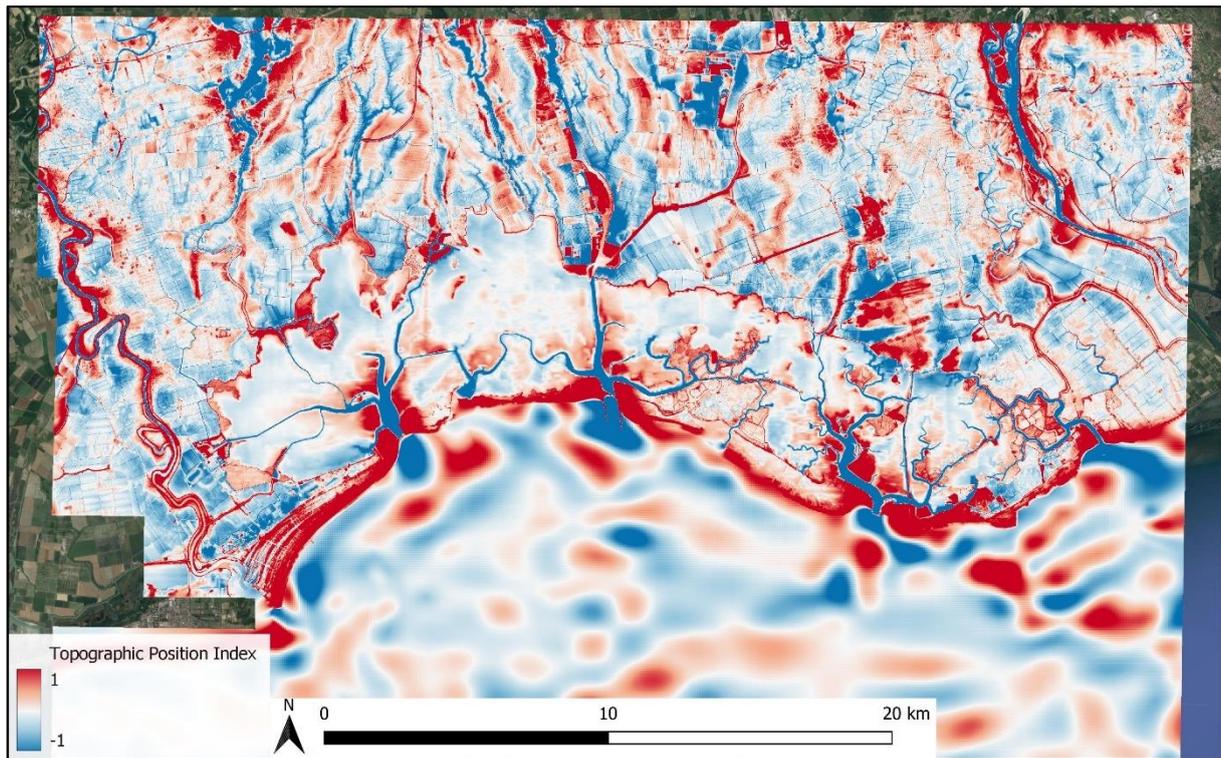


Figura 19: Mappa risultato elaborazione tool TPI. Fonte: elaborazione QGIS e immagini satellitari Google satellite 2023.

3.4.1 Cartografia storica

È stata utilizzata una mappa del 1536 intitolata “La nova descrizione di tutta la patria del Friuli – Roma MDLXIII” di Pirro Ligorio.

3.4.2 Carotaggi sedimentologici

In questo studio sono state utilizzate le evidenze sedimentologiche e le datazioni al carbonio 14 dei sondaggi eseguiti su tutto il territorio della laguna di Marano e Grado. Nello specifico sono state prese in esame le analisi dei sondaggi S2 - S8 - S9 contenute nel lavoro di Marocco (1989). I sondaggi S19 - S20 analizzati nel lavoro di Marocco (1988), il sondaggio S15 e le sue analisi sedimentologiche contenute nel lavoro di Marocco et al. (1988) le considerazioni sedimentologiche su alcuni transetti stratigrafici nell’area delle dune di Belvedere e San Marco analizzate sempre da Lenardon e Marocco (1994) e Marocco (1992), il transetto composto dai sondaggi S5 - S4 - S11 - S12 contenuti nel lavoro di Arnaud-Fassetta et al. (2003).

Ci si è serviti inoltre delle evidenze scientifiche e archeologiche derivate dai carotaggi eseguiti nell’ambito del progetto S.A.R.A. (Subacquea Archeologia Romana Aquileia) del 1994 nell’area di Aquileia (Arnaud-Fassetta et al. 2003). Sono state comprese anche alcune evidenze sedimentologiche e stratigrafiche dei sondaggi compiuti nelle aree

archeologiche di Ara del Gorgo, Muzzana Bonifica e Ca' Baredi contenute nel lavoro di Fontana et al. (2018).

Sono stati utilizzati inoltre, i sondaggi BLG1, PCN1 presenti nel lavoro di tesi magistrale di Bresolin (2012).

Infine, sono stati presi in esame anche alcuni sondaggi eseguiti presso la chiesa di Santa Maria delle Grazie a Grado analizzati in un recente lavoro di Marocco et al., (2005). La localizzazione geografica di tutte queste evidenze scientifiche è visibile in figura 20.

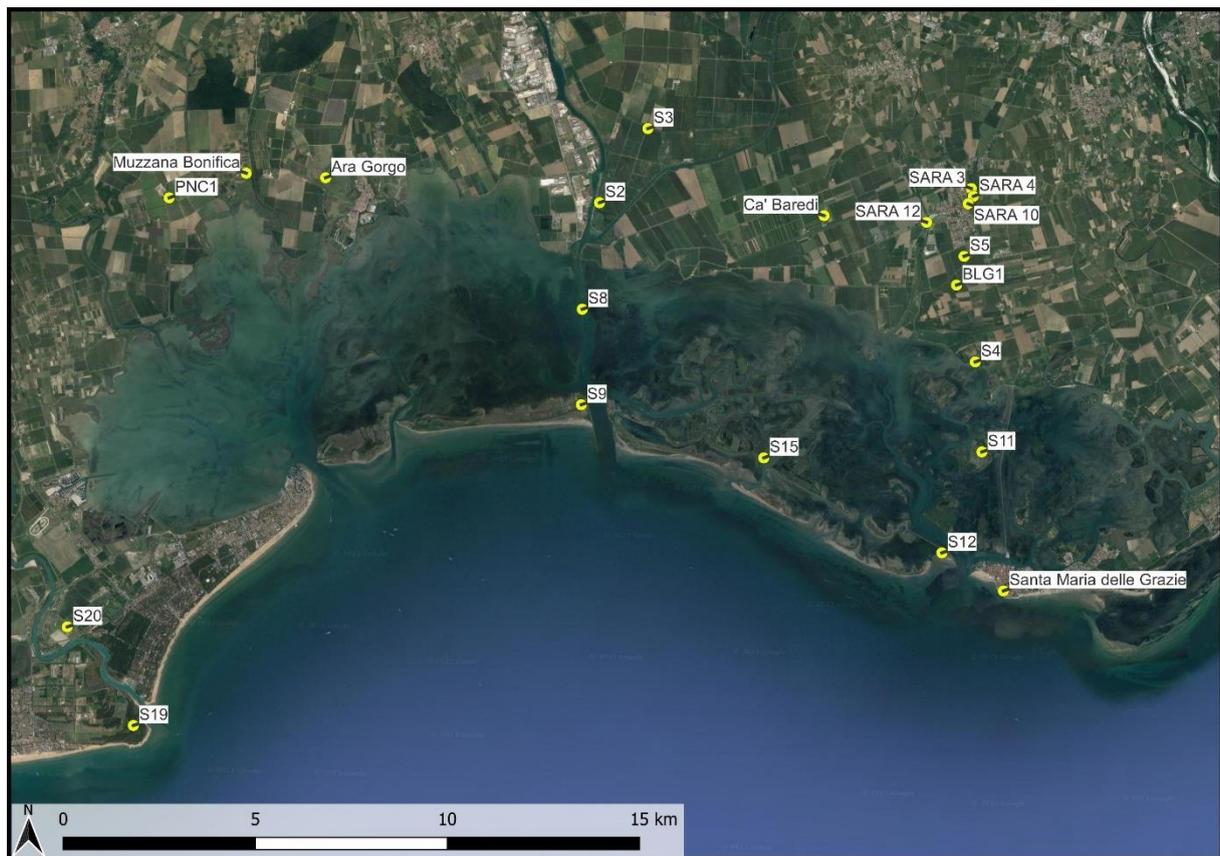


Figura 20: localizzazione dei sondaggi sedimentologici presi in esame. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023

3.4.3 Simulazione idrologica per la ricostruzione dei livelli antichi delle acque marine

A partire dal DTM complessivo dell'area di studio che modella il profilo altimetrico dei tre ambienti esaminati, si è cercato di rimodellare il livello delle acque marine, lagunari e di superficie nel passato in relazione alla geomorfologia e ai record archeologici presenti sul territorio. La ricostruzione è stata compiuta utilizzando il diagramma degli index point del livello marino relativo (RSL) del passato per la zona della laguna di Marano e Grado (modificato da Fontana et al. 2017) e la curva del livello marino teorico calcolato presente

nel modello geofisico proposto da Lambeck et al. (2011). In questa modellazione si è cercato inoltre di tenere in considerazione il fenomeno della subsidenza media tra l'area lagunare di Caorle e Marano Grado, calcolata sulla base di marker sedimentologici e archeologici (Lambeck et al. 2004).

In età romana il livello del mare si attestava a circa -0,8 m slm rispetto al livello odierno (Fontana et al. 2017; Lambeck et al. 2004) mentre il valore di subsidenza totale è stato calcolato per il periodo compreso tra il 100 a.C., momento storico che coincide all'incirca con le prime attestazioni della presenza del porto fluviale di Aquileia (Scotti Maselli 2014), e il termine delle rilevazioni dei dati LiDAR all'anno 2010. Considerando quindi un lasso temporale complessivo di 2110 anni, con un tasso stabilito di $- 0,28 \text{ mm/anno} \pm 0,20 \text{ mm/anno}$, si stima che le terre attorno alla laguna si siano abbassate di circa 590 mm (arrotondato a 0,6 m) (Lambeck et al. 2004). Tale valore fungerà inoltre da intervallo di confidenza per provare a includere nella modellazione possibili fenomeni non controllabili con i dati a disposizione, come ad esempio il tasso di sedimentazione dovuto agli apporti fluviali nelle diverse parti dell'area di studio o all'escursione delle maree.

Le prime operazioni eseguite consistono in una rielaborazione della mappa DTM complessiva dell'area di studio. Sono stati così eliminati gli elementi antropici moderni appartenenti al consorzio di bonifica, che potevano alterare il risultato finale della modellazione idrologica. In particolare, si è provveduto a rimuovere l'area appartenente all'imponente argine alto fino a 2 metri che delimita tutto il perimetro della laguna. Questo procedimento è stato eseguito attraverso il tool "*Clip by mask layer*", dopo aver disegnato un'area di rispetto intorno all'argine di circa 120 metri. Il DTM ritagliato è stato successivamente interpolato tramite il tool "*SAGA Close Gaps*" in modo da riottenere una superficie continua priva di mancanza di dati.

La creazione dei diversi livelli di quota delle acque marine e lagunari che riguardano il periodo di interesse della ricerca, è avvenuta grazie al tool "*reclassify by table*"; quest'azione ha permesso di riclassificare la banda del file raster assegnandoli nuovi valori sulla base di intervalli specificati in una tabella data decisi dall'utente. Per l'analisi del periodo romano la tabella è stata quindi impostata in modo da riclassificare con un valore pari a 1 i valori della banda compresi tra il minimo registrato e il valore -0,8 m, mentre i valori tra lo -0,8 metri e il massimo registrato sono stati riclassificati con il valore 0. Invece per ottenere la rappresentazione dell'intervallo di confidenza (subsidenza

totale) si sono ripetute le stesse azioni ma come valore limite di interfaccia terra-mare di -1,4 m dato dalla somma del valore di subsidenza totale calcolato per 2110 anni (-0,6 m subsidenza totale sommata a -0,8 m valore del livello del mare al periodo romano).

Come ultimo passaggio, i raster riclassificati sono stati vettorializzati tramite il tool "*Polygonize*"; successivamente, il layer è stato semplificato nella geometria con il tool "*Smooth geometry*", eseguendo tre interazioni e lasciando inalterate le altre impostazioni di default, per limitare in questo modo l'effetto legato alla presenza di rumore di fondo nel DTM. Nella visualizzazione finale della ricostruzione i poligoni del livello del mare sono stati impostati con differenti colori in base al livello che rappresentano, in modo da ottimizzarli nella visualizzazione in mappa.

4. Risultati

4.1 Analisi geomorfologica dell'area di studio

L'area di studio è caratterizzata da tre principali ambienti: una pianura alluvionale con pendenze dolci attraversata da molteplici corsi fluviali, un ambiente di transizione lagunare, ovvero la laguna di Marano e Grado, e infine un ambiente costiero che separa la laguna dal mare, composta da cordoni litorali. Qui sono presenti le sei principali bocche di porto: Lignano, S. Andrea, Porto Buso, Morgo, Fosa di Grado, e Primero (figura 21).

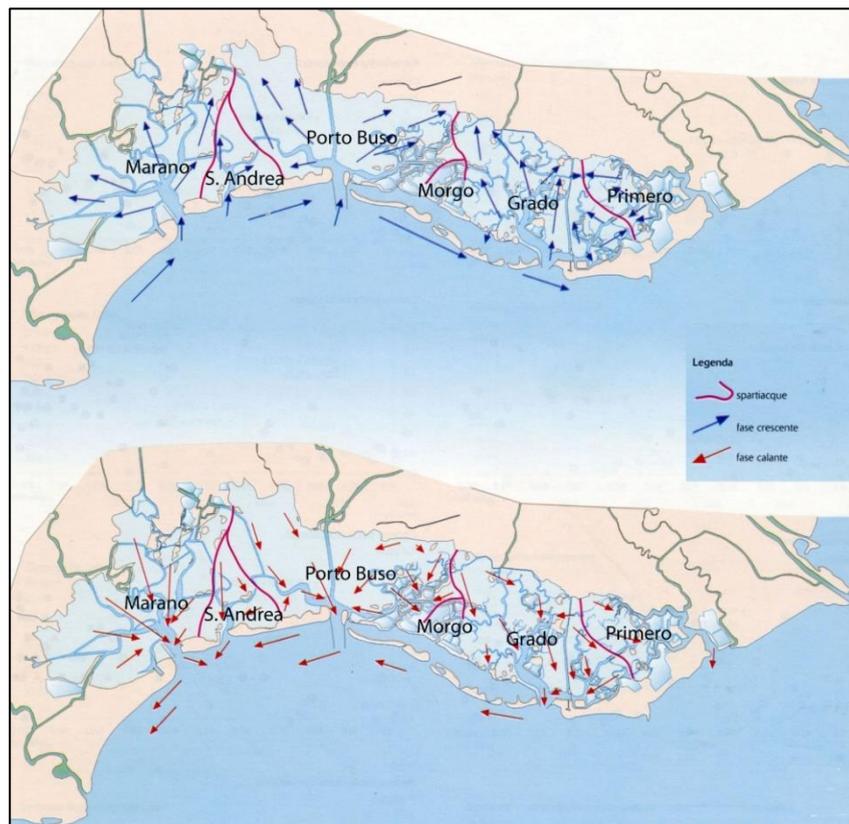


Figura 21: bocche di porto e flussi marea in laguna. Fonte: da <http://cmsarpa.regione.fvg.it/cms/tema/acqua/acque-marino-costiere-e-lagunari/approfondimenti/schede/Inquadramento-geomorfologico-e-idrologico-delle-lagune-di-Marano-e-di-Grado.html>

L'utilizzo di dati LiDAR ad alta risoluzione coadiuvati dalla mappa TPI, hanno permesso di evidenziare le morfostrutture descritte nei prossimi paragrafi in modo molto più preciso, rispetto alla rappresentazione contenuta nella carta geologica del 2019 (figura 4). Queste nuove informazioni insieme all'analisi del database archeologico, saranno impiegate per l'analisi e la contestualizzazione geoarcheologica dei reperti che sono stati rinvenuti nell'area di studio.

4.1.1 Sistemi dunali antichi

Queste formazioni morfologiche localizzate vicino al margine lagunare nella parte orientale della pianura a sud di Aquileia in un'area compresa tra il fiume Natissa e il canale Tiel, sono delle formazioni che rientrano nella subunità GOR1, attribuibile alle dune di Belvedere e San Marco (figura 22).

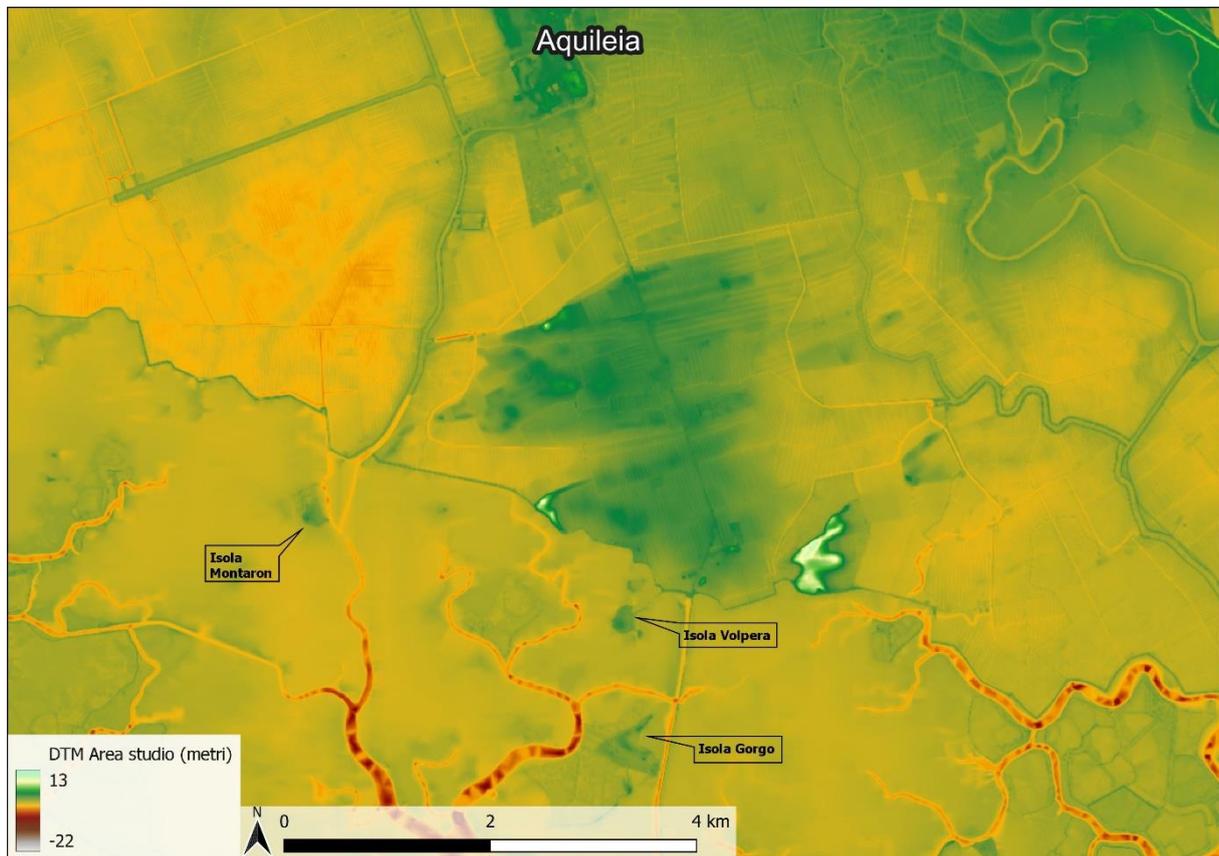


Figura 22: ritaglio DTM su formazione del paleo dune di Belvedere e San Marco. Fonte: elaborazione QGIS

Questa formazione morfologica è stata rilevata nei primi 7 metri circa nel sondaggio sedimentologico BLG1, rilevando che essa poggia su uno strato di circa 20 metri composto da alternanze di limi sabbiosi e argille ricollegabili a sedimenti depositati nel LGM (Bresolin 2012). Tali datazioni sono congruenti con le indagini stratigrafiche che datano il complesso alto strutturale al periodo del pleistocene superiore (Marocco 2009). Gli studi degli anni '90 compiuti in quest'area riportano che questa formazione abbia un orientamento di tipo NE-SW o NNE-SSW, continuando anche verso sud formando le isole Gorgo, Montaron e Volpera (Marocco 1992). Gli studi sedimentologici indicano che la loro probabile origine sia attribuibile alla conoide deposizionale del fiume Isonzo quando esso non era ancora in commistione con il fiume Torre (Lenardon e Marocco 1994). La più grande delle cinque formazioni ha un'area di circa 6 km², si estende in direzione NS per

circa 3 km, in modo simile si estende per la stessa lunghezza anche in direzione WE. Nel settore centrale si restringe formando un collo di bottiglia della larghezza di 500 metri, infine nella porzione a Sud si raggiungono i 2 km di larghezza. Le altre formazioni più piccole, situate nei pressi della formazione principale, sono caratterizzate da dimensioni che non superano i 1000 metri sia in altezza che larghezza, con aree che non arrivano a superare gli 0,6 km². Le quote registrate su queste formazioni variano tra i +2 e +3 metri slm, mentre in alcuni casi, come nella formazione più grande, si raggiungono anche +10 metri slm.

4.1.2 I sistemi fluviali

Le formazioni dei dossi fluviali si originano quando un corso fluviale caratterizzato da una bassa velocità perde la sua capacità erosiva. In queste situazioni le eventuali piene fanno sì che il fiume esondi, superando gli argini naturali e depositando i sedimenti trasportati dalla corrente nelle piane alluvionali adiacenti (Cattani 2001). I sedimenti a granulometria grossolana vengono depositati vicino all'alveo mentre quelli più fini vengono trasportati più lontano. Tali meccanismi portano all'innalzamento delle aree vicino all'alveo fluviale, dove i sedimenti grossolani sono soggetti ad una minore compressibilità, a dispetto delle aree di pianura alluvionale e le aree interfluviali dove i sedimenti fini sono soggetti a una maggiore compressibilità. Tutto questo contesto porta alla creazione delle morfologie chiamate dossi fluviali (Cattani 2001). Le aree poligonali delimitate, sono tutte classificabili come alti morfostrutturali, laddove si è riscontrata anche la presenza di un alveo residuale contenuto in esse, è stata attribuita la distinzione in dosso fluviale.

4.1.2.1 Analisi del settore 1

Nel settore 1, appartenente al megafan del Tagliamento, si è delineata l'area (dosso n1) di ampiezza tra i 500 e 800 metri che caratterizza l'area limitrofa alle arginature del fiume Tagliamento. L'area che segue il percorso attuale dell'alveo, si può interpretare come area di dosso fluviale o piana alluvionale, dove il fiume Tagliamento deposita i sedimenti nelle sue fasi di esondazione; tale dosso fluviale insieme ai rami visibili in mappa sono di recente attivazione databile in periodo posteriore a quello romano dal V secolo d.C. (Zanferrari et al. 2008).

Si può osservare inoltre un ramo che devia verso est all'altezza di Plaudo di Latis (figura 23), proseguendo verso il fiume Stella e raggiungendo il margine della laguna di Marano. Anch'esso può essere interpretato come un vecchio dosso fluviale ormai abbandonato,

anche se le quote registrate sono molto basse e non si rileva alcuna forma di alveo residuale.

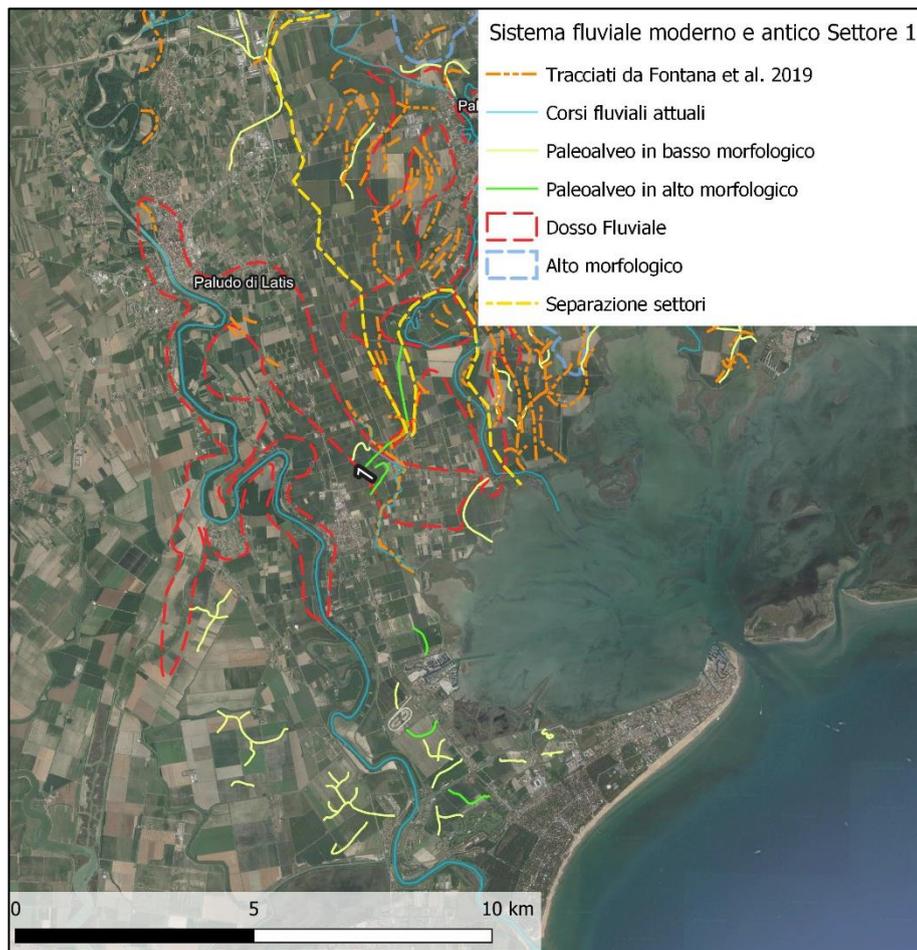


Figura 23: morfologie identificate nel settore 1. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023.

Questo ramo è associabile a una delle direttrici abbozzate solo in parte nella mappa presentata nel progetto CARG di Zanferrari et al. (2008)(figura 24), ma grazie a questo studio è possibile aggiungere nuove informazioni e completare il percorso di questa direttrice antica che giungeva in laguna (ulteriori indagini sono sicuramente necessarie per confermare tale supposizione).

Tale area (vedere paragrafo 2.1.1) è composta da unità geologiche GRA di origine olocenica; quindi, quelli presenti in superficie sono sedimenti relativamente recenti che possono aver ricoperto le eventuali tracce di dossi fluviali antichi di età LGM. Tale fattore può essere



Figura 24: porzione mappa "principali direttrici del Tagliamento in epoca post-LGM" con rappresentate: frecce in blu le direttrici fluviali. Fonte: Zanferrari et al. 2018.

la spiegazione del perché in questa area si osservino così poche strutture geomorfologiche, contrariamente a quanto accade nel settore 2. Le tracce di dossi fluviali molto probabilmente si potranno osservare negli strati più profondi dove è presente la piana alluvionale del LGM.

In modo analogo per quanto eseguito nella individuazione dei dossi fluviali, le aree a forma di vallecole o bassi morfostrutturali sono ben visibili tramite il TPI (figura 19) esse non sono state segnate sulla mappa perché sono aree essenzialmente adiacenti e complementari a quelle dei dossi fluviali, in alcuni casi come spiegato precedentemente si possono osservare anche in questo caso i resti dei tracciati fluviali (le linee in giallo chiaro sono i resti di canale-paleoalvei identificati, che insistono in aree caratterizzate da depressioni morfostrutturali).

Nella figura 25 è visibile un particolare del settore 1 nei pressi della foce del fiume Tagliamento, come è possibile osservare, i paleoalvei identificati in queste porzioni sono numerosi e spesso intrecciati tra di loro, caratterizzati da lunghezze medie di circa 500 m e raggruppati nei dintorni dell'alveo attuale. Probabilmente sono divagazioni del corso fluviale antico in epoca di formazione dell'area della foce del fiume Tagliamento.



Figura 25: particolare nei pressi della foce del Tagliamento settore 1. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023.

4.1.2.2 Analisi del settore 2

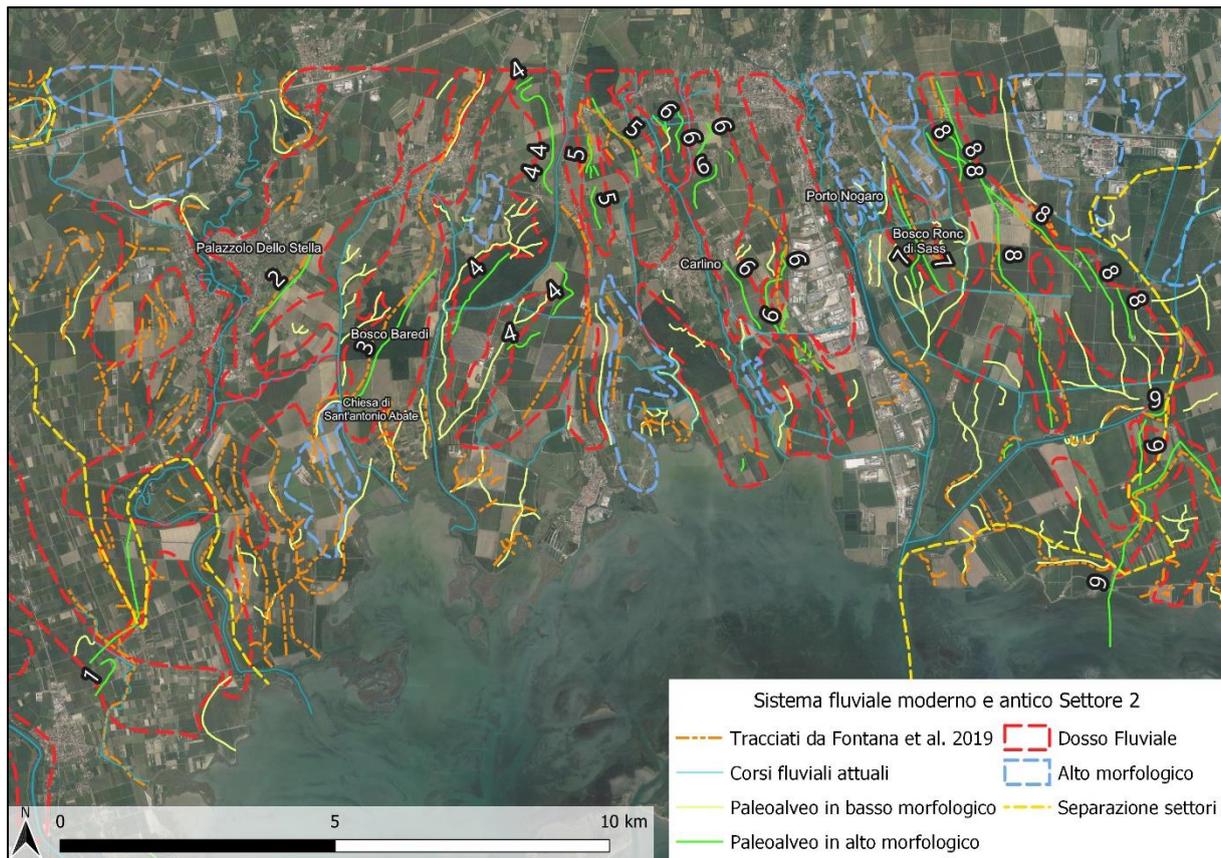


Figura 26: morfologie identificate nel settore 2. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023.

Nel settore 2 sono stati individuati 7 dossi fluviali, essi appartengono con molta probabilità al megafan del fiume Cormor che è interamente compreso nel settore analizzata, come si può vedere dal lavoro di Marocco (vedasi figura 3 in paragrafo 2.2) (Marocco 2009).

Il dosso n2 è situato nella parte a occidente della località di Palazzolo dello Stella e prosegue verso la laguna rimanendo principalmente nella parte orientale dell'alveo del fiume Stella odierno. Al suo interno è stata individuata una traccia lunga 2 km circa, del canale residuale, vicino alla località di Palazzolo dello Stella.

La larghezza media del dosso fluviale associato è di circa 2 km con restringimenti visibili fino a 300 metri. In figura 27 è possibile osservare due sezioni NW altimetriche del dosso identificato con i suoi caratteristici bordi rialzati ai lati e scavato nella sezione centrale, forma coerente a quella proposta nella rappresentazione schematica di un dosso fluviale dai lavori di Fontana presente in Marocco (2009) (figura 28).

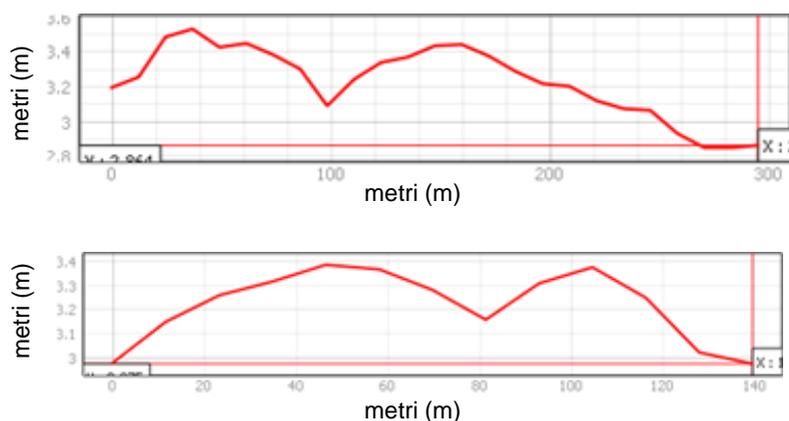


Figura 27: sezione altimetrica trasversale dosso n2. Fonte: elaborazione QGIS

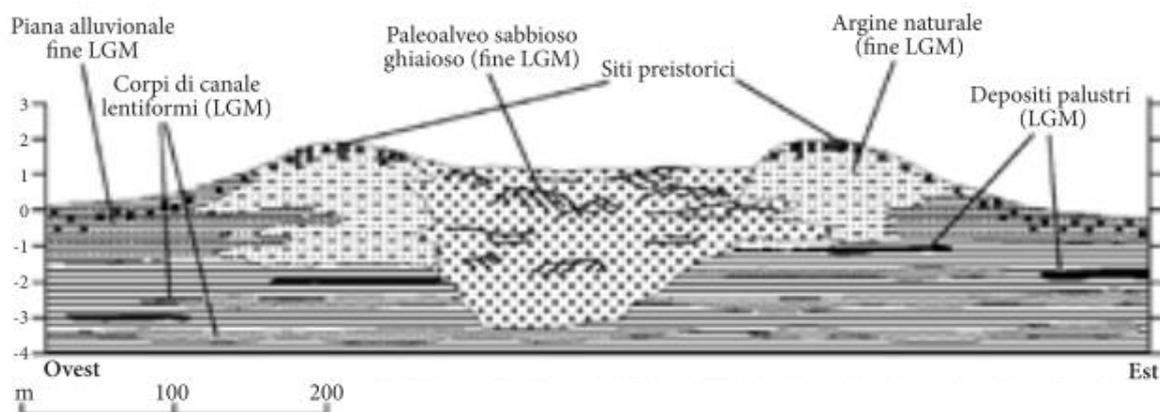


Figura 28: rappresentazione dosso fluviale semplificata. Fonte: Marocco 2009.

Osservando la posizione e l'orientamento di questo dosso fluviale si può ipotizzare che esso poteva essere un paleoalveo del fiume Stella prima di possibili diversioni che lo portarono al percorso attuale.

Il dosso n3 si colloca a circa 2 km a Est rispetto al n2; esso attraversa da N a S il Bosco Baredi e continua fino all'altezza della chiesa di Sant'Antonio Abate. Da questa località il dosso non è più percepibile attraverso l'analisi topografica, ma solamente attraverso le tracce lasciate al suolo, individuabili dalle immagini satellitari. In quest'ultima parte, infatti, il paleoalveo insiste su una depressione, direzione, forse, che prese il fiume in epoche più recenti abbandonando di fatto l'alveo su cui scorreva. In corrispondenza del rilievo topografico è possibile individuare anche le tracce del canale residuale, lungo 3 km. Il paleoalveo prosegue verso la laguna con una pendenza che varia di 3 metri lungo tutto il tratto. Il dosso fluviale è compreso completamente tra l'alveo del fiume Turgnano e il fiume Cormor, ed è caratterizzato da un'ampia area e da una lunghezza che spazia lungo tutta la pianura. La larghezza del dosso è compresa tra un minimo di 500 metri e un massimo di 1,5 km misurata nei pressi del Bosco Baredi.

Il dosso n4 possiede una forma molto complessa, comprendendo per una buona parte il corso attuale del fiume Cormor. Al suo interno vi si possono osservare 5 tratti di canale residuale, rinvenimento inedito in quanto non si trovano segnati in letteratura. La loro lunghezza media è di circa 1,6 km con la presenza di un tratto lungo 2,5 km circa. Verso la laguna il dosso si divide in tre rami, con uno diretto verso il centro di Marano Lagunare.

In figura 29 è visibile una sezione trasversale con l'analisi altimetrica del dosso identificato, dove si registra un incremento di quota di circa mezzo metro rispetto al livello medio della pianura.

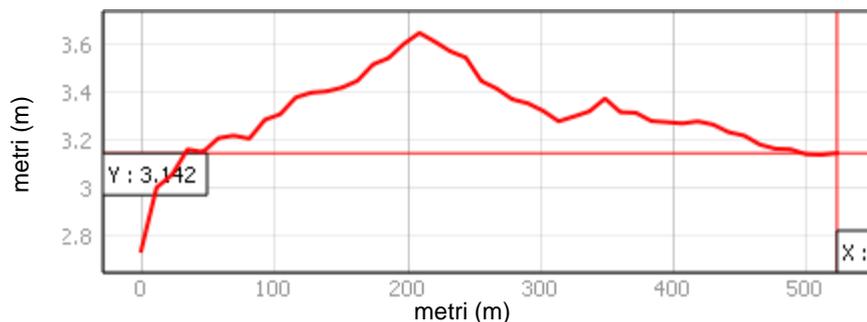


Figura 29: sezione altimetrica trasversale dosso n4. Fonte: elaborazione QGIS

Il dosso n5 è situato alla sinistra del fiume Zellina. Fin da subito è presente una doppia ramificazione. Tracce di canale residuale sono stati rilevati solamente nella porzione più a nord del dosso fluviale. Gran parte dei tracciati è congruente con quanto si legge in letteratura: il tratto più lungo identificato è di circa 1,7 km mentre i più brevi si aggirano intorno ai 200 metri. Il dosso fluviale in questione si arresterebbe nei pressi della località di Carlino (UD) ma poco più a sud sono state rilevate altre strutture morfologiche ricollegabili presumibilmente a prolungamenti del dosso n5 identificato a nord e che terminano in area lagunare. Questi ultimi due, anche se non sono state rilevate tracce di alvei residuali tramite analisi delle immagini satellitari e del TPI, probabilmente vista la loro direzione e forma furono i prolungamenti del dosso n5 che raggiungevano la laguna

Il dosso n6 è compreso tra il fiume Zellina a ovest e il fiume Corno a est. Di questo dosso si possono identificare due diramazioni principali. Nel ramo vicino al fiume Zellina sono stati individuati numerosi gruppi di canali residuali inediti, caratterizzati da una lunghezza media di 500 metri. La larghezza dei dossi su cui insistono è mediamente simile agli altri finora analizzati con alcune eccezioni in cui si registrano ampiezze che raggiungono il chilometro. Nel ramo situato nei pressi del corso del fiume Corno non sono state rilevate tracce di canali residuali. Non è pertanto possibile individuare l'associazione

tra alto morfologico e presenza delle tracce del canale; tuttavia, si possono però avanzare delle ipotesi. Come è possibile vedere nella mappa, verso l'altezza del fiume Lamars i due rami si uniscono, e in tale area sono presenti diversi tratti di alveo residuale, probabilmente quindi anche il ramo vicino al fiume Corno doveva far parte di un dosso fluviale soggetto probabilmente a fenomeni di erosione e alterazione che hanno compromesso la sua visibilità e interpretazione.

Il dosso n7 è situato nel margine destro del fiume Corno ed è individuabile da una marcata elevazione rispetto al livello medio della pianura, anche se in minima parte è possibile identificare la presenza del relativo canale residuale. Il tracciato è simile a quanto riportato in letteratura, e passa vicino al Bosco Ronc di Sass all'altezza di Porto Nogaro. Le tracce dei canali sono lunghe 2 km e 1 km rispettivamente. La larghezza massima del dosso è di circa 1 km mentre la sua lunghezza è di 2,3 km. Intorno al dosso, nelle aree concave interfluviali, sono presenti numerosi tracciati di canali identificati tramite immagini satellitari che rappresentano le tracce del drenaggio superficiale conseguente alla probabile disattivazione del dosso.

Il dosso n8 è situato nella parte più orientale del settore 2, delimitato dal fiume Ausa a sud. Il dosso è associato all'identificazione di numerosi tratti di canale residuale, per una lunghezza totale di circa 14 km. I tratti identificati aggiungono maggiori informazioni al percorso antico di questo alveo che solo in parte era già stato riconosciuto. Verso il fiume Ausa l'area del dosso si dirama in tre bracci occupando un'area molto ampia di circa 4 km. Anche in questo caso verso la porzione più a sud del dosso fluviale si interdigitano altre tracce del paleodrenaggio che insistono su aree concave, come per il caso precedente (dosso n7).

Questi dossi fluviali sono stati identificati nelle unità geologiche SPB3 e SPB4, le più antiche riscontrabili sul territorio dell'area di studio. Questo può essere il fattore che ha determinato la numerosità di evidenze morfologiche di questa tipologia, al contrario dei settori 1 e 3.

Analizzando le aree depresse tra le aree del dosso n3 e n4 (figura 30), sono visibili i percorsi degli antichi corsi fluviali che si intramezzano ai dossi fluviali rialzati, data la loro forma tipicamente a valle l'acqua prediligeva questi percorsi grazie all'instaurarsi di pendenze sempre più elevate date dai dossi; infatti, la maggior parte di questi corsi riprende i corsi fluviali presenti nel reticolo idrografico attuale.

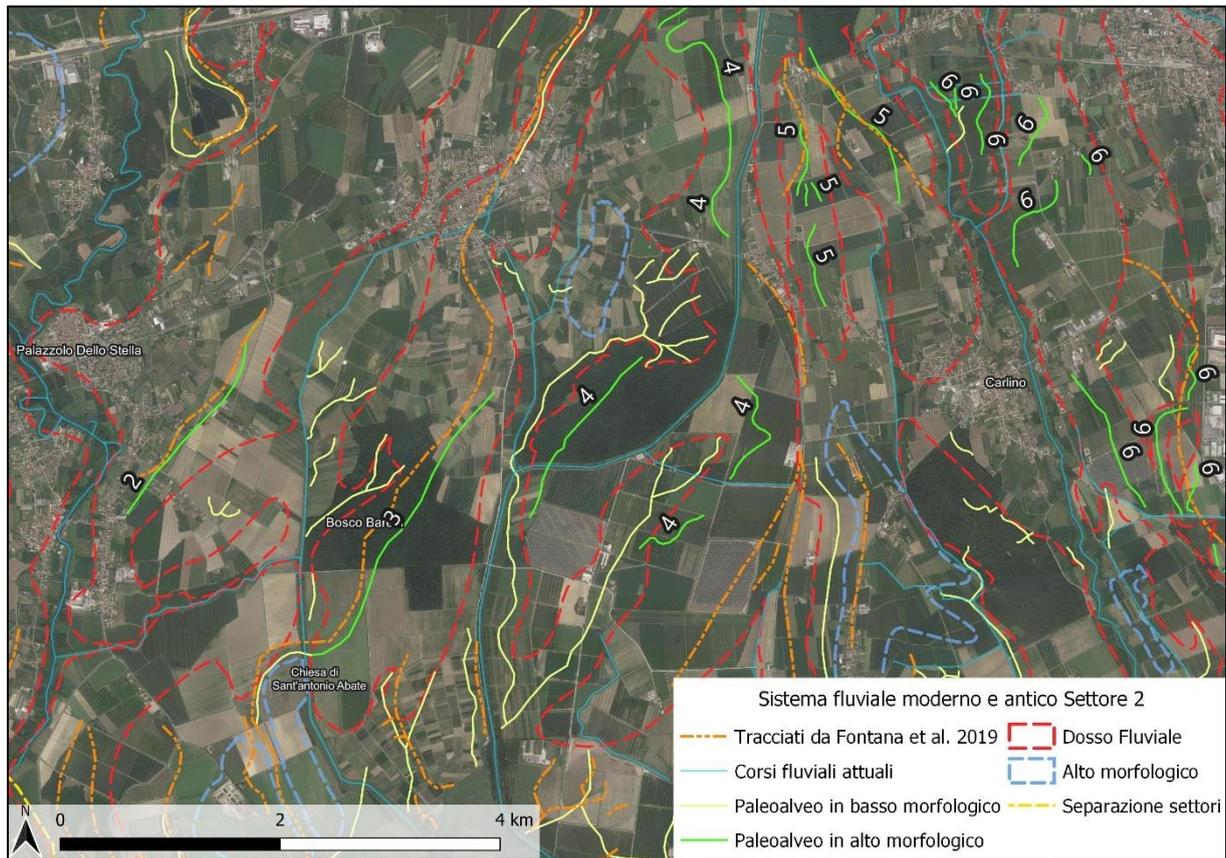


Figura 30: particolare del settore 2 con visibili i canali antichi in vallecole/bassi morfologici. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023.

4.1.2.3 Analisi del settore 3

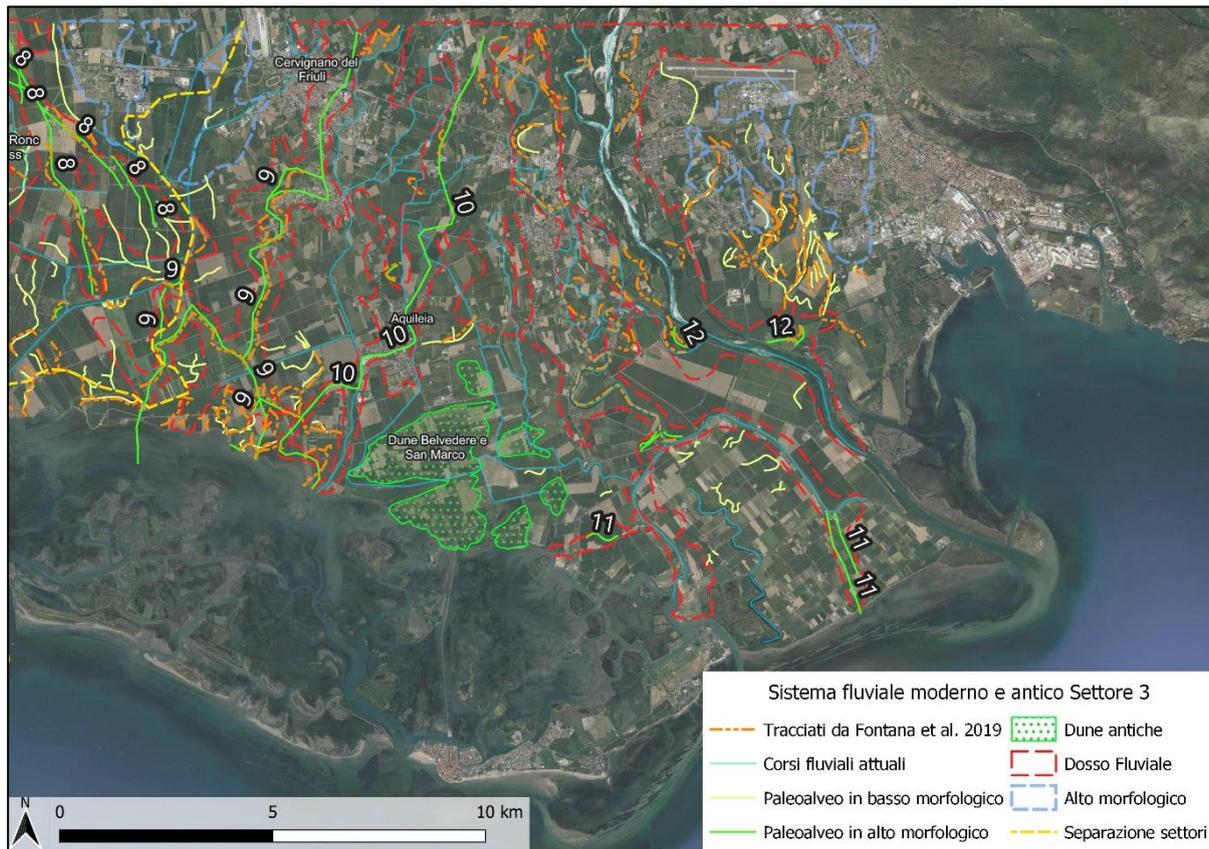


Figura 31: morfologie identificate nel settore 3. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023.

Questo settore è geologicamente molto simile al settore 1 e al contesto del fiume Tagliamento, dove i paleoalvei identificati insistono su unità relativamente giovani di età olocenica. In questo settore (figura 31) il megafan dell'Isonzo e quello del Torre sono stati i principali attori delle modifiche alla pianura alluvionale, soprattutto con le diversioni in tempi recenti del fiume Isonzo verso est (Marocco 2009).

Il dosso n9 passa nelle immediate vicinanze di Cervignano del Friuli e continua in direzione SW arrivando vicino al canale Anfora dove forma un'ansa molto stretta, per poi continuare in due direzioni e raggiungere la laguna; questo paleoalveo è associabile al megafan del fiume Torre (Marocco 2009). Si possono osservare tracce di questo paleoalveo e del suo alveo residuale anche negli studi sedimentologici eseguiti presso il sito archeologico Ca' Baredi. A sud del canale Anfora, forse in una fase più antica, il dosso fluviale proseguiva in direzione sud, dove è possibile individuare numerosi canali disposti a ventaglio che suggeriscono la presenza di un'antica foce deltizia che entrava in laguna. Altre diramazioni del dosso proseguono invece in direzione ovest e nord-ovest, per poi terminare nell'attuale limite lagunare dopo alcune grosse anse. La forma del dosso fluviale

è molto sinuosa e di ampiezza variabile che non supera gli 1,5 km. I tratti associati a questo dosso fluviale sono in buona parte confermati dalla letteratura ma sono state rilevate nuove evidenze che aggiungono informazioni sul suo percorso antico. Grazie alla presenza dell'insediamento dell'età del Bronzo sui rilievi topografici di questo dosso nei pressi di Ca' Baredi, è possibile stabilire che questo paleoalveo fosse già disattivato alla fine del III millennio a.C. per fenomeni di avulsione (Fontana et al. 2018).

Il dosso n10, noto anche in letteratura, è il dosso fluviale sul quale si imposta la città romana di Aquileia e che doveva essere già disattivato all'epoca della sua fondazione. Esso rappresenta un paleoalveo dell'antico fiume Natissa che circondava la città di Aquileia e che i romani sfruttavano per la navigazione attraverso opere di regimazione. Il dosso fluviale a sud dell'abitato di Aquileia procede verso la laguna lambendo le dune di Belvedere San Marco. Dalle analisi delle immagini satellitari è possibile individuare il corso dell'antico alveo che probabilmente scorreva ad est dell'attuale corso del fiume Natissa e che compie una grossa curva a gomito nei pressi dell'attuale limite lagunare. Come nel caso del dosso n9, lungo tutto il corso del dosso fluviale è possibile individuare la traccia del canale residuale, che in questo caso misura circa 14 km e attraversa tutta l'area della pianura studiata.

I dossi fluviali n11 e n12 si trovano nei pressi del fiume Isonzato e Isonzo rispettivamente; il dosso fluviale n11 è ampio circa tra i 500 metri e gli 1,5 km mentre per il dosso fluviale n12 si registrano valori anche superiori ai 2 km nelle sezioni più ampie. In questo caso nonostante l'evidente rilievo che caratterizza queste forme rispetto al livello medio della pianura, non è stato possibile identificare le tracce dei canali residuali. Queste, infatti, sono poche e risultano visibili solamente nella parte distale dei dossi, vicino ai margini della laguna. In questa zona sono inoltre visibili numerose tracce di paleoalvei che possono essere intese come vecchie anse disattivate dei relativi fiumi. Vi sono inoltre tutta una serie di forme geomorfologiche che risultano essere caratterizzate da una spiccata elevazione rispetto al livello medio della pianura. Tuttavia, servendosi dei soli dati da remote sensing, non è stato possibile interpretare tali forme con certezza a causa della loro limitata continuità laterale o in alcuni casi per l'assenza dei tratti tipici di dossi fluviali; per questo motivo sono state categorizzate come aree di alti morfostrutturali. Le forme, la loro localizzazione e direzione però fanno intuire che essi potrebbero essere dei

dossi fluviali, eventuali studi futuri, in queste aree, potranno fornire nuovi dettagli e una loro corretta categorizzazione.

Analizzando invece i paleoalvei nelle aree morfologicamente depresse, nella figura 32 si può vedere una sezione nei pressi della località di Monfalcone in cui sono presenti numerosi resti di tracciati fluviali, raggruppati in aree ristrette. Essi sono visibili sulla piana alluvionale senza particolari associazioni o adiacenze a dossi fluviali. Anche in questo caso potrebbero essere residui di diversioni fluviali, questa volta del fiume Isonzo che scorre nelle vicinanze.

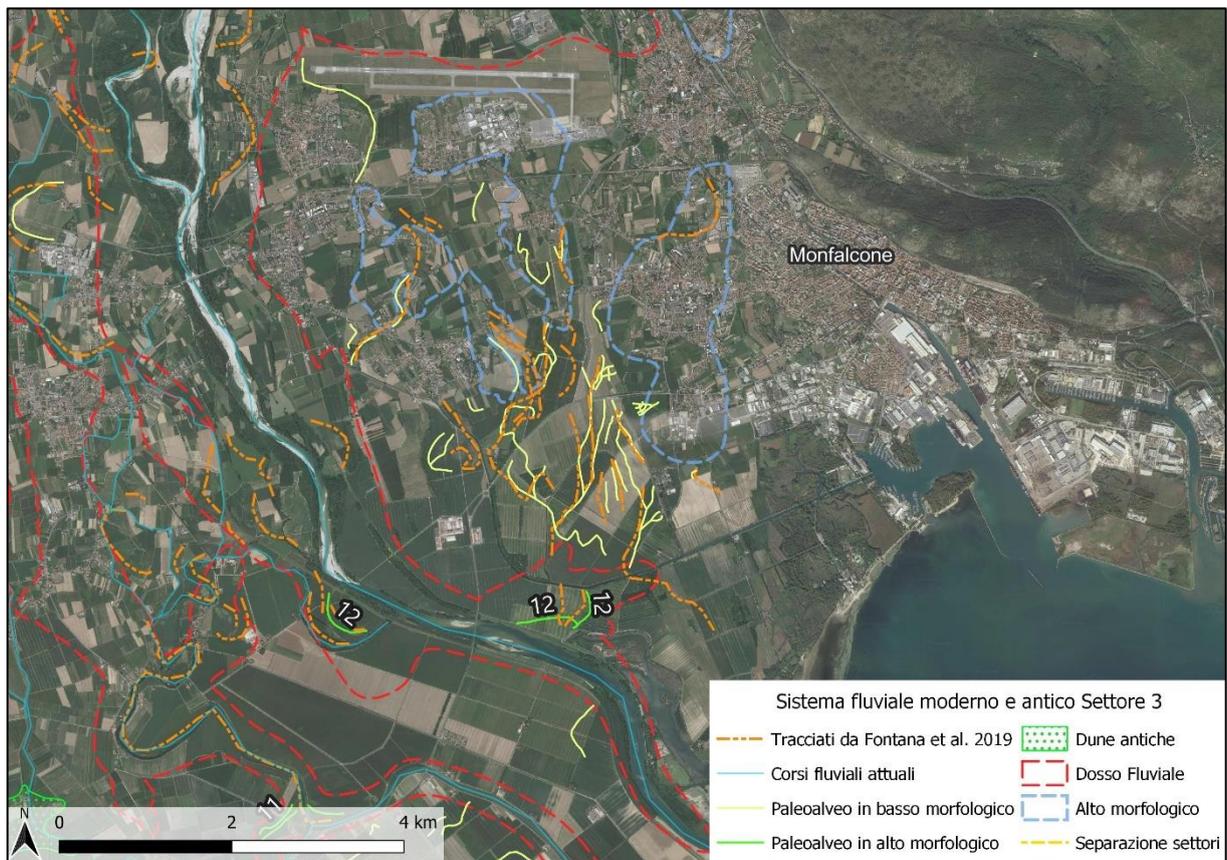


Figura 32: particolare del settore 3 con visibili i canali antichi in vallecicole/bassi morfologici. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023.

4.1.3 Morfologia della laguna

Per quanto concerne la morfologia dell'area lagunare (vedasi figura 33), la parte orientale si presenta con forme molto più complesse e intricate, caratterizzate da una fitta rete di barene, isole e canali di piccole e medie dimensioni, la profondità media non supera i - 1,5 metri di profondità. Per quanto concerne invece la parte occidentale le condizioni sono completamente differenti, le forme tipiche di una laguna sono molto più ridotte e presenti prevalentemente vicino alla terra ferma, lasciando spazio a piane lagunari dove la profondità è caratterizzata da un intervallo più ampio anche se, nel complesso, come valore massimo non vengono superati i -2 metri. I canali presenti in laguna hanno mediamente una profondità molto più ampia arrivando anche a -10 metri, soprattutto nelle aree adiacenti alle bocche di porto. Anche in questo caso le forme meandriiformi sono più accentuate nel settore 2 mentre si osservano forme più semplici e lineari nel settore 1.

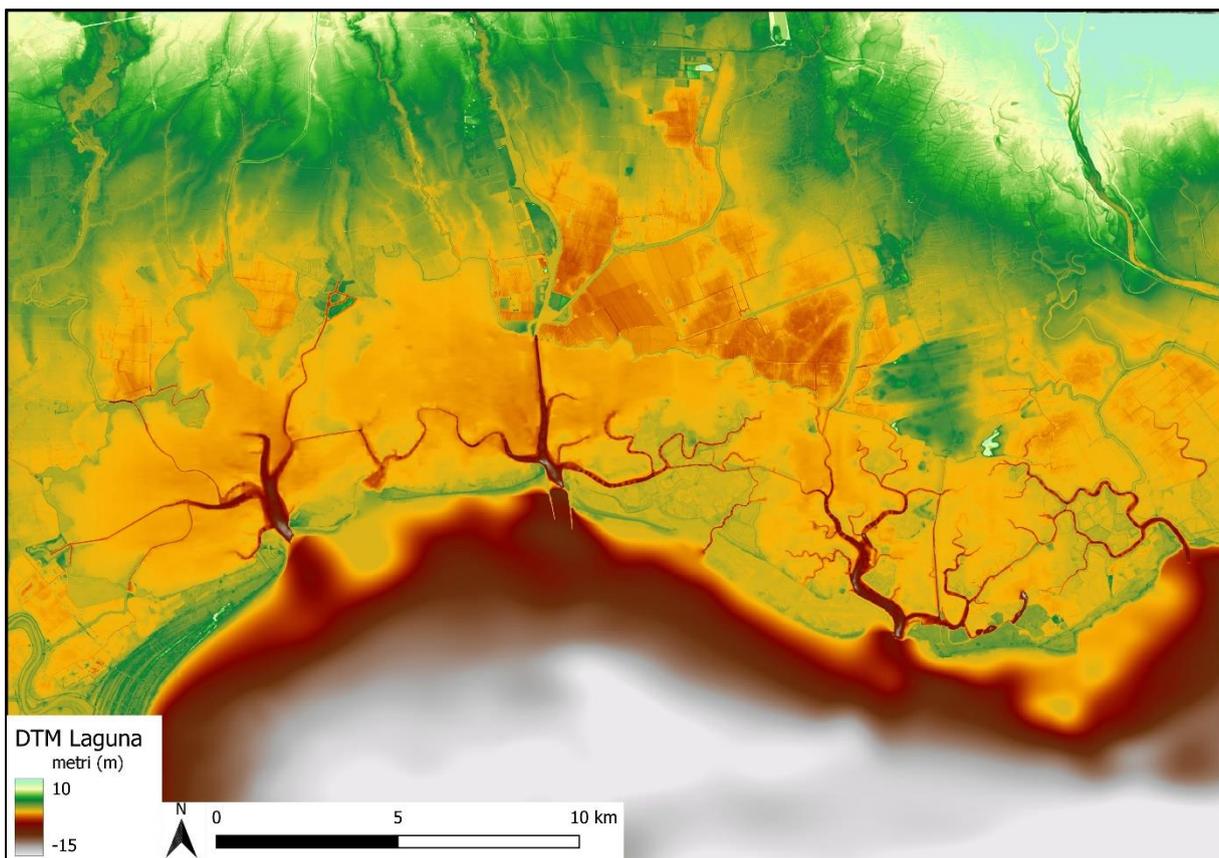


Figura 33: DTM della laguna di Marano e Grado. Fonte: Elaborazione QGIS

4.1.4 Morfologia dell'area costiera

Per quanto concerne infine la morfologia costiera si osservano dei gradienti di profondità molto gradualmente e dolci allontanandosi dalla costa, si registra infatti una pendenza percentuale dello 0,3% calcolata in due punti dalla spiaggia fino a 3 km a largo, nelle figure sottostanti i due profili altimetrici: il primo a Lignano Sabbiadoro (figura 34) mentre il secondo dalla spiaggia di Banco d'Orio vicino alla bocca di Grado (figura 35).

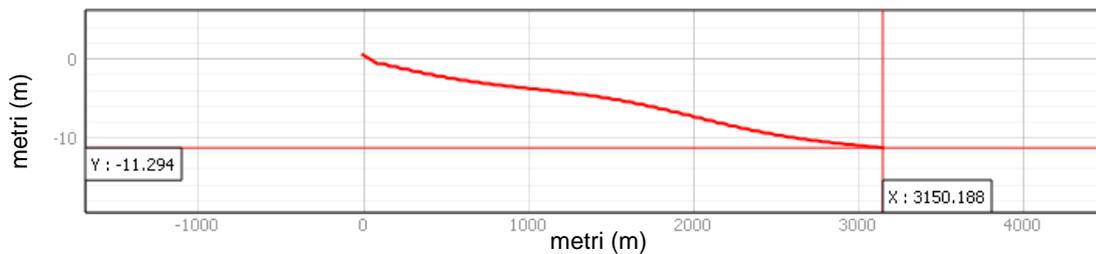


Figura 34: profilo altimetrico da Lignano Sabbiadoro fino a 3 km a largo. Fonte: elaborazione QGIS

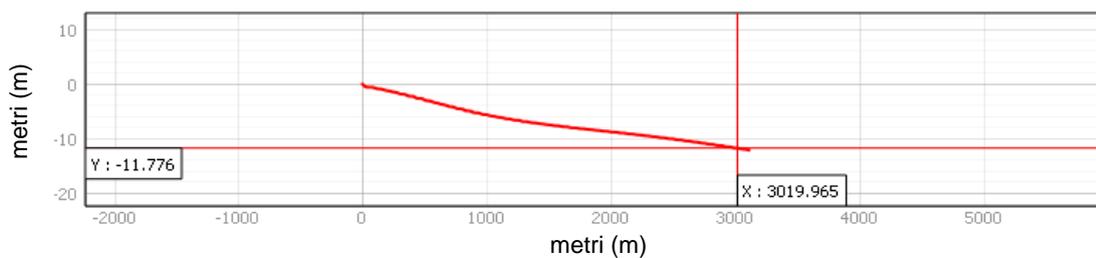


Figura 35: profilo altimetrico Banco d'Orio fino a 3 km a largo. Fonte: elaborazione QGIS

Di importanza rilevante e ben visibile anche dalla batimetria del fondale è la presenza del banco della Mula di Muggia, a ridosso della località costiera di Grado, essa è una formazione originata dalle correnti che trasportano i sedimenti da est a ovest provenienti dalla bocca di porto di Primero e dalla foce del fiume Isonzo (INTERREG ITALY-CROATIA CHANGEWE CARE). È visibile, inoltre, l'alto morfologico denominato "Trezza Grande" situato a circa 12 km dalla costa in direzione sud (vedasi figura 36) (Marocco et al. 2002; Trobec e Buseti 2017; Trobec et al. 2018).

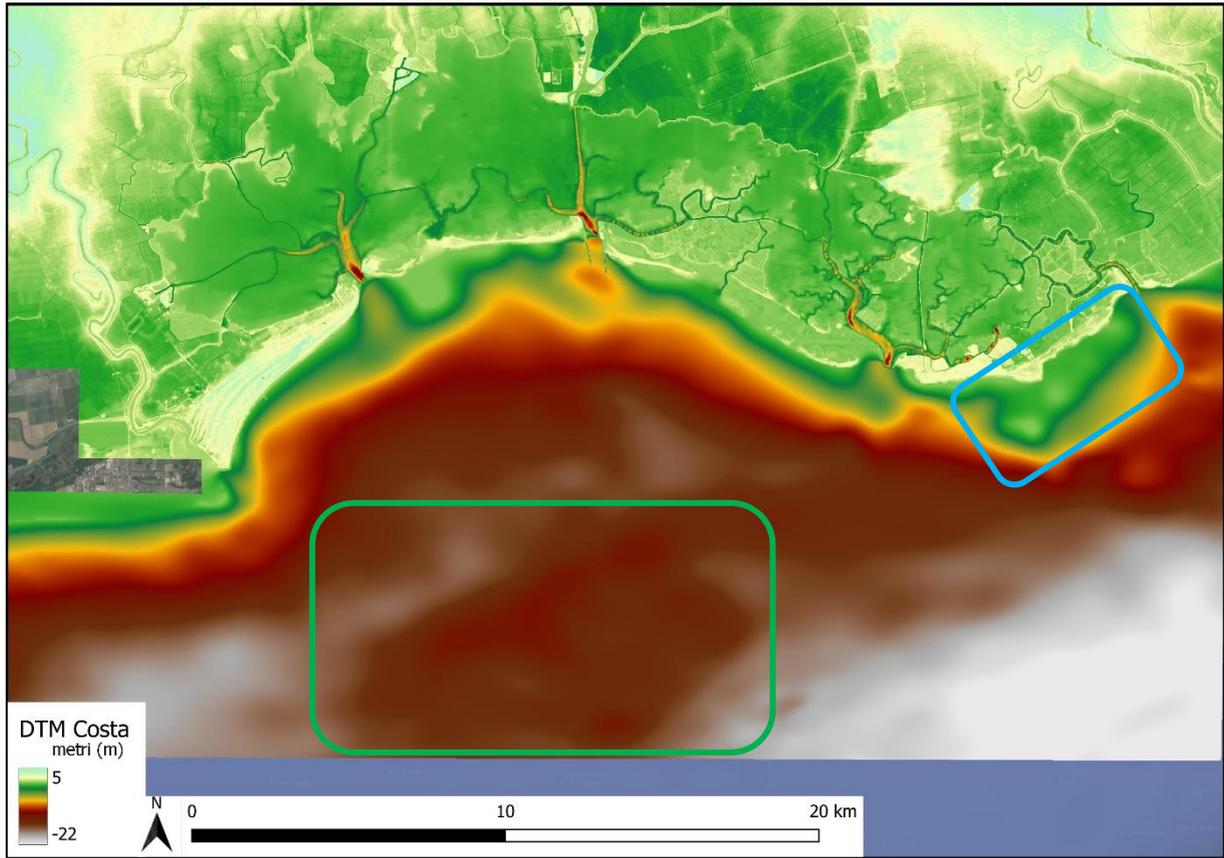


Figura 36: DTM dell'area marina costiera cerchio verde formazione della Trezza Grande e in azzurro Mula di Muggia. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023.

4.2 Valutazione della distribuzione del record archeologico

4.2.1 Periodo preistorico: VIII millennio a.C. – metà III millennio a.C.

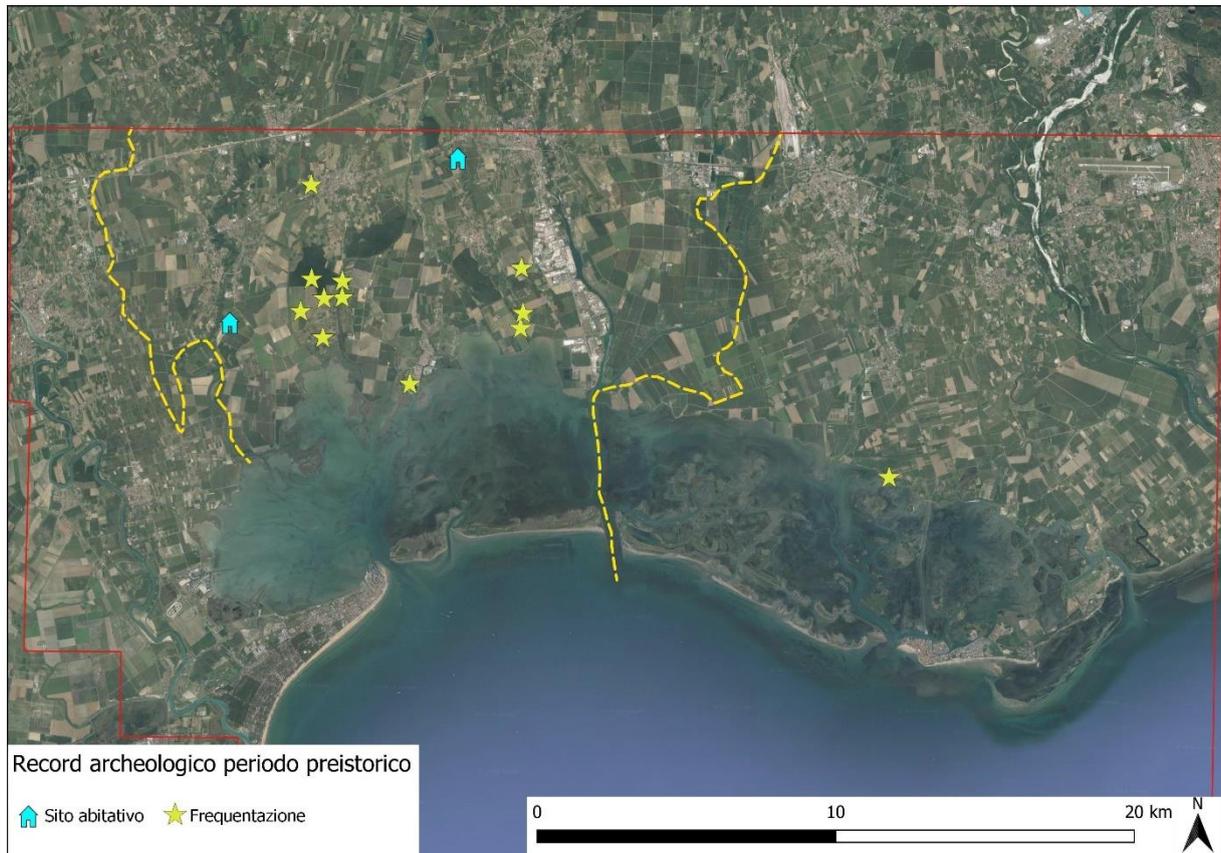
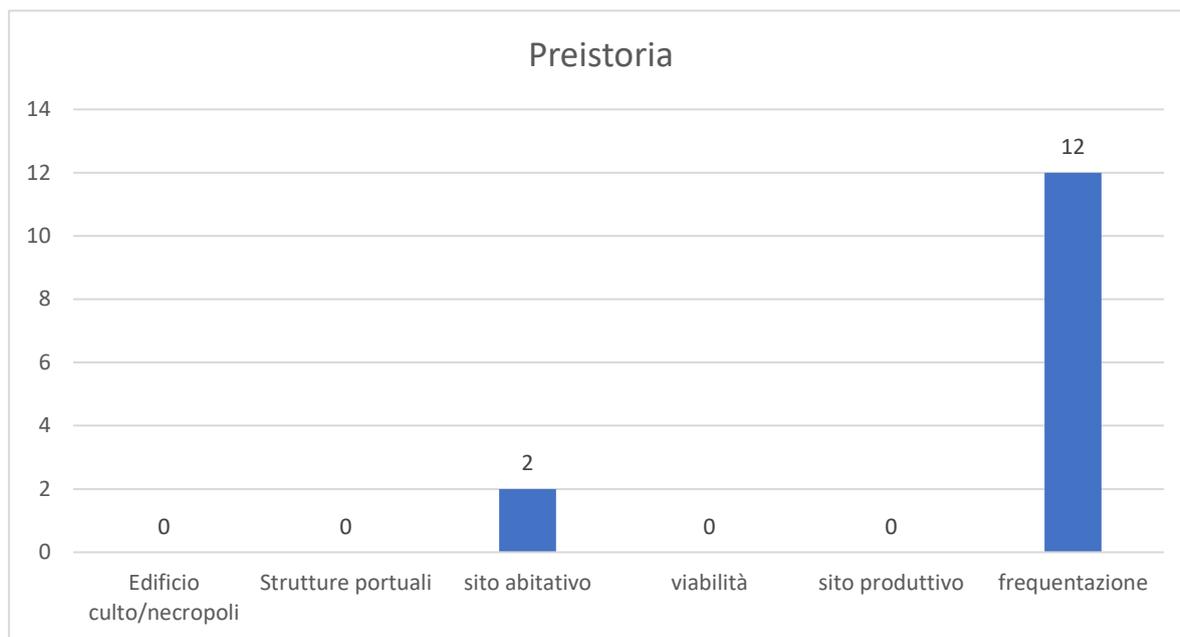


Figura 37: distribuzione record archeologico per il periodo preistorico. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023.

Come è possibile osservare, 14 siti archeologici sono attribuiti cronologicamente al periodo preistorico (tabella 3). La maggior parte dei reperti rinvenuti sono principalmente materiale sparso e spesso in tracce che non permette un'interpretazione funzionale del sito archeologico (figura 37); esse possono essere però interpretate come più generiche aree di frequentazione. Solo in due casi le evidenze archeologiche sono ricollegabili a degli insediamenti, tutti nel settore 2; un solo sito si trova a ridosso del margine lagunare odierno. In generale, la localizzazione dei siti appartenenti a questa epoca è limitata alla sezione ovest della pianura circa a 3 km dal margine lagunare attuale, nei suoli datati di origine LGM. È presente una sola eccezione, nel settore 3 che appartiene ad un ritrovamento sporadico al margine lagunare, sulle paleo-dune di Belvedere e San Marco situate a ridosso della laguna a sud di Aquileia.

Tabella 3: distribuzione record archeologico per categoria nel periodo preistorico



4.2.2 Periodo protostorico: metà III millennio a.C. – VIII secolo a.C.

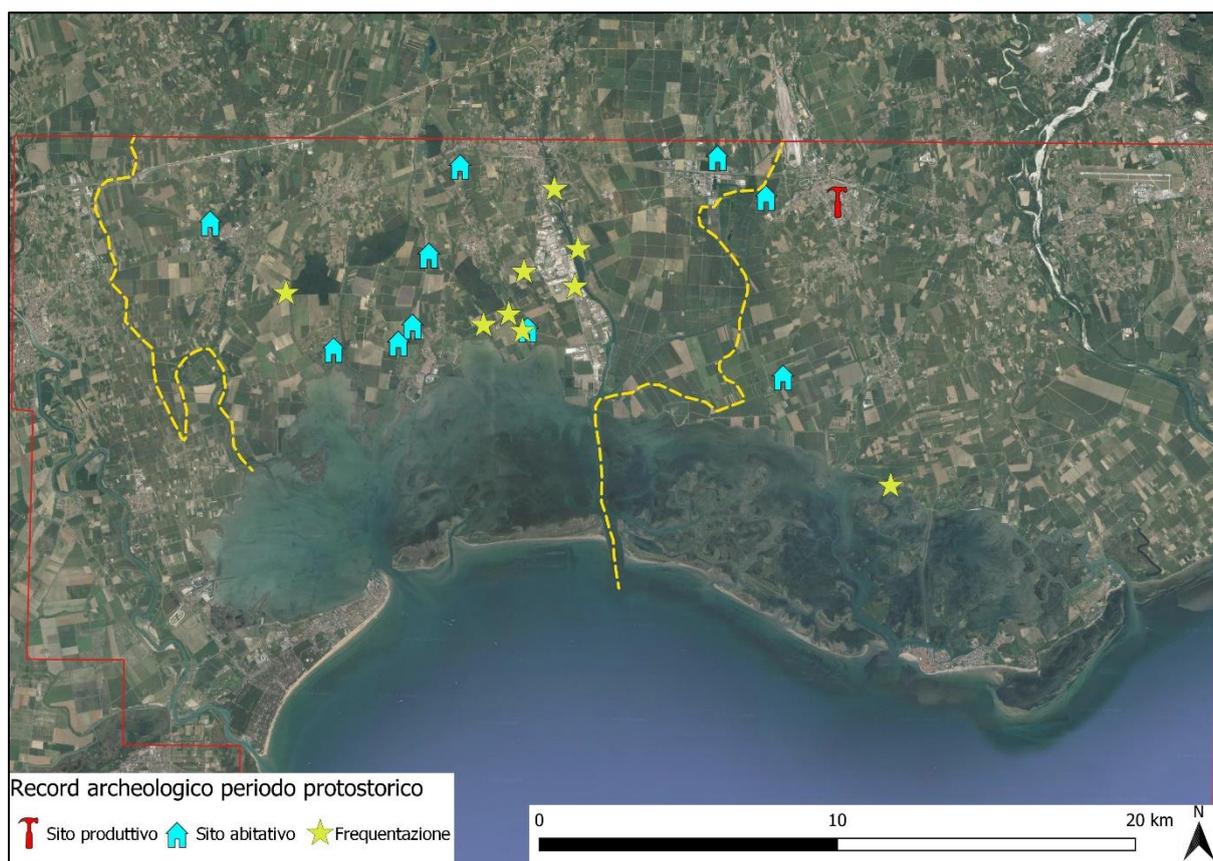
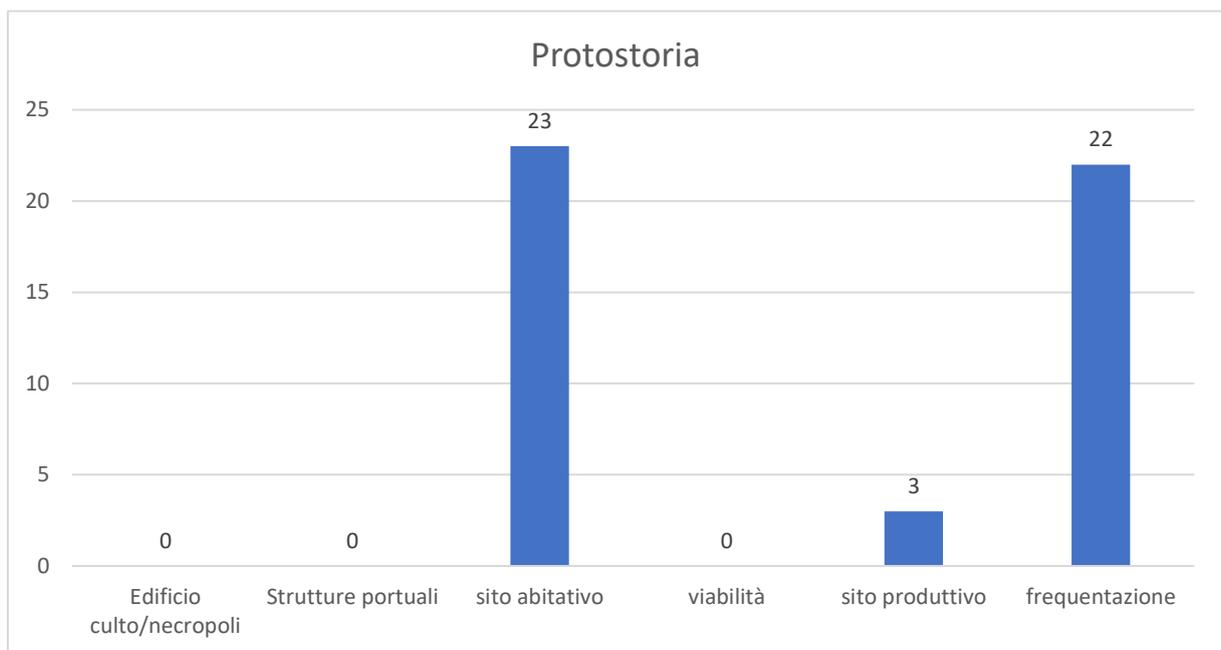


Figura 38: distribuzione record archeologico per il periodo protostorico. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023.

Nel periodo Protostorico afferiscono ben 48 voci archeologiche (vedasi tabella 4) di cui 42 attribuibili all'età del Bronzo e solo 6 appartenenti all'età del Ferro. La loro localizzazione

geografica prevalente è nel settore 2, con la presenza di alcuni siti nel settore 3 vicino alla città di Cervignano del Friuli e ad Aquileia; un sito è presente anche sulle paleo-dune di Belvedere e San Marco, in continuità con i rinvenimenti preistorici in questa stessa localizzazione (figura 38). Esso coincide con un rinvenimento, di una spada databile all'età del Bronzo. In questo periodo, numerosi siti archeologici abitativi sono concentrati nella porzione di territorio relativamente vicina al margine lagunare odierno nel settore 2. Si riscontrano anche in questo periodo storico molteplici ritrovamenti sporadici che si possono interpretare come aree di frequentazione nei dintorni della zona industriale di Porto Nogaro e Bosco Sacile. Un complesso insediativo di alta rilevanza archeologica è il sito di Ca' Baredi, l'unico che si osserva nel settore 3. Per la prima volta è stato rinvenuto un ripostiglio-magazzino contenente dei manufatti bronzei, categorizzato come sito produttivo, nei pressi della località di Cervignano del Friuli.

Tabella 4: distribuzione record archeologico per categoria nel periodo protostorico



4.2.3 Periodo romano: Il secolo a.C. – V secolo d.C.

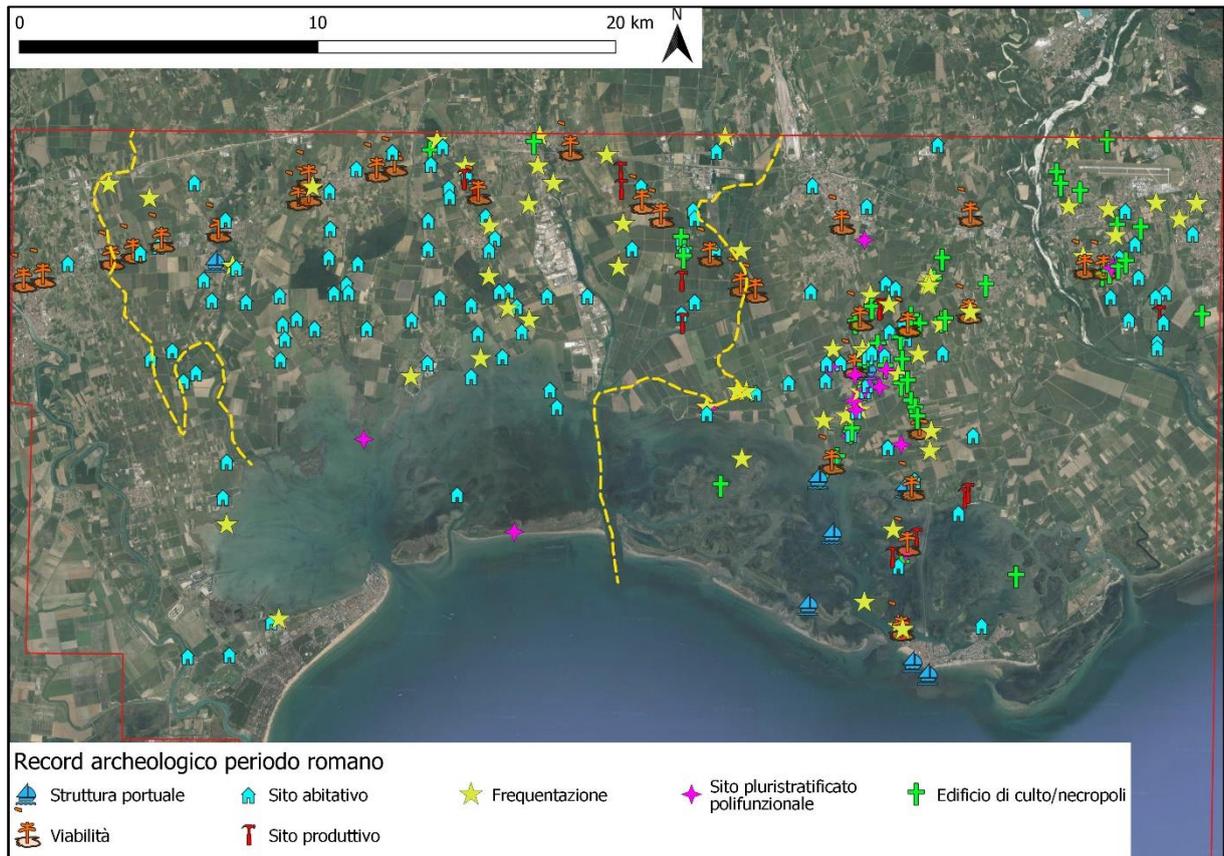
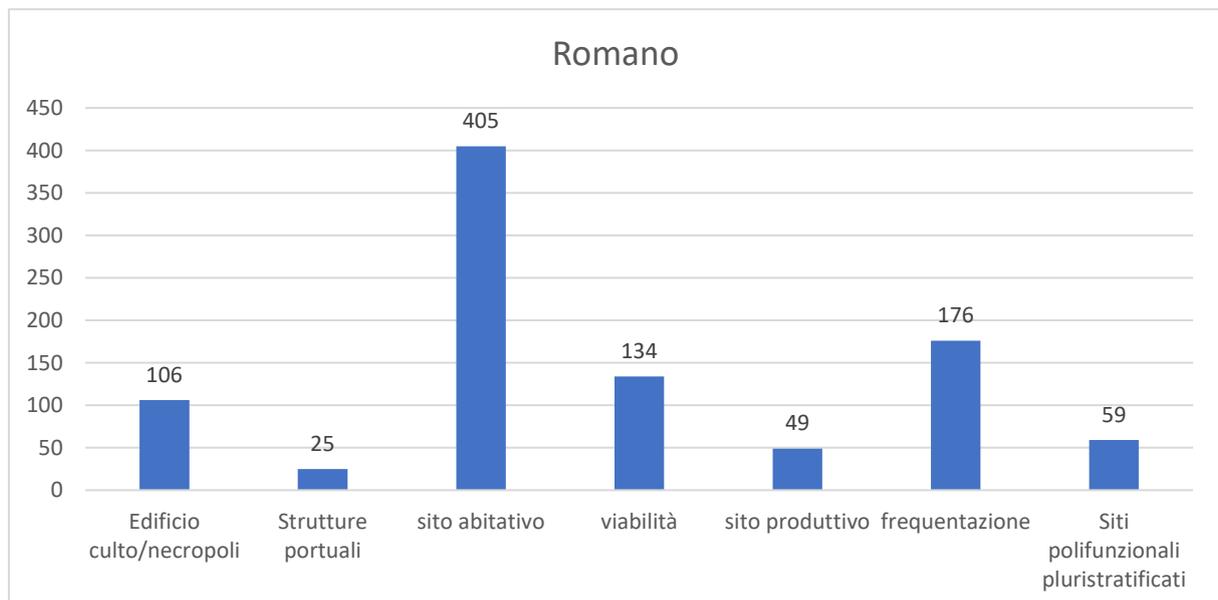


Figura 39: distribuzione record archeologico per il periodo romano. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023.

Nella figura 39 sono rappresentati tutti i siti archeologici rinvenuti nell'area di studio appartenenti all'età romana, dal 200 a.C. al 450 d.C. circa. Questa è, tra tutte le mappe archeologiche prodotte in questo lavoro di tesi, quella con la più alta densità di evidenze archeologiche registrate nell'intero dataset, si contano infatti ben 954 voci (tabella 5).

Tabella 5: distribuzione record archeologico per categoria nel periodo romano



Per quanto concerne la posizione geografica dei siti, si può osservare una distribuzione omogenea che ricopre tutta l'area di studio con la presenza di un rilevante hotspot localizzato nella città di Aquileia e nei suoi dintorni. Le interpretazioni date ai ritrovamenti sono eterogenee e numerose. 106 voci archeologiche sono afferenti a siti di culto che comprendono luoghi di preghiera e aree ad uso funerario per le sepolture, come è possibile vedere dalla mappa sottostante (vedasi figura 40) la maggior parte dei siti è localizzata nella parte orientale della laguna nei pressi della località di Aquileia, da notare anche la presenza di alcuni siti localizzati nell'area lagunare interna attuale.

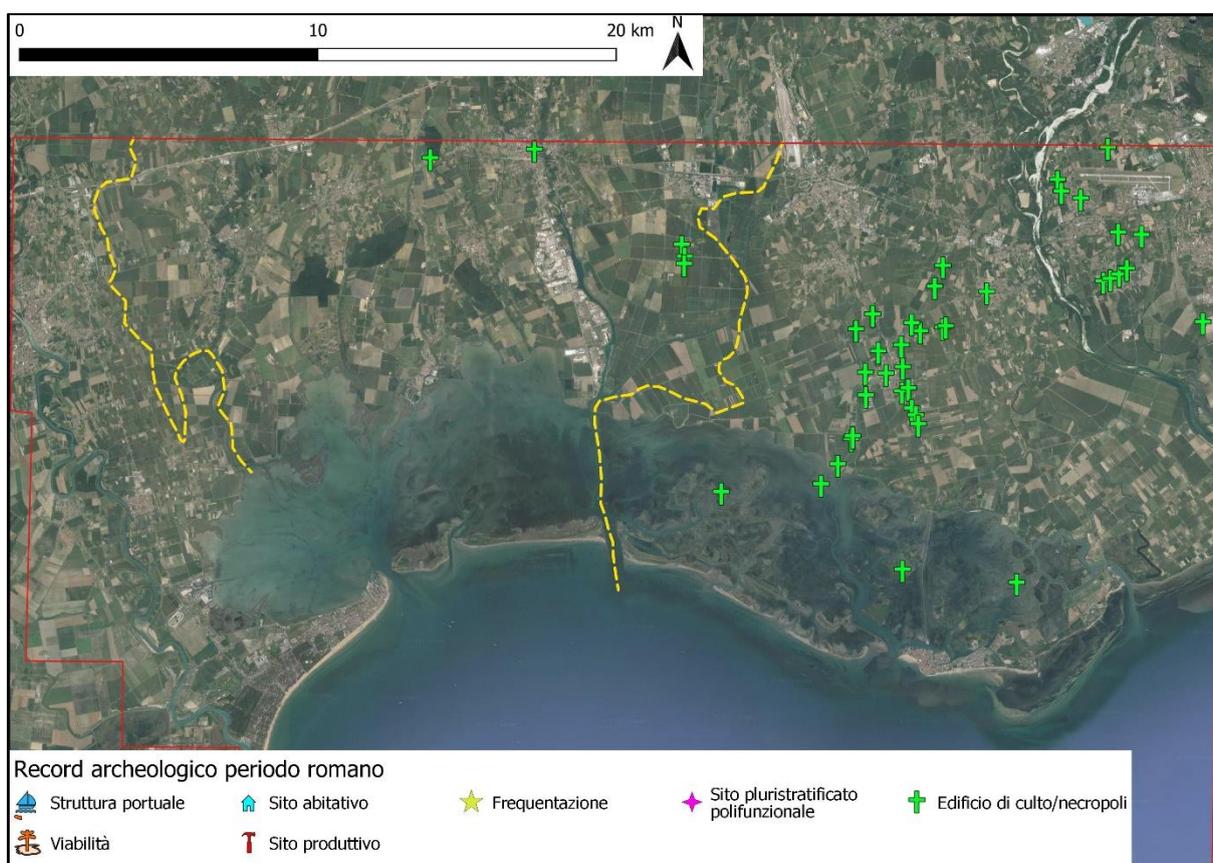


Figura 40: edifici di culto/necropoli in età romana. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023.

In questa epoca sono riscontrabili le prime evidenze di siti portuali e di approdo (figura 41), anch'essi localizzati nella parte orientale; le loro posizioni seguono i principali canali fluviali navigabili utilizzati anticamente per il trasporto delle merci. A prova di ciò vi sono le innumerevoli anfore di diversi "tipi", ovvero le forme che testimoniano l'appartenenza a diverse epoche e luoghi di produzione. Sono stati rinvenuti anche alcuni siti nell'area costiera di Grado a testimonianza della probabile importanza di questa città come uno degli scali portuali presenti sul territorio in epoca romana. Solo 4 voci appartenenti a questa categoria sono state rinvenute nella parte occidentale, precisamente tra le località di Precenicco e Palazzolo dello Stella, esse sono appartenenti ad un probabile scalo o magazzino lungo il corso fluviale del fiume Stella che passa nelle vicinanze.

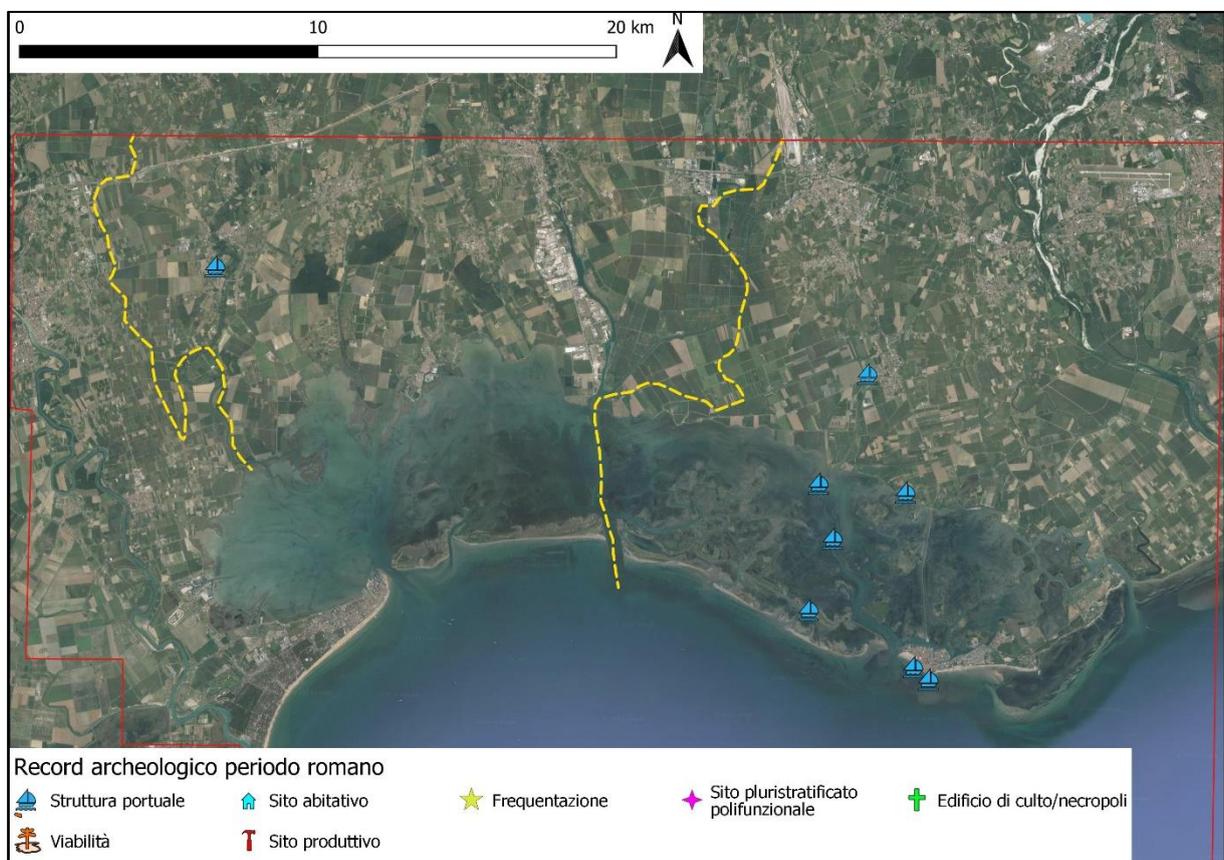


Figura 41: strutture portuali in età romana. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023.

Per quanto concerne i siti abitativi (figura 42), essi sono omogeneamente distribuiti su tutto il territorio dell'area di studio (vedere mappa siti abitativi), in questi siti la maggior parte dei ritrovamenti archeologici è composta da affioramenti di laterizi e altri materiali quali ceramiche, sono però presenti evidenze archeologiche quali pavimenti decorati con mosaici e ritrovamenti di resti murari. La prevalenza dei siti è localizzata nell'entroterra della bassa pianura, buona parte nelle vicinanze del margine interno della laguna. Anche in questo caso, similmente alla precedente mappa, si riscontra la presenza di alcuni siti all'interno della laguna, che comprendono in alcuni casi fondamenta visibili e numerosi affioramenti di materiale.

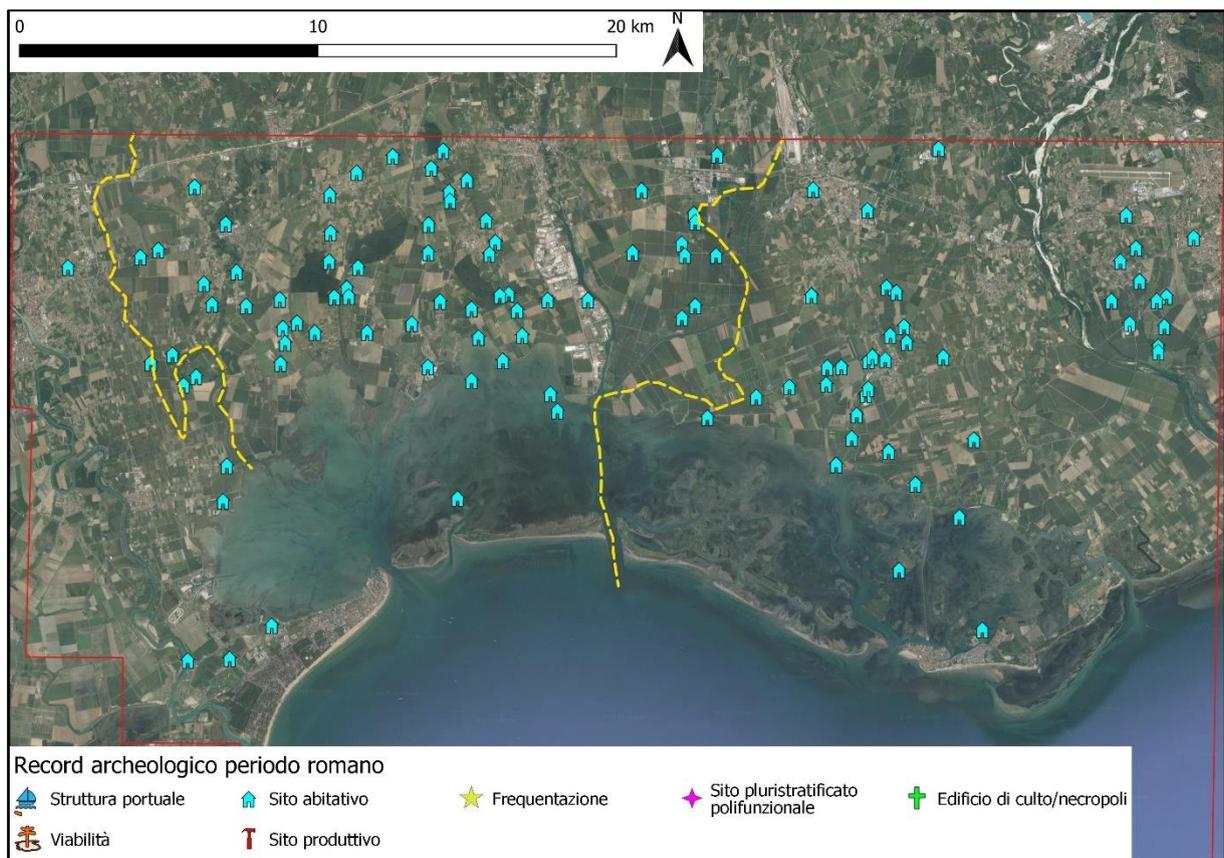


Figura 42: siti abitativi in età romana. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023.

Le voci riferite ai siti interpretati come resti di viabilità, permettono di tracciare visivamente sul territorio quelli che erano i percorsi antichi che collegavano le principali città romane tra loro nel territorio friulano e veneto (vedasi figura 43). In particolare, si può facilmente intuire a colpo d'occhio, il tracciato della Via Annia che attraversava questo territorio (Mozzi et al. 2011). Inoltre, è possibile notare nella parte orientale una sequenza di siti in linea retta che parte dall'entroterra e continua verso la laguna arrivando nei pressi di Grado, tali siti probabilmente indicano la presenza di quella che era un'antica via di collegamento con le aree che si affacciavano al mare (Gaddi 2001).

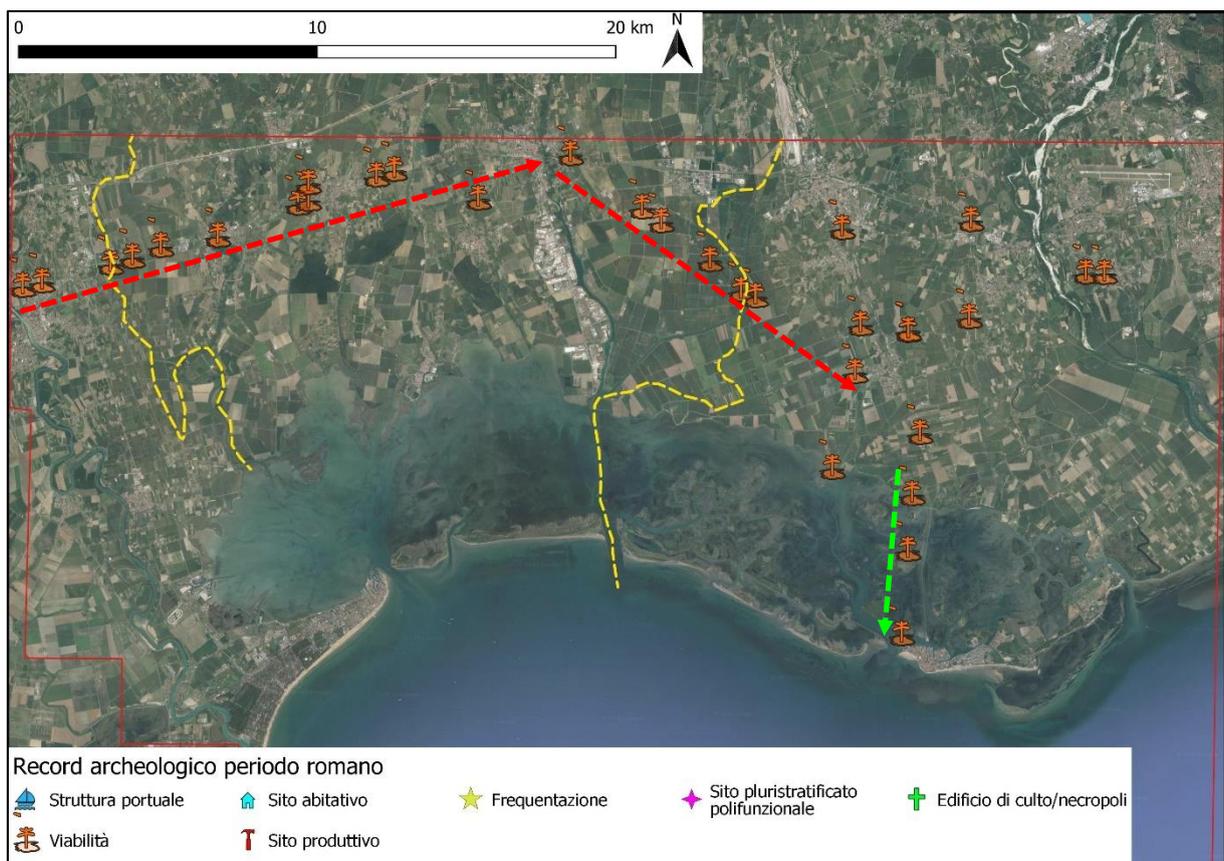


Figura 43: siti con resti di viabilità in età romana. Le frecce tratteggiate Via Annia in rosso e in verde tratto via ipotetico fino a Grado. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023, Mozzi et al. (2011), Gaddi (2001).

I siti produttivi e i magazzini comprendono evidenze archeologiche di resti di strutture adibite a magazzino ma anche di fornaci produttive. La maggior parte dei siti è stata identificata come tale in base alla presenza molto elevata di scarti di lavorazione. La loro localizzazione si focalizza nella parte centrale dell'area di studio e nella parte sudorientale (figura 44). Alcuni siti sono posizionati verso il margine più a nord dell'area di studio mentre quelli a est sono collocati vicino all'area lagunare, alcuni anche al suo interno.

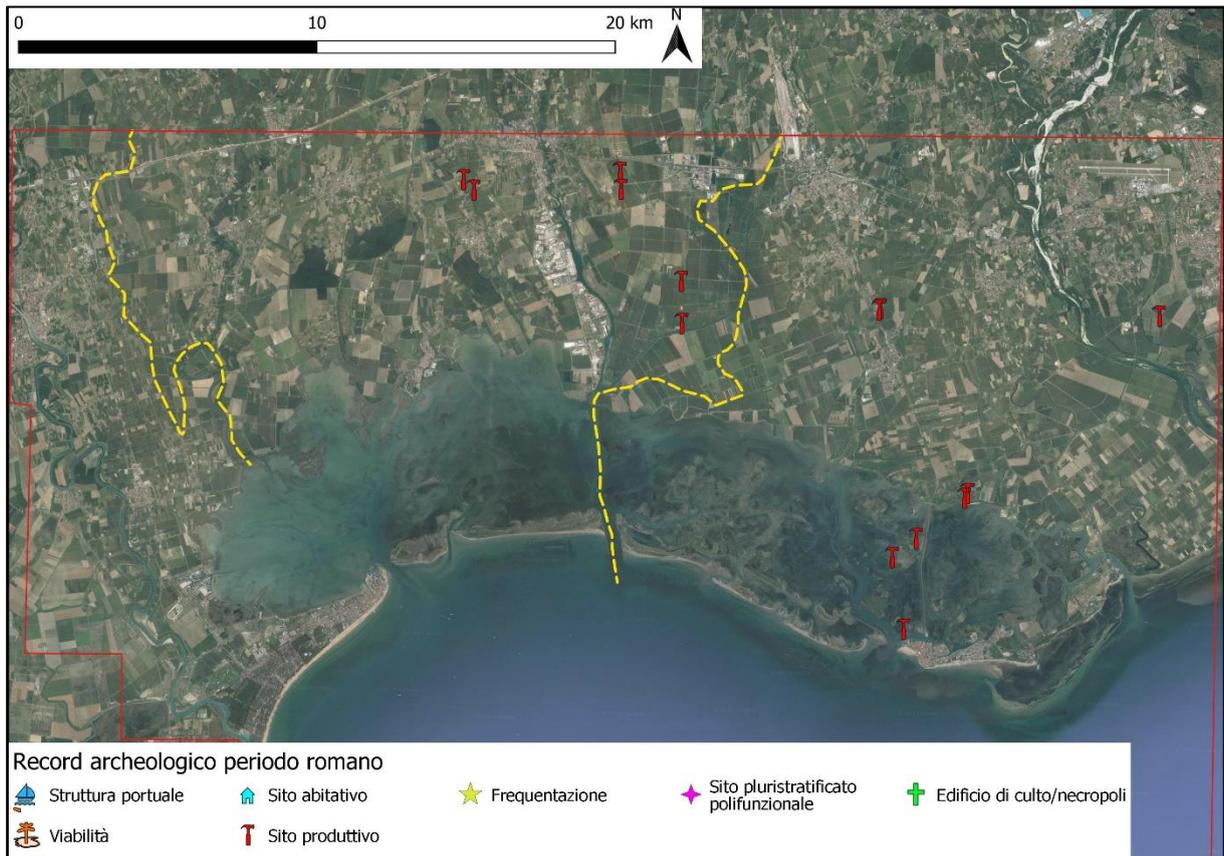


Figura 44: siti produttivi in età romana. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023.

4.2.4 Periodo tardoantico e altomedievale: V secolo d.C. – X secolo d.C.

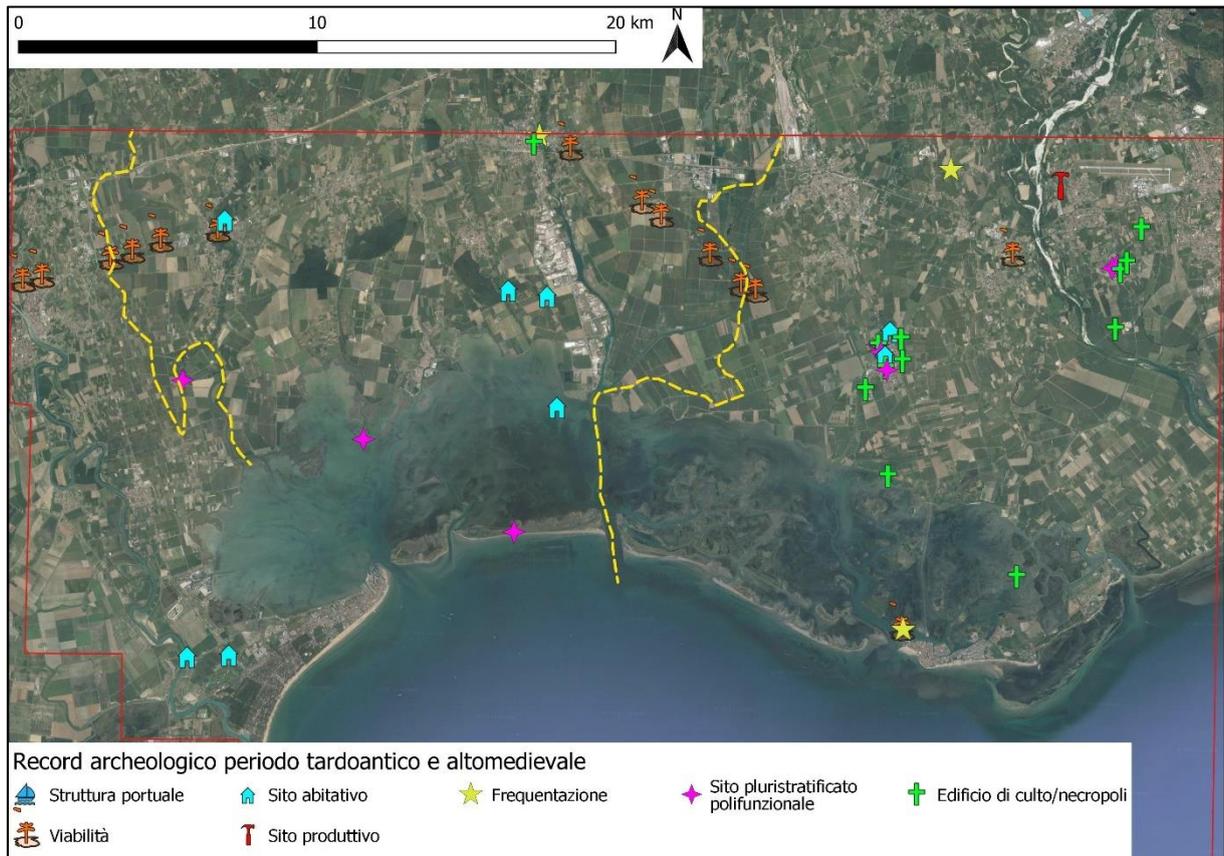
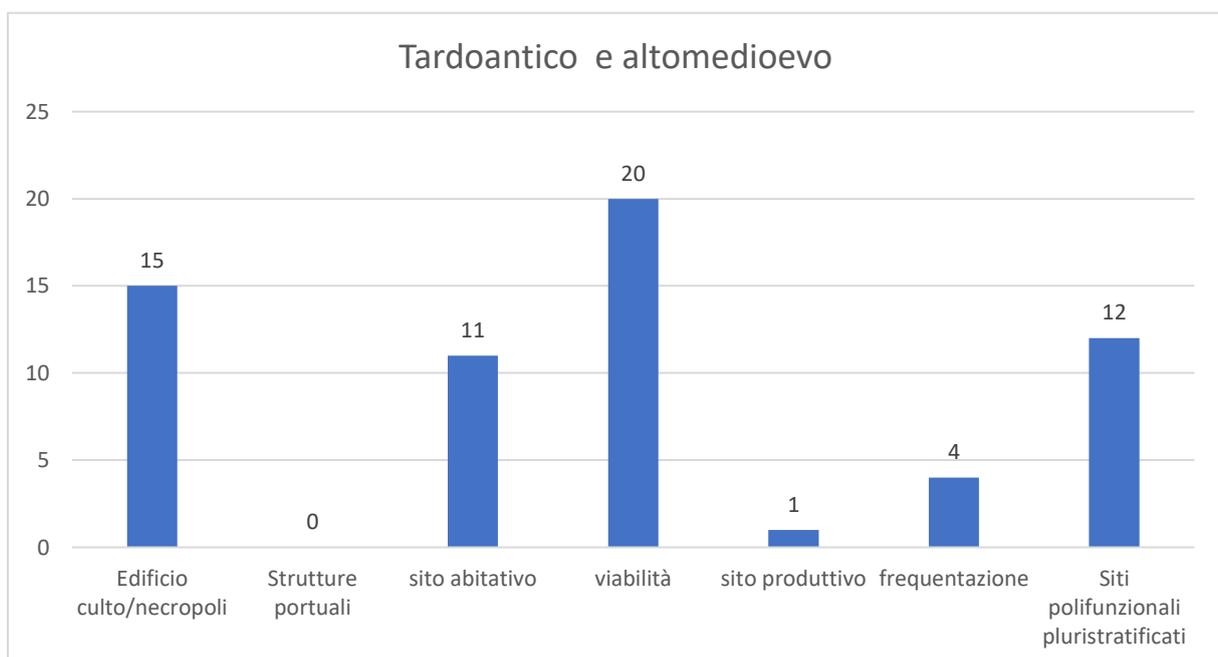


Figura 45: distribuzione record archeologico per il periodo tardoantico e altomedievale. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023.

In figura 45 sono raccolti i rinvenimenti archeologici dei periodi relativi al tardoantico e a quello altomedievale. Rientrano in questo periodo 63 voci equi dipartite tra le due epoche (tabella 6).

Tabella 6: distribuzione record archeologico per categoria nel periodo tardoantico e altomedievale



Anche in questo caso le interpretazioni date ai siti archeologici sono abbastanza eterogenee, similmente per quanto si riscontra nel periodo romano. I siti archeologici sono localizzati in tutti e tre i settori, anche in questo caso si riscontra un numero elevato di siti archeologici nella città di Aquileia.

Un cospicuo numero di voci archeologiche afferisce alla categoria di luoghi di culto, resti di strutture ricollegabili a oratori e chiese nonché ritrovamenti di tombe ed epigrafi. Come si può osservare dalla figura 45 essi sono diffusi maggiormente nel settore 3, prevalentemente nell'area di Aquileia e di San Canzian d'Isonzo, alcuni siti sono anche presenti all'interno della laguna.

Gli insediamenti sono pochi e rinvenuti per lo più nei settori 1-2, si tratta di resti di murature, edifici e materiale di vario tipo, prevalentemente laterizi, che possono essere ricondotti a vari scopi, tra cui anche quello di abitazione. Da notare la presenza di un sito composto da blocchi di struttura muraria e anfore posizionato all'interno della laguna ma sempre in prossimità del margine interno.

I siti riferiti alle vie antiche riprendono quelle che sono le localizzazioni dei siti di epoca romana, si ipotizza quindi il prolungamento dell'utilizzo di tali infrastrutture in questo periodo storico. La maggior parte dei siti si trovano nei settori 1-2, distante dall'ambiente lagunare.

4.2.5 Periodo medievale: X secolo d.C. – XV secolo d.C.

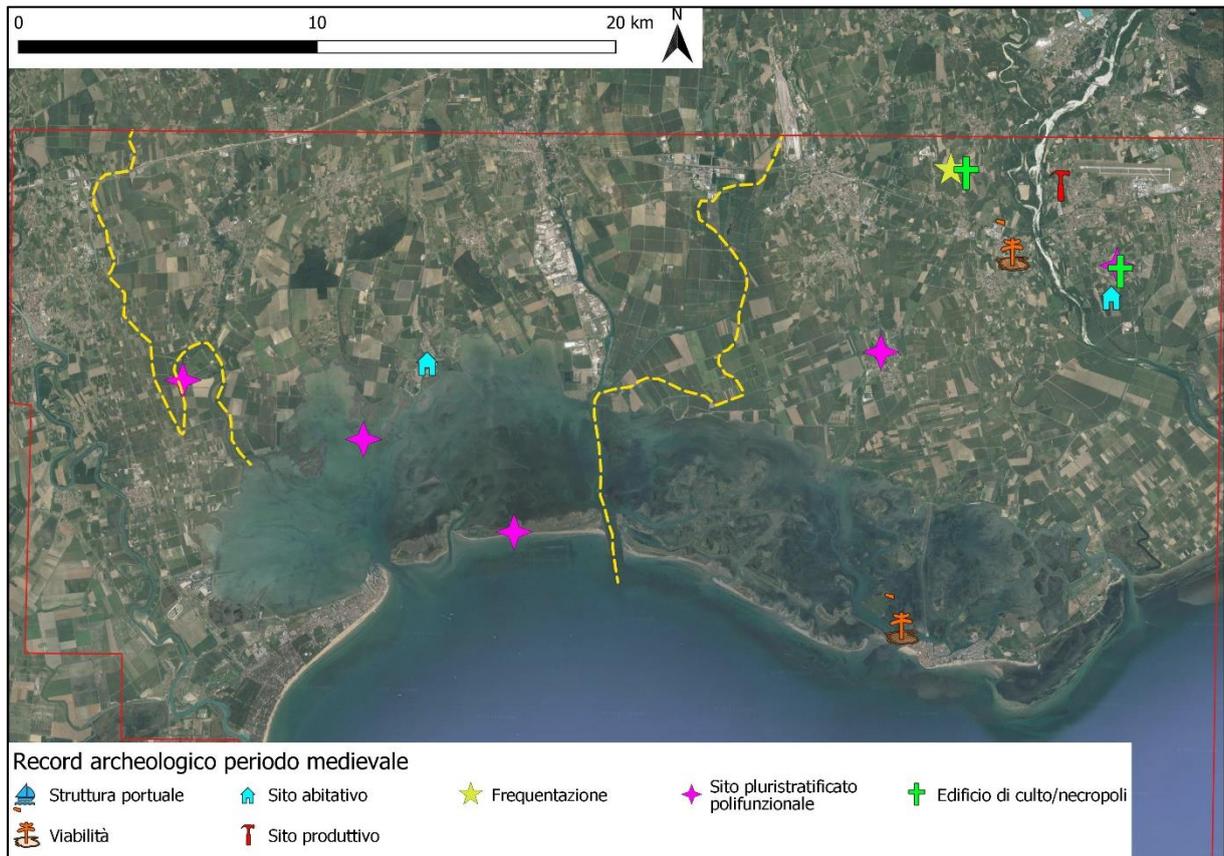
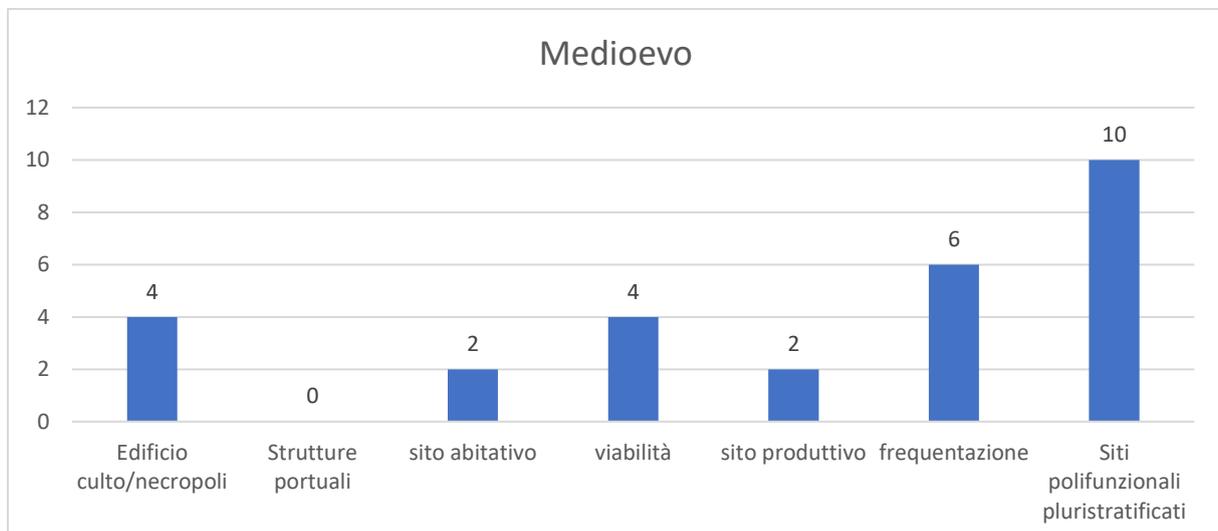


Figura 46: distribuzione record archeologico per il periodo medievale. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023.

Nella figura 46 sono rappresentate le 28 voci appartenenti al Medioevo e nella tabella 7 la loro suddivisione per categoria. I siti sono geograficamente posizionati nel settore 3 vicino al corso fluviale dell'attuale Isonzo e constano di ritrovamenti associabili a affioramenti di ceramiche, frammenti fittili e resti di strade, inoltre sono state rinvenute porzioni di muri appartenenti ad antiche chiese, nonché pavimentazioni, e resti di un mulino.

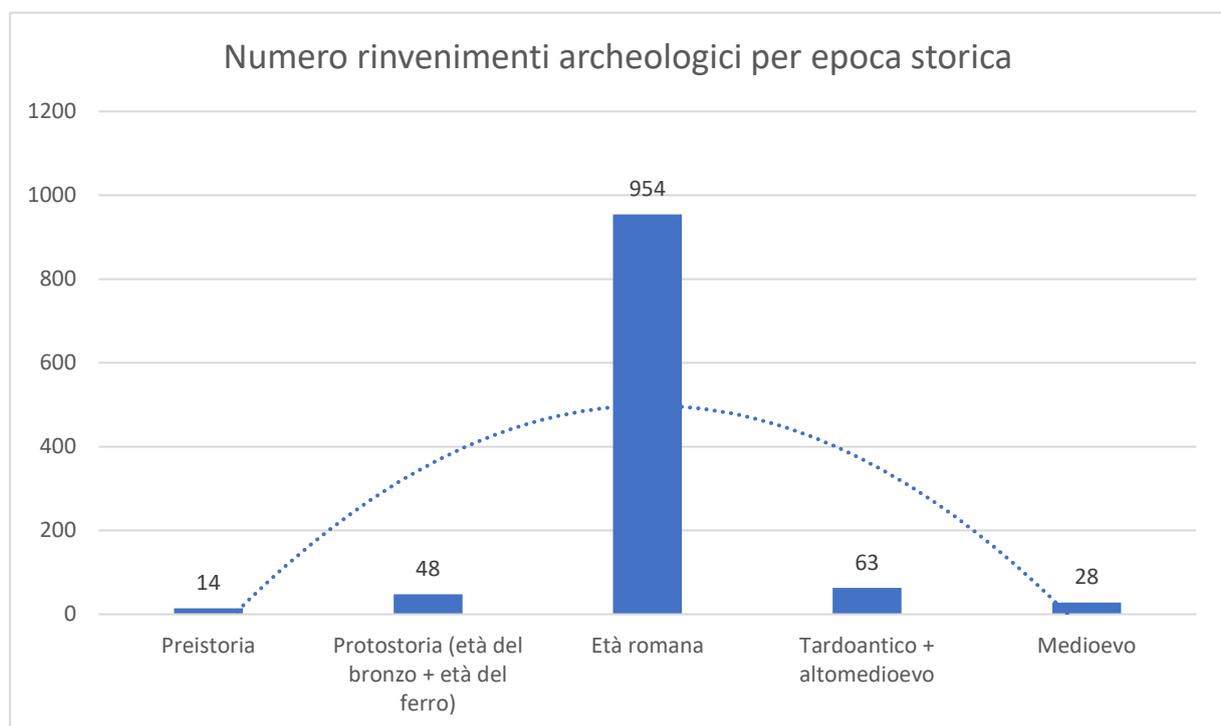
Tabella 7: distribuzione record archeologico per categoria nel periodo medievale



Tutti questi siti non godono di particolari associazioni lasciando spazio a poche interpretazioni complessive.

Nel settore 2 si nota un sito a carattere abitativo presso Marano Lagunare a ridosso della laguna, dove sono stati ritrovati numerosi frammenti ceramici di epoca rinascimentale e medievale insieme ad altri di età imperiale romana, indicatori quindi di occupazione continuativa dell'area, simili rinvenimenti si riscontrano anche nella limitrofa Isola dei Bioni. Nell'isola di Sant'Andrea sono stati ritrovati mosaici afferenti ad un monastero e blocchi di pietra forse ricollegabili ad una antica banchina portuale romana. Tali evidenze sono indicatrici di un riutilizzo dei siti antichi nelle epoche più recenti, probabilmente, per la presenza di infrastrutture già ben strutturate in età romana come per il caso di Marano Lagunare e in altri, come per l'isola di Sant'Andrea, per scopi sicuramente sia di tipo strategico commerciale, che di culto, o probabilmente per scopi di difesa, visto che si affaccia al mare Adriatico.

Tabella 8: distribuzione record archeologico per epoca storica, con disegnata curva gaussiana di distribuzione.



La distribuzione di abbondanza dei siti archeologici visibile in tabella 8 nei diversi periodi storici presi in considerazione, può essere rappresentata da una curva gaussiana molto stretta data dall'abbondanza di siti di epoca romana rinvenuti sul territorio.

5 Discussione

5.1 Analisi geoarcheologica

In questo capitolo si analizza l'area presa in esame della laguna di Marano e Grado tramite un approccio geoarcheologico che permette un nuovo tipo di analisi, incrociando le informazioni ambientali e geomorfologiche con quelle archeologiche. In tale modo, si riesce ad ottenere una visione molto più ampia e complessiva dell'evoluzione antropica e ambientale che ha interessato il luogo.

5.1.1 Periodo preistorico: VIII millennio a.C. – metà III millennio a.C.

I siti archeologici sono tutti stati rinvenuti in unità geologiche (SPB3 SPB4) databili al Pleistocene superiore nelle fasi anaglaciali e cataglaciali del LGM. Questi suoli sono i più antichi tra tutti quelli presenti nell'area di studio. Tale condizione è presumibilmente il fattore principale del motivo del rinvenimento di evidenze archeologiche attribuibili a questo periodo storico nella parte occidentale. Infatti, l'unico sito presente nel settore 3, composto prevalentemente da unità geologiche di origine Post-LGM è situato sull'alto morfologico delle Dune di Belvedere San Marco (GOR1) di origine databile al pleistocene medio e superiore. L'area orientale come appena spiegato è composta da suoli relativamente giovani, alcuni formatesi in epoca post-romana; tale condizione potrebbe spiegare in parte la mancanza di evidenze archeologiche per questo periodo storico. Tali suoli potrebbero infatti aver sepolto le evidenze archeologiche presenti in quest'area. Le evidenze preistoriche molto probabilmente saranno situate più in profondità dove si osservano le stratigrafie appartenenti alla piana alluvionale del LGM.

Il sito presente nel settore 3, comunque, può permetterci di avanzare alcune ipotesi circa l'ambiente che caratterizzava il periodo preistorico. Le caratteristiche geomorfologiche delle dune di Belvedere San Marco hanno sicuramente giocato un ruolo fondamentale nella frequentazione o occupazione del sito. In quest'epoca le dune di Belvedere probabilmente spiccavano rispetto al paesaggio della pianura circostante, e fornivano il riparo da potenziali inondazioni; inoltre permettevano di evitare le aree paludose e salmastre formatesi dal passaggio dei paleoalvei e dalla trasgressione marina.

Il sito abitativo rinvenuto nei pressi della località di Piancada, nella sponda destra dell'alveo attuale del fiume Stella, è situato sopra il dosso fluviale n2. La presenza del sito può indicare quindi che tale alveo era già disattivato in questo periodo storico. Inoltre,

l'area più rialzata formatesi dal dosso fluviale forniva sicuramente protezione da fenomeni alluvionali, come le esondazioni dei fiumi, o fornendo riparo da aree umide e salmastre, abbassando in questo modo il rischio idraulico associato. Il secondo sito archeologico abitativo è situato in una vallecchia tra i dossi fluviali n5 e n6 nella porzione più a nord. La peculiare posizione situata vicino al fiume Zellina attuale, poteva essere strategica per attività produttive o di caccia. Prove che confermano la stabilità idrogeologica di questa area sono i rinvenimenti di frammenti ceramici databili all'età del bronzo nel medesimo sito. Gli altri siti archeologici sono contraddistinti da materiale sporadico e quindi associabile a sole frequentazioni di queste aree. Molti siti di questo genere sono stati recuperati nei pressi del Bosco Baredi all'interno del dosso n3, con la presenza di materiale archeologico esattamente sopra il tracciato dell'alveo residuale. Questa evidenza archeologica insieme alle altre nei pressi di quest'area indicano anch'esse una disattivazione di questo dosso fluviale e di quello adiacente (n4), in epoche anteriori a quella esaminata. Grazie ai transetti sedimentologici di Muzzana Bonifica e Ara del Gorgo, compiuti nell'area del margine lagunare di Marano, è possibile avanzare delle ipotesi sull'ambiente antico che caratterizzava quest'area. Le datazioni al C-14 eseguite su alcuni campioni di semi raccolti in profondità chiariscono che i sedimenti depositati circa nel 3.360 a.C. appartenevano ad un ambiente marino, più precisamente di transizione da acque dolci di origine fluviale a quello tipico di aree umide lagunari (Fontana et al. 2018). Tale cambiamento, se messo in relazione con le evidenze archeologiche, indica quindi che l'area lagunare di Marano aveva un'estensione simile a quella osservabile ad oggi, confermato anche dalla distribuzione dei siti diffusi sino a ridosso del margine lagunare. Purtroppo, la scarsità e la mancanza, per la maggior parte dei siti, di evidenze tali che permettano la loro caratterizzazione e classificazione non consentono di avanzare ulteriori ipotesi, soprattutto per quanto riguarda l'area del settore 3. In conclusione, l'insieme dei dati raccolti conferma in linea di massima la ricostruzione proposta dagli studiosi Fontana e Ronchi nel 2021, con alcune riserve. Infatti, sono state individuate evidenze archeologiche a quello che è il margine attuale della laguna di Marano, indicatrici che la frequentazione di queste aree era possibile in epoca neolitica. La ricostruzione plausibile del limite interno della laguna, quindi, può essere quello riportato dalla linea continua arancione in figura 47.

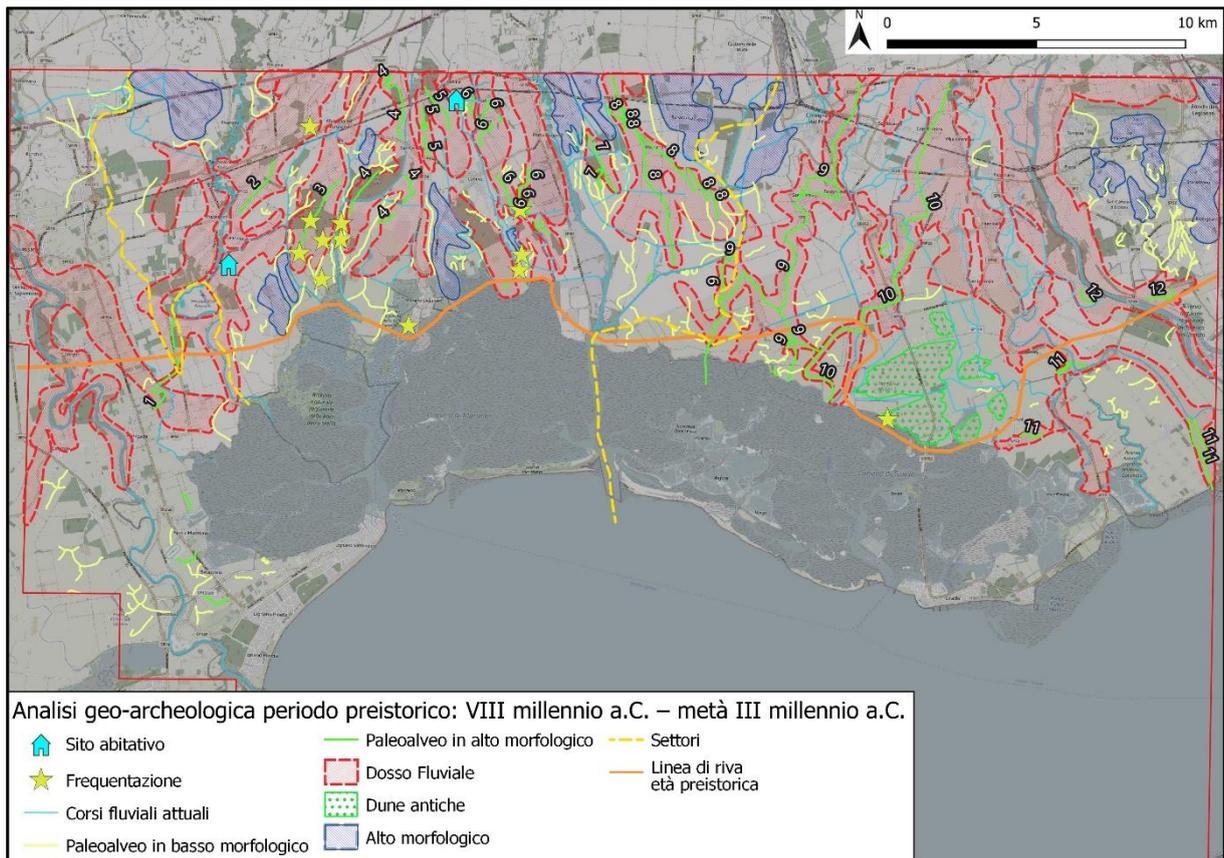


Figura 47: analisi geoarcheologica per il periodo preistorico con ricostruzione paleo riva ipotetica. Fonte: elaborazione QGIS modificata dopo Fontana e Ronchi (2021), mappa di base e dati di OpenStreetMap e OpenStreetMap Foundation (CC-BY-SA).

5.1.2 Periodo protostorico: metà III millennio a.C. – VIII secolo a.C.

In questo periodo storico aumentano le evidenze archeologiche, soprattutto per quanto concerne gli insediamenti. Alcuni siti, come per esempio quelli compresi tra le aree dei dossi n5 e n6, giacciono su rinvenimenti archeologici appartenenti all'epoca storica precedente a prova della stabilità ambientale degli stessi. Contrariamente a quanto si possa pensare, nel settore 2 si nota una generale preferenza di insediamento e di frequentazione degli avvallamenti, che si sono venuti a formare tra due dossi, dove sono presenti paleo-canali residuali e di scorrimento a volte ancora visibili tutt'oggi. Gli insediamenti di Muzzana Bonifica e Ara del Gorgo, come è visibile dalle mappe, giacciono proprio vicino a dei paleo-canali. Queste evidenze permettono quindi di avanzare delle ipotesi riguardo lo sviluppo delle popolazioni protostoriche e le loro interazioni con il paesaggio. La vicinanza stretta ai canali delle vallecicole indicano che queste aree dovevano essere relativamente stabili idrologicamente e permettevano quindi lo sfruttamento delle risorse idriche come, ad esempio, per la pratica dell'agricoltura o della pesca. Questo andamento è riscontrabile anche nei siti classificabili come sola frequentazione.

Per la prima volta si registrano dei siti a carattere insediativo nel settore 3, nei pressi della località di Cervignano del Friuli e presso il già citato sito di Ca' Baredi (vedere paragrafo 4.1.2 sistemi fluviali). Tali siti ci forniscono delle preziose informazioni ambientali. L'insediamento nei pressi di Cervignano è posizionato su un alto morfostrutturale, mentre il sito di Ca' Baredi è posizionato su di un dosso fluviale disattivato come discusso nei capitoli precedenti. Si può presupporre quindi che il settore 3 fosse caratterizzato da un rischio idrologico maggiore, in quanto gli insediamenti erano posizionati strategicamente in aree rialzate quasi a indicare la necessità di riparo da pericoli. Ulteriore supporto a queste deduzioni vengono dal rinvenimento di un ripostiglio di materiale bronzeo ritrovato sull'alto morfostrutturale del dosso n9, e dalle prove di frequentazione del sito nei pressi delle dune di Belvedere e San Marco già citato nel periodo preistorico.

Nel settore 1 non si rilevano siti appartenenti a questa epoca storica; le diversioni del fiume Tagliamento e le inondazioni degli ultimi secoli potrebbero aver sepolto in profondità le evidenze archeologiche di tale periodo; infatti, i suoli di questo settore appartengono alle subunità GRA 4 e GRA formatesi nell'olocene in epoca post-romana.

In conclusione, le informazioni che possediamo per l'epoca del bronzo e del ferro, ci permettono di descrivere un paesaggio sostanzialmente diverso tra i settori 2 e 3. Nel

settore 2, si presume dovessero prevalere ambienti con un basso rischio idrologico che permettessero l'insediamento in modo stabile delle popolazioni lungo le aree depresse interfluviali. Mentre nel settore 3, gli insediamenti e le frequentazioni erano focalizzate su strutture morfologicamente più elevate rispetto alla piana alluvionale, presumibilmente per essere più al sicuro da fenomeni alluvionali. Quest'ultimo settore è però caratterizzato dalle subunità GRA1 e GRA2, che possono, come spiegato precedentemente nel settore 1, aver sepolto le evidenze archeologiche.

Analizzando i margini lagunari proposti dal lavoro di Marocco del 2005 basato sulle sole evidenze stratigrafiche, si possono ora apportare delle modifiche con le basi geoarcheologiche appena descritte e tracciare il nuovo margine ipotetico (vedasi figura 48).

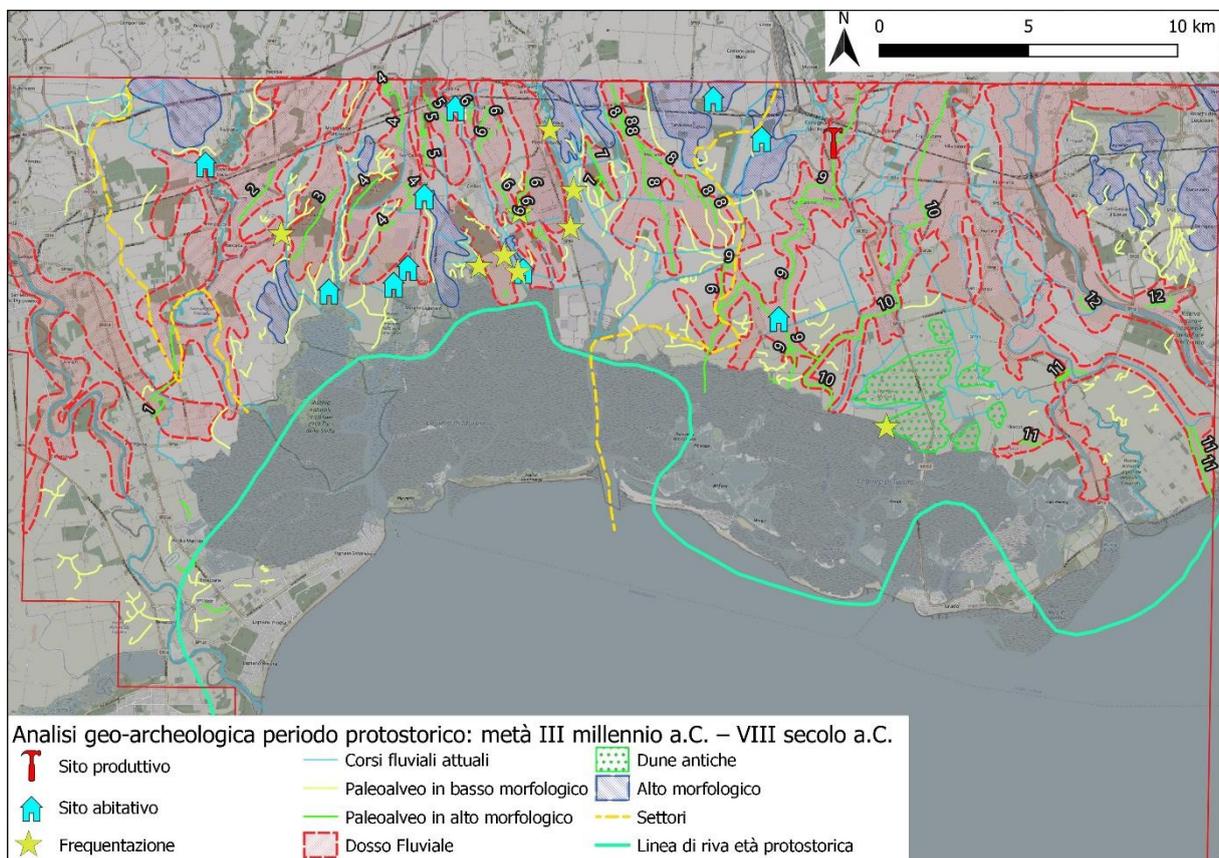


Figura 48: analisi geoarcheologica per il periodo protostorico con ricostruzione paleo riva ipotetica. Fonte: elaborazione QGIS modificata dopo Marocco (2005), mappa di base e dati di OpenStreetMap e OpenStreetMap Foundation (CC-BY-SA).

5.1.3 Periodo romano: Il secolo a.C. – V secolo d.C.

Durante questo periodo storico, le evidenze archeologiche sono molto numerose e visibili su tutti e tre i settori analizzabili, nonostante la presenza di aree certamente poco idonee all'insediamento come per i periodi storici precedenti. Tuttavia, in questo periodo molto probabilmente il territorio è stato fortemente antropizzato più che in altri momenti, così come evidenziato dalla testimonianza di intense opere di bonifiche, drenaggi, centuriazioni e edificazioni di infrastrutture che hanno permesso lo svilupparsi di insediamenti rurali, oltre che alla espansione delle pratiche dell'agricoltura e allevamento.

Le uniche aree in cui la presenza antropica è limitata risultano essere la parte più orientale del settore 1 e quella più occidentale del settore 3. In questi casi l'analisi geomorfologica ha evidenziato come le avulsioni dei fiumi Tagliamento e Isonzo, avvenute in età post-romana, abbiano probabilmente sepolto a diversi metri di profondità eventuali tracce dei periodi storici precedenti. Il settore 1, attraversato dal tratto finale del corso del fiume Tagliamento, infatti, è contraddistinto dalla subunità GRA4 che comprende sedimenti alluvionali depositi in epoca post-romana dopo il V secolo d.C.. Questo fattore ha giocato sicuramente un ruolo determinante nello spiegare l'assenza o la difficoltà nel rinvenimento di evidenze archeologiche di epoca romana in tale area. Questo è il caso anche dell'area, nel settore 3, compresa tra l'alto morfologico delle dune di Belvedere e il dosso fluviale n12 del fiume Isonzo; infatti, anche in questa zona non si rilevano evidenze archeologiche di epoca romana in quanto i suoli appartengono alla subunità GRA2 composta da sedimenti alluvionali dei fiumi Isonzo-Natisone-Torre anch'essi di epoca post-romana.

Per quanto riguarda invece gli insediamenti, questi, sono distribuiti in numero abbastanza simile tra alti e bassi morfologici, a differenza dell'età del Bronzo dove si è individuata una netta prevalenza di insediamenti su dossi fluviali. In età romana la metà di essi risiede su un alto morfologico o dosso fluviale. Ciò indica che le popolazioni riuscivano a sfruttare in modo efficace sia le aree morfologicamente rialzate che quelle dei bassi morfostutturali. Questo inoltre dimostra una notevole capacità nello sfruttare e gestire il paesaggio, modificandolo con opere di bonifica e canalizzazioni. Un esempio di tale capacità e ingegno sono le centuriazioni romane visibili ancora oggi sul territorio nei terreni vicino al canale Anfora (Muzzioli 2005). Il territorio, quindi, doveva risultare abbastanza stabile dal punto di vista idrogeologico.

La presenza di insediamenti al di sopra dei dossi fluviali permette di ipotizzare che al tempo della loro occupazione tali paleoalvei fossero già disattivati. È questo il caso dei dossi n3 e n4 nei pressi del Bosco Baredi e del n9 nelle vicinanze del canale Anfora.

In questa fase si registrano testimonianze archeologiche che ricadono all'interno dei limiti lagunari odierni. Si riscontrano evidenze insediative all'interno dell'area lagunare sia di Marano che di Grado. Tali rinvenimenti sono stati trovati ad una profondità compresa tra -1 m e -0,8 m e ricoperti da sedimenti lagunari (Fontana e Ronchi 2021). Attraverso la verifica delle quote su DTM, queste evidenze risultano associate a dei rilievi che identificano delle porzioni di fondale rialzato. Questi siti occupano quindi dei terreni che garantivano loro una decisa vicinanza con l'antico ambiente lagunare, senza tuttavia esporsi ai problemi legati alla presenza di acque superficiali. Le quote di queste evidenze sono compatibili con il livello della curva eustatica di risalita del livello del mare che in epoca romana doveva essere posizionato più in basso di quello attuale di circa 0,8 m (Fontana e Ronchi 2021)

Analizzando l'area della città di Aquileia si può notare come essa si imposta, come spiegato precedentemente (paragrafo 4.1.2.3), su di un dosso fluviale (n10), che attraversa da nord a sud tutta l'area studio. I log stratigrafici analizzati dal progetto S.A.R.A., che constano di un transetto ENE-WSW passante per tutto il centro di Aquileia (vedere figura 46), rilevano e confermano le tracce di un passaggio di alvei (numeri cerchiati in figura 46) (Arnaud-Fassetta et al. 2003), visibili chiaramente anche grazie alla mappa TPI.

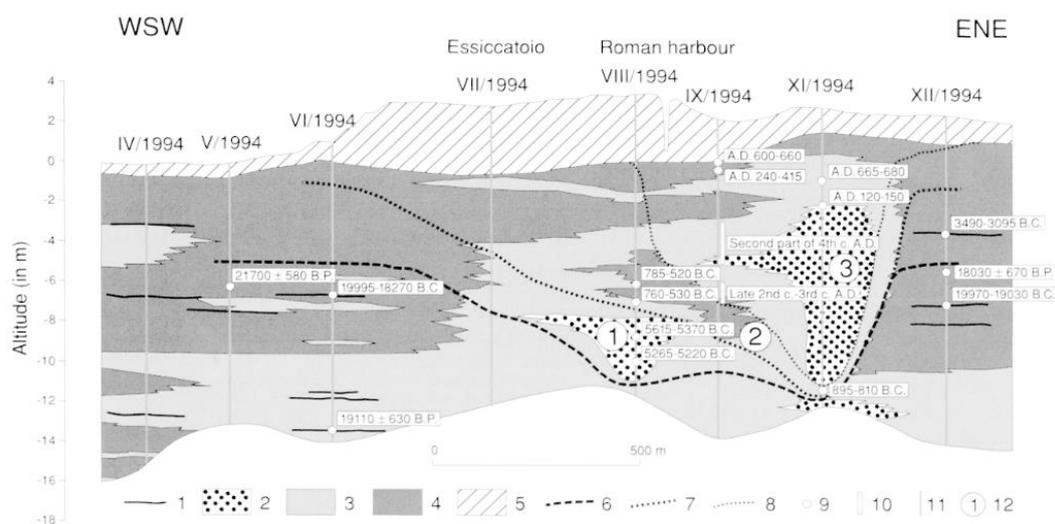


Figura 49: Sezione litostratigrafica WSW-ENE ad Aquileia 1: torba; 2: ghiaia; 3: sabbia; 4: pelite; 5: materiale rielaborato; 6: piana alluvionale 18'030 ± 0,670 ka B.P. (traccia speculativa); 7: piana alluvionale 3490-3095 a.C. (traccia speculativa); 8: piana alluvionale 785-520 a.C. (traccia speculativa); 9: datazione al radiocarbonio (cal.); 10: datazione archeologica; 11: sondaggio S.A.R.A (1994); 12: numero di paleocanali. Fonte: Arnaud-Fassetta et al. (2003)

Per di più, si può osservare come tutto l'abitato di Aquileia goda di quote relativamente molto più elevate rispetto alla zona circostante, con dislivelli che raggiungono anche i +4 metri. Tali rilevazioni indicano quindi il rimaneggiamento e l'impiego di azioni di bonifica dell'area aquileiese, dato che, osservando il contesto in cui è inserita, tutta l'area, prima dell'arrivo dei romani, doveva essere prevalentemente dominata da ambienti di natura paludosa, essendo posizionata in un contesto di terreni con quote pari a quelle del livello del mare se non inferiori (Arnaud-Fassetta et al. 2003; Scotti Maselli 2014).

Inoltre, sono da menzionare le evidenze archeologiche riferibili alla viabilità. Nel settore 3 a sud dell'alto morfologico delle dune di Belvedere, sono presenti i resti di una via "Helciaria"³, che doveva collegare Aquileia con la costa e che trascorreva parallelamente al canale e alla strada odierni (Gaddi 2001). Da notare come i rinvenimenti archeologici siano visibili sulle isole di origine geologica appartenente alla subunità GOR1; queste formazioni antiche giacciono ora all'interno della laguna di Grado e sono caratterizzate da quote altimetriche moderatamente alte se confrontate con quelle di altre isole o barene circostanti. La presenza di alti morfologici potrebbe aver quindi condizionato la scelta di questa direttrice per la realizzazione di questa via. Sull'Isola del Gorgo, per di più, si rilevano evidenze archeologiche di siti abitativi nonché di culto e produttivi, a indicare ancora una volta l'importanza, la stabilità e il riparo che dovevano fornire queste aree da eventuali influenze mareali o alluvionali.

Per la prima volta in questo periodo si registrano evidenze archeologiche interpretate come siti di approdo portuale, collocati principalmente nel settore 3 e posizionati lungo i canali più profondi, rilevati dalla batimetria della laguna di Grado. Quest'ultimi potrebbero essere quindi le tracce di antichi corsi fluviali utilizzati come vie navigabili, supposizione confermabile in parte anche dai resti di imbarcazioni e da anfore commerciali ritrovate lungo tali canali (Gaddi 2001).

Tutte le evidenze sia archeologiche che geomorfologiche appena descritte confermano quanto proposto dai lavori di (Lambeck et al. 2011). In epoca romana, infatti, quando il livello del mare doveva essere più basso di circa 0,8 metri (Lambeck et al. 2004) rispetto a quello odierno, la parte orientale dell'area lagunare di Grado, doveva essere emersa, come testimoniano numerose evidenze archeologiche ora sepolte sotto sedimenti

³ Strada pavimentata che costeggiava i fiumi e consentiva la pratica dell'alaggio, ovvero il traino da parte di uomini o animali delle imbarcazioni.

lagunari. L'area lagunare di Marano, invece, essendo essa globalmente più profonda, era anche in antichità un ambiente lagunare sebbene più ristretto rispetto ad oggi. Infatti, i margini lagunari dovevano essere al tempo emersi, assieme ad alcune aree morfologicamente più rialzate, che di conseguenza fornivano superfici protette dall'influenza del mare e adatte agli insediamenti. Nel complesso l'area della pianura costiera invece doveva essere più stabile idrogeologicamente in confronto alle epoche passate.

La ricostruzione del limite costiero, quindi, può in gran parte riprendere quella proposta dal lavoro di Marocco (1991) e Traviglia (2016) modificata seguendo le evidenze trovate da questo lavoro di tesi visibile in figura 50.

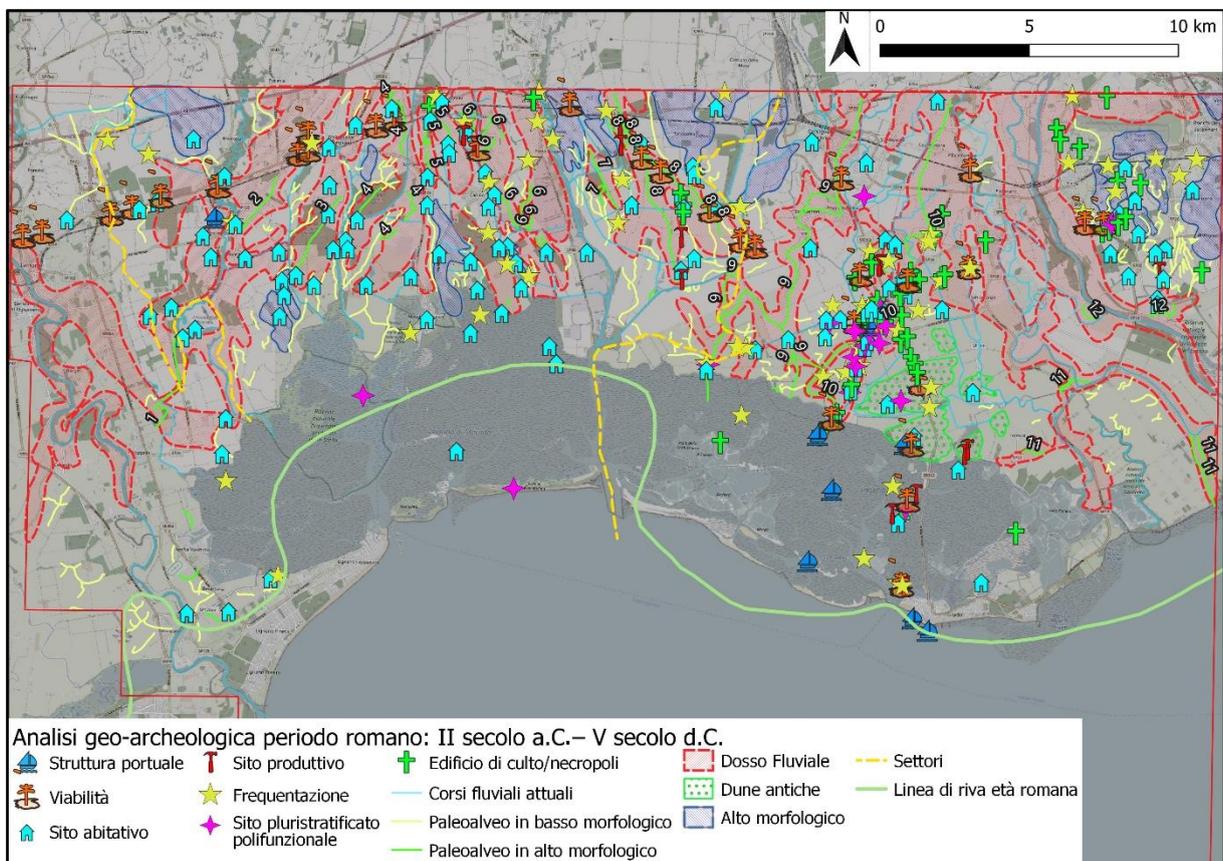


Figura 50: analisi geoarcheologica per il periodo romano con ricostruzione paleo riva ipotetica. Fonte: elaborazione QGIS modificata dopo Marocco (1991) e Traviglia (2016), mappa di base e dati di OpenStreetMap e OpenStreetMap Foundation (CC-BY-SA).

5.1.3.1 Ricostruzione dell'ambiente in età romana tramite simulazione idrologica del livello dell'acqua

Oltre alla ricostruzione ottenuta dalla bibliografia, per il periodo romano è stata creata una modellazione del livello del mare che sfrutta le potenzialità della mappa DTM prodotta in questo lavoro.

Nella figura 51 è rappresentata con il colore azzurro chiaro l'area presumibilmente occupata dal mare nel periodo romano stabilita a -0,8 m, mentre in blu il livello di -1,4 metri che rappresenta il limite inferiore dell'intervallo di confidenza, basato sul valore di subsidenza calcolato.

La mappa, quindi, raffigura la superficie lagunare e quella delle terre emerse nel periodo romano. La laguna di Grado risulterebbe praticamente interrata per la sua interezza, ad eccezione di qualche porzione, nella quale sono essenzialmente visibili i canali lagunari più profondi. Per quanto concerne invece la laguna di Marano, si può osservare una rappresentazione mai proposta prima. Essa, infatti, risulta divisa in due grandi aree lagunari, facenti riferimento alle bocche di porto di Marano e Porto di Buso. Al contempo, la bocca di Sant'Andrea, compresa tra le due appena citate, secondo questa nuova modellazione non era ancora formata. Probabilmente, la fascia di terreno che divide queste due porzioni di laguna era composta da ambienti di palude salmastra influenzata regolarmente dalle escursioni di marea. Queste affermazioni sono confermate anche dalla modellazione più bassa a -1,4 m dell'intervallo di confidenza.

Nella parte orientale la ricostruzione evidenzia tuttavia una grande area depressa compresa tra la foce dei fiumi Corno-Àusa e le dune di Belvedere e San Marco.

Questi ambienti si trovano tutt'oggi al di sotto del livello del mare e sono protetti da un grande argine artificiale. In età romana, considerato il livello delle acque più basso e la lontananza degli ambienti lagunari, probabilmente non vi era necessità di proteggere quest'area dalle ingressioni marine. Difatti, le evidenze dei log stratigrafici di Ca' Baredi e degli altri carotaggi ai margini di quest'area identificano le facies di una pianura alluvionale scarsamente drenata, ma non sono presenti elementi che lasciano ipotizzare la presenza di fenomeni prolungati di stagnazione delle acque (Fontana et al. 2017; Marocco 1989).

Per questo motivo è probabile che l'area depressa evidenziata dalla ricostruzione fosse soggetta a fenomeni di alluvionamento a carattere più o meno stagionale, cosa che ha portato a prediligere l'insediamento in aree morfologicamente più rilevate dei dossi fluviali e dei sedimenti più grossolani, caratterizzati da un migliore drenaggio. Inoltre, la costruzione di opere idrauliche come il canale Anfora e la centuriazione dei terreni, hanno sicuramente influenzato la gestione idrologica del paesaggio mantenendo relativamente asciutte tali zone.

Analizzando il database archeologico, i rinvenimenti di epoca romana della laguna di Grado risultano particolarmente coerenti con il modello a -0,8 m. Ad esempio, i siti portuali di Grado sono posizionati in modo abbastanza preciso sulla linea di costa modellata. Simili evidenze si osservano anche per i siti localizzati dietro Grado, nell'area lagunare, affacciati alla bocca di Grado, che giacciono su aree emerse come indicano le evidenze archeologiche.

Nella sezione della laguna di Marano, i record archeologici sono congrui con la modellazione realizzata, in quanto la loro localizzazione risulta posizionata nelle aree di terra emersa, abbondantemente distanziati dalla laguna. Questa distanza potrebbe essere spiegata dalla probabile necessità di evitare l'influenza delle escursioni di marea che caratterizzano gli ambienti lagunari.

In conclusione, questa modellazione restituisce visivamente, pur con qualche incertezza, l'estensione delle aree lagunari e i limiti delle aree emerse nel periodo romano. Infatti, in questo modello non sono presi in esame possibili anomalie nei secoli del tasso di subsidenza e la sua variabilità locale. Inoltre, fenomeni quali sedimentazione fluviale e azioni antropiche recenti, come bonifiche dei terreni, insieme ad altri fattori ambientali, hanno sicuramente giocato un ruolo fondamentale nella modificazione del territorio.

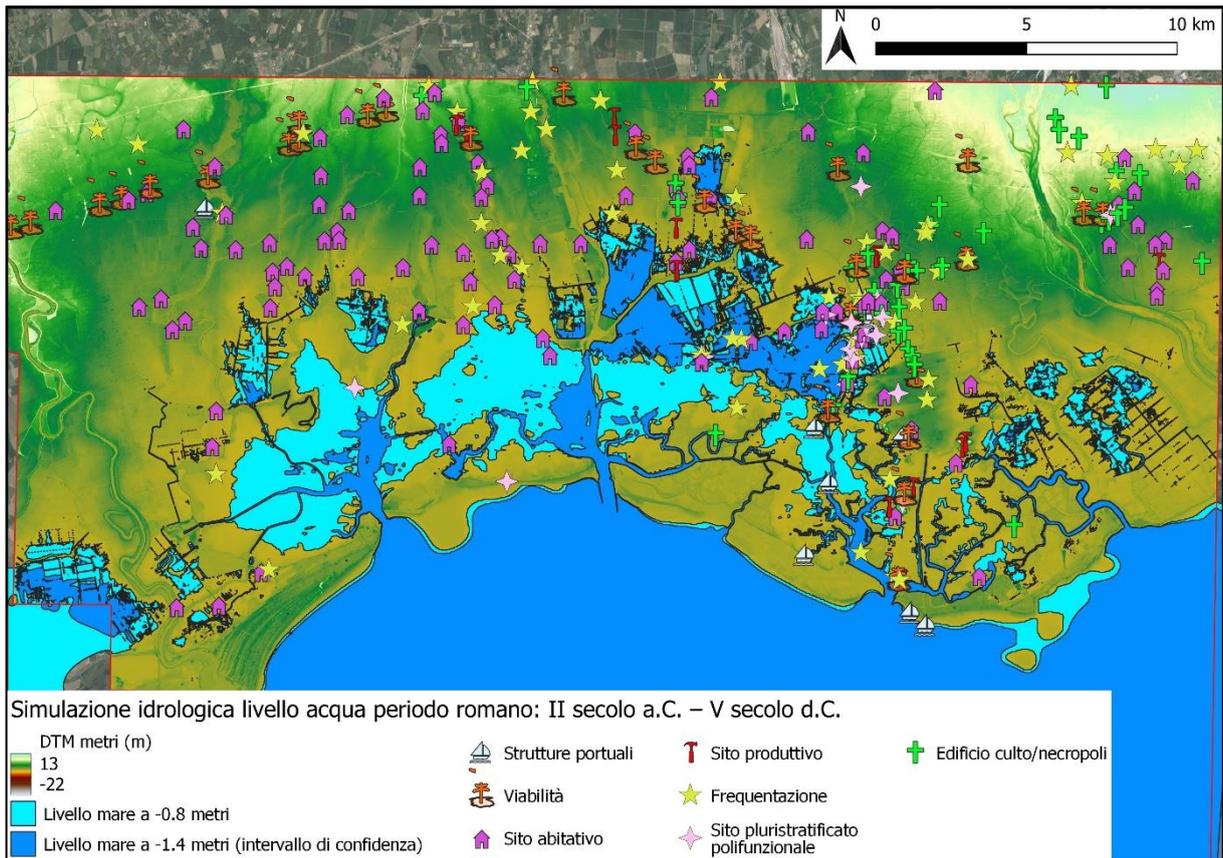


Figura 51: modellazione livello acqua marino per periodo romano. In azzurro chiaro livello mare a -0,8 m mentre in blu modellata a -1,4 metri, sono visibili, inoltre, il DTM complessivo e le evidenze archeologiche per il periodo romano. Fonte: elaborazione QGIS, immagini satellitari Google satellite 2023.

5.1.4 Periodo tardoantico e altomedievale: V secolo d.C. – X secolo d.C.

Le evidenze archeologiche appartenenti a questo periodo diminuiscono drasticamente rispetto al periodo romano, si contano infatti solamente 63 schede in totale.

La distribuzione dei siti spazia su tutti e tre i settori dell'area di studio. Si nota un calo generale di tutte le categorie archeologiche, rimane però relativamente alto il numero di evidenze appartenenti alla viabilità, mentre quelle insediative sono spesso frammentarie e mescolate a quelle di età romana.

Viene rilevato solamente un insediamento in area lagunare a 4,5 km a est di Marano lagunare, vicino al confine tra il settore 2 e 3 nei pressi della foce del fiume Corno-Ausa, in un'area rialzata e già occupata da un insediamento romano, ad indicare quindi la stabilità di questa area morfologicamente rialzata. Si nota quindi un progressivo abbandono delle aree lagunari, forse dovuto alla maggiore influenza del mare che stava iniziando un nuovo processo di trasgressione dentro l'area retrostante Grado, abbozzando quindi l'ambiente lagunare, che doveva risultare di difficile occupazione. Gli altri insediamenti si trovano comunque per la maggior parte su dossi fluviali a indicare una preferenza di posizioni morfologicamente stabili e rialzate e al riparo da rischi idrologici. Si rileva inoltre come la città di Aquileia e l'area della località di San Canzian d'Isonzo, nel settore 3, rimangano dei fulcri insediativi importanti contraddistinti anche da rinvenimenti di luoghi di culto quali chiese e aree cimiteriali. In particolare, la città di Aquileia perse gradualmente il fasto che aveva acquisito al tempo dei romani, e si innescò un abbandono dei terreni e delle infrastrutture (Groh 2011). L'ambiente nei pressi della città cambiò drasticamente ritornando ad essere caratterizzato da ambienti umidi e paludosi favoriti da acque stagnanti all'incirca fino al 660 ± 55 anni d.C. (Kaniewski et al. 2022). Da questi anni fino alla fine del periodo Altomedievale gli ambienti umidi che circondavano l'abitato aquileiese regredirono lasciando spazio ad ambienti più secchi dominati da associazioni vegetali quali pini, querce e arbusteti (Kaniewski et al. 2022).

Per quanto riguarda il periodo storico tardoantico altomedievale l'area della pianura costiera sembra subire diversi cambiamenti. Probabilmente le aree e i terreni furono abbandonati e l'influenza preponderante della civiltà romana declinò (Riccatò 2021), lasciando spazio ad aree umide non salubri, supposizione confermabile dagli insediamenti prevalentemente situati su alti morfologici. Le diversioni dei fiumi Tagliamento nel settore 1 e del fiume Isonzo nel settore 3 avvenute in epoca post-romana potrebbero aver causato

problemi ed elevati rischi idrologici, un probabile valido motivo per evitare tali aree. Inoltre, l'inizio della formazione della laguna di Grado potrebbe aver accentuato l'abbandono di questa area fortemente antropizzata nel periodo romano. Da notare infine l'area costiera destra della foce del Tagliamento, oggi località Lignano Sabbiadoro, dove sono molto ben evidenziate, grazie al DTM, la grande formazione di dune fossili, probabilmente iniziatisi a formare in questo periodo dalle ultime diversioni del corso fluviale (Regione Friuli-Venezia Giulia - Pineta di Lignano - Misure di conservazione sito specifiche 2019).

Complessivamente, quindi, la ricostruzione della evoluzione della linea costiera in questo periodo può essere associabile alle ricostruzioni di Marocco 1991 opportunamente modificate in base alle evidenze ottenute (vedasi figura 52).

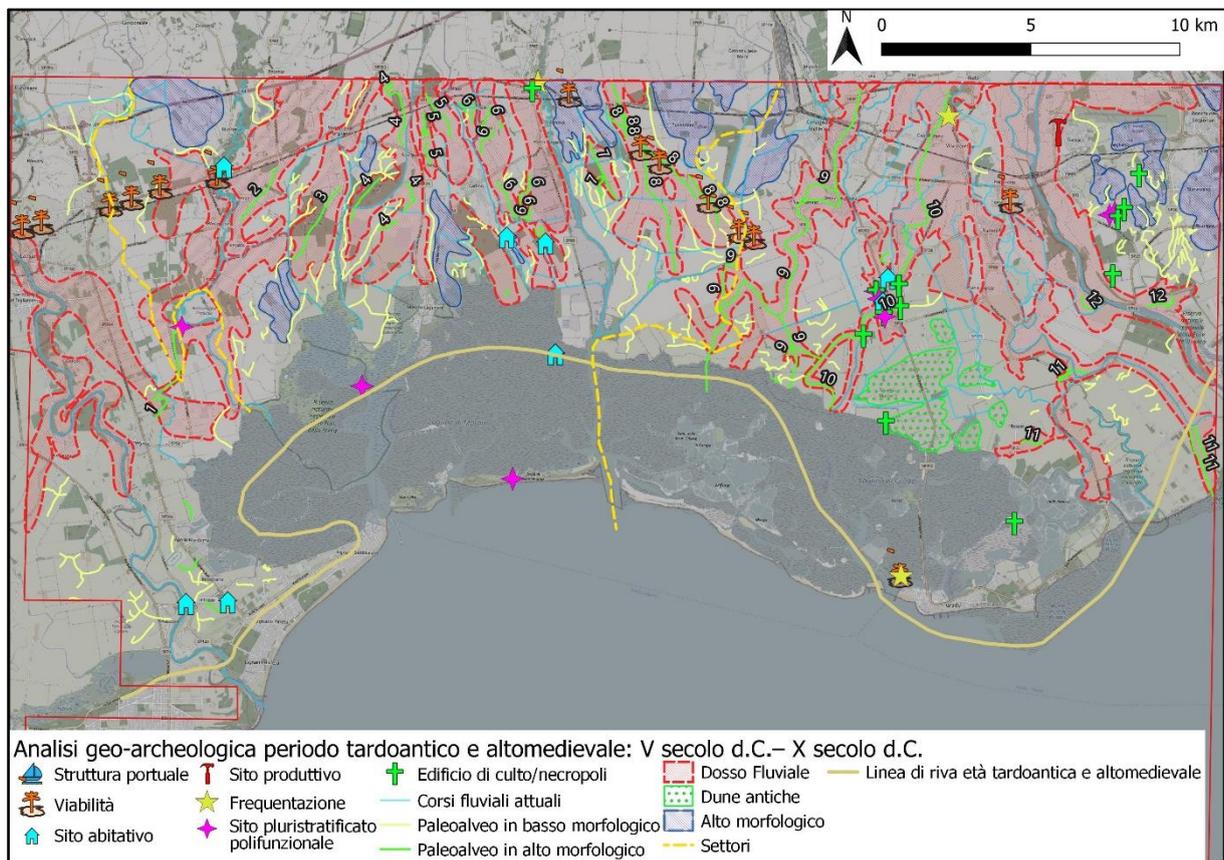


Figura 52: analisi geoarcheologica per il periodo tardoantico e altomedievale con ricostruzione paleo riva ipotetica. Fonte: elaborazione QGIS modificata dopo Marocco (1991) e Traviglia (2016), mappa di base e dati di OpenStreetMap e OpenStreetMap Foundation (CC-BY-SA).

5.1.5 Periodo medievale: X secolo d.C. – XV secolo d.C.

le evidenze archeologiche appartenenti a questo periodo sono molto scarse. I siti archeologici non sembrano avere dei pattern di associazione effettiva con i rilievi morfologici identificati. La maggior parte dei siti è collocata nel settore 3 per lo più concentrati nell'angolo NE dell'area di studio alla sponda destra del corso fluviale dell'Isonzo. Non vengono rilevati insediamenti veri e propri nell'area lagunare ormai formatesi nella sua interezza, si può però osservare un solo sito nella città di Marano Lagunare caratterizzato da rinvenimenti frammentari di ceramiche che non permettono alcuna supposizione fondata sul tipo effettivo di occupazione. Alcuni reperti archeologici rinvenuti nel cordone litoraneo di Sant'Andrea, che comprende fondazioni e mosaici appartenenti ad un edificio di culto frammisti ad altri reperti di epoca romana e tardoantica/altomedievale, indicano il consolidamento effettivo di tale cordone litoraneo. Simili conclusioni si possono trarre dalle evidenze archeologiche situate nell'isola di Bioni. Il sito è caratterizzato da numerosi resti ceramici, anforari, laterizi, reperti ossei e altri manufatti appartenenti a diverse epoche storiche databili fino all'epoca romana, queste evidenze permettono insieme all'analisi topografica LiDAR di affermare che tale isola è sempre rimasta emersa dall'epoca del primo insediamento romano fino ai giorni nostri.

La presenza di vari resti di edifici e strutture che spaziano temporalmente dai romani fino al basso medioevo caratterizza la città di Aquileia. Grazie al patriarcato di Aquileia, essa riacquistò importanza (Kaniewski et al. 2022). Durante tale periodo, si susseguirono un alternarsi di condizioni ambientali e climatiche che portarono al proseguimento del clima asciutto instauratosi nel periodo altomedievale. Questa condizione perdurò fino a circa il 1200 d.C., da questo secolo fino al 1700 d.C. l'area aquileiese fu caratterizzata invece da oscillazioni climatiche che portarono all'avvicinarsi di ambienti umidi e secchi (Kaniewski et al. 2022).

Come accennato precedentemente un raggruppamento di evidenze archeologiche è visibile nell'angolo NE nei pressi del corso dell'attuale Isonzo, seppur non si rilevino associazioni evidenti con gli alti morfologici rilevati in quell'area. Osservando la topografia DTM dell'area, però, si rileva che essi giacciono su una porzione di territorio caratterizzata da quote significativamente più elevate rispetto a tutta l'area di studio. Ciò può portare a presupporre uno spostamento delle popolazioni in aree più elevate, forse in cerca di riparo dagli ambienti umidi della pianura costiera lagunare.

Le poche evidenze archeologiche molto sparse sul territorio e in alcuni casi poco esplicite e inframmezzate insieme ad evidenze di altre epoche storiche vicine, non permettono di avanzare ipotesi sicure circa il paleo-ambiente di quest'epoca, similamente per quanto accade nella discussione del periodo preistorico. Pertanto, la ricostruzione della paleo-riva proposta da Marocco del 1991 insieme alle prime mappe cartografiche di epoca rinascimentale, in particolare alla mappa "Nova descrizione di tutta la Patria del Friuli, Pirro Ligorio, 1563" possono essere prese come plausibili e digitalizzate come in figura 53.

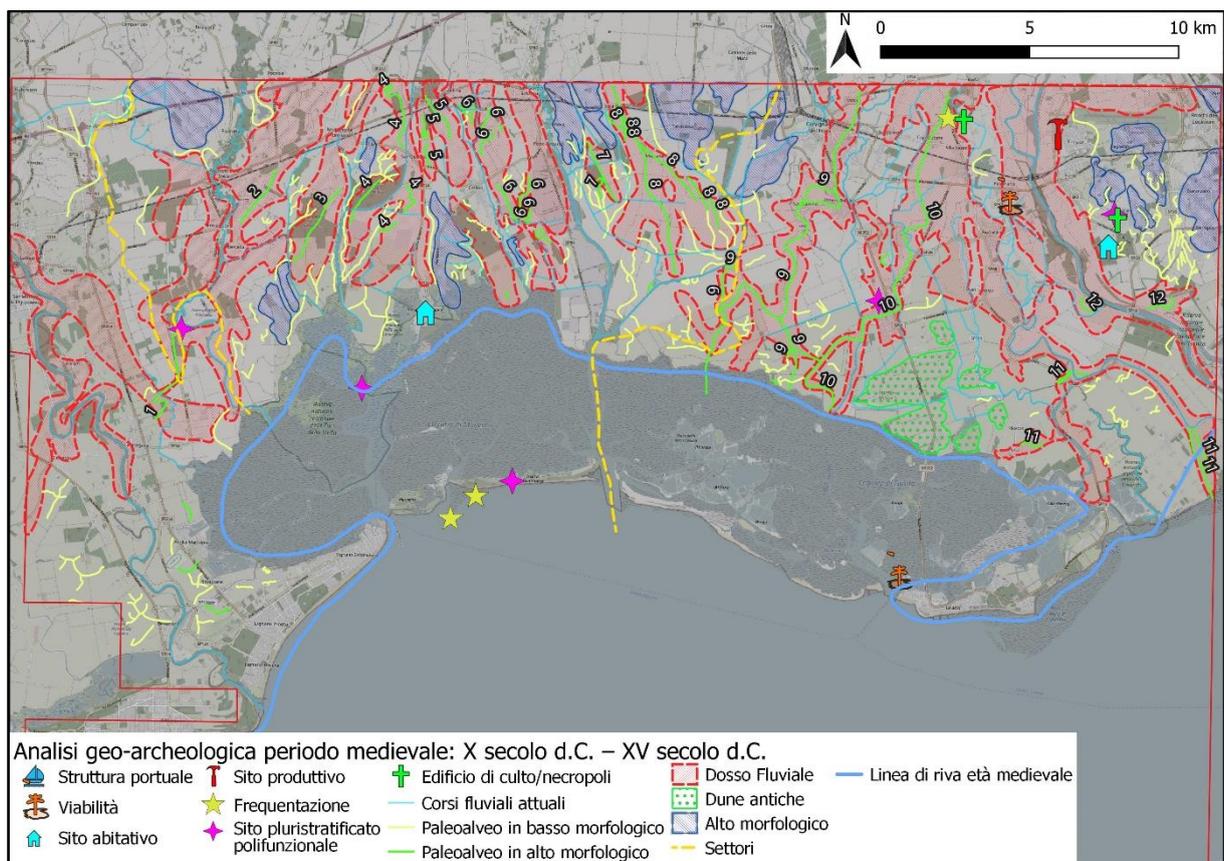


Figura 53: analisi geoarcheologica per il periodo medievale con ricostruzione paleo riva ipotetica. Fonte: elaborazione QGIS modificata dopo Marocco (1991), "Nova descrizione di tutta la Patria del Friuli, Pirro Ligorio, 1563"; mappa di base e dati di OpenStreetMap e OpenStreetMap Foundation (CC-BY-SA).

6. Conclusioni

Questo elaborato presenta i risultati di un approccio multidisciplinare per lo studio geoarcheologico dell'area della pianura costiera e dell'ambiente lagunare di Marano e Grado. Tali risultati hanno permesso di ricostruire e dettagliare le dinamiche di interazione tra eventi naturali e modificazioni antropiche del territorio che hanno contribuito alla formazione e all'evoluzione del paesaggio di quest'area in determinati momenti storici particolarmente significativi. Tutto questo è stato possibile attraverso il confronto e la rielaborazione dei dati provenienti dall'analisi geomorfologica, principalmente condotta attraverso la rielaborazione delle informazioni edite e frammentate di molteplici studi eseguiti sul territorio; inoltre, una nuova analisi condotta su dati inediti elaborati da remote sensing, la raccolta, la riorganizzazione e l'analisi degli archivi archeologici disponibili per l'area, hanno contribuito alla realizzazione di questo lavoro di ricerca.

In particolare, l'approccio metodologico adoperato per l'analisi geomorfologica del territorio, si è basato principalmente sulla realizzazione di un modello digitale del terreno (Digital Terrain Model, DTM) che comprende i valori delle quote altimetriche dei tre ambienti in cui è suddivisa l'area di studio, completamente diversi tra loro dal punto di vista morfologico e ambientale, ma uniti dal contesto paesaggistico in cui sono inseriti. Il raggiungimento di tale risultato è da considerarsi di ampio valore in quanto un dataset di questa tipologia non era mai stato realizzato prima per quest'area. Esso permette infatti di analizzare contemporaneamente in un unico modello la geomorfologia e le caratteristiche del territorio lagunare, costiero e della bassa pianura del Friuli-Venezia Giulia, consentendo di realizzare modellazioni su larga scala che facilitano la comprensione delle dinamiche di evoluzione del territorio, che aiutano a superare i limiti dettati dalle caratteristiche del paesaggio odierno.

L'elevata risoluzione dei dati, opportunamente valorizzata attraverso algoritmi morfometrici che enfatizzano le proprietà dei modelli digitali del terreno, come ad esempio il TPI (Topographic Position index), hanno permesso l'identificazione accurata delle morfologie strutturali della pianura costiera, come alcuni paleoalvei e dune antiche. Su questi si è potuta condurre un'analisi delle loro caratteristiche e una digitalizzazione molto più precisa delle loro forme rispetto agli studi già presenti in letteratura. Ciò ha permesso quindi l'ampliamento delle conoscenze riguardo queste morfostrutture, utili

non solo per gli scopi di questa ricerca, ma anche per altri ambiti come l'analisi del rischio idrologico o in ambito ecologico. Inoltre, grazie al DTM è stato possibile eseguire delle modellazioni idrologiche che hanno permesso di verificare l'impatto delle variazioni del livello del mare nei vari periodi storici sulle dinamiche di evoluzione dell'ambiente lagunare e le sue relazioni intrinseche con la fascia costiera e la pianura distale. Tale visione di insieme, prima dello svolgimento di questo lavoro, risultava di difficile realizzazione vista la frammentarietà dei dati topografici disponibili per i tre differenti ambienti dell'area di studio. Successivamente grazie ai nuovi sviluppi derivati dall'analisi geomorfologica su dati da remoto, sono state ri-analizzate anche le informazioni derivanti dagli studi geologici e sedimentologici pregressi, che hanno permesso di definire in modo abbastanza esaustivo la genesi e i cambiamenti che hanno caratterizzato la pianura costiera che si affaccia sulla laguna di Marano e Grado.

Congiuntamente è stato eseguito uno studio delle evidenze archeologiche, che ha previsto una prima fase di raccolta, organizzazione e normalizzazione di numerosi archivi archeologici presenti sia online che in letteratura. Questo ha permesso di ottenere una visione d'insieme di tutto il territorio attorno alla laguna di Marano e Grado, analizzando lo sviluppo insediativo delle popolazioni nelle diverse epoche analizzate, e confrontandolo per la prima volta con l'evoluzione del territorio dal punto di vista geomorfologico e ambientale.

L'approccio adottato in questa tesi ha permesso di unire i risultati derivanti dalle analisi geomorfologiche e archeologiche, cercando di realizzare per la prima volta un'analisi geoarcheologica del territorio in esame.

È stato quindi così possibile effettuare delle ricostruzioni per le cinque epoche storiche analizzate, dall'età del Neolitico fino a quella Medievale, che cercano di migliorare e ampliare lo stato dell'arte su quelle che sono state le dinamiche del popolamento e le interazioni uomo-ambiente.

Una delle evidenze principali che si può evincere da questo lavoro è che vi sia una sorta di legame, riscontrabile in alcune epoche storiche, tra la scelta del luogo di insediamento e le strutture morfologiche del territorio, come gli alvei antichi ormai sepolti o quello con l'ambiente lagunare, ricco di risorse.

In età neolitica, nel paragrafo 5.1.1, le popolazioni preferivano insediarsi in alti morfologici come i dossi fluviali o le dune antiche di Belvedere, lasciando desumere la necessità di ricercare luoghi che garantissero riparo e che fossero a basso rischio idrologico. Successivamente i dati sembrano indicare l'inizio di un periodo di maggiore stabilità idrogeologica che raggiunse il suo culmine in età romana. Infatti, nell'età del Bronzo, i dati archeologici rivelano la frequentazione anche di aree di depressione topografica, indicando quindi un interesse verso aree che non fossero esclusivamente alti morfostrutturali. Inoltre, secondo le evidenze sedimentologiche, è probabilmente durante questo periodo che iniziò a delinarsi l'area lagunare di Marano; diversa è la situazione riscontrata nella laguna di Grado, la quale fu caratterizzata da un periodo di riempimento dovuto all'intensa sedimentazione fluviale. Le recenti avulsioni post-romane dei fiumi Tagliamento a ovest (settore 1) e del gruppo Natisone-Torre-Isonzo a est (settore 3), come visibile dalla minore quantità di paleoalvei e dalle unità geologiche presenti, potrebbero quasi sicuramente aver compromesso le evidenze archeologiche preistoriche e protostoriche, seppellendole a profondità più elevate e spiegando presumibilmente il perché della loro assenza.

In età romana (vedere paragrafo 5.1.3), grazie all'elevata densità di record archeologici, è possibile interpretare in modo migliore le dinamiche uomo-ambiente anche grazie alla modellazione idrologica eseguita. Si afferma l'importanza della città di Aquileia e si nota in generale un'estesa occupazione territoriale. Numerose sono le frequentazioni e insediamenti abitativi nell'area lagunare di Grado che quindi probabilmente risultava emersa, almeno parzialmente, in questo periodo storico. Questa evidenza è confermata anche dalle modellazioni idrologiche realizzate seguendo quello che doveva essere il livello marino di questi secoli. Secondo tale modellazione, è inoltre possibile proporre una nuova ipotesi ricostruttiva riguardo l'ambiente lagunare di Marano. La laguna in quest'area potrebbe originariamente essersi formata come due distinte aree, separate tra di loro da un'ampia fascia che presentava quote più elevate, verosimilmente caratterizzate da un ambiente salmastro. Ciò si pone in contrasto con le affermazioni presenti in letteratura riguardo la storia evolutiva di questo ambiente, che pongono la formazione della laguna di Marano a circa 5.500 anni fa e contraddistinta da un'unica grande area che si espanse con il passare dei secoli fino ad arrivare alla conformazione attuale (Marocco 1991). Si notano anche in questo caso l'assenza di rinvenimenti

archeologici in alcune aree dei settori 1 e 3 sempre per il motivo discusso precedentemente, relativo alle avulsioni degli alvei fluviali.

In età tardoantica e altomedievale la città di Aquileia rimane un importante nucleo insediativo. In questi secoli inizia la formazione della laguna di Grado e si nota un ritorno a preferire le posizioni rialzate date dagli alti morfostrutturali presenti sul territorio. Ciò indica quindi un probabile periodo di instabilità ambientale e di grandi cambiamenti dell'assetto della rete fluviale dati dalle diversioni fluviali che hanno caratterizzato l'area. Infine, il periodo medievale è caratterizzato da un numero esiguo di evidenze archeologiche e dall'assenza di associazioni evidenti con gli alti morfologici del territorio; si può tuttavia, grazie alle prime evidenze cartografiche del XVI secolo, osservare come il territorio inizi ad avere una conformazione confrontabile a quella odierna.

Grazie alla combinazione delle evidenze archeologiche, sedimentologiche e alla valutazione dei dati da remote sensing è stato possibile, seppur con molte limitazioni e riserve, cercare di valutare quelle che sono state le dinamiche di interazione uomo-paesaggio al susseguirsi dei secoli. È doveroso comunque evidenziare i punti critici di questo elaborato e proporre di conseguenza alcuni suggerimenti e approfondimenti da eseguire per poter raggiungere pienamente l'obiettivo prefissato in questa tesi, utili anche per impostare future prospettive di ricerca in questo ambito.

La diversa origine dei dataset utilizzate nella analisi di remote sensing e la differente metodologia di raccolta dati degli stessi, crea un certo livello di eterogeneità visibile anche nelle mappe finali. I dati relativi alla batimetria della laguna e ai dati LiDAR topografici risultano comunque tutti comparabili, ma caratterizzati da risoluzioni diverse. I campionamenti della laguna e quelli da LiDAR topografico sono caratterizzati da una risoluzione di 10 metri mentre quelli marini sono ad una risoluzione più bassa di 50 metri. Un ottimale metodo di raccolta dati per questo tipo di analisi topografiche sarebbe quello di utilizzare delle piattaforme aeree munite di scanner e sensori LiDAR in grado di poter analizzare contemporaneamente la topografia terrestre della pianura costiera e batimetrica della Laguna, in un'unica soluzione, come trattato nel paragrafo 3.1.2 In questo modo si potranno limitare gli artefatti e ottenere una rappresentazione più pulita, omogenea e veritiera del territorio, riuscendo ad analizzare anche le aree umide di transizione, dove i campionamenti odierni non sono stati in grado di operare.

Per quanto concerne invece le evidenze derivanti dai campionamenti di sedimento, l'area coperta dai sondaggi delle differenti campagne di studio risulta accettabile comprendendo in modo abbastanza esaustivo l'intera area d'esame. Risulta però necessario eseguire nuovi carotaggi e analisi sedimentologiche, seguite da datazioni, precise e mirate, che identifichino tutte le facies sedimentologiche presenti, sfruttando anche le più recenti tecniche di datazione cronologica.

Sarebbe quindi necessario prevedere una nuova campagna di campionamento composta da una prima analisi e interpretazione geomorfologica da remote sensing (utile a identificare tutte le aree di interesse) e, in un secondo momento, da carotaggi mirati. In questo modo si riuscirebbero a datare in modo preciso le disattivazioni e le fasi di aggradazione dei paleoalvei o quella di altre strutture morfologiche. Oltre a questi carotaggi, sarebbe necessario eseguirne degli altri, in modo che vengano analizzati in un unico studio tutti gli ambienti presenti (pianura alluvionale, laguna, costa). Tutto ciò permetterebbe di ottenere una visione molto più accurata ed esaustiva, specialmente della storia cronologica evolutiva della geomorfologia dell'area di studio.

Bibliografia

- Abdul, N. A., R. A. Mortlock, J. D. Wright, e R. G. Fairbanks. 2016. «Younger Dryas sea level and meltwater pulse 1B recorded in Barbados reef crest coral *Acropora palmata*». *Paleoceanography* 31(2):330–44. doi: 10.1002/2015PA002847.
- Arnaud-Fassetta, Gilles, Marie-Brigitte Carré, Ruggero Marocco, Franca Maselli Scotti, Nevio Pugliese, Claudio Zaccaria, Alessio Bandelli, Véronique Bresson, Giorgio Manzoni, Maria Eugenia Montenegro, Christophe Morhange, Michele Pipan, Alessandro Prizzon, e Isabelle Siché. 2003. «The site of Aquileia (northeastern Italy): example of fluvial geoarchaeology in a Mediterranean deltaic plain / Le site d'Aquilée (Italie nord-orientale) : exemple de géoarchéologie fluviale dans une plaine deltaïque méditerranéenne». *Géomorphologie relief processus environnement* 9(4):227–45. doi: 10.3406/morfo.2003.1187.
- Awadallah, Mahmoud Omer Mahmoud, Ana Juárez, e Knut Alfredsen. 2022. «Comparison between Topographic and Bathymetric LiDAR Terrain Models in Flood Inundation Estimations». *Remote Sensing* 14(1). doi: 10.3390/rs14010227.
- Benjamin, J., A. Rovere, A. Fontana, S. Furlani, M. Vacchi, R. H. Inglis, E. Galili, F. Antonioli, D. Sivan, S. Miko, N. Mourtzas, I. Felja, M. Meredith-Williams, B. Goodman-Tchernov, E. Kolaiti, M. Anzidei, e R. Gehrels. 2017. «Late Quaternary sea-level changes and early human societies in the central and eastern Mediterranean Basin: An interdisciplinary review». *Quaternary International* 449:29–57.
- Bresolin, Mario. 2012. «EVOLUZIONE DELLA BASSA PIANURA FRIULANA NEL PLEISTOCENE SUPERIORE - LATE PLEISTOCENE EVOLUTION OF THE LOW FRIULAN PLAIN (NE ITALY)». Laurea magistrale, UNIVERSITA DEGLI STUDI DI PADOVA, Padova.
- Căţeanu, Mihnea, e Arcadie Ciubotaru. 2021. «The effect of lidar sampling density on dtm accuracy for areas with heavy forest cover». *Forests* 12(3):1–20. doi: 10.3390/f12030265.
- Cattani, Maurizio. 2001. «LA MEDIA ETÀ DEL BRONZO NELL'AREA TRA PANARO E RENO (PROVINCE DI MODENA E BOLOGNA). PROGETTO PER UNA RICOSTRUZIONE DEL PAESAGGIO». *IpoTESI di Preistoria* 1:211–50.
- Chen, Ziyue, Bingbo Gao, e Bernard Devereux. 2017. «State-of-the-art: DTM generation using airborne LIDAR data». *Sensors (Switzerland)* 17(1).
- Fontana, A., G. Vinci, G. Tasca, P. Mozzi, M. Vacchi, G. Bivi, S. Salvador, S. Rossato, F. Antonioli, A. Asioli, M. Bresolin, F. Di Mario, e I. Hajdas. 2017. «Lagoonal settlements and relative sea level during Bronze Age in Northern Adriatic: Geoarchaeological evidence and paleogeographic constraints». *Quaternary International* 439:17–36.

doi: 10.1016/j.quaint.2016.12.038.

Fontana, Alessandro, Fabrizio Antonioli, e Aldino Bondesan. 2016. *Post-LGM sedimentation and Holocene shoreline evolution in the NW Adriatic coastal area*
Subsidence zonation through satellite interferometry in coastal plain environments of NE Italy: a possible tool for geomorphological and geological mapping in coastal plain environments. View project.

Fontana, Alessandro, Giovanni Monegato, Sandro Rossato, Maria Eliana Poli, Stefano Furlani, e Cristina Stefani. 2019. «Carta delle unità geologiche della pianura del Friuli Venezia Giulia alla scala 1:150.000 e note illustrative». *Regione autonoma Friuli Venezia Giulia - Servizio Geologico.*

Fontana, Alessandro, e Livio Ronchi. 2021. «Paesaggi sommersi in Alto Adriatico Dalla pianura glaciale al futuro innalzamento marino».

Fontana, Alessandro, Giacomo Vinci, Giovanni Tasca, Paolo Mozzi, Matteo Vacchi, Giorgio Bivi, Sergio Salvador, Sandro Rossato, Fabrizio Antonioli, Alessandra Asioli, Mario Bresolin, Francesco Di Mario, e Irka Hajdas. 2018. *TERRA-MARE: INSEDIAMENTI LAGUNARI E LIVELLO MARINO RELATIVO DURANTE L'ETÀ DEL BRONZO IN ADRIATICO NORD-OCCIDENTALE.* Grafiche Turato Edizioni.

Gaddi, Dario. 2001. «Approdi nella Laguna di Grado». *Antichità Altoadriatiche XLVI* 261–75.

Gioia, Dario, Massimo Bavusi, Paola Di Leo, Tonia Giammatteo, e Marcello Schiattarella. 2020. «Geoarchaeology and geomorphology of the Metaponto area, Ionian coastal belt, Italy». *Journal of Maps* 16(2):117–25. doi: 10.1080/17445647.2019.1701575.

Groh, Stefan. 2011. «RICERCHE SULL'URBANISTICA E LE FORTIFICAZIONI TARDOANTICHE E BIZANTINE DI AQUILEIA. RELAZIONE SULLE PROSPEZIONI GEOFISICHE CONDOTTE NEL 2011». *AQUILEIA NOSTRA* 153–204.

Kaniewski, D., N. Marriner, C. Morhange, M. Vacchi, G. Sarti, V. Rossi, M. Bini, M. Pasquinucci, C. Allinne, T. Otto, F. Luce, e E. Van Campo. 2018. «Holocene evolution of Portus Pisanus, the lost harbour of Pisa». *Scientific Reports* 8(1). doi: 10.1038/s41598-018-29890-w.

Kaniewski, David, Nick Marriner, Giovanni Sarti, Duccio Bertoni, Marco Marchesini, Veronica Rossi, Anna Lena, Alexandra Bivolaru, Majid Pourkerman, Matteo Vacchi, Rachid Cheddadi, Thierry Otto, Frédéric Luce, Daniela Cottica, e Christophe Morhange. 2022. «Northern Adriatic environmental changes since 500 AD reconstructed at Aquileia (Italy)». *Quaternary Science Reviews* 287. doi: 10.1016/j.quascirev.2022.107565.

- Lambeck, K., F. Antonioli, M. Anzidei, L. Ferranti, G. Leoni, G. Scicchitano, e S. Silenzi. 2011. «Sea level change along the Italian coast during the Holocene and projections for the future». *Quaternary International* 232(1–2):250–57. doi: 10.1016/j.quaint.2010.04.026.
- Lambeck, Kurt, Fabrizio Antonioli, Anthony Purcell, e Sergio Silenzi. 2004. «Sea-level change along the Italian coast for the past 10,000 yr». *Quaternary Science Reviews* 23(14–15):1567–98. doi: 10.1016/j.quascirev.2004.02.009.
- Lambeck, Kurt, Hélène Rouby, Anthony Purcell, Yiyang Sun, e Malcolm Sambridge. 2014. «Sea level and global ice volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111(43):15296–303. doi: 10.1073/pnas.1411762111.
- Lenardon, Giovanni, e Ruggero Marocco. 1994. «Le dune di Belvedere – San Marco. Una antica linea di riva 2) considerazioni sedimentologiche». *Gortania - Atti museo Friul. Storia Nat.* 16:5–24.
- Marocco, Ruggero. 1988. «Considerazioni sedimentologiche sui sondaggi S19 e S20 (delta del F. Tagliamento)». *GORTANIA* 10:101–20.
- Marocco, Ruggero. 1989. «Evoluzione Quaternaria della Laguna di Marano (Friuli-Venezia Giulia)». *Il Quaternario* 2(2):125–37.
- Marocco, Ruggero. 1991. «Evoluzione tardopleistocenica-olocenica del delta del F. Tagliamento e delle lagune di Marano e Grado (Golfo di Trieste)». *Il Quaternario* 4:223–32.
- Marocco, Ruggero. 1992. «Le dune di belvedere-San Marco. Una antica linea di riva 1) Considerazioni geomorfologiche». *Gortania* 13:57–76.
- Marocco, Ruggero. 2009. «Prima Ricostruzione paleo-idrografica del territorio della bassa pianura friulano-isontina e della laguna di Grado». *GORTANIA* 69–86.
- Marocco, Ruggero, Emiliano Gordini, e Ennio Vio. 2002. «Stratigrafia del sottosuolo della “Trezza Grande” (Golfo di Trieste, Adriatico settentrionale)». *Gortania* 24:31–63.
- Marocco, Ruggero, Franca Maselli Scotti, Romana Melis, e Ennio Vio. 2005. «IL SOTTOSUOLO DEL CASTRUM DI GRADO (ADRIATICO SETTENTRIONALE): STUDI PRELIMINARI PER UNA RICOSTRUZIONE PALEOGEOGRAFICA». *il Quaternario* 18(2):135–46.
- Marocco, Ruggero, Maria Luisa Zucchi Stolfa, Giovanni Lenardon, e Dario Stolfa. 1988. «Considerazioni sedimentologiche, paleoecologiche e geochimiche sul sondaggio S15 (Canale di Morgo – Laguna di Grado)». *Gortania* 10:81–100.

- Meehl, Gerald A., Warren M. Washington, William D. Collins, Julie M. Arblaster, Aixue Hu, Lawrence E. Buja, Warren G. Strand, e Haiyan Teng. 2005. *How Much More Global Warming and Sea Level Rise?* Vol. 307.
- Mozzi, Paolo, Alessandro Fontana, Silvia Piovan, e Tiziano Abbà. 2011. *Indagini geomorfologiche lungo il tracciato della Via Annia*.
- Muzzioli, Maria Pia. 2005. «DIVISIONI DEL TERRENO MODERNE E ANTICHE. DOCUMENTAZIONE PER LO STUDIO DELLA CENTURIAZIONE DI AQUILEIA». *Aquileia Nostra* 76, 281–316.
- Pieruccini, Pierluigi, Davide Susini, Giulio Poggi, Giovanna Bianchi, e Richard Hodges. 2023. «Geoarchaeology of the Cornia river coastal plain (Piombino, southern Tuscany, Italy)». *Journal of Maps*. doi: 10.1080/17445647.2023.2173677.
- Poggi, Giulio. 2021. «Evoluzione del paesaggio storico e dinamiche uomo-ambiente: sistemi di fonti, Remote Sensing e multi-proxies ambientali (Pianura costiera del Fiume Cornia, Toscana Meridionale, Italia)». Dottorato in Scienze e tecnologie ambientali, geologiche e polari, Università di Siena, Siena.
- Riccato, Anna. 2021. «Vasellame da cucina ad Aquileia e in area altoadriatica tra V e VI secolo d.C.: continuità e trasformazioni». Pagg. 269–391 in *Storia e archeologia* 1.
- Salinas-Melgoza, Miguel A., Margaret Skutsch, e Jon C. Lovett. 2018. «Predicting aboveground forest biomass with topographic variables in human-impacted tropical dry forest landscapes». *Ecosphere* 9(1). doi: 10.1002/ecs2.2063.
- Salomon, Ferréol, Jean Philippe Goiran, Brice Noirot, Elisa Pleuger, Evelyne Bukowiecki, Ilaria Mazzini, Pierre Carbonel, Ahmed Gadhoun, Pascal Arnaud, Simon Keay, Sabrina Zampini, Stephen Kay, Michele Raddi, Alessandra Ghelli, Angelo Pellegrino, Cinzia Morelli, e Paola Germoni. 2018. «Geoarchaeology of the Roman port-city of Ostia: Fluvio-coastal mobility, urban development and resilience». *Earth-Science Reviews* 177:265–83.
- Scotti Maselli, Franca. 2014. «Riflessioni sul paesaggio aquileiese all'arrivo dei Romani».
- Szafarczyk, Anna, e Cezary Toś. 2023. «The Use of Green Laser in LiDAR Bathymetry: State of the Art and Recent Advancements». *Sensors* 23(1).
- Terrenato, Nicola. 2004. «Sample size matters! The paradox of global trends and local surveys». Pagg. 36–48 in *Side-by-Side Survey Comparative Regional Studies in the Mediterranean World*, a cura di S. E. Alcock e J. F. Cherry.
- Traviglia, Arianna. 2016. «Archaeology of a Lagoon: the anthropogenic landscapes of Aquileia (Italy) between land and sea». Pagg. 422–23 in *Fifth International Congress on Underwater Archaeology*, a cura di C. Y. D. MINISTERIO DE EDUCACIÓN.

Cartagena.

- Triches, Antonella, Simone Pillon, Annelore Bezzi, Marco Lipizer, e Emiliano Gordini. 2011. *Carta batimetrica della Laguna di Marano e Grado. Note illustrative*. Arti Grafiche Friulane / Imoco spa (Ud),.
- Trobec, Ana, Martina Buseti, Fabrizio Zgur, Luca Baradello, Alberto Babich, Andrea Cova, Emiliano Gordini, Roberto Romeo, Isabella Tomini, Sašo Poglajen, Paolo Diviaco, e Marko Vrabec. 2018. «Thickness of marine Holocene sediment in the Gulf of Trieste (northern Adriatic Sea)». *Earth System Science Data* 10(2):1077–92. doi: 10.5194/essd-10-1077-2018.
- Trobec, A. & Buseti, M. 2017: Models of the bathymetry, of the base and of the thickness of Holocene marine sediment in the Gulf of Trieste (Northern Adriatic Sea). OGS SNAP System, DOI: <https://doi.org/10.6092/6ad9b1e6-c977-cec9-8a2d-db10c7f90adc>
- Verhagen, Philip, e Lucian Drăguț. 2012. «Object-based landform delineation and classification from DEMs for archaeological predictive mapping». *Journal of Archaeological Science* 39(3):698–703. doi: 10.1016/j.jas.2011.11.001.
- Vinci, Giacomo, Federico Bernardini, e Stefano Furlani. 2019. «Geo-archaeology of the Grozzana area (N–E Italy)». *Journal of Maps* 15(2):697–707. doi: 10.1080/17445647.2019.1659866.
- Visentini, Paola, Sara Roma, Luca Simonetto, Patricia Fanning, e Arianna Traviglia. 2018. «Notes from the Underground: traces of prehistoric occupation in the Aquileian hinterland». Pagg. 597–602 in *Preistoria e Protostoria del Caput Adriae*. Vol. 5, a cura di E. Borgna, P. Càssola Guida, e S. Corazza. Firenze: Istituto Italiano di Preistoria e Protostoria.
- Zanferrari, A., R. Avigliano, A. Fontana, e G. Paiero. 2008. *NOTE ILLUSTRATIVE della CARTA GEOLOGICA D'ITALIA alla scala 1:50.000 foglio 086 SAN VITO AL TAGLIAMENTO*.
- Zhang, Weihua, e David R. Montgomery. 1994. *Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations*. Vol. 30.
- Misure di conservazione sito specifiche PINETA DI LIGNANO In vigore dal 13/02/2020, Estratto della DGR 134 del 30/01/2019

Ringraziamenti

Ringrazio la mia famiglia, compresi i miei quattro zampe, che hanno sempre creduto in me, spronato e supportato in questo percorso universitario.

Un ringraziamento alle persone che ho incontrato in questi ultimi mesi di università che sono state di enorme aiuto e supporto in questo lavoro di tesi.

Un sincero e profondo ringraziamento a Giulio Poggi ricercatore presso Centre for Cultural Heritage Technology (CCHT@Ca' Foscari) dell'Istituto Italiano di Tecnologia (IIT) che mi ha seguito, fornendomi preziosi consigli e aiuto, durante tutto il periodo di tirocinio e nella stesura di questo lavoro di tesi.

Un vivo ringraziamento alla dott.ssa Arianna Traviglia mia correlatrice in questo lavoro di tesi e coordinatrice del Centre for Cultural Heritage Technology (CCHT@Ca' Foscari) dell'Istituto Italiano di Tecnologia (IIT) e al suo gruppo di lavoro, che mi hanno permesso di svolgere una ricca e formante esperienza di tirocinio.

Un ringraziamento al mio relatore prof. Claudio Silvestri e al mio correlatore prof. Alessio Rovere, di enorme aiuto e ispirazione per questo elaborato di tesi ed esperienza di tirocinio.

Un ringraziamento al dott. Marco Lipizer, funzionario presso Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, per avermi gentilmente condiviso i dati originali utilizzati nella stesura e realizzazione della carta batimetrica della laguna di Marano e Grado, di fondamentale importanza per la realizzazione di questo lavoro di tesi.

Un ringraziamento sincero al migliore gruppo di colleghi ma soprattutto amici universitari che abbia mai potuto incontrare, con cui ho condiviso questi due anni di corso magistrale.

Infine, ma non per importanza, ringrazio i miei migliori amici, soprattutto quelli d'infanzia che mi sono sempre stati accanto e aiutato nei momenti di bisogno.