

## GRADO (Go)

### Scoperta di palizzate romane e altomedievali che vincolano il livello del mare relativo e il paleoambiente nel Mare Adriatico settentrionale

(da Nature [www.nature.com](http://www.nature.com) – ottobre 2025)

Gli insediamenti romani nell'Adriatico settentrionale forniscono prove delle fluttuazioni temporali del livello relativo del mare (LSR).

Il ritrovamento di tre palizzate interrato durante uno scavo archeologico a Grado, uno dei più importanti porti romani, ha permesso di ricostruire la posizione del livello del mare sulla costa adriatica nord-orientale. Due di queste barriere in legno offrivano agli isolani un migliore accesso al mare ed una protezione più efficace contro l'erosione costiera. La palizzata più antica (metà/fine I-inizi II secolo d.C.) era destinata a sostenere la parte del deposito artificiale più vicina alla riva e consentiva l'accesso degli abitanti. Sulla base della sua posizione e di un campione di legno datato, che si correla con la cronologia della ceramica, il LRS nella prima età imperiale romana era di  $-1,20 \pm 0,30$  m.

La palizzata più recente (VI secolo d.C.) mostra un significativo innalzamento del livello del mare di +0,40 m LRS; fu probabilmente costruita per compattare parte del terreno inondato e fornire rinforzo in risposta all'innalzamento del livello del mare. La palizzata più alta, ma altrettanto antica, risalente al VI secolo d.C., fu probabilmente costruita per consolidare la base del Castrum di Grado.

Sulla base di questi risultati, aggiungiamo nuovi dati per ricostruire la storia della RSL della costa adriatica nord-orientale e delinearne la configurazione ambientale, in cui si sviluppò di lì a poco un paesaggio lagunare.

La storia dell'isola di Grado è strettamente legata a due città di fama mondiale: Aquileia, una delle più importanti città commerciali dell'Impero Romano, e Venezia.

Un vecchio detto recita: "Grado è figlia di Aquileia e madre di Venezia", infatti. Probabilmente il riferimento più antico in cui viene citata l'isola di Grado è la "Historia Langobardorum" di Paolo Diacono, risalente al 789 d.C.

L'attuale fisiografia dell'isola di Grado e della sua laguna deriva da una complessa evoluzione avvenuta a partire dall'Ultima Glaciazione e dal conseguente innalzamento del livello del mare.

Le prime tracce della presenza umana nell'area di Grado risalgono almeno al II secolo a.C., come rivelato da uno studio stratigrafico, dove 12 m di sedimenti sono stati carotati nel sagrato della basilica paleocristiana di Sant'Eufemia, rivelando la presenza di frammenti di manufatti ceramici tra -1,6 e circa -6 m sotto il livello medio del mare.

I nostri resti risalgono tra il I secolo a.C. e il I secolo d.C. e suggeriscono l'esistenza di un porto o di altre attività antropiche costiere probabilmente legate alla neonata colonia romana di Aquileia. Tuttavia, i reperti archeologici rivelano che anche prima della fondazione di Aquileia (181 a.C.), l'area di Grado era abitata, grazie alla sua vicinanza alla foce di un fiume navigabile (il paleoIsonzo).

La costruzione di edifici residenziali e la presenza di una piccola necropoli segnalano un forte sviluppo dell'insediamento nella tarda età imperiale.

Tuttavia, la principale fase di sviluppo di Grado si verificò quando si sviluppò un nuovo e diverso contesto geopolitico, a seguito dell'assedio di Aquileia da parte di Attila (452 d.C.), della guerra greco-gotica (535-553 d.C.) e della successiva invasione dei Longobardi (568 d.C.).

Durante il V e il VI secolo d.C., a causa delle ricorrenti incursioni barbariche, Grado divenne una fortezza e fu costruito il *Castrum*, le cui fondamenta sono ancora in loco. Infatti, durante la tarda antichità, Grado divenne un porto chiave per tutta l'area nord-orientale italiana, al posto del porto di Aquileia che stava attraversando una fase di declino, dovuta principalmente a cambiamenti idrogeologici, che portarono al completo insabbiamento di quel porto.

Gli studi geoarcheologici condotti nel *Castrum* ed i reperti archeologici rinvenuti nell'area hanno portato alle prime stime del livello relativo del mare (RSL), ovvero la variazione del livello del mare sperimentata in un luogo specifico, in periodi diversi: le misurazioni dell'altitudine delle abitazioni romane e dei primi monumenti cristiani mostrano che il livello del mare era più basso di oggi fin dalla costruzione della maggior parte delle ville antiche.

Le mura del *Castrum* sono state erette su palafitte all'interno di un sottosuolo sabbioso prevalentemente saturo d'acqua, portando a ipotizzare che il livello del mare al VI secolo d.C., cioè quando il *Castrum* fu costruito, fosse da circa 1,32 a circa 1,40 m più basso di oggi, tenendo conto anche dell'escursione di marea. Le fluttuazioni di marea sulla costa adriatica settentrionale sono microtidali (1 m), con la massima ampiezza registrata durante la marea sizigiale (differenza media di mezza giornata di 0,86 m nel Golfo di Trieste e 1,0 m a Venezia, con picchi da 1,30 a 2,0 m) e l'ampiezza minima registrata durante la marea media di quadratura (differenze giornaliere di circa 0,22 e 0,20 m a Trieste e Venezia, rispettivamente).

Possibili fattori che determinano la variazione del livello del mare nell'area di studio sono la compattazione del suolo (determinata in loco in 0,35 mm/anno per il periodo 1980-2000), la subsidenza regionale (0,5 mm/anno 12 ) e l'innalzamento del livello del mare (1,23 mm/anno dal 1890 come registrato dal mareografo di Trieste). I fattori sopra menzionati hanno permesso di stimare il livello relativo del mare all'1 d.C., che si trovava a circa 1,70 m più basso di quello attuale.

La presenza dei resti archeologici romani noti come "rovine di San Gottardo" e come "S. Agata" a profondità d'acqua rispettivamente di circa 4 m e 5 m, a 500 m dalla linea di costa attuale, e datati al II-III secolo d.C., sono stati interpretati come strutture pertinenti al porto romano. Questi resti forniscono un'ulteriore prova che la laguna di Grado durante il periodo romano era rappresentata in gran parte da terre emerse.

In questo studio vengono presentati i risultati di un'indagine archeologica condotta nelle immediate vicinanze del *Castrum* di Grado, dove sono state individuate tre palizzate di contenimento tra i vari livelli intercettati dallo scavo. La datazione dei legni che le compongono e delle loro quote, affinata dall'analisi dei reperti, ha consentito una ricostruzione del livello relativo del mare (LSR) tra il I e il VI secolo d.C., unitamente ad un quadro dell'ambiente paleogeografico dell'area gradese in questo periodo.

L'area di intervento è situata a pochi metri dal porto interno di Grado (porto Mandracchio), realizzato all'inizio del XIX secolo, e 25 m ad est delle mura del *Castrum* (Fig. 1).



Il sito è stato interessato da un progetto di riqualificazione della rete fognaria, finanziato da Irisacqua (Gorizia), per cui è stata attivata la valutazione di impatto archeologico. In una fase preliminare, nel 2017, diversi carotaggi fino ad una profondità massima di circa -3 m sotto la superficie hanno rivelato la presenza di legno lavorato, materiale da costruzione ceramico (CBM) e resti ceramici, i più antichi risalenti al III-II secolo a.C., evidenziando così le potenzialità dell'area di studio.

Lo scavo estensivo in area aperta si è svolto dal 29 gennaio al 1 marzo 2019 (ArcheoTest Srl, sotto la direzione scientifica della Soprintendenza). Il sito è stato fortificato con barriere verticali in ferro (palancole) infissi nel terreno, ed il terreno è stato rimosso meccanicamente nelle aree prive di reperti archeologici e manualmente in corrispondenza di strutture e strati di epoca tardoantica e medievale e di età romana. Le diverse unità stratigrafiche sono state etichettate con la sigla "US" seguita da un numero (Fig. 2).



Il dato di riferimento (quota) comunemente utilizzato negli studi archeologici all'interno del Castrum è la soglia della “basilica di San Giovanni” a Grado, che corrisponde a + 1,32 m sul livello medio del mare misurato dal mareografo di Trieste.

Lo strato più profondo identificato e documentato durante il nuovo scavo è il relitto di una piana fangosa lagunare, localmente nota come “velma”, che si estende su tutta la parte occidentale dell'area ad una profondità di circa -1 m bmsl (Fig. 2). Si tratta di un terreno archeologicamente sterile che rappresenta l'elemento dominante di un contesto non ancora antropizzato. Il limite orientale di questa velma è costituito da uno spesso deposito di sabbia marina; si tratta di una sabbia grigio-giallastra, con una composizione petrografica che indica un'origine dal bacino dell'Isonzo contenente frammenti di diverse tipologie di bivalvi, ovvero *Cardiidae*, *Glycymeris* sp., *Ostrea edulis*, insieme ad aghi di *Abies alba* e schegge di legno.

La presenza di una valva di *Cerastoderma glaucum* fortemente abrasa in questo giacimento riflette necessariamente un ambiente ad alta energia. La sua presenza in relazione all'isola di Grado e alla velma indicherebbe la presenza di un mare aperto, di un canale associato o di una rottura delle barriere costiere, simili a quelle attuali.

Al di sopra della piana fangosa lagunare, gli scavi hanno identificato una serie di depositi di detriti edilizi e rifiuti domestici, costituiti da pietre, frammenti di ceramica comune e grezza, anfore, contenitori in vetro, ossa animali e altri resti alimentari. Questo materiale è molto probabilmente il risultato di un'ampia e lunga operazione di drenaggio e riempimento del terreno della fascia costiera dell'insediamento di Grado, dal limite della barena verso la spiaggia, per innalzare il livello del camminamento e rendere più compatto il terreno soffice e fangoso. Gli strati sedimentari si ispessiscono verso ovest, cioè verso la zona elevata del futuro Castrum. Si tratta del primo insediamento antropico databile tra la metà/fine del I e l'inizio del II secolo d.C. sull'isola di Grado, di cui si abbia notizia archeologicamente comprovata e documentata.

Questi interventi antropici consistono anche in una palizzata di sponda, il cui vertice è posto a -0,60 m slm, realizzata in tavole di ontano allungate a sezione rettangolare e di dimensioni irregolari, in media larghe 15-20 cm e spesse 8-10 cm; le tavole più lunghe sono lunghe circa 1 m. L'estremità inferiore di tutti gli elementi è stata affilata con un'ascia per facilitarne la penetrazione nel terreno (Fig. 3). Le tavole sono state posate con particolare cura in modo da formare una barriera continua, con ogni elemento adiacente al successivo.



La palizzata ha un andamento pressoché rettilineo con orientamento approssimativamente nord-sud, ovvero parallelo al lato lungo della duna costiera su cui sorgeva l'antico insediamento di Grado. La palizzata si estende sia a sud che a nord oltre i limiti dello scavo; la sua presenza in prossimità delle palancole non ha potuto essere documentata perché si è reso necessario creare delle zone più basse che consentissero l'isolamento di un'area centrale per lo svolgimento dell'indagine archeologica. L'estremità superiore delle tavole appare rifinita e non usurata né rotta (a parte gli elementi danneggiati dalla benna della ruspa). Questa osservazione, unita all'assenza di tracce di attacco di *Teredo navalis* (Linnaeus, 1758) e all'ottimo stato di conservazione del legname, suggerisce che le tavole siano state collocate al margine della riva in una zona ampiamente emersa dall'acqua per creare una barriera al materiale rimosso dalla terraferma. Come ampiamente noto, *Teredo navalis* è un microrganismo xilofago ampiamente diffuso nel Mar Mediterraneo. Può sopravvivere con una dieta a base di legno, a differenza di altri teredini, e può resistere a condizioni sfavorevoli come l'esposizione all'aria o all'acqua dolce per circa tre settimane. Se il legno è coperto, non verrà degradato dai tarli a causa della limitata quantità di ossigeno disciolto nell'acqua che impedisce loro di respirare. Poiché *Teredo navalis* si riproduce esclusivamente in legno permanentemente sommerso che può essere esposto all'aria per brevi periodi di tempo, questo elemento può essere considerato un indicatore del livello del mare. Su pali ancorati nel fondale marino, può occupare una fascia che si estende dal fondale marino al livello medio del mare; la sua presenza su un palo indica un'area che un tempo emergeva dal fondale marino ma che era permanentemente o quasi permanentemente al di sotto del livello medio del mare.

Inoltre, nella parte occidentale dello scavo, partendo dal fondo si incontra uno strato di sabbia limosa con conchiglie, frammenti di legno e carbone, localizzato a circa -1,5 m slm ed interpretato come il primo intervento umano di bonifica dell'area sulla superficie del fondale lagunare originario. Analisi micropaleontologiche su un campione indicano la presenza di una laguna aperta, con un buon ricambio di acqua marina. Al di sopra, si trova uno strato pseudo-orizzontale con matrice sabbiosa limosa ed uno scheletro di grandi pietre, mattoni, ceramiche e conchiglie. Al di sopra di esso, uno strato di limo argilloso con grandi frammenti di anfore disposti in piano; analisi micropaleontologiche su un campione prelevato da questa unità stratigrafica rivelano la presenza di un ambiente intertidale situato in prossimità di una palude salmastra. Lungo il bordo della sezione scavata è stato identificato uno strato con una disposizione planare e ordinata di grandi pietre ovali rotonde, mentre i componenti più piccoli erano costituiti da ceramiche e conchiglie.

Al di sopra della velma, lungo entrambi i lati della palizzata, è segnalato solo uno strato di limo sabbioso ricco di frammenti ceramici e gusci di molluschi: la matrice sedimentaria è riferibile ad un ambiente lagunare interno, forse rappresentato da sedimenti subtidali, scavati dal fondale lagunare per innalzare il sito.

A est della US 14, uno strato di limo nettamente argilloso contenente una grande quantità di frammenti di ceramica e resti di cibo derivati da rifiuti domestici e macerie edili caratterizza la US 12. Un grande tronco d'albero (forse un pino marittimo a giudicare dalla corteccia) giace parallelo alla palizzata della US 14 al confine orientale della US 12 e in stretta prossimità del deposito sabbioso della US 31, indicando che si tratta di un tronco d'albero spiaggiato, è stato rinvenuto a circa -1 m bmsl (US 15, Fig. 4 A e B). Sosteniamo che il tronco sia stato trasportato in direzione NS durante un evento ad alta energia, ovvero una mareggiata, probabilmente associata a forti venti settentrionali (scirocco o libeccio) e alte maree. Tali condizioni sono comuni nell'area di studio, soprattutto in autunno e in primavera, quando tronchi simili a quello rinvenuto durante il nostro scavo archeologico vengono gettati sulle spiagge di Grado e dintorni (Fig. 4 C).

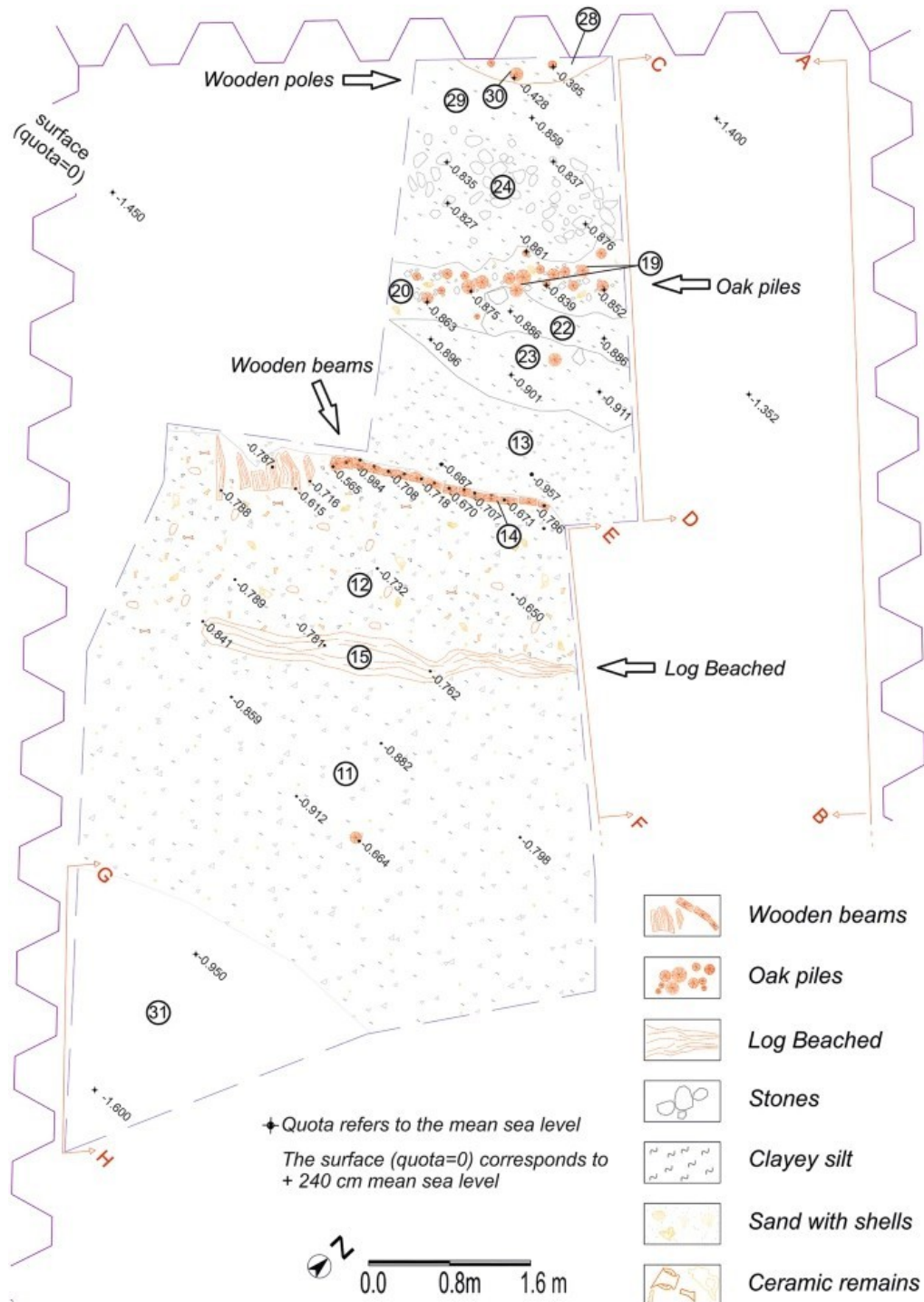
Gli scavi hanno quindi evidenziato la presenza di una sistemazione artificiale della riva con la costruzione della palizzata US 14 e la creazione di una "spiaggia a frammenti", che rappresenta una sorta di "estensione artificiale" della linea di riva del II secolo d.C. ed è costituita da frammenti ceramici, distesi e isoorientati. Sulla base di questa disposizione dei reperti archeologici, sosteniamo che si tratti di un interrimento artificiale che agisce come una spiaggia, dove l'azione dell'acqua marina ha allineato i

frammenti ceramici secondo la linea di minor resistenza. A ciò ha fatto seguito (Fase 3) la formazione di una nuova pianura lagunare (US 11), che ha ricoperto sia i depositi artificiali US 12 e 13, sia il tronco US 15 e la palizzata US 14. US 11, una piccola parte della quale è stata identificata come US 21, è presente anche nell'area occidentale. È caratterizzata dalla presenza di frammenti di canneto che ne supportano l'identificazione come palude salmastra. Nonostante i reperti archeologici siano molto scarsi, questa fase può essere datata tra il III-V/metà del VI secolo d.C.



Successivamente (Fase 4), è stato creato un massiccio rinforzo della sponda, ovvero la palizzata US 19, conficcando verticalmente nel terreno lunghi pali di quercia (Fig. 5). Il bordo superiore di questa palizzata si trova a -0,85 m bmsl. Dal punto di vista stratigrafico, l'intrusione di US 19 è certamente avvenuta dopo la deposizione di US 18, 20, 21, 22, 24, 25, 26, 27, che attraversa: i pali hanno fortemente disturbato questi strati spostando grandi pietre e CBM, mescolando i sedimenti e tirando verso il basso gli elementi più piccoli.

I tronchi di quercia hanno un diametro di almeno 20 cm e sono stati divisi in settori radiali con sezione trasversale sub-triangolare. Dei pali rimane solo la parte inferiore, affilata all'estremità da tagli d'ascia fino a una lunghezza massima di 110 cm. Le cataste mostrano chiari segni di infestazione alle estremità superiori da *Teredo navalis*.



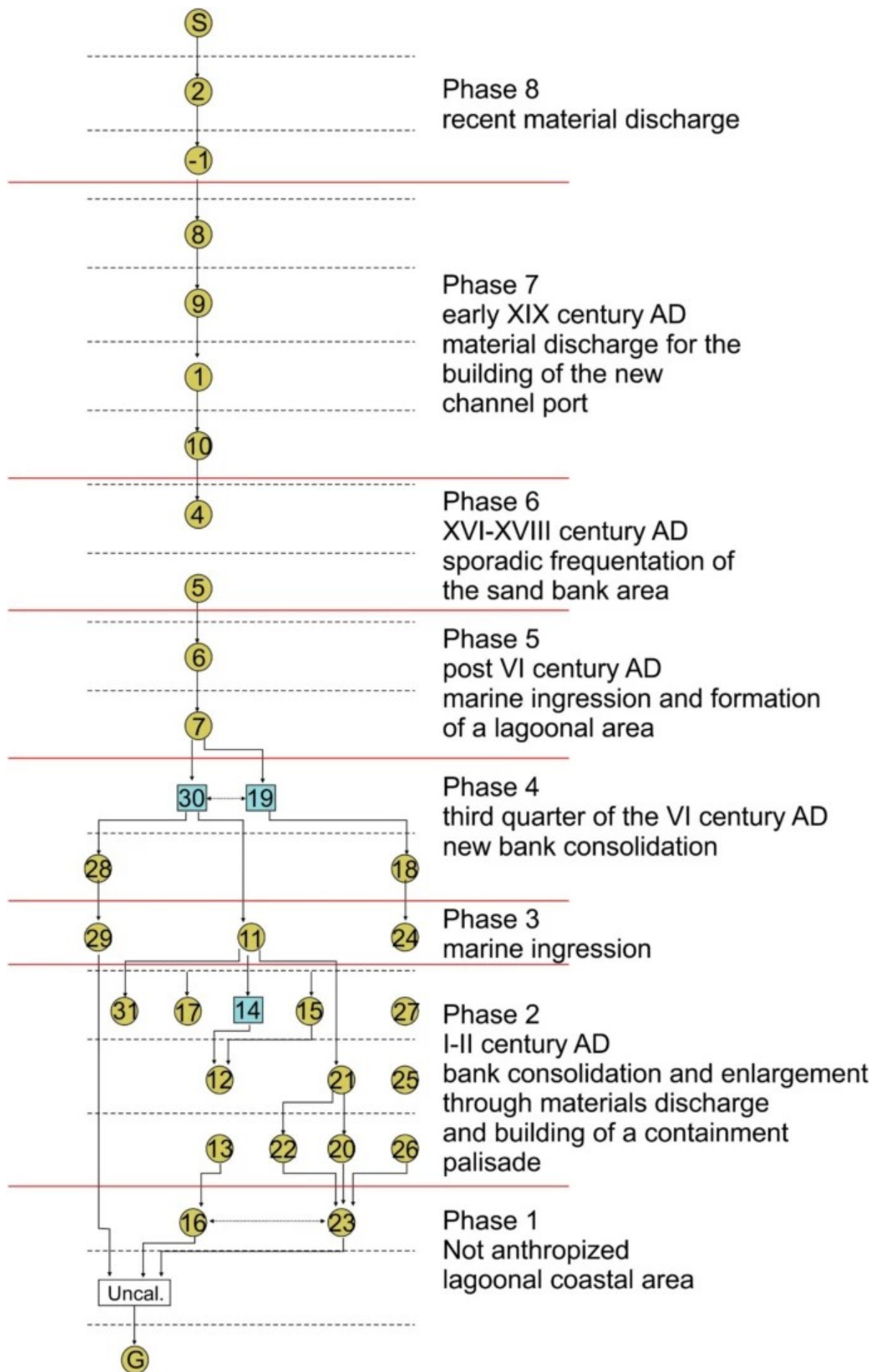
A differenza della US 14, questa non è una palizzata continua, ma un sistema di pali disposti in una fascia lunga circa 50 cm, in cui, oltre alla maggior parte dei pali adiacenti, sono presenti anche elementi più avanzati o arretrati. In ogni caso, è orientata approssimativamente da nord a sud e, come la US 14, segue l'andamento del margine orientale del Castrum di Grado.

L'ultimo intervento umano di epoca antica è testimoniato anche da una terza palizzata, US 30 (Fig. 5), di cui rimangono solo tre pali; la specie legnosa identificata è la quercia decidua (*Quercus* sp), che comprende farnia, roverella e roverella, specie anatomicamente molto simili e difficilmente distinguibili. I pali erano fissati in US 28, 29: sono stati tutti rinvenuti in prossimità del bordo occidentale del muro di palancole e sono stati scavati solo in misura molto limitata, il che ha permesso l'identificazione di un singolo frammento di ceramica. La palizzata US 30 è situata a un livello più alto e probabilmente aveva una funzione diversa da US 19, legata al consolidamento del Castrum e quindi non serviva come protezione dalle infiltrazioni marine.

Non sono sopravvissute superfici o riempimenti della fase di occupazione altomedievale (Fase 5), sebbene le palizzate US 19 e US 30 fossero certamente ancora in uso, associate a livelli di occupazione esterni al sito, probabilmente localizzati più a ovest in prossimità delle mura del Castrum di Grado. L'area in cui furono conficcate le palafitte fu gradualmente colmata dopo la metà del VI secolo d.C. da un deposito di sedimenti lagunari, US 6 e – complessivamente – US 7, che ha uno spessore di circa 1 m e ha dato origine a un'ampia palude limo-salina che apparentemente occupa l'intera area di studio. La palude non sembra essere stata frequentata costantemente nel tempo e solo nella parte superiore, immediatamente al di sotto di US 5, sono state rinvenute alcune pietre e piccoli frammenti di mattoni. L'elevato spessore del deposito lagunare e la sua posizione all'interno della sequenza stratigrafica hanno permesso di associare questa fase al Medioevo, per il quale non disponiamo né di informazioni né di dati archeologici attendibili relativi alla frequentazione del sito.

US 5 segna l'inizio di un nuovo periodo di frequentazione dell'area (Fase 6), con la comparsa di depositi in cui aumentano progressivamente sia il contenuto di humus sia la presenza di elementi di origine antropica, quali CBM e frammenti ceramici. Sembra trattarsi ancora di una presenza sporadica legata a un'area periferica, forse in relazione all'apertura di una nuova porta sul lato occidentale delle mura, in corrispondenza dell'attuale area di "Porta Nuova", che, insieme al nome, conserva ancora i resti dell'antica torre integrata negli edifici moderni. Pur in assenza di studi specifici, è possibile confermare un'origine rinascimentale per la costruzione della porta che fu raffigurata per la prima volta in una mappa risalente al 1509. US 5, insieme a US 4, mostra un'intensificazione di componenti di origine artificiale, ceramiche, soprattutto graffiti di epoca rinascimentale e post-rinascimentale, maioliche, terrecotte, vetri e calcinacci edili, in un contesto che proviene sempre dalla laguna e testimonia una frequentazione occasionale di lunga durata.

Gli strati di stratificazione più recenti, US 8, 9, 3, 10 (Fase 7) sono più consistenti e la presenza diffusa di frammenti di terracotta consente di datarli tra la fine del XVIII secolo e l'inizio del XIX secolo (Fig. 6).



## L'età delle palizzate

Tre elementi della palizzata US 14 sono stati datati mediante la misurazione degli isotopi del carbonio-14 (Tabella 1; campioni GRA19 PMI P1, GRA19 PMI P2, GRA19 PMI P3). Sebbene gli estremi delle datazioni proposte coprano un intervallo cronologico molto ampio, la posizione stratigrafica della palizzata in fase con i depositi archeologici US 12 e US 13 consente di ridurre l'intervallo di età e di datare il periodo di costruzione della palizzata più antica, che risale alla metà/fine del I e all'inizio del II secolo d.C.

Come già accennato, da un punto di vista stratigrafico, l'incassamento della palizzata US 19 avviene certamente dopo la deposizione dei drenaggi US 18, 20, 21, 22, 24, 25, 26, 27, che attraversa. Questa osservazione è confermata dai risultati della datazione con il metodo del radiocarbonio (Tabella 1; campioni GRA19 PMI P4, GRA19 PMI P5; GRA19 PMI P6). Inoltre, questa palizzata è datata con maggiore precisione rispetto a quella più antica grazie alla dendrocronologia (vedi Metodi), che indica un'età del 566 d.C. La palizzata US 19 è quindi un intervento molto più tardo rispetto alla costruzione della prima palizzata e della relativa "spiaggia di frammenti".

Per quanto riguarda la palizzata US 30, solo un campione è stato datato fino al 14 ° C (Tabella 1). Non sono state eseguite ulteriori datazioni sulla palizzata US 30, poiché i pali utilizzati per costruirla derivano da giovani fusti con sequenze anulari molto corte, quindi non sono adatti alla dendrocronologia. L'intervallo calibrato mostra che l'intervallo cronologico molto ampio è quasi identico a quello ottenuto dal campione GRA19 PMI P6 prelevato da US 19, il che ci consente di considerare le palizzate US 19 e US 30 come contemporanee.

## Discussione

I dati raccolti permettono di ricostruire un contesto paleoambientale per l'area di studio in cui il lato orientale dell'isola barriera di Grado si apriva in un'area lagunare circondata da una spiaggia. L'area fu strutturata artificialmente mediante la costruzione di una barriera lignea (palizzata) e lo scarico di macerie edili e rifiuti domestici, che formarono una "spiaggia di cocci" che garantiva agli abitanti dell'isola un migliore accesso al mare e probabilmente una protezione più efficace contro l'infiltrazione marina. A nostra conoscenza, non esistono esempi simili di spiagge artificiali, almeno nell'area mediterranea. Ulteriori indagini archeologiche e ambientali sono quindi necessarie per corroborare la nostra ipotesi. La palizzata aveva probabilmente la funzione di contenere la parte del tumulo artificiale più vicina alla riva e di consentire il calpestio della parte di riva rivolta verso il mare senza sprofondare. Una struttura lignea simile, datata all'inizio del II secolo d.C., è stata rinvenuta su una delle isole lagunari di Grado. Tuttavia, la sua forma quadrangolare e il ritrovamento di 200 anfore quasi intatte hanno portato gli archeologi a credere che si trattasse di una cantina e non di una palizzata di recinzione 20, come le palizzate che descriviamo qui.

È noto che le quote altimetriche delle strutture archeologiche in prossimità della linea di costa (moli portuali, vasche e vivai, scali di alaggio, cave costiere, scivoli fognari, ecc.) possono essere utilizzate per definire le antiche linee di costa in cui il sito è stato edificato e, in particolare, per determinare il livello del mare in passato. La lunga storia dell'occupazione umana nel Mediterraneo ha lasciato un'abbondanza di testimonianze archeologiche lungo le sue coste e queste strutture sono ampiamente riconosciute come importanti indicatori per la ricostruzione dei livelli del mare passati 21, 22 e sono state utilizzate per stimare i punti indice del livello del mare (SLIP). Questi indicatori sono descritti secondo un protocollo standard recentemente sviluppato (Hjima et al., 2015), in cui: (i) la posizione dell'indicatore, (ii) l'età calibrata dell'indicatore e (iii) l'elevazione dell'indicatore rispetto a un dato specifico (ovvero l'elevazione rispetto al livello medio del mare) sono determinate con precisione. Ogni punto indice è descritto dal suo intervallo indicativo, che corrisponde all'intervallo di quota in cui il punto indice potrebbe essersi formato. Tuttavia, la determinazione degli SLIP comporta diverse potenziali fonti di errore che possono influire sull'accuratezza delle ricostruzioni del livello del mare. Queste possono derivare da diversi fattori, come incertezze di datazione, cambiamenti post-deposizionali, errata interpretazione delle relazioni degli indicatori, fattori

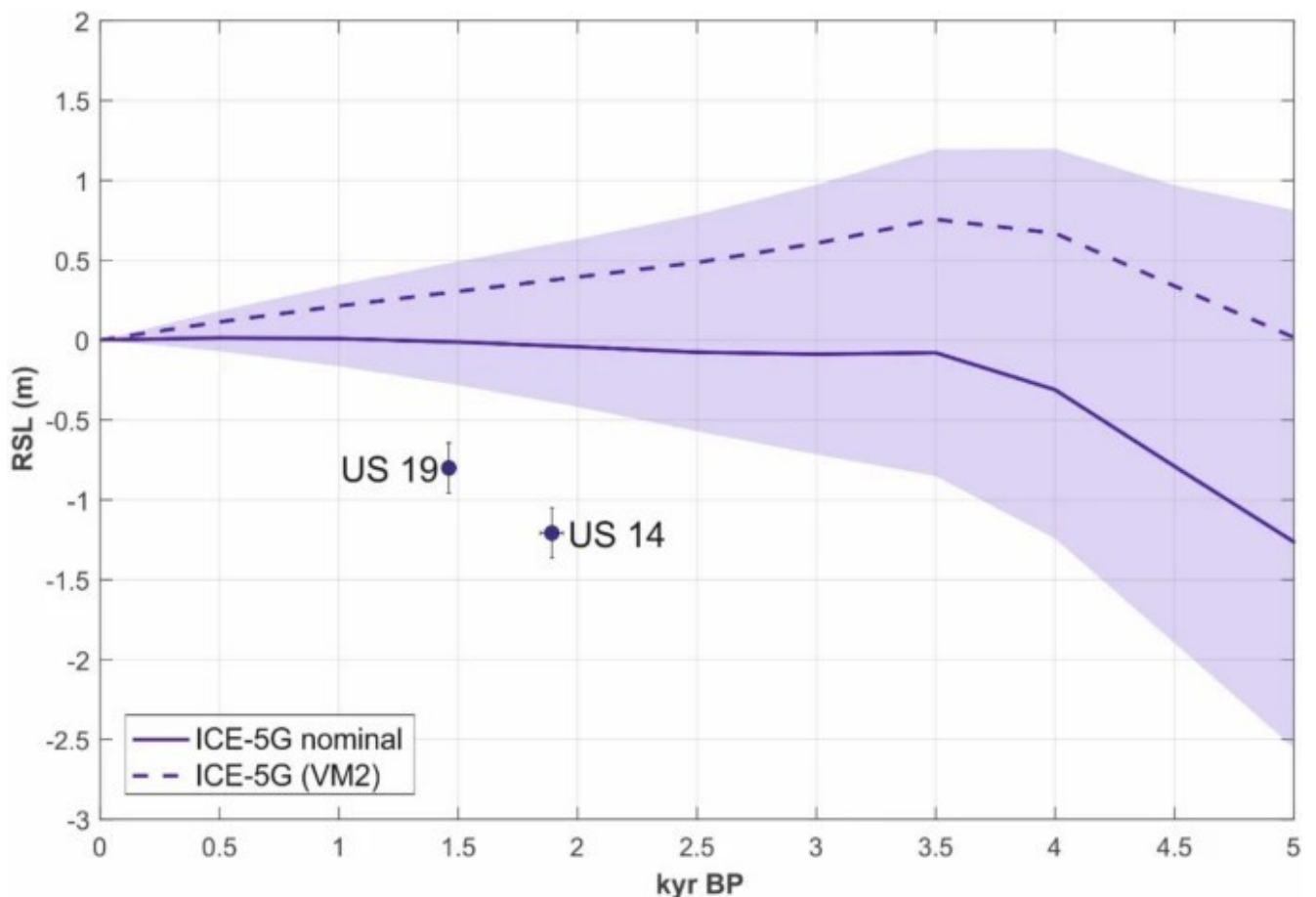
geofisici, ecc. Una volta definite le quote residue dei resti archeologici in relazione al livello del mare in quel momento, il paleolivello marino viene confrontato con quello attuale e la differenza risultante viene utilizzata per quantificare la variazione locale del livello del mare dal periodo storico a oggi. Secondo Shennan e Horton 23, l'RSL viene quindi stimato utilizzando la seguente equazione:  $RSL = (E - I) \pm V$ , dove E è l'elevazione misurata della caratteristica, I è il significato indicativo (il livello di marea associato alla funzione della caratteristica) e V è l'incertezza verticale. Questa procedura è stata ampiamente applicata in vari contesti sulle coste italiane e nel Mediterraneo occidentale per limitare il livello relativo del mare del passato 24, anche per l'epoca preromana e in particolare per l'età del bronzo nell'Adriatico settentrionale 25.

Le palizzate in legno che preservano marcatori biologici e/o sono associate a specifici record sedimentari, come quelle descritte in questo lavoro, possono fungere da indicatori per stimare i precedenti livelli del mare. I sedimenti lagunari forniscono le condizioni ideali per la conservazione delle strutture in legno riducendo la disponibilità di ossigeno, prevenendo il degrado microbico, limitando l'erosione fisica e proteggendo il legno con strati di sedimenti. Questo li rende un ambiente eccellente per le ricostruzioni archeologiche. La presenza di strutture lignee romane, datate e conservate perché sommerse, è notevole. Per la palizzata più orientale, la US 14, le misurazioni al radiocarbonio indicano un intervallo di datazione compreso tra la metà del II secolo a.C. e il III secolo d.C. (Tabella 1). I depositi ceramici negli strati associati consentono di ridurre questo intervallo di età tra la metà/fine del I secolo d.C. e l'inizio del II secolo d.C. Trattandosi di depositi costituiti da rifiuti domestici e resti di produzione, si può presumere che provengano da depositi formati in un periodo di diversi anni, ma accumulati lungo la riva contemporaneamente alla costruzione della barriera in legno US 14 per formare la spiaggia. Sulla base di questi risultati, consideriamo quindi l'età del 100 d.C. un valore affidabile per il calcolo delle curve relative del livello del mare, con una ragionevole incertezza di  $\pm 30$  anni. In prossimità della spiaggia US 31, sulla US 26, in una laguna aperta con buon ricambio marino, a poche decine di metri dalla costa dell'isola barriera di Grado, è stato quindi eseguito un intervento di innalzamento e consolidamento delle sponde per facilitare l'accesso al canale. La morfologia del fondo lagunare, su cui sono stati versati gli strati contenenti il materiale archeologico, non è piana, ma presenta una depressione corrispondente all'area degli strati US 26, 25, 27 e 24. La testa della palizzata US 14 sporge di alcuni centimetri dalla superficie di US 16 e serve a contenere gli strati scaricati tra la palizzata e l'isola di Grado, mentre il materiale a est, rappresentato da US 12, serve solo a consolidare il letto in prossimità del canale US 31 (Fig. 6).

La presenza di un tronco spiaggiato a quota -0,90 m slm, la testa intatta delle tavole di US 14 (-0,60 m slm) non attaccata dalla *Teredo navalis*, e il fatto che la sabbia di US 31 (-0,90 m slm) indichi un ambiente solo occasionalmente allagato, sono gli elementi che abbiamo preso in considerazione per il calcolo del RSL in questo sito. Abbiamo misurato l'elevazione della testa della palizzata ( $E = -0,6$  m al di sotto dell'attuale livello medio del mare), e poiché questa palizzata rappresenta una difesa costiera su una spiaggia lagunare, è probabile che sia correlata all'alta marea o leggermente al di sopra, quindi assumiamo il suo significato indicativo (I) in questo sito di  $+ 0,6$  m rispetto al livello medio del mare. Applicando la formula  $RSL = EI$ , otteniamo  $-1,2$  m. Nel nostro caso, l'incertezza verticale totale (ovvero l'incertezza sul livello del mare passato ricostruito) deriva da due componenti principali: e 1 ( $\pm 0,05$  m), che si riferisce all'errore di elevazione misurato (ad esempio, dovuto al rilevamento GPS); e 2 ( $\pm 0,30$  m), che riflette l'incertezza associata al significato indicativo (ad esempio, la zona di marea in cui l'indicatore ha funzionato). La formula della radice quadrata efficace:  $e_{totale} = (e_1^2 + e_2^2)^{1/2}$  produce un valore di  $\approx 0,30$  m. Pertanto, l'incertezza verticale totale per questo SLIP, che tiene conto della variabilità delle condizioni di marea, delle mareggiate e dell'altezza di costruzione, è stimata a  $\pm 0,3$  m. La palizzata US 19, datata all'anno 566 d.C. e gravemente attaccata dalla *Teredo navalis*, indica un considerevole innalzamento del livello medio del mare. La *Teredo navalis* di US 19 occupa una fascia di pochi centimetri in corrispondenza della sommità conservata dei poli, a una quota compresa tra -0,80 e -0,90 m bmsl. Considerando un'escursione di marea simile a quella odierna, l'applicazione della formula RSL fornisce un valore di  $-0,80$  m al VI secolo. L'incertezza verticale totale per questo SLIP è analoga a quella del precedente SLIP ( $\pm 0,30$  m). Questo innalzamento del livello medio del

mare, che dovrebbe essere valutato anche nel contesto dei fenomeni di subsidenza, potrebbe essere una concausa della natura della matrice degli strati da US 26 a US 18, tipica di ambienti lagunari sommersi, la cui componente artificiale sarebbe stata scaricata tra il I e il II secolo d.C., mentre la matrice al momento dell'innalzamento del livello medio del mare era compresa tra il II e il VI secolo d.C. Le palizzate US 19 e US 30 sembrano rappresentare un intervento strutturale di tipo diverso rispetto alla palizzata US 14. I pali ammassati dall'alto compattano una striscia larga circa 50 cm sotto l'acqua e potrebbero rappresentare un intervento di stabilizzazione della riva successivo a quello della metà/fine del II secolo d.C.

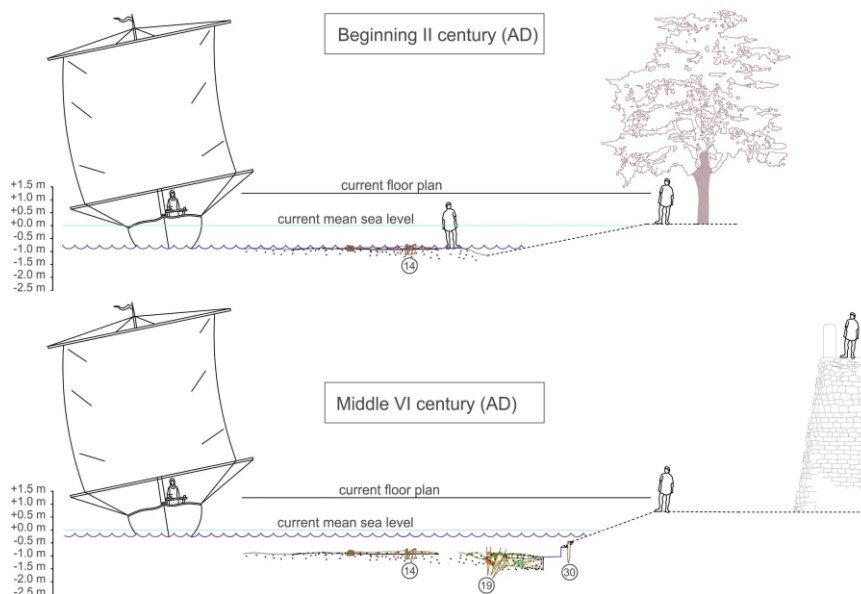
Questi due punti indice sono tracciati come età calibrata rispetto al cambiamento del livello del mare rispetto al presente (Fig. 7). La figura mostra anche una curva RSL post-glaciale ottenuta risolvendo l'"equazione del livello del mare" (SLE; 26, che descrive le variazioni spazio-temporali del livello del mare associate allo scioglimento progressivo delle calotte glaciali del tardo Pleistocene. Non sono stati considerati contributi derivanti dalla subsidenza tettonica, dalla compattazione dei sedimenti e da altri processi geologici rilevanti. Abbiamo risolto numericamente la SLE mediante il codice open source SELEN4 27, 28, che include gli effetti del feedback rotazionale sul livello del mare secondo la teoria rivista di Mitrovica et al. 29 e tiene conto della migrazione orizzontale delle linee di costa e delle variazioni della funzione oceanica seguendo il metodo delineato da Peltier 30. Qui abbiamo assunto un'evoluzione delle calotte glaciali secondo il modello ICE-5G di Peltier 30, in accordo con Vacchi et al. 24. La linea tratteggiata in Fig. 7 rappresenta la curva RSL ottenuta con il profilo di viscosità VM2 originale, mentre la linea continua e la regione ombreggiata in blu rappresenta, rispettivamente, la curva RSL secondo l'approssimazione nominale a tre strati di VM2 utilizzata in Vacchi et al. 24 e l'intervallo di variazione RSL stimato attraverso un mini-insieme di 27 profili reologici ottenuti esplorando diversi valori per lo spessore litosferico e le viscosità del mantello superiore e inferiore (vedere Tabella 2 in 24).



Studi precedenti hanno tentato di ricostruire l'antico livello del mare nell'area lagunare di Grado sulla base di informazioni archeologiche e geomorfologiche. Una stima del livello del mare intorno al IV secolo d.C. derivata dalle altezze dei più importanti monumenti paleocristiani di Grado e tenendo conto degli effetti della compattazione del suolo e della subsidenza, ha prodotto un valore di -1,4 m rispetto all'attuale livello medio del mare 9 . Tale livello del mare è correlato all'altezza di riferimento della rete altimetrica nazionale d'Italia rappresentata dal mareografo di Genova, che è superiore a quella di Trieste (dove esiste una delle registrazioni più lunghe nel contesto nazionale, a partire dal 1890) di 0,05 m. Gli studi hanno dimostrato che i tassi di subsidenza olocenica nella costa adriatica settentrionale sono piuttosto variabili, variando da circa 0,7 mm/anno nella pianura veneta a circa 0,4 mm/anno nella parte orientale della costa friulana 31. A est nel Golfo di Trieste, lungo la costa rocciosa del Carso, si trovano tracce geomorfologiche significative di incisioni sommerse (Duino) a una profondità di  $-1,7 \pm 0,2$  m, e anche strutture portuali allagate a una profondità di 1,2–1,5 m sotto il livello del mare (Muggia), indicando in questo caso una componente tettonica significativa 32 . Lungo questo tratto di costa, i tassi di subsidenza variano da -1,99 mm/anno a 1,01 mm/anno.

## Conclusioni

Questo studio multidisciplinare documenta la scoperta di tre palizzate romane datate tra la metà/fine del I e l'inizio del II e VI secolo d.C. a Grado, uno dei principali siti collegati al sistema portuale di Aquileia, tra i più importanti in epoca romana, e le sue implicazioni per la ricostruzione della RSL in quel periodo. Due di queste palizzate furono utilizzate per proteggere e consolidare il terreno immediatamente antistante il mare aperto, o di un canale o di una foce lagunare, sostenendo la parte del deposito artificiale più vicina alla riva e consentendo agli abitanti di accedere alla riva senza sprofondare quando il livello del mare si alzava. La costruzione di barriere in legno e lo scarico di macerie edili e rifiuti domestici crearono una "spiaggia di schegge", che offrì agli isolani, oltre a un migliore accesso al mare, probabilmente anche una protezione più efficace contro l'erosione costiera. Le parti terminali di queste palizzate misurate in riferimento al livello medio del mare e le datazioni al radiocarbonio effettuate su frammenti lignei degli stessi manufatti, furono utilizzate come punti indice per vincolare la posizione del livello del mare nel I e VI secolo d.C. sulla costa adriatica nord-orientale. I risultati di queste analisi hanno portato a stabilire che il livello del mare era di  $-1,20 \pm 0,50$  m nella metà/fine del I–inizi del II secolo d.C. e si è innalzato di circa + 0,40 m entro il VI secolo d.C. L'analisi stratigrafica degli strati intercettati dallo scavo e le caratteristiche sedimentologiche delle diverse sequenze deposizionali hanno inoltre consentito di aggiungere informazioni chiave sul quadro paleoambientale dell'area di Grado così come si presentava in età romana e medievale e di delineare uno schema delle variazioni del livello del mare in questo settore dell'Adriatico settentrionale (Fig. 8).



Ipotizziamo che il nucleo insediativo fosse localizzato in una fascia costiera rivolta verso il mare aperto, o lungo un canale che collegava la zona di marea interna con il mare aperto, simile all'attuale ambiente lagunare. Ciò significa che la laguna di Grado e la vicina laguna di Marano sono i rappresentanti più recenti di una serie di ambienti costieri con mare poco profondo circondato da spiagge sabbiose e piane di marea che hanno caratterizzato il paesaggio costiero dell'Adriatico settentrionale da sud a nord dalla fine dell'Ultimo Massimo Glaciale, e sono stati gradualmente sepolti a seguito dell'innalzamento del livello del mare.

## **Metodi**

Indagini dendrocronologiche e identificazione delle specie sui resti lignei

Sette campioni lignei, rappresentati da sezioni trasversali di 5 cm di spessore prelevate dalle palizzate US 14, 19 e 30, sono stati analizzati da Nicoletta Martinelli presso il Laboratorio Dendrodata (Verona, Italia). Dopo l'identificazione della specie lignea mediante analisi autoptica, è stata eseguita una valutazione della lunghezza della serie anulare e sono stati selezionati 3 campioni per le analisi dendrocronologiche, volte a fornire una datazione assoluta di questi resti.

Le analisi del legno sono state condotte sulle sezioni trasversali prelevate dai campioni lignei tramite microscopio ottico. L'identificazione delle specie legnose è stata effettuata seguendo le procedure 33, 34, 35, 36, 37. I campioni sono rappresentati da latifoglie: la palizzata US 14 è costituita da *Alnus glutinosa/incana*, mentre US 19 e US 30 da quercia decidua della sezione ROBUR.

Le indagini dendrocronologiche sono state condotte su campioni prelevati dalla palizzata US 19, secondo le procedure classiche descritte da Baillie e Fritts 38, 39. Lo spessore degli anelli di accrescimento è stato determinato con lo strumento Lintab di F. Rinn (Heidelberg, Germania), che consente una precisione al centesimo di millimetro. I dati raccolti sono stati registrati ed elaborati con i programmi Catras© (Computer Aided Tree Ring Analysis) e TSAP© (Time Series Analysis Program - TSAP-WinTM2003). I tre campioni di legno di quercia decidua analizzati sono stati selezionati sia per la specie legnosa (ROBUR), particolarmente adatta alle indagini dendrocronologiche, sia per la sequenza anulare di lunghezza superiore a 40 anelli; essi consistono in una sezione trasversale sub-triangolare ottenuta da tronchi di quercia di diametro di almeno 20 cm, suddivisa in settori radiali. Per quanto riguarda la datazione dendrocronologica assoluta, poiché manca ancora la costruzione di una curva standard della quercia per la regione dell'Italia settentrionale 40, è stata utilizzata provvisoriamente una teleconnessione con le due cronologie straniere della quercia per la Germania centro-occidentale (700 a.C.-1964 d.C.) e per la Germania centro-meridionale (7237 a.C.-1963 d.C.; 41). Tenendo conto delle informazioni derivate dalle determinazioni al radiocarbonio (vedi sotto), la datazione incrociata è stata condotta con la cronologia regionale della quercia elaborata per la regione Veneto (Martinelli, 2019), datata tramite wiggle-matching. I risultati di queste analisi forniscono una possibile datazione assoluta dell'ultimo anello della curva media ottenuta dai poli al 565 cal d.C. ( $\pm 21$  anni). Poiché la curva media manca dell'anello cambiale, l'abbattimento dei fusti di quercia dovrebbe essere ricondotto all'estate del 566 cal d.C.

## **Datazione al radiocarbonio**

La datazione al radiocarbonio è stata eseguita dal Centro di Datazione Diagnostica - CEDAD (Università del Salento, Italia) su sette campioni, tre dei quali prelevati dalla palizzata US 19, mediante spettrometria di massa ad alta risoluzione (AMS). Il materiale estratto è stato successivamente convertito in anidride carbonica mediante combustione a 900 °C in ambiente ossidante, e poi in grafite mediante riduzione. H<sub>2</sub> è stato utilizzato come elemento riducente e polvere di ferro come catalizzatore. La concentrazione di radiocarbonio è stata determinata confrontando i valori misurati delle correnti 12C e 13C e dei conteggi di 14C con i valori ottenuti da campioni standard di saccarosio C6 forniti dall'AIEA. La datazione al radiocarbonio convenzionale è stata corretta per gli effetti del frazionamento isotopico e misurando direttamente il termine  $\delta^{13}C$  con l'acceleratore, entrambi per il fondo della misura. Campioni di acido ossalico a concentrazione nota forniti dal

NIST (National Institute of Standards and Technology) sono stati utilizzati come controllo di qualità dei risultati. Per la determinazione dell'errore sperimentale nei dati radiocarbonici, sono stati presi in considerazione sia la dispersione dei dati attorno al valore medio sia l'errore statistico derivante dal conteggio del  $^{14}\text{C}$ . La datazione al radiocarbonio è stata quindi calibrata in età calendariale utilizzando il software OxCal Ver. 4.4 basato su dati atmosferici 42, che fornisce l'età dei quattro campioni prelevati dalla palizzata US 19, della seconda metà del III e della seconda metà del V secolo d.C., che sono coerenti con quelle ottenute dalla dendrocronologia:  $566 \pm 21$  d.C.

### **Archeo-malacologia**

Analisi archeo-malacologiche sono state eseguite dal Laboratorio di Archeobiologia dei Musei Civici di Como, ARCO - Cooperativa di Ricerche Archeologiche (Italia) su campioni prelevati dai livelli US 13, US 24, US 25, US 26 e US 31, che hanno rivelato la presenza di 716 reperti, appartenenti a tre ambienti principali: terrestre, marino, in cui si trova la maggior parte dei reperti, rappresentati da molluschi gasteropodi e bivalvi, e d'acqua dolce. Tuttavia, i molluschi marini presentano conchiglie più robuste di quelle terrestri, caratterizzate da nicchie più sottili e quindi più fragili. Per quanto riguarda l'ambiente terrestre, in US 13 e US 24, insieme al materiale malacologico, sono stati rinvenuti 7 frammenti ossei. In US 13 si tratta di frammenti ossei carbonizzati indeterminabili, riferibili a un mammifero di medie dimensioni, e di scapole di micromammifero, suggerendo rispettivamente che si tratti di resti di pasto, e di resti di un topo. In US 24 sono stati rinvenuti un incisivo di un micromammifero roditore e un frammento osseo di mammifero non determinabile. Tutti questi reperti, che comprendono *Cochlicella barbara*, *Trochoidea trochoides*, *Candidula unifasciata*, che vivono in zone costiere, sabbiose e secche, indicano che il loro accumulo è avvenuto in situ, a seguito della morte degli esemplari per cause naturali. 655 reperti appartengono all'ambiente marino e tutte le unità stratigrafiche analizzate contengono organismi marini. Possono essere suddivisi in tre gruppi principali: specie accumulate in situ, a seguito della morte naturale degli organismi, come *Bittium scabrum*, *Nassarius pygmaeus*, *Retusa candidula*; specie trasportate dalle onde, specie pescate dall'uomo per vari scopi, *Cerastoderma edule*, *Ostrea edulis*, *Venus nux vive*, *Abra alba*. Per quanto riguarda l'ambiente di acqua dolce, 27 ritrovamenti sono avvenuti all'interno degli Stati Uniti 24 e sono rappresentati da esemplari, come *Theodoxus fluviatilis*, *Mercuria similis*, *Hidrobidae*, morti in situ o in prossimità, e indicano la presenza di delta fluviali e stagni salmastri. In sintesi, l'archeo-malacologia suggerisce che il paleoambiente fosse caratterizzato da dune e spiagge che includevano un dominio bentonico marino, ma anche habitat terrestri e di acqua dolce, come i delta fluviali all'interfaccia tra l'ambiente marino e quello terrestre. L'azione del moto ondoso, delle mareggiate e delle inondazioni fluviali consente l'apporto di vari materiali organici, in particolare in prossimità delle foci dei grandi fiumi.

Analisi sedimentologiche e micropaleontologiche sono state eseguite dal Dipartimento di Geoscienze (Università di Padova, Italia) e dall'Istituto di Geoscienze e Georisorse CNR-IGG, rispettivamente su sette campioni prelevati da US 13, US 22, US 24, US 25, US 27, US 26, US 31. Si tratta per lo più di depositi di riempimento realizzati in epoca antica o di sedimenti pesantemente rimaneggiati dalle attività antropiche, come già riportato nella descrizione delle fasi di scavo. Su questa base, un'analisi sedimentologica accurata è stata eseguita solo per il campione prelevato da US 31, che corrisponde a un deposito sabbioso situato a est delle indagini archeologiche, e per la matrice di US 26 e 27, che sono in posto. La sequenza deposizionale naturale sottostante le unità archeologiche può essere interpretata come una tipica successione sedimentaria generata da una trasgressione marina al di sopra di una piana alluvionale. Negli ultimi millenni l'area sembra essere stata caratterizzata da un ambiente di tipo lagunare, il che testimonia che l'area oggetto di scavo si trovava nel settore interno dell'isola barriera su cui sorge Grado. Il campione prelevato da US 31 è stato trattato in acqua e liberato dalla frazione inferiore a 63 micron per ottenere solo granelli di sabbia (0,063–2 mm). La sabbia è stata quindi squartata con uno splitter fino ad ottenere una frazione di circa 2 cm di altezza in un contenitore cilindrico del diametro di 3 cm. Tale frazione è stata quindi incorporata in resina bicomponente (Araldite, 2020) per ottenere un blocco di roccia artificiale. Dopo l'essiccazione in forno, la

tavoletta risultante è stata quindi trattata come una fetta di roccia da cui è stata ricavata la sezione sottile per l'indagine al microscopio. La sezione sottile è stata colorata con rosso di alizarina, per distinguere rapidamente i granelli di carbonato di calcio, che virano al rosa in pochi secondi, da quelli dolomitici che rimangono incolori se esposti alla soluzione per alcuni secondi. Il campione è costituito da sabbie siltose molto fini (> 25–30%), grigio giallastre (2,5Y 6/2–3) (90–150 µm), con rari frammenti di legno, forse identificabili come porzioni di radici, e clasti esogeni. Questi ultimi hanno dimensioni millimetriche, ma è stata rinvenuta anche una valva abrasa di *Cerastoderma glaucum*, forse indicativa del trasporto e dello spostamento delle sabbie. Sulla base di osservazioni microscopiche, il campione presenta una composizione litica dominata da frammenti di rocce carbonatiche (calcaree e dolomitiche) e rari clasti di selce, quarzo, bioclasti, foraminiferi e fillosilicati carboniosi. I clasti calcarei sono solitamente più abbondanti di quelli dolomitici.

Analisi micropaleontologiche sono state condotte su sei campioni. I campioni sono stati preparati secondo le procedure standard per l'analisi dei foraminiferi bentonici: sono stati lavati con acqua su un setaccio a maglie da 0,063 mm per disperdere la frazione pelitica e sono stati essiccati in stufa a 50 °C. Per l'analisi micropaleontologica, è stato analizzato il residuo > 0,125 mm, generalmente osservato e analizzato in ambienti lagunari analoghi 43. Per ciascun campione, è stata analizzata rapidamente una frazione idonea di sedimento per valutare la composizione dell'associazione a Foraminiferi bentonici in ambienti marini marginali dove la diversità specifica è molto bassa, come nell'area di studio. La classificazione dei Foraminiferi ha seguito la tassonomia di Loeblich e Tappan 44. La parte organogena è costituita da Foraminiferi bentonici, Ostracodi, bioclasti e biosomi di Molluschi, opercoli di gasteropodi d'acqua dolce e resti vegetali. La frazione superiore a 0,500 mm di tutti i campioni contiene, in varia misura, resti vegetali e piccoli frammenti carbonizzati, frammenti litici con diversi gradi di arrotondamento. Alcuni campioni contengono frammenti di terracotta, mattoni o vetro, nonché bioclasti di molluschi marini. I campioni contengono un'associazione di foraminiferi compatibile con un ambiente lagunare temperato simile alle attuali lagune dell'Adriatico settentrionale. In particolare, l'associazione presente nel campione 2 (US 13, vedi Tabella 2) può essere correlata al biotopo lagunare interno (Inner Lagoon Biotopo) descritto nella Laguna di Venezia 43, indicando un ambiente lagunare subtidale con un grado di confinamento piuttosto elevato. L'associazione presente nei campioni 4 (US 24), 5 (US 25) e 7 (US 26, vedi Tabella 2) può riferirsi al biotopo lagunare esterno della Laguna di Venezia, correlato a un ambiente lagunare subtidale con un buon ricambio di acqua marina. L'associazione presente nel campione 6 (US 27, vedi Tabella 2) può invece riferirsi al biotopo prossimo alla barena (biotopo prossimo alla barena) della Laguna di Venezia, indicando un ambiente intertidale con un'altitudine media sotto il livello del mare, e situato in prossimità di una barena. I campioni 2 (US 13) e 3 (US 22) indicano un ambiente lagunare più interno.

### **Disponibilità dei dati**

I set di dati analizzati durante lo studio attuale sono disponibili su richiesta ragionevole a P. Ventura ([sabap-fvg@cultura.gov.it](mailto:sabap-fvg@cultura.gov.it)).

### **Riferimenti:**

- Fontana A, *La zona costiera e lagunare. Nella pianura del Friuli Venezia Giulia. Geomorfologia e Geologia del Quaternario*. A cura della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia - Servizio Geologico, 320 (2024).
- Marocco, R., Scotti, FM, Melis, R. & Vio, E. *Il sottosuolo del Castrum di Grado (Adriatico settentrionale): Studi preliminari per una ricostruzione paleogeografica, in Il Quaternario*. Associazione italiana per lo studio del quaternario 18, 135–146 (2005).
- Schmidt, G. *Archeologia della laguna di Grado*.in: "Antichità Altoadriatiche XVII (1980). Grado nella storia e nell'arte". EUT Edizioni Università di Trieste, Trieste 1980, 17–40 (1980).

- Cagnana, A., Malaguti, C. & Riavez, P. *Contesti tardo antichi e altomedievali da recenti scavi in Friuli-Venezia Giulia. Produzione e circolazione 2004*, 227–246 (2004).
- Brogiolo GP, Cagnana A. 2005, *Nuove ricerche sull'origine di Grado*, in *L'Adriatico dalla tarda antichità all'età carolingia*, (GP Brogiolo e P. Delogu), Atti del convegno di studio, Brescia 11 – 13 ottobre 2001, Firenze, 79–108.
- Basso, P. et al. *Aquileia e il suo sviluppo urbano alla luce delle ricerche recenti e in corso. Paesaggio urbano romano: città e insediamenti minori da Aquileia al Danubio*. Opera Instituti Archaeologici Sloveniae. 47 , 53–76 (2023).
- Cottica et al. 2017a. *Le attività di scavo e ricerca del Dipartimento di Studi Umanistici a Pompei ed Aquileia e gli studi paleobiologici sulla necropoli di piazza Corrubbio a Verona*, in L. Sperti, a cura di, *Giornata dell'archeologia: scavi e ricerche del Dipartimento di Studi Umanistici*, Venezia, 2017, 81-98. <https://doi.org/10.14277/6969-189-8/SR-11-6>
- Cottica, D., Marchesini, M., Marvelli, S., Novello, M. & Ventura, P. *Per uno studio integrato di uomo e ambiente ad Aquileia: Alcune riflessioni a partire da recenti indagini archeologiche*. *Rivista di Archeologia* [https://doi.org/10.26406/RDA41-006 \(2017b\)](https://doi.org/10.26406/RDA41-006 (2017b)).
- Marocco, R. *Le quote delle costruzioni romane e paleocristiane del castrum di Grado in relazione al livello del mare*. *Aquileia Nostra* 75 , 375–387 (2004).
- Dorigo, L. *La laguna di Grado e le sue foci 231* (Ufficio Idrografico del Magistrato delle Acque di Venezia, Ricerche e rilievi idrografici, Venezia, 1965).
- Polli, S. *Tabelle di previsione delle maree per Trieste e l'Adriatico Settentrionale per l'anno 1971 20* (Istituto Talassografico Sperimentale, Trieste, 1970).
- Gambolati, G. 1998. *Evoluzione della linea costiera dell'alto Mare Adriatico dovuta all'innalzamento del livello del mare e alla subsidenza naturale e antropica del territorio*, Progetto CENAS, Biblioteca di scienze e tecnologie dell'acqua, 28.
- De Grassi, V. *Le rovine subaquee di San Gottardo a Grado 32–33* (*Aquileia Nostra*, XXIII, 1952).
- Gaddi, D., *Approdi nella laguna di Grado*, in *Antichità Altoadriatiche XLVI. Strutture portuali e rotte marittime nell'Adriatico di età romana*, Atti della XXIX Settimana di Studi Aquileiesi (*Aquileia*, 20–23 maggio 1998), Trieste – Roma 2001
- Andreaia Studio Associato per l'Archeologia delle Acque 2017, *Relazione archeologica e assistenza all'esecuzione e lettura archeologica dei carotaggi*, Archivio SABAP FVG.
- Brambati, A., 1970. *Provenienza, trasporto ed accumulo dei sedimenti recenti nella laguna di Marano e di Grado e nei litorali tra i fiumi Isonzo e Tagliamento*, *Memorie della Società Geologica Italiana*, IX, 323–325.
- Eriksen, AM, Gregory, D. e Shashoua, Y. *Attacco selettivo del legno archeologico inzuppato d'acqua da parte del teredine, *Teredo navalis* e le sue implicazioni per la conservazione in situ*. *J. Archeol. Sci.* 55 , 9–15 (2015).
- Capulli, M. *I nuovi relitti di Grado e l'isola lagunare di Gorgo: Aggiornamenti sulla portualità aquileiese. Archeologia marittima mediterranea*. Una rivista internazionale sull'archeologia subacquea <https://doi.org/10.19272/202304501005> (2023).
- Auriemma, R. & Solinas, E. *Resti archeologici come indicatori del cambiamento del livello del mare: una revisione*. *Quat. Int.* 206 (1), 134–146 (2009).

- Morhange, C. e Marriner, N. *Indicatori archeologici e biologici del livello del mare relativo*. In Handbook of Sea Level Research (a cura di Shennan, I. et al.) 146–156 (Wiley, 2015).
- Shennan, I. e Horton, B. *Cambiamenti olocenici del livello del mare e della terra in Gran Bretagna*. J. Quat. Sci. 17 (2002), 511–526 (2002).
- Vacchi, M. et al. *Valutazione multiproxy delle variazioni relative del livello del mare nell'Olocene nel Mediterraneo occidentale: variabilità del livello del mare e miglioramenti nella definizione del segnale isostatico*. Earth Sci. Rev. 155 , 172–197 (2016).
- Fontana, A. et al. *Insedimenti lagunari e livello relativo del mare durante l'età del bronzo nell'Adriatico settentrionale: evidenze geoarcheologiche e vincoli paleogeografici*. Quat. Int. 439 , 17–36 (2017).
- Farrell, WE e Clark, JA *Sul livello del mare postglaciale*. R. Astron. Soc. Geophys. J. 46 , 647–657 (1976).
- Spada, G. & Melini, D. SELEN4 (SELEN versione 4.0): *Un programma Fortran per la risoluzione dell'equazione del livello del mare gravitazionalmente e topograficamente autoconsistente nella modellazione dell'aggiustamento isostatico glaciale*. Geoscient. Model Dev. 12 (12), 5055–5075. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-5055-2019> (2019).
- Spada, G. & Stocchi, P. SELEN: *Un programma Fortran 90 per risolvere l'“equazione del livello del mare”*. Comput. Geosci. 33 (4), 538–562 (2007).
- Mitrovica, JX, Wahr, J., Matsuyama, I. e Paulson, A. *La stabilità rotazionale di una Terra dell'era glaciale*. Geophys. J. Int. 161 , 491–506 (2005).
- Peltier, WR *Isostasia glaciale globale e superficie della Terra dell'era glaciale: il modello ice-5G (VM2) e la grazia*. Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 32 , 111–149 (2004).
- Antonioli, F. et al. *Cambiamenti relativi del livello del mare nell'Olocene e movimenti verticali lungo le coste italiane e istriane*. Quat. Int. 206 (1), 102–133 (2009).
- Furlani, S. et al. *Effetti tettonici sui cambiamenti del livello del mare nel tardo Olocene nel Golfo di Trieste (Mare Adriatico nord-orientale, Italia)*. Quat. Int. 232 (1), 144–157 (2011).
- Cambini, A., 1967 *Micrografia comparata dei legni del genere Quercus, Contributi scientifico-pratici per una migliore conoscenza ed utilizzazione del legno, CNR, X, 7–49*.
- Cambini, A., 1967b. *Riconoscimento microscopico del legno delle querce italiane, Contributi scientifico-pratici per una migliore conoscenza ed utilizzazione del legno, CNR, X, 51–79*.
- Albani, A., Serandrei, BR e Donnici, S. *Foraminiferi come indicatori ecologici nella Laguna di Venezia, Italia*. Ecol. Ind. 7 , 239–253 (2007).
- Loeblich, AR e Tappan, H. *Generi di foraminiferi e loro classificazione 970* (Van Nostrand Reinhold Company, 1987).
- Carminati, E., Doglioni, C. & Scrocca, D. *Subduzione appenninica legata alla subsidenza di Venezia (Italia)*. Geophys. Res. Lett. 30 (13), 1717 (2003).
- Marocco, R. *Prima Ricostruzione paleo-idrografica del territorio della bassa pianura friulano-isontina e della laguna di Grado nell'Olocene/Prima ricostruzione paleo-idrografica della bassa pianura Isonzo – Friulana e della laguna di Grado durante l'Olocene*, Gortania. Geologia, Paleontologia, Paleontologia 31 , 69–86 (2009).
- Marriner, N. & Morhange, C. *Geoscienze degli antichi porti del Mediterraneo*. Earth Sci. Rev. 80 (3), 137–194 (2007).

- Milne, GA e Mitrovica, *JX Cambiamento postglaciale del livello del mare su una Terra in rotazione*. Geophys. J. Int. 133 (1), 1–19 (1998).

**Autori:**

Dario Gaddi, Emiliano Gordini, Emanuele Lodolo, Federica Donda, Daniele Melini, Giorgio Spada & Paola Ventura

Fonte: [www.nature.com](http://www.nature.com) – ottobre 2025