

Emissioni gassose di metano in Adriatico Settentrionale: quale ruolo nei processi di cementazione dei sedimenti marini?

Methane emissions in Northern Adriatic Sea: what role in the lithification processes of marine sediments?

GORDINI E.(*), DONDA F.(*)

RIASSUNTO - In questa breve nota vengono presentate le principali caratteristiche emerse da tre casi studio riguardanti emissioni di gas metano in Adriatico settentrionale correlate a processi di cementazione dei sedimenti marini. Per lo studio sono stati analizzati numerosi *dataset* di dati geofisici di alta risoluzione (profili CHIRP, *Side Scan Sonar* e *multibeam*) e dati geochimici.

Sono state analizzate le emanazioni gassose e relativi affioramenti rocciosi dei siti denominati “Campione gas” (a 4 km dall’Isola di Grado), “Bardelli” (a 19 km dal delta del fiume Tagliamento) e “D’Ancona” (a 7,5 km dalla Laguna di Venezia). Le indagini geofisiche realizzate hanno mostrato l’abbondante presenza di gas intrappolato all’interno dei sedimenti dell’intera successione sedimentaria del Plio-Quaternario e in modo diffuso nella coltre sedimentaria superficiale. Le immersioni subacquee hanno confermato quanto evidenziato dalle indagini geofisiche permettendo di individuare fuoriuscite più o meno intermittenti di gas dal fondale marino, talvolta associate a morfologie e depositi rappresentati da affioramenti rocciosi conosciuti come *Tegnùe*, *Trezze*, *Grebeni*, *Bromboli*, o in altri casi, sotto forma di piccoli vulcani di sedimento (sabbia-fango), ed infine da chiazze biancastre legate all’attività batterica/microbica.

I risultati ottenuti dalle analisi isotopiche eseguite su alcuni campioni di roccia mostrano valori del $\delta^{13}\text{C}$ compresi tra -17.36 ‰ PDB e -22.09 ‰. Il solo cemento risulta molto negativo e pari a -49.80 ‰ PDB. Il $\delta^{18}\text{O}$ risulta pari a 0.14 ‰ PDB e 0.62 ‰ PDB. Il gas prelevato è costituito prevalentemente da metano (81/84%), subordinatamente da azoto (15/18%) ed alcune tracce di ossigeno (0,7/1,3%). Recentemente sono stati effettuati dei campionamenti di gas sia in corrispondenza dei due affioramenti Bardelli e d’Ancona, sia in altre zone dell’Adriatico settentrionale, che hanno confermato la predominanza di metano biogenico quale componente principale delle emissioni gassose presenti nell’area (DONDA *et alii*, 2018).

PAROLE CHIAVE: Adriatico settentrionale, carbonato autigeno, emissioni gassose, geochimica, metano

ABSTRACT - This note presents the main results concerning three case studies on methane gas emissions in the Northern Adriatic Sea and related cementation processes in marine se-

diments. For this study, several datasets of high resolution geophysical data (CHIRP, Side Scan Sonar and multibeam profiles) and geochemical data were analyzed.

In particular, we have analyzed the gas seeps and rocky outcrops of the sites called “Campione gas” (4 km offshore the Grado Island), “Bardelli” (19 km from the Tagliamento river delta) and “D’Ancona” (ca 7 km offshore the Venetian Lagoon). The geophysical investigations revealed the abundant presence of gas trapped within the Plio-Quaternary sedimentary succession. Gas also appears to be widespread in the uppermost sedimentary layer. Scuba diving confirmed what highlighted by the geophysical surveys and allowed to detect more or less intermittent gas leaks from the seabed. Locally, they appear to be associated to rocky outcrops known as *Tegnùe*, *Trezze*, *Grebeni*, *Bromboli*, to small-scale sand-mud volcanoes, and also to white patches related to bacterial / microbial activity.

The isotopic analyses carried out on some rock samples reveal values of $\delta^{13}\text{C}$ ranging from -17.36 ‰ PDB to -22.09 ‰. Cement alone is very negative and equal to -49.80 ‰ PDB. The $\delta^{18}\text{O}$ is 0.14 ‰ PDB and 0.62 ‰ PDB. The sampled gas mainly consists of methane (81/84%), nitrogen (15/18%) and some traces of oxygen (0.7 / 1.3%).

Gas samplings have been recently carried out at the Bardelli and Ancona outcrops, and in other areas of the Northern Adriatic Sea, which confirmed the predominance of biogenic methane as the main component of the gaseous emissions present in the area (DONDA *et alii*, 2019).

KEY WORDS: Northern Adriatic Sea, authigenic carbonate, gas seepage, geochemistry, methane

1. - INTRODUZIONE

Le emissioni gassose nell’Adriatico settentrionale sono già state oggetto di numerosi studi, ma solo recenti indagini hanno portato ad una loro caratterizzazione dal punto di vista geofisico, composizione chimica, caratterizzazione isotopica e

(*)Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale Borgo Grotta Gigante, 42/c 34010 Sgonico - TS – Italy

definizione dell'età di formazione (DONDA *et alii*, sottomesso). I dati geofisici acquisiti in Adriatico settentrionale da OGS (sismica multicanale, profili CHIRP, dati morfo-batimetrici *Side Scan Sonar e Multibeam*) in varie campagne di ricerca, e numerose immersioni subacquee eseguite nell'ambito di vari Progetti di Ricerca (per tutti GORDINI, 2009) evidenziano che il gas è presente all'interno dell'intera successione sedimentaria del Plio-Quaternario e in modo diffuso nella coltre sedimentaria superficiale. Localmente esso risale da strati più profondi

in superficie attraverso vie di migrazione preferenziali (*chimney*), a volte associate a faglie (fig. 1C e 2C), dando vita a gorgogliamenti che si diffondono lungo tutta la colonna d'acqua. I camini di risalita, dove presenti, si originano a vari livelli nella sequenza plio-quaternaria (DONDA *et alii*, 2015) e mostrano un'ampiezza variabile da qualche decina fino a centinaia di metri. Localmente i camini raggiungono senza soluzione di continuità il fondo mare, dove la fuoriuscita di gas è talvolta associata a morfologie e depositi peculiari rappresentati da

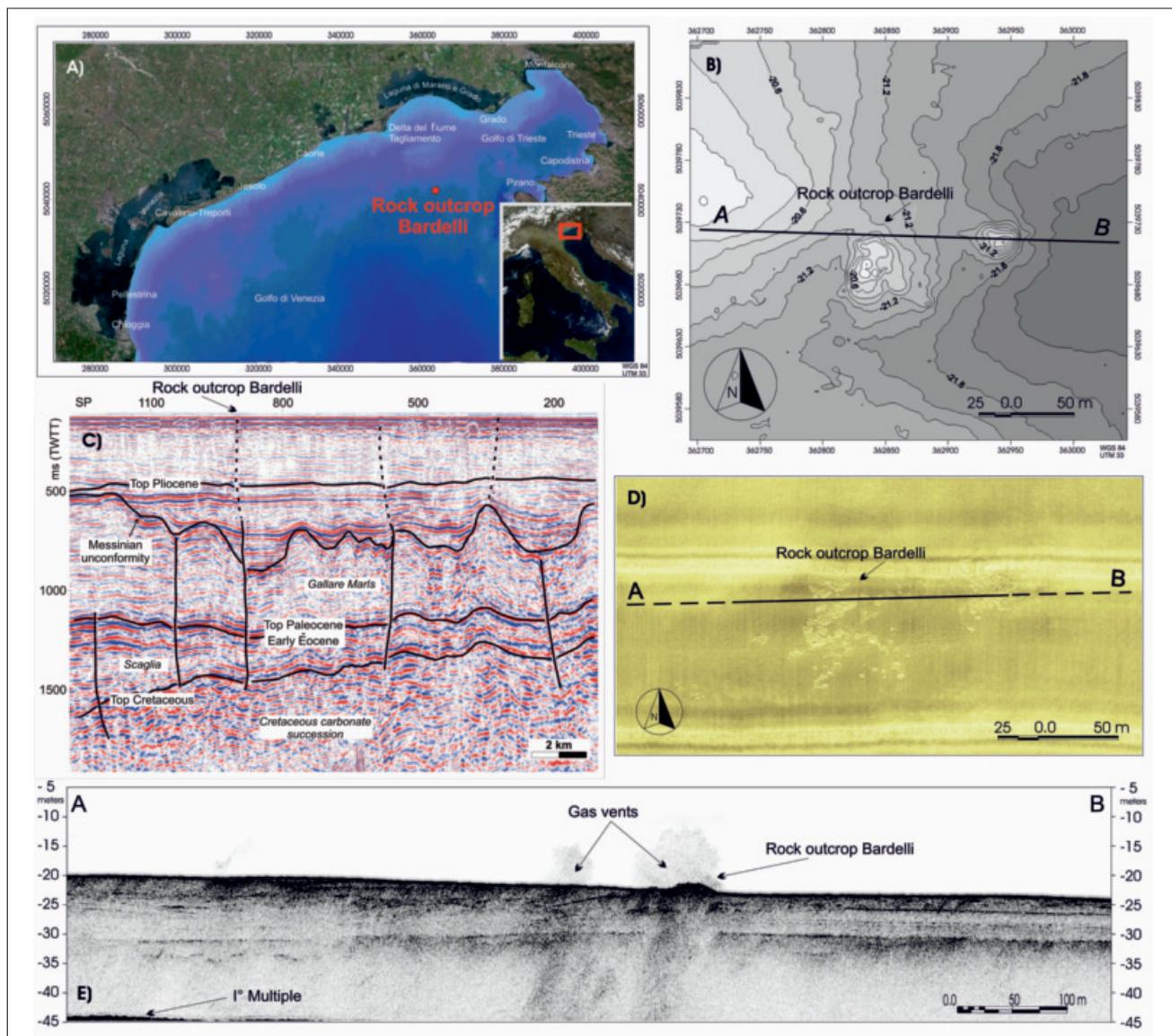


Fig. 1 – A) Mappa con l'ubicazione dell'affioramento roccioso presente al largo dell'Isola di Grado, conosciuto dai pescatori locali con il nome di Affioramento Bardelli. B) Rappresentazione bidimensionale del rilievo *singlebeam* realizzato in corrispondenza dell'affioramento Bardelli (*singlebeam Kongsberg-Simrad EA400* Survey, 38-200 kHz). C) Linea sismica multicanale ST09-01 (a) (modificata da fig. 2a, DONDA *et alii*, 2015). L'immagine mostra che l'affioramento roccioso è presente appena sopra un camino che si origina nella parte superiore di una faglia profonda sub-verticale. D) Particolare del mosaico *Side-Scan Sonar* (500 kHz, *Side Scan Sonar EdgeTech DF1000*); nella parte centrale del mosaico è evidente la presenza di un numero elevato di affioramenti rocciosi di forma irregolare. E) Profilo acustico *sub-bottom profiler Chirp* (2-7 kHz, *Portable Sub-bottom Profiler CHIRP EdgeTech SB-216S*) eseguito lungo la direzione di massimo sviluppo dell'affioramento roccioso in cui sono ben evidenti sacche di gas nell'immediato sottofondo dell'affioramento e ampi *plumes* di metano che si sviluppano lungo la colonna d'acqua.

- A) Location map of the rocky outcrop offshore the Grado Island, known by local fishermen as "Affioramento Bardelli". B) Two-dimensional representation of the *singlebeam* survey performed in correspondence to the Bardelli outcrop (*singlebeam Kongsberg-Simrad EA400* Survey, 38-200 kHz). C) Multichannel seismic line ST09-01 (a) (modified by fig. 2a, DONDA *et alii*, 2015). The image shows that the rocky outcrop is present just above a chimney that originates from a deep sub-vertical fault. D) Detail of the *Side Scan Sonar* Mosaic (500 kHz, *Edge Scan Sonar EdgeTech DF1000*); in the central part of the mosaic, the presence of a large number of irregularly shaped rocky outcrops is evident. E) Acoustic *sub-bottom profiler Chirp* (2-7 kHz, *Portable Sub-bottom Profilers CHIRP EdgeTech SB-216S*) performed along the direction of the maximum development of the rocky outcrop, where gas pockets are clearly visible just below the outcrop, together with large methane plumes in the water column.

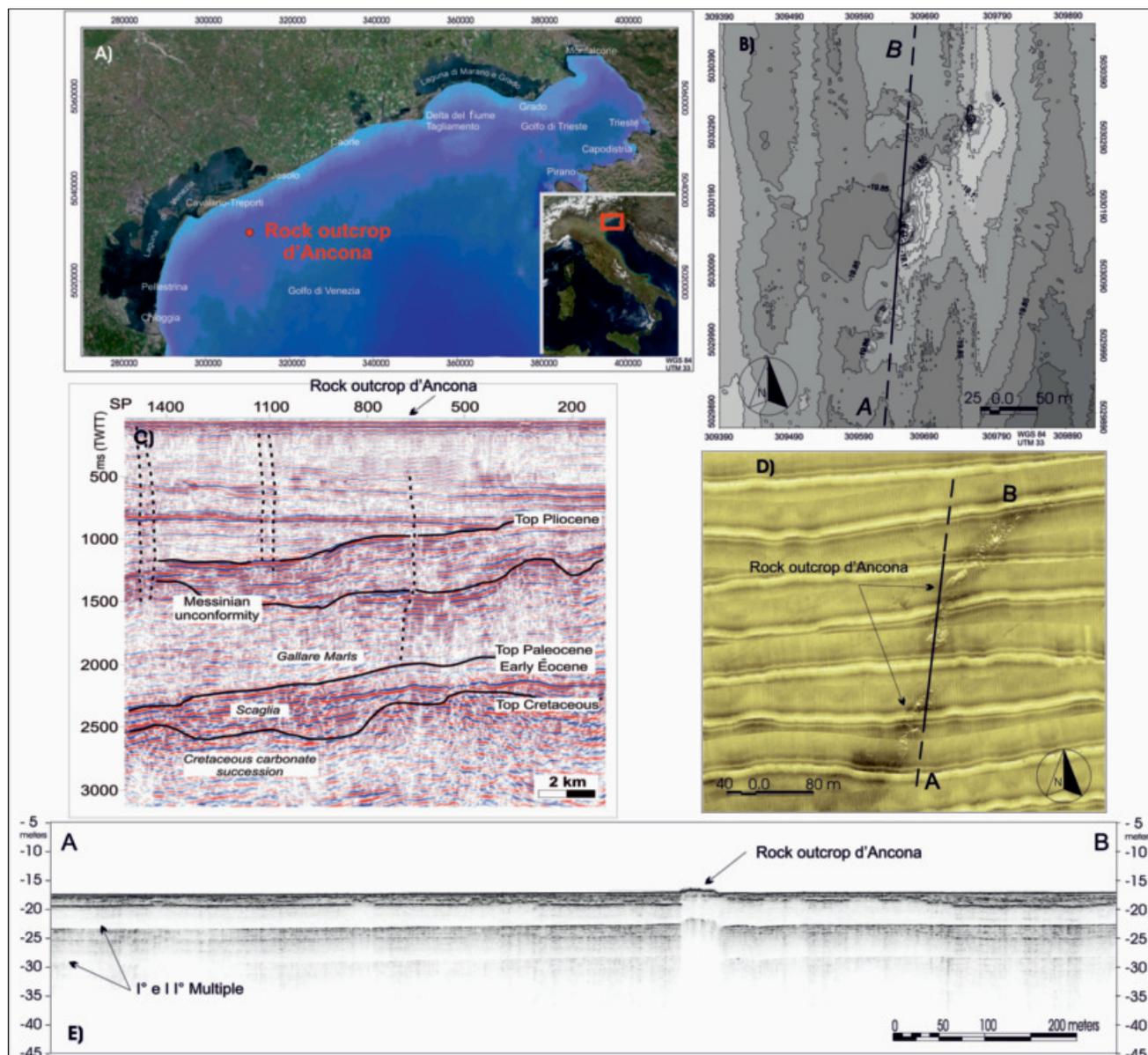


Fig. 2 - A) Mappa con l'ubicazione dell'affioramento roccioso presente al largo della Laguna di Venezia denominato Affioramento d'Ancona. B) Rappresentazione bidimensionale del rilievo *multibeam* realizzato in corrispondenza dell'affioramento d'Ancona (*multibeam Reson SeaBat 8111*, 100 kHz). C) Linea sismica multicanale ST09-15(a) (modificata da fig. 6a, DONDA *et alii*, 2015). L'immagine mostra che l'affioramento roccioso si trova ubicato sulla verticale di un'area contraddistinta dalla presenza di anomalie acustiche e *chimneys*. D) Particolare del mosaico *Side Scan Sonar* realizzato (500 kHz, *Side Scan Sonar EdgeTech DF1000*); nella parte centrale del mosaico è evidente la presenza di un affioramento roccioso dalla morfologia allungata e sinuosa. E) Profilo acustico *sub-bottom profiler Chirp* (2-7 kHz, *Portable Sub-bottom Profiler CHIRP EdgeTech SB-216S*) eseguito lungo la direzione di massimo sviluppo dell'affioramento roccioso in cui sono ben evidenti sacche di gas nell'immediato sottofondo dell'affioramento.

- A) Location Map of the rocky outcrop offshore the Venice Lagoon, called "Affioramento d'Ancona". B) Two-dimensional representation of the multi-beam survey performed in correspondence to the Ancona outcrop (*multibeam Reson SeaBat 8111*, 100 kHz). C) Multichannel seismic line ST09-15 (a) (modified by fig. 6a, DONDA *et alii*, 2015). The image shows that the rocky outcrop is located just above an area characterized by the presence of acoustic anomalies and *chimneys*. D) Detail of the *Side Scan Sonar* mosaic (500 kHz, *Side Scan Sonar EdgeTech DF1000*); in the central part of the mosaic, the presence of a rocky outcrop with an elongated and sinuous morphology is recognizable. E) Acoustic *sub-bottom profiler Chirp* (2-7 kHz, *Portable Sub-bottom Profiler CHIRP EdgeTech SB-216S*) performed along the direction of maximum development of the rocky outcrop, where gas pockets are visible just below the outcrop.

affioramenti rocciosi conosciuti come Tegnùe, Trezze, Grebeni, Bromboli (1), o in altri casi, sotto forma di piccoli vulcani di sedimento (sabbia-fango), fuoriuscite gassose più o meno intermittenti dal fondale marino, ed infine da chiazze

biancastre legate all'attività batterica/microbica ad opera di colonie di *Archaea* e *Beggiatoa* (GORDINI *et alii*, 2012).

Lastre e croste carbonatiche individuate sui fondali marini in altre aree geografiche sono state spesso

(1) Le prime segnalazioni sull'esistenza di tali corpi rocciosi risalgono al XVIII secolo, quando l'Abate Giuseppe Olivi nella sua opera "Zoologia Adriatica" ne fornisce per la prima volta una descrizione come "...elevatione di qualche massa calcarea nudo durissimo, il quale sorge isolato dal fondo molle. Tali eminenze, dette volgarmente Tenu...esistono dirimpetto a Maran, a Carole, ai Tre Porti...soprattutto dirimpetto a Malamocco e Chioggia..." (OLIVI, 1792). I più recenti studi hanno dimostrato che l'origine di tali depositi è effettivamente legata alle diffuse emissioni di gas (CONTI *et alii*, 2002; GORDINI, 2009; GORDINI *et alii*, 2012).

associate a condotti e *chimney* legati a fuoriuscite di gas metano in diversi contesti tettonici (CAMPBELL, 2006; ORPIN, 1997). Il gas metano che fuoriesce dal fondale marino presenta una precisa caratteristica isotopica legata a processi di ossidazione anaerobica del metano (AOM) e/o alla riduzione del solfato (SR). Si ritiene che l'aumento di alcalinità che si osserva in questi processi determini la precipitazione di carbonati autigenici impoveriti ($\delta^{13}\text{C}$ negativo; WHITICAR, 1999; MAZZINI *et alii*, 2004). L'attività batterica che promuove l'ossidazione anaerobica del metano, insieme al processo di riduzione del solfato, è stata studiata su croste carbonatiche, *mound* e *thrombolite* (REITNER *et alii*, 2005). Nel mare Adriatico sono state osservate e studiate alcune fuoriuscite di gas legate a morfologie riconducibili a *pockmark*, *mud volcano* e *gas seepage* (CONTI *et alii*, 2002; GORDINI, 2009; GORDINI *et alii*, 2012) che sono frequentemente associate a croste carbonatiche.

In alcuni casi, il gorgogliamento diffuso del gas è stato relazionato a gas poco profondi intrappolati nel Pleistocene superiore e al di sotto della superficie Olocenica (TRINCARDI *et alii*, 2004; GARCÍA-GARCÍA *et alii*, 2007) mentre, in altri casi, è stata ipotizzata un'origine più profonda (MATTAVELLI *et alii*, 1983, 1992; DONDA *et alii*, 2015).

In questa breve nota vengono presentate le principali caratteristiche di tre casi studio, evidenziate da dati geofisici di alta risoluzione (profili CHIRP, *Side Scan Sonar* e *multibeam*) e da dati geochimici. Il primo è rappresentato da fuoriuscite di fluidi presenti nelle immediate vicinanze

di due gruppi di affioramenti rocciosi ubicati a circa 10 km di distanza dalla costa dell'Isola di Grado (indicato come "Campione gas" in fig. 3). Il secondo, presente sul fondale marino prospiciente il delta del fiume Tagliamento ad una distanza dalla costa di circa 19 km (indicato come "Bardelli" in fig. 3), è rappresentato da un gruppo di rocce dalla marcata morfologia frastagliata riconducibili a due tronconi principali. L'estensione massima risulta pari a 6300 metri quadrati. Le indagini geofisiche e le numerose immersioni subacquee eseguite hanno mostrato la presenza di abbondanti fuoriuscite di gas distribuite nell'intorno dell'affioramento ma anche in corrispondenza di fratture della roccia stessa (GORDINI, 2009; DONDA *et alii*, 2015; DONDA *et alii*, 2018).

Il terzo caso presentato (indicato come "D'Ancona" in fig. 3), è rappresentato da un gruppo di rocce presenti al largo della laguna di Venezia ad una distanza di circa 7,5 km dalle spiagge di Cavallino-Treporti. L'ammasso roccioso principale presenta un'orientazione preferenziale NNE – SSO con una marcata morfologia allungata e sinuosa per una superficie complessiva di 9400 metri quadrati. Anche in questo caso le indagini geofisiche realizzate hanno mostrato l'abbondante presenza di gas intrappolato all'interno dei sedimenti superficiali e locali deboli/intermittenti gorgogliamenti di gas associati alla presenza di numerose chiazze biancastre/grigiastre batteriche.

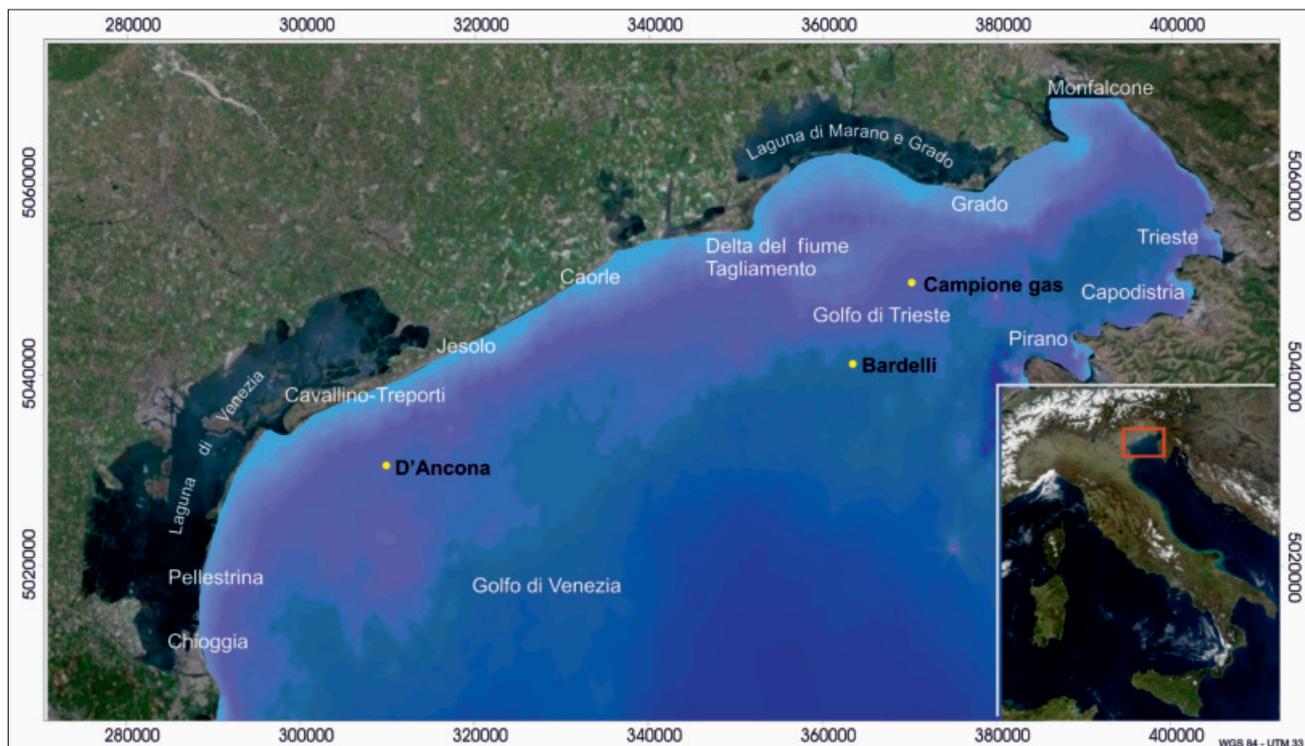


Fig. 3 – Mappa delle aree studiate nell'ambito di questo studio. In particolare, è indicata l'ubicazione del campione di gas prelevato in immersione ad analisi di laboratorio (Caso Studio 1), affioramento Bardelli (Caso Studio 2), Affioramento d'Ancona (Caso Studio 3).

- Location map of the studied areas. In particular, the location of the gas sample is shown (Case Study 1), Bardelli outcrop (Case Study 2), D'Ancona outcrop (Case Study 3).

2. - CASO STUDIO 1 – CAMPIONAMENTO E ANALISI CHIMICHE SUI GAS

Dalla letteratura scientifica dell'Adriatico settentrionale, più volte è emersa la presenza di orizzonti sedimentari che mostrano al loro interno quantità più o meno abbondanti di gas. Tale fluido, particolarmente evidente nelle proiezioni sismiche ad alta risoluzione, spesso è stato ricondotto geneticamente alla decomposizione della sostanza organica accumulata nei sedimenti dell'antica pianura alluvionale e ben documentata anche in studi realizzati in aree continentali e lagunari. Fino ad ora però mancava una caratterizzazione precisa e puntuale dei fluidi che fuoriescono in prossimità degli affioramenti rocciosi. In una prima campagna di campionamento subacqueo (GORDINI, 2009), sono stati realizzati tre campioni di gas prelevati in corrispondenza di fuoriuscite di fluidi presenti nelle immediate vicinanze di due gruppi di affioramenti presenti a circa 4 km di distanza dall'isola di Grado (indicati come "Campione gas" in fig. 3). L'area marina scelta, oltre ad evidenziare una forte concentrazione di affioramenti rocciosi di modeste dimensioni ed abbondanti fuoriuscite di gas attive osservabili in immersione (fig. 4C), presenta anche altre interessanti peculiarità che possono far pensare che i fenomeni di emissione di gas siano particolarmente importanti in questo tratto di mare: è stata infatti qui individuata la presenza di numerosi piccoli vulcani di sedimento (fig. 4A), aventi altezza pari a circa 2/3 cm e diametro 4/5 cm, particolarmente evidenti per il loro colore più scuro rispetto al sedimento circostante. Questa caratteristica è dovuta principalmente al trasporto di sedimenti più profondi e generalmente contraddistinti da un ambiente riducente, che avviene insieme ai fluidi che gorgogliano verso la superficie. Significative appaiono anche le numerose chiazze biancastre probabilmente legate all'attività batterica ad opera di colonie di *Archaea* e *Beggiatoa* (fig 4B) e dunque legate alle emanazioni di metano.

Il prelievo dei tre campioni di gas, eseguito in immersione, ha permesso di evidenziare che il gas è costituito prevalentemente da metano (81/84%), subordinatamente da azoto (15/18%) ed alcune tracce di ossigeno (0,7/1,3%).

3. - CASO STUDIO 2 - AFFIORAMENTO BARDELLI

La distribuzione areale di questo gruppo di rocce presenta un'orientazione preferenziale Est – Ovest con una morfologia frastagliata e riconducibile a due tronconi principali. L'estensione massima risulta pari a 250 m e larghezza massima pari a 90 m. La porzione centrale dell'affioramento ha morfologia circolare irregolare e molto frastagliata, con numerose ed ampie aree sabbiose alternate a

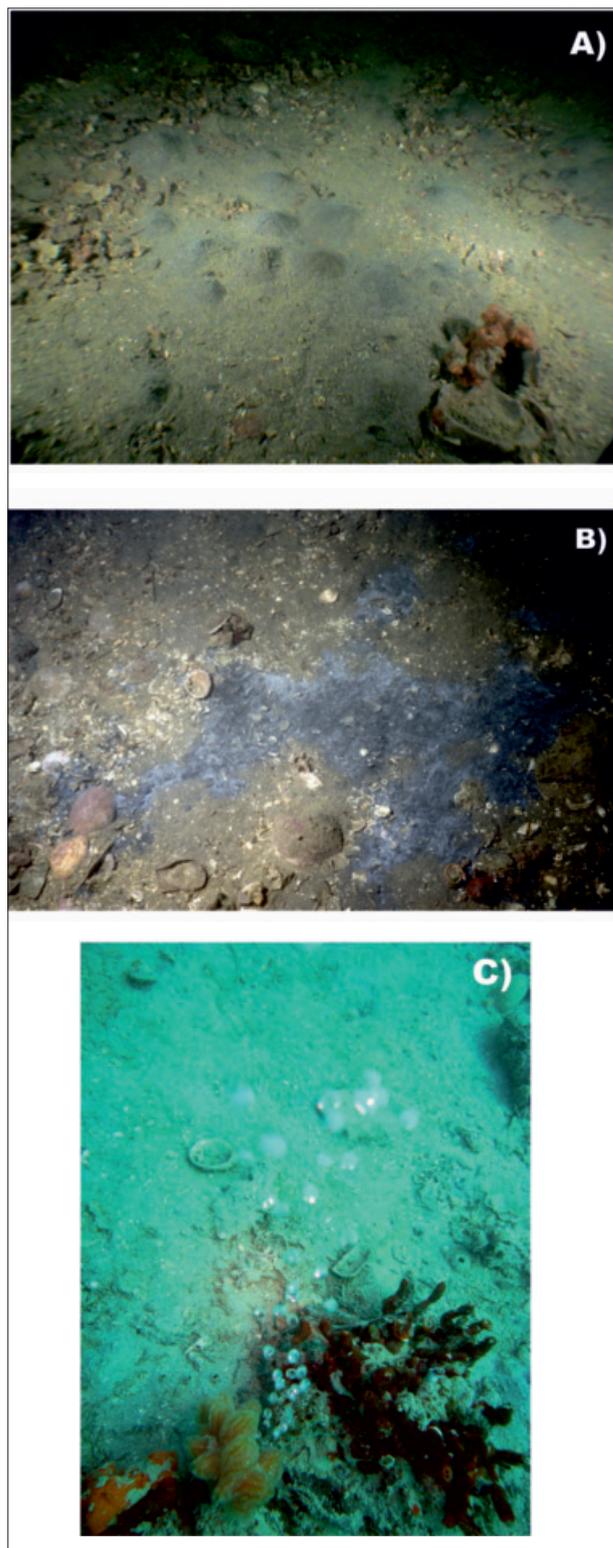


Fig. 2 – A) Piccoli vulcani di sedimento aventi altezza di alcuni centimetri, che vengono messi in risalto per il loro colore più scuro rispetto al sedimento circostante, individuati nelle vicinanze di alcuni affioramenti rocciosi in cui sono presenti abbondanti fuoriuscite di gas attive. B) Chiazze biancastre legate all'attività batterica ad opera di colonie di *Archaea* e *Beggiatoa* in presenza di emanazioni di metano. C) Abbondante gorgogliamento di gas osservabile in immersione.

- A) *Small-scale sediment volcanoes with a height of a few centimeters, and characterized by a darker color in respect with the surrounding sediment, they have been identified close to some rocky outcrops, where there are abundant gas seeps.* B) *White patches linked to bacterial activity of Archaea and Beggiatoa colonies in correspondence to methane seeps.* C) *Abundant bubbling of gas observable during the scuba diving.*

zone con blocchi/crostoni litoidi di varie dimensioni, separati da numerose e ben sviluppate fessure, da cui si individua il fondale sabbioso. Le dimensioni di tali spaccature sono pari a circa 0,2-0,3 m ed appaiono così ridotte e dalla geometria speculare lungo le cornici nette verticali dei blocchi rocciosi adiacenti, da far supporre che l'affioramento sia in realtà un unico blocco disarticolato. Dall'elaborazione e restituzione bidimensionale e tridimensionale dei dati multibeam acquisiti risulta che l'affioramento si sviluppa su di un fondale di profondità variabile tra -20,2 e -22,5 m (pendenza 4 ‰ circa). Il corpo roccioso di maggiore dimensione è caratterizzato da altezze massime nelle zone apicali pari a 1,2 m.

La successione sismo-stratigrafica superficiale (desunta da indagini *sub-bottom profiler* CHIRP) è contraddistinta da tre principali riflettori acustici che delimitano quattro sequenze deposizionali. L'unità acustica più profonda e quella centrale mostrano una geometria tabulare, interrotta localmente dalla diffusa presenza di gas. I corpi rocciosi evidenziano un limitato apparato radicale che porta ad interpretarli come "crostoni" di sabbia cementata, di spessore metrico, in parte sepolti dai sedimenti sabbiosi e sabbioso pelitici circostanti. Particolarmente significativa è la presenza di due ampi *plume* che si sviluppano lungo la colonna d'acqua, al di sopra degli affioramenti.

L'analisi della sezione lucida di un campione prelevato in immersione, permette di evidenziare la presenza di un livello sedimentario cementato di colore grigio, macroscopicamente costituito da gusci e frammenti di lamellibranchi e meno abbondanti gasteropodi. Le dimensioni dei bioclasti e dei gusci di individui interi, la cui disposizione non conferisce al deposito una struttura sedimentaria deposizionale predominante, sono valutabili da alcuni millimetri ad alcuni centimetri. I vuoti tra i gusci/frammenti conchigliari sono parzialmente riempiti sabbia medio-fine a matrice fangosa. Il limite superiore è rappresentato da una crosta centimetrica di materiale organogeno recente (probabilmente alghe calcaree, serpulidi, ecc.). Il campione studiato al microscopio petrografico risulta costituito prevalentemente da gusci e frammenti di lamellibranchi e gasteropodi (appartenenti rispettivamente alla famiglia delle Veneriidae e Cerithiidae) e alcuni foraminiferi del genere *Ammonia* sp. La componente organogena rappresenta circa il 65 % del campione, mentre il rimanente 35% è costituito da granuli terrigeni, matrice e cemento. All'interno dei vuoti fra i bioclasti è presente un cemento di tipo aciculare aragonitico, generalmente abbondante, ma anche "ad orlo costante" e a tessitura fibroso raggiata. L'analisi con diffrattometria ai raggi X evidenzia una notevole presenza di calcite (41,0 ‰), significativa abbondanza di aragonite (21,5 ‰) e subordinata dolomite (13,5 ‰), per quanto riguarda le fasi carbonatiche. Sono presenti inoltre minerali silicici come il quarzo (12,5 ‰), il plagioclasio – albite (2,5 ‰) ed il

feldspato – microclino (2,0 ‰), oltre alla presenza di una componente mafica rappresentata da miche (muscovite e biotite) ed argille con prevalenza di caolinite (per un totale di 8,2 ‰).

Le analisi isotopiche eseguite mostrano valori del $\delta^{13}\text{C}$ comprese tra -22.09 ‰ PDB e 24.07 ‰ PDB. Il solo cemento risulta molto negativo e pari a -49.80 ‰ PDB. Il $\delta^{18}\text{O}$ risulta pari a 0.14 ‰ PDB e 0.62 ‰ PDB.

4. - CASO STUDIO 3 - AFFIORAMENTO D'ANCONA

L'affioramento è rappresentato da un gruppo di rocce distribuite sul fondale marino del Golfo di Venezia che presenta un'orientazione preferenziale NNE – SSO con una marcata morfologia allungata e sinuosa di estensione massima pari a 600 m e larghezza massima pari a 35/37 m. Sono presenti essenzialmente due tronconi principali, distanti l'uno dall'altro circa 70 m e suddivisi da un'area pianeggiante sabbiosa in cui sono totalmente assenti blocchi e frammenti litoidi. Dall'elaborazione dei dati batimetrici multibeam risulta che l'affioramento si sviluppa su di un fondale di profondità variabile tra -19,4 e -20,6 m. Il fondale si presenta prevalentemente pianeggiante con locali approfondimenti. Gli *outcrops* di maggiore dimensione presentano altezze per lo più comprese tra 1,2 e 2,6 m rispetto al fondale circostante. I blocchi rocciosi di dimensioni minori e presenti nelle aree di transizione fra i blocchi principali mostrano un'ampia variabilità in altezza che può variare da 0,2 a 1,2 m.

L'indagine sismostratigrafica *sub-bottom profiler* CHIRP ha permesso di evidenziare che il radicamento del corpo roccioso è modesto e si può stimare essere non superiore a 1,0 m e comunque sviluppato all'interno del primo substrato sedimentario. Il tipo di risposta acustica del sottosuolo nell'intera area indagata mostra un andamento pressoché tabulare degli orizzonti presenti, con una stratificazione piano parallela, localmente articolata, di potenza variabile da decimetrica a metrica. Questa strutturazione del sottofondo viene spesso mascherata dalla presenza di aree contraddistinte dalla mancanza di segnale riflesso, alla cui sommità sono visibili riflettori più o meno continui di forte ampiezza (*bright spot*). Questa particolare facies è riconducibile all'abbondante presenza di gas all'interno dei sedimenti (GORDINI, 2009; DONDA *et alii*, 2018).

Il campione di roccia prelevato in immersione ed osservato in sezione lucida mostra la presenza di un livello basale di colore grigio, dello spessore di alcuni centimetri costituito da gusci e frammenti di lamellibranchi, gasteropodi e numerosi intraclasti fangosi di colore grigio scuro. I vuoti tra i gusci/frammenti conchigliari sono parzialmente riempiti da materiale terrigeno a granulometria medio-fine (sabbia). La porzione più superficiale è

costituita da una crosta pluricentimetrica-decimetica di materiale organogeno recente (alghe calcaree, serpulidi, ecc.).

In sezione sottile risulta evidente che il campione è costituito prevalentemente da gusci e frammenti di lamellibranchi e gasteropodi appartenenti rispettivamente al genere *Venus* sp., e *Bittium* sp. La componente organogena risulta mal classata e rappresenta circa il 67% del campione, mentre il rimanente 33% è costituito da granuli terrigeni (a basso grado di classazione), matrice e cemento. Il cemento risulta generalmente abbondante, spesso distribuito uniformemente sulle superfici dei granuli detritici e di quelli organogeni come cemento “ad orlo costante” ma anche con struttura aciculare e fibroso raggiata. I cristalli presentano un alto rapporto larghezza/lunghezza, tipico dell’aragonite. L’analisi XRD ha mostrato la presenza delle tre serie carbonatiche: calcite, dolomite ed aragonite con rispettivamente le percentuali di 9,3-11,8; 5,5-7,6 e 52,5-53,9 % del totale del campione. La roccia risulta poi costituita anche da quarzo (10,2-11,0 %), feldspati – microclino (2,5 %), plagioclasti – albite (2,7-3,9 %), miche (muscovite e biotite) ed argille con prevalenza di caolinite (per un totale di 13,0-13,6 %).

I risultati ottenuti dalle analisi isotopiche eseguite su un campione di roccia mostra valori del $\delta^{13}\text{C}$ pari a -17,36‰ mentre il solo cemento risulta molto negativo e compreso tra -38,00‰ PDB e -39,40‰ PDB. Il $\delta^{18}\text{O}$ risulta rispettivamente pari a -0,69‰ PDB e 1,21‰ PDB.

Recentemente sono stati effettuati dei campionamenti di gas sia in corrispondenza dei due affioramenti Bardelli e d’Ancona, sia in altre zone dell’Adriatico settentrionale, che hanno confermato la predominanza di metano biogenico quale componente principale delle emissioni gassose presenti nell’area (DONDA *et alii*, 2018).

BIBLIOGRAFIA

- CAMPBELL K.A. (2006) - *Hydrocarbon seep and hydrothermal vent palaeoenvironments and palaeontology: past developments and future research directions*. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, **232**: 362–407
- CONTI A., STEFANON A. & ZUPPI G.M. (2002) - *Gas seeps and rock formation in the northern Adriatic Sea*. Continental Shelf Research, **22**: 2333–2344.
- DONDA F., FORLIN E., GORDINI E., PANIERI G., BUENZ S., VOLPI V., CIVILE D. & DE SANTIS L. (2015) - *Deep-sourced gas seepage and methane-derived carbonates in the Northern Adriatic Sea*. Basin Research, **27**: 531–545.
- DONDA F., TINIVELLA U., GORDINI E., PANIERI G., VOLPI V., CIVILE D., FORLIN E., FACCHIN L., BURCA M., COVA A. & FERRANTE G.M. (2018) - *The Origin of Gas Seeps in the northern Adriatic Sea*. Italian Journal of Geosciences.
- GARCIA-GARCIA A., ORANGE D.L., MISEROCCHI S., CORREGGIARI A., LANGONE L., LORENSON T.D., TRINCARDI F. & NITTROUER C.A. (2007) - *What controls the distribution of shallow gas in the Western Adriatic Sea? Continental Shelf Research*, **27**: 359–374.
- GORDINI E. (2009) - *Integrazione di metodologie geofisiche, geomorfologiche, sedimentologiche e geochemiche per la definizione della genesi e dell’età degli affioramenti rocciosi presenti sul fondale marino dell’Adriatico settentrionale*. PhD Thesis. University of Trieste, Department of Geological, Environmental and Marine Science, 389 pp.
- GORDINI E., FALACE A., KALEB S., DONDA F., MAROCCO R. & TUNIS G. (2012) - *Methane-Related Carbonate Cementation of Marine Sediments and Related Macroalgal Coralligenous Assemblages in the Northern Adriatic Sea*. In: HARRIS P.T. & BAKER E.K. (Eds): “*Seafloor Geomorphology as Benthic Habitats*”, Elsevier, 183–198.
- MATTAVELLI L., RICCHIUTO T., GRIGNANI D. & SCHOELL M. (1983) - *Geochemistry and habitat of natural gases in Po Basin, Northern Italy*. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, **67**: 2239–2254.
- MATTAVELLI L., RICCHIUTO T. & MARTINENGI C. (1992) - *Deep isotopic light methane in Northern Italy*. In: Vially B. (Eds): “*Bacterial Gas*”, Editions Technip, 121–132, Paris.
- MAZZINI A., IVANOV M.K., PARNELL J., STADNITSKAIA A., CRONIN B.T., POLUDETkina E., MAZURENKO L. & VAN WEERING T.C.E. (2004) - *Methane-related authigenic carbonates from the Black Sea: geochemical characterization and relation to seeping fluids*. Marine Geology, **212** (1–4): 153–181.
- OLIVI G. (1792) - *Zoologia Adriatica*. Reale Accademia Scienze Lettere Arti, Bassano, 334 pp.
- ORPIN A.R. (1997) - *Dolomite chimneys as possible evidence of coastal fluid expulsion, uppermost Otago continental slope, southern New Zealand*. Marine Geology, **138**: 51–67.
- REITNER J., PECKMANN J., BLUMENBERG M., MICHAELIS W., REIMER A., THIEL V. (2005) - *Concretionary methane-seep carbonates and associated microbial communities in Black Sea sediments*. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, **227**: 18 – 30.
- TRINCARDI F., CATTANEO A., CORREGGIARI A. & RIDENTE D. (2004) - *Evidence of soft sediment deformation, fluid escape, sediment failure and regional weak layers within the late Quaternary mud deposits of the Adriatic Sea*. Marine Geology, **213**: 91–119.
- WHITICAR M.J. (1999) - *Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane*. Chemical Geology, **161**: 291–314.