

Analisi Green delle Microplastiche nella sabbia dei litorali italiani: una proposta di *Citizen Science*

Teresa Cecchi¹ e Davide Poletto²

¹ITT "G. e M. Montani" di Fermo; ²Venice Lagoon Plastic Free, Campo S. Cosmo di Venezia

e-mail: cecchi.teresa@istitutomontani.edu.it; segreteria@plasticfreevenice.org

Abstract. Microplastics are a dramatic emerging problem for human health and ecosystems. Since we cannot pollute to quantify pollution, during the Green Chemistry and Outreach course, taught to a fifth-grade class at ITT Montani in Fermo, we evaluated the impact and effectiveness of analytical strategies currently used to monitor microplastics in sand. We worked to substantially improve them using CLIL and Inquiry-Based Learning methodology. The citizen science campaign was made possible by cooperation with the non-governmental organization Venice Lagoon Plastic Free, which coordinated the field sampling campaigns and funded them entirely through the MICRO 1.0 and 2.0 projects. Finally, we engaged in outreach campaigns as part of the EU Ocean Mission activities.

Keywords: service learning; citizen science; chimica verde; educazione civica; scoperta guidata

1. Introduzione

Viviamo in un ambiente definito come "plastisfera" a causa della presenza ubiqua della plastica nelle nostre vite. Ci stiamo accorgendo che i suoi meravigliosi vantaggi, ovvero la durabilità e la resistenza, stanno diventando un drammatico problema. L'uso di plastica riciclata è aumentato del 70% dal 2018 [1], ma le plastiche di origine fossile, rilasciate nell'ambiente sin dal loro avvento, persistono e si accumulano. A causa dei raggi ultravioletti o delle temperature estreme tendono a frammentarsi con conseguente rilascio di vari additivi [1] e generazione di mesoplastiche e microplastiche (MP), che hanno, per definizione, una dimensione inferiore ai 5 mm [3] more precisely in the Venice-Lido Port Inlet, Grand Canal under Rialto Bridge, and Saint Marc basin. In this study, MPs were analyzed through optical microscopy for their relative abundance and characterized based on their color, shape, and size classes, while the concentration and the mean of nanoparticles were estimated via the Nanoparticle Tracking Analysis technique. Bulk seawater sampling, combined with filtration through a cascade of stainless-steel sieves and subsequent digestion, facilitates the detection of MPs of relatively small sizes (size classes distribution: >1 mm, 1000–250 µm, 250–125 µm, 125–90 µm, and 90–32 µm).

Le MP sono inquinanti emergenti onnipresenti nell'ambiente e addirittura negli organismi viventi: gli impatti per la salute umana e per quella degli ecosistemi sono preoccupanti [4].

Sono stati compiuti progressi significativi per mitigare l'inquinamento da MP attraverso (i) la restrizione dell'uso di MP primarie intenzionalmente prodotte, (ii) la prevenzione della generazione di MP secondarie, attraverso il divieto di articoli in plastica monouso, (iii) la promozione di articoli riutilizzabili non tossici e (iv) lo sviluppo di plastiche biodegradabili e a base biologica [5].

L'ambiente marino è il principale recettore finale di tutte le MP rilasciate nell'ambiente [2] e per questo è ampiamente studiato. Il monitoraggio ambientale ripetuto nel tempo e su aree molto vaste è fondamentale per documentare la contaminazione attuale e capire se, nel tempo, siamo di fronte a un accumulo o a una diminuzione dell'inquinamento da MP statisticamente significativo. A questo proposito, la *citizen science*, cioè la costruzione di dati scientificamente solidi grazie alla partecipazione dei cittadini, è una risorsa cruciale. A oggi è stata determinante solo nella fase

del campionamento [6] delle MP in ambienti marini. Ciò è dovuto alle difficoltà tecniche della successiva fase analitica. Viceversa, le competenze teoriche e tecniche dei discenti dell'articolazione di Chimica e Materiali, rispetto a quelle del comune cittadino, permettono di sviluppare sia le fasi preanalitiche che analitiche nella determinazione delle MP. Le studentesse e gli studenti, sotto la supervisione dei loro insegnanti, possono essere essenziali per ampliare le capacità di ricerca e fornire un monitoraggio ambientale su base nazionale. Un'attività del genere si inquadra nella cornice pedagogica del Service Learning promossa da Ministero dell'Istruzione e del Merito (<https://www.mim.gov.it/service-learning>): l'apprendimento basato su progetti di utilità sociale e compiti di realtà sviluppa il talento mediante il coinvolgimento nel perseguire obiettivi di interesse comune.

Attualmente mancano metodi analitici standardizzati per valutare le concentrazioni di MP in vari compartimenti ambientali; ne consegue che i risultati in letteratura sono incoerenti e non confrontabili [7]. Inoltre, la scarsità di campagne di monitoraggio delle MP su vaste aree geografiche ostacola una comprensione completa del problema.

Presso L'Istituto Tecnico e Tecnologico "G. e M. Montani" di Fermo, da tre anni è stato istituito il corso di *Green Chemistry and Outreach*. Lo scopo è stimolare l'adozione di pratiche analitiche e sintetiche, ispirate ai 12 principi della chimica verde, e sviluppare la capacità di interagire con la società civile, trattando le cogenti sfide contemporanee come ottimi spunti di apprendimento. Nel corso, come metodologie didattiche, si utilizzano il CLIL, per favorire il multilinguismo necessario nel mondo scientifico e l'*Inquiry Based Learning (IBL)*, per porre studenti e studentesse al centro del processo formativo, stimolando la curiosità e il pensiero critico, la capacità di indagine autonoma, la sperimentazione per risolvere problemi reali e costruire attivamente la propria conoscenza. Il corso, unico in Italia, valorizza un insegnamento *research oriented* secondo il modello della Ricerca-Azione Partecipata, un approccio alla produzione della conoscenza che cerca di capire il mondo e trasformarlo [8]. Convinti che la *citizen science* permetta l'apprendimento significativo e un servizio alla società e rappresenti un'enorme risorsa per l'urgente necessità di ricerca nel campo dell'analisi delle MP, si è costruita un'unità di apprendimento estremamente motivante. Abbiamo intrecciato Green Chemistry ed Educazione Civica: il problema scientifico complesso può diventare, infatti, un'opportunità per formare cittadini consapevoli, responsabili e attivi; per questo sono state anche progettate attività di disseminazione e comunicazione a vari livelli.

Di seguito è descritto lo scenario di apprendimento costruito per la determinazione delle MP nella sabbia di un'oasi del WWF a Venezia: dopo un brainstorming iniziale, partito da domande stimolo che hanno scandito le varie fasi del percorso didattico, durato per l'intero anno scolastico, la classe è stata guidata a realizzare un processo analitico più logico e più "verde" di quelli disponibili nella letteratura.

2. Brainstorming e IBL

Le attività sono iniziate mettendo le studentesse e gli studenti di fronte al problema ambientale descritto nell'Introduzione e chiedendo loro di documentarsi per poter partecipare nel miglior modo possibile alla fase di brainstorming. Sono stati indicati e forniti i riferimenti bibliografici più recenti sulle varie procedure analitiche. L'esame critico delle metodiche esistenti nella letteratura scientifica internazionale ha permesso di evidenziare che le procedure sono variegiate, ma quasi tutte/i condividono la proposta presente in una pubblicazione della National Oceanic and Atmospheric Administration [9].

È stata sottolineata la mancanza di protocolli ufficiali e la lacuna legislativa, a livello europeo e mondiale, circa i limiti di concentrazione tollerabili per le MP in vari comparti ambientali.

Si è preso atto dei limiti delle varie procedure o in termini di efficacia o in termini di *greenness*, cruciale nel contesto educativo scolastico e culturale nel senso più ampio.

L'obiettivo condiviso ha riguardato lo sviluppo di una strategia analitica efficace, ma al tempo stesso

non inquinante, per misurare l'inquinamento da MP e la sua applicazione in una campagna pilota di *citizen science*. La campagna è stata sviluppata grazie alla cooperazione con Venice Lagoon Plastic Free (VLPF), un'organizzazione no-profit fondata nel 2019 che utilizza il sito Patrimonio Mondiale UNESCO di Venezia e della sua Laguna, come laboratorio per la prevenzione, il monitoraggio e la mitigazione dell'inquinamento da plastica. VLPF ha coordinato l'intera iniziativa MICRO1.0 e 2.0 (Microplastics Investigation for Comprehensive Research and Observation), definendo il disegno sperimentale, selezionando i siti rappresentativi e finanziando le attività sul campo grazie al supporto di IMG Group.

Prima domanda stimolo: Come svolgere un campionamento efficiente e rappresentativo?

L'Oasi Alberoni del WWF nel Lido di Venezia è il sito di campionamento prescelto per il valore simbolico della natura incontaminata. L'associazione Venice Lagoon Plastic Free ha interamente finanziato la campagna di campionamento delle MP iniziata il 15 novembre 2024, in condizioni di mare calmo, assenza di precipitazioni e bassa marea, a cui hanno partecipato le studentesse e gli studenti della classe 5CMA. VLPF ha curato l'intera organizzazione logistica: il coordinamento con le autorità locali, le autorizzazioni per operare nell'Oasi, il trasporto e la conservazione dei campioni, e il collegamento con i media e le istituzioni del territorio. L'approccio integrato ha previsto, parallelamente al campionamento delle microplastiche, il monitoraggio del macrolitter spiaggiato, mediante strumenti digitali sviluppati da VLPF nell'ambito dei progetti Horizon Europe delle missioni Oceano REMEDIES e SeaClear2.0, consentendo la classificazione codificata, la conta e la pesatura dei rifiuti secondo gli standard EMODnet.

L'estensione dell'area da campionare è stata scelta come compromesso fra la rappresentatività e una operatività ragionevole. Sono stati svolti dei calcoli temporali. Volendolo terminare l'attività in circa 3 ore al massimo, si è proposto un campionamento a telaio in tre posizioni equidistanti 5 m l'una dall'altra sulle linee di bassa marea, intertidale e alta marea, lungo cinque transetti ortogonali alla battigia, distanti 25 m l'uno dall'altro. In questo modo, è stato possibile campionare 15 posizioni e 1.000 m² di spiaggia (Figura 1). In ogni posizione, la sabbia è stata prelevata ai vertici e al centro di un quadrato di 50 cm per 50 cm, fino a una profondità di 5 cm, utilizzando un cucchiaino di acciaio inossidabile. Quindi in totale la sabbia è stata prelevata in 75 punti.

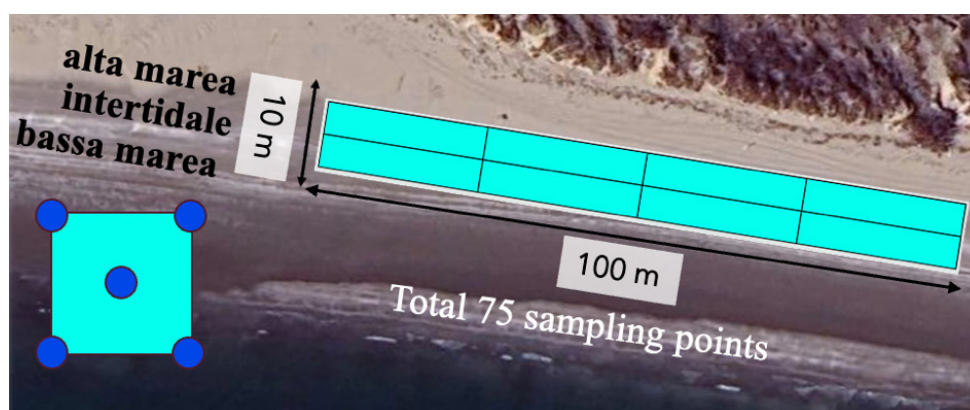


Figura 1. Sito di campionamento, quadro di campionamento con 15 punti di campionamento e quadrato con 5 punti di campionamento

Si è, inoltre, discussa l'importanza di avere un campione composito, per cui si è deciso di unire la sabbia di tutti i punti campionati nella linea di bassa marea mescolandola in un contenitore di vetro con tappo metallico a vite; la stessa procedura è stata ripetuta per la linea di battigia e la linea intertidale; i contenitori sono stati trasferiti in laboratorio e conservati a 4 °C prima dell'analisi.

Seconda domanda stimolo: Quali precauzioni dobbiamo prendere per evitare che il campione si contamini con MP provenienti dal laboratorio?

Poiché le MP sono ubiquo e anche presenti nell'aria indoor abbiamo cercato di capire come evitare la contaminazione dei campioni durante il loro processamento laboratoriale.

Prima di qualsiasi operazione, le superfici di lavoro sono state pulite con acqua ultra-pura filtrata Milli-Q (0,45 μm). La vetreria da laboratorio è stata lavata in lavastoviglie e asciugata in un forno. Tutti i camici indossati sono stati in cotone. Il tempo di esposizione dei campioni all'aria è stato limitato il più possibile. I contenitori di vetro sono sempre stati coperti.

L'esperimento è stato eseguito in triplicato e per la correzione dei risultati è stato utilizzato un controllo negativo in bianco, contenente la sabbia campionata posta a 700 °C in muffola per un giorno ed usando tutti i reagenti come per il campione. In questo modo si è tenuto conto della contaminazione residua ineliminabile anche prendendo tutte le precauzioni.

Terza domanda stimolo: A quale temperatura è bene essiccare la sabbia?

La domanda permette di recuperare concetti della chimica dei polimeri, familiari per studentesse e studenti del quinto anno. Anche se autorevoli rapporti tecnici raccomandano una temperatura di asciugatura elevata, fino a 90 °C [10], si è discusso su quale potesse essere la temperatura di essiccazione ottimale per evitare la degradazione dei polimeri termoplastici: si è scelto di essiccare a 40 °C tenendo conto della transizione vetrosa del nylon [11], la più bassa fra quelle dei comuni polimeri.

Quarta domanda stimolo: Come isolare le MP dalla sabbia con un metodo efficiente ma rispettoso dell'ambiente e della salute?

La prima ipotesi proposta è stata la setacciatura della sabbia, ma subito è stata scartata data la simile dimensione dei granelli di sabbia e delle MP. Si è presto intuito che le densità delle MP e della sabbia sono ben diverse, per cui in una soluzione avente una densità superiore a quella delle MP, ma inferiore a quella delle particelle inorganiche (granelli di sabbia e frammenti di conchiglie), le MP galleggiano, mentre le altre precipitano nel fondo del contenitore. Poiché il galleggiamento sulla base del principio di Archimede è un fenomeno studiato anche nella scuola secondaria di primo grado ed è uno dei fenomeni esplorati fin dall'infanzia, questo esperimento si presta molto bene ad eventi di *Outreach* dedicato a bambine e bambini.

Un gruppo di studenti ha, dunque, ricercato le densità dei polimeri più comuni: tutti, tranne il PTFE, dovrebbero galleggiare in una soluzione la cui densità è pari o superiore a 1,45 g/ml [12] so-called microplastics (particle size, 1–5,000 μm , mentre la sabbia, la cui densità è di circa 2,65 g/ml, dovrebbe affondare. Si è, però, anche trovato che la densità finale della plastica può differire da quella del polimero a causa degli additivi (plastificanti, stabilizzanti UV, pigmenti e riempitivi) o per modifiche ambientali dovute ai raggi UV, biofouling e adsorbimento di minerali [13].

Un altro gruppo di studenti ha invece ricercato i soluti da considerare per avere soluzioni ad alta densità. Dallo screening basato solo sulla densità si è passati a considerare la sicurezza ed eventuali interazioni con gli analiti (ad es., depolimerizzazione delle MP) o con gli altri comuni reattivi (ad es., l'acqua ossigenata che si usa per rimuovere la materia organica). La figura 2 presenta 19 soluzioni in ordine di densità crescente con le principali limitazioni associate a ciascun specifico soluto.

Quindi, la soluzione ideale dovrebbe:

- avere una densità di almeno 1,45 g/ml
- non presentare alcun rischio per gli organi interni (sicurezza per l'operatore)
- non creare alcun danno all'ambiente acquatico
- non reagire con H_2O_2 , utilizzata per rimuovere la materia organica
- non avere un pH basso (poliammidi possono depolimerizzare)
- non avere un pH elevato (poliesteri possono depolimerizzare)
- non presentare una viscosità elevata
- avere caratteristiche di economicità

Saturated solutions	D (g/ml)	Pictogram
Sodium Chloride	1.2	
Sodium hexametaphosphate	1.3	
Calcium Chloride	1.4	
Sucrose	1.45	⚠
Iron (III) Chloride	1.5	⚠ ⚠
Calcium Nitrate (1€/kg)	1.50	⚠ ⚠
Xylitol	1.50	
Potassium Formate (90€/kg)	1.57	
Sodium Silicate	1.6	⚠ ⚠ ⚠
Zinc Chloride	1.6-1.7	⚠ ⚠ ⚠
Sodium Iodide	1.6	⚠ ⚠ ⚠
Potassium Iodide	1.7	⚠
Calcium/Strontium Bromide (320€/kg)	1.8	⚠
Cesium Chloride	1.90	⚠
Zinc Bromide	1.99	⚠ ⚠ ⚠
Cesium Iodide	2.4	⚠ ⚠
Cesium Formate	2.4	⚠ ⚠
Potassium Carbonate	2.43	⚠
Sodium/Cesium tungstate (800€/kg)	2.8	⚠

Figura 2. Possibili soluti in grado di fornire mezzi di separazione ad alta densità, classificazione di pericolo e il pittogramma (Regolamento (CE) n. 1272/2008): i soluti sono disposti in ordine di densità crescente e sono evidenziati in rosso, se procurano danno agli organi, in giallo, se sono potenzialmente pericolosi a livello di pH a causa dell'idrolisi del polimero o della reazione con il perossido di idrogeno, in marrone, se la viscosità è troppo elevata; in arancione è riportato il costo, quando troppo elevato

Alla luce di questi requisiti si sono studiati criticamente i metodi generalmente applicati nella letteratura scientifica per permettere il galleggiamento delle MP.

Il cloruro di sodio è uno dei soluti più utilizzati [14] perché è economico, non pericoloso e rispettoso dell'ambiente. Tuttavia, tutte le MP con densità superiore a 1,2 g/ml, incluso il PET ampiamente diffuso, non verrebbero recuperate. Allo stesso modo, le densità delle soluzioni di esametafosfato di sodio e cloruro di calcio non danno densità sufficienti. Si sono, dunque, evidenziate le conseguenze dell'uso delle soluzioni con densità non sufficientemente alte: le MP verrebbero sottostimate.

Il cloruro di zinco è il sale prevalente utilizzato [13] per garantire un elevato recupero di MP; il politungstato di sodio, nonostante sia molto costoso, è raccomandato perché anche il polimero più denso, ovvero il PTFE, potrebbe galleggiare nella sua soluzione. Però, dato che questo polimero è presente nelle MP in minima percentuale e che entrambi questi sali minacciano la vita acquatica con effetti di lunga durata, il loro utilizzo è da escludere.

L'analisi della letteratura ha, quindi, rafforzato l'idea che si potesse incrementare la *greenness* della procedura e questa consapevolezza ha reso le successive attività particolarmente motivanti.

Il cloruro di ferro (III) non è stato considerato un soluto adatto a causa del pH acido delle sue soluzioni, che potrebbe depolimerizzare le poliammidi. Il carbonato di potassio è stato utilizzato nella valutazione delle MP nella sabbia, ma lo ione carbonato è fortemente basico e il pH alcalino della soluzione potrebbe depolimerizzare i poliesteri. Diversi ioduri e bromuri potrebbero reagire con il perossido di idrogeno, necessario per ossidare la sostanza organica residua; pertanto, non possono essere utilizzati. Inoltre, il loro impiego comporterebbe ulteriori problematiche tossicologiche e ambientali. L'elevatissima viscosità delle soluzioni di silicato di sodio, xilitolo e saccarosio impedisce alle

MP di galleggiare in tempi ragionevoli. Infine, la soluzione di formiato di potassio può reagire vigorosamente con H_2O_2 , per cui non può essere utilizzato.

Alla fine dell'analisi, il nitrato di calcio è stato considerato il miglior soluto per la separazione in base alla densità. In un'ottica di economia circolare, il nitrato di calcio può essere ottenuto tramite la neutralizzazione degli effluenti della produzione di acido nitrico; inoltre, gli ioni calcio e nitrato svolgono ruoli biologici essenziali tanto che il nitrato di calcio è un fertilizzante. Inoltre, il suo smaltimento non presenta particolari problemi. La sabbia a contatto con soluzioni di nitrato di calcio, una volta risciacquata correttamente, può essere restituita in sicurezza all'ambiente e la soluzione può essere riutilizzata.

Una volta scelto il sale, due studentesse hanno preparato una sua soluzione ad alta densità e misurato la densità effettiva a 20°C mediante un picnometro.

Si è operato in triplicato su campioni compositi (500 g) ottenuti mescolando quantità uguali di sabbia essiccata e setacciata (con setacci aventi una porosità di 5 mm), proveniente dalla linea di alta marea, dalla linea intertidale e dalla linea di bassa marea; si sono provati diversi rapporti fra il campione di sabbia e la soluzione; considerata la quantità di liquido che imbibisce la sabbia, 1000 ml di una soluzione satura di nitrato di calcio sono stati sufficienti per 500 g di campione composito; sono stati mescolati per 30 min in un becher, poi la miscela è stata lasciata a riposo per tutta la notte in modo da consentire la sedimentazione della sabbia. Il surnatante è stato, infine, accuratamente pipettato in una bottiglia di vetro avendo cura di sciacquare le pareti del becher con una soluzione satura di nitrato di calcio per rendere quantitativo il trasferimento.

Quinta domanda stimolo: Come evitare che materiale biotico potenzialmente galleggiante possa essere confuso con le MP?

La sabbia proviene da un ecosistema e, pertanto, può contenere materiale biotico (cellule vegetali o animali) che può galleggiare in una soluzione ad alta densità, interferendo con l'analisi delle MP. Lo studio della letteratura scientifica ha permesso di notare la variabilità delle strategie adottate per limitare tali interferenze.

Alcuni autori usando la digestione acida della miscela con acido nitrico concentrato bollente o idrossido di sodio concentrato [15] non è stata considerata appropriata, perché alcuni polimeri vengono danneggiati o idrolizzati da questi trattamenti [16] e perché la procedura è pericolosa.

Altri autori trattano la miscela ottenuta con perossido d'idrogeno. Ragionando sul buon potere ossidante dell'acqua ossigenata e constatato che il prodotto della sua riduzione è l'innocua l'acqua, e che, data l'esotermicità della reazione di ossidazione, non sono necessari apporti energetici esterni, si è inserita nella procedura una fase ossidativa, per aumentare la selettività del metodo, utilizzando dunque il perossido d'idrogeno. Sono stati, quindi, aggiunti 100 ml di H_2O_2 al 30% m/m alla miscela contenente le MP; la bottiglia è stata coperta con un foglio di alluminio e la vigorosa ossidazione della materia organica è stata monitorata visivamente fino a quando la miscela, inizialmente torbida, è diventata incolore e trasparente; ci sono voluti tre giorni a temperatura ambiente. Per assicurarsi che l'ossidazione fosse quantitativa, dopo tre giorni sono stati aggiunti altri 10 ml di H_2O_2 al 30% m/m per valutare eventuali ulteriori reazioni.

Sesta domanda stimolo: Come quantificare correttamente le MP?

Considerando che la dimensione delle MP è molto rilevante nei confronti della loro tossicità e mobilità ambientale, è necessario quantificare le MP appartenenti a specifiche classi dimensionali. Molti metodi in letteratura o non distinguono le classi dimensionali di MP o misurano la loro dimensione al microscopio, ma tale procedura è suscettibile di soggettività ed errori. Far passare la miscela contenente le MP attraverso una serie di setacci con porosità di 1000, 300 e 100 μm è stata considerata la procedura migliore per ottenere la suddivisione oggettiva delle MP in varie classi dimensionali. Ciascun setaccio è stato risciacquato e ogni retentato è stato trasferito con acqua ultra-pura alla filtrazione sottovuoto su un filtro in nitrocellulosa Whatman (diametro 47 mm, porosità 0,45 μm) alloggiato in un kit di filtrazione in vetro. Ciascun filtro con il relativo retentato (di una specifica classe dimensionale) è stato conservato in una capsula di Petri di vetro coperta e lasciato asciugare a

temperatura ambiente per 24 ore, per la successiva osservazione e conta delle MP di quella specifica classe dimensionale.

La stereomicroscopia è un semplice e diffuso strumento per contare le MP in ciascuna classe dimensionale e classificarle in base alla forma (filamento/fibra, frammento, pellet/perline/granuli, pellicola, schiuma) e al colore (incolore, bianco, nero e colorato).

Nella Tabella 1 sono riportati i risultati medi e le deviazioni standard.

Tabella 1. Risultati medi espressi in MP/kg (3 repliche) e deviazioni standard ottenuti con la soluzione saturata di $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ come mezzo galleggiante

Classe dimensionale	Fibre	Frammenti	Film	Pellet	Spugna	Totali
1000-5000 μm	29 \pm 8	29 \pm 9	0	0	0	59
300-1000 μm	39 \pm 10	26 \pm 8	1 \pm 1	6 \pm 2	0	72
100-300 μm	42 \pm 11	31 \pm 9	4 \pm 1	11 \pm 4	0	88
Totale	110	87	5	17	0	219

L'abbondanza totale di MP per tutte le classi di dimensioni è di 219 MP/kg. Rispetto ai risultati più recenti che presentano migliaia di MP/kg in Malesia [17], Galapagos [18] ed Ecuador [19], quelli ottenuti in questo studio sono incoraggianti. Sono, comunque, leggermente superiori a quelli trovati nella Riserva della Biosfera delle Mangrovie UNESCO di Can Gio in Vietnam (da 31,99 a 92,56 MP/kg), anche se in quel caso il sale di separazione della densità era NaCl, quindi non tutti gli MP potevano essere stimati [20].

Le fibre sono le MP più abbondanti e la figura 3 ne mostra una (riconosciuta al microFTIR come poliammide).

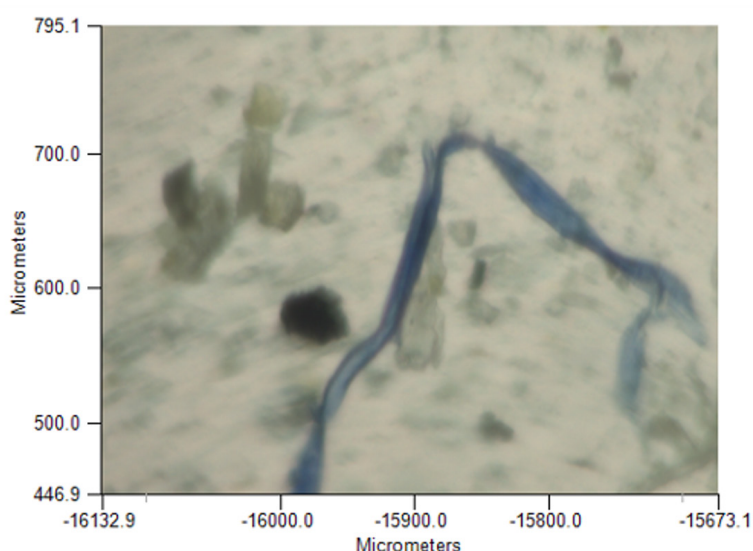


Figura 3. Esempio di fibra sintetica

Le MP classificate e quantificate possono essere ulteriormente analizzate tramite metodi strumentali più sofisticati. Attualmente stiamo lavorando sulla caratterizzazione dei polimeri delle MP, attività

che difficilmente può essere effettuata in altri istituti, dato che necessita dello spettrofotometro FTIR e possibilmente del microFTIR.

Il colore delle MP è importante perché influenza la possibile reazione delle specie marine. Occorre ricordare che, nell'ambiente, gli agenti atmosferici e l'invecchiamento naturale (che comprende i processi di fotoinvecchiamento, termoinvecchiamento, invecchiamento biologico e meccanico) possono modificare l'aspetto delle materie plastiche, ma la maggior parte di esse sono nere o blu.

La Figura 4 mostra sia il flusso di lavoro preanalitico che quello analitico, seguiti nel presente studio.

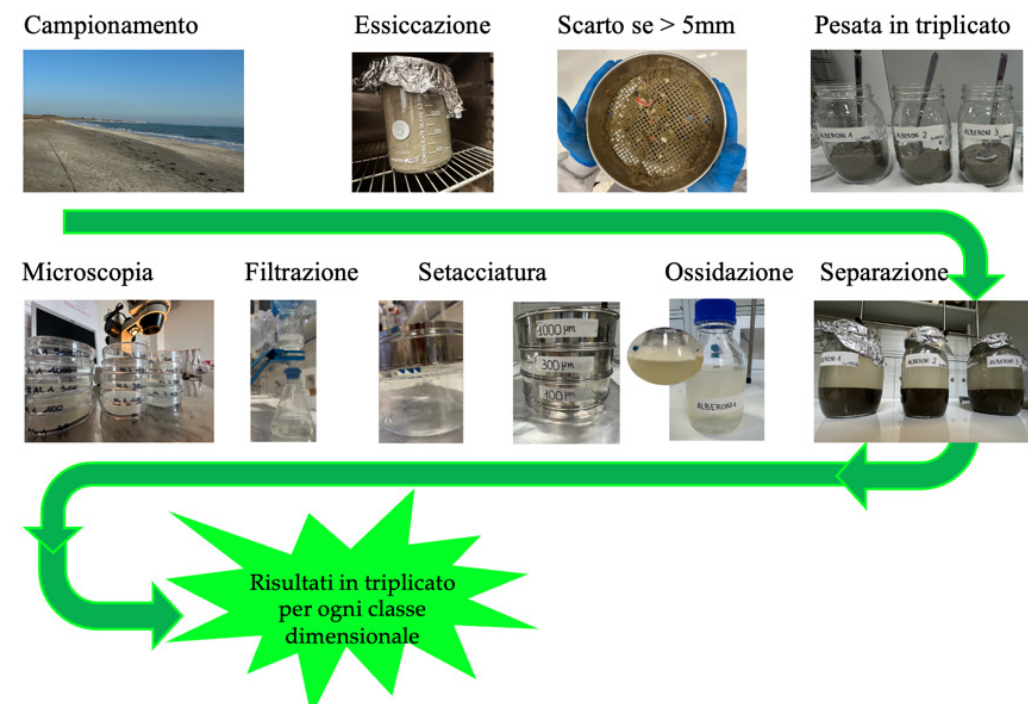


Figura 4. Flusso di lavoro preanalitico e analitico

Settima domanda stimolo: Come quantificare l'aderenza ai 12 Principi della Chimica Verde di questo protocollo innovativo?

Abbiamo valutato le varie metriche della chimica verde. La metrica AGREE è la più adatta, perché specifica per l'ambito analitico. Utilizzando il programma disponibile abbiamo costruito la Figura 5, che illustra l'aumento del punteggio AGREE [21] "ISSN": "15206882"; "abstract": "Green analytical chemistry focuses on making analytical procedures more environmentally benign and safer to humans. The amounts and toxicity of reagents, generated waste, energy requirements, the number of procedural steps, miniaturization, and automation are just a few of the multitude of criteria considered when assessing an analytical methodology's greenness. The use of greenness assessment criteria requires dedicated tools. We propose the Analytical GREENness calculator, a comprehensive, flexible, and straightforward assessment approach that provides an easily interpretable and informative result. The assessment criteria are taken from the 12 principles of green analytical chemistry (SIGNIFICANCE (da 0,66 a 0,81) in seguito della sostituzione di $ZnCl_2$ con $Ca(NO_3)_2$. L'aumento è dovuto principalmente all'assenza di tossicità per l'operatore e per la vita acquatica del nitrato di calcio. Le soluzioni utilizzate per la separazione in base alla densità possono, inoltre, essere recuperate sul fondo della cascata di setacciatura, ricostituite fino alla densità appropriata, rinfiltrate e riutilizzate, per ridurre drasticamente l'acquisto di sali e la generazione di rifiuti, aumentando così la sostenibilità della procedura.

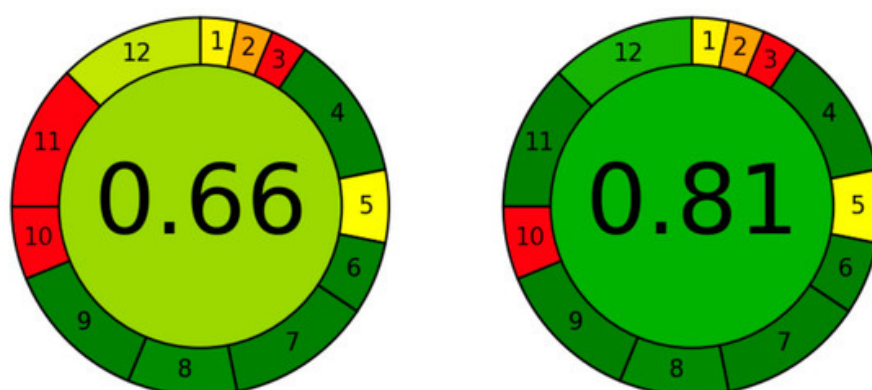


Figura 5. Punteggi di sostenibilità ambientale AGREE per ZnCl_2 (sinistra) e $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (destra) come sali per ottenere soluzioni adatte per separazione in base alla densità; il pittogramma circolare a 12 segmenti con codifica a colori mostra l'impatto ambientale dei metodi analitici; i colori passano dal rosso (non ecologico/cattivo) al verde scuro (completamente ecologico/buono)

Ottava domanda stimolo: Come massimizzare l'impatto educativo di questa attività a livello scolastico e sulla società?

Il progetto didattico proposto è stato sviluppato a stretto contatto con Venice Lagoon Plastic Free, un'organizzazione non governativa veneziana che dal 2019 opera come catalizzatore di iniziative di citizen science, monitoraggio ambientale e blue circular economy nella Laguna di Venezia, Patrimonio Mondiale UNESCO. VLPF ha sviluppato soluzioni digitali per il monitoraggio dei rifiuti marini, nell'ambito dei progetti europei Horizon Europe REMEDIES e SeaClear2.0, e ha consolidato una rete di collaborazioni con istituti di ricerca, enti locali e partner internazionali. L'incontro fra le competenze chimico-analitiche dell'ITT Montani e la capacità operativa e progettuale di VLPF ha generato un modello replicabile di *Citizen Science* esperta, in cui la raccolta di dati scientificamente solidi si accompagna alla formazione dei giovani e alla sensibilizzazione della società civile.

L'educazione civica centrata sullo studio della Costituzione può mettere a fuoco gli aspetti cruciali legati alla sostenibilità, alla salute delle persone e degli ecosistemi e alla legalità. Le MP rappresentano un caso perfetto di minaccia al "bene comune". La decisione di agire anche a livello legislativo (ad es., bando delle MP dai cosmetici, limiti di concentrazione nelle acque potabili, tassazioni/incentivi) richiede scelte collettive. La consapevolezza circa la presenza e la pericolosità delle MP mostra che la raccolta differenziata, un dovere civico, non basta, perché la plastica si degrada e genera MP.

La *Citizen Science* è intrinsecamente una potente azione di educazione civica per il coinvolgimento attivo nella ricerca scientifica dei cittadini, i quali mettono a disposizione il loro tempo ed impegno e, nel caso degli studenti e studentesse di chimica, anche la loro competenza disciplinare. La rete degli istituti tecnici e tecnologici, in questo contesto, riveste un potenziale ruolo cruciale: se, utilizzando un kit di campionamento standardizzato, sotto la supervisione esperta dei loro docenti, studentesse e studenti di chimica in tutta Italia svolgessero una singola campagna di campionamento ed analisi delle MP (anche mediante il diffuso stereomicroscopio), si potrebbe ottenere un formidabile set di dati analitici e un alto impatto sociale. I risultati possono consentire una valutazione comparativa dell'influenza dei diversi stili di vita sull'inquinamento da plastica. Dai risultati analitici deve sorgere una domanda: Chi è responsabile delle MP che abbiamo trovato? Dalla risposta deve nascere l'educazione civica che veicola la consapevolezza ambientale e possibilmente un cambiamento comportamentale, secondo la strategia delle 4R (Ridurre, Riutilizzare, Riciclare, Recuperare).

In questo contesto l'Outreach è cruciale per rendere la cittadinanza capace di comprendere i dati scientifici e l'importanza del cambio di stile di vita verso scelte in linea con la sostenibilità. Per raggiungere tale obiettivo sono stati preparati alcuni interventi importanti in vari Festival Scientifici, in

rassegne teatrali, in eventi di ludicizzazione della chimica dedicati ai più piccoli. Attualmente, la nostra proposta di Outreach, selezionata nell'ambito del Progetto del Ministero della Cultura e del Ministero dell'Istruzione e Merito "Cinema ed Immagini per la Scuola", sta diventando un Cortometraggio dedicato alla sensibilizzazione verso questa tematica.

Nona domanda (per il/la docente): Come valutare gli apprendimenti?

La valutazione ha accompagnato tutto il percorso didattico.

Per quanto riguarda la valutazione formativa si è usata una griglia osservazionale con indicatori precisi:

- Partecipazione al brainstorming e qualità delle domande e delle proposte
- Rigore nella progettazione sperimentale
- Partecipazione, coordinazione, capacità di lavorare in team durante la fase outdoor di campionamento, attività di laboratorio ed esperienze di outreach
- Competenza pratica ed attenzione alla sicurezza
- Competenza nella raccolta dei dati, discussione critica dei risultati nell'ottica del miglioramento
- Chiarezza e creatività nella comunicazione
- Competenze nel videomaking scientifico e nell'uso dell'AI per la musica

Oggetto della valutazione sommativa è stata, invece, una relazione critica circa le attività laboratoriali e gli aspetti teorici alla base della procedura costruita (relativi al valore statistico del dato analitico, alla chimica dei polimeri, ai metodi separativi etc.).

Al fine di favorire l'attitudine all'autoapprendimento le attività sono state ulteriormente elaborate per redigere Capolavoro per il Curriculum dello Studente.

Infine, per la diffusione della buona pratica nella comunità scientifica i risultati completi sono stati messi a disposizione mediante una pubblicazione scientifica [22].

3. Ulteriori sviluppi: MICRO2.0, la campagna 2025 a Sant'Alvise e Isola della Certosa

Il successo di MICRO1.0 ha naturalmente condotto alla seconda edizione dell'iniziativa: MICRO2.0, Microplastics Investigation for Comprehensive Research and Observation. Questa edizione si è svolta il 13 e 14 novembre 2025 e ha ampliato significativamente la portata della campagna pilota, coinvolgendo 23 studenti e studentesse di chimica dell'ITT Montani, sotto la supervisione di due docenti di chimica e con il coordinamento operativo di VLPF.

A differenza della prima edizione, limitata a un solo sito (l'Oasi Alberoni al Lido), MICRO2.0 ha interessato due aree della Laguna nord-orientale: la Secca di Sant'Alvise, nel centro storico di Venezia, e l'Isola della Certosa. Il disegno di campionamento ha seguito lo stesso protocollo verde messo a punto nel primo anno, impiegando nitrato di calcio come mezzo di separazione per densità e perossido di idrogeno per la digestione della materia organica.

A Sant'Alvise sono stati raccolti 40 campioni ambientali (5 campioni × 4 stazioni × 2 linee parallele alla battigia) su un'area di circa 300 m². A Certosa, la griglia di campionamento è stata estesa a 75 campioni (5 campioni × 5 stazioni × 3 linee), su un'area di circa 1.000 m², in collaborazione con Vento di Venezia della Venezia Certosa Marina. Tutti i campioni sono stati mescolati per ogni risultato in triplicato.

Parallelamente al campionamento delle microplastiche, è stato condotto il monitoraggio del macro-litter con gli strumenti digitali di VLPF. A Sant'Alvise sono stati censiti 1.780 oggetti per un totale di 139,7 kg di rifiuti rimossi, di cui 19,4 kg di plastica. Le categorie più rappresentate sono costituite da frammenti di vetro e da bottiglie di plastica per bevande, confermando la pressione legata alle attività urbane e turistico-ricreative. A Certosa sono stati rimossi 120,36 kg di rifiuti, di cui 40,22 kg di plastica. Complessivamente, la campagna ha rimosso oltre 260 kg di rifiuti su un'area lagunare di circa 4 km². L'impronta della plastica (plastic footprint), calcolata tramite l'app SeaClear2.0, ha stimato che questo materiale raccolto a Sant'Alvise equivale al consumo annuo di 0,35 persone in Italia, mentre quella di Certosa corrisponde a 0,72 persone.

Di particolare interesse scientifico è stato il fatto, del tutto inatteso, che i campioni di Sant'Alvise hanno dato esito positivo alla reazione di Fenton: la presenza di ruggine nel sedimento ha innesca-

to una reazione violenta con il perossido di idrogeno, causando il traboccamento della soluzione e la perdita delle microplastiche galleggianti. Questo ha richiesto la modifica del protocollo, con l'aggiunta graduale di 100 ml di H₂O₂ al 30%, in aliquote da 1 ml, nell'arco di 3 ore. L'episodio dimostra come la *citizen science* esperta debba essere capace di adattare le procedure ai contesti reali. L'analisi FTIR dei polimeri è attualmente in corso presso il laboratorio del Montani, utilizzando lo spettrofotometro FTIR Spectrum Two e il micro-FTIR Spotlight 200i (Perkin Elmer). La correlazione fra dati di macrolitter e composizione polimerica delle microplastiche costituirà un contributo originale per la comprensione delle dinamiche di frammentazione della plastica nell'ecosistema lagunare veneziano.

4. Le microplastiche quali contaminanti emergenti: il contesto normativo europeo nella didattica chimica

Il professionista chimico deve muoversi nel contesto normativo. Per questo abbiamo inquadrato l'aspetto scientifico nella prospettiva del diritto internazionale in una lezione dedicata all'importanza del supporto scientifico per "informare" i *policy makers*.

Le microplastiche sono oggi classificate come contaminanti emergenti (Contaminants of Emerging Concern, CEC), una categoria che include sostanze la cui presenza nell'ambiente e i cui effetti sulla salute umana e sugli ecosistemi sono oggetto di crescente attenzione scientifica e normativa. L'ambiente marino è il principale recettore finale delle microplastiche e la Laguna di Venezia, con dieci fiumi immissari e solo tre bocche di porto verso l'Adriatico, funge da trappola naturale per i rifiuti plastici, rendendo particolarmente rilevante il nostro lavoro di monitoraggio.

Il quadro normativo europeo si sta rapidamente evolvendo: nel febbraio 2026, il Consiglio dell'UE ha formalmente adottato la direttiva che aggiorna l'elenco delle sostanze inquinanti per le acque superficiali e sotterranee, includendo farmaceutici, pesticidi, bisfenoli e PFAS. Per la prima volta, la direttiva introduce regole per valutare il rischio cumulativo delle miscele di sostanze e, aspetto cruciale, inserisce le microplastiche e gli indicatori di resistenza antimicrobica nelle watchlist europee per le acque. Secondo i dati dei piani di gestione dei bacini idrografici, il 46% delle acque superficiali e il 24% delle acque sotterranee nell'UE non soddisfa gli attuali standard di qualità ambientale. Gli Stati membri avranno tempo fino al 2039 per adeguarsi.

La Direttiva Acque Potabili (UE) 2020/2184 ha già classificato le microplastiche come materia di attenzione emergente. Nel 2024, il Joint Research Centre (JRC) della Commissione Europea ha pubblicato una metodologia armonizzata per la misurazione delle microplastiche nell'acqua potabile, basata su spettroscopia IR e Raman, con volumi di campionamento di almeno 1.000 litri. I polimeri più riscontrati sono risultati polietilene, PET, poliestere e polipropilene, gli stessi polimeri identificabili con il nostro protocollo verde tramite FTIR.

Questo contesto normativo, in rapida evoluzione, conferma la rilevanza del lavoro di *citizen science* avanzato, condotto attraverso i progetti MICRO. La necessità di metodologie standardizzate, accessibili e sostenibili per il monitoraggio delle microplastiche su vaste aree geografiche è esattamente ciò che il nostro protocollo verde intende offrire: dati scientificamente robusti, generati con il coinvolgimento di studenti e società civile, senza ricorrere a reagenti pericolosi per l'operatore e per l'ambiente.

5. Conclusioni e prospettive

Insegnare in una scuola tecnica permette di concepire l'azione didattica come produzione e non mera riproduzione dei saperi. Abbiamo declinato l'insegnamento non per dare risposte, ma per far sorgere domande e per costruire soluzioni e relazioni umane. Il risvolto epistemologico relativo all'azione didattica progettata e svolta è enorme: le studentesse e gli studenti non imparano soltanto come si progetta e si svolge un'analisi, ma interiorizzano l'importanza dello sforzo cognitivo per cambiare il modo in cui si realizza un'analisi chimica nell'ottica della sostenibilità. Il Popperiano principio di falsificabilità viene applicato non a una teoria, ma a una procedura normalmente accettata dalla comunità scientifica: i principi della chimica verde diventano un criterio per validare la produzione di conoscenza.

Orientati dalla proposta pedagogica del Service Learning, crediamo nell'importanza dell'apprendimento basato su progetti di utilità sociale e compiti di realtà. Gli aspetti epistemologici si intrecciano con quelli psicologici e sociologici perché l'attività permette al discente di essere protagonista del percorso di scoperta guidata, in un'età che è quella più adatta per stimolare la creatività.

Ringraziamenti

TC ringrazia VLPF e IMG Group per il supporto finanziario, in qualità di donatori ufficiali delle attività legate a MICRO1.0 e MICRO2.0. Il finanziamento ha coperto tutti i costi relativi alla logistica e ai trasporti per rendere possibile il campionamento. Si ringraziano Stefania Scatasta, Nadia Fraticelli, Roberto Barbieri e gli studenti e le studentesse di chimica dell'ITT "G. e M. Montani" per il loro prezioso supporto, così come Gherardo Toso, Gulce Korkmaz e Zehra Senem Nurel di VLPF.

Riferimenti bibliografici

- [1] Plastic Europe 2024 (<https://plasticseurope.org/knowledge-hub/the-circular-economy-for-plastics-a-european-analysis-2024/>).
- [2] T. Cecchi, Analysis of Volatiles Organic Compounds in Venice Lagoon Water Reveals COVID 19 Lockdown Impact on Microplastics and Mass Tourism Related Pollutants, *Sci. Total Environ.*, 2021, 146951 (doi:10.1016/j.scitotenv.2021.146951).
- [3] T. Cecchi, D. Poletto, A. C. Berbecaru, E. M. Cârstea, M. Râpă, Assessing Microplastics and Nanoparticles in the Surface Seawater of Venice Lagoon—Part I: Methodology of Research, *Materials (Basel)*, 2024, **17**, 1759 (doi:10.3390/MA17081759/S1).
- [4] I. Ansari, C. Arora, A. Verma, et al., A Critical Review on Biological Impacts, Ecotoxicity, and Health Risks Associated with Microplastics, *Water, Air, Soil Pollut.*, 2025, **236**, 1-32 (doi:10.1007/S11270-024-07731-Z).
- [5] EU Commission Regulation (EU) 2023/2055 - Restriction of Microplastics Intentionally Added to Products - Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs (https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/chemicals/reach/restrictions/commission-regulation-eu-20232055-restriction-microplastics-intentionally-added-products_en) (accessed on 26 November 2025).
- [6] B. A. Walther, F. Pasolini, Š. Korez Lupše, M. Bergmann, Microplastic Detectives: A Citizen-Science Project Reveals Large Variation in Meso- and Microplastic Pollution along German Coastlines, *Front. Environ. Sci.*, 2024, **12** (doi:10.3389/fenvs.2024.1458565).
- [7] M. Tiwari, T. D. Rathod, P. Y. Ajmal, R. C. Bhangare, S. K. Sahu, Distribution and Characterization of Microplastics in Beach Sand from Three Different Indian Coastal Environments, *Mar. Pollut. Bull.*, 2019, **140**, 262–273 (doi:10.1016/j.marpolbul.2019.01.055).
- [8] A. Malorni, C. H. Lea, K. Richards-Schuster, M. S. Spencer, Facilitating Youth Participatory Action Research (YPAR): A Scoping Review of Relational Practice in U.S. Youth Development & out-of-School Time Projects, *Child. Youth Serv. Rev.*, 2022, **136**, 106399 (doi:10.1016/j.childyouth.2022.106399).
- [9] NOAA Laboratory Methods for the Analysis of Microplastics in the Marine Environment: Recommendations for Quantifying Synthetic Particles in Waters and Sediments, 2015.
- [10] J. Masura, J. Baker, G. D. Foster, C. Arthur, C. Herring, *Laboratory Methods for the Analysis of Microplastics in the Marine Environment: Recommendations for Quantifying Synthetic Particles in Waters and Sediments*; 2015 (<https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/10296>).
- [11] S. Grishanov, Structure and Properties of Textile Materials, *Handb. Text. Ind. Dye. Princ. Process. Types Dye*, 2011, **1**, 28-63 (doi:10.1533/9780857093974.1.28).
- [12] M. Wagner, S. Lambert, *Freshwater Microplastics - The Handbook of Environmental Chemistry 58*, 2018 (ISBN 9783319616148).
- [13] M. Tiwari, S. K. Sahu, T. Rathod, et al., Comprehensive Review on Sampling, Characterization and Distribution of Microplastics in Beach Sand and Sediments, *Trends Environ. Anal. Chem.*, 2023, **40**, e00221 (doi:10.1016/j.teac.2023.e00221).

- [14] B. Quinn, F. Murphy, C. Ewins, Validation of Density Separation for the Rapid Recovery of Microplastics from Sediment, *Anal. Methods*, 2017, **9**, 1491-1498 (doi:10.1039/C6AY02542K).
- [15] M. Claessens, L. Van Cauwenberghe, M. B. Vandegehuchte, C. R. Janssen, New Techniques for the Detection of Microplastics in Sediments and Field Collected Organisms, *Mar. Pollut. Bull.*, 2013, **70**, 227-233 (doi:10.1016/J.MARPOLBUL.2013.03.009).
- [16] GESAP Guidelines for the Monitoring and Assessment of Plastic Litter in the Ocean: GESAMP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection, *Rep. Stud. GESAMP* 2019, **99**, 138.
- [17] A. A. Khalid, N. I. Abd Razak, S. T. Anuar, et al., Microplastics Contamination in Natural Sea Turtle Nests at Redang Island, Malaysia, *Mar. Pollut. Bull.*, 2025, **211** (doi:10.1016/J.MARPOLBUL.2024.117412).
- [18] D. J. Basurto Alcívar, M. A. Chavarría Peñarrieta, M. F. Pincay Cantos, J. M. Calderón Pincay, Microplastics on the Coasts of San Cristobal, Galapagos: A Threat to the Archipelago, *Visions Sustain.*, 2024, **22**, 1-19 (doi:10.13135/2384-8677/10344).
- [19] I. Arteaga, V. Pinos-Vélez, M. Capparelli, et al., Microplastic Occurrence and Distribution in the Gulf of Guayaquil, Ecuador, *Mar. Pollut. Bull.*, 2024, **209**, 117288 (doi:10.1016/J.MARPOLBUL.2024.117288).
- [20] V. T. K. Khuyen, D. V. Le, A. R. Fischer, C. Dornack, Comparison of Microplastic Pollution in Beach Sediment and Seawater at UNESCO Can Gio Mangrove Biosphere Reserve, *Glob. Challenges*, 2021, **5**, 1-9 (doi:10.1002/gch2.202100044).
- [21] F. Pena-Pereira, W. Wojnowski, M. Tobiszewski, AGREE - Analytical GREENness Metric Approach and Software, *Anal. Chem.*, 2020, **92**, 10076-10082 (doi:10.1021/acs.analchem.0c01887).
- [22] T. Cecchi, Microplastics in Sand: Green Protocol for Expert Citizen Science over Large Geographical Areas, *Appl. Sci.*, 2025, **15**, 13007 (doi:10.3390/app152413007).

