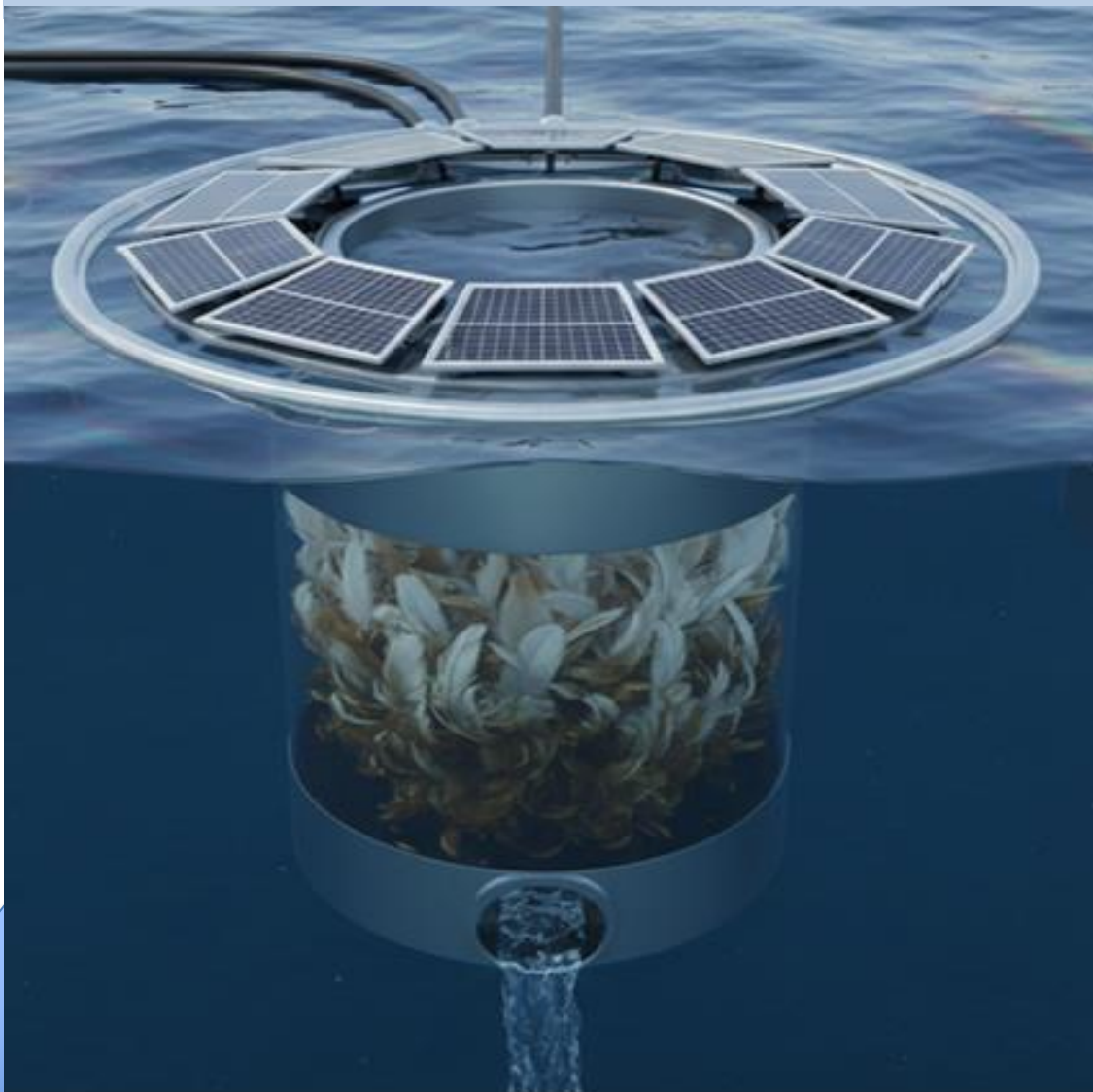




**IIS Galilei**  
Istituto di Istruzione Superiore Jesi

a.s. 2025/2026

## FeatherTech – Innovazione sostenibile per la bonifica di acque contaminate da idrocarburi



*Ricerca realizzata da Consoli Eva,  
Graziosi Mathias e Santarelli Luca.  
Corso Biotecnologie Ambientali Istituto  
Istruzione Superiore "G. Galilei" di Jesi  
(AN) Coordinatori del progetto:  
prof. Loroni Massimiliano  
prof.ssa Antonelli Milva*

## INDICE

	Pag.
- 1.Bibliografia/Sitografia	1
- 2.introduzione	2
- 3.L'inquinamento da idrocarburi C10–C40 nei mari e nelle aree portuali	2
- 4.L'idea progettuale	4
- 5.LE PIUME DI VOLATILI: composizione chimica, produzione e smaltimento.	4
- 6.Svilluppo dell'idea progettuale e della metodica sperimentale	6
- 7.Sviluppo di un processo sostenibile	9
- 8.Conclusioni	13
- Allegati:	
- scheda analisi 1	14
- scheda analisi 2	18
- scheda analisi 3	19

## BIBLIOGRAFIA

- Principi di Biochimica di LEHNINGER – ZANICHELLI
- Reazioni Organiche D.Pocar – casa editrice AMBROSIANA Milano
- Enciclopedia della Chimica – ISEDI
- Chimica Organica – reattività e struttura - casa editrice USES
- UNI EN ISO 9377-2:2002 Qualità dell'acqua – Determinazione degli idrocarburi totali C10–C40 mediante gascromatografia con estrazione in solvente esano (metodo ufficiale usato nei laboratori ambientali italiani).
- Decreto Legislativo D.Lgs. 152/2006 Norme in materia ambientale
- ISPRA (2023). Rapporto sullo Stato dell'Ambiente Marino e Costiero Italiano 2023. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Roma.
- Gupta, A., & Upadhyay, R. K. (2020). Use of Natural Adsorbents for Removal of Hydrocarbons from Wastewater: A Review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(3), 103680.
- 

## SITOGRAFIA

- ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale  
<https://www.isprambiente.gov.it>
- Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE)  
<https://www.mase.gov.it>
- UNEP/Mediterranean Action Plan (Programma delle Nazioni Unite per l'Ambiente)  
<https://www.unep.org/unepmap>
- Joint Research Centre (JRC) – European Commission  
<https://joint-research-centre.ec.europa.eu>
- WWF Italia – Inquinamento Marino da Idrocarburi  
<https://www.wwf.it/marine>

## **2.INTRODUZIONE**

La crescente presenza di contaminanti idrocarburici nelle acque marine, dovuta a sversamenti accidentali e attività industriali, rappresenta una delle principali minacce per gli ecosistemi acquatici. In questo studio si propone la valorizzazione delle piume di pollo, sottoprodotto abbondante dell'industria avicola, come biomateriale adsorbente ecosostenibile per la rimozione di idrocarburi a catena media e lunga (C10–C40) da soluzioni salmastre e marine.

## **3.L'INQUINAMENTO DA IDROCARBURI C10–C40 NEI MARI E NELLE AREE PORTUALI**

Negli ultimi decenni l'analisi dello stato ambientale marino ha evidenziato la diffusione dell'inquinamento da idrocarburi pesanti, composti con catena C10–C40, principali componenti del petrolio. Queste sostanze, caratterizzate da bassa solubilità, alta viscosità e forte affinità per la materia organica, formano film superficiali e si accumulano nei sedimenti, risultando molto persistenti.

Oltre il 95% degli idrocarburi C10–C40 presenti in mare deriva da attività umane legate a trasporto, uso e lavorazione dei prodotti petroliferi, soprattutto in aree costiere e portuali, dove la concentrazione di fonti di contaminazione e la scarsa circolazione delle acque rendono l'impatto particolarmente rilevante.

Nel contesto mediterraneo, caratterizzato da bacino chiuso e intenso traffico navale (oltre il 30% del traffico mondiale di idrocarburi), il problema è amplificato. Studi europei (MEDPOL, ICES) registrano concentrazioni di idrocarburi totali (THC) tra 5 e 50 µg/L in acque pulite, ma fino a 500 µg/L in aree portuali; nei sedimenti i valori variano da 100 a oltre 5.000 mg/kg. Particolare attenzione è riservata agli idrocarburi aromatici policiclici (IPA), tossici e bioaccumulabili.

### **3.1. Cause e origini dell'inquinamento da idrocarburi C10–C40**

Le fonti si distinguono in puntuali, diffuse e secondarie.

#### **Fonti puntuali:**

- Sversamenti accidentali e incidenti navali: anche se piccoli ma ripetuti, rilasciano quantità significative.
- Perdite da depositi e condotte portuali: comuni in impianti datati.
- Scarico di acque di sentina e residui oleosi: spesso non adeguatamente controllati.
- Cantieristica navale: operazioni di manutenzione e pulizia generano spillamenti diretti.

#### **Fonti diffuse:**

- Dilavamento urbano e industriale: trascina oli e residui di combustione nei canali e nei fiumi.
- Deposizione atmosferica: fino al 30% del carico totale in alcuni bacini costieri.
- Rilasci operativi della navigazione e attività portuali ausiliarie che immettono progressivamente idrocarburi in mare.

#### **Fonti secondarie:**

Le frazioni medio-pesanti sedimentano costituendo serbatoi di contaminazione. Dragaggi o correnti possono risospingere il materiale, mentre la degradazione biologica è molto lenta nei sedimenti poveri di ossigeno.

### **3.2. Livelli medi nel Mediterraneo**

Nonostante normative più stringenti, gli idrocarburi C10–C40 permangono tra i principali contaminanti. Secondo il Joint Research Centre (2022), nei principali porti mediterranei (Genova, Barcellona, Istanbul, Pireo) i valori medi sono di 150–400 µg/L nelle acque e 600–2.000 mg/kg nei sedimenti.

### 3.3. Effetti ecologici e ambientali

#### Impatti fisico-chimici:

Le frazioni leggere (C10–C20) formano film che ostacolano gli scambi gassosi e la fotosintesi; le più pesanti (C20–C40) si legano a particelle solide, veicolando contaminazione anche nei fondali profondi.

#### Effetti biologici:

Gli idrocarburi causano ipossia e intossicazioni nei pesci, alterazioni fisiologiche negli organismi bentonici e bioaccumulo di IPA nella catena trofica, con effetti mutageni e cancerogeni. Concentrazioni superiori a 200 µg/L riducono la vitalità del plancton, mentre nei sedimenti oltre 1.000 mg/kg compromettono la biodiversità bentonica.

#### Effetti sulla flora marina:

Le fanerogame e le alghe fototrofe (es. *Posidonia oceanica*) soffrono per riduzione della fotosintesi fino all'80%, con regressione delle praterie e perdita di habitat. In prossimità dei porti italiani, la copertura di *Posidonia* è spesso inferiore del 30% rispetto a zone non contaminate (ISPRA, 2023).

#### Conseguenze socio-economiche:

La contaminazione da idrocarburi causa danni alla pesca e all'acquacoltura, elevati costi di bonifica e perdita di attrattiva turistica delle aree costiere.

### 3.4. Limiti normativi e riferimenti legislativi

La normativa italiana in materia di tutela delle acque e controllo dell'inquinamento da idrocarburi si colloca all'interno del quadro europeo per la protezione della qualità ambientale delle acque superficiali, sotterranee e marine.

Il principale riferimento è la Direttiva 2000/60/CE (Water Framework Directive), che stabilisce gli obiettivi di qualità per tutti i corpi idrici. Pur non essendo inseriti tra le "sostanze prioritarie", gli idrocarburi C10–C40 rientrano nella categoria dei contaminanti organici da prodotti petroliferi, per i quali è previsto il monitoraggio nelle acque e nei sedimenti.

In Italia, il riferimento legislativo è il Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152 ("Norme in materia ambientale") e successive modifiche, che definisce i criteri generali per la tutela delle acque e la bonifica dei siti contaminati. L'Allegato 5, Parte IV, Titolo V riporta le Concentrazioni Soglia di Contaminazione (CSC), oltre le quali devono essere avviate indagini o interventi di risanamento.

Per gli idrocarburi totali del petrolio (C>12, inclusi i C10–C40), i limiti stabiliti sono:

- 350 µg/L per acque sotterranee;
- 50 mg/kg s.s. per suoli a uso verde o residenziale;
- 750 mg/kg s.s. per suoli a uso industriale o commerciale.

Per le acque marino-costiere non esistono limiti di legge specifici, ma enti di controllo come ISPRA, ARPA e il Joint Research Centre (JRC) utilizzano valori di riferimento tecnico comunemente adottati nei programmi di monitoraggio ambientale:

- <50 µg/L: buono stato ambientale;
- 50–200 µg/L: contaminazione moderata;
- >200 µg/L: contaminazione significativa;
- >1 mg/L: evento acuto o sversamento.

Nel complesso, il quadro normativo testimonia una crescente attenzione verso la prevenzione dell'inquinamento da prodotti petroliferi e la limitazione del bioaccumulo negli ecosistemi marini.

#### 4. L'IDEA PROGETTUALE

L'idea progettuale nasce da uno studio iniziato a maggio 2025 dopo l'uscita didattica all'Isola d'Elba in cui sono stati effettuati vari campionamenti di acqua di mare in diversi punti dell'isola per poi poterli analizzare a scuola nel nostro laboratorio di analisi chimica strumentale.

Sui campioni di acqua abbiamo effettuato diverse indagini, nello specifico metalli e idrocarburi C10-C40 con risultati che ci hanno incuriosito come, in particolare, la presenza di idrocarburi riscontrati in tutti i campioni analizzati con concentrazione comprese fra 500 e 1000 µg/L.

Proprio dall'analisi dei risultati sperimentali sugli idrocarburi C10-C40 è nata la nostra idea di studiare un metodo per la bonifica di acqua di mare contaminata da idrocarburi pesanti.

Dallo studio delle proprietà chimico-fisiche della frazione idrocarbureca pesante C10-C40 abbiamo compreso la necessità di trovare un materiale adsorbente fortemente idrofobo e resistente all'azione degradante dell'acqua di mare; queste caratteristiche sono presenti sicuramente in molti materiali plastici tipo il poliuretano, il PVC, ecc..., che potrebbero essere utilizzati come ottimi materiali adsorbenti ma con la problematica della cessione in acqua di microplastiche generate dall'azione meccanica delle onde e correnti marine.

Per le motivazioni di cui sopra, abbiamo iniziato a ricercare fra i materiali non sintetici, prodotti naturali ad elevata idrofobicità, materiali di scarto da valorizzare, ecc...

Da immagini come quella affianco correlate a disastri ambientali, esempio sversamenti massivi di greggio in mare, abbiamo avuto l'idea di indagare la capacità delle piume dei volatili di adsorbire idrocarburi pesanti, quali la frazione C10-C40, vista la loro nota elevata idrofobicità.



Di seguito viene fornita una descrizione dettagliata della composizione chimica, delle quantità prodotte nonché delle modalità di smaltimento e riutilizzo delle piume, in particolare quelle di pollo essendo quelle maggiormente disponibili nel nostro territorio.

#### 5. LE PIUME DI VOLATILI: composizione chimica, produzione e smaltimento.

##### 5.1. Composizione chimica

Le piume sono costituite prevalentemente da cheratina, una proteina fibrosa strutturale molto resistente e insolubile in acqua, simile a quella presente nei capelli, nelle unghie e nelle corna dei mammiferi.

Componenti principali:

COMPONENTE	PERCENTUALE MEDIA (% PESO SECCO)	DESCRIZIONE
Cheratina (proteina)	85–92%	Polipeptide ricco di cisteina, con legami disolfuro (-S-S-) che conferiscono resistenza.
Lipidi	1–3%	Grassi naturali e cere superficiali che conferiscono idrofobicità e flessibilità.
Ceneri minerali	1–2%	Calcio, magnesio, fosforo, zolfo, ferro, e oligoelementi vari.
Umidità	6–12%	Varia in base a temperatura e umidità ambientale.

### Struttura molecolare della cheratina piumale

- È una cheratina  $\beta$  (beta-cheratina), differente dalla  $\alpha$ -cheratina dei mammiferi.
- Presenta una struttura lamellare antiparallela (foglietti  $\beta$ ) che forma fibre altamente ordinate.
- Alta percentuale di amminoacidi solforati, soprattutto cisteina, serina, prolina e valina.
- L'elevata concentrazione di zolfo (~3–5%) contribuisce alla resistenza alla degradazione.

### 5.2. Quantità prodotte nel mondo

Le piume sono un sottoprodotto dell'industria avicola globale, che movimentata miliardi di capi all'anno.

ANNO DI RIFERIMENTO	PRODUZIONE MONDIALE DI PIUME DI POLLO	ORIGINE PRINCIPALE
2023 (stima)	~2,5–3 milioni di tonnellate/anno	Cina, USA, Brasile, UE

- Circa **5–7% del peso vivo del pollo** è costituito da piume.
- Ogni 1 milione di tonnellate di carne di pollo produce ~50.000–70.000 tonnellate di piume.

### 5.3. Modalità di smaltimento

Lo smaltimento delle piume rappresenta una sfida ambientale a causa della loro resistenza alla biodegradazione. I metodi principali sono:

1. Interramento o discarica
  - Metodo tradizionale, ma ambientalmente impattante (rilascio di ammoniaca, zolfo e metano)
  - Scarsamente sostenibile nel lungo periodo.
2. Incenerimento
  - Elimina il materiale, ma produce CO<sub>2</sub> e ossidi di zolfo.
  - Possibilità di recupero energetico in impianti specializzati.
3. Idrolisi termochimica o enzimatica
  - Degradazione controllata della cheratina tramite calore (120–150 °C, pressione) o enzimi cheratinolitici.
  - Produce idrolizzati proteici utilizzabili come additivi per mangimi o fertilizzanti.

### 5.4. Strategie di riutilizzo e valorizzazione

Negli ultimi anni si stanno sviluppando numerose tecnologie per il riciclo e la valorizzazione delle piume, data la disponibilità e l'elevato contenuto proteico.

Applicazioni industriali e tecnologiche:

SETTORE	TIPO DI RIUTILIZZO	DESCRIZIONE
Mangimistica	Farine di piume idrolizzate	Fonte di proteine (40–45% digeribili) per animali da allevamento.
Agricoltura	Fertilizzanti organici	Ricchi di aminoacidi e azoto; rilascio lento di nutrienti.
Bioindustria	Produzione di cheratina pura	Materia prima per cosmetici, bioplastiche, membrane filtranti.
Materiali compositi	Bioplastiche e isolanti	Fibre di cheratina combinate con resine per creare materiali leggeri e termoisolanti.
Energia	Biochar o biogas	Pirolisi delle piume per produzione di syngas o carbone attivo.

### In sintesi

Le piume di pollo rappresentano un biomateriale complesso, costituito per oltre il 90% da cheratina insolubile, con un enorme potenziale di riutilizzo sostenibile. Sebbene attualmente una parte significativa venga ancora smaltita in modo poco ecocompatibile, le innovazioni nel campo biotecnologico e dei materiali stanno orientando l'industria verso un uso circolare e integrato di questo sottoprodotto.

### 6.SVILUPPO DELL'IDEA PROGETTUALE E DELLA METODICA SPERIMENTALE.

Come detto nei paragrafi precedenti, l'idea per questo progetto è nata dalla ricerca di un materiale estremamente idrofobo in grado di adsorbire la frazione idrocarburica C10-C40 da poter utilizzare senza generare altri inquinanti (questa condizione ci ha fatto escludere l'utilizzo di materiali plastici), economicamente sostenibile e quindi possibilmente un materiale di scarto da valorizzare e inoltre un materiale rigenerabile dopo un trattamento di desorbimento così da poter progettare un processo ciclico sostenibile cioè senza utilizzo di nuovo materiale adsorbente e soprattutto senza l'esigenza di dover smaltire il sistema adsorbente-adsorbito.

Quest'ultima condizione è particolarmente importante per materiali venuti in contatto con acqua di mare in quanto per questi materiali viene esclusa la possibilità di utilizzare processi termici di distruzione con recupero energetico in quanto si potrebbero generare composti clorurati come le diossine estremamente inquinanti.

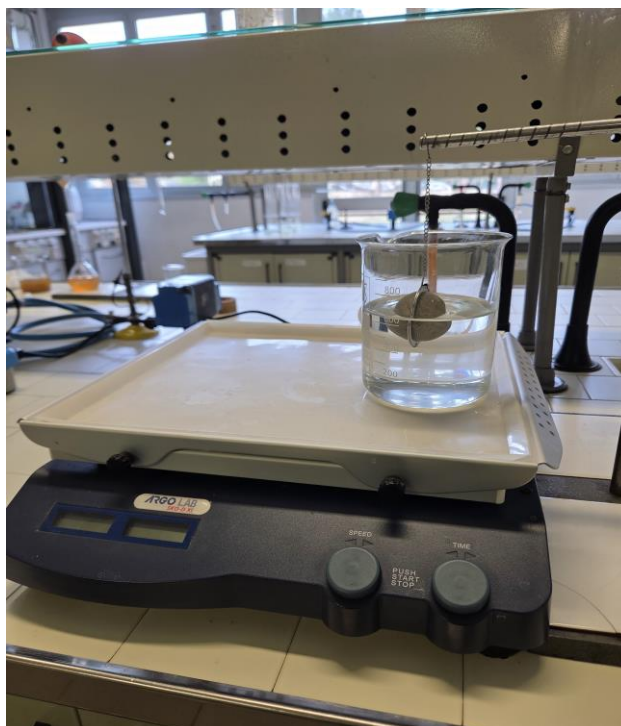
Per questo motivo, vista la natura chimica delle piume e la loro resistenza a trattamenti con solventi, abbiamo iniziato a simulare condizioni di acqua di mare contaminata da frazione idrocarburica C10-C40 e abbiamo indagato l'azione adsorbente di un filtro a base di piume di pollo posto in galleggiamento sull'acqua.

Nelle prove iniziali abbiamo sperimentato anche l'utilizzo come materiale adsorbente di paglia di cereale (orzo) anch'essa scelta per l'elevata idrofobicità data dalla sua composizione a base di cellulosa, emicellulosa, lignina e cere.



Le prove sono state effettuate utilizzando acqua distillata contenente il 3.5% di NaCl (salinità media di un'acqua di mare) contaminata da idrocarburi C10-C40 ottenuta disperdendo in acqua una miscela al 50% di gasolio e olio minerale altamente raffinato in concentrazione pari a 100 mg/l.

Il processo di adsorbimento è stato simulato utilizzando degli infusori sferici contenenti 2 grammi di materiale adsorbente sospesi in galleggiamento mediante sostegni verticali in un becher da 600 ml contenenti 450 ml di acqua di mare contaminata da gasolio/olio posti su un piano oscillante per simulare il moto ondoso del mare e per una durata di 24 ore.



I campioni di acqua, dopo le 24 ore di contatto con il materiale adsorbente, sono stati sottoposti alla procedura di estrazione e quantificazione della frazione idrocarburica C10-C40 come da metodica UNI EN ISO 9377-2:2002 (Qualità dell'acqua – Determinazione degli idrocarburi totali C10–C40) descritta in allegato; parallelamente ai campioni di acqua di cui sopra è stato realizzato un campione di riferimento cioè un campione di acqua con la stessa contaminazione ma senza l'utilizzo di materiali adsorbenti anch'esso posto in moto ondoso per 24 ore.

Tale procedura ci ha permesso di valutare la riduzione della concentrazione di idrocarburi C10-C40 sia dal valore assoluto ottenuto utilizzando una retta di lavoro costruita da soluzioni standard di gasolio/olio in solvente esano, sia confrontando direttamente la riduzione % delle aree del cromatogramma dei campioni rispetto all'area del campione di riferimento non trattato.

Le prove effettuate utilizzando come materiali adsorbenti: sfridi di PVC, piume di pollo e paglia di cereale (orzo) hanno dimostrato un'elevata capacità di adsorbimento da parte delle piume e, ancor più, della paglia di orzo.

Di seguito i risultati ottenuti in termini di % di frazione C10-C40 adsorbita rispetto ad un campione di acqua di riferimento non trattata con materiale adsorbente:

volume di acqua di mare trattato (ml) (acqua distillata con 3.5% di NaCl)	concentrazione inquinante olio/gasolio mg/l	Materiale adsorbente (*)	% inquinante adsorbito (valore medio su n.2 prove)
450	100	nessuno	0.0
450	100	Sfridi di PVC	60.4
450	100	Piume di pollo	75.5
450	100	Paglia di orzo sminuzzata	80.1

(\*) 2 grammi di materiale adsorbente

Tutti e tre i materiali hanno evidenziato buona capacità di adsorbire la frazione idrocarburica C10-C40 ma la nostra scelta è ricaduta nelle piume di pollo in quanto gli sfridi plastici di PVC hanno il problema del rilascio di microparticelle mentre per la paglia di orzo è riscontrato un rilascio di sostanze nel campione di acqua che assumeva una colorazione giallognola e inoltre volendo ripetere più cicli di adsorbimento/desorbimento la paglia potrebbe decomporsi e marcire.

Una volta scelto il materiale adsorbente, piume di pollo, abbiamo eseguito numerose prove di adsorbimento per verificare la ripetibilità del metodo analitico utilizzando sempre gli stessi campioni di piume sottoposte per ogni ciclo di adsorbimento ad una fase di desorbimento per verificare che le piume mantengano la capacità di adsorbire e che quindi sia possibile attuare una ciclicità del processo adsorbimento/desorbimento.

Il desorbimento della frazione idrocarburica C10-C40 è stato realizzato immergendo il filtro di piume per circa 10 minuti in esano e sottoponendo poi le soluzioni estraenti a concentrazione in un evaporatore rotante con bagno termico a 30°C.

Come ultima fase sperimentale abbiamo incrementato la concentrazione della miscela inquinante olio/gasolio per verificare la capacità adsorbente delle piume in funzione della concentrazione di inquinanti. I risultati sperimentali hanno dimostrato, come atteso, che la capacità adsorbente delle piume aumenta con la concentrazione di inquinante idrocarburico sino a concentrazioni anche molto elevate (casi di sversamenti accidentali di greggio in mare) fino ad adsorbire una quantità di miscela idrocarburica pesante (olio/gasolio) pari a 20/30 volte il peso delle piume (Ribeiro, T. H. et al. (2019) – Evaluation of chicken feathers as natural sorbents for oil spill cleanup. Marine Pollution Bulletin, 142, 321–327).

Di seguito la tabella che riassume i valori della capacità adsorbente del filtro in piume di pollo valutata su una contaminazione da olio/gasolio di 100 mg/l, effettuata su 2 serie di campioni siglate con A e B:

codice campione	volume di acqua di mare trattato (ml) (acqua distillata con 3.5% di NaCl)	concentrazione inquinante olio/gasolio mg/l	Materiale adsorbente (*)	% inquinante adsorbito
A	450	100	Nessuno	0.0
A1	450	100	Piume di pollo	74,5
A2	450	100	Piume di pollo	79,9
A3	450	100	Piume di pollo	76,5
A4	450	100	Piume di pollo	79,1
B	450	100	Nessuno	0.0
B1	450	100	Piume di pollo	73,8
B2	450	100	Piume di pollo	74,5
B3	450	100	Piume di pollo	76,2
B4	450	100	Piume di pollo	73,8

(\*) 2 grammi di materiale adsorbente

**CAPACITA' MEDIA DI ADSORBIMENTO 76 %**

Nei campioni con codice B sono stati utilizzati gli stessi filtri dei campioni A dopo trattamento di desorbimento in esano.

Nella tabella seguente sono riportati i dati relativa alla capacità di adsorbimento delle piume di pollo all'aumentare della concentrazione di inquinante, anche in questa sequenza di prove sono stati utilizzati gli stessi filtri della sequenza B dopo desorbimento in esano:

codice campione	volume di acqua di mare trattato (ml) (acqua distillata con 3.5% di NaCl)	concentrazione inquinante olio/gasolio mg/l	Materiale adsorbente (*)	% inquinante adsorbito
C1	450	100	Piume di pollo	74,1
C2	450	200	Piume di pollo	86,9
C3	450	300	Piume di pollo	84,0
C4	450	400	Piume di pollo	85,8

(\*) 2 grammi di materiale adsorbente

Recupero miscela olio/gasolio per desorbimento in esano: dopo la prima serie di adsorbimento indicata con la sigla A e dopo la seconda serie denominata B abbiamo posto gli infusori in desorbimento in esano per 10 minuti, successivamente l'estratto è stato concentrato all'evaporatore rotante e quantificato la frazione C10-C40 in gas-cromatografia.

La quantità recuperata è stata pari a 258.7 mg rispetto alla quantità di 360 mg utilizzata per drogare gli 8 campioni di acqua sottoposti ad adsorbimento.

Considerando la capacità adsorbente delle piume del 75%, la quantità teorica estraibile è di 270 mg di miscela olio/gasolio; siccome ne abbiamo recuperata per estrazione 258.7 mg, l'efficienza di recupero degli idrocarburi è risultata essere superiore al 95%.

## 7.SVILUPPO DI UN PROCESSO SOSTENIBILE.

Parallelamente alle indagini chimiche abbiamo iniziato a ipotizzare e progettare un meccanismo di depurazione dell'acqua di mare da idrocarburi C10-C40 incentrato sui principi di sostenibilità di un processo e, in particolare, sulla possibilità di inserire in un meccanismo ciclico i processi di adsorbimento, desorbimento, recupero della frazione C10-C40 e recupero del materiale adsorbente.

Per la fase di adsorbimento degli idrocarburi si è pensato di incrementare l'interazione idrocarburo/piume aumentando la dinamicità dell'interazione. Ciò può essere realizzato sostituendo l'adsorbimento statico con uno dinamico, utilizzando uno skimmer contenente nel suo interno un filtro in piume di pollo e dotato di una pompa di ricircolo alimentata con pannelli fotovoltaici. Di seguito le immagini del modello in miniatura del prototipo da noi realizzato.



Per la rigenerazione del materiale adsorbente, cioè le piume di pollo impregnate di idrocarburi, i metodi tradizionali prevedono:

- Pirolisi o trattamento termico (480–600 °C)
- Solventi organici (es. esano, acetone)
- Surfattanti o detergenti non ionici

Tuttavia, questi metodi possono degradare le strutture cheratiniche delle piume, riducendone la capacità di riutilizzo.

Per questo motivo, si è realizzato un sistema di recupero a solvente chiuso, cioè trattando le piume in bagno di esano e poi recuperando il solvente per distillazione sotto vuoto con l'uso di un rotavapor.



Ricercando in letteratura e indagando le metodiche di desorbimento chimico utilizzate nei processi industriali, abbiamo individuato una metodica da poter utilizzare su grandi quantità di piume che si potrebbero utilizzare su skimmer di elevate dimensioni; le cosiddette “lavatrici a solvente a ciclo chiuso” (simili a quelle usate nel *dry cleaning sostenibile*) che utilizzano solventi non acquosi.

Una lavatrice ad alcoli modificati (es. alcoli propanolici) per la rimozione di olio/gasolio è un sistema di pulizia industriale sottovuoto che usa solventi a basso impatto ambientale, senza residui, adatta a materiali complessi e conformi alle normative ambientali, grazie alla distillazione continua che ricicla il solvente.

Il funzionamento delle lavatrici a solventi a ciclo chiuso è di seguito schematizzato:

- Ciclo sottovuoto: l'intero processo (lavaggio, risciacquo, asciugatura) avviene sottovuoto, eliminando i vapori nocivi.
- Liquido di lavaggio: vengono usati alcoli modificati, che sono efficaci quanto i solventi tradizionali ma meno tossici e con minore impatto ambientale.
- Asciugatura rapida: il vuoto e le proprietà del solvente garantiscono un'asciugatura rapida e completa.
- Distillazione e recupero: il sistema integra un ciclo di distillazione che separa continuamente la frazione idrocarburica pesante dall'alcool, che viene riutilizzato, riducendo i costi di gestione e smaltimento.

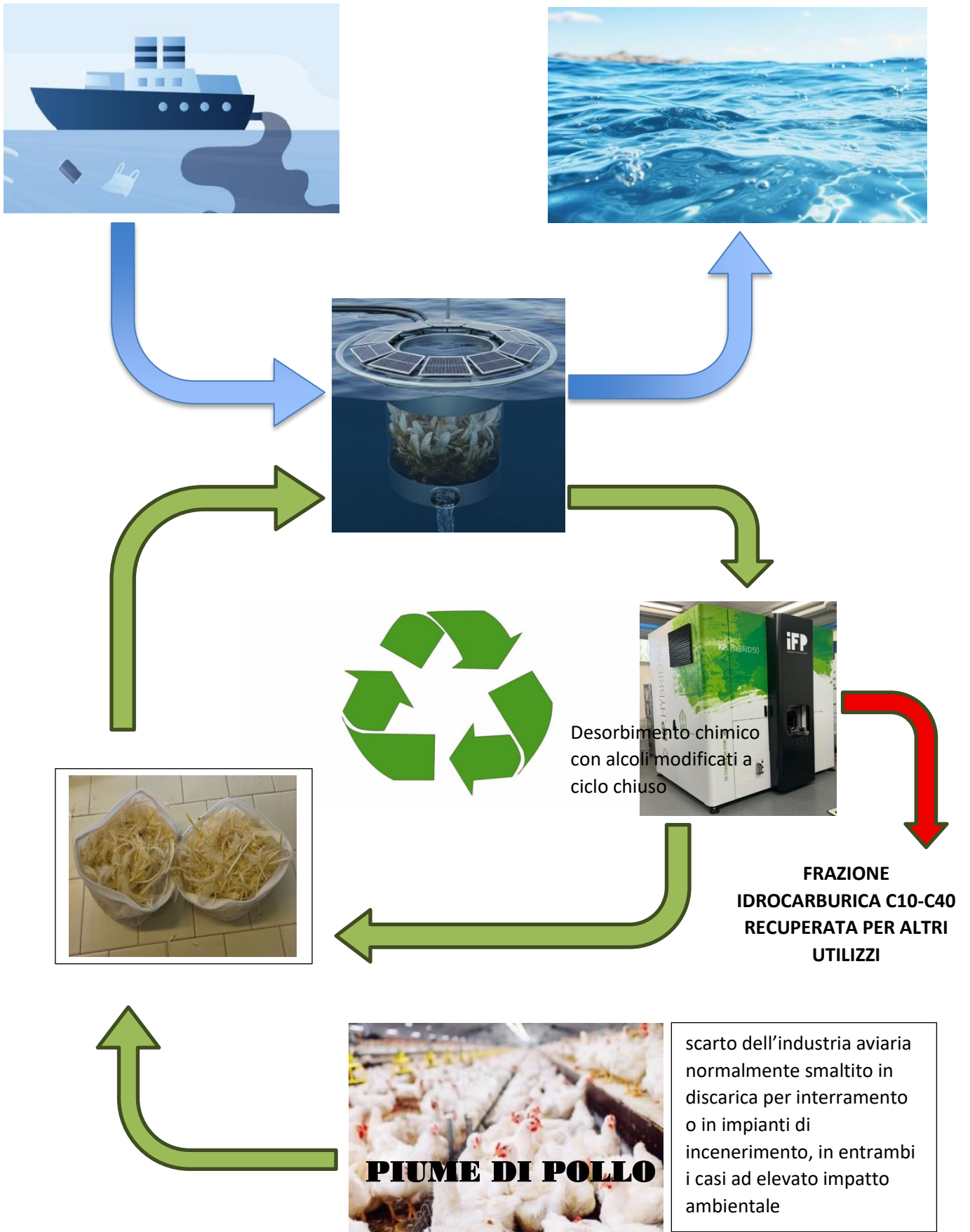


Questo tipo di impianto permetterebbe di desorbire la frazione idrocarburica C10-C40 dal filtro adsorbente contenente piume di pollo che, dopo asciugatura a 50/60°C, sarebbero nuovamente utilizzabili per la successiva fase di adsorbimento in mare. L'estratto liquido, invece, sottoposto a distillazione sotto vuoto, permette di recuperare il solvente di desorbimento per un successivo ciclo e di ottenere separatamente la frazione idrocarburica C10-C40 utilizzabile in qualche processo industriale o come combustibile.

Tali impianti di trattamento potrebbero essere presenti stabilmente in tutte le aree portuali con skimmer in grado di filtrare grandi volumi di acqua posti sia nelle zone di ingresso alle aree portuali che nelle banchine, così da svolgere una continua azione di adsorbimento degli idrocarburi pesanti che inevitabilmente vengono sversati in mare.

Gli stessi impianti potrebbero essere utilizzati, in aggiunta alle attuali tecniche di intervento che consistono maggiormente nell'utilizzo di barriere galleggianti, pompaggio e separazione della miscela acqua/greggio, anche in occasione di sversamenti accidentali o incidenti navali come la rottura di condotte durante le operazioni di carico/scarico, collisioni o incagli di petroliere, navi commerciali e quant'altro possa determinare la dispersione in mare di quantità enormi di greggio o prodotti raffinati.

## Infografica del processo di FeatherTech – Innovazione sostenibile per la bonifica di acque contaminate da idrocarburi



## 8.CONCLUSIONI

L'indagine condotta ha consentito di affrontare in modo sperimentale e sostenibile il problema dell'inquinamento marino da idrocarburi pesanti (C10–C40), fenomeno di grande rilievo ecologico e sociale, particolarmente evidente nelle zone portuali del Mediterraneo. A partire da un'analisi del contesto ambientale e delle principali sorgenti di contaminazione, è emersa la necessità di individuare soluzioni di bonifica efficaci, a basso costo e compatibili con i principi dell'economia circolare.

L'idea di utilizzare le piume di pollo come materiale adsorbente è nata dall'osservazione delle loro peculiari caratteristiche chimico-fisiche: elevata idrofobicità, resistenza strutturale e disponibilità come sottoprodotto dell'industria avicola. Le analisi sperimentali hanno confermato l'efficacia di questo materiale naturale, capace di adsorbire in media oltre il 75% della frazione idrocarbureca C10–C40 contenuta in acqua salmastra contaminata. Inoltre, le piume hanno mostrato una buona stabilità e riutilizzabilità, mantenendo proprietà adsorbenti significative anche dopo diversi cicli di adsorbimento e desorbimento.

Il confronto con altri materiali, come il PVC e la paglia d'orzo, ha evidenziato ulteriormente il vantaggio delle piume di pollo: i materiali plastici comportano rischi legati al rilascio di microplastiche, mentre i materiali lignocellulosici mostrano scarsa stabilità chimica e rilascio di composti organici indesiderati.

Le piume, invece, rappresentano una risorsa naturale, riciclabile e non inquinante, facilmente rigenerabile mediante trattamenti con solventi a ciclo chiuso, senza generazione di residui tossici o perdite significative di efficienza.

Parallelamente alle prove di laboratorio, il progetto ha portato allo sviluppo di uno skimmer sperimentale dotato di filtro in piume di pollo e sistema di ricircolo alimentato ad energia solare e all'utilizzo di lavatrici a solvente ecologico (alcoli modificati) a ciclo chiuso; queste soluzioni aprono la strada ad un prototipo di impianto ecologico e autosostenibile per la depurazione delle acque marine contaminate da idrocarburi da poter utilizzare in modo stabile e continuo nelle aree portuali o in situazioni emergenziali in casi di sversamenti massivi di idrocarburi pesanti in mare.

Complessivamente, il lavoro svolto dimostra che le piume di pollo possono rappresentare una soluzione innovativa, sostenibile ed economicamente conveniente per la bonifica di acque contaminate da idrocarburi. La loro adozione su larga scala potrebbe contribuire a:

- migliorare la qualità ecologica delle aree costiere e portuali riducendo l'inquinamento da idrocarburi C10-C40;
- ridurre l'impatto ambientale dell'industria avicola, valorizzandone un sottoprodotto;
- diminuire la dispersione di microplastiche e l'uso di materiali sintetici attualmente utilizzati nelle situazioni di sversamento massivo di idrocarburi in mare come adsorbenti o barriere galleggianti;

In prospettiva, ulteriori sviluppi potranno riguardare la ottimizzazione del processo di rigenerazione e l'applicazione in impianti pilota su scala reale per aumentare la capacità adsorbente e la durabilità del filtro.

## ALLEGATI

### **SCHEDA ANALISI 1 (preparazione soluzione saline contaminate da idrocarburi C10-C40, prove di adsorbimento con più materiali e determinazione della capacità di adsorbimento)**

**Scopo:** individuare fra sfridi di PVC, piume di pollo e paglia di orzo, il materiale con migliore capacità di adsorbimento e desorbimento di idrocarburi C10-C40 presenti in acqua di “mare”.

**Materiali:** becher da 600 ml, imbuto separatori da 500 ml, colonnine per purificazione, beute, matracci tarati da 5 ml, Pipette Pasteur, sostegni metallici, pinze e anelli.

**Strumenti:** Bilancia analitica a 5 cifre decimali OHAUS mod. EXPLORER, Agitatore a scuotimento orbitale Shaker SKO-D XL ARGOLab, evaporatore rotante HEIDOLPH mod. Hei-VAP, Gas Massa della ditta SHIMADZU modello GCMS-QP2010 SE.

**Sostanze:** acqua distillata, gasolio per autotrazione, olio minerale altamente raffinato (EDWARDS ULTRAGRADE) cloruro di sodio, esano per analisi cromatografiche, solfato di sodio e florisil (essiccati in stufa a 150 °C per 12h)

#### Procedimento:

##### 1° fase: preparazione materiali adsorbenti

I tre materiali adsorbenti scelti per la prova preliminare derivano tutti da scarti di processi industriali/agricoli, nello specifico il PVC da attività di produzione infissi in PVC, la paglia da produzione di cereali e le piume di pollo dal processo di macellazione dei polli di una nota azienda avicola del nostro territorio.

Un campione di materiale adsorbente di ogni tipologia è stato “purificato” mediante lavaggio prima con esano poi dopo asciugatura all’aria sotto cappa con acqua distillata e successivamente posto in stufa a 80 °C per 4 h.



Per ogni campione di materiale adsorbente sono stati pesati 2 grammi e posti all’interno di un infusore in rete di acciaio.

Parallelamente all’attività di lavaggio dei materiali adsorbenti sono state preparate 4 soluzioni di acqua di mare contaminata da idrocarburi C10-C40; nello specifico per simulare acqua di mare è stata preparata una soluzione (450 ml) di acqua distillata con il 3.5 %m/v di NaCl (salinità media di un’acqua di mare) a cui sono stati aggiunti 0.04500 grammi di una miscela al 50%m/m di gasolio e olio minerale altamente raffinato così da avere una concentrazione di inquinante pari a 100 mg/l di C10-C40.

I quattro becher da 600 ml contenenti 450 ml di acqua di mare contaminata sono stati posti sul piatto orbitante e mediante sostegni metallici sono stati posti in galleggiamento i tre infusori, uno per ogni becher, lasciando un becher senza materiale adsorbente utilizzato come bianco della prova analitica. Il piano orbitante è stato attivato con 100 oscillazioni al minuto per 24 h.

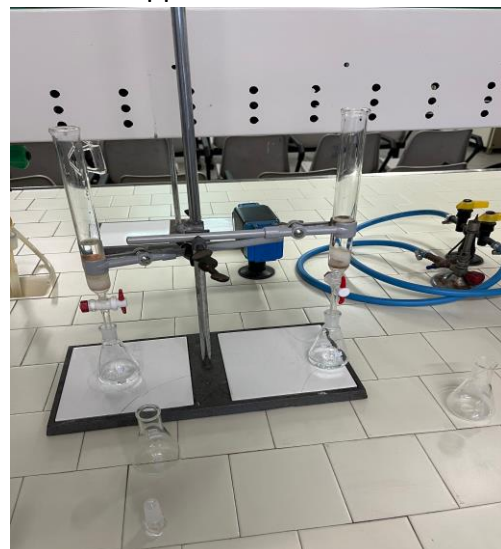
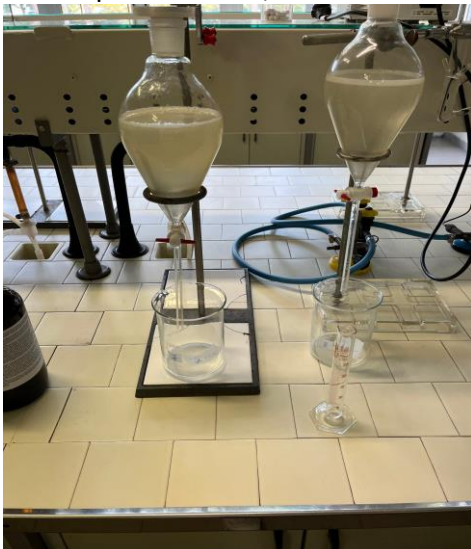
Le prove di adsorbimento sono state ripetute 2 volte per tutti e tre i materiali.



2° fase: estrazione della frazione C10-C40 non adsorbita (Metodo di riferimento: UNI EN ISO 9377-2 / 2002)

Procedimento (tutte le operazioni con esano sono state svolte su banconi aspirati):

1. trasferire il campione all'interno dell'imbuto separatore;
2. Lavare il becher che conteneva il campione con 25 ml di esano misurati con il cilindro graduato da 25 ml e versarli nell'imbuto separatore;
3. Estrarre per circa 30 minuti (agitando e sfiatando periodicamente), si creano 2 fasi quella sottostante acquosa e quella sovrastante organica;
4. Separare la fase acquosa dalla fase organica
5. Mettere la fase organica in una beuta
6. Lavare l'imbuto separatore con 5 ml di esano misurati con il cilindro graduato e poi unirli all'estratto organico
7. Preparare la colonnina di purificazione (rimozione di sostanze polari, IPA e grasso di origine animale e vegetale) mettendo prima 2 g di florisil poi 2 g di  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  anidro (preventivamente condizionati in stufa a  $150\text{ }^\circ\text{C}$  per 12 h)
8. Versare il contenuto della beuta nella colonnina senza attivazione con solvente
9. lavare la prima beuta con una piccola quantità di esano con una pipetta e poi versarlo nella colonnina di purificazione
10. Finita la purificazione, chiudere la seconda beuta con un tappo di vetro



**3° fase:** concentrazione dell'estratto organico e quantificazione frazione C10-C40 in GC-MS (Metodo di riferimento: UNI EN ISO 9377-2 / 2002)

1- La soluzione estratta e purificata viene portata ad un piccolo volume mediante evaporatore rotante con bagno termostatico posto a 30 °C su matraccio da 5 ml usando esano per portare a volume.



2- Preparazione soluzioni standard utilizzando la stessa miscela al 50% di gasolio e olio minerale utilizzata per contaminare i campioni di acqua da sottoporre ad adsorbimento e come solvente esano.

3- Preparazione della soluzione madre da 2000 mg/l per pesata su bilancia analitica a 5 cifre decimali e diluizioni per preparare altre due soluzioni standard a concentrazione 500 e 1000 mg/l.

4- Preparazione soluzione di esano contenete decano (C10) e tetracontano (C40) per l'individuazione dell'intervallo di integrazione del gas-cromatogramma.

5- Analisi gas-cromatografica degli estratti e degli standard con determinazione dell'area compresa fra il tempo di ritenzione del decano (6.186 min.) e del tetracontano (24.854min.).

Dati esercizio GC-MS

Shimadzu mod. QP2010 SE

Volume di iniezione: 1-2 uL

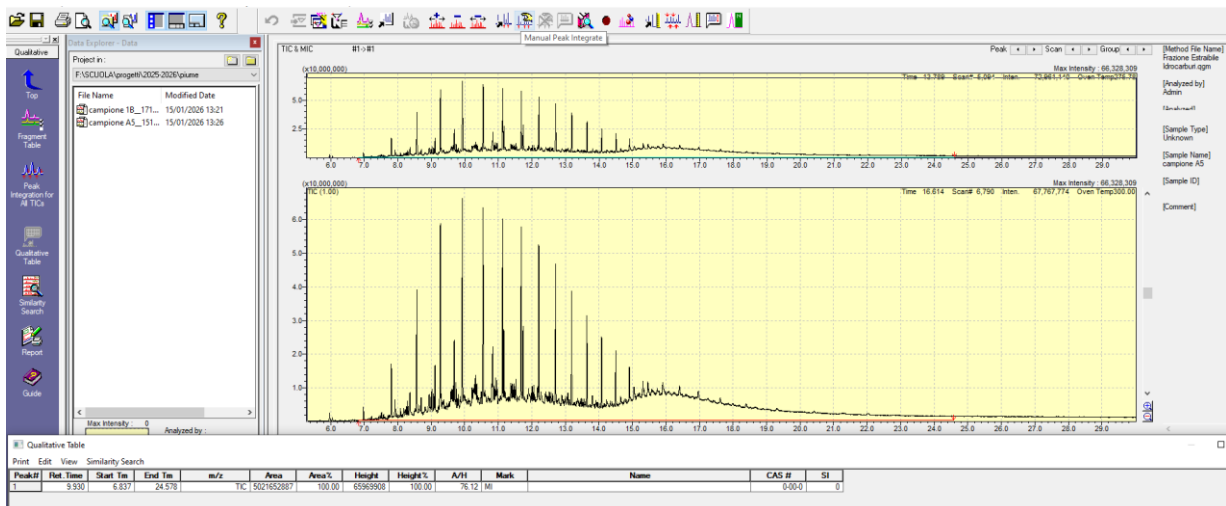
Iniettore SSL / PTV 300°C – modalità splitless con stempo di splittaggio di 1 min  
Colonna tipo 5 – 30 m x 0,25 mm con film da 0,25 um

Flusso He in colonna 1.4 ml/min

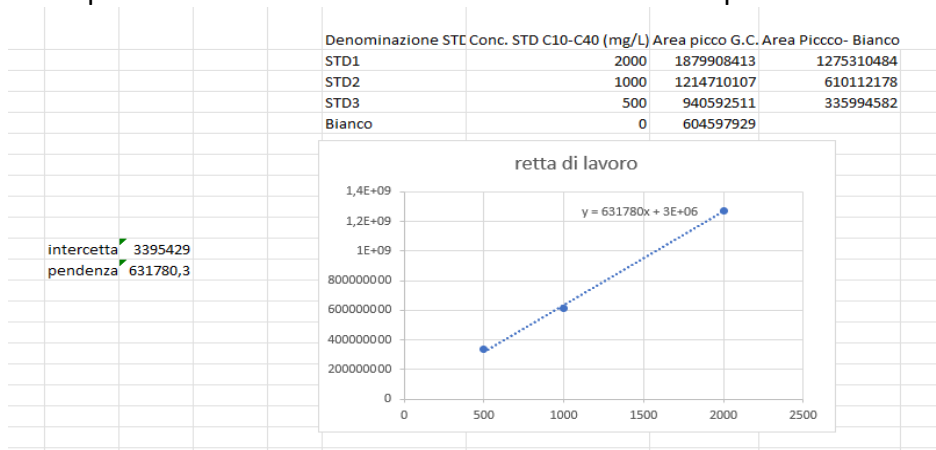
Forno: 50°C per 2.5 min

20°C/min >>> 300°C per 15 min

run time di 30 min



6- Elaborazione dati per costruzione retta di lavoro e determinazione pendenza e intercetta



Determinazione della concentrazione di idrocarburi pesanti C10-C40 negli estratti mediante la seguente formula:

$$\text{Idrocarburi C10-C40 (mg/l)} = \frac{(Ac - b) \times Ve}{a \times Vc}$$

dove:

- Ac: area integrata del cromatogramma fra C10 e C40 dell'estratto
- b: intercetta asse y della funzione di taratura
- Ve: volume estratto in ml
- a: pendenza della funzione di taratura
- Vc: volume campione acqua

Risultati sugli estratti:

sigla campione	volume acqua analizzata (ml)	massa acqua analizzata (g)	massa miscela C10-C40 aggiunta (mg)	concentrazione C10-C40 nel campione (mg/l)	materiale adsorbente	quantità materiale adsorbente (g)	volume estratto (ml)	Area G.C. picco integrata fra C10 e C40	C10-C40 mg/l	% di adsorbimento
1	450	461,25	45	100	PVC	2.0	5	2216833526	38,928	59,4
2	450	461,25	45	100	piume	2.0	5	1274548569	22,356	76,6
3	450	461,25	45	100	paglia	2.0	5	996001889	17,457	81,7
4	450	461,25	45	100			5	5457131886	95,915	0,0
5	450	461,25	45	100	PVC	2.0	5	2154876253	37,838	61,3
6	450	461,25	45	100	piume	2.0	5	1423564212	24,976	74,4
7	450	461,25	45	100	paglia	2.0	5	1202032315	21,080	78,4
8	450	461,25	45	100			5	5562321008	97,765	0,0

Analisi dei risultati:

I risultati medi riportati nella tabella seguente evidenziano una buona capacità di adsorbimento sia della paglia che delle piume di pollo.

Visto che l'idea progettuale prevede l'individuazione di un materiale adsorbente in grado di rigenerarsi per svolgere ciclicamente le fasi di adsorbimento e desorbimento, si esclude la possibilità di utilizzare la paglia di orzo in quanto ha evidenziato rilascio di sostanze in acqua (che si colora di giallo) e inoltre si potrebbero innescare meccanismi di decomposizione microbiologica (processi di marcitura).

volume campione (ml) (acqua distillata con 3.5% di NaCl)	concentrazione inquinante olio/gasolio mg/l	Materiale adsorbente (*)	% inquinante adsorbito (valore medio su n.2 prove)
450	100	nessuno	0.0
450	100	Sfridi di PVC	60.4
450	100	Piume di pollo	75.5
450	100	Paglia di orzo	80.1

(\*) 2 grammi di materiale adsorbente

## SCHEMA ANALISI 2 (quantificazione della capacità adsorbente delle piume di pollo e della capacità di desorbimento e recupero della frazione idrocarburica C10-C40)

Dopo aver individuato le piume di pollo come migliore materiale adsorbente si è passati ad una seconda fase di indagini finalizzate alla verifica della ripetibilità del potere adsorbente delle piume mediante prove ripetute, alla verifica della capacità adsorbente all'aumentare della concentrazione di idrocarburi C10-C40 presenti nel campione di acqua di mare e al recupero per desorbimento chimico con solvente degli idrocarburi adsorbiti nelle piume.

Sono state effettuate due serie di analisi (sigle A e B) preparando ogni volta 5 campioni di acqua contaminata da idrocarburi in concentrazione 100 mg/l e sottoponendone 4 al trattamento di adsorbimento con piume di pollo e una come bianco analitico seguendo la stessa metodica applicata nella scheda analisi 1.

Al termine delle 24 ore di adsorbimento i quattro infusori contenenti ognuno 2 grammi di piume di pollo sono stati lavati per immersione in 100 ml di esano per recuperare il contenuto di idrocarburi (unica soluzione di estratto per i 4 infusori)

Successivamente alla verifica della capacità adsorbente delle piume su n.8 campioni di acqua contaminata con la medesima concentrazione di idrocarburi C10-C40 (100 mg/l) si è svolta una terza serie di misurazioni (sigla C) variando la concentrazione di inquinante idrocarburico (100 mg/l, 200 mg/l, 300 mg/l, 400 mg/l) per verificare la capacità di adsorbimento al variare della concentrazione di inquinante idrocarburico.

Le procedure operative e analitiche svolte per le fasi di preparazione delle soluzioni, adsorbimento, estrazione, concentrazione estratti e quantificazione della frazione C10-C40 adsorbita dalle piume di pollo sono le stesse riportate nella scheda analisi 1.

L'estratto proveniente dal desorbimento dei 4 infusori dopo ogni serie di indagini, è stato trattato in colonnina con solfato di sodio e florisil, concentrato in evaporatore ruotante fino ad un volume di 10 ml e sottoposto ad analisi gas-cromatografica come svolto per tutti i campioni analizzati.

Nelle tre serie di misure sono state utilizzate le stesse piume al fine di verificare la capacità di questo biomateriale di mantenere il potere adsorbente su cicli ripetuti di adsorbimento/desorbimento.

Risultati sperimentali ottenuti:

sigla campione	volume acqua analizzata (ml)	massa acqua analizzata (g)	massa miscela C10-C40 (mg)	concentrazione C10-C40 nel campione (mg/l)	materiale adsorbente	quantità materiale adsorbente (g)	volume estratto (ml)	Area G.C. piccolo integrata fra C10 e C40	concentrazione mg/l C10-C40	% di adsorbimento
A1	450	461,25	45	100	piume	2.0	5	1327233601	23,282	74,5
A2	450	461,25	45	100	piume	2.0	5	1045850378	18,334	79,9
A3	450	461,25	45	100	piume	2.0	5	1222001751	21,432	76,5
A4	450	461,25	45	100	piume	2.0	5	1088085537	19,076	79,1
A5	450	461,25	45	100			5	5207131886	91,518	0,0
B1	450	461,25	45	100	piume	2.0	5	1427180253	25,040	73,8
B2	450	461,25	45	100	piume	2.0	5	1386737520	24,329	74,5
B3	450	461,25	45	100	piume	2.0	5	1295948818	22,732	76,2
B4	450	461,25	45	100	piume	2.0	5	1428158030	25,057	73,8
B5	450	461,25	45	100			5	5444034994	95,684	0,0
C1	450	461,25	45	100	piume	2.0	5	1349640600	23,676	74,1
C2	450	461,25	90	200	piume	2.0	5	1359792766	23,855	86,9
C3	450	461,25	135	300	piume	2.0	5	2495133124	43,822	84,0
C4	450	461,25	180	400	piume	2.0	5	2949988557	51,822	85,8
estratto piume A							10	8353843135	293,718	(132,2 mg di idrocarburi recuperati)
estratto piume B							10	7995933135	281,129	(126,5 mg di idrocarburi recuperati)

### **SCHEDA ANALISI 3: Progettazione e realizzazione di uno skimmer a pannelli fotovoltaici con filtro in piume di pollo per la rimozione di idrocarburi da acque superficiali**

#### introduzione

- Principio di funzionamento dello skimmer: recupero di idrocarburi galleggianti mediante aspirazione e adsorbimento su filtro in piume di pollo.
- Ruolo dei pannelli fotovoltaici: alimentazione autonoma di pompe e sistemi di controllo.

#### Scopo

- Realizzare un dispositivo flottante skimmer a basso consumo alimentato a energia fotovoltaica in grado di ospitare un filtro in piume di pollo.

#### Struttura meccanica

- Corpo galleggiante realizzato in materiale plastico o composito leggero.
- Bocca di aspirazione frontale con canalizzazione verso il serbatoio filtrante.
- Supporto superiore con pannelli fotovoltaici inclinati (massa totale ridotta).

#### Sistema energetico

- 3 pannelli fotovoltaici da 3 V ciascuno.

#### Sistema filtrante

- Cuscino filtrante contenente piume di pollo lavate, essiccate e compattate.
- Possibilità di sostituire il filtro.

