



Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Biologia  
*Corso di Laurea in Biologia*

Elaborato di Laurea  
**IMPATTI DEGLI SVERSAMENTI PETROLIFERI SUGLI  
ECOSISTEMI MARINI**

TUTOR: Prof. Maria Gabriella Marin  
*Dipartimento di Biologia*

LAUREANDA: Lisa Granzio

*Anno Accademico 2015-2016*



## INDICE

1. INTRODUZIONE	1
1.1. Destino del petrolio disperso in mare	1
1.2. Valutazione biologica	3
2. IMPATTI DEGLI SVERSAMENTI SULL'ECOSISTEMA MARINO	5
2.1. Plancton	5
2.2. Benthos	6
2.2.1 Macrofauna bentonica di Guethary	6
2.2.2 Meiofauna del Golfo del Messico	7
2.2.3 Comunità coralline del Golfo del Messico	8
2.3. Pesci	9
2.4. Mammiferi marini	10
2.4.1 Cetacei del Golfo del Messico	11
2.4.2 Lontre dello stretto di Prince William	12
2.5. Uccelli marini	12
2.5.1 Cormorano europeo	13
3. CONCLUSIONI	14
4. LETTERATURA CITATA	15



## **1. INTRODUZIONE**

Gli sversamenti di petrolio negli ecosistemi marini costituiscono una continua fonte di preoccupazione. La ricerca e lo sfruttamento di nuovi giacimenti si sta spostando dalla piattaforma continentale verso acque più profonde e a latitudini maggiori, dove il rischio di uno sversamento è maggiore e può colpire ambienti incontaminati. Nonostante il miglioramento tecnologico delle condizioni di trasporto realizzato con le petroliere di ultima generazione, resta comunque elevato il rischio di perdite, anche ingenti, sia in mare aperto, sia lungo le coste. L'inquinamento da petrolio persiste nell'ecosistema per molti anni dopo uno sversamento; dopo che il petrolio è stato eliminato dall'ambiente, gli impatti a lungo termine in genere sono limitati ad anomalie nella struttura della comunità, che possono persistere a lungo anche in relazione a complessità e durata dei cicli biologici delle specie coinvolte.

Gli effetti di uno sversamento dipendono da molti fattori: la quantità e il tipo di olio, come questo interagisce con l'ambiente, le caratteristiche climatiche, ecologiche e biologiche dell'area interessata. In particolare è importante la sensibilità delle specie chiave e il periodo dell'anno in cui vengono colpite dall'inquinamento. Il petrolio può impattare in modo diverso l'ambiente:

- Soffocamento fisico degli organismi: è causato da oli ad alta viscosità, o oli pesanti, e impedisce agli organismi di compiere funzioni vitali come la respirazione, l'alimentazione e la termoregolazione.
- Tossicità chimica: tipico delle componenti chimiche più leggere, che sono generalmente più biodisponibili, possono essere facilmente assorbite da organi, tessuti e cellule, e causare effetti tossici letali o subletali.
- Cambiamenti ecologici: causati principalmente dalla perdita di specie chiave con una specifica funzione nella comunità. Queste possono essere rimpiazzate da altre specie con funzioni simili, in questo caso le ripercussioni sull'intero ecosistema possono non essere molto gravi. Se invece la nicchia lasciata libera venisse occupata da una specie con un ruolo diverso, le dinamiche della comunità sarebbero completamente alterate spesso con ricadute fortemente negative.
- Effetti indiretti: perdita di rifugi e habitat a causa dello sversamento o delle operazioni di pulizia, soprattutto a livello costiero.

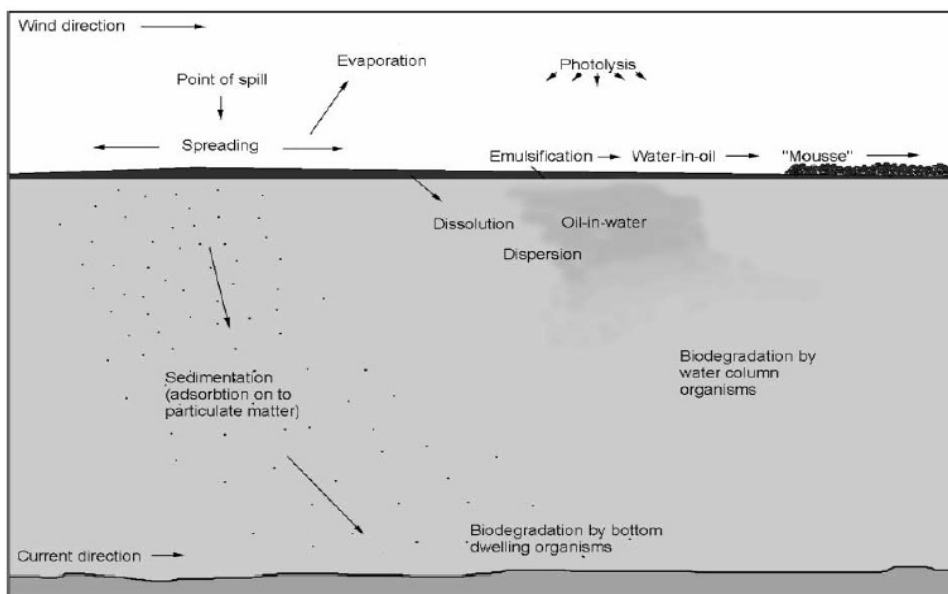
### **1.1 Destino del petrolio disperso in mare**

Il petrolio inizialmente si diffonde nei primi millimetri della colonna d'acqua. Esiste una componente volatile che evapora velocemente, soprattutto nelle prime ore e giorni dopo l'incidente, e che include molti prodotti tossici (come gli idrocarburi aromatici). Nella determinazione del tasso di evaporazione bisogna tenere in considerazione le condizioni atmosferiche e le temperature presenti

nella zona di rilascio ed è molto importante anche la natura del petrolio sversato: più è leggero, più evaporerà. Ad esempio più della metà del petrolio disperso in mare dalla petroliera *Jessica* nel 2001 in prossimità delle isole Galapagos era diesel (olio leggero), che le correnti e il vento hanno contribuito ad allontanare dalla costa e che il caldo sole tropicale ha fatto evaporare in grande quantità.

Altre componenti del petrolio vengono ossidate dai raggi UV, come mostrato dalla Figura 1, con un processo detto fotoossidazione (Radovic et al., 2012), che può generare alcuni prodotti (acidi e fenoli) più tossici degli idrocarburi di partenza, ma a concentrazioni generalmente basse e quindi ecologicamente poco significative. Il tasso di fotoossidazione dipende in primo luogo dall'intensità dell'irraggiamento e dal particolato in sospensione nella colonna d'acqua, non dalla temperatura. A sua volta l'irraggiamento dipende dalla stagione, dal momento del giorno, dalla latitudine, dallo spessore dell'atmosfera e dello strato di ozono, dall'altitudine e dalla presenza di nuvole.

Alcuni idrocarburi possono essere dispersi o disciolti in acqua, in questo modo possono essere più facilmente soggetti a degradazione. Microrganismi come batteri, funghi e lieviti svolgono un'attività importante nella fase di recupero che segue uno sversamento in quanto possono degradare l'olio disperso (Kingston, 2002): ossidano gli idrocarburi del petrolio ricavandone energia. In questo processo di biodegradazione sono molto importanti la composizione del carburante, la temperatura e la disponibilità di ossigeno: gli idrocarburi saturi sono più facilmente attaccabili, e le alte temperature promuovono la degradazione che può avvenire sia in condizioni aerobiche che anaerobiche, portando a diversi prodotti. Altre componenti del petrolio, infine, possono depositarsi sul substrato causando vari problemi agli organismi bentonici, come per esempio intossicazione e soffocamento.



**Figura 1** Vie attraverso cui il petrolio sversato può entrare nell'ecosistema marino. Da Kingston, 2002

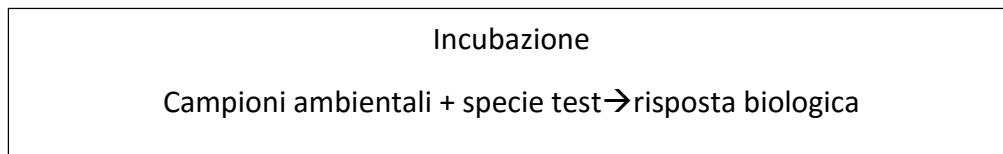
## **1.2 Valutazione biologica**

Gli organismi impattati da uno sversamento petrolifero possono subire tre tipi di effetti: effetti diretti letali ed effetti subletali, sia diretti che indiretti (Penela-Arenaz et al., 2009). Nel primo caso ci si riferisce a effetti fisici o chimici dovuti a un contatto diretto con il petrolio, che porta ad un aumento della mortalità causata da soffocamento, ipotermia (molto frequente negli uccelli marini), copertura della superficie corporea (che interferisce con la capacità di movimento, di cattura delle prede e di fuga dai predatori) e fenomeni di tossicità acuta. Eventi di mortalità di massa si registrano soprattutto vicino alla costa piuttosto che al largo. Gli effetti subletali sono dovuti alla permanenza nell'ambiente di componenti del petrolio e sono più difficili da rilevare degli effetti acuti letali. Infatti questo tipo di impatto può causare la riduzione della fitness di una specie, modificandone la fisiologia, il comportamento e le abitudini riproduttive, oppure può indurre un cambiamento nella distribuzione, nell'abbondanza e nella composizione delle comunità. Infine gli effetti indiretti possono includere variazioni negli habitat, nelle dinamiche preda-predatore, nelle interazioni tra specie in competizione per una risorsa, nella produttività e nelle caratteristiche delle reti trofiche. Quest'ultimo aspetto può essere legato alla perdita di specie chiave e può comportare un rallentamento del processo di recupero dell'ecosistema fino a farlo durare anche più di dieci anni (Penela-Arenaz et al., 2009).

Per indagare tutte queste problematiche legate agli sversamenti petroliferi si possono utilizzare due approcci diversi: in un caso si può intervenire direttamente sul campo con un monitoraggio delle popolazioni e delle comunità colpite, nell'altro si possono eseguire degli studi in laboratorio per verificare se i contaminanti sversati possono essere ancora presenti nelle matrici ambientali (acqua e sedimenti) in misura tale da portare ad effetti negativi su organismi marini usati come bioindicatori. Se si adotta l'approccio sul campo si effettuano dei rilevamenti in vari siti più o meno colpiti dall'incidente e si valutano gli effetti sulle singole popolazioni e sulle comunità. Questo tipo di analisi risulta più approfondito e completo se sono disponibili studi precedenti allo sversamento relativi alle varie componenti dell'ecosistema colpito: si possono così fare dei confronti per comprendere a fondo l'impatto subito e per monitorare l'evoluzione della situazione durante il periodo di recupero. Si può anche rilevare se l'equilibrio raggiunto dopo il recupero sia uguale a quello precedente l'incidente o se si sono instaurate nuove dinamiche all'interno della popolazione o della comunità esaminata. Per esempio alcune specie più suscettibili potrebbero essere state sostituite da altre più resistenti, oppure alcune popolazioni potrebbero essere state impattate tanto da non riuscire più a coprire a pieno il loro ruolo nella rete trofica, lasciando quindi modo ad altri organismi di

subentrare al loro posto oppure lasciando proliferare liberamente le loro prede, creando così scompensi anche negli altri livelli trofici. Per osservare l'impatto di uno sversamento su una comunità si possono tenere sotto controllo vari parametri ecologici. In primo luogo può essere valutata l'abbondanza nelle diverse popolazioni e può essere operato un confronto con i dati precedenti quando disponibili. Viene considerata anche la ricchezza specifica, e per specie di particolare interesse, possono essere valutati parametri in grado di descrivere eventuali variazioni nei tassi di crescita (ad esempio con la misura delle dimensioni corporee) o nel successo riproduttivo (ad esempio con la quantificazione del reclutamento). Alterazioni nella crescita e nella riproduzione risultano i migliori descrittori di effetti a lungo termine (Neuparth et al., 2012).

Le indagini in laboratorio si basano sull'uso di due strumenti molto importanti: i saggi biologici e i biomarker. Un saggio biologico è un metodo ecotossicologico per la rilevazione degli effetti dell'esposizione a contaminanti chimici e per la valutazione della qualità di un ambiente, basato sull'incubazione di organismi in campioni di acqua e/o sedimento provenienti dal sito impattato e sulla registrazione delle risposte biologiche (Radovic et al., 2012). Quanto previsto in un saggio biologico può essere schematizzato in questo modo:



I saggi biologici, o bioassay, sono utili per seguire il decorso dopo un incidente, per verificare la tossicità dei composti dispersi in acqua o depositati sul sedimento.

Molto importante è la scelta degli organismi usati per questi test e quella del loro stadio vitale. Spesso vengono usati ricci di mare e bivalvi nei primi stadi embrionali perché si è visto che sono più sensibili sia degli adulti sia dei gameti. Sugli organismi scelti per l'esecuzione dei saggi biologici si possono misurare le risposte di diversi biomarker, o marcatori biologici, come ad esempio variazioni nella presenza e nell'attività di molecole coinvolte nel metabolismo degli idrocarburi. Spesso si controlla l'attività di enzimi che intervengono nella difesa dallo stress ossidativo, promuovendo una riduzione delle specie ossidate dell'ossigeno (ROS), che aumentano nell'esposizione a contaminanti ambientali. Una mancata risposta antiossidante può causare danni cellulari, più o meno gravi, dato che i ROS sono in grado di agire a livello di membrana e a livello molecolare, su proteine e DNA. Biomarcatori di particolare interesse sono quelli in grado di descrivere lo stato del sistema immunitario degli animali poiché lo stress chimico a cui l'organismo è sottoposto può provocare un abbassamento



delle difese comportando un maggior rischio di infezioni e malattie anche mortali.

## **2. IMPATTI DEGLI SVERSAMENTI SULL'ECOSISTEMA MARINO**

Ogni componente della comunità marina ha una sua sensibilità al petrolio sversato in mare e quindi sarà impattata in modo diverso dalle altre, potrà subire effetti gravi immediatamente dopo l'incidente e poi riprendersi velocemente, oppure mostrare ripercussioni anche parecchi anni dopo l'inquinamento.

### **2.1 Plancton**

Generalmente non sono stati rilevati effetti a lungo termine sulle comunità planctoniche grazie ai tempi di generazione relativamente brevi e al reclutamento di individui dalle aree limitrofe a quella coinvolta nello sversamento (Penela-Arenaz et al., 2009). Piccole quantità di idrocarburi (<50ng/g) possono addirittura favorire la fotosintesi, probabilmente perché esercitano un effetto trofico benefico; concentrazioni maggiori invece inibiscono la fotosintesi e la crescita del fitoplancton (Clark, 2001). Effetti negativi sul fitoplancton sono associati alla presenza di uno spesso strato oleoso superficiale che impedisce gli scambi gassosi con l'atmosfera e la penetrazione della luce (Gonzalez et al., 2009). Viceversa, dopo lo sversamento della petroliera *Thesis* avvenuto nel mar Baltico nel 1977, si è registrato un aumento della produzione primaria e della biomassa fitoplanctonica, che è stato però messo in relazione al calo osservato nelle popolazioni degli erbivori zooplanctonici e quindi ad una riduzione del grazing da essi esercitato (Johansson et al., 1980).

Per quanto riguarda gli effetti sullo zooplancton, un esempio può essere dato dai Copepodi: se entrano in contatto con uno sversamento mostrano un aumento di mortalità, una diminuzione nell'alimentazione e nella fertilità (Abbriano et al., 2011). I copepodi però si sono anche dimostrati in grado di percepire ed evitare le aree inquinate, riducendo le possibilità di entrare in contatto con il petrolio e di subirne gli effetti negativi. Le larve di tonno (*Thunnus thynnus*) invece non sembrano avere le stesse capacità, mentre quelle di aringa e di salmone risultano molto sensibili agli idrocarburi policiclici aromatici (IPA) presenti nel petrolio, che causano emorragie, deformazioni spinali, ritardo nella crescita e morte (Billiard et al., 1999). Le miscele di petrolio e dispersanti usati per abbatterne la presenza in mare si dimostrano spesso più tossiche del solo petrolio, sia per il fitoplancton che per le larve di pesce (Abbriano et al., 2011). In ogni caso, nella maggior parte degli sversamenti di petrolio oggetto di studi, l'abbondanza e la struttura della comunità zooplanctonica non sono apparse alterate per periodi superiori a diverse settimane o alcuni mesi e pertanto si ipotizza che un iniziale aumento del

fitoplancton o una diminuzione dello zooplancton rappresentino essenzialmente dei fenomeni transitori (Abbriano et al., 2011).

Molto importante è l'azione dei batteri sugli idrocarburi dispersi in mare: molte specie degradano questi composti tossici immettendoli nella rete trofica. Un esempio è dato dalle variazioni nella composizione della comunità batterica osservate in seguito all'esplosione della piattaforma petrolifera *Deepwater Horizon* nel Golfo del Messico nel 2010. Alcune settimane dopo l'incidente si è registrato un bloom di *Oceanospirillales* (prevalentemente degradatori di idrocarburi alifatici semplici), tanto che questo ordine è arrivato a rappresentare fino al 95% dei batteri nella zona impattata, mentre nelle aree circostanti costituiva solo il 5%. Nei mesi successivi un altro genere (*Cycloclasticus*), che degrada in particolare IPA, ha preso il sopravvento, infine si è osservato un bloom di batteri metanotrofi che hanno ossidato tutto il metano rilasciato durante l'incidente. Questi risultati mostrano come la degradazione da parte dei batteri modifichi la composizione chimica degli idrocarburi nel corso del tempo e cambiamenti nella struttura della comunità batterica siano rappresentati da variazioni nella dominanza di taxa che utilizzano diversi substrati metabolici (Abbriano et al., 2011). I batteri possono non solo degradare ma anche accumulare idrocarburi trasferendoli così ai livelli più bassi della rete trofica pelagica e da questi a quelli via via più alti dove possono causare effetti negativi ritardati (Abbriano et al., 2011).

## **2.2 Benthos**

Gli organismi bentonici sono molto soggetti alla deposizione del petrolio sui fondali, quindi a fenomeni di soffocamento ma anche di tossicità acuta. Le macroalghe e gli invertebrati, come cnidari, crostacei, echinodermi e molluschi, di solito soffrono un'alta mortalità (Peterson et al., 2003). Dopo uno sversamento di petrolio si assiste in genere alla scomparsa degli erbivori dominanti e alla successiva colonizzazione del substrato da parte di alghe verdi.

### **2.2.1 Macrofauna bentonica di Guethary**

Dopo l'incidente della petroliera Prestige, avvenuto nel 2002 impattando le coste atlantiche dal nord del Portogallo alla Bretagna, Castege et al. (2014) hanno monitorato le variazioni nell'abbondanza di alcune specie di organismi bentonici sul litorale roccioso di Guethary (Golfo di Biscaglia). I dati raccolti tra il 2003 e il 2011 sono stati confrontati con quelli degli anni precedenti al disastro, consentendo così di seguire la graduale ripresa dell'ambiente e delle popolazioni colpite. Prima dell'incidente erano state campionate 57 specie, che nel 2004 sono però scese a 41. Negli anni successivi si è assistito ad una graduale ripresa fino a che le specie campionate sono tornate ad essere 58. Le specie presenti

sono state divise in quattro gruppi dai ricercatori: specie sempre presenti, specie rare campionate occasionalmente, specie scomparse dopo il disastro e ricomparse dopo 2-5 anni, e specie mai ricomparse. I dati raccolti hanno mostrato un forte impatto iniziale con la perdita di circa 16 specie e un graduale recupero negli anni successivi. Tuttavia alcune specie particolarmente sensibili all'inquinamento non sono più state segnalate, come ad esempio le spugne *Hymeniacidon perlevis* e *Tethya* sp. Si pensa che l'impatto iniziale sia stato causato non solo dallo sversamento ma anche dalle operazioni di pulizia: la costa considerata è stata infatti parzialmente pulita usando getti di acqua calda ad alta pressione, che hanno sterilizzato il substrato roccioso eliminando ogni organismo bentonico sopravvissuto all'iniziale impatto del petrolio. Si è anche notato come l'abbondanza totale di organismi sia fortemente legata a quella dei brucatori (grazer). Quest'ultima, dopo un'iniziale diminuzione dovuta agli effetti diretti dello sversamento, ha avuto un picco e infine si è stabilizzata. Questo fenomeno è stato registrato anche in altri casi di incidenti di petroliere ed è stato studiato in particolare da Barillé-Boyer et al. (2004) in relazione all'incidente della nave Erika, avvenuto nel 1999 anch'esso nel golfo di Biscaglia. Nel loro lavoro gli autori hanno mostrato come nel primo periodo la copertura percentuale di due specie di macrofite (*Ulva* sp. e *Grateloupia doryphora*) fosse aumentata a causa della diminuzione degli erbivori, diminuendo poi notevolmente nel momento in cui l'abbondanza dei grazer arrivava a far registrare il suo picco massimo. Successivamente si assisteva all'instaurarsi di un nuovo equilibrio tra alghe ed erbivori. Un fenomeno simile ha caratterizzato anche le coste di Guethary in seguito all'incidente della *Prestige*. In questo caso l'area considerata e campionata si trovava all'interno di un'area marina protetta, quindi si sono potute escludere interferenze di impatti antropici successivi all'incidente. Lo studio di Castege et al. (2014) ha permesso di evidenziare un tempo di recupero di circa 5 anni necessario a riportare la struttura della comunità bentonica a condizioni simili a quelle presenti prima dell'incidente.

### **2.2.2 Meiofauna del Golfo del Messico**

A seguito del disastro ambientale provocato dallo scoppio della piattaforma petrolifera *Deepwater Horizon* nel 2010 e del conseguente sversamento in mare di enormi quantità di petrolio, la meiofauna del Golfo del Messico ha subito alcune importanti modificazioni. Bagueley et al. (2015) hanno condotto una campagna di monitoraggio in ben 66 siti più o meno distanti (0.5 – 200 Km) dalla piattaforma esplosa. Hanno registrato variazioni a livello di abbondanza, diversità e rapporto nematodi/copepodi (i due taxa dominanti) in tutte le stazioni considerate. In particolare, nelle zone più colpite si è assistito ad un aumento dell'abbondanza dei nematodi parallelo ad una diminuzione nella diversità

tassonomica. Al contrario nelle zone più lontane e meno impattate è stata rilevata una maggiore diversità tassonomica e una minore abbondanza di nematodi (Tabella 1). Questi dati, in accordo con i risultati ottenuti in studi analoghi, sembrano mostrare un equilibrio tra l'arricchimento organico del sedimento e la tossicità del materiale organico depositato.

Taxa	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4
Nematoda	97.62	91.17	84.55	77.99
Copepoda	1.61	4.27	6.59	10.15
Nauplii	0.49	3.76	7.09	9.72
Polychaeta	0.27	0.61	1.08	1.31
Ostracoda	0.00	0.06	0.28	0.44
Kinorhyncha	0.00	0.04	0.30	0.24
Bivalvia	0.01	0.08	0.08	0.08
Tanaidacea	0.00	0.00	0.01	0.03
Tardigrada	0.00	0.01	0.01	0.02
Aplacophora	0.00	0.00	0.01	0.00
Gastrotricha	0.00	0.00	0.01	0.00

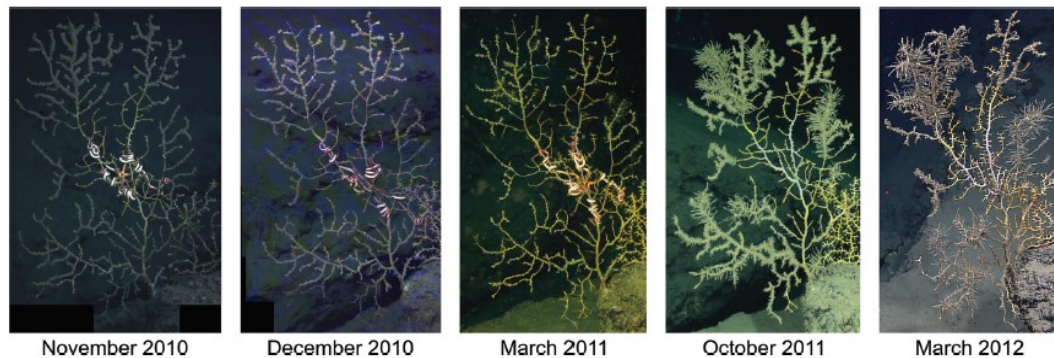
**Tabella 1.** *Abbondanza dei diversi taxa della meiofauna in 4 aree del Golfo del Messico dopo l'incidente alla piattaforma Deepwater Horizon. Da Baguley et al., 2015.*

### 2.2.3 Comunità coralline del Golfo del Messico

Le conoscenze su composizione, localizzazione e distribuzione delle comunità coralline del Golfo del Messico sono limitate, per questo motivo è stato particolarmente difficile verificare i possibili impatti dell'incidente della piattaforma *Deepwater Horizon* in questi ecosistemi. Grazie a un nuovo metodo di riconoscimento di aree in cui sono presenti depositi carbonatici, i ricercatori sono riusciti a scoprire nuove comunità. In particolare a circa 13 km a sud-ovest della piattaforma ne è stata identificata una in cui più della metà dei coralli era ricoperta da un caratteristico flocculato scuro (floc), e mostrava segni di stress, come perdita di parti di tessuto ed eccessiva produzione di muco (Fisher et al., 2014). Si è anche potuto notare come alcuni commensali di questi coralli, ad esempio l'ofiuroido *Asteroschema clavigerum*, fossero ancora attaccati alle porzioni di colonia completamente ricoperte di floc, anche se queste erano già morte o morenti.

Dall'analisi dei campioni è stato appurato che il floc conteneva anche IPA provenienti dal petrolio disperso dalla *Deepwater Horizon* (White et al., 2012a). Questi risultati hanno portato Fisher et al. (2014) ad indicare proprio nel disastro della *Deepwater Horizon* la causa dei gravi danni subiti dai coralli. Il monitoraggio continuato successivamente ha permesso di rilevare una ripresa della comunità nel giro di un paio di anni: le zone che erano scarsamente ricoperte dal floc nel 2010, nel 2012 si erano perfettamente riprese (Hsing et al., 2013). Nelle diverse aree della comunità corallina la persistenza del danno è risultata significativamente correlata al grado di impatto osservato inizialmente e alla colonizzazione secondaria da parte di idroidi sulle porzioni di colonia morte. Gli

idroidi esibiscono una distribuzione a chiazze sulle parti moderatamente colpite dei coralli, mentre sono assenti in quelle sane e colonizzano pesantemente quelle morte (Figura 2). Questo tratto caratterizzante ha permesso di individuare nel Golfo del Messico altre comunità coralline che hanno subito una sorte simile, identificando anche colonie la cui morte era evidentemente recente e quindi probabile conseguenza dello sversamento di petrolio dalla piattaforma esplosa (Fisher et al., 2014).



**Figura 2** Diversi livelli di danno in colonie di *Paramuricea biscaya* tra Novembre 2010 e Marzo 2012. Da Fisher et al., 2014.

### 2.3 Pesci

I pesci possono essere influenzati da uno sversamento in vari modi: raramente è stata osservata alta mortalità in questi organismi, in quanto sono in grado di evitare attivamente le zone inquinate. Ciononostante, i pesci possono mostrare gli effetti di uno sversamento in particolari situazioni, per esempio se avviene in acque basse, chiuse o semichiusate, oppure se la quantità di petrolio rilasciata è stata consistente, oppure possono risentirne indirettamente, attraverso danni subiti da altre specie di cui si cibano o dall'ambiente in cui vivono.

Un esempio di forte impatto sulle risorse ittiche è dato dall'incidente della petroliera *Prestige*. A seguito del disastro si sono registrati forti cali nelle abbondanze di alcune specie, soprattutto bentoniche: le catture di cicerello (*Gymnammodytes semisquamatus*) nel 2003 sono diminuite significativamente e sono stati registrati alti tassi di mortalità, anche se parte della popolazione poteva essere migrata per evitare il sedimento inquinato (Velandò et al., 2005a). Anche altre specie di pesci, come il rombo quattrocchi (*Lepidorhombus boscii*), ma anche di crostacei come l'aragosta norvegese (*Nephrops norvegicus*) e i gamberetti pandalidi (*Plesionika heterocarpus*), hanno subito un calo nell'abbondanza, seppure per il rombo e i gamberetti si sia notata una ripresa già a partire dal 2004. In campioni di boghe, *Boops boops*, raccolti a Malpica e a Vigo due o tre anni dopo l'incidente si è riscontrato un notevole aumento nell'abbondanza e nella ricchezza delle comunità di parassiti e un cambiamento nei pattern di abbondanza delle singole specie e dei diversi gruppi funzionali considerati (Perez-del Olmo et al., 2007). Gonzalez-Doncel et al. (2008) hanno

studiato gli effetti di diverse frazioni di petrolio rilasciato dalla *Prestige* (frazione solubile in acqua, grezzo e petrolio invecchiato) sugli stadi embrionali e larvali di medaka (*Oryzias latipes*). Hanno rilevato anomalie nel tempo di schiusa, nella crescita e nella mortalità delle larve: questo ha suggerito che l'impatto ambientale di quel particolare petrolio non fosse legato solo agli IPA, presenti con livelli relativamente bassi, ma anche ad altre sue componenti. Altri studi hanno evidenziato riduzioni della crescita in giovanili di rombo chiodato (*Scophthalmus maximus*) mantenuti in laboratorio con cibo contenente carburante raccolto subito dopo il disastro; la riduzione si è dimostrata proporzionale alla concentrazione di inquinante ed è stata associata ad una minore assunzione di cibo e ad una minore efficienza metabolica (Morales-Nin et al., 2007; Saborido-Rey et al., 2007).

Un altro esempio viene ancora una volta dal disastro della piattaforma petrolifera *Deepwater Horizon*. Il gruppo di Brown-Peterson e colleghi (2015) ha pubblicato i risultati del suo lavoro sugli stadi giovanili di sogliola, *Paralichthys lethostigma*. Gli organismi sono stati esposti per 32 giorni a sedimento contaminato con diverse concentrazioni di petrolio rilasciato in mare dalla piattaforma. È stato quindi valutato il loro stato di salute, attraverso indagini condotte a vari livelli. A livello di organismo si è notato un aumento della mortalità e un rallentamento nella crescita direttamente correlati all'aumento della concentrazione di IPA nel sedimento. A livello di tessuti e organi è stata evidenziata una serie di problemi istopatologici, soprattutto nel fegato e nelle branchie: riduzione del tessuto esocrino pancreatico, edema epatico molto più sviluppato nei pesci esposti a sedimento più inquinato, proliferazione del tessuto delle lamelle branchiali, che addirittura tendono a fondersi tra loro. Infine sono state rilevate anche sostanziali variazioni nella composizione del microbioma presente sulle branchie e nell'intestino delle sogliole. Molti gruppi di questi microrganismi hanno mostrato un aumento nell'abbondanza, altri una diminuzione, in ogni caso quelli che vivono sulle lamelle branchiali hanno subito un impatto maggiore di quelli presenti nell'intestino. I risultati ottenuti hanno consentito di evidenziare il possibile impatto subito dai pesci bentonici del Golfo del Messico in seguito al disastro della *Deepwater Horizon*.

#### **2.4 Mammiferi marini**

L'impatto degli sversamenti sui mammiferi marini può includere effetti a breve termine o effetti tossici cronici, che possono derivare dall'impatto fisico sulla pelliccia, causa di ipotermia e annegamento, dal tentativo di ripulirsi ingerendo petrolio o dall'ingestione di prede intossicate (Peterson et al., 2003). Inoltre questi animali sono esposti al rischio di respirare gas tossici liberati dal petrolio che possono causare infiammazioni a livello nasale e dello sfintere e perfino

polmoniti, con elevate mortalità. Per esempio, studi condotti su un gruppo di orche dello stretto di Prince William in Alaska hanno registrato una serie di morti sospette a seguito dell'incidente della petroliera *Exxon Valdez*, nel 1989. Il numero di orche è infatti diminuito significativamente dopo lo sversamento, e poiché non sono stati accertati impatti diretti del petrolio, si è ipotizzato un effetto indiretto del disastro ambientale che avrebbe portato ad una compromissione delle difese immunitarie degli animali, esponendoli maggiormente a malattie o a parassitosi (NOAA, 2015).

#### **2.4.1 Cetacei del Golfo del Messico**

Molti studi sono stati condotti sull'impatto del disastro della *Deepwater Horizon* sui cetacei. I ricercatori hanno dovuto fare i conti con l'impossibilità di rintracciare tutte le carcasse per poter stimare correttamente la mortalità causata dallo sversamento nelle popolazioni del Golfo del Messico. Williams et al. (2011) hanno analizzato serie storiche di dati relativi a ritrovamenti di carcasse, abbondanze delle popolazioni, tassi di crescita e spiaggiamenti per 14 specie di cetacei del Golfo del Messico e hanno potuto stimare che le carcasse recuperate rappresentino in media solo il 2% degli animali morti. Ad esempio, se viene ritrovata la carcassa di un capodoglio e la necropsia indica come causa di morte le conseguenze dovute a uno sversamento, dato che il tasso di ritrovamento delle carcasse di questa specie è del 3,4%, è probabile che ci siano altri 29 capodogli morti che non sono stati rintracciati. Nel caso della *Deepwater Horizon* sono state ritrovate in totale 101 carcasse di cetacei e tutte le morti sono attribuibili all'incidente, ciò significa che in totale devono essere considerati 5050 casi di mortalità. La maggior parte dei cetacei morti sono stati identificati come tursiopi (*Tursiops truncatus*), ciò suggerisce che lo sversamento potrebbe aver avuto conseguenze devastanti sulle piccole popolazioni di tursiopo del Golfo del Messico.

Un altro studio si è focalizzato maggiormente sulle conseguenze per i tursiopi del contatto con il petrolio sversato e con inquinanti organici persistenti (POPs). Balmer e colleghi (2015) hanno campionato il grasso di molti esemplari maschi di delfino in sei siti del Golfo del Messico e ne hanno misurato la concentrazione di POPs e di contaminanti riconducibili al petrolio sversato. Le loro ricerche sono state mirate a trovare dei collegamenti tra l'aumento di mortalità di questa specie, la presenza di POPs e di petrolio. E' stato dimostrato infatti che alti livelli di POPs e altri contaminanti possono causare disfunzioni a livello endocrino e depressione del sistema immunitario (Ross et al., 1996; Schwacke et al., 2012) oltre che un aumento dell'esposizione a malattie epidemiche (Aguilar and Borrel, 1994). I risultati ottenuti dai ricercatori hanno evidenziato però dei livelli bassi di POPs in tutti i siti campionati: questo ha dimostrato che i POPs non possono

essere ritenuti la causa determinante della morte dei cetacei. Possono però aver contribuito insieme ad altri fattori, come la presenza di prede intossicate dallo sversamento di petrolio, all'abbassamento delle difese immunitarie e all'aumentata esposizione a malattie, come la polmonite, che sono poi risultate la causa finale di morte.

#### **2.4.2 Lontre dello stretto di Prince William**

A causa dell'incidente della petroliera *Exxon Valdez* nel 1989 nello stretto Prince William, Alaska, l'ecosistema ha subito un forte impatto ecologico. Il caso delle lontre di mare (*Enhydra lutris*) è diventato il simbolo di questo disastro: anche a distanza di anni infatti sono state registrate difficoltà di recupero nelle popolazioni colpite. Dopo il primo forte impatto fisico su centinaia di animali, letteralmente ricoperti da petrolio, le lontre hanno mostrato una difficoltà nella ripresa, dovuta al fatto che gli individui sopravvissuti hanno comunque una vita media più corta rispetto agli anni precedenti lo sversamento. Inoltre anche le lontre nate dopo l'incidente hanno manifestato problemi di salute probabilmente legati all'intossicazione dei genitori, e soprattutto della madre. In molte carcasse recuperate nei mesi successivi allo sversamento, sono stati riscontrati danni a livello polmonare, epatico e renale, ma anche gli esemplari portati in centri specializzati per cercare di salvarli sono sopravvissuti poco e dalla necropsia sono stati trovati gli stessi danni osservati in quelli morti in natura (Monson et al., 2000). I ricercatori hanno ipotizzato che la continua e prolungata esposizione al petrolio abbia potuto causare danni persistenti a lungo termine nelle popolazioni di lontre, e in particolare negli individui direttamente colpiti dall'incidente, che in alcune aree sono arrivati a far registrare una densità dimezzata rispetto al periodo pre-sversamento. I dati raccolti hanno mostrato infatti una mortalità particolarmente alta fino a nove anni dopo l'incidente, per lontre di tutte le classi di età: gli esemplari che avevano già 4/5 anni nel 1989 hanno subito i maggiori danni, mentre quelli via via più giovani mostrano di avere maggiore resistenza e un tasso di sopravvivenza maggiore. In ogni caso il calo demografico ha causato un forte ritardo nella ripresa delle popolazioni di lontre, tanto che i primi deboli segni di aumento demografico sono stati registrati solo nel 1991, mentre solo tra il 1993 e il 1995 la crescita ha iniziato a dimostrarsi significativa. La ripresa è stata favorita dallo spostamento di individui, soprattutto maschili, dalle aree meno colpite o indenni, che ha così permesso un graduale recupero anche nelle zone più impattate.

#### **2.5 Uccelli marini**

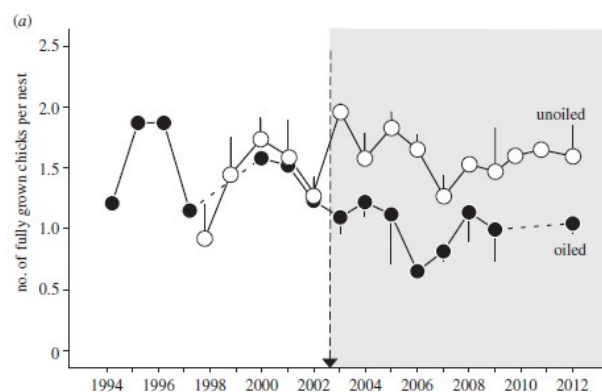
Gli uccelli marini sono tra gli animali che soffrono il maggior impatto dopo uno sversamento di petrolio (Peterson et al., 2003) a causa del loro continuo contatto



con la superficie marina e con l'ambiente costiero. Il piumaggio può impregnarsi di petrolio, con conseguente perdita dell'isolamento dall'acqua e la diminuzione della galleggiabilità ed effetti finali simili a quelli descritti per i mammiferi marini con pelliccia. Inoltre l'inalazione e l'ingestione casuale di idrocarburi tossici possono provocare gravi danni a livello dell'apparato respiratorio, del sistema digerente e anche a livello cerebrale.

### 2.5.1 Cormorano europeo

Il cormorano europeo (*Phalacrocorax aristotelis*) è stato duramente colpito dall'incidente della *Prestige* nel 2002 (Barros et al., 2014). Il successo riproduttivo annuale era stabile prima dell'incidente, ma dopo si è ridotto del 45% nelle colonie colpite dallo sversamento rispetto a quelle non impattate, come si nota bene dalla Figura 3. Grazie all'esistenza di monitoraggi precedenti, è stato possibile fare delle valutazioni utilizzando un modello *before-after-control-impact* (BACI) su un arco temporale di 18 anni, dal 1994 al 2012. In questo modo Barros et al., (2014) hanno potuto distinguere gli effetti dello sversamento dalle variazioni naturali temporali e spaziali nel successo riproduttivo di questi animali. Per indagare i potenziali effetti delle variazioni climatiche sulla riproduzione, i ricercatori hanno tenuto conto anche di indici relativi alla circolazione atmosferica (North Atlantic Oscillation, NAO) e alla temperatura superficiale. Poiché in due aree sono stati trovati dei visoni americani (*Neovison vison*), una specie invasiva che può influenzare l'andamento del successo riproduttivo dei cormorani, anche la variabile presenza/assenza del predatore è stata inclusa nel modello. In questo modo si è potuto escludere che il calo registrato nel successo riproduttivo delle colonie impattate potesse dipendere da variazioni climatiche o dalla presenza del visone americano.



**Figura 3** Andamento del successo riproduttivo del cormorano europeo in aree impattate (oiled) e non impattate (unoiled). Da Barros et al., 2013.

Nonostante questo lavoro rappresenti un contributo significativo nella valutazione dell'impatto dell'incidente, mettendo in luce aspetti di gravità precedentemente non emersi con altrettanta chiarezza, non vengono tuttavia fornite indicazioni su quali potrebbero essere state le cause dirette del calo di

fitness per i cormorani raggiunti dall'inquinamento. Gli autori suggeriscono la possibile presenza di effetti subletali legati all'esposizione alle componenti del petrolio e una riduzione della disponibilità di risorse alimentari, tanto che anche dopo cinque anni dall'incidente le colonie di uccelli di aree impattate non mostravano ancora segni di ripresa.

### **3. CONCLUSIONI**

Gli sversamenti di petrolio continuano a rimanere una minaccia per gli ecosistemi marini. Per riuscire a fronteggiare una così ampia varietà di impatti si è resa sempre più evidente la necessità di avere a disposizione piani in grado di definire non solo le modalità di intervento immediato, ma anche quelle di valutazione dei danni ambientali ed economici e di monitoraggio spazio-temporale dopo l'incidente (Kirby & Law, 2010). Una particolare attenzione viene richiesta nella scelta delle metodologie adottate, nella validazione della loro efficienza e del rapporto costi/benefici nel loro impiego. Questi aspetti sono essenziali nella definizione delle strategie di mitigazione degli impatti, per esempio in relazione all'uso di solventi durante le operazioni di pulizia o di trattamenti con fertilizzanti per favorire la crescita dei batteri degradatori. Proprio tenendo conto di queste esigenze in Inghilterra è stato avviato un progetto denominato "Pollution Response in Emergencies: Marine Impact Assessment and Monitoring (PREMIAM)" con la finalità di definire le linee guida per fronteggiare una situazione di emergenza e di formare, coordinare e mantenere una rete di servizi pronti ad intervenire se si dovesse verificare un incidente. Vengono coinvolte competenze diverse, come quelle di chimici analitici, ecologi, ecotossicologi, modellisti esperti in valutazioni di impatto e di recupero, ma vengono anche individuate strutture che possano provvedere all'esecuzione dei campionamenti (al largo, vicino alla costa e sulla costa), e al trasporto dei campioni verso i laboratori di analisi (Kirby & Law, 2010). Accanto ad iniziative come PREMIAM, risulta in ogni caso fondamentale implementare la legislazione internazionale e le convenzioni esistenti, come ad esempio l'International Convention on Oil Pollution Preparedness, Response and Co-operation (OPRC), che anche a livello internazionale promuovono il coordinamento negli interventi necessari dopo uno sversamento di petrolio. Va sottolineata infine l'importanza del proseguimento dei monitoraggi per tempi sufficienti a rilevare anche gli impatti a lungo termine che un incidente può provocare. Nonostante sia stato dimostrato in alcuni casi che il recupero dell'ecosistema può durare in media tra i due e i dieci anni (Kingston, 2002), in ecosistemi particolarmente vulnerabili può essere necessario un più ampio lasso di tempo, come è stato evidenziato nel caso dell'incidente della petroliera Exxon Valdez i cui effetti erano ancora rintracciabili anche dopo 20 anni (Peterson et al., 2003).

## LETTERATURA CITATA

- Abbriano, R. M., Carranza, M. M., Hogle, S. L., Levin, R. A., Netburn, A. N., Seto, K. L., Snyder, S. M., SIO280, Franks, P. J. S., 2011. Deepwater Horizon oil spill: A review of the planktonic response. *Oceanography* 24 (3): 294-301.
- Aguilar, A., Borrell, A., 1994. Abnormally high polychlorinated biphenyl levels in striped dolphins (*Stenella coeruleoalba*) affected by the 1990–1992 Mediterranean epizootic. *Science of the Total Environment* 154: 237–247.
- Baguley, J. G., Montagna, P. A., Cooksey, C., Jeffrey L. Hyland, J. L., Bang, H. W., Morrison, C., Kamikawa, A., Bennetts, P., Saiyo, G., Parsons, E., Herdener, M., Ricci, M., 2015. Community response of deep-sea soft-sediment metazoan meiofauna to the Deepwater Horizon blowout and oil spill. *Marine Ecology Progress Series* 528: 127-140.
- Balmer, B. C., Ylitalo, G. M., McGeorge, L. E., Baughc, K. A., Boyd, D., Mullin, K. D., Rosel, P. E., Sinclair, C., Wells, R. S., Zolmana, E. S., Schwacke, L. H., 2015. Persistent organic pollutants (POPs) in blubber of common bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) along the northern Gulf of Mexico coast, USA. *Science of the Total Environment* 527: 306-312.
- Barillé-Boyer, A-L., Gruet, Y., Barillé, L., Harin, N., 2004. Temporal changes in community structure of tide pools following the “Erika” oil spill. *Aquatic Living Resources* 17: 323-328.
- Barros, A., Alvarez, D., Velando, A., 2014. Long-term reproductive impairment in a seabird after the Prestige oil spill. *Biology Letters* 10 (4).
- Billiard, S.M., Querbach, K., Hodson, P.V., 1999. Toxicity of retene to early life stages of two freshwater fish species. *Environmental Toxicology and Chemistry* 18: 2070–2077.
- Brown-Peterson, N. J., Krasnec, M., Takeshita, R., Ryanc, C. N., Griffitt, K. J., Lay, C., Mayerc, G. D., Bayhaa, K. M., Hawkinsa, W. E., Liptonb, I., Morris, J., Griffitt, R. J., 2015. A multiple endpoint analysis of the effects of chronic exposure to sediment contaminated with *Deepwater Horizon*

- oil on juvenile Southern flounder and their associated microbiomes. *Aquatic Toxicology* 165: 197-209.
- Castege, I., Milon, E., Pautrizel, F., 2014. Response of benthic macrofauna to an oil pollution: Lessons from the "*Prestige*" oil spill on the rocky shore of Guethary (south of the Bay of Biscay, France). *Deep-Sea Research Part II-Topical Studies In Oceanography* 106: 192-197.
  - Clark, R. B., 2001. *Marine Pollution*. Oxford University Press, Oxford, 236 pp.
  - Fisher, C. R., Demopoulos, A. W. J., Cordes, E. E., Baums, I. B., White, H. K., Bourque, J. R., 2014. Coral communities as indicators of ecosystem-level impacts of the *Deepwater Horizon* spill. *Bioscience* 64 (9): 796-807.
  - Gonzalez, J., Figueiras, F. G., Aranguren-Gassis, M., Crespo, B. G., Fernandez, E., Moran, X. A. G., Nieto-Cid., M., 2009. Effect of a simulated oil spill on natural assemblages of marine phytoplankton enclosed in microcosms. *Estuarine, Coastal, and Shelf Science* 83:265–276.
  - González-Doncel, M., González, L., Fernández-Torija, C., Navas, J. M., Tarazona, J. V., 2008. Toxic effects of an oil spill on fish early life stages may not be exclusively associated to PAHs: Studies with *Prestige* oil and medaka (*Oryzias latipes*). *Aquatic Toxicology* 87: 280-288.
  - Hsing, P. Y., Fu, B., Larcom, E.A., Berlet, S. P., Shank, T. M., Govindarajan, A. F., Lukasiewicz, A. J., Dixon, P. M., Fisher, C. R., 2013. Evidence of lasting impact of the *Deepwater Horizon* oil spill on a deep Gulf of Mexico coral community. *Elementa: Science of the Anthropocene* 1.
  - Johansson, S., Larsson, U., Boham, P., 1980. The *Thesis* oil spill. Impact on the pelagic ecosystem. *Marine Pollution Bulletin* 11: 284-293.
  - Kingston, P. F., 2002. Long-term environmental impact of oil spills. *Spill Science & Technology Bulletin* 7: 53–61.
  - Kirby, M. F., Law, R. J., 2010. Accidental spills at sea – Risk, impact, mitigation and the need for co-ordinated post-incident monitoring. *Marine Pollution Bulletin* 60: 797-803.

- Monson, D. H., Doak, D. F., Ballachey, B. E., Johnson, A., Bodkin, J. L., 2000. Long-term impacts of the *Exxon Valdez* oil spill on sea otters, assessed through age-dependent mortality patterns. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 97 (12): 6562–6567.
- Morales-Nin, B., Geffen, A. J., Cardona, F., Kruber, C., Saborido-Rey, F., 2007. The effects of the *Prestige* oil ingestion on the growth and chemical composition of turbot otoliths. *Marine Pollution Bulletin* 54: 1732-1741.
- Neuparth, T., Moreira, S. M., Santos, M. M., Reis-Henriques, M. A., 2012. Review of oil and HNS accidental spills in Europe: Identifying major environmental monitoring gaps and drawing priorities. *Marine Pollution Bulletin* 64: 1085–1095.
- NOAA, 2015. How Oil Spills Affect Fish and Whales. <http://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/oil-spills/how-oil-spills-affect-fish-and-whales.html>
- Penela-Arenaz, M., Bellas, J., Vazquez, E., 2009. Effects of the *Prestige* oil spill on the biota of NW Spain: 5 years of learning. *Advances in Marine Biology*.
- Pérez-del Olmo, A., Raga, J. A., Kostadinova, A., Fernández, M., 2007. Parasite communities in *Boops boops* (L.) (Sparidae) after the *Prestige* oil spill: Detectable alterations. *Marine Pollution Bulletin* 54: 266-276.
- Peterson, C. H., Rice, S. D., Short, J. W., Esler, R. D., Bodkin, J. L., Ballachey, B. E., Irons, D. B., 2003. Long-term ecosystem response to the *Exxon Valdez* oil spill. *Science* 302: 2082-2086.
- Radovic, J. R., Rial, D., Lyons, B. P., Harman, C., Viñas, L., Beiras, R., Readman, J. W., Thomas, K. V., Bayona, J. M., 2012. Post-incident monitoring to evaluate environmental damage from shipping incidents: Chemical and biological assessments. *Journal of Environmental Management* 109: 136-153.
- Ross, P., De Swart, R., Addison, R., Van Loveren, H., Vos, J., Osterhaus, A., Contaminant-induced immunotoxicity in harbour seals: wildlife at risk?. *Toxicology* 112: 157–169.

- Saborido-Rey, F., Domínguez-Petit, R., Tomàs, J., Morales-Nin, B., Alonso-Fernandez, A., 2007. Growth of the juvenile turbot in response to food pellets contaminated by fuel oil from the tanker *Prestige*. *Marine Ecology Progress Series* 345: 271-279.
- Schwacke, L. H., Zolman, E. S., Balmer, B. C., De Guise, S., George, R. C., Hoguet, J., Hohn, A. A., Kucklick, J. R., Lamb, S., Levin, M., Litz, J. A., McFee, W. E., Place, N. J., Townsend, F. I., Wells, R. S., Rowles, T. K., 2012. Anemia, hypothyroidism and suppressed immune response associated with extreme polychlorinated biphenyl exposure in common bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) from the Georgia, USA, coast. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Science* 279, 48–57.
- Velando, A., Munilla, I., Leyenda, P. M., 2005a. Short-term indirect effects of the *Prestige* oil spill on European Shags: Changes on the availability of prey. *Marine Ecology Progress Series* 302: 272-286.
- White, H. K., Hsing, P. Y., Choc, W., Shank, T. M., Cordes, E. E., Quattrini, A. M., Nelson, R. K., Camilli, R., Demopoulos, A. W. J., German, C. R., Brooks, J. M., Roberts, H. H., Shedd, W., Reddy, K. M., Fisher, C. B., 2012a. Impact of the *Deepwater Horizon* oil spill on a deep-water coral community in the Gulf of Mexico. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109: 20303-20308.
- Williams, R., Gero, S., Bejder, L., Calambokidis, J., Kraus, S. D., Lusseau, D.,
- Read, A. J., Robbins, J., 2011. Understanding the damage: interpreting cetacean carcass recoveries in the context of the *Deepwater Horizon*/BP incident. *Conservation Letters* 4: 228-233.