

ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

FACOLTA' DI SCIENZE MATEMATICHE FISICHE E NATURALI

Corso di laurea in SCIENZE AMBIENTALI

RELAZIONE TRA URAGANI E FIORITURE  
FITOPLANCTONICHE NELL'OCEANO ATLANTICO

Tesi di laurea in Geografia fisica.

Relatore

Prof. Nadia Pinardi

Correlatore

Dott. Marcello Vichi

Presentata da

Luconi Elisa

( III sessione)

Anno Accademico 2010-2011

# INDICE

<i>1. INTRODUZIONE</i>	Pag. 3
1.1 Cenni sugli uragani	Pag. 3
1.2 Osservazioni satellitari	Pag.13
<i>2. SCOPO DEL LAVORO</i>	Pag.19
<i>3. MATERIALI, METODI E STRUMENTI UTILIZZATI</i>	
3.1 Dati satellitari di clorofilla	Pag.22
3.2 Dati satellitari di sst	Pag.22
3.3 Tracce dei cicloni	Pag.23
3.4 Metodo di lavoro	Pag.23
<i>4. RISULTATI OTTENUTI</i>	Pag.26
<i>5. DISCUSSIONE DEI RISULTATI OTTENUTI</i>	Pag.40
<i>6. CONCLUSIONI E LAVORO FUTURO</i>	Pag.43
<i>7. BIBLIOGRAFIA</i>	Pag.44

# 1. INTRODUZIONE

## 1.1 Cenni sugli uragani

“Uragano” è il nome utilizzato per indicare i cicloni tropicali che raggiungono una velocità dei venti maggiore di 120 km/h e che si formano generalmente nell’Atlantico settentrionale.

In generale, si tratta di un sistema temporalesco, caratterizzato da un largo centro di bassa pressione, a cui sono associati forte vento e precipitazioni.

Esso si forma a causa di grandi masse d’aria calda e umida che risalgono dall’oceano e, raffreddandosi rapidamente, condensano, ritornando verso il basso.

Ciò provoca un calo di pressione che, a sua volta, fa aumentare l’intensità dei venti, quindi l’evaporazione, innescando un meccanismo ciclico che alimenta il ciclone fino a che questo si trova a contatto con acque calde.

E’ per questo motivo che gli uragani si formano principalmente nelle zone tropicali, dove l’umidità è elevata e la temperatura dell’acqua può raggiungere anche i 26 o 27 gradi. Questo fenomeno non avrebbe una lunga durata nel tempo se non intervenisse l’azione della forza di Coriolis.

Tale forza, causata dalla rotazione terrestre, è nulla all’equatore ed aumenta con la latitudine; ad una distanza di circa 500-600 Km da esso, provoca una deviazione dei venti che iniziano a muoversi circolarmente con velocità sempre più elevate man mano che si avvicinano all’occhio del ciclone.

Nell'emisfero settentrionale la deviazione avviene verso destra, perciò il vortice acquista una rotazione antioraria, al contrario di ciò che avviene nell'emisfero meridionale.

Un uragano è considerato tale soltanto quando i venti superano i 120 Km/h, altrimenti si tratta o di depressioni tropicali, con venti che non superano i 60 Km/h, o di tempeste tropicali, caratterizzate da venti dai 60 ai 120 Km/h.

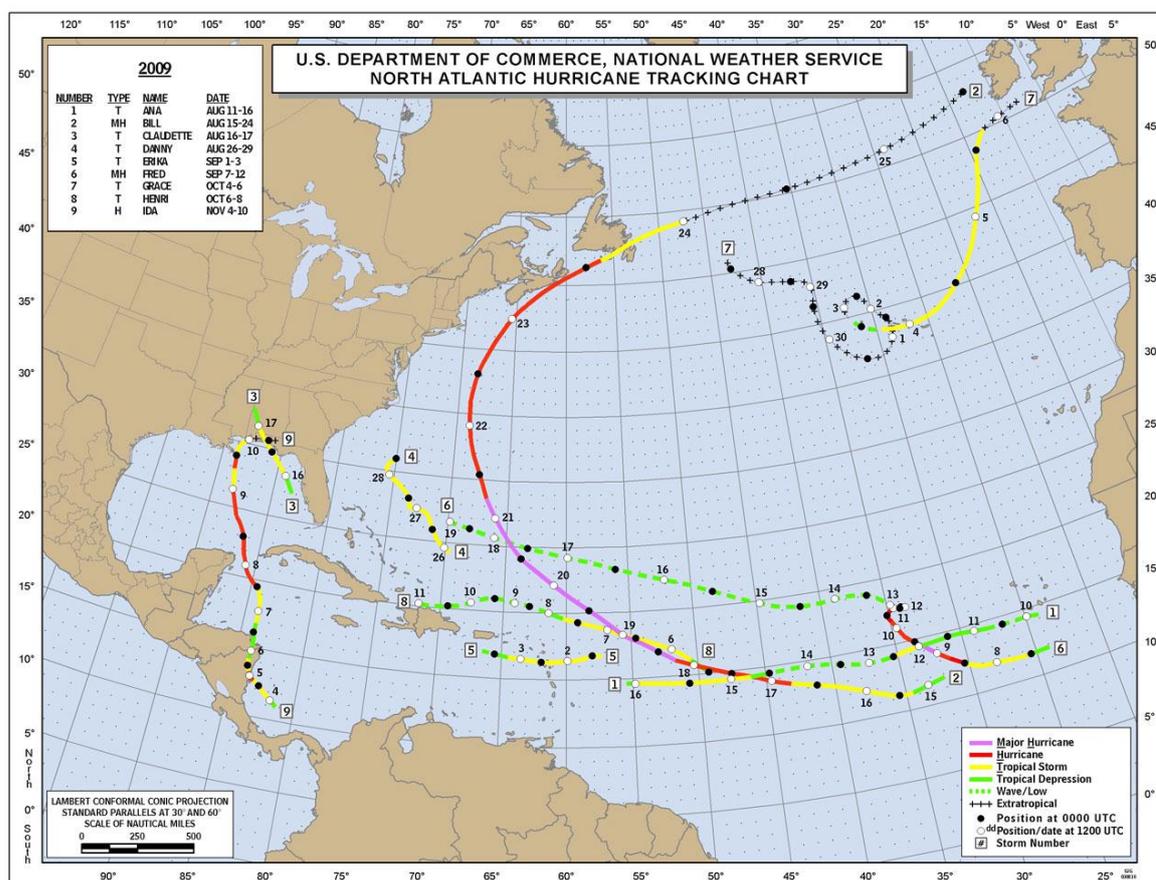
Gli uragani sono poi classificati in base alla loro intensità seguendo la scala di Saffir-Simpson che prevede cinque differenti livelli, dove l'uno corrisponde all'intensità più bassa e cinque alla più alta.

La forte attività del vento associata ai cicloni tropicali ha due effetti principali: il primo, già accennato in precedenza, consiste nel fatto che i venti, favorendo l'evaporazione, aumentano la quantità di calore, e perciò di energia, disponibile per l'ulteriore sviluppo dell'uragano stesso; il secondo consiste nella risalita di acque fredde dovuta allo stress del vento sulla superficie dell'oceano che è in grado di rimescolare le acque fin sotto il termoclino (Scoccimarro et al., 2011).

Lo studio proposto in questa tesi è legato proprio a questo secondo aspetto, infatti, si è voluto analizzare l'effetto che la risalita di queste acque profonde ha, in termini di abbondanza relativa, sullo sviluppo del fitoplancton.

Perciò, tracciare il movimento di una tempesta tropicale diventa una cosa fondamentale sia, e soprattutto, ai fini della sicurezza, ma anche per motivi scientifici. Allo scopo di raccogliere maggiori informazioni possibili

riguardo la velocità dei venti, la pressione e la posizione degli uragani, vengono impiegati, tra gli altri mezzi, anche i satelliti. Le informazioni registrate sono poi inviate al National Hurricane Center di Miami, dove vengono raccolte, interpretate e utilizzate per creare anche delle mappe annuali contenenti le tracce di tutti i cicloni (figura 1).



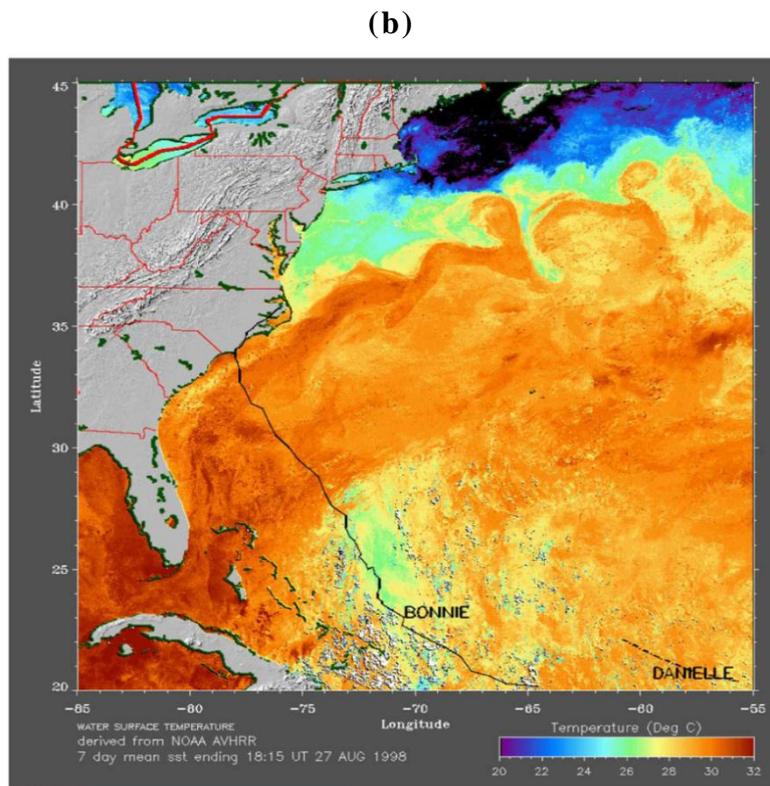
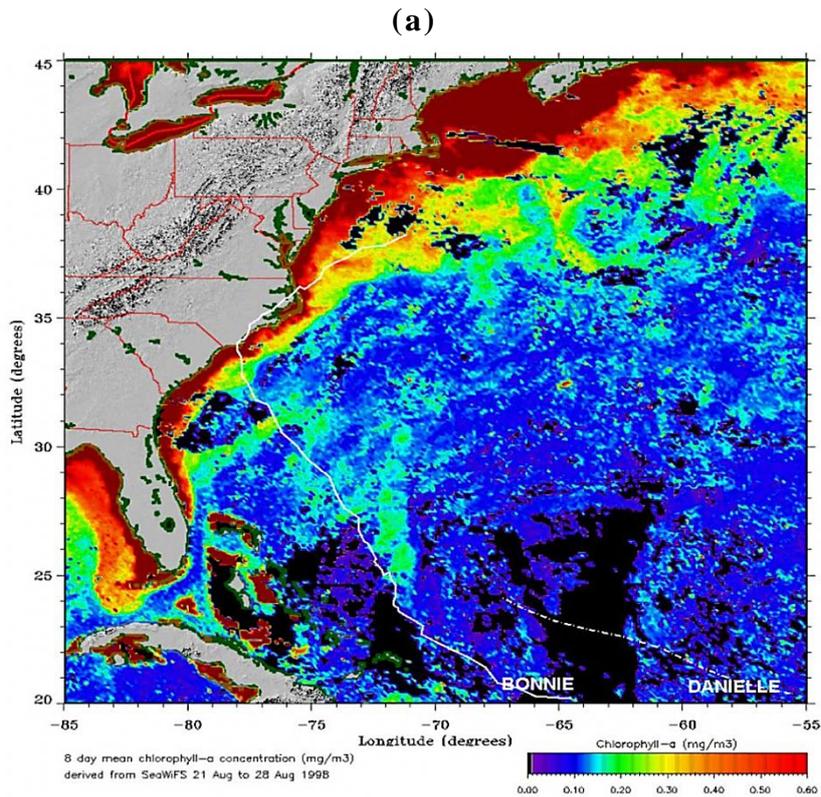
**Fig. 1. Carta delle tracce dei cicloni nel Nord Atlantico del 2009, presa dal sito <http://www.nhc.noaa.gov>. Rappresenta le tracce di tutti gli uragani passati nell'arco dell'anno, le date in cui sono stati attivi, e la categoria in ogni tratto: il viola rappresenta gli uragani maggiori, il rosso gli uragani, il giallo le tempeste tropicali e il verde le depressioni tropicali.**

In passato sono già stati svolti diversi studi sia fenomenologici sia tramite utilizzo di modelli, allo scopo di analizzare questa interazione.

Gli studi fenomenologici sono stati svolti soprattutto concentrandosi sull'effetto di singoli cicloni analizzati utilizzando dati satellitari, di cui si discuterà nel paragrafo seguente, ad esempio sull'uragano Fabian (Son et al., 2007) o su Bonnie e Daniel (Babin et al. 2004).

In questo secondo lavoro, sono stati presi tredici diversi casi di cui sono state ricercate le anomalie e le immagini più significative, cioè quelle relative a Bonnie, sono mostrate di seguito (figura 2).

Osservandole, si vedono chiaramente le zone in cui l'uragano ha prodotto un segnale apprezzabile, sia in termini di aumento della concentrazione di clorofilla *a*, segnale della presenza più o meno abbondante di fitoplancton in mare (figura a), sia nella diminuzione della temperatura superficiale che evidenzia la risalita di acque profonde (figura b).

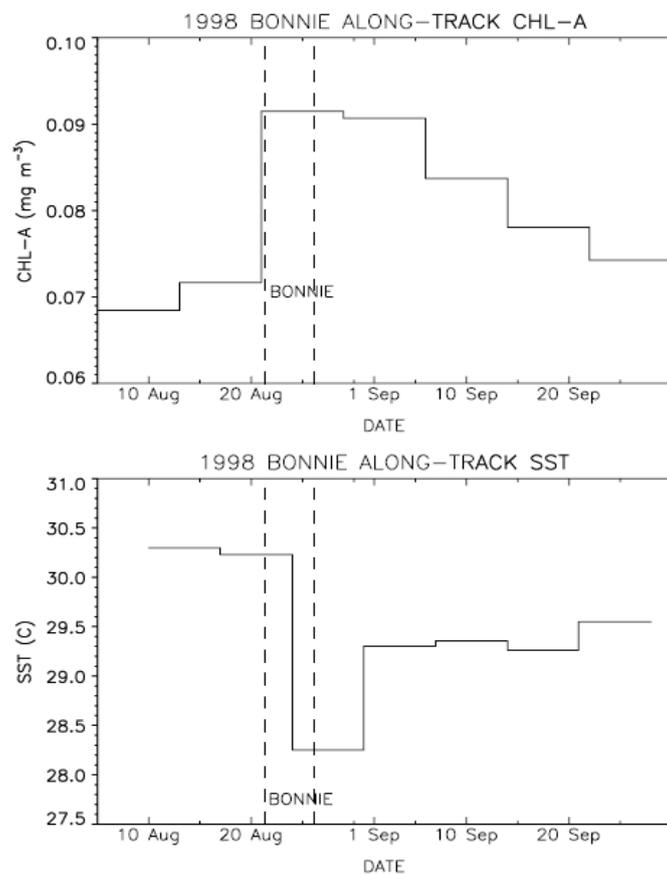


**Fig.2. (a) Composita di 8 giorni della concentrazione di clorofilla  $a$  ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) derivata dai dati Seawifs dal 21 al 28 Agosto 1998. (b) Immagine della temperatura superficiale ( $^{\circ}\text{C}$ ) derivata dai dati NOAA AVHRR dal 20 al 27 Agosto 1998 (Babin et al. 2004).**

In figura 3 sono mostrati i grafici creati, nella stessa pubblicazione, per evidenziare i picchi di anomalia registrati sia per la clorofilla *a*, sia per la temperatura.

La parte tratteggiata rappresenta quella relativa agli stessi giorni delle immagini satellitari presentate in figura 1.

Questi grafici evidenziano quindi il fatto che ci sia un picco nella concentrazione di clorofilla *a* di circa  $0,02 \text{ mg/m}^3$  e una diminuzione della temperatura superficiale di circa  $2^\circ\text{C}$ .



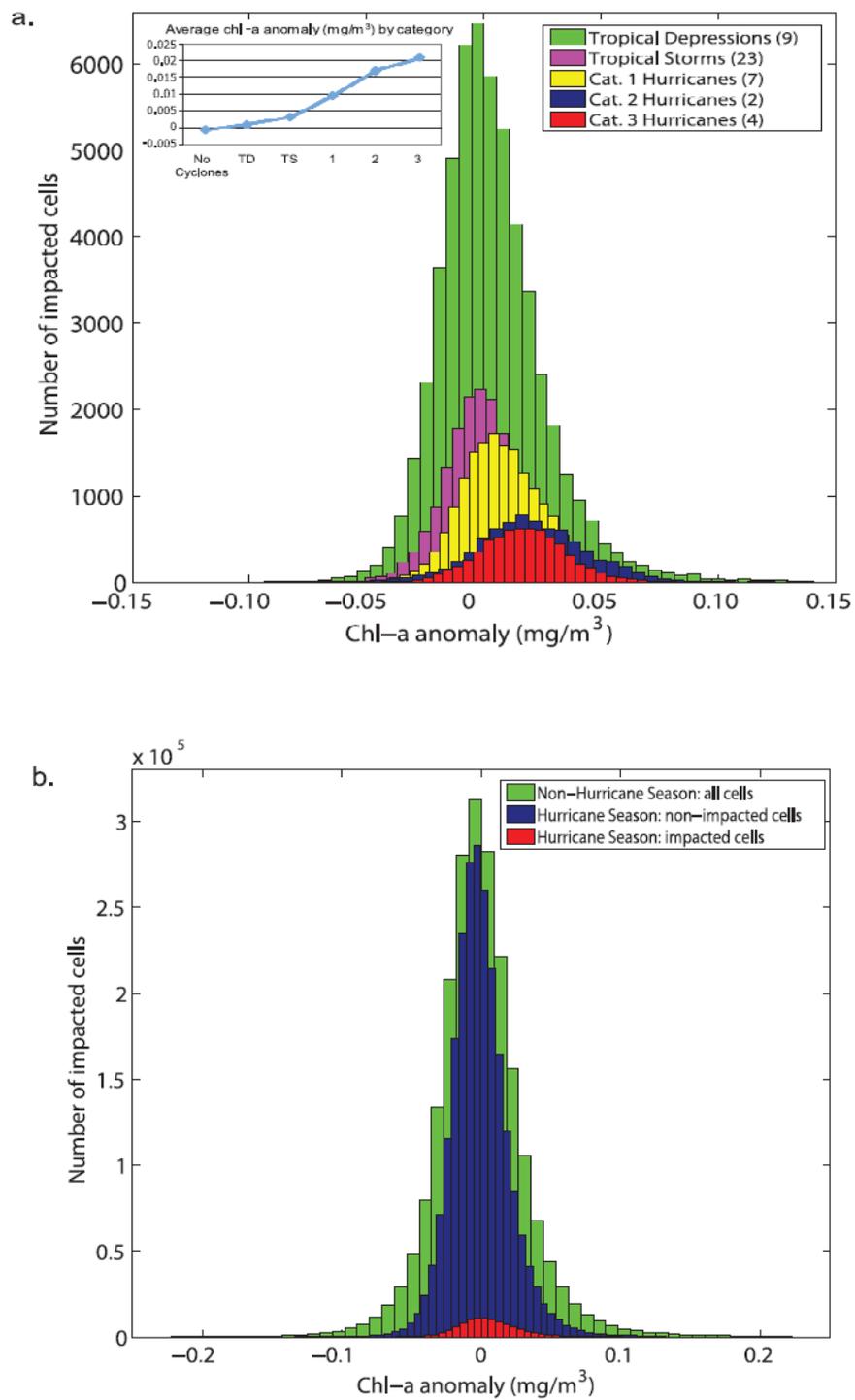
**Fig. 3\_ Grafici dei picchi di anomalia di clorofilla *a* ( $\text{mg/m}^3$ ) e di temperatura ( $^\circ\text{C}$ ) registrati durante l'uragano Bonnie. (Babin et al. 2004).**

La maggior parte dei lavori pubblicati finora è di tipo qualitativo, ma è stata tentata anche una prima quantificazione dell'impatto globale di queste fioriture sulla produzione primaria media, benché questo impatto sia risultato poco significativo (Hanshaw et al., 2008).

Di seguito sono stati inseriti i grafici presenti in questo articolo (figura 4), che mostrano l'effettivo impatto delle anomalie trovate sulla variabilità totale di clorofilla.

Infatti, le immagini dei dati satellitari ottenute sono state suddivise in una griglia di celle da 9 km l'una ed è stato poi contato il numero di celle effettivamente interessate dall'anomalia che è risultato essere abbastanza contenuto, perciò l'impatto totale sembra non essere molto rilevante.

Il primo grafico rappresenta il numero di celle interessate dall'anomalia a seconda della categoria di uragano o tempesta tropicale analizzata, mentre il secondo mette a confronto il numero di celle impattate con quelle non influenzate durante la stagione degli uragani e nel resto dell'anno.

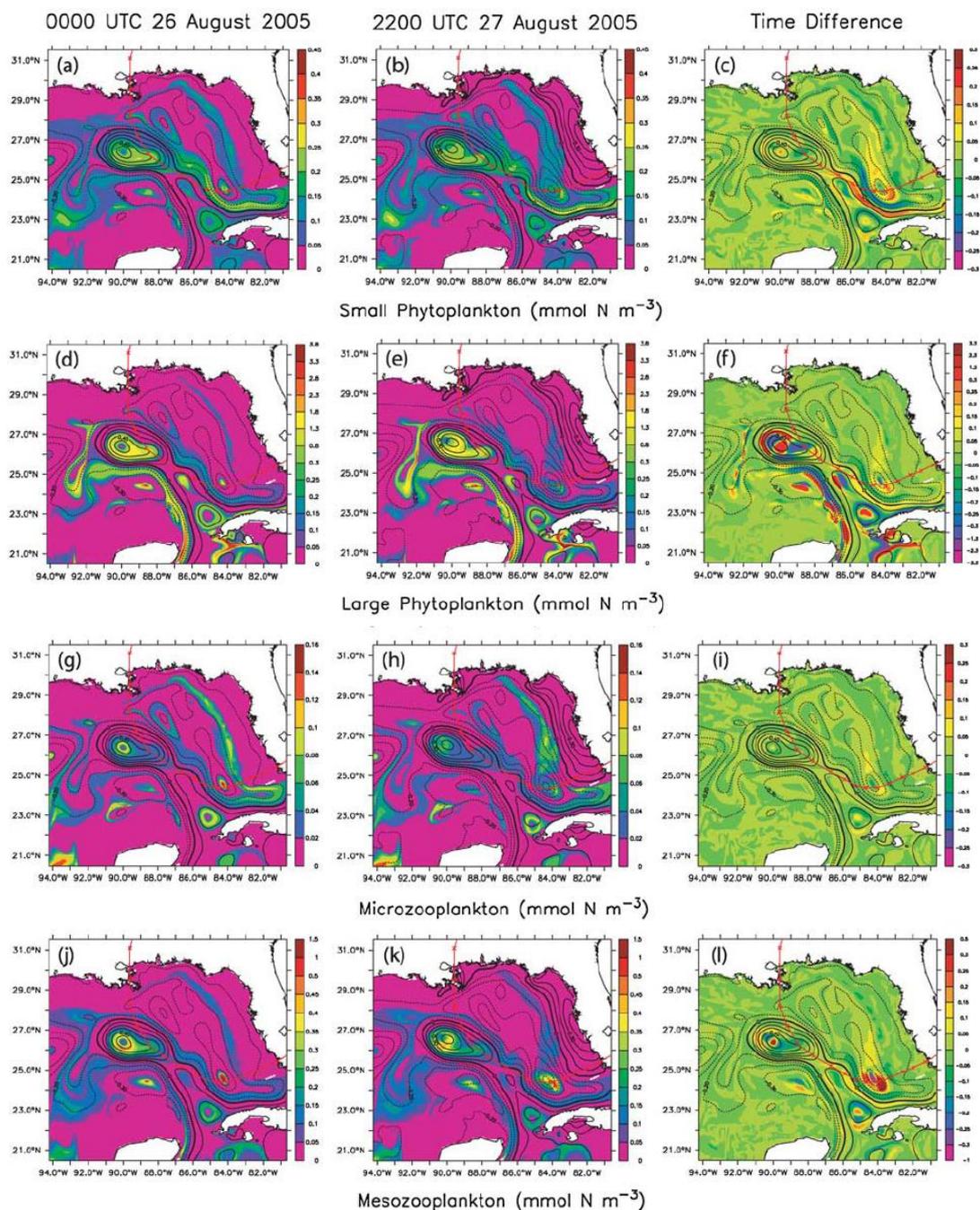


**Fig. 4. (a) Grafico del numero di celle interessate dall'anomalia di clorofilla *a* suddiviso in base alle diverse categorie: depressioni tropicali (verde), tempeste tropicali (viola), uragani di categoria 1 (giallo), 2 (blu) e 3 (rosso). (b) Grafico del numero di celle impattate (rosso) e non impattate (blu) durante la stagione degli uragani rispetto al numero totale di celle (verde).**

Nel 2009, invece, è stato pubblicato uno studio su un modello riguardante l'alterazione in termini di dimensioni e di distribuzione della popolazione fitoplanctonica nel Golfo del Messico, in risposta al passaggio dell'uragano Katrina (Gierach et al., 2009).

Nelle figure sottostanti (figura 5) sono riportati i risultati di questo lavoro che mostrano le anomalie di concentrazione per ogni categoria di fitoplancton formatesi in seguito al fenomeno simulato.

In base alla loro dimensione, si vede che i vari microrganismi rispondono e si dispongono in maniera completamente diversa, ad esempio il fitoplancton di piccole dimensioni si accresce lungo la traccia dell'uragano, mentre il microzooplancton non sembra mostrare alcuna risposta.



**Fig. 5.** Risultati del lavoro di Gierach et al., 2009. Le prime due immagini di ciascuna riga rappresentano la concentrazione ( $\text{mmol N m}^{-3}$ ) del Phytoplankton di piccole dimensioni (a-b), di grandi dimensioni (d-e), del Microzooplankton (g-h) e del Mesozooplankton (j-k) registrate prima (26 Agosto 2005) e dopo (27 Agosto 2005) il passaggio di Katrina. Nelle ultime immagini di ogni riga invece, è mostrata la differenza tra la concentrazione prima e dopo per ogni categoria (c,f,i,l).

Ad ogni modo, in tutti i casi analizzati, si è riscontrato un effettivo incremento nella produzione primaria, o meglio nella concentrazione di clorofilla *a*, in un periodo compreso dai pochi giorni fino alle settimane in seguito al passaggio di uragani.

## **1.2 Osservazioni satellitari**

Le osservazioni satellitari sono uno strumento indispensabile per studiare in maniera completa e generale i fenomeni che avvengono negli oceani, in quanto consentono di avere una visione sinottica, cioè di esaminare allo stesso tempo aree molto vaste del mondo.

I dati raccolti in questo modo sono utilizzati per stimare le concentrazioni delle sostanze presenti nelle acque marine, a partire dalle proprietà ottiche apparenti delle stesse.

Quando la luce solare colpisce il mare, parte di essa viene direttamente riflessa, ma la maggior parte di essa penetra la superficie e interagisce con le molecole d'acqua che incontra. La parte rossa della radiazione luminosa viene rapidamente assorbita, mentre la parte blu viene riflessa, per questo il mare appare di colore blu.

Tuttavia, ci sono molte sostanze sia organiche che inorganiche oltre alle sole molecole d'acqua che possono modificare il colore che vediamo, o più precisamente possono modificare la lunghezza d'onda della radiazione emessa. Nelle zone costiere, ad esempio, il deflusso dei fiumi, la risospensione di sabbia e limo dal fondo a causa delle maree, le onde e le tempeste

possono modificare l'assorbimento della radiazione solare e perciò cambiare il colore delle acque vicino alla costa. Negli oceani invece, il maggior responsabile della variazione nell'assorbimento della radiazione solare è il fitoplancton che si sviluppa nella zona eufotica, cioè quell'area in cui l'intensità di luce in entrata è sufficiente da permettere la fotosintesi.

Il fitoplancton contiene al suo interno una serie di pigmenti in grado di assorbire luce nello spettro del visibile (tra i 400 e i 700nm) per compiere la fotosintesi, perciò è in grado di modificare lo spettro di assorbimento dell'acqua, in funzione della sua abbondanza.

Il pigmento più importante per la fotosintesi è la clorofilla *a*, che quindi può essere utilizzata per stimare l'abbondanza di fitoplancton poiché questi due fattori sono legati da proporzionalità diretta, nel senso che maggiore è la concentrazione di questi pigmenti, maggiore sarà la presenza dei microorganismi in acqua.

Il principio di base dietro al telerilevamento del colore del mare da satellite è che maggiore è la concentrazione di fitoplancton, quindi di clorofilla *a*, più il colore dell'acqua tende a passare dal blu al verde.

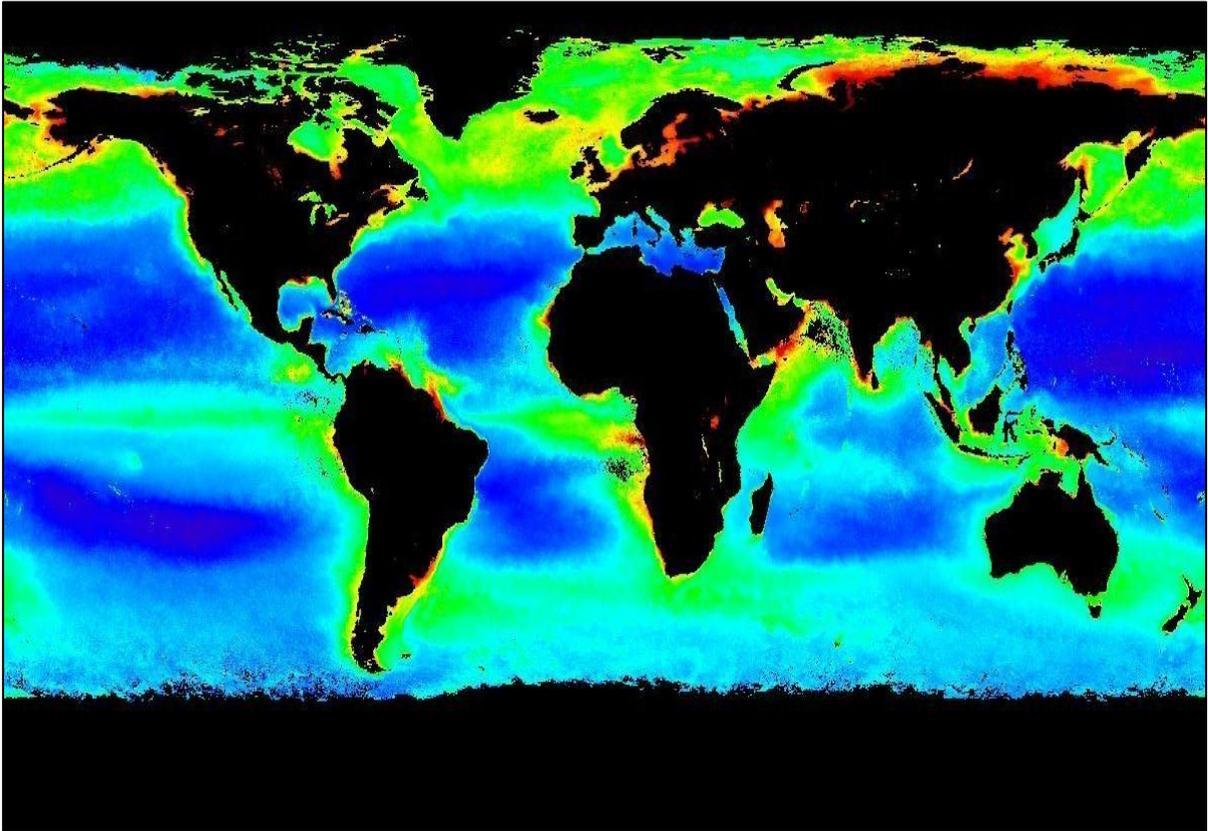
Mentre il satellite ruota intorno alla Terra raccoglie i dati relativi alla parte illuminata del globo e, dopo aver coperto tutta la superficie terrestre, trasmette i dati alla stazione NASA/Goddard. Qui, i dati vengono analizzati e applicando la relazione empirica tra dati radiometrici e la concentrazione di clorofilla, vengono elaborate tutte le immagini come quella in figura 6.

La presenza di fitoplancton nelle acque è fondamentale poiché esso rappresenta il primo anello della catena alimentare marina, perciò è importante studiare le dinamiche del suo sviluppo.

Proprio per questo scopo, la NASA ha creato la missione SeaWiFS, lanciando in orbita il satellite Seastar che è rimasto in funzione fino al 2010.

Il satellite orbitava intorno alla Terra ogni 99 minuti, 14 volte al giorno, ed è in grado di coprire tutta la superficie terrestre in 8 giorni.

La figura 6 mostra le immagini satellitari prodotte grazie ai dati raccolti dal satellite Seastar.



**Fig. 6**\_Immagine satellitare della concentrazione di clorofilla *a* in oceano presa dal sito <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>. Rappresenta la media annuale di settembre dal 1997 al 2008. Il rosso rappresenta le zone con massima concentrazione di clorofilla che si trovano nelle zone di upwelling oceanico, mentre il blu rappresenta le zone con minore concentrazione.

Un altro dato importante che è possibile ricavare attraverso le osservazioni satellitari è quello relativo alla temperatura delle acque superficiali (Sea Surface Temperature, SST).

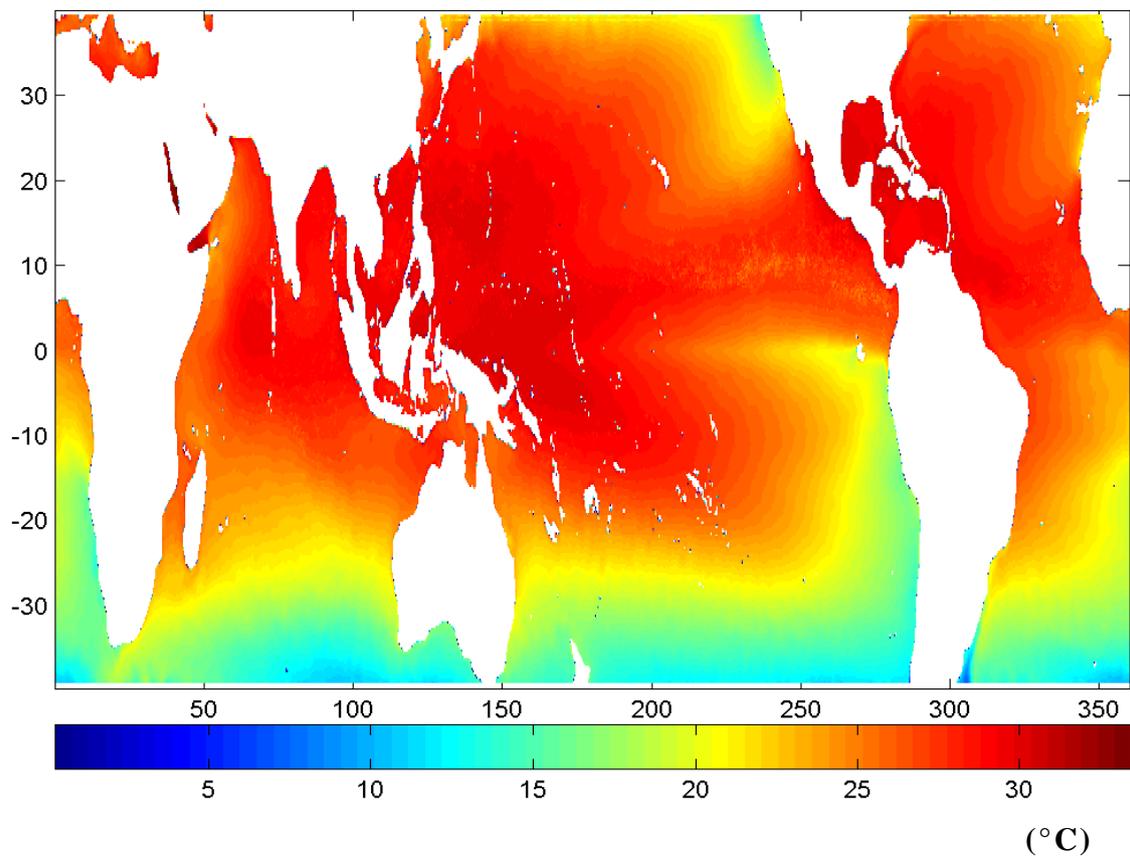
La missione TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) è un programma condiviso della NASA e la NASDA (National Space Development Agency of Japan), che nel 1997 hanno lanciato in orbita un satellite con a bordo un radiometro, il TMI (TRMM Microwave Imager), in grado di raccogliere dati anche al di sotto

della copertura nuvolosa, con lo scopo principale di raccogliere informazioni sulle precipitazioni tropicali.

Le informazioni raccolte da questo radiometro riguardano non soltanto le precipitazioni, ma anche la velocità del vento alla superficie, il vapore acqueo in atmosfera e la temperatura superficiale dell'oceano, perciò i dati raccolti possono essere usati anche per valutare le variazioni di temperatura associate alla presenza di un uragano.

Il satellite viaggia da ovest a est seguendo un'orbita semi equatoriale e fornisce dati come mappe giornaliere, di tre giorni, settimanali o mensili. A differenza del radiometro utilizzato nella missione Seawifs, i dati TMI coprono soltanto la zona compresa tra i 40° Sud e i 40° Nord, con una risoluzione di circa 25 chilometri (Kummerow et al., 2000; Lloyd et al., 2011).

La figura sottostante (7) rappresenta una climatologia mensile di temperatura superficiale ottenuta grazie ai dati raccolti durante la missione TRMM.



**Fig. 7\_immagine satellitare di sst (Sea Surface Temperature).  
 Rappresenta la climatologia mensile di settembre calcolata con i dati  
 raccolti dal 1998 al 2008 durante la missione TRMM.**

I dati raccolti da questi, e da altri satelliti sono utilizzati in studi, come quelli citati nel paragrafo precedente, in cui è necessaria una visione globale e completa dei fenomeni in esame, cosa che non sarebbe possibile se si dovesse ricorrere semplicemente a singoli campionamenti sul campo.

## **2. SCOPO DEL LAVORO**

Recentemente è stato visto che, in seguito al riscaldamento globale, il numero di tempeste tropicali sta aumentando, e una parte sempre maggiore di queste raggiunge lo stato di uragano di categoria elevata (Emanuel et al., 2005), perciò diventa molto importante stabilire in che modo e in che misura siano in grado di alterare i processi fisici e biologici dell'oceano.

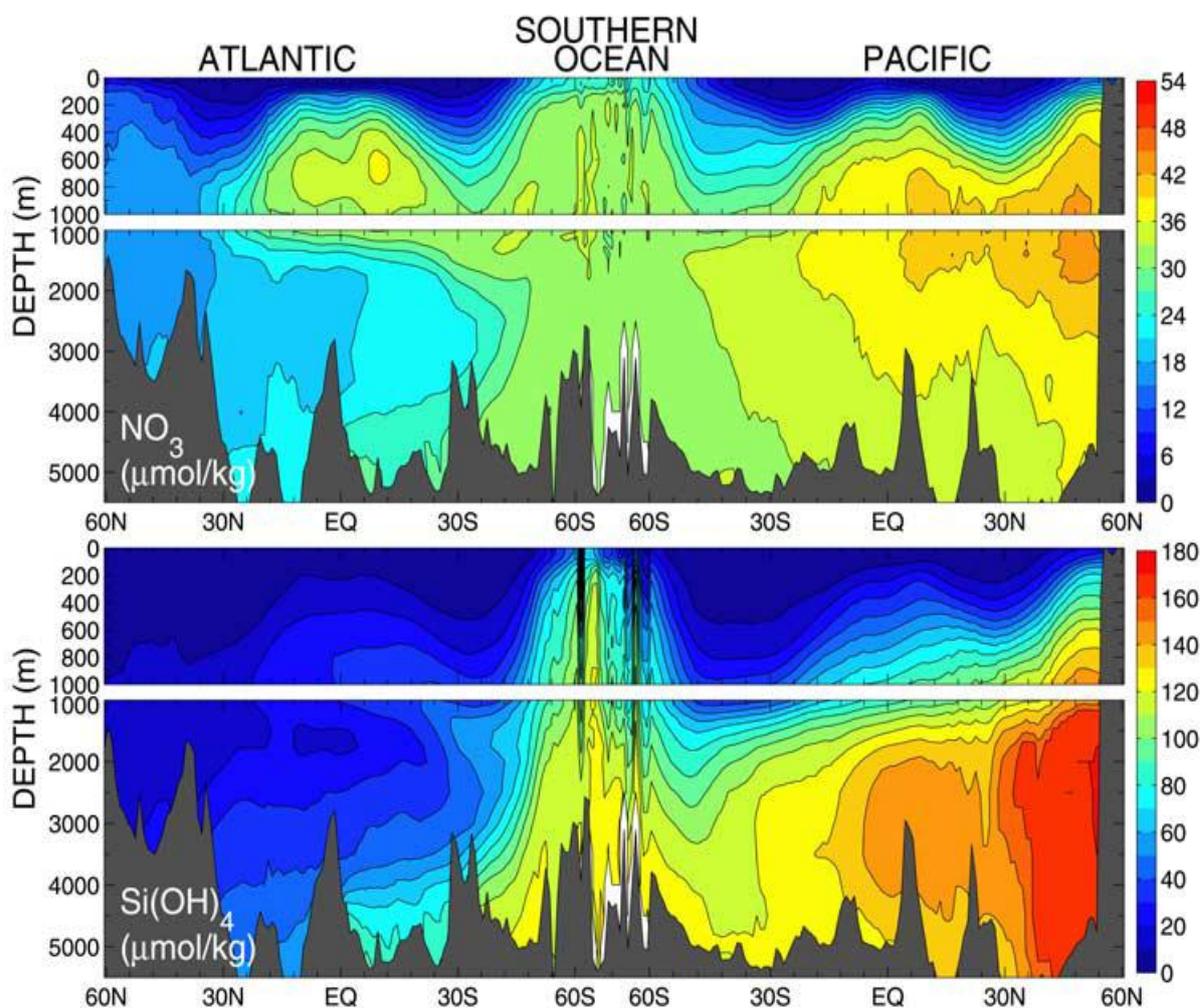
A tal proposito, lo scopo di questo lavoro è stato lo studio, attraverso l'utilizzo di strumenti a larga scala, in particolare delle osservazioni satellitari, della relazione tra il passaggio di uragani e le fioriture fitoplanctoniche nell'oceano Atlantico.

A differenza degli studi passati, in cui ci si è soffermati su singoli casi per valutare se i cicloni fossero in grado di stimolare una crescita di microorganismi maggiore rispetto alla norma e quindi di creare un'anomalia positiva di entità tale da poter essere osservata anche nelle immagini satellitari, in questo studio è stata svolta una ricerca sistematica esaminando tutti gli uragani presenti tra il 1998 e il 2008.

Proprio come le piante terrestri, infatti, il fitoplancton ha bisogno di luce, acqua, anidride carbonica e sostanze nutritive per crescere.

Nell'oceano il principale fattore limitante per lo sviluppo di queste piante unicellulari è la disponibilità di nutrienti, che si trovano principalmente nelle acque più fredde e profonde (Sarmiento et al., 2007; Conkright et al., 2002).

Nell'immagine successiva è mostrata la media zonale della concentrazione di nitrati e di acido silicico nell'Oceano Atlantico e Pacifico (figura 8).



**Fig. 8.** Sezione delle concentrazioni di nitrato e acido silicico preso dal World Ocean Atlas 2001 [Conkright et al., 2002]. I bacini Atlantico e Pacifico sono medie zonali. L'Oceano meridionale è rappresentato dai dati a 60S, con una scala di lunghezza compressa.

Per questo motivo, dove il rimescolamento delle acque è sufficientemente grande da portare acqua fredda e ricca di nutrienti vicino alla superficie è possibile assistere ad un'abbondante fioritura di fitoplancton.

Questo ad esempio succede nelle zone di upwelling degli oceani come il Pacifico equatoriale, di fronte alla Somalia e nella California current, come si vede nella figura della concentrazione di clorofilla *a* in oceano (figura 6).

### **3. MATERIALI, METODI E STRUMENTI UTILIZZATI**

#### **3.1 Dati satellitari di clorofilla**

I dati riguardanti la concentrazione di clorofilla *a* utilizzati per questo lavoro sono quelli raccolti durante la missione Seawifs, presi dal sito <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>.

Le immagini utilizzate sono le composite di 8 giorni, ottenute dall'unione delle relative immagini giornaliere che contengono dati a bande alternate, per ottenere l'intera copertura globale.

Per questo lavoro sono state scelte quelle con una risoluzione di 9 chilometri e le medie climatologiche mensili dal 1998 al 2008.

#### **3.2 Dati satellitari di sst**

I dati riguardanti la SST (Sea Surface Temperature) sono quelli registrati dal radiometro TMI (TRMM Microwave Imager), disponibili sul sito <ftp://ftp.ssmi.com/>.

Questi dati delle medie settimanali prese da sabato a sabato, con una risoluzione spaziale di circa 25 chilometri per pixel. Su questo sito però non sono disponibili le immagini delle medie climatologiche mensili, che perciò sono state create tramite utilizzo di Matlab mediando i dati settimanali disponibili per ciascun mese.

### **3.3 Tracce degli uragani**

I dati riguardanti i cicloni sono stati presi dal sito <http://www.nhc.noaa.gov>; in questo sito si possono trovare tutte le informazioni relative agli uragani, come la posizione in termini di latitudine e longitudine, l'intensità dei venti, i valori della pressione, registrate ogni 6 ore dal momento della nascita dell'uragano fino al momento della sua scomparsa.

### **3.4 Metodo di lavoro**

Si è partiti dall'ipotesi, già precedentemente esposta, che la risalita di acque fredde e ricche di nutrienti, dovuta al passaggio di uragani, porti un significativo aumento della produzione di fitoplancton.

Tale incremento può essere riscontrato grazie alle osservazioni satellitari nell'aumento della concentrazione di clorofilla *a* nell'oceano.

Per verificare questa ipotesi, sono state create, utilizzando il programma Matlab, le immagini relative alle anomalie di clorofilla *a* e di temperatura superficiale dei dati settimanali rispetto alle climatologie mensili.

La misura della SST è efficace per riscontrare un aumento nella concentrazione dei nutrienti in mare poiché è stato studiato che tale concentrazione, in particolar modo quella dei nitrati in oceano aperto, è generalmente inversamente proporzionale alla temperatura dell'acqua (Horne et al., 1989).

Questo accade perché lo stress dovuto ai forti venti associati al passaggio di uragani, aumenta l'energia cinetica turbolenta che

porta al verificarsi del fenomeno di rottura della stratificazione delle acque, cosicché quelle più fredde e dense possono risalire, portando in superficie anche i nutrienti.

Invece di focalizzare l'attenzione su dei singoli casi, la ricerca è stata ampliata a dieci anni, dal 1998 al 2008, in modo da avere un quadro più completo del fenomeno e ricercare le possibili condizioni che favoriscono la comparsa di una fioritura di fitoplancton.

Una volta ottenute tutte le immagini delle anomalie di clorofilla *a* e di temperatura superficiale si è passati all'individuazione di zone in cui fossero presenti contemporaneamente anomalie positive della prima e negative della seconda.

In questo modo è possibile verificare che effettivamente il passaggio di uragani contribuisce ad aumentare la produzione primaria nell'oceano, confermando la validità dell'ipotesi iniziale.

Le immagini delle anomalie di clorofilla sono state prodotte creando uno script in Matlab che fosse in grado di analizzare ed elaborare i dati scaricati.

L'algoritmo realizzato carica tutti i dati in memoria, trova il giorno d'inizio e fine dell'immagine in questione e seleziona la relativa media climatologica mensile.

A questo punto il programma traccia una mappa raffigurante la differenza tra i dati satellitari della concentrazione di clorofilla *a* per quella specifica settimana, sottratti della climatologia del mese, così da ottenere l'anomalia relativa, che è poi normalizzata rispetto alla media climatologica stessa, così da evidenziare più chiaramente eventuali risultati positivi.

La formula utilizzata per eseguire questa operazione è la seguente:

dove  $C_a$  è l'anomalia percentuale,  $C$  l'immagine di clorofilla della settimana

$$C_a = (C - C_{media}) / C_{media}$$

in esame e  $C_{media}$  la media mensile climatologica sui 10 anni considerati.

Questo procedimento è ripetuto in automatico per ogni composita da 8 giorni caricata.

In questo studio ci si è focalizzati sulla zona del Golfo del Messico e sulla parte dell'oceano Atlantico antistante, perciò lo script è stato creato in modo tale da rappresentare questa parte dell'immagine globale, sovrapponendola a una griglia georeferenziata.

Il passo successivo è stato l'introduzione delle tracce dei cicloni. Inizialmente erano state inserite soltanto le tracce di quelli presenti nella settimana d'interesse, ma dopo ulteriori analisi si è visto che la risposta del sistema, può arrivare con qualche giorno di ritardo rispetto al passaggio del ciclone, perciò si è deciso di segnare anche i tragitti degli uragani che, seppur già finiti, sono passati per quella zona fino a 15 giorni prima dell'inizio dell'immagine satellitare in esame.

Come risultato finale è stata ottenuta una serie di immagini contenenti le anomalie dei dati settimanali rispetto alla media climatologica a cui sono sovrapposte le tracce dei cicloni presenti nell'arco di quindici giorni.

Le immagini relative alla SST sono state realizzate seguendo lo stesso metodo, modificando lo script in alcuni punti, per permettere l'analisi dei nuovi dati.

L'unica differenza sostanziale sta nel fatto che le medie climatologiche mensili non erano disponibili nel database del sito e perciò è stato necessario costruirle partendo dai dati settimanali.

Queste climatologie sono state create, sempre utilizzando Matlab, facendo la media dei dati settimanali disponibili per ogni mese nell'arco dei 10 anni esaminati.

Dato che i dati sono forniti sotto forma di matrice, in cui ogni cella corrisponde ad un pixel della figura associata, è stata utilizzata anche una "matrice contatore", in modo che la somma dei dati settimanali in ogni singola cella fosse divisa esattamente per il numero di dati non nulli che conteneva.

Dopodiché l'anomalia è stata calcolata sempre sottraendo ad ogni composita settimanale il dato relativo alla climatologia mensile corrispondente, con l'unica differenza che, essendo la temperatura una variabile più lineare rispetto alla clorofilla, non è stata eseguita la normalizzazione, perciò i dati sono espressi in gradi centigradi.

Infine è stata fatta la ricerca dei risultati analizzando visivamente un'immagine alla volta e annotando l'eventuale presenza simultanea di consistenti anomalie di clorofilla e temperatura superficiale.

## 4. RISULTATI OTTENUTI

Dall'analisi visiva delle immagini realizzate, sono emersi diversi casi in cui il passaggio di uragani è stato in grado di provocare una consistente anomalia positiva di clorofilla (chl).

In particolare, calcolando che nei dieci anni presi in esame ci sono state 89 tempeste tropicali che hanno raggiunto il livello di uragano, tra queste sono stati trovati circa 30 casi che confermavano l'ipotesi di partenza di questo studio.

Tra questi, sono stati selezionati i cinque più significativi che comprendono Bonnie nel 1998 (studiato anche da Babin et al., 2004), Dennis nel 1999, Isabel nel 2003, Lee, Maria e Nate nel 2005 ed infine Gordon ed Helene nel 2006.

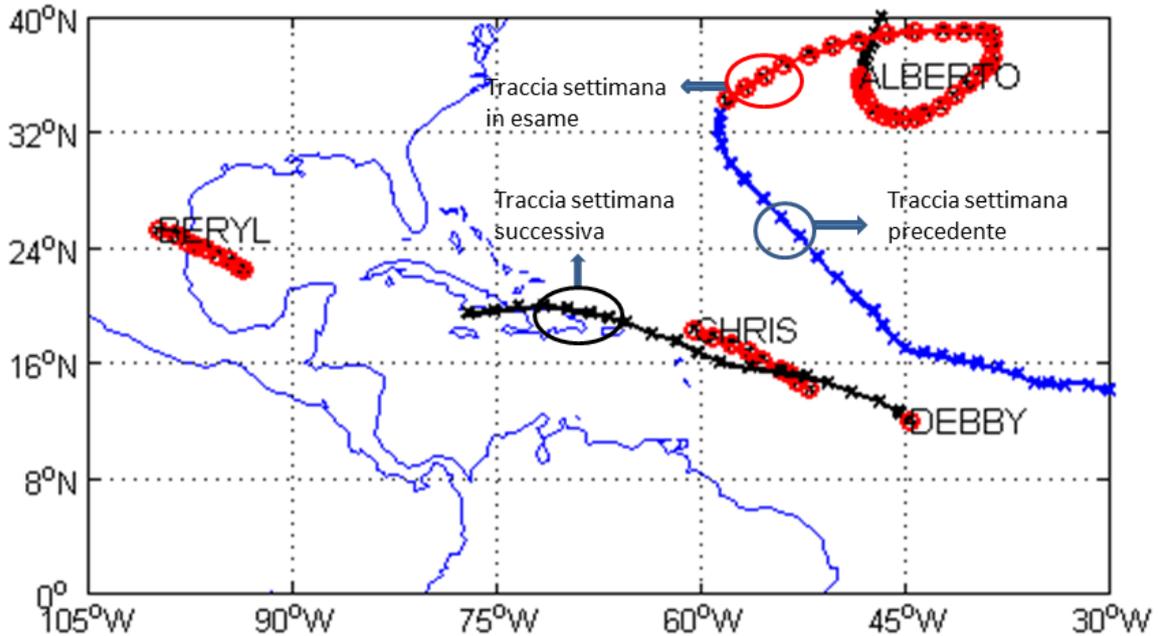
Le relative immagini sono riportate di seguito: per primo è stato inserito il caso di Gordon, perché più rappresentativo, poi gli altri sono elencati in ordine cronologico.

La figura 9 mostra graficamente il metodo di analisi utilizzato.

Le tracce degli uragani sovrapposte alle mappe delle anomalie, hanno un colore diverso a seconda di ciò che rappresentano: in blu il tragitto che la tempesta ha percorso la settimana precedente a quella in esame, in rosso la parte relativa a quella settimana specifica ed infine in nero il tratto non ancora effettuato.

Lungo tutta la traccia segnata, si vedono anche dei simboli, che rappresentano la posizione precisa del ciclone ogni sei ore, intervallo al quale gli strumenti registrano le informazioni relative ai venti, alla pressione eccetera.

Se i simboli sono ravvicinati significa che il ciclone staziona nella stessa zona per più tempo.



**Fig. 9\_ Esempio del metodo di analisi qualitativa degli uragani.**  
La traccia colorata in blu rappresenta il tragitto percorso dal ciclone la settimana precedente a quella in esame; la parte in rosso è lo spazio percorso nella settimana in esame e quella in nero è il tragitto non ancora percorso. I simboli lungo la traccia rappresentano invece la posizione del ciclone registrata ogni 6 ore.

# GORDON, HELENE (2006)

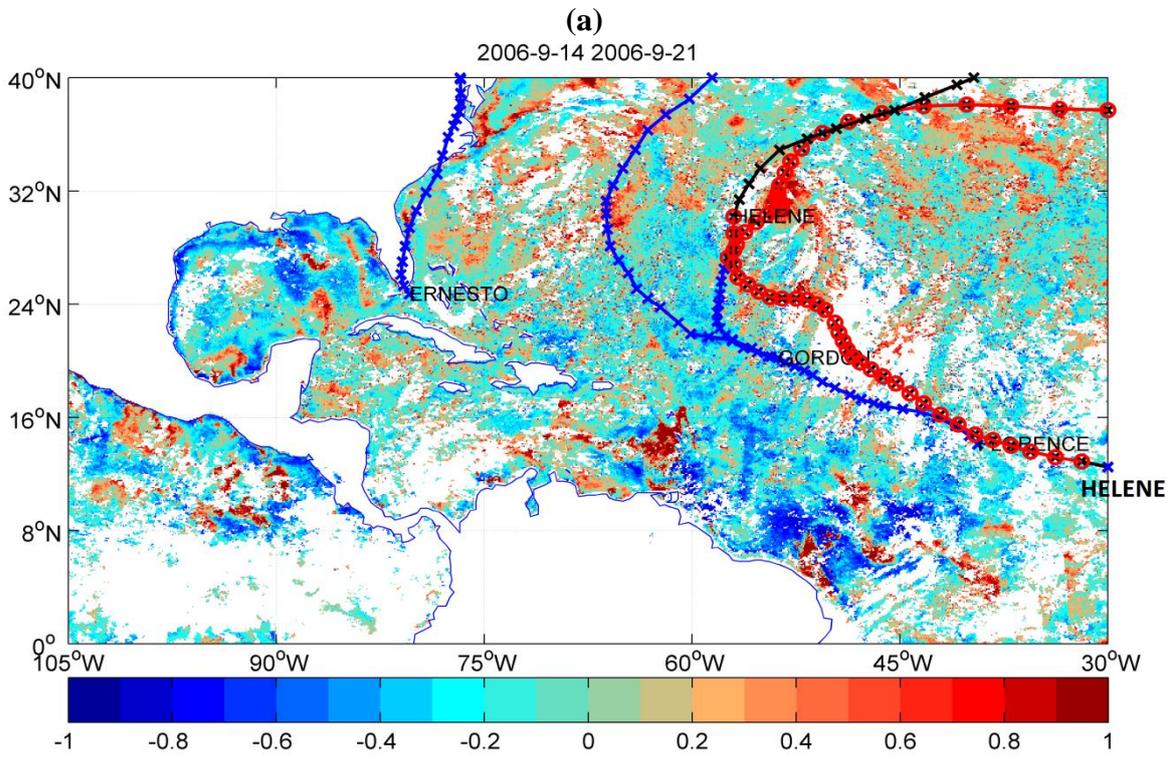


Immagine chl

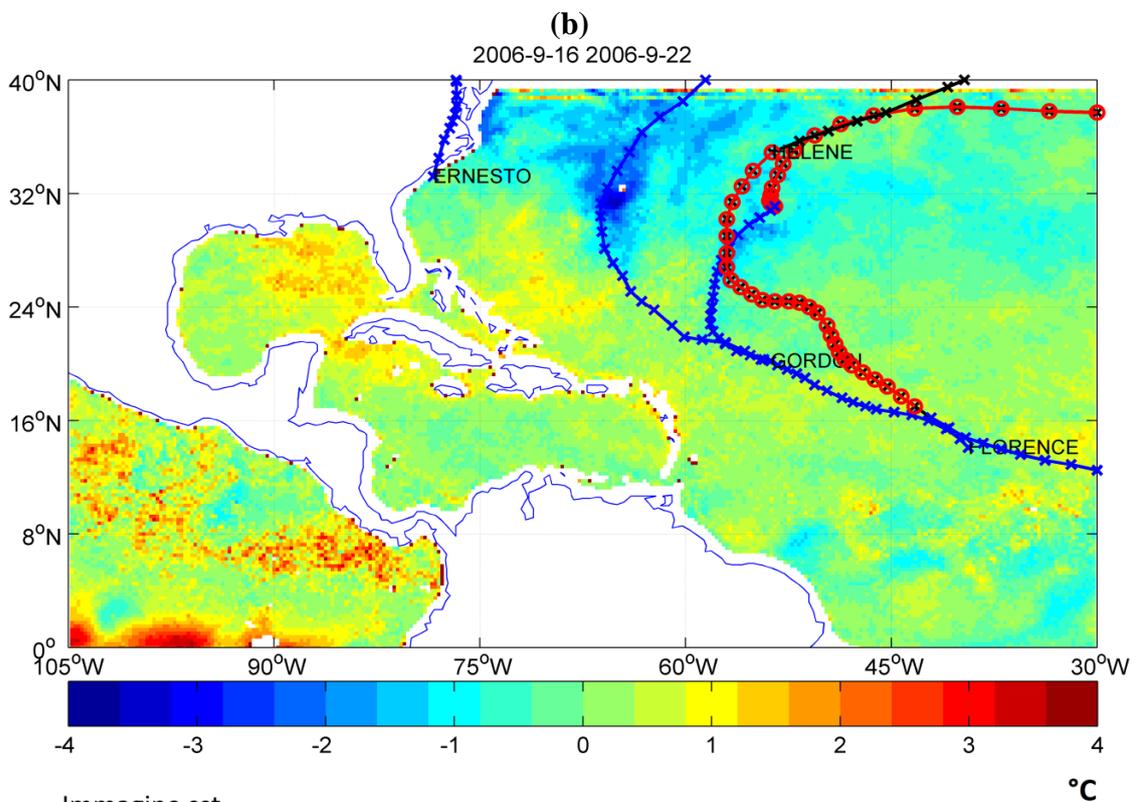


Immagine sst

**Fig. 10. (a) immagine dell'anomalia di chl dal 14 al 21 settembre 2006. (b) anomalia di sst dal 16 al 22 settembre 2006.**

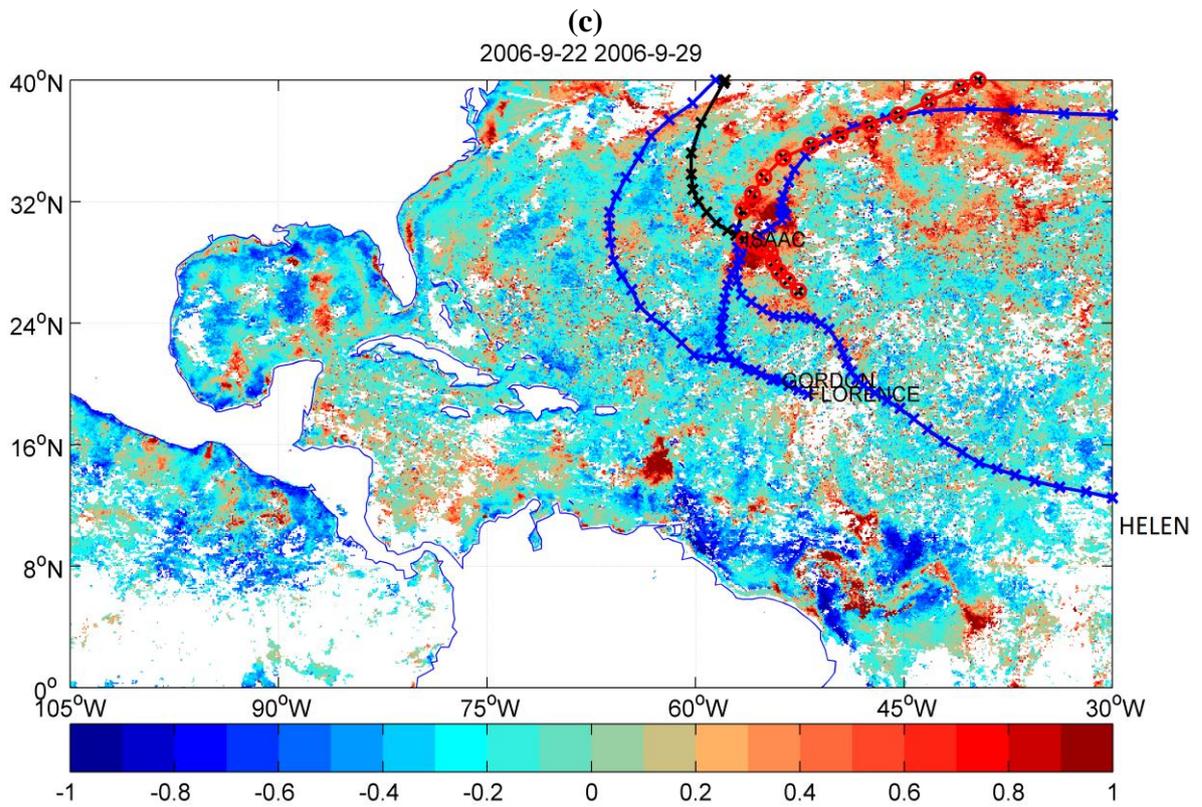


Immagine chl

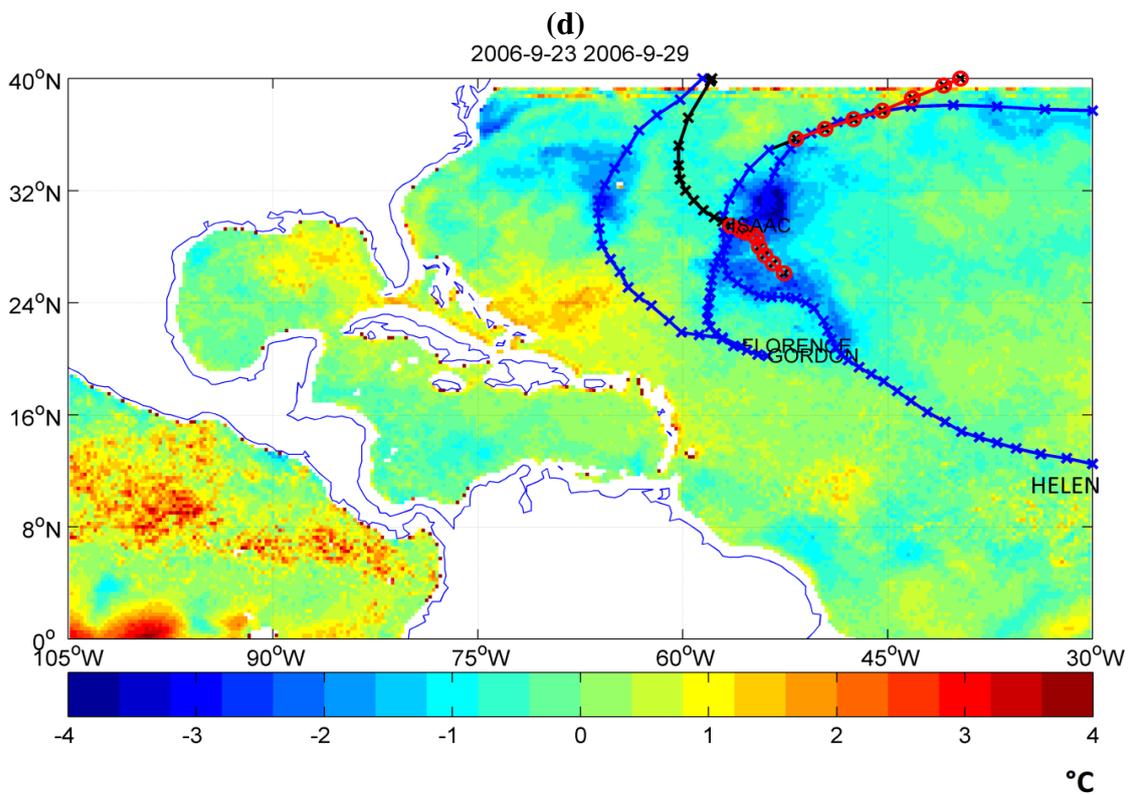


Immagine sst

**Fig. 10 (continua). (c) anomalia di chl nella settimana dal 22 al 29 settembre 2006. (d) anomalia di sst dal 23 al 29 settembre 2006.**

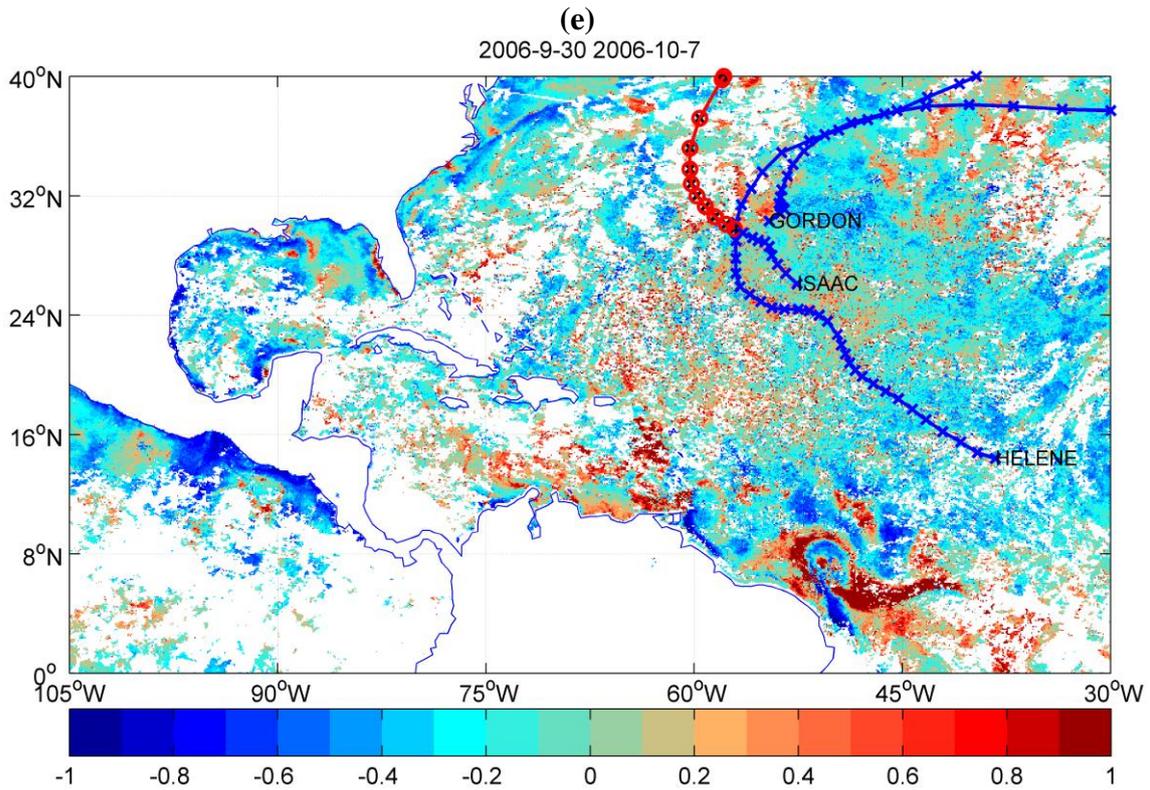


Immagine chl

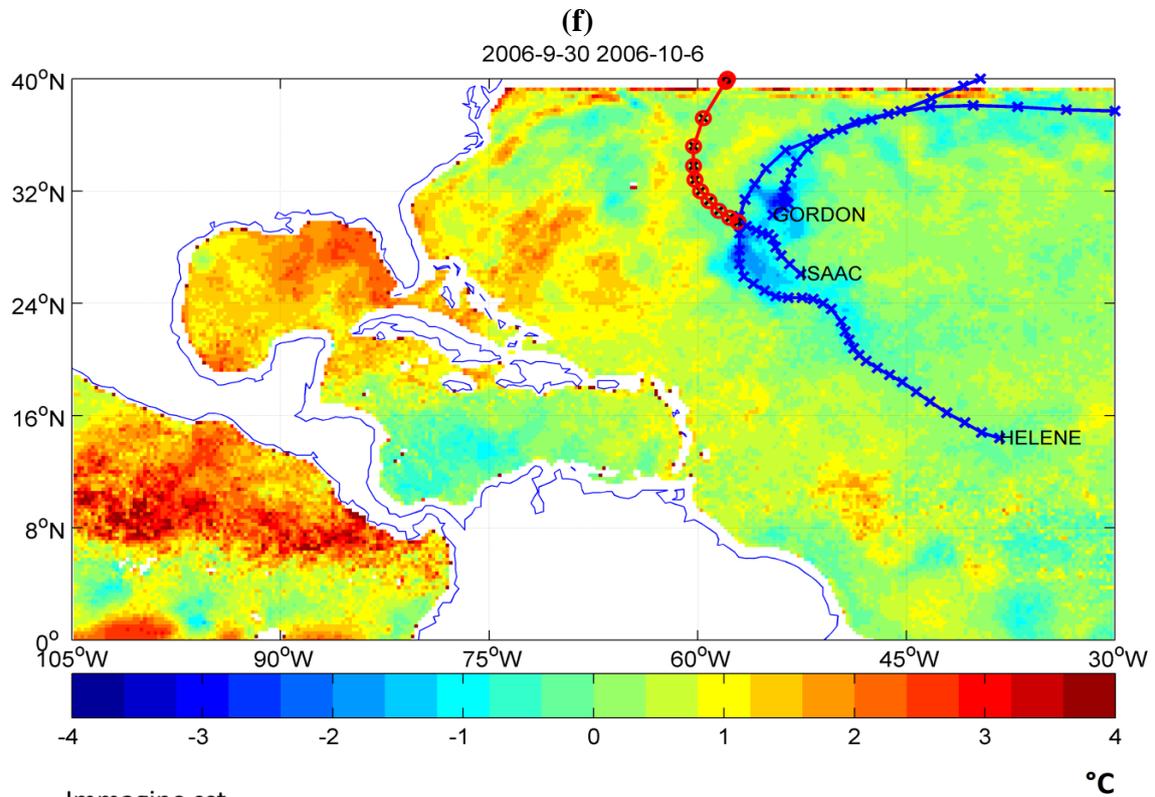


Immagine sst

**Fig. 10 (continua). Immagini delle anomalie di chl dal 30 settembre al 7 ottobre 2006 (e) e di sst dal 30 settembre al 6 ottobre 2006 (f).**

Il primo esempio selezionato è quello di Gordon ed Helene nel 2006 (figura 10).

Questi uragani, entrambi di categoria 3 con un picco nella velocità del vento di circa 190 km/h, si sono sviluppati praticamente in contemporanea, infatti, Gordon è attivo tra il 10 e il 20 settembre e Helene tra il 12 e il 24 settembre, ed insistono entrambi sulla stessa zona.

In quest'ultimo caso, essendo particolarmente evidente, è stata riportata tutta la sequenza delle immagini, vale a dire che oltre alla settimana in cui è presente il massimo dell'anomalia registrata, sono presenti anche le immagini relative alla settimana precedente e successiva, in modo da far capire come è possibile riconoscere visivamente la presenza di anomalie significative.

Nella prima sequenza di immagini (figura 10 a; 10 b) si vede che durante il passaggio dell'uragano (linea della traccia rossa) è presente soltanto una leggera anomalia negativa di temperatura di circa 1°C mentre l'anomalia di clorofilla non è ancora evidente anche a causa della copertura nuvolosa, rappresentata nelle immagini dalle zone in bianco.

Nella sequenza successiva invece (figura 10 c; 10 d), che corrisponde al periodo dal 22 al 29 settembre per la clorofilla (chl) e dal 23 al 29 per l'SST, quando l'uragano è già passato (linea della traccia in blu) appare evidente l'anomalia che è stata generata, in cui l'incremento di concentrazione della chl raggiunge il 100% e il calo della temperatura supera i 4°C.

Si può vedere inoltre come il massimo in entrambi i casi sia raggiunto nel punto in cui Gordon subisce un rallentamento e cambi di direzione.

Nelle ultime due immagini (figura 10 e; 10 f) invece si può vedere come, nonostante l'uragano sia passato in quella zona da ormai più di quindici giorni, una lieve anomalia di clorofilla ancora persiste nella zona dove era stato raggiunto il massimo.

# BONNIE (1998)

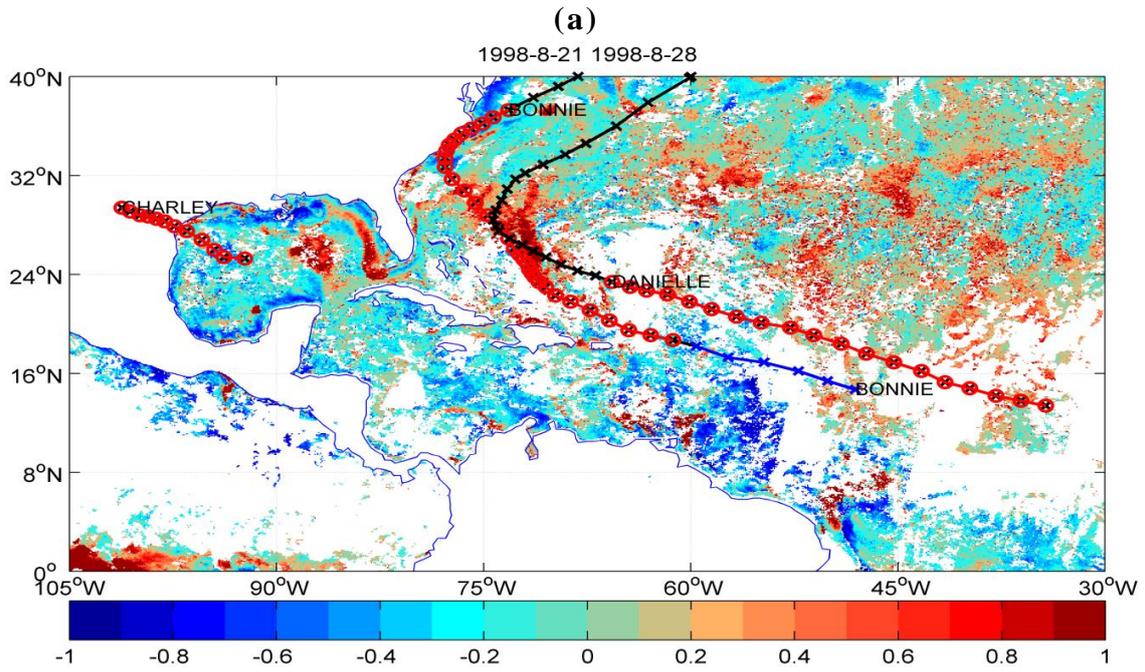


Immagine chl

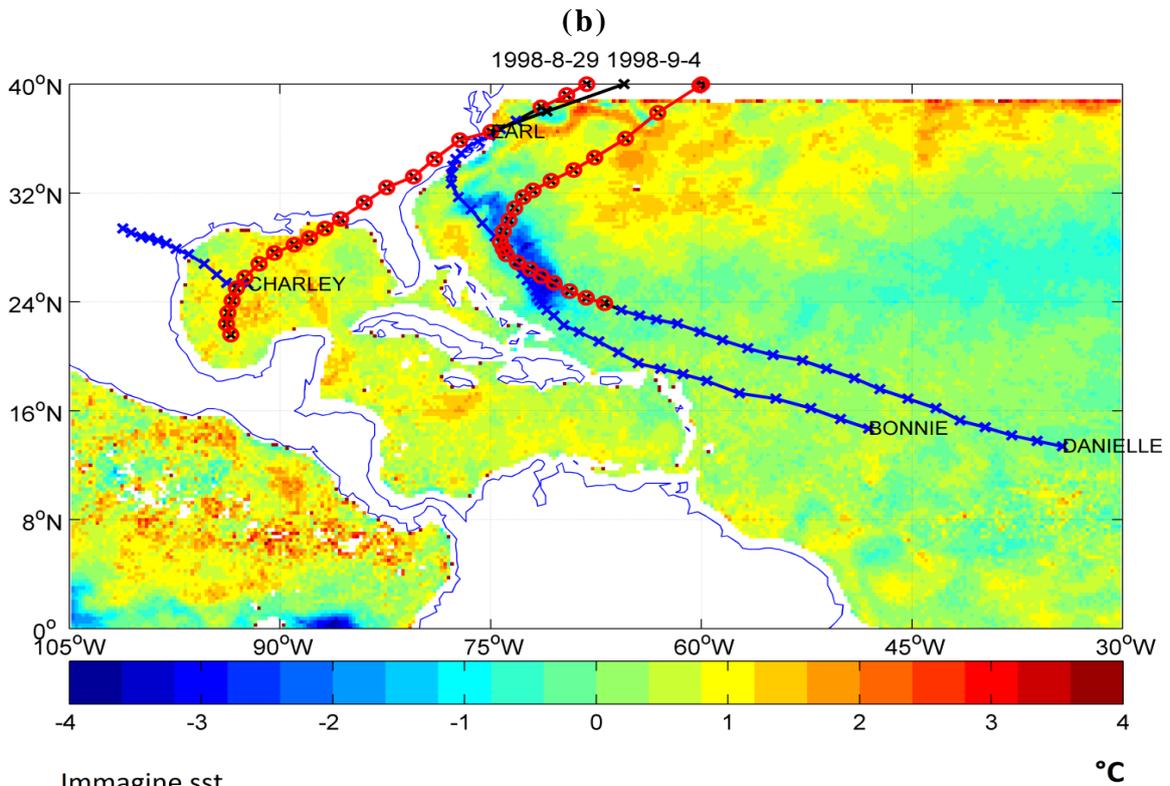


Immagine sst

**Fig. 11. Anomalia di chl (a) tra il 21 e il 28 agosto 1998 e di sst (b) tra il 29 agosto e il 4 settembre 1998 registrate in seguito al passaggio di Bonnie.**

Il secondo caso presentato è quello di Bonnie nel 1998 (figura 11).

Bonnie è un uragano di categoria 2/3, attivo tra il 19 e il 30 marzo 1998. Ha raggiunto un picco di velocità di circa 180 km/h e una pressione minima di 954 mb.

Le immagini studiate sono la composita dell'anomalia di clorofilla, tra il 21 e il 28 agosto e l'anomalia di temperatura tra il 29 agosto e il 4 settembre.

Nelle immagini è evidente la compresenza proprio lungo la traccia del ciclone, di un'anomalia negativa di temperatura di circa 3-4 °C e positiva di clorofilla *a*.

Essendo il dato della clorofilla *a* normalizzato rispetto alla media, anche in questo caso la concentrazione raggiunge valori che sono tra l'80 e il 100% maggiori rispetto alla concentrazione normale in questa zona.

Analizzando le composita di chl successive a quella mostrata si vede inoltre che l'anomalia è persistita per altre due settimane in seguito al passaggio del ciclone, come nel caso illustrato in precedenza.

# FLOYD (1999)

(a)

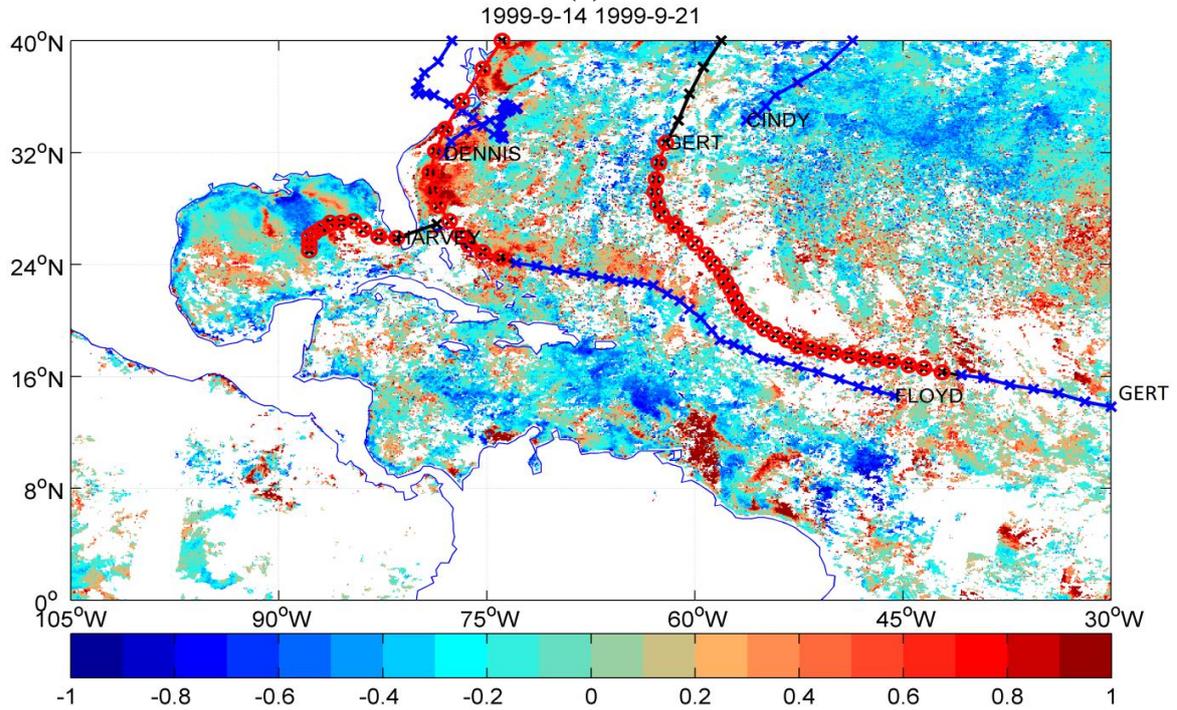


Immagine chl

(b)

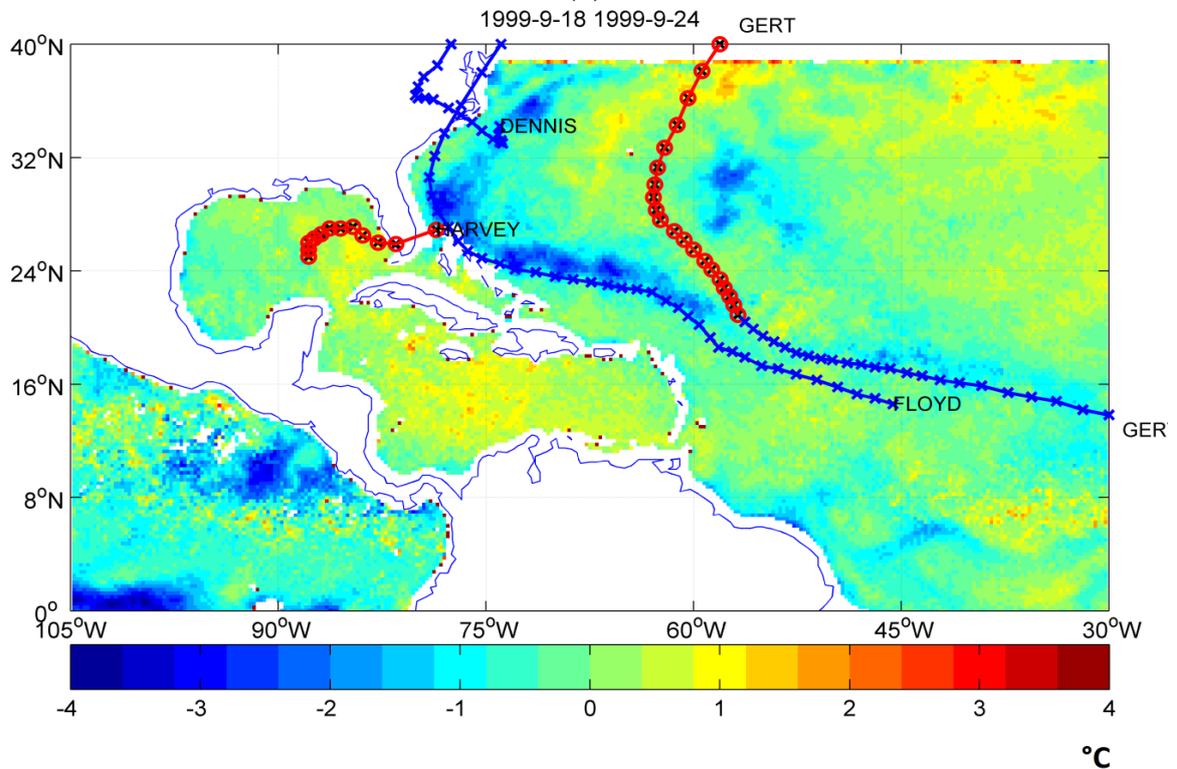


Immagine sst

**Fig. 12. Anomalia di chl tra il 14 e il 21 settembre 1999 (a) e di sst tra il 18 e il 24 settembre 1999 (b) in seguito al passaggio di Floyd.**

Il terzo esempio è quello di Floyd del 1999 (figura 12).

Floyd è un uragano sviluppatosi tra il 7 e il 17 settembre, che ha raggiunto la categoria 3-4 della scala Saffir/Simpson.

L'immagine selezionata per l'anomalia di clorofilla è quella dal 14 al 21 settembre 1999, mentre per la temperatura quella dal 18 al 24 settembre.

In queste immagini si vede bene un'anomalia, sia di temperatura che di clorofilla, questa volta non concentrata in una sola zona ma che si sviluppa seguendo gran parte della traccia del ciclone.

Per quanto riguarda la temperatura, si registra un calo sempre intorno ai 3-4 °C, mentre l'aumento della concentrazione di clorofilla è leggermente più debole rispetto al primo caso e si assesta intorno al 40% in mare aperto e all'80% in prossimità della costa.

# ISABEL (2003)

(a)

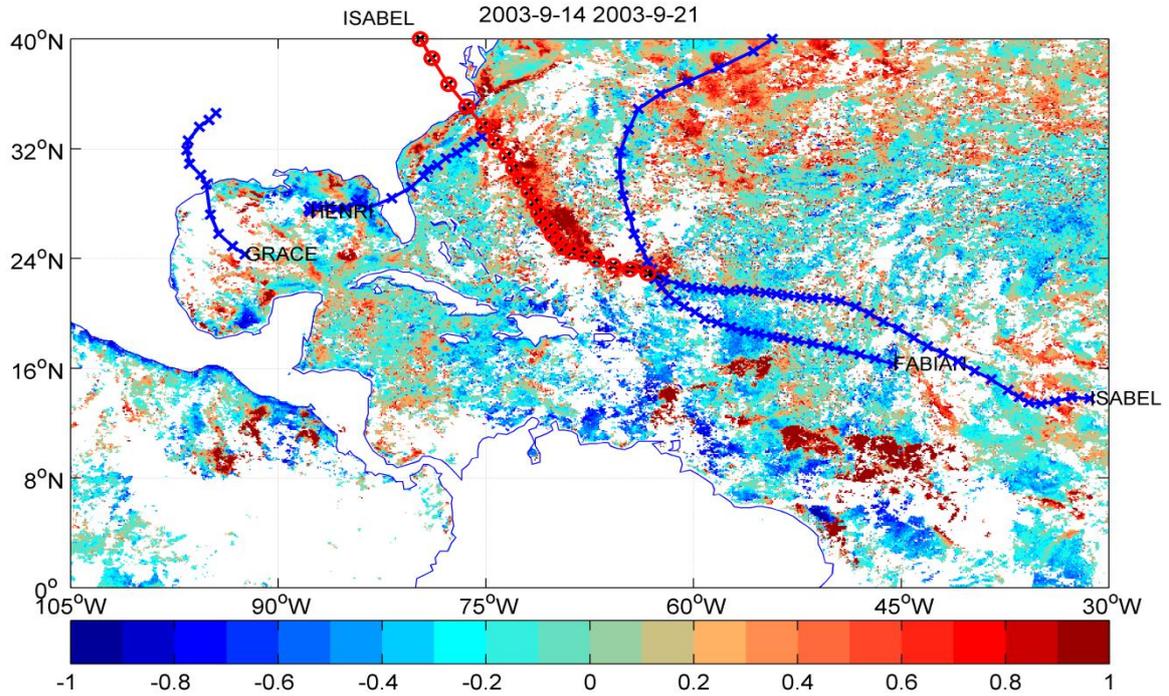


Immagine chl

(b)

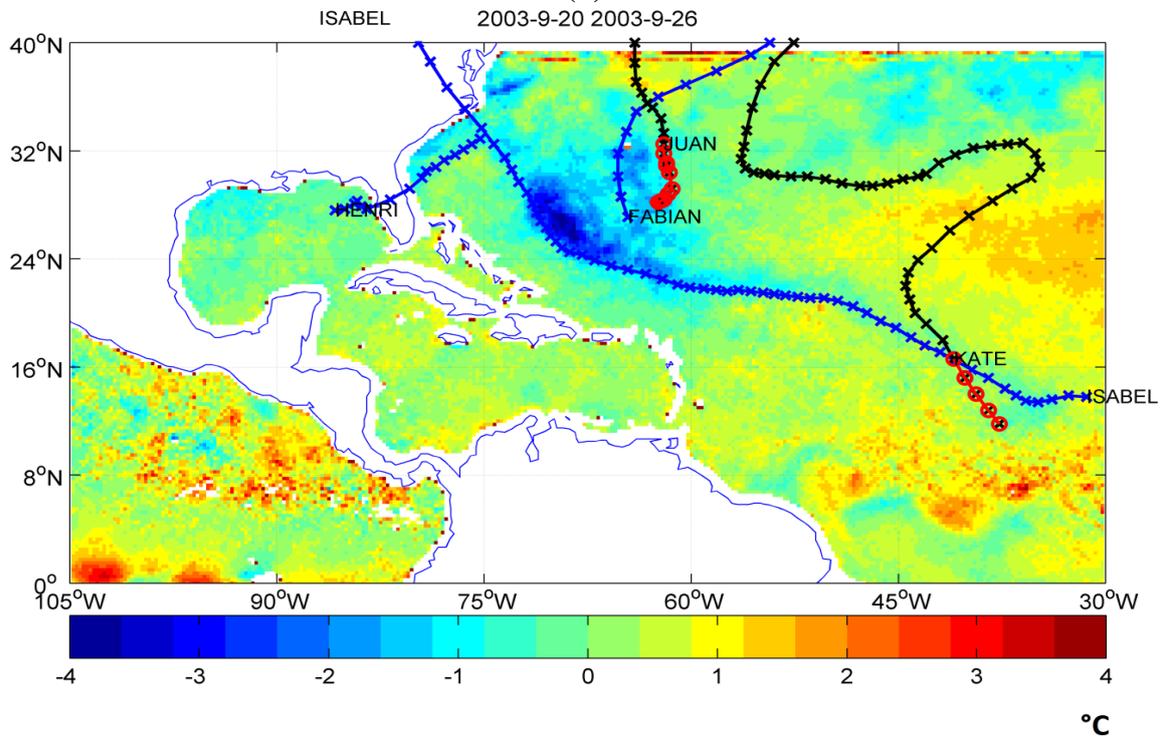


Immagine sst

**Fig. 13. (a) anomalia di chl tra il 14 e il 21 settembre 2003; (b) anomalia di sst tra il 20 e il 26 settembre 2003.**

Il quarto caso riguarda Isabel, un uragano presente tra il 6 e il 19 settembre 2003 (figura 13).

Isabel è l'uragano più intenso tra quelli analizzati in quanto ha raggiunto la categoria 5 della scala Saffir/Simpson.

Proprio per la sua forte intensità, nella composita dal 14 al 21 marzo è ben visibile una forte anomalia di clorofilla *a* che raggiunge il 100% di aumento della concentrazione rispetto alla media.

Anche l'anomalia di temperatura, che questa volta supera i 4°C, è molto evidente nella figura che rappresenta i dati dal 20 al 26 settembre e si trova esattamente nella stessa zona di comparsa della fioritura di fitoplancton.

Anche in questo caso, analizzando le composithe successive, si vede che l'anomalia di clorofilla persiste per altre due settimane in seguito al passaggio di Isabel.

# LEE, MARIA, NATE (2005)

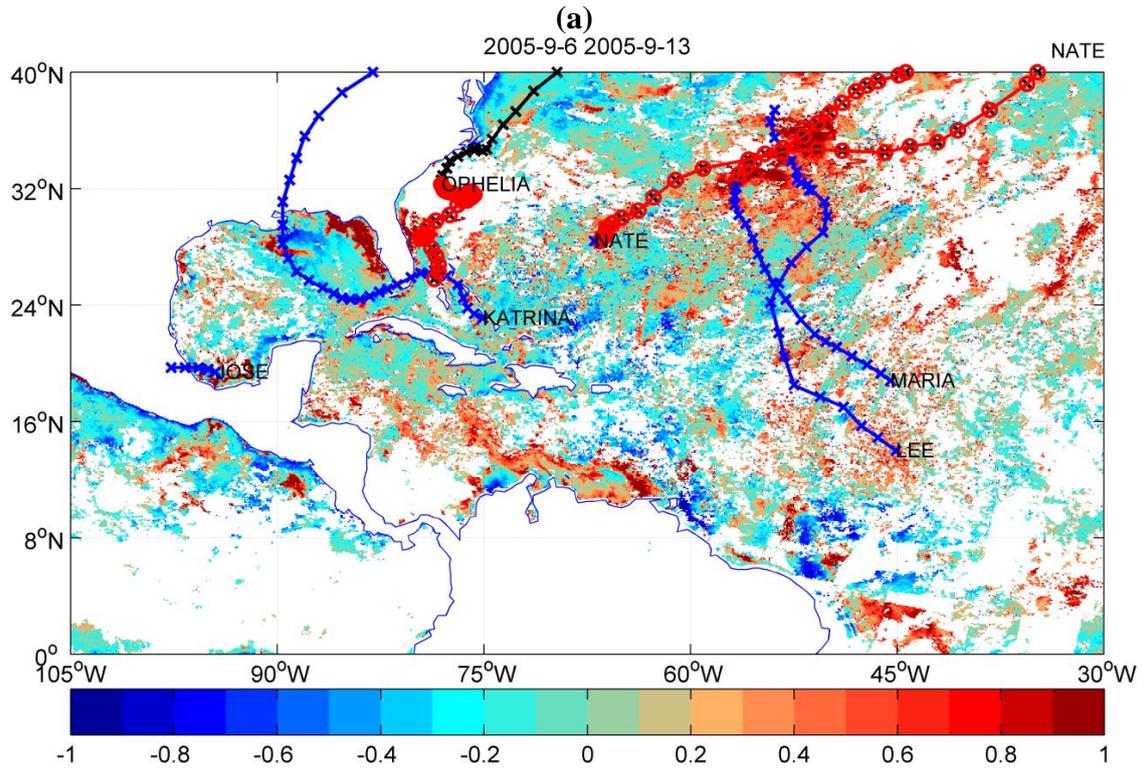


Immagine chl

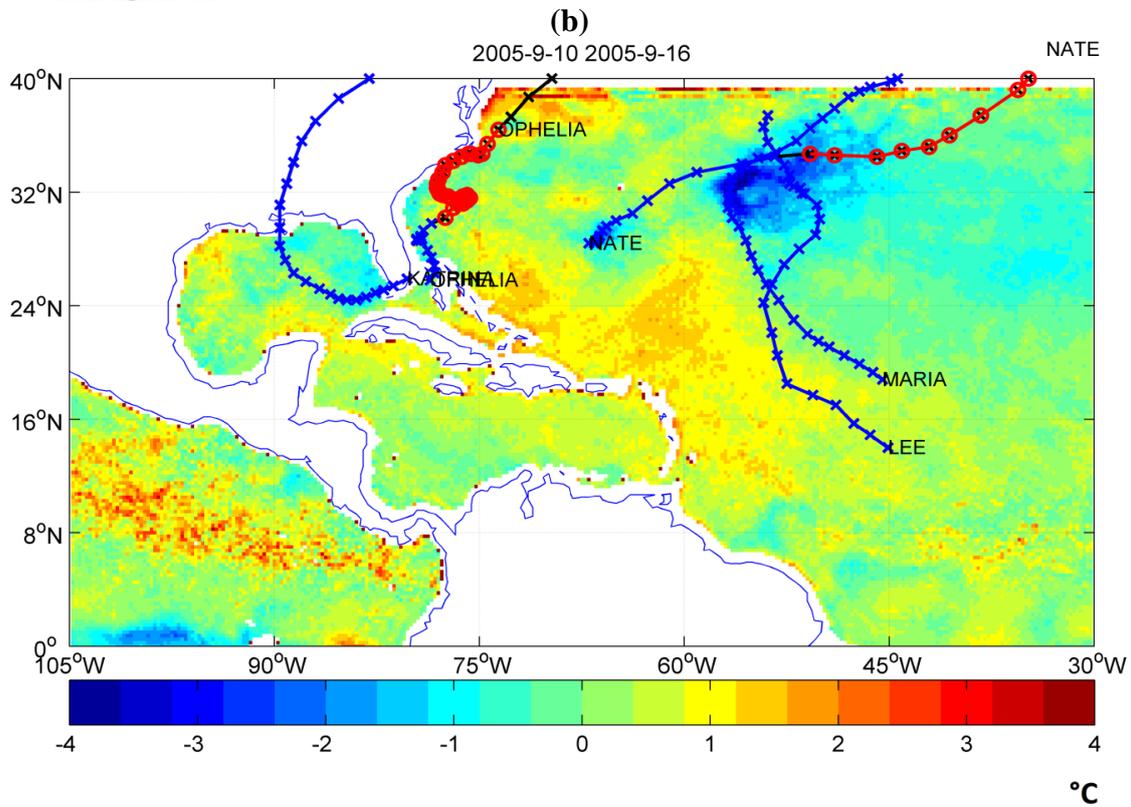


Immagine sst

**Fig. 14. Anomalie di chl tra il 6 e il 13 settembre 2005 (a) e di sst tra il 10 e il 16 settembre 2005 (b) dovute al passaggio di Lee, Maria e Nate.**

L'ultimo esempio riguarda Lee, Maria e Nate (figura 14). L'anomalia è avvenuta nel centro dell'Atlantico e si è verificata la compresenza di più cicloni nello stesso periodo.

Infatti, tra il 28 agosto e il 2 settembre è comparso Lee, dall'1 al 10 settembre Maria e dal 5 al 10 settembre Nate.

In acque profonde la presenza di anomalie significative è più rara, poiché lo strato d'acqua da mescolare per riuscire a fare risalire i nutrienti è molto maggiore. In questo caso però, la presenza simultanea di tre uragani, ha fatto sì che si sviluppasse un'anomalia di clorofilla molto estesa.

Anche in questo caso la concentrazione di clorofilla nella composita tra il 6 e il 13 settembre raggiunge il 100% di incremento, mentre la temperatura dell'acqua, come si vede nell'immagine tra il 10 e il 16 settembre, ha subito un calo di circa 4 °C.

## 5. DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Dagli esempi mostrati nel paragrafo precedente possono essere tratte alcune deduzioni che permettono di capire in generale come avvenga questo fenomeno e quali siano le condizioni necessarie affinché questo avvenga.

La prima cosa che si nota osservando i casi riportati è che la risposta del sistema alla sollecitazione non avviene immediatamente ma con qualche giorno di ritardo, infatti, l'anomalia si evidenzia sempre nella composita successiva a quella del passaggio dell'uragano.

Questo divario è facilmente comprensibile, poiché i nutrienti richiedono del tempo per giungere dal fondale alla superficie e così il fitoplancton richiede del tempo per la propria crescita.

Un'altra cosa che è possibile evidenziare è il fatto che l'anomalia di clorofilla *a* è molto più persistente rispetto a quella di temperatura, questo perché la temperatura, essendo una proprietà fisica, tende a tornare verso l'equilibrio più in fretta mentre l'anomalia di clorofilla segue l'andamento del ciclo biologico del fitoplancton.

Dall'analisi visiva è inoltre emerso che non tutti i cicloni sono in grado di provocare un segnale consistente il che vuol dire che devono verificarsi delle condizioni particolari per cui possa esserci un'anomalia.

Alcune di queste condizioni possono essere dedotte dalle immagini osservate, come ad esempio il fatto che le anomalie siano più consistenti e più frequenti lungo le coste, dove le acque sono meno profonde e perciò anche i cicloni meno potenti possono essere in grado di far risalire i nutrienti.

Per lo stesso motivo si deduce che, per riuscire a creare un'anomalia rilevabile, gli uragani che passano in oceano aperto devono possedere un'energia maggiore, cosicché lo stress dovuto ai venti ad esso associati

possa raggiungere una profondità sufficiente da indurre una risalita delle acque profonde.

Per i casi in oceano aperto più profondo, oltre all'intensità, sembra rivestire un ruolo importante anche la velocità degli uragani, infatti, quelli più lenti, che perciò insistono nella stessa zona per più tempo sono in grado di restituire un segnale più forte.

Questo si può notare ad esempio osservando le immagini di Gordon ed Helene (figura 10 c), dove il massimo di anomalia si raggiunge nel punto in cui Gordon subisce un rallentamento e un cambio di direzione.

La velocità degli uragani può essere in qualche modo dedotta direttamente dalle immagini osservando le croci e i cerchi lungo le tracce dei cicloni presenti su ogni mappa, infatti, ogni simbolo rappresenta la posizione del ciclone registrata ogni sei ore, perciò più i simboli sono ravvicinati, più questo è lento quindi si è soffermato nella stessa zona.

La velocità però non è l'unico fattore determinante, infatti, anche uragani non molto lenti, possono provocare un'anomalia abbastanza intensa se agiscono contemporaneamente nella stessa area, come si può vedere nel caso di Lee, Maria e Nate (figura 14).

Il loro passaggio simultaneo, infatti, sembra portare ad un rafforzamento del segnale totale, come se gli effetti dei singoli cicloni si sommassero.

Quello che non è possibile capire semplicemente osservando queste immagini, è il rapporto temporale tra l'anomalia di clorofilla e quella di temperatura poiché in alcuni casi sembrano avvenire contemporaneamente mentre in altri sembra che l'anomalia di clorofilla compaia qualche giorno dopo, o addirittura prima perché i due segnali compaiono in composite settimanali diverse.

Questo problema probabilmente dipende soltanto dal fatto che i dati di chl e SST sono campionati in maniera diversa: quelli della concentrazione di

clorofilla *a* sono forniti in composite da 8 giorni che ripartono ogni anno dall'1 gennaio, indipendentemente dal giorno della settimana, mentre quelli di temperatura sono suddivisi in settimane di 7 giorni che vanno da sabato a sabato.

Questo comporta uno sfasamento nelle date d'inizio e fine delle immagini che vengono confrontate e perciò in alcuni casi non è possibile stabilire quale delle due anomalie avvenga prima in base alle osservazioni disponibili.

## 6. CONCLUSIONI E LAVORO FUTURO

In sintesi, nel corso di questa indagine sistematica, anche se soltanto qualitativa, sono stati trovati diversi casi che confermano l'esistenza di una correlazione tra il passaggio di uragani e l'aumento di clorofilla *a* nell'oceano.

In particolare si è visto che i cicloni possono creare le condizioni necessarie per cui si verifichi una fioritura straordinaria di fitoplancton, specialmente nel caso in cui si verifichi una compresenza di più cicloni nella stessa area nell'arco di un breve lasso di tempo.

Per quanto riguarda i casi in Atlantico aperto, un ruolo fondamentale è rivestito dalla permanenza degli uragani in un'area abbastanza ristretta per più giorni.

Infatti, si nota che solo gli uragani di forte intensità sono in grado di produrre un segnale consistente in mare aperto. Si ipotizza pertanto che sia necessario un certo livello di energia per raggiungere la profondità del nutriclino, e questo può accadere anche con uragani meno intensi ma che permangono nella stessa zona per più tempo.

Il passo successivo della ricerca sarebbe la costruzione di mappe di correlazione tra le anomalie di clorofilla *a* e di temperatura, in modo da valutare più chiaramente e non solo tramite analisi visiva le zone dove esiste un'effettiva compresenza delle due anomalie.

Successivamente, si dovrebbe passare alla quantificazione delle anomalie trovate, cioè alla valutazione dell'impatto che queste hanno sulla produzione media annuale di biomassa.

## **Bibliografia**

Babin S. M., Carton J. A., Dickey T. D. et al. (2004), Satellite evidence of hurricane-induced phytoplankton blooms in an oceanic desert, *Journal of geophysical research*, 109, C03043, doi:10.1029/2003JC001938.

Conkright, M. E., et al. (2002), World Ocean Database 2001, vol. 1, Introduction, 167 pp., U.S. Gov. Print. Off., Washington, D. C.

Emanuel K., (2005), Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years, *Nature*, 436, 686-688.

Webster P. J., Holland G. J., Curry J. A., Chang H. R. (2005), Changes in tropical cyclone number, duration and intensity in a warming environment, *Science*, 309, 1844-1846.

Gierach M. M., Subrahmanyam B., Samuelsen A., Ueyoshi K. (2009), Hurricane-driven alteration in plankton community size structure in the Gulf of Mexico: a modeling study, *Geophysical research letters*, vol. 36, L07604, doi:10.1029/2009GL037414.

Hanshaw M. N., Lozier M. S., Palter J. B. (2008), Integrated impact of tropical cyclones on sea surface chlorophyll in the North Atlantic, *Geophysical research letters*, vol.35, L01601, doi:10.1029/2007GL031862.

Horne E. P. W., Loder J. W., Harrison W. G. et al. (1989), Nitrate supply and demand at the Georges Bank tidal front, *Topics in marine biology*, 53, 145-158.

Kummerow C., Simpson J., Thielf O., Barnes W., Chang A. T. C., Stocker E., Adler R. F., Hou A., Kakar R., Wentz F., Ashcroft P., Kozu T., Hong Y., Okamoto K., Iguchi T., Kuroiwa H., Im E., Haddad Z., Huffman G., Ferrier B., Olson W. S., Zipser E., Smith E. A., Wilheit T. T., North G., Krishnamurti T., Nakamura K. (2000), The status of the tropical rainfall measuring mission (TRMM) after two years in orbit, *American meteorological society*, December 2000.

Lloyd I. D., Vecchi G. A. (2010), Observation evidence for oceanic controls on hurricane intensity, *Journal of climate*, vol. 24.

Sarmiento J. L., Simeon J., Gnanadesikan A., Gruber N., Key R. M., Schlitzer R. (2007), 'Deep ocean biogeochemistry of silicic and nitrate', *Global biogeochemical cycles*, vol. 21, GB 1S90, doi: 10.1029/2006GB002720, 2007.

Scoccimarro E., Gualdi S., Bellucci A., Sanna A., Fogli P. G., Manzini E., Vichi M., Oddo P., Navarra A. (2011), Effects of Tropical Cyclones on Ocean Heat Transport in a High-Resolution Coupled General Circulation Model *Journal of climate*, vol. 24.

Son S., Platt T., Fuentes-Yaco C., Bouman H., Devred E., Wu Y., Sathyendranath S. (2007), Possible biogeochemical response to the passage of Hurricane Fabian observed by satellites, *Journal of plankton research*, vol.29, num. 8, pag. 687-697.

Feldman G. C., “Monitoring the Earth from Space with SeaWiFS”, <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS/TEACHERS>.

“Description of TMI data products”, [http://www.ssmi.com/tmi/tmi\\_description.html](http://www.ssmi.com/tmi/tmi_description.html).