

Gli uragani come macchine termiche

Kerry Emanuel <https://emanuel.mit.edu/> (MIT/Boston USA)

Original published on web 23 July 2019, translated: June 17th 2023

Abstract The hurricanes as thermal engines are models very much credited to predict the intensification of them in global warming. The interview of prof. K. Emanuel published in the Annenberg Learner website contains the basics for understanding the model of the thermodynamical cycle, and its limitations and it is proposed in Italian language. The variability of the last 4 millenia in the hurricanes' intensity is also devised, as well as the role of the hurricanes in the World's climate balance.

Sommario L'intervista per il sito Annenberg Learner del prof. K. Emanuel, esperto Americano di uragani, è tradotta in Italiano per disporre di idee chiare e semplici sulla trasformazione da energia termica in cinetica, mediante un ciclo termodinamico che si svolge tra la superficie dell'oceano e la stratosfera. Il modello è una semplificazione della realtà, ma aiuta a capire anche le basi teoriche della intensificazione degli uragani con il riscaldamento globale, presentando anche la loro variabilità secolare negli ultimi 4 millenni, cruciale nell'attuale dibattito scientifico e mediatico. Il ruolo degli uragani nel bilancio climatico della Terra è tratteggiato.

Keywords: Hurricane, Carnot heat engine, Wind energy, Deep convection.

Introduzione: Questo articolo viene proposto all'attenzione del pubblico italiano che non ha a che fare con gli uragani, anche se si parla già di *Medicanes*, *Med(iterranean hurri)canes*, che capitano in autunno, quando lo sbilanciamento termico tra acqua e aria è massimale, al termine del riscaldamento estivo.

Anche la formazione di una cella temporalesca, da un cumulonembo, ha in sé gli elementi fisici di base che stanno dietro ad un uragano, sia pure su scala molto minore.

Intervistatore: Vorrei iniziare chiedendoti come ti sei interessato per la prima volta al fenomeno meteorologico. Riesci a ripensare a ciò che ha reso questo un interesse per tutta la vita per te?

KERRY: Come è vero per molte persone nel mio campo, mi sono interessato ad esso da bambino. Sono cresciuto nel New England. E il meteo in New England presenta molta varietà. È molto variabile. E mi sono interessato al fenomeno meteorologico. Volevo capire come funzionano le varie cose.

Intervistatore: C'è un momento particolare in cui hai iniziato a considerare gli uragani come un fenomeno interessante?

KERRY: Sì, effettivamente. Questo è un classico esempio di come a volte ti interessi a qualcosa dovendolo insegnare. E uno dei motivi per cui l'insegnamento e la ricerca vanno così bene insieme è che, *spesso, pensi di capire qualcosa. Solo quando devi insegnarlo, però, capisci che non lo capisci.*

E questo mi è successo nel caso degli uragani. Così mi è stato chiesto di tenere un corso di meteorologia tropicale. Pensavo di aver capito come funzionano gli uragani. Sapevo quale fosse la spiegazione convenzionale. Così ho iniziato a insegnarlo. E ho avuto una di quelle esperienze orribili in cui inizi a parlare di qualcosa, e ti rendi conto che non ha davvero alcun senso. E questo ti porta lungo un percorso di cercare di capire cosa ha senso. E questo è ciò che chiamiamo ricerca.

Intervistatore: Hai mai visto come gli uragani vengono solitamente insegnati a scuola ai bambini? E come questa descrizione potrebbe essere ampliata?

KERRY: Beh, sì. Penso che in quasi tutte le presentazioni di cui sono a conoscenza, che siano in televisione, in un film documentario o in un libro di testo, sia molto descrittivo. Questa è una sequenza di eventi che osserviamo accadere che porta a un uragano. E non è davvero esplicativo. *C'è molto poco che dice: "Beh, questo è il motivo per cui sta accadendo. Questa è la fisica che c'è dietro".* Quindi, vedo che manca in molti dei programmi sugli uragani.

Intervistatore: Approfondiamo un po' questo aspetto. Da un punto di vista fisico, cos'è un uragano?

KERRY: Bene, *da un punto di vista fisico, un uragano è un motore termico.* È una macchina massiccia e naturale per convertire l'energia termica in energia meccanica, l'energia meccanica è l'energia del vento. E l'energia termica deriva

dall'oceano, e in particolare dall'evaporazione dell'acqua dell'oceano. Ora, non è sempre chiaro alle persone che quando si fa evaporare l'acqua, questo corrisponde in realtà a un trasferimento di energia. Eppure tutti noi abbiamo quell'esperienza.

Ad esempio, quando esci da una piscina in una giornata ventosa, anche se fa caldo, potresti sentire freddo per un po' perché **l'acqua sta evaporando dalla tua pelle** e sta togliendo calore dal tuo corpo. E quando l'acqua evapora dall'oceano, toglie calore dall'oceano. E quel calore viene effettivamente aggiunto all'atmosfera, ed è una **forma di calore che chiamiamo "latente"**, perché non è davvero evidente. Si esprime nel contenuto di vapore acqueo dell'aria.

Ora, **più tardi, quando quel vapore acqueo si condensa in piccole gocce di acqua liquida che chiamiamo "nuvola", quel calore viene rilasciato e riscalda l'aria.** E quindi è la quantità formidabile di calore rilasciata nel nucleo interno di un uragano dove tutto questo vapore acqueo si condensa. Questa è la cosa prossima che guida questa grande circolazione.

Intervistatore: Puoi parlare un po' di come viene convertito il calore?

KERRY: Permettetemi di tracciare un'analogia che è molto più familiare alle persone nella vita di tutti i giorni, che è un'automobile. Un'automobile è una macchina che converte, in definitiva, l'energia chimica, l'energia immagazzinata nella benzina, prima in energia termica quando si verifica una piccola esplosione in miniatura all'interno del cilindro del motore. E poi quell'energia termica viene convertita in energia meccanica che è il movimento dell'auto.

Ora, quando si preme sull'acceleratore, l'auto sta accelerando. È questa energia che viene utilizzata per accelerare l'auto. Quando stai percorrendo l'autostrada a 100 km all'ora, e non stai più accelerando, stai ancora bruciando energia. È tutta

l'energia necessaria per superare l'attrito dell'auto che si muove lungo la strada e l'attrito dell'aria che si muove oltre l'auto. C'è un'analogia con un uragano. **Un uragano gira e raggiunge una certa intensità massima. E a quel punto, non sta più crescendo.** Ma c'è un'enorme quantità di attrito, dei venti che soffiano sulla superficie della terra. Ed è **l'energia termica su cui prospera l'uragano** che, in questo caso, **viene prima convertita in energia meccanica dei venti e poi dissipata dall'attrito.** E la dissipazione, tra l'altro, trasforma l'energia in calore. Attrito, ti strofini le mani insieme, si surriscaldano. **L'attrito provoca calore. Quindi è un ciclo.**

Intervistatore: Quindi, quando si sperimentano i venti di un uragano più veloci e pesanti, c'è attrito lì e si sta riscaldando.

KERRY: Giusto. Parte dell'acqua che è evaporata dall'oceano e che trasferisce calore nell'aria, parte di quel calore viene utilizzata per spingerti. È l'energia che viene utilizzata per spingerti o trascinarti sul terreno se non riesci a stare in piedi con venti così forti. Possiamo parlare dell'energia che viene dissipata in un uragano in termini quantitativi. E il numero che mi piace, perché è quasi esatto, è che, per un uragano medio, non particolarmente grande, non particolarmente potente, la quantità di energia che viene dissipata, per attrito, che è uguale alla quantità di energia termica che viene pompata in questa tempesta, sembra essere quasi esattamente uguale alla velocità media con cui gli Stati Uniti usano l'energia elettrica. Quindi l'intera capacità di generazione degli Stati Uniti (MegaWatt) equivale a quella di un uragano.

Intervistatore: In che modo un uragano è come un motore termico?

KERRY: Uno dei principi che è stato stabilito nei primissimi giorni della termodinamica, **a metà del 19° secolo**, principalmente dai francesi, era che si poteva prendere solo una frazione di energia termica e trasformarla in energia

meccanica. E questa frazione è chiamata "efficienza". E questa teoria è stata sviluppata da un termodinamico francese di nome **Sadi Carnot**. Ed è per questo che molti motori termici, ancora oggi, sono chiamati motori di Carnot.

E questa frazione è proporzionale alla differenza tra la temperatura alla quale il calore viene immesso nel sistema e la temperatura alla quale, alla fine, viene estratto. Quindi, iniziamo con un semplice esempio. In realtà, non è affatto semplice, ma familiare. Un esempio familiare è un'auto. Ora, il calore viene aggiunto all'interno del cilindro del motore dove la temperatura è molto, molto calda a causa di tutte le esplosioni di vapore di gas e miscela di ossigeno lì dentro.

E il calore viene infine tolto dall'auto dal radiatore. Il radiatore potrebbe funzionare a una temperatura pari a qualsiasi temperatura esterna, sempre inferiore alla temperatura all'interno del cilindro. Quindi maggiore è la differenza di temperatura, maggiore è la frazione dell'energia termica totale che puoi trasformare in energia meccanica. Questo è un limite superiore. Esistono tutti i tipi di altre inefficienze nel sistema.

Ora, un uragano è anche un motore termico. E la temperatura alla quale il calore è immesso è la temperatura dell'oceano, in media circa 30 °C. Quindi, nel caso di un uragano, è anche un esempio di motore termico. Il calore viene immesso nel motore alla temperatura dell'oceano, la superficie dell'oceano, che è di circa 30°C - 28 °C. E l'aria scorre lungo la parete oculare dell'uragano, un anello di temporali molto forti che circonda l'occhio. E poi esce all'altitudine molto più alta della parte superiore dell'atmosfera dove le temperature sono molto, molto fredde. Alcune delle temperature più fredde che puoi trovare ovunque nell'atmosfera, ironicamente, sono ai tropici, a circa 16 chilometri sopra la superficie. E le temperature sono basse: fino a -80 ° C.

Quindi c'è una grande differenza di temperatura che agisce attraverso l'uragano. E per questo motivo, l'uragano è un motore termico abbastanza efficiente, come i motori termici naturali. **Stai convertendo circa un terzo dell'energia termica che stai ricevendo dall'oceano in energia eolica.**

Intervistatore: Qual è la fonte ultima dell'energia che aziona questo motore termico? In che modo è correlato all'effetto serra?

KERRY: La fonte ultima di energia per tutto, virtualmente, che accade nell'atmosfera è il Sole. E infatti, è il Sole in combinazione con l'effetto serra. E non avremmo uragani se non fosse per l'effetto serra, tra l'altro. Ecco come funziona. La luce del Sole riscalda l'oceano. E se non ci fosse atmosfera, l'oceano si libererebbe del suo calore semplicemente emettendo radiazioni – si chiama "radiazione infrarossa", radiazione che non puoi vedere – nello spazio. E sarebbe un semplice equilibrio. Questo è, ad esempio, l'equilibrio che esiste sulla superficie della Luna e il suolo che è rivolto verso la luce del Sole. E la Luna ha una certa temperatura che si può facilmente calcolare, quindi emette tanta radiazione quanta ne riceve dal Sole.

Ma la Terra ha questa bella coltre di gas intorno ad essa. E alcuni di questi gas sono gas serra molto importanti, il vapore acqueo è il più importante, e anche l'anidride carbonica, il metano. E quei gas assorbono parte del calore che risale dal pianeta, e poi lo re-irradiano verso la superficie.

E così, ai tropici, c'è così tanto vapore acqueo che l'oceano scopre che non può davvero liberarsi del calore che riceve dal sole irradiandolo nello spazio. Quindi, invece, il calore viene portato via dalle correnti d'aria. L'aria che sale da vicino alla superficie dell'oceano è un po' più calda e molto più umida dell'aria che scende nelle correnti discendenti. Quindi l'aria sta portando via il calore.

E per farlo, l'aria a contatto con l'oceano non deve essere satura di vapore acqueo. La sua umidità relativa deve essere inferiore al 100%, in modo che ci sia un potenziale di evaporazione. Ed è **questo potenziale di evaporazione che guida gli uragani**. È anche il motivo per cui gli uragani tendono ad essere più intensi e frequenti alla fine dell'estate e all'inizio dell'autunno, quando la temperatura dell'oceano è al massimo e questo squilibrio tra l'oceano e l'atmosfera è anche al massimo.

Quindi, se non fosse per l'effetto serra, non avremmo problemi con gli uragani. Una delle tante cose di cui siamo preoccupati, se dovessimo avere un qualche tipo di riscaldamento globale perché l'effetto serra è in aumento, è che **gli uragani potrebbero essere un po' più intensi in un mondo più caldo**.

Intervistatore: Come variano le temperature in un uragano, verticalmente, dalla superficie dell'oceano verso l'alto?

KERRY: Se guardi una fotografia di un uragano dallo spazio, quello che vedi, ovviamente, è questa bellissima massa bianca a spirale di nuvole. È un po' difficile da dire, ma quelle nuvole si estendono da molto vicino alla superficie dell'oceano fino a circa 16 km di altezza. E la superficie dell'oceano è ad una temperatura piuttosto elevata. Se qualcuno è stato ai tropici, lo sa. È tra i 25 °C e i 30 °C. Ma le cime delle nuvole in un uragano rappresentano la temperatura che si trova nella parte superiore dell'atmosfera. Fa molto, molto freddo: circa -80°C . Ed è qualcosa che non molte persone conoscono, l'atmosfera tropicale. È vero ovunque nell'atmosfera. Diventa più freddo man mano che sali. Ecco perché c'è neve in cima al Monte Kilimanjaro (5895 m), che è quasi all'equatore. Ma se vai molto lontano, molto al di sopra delle cime delle montagne, è ancora più freddo. E può essere molto, molto freddo. Quindi, l'uragano sta operando su un gradiente piuttosto spettacolare, dalla superficie dell'oceano alla cima della tempesta.

Intervistatore: Potresti descrivere il processo di formazione degli uragani?

KERRY: In effetti, la generazione di uragani, che chiamiamo la **"genesì degli uragani"**, **rimane uno dei problemi più enigmatici della scienza atmosferica**. Non capiamo davvero come funziona. Ma questo è ciò che vediamo quando guardiamo cose come immagini satellitari o sequenze di immagini. In genere la **prima cosa** che vedi è un gruppo di temporali, o ciò che chiamiamo "rovesci convettivi". Si tratta di **grandi cumulonembi** che piovono, molto comuni ai tropici. E di solito sono sparpagliati, e sono **un po' disorganizzati**.

E quello che vedete è che iniziano a formare grumi. E ogni tanto, i grumi inizieranno a mostrare alcuni **segni di rotazione**. E poi, col passare del tempo, si organizzano in una specie di anello, un **anello di convezione a forma di ciambella**. E mentre i venti si intensificano in superficie, spesso si svilupperà un occhio, una regione chiara forse 30-50 km al centro dove le nuvole se ne vanno, e ti rimane questa massa di nuvole molto più organizzata, molto più simmetrica. Ora, comprendiamo che una volta avviato questo processo, il feedback che consente all'uragano di crescere è tra vento ed evaporazione. Abbiamo appena discusso poco fa che la principale fonte di energia per un uragano è l'evaporazione dell'acqua. Ma proprio come senti più freddo quando esci da una piscina in una giornata ventosa rispetto a una giornata calma, la velocità con cui il calore entra nell'atmosfera è una funzione della velocità del vento. **Più forti sono i venti, più calore hai in atmosfera**. Quindi hai questo ciclo. **Più forti sono i venti dell'uragano, maggiore è l'evaporazione**. **Maggiore è l'evaporazione, più calore entra nell'uragano**. **Più calore va nell'uragano, più forte diventa**. E questo sarebbe andato avanti per sempre. Ma c'è un'altra cosa che gli impedisce di farlo. È attrito. E l'attrito aumenta ancora più

velocemente con la velocità del vento rispetto all'evaporazione. E alla fine, smaltisce il calore. E a quel punto, l'uragano smette di crescere.

Cosa c'è di misterioso in questo – penso che capiamo abbastanza bene questo processo, tra l'altro. — è il modo in cui tutto è iniziato. E ora **ne sappiamo abbastanza per sapere che non inizia spontaneamente**. Cioè, **una farfalla che sbatte le ali da qualche parte nella parte occidentale dell'Africa non è in grado di iniziare un uragano**. Un uragano è più simile a un tosaerba, nel senso che il tuo tosaerba è seduto nel garage. Ha la benzina pronta in esso. E tutto è oliato. Le candele sono buone. Ma fortunatamente per voi e per me, tranne forse nei film horror, il tosaerba non parte spontaneamente. Devi andare oltre e dare alla corda una buona tirata. E tutti quelli che hanno provato a farlo sanno che se la tua trazione è troppo anemica, non parte.

Anche gli uragani sono così. Devi avere qualche altro tipo di tempesta che non ha nulla a che fare con la fisica di cui abbiamo parlato, che arriva e dà una spinta sufficientemente forte all'atmosfera. E capiamo perché è vero. Ma quello che non capiamo è come tutto riesca ad accadere. Ed è raro, per fortuna. Non succede così spesso.

Intervistatore: Parlati un po' di alcuni degli effetti di un uragano quando colpisce la terra, nell'approdo. **Come riconosceresti, se fossi in piedi sulla spiaggia, che era un uragano, e non solo una tempesta** o qualcosa del genere?

KERRY: Bene, **un uragano è probabilmente la tempesta più potente sulla Terra**. Le velocità del vento non sono così elevate come un tornado, ma sono molto più estese. Un tornado copre poche centinaia di metri, mentre un uragano si estende per molte, molte decine e centinaia di chilometri. E quando un uragano si avvicina alla riva, ci sono varie cose che accadono. La prima indicazione che qualcosa di brutto sta accadendo in

mare è che queste **onde terrificanti iniziano ad arrivare a riva, molto prima che ci sia vento**. Le onde in genere superano la velocità di spostamento dell'uragano. E, ai vecchi tempi, prima che avessimo satelliti e aerei, quando non sapevamo davvero cosa stesse succedendo in mare, i meteorologi facevano molto affidamento su questo.

C'è la famosa storia dell'uragano di Galveston che è commemorata in questo meraviglioso libro intitolato *Isaac's Storm* su Isaac Cline,¹ che era il meteorologo in servizio a Galveston nel 1900. E, sebbene avesse notizie da Cuba che c'era un uragano lì, non avevano modo di sapere veramente se stava arrivando nel Golfo del Messico. La prima volta che si è davvero insospettito è stato quando queste enormi onde hanno iniziato ad infrangersi sulle spiagge di Galveston. E cominciò a pensare: "Oh mio Dio. Qualcosa sta per accadere". Questa è la prima cosa che succede.

Poi, naturalmente, **il cielo verso il mare diventa molto scuro**, mentre la massa centrale di nuvole si avvicina alla riva. Il **vento aumenta gradualmente**. Di solito non è un aumento molto improvviso del vento. **Inizi ad avere raffiche di pioggia, le bande a spirale degli uragani. Quindi la pioggia va e viene, e il vento aumenta gradualmente.**

E poi, **quando la parete oculare si avvicina alla riva, i venti iniziano ad aumentare molto, molto velocemente**, e in particolare se l'uragano si muove velocemente. E l'altra cosa che succede è, naturalmente, che **le onde diventano sempre più grandi**. Ma le onde si sovrappongono a un altro fenomeno che chiamiamo "**storm surge**", che è un'**elevazione generale dell'acqua**, che è causata dall'effetto netto dei venti che spingono tutta quest'acqua a riva.

E c'è un altro piccolo contributo proprio dal fatto che la pressione al centro dell'uragano è molto bassa. In realtà tira un

¹ [La tempesta di Isaac - Wikipedia](#)

po' su la superficie dell'oceano. Quindi questo grande muro d'acqua invade l'entroterra. E può essere alto 6-9 metri in casi estremi. E storicamente, è questa ondata di tempesta che ha ucciso la maggior parte delle persone e, in molte tempeste, fa il maggior danno.

L'altro fenomeno con cui molte persone non hanno familiarità è l'enorme quantità di spray che vengono sollevati nell'aria in un uragano. Quando i venti iniziano a scorrere più di circa 130-150 km all'ora, così tanti spruzzi vengono sollevati nell'aria che, alla fine, diventa difficile persino parlare di una superficie dell'oceano. E non sto parlando metaforicamente. Si passa semplicemente dall'aria che è piena di bolle all'acqua che è piena di bolle all'aria che viene riempita gradualmente di spray. E non c'è più nulla che si possa chiamare la superficie dell'oceano. Quindi diventa un vero caos nel cuore di un uragano.

Intervistatore: E l'occhio dell'uragano?

KERRY: Beh, certo, c'è un sacco di tradizioni sull'occhio. E, visivamente, l'occhio è il posto più spettacolare in cui stare, in particolare se sei in aereo. Quello che succede è che, proprio quando i venti raggiungono il loro stato più feroce, inizieranno improvvisamente a diminuire. E, in una tempesta molto, molto intensa come l'uragano Andrew,² quel declino può essere molto rapido. Quasi in pochi minuti, il vento cala. Il cielo potrebbe schiarirsi. Anche se di solito, ci sono molte nuvole basse in giro. Puoi vedere il Sole di tanto in tanto e poi sbirciare tra le nuvole, il che è un peccato. Perché se non fosse per le nuvole basse, potresti vedere questo muro di nuvole che ti è appena passato sopra, e sarebbe molto spettacolare. Lo so perché l'ho visto da un aereo.

I venti calano. E ai vecchi tempi, prima ancora che la gente capisse davvero che gli uragani erano tempeste rotanti, molte

² [Uragano Andrew - Wikipedia](#) (1992)

persone venivano uccise perché pensavano che la tempesta fosse finita. Così sono usciti, e hanno cercato di iniziare a raccogliere dopo tutti i danni, solo per essere colpiti dall'altra parte della tempesta. Oggi, la maggior parte delle persone lo capisce e questo non accade.

Ma ci sono ogni sorta di altre cose folli che accadono negli occhi. Gli uccelli in mare a volte rimangono intrappolati negli occhi. E, poiché è così violento nella parete oculare, non possono davvero uscire. E se l'uragano va a latitudini molto alte, porta con sé tutti questi uccelli tropicali. In modo che di tanto in tanto, alcune specie tropicali di uccelli appariranno a Terranova o da qualche parte.

E se una nave capita di essere erroneamente catturata nell'occhio di una tempesta, cosa che non accade più molto a causa dei buoni avvertimenti che ricevono, allora questi uccelli – uccelli esausti – atterreranno sugli alberi della nave. Ci sono fotografie di queste petroliere negli occhi degli uragani completamente coperti di uccelli che stavano cercando di riposarsi.

Intervistatore: Come puoi prevedere l'intensità di un uragano mentre si evolve?

KERRY: Bene, quando abbiamo iniziato a considerare l'intera faccenda di trattare gli uragani come sistemi, una delle cose che ne è venuta immediatamente fuori è che ci siamo resi conto che **per un dato ambiente atmosferico, in una data temperatura oceanica, c'era una velocità massima del vento che si poteva raggiungere in un uragano**, che possiamo facilmente calcolare se solo conosciamo il tipo di proprietà medie dell'atmosfera tropicale nel mondo. oceano. È un limite di velocità.

E, in un certo senso, funziona molto bene. Cioè, se si guardano le effettive velocità del vento osservate in un sacco di uragani diversi, e si confrontano quelle velocità del vento con questo

limite, in effetti, nessuna tempesta supera mai questo limite. E solo una percentuale molto piccola di loro arriva effettivamente fino al limite. La maggior parte di loro non è all'altezza. Una delle cose interessanti che ci è successa quando abbiamo fatto questo è che abbiamo iniziato a costruire modelli computerizzati di uragani. E, infatti, ho un tale modello che distribuisco gratuitamente agli insegnanti che può essere eseguito su un normale personal computer.³ E i modelli computerizzati si comportavano, in qualche modo, in modo molto diverso dai veri uragani in quanto arrivavano sempre al loro limite di velocità, a meno che non accadesse loro qualcosa di veramente terribile, come l'approdo a terra.

All'inizio non l'abbiamo capito. Gli uragani informatici ideali raggiungono sempre il loro limite di velocità. Ma quelli veri raramente ce l'hanno fatta. Anche se guardi i veri uragani che rimangono sopra le calde acque tropicali e non atterrano, di solito non raggiungono nemmeno il limite. E abbiamo iniziato a chiederci perché. Una delle prime cose che ci è venuta in mente è che nei modelli idealizzati, manteniamo fissa la temperatura dell'oceano. Non lasciamo che cambi. Ma un vero uragano cambia profondamente la temperatura dell'acqua del mare, non perché sta togliendo calore dall'oceano. Lo sta facendo e questo raffredda l'acqua. Ma è forse un decimo di grado o giù di lì. Non è molto evidente perché l'oceano è un serbatoio di calore enorme. Quello che fanno i veri uragani è agitare l'oceano. E non devi andare molto lontano nell'oceano tropicale prima di trovare acqua molto fredda. Fa caldo solo entro i primi trenta metri circa dalla superficie.

Gli uragani arrivano e mescolano quest'acqua fredda portandola fino alla superficie. Puoi guardare un'immagine satellitare e vedere queste scie davvero fredde che vengono

³ <http://wind.mit.edu/~emanuel/home.html>

lasciate dagli uragani. E così l'uragano sta raffreddando la temperatura dell'oceano. E dovrebbe solo raffreddarlo di circa 2 °C proprio sotto la parete dell'occhio per "uccidere" l'uragano. Quindi anche una caduta di 1° C è importante.

Abbiamo imparato come includere questo effetto nei modelli di computer, incluso quello semplice che chiunque può eseguire. Abbiamo un modo di affrontarlo ora che, in effetti, prevede che la maggior parte degli uragani non raggiunga davvero il limite di velocità.

Intervistatore: Gli uragani si avvicinano mai al loro limite massimo teorico di velocità?

KERRY: È solo in circostanze molto eccezionali che lo fanno. Un caso famoso è l'uragano Camille,⁴ che è stato uno degli uragani più violenti che hanno colpito gli Stati Uniti nella storia. Nel 1969, arrivò ruggendo sul lato orientale del Golfo. E si è schiantato nel Mississippi con venti di qualcosa come 320 km all'ora. Questo è stato un po' strano perché nel Golfo del Messico, lo strato di acqua calda, il più delle volte, è molto, molto sottile. È profondo 20 o 30 metri. E normalmente, un uragano non sarebbe mai così intenso.

Ma c'è un fenomeno nel Golfo del Messico chiamato "corrente ad anello", che è una stretta corrente di acqua molto calda che scorre molto in profondità. Si chiama corrente ad anello perché risale attraverso il passaggio dello Yucatan fino a New Orleans. E poi fa solo un'inversione a U, scende appena al largo della costa occidentale della Florida, attraversa lo stretto della Florida e diventa la Corrente del Golfo. Quindi è un predecessore della Corrente del Golfo.

E abbiamo capito che quello che è successo con Camille è che per puro caso, Camille è andata proprio al centro di questa corrente circolare dove l'acqua calda scorre molto, molto profonda. E quindi non c'era acqua fredda da tirare su, che

⁴ [Uragano Camille - Wikipedia](#) (1969)

quindi non ha avuto questa influenza negativa sull'uragano, che poi è andato davvero in città. Ma ci sono anche altre cose.

Una delle cose più misteriose è l'interazione degli uragani con altri sistemi meteorologici, in particolare se l'atmosfera ha quello che chiamiamo "**wind shear**" **gradiente del vento**, dove i venti di fondo, il vento normale di tutti i giorni che hai nell'atmosfera, cambiano con l'altezza, sia la direzione che / o la velocità. Quando gli uragani si spostano in ambienti in cui questo vento di fondo cambia con l'altezza, spesso si indeboliscono. E questo è osservato così spesso che ci possono essere pochi dubbi su di esso. Ma non comprendiamo molto bene il meccanismo. Ci sono tutti i tipi di speculazioni.

Tutto ciò ha portato al problema che non siamo molto bravi a prevedere il cambiamento di intensità degli uragani. Possiamo prevedere dove andrà abbastanza bene rispetto a molte altre cose che facciamo. Ma il cambiamento di intensità non è affatto buono. Quindi c'è ancora molta strada da fare per capire come le tempeste interagiscono sia con il loro ambiente atmosferico che con l'oceano.

Intervistatore: Puoi descrivere alcune delle attuali ricerche all'avanguardia che stai facendo ora e perché è importante per le persone?

KERRY: Stiamo lavorando su diversi aspetti del comportamento degli uragani che vanno dal microscopico fino al globale. Partendo dalla parte microscopica, se vuoi prevedere la velocità del vento degli uragani, devi sapere come il trasferimento di calore attraverso la superficie dell'oceano, l'evaporazione, dipende dalla velocità del vento. E sappiamo come funziona a basse velocità del vento, ma non capiamo davvero, né abbiamo misurazioni di, ciò che accade ad alta velocità del vento.

L'altra cosa che devi essere in grado di fare è prevedere la resistenza che l'oceano esercita nell'aria. E ancora, sappiamo

come prevederlo a bassa velocità del vento. Ma, ad alta velocità del vento, avremmo queste onde gigantesche. Non sappiamo come farlo. Tutto ciò che sappiamo finora ci insegna che la fisica che deve essere compresa riguarda gli spruzzi alla velocità del vento degli uragani.

Lo spruzzo marino, pensiamo, è fondamentale per un uragano. Quando una goccia di spruzzo sale ed evapora parzialmente, diventa molto fredda. Torna giù nell'oceano. Si scopre che il processo trasferisce un'enorme quantità di calore all'aria. E **così gli spruzzi marini sono un meccanismo di trasferimento del calore molto efficiente.**

Ma quando una goccia di spruzzo sale in aria, deve accelerare la velocità del vento. E così facendo, esercita un trascinamento nell'aria. Quindi è anche un importante pozzo di energia eolica per un uragano. E così abbiamo costruito un apparato di laboratorio in cui possiamo simulare queste condizioni fantastiche, velocità del vento molto elevate, aria che soffia attraverso l'acqua. L'aria è piena di spray. Stiamo cercando di misurare attentamente l'attrito e il trasferimento di calore dello spray. Ora, per passare all'estremità completamente opposta dello spettro, la gente si è preoccupata per alcuni anni se **il cambiamento climatico influisce sull'attività degli uragani.** Ci sono stati più o meno uragani durante l'ultima era glaciale, per esempio. Ci saranno più o meno uragani se avremo il riscaldamento globale? Ma pochissime persone si sono poste la domanda: **"Gli uragani giocano un ruolo centrale nel clima?"** Tendiamo a pensare a loro come tempeste strane che non influenzano davvero il clima in modo importante. I libri di testo, tra l'altro, sono pieni di cattive informazioni su questo; gli uragani trasferiscono molta acqua dai tropici al Polo. Non è vero. Sono attori minori nel bilancio idrico della Terra. Ma c'è qualcosa di piuttosto inaspettato che è emerso dalla ricerca: che **gli uragani possono avere un**

profondo effetto sulla circolazione globale dell'oceano.

L'oceano funziona in modo molto diverso dall'atmosfera. Ma ecco cosa sappiamo. **Di tutto il calore che viene trasportato sia dall'oceano che dall'atmosfera dai tropici verso i poli, in media circa un terzo viene trasportato dall'oceano e circa due terzi dall'atmosfera.** E quindi il clima sarebbe molto diverso se l'oceano non trasportasse tutto questo calore.

Ci sono molte discussioni su come funziona. Una delle teorie che sono state prese in giro negli ultimi giorni è che, stranamente, **sono gli uragani che permettono che ciò accada.** E le ragioni sono molto sottili. Ma in realtà è stato dimostrato circa cento anni fa che l'unico modo per far trasportare all'oceano molto calore dai tropici al Polo è se si potesse mescolare in modo turbolento l'acqua calda nei tropici nell'oceano tropicale profondo.

Gli oceanografi hanno discusso per anni su cosa stia facendo questo mescolamento. Abbiamo fatto alcuni calcoli che suggeriscono che l'attività globale dei cicloni tropicali (ciclone tropicale è un nome generico per un uragano) è ciò che sta facendo questo mix. Ora, se questo è vero, significa che dobbiamo ripensare completamente la nostra comprensione di come funziona il clima in generale. Perché nei grandi enormi modelli computerizzati che vengono utilizzati per simulare il clima, questa miscelazione è solo specificata. È costante. Non cambia con il tempo o il clima. È così specificato per ignoranza. Non sappiamo cos'altro fare.⁵

Se sono gli uragani a guidare questa miscelazione, abbiamo un problema diverso tutti insieme. Abbiamo una dinamica di sistema diversa perché gli uragani stessi sono funzioni del clima. E così, abbiamo costruito alcuni semplici modelli in cui permettiamo al clima di controllare gli uragani e agli uragani

⁵ Così il 23 luglio 2019, data della pubblicazione sul sito originale, rivista il 14 agosto 2019.

di controllare il flusso di calore nell'oceano. E otteniamo alcuni comportamenti molto interessanti che possono spiegare cose, per esempio, come il **clima di 50 milioni di anni fa**, quando i tropici avevano all'incirca la stessa temperatura di oggi, ma i **poli erano molto più caldi**. Invece di essere intorno a 0 °C, erano più vicini a 15 o addirittura 20 °C. Questo è quando **c'erano coccodrilli che vagavano per la Groenlandia**, e alligatori a Londra, e posti del genere. E questo è un grande mistero perché la distribuzione della luce solare sulla Terra non era sensibilmente diversa in quei giorni. Ma **pensiamo che fosse un clima molto tempestoso con molti uragani**, che stava guidando un fantastico flusso di calore polare nell'oceano che era **responsabile sia di mantenere i tropici relativamente freschi, sia di mantenere calde le alte latitudini**.

Questo è un nuovo ramo di ricerca che ora collega gli uragani all'intero sistema climatico in un modo che potrebbe rivelarsi molto interessante.

Intervistatore: Mentre lavoravi su questo, hai fatto sì che la tua visione del sistema di circolazione terrestre diventasse più una vista a volo d'uccello piuttosto che una vista microscopica?

KERRY: Penso che abbia funzionato in entrambe le direzioni. Per quanto mi riguarda, dal momento che sono stato in questo campo, che è ben oltre 20 anni, vengo da una prospettiva abbastanza ristretta di cercare di capire alcuni tipi di sistemi che vediamo nell'atmosfera. Ma questa comprensione ha portato – o il tentativo di raggiungere tale comprensione ha portato – sia verso il basso che verso l'alto. Da un lato, siamo costretti a studiare quelli che chiamiamo "processi microscopici", come come si forma una goccia di spray e si stacca, e quali leggi governano questo, fino a tutta questa faccenda globale di come tutto è interconnesso in un modo che controlla il clima?

E capire il clima è una questione davvero affascinante. È una scienza giovane. Ma nell'ultimo decennio o due, tutte queste carote di ghiaccio e sedimenti di acque profonde hanno fornito questa meravigliosa registrazione del clima che mostra un sistema molto, molto insolito e dinamico che stiamo solo iniziando a capire. Quindi, per chiunque inizi nella scienza, questo è un posto fantastico dove andare e fare scoperte.

Intervistatore: C'è qualcosa che volevi aggiungere che non ti abbiamo chiesto?

KERRY: C'è un altro ramo interessante della ricerca che può aiutarci a capire la relazione tra uragani e clima. È ciò che viene chiamato paleotempestologia. Questo è uno sforzo per ricostruire una registrazione a lungo termine della tempesta dalla documentazione geologica. Ci sono diverse tecniche, e una con cui ho familiarità prevede di andare in laghi [o **lagune che sono vicino alla riva**] **ma che sono separati dall'oceano da un banco di sabbia.** Ce ne sono molti lungo la costa del Golfo degli Stati Uniti e la costa orientale.

La natura di questi laghi è tale che quando arriva un uragano, e c'è un colpo diretto, **lo storm surge** fa scavalcare all'acqua il banco di sabbia nel lago, **portando con sé molta sabbia.** E così uno strato di sabbia si deposita sul fondo del lago. Ora, il resto del tempo, **quando non c'è tempesta, è solo fango che si sta accumulando, deposizione organica,** piante, piante in decomposizione e cose. Se andate nel lago con una barca e scavate nel fondo del lago, e prendete una **carota** e la esaminate, quello che vedete è **un sacco di fango nero con alcuni strati intermedi di sabbia. Quegli strati di sabbia rappresentano gli attacchi degli uragani.** Puoi usare una tecnica che ha a che fare con il decadimento radioattivo di alcuni isotopi e di questa materia organica per datarlo, in modo da poter scoprire quando quegli strati di sabbia sono

stati messi giù. Gli scienziati sono tornati indietro nel tempo di circa 4000 anni con questa tecnica. Ci sono alcuni posti lungo la costa del Golfo dove ora abbiamo qualcosa come un record di 4000 anni di attività degli uragani, il che è fantastico. Una delle cose che vediamo costantemente è che **il periodo tra circa 1000 anni fa e 3000 anni fa era molto più attivo rispetto ad oggi**. Ci sono stati molti più uragani di quanti ce ne siano stati negli ultimi 1000 anni.

Durante il periodo precedente a circa 3000 anni fa c'erano pochissime tempeste. Quindi ne avevamo pochissimi, poi ne avevamo molti. E poi negli ultimi 1000 anni, ne abbiamo avuti pochi in quella parte del Mondo.

Se lo stesso genere di cose può essere fatto dappertutto, potremmo costruire un record a lungo termine dell'attività degli uragani. E questo sarebbe un passo verso la comprensione di ciò che controlla il livello di attività degli uragani.



Fig. 1 Parete verticale della cella temporalesca, a Roma, sopra Monte Mario il 13 giugno 2023, appena un poco separata dalla nube a mensola che la precedeva, sulla sinistra. La descrizione dell'occhio del ciclone riportate da Kerry Emanuel calza anche per una fase dei temporali convettivi nostrani (C. Sigismondi).