

SU TALUNE VARIAZIONI A LUNGO PERIODO DEL LIVELLO MARINO

FERRUCCIO MOSETTI

dell'Osservatorio Geofisico Sperimentale di Trieste

RIASSUNTO. - Oscillazioni del livello del mare aventi periodo di più anni, possono venir messe in evidenza sottoponendo ad analisi periodale le serie dei valori medi annui del livello marino. Benchè al momento attuale non siano molte le stazioni mareografiche dotate di serie continue di osservazioni estese più di un secolo, talune interessanti caratteristiche di queste oscillazioni sono già note. Purtroppo però, riguardo le onde più lunghe, la conoscenza è alquanto più scarsa. Dalle varie indagini finora eseguite su queste onde con periodo di anni è risultato peraltro che, uniformemente su tutti i mari, compaiono sempre oscillazioni con periodi prossimi a quelli indicati dalla successione fondamentale ... 2; 2,8; 4; 5,6; 8; 11,2; 16; 22,4; 32; 44,8... anni e inoltre un'oscillazione con periodo vicino al ciclo di 18,6 anni della declinazione lunare.

Oscillazioni con periodi prossimi alla successione fondamentale si trovano in tutti gli altri fenomeni geofisici variabili nel tempo in maniera oscillante. In particolare le oscillazioni climatico-meteorologiche presentano componenti periodiche affette dagli stessi periodi della successione fondamentale. Fra le oscillazioni climatiche sono di particolare interesse, per l'effetto sul livello marino, le oscillazioni della pressione atmosferica, della piovosità, dell'intensità dei venti dominanti. La determinazione della fase e dell'ampiezza delle oscillazioni di livello e la comparazione di queste con le oscillazioni climatiche, permette di evidenziare gli eventuali nessi di causa tra i diversi fenomeni.

Le fasi degli elementi climatici oscillanti sono generalmente diverse da luogo a luogo. In mari non molto estesi peraltro, le oscillazioni locali di livello, provocate ad esempio da oscillazioni a periodo annuo della pressione, riescono a venir equilibrate e compensate; in tutto il bacino allora si trova praticamente concordanza di fase nelle oscillazioni di livello e la fase risultante è la media delle fasi componenti. Talune oscillazioni della successione fondamentale si trovano peraltro anche in pulsazioni della crosta terrestre; le oscillazioni aventi questa origine si presentano però con ampiezza e fase differenti generalmente da punto a punto. Differenze locali di fase nella distribuzione di una o dell'altra componente l'oscillazione del livello marino derivano cioè soltanto da movimenti crostali o da influssi più propriamente oceanografici (coste sottoposte costantemente all'influsso di forti correnti

che presentano un loro ritmo caratteristico) esse non riescono a venir equilibrati sul complesso del bacino interessato.

Particolare importanza fra le oscillazioni di livello a lungo periodo che presentano fasi diverse anche sulla stessa costa, assume l'onda con periodo di circa 45 anni. Questa onda deriverebbe da una fluttuazione del nucleo terrestre.

Nel suo movimento di espansione e di ritiro, col ritmo di 45 anni, il nucleo spinge la crosta provocando dei movimenti relativi del livello marino. Tale oscillazione è stata rilevata inizialmente nelle fluttuazioni del campo magnetico terrestre e recentemente in quelle del livello marino. La distribuzione delle fasi di quest'onda, almeno nei vari punti costieri esaminati, si dimostra in accordo con le osservazioni della variazione del campo magnetico terrestre.

ABSTRACT. - Oscillations of the sea level with period of several years can be put in evidence by applying the periodical analysis to the series of mean yearly values of the sea level. Even if at the present time continuous observations covering more than one century are available only for few stations, some interesting characteristics of these oscillations are already known. However, our knowledges are unfortunately scarce particularly with respect to the waves of longest periods. The investigations carried out up today on such waves that in all series are always present oscillations,

the periods of which lie close about to that of the fundamental series: 2 ; 2,8; 4; 5,6; 8; 11,2 ; 16;.... years; moreover we can

remark an oscillation of period 18.6 years, like that of the lunar declination.

In any case, periods near to the figures of the fundamental series can be found in all geophysical phenomena variable in time. Particularly, this fact is noticeable for the climatic-meteorological oscillations. Among the climatic oscillations, that of atmospheric pressure, rainfall and wind intensity are of great interest, because of their effect on the sea level. The determination of phase and amplitude of the fluctuations of sea level, allows to compare this one with the climatic oscillations and to put in evidence possible relations between the different phenomena. The phases of the periodical climatic events are generally different from place to place; however local oscillations of level in seas of small size (caused e.g. by yearly oscillations of the pressure) can be balanced and equalized. In this case level presents phase concordance in all the basin and resulting phase is the average of the component phase. Some oscillations of the fundamental series can be also found in periodical movements of the Earth's crust. In this case however, phase and amplitude are different from point to point. In other terms, local phase differences in the distribution of certain components of the sea level oscillation could be caused only by crustal movements or by more oceanographic reasons (like coasts subjected to the continuous influence of strong streams having a given characteristic period) which cannot be balanced on the whole area of the basin.

Among the long-period oscillations of the sea level, which can be correlated to coastal movements, the most interesting is that of nearly 45 years of period. This wave could be ascribed to a oscillation of the Earth's core. During their movements up and downwards

having a period of 45 years, the core draws the crust and produces variations of the sea level. Such variations have been formerly observed in the Earth's magnetic field, and in the last time also in the sea level. In the coastal stations the phase distribution show a good concordance with the corresponding observed data of the Earth's magnetic field.

Fluttuazioni del livello marino indipendenti dalle maree ma attribuibili a fattori oceanografici, climatici o crustali, possono venir messe in evidenza in varia guisa. Benchè approssimate, esistono pure alcune possibilità di discriminazione tra le varie cause di fluttuazione.

L'analisi armonica eseguita sui valori dell'escursione del livello marino entro limitati intervalli di tempo (p. es. col metodo abbreviato per l'analisi su 29 giorni) porta alla determinazione di ampiezze e fasi delle varie componenti della marea che in generale non risultano costanti nel tempo ma presentano delle deboli fluttuazioni (¹). Ciò è dovuto al fatto che i valori osservati del livello marino in un determinato istante non dipendono solo dall'effetto di marea (azione diretta delle forze lunisolari di marea o maree indotte) bensì anche da altri fattori, più o meno continui taluni, del tutto occasionali gli altri. Le « costanti armoniche » essendo grandezze caratteristiche della marea in atto risentono allora del contributo di questi altri fattori e variano nel tempo seguendo il ritmo delle cause perturbanti. Cioè, benchè le caratteristiche della forza di marea si possano ritenere costanti, la forza di marea si estrinseca differentemente in un dato bacino, al variare della geometria (livello) e dalle caratteristiche fisico chimiche di questo. La geometria e le caratteristiche fisico chimiche variano coi ritmi delle fluttuazioni climatiche e oceanografiche sicchè in definitiva queste si rispecchiano nell'andamento delle costanti armoniche.

Se l'analisi mirante alla definizione delle costanti armoniche viene eseguita su un intervallo di tempo molto lungo di più anni per esempio, o pur essendo fatta su tratti brevi viene ripetuta entro larghi intervalli in modo

¹ Detto per inciso, questa constatazione infirma i risultati di analisi armoniche eseguite su serie troppo brevi.

da consentire di mediare i diversi valori ottenuti, allora i risultati appaiono praticamente costanti e molto vicini alla realtà.

Nelle figure 1 e 2 sono riportati i Valori mensili (calcolati su serie di 29 giorni) assunti dalle costanti armoniche H (ampiezza) e g (fase) delle onde componenti M_2 e S_2 per la località di Trieste, relativi al periodo 1954-1958.

Tali valori, come si osserva, presentano una fluttuazione abbastanza rilevante, nella quale, almeno in taluni casi, si osserva tra l'altro un andamento annuo. I valori medi annui delle medesime costanti armoniche presentano invece una fluttuazione notevolmente ridotta rispetto ai valori mensili e la media del quinquennio ci dà un valore abbastanza prossimo al reale nell'attuale periodo. Il valore medio del quinquennio si avvicina al valore già accettato e noto per le costanti armoniche di Trieste, derivate da più antiche determinazioni eseguite su serie lunghe di osservazioni.

		Media 1954-58	Valore preesistente
M_2	H cm	26,73	26,3
	g^0	275,92	276
S_2	H cm	16,04	15,80
	g^0	284,47	283

Naturalmente la fluttuazione dei valori mensili degli altri elementi, di minor ampiezza, è ancor più forte benchè di minor significato per l'aumentato contributo di errori e imperfezioni di calcolo.

Era stato anche fatto intravedere in passato, che H e g aumenterebbero semplicemente con l'aumentare del livello medio, questo rapporto, se esiste, è ben più complesso della semplice proporzionalità. La figura 3 mostra andamenti differenti per H e g di M_2 e S_2 nel corso degli anni, segno che le

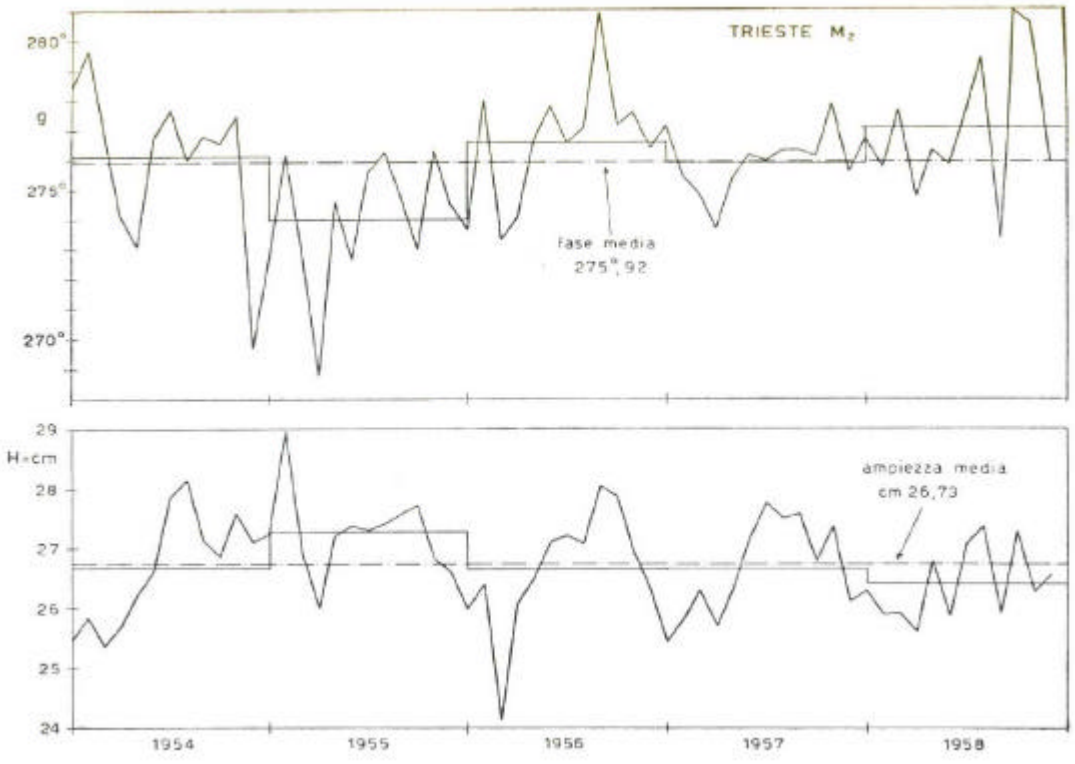


Figura 1

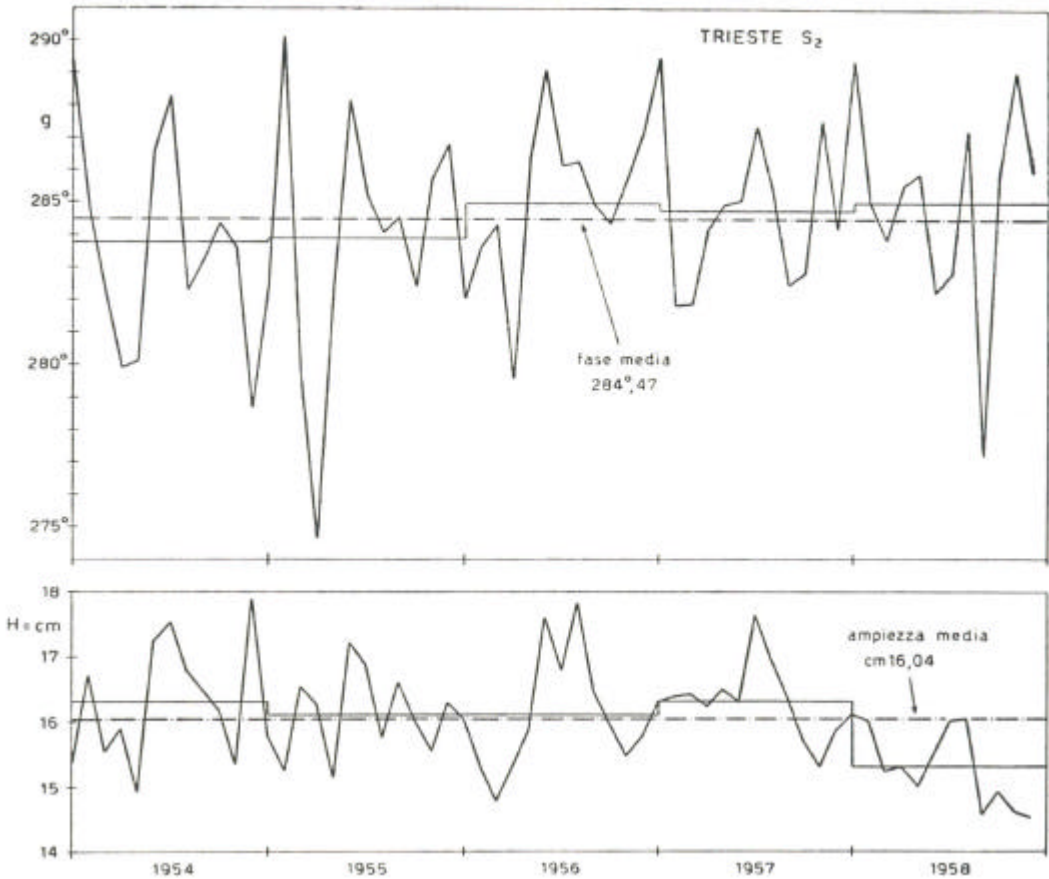


Figura 2

cause di variazione agiscono differientemente sulle varie « costanti armoniche » e mostra, seppur visivamente soltanto, una indipendenza dell'andamento di questa grandezza dall'andamento del livello medio.

Nonostante le approssimazioni che si possono ottenere nella determinazione, delle costanti armoniche la «marea prevista» calcolata secondo le costanti ricavate dall'analisi, raramente coincide, procedendo ad un confronto, con la « marea osservata ». Sembrerà banale ma tale discrepanza deriva più che altro da una definizione, cioè da ciò che si intende abitualmente per marea prevista e marea osservata. I valori letti al mareografo, a intervalli orari, o ai massimi e minimi, non rappresentano le ampiezze della marea, bensì più complessivamente i valori istantanei dell'escursione del livello marino. Si intende cioè che il livello marino varia per il contributo combinato della marea e di altre cause (climatiche e oceanografiche). Su lunghe serie di osservazioni l'effetto di queste altre componenti perturbatrici, per lo meno di quelle con periodo dell'ordine dei brevi periodi della marea, viene compensato ed allora le costanti armoniche pur essendo ricavate da valori osservati di livello e non dai valori osservati di marea (che non si possono ottenere in pratica) sono effettivamente tali entro brevi scarti d'errore. Con la previsione matematica si ricostruisce l'andamento della marea e si ha modo di verificare in ogni momento la differenza tra livello effettivo e marea.

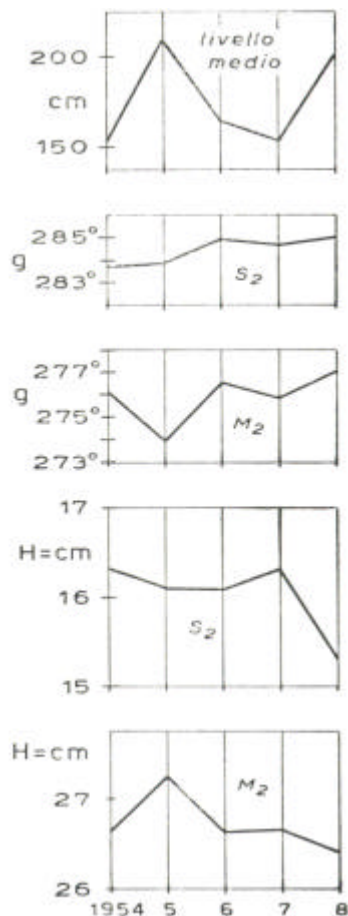


Figura 3

E' ben noto che nella figurazione armonica della forza di marea compaiono dei termini « fondamentali » a periodo piuttosto breve, attorno a 12 e a 24 ore, ma che esistono anche delle fluttuazioni assai più lunghe della forza di marea, talune delle quali (vedi ad es. l'oscillazione della declinazione lunare), con periodo di parecchi anni, altre ancora più lunghe. Il fenomeno può ben essere contenuto analiticamente, si tratta di una

$$\sum_1^m a_k \sin (w_k t + e_k)$$

con a_k e e_k generalmente variabili da luogo a luogo ma in cui gli w_k , sono invece costanti nello spazio e nel tempo. Lo spettro della forza di marea non è continuo ma a bande: alcuni w_k sono situati attorno al valore di 15° (se il tempo si misura in ore) altri attorno a 30° , altri ancora sono prossimi a 0° .

Le altre cause che influiscono sul livello marino (prescindendo dal moto ondoso che sarà sempre ritenuto eliminato costruttivamente dal mareografo), possono anch'esse venir rappresentate da una

$$\sum_1^n a_i \sin (w_i t + e_i)$$

tra queste componenti, le più brevi possono comparire in realtà semplicemente con carattere impulsivo: la rappresentazione periodica ha allora solo un significato statistico o di schematizzazione matematica; oppure si tratta, di brevi treni di onde non persistenti, distanziati da lunghi intervalli di assenza di ondulazione. Le onde più lunghe sono invece generalmente persistenti.

Prescindendo dalla considerazione delle costanti armoniche (che ci può dare un modo di messa in evidenza delle fluttuazioni del livello marino), nonché della differenza tra osservazioni di livello e maree teoriche, assai idonea, specie per riconoscere le fluttuazioni più lunghe, è la considerazione del livello medio. Nell'elaborazione dei valori di livello medio annuo da medie dei valori orari, si potrà ritenere di aver praticamente compensato ogni contributo dovuto alle brevi componenti di marea e alle ondulazioni più brevi dovute ad altre cause. Le serie dei valori medi annui del livello sono però affette dai termini più lunghi delle due

somme soprascritte. Considereremo perciò ora, trascurando le altre oscillazioni più brevi, solo le fluttuazioni dell'ordine di anni. Di particolare interesse tra queste, quelle della seconda somma, che rappresentano il variare periodico di livello marino per cause diverse dalla forza di marea.

Preciseremo fin d'ora che questi periodi sono ben determinati e praticamente invariabili ovunque, essi sono fissi come quelli dei termini periodici di marea, salvo che mentre questi ultimi sono stati ricavati in base a precisi modelli teorici, ben poco si sa delle cause degli altri. Si tratta comunque di periodi molto vicini (o concidenti) ai valori della successione media fondamentale ... 1; 1,4 ; 2 ; 2,8; 4 ; 5,6 ; 8; 11,2; 16 ; 22,4 ; 32 ; 448 ; 64.....anni.

La causa di queste fluttuazioni non è ancora conosciuta, essa è molto probabilmente di origine extraterrestre ⁽²⁾.

Se si applica un qualunque metodo di analisi delle periodicità su una serie di valori di un qualunque fenomeno geofisico variabile nel tempo, si trova sempre tutta la serie dei periodi sopra indicati. Cioè a dire, se si esaminano i valori medi annui della temperatura, della piovosità, della pressione atmosferica, dell'intensità di un dato vento, dell'insolazione.....relativi ad una data stazione, si riscontra che la complessa fluttuazione osservata è determinata soltanto da un ben determinato gruppo di periodi che compaiono, in media sempre gli stessi, come componenti di ciascun fenomeno.

In punti differenti della superficie terrestre generalmente le ampiezze e le fasi di queste componenti sono differenti, ma i periodi rimangono invariati o, trattandosi di periodi medi (determinati probabilmente dall'interferenza di periodi molto vicini che, per la relativa brevità della serie di valori annui che si ha a disposizione finora non è ancora possibile discriminare) presentano localmente o contingentemente qualche piccola variazione.

È evidente che (anche ammettendo che la presunta causa generale di origine extraterrestre non agisca direttamente sul livello marino), dato che la piovosità, la temperatura, la pressione ecc. fluttuano con determinati periodi e dato che questi fattori climatici influenzano il livello marino, pur

² Alcuni dei periodi della indicata successione sono molto noti, tra questi il ciclo annuo o quello di 11,2 anni attribuito all'attività delle macchie solari.

questo deve fluttuare seguendo la medesima legge. È infatti quanto si osserva.

Ma se la causa è affatto generale essa agisce anche sulla crosta terrestre apportando in tal modo un ulteriore contributo alla variazione del livello marino. Naturalmente in questo gioco di cause che interagiscono nella determinazione del livello marino l'intensità dell'effetto è pur sempre condizionata dalla risonanza ⁽³⁾ per cui talora talune oscillazioni componenti potranno risultare tanto evanescenti da scomparire nell'indeterminazione degli errori di calcolo o di osservazione.

Sul livello marino, insomma, si dovranno intendere quali cause di variazioni: le maree, taluni fattori climatici che a loro volta rispecchiano più o meno effettive variazioni delle proprietà fisico-chimiche delle masse d'acqua (fattori oceanografici), e fattori crustali. Tutte queste varie cause agenti sul livello marino sono oscillanti secondo ben determinati periodi i quali si ritrovano ovviamente nella fluttuazione del livello stesso. Solo fra i movimenti crustali possono riscontrarsi accanto a movimenti tipicamente periodici (su uno di questi accenneremo più oltre) escursioni non periodiche, localmente differenti, dipendenti da fenomeni più o meno circoscritti di affondamento o innalzamento delle coste.

Sarà ora opportuno, sulla scorta di quanto è stato fin qua premesso, cercare di fissarsi su alcune situazioni particolari, che permettano la discriminazione fra le varie cause; considerando però semplicemente le cause immediate di variazione, prescindendo cioè da quella che può essere la loro comune origine lontana. In questa discriminazione converrà tralasciare i fenomeni più rapidi (maree, sesse quali effetti di vento o di impulsi di pressione, effetto « stazionario » di venti dominanti o di persistenti anomalie del campo barico che già trovano delle forme di interpretazione quantitativa), soffermandoci invece sulle variazioni a più lungo periodo la cui ricerca, e lo studio delle quali, sconfinava spesso nella statistica, quando si ignora in merito una impostazione fisica adeguata.

Se si esamina in una stazione la serie dei livelli medi annui e si scompone la complessa fluttuazione mediante analisi periodale, si ottengono successive componenti periodiche aventi periodi prossimi a quelli della successione fondamentale precedentemente indicata, nonchè

³ O ad altri più complessi fenomeni di esaltazione o di smorzamento.

periodi riscontrabili tra i termini più lunghi della forza di marea - ad esempio il ciclo di 18,5 anni.

La separazione tra effetti attribuibili alle lunghe componenti di marea e effetti climatico-oceanografici è immediata perché i due effetti si esplicano con periodi differenti. L'ampiezza delle componenti affette dai periodi derivanti dalla forza di marea e delle componenti derivanti da fattori climatici, rapportata all'escursione totale, ci può dare il contributo percentuale dalle due cause alla variazione del livello.

Ben più ardua è la separazione tra gli altri effetti cioè il discernimento, in seno ad un gruppo di componenti, dell'effetto di singoli elementi climatici (discriminare per esempio nelle onde con periodi 4, 5,6, 8, 11,2 anni l'effetto della pressione atmosferica da quello della temperatura) dato che questi oscillano con i medesimi periodi.

Solo le ampiezze e le fasi delle varie componenti i due fenomeni possono essere differenti e su questo fatto possono venir fissati alcuni metodi discriminatori. Due vie (sostanzialmente equivalenti) sono seguibili, entrambe però con le debite cautele; esse impongono controlli delicati e laboriosi e le soluzioni comunque sono spesso solo approssimate. Si potrà ammettere una più immediata possibilità di soluzione per bacini limitati tali che le variazioni climatiche circostanti giungano ad esser mediate sul bacino stesso. Se una indagine di questo tipo viene svolta invece su un'area oceanica molto vasta occorrerà che questa sia suddivisa in parti, dopo aver esaminato la distribuzione sull'area stessa dell'ampiezza e delle fasi delle oscillazioni climatiche che influenzano le fluttuazioni del livello.

Consideriamo un istante solo l'effetto della pressione atmosferica; supponiamo nulle le altre forze agenti e il movimento dell'acqua diretto solo secondo la verticale, se x è l'innalzamento del livello e se la pressione atmosferica varia uniformemente con la

$$P = \sum_1^n P_{0j} \sin(\mathbf{w}_j t + \mathbf{j}_j)$$

$$\text{sarà} \quad z = \sum_1^n k_j P_{0j} \sin(\mathbf{w}_j t + \mathbf{j}_j + \mathbf{e}_j)$$

gli stessi periodi della fluttuazione di P si trovano cioè in x ma con una differente ampiezza per la presenza del fattore di amplificazione k_j e con differenti fasi \mathbf{e}_j . In base a considerazioni idrodinamiche, sia pur

approssimate, si possono valutare k e E . Se nell'andamento della \mathbf{x} è effettivamente presente solo l'effetto della pressione atmosferica i calcoli di confronto eseguiti applicando all'andamento di P questi due termini e paragonando con \mathbf{x} coincideranno (⁴).

Ma in realtà la pressione atmosferica non varia nello stesso modo su una certa area, i periodi componenti sono gli stessi, le ampiezze e le fasi però sono differenti da sito a sito.

Suddividendo l'area A del bacino in una somma di piccoli elementi di superficie

$$A = \sum_1^s A_j$$

su ogni singola area si ha la pressione

$$P_j = \sum_1^n P_{0ij} \sin(\mathbf{w}_i t + \mathbf{j}_{ji})$$

l'andamento medio della pressione su A sarà

$$\frac{1}{s} \sum_1^s P_j = \frac{1}{s} \sum_1^s \sum_1^n P_{0ij} \sin(\mathbf{w}_i + \mathbf{j}_{ij}) = \frac{1}{s} \sum_1^n \left[\sin \mathbf{w}_i t \left(\sum_1^s P_{0ij} \cos \mathbf{j}_{ij} \right) + \cos \mathbf{w}_i t \left(\sum_1^s P_{0ij} \sin \mathbf{j}_{ij} \right) \right]$$

Cioè i periodi dell'oscillazione media rimangono gli stessi delle onde parziali ma l'ampiezza e la fase derivano dal contributo ponderato delle ampiezze e delle fasi riscontrate in ogni singolo elemento areale.

Un esempio tolto dall'idrologia fluviale può chiarire questo fatto. Un tronco terminale, con portata P , sia alimentato da n affluenti ognuno con portata P_i . Trascuriamo gli effetti dell'assorbimento, dell'evaporazione ecc. e

⁴ Il caso comunque è ben diverso dal noto calcolo idrodinamico sull'effetto di una perturbazione di pressione vagante. Qui dobbiamo considerare l'azione uniforme su tutto il bacino della colonna d'aria che lo sovrasta.

consideriamo solo gli apporti pluviometrici alle singole portate P_l . Poiché la piovosità nei vari bacini di alimentazione oscilla -consideriamo per semplicità una sola delle componenti la piovosità - con fasi e ampiezze diverse, ogni singola P_l oscilla pure con lo stesso periodo della piovosità ma con fasi e ampiezze differenti. Nel tronco collettore arrivano le varie P_l con fasi singolarmente diverse: esse si compongono nella P che oscilla ancora col periodo comune alle varie P ma con fase e ampiezza determinate dal contributo medio ponderato delle varie P_l .

Il contributo delle varie fasi ed ampiezze, arealmente differenti, si può calcolare disponendo di sufficienti dati di osservazione di P . Quindi si confronta l'ampiezza e la fase media con l'ampiezza e la fase delle corrispondenti componenti l'oscillazione del livello, avendo modo così di discernere il contributo della pressione sull'oscillazione di livello. Analogamente si può fare con la piovosità, con l'evaporazione ecc. pur di ammettere un legame quantitativo e di conoscere il coefficiente (k) che lega i rapporti tra questi fenomeni e l'innalzamento x . È possibile così separare in ognuna delle varie componenti l'oscillazione del livello x le ulteriori componenti derivate dal contributo di cause differenti anche se queste agiscono, come avviene nella generalità dei casi, contemporaneamente.

Possiamo ancora chiarire questo fatto con le seguenti considerazioni. Limitiamoci a considerare un'unica componente; alla relativa oscillazione del livello marino competerebbe un'ampiezza parziale x_a dovuta all'elemento climatico $a = a_0 \sin (w_t + j_a)$, un'ampiezza parziale x_b per l'elemento $b = b_0 \sin (w_t + j_b)$, un'ampiezza x_c per c

L'ampiezza dell'oscillazione totale è

$$z = z_a + z_b + z_c + \dots = k_a a_0 \sin (w t + j_a) + k_b b_0 \sin (w t + j_b) + k_c c_0 \sin (w t + j_c) + \dots$$

Si potrà valutare il contributo di vari fattori se si conosce, dalle osservazioni, $a_0, b_0, c_0, \dots, j_a, j_b, j_c, \dots$ nonché dalla teoria, o per via sperimentale, i coefficienti k_a, k_b, k_c, \dots che legano ai rispettivi effetti le varie cause, e l'oscillazione del livello $x = x_0 \sin (w_t + j)$.

x_0 e j dovranno derivare dal contributo ponderato di $k_a a_0, k_b b_0, \dots$

Un'altro metodo di riconoscimento e quello di esaminare gli spettri delle varie componenti delle differenti cause e di confrontarli separatamente con lo spettro delle componenti l'oscillazione di livello. Senza eseguire l'analisi periodale dei vari fenomeni, nel senso di Vercelli-Labrouste, ed ottenere in seguito a queste le singole posizioni di fase, lo spettro si può ottenere direttamente mediante i periodogrammi. Supponiamo che relativamente alla causa a si ottenga il periodogramma P_a , P_b per b , ecc. Intendiamo simbolicamente con $k_a P_a$ il periodogramma di a , alterato in ampiezza, per le varie frequenze w_i secondo i fattori di amplificazione k_{ai} ; si dovrà cercar di verificare, noti i e k e ammesso di aver considerato tutte le cause $a, b, c \dots$ che il periodogramma dell'oscillazione del livello P è legato agli altri dalla

$$P = k_a P_a + k_b P_b + \dots$$

Ovverossia
$$P - (k_a P_a + k_b P_b + \dots) = 0$$

Resta comunque il fatto che la separazione di vari effetti climatici oscillanti quali causa di variazione di livello marino a lungo periodo è arduo e laborioso. Più facile può risultare talvolta la separazione di effetti di movimento crostale.

Su bacini limitati, racchiusi tra le coste o da soglie sottomarine quali il Mar Adriatico, il Baltico ecc. l'azione climatica esterna riesce a mediarsi quasi completamente. In una recente ricerca (*), eseguita su alcune stazioni sparse lungo le coste e sulle isole del Baltico, abbiamo effettivamente osservato, limitando l'azione a sole quattro componenti, che le componenti di 5,6 ; 8 ; 11,2 e 16 anni presentavano differenze insignificanti di fase da punto a punto tutto il bacino viene simultaneamente sollecitato dal medesimo ritmo con fase costante. Un simile risultato è possibile evidentemente solo per quelle componenti l'oscillazione che derivano precipuamente da quei fattori climatici e oceanografici che avvengono in modo tale che i loro contributi si compensino su un dato bacino.

Solo allora in qualsiasi punto del bacino si osserverà equivalenza di fase e di ampiezza. Locali ma costanti differenze di densità dell'acqua del mare potranno alterare l'ampiezza delle componenti rimanendo pressoché

* Non ancora pubblicata

invariata la fase. Se talune zone costiere sono sottoposte al ritmo particolare di correnti il contributo di queste potrà alterare la distribuzione delle ampiezze e delle fasi ma l'alterazione potrà essere ancora conosciuta se sono note le caratteristiche della corrente. I movimenti crustali invece possono ancora comparire coi soliti periodi (in pratica si osserva che solo i termini più lunghi presentano un effetto apprezzabile) ma con ampiezze e fasi diverse da punto a punto di una data costa. Contrariamente agli effetti climatici questi movimenti costieri determinano variazioni relative di livello che non possono compensarsi su un dato bacino, determinando così componenti di livello variabili per ampiezza e fase da punto a punto.

È possibile così un'ulteriore discriminazione, tra le variazioni di livello insite in effettivi moti marini e quelle dovute ai moti costieri crustali. Nel gruppo delle periodicità che compaiono in un bacino limitato con la medesima fase, si potranno trovare singole componenti in posizioni differenti, segno di differenti moti crustali esplicitanti secondo quel periodo. In un singolo bacino si osserva generalmente, anche se le componenti più brevi sono sempre in fase, che l'andamento dell'oscillazione totale è diverso da punto a punto, ciò per l'effetto di onde più lunghe, generalmente non più in fase perchè determinate in parte da moti crustali. Le più piccole oscillazioni non sarebbero percettibili in moti crustali forse per gli smorzamenti cui sarebbero sottoposte.

Un caso tipicamente evidente e recentemente messo in evidenza riguarda il comportamento dell'onda di 45 anni di periodo che, contrariamente ad altre componenti della serie fondamentale, risulta con fasi differenti anche entro brevi distanze. Accenneremo brevemente e in via del tutto preliminare ai risultati di queste ricerche, che riteniamo di particolare interesse sia come esempio di applicazione dei concetti più sopra esposti, sia perchè con esse si precisa una nuova causa di variazione del livello marino. Un'onda di tale periodo è stata messa in evidenza dal Vestine e dal Barta in oscillazioni di taluni degli elementi caratteristici del campo magnetico terrestre (è particolarmente evidente nelle componenti D e Y) ed è stata attribuita a una fluttuazione periodica del nucleo terrestre.

Venne ipotizzato che se il nucleo era responsabile effettivamente di tale fluttuazione del campo magnetico terrestre l'onda di 4,5 anni di periodo doveva trovarsi tra l'altro nella fluttuazione della crosta e si sarebbe pure

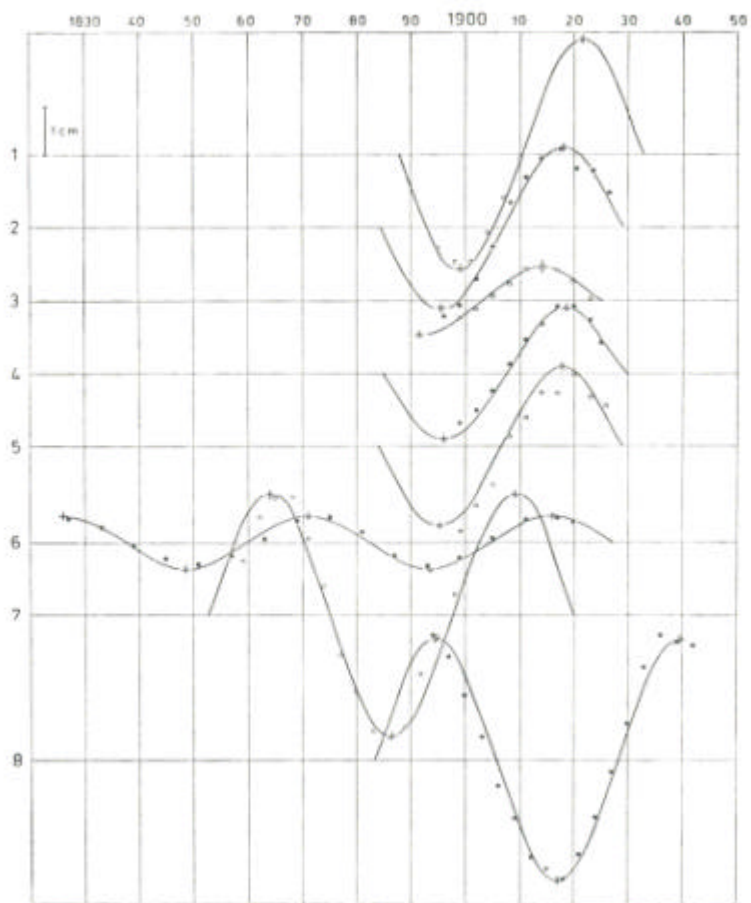


Figura 4

Tabella I

Località	λ	A	Δ
S. Fernando	-6° 12'	1933	0
Abinger	-0° 23'	1934	+1
Chambon la Forêt	2° 16'	1933	0
Niemegk	12° 40'	1933,5	+0,5
Slutzk	30° 29'	1926,5	-6,5
Helwan	31° 20'	1927	-6
Karsani	44° 42'	1919	-14
Mauritius	57° 33'	1911,5	-21,5
Wyssokaja Doubrawa	61° 04'	1912,5	-20,5
Zuy	104° 02'	1908	-25
Au Tau	114° 03'	1903	-30
Zô Sé	121° 11'	1899,5	-33,5
Toolangi	145° 28'	1900	-33
Amberley	172° 44'	1900	-33

potuta mettere in evidenza attraverso lo studio delle variazioni del livello marino.

Sottoposte alcune serie di livelli medi annui ad analisi periodale (limitando forzatamente l'esame alle serie più lunghe oggi esistenti, onde poter definire con relativa sicurezza l'onda con 45 anni di periodo) abbiamo effettivamente riscontrato l'onda con periodo di 45 anni; essa è di ampiezza abbastanza notevole e appare in differente posizione di fase nelle varie località esaminate (fig. 4). Appare abbastanza chiaramente una progressiva variazione della fase di quest'onda con la longitudine della stazione. Il Barta aveva pure osservato un tanto, nonostante non avesse sottoposto i dati da lui considerati ad analisi periodale ma accettata la variazione complessiva del c.m.t. (che però è molto più evidentemente influenzato da questa periodicità). A titolo di confronto si può riportare, secondo il Barta, un gruppo di suzioni poste su longitudini vicine a quelle da noi esaminate.

Nella tabella I figurano alcune località di osservazione del c.m.t., poste a differenti longitudini e gli anni (colonna A) di comparsa di un massimo

dell'onda di 45 anni di periodo (tale anno è stato calcolato per semplicità come media tra gli anni di comparsa del massimo nell'andamento di D e in quello di Y . Fissato come riferimento l'anno di comparsa del massimo nella prima stazione, sono calcolate le differenze in anni tra i massimi delle altre stazioni (colonna D). I valori della colonna D ci esprimono la variazione della fase dell'onda in funzione della longitudine.

Coi dati mareometrici è stata compilata, in maniera analoga la tab. 2.

In queste due tabelle si considera solo l'effetto della longitudine chè, le differenti località sono situate a latitudini diverse. Le località della tabella 1 sono distribuite entro un divario di longitudine ben maggiore di quello della tabella 2, per la nota mancanza di serie mareografiche continue sufficientemente lunghe. Onde procedere ad un confronto tra le due tabelle è opportuno di fissare, sia pur con formule empiriche, il rapporto di dipendenza, già a prima vista osservabile tra D e I . Si può adottare per questo una formula del tipo $D = a + bI$ e determinare a e b col metodo dei minimi quadrati dai dati di osservazione.

Così procedendo si ottiene, relativamente alla tabella 1

$D=3,417 - 0,270 I$ e, relativamente alla tabella 2, $D= - 2,665 - 0,344 I$.

Tabella 2

Località	λ	A	Δ
Brest	-4° 29'	1921,5	0
Vlissingen	3° 36'	1918	-3,5
Den Helder	4° 45'	1914	-7,5
Haarlingen	5° 25'	1918,5	-3
Delfzijl	6° 56'	1917,75	-3,75
Swinemünde	14° 17'	1916	-5,5
Stockholm	18° 05'	1909	-12,5
Bombay	72° 50'	1894,5	-27

Prescindendo dalla costante, che può necessariamente differire nei due casi, l'andamento di D con I , è pressapoco parallelo, ciò che conferma in un certo senso, il parallelismo dei due fenomeni. Se si calcola, per ognuno dei I , che compaiono nelle tabelle, il valore medio di D , usando le due sopracitate formule, e si aggiunge tale valore ordinatamente ad ogni valore di A , si ottiene una serie di tempi oscillanti attorno ad un valore medio. Tale valore è 1930,9 relativamente all'andamento del campo magnetico terrestre e 1921,4 relativamente all'oscillazione di livello marino. La differenza tra questi due valori ci dà l'anticipo o il ritardo medio (per le varie longitudini) tra l'oscillazione del campo magnetico terrestre e del livello. Risulta, in senso relativo, che l'oscillazione del campo magnetico terrestre è ritardata di 9,5 anni rispetto quella del livello, ossia considerando il complemento a 45 anni (valore del periodo), che l'oscillazione del livello è ritardata rispetto a quella del campo magnetico terrestre di 35,5 anni.

Questo esempio, riguardante una sola tra le tante componenti periodiche del livello marino, ci dà modo di vedere che per talune di queste componenti, quando sia ipotizzata la causa che le genera, il rapporto causale può esser verificato anche con la constatazione dell'identico comportamento della causa e dell'effetto in funzione di una certa variabile indipendente (la longitudine nel nostro caso). Naturalmente l'onda che abbiamo selezionato nell'andamento del livello marino può non dipendere solo dall'effetto crustale indotto dai movimenti del nucleo ma dipendere anche, in parte, da un'onda climatica del medesimo periodo. L'onda climatica indurrà nel livello marino un'oscillazione che si può presumere a egual fase per le stazioni del mare del Nord, ma non necessariamente in fase relativamente alla località di Bombay che si trova in tutt'altre condizioni. L'influsso di questa onda climatica, di cui nell'attuale fase delle ricerche non è stato ancor tenuto conto, può ritenersi a priori responsabile dello scarto del coefficiente che lega la fase alla latitudine, differente, se pur non di molto, tra l'andamento dell'onda del campo magnetico terrestre e quello del livello marino.

La breve esposizione che abbiamo presentato mira soprattutto a metter in evidenza l'interesse che può assumere, nella determinazione di legami causali tra variazioni del livello marino e variazioni climatiche o, più in generale geofisiche, lo studio delle oscillazioni componenti le variazioni stesse.

Tale studio, molte volte misconosciuto o al più relegato fra le applicazioni della statistica, può invece esser impostato secondo precise basi fisiche (anche se dato lo stadio ancora iniziale delle ricerche di questo tipo non tutti i parametri possono esser precisati in maniera del tutto analoga a quanto si fa nel caso delle maree).

DISCUSSIONE

PRESIDENTE: Ringrazio il Prof. Mosetti per la sua interessante relazione e apro la discussione.

HANSEN: would like to ask two questions. The first one: When a depression crosses an area and the velocity C of this depression is equal to the velocity \sqrt{gh} of the gravitation waves ($G = \sqrt{gh}$, g the earth's acceleration, h the depth), under special conditions resonance occurs. That means that the amplitude of this variation of sea-level becomes extremely large. Examples zero known from Japanese islands where, caused by hurricanes crossing these areas, a very large elevation of sea-level has been measured. Is it possible that in the northern part of the Adria this also may happen

MOSETTI: La considerazione del Prof. Hansen è molto giusta e puntualizza un effetto cui io ho appena accennato. È ben vero che le valutazioni idrodinamiche vengono abitualmente fatte riguardo il passaggio su un dato bacino di una singola depressione barometrica, mentre il mio studio riguarda invece lunghe successioni temporali. In queste peraltro l'effetto di singoli a «impulsi» si somma statisticamente dando luogo a ondulazioni aventi carattere più o meno periodico. La differente ampiezza con cui una di queste ondulazioni si presenta in varie stazioni del medesimo bacino si dovrebbe far dipendere proprio dagli effetti di risonanza riferiti dal Prof. Hansen. Un'azione della risonanza sulla fase di queste onde dovrebbe essere, almeno dal punto di vista numerico, più piccola; oppure tale da esser statisticamente compensata. Almeno nei bacini che io ho preso in esame non ho potuto apprezzare una differenza di fase che possa esser giudicata statisticamente significativa.

HANSEN: Thank you. I suppose that my second question is already answered by you.

MOSETTI: Naturalmente il coefficiente h che lega l'oscillazione di livello all'oscillazione di pressione deve esser stabilito in base a considerazioni idrodinamiche, cioè con le equazioni del movimento, generali o ridotte.

HANSEN: Yes, thank you very much.

PRESIDENTE: possiamo alla relazione successiva, quella del Prof. Groen, dell'Istituto Reale Olandese di Meteorologia di De Bilt.