

III CONFERENCIA TÉCNICA SOBRE HURACANES Y METEOROLOGÍA TROPICAL TECHNICAL CONFERENCE ON HURRICANES AND TROPICAL METEOROLOGY

México, D. F., Jun. 6-12, 1963

SESIÓN GENERAL (I) — GENERAL SESSION (I)

PRONOSTICANDO MAREJADAS FUERTES INDUCIDAS POR HURACANES

D. LEE HARRIS * y EUGENE W. HOOVER *

INTRODUCCION

Una amplia revisión de los aspectos teóricos del problema de las marejadas de tormentas fue recientemente publicada por Welander (1961). Fortak (1962) presentó el último año una discusión unificada. Harris (1963) también publicó recientemente una extensa descripción no-matemática de los procesos físicos y de los datos de observación de 26 tormentas tropicales y huracanes. La investigación en este campo tiende más y más a concentrarse en problemas de estabilidad de cálculo, ingeniería de costas y oceanografía de aguas someras en lugar de la meteorología. Por ello creemos que un informe actual sobre el sistema de alarmas contra marejadas de tormentas, como se tiene en los Estados Unidos y breves datos sobre proyectos de investigaciones y desarrollos ahora en vigor será más útil a este grupo que un informe sobre investigaciones especializadas.

En muchas situaciones la única forma práctica de protección contra el agua empujada por el viento que acompaña a la entrada de un huracán en tierra es la evacuación — a terreno alto o edificios excepcionalmente fuertes. Aún si se busca protección construyendo muros contra inundaciones, generalmente es necesario cerrar las entradas de navegación, drenajes y espacios abiertos en diques para calles transitadas. Esas formas de protección sólo son efectivas si se ayudan con un sistema de alarma que proporcione:

1. Una estimación útilmente acertada del peligro potencial;
2. Un claro entendimiento del peligro en quienes necesitan ser advertidos;
3. Un procedimiento ordenado para la necesaria acción protectora.

El desarrollo y manejo de un sistema de alarmas se apoya sobre muchos conceptos que ordinariamente no se consideran parte de la meteorología. Sin embargo, el meteorólogo debe aceptar gran parte de la responsabilidad porque

* U. S. Weather Bureau.

FORECASTING HURRICANE-INDUCED HIGH WATER SURGES

D. LEE HARRIS * and EUGENE W. HOOVER *

INTRODUCTION

An extended review of the theoretical aspects of the storm surge problem was published recently by Welander (1961), Fortak (1962) gave a unified discussion last year. An extensive non-mathematical description of the physical processes involved together with the observational data for 26 tropical storms and hurricanes has just been published by Harris (1963). The research in this field is tending more and more to be concerned with the problems of computational stability, coastal engineering, and shallow water oceanography rather than meteorology. Therefore, we feel that a status report of the storm surge warning system as it exists in the United States and a brief report on research and development projects now underway will be more useful to this group than a report of specialized research.

In many situations the only practical form of protection from the wind-driven water which accompanies the landfall of a hurricane is evacuation — to high ground or to exceptionally sturdy buildings. Even if one seeks protection by the construction of flood walls, it is usually necessary to close navigation openings, sewers, and a few gaps left in the dikes for busy streets. These forms of protection are effective only if they are activated by a warning system which will provide:

1. A usefully accurate evaluation of the potential danger;
2. A clear understanding of the danger to those who need to be warned;
3. An orderly procedure for the necessary protective action.

The development and operation of a warning system requires many concepts not ordinarily considered as a part of meteorology. However, the meteorologist must accept a large share of the responsibility because his skill is essential in

* U. S. Weather Bureau.

su competencia es esencial para valorar el peligro potencial y preparar el mensaje de alarma. Muchas profesiones pueden contribuir al sistema de alarma semanas y años antes que ocurran daños por tormentas, pero el meteorólogo debe estar activo cuando amenaza el desastre. Por ello, tiene que conocer todas las fases del sistema. Debe expresar su pronóstico en palabras que no puedan dejar de entenderse, lo que supone una apreciación del clima psicológico creado por un relativo vacío en la memoria de desastres locales o por excesiva preocupación pública sobre un desastre reciente. Debe evitar el uso de términos relativos como "alto" o "bajo" que no tienen significación específica y pueden no ser entendidos. También debe evitar palabras creadoras de una impresión de excesiva confianza o falta de confianza en sus predicciones.

Aunque el servicio meteorológico no es responsable de los planes previos en la comunidad para conducir una evacuación ordenada, sabemos que estimulando activamente el desarrollo de planes de protección contra desastres se mejora la reacción pública a las alarmas y se acrecienta el valor de los avisos que puedan darse durante las tormentas.

El principal tema de este trabajo consistirá en valorar el peligro potencial de inundaciones costeras en los huracanes ya que este aspecto del sistema de alarma debe quedar primordialmente bajo la responsabilidad del servicio meteorológico. Se citarán ejemplos de marejadas extratropicales cuando sean representativas de condiciones huracanadas en los citados fenómenos.

FACTORES METEOROLOGICOS

El viento, la presión y los campos de olas superficiales en los océanos están organizados de manera más o menos

the evaluation of the potential danger and in composing the warning message. The contribution of many professions to the warning system may be made weeks or years before the damaging storm occurs, but the meteorologist must be active at the time of the threatened disaster. Thus he must understand all phases of the system. He must express his prediction in words that are not apt to be misunderstood. This may involve recognition of the psychological climate created by either a relative void of memorable local disasters or by excessive public concern over a recent disaster. He must avoid the use of relative terms like "high" or "low" which have no specific meaning and may lead to misunderstanding. He must also avoid wording which creates an impression of excessive confidence or lack of confidence in his predictions.

Although the weather service is not responsible for the advanced community planning required for an orderly evacuation, we have found that actively encouraging the development of disaster protection plans materially improves the public response to warnings and enhances the value of the advice we can furnish during storms.

The principal subject of this paper will be the evaluation of the potential danger of coastal flooding in hurricanes as this aspect of the warning system must be primarily the responsibility of the weather service. Examples from extratropical surge occurrences may be quoted when the phenomena cited are representative of hurricane conditions.

METEOROLOGICAL FACTORS

The wind, pressure, and ocean surface wave fields are organized in a more or less systematic manner with respect

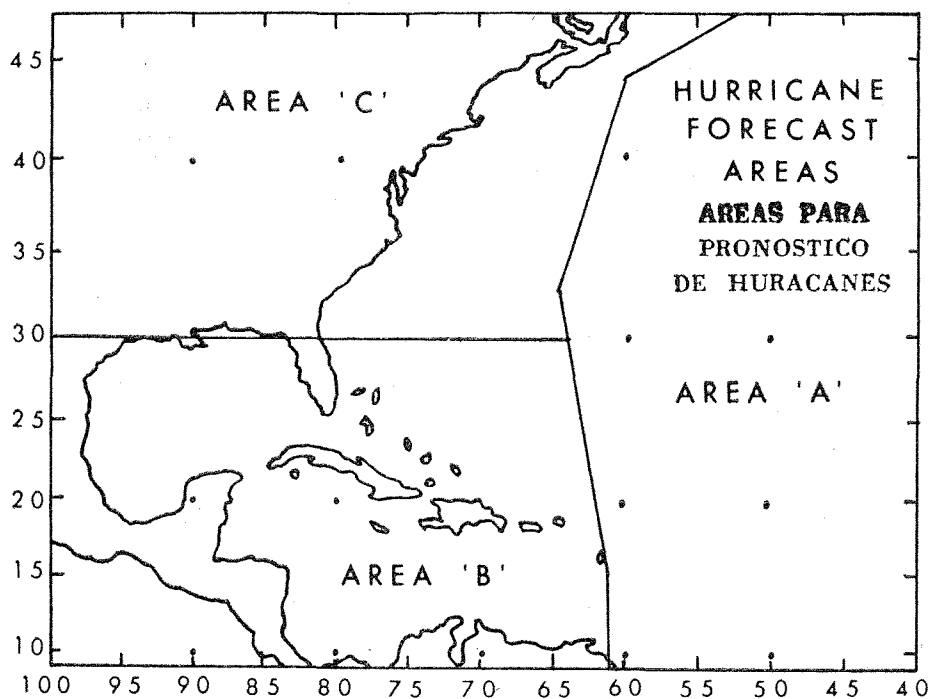


Fig. 1. Areas en que se localizaron tormentas tropicales al hacerse los pronósticos para clasificar las comprobaciones.

Fig. 1. Areas in which tropical storms were located at time of forecasts used for classifying the verifications.

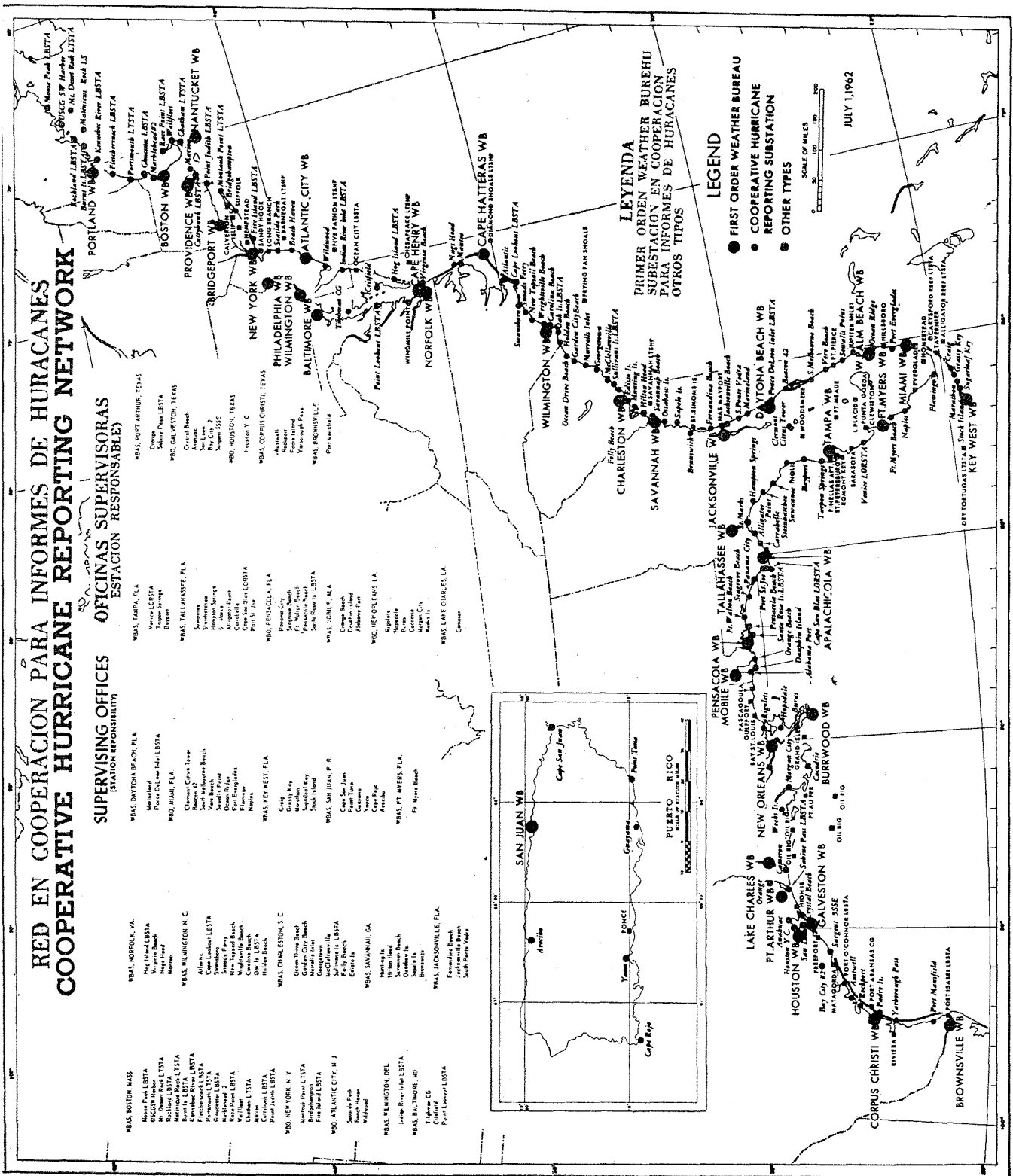


Fig. 2. Distribución de estaciones de observación del tiempo de primer orden y en cooperación. Fig. 2. Location of first order and cooperative weather observation stations.

TABLA I

VERIFICACION DE PRONOSTICOS OPERACIONALES DE LA OFICINA METEOROLOGICA DISTRITAL CONSIDERANDO LA UBICACION GEOGRAFICA DEL CICLON TROPICAL EN EL MOMENTO INICIAL

Pronósticos para 24 horas (de Tracy, 1962)

VERIFICATION OF DISTRICT METEOROLOGICAL OFFICE OPERATIONAL FORECASTS CONSIDERING THE GEOGRAPHICAL LOCATION OF THE TROPICAL STORM AT THE INITIAL TIME

Forecasts for 24 hours (from Tracy, 1962)

Año	Error medio (mi. n)	Núm. de Casos	Error medio (mi. n)	Núm. de Casos	Error medio (mi. n)	Núm. de Casos	Error medio (mi. n)	Núm. de Casos
Year	Median error (n. mi)	No. of Cases	Median error (n. mi)	No. of Cases	Median error (n. mi)	No. of Cases	Median error (n. mi)	No. of Cases
1955-1957	145	118	93	131	131	84	118	333
1958	165	7	96	52	122	26	104	85
1959	307	40	125	59	127	27	152	126
1960	63	8	77	32	203	19	109	59
1958-1960	208	55	99	143	143	72	119	270
1955-1960	164	173	95	274	137	156	122	603

sistemática respecto al centro de la tormenta. Consecuentemente, el primer problema es la predicción de la ruta futura de la tormenta. Por desgracia, esta predicción raras veces es perfecta y debe considerarse que el error probable es esencial al valorar el peligro potencial. Al lanzar alarmas es mejor ser cauto que francamente optimista al estimar la propia habilidad de predicción.

En años recientes se han hecho muchos estudios sobre errores de vector en pronósticos de la posición de huracanes. Uno que hizo Tracy (1962) en la última Conferencia Técnica sobre Huracanes es típico de ese grupo y se ha resumido en la Tabla I y la Fig. 1, reproducidas de Tracy.

Podemos ver en dicha tabla que el promedio de error de 24-horas al pronosticar la posición casi es de 120 millas. El promedio de error en 12-horas es cercano a la mitad de tal cifra o sean 60 millas. El error duplica esa cantidad casi en el siete por ciento del tiempo. Otros estudios muestran que no hay equívoco significativo en la dirección del error de vector.

Los errores ya mencionados son pequeños desde el punto de vista geofísico. Cuando se considera la escasez de observaciones cerca del centro de un huracán y la magnitud de los errores que se hacen frecuentemente al pronosticar el movimiento de los centros de tormentas extratropicales, la exactitud aparece como notablemente buena. Pero cuando se consideran, la pequeña escala horizontal y el apretado gradiente de un huracán, parece que el daño mayor puede ocurrir en un sitio que se creía relativamente seguro en una predicción preparada 24 horas antes. Este límite a la capacidad del pronóstico significa que debe mantenerse una vigilancia continua de las condiciones costeras durante el

TABLE I

to the storm center. Therefore, the first problem is the prediction of the future storm track. Unfortunately, this prediction is rarely perfect and some consideration of the probable error is essential in an evaluation of the potential danger. In issuing warnings it is better to be conservative than overly optimistic in estimating our forecast skill.

Many studies of the vector errors of hurricane position forecasts have been conducted in recent years. That presented by Tracy (1962) at the last Technical Conference on Hurricanes is typical of the group and is summarized in Table I and Figure 1, reproduced from Tracy's paper.

From this table we can see that the average 24-hour error in forecast position is about 120 miles. The average 12-hour error is about half this amount, or 60 miles. The error is double this amount about seven per cent of the time. Other studies show that there is no significant bias in the direction of the vector error.

The errors shown above are small from a geophysical standpoint. When one considers the sparsity of observations near the center of a hurricane and the magnitude of the errors frequently made in predicting the motion of extratropical storm centers, the accuracy appears remarkably good. But when the small horizontal scale and the tight gradients of a hurricane are considered, it appears that the major damage may occur in a location which appeared relatively safe in a forecast issued 24 hours earlier. This limit to forecasting skill means that a continuous watch must be maintained on coastal conditions during the period when the landfall of a hurricane is imminent. By far the

período de inminente precipitación de un huracán a tierra. Desde luego, el instrumento más útil para difundir la posición del centro de un huracán es la red de radar que describe Rockney (esta sesión). Pero, eso no da suficiente información sobre el viento real, la marea y las condiciones de olas en las costas.

Pueden lograrse algunos adelantos en la exactitud y una mejoría significativa en la reacción pública a las alarmas reuniendo informes sobre el verdadero nivel del agua y las pérdidas durante la primera parte de la tormenta para asociarla a la información de alarmas posteriores. La Fig. 2 es un mapa que muestra la distribución de estaciones meteorológicas de primer orden y los lugares en que se hacen observaciones suplementarias durante las tormentas. Ello es especialmente útil cuando la tormenta se mueve realmente más aprisa o se intensifica más de lo indicado en las primeras alarmas. En el Centro de Predicción de Huracanes en Washington hemos considerado necesario tomar contacto con áreas de tiempo sospechosamente crítico, generalmente por teléfono, para lograr información adicional. Nuestros informes meteorológicos habituales son inadecuados con frecuencia y aún engañosos. Puede faltar alguna información importante por ciertas fallas en el sistema de instrumentos. Durante el máximo de una fuerte tormenta en la mañana del 7 de Marzo de 1962 nuestras estaciones costeras regulares del Atlántico medio estaban informando de vientos de 20-30 nudos con rachas de casi 45 nudos en tanto que informes simultáneos, disponibles en fecha tardía, desde playas amenazadas indicaban de 40 a 60 nudos con breves períodos de 70 nudos. Los informes sinópticos de las 1200Z indicaban anomalías de marea menores de 3 pies, pero faltaban informes de la sección de costa cercana al centro de tormenta. Una investigación telefónica en comunidades costeras reveló anomalías de marea que superaban a 5.0 pies y se comprobó que esa tormenta fue una de las más extensas y fuertes en la costa en el siglo.

Si nuestros pronósticos predijeran correctamente condiciones malas deberíamos pedir informes de observadores asociados en áreas vulnerables para planear procedimientos. Tales informes, unidos a los de la Guardia Costera, proporcionan útil información sobre muchas localidades. Debe destinarse personal suplementario en cierto número de estaciones de información, una posible falla de comunicaciones y recordarse que el trabajo de rescate es el primer deber de la Guardia Costera.

FACTORES OCEANOGRÁFICOS

Aunque los campos de viento y presión fuesen determinados totalmente con adelanto de muchos días, aún quedarían varios problemas serios para valorar el peligro potencial. La Fig. 3 muestra una densa colección de alturas de marejadas en pequeñas áreas en varias tormentas. Muchas cartas similares fueron consideradas por Harris (1963). Nótese que la magnitud de muchas alturas de marejadas en un radio de pocas millas puede pasar de tres pies. Las alturas de marejadas generalmente se basan en los restos

most useful tool in monitoring the position of the hurricane center is the radar network as described by Rockney (this session). But this does not provide enough information about the actual wind, tide, and wave conditions at the coast.

Some improvement in the accuracy and a significant improvement in the public response to warnings can be obtained by collecting reports of the actual water level and damage during the early part of the storm and including this information in later warnings. A map showing the distribution of first order weather stations and the locations from which supplementary observations are available during storms is shown in Figure 2. This is especially useful when the storm actually moves faster or becomes more intense than indicated in the early warnings. At the Hurricane Forecast Center in Washington, we have found it necessary to contact areas of suspected critical weather, mostly by telephone, to obtain additional information. Our regular weather reports are often inadequate and may even be deceiving. Some critical information may be missing because of some failure in the instrument system. At the peak of a severe storm during the morning of March 7, 1962, our regular mid-Atlantic coastal stations were reporting winds of 20-30 knots with gusts to about 45 knots, while simultaneous reports available at a later date from exposed beaches were 40 to 60 knots with brief periods of 70 knots. The 1200Z synoptic reports generally indicated tide anomalies less than three feet, but reports were missing from the section of the coast nearest the storm center. Telephone inquiries to the coastal communities revealed tide anomalies exceeding 5.0 feet and showed this storm to be one of the most widespread, severe coastal storms of the century.

If our forecast correctly anticipates severe conditions our planned procedures are to request reports from cooperative observers in vulnerable areas. These reports, in addition to Coast Guard reports, provide useful information from many locations. We must arrange for supplementary staffing at a number of reporting stations, possible communication failure, and remember that rescue work is the prime duty of the Coast Guard.

OCEANOGRAPHIC FACTORS

Even if the wind and pressure fields were fully specified many days in advance, there would still be several serious problems in evaluating the potential danger. Figure 3 shows a dense collection of high water marks from small areas in several storms. Many similar charts are given by Harris (1963). Notice that the spread of the high water marks are generally based on debris left on the interior walls of buildings and other structures which can serve as stilling wells to decrease the amplitude of the ordinary wind waves.

ALTURAS DE MAREJADAS
HIGH WATER MARKS

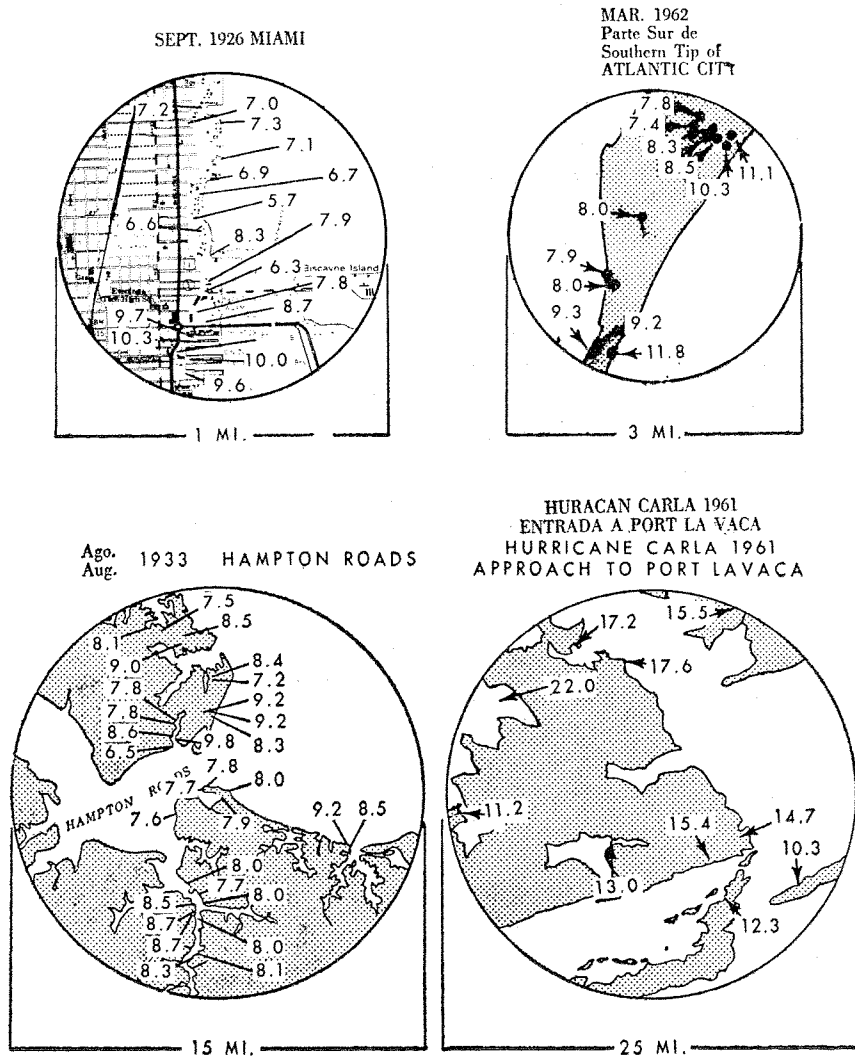


Fig. 3. Variación local de alturas de marejadas en algunas tormentas.

Fig. 3. Local variation in high water elevations in selected storms.

esparcidos en las paredes interiores de edificios y otras estructuras que pueden actuar como pozos de retención al disminuir la amplitud del oleaje que ordinariamente levanta el viento. La dispersión que indican los datos es típica de la observada siempre que haya informes de alturas de marejadas suficientemente densos. Estudios de laboratorio por Saville (1962) y estudios teóricos de Fortak (1962), Dorrestein (1962) y Longuet-Higgins y Stewart (1962) muestran que las olas de rompientes pueden subir de 3 a 8 pies sobre el nivel medio del agua entre esa zona y la playa si se estrellan paralelamente a ella. Los cambios locales en la topografía son en general suficientemente complejos para explicar la variación indicada en los informes de altura de mareas.

La marejada parece generarse por acción simultánea de varios procesos macro-, meso- y micro-escalares. No se ha construido un modelo sencillo y realístico de la marejada y

The scatter shown by these data is typical of that observed whenever a sufficiently dense collection of high water marks is obtained. Laboratory studies by Saville (1962) and theoretical studies by Fortak (1962), Dorrestein (1962) and Longuet-Higgins and Stewart (1962) show that breaking waves can add from 3 to 8 feet to the mean water level between breaker zone and the beach if the waves break parallel to the beach. Local changes in topography are generally sufficiently complex to fully account for the variation in the reported tide height.

The storm surge appears to be generated by the simultaneous action of several macro-, meso-, and micro-scale processes. No realistic and simple model of the storm surge has been constructed and it is doubtful if one can be. Never-

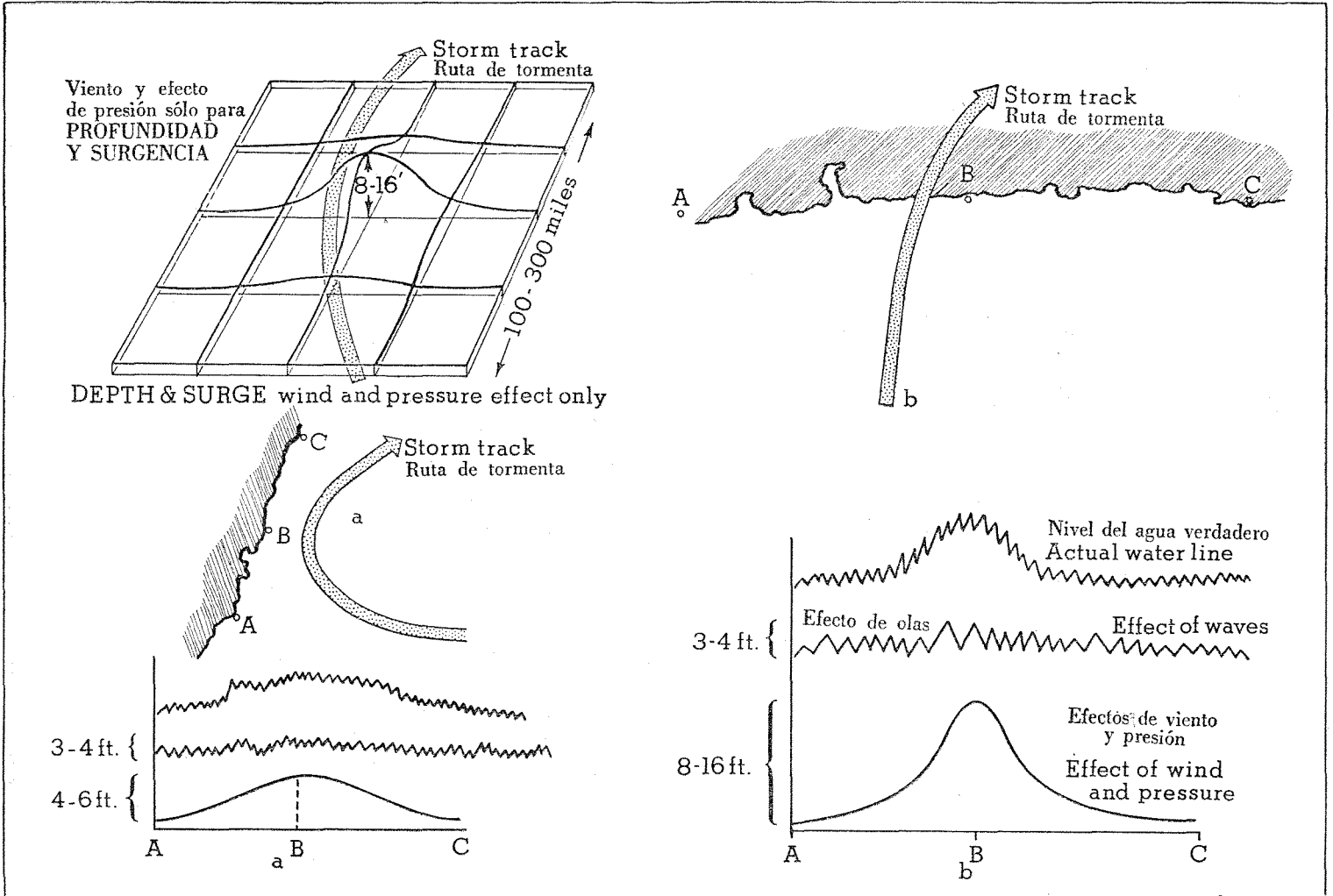


Fig. 4. Modelo esquemático para interpretar alturas de marejadas en huracanes.

Fig. 4. Schematic model for interpreting high water mark observations in hurricanes.

difícilmente podrá hacerse. A pesar de ello, el modelo ficticio presentado en la Fig. 4 vale algo, pues proporciona un esquema para recoger observaciones y lanzar alarmas si se recuerda que el modelo sólo puede usarse para interpretar observaciones en la línea de costa y no para entender los fenómenos en el mar abierto.

Imaginemos que los campos de viento y presión producen una perturbación en el nivel del agua que se aproxima al cociente obtenido al dividir una función en curva de campana de la misma escala horizontal de la tormenta por la profundidad local del agua. Puede pensarse que el centro de esta función en forma de campana está bajo la zona de máximos vientos a la derecha de la ruta de la tormenta. La masa de agua no puede ser muy alta a cualquier gran distancia de la orilla por dividirla la profundidad local del agua. Tampoco puede ser muy alta en la orilla a menos que el centro de la tormenta se acerque mucho a ella o rebase realmente la línea de costa. En la intersección de aquella masa y la orilla debemos agregar otra perturbación de mucho menor escala horizontal para representar el efecto de olas de rompiente, rasgos topográficos a menor escala

theless, the fictitious model presented in Figure 4 has some merit in providing a framework for collecting observations and issuing warnings if it is remembered that the model is expected to be useful only in interpreting observations at the coastline, not in understanding phenomena in the open sea.

Let us imagine that the wind and pressure fields produce a disturbance in the water level which can be approximated as the quotient obtained by dividing a bell-shaped function of the same horizontal scale as the storm by the local water depth. The center of this bell-shaped function must be thought of as being under the zone of maximum winds to the right of the storm track. The mound of water cannot be very high at any great distance from shore because of the division by the local water depth. Neither can it be very high at the shore unless the storm center comes very near the shore or actually crosses the coastline. At the intersection of this mound with the shore we must add another disturbance of much smaller horizontal scale to represent the effect of breaking waves, small scale topographic features, and local variations in the wind field.

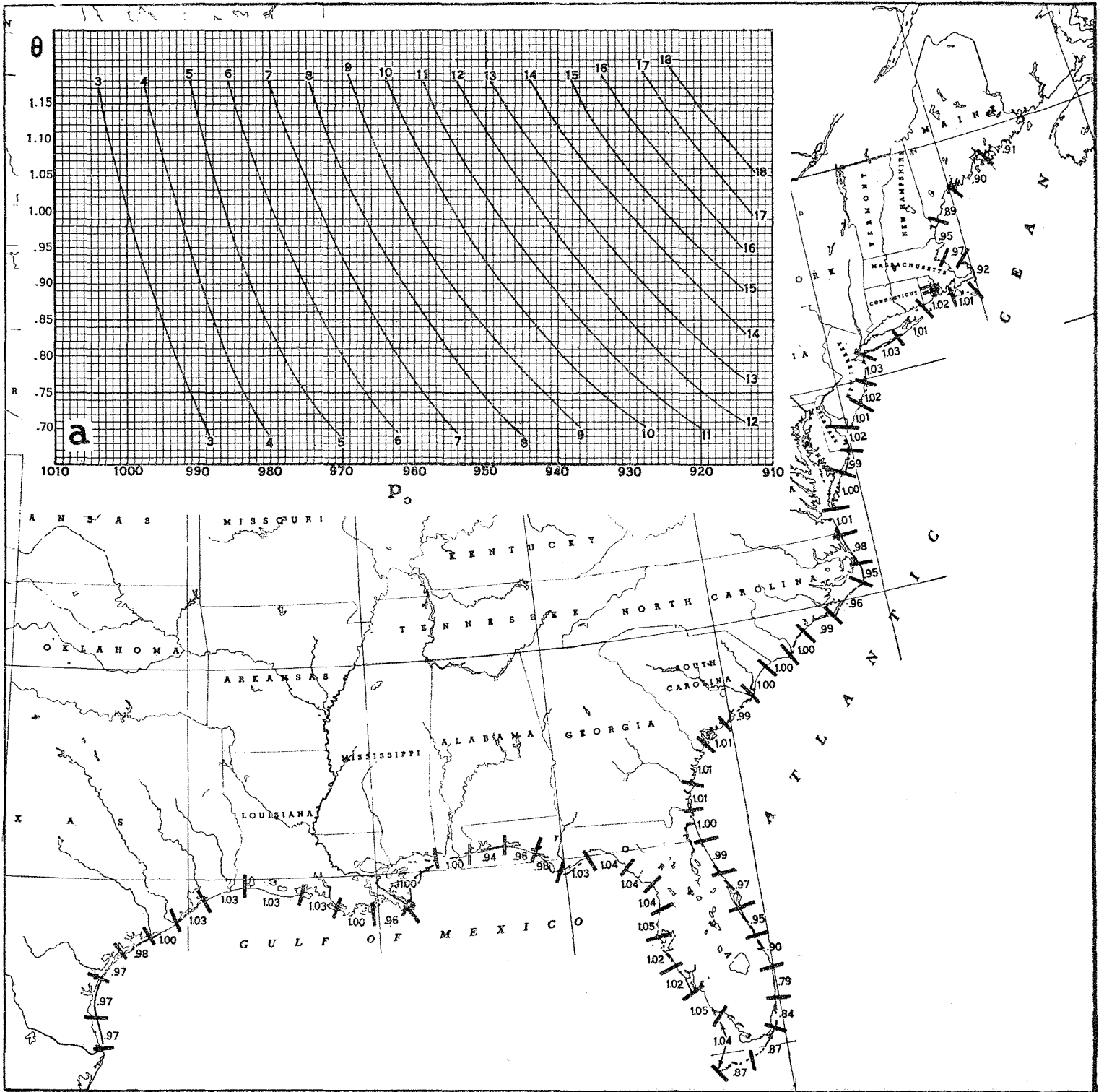


Fig. 5. Esquema de predicción para surgencias máximas de tormenta en huracanes. Los valores de surgencia pronosticados se muestran por curvas descendentes a la derecha de la gráfica. La predicción que depende de la presión central se indica por el valor 1.00, que puede corregirse para el declive de la plataforma continental multiplicándolo por el valor indicado en la parte apropiada del mapa o leerse directamente en la gráfica en el correspondiente a θ . Según Harris (1961).

Fig. 5. Prediction scheme for peak storm surge heights in hurricanes. Predicted surge values are given by the curves sloping downward and to the right in the graph. The prediction which depends on the central pressure is given for a value of 1.00. This can be corrected for the slope of the continental shelf by multiplying by the value shown on the appropriate part of the map, or read directly from the graph for the proper value of θ . From Harris (1961).

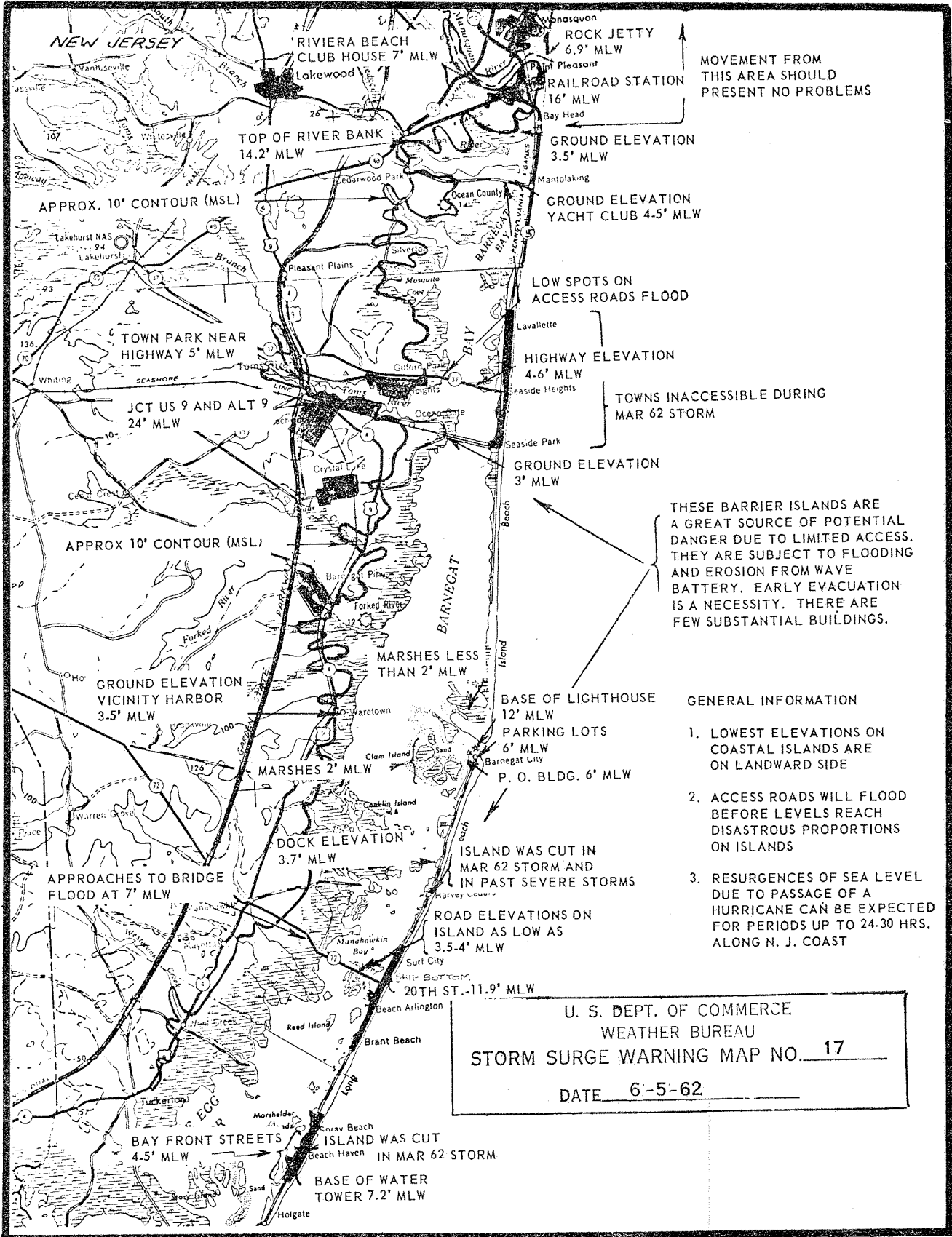


Fig. 6. Carta de alarmas de marejadas para una región de la costa de New Jersey.

Fig. 6. Storm surge warning chart for a region of the New Jersey coast.

y variaciones locales en el campo del viento. Esta segunda función tiene la apariencia de una oscilación imprevista con una variación de casi 3 a 4 pies y longitudes de onda que pueden variar entre algunos cientos de yardas y pocas millas. No puede precisarse más esta definición ya que no es realista en el sentido físico. Sin embargo, nos ayuda mucho a entender el problema de la alarma, ya que puede darse un pronóstico de las características de la masa de agua debidas a campos de viento y presión conociendo ambos y la batimetría de la región oceánica cerca de la costa, con mucho mayor exactitud que un pronóstico de cambios resultantes de procesos a pequeña escala que ocurran al azar en la playa.

UN ESQUEMA SENCILLO DE PREDICCIÓN

Existe una relación bien sencilla entre la más alta marejada reportada para un huracán y la presión central de la tormenta que se muestra en la Fig. 5. La correlación obtenida con la presión central aislada puede mejorarse hasta un 10% considerando la inclinación de la plataforma continental en la región de ataque. Hasta ahora no puede mejorarse considerando la magnitud de la tormenta o el ángulo con que se aproxima a la costa.

Esta gráfica parece contener los efectos de viento, presión, olas e inclinación de la plataforma continental en la máxima marejada con notable exactitud. El error standard del máximo estimado con base en este esquema de predicción es sólo de 1.5 pies. Es decir, el valor declarado cae dentro de ± 1.5 pies del valor indicado en la mitad de los casos. Cuando se considera la variabilidad local que muestra la Fig. 3, con incertidumbre en la predicción de la posición típica para un período de más de 12 horas e incertidumbre de este esquema de predicción, se deduce que cualquier pronóstico debe encerrarse en una escala de valores que pueda no pasar de 2 pies cerca de la periferia de la tormenta o a lo más 4 pies cerca del punto de ataque previsto. Todavía pueden salirse de este cálculo algunos niveles máximos y mínimos del agua que se registran en la realidad. No debe olvidarse que el público puede entender mejor esta variabilidad a base de noticias periódicas, de radio y de estaciones de TV que las pasan gustosamente durante el alerta de un huracán.

El agua que va subiendo penetra en los estuarios de costas abiertas del mismo modo que la marea astronómica. Las olas generadas en estuarios no pueden ser tan grandes como las observadas en la costa abierta durante fuertes tormentas y por ello, la línea de alto nivel del agua en los estuarios es mucho más suave que la existente en las costas abiertas. Sin embargo, el viento puede originar pendientes más fuertes en la superficie del agua sobre un estuario somero que en una costa abierta, habiéndose registrado pendientes del orden de 1 pie en una distancia de 2 a 5 millas en varias ocasiones. El efecto directo del viento al arrojar agua sobre la costa en el fondo de una bahía puede agregarse a lo pronosticado para la costa abierta por la relación de la presión central de la marejada discutida antes. En el

This second function has the appearance of a random oscillation with a range of about 3 or 4 feet and wavelengths which may vary from a few hundred yards to a few miles. This definition cannot be made very precise because it is not realistic in a physical sense. Nevertheless, it does help us to understand the warning problem. One can expect to predict the characteristics of the mound of water due to the wind and pressure fields from a knowledge of these fields and the bathymetry of the oceanic region near the coastline, with much greater accuracy than he can predict the modification resulting from the small-scale random processes occurring at the beach.

A SIMPLE PREDICTION SCHEME

A fairly simple relation is found between the highest storm surge reported in a hurricane and the central pressure of the storm. This is shown in Figure 5. The correlation obtained with the central pressure alone can be improved up to about 10% by considering the slope of the continental shelf in the region of landfall. As yet it cannot be improved by considering the size of the storm or the angle with which the storm approaches the coast.

This graph appears to contain the effects of wind, pressure, waves and the slope of the continental shelf on the peak storm surge with surprising efficiency. The standard error of the estimated peak surge based on this prediction scheme is only 1.5 feet. That is, the reported value is within ± 1.5 feet of the indicated value one-half of the time. When one considers the local variability as shown in Figure 3, the uncertainty in a typical position forecast for a period of more than 12 hours, and the uncertainty in this forecasting scheme, it appears that any forecast should be stated in a range of values which may be no more than 2 feet near the periphery of the storm, or as much as 4 feet near the anticipated point of landfall. Even this spread should miss a few of the higher and lower water levels that actually occur. One should not overlook the opportunity of giving the public a better understanding of this variability in the background stories that newspapers, radio, and TV stations are usually glad to run during a hurricane alert.

The rising water along the open coast penetrates estuaries in much the same way as the astronomical tide. The waves generated in estuaries cannot grow as large as those commonly experienced on the open coast during severe storms, consequently the high water line in estuaries is much smoother than that experienced on the open coast. However, the wind can support much steeper slopes on the water surface over a shallow estuary than on the open coast. Slopes on the order of 1 foot in a distance of 2 to 5 miles have been reported on several occasions. The direct effect of wind in piling up water on the shore to the lee of a bay must be added to that predicted for the open coast by the storm surge central pressure relation discussed above. At the pre-

**MAPA PARA EVACUACION EN TORMENTAS
STORM EVACUATION MAP**

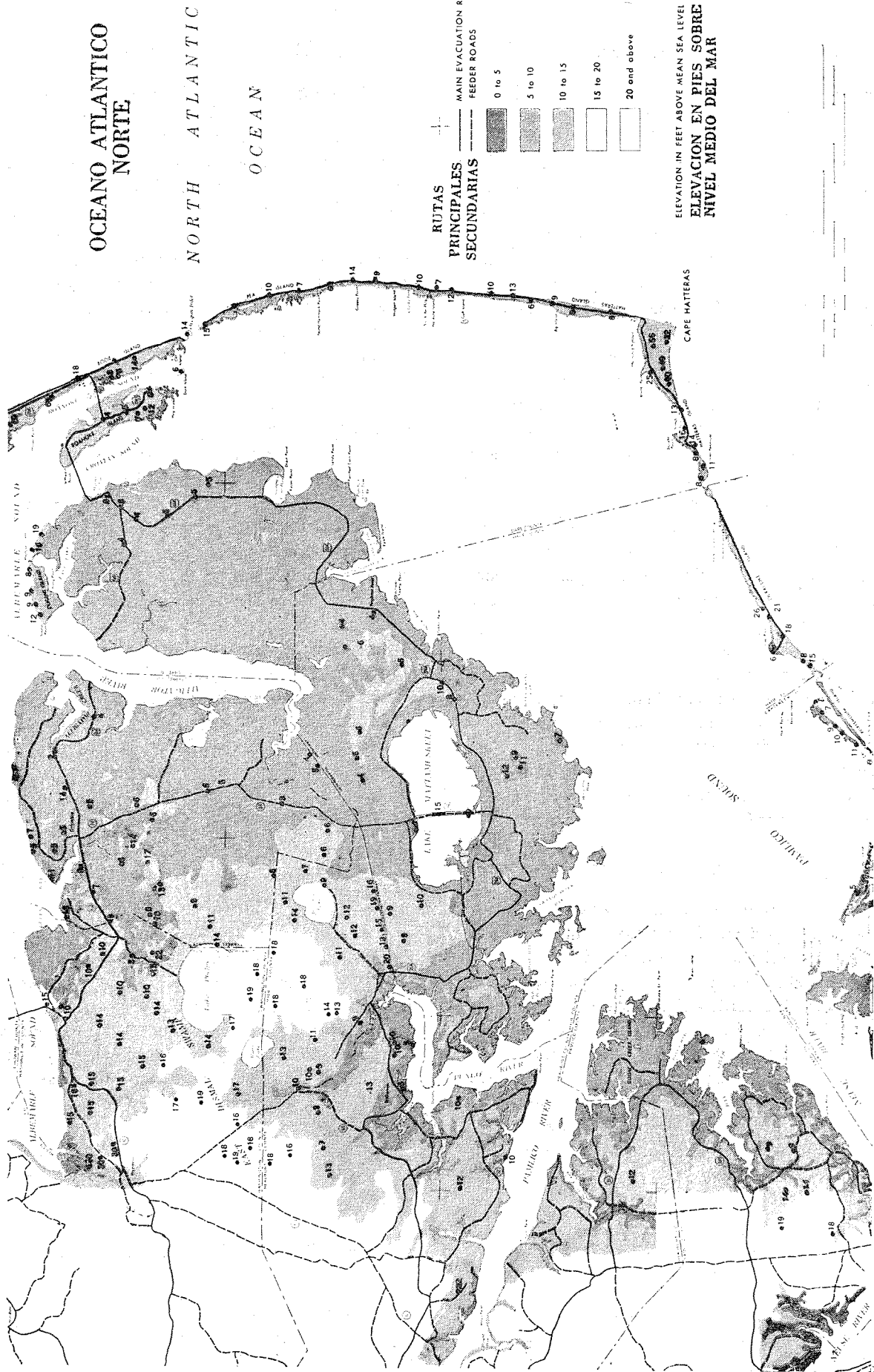


Fig. 7. Revised base for a storm surge warning chart for the North Carolina coast.

Fig. 7. Base revisada de una carta de alarma de marejada de tormenta para la costa de Carolina del Norte.

momento actual no tenemos un sistema satisfactorio para pronosticar este valor.

IMPORTANCIA DE LA TOPOGRAFIA COSTERA

Las consideraciones meteorológicas aisladas sólo pueden darnos información sobre los efectos de la tormenta al nivel del mar, lo cual generalmente es todo lo que puede decirse en una alarma general. Una mejor estimación del peligro potencial de la tormenta es el espesor de agua esperada encima del nivel del terreno. Cartas similares a la mostrada en la Fig. 6 se han preparado para muchas regiones costeras del Atlántico y del Golfo para dar al pronosticador una rápida referencia a los lugares de peligro potencial en las regiones costeras bajas. Contienen dichos mapas información sobre elevación crítica del terreno y lugares bajos en carreteras que impedirán la evacuación.

Un ejemplo de un mapa base más ideal para este propósito se encuentra en la Fig. 7. Tal carta, la primera de una serie que viene desarrollando el Coast and Geodetic Survey, es muy superior para una alarma general de inundación costera a la mostrada en la Fig. 6, porque destaca las elevaciones del terreno y omite los detalles irrelevantes. Todavía deben agregarse notas sobre uso de la tierra como

La vulnerabilidad de las comunidades de ribera varía considerablemente con las condiciones de la playa y dunas. Una playa ancha y baja apenas por encima de la línea de agua y viendo al mar permite que la mayoría de las olas entrantes se disipen sin daño en tanto que las mismas olas producirán grandes perjuicios en una región con playa angosta. Una línea continua de dunas puede también reducir el área de daños por oleaje en el frente del océano. Pero, las playas y dunas están sujetas a erosión bajo el prolongado ataque de las olas y las áreas que parecían seguras al principio de la tormenta pueden estar en peligro si la marejada persiste a través de dos o más pleamares.

IMPORTANCIA DE LAS MAREAS ASTRONOMICAS

La amplitud de la marea astronómica varía por un factor de dos o más con la posición de la Luna en la mayoría de los puertos norte-americanos. No podemos fijar el tiempo para la marea máxima con precisión muy por adelantado pero rara vez pasa inadvertido el momento de llegada del huracán por más de un día. La práctica conservadora en la operación de un sistema de alarma requiere que se sepa que la marejada máxima puede coincidir con la marea alta astronómica casi al momento de la llegada a tierra del huracán hasta que se aclare que no fue su causa.

También se necesita considerar la posibilidad de inundaciones fluviales en estuarios, como consecuencia de fuertes lluvias por huracanes.

PROYECTOS ACTUALES DE INVESTIGACION Y VISTAS AL FUTURO

Como se mencionó antes, aún no hemos podido demostrar una conexión empírica entre la velocidad o dirección

sent time we do not have a satisfactory system for predicting this value.

IMPORTANCE OF COASTAL TOPOGRAPHY

Meteorological considerations alone can give us information only about the effects of the storm on the level of the sea. This is usually all that one can include in a general storm warning. A better measure of the potential danger from a storm is the depth of water expected above the ground level. Charts similar to that shown in Figure 6 have been prepared for many Atlantic and Gulf Coastal regions to provide the forecaster with a ready reference to potential trouble spots in the coastal lowland regions. Information about critical land elevations, low spots in the highways, which would impede evacuation have been entered on a pre-existing map.

An example of a more ideal base map for this purpose is shown in Figure 7. This chart, the forerunner of a series being developed by the Coast and Geodetic Survey is much superior for a coastal flood warning chart to that used in Figure 6, because it highlights the land elevations and all irrelevant detail has been omitted. Notes on land use, such as shown in Figure 6, are yet to be added.

The vulnerability of beach communities varies considerably with the condition of the beach and dunes. A wide flat beach just above the waterline and seaward of the first houses permits many of the oncoming waves to dissipate without damage, when the same waves would produce extensive damage in a region with a narrow beach. A continuous dune line can likewise limit the area of wave damage to the oceanfront. But the beaches and dunes are subject to erosion by prolonged wave attack and areas that appeared safe at the beginning of a storm may be in danger if the storm surge persists through two or more high tides.

IMPORTANCE OF ASTRONOMICAL TIDES

The astronomical tide range varies by a factor of two or greater with the position of the Moon at most North American ports. We may not be able to time the peak surge to the nearest hour, very far in advance, but we rarely miss the time of landfall by more than a day. Conservative practice in operating a warning system requires recognition that the storm surge peak may coincide with the peak astronomical tide nearest the time of hurricane landfall until it is obvious that this will not be the case.

It is also necessary to consider the possibility of fluvial flooding in estuaries as a consequence of the heavy hurricane rains.

CURRENT RESEARCH PROJECTS AND FUTURE OUTLOOK

As mentioned above, we have not yet been able to demonstrate any empirical connection between the speed or

del movimiento del huracán sobre el valor de la marejada u obtener una expresión satisfactoria para el aumento en el nivel del agua debido a la acción del viento sobre estuarios. La teoría elemental indica que estos factores pueden ser importantes y creemos que nuestro fracaso en definirlos empíricamente se debe a limitación de datos de primera clase.

La tendencia actual en el estudio de marejadas por tormentas va hacia una solución numérica de las diferentes ecuaciones que relacionan el esfuerzo del viento y los gradientes de presión al movimiento de la superficie de agua libre. Cuando se logre una formulación satisfactoria del problema, se podrán simular muchos huracanes para cada área crítica de la costa y usarlas para mayores refinamientos en las ecuaciones empíricas del pronóstico. Las diferentes ecuaciones que deben resolverse son similares a las necesarias para un pronóstico de tiempo barotrópico, aunque dándose más importancia a la variabilidad de los coeficientes y menos a los términos no-lineales. Las condiciones de frontera son considerablemente más críticas, pues la solución se necesita más en ellas. Se han logrado soluciones satisfactorias para condiciones de frontera idealizadas. El proyecto busca actualmente la representación más satisfactoria de condiciones realistas, especialmente en agua libre necesarias para permitir un detallado estudio de una pequeña sección del océano.

La solución numérica debiera explicar los efectos directos de esfuerzos del viento y gradientes de presión. Se necesitan más investigaciones básicas dentro de un programa de estudios aplicados sobre los efectos de olas a nivel del mar y la relación entre la velocidad y el esfuerzo del viento. Los proyectos de investigación dedicados a estos problemas ya se realizan, pero como tienen mayor variedad de aplicaciones no se les considera como parte del proyecto de marejadas por tormentas.

La Junta de Erosión de Playas realiza ahora un estudio piloto para demostrar la conveniencia de pronosticar los efectos de cambios en playas sobre la vulnerabilidad de las comunidades de ribera ante daños por marejadas. Todo ello será de valor directo en el sistema de alarmas contra huracanes.

direction of the hurricane motion on the peak surge value or to obtain a satisfactory expression for the increase in water level due to the wind action over estuaries. Elementary theory indicates that these factors must be important and we believe that our failure to define them empirically is due to the shortage of first class data.

The present trend in storm surge research is toward a numerical solution of the differential equations relating wind stress and pressure gradients to the motion of the free water surface. When a satisfactory formulation of the problem is achieved it should be possible to simulate many hurricanes for each critical area of the coast and use these for further refinements in the empirical prediction equations. The differential equations which must be solved are similar to those needed for a barotropic weather forecast but with more importance attached to the variability of the coefficients and less to the non-linear terms. The boundary conditions are considerably more critical, as it is at the boundary that the solution is most wanted. Satisfactory solutions have been achieved for idealized boundary conditions. The project is presently searching for the most satisfactory representation of realistic boundary conditions, particularly the open water boundary conditions needed to permit a detailed study of a small section of the ocean.

The numerical solution should account for the direct effects of wind stress and pressure gradients. Further basic research is needed to support an applied research program in the effect of waves on sea level, and the relation between wind velocity and wind stress. Research projects devoted to these problems are underway, but as they have a much wider range of application they are not regarded as part of the storm surge project.

The Beach Erosion Board is now conducting a pilot study to determine the feasibility of predicting the effects of beach changes on the vulnerability of beach communities to storm surge damage. This will be of direct value to the hurricane warning system.

BIBLIOGRAFIA

- DORRESTEIN, R. 1962. Wave Set-up on a Beach. Proc. Second Techn. Confer. Hurrics., NHRP Report No. 50, U. S. Weather Bureau, pp. 230-241.
- FORTAK, H. G. 1962. On the Mathematical Formulation of the Storm Surge Problem. Proc. Second Techn. Confer. Hurrics., NHRP Report No. 50, U. S. Weather Bureau, pp. 196-210.
- HARRIS, D. LEE. 1961. Characteristics of the Hurricane Storm Surge. *U. S. Weather Bureau Techn. Paper*, No., pp.
- LONGUET-HIGGINS, M. S. & R. W. STEWART. 1962. Radiation Stress and Mass Transport in Gravity Waves with Application to "Surf Beats". *Jour. Fluid Mechan.*, 13:481-504.
- — 1963. Note on Wave Set-up. *Jour. Marine Res.*, 21(1):
- SAVILLE, JR., T. 1962. Experimental Determination of Wave Set-up. Proc. Second Techn. Confer. Hurrics., NHRP Report No. 50, U. S. Weather Bureau, pp. 242-252.

BIBLIOGRAPHY

- TRACY, J. D. 1962. Verification of Forecasts of Hurricane Motion using Various Techniques. Proc. Second. Techn. Confer. Hurrics., NHRP Report No. 50, U. S. Weather Bureau, pp. 373-382.
- WELANDER, P. 1961. Numerical Prediction of Storm Surges. *Advances in Geophysics*, Vol. 8, pp. 315-379.