

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

México, D. F., Jun. 6-12, 1963

7a. SESIÓN

7th. SESSION

CONVECCIÓN E INTERCAMBIO AIRE-MAR-TIERRA CONVECTION AND AIR-SEA-EARTH EXCHANGE

PERDIDA DE CALOR EN AGUAS DEL NOROESTE DEL GOLFO DE MEXICO DURANTE EL HURACAN CARLA

R. E. STEVENSON * y R. S. ARMSTRONG *

Apenas cabe duda que el océano es la fuente básica de energía para perturbaciones atmosféricas marinas grandes y pequeñas. Sin embargo, la más dramática interacción se realiza durante la plenitud del huracán. Estas monstruosas tormentas, nacidas en los trópicos moderados en otros aspectos, extraen del mar las enormes cantidades de combustible requeridas para mantenerlos durante sus cortas y violentas vidas.

Ya que el cambio de energía es por varios órdenes de magnitud mayor que en otras tormentas tropicales más comunes, los huracanes equivalen a un "laboratorio" único para el examen de fuerzas oceánicas y atmosféricas (ver Malkus, 1962 y referencias citadas). A pesar de ello es virtualmente imposible tomar medidas detalladas de los cambios en temperatura de aguas *in situ*. Pero, un fortuito conjunto de circunstancias permitió apreciar cambios en la distribución de temperaturas acuáticas producidos por el Huracán Carla en el noroeste del Golfo de México, que se "conservaron" para investigación en momentos más quietos.

AGUAS DEL NOROESTE DEL GOLFO EN EL OTOÑO DE 1961

Una capa de agua de baja salinidad existe durante el año a lo largo de la costa noroeste del Golfo. Sus variaciones en salinidad, anchura y espesor dependen primordialmente del volumen de escurrimiento fluvial que llega a través de numerosos estuarios y lagunas. Usualmente la salinidad superficial es de un 30.00% cerca de la orilla. Una salinidad de 36.50% ocurre a distancias de 30 a 50 kilómetros de la costa. El agua de 30.00% puede llegar a profundidades de 20-30 metros, encontrándose por debajo salinidades de 36.00% hasta 40.50 metros.

En Septiembre de 1961, el agua superficial salobre formaba una saliente que se extendía por 120 kilómetros de la costa, entre la frontera con México y Galveston, Texas.

HEAT LOSS FROM THE WATERS OF THE NORTHWEST GULF OF MEXICO DURING HURRICANE CARLA

R. E. STEVENSON * and R. S. ARMSTRONG *

That the ocean is the basic source of energy for marine atmospheric perturbations, large and small, there can be little doubt. However, the most dramatic and intense interaction takes place during the full hurricane. These monstrous storms, born in the otherwise moderate tropics, draw from the sea the awesome quantities of fuel required to sustain them through their short but violent lives.

Because the energy exchange is several order of magnitude greater than that in the more usual tropical storm, hurricanes provide a unique "laboratory" for the examination of atmosphere and ocean forces (see Malkus, 1962, and references therein). However, it is virtually impossible to take detailed *in situ* measurements of water temperature changes. It was, therefore, a fortuitous set of circumstances by which changes in the water temperature distribution wrought by Hurricane Carla in the northwest Gulf of Mexico were "preserved" for investigation at a more peaceful time.

NORTHWEST GULF WATERS IN THE FALL, 1961

Throughout the year a low-salinity layer of water lies along the coast of the northwest Gulf. The variations in the salinity, width and thickness of the layer are dependent primarily upon the volume of river run-off coming through the numerous estuaries and lagoons. Usually, the surface salinity is approximately 30.00‰ close to the shore. A salinity of 36.50‰ is usual at distances of from 30 to 50 kilometers from the coast. The water of 30.00‰ may extend to depths of 20-30 meters, below which salinities of 36.00‰ are encountered at 40-50 meters.

In September 1961, the brackish surface water lay in a bulge which extended some 120 kilometers from the coast between the Mexican Border and Galveston, Texas. It was

* A & M University of Texas.

* A. & M. University of Texas.

Sobre esta saliente cruzó el Huracán Carla el 10 y 11 de Septiembre (Fig. 1).

Un mes más tarde, entre el 4 y 9 de Octubre, un grupo de científicos a bordo del R/V "Hidalgo", del A & College of Texas, realizó una investigación de la distribución de temperaturas y salinidad. Muchos trazos de registros de batitermógrafo revelaron inversiones de temperatura con magnitudes hasta de 2.5°C , que se extendían a profundidades de 83 metros (Fig. 2). Todas las inversiones ocurrían en el área de la saliente de agua salobre, cuya salinidad era de 29.76‰ cerca de la orilla y de 30.00‰ a profundidades de casi 40 metros. El agua de 36.00‰ estaba en casi toda el área por debajo de 100 metros, aunque de 60 a 70 metros las salinidades generalmente se acercaban al 35.00‰.

Fue el conjunto de una extensión mayor que la normal de agua de baja salinidad y la intrusión del huracán en el

over this bulge that Hurricane Carla swept on September 10 and 11 (Fig. 1).

A month later, between October 4 and 9, scientists cruised aboard the R/V "Hidalgo", of the A & M College of Texas, to investigate the distribution of temperatures and salinity. Many of the traces from bathythermograph casts revealed temperature inversions, with magnitudes as great as 2.5°C , extending to depths of 83 meters (Fig. 2). The inversions were all within the area of the brackish bulge. Salinities of 29.76‰ were encountered near shore, and salinities of 30.00‰ were measured through depths of 40 meters. In most of this area, water of 36.00‰ lay below 100 meters, although at 60 to 70 meters the salinities were usually near 35.00‰.

It was the concurrence of the greater-than-normal extension of low-salinity water and the intrusion of the hur-

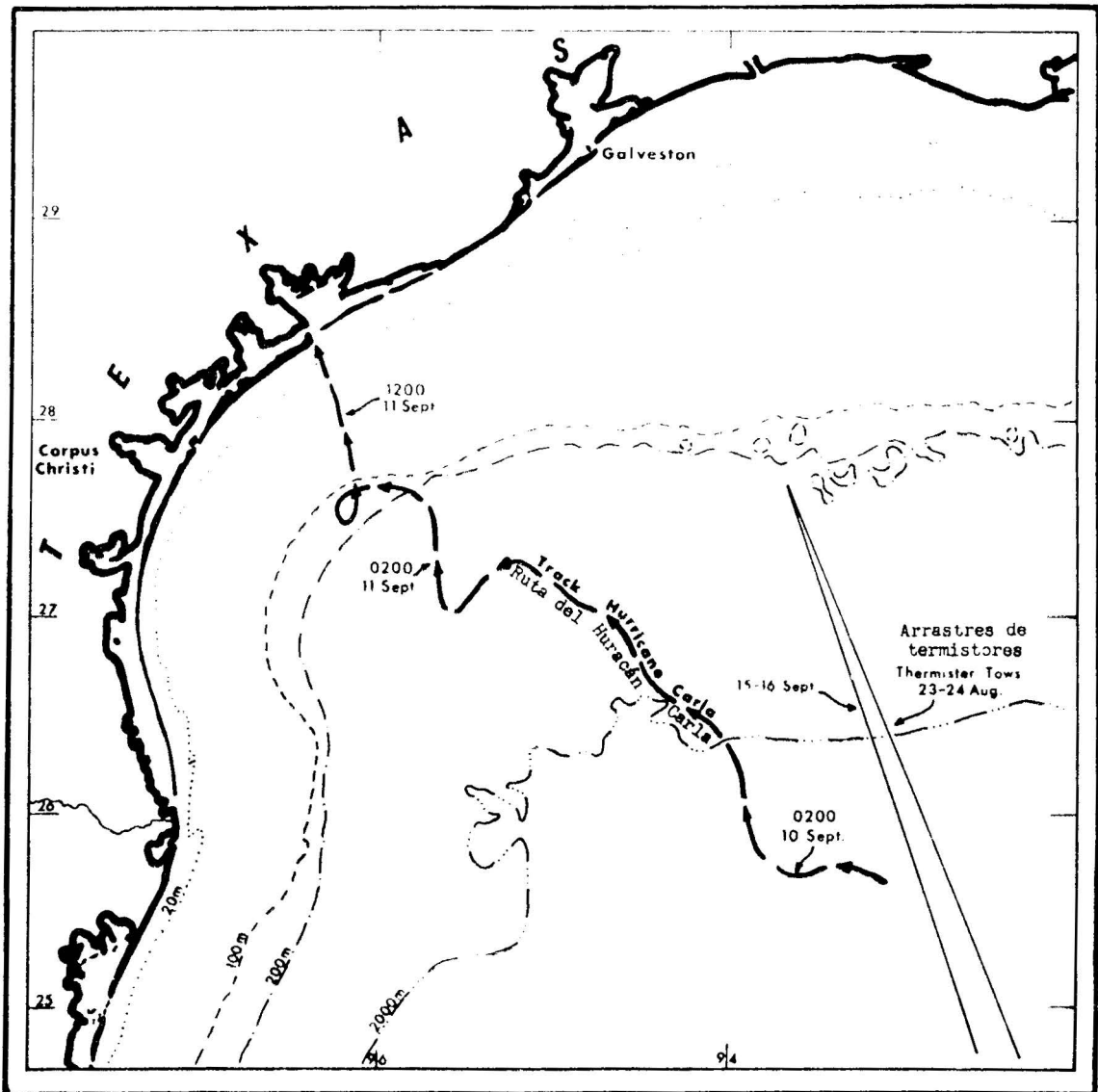


Fig. 1. Ruta del Huracán "Carla" el 10 y 11 de Septiembre de 1961 trazada por el radar del U.S. Weather Bureau en Corpus Christi y Galveston, Texas y ubicaciones de los arrastres de cadena de termistores desde el barco "Hidalgo".

Fig. 1. The track of Hurricane "Carla" on 10 and 11 September, 1961 as plotted by U. S. Weather Bureau radar at Corpus Christi and Galveston, Texas, and locations of thermistor-chain tows made from the R/V "Hidalgo".

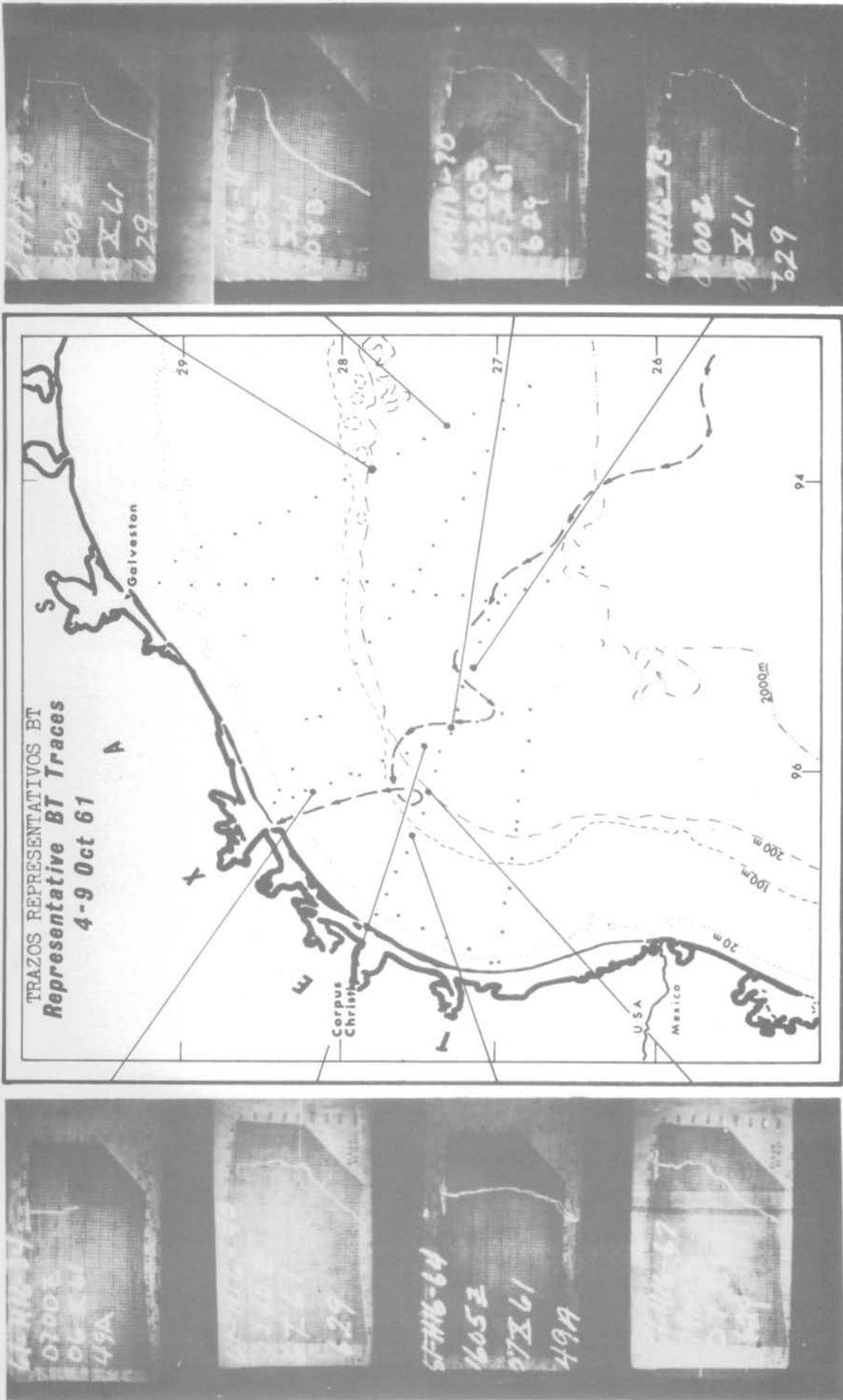


Fig. 2. Ubicación de moldes batitermográficos desde el barco "Hidalgo" del 4 al 9 de Octubre de 1961 y trazos representativos de temperatura.

Fig. 2. Location of bathythermograph casts made from the R/V "Hidalgo" on 4-9 September, 1961, and representative temperature traces.

noroeste del Golfo lo que permitió "conservar" las inversiones de temperatura durante los primeros días de Octubre. La pérdida de calor en aguas superficiales, bajo el huracán, redujo las temperaturas del agua causando las inversiones. Por existir una capa salobre, las bajas temperaturas no produjeron inestabilidad y como resultado del ligero calentamiento y cambio lateral durante las siguientes semanas, la inversión permaneció estable.

Al sureste de Galvestón, donde la distribución vertical de salinidad era más típica de aguas del Golfo, la pérdida de calor en la superficie causó inestabilidad en las capas superiores. La consecuente agitación convectiva produjo una capa isotérmica que llegaba a profundidades de 60 metros (Fig. 2).

DISTRIBUCIÓN DE LA TEMPERATURA

La distribución de temperaturas en aguas superficiales al comenzar Octubre reflejaba la influencia de Carla (Fig. 3). El agua más caliente se concentraba en el área donde el huracán se desvió de su curso al noroeste en tanto que el agua más fría se situaba más cerca de los límites inferiores de la capa de baja salinidad y sobre la somera plataforma, bajo la ruta de la tormenta.

ricane into the northwest Gulf which resulted in the "preservation" of the temperature inversions through the early days of October. The loss of heat in the surface waters to the hurricane lowered the water temperatures, forming the inversions. Because of the brackish layer, the lowered temperatures did not produce instability and, as a result of negligible heating and lateral exchange during the following weeks, the inversions remained stable.

To the southeast of Galveston, where the vertical distribution of salinity was more typical of Gulf water, the heat loss from the surface caused instability in the upper layers. The consequent convective stirring produced an isothermal layer which extended to depths of 60 meters (Fig. 2).

THE TEMPERATURE DISTRIBUTION

The distribution of surface water temperatures in the early days of October reflected the influence of Carla (Fig. 3). Warmer water was centered in the area where the hurricane deviated from its northwesterly course, whereas colder water was situated near the outer boundaries of the low-salinity layer, and over the shallow shelf beneath the track of the storm.

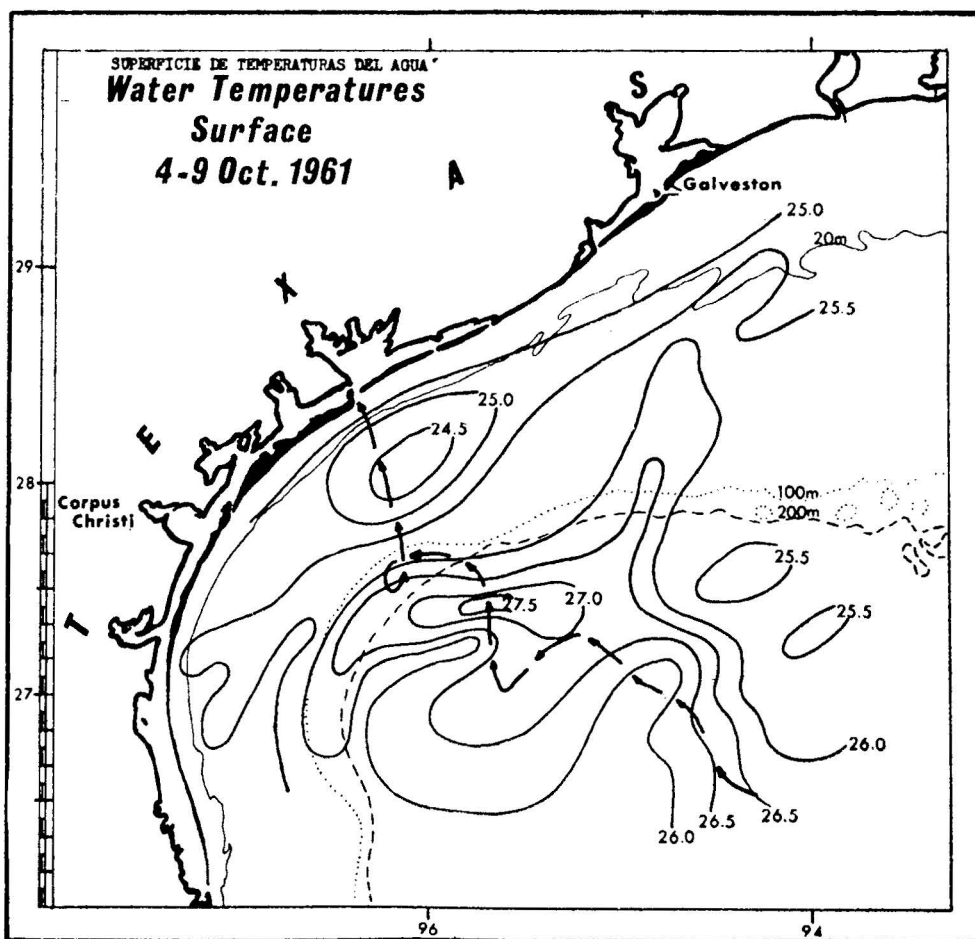


Fig. 3. Distribución de temperaturas superficiales de aguas del 4 al 9 de Octubre de 1961.

Fig.3. The distribution of surface water temperatures on 4-9 October, 1961.

A profundidades de 50 metros (Fig. 4), las principales "manchas" de aguas caliente y fría estaban mucho mejor definidas. Los efectos de inversiones de temperatura se notaban cuando eran algo más cálidas de 28.0°C que en la superficie inmediatamente superior. Más lejos de la orilla y a la derecha de la ruta del huracán, el agua fría indicaba estructuras de temperatura modificadas donde había salinidades típicas de aguas del Golfo.

La influencia del huracán no se limitaba a las capas superficiales, pues había transporte ascendente de calor desde profundidades mayores de 100 metros, ejemplificándose mejor por cambios sucedidos en la configuración horizontal y vertical del termoclinal. En las Figuras 5 y 6 se dibujaron esquemas semi-diagramáticos de datos recogidos en arrastres de termistores en cadena a lo largo de la ruta indicada en la Figura 1. El 23 de Agosto hubo un termoclinal típico de estas aguas del Golfo que exhibían una superficie plana a profundidades entre 65 y 70 metros. El espesor del termoclinal decrecía en dirección al mar abierto, pero la isoterma de 26°C permanecía como límite superior en toda la longitud de agua medida.

Durante el huracán aguas a 26°C fueron acarreadas a la capa superficial perturbada y la isoterma de 25°C marcaba

At depths of 50 meters (Fig. 4), the main "patches" of warm and cold water were even more sharply defined. The effects of the temperature inversions were noted where temperatures were slightly greater than 28.0°C warmer than those at the immediately overlying surface. Farther from shore and to the right of the hurricane track, the cooler water indicated modified temperature structures where typical Gulf-water salinities occurred.

The influence of the hurricane was not restricted to the surface layers for there was an upward transport of heat from depths greater than 100 meters. This was best exemplified by changes which took place in the vertical and horizontal configuration of the thermocline. For Figures 5 and 6, semi-diagrammatic sketches were drawn from data gathered by thermistor-chain tows along the tracks noted in Figure 1. On August 23, there was a thermocline typical of these Gulf waters, exhibiting a flat surface at depths of from 65 to 70 meters. The thickness of the thermocline decreased in an offshore direction, but the 26°C isotherm remained as the upper limit throughout the length of water measured.

During the hurricane, 26°C water was carried into the disturbed surface layer, and the 25°C isotherm marked the

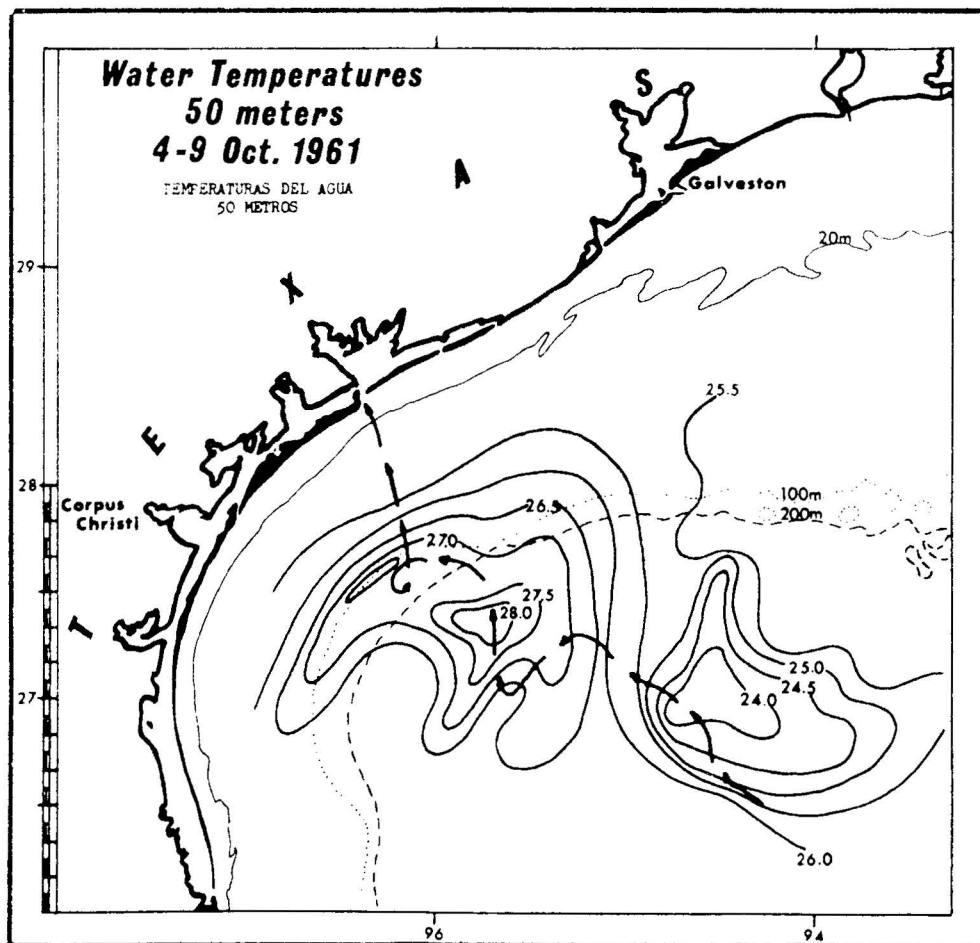
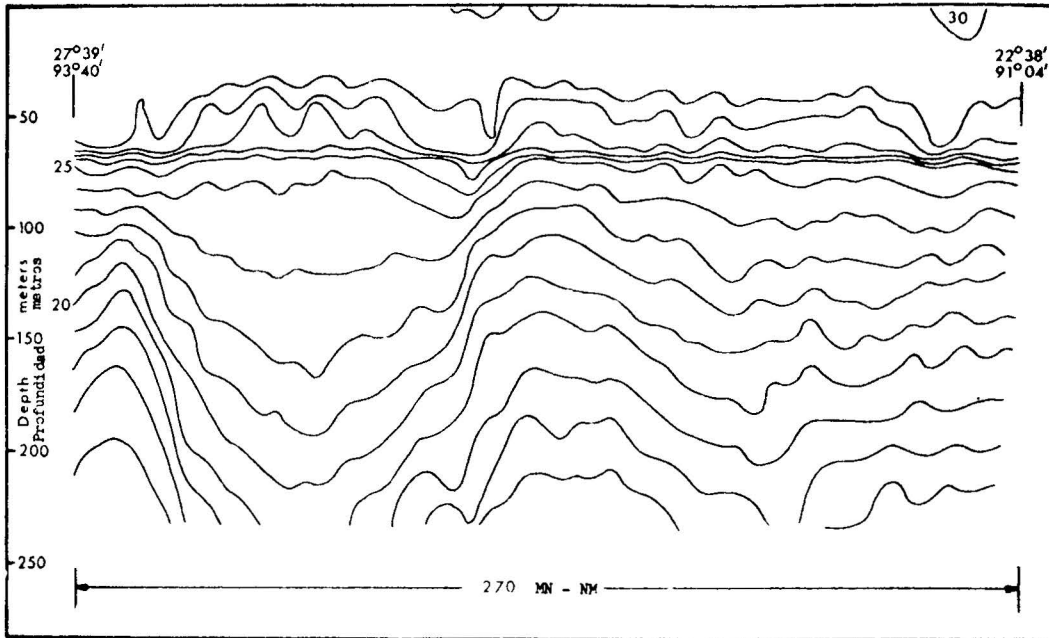


Fig. 4. Distribución de temperaturas de agua a la profundidad de 50 metros del 4 al 9 de Octubre de 1961.

Fig. 4. The distribution of water temperatures at a depth of 50 meters on 4-9 October, 1961.

Temperature Profile

August 23, 1961



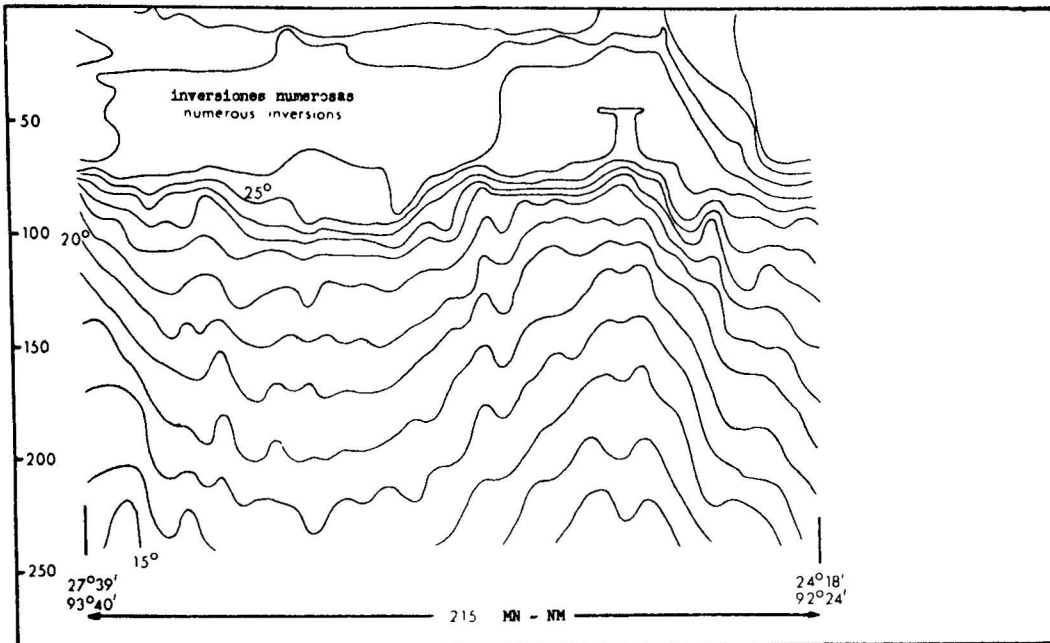
PERFIL DE TEMPERATURA
Agosto 23, 1961

Fig. 5. Representación semi-diagramática de la distribución vertical de temperaturas de agua al sur de Galveston el 23 de Agosto de 1961. Los datos se obtuvieron de un arrastre de termistores en cadena desde el barco "Hidalgo".

Fig. 5. A semi-diagrammatic representation of the vertical water temperature distribution south of Galveston on 23 August, 1961. Data were obtained from a thermistor-chain tow made from the R/V "Hidalgo".

Temperature Profile

September 15, 1961



PERFIL DE TEMPERATURA
Septiembre 15, 1961

Fig. 6. Representación semi-diagramática de la distribución vertical de temperaturas de agua al sur de Galveston el 15 de Septiembre de 1961. Los datos se obtuvieron de un arrastre de termistores en cadena desde el barco "Hidalgo".

Fig. 6. A semi-diagrammatic representation of the vertical water temperature distribution south of Galveston on 15 September, 1961. Data were obtained from a thermistor-chain tow made from the R/V "Hidalgo".

la parte superior del termoclinel el 15 de Septiembre (Fig. 6). La superficie del termoclinel ya no era plana, deprimiéndose hacia la orilla y hacia el mar abierto en la región en que se cruzaban las rutas del huracán y de los termistores en cadena. Comparando ambos perfiles (Figs. 5 y 6), se revela que después de la tormenta las isotermas de 24° y 25°C eran más profundas en el área cercana a la orilla y que otras inferiores al termoclinel eran de 18 a 70 metros más someras que el 23 de Agosto. El máximo desplazamiento ascendente estaba en el agua profunda (20°C , por ejemplo).

La topografía de la isoterma de 25°C (cima del termoclinel) durante los días 4 a 9 de Octubre se asemejaba mucho a la configuración de distribución de temperaturas. Pero, si al sur de Galveston y aguas afuera de la rompiente de la plataforma, la superficie del termoclinel estaba generalmente entre 50 y 75 metros al oeste se hundía hasta profundidades de 102 metros (Fig. 7). Desde el borde de la plataforma hacia tierra la profundidad del termoclinel disminuía abruptamente y faltaba en aguas menos profundas de 50 metros a lo largo de la ruta del huracán (Ver Fig. 2).

upper part of the thermocline on September 15 (Fig. 6). The surface of the thermocline was no longer flat, having been depressed to the shoreward and seaward of the region where the tracks of the hurricane and thermistor tow crossed. A comparison of the two profiles (Figs. 5 and 6) reveals that after the storm the 24° and 25°C isotherms were deeper in the nearer-shore area and that those below the thermocline were from 18 to 70 meters shallower than on August 23. The greater upward displacements was in the deeper water (20°C , for example).

The topography of the 25°C isotherm (top of the thermocline) during the days of October 4-9, closely resembled the configuration of the temperature distribution. Whereas south of Galveston and seaward of the shelf break, the thermocline surface was generally between 50 and 75 meters, to the west it was depressed to depths of 102 meters (Fig. 7). From the edge of the shelf shoreward, the depth to the thermocline decreased abruptly, and, along the track of the hurricane, it was absent in waters shoaler than 50 meters (see Fig. 2).

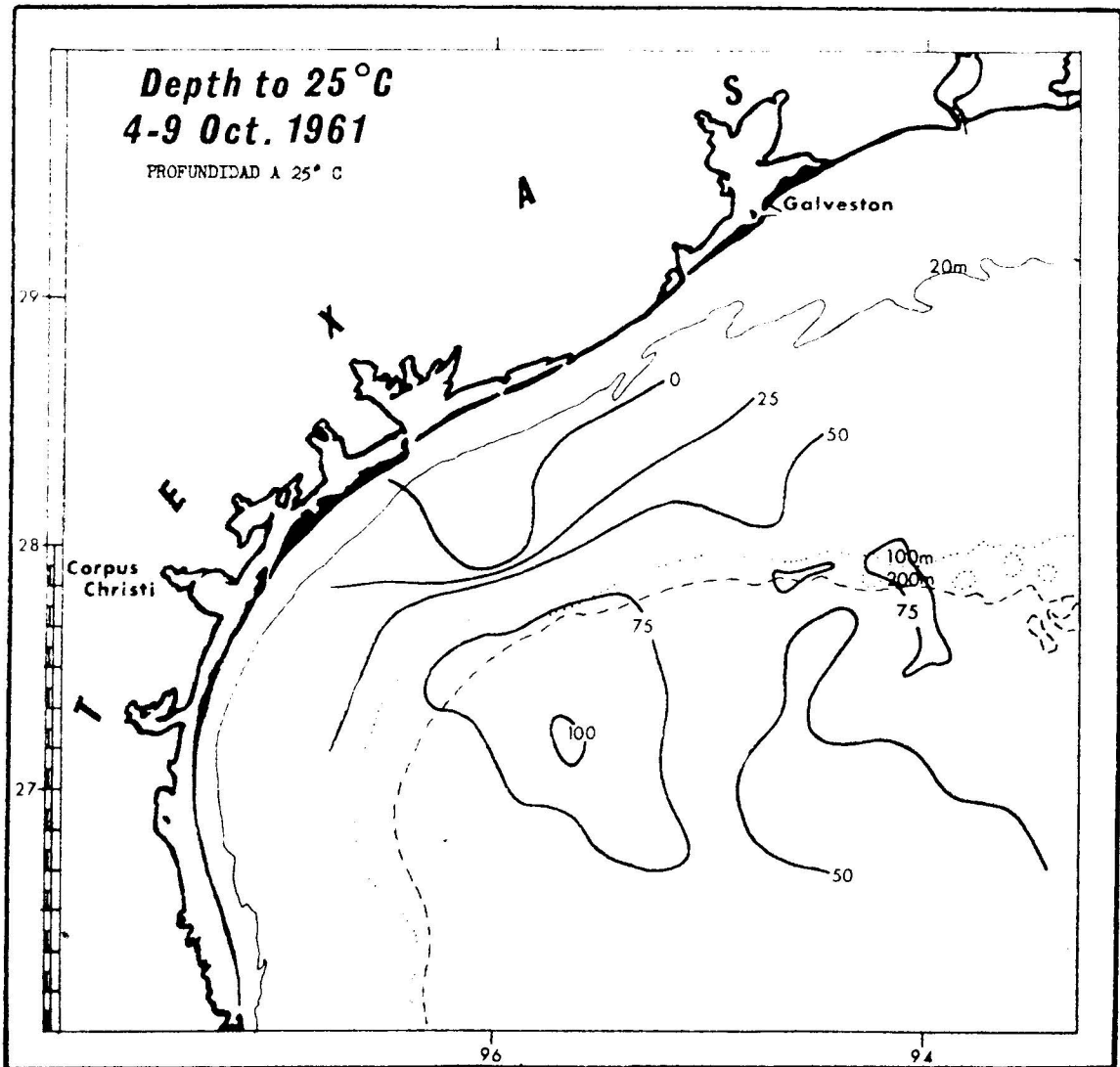


Fig. 7. Topografía de la isoterma de 25°C del 4 al 9 de Octubre de 1961.

Fig. 7. The topography of the 25°C isotherm on 4-9 October, 1961.

PERDIDA DE CALOR EN LAS AGUAS

HEAT LOSS FROM THE WATER

Con tales datos puede determinarse con razonable seguridad la magnitud de la pérdida de calor en el mar bajo el Huracán Carla en el período de 24-horas, entre las 1200 del 10 de Septiembre y las 1200 del 11 de Septiembre. El volumen de agua arrastrado en la interacción se determinó al examinar las profundidades a que se extendían las aguas superficiales más frías (es decir, las profundidades del fondo de las inversiones de temperatura). La configuración de distribución de las profundidades (Fig. 8) recuerda la topografía de la temperatura y del termoclinal. En el área del agua superficial salobre se encontraron inversiones hasta una milla de la playa (ver Fig. 2). Al este, sin embargo, las profundidades de inversión se hacían más someras abruptamente en el límite de la capa de baja salinidad.

From these data, it is possible to determine, with reasonable assurance, some magnitude of the heat lost from the sea to Hurricane Carla over the 24-hour period from 1200, September 10 to 1200, September 11. The volume of water involved in the interaction was determined by examining the depths to which the cooler surface waters extended (that is, the depths to the bottom of the temperature inversions). The distribution pattern of the depths (Fig. 8) is reminiscent of the temperature and thermoclinal topography. In the area of the brackish surface water, inversions were found to within one mile of shore (see Fig. 2). To the east, however, the inversion depths shoaled abruptly at the boundary of the low-salinity layer.

La variación de temperatura de inversión en cada estación (Fig. 9) se midió entre la temperatura más baja y la que tendría el agua si no hubiese pérdida de calor en

The temperature range in the inversion at each station (Fig. 9) was measured from the lowest temperature to that which the water would have had had there been no

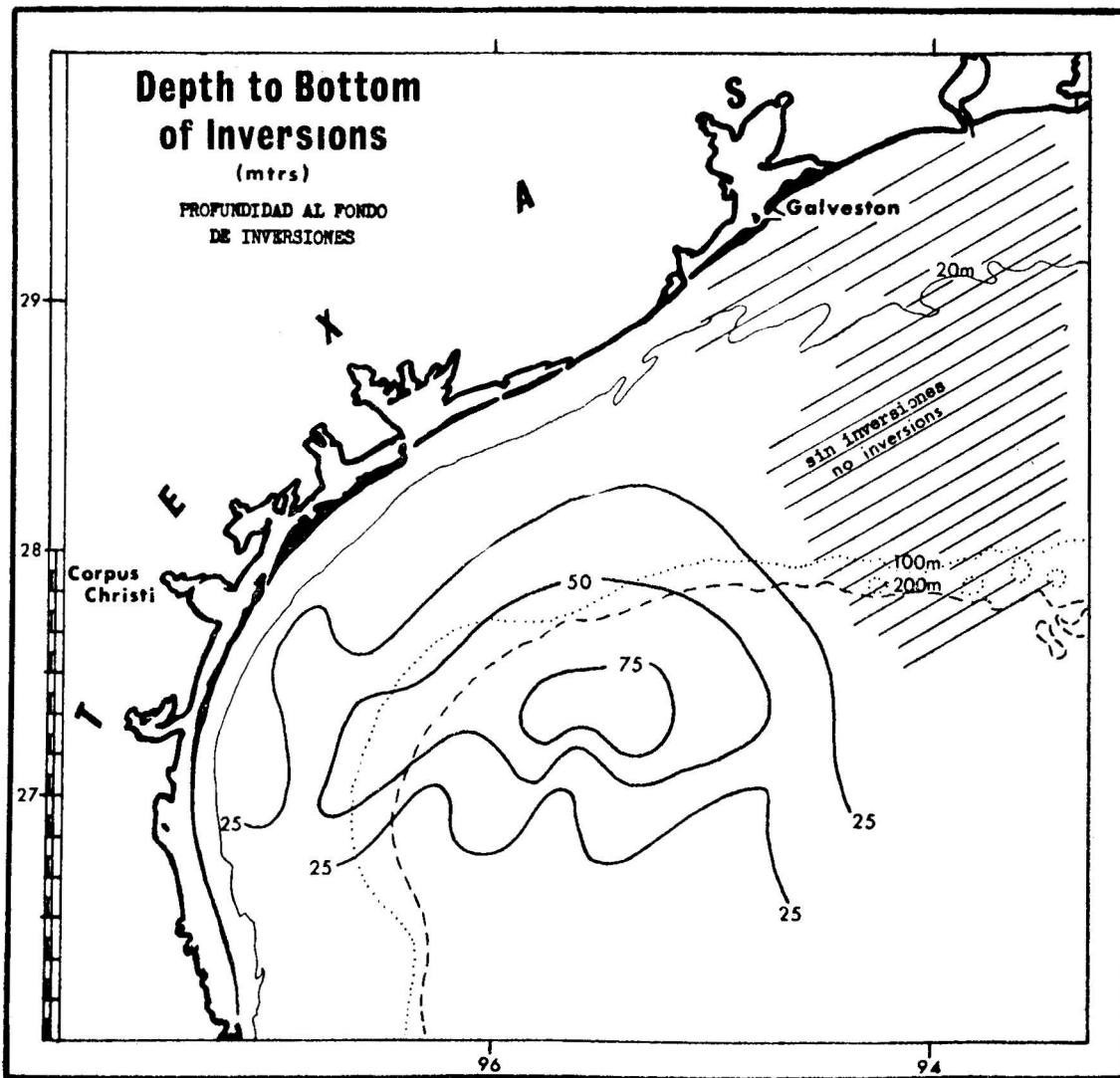


Fig. 8. Distribución de profundidades en la base de las inversiones de temperatura del 4 al 9 de Octubre de 1961.

Fig. 8. The distribution of depths to the base of temperature inversions on 4-9 October, 1961.

la profundidad dada. Esta última temperatura se obtuvo por proyección racional del trazo batitermográfico. La diferencia máxima fue de 2.5°C en una localidad y la distribución de diferencias de temperatura disimilar de otras configuraciones previamente conocidas. Las mayores variaciones se vieron al oeste de la ruta del huracán, cerca de la desviación regional de ruta (Fig. 1), sobre la plataforma en aguas a 100 metros de profundidad. Sin embargo, en aguas cuya disminución de temperatura era de 1.5°C o más, estaban cerca del curso de la tormenta.

Analizando las profundidades de inversión real y de diferencias de temperatura en cada estación batitermográfica, se calculó la pérdida de calor durante el período escogido de 24-horas en 2.5×10^{17} cal/día (con promedio de 6×10^{13} cal/seg.). Es obvio que tales valores no representan la pérdida total de calor, pues ciertamente hubo cambio de energía en aguas de salinidad normal al sureste de Gal-

veston. This latter temperature was obtained by a rational projection of the bathythermograph trace. The maximum difference was 2.5°C , at one location. The distribution of temperature differences was dissimilar from all other patterns previously noted. The greatest ranges were to the west of the hurricane track, near the region of path-deviation (Fig. 1), and lay nearly over the shelf break, in waters of 100 meters depth. Nevertheless, waters where a temperature decrease of 1.5°C or more occurred, lay close to the course of the storm.

From an analysis of the actual inversion depths and temperature differences at each bathythermograph station, the heat loss during the 24-hour period chosen was calculated to be 2.5×10^{17} cal/day (an average of 6×10^{13} cal/sec). It is obvious that these values do not represent the total heat loss, for certainly energy was exchanged in waters of normal salinity lying southeast of Galveston. Even so, estimates of

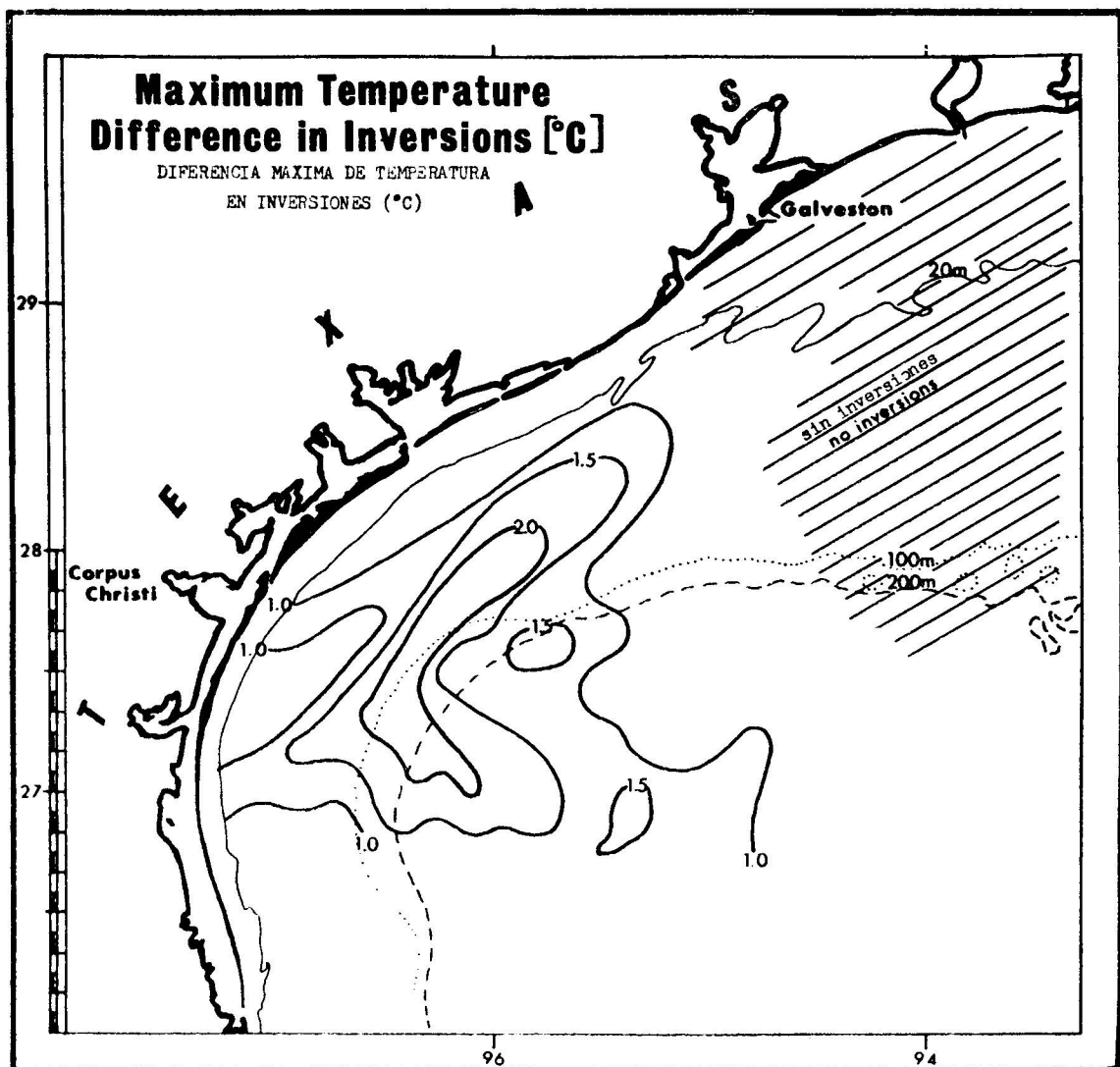


Fig. 9. Distribución de diferencias máximas de temperatura de inversiones, deducida de datos recogidos del 4 al 9 de Octubre de 1961.

Fig. 9. The distribution of maximum temperature differences in inversions, as deduced from data gathered on 4-9 October, 1961.

veston. Pero, las estimaciones del probable cambio de calor en tales aguas cambian la cifra dada en menos de un orden de magnitud.

Parece interesante comparar dichos valores con los determinados por Riehl y Malkus (1961) para el balance de energía cinética del Huracán Daisy, ya que notaron que en un radio de 40 millas náuticas desde el ojo, ese balance era igual a 5.6×10^{14} k. j./día (o 12.2×10^{16} cal/día), con un promedio de balance de energía cinética de 3.4×10^{13} cal/seg.

AGRADECIMIENTOS

Deseamos expresar nuestro aprecio al Dr. Bryan Logan, quien realizó los arrastres de termistores; al Sr. Jack Hill, quien compiló los datos de termistores y al Sr. Oscar Chancey, quien dirigió el crucero en Octubre de 1961. Todos pertenecen al Departamento de Oceanografía y Meteorología del A & M College of Texas.

Se recibió ayuda financiera para este trabajo de la Oficina de Investigación Naval bajo Contrato Nonr 2110 (4) NR 083-036.

the probable heat transfer in these waters change the figure given by less than an order of magnitude.

It is of some interest to compare these values with those determined by Riehl and Malkus (1961) for the kinetic energy budget of Hurricane Daisy. They noted that for a radius of 40 nautical miles from the eye, the budget equaled 5.6×10^{14} k.j./day (or 12.2×10^{16} cal/day), with an average kinetic energy budget of 3.4×10^{13} cal/sec.

ACKNOWLEDGMENTS

We wish to note our appreciation to Dr. Bryan Logan who was responsible for the thermistor tows; to Mr. Jack Hill who compiled the thermistor data; and to Mr. Oscar Chancey who was cruise leader on the October 1961 cruise. All are with the Department of Oceanography and Meteorology, A & M College of Texas.

Financial support for this work was from the Office of Naval Research, under Contract Nonr 2110(4) NR083-036.

BIBLIOGRAFIA

- RIEHL, H. & J. S. MALKUS. 1961. Some Aspects of Hurricane Daisy, 1958, N.H.R.P., Rept. No. 46, U. S. Weather Bureau.
- MALKUS, J. S. 1962. Large scale interactions. *The Sea*, Vol. 1, *Physical Oceanography*, New York, (Interscience Publishers), pp. 88-294.

BIBLIOGRAPHY