

Modelación numérica de la surgencia provocada por los huracanes (MONSAC3)

Rafael Pérez Parrado, Isidro Salas García y Jesús Dole Chávez

RESUMEN: En el presente trabajo se desarrolla un modelo dinámico de alta resolución para pronosticar la surgencia provocada por los huracanes sobre la línea costera y los mares cercanos que rodean a Cuba. Se utiliza una forma linealizada de las ecuaciones de transporte para calcular la surgencia sobre una rejilla rectangular de 60 x 60 puntos, con un paso espacial de 2 Km. La tormenta puede moverse en cualquier dirección y velocidad con relación a la línea costera. En este modelo se utiliza la batimetría real de los alrededores de Cuba. Se presentan algunos resultados con huracanes de archivo y otros en tiempo real (Isidore y Lili, 2002).

Numerical Modeling of Storm surge (MONSAC3)

Rafael Pérez Parrado, Isidro Salas García and Jesús Dole Chávez

ABSTRACT: In this article a bidimensional numerical dynamic model is developed for forecasting of hurricane storm surges on Cuba's insular shelve and coastlines. A linearized form of the transport equations is used to compute surge in a rectangular grid of (60 x 60) points and space step of 2 km. The storm move in any fixed direction and speed relative to line coast. The model has used the actual bathymetric data around Cuba. Some results with archive and real hurricanes are presented.

Modelación numérica de la surgencia provocada por los huracanes (MONSAC3 INTRODUCCION)

Los elementos adversos mas importantes del tiempo asociados a los ciclones tropicales son: los vientos con fuerza de huracán, las inundaciones debido a las intensas lluvias, las marejadas y la surgencia, precisamente, para muchos meteorólogos es la surgencia el más destructivo de ellos, como promedio tiene asociada nueve de cada diez víctimas y el 90 % de los daños materiales que ocurre debido a la afectación de un huracán.

Se define la surgencia como la elevación anormal y temporal del nivel del mar debido al desplazamiento al desplazamiento de un ciclón tropical sobre la plataforma continental o insular. Como promedio afecta unos 160 Km. de la línea costera durante unas seis horas, generalmente el máximo absoluto se presenta a la derecha del punto de llegada a tierra del organismo tropical, próximo al radio de viento máximo. El nivel que alcanza la surgencia puede verse incrementado por la marea astronómica, en dependencia de la incidencia de la pleamar con la surgencia.

El archipiélago cubano ha sido afectado en diferentes ocasiones por intensos huracanes que han ocasionado impresionantes surgencias, entre estas se destaca la ocurrida en la costa sur de la provincia de Camagüey en noviembre de 1932, barrió completamente con el pueblo de Santa Cruz del Sur con el triste saldo de más de 3000 muertes, considerándose el mayor desastre natural que ha sufrido Cuba.

La finalidad del presente trabajo es presentar un modelo dinámico mejorado para el pronóstico de la surgencia que pueden ocasionar los ciclones tropicales sobre la plataforma insular y las costas de Cuba. Para lograr este objetivo se estudiaron las características y el comportamiento del modelos anteriores y se mejoraron algunos elementos como son el esquema en diferencias finitas y la batimetría mas fina dando como resultado el MONSAC3 (Pérez Parrado et al., 2002).

EL MODELO

Sistema de ecuaciones

Se realizaron diferentes pruebas con el esquema de rejilla "B" de Mesinger y Arakawa (1976) para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales que describe la altura de la surgencia y el movimiento del fluido, finalmente se decidió cambiar el esquema utilizado en las versiones anteriores, MONSAC1(Pérez Parrado y García 1994) y MONSAC2 (García, et. al, 1998), no se varió el algoritmo utilizado para el cálculo de los diferentes coeficientes del modelo, ni las parametrizaciones utilizadas para el cálculo de las tensiones superficiales y de fondo.

El sistema de ecuaciones utilizado fue la forma linealizada de las ecuaciones de transporte de masa planteada por Harris y Jelesnianski (1964) y Jelesnianski (1966, 1972), el cual se presenta a continuación:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} &= -gD(x,y)\frac{\partial h}{\partial x} + fv + \frac{D(x,y)}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\tau_s^x(x,y,t)}{\rho} + \frac{\tau_f^x(x,y,t)}{\rho} \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -gD(x,y)\frac{\partial h}{\partial y} + fu + \frac{D(x,y)}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\tau_s^y(x,y,t)}{\rho} + \frac{\tau_f^y(x,y,t)}{\rho} \\ \frac{\partial h}{\partial t} &= \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}\end{aligned}\quad (1)$$

Donde: u, v transporte de masa en las direcciones x, y respectivamente
 g aceleración de la gravedad
 $D_{(x,y)}$ profundidad del fluido no perturbado
 h altura de la surgencia (en metros), por encima del nivel medio del mar
 f parámetro de Coriolis
 ρ densidad del agua de mar
 P presión atmosférica
 $\tau_s^{(x)} \tau_s^{(y)}$ componentes de la tensión de superficie
 $\tau_F^{(x)} \tau_F^{(y)}$ componentes de la tensión de fondo

Cálculo de las tensiones superficial y de fondo.

Las componentes de la tensión superficial se consideran como una función de la velocidad del viento (Jelesneanski 1966) siendo:

$$\begin{aligned}\tau_s^x &= k\rho_a|V|u \\ \tau_s^y &= k\rho_a|V|v\end{aligned}\quad \text{donde: } |V| = \sqrt{u^2 + v^2}$$

ρ_a es la densidad del aire
 u, v componentes de la velocidad del viento en superficie
 k constante

las componentes de fondo se tomaron de acuerdo a las proposiciones de Yamasaki et al (1961)

$$\begin{aligned}\tau_f^x &= k_1|V|u - k_2\tau_s^x \\ \tau_f^y &= k_1|V|v - k_2\tau_s^y\end{aligned}$$

en las cuales k_1 y k_2 son constantes

Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera establecidas después de diferentes exámenes para este modelo son las siguientes:

- La componente de transporte normal a la costa y a la frontera opuesta a la costa es cero ($V=0$), igual sucede con la derivada normal a ambas fronteras, o sea ($\square u / \square y = 0$).
- La componente de transporte normal a las fronteras laterales es cero ($v=0$), lo mismo sucede con la derivada normal a estas fronteras, ($\square v / \square x = 0$).

- Los valores de altura de la surgencia en las cuatro fronteras se sustituyen por los valores del punto interior inmediato (en cada paso del tiempo), este proceso también es válido para las componentes u y v no especificadas anteriormente.

- En los cuatro puntos de las esquinas (puntos donde se interceptan dos fronteras), los campos h , u y v toman los valores del punto inmediato interior que está en diagonal a dichos puntos.

Esquema numérico

Para obtener la solución aproximada del sistema de ecuaciones diferenciales (1) se hará uso de un sistema en diferencias centrado en tiempo y en espacio.

$$\begin{aligned}
 u_{t+1} - u_t &= \frac{\Delta t}{2} \delta_t u = -2(gD(x,y)\delta_x h + fv + \frac{D(x,y)}{\rho} \delta_x P + \frac{\tau_s^{(x)}}{\rho} + \frac{\tau_f^{(x)}}{\rho}) \Delta t \\
 v_{t+1} - v_t &= \frac{\Delta t}{2} \delta_t v = -2(gD(x,y)\delta_y h - fu + \frac{D(x,y)}{\rho} \delta_y P + \frac{\tau_s^{(y)}}{\rho} + \frac{\tau_f^{(y)}}{\rho}) \Delta t \quad (2) \\
 h_{t+1} - h_t &= \frac{\Delta t}{2} \delta_t h = -2(\delta_x u + \delta_y v) \Delta t
 \end{aligned}$$

donde

$$\begin{aligned}
 \delta_x u &= \frac{(u_{i,j+1} - u_{i,j-1})}{2\Delta x} \\
 \delta_y u &= \frac{(u_{i+1,j} - u_{i-1,j})}{2\Delta y} \quad \Delta x = \Delta y = \Delta s
 \end{aligned}$$

De importancia vital al diseñar un modelo dinámico para calcular la surgencia es la representación de las “fuerzas conductoras” del fenómeno, o sea el campo de viento y de presión alrededor del ciclón tropical. En este trabajo estos campos se representan de igual forma que en el MONSAC1 (Pérez Parrado y García 1994). En la Figura. 1 se comparan los perfiles del viento real y el estimado por el modelo para el huracán Emily de 1993.

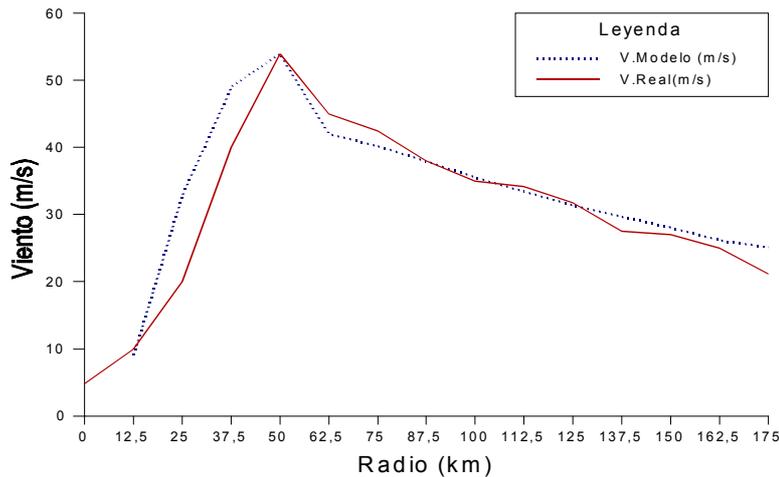


Figura 1 Comparación entre el perfil real del viento (tomado de Avila, 1993) y el modelado para el huracán Emily (31 de agosto de 1993).

Un gran número de investigadores han señalado el importante papel que desempeña la batimetría de un lugar en la amplificación de la surgencia, cuando un huracán se desplaza sobre aguas poco profundas, de lo anterior se deriva que el calculo de la surgencia mediante un modelo donde se considera una batimetría ficticia, indudablemente ya tiene una limitante al calcular los rasgos del campo de la surgencia. Por esta razón se obtuvo una base batimétrica para los alrededores de Cuba, la cual consiste de 9800 datos batimétricos distribuidos de manera uniforme en una rejilla rectangular con 2 Km. de paso espacial.

Al analizar las características físico-geográficas de la plataforma insular de Cuba, se construyeron nueve cuencas, Figura. 2 El número de cada cuenca es un parámetro de entrada al modelo, usado en el algoritmo computacional como parámetro de control para situar el centro del ciclón tropical y para controlar la transformación en coordenadas de rejilla de las coordenadas geográficas.

Al efectuar diferentes corridas, una vez sustituido el fondo ficticio utilizado en el modelo MONSACI por el real, fue necesario implantar nuevas condiciones de frontera, para evitar la ocurrencia de la inestabilidad computacional que se presentaba.

Por tal motivo se implantaron las condiciones de frontera propuestas por Jelesnianski, et al (1992) entre aguas poco profunda, mediana y profunda.

Aguas profundas (mayor a 45 metros)

$$h_{i,j} = (h_0)_{i,j}$$

Medianamente profundas (mayor que 23 metros y menor de 45 metros)

$$\left(\frac{\partial h}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial y}\right)_{i,j} = \left(\frac{\partial h_0}{\partial x}, \frac{\partial h_0}{\partial y}\right)_{i,j}$$

Aguas poco profundas (menores de 23 metros)

$$\left((D) \frac{\partial h}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial y} \right)_{i,j} = \left((D) \frac{\partial h_0}{\partial x}, \frac{\partial h_0}{\partial y} \right)_{i-1,j}$$

donde h_0 es la altura hidrostática

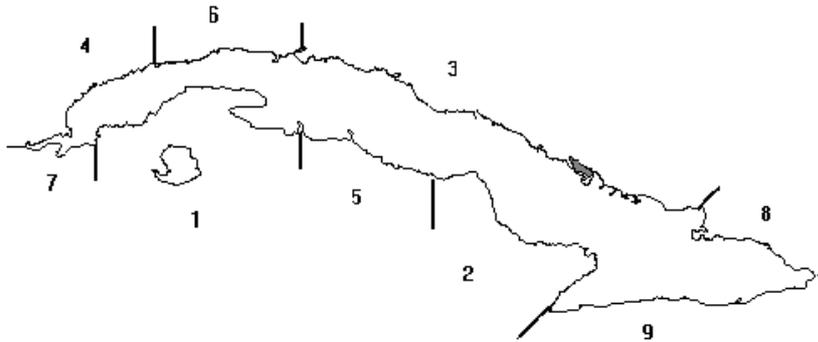


Figura 2 Cuencas seleccionadas para el modelo de surgencia. La numeración es en orden de importancia en la generación de la surgencia, de acuerdo a las características físico geográficas de la plataforma insular...

En el Primer Taller Internacional sobre Ciclones Tropicales (IWTC-I) celebrado en Bangkok, 1985, Jelesnianski (citado en WMO, 1993) resumió los problemas relacionados con el monitoreo de los eventos de surgencia de la siguiente manera:

- (a) Las observaciones son deficientes, casuales y sujetas a cambios
- (b) Los mareógrafos son pocos y situados muy lejos uno de otro y frecuentemente no funcionan bien. Un problema reconocido en la calibración y verificación de los modelos numéricos de surgencia es la falta de archivos de datos de este evento

En Cuba los registros históricos sobre estos eventos son muy aislados. Las pocas observaciones están relacionadas con las marcas dejadas por el nivel de las aguas y las líneas dejadas por los restos de desperdicios, método ampliamente usado, pero en nuestro caso se conoce poco sobre la forma en que fueron realizadas, siendo lo más probable que no se siguiera una metodología totalmente acorde con lo sugerido por la Organización Meteorológica Mundial. (WMO, 1978).

RESULTADOS

De lo expresado en el párrafo anterior se deriva la dificultad de poder realizar una evaluación detallada sobre la habilidad del modelo, por no contar con una muestra histórica que permita comparar los valores de la altura del nivel de las aguas dados por el modelo de surgencia y los valores reales. No obstante, en la Figura. 3 se presenta una comparación entre los resultados del modelo y los registros históricos disponibles del huracán de octubre de 1944 y en las Figuras 4 y 5 se muestran las surgencias calculadas para los huracanes Isidore y Lili en Septiembre y Octubre de 2002.

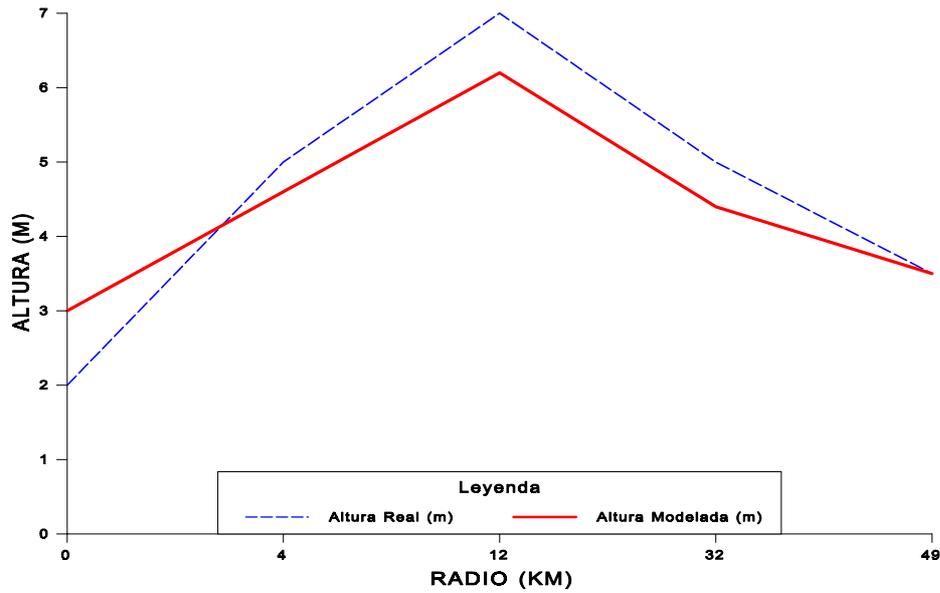
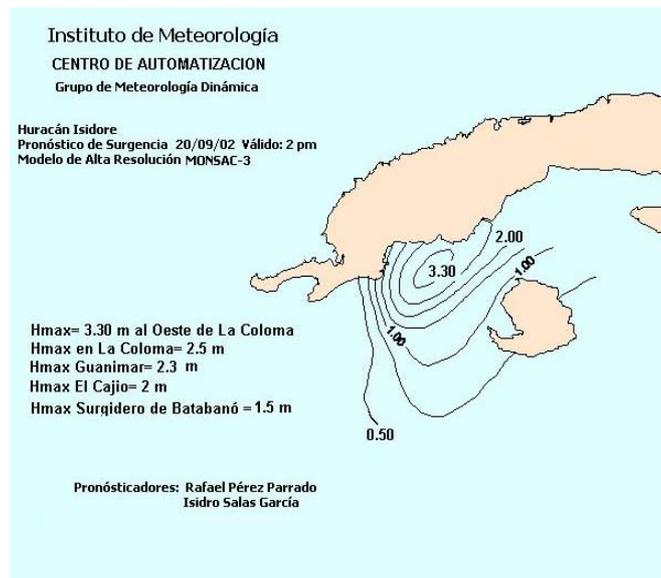
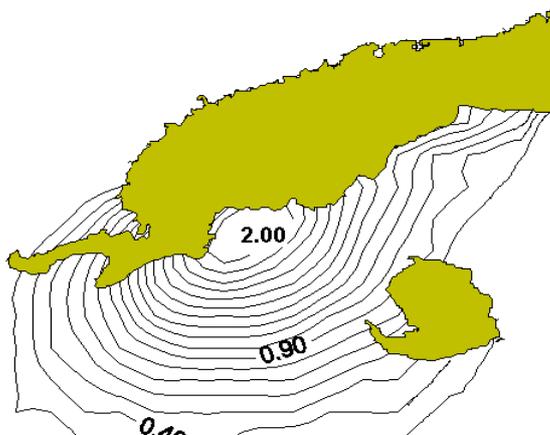


Figura 3 Gráfico de la altura alcanzada por la marea de tormenta durante el huracán de octubre de 1944, de acuerdo a testigos presenciales y el perfil de la surgencia dado por el modelo.



CENTRO DE AUTOMATIZACION
GRUPO DE METEOROLOGIA DINAMICA
HURACAN LILI
SURGENCIA MAXIMA 2.20 M.
PRONOSTICO VALIDO 01/10/02 1 P.M.

Figura 4.
huracán
para el día
de 2002



Surgencia del
Isidoro calculada
20 de Septiembre

Figura 5. Surgencia para el Huracán Lili calculada con el Monsac3 para el día 1 de Octubre de 2002.

Los resultados obtenidos al calcular las surgencias durante la afectación de los huracanes Isidore y Lili fueron muy buenos y permitieron realizar las medidas de protección a la población de esta zona costera, en el caso de Lili se calculó una surgencia máxima de 2 m. y se comprobó que en boca de Galafre en la ensenada de Cortés, el nivel del mar ascendió 1.75 m. (J. M. Rubiera 2002, comunicación personal) valor que está muy próximo al pronosticado.

Otro aspecto muy importante es la preparación anticipada de los planes de evacuación, un requisito previo para la confección de dichos planes es la determinación de costeras propensas a inundaciones debido a la surgencia. La inundación potencial podría ser especificada a través del estudio de eventos pasados ocurridos en la región de interés, pero los huracanes son eventos de rara ocurrencia para muchas regiones del mundo, en consecuencia, muchos de los datos hidrometeoro lógicos no están disponibles para este fin.

Entre las utilidades que brindan los modelos numéricos está la compensación de esa falta de datos. Un producto de gran utilidad en ese aspecto es el EOHW (Jarvinen y Gebert, 1986).

El EOHW representa el valor máximo de la altura alcanzada por la surgencia para cada punto de la rejilla (independiente del tiempo) y brinda una información sobre el comportamiento que tendrá la altura de la surgencia en un escenario dado para distintos ciclones tropicales. Al construir los mapas de EOHW para una cuenca dada es necesario tomar en consideración la climatología de los ciclones que han afectado esa zona.

En este trabajo se obtiene el EOHW para las costas cubanas, construido de la siguiente manera:

Para cada cuenca se corrieron huracanes en las direcciones más probables de afectación (desde un punto de vista climatológico), estas son: S , SE y SW en la

costa sur y E y NE en la costa norte.

Como presión central mínima y viento máximo sostenido se consideró el valor medio para cada intervalo de la escala de intensidad de Saffir / Simpson, (citada por Rappaport y Mc Adie, 1991), el radio de viento máximo fue tomado como 20 Km. y la velocidad de traslación del ciclón 20 Km./h.

Estos resultados constituyen un valioso atlas que se encuentra disponible en el software creado para la explotación del modelo en computadoras personales.

CONCLUSIONES

- La sustitución del fondo ficticio utilizado los modelos anteriores por una base batimétrica real fue un reto que se venció satisfactoriamente, creándose una versión final (MONSAC3) para la modelación dinámica de la surgencia en Cuba en la cual fue necesario incluir nuevas condiciones de fronteras al modelo.
- Los resultados demuestran que los cálculos realizados por el modelo son confiables y seguros y que se pueden utilizar en el trabajo operativo.
- Con este modelo de alta resolución se tiene en Cuba una herramienta de gran precisión para pronosticar objetivamente uno de los eventos más dañino y peligroso de los asociados a un ciclón tropical y significa un paso de avance en la modelación numérica de la surgencia en Cuba.

REFERENCIAS

1. Avila, L. A. (1993): Tropical Cyclone Structure. Forecaster Report. En WMO Tropical Meteorology Research Programme. Report Series. Report No. 46 WMO/TD No. 573, pp. 37-54.
2. García O., R. Pérez Parrado e I. Salas (1998): Modelo numérico para pronosticar la surgencia de los ciclones tropicales. En las Memorias de la

Conferencia Científica sobre ciclones tropicales "Rodríguez Ramírez in Memoriam" 7-9 de Mayo de 1998. pp. 74-80.

3. Harris, D. L., y Ch. Jelesnianski (1964): Some problems involved in the numerical solutions of tidal hydraulics equations. MWR Vol. 92, NO. 9 Dec. pp. 409-422.
4. Jarvinen, B. R. y J. Gebert (1986): Comparison of observed versus SLOSH model computed storm surge hydrographs along the Delaware and New Jersey shorelines for hurricane Gloria, September 1985. NOAA Technical Memorandum NWS, NHC 32, 17 pag.
5. Jelesnianski Ch. P. (1966): Numerical computations of storm surges without bottom stress. MWR Vol. 94, No 6, June pp 379-394.
6. ----- (1972): SPLASH (Special program to List Amplitudes of Surges From Hurricanes): 1. Landfall Storms., Meteorological Development Laboratory Technical Memorandums, 52 pp. (COM-72-10807)
7. -----, J. Chen y W. Shaffer (1992): SLOSH Sea, Lake and Overland Surges from Hurricanes. NOAA Technical Report NWS 48, 18 pag.
8. Mesinger, F. y A. Arakawa (1976): Numerical methods used in atmospheric models. Global. Global Atmospheric Research Programme. WMO-ISCU Joint Organizing Committee. GARP Publication Series No. 17, 64 pag.
9. Pérez Parrado R., I Salas y J. Dole (2002): Monografía sobre los modelos para pronosticar las surgencias producidas por los ciclones tropicales. CITMA, Instituto de Meteorología, La Habana, 93 Pág.
10. ----- y O. García (1994): "Modelación numérica de la surgencia provocada por los huracanes en los alrededores de Cuba. Primera versión. MONSAC1". En Memorias del VIII Congreso Brasileiro de Meteorología, II Congreso Latino-Americano e Ibérico de Meteorología. "La Meteorología en la Prevención de los Desastres". Vol. 2 pp. 502-509.
11. Rappaport, E. N. y C. J. Mc Adie (1991): Hurricane Gilbert (1988) in review and perspective NOAA Technical Memorandum NWS, NHC 45.
12. WMO (1978): Chapter 7. Field Survey of storm surge. En report No. 13. Present Techniques of Tropical Storm Surge Prediction. WMO No. 500 pp 72-75.
13. ----- (1993): Topic Rapporteur reports of the Third WMO/ISCU International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-III). WMO/TD No. 573.
14. Yamasaki, M., T. Ueno and S. Unoki (1961) : Theoretical investigations of typhoon surges along the Japanese coast Reprinted from The Oceanographic Magazine. Vol.13, pp. 51-75.