

PICLOCC.EXE: Localiza cualquier punto de la ROE que se encuentre dentro de la rejilla geográfica. Cada punto de la ROE está rodeado por cuatro puntos de la rejilla geográfica fina de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$, a cada uno de los cuales se les asigna pesos de acuerdo a la distancia que los separa del punto de la ROE y cuya suma es igual a 1. Aquí se cumple la regla de que el punto de rejilla geográfica más cercano tendrá mayor peso. Si un punto de la ROE cayera fuera de la rejilla geográfica, los puntos que lo circundan tendrán igual peso, siempre sumando 1. Tales posiciones y pesos se emplean cuando se interpolan las direcciones y velocidades de los vientos de una rejilla a otra. Este programa recibe como entrada el archivo GD.DAT y genera el archivo WL.DAT, que contiene el listado de los puntos de rejilla geográfica en coordenadas I,J de cada punto de la ROE, con los respectivos pesos.

ANGTRNC.EXE: Cambia las direcciones del campo de vientos original (archivo X.DAT) a direcciones en el campo de vientos de la ROE en un ángulo de rotación constante, para cada punto. Dicha constante representa la diferencia angular, en radianes, entre el ángulo de la rejilla geográfica y el mismo ángulo en la ROE. El programa tiene como entrada el archivo GD.DAT y genera el archivo GR.DAT.

NTERWNC.EXE: Interpola los vientos generados por BWNDC.EXE sobre la ROE. Requiere como entrada los archivos X.DAT, WL.DAT y GR.DAT, para producir un archivo N.DAT, que contiene la información de velocidades y direcciones del viento que serán introducidas en el modelo de olas.

CANIC.EXE: Es el programa portador del modelo de olas de Resio (1981) que simula la generación, propagación y decadencia de la ola. La energía y la propagación se modelan empleando soluciones a la ecuación de transferencia radiativa de la forma:

$$\frac{\partial E_2(f, \theta)}{\partial t} = \vec{V} \times \vec{\nabla} E_2(f, \theta) + S_2(f, \theta) \quad (1.3.1)$$

Donde: f es la frecuencia, θ es la dirección de propagación de la ola, $\vec{V}$ es la velocidad de grupo, E_2 es el espectro direccional de densidad y S_2 es la función de origen direccional espectral.

CANIC.EXE requiere la entrada de los archivos N.DAT, OPCION.DAT y D1.DAT, en tanto que produce los archivos T.DAT, S.DAT, H.DAT y D.DAT. OPCION.DAT es un fichero de opciones que debe ser grabado con las especificidades para la ejecución del modelo como se describe posteriormente D1.DAT es el propio fichero H.DAT renombrado para el inicio en *caliente* de las corridas sucesivas.

En nuestro caso particular, el llamado archivo OPCION.DAT ha tomado el nombre específico de OCAT.DAT, en referencia al Oceano Atlántico. Otras áreas podrán ser representadas e incluso ampliarse la extensión de la zona actual de estudio, ya que las diferencias estarán dadas básicamente por la distribución de las correspondientes matrices tierra - agua.

Por último, todos los programas fueron enlazados mediante un fichero BATCH, denominado RUN.BAT, que hace la corrida sucesiva de los mismos, solo con dar la entrada de los datos de cada mapa.

Para correr el modelo se preparó una rejilla para el Océano Atlántico en un área limitada por los paralelos 20 - 40 °N y los meridianos 50 - 80 °W. En una primera prueba se incluyó en una sola rejilla al Océano Atlántico y al Golfo de México, pero se detectaron problemas de propagación de la ola de una cuenca oceánica a otra, por lo que procedió a hacer rejillas separadas para ambas cuencas.

Se emplearon las cartas sinópticas de superficie desde el 29 de Enero de 1993 a las 00 UTC hasta el 28 de Febrero de 1993 a las 18 UTC, lo que sumó 93 corridas.

Siguiendo la metodología indicada en el manual del WHIP, para el área elegida se confeccionan tres ficheros: uno con el campo de presión digitalizado, el cual es extraído de una rejilla geográfica de 10°×10°, otro con los datos de dirección y velocidad del viento provenientes del análisis cinemático sobre una llamada rejilla en diamante y un tercero con las opciones necesarias para determinar la forma y continuidad de los ficheros de salida. El análisis cinemático se ejecuta para la zona generadora de olas de interés para el meteorólogo, ya sea alrededor de una tormenta extratropical o en la periferia de un anticiclón.

Luego se procede a la corrida del programa PMAP2C.EXE, que interpola el campo de presiones sobre una rejilla geográfica de 2,5°×2,5°; posteriormente el programa XWNDC.EXE genera los vientos a la altura de 19,5 m sobre la superficie del mar, los cuales se combinan o mezclan con el campo de vientos obtenido mediante el análisis cinemático para lograr el patrón de circulación general que luego se transportará sobre la ROE.

Esta rejilla se crea mediante la corrida del programa GRIDC.EXE, el cual da puntos de latitud y longitud de modo que sus líneas este - oeste y norte - sur se distribuyan según fue explicado con anterioridad.

Más adelante se corren los programas PICLOCC.EXE y ANGTRNC.EXE. Luego, la corrida del programa NTERWNC.EXE empleará los pesos calculados por PICLOCC.EXE y los giros angulares calculados mediante ANGTRNC.EXE en cada punto de la ROE, para así proporcionar el fichero de vientos que queda listo para ser introducido en el modelo de olas (programa CANIC.EXE).

En los ficheros de opciones se especifican los siguientes parámetros:

N filas × M columnas: Es el tamaño de las matrices tierra - agua de las zonas elegidas.

TINC: Es la cantidad de segundos por paso temporal, la cual está limitada por el criterio de estabilidad para la propagación de la frecuencia más baja, dado por el cociente entre el paso de rejilla y la velocidad de grupo a la frecuencia mínima.

DINC: Distancia entre puntos de rejilla en kilómetros.

MSTA: Cantidad de puntos especiales de salida.

IHR: Cantidad de horas entre entradas de vientos.

NEWSTR: Indicador de inicio en frío (1) o en caliente (0).

NOWRT: Indica si las cintas de salida se escriben (0) o no (1).

NORD: Indica si las cintas de entrada se leen (0) o no (1).

ZM2: Es el nivel sobre la superficie del mar a la que están referidos los vientos que entran al modelo.

JMDL: Es el punto medio de la rejilla, designado por una coordenada central J.

NOUT: Indica si se escriben (0) o no (1) los últimos datos para el inicio en caliente de una corrida consecutiva.

Se indican también las 20 bandas de frecuencia con incrementos constantes, definidos para la propagación en 16 rumbos del compás.

Los puntos especiales de salida se indican en coordenadas N,M y se presenta, por último, la matriz de los puntos de tierra (0) y agua (1), según el tamaño de la ROE.

Los archivos que se obtienen son los siguientes:

Archivo T: Contiene el espectro de ola bidimensional de cada uno de los puntos especiales de salida, dados en 16 columnas de dirección por 20 filas de frecuencia.

Archivo S: Contiene el espectro de ola unidimensional integrado en cada punto especial de salida para cada una de las 20 frecuencias. Esto representa las frecuencias, la densidad de energía y la energía acumulativa, lo que posibilita ver cómo la energía se divide entre las diversas frecuencias, dando una imagen del espectro de energía a una hora específica.

Archivo H: Son los parámetros de la ola en cada punto específico. Se indica para cada uno la altura, dirección y período de la ola de viento, de la mar de leva y de la ola combinada. El modelo calcula los parámetros cada 7115 segundos en cada fecha, o sea, 1,97 horas.

Archivo D: Es un archivo binario que contiene los datos del último paso temporal que se emplearán para los inicios en caliente de corridas consecutivas.

Una vez conocido el resultado de la altura y dirección de la ola de mar profundo en cada punto, durante una situación de inminente ocurrencia de una inundación costera, se aplica el método de cálculo de la mar de leva que se encuentra disponible en el Servicio de Meteorología Marina de Cuba y que fue preparado por Juantorena y Beauballet (1996). Se ha establecido por la práctica operativa que puede ocurrir una inundación costera en el norte de las provincias Holguín y Guantánamo por mar de leva, si en el Océano Atlántico adyacente se genera un núcleo de ola máxima de 6,0 m de altura, que proviene de rumbo norte y tiene una persistencia entre 48 y 60 horas.

Análisis de los resultados

El WHIP fue aplicado para el Océano Atlántico adyacente a Las Bahamas, Cuba, La Española y Puerto Rico. Se escogieron 11 puntos, distribuidos arbitrariamente para hacer un seguimiento de la generación del oleaje en los mapas sucesivos.

Habitualmente, la comparación de los resultados de las corridas del modelo se hacen en base a datos de boyas ancladas o a la deriva, pero éstas son pocas y se encuentran junto a la costa de Estados Unidos; no se cuenta entonces con referencias suficientes en Las Bahamas meridionales y las aguas al norte de las provincias de Holguín y Guantánamo, y por lo tanto fue el análisis manual el que sirvió de patrón.

La comparación realizada entre los mapas diagnóstico de donde se extrajeron los datos y los resultados de las corridas del modelo, muestran una concordancia apropiada para los propósitos de empleo por el Servicio de Meteorología Marina. El empleo de este procedimiento es efectivo al sur de los 40 °N y al oeste de los 50 °W, propagando el oleaje generado hasta el Gran Banco de Bahamas, La Española, Puerto Rico y las Antillas Menores. Será necesario estudiar la propagación del oleaje a través del Paso de los Vientos, Paso de la Mona, Paso Crooked Islands, Paso Caicos y Paso Mayaguana.

En las Figuras 1.3.1 y 1.3.2 se observan, respectivamente, el campo de olas analizado manualmente y el campo de olas calculado por el modelo el 2 de febrero de 1993 a las 12 UTC. El error de -1,0 metro que presenta el cálculo con respecto al análisis manual se debe a que la red de puntos de prueba no se extendió más allá de los 30 °N, en tanto que tampoco puede soslayarse la posible sobrevaloración subjetiva de la altura de la ola en que incurren ocasionalmente los observadores y meteorólogos.

La aplicación del WHIP, sin embargo, no fue eficaz en el Golfo de México, ya que debido a que el alcance del viento está limitado en todas las direcciones, el oleaje se desarrolla solo parcialmente y su propagación podría no ser bien simulada por CANIC. EXE. Será entonces necesario desarrollar y probar otras variantes de este modelo que incluyan como datos las distancias entre costas y las profundidades, para incluir los procesos de disipación por la influencia del fondo marino.

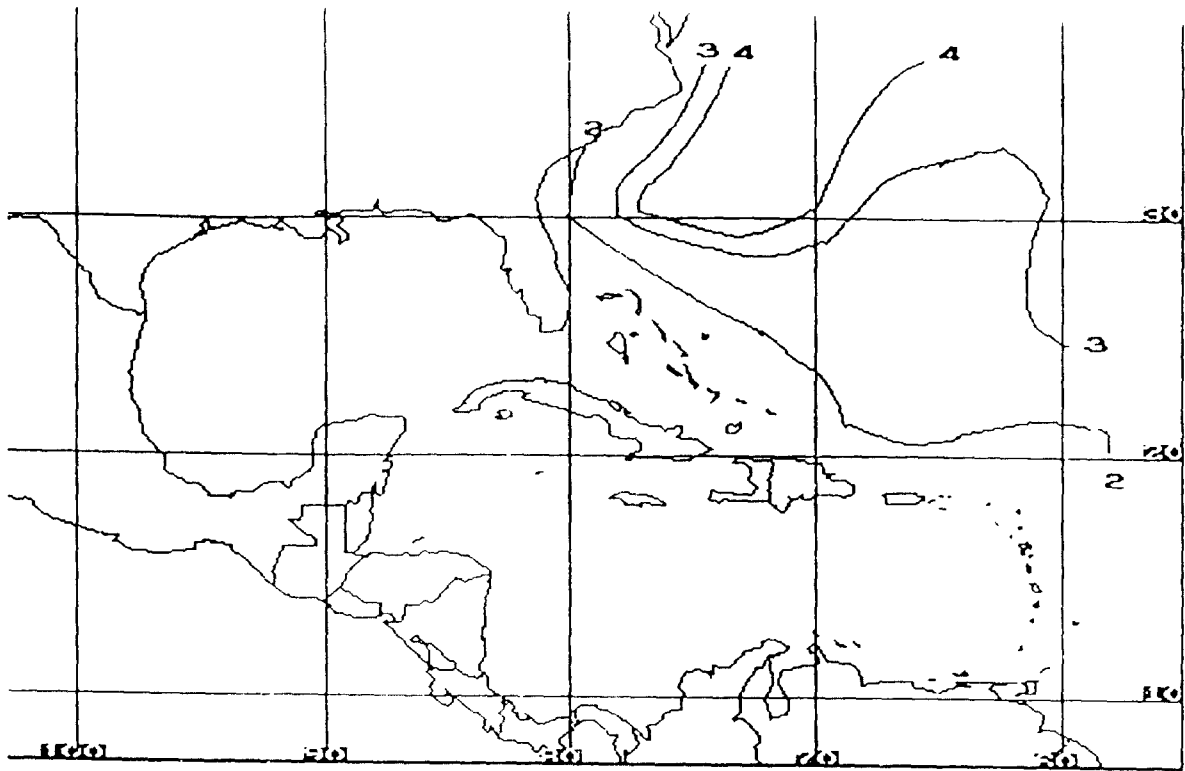


Figura 1.3.1 Análisis del campo de olas real, el 2 de Febrero de 1993 a las 12 UTC

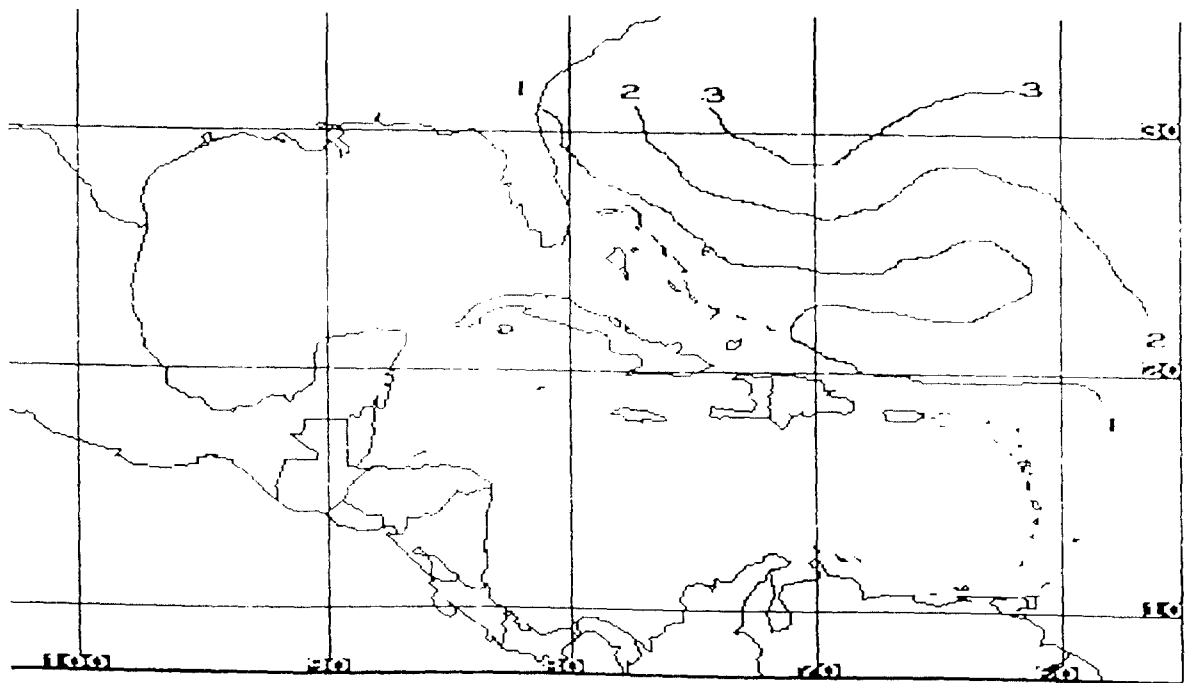


Figura 1.3.2 Campo de ola según el modelo WHIP, el 2 de Febrero de 1993 a las 12 UTC

Tabla 1.2.17 Porcentaje de casos con errores menores que el valor señalado. Estrato 1 (m)

Plazo	E ≤ 0.5	E ≤ 1.0	E ≤ 1.5	E ≤ 2.0	E ≤ 2.5	E ≤ 3.0	E ≤ 3.5
6	81.0	92.1	95.2	98.4	98.4	98.4	98.4
12	79.4	90.5	95.2	96.8	98.4	100.0	100.0
18	71.4	84.1	90.5	92.1	93.7	93.7	98.4
24	77.8	82.5	87.3	88.9	92.1	93.7	95.2
30	69.8	79.4	84.1	87.3	92.1	96.8	96.8
36	68.3	77.8	88.9	93.7	96.8	100.0	100.0
42	69.8	81.0	84.1	90.5	93.7	98.4	100.0
48	71.4	79.4	84.1	92.1	95.2	95.2	95.2

Tabla 1.2.18 Porcentaje de casos con errores menores que el valor señalado. Estrato 2 (m)

Plazo	E ≤ 0.5	E ≤ 1.0	E ≤ 1.5	E ≤ 2.0	E ≤ 2.5	E ≤ 3.0	E ≤ 3.5
6	82.8	98.3	98.3	100.0	100.0	100.0	100.0
12	82.8	93.1	96.6	98.3	100.0	100.0	100.0
18	74.1	86.2	93.1	94.8	96.6	100.0	100.0
24	77.6	84.5	89.7	94.8	96.6	96.6	96.6
30	81.0	86.2	91.4	94.8	96.6	96.6	98.3
36	75.9	86.2	93.1	94.8	98.3	98.3	100.0
42	69.0	82.8	93.1	93.1	98.3	100.0	100.0
48	70.7	84.5	87.9	91.4	91.4	93.1	94.8

Tabla 1.2.19 Porcentaje de casos con errores menores que el valor señalado. Estrato 3 (m)

Plazo	E ≤ 0.5	E ≤ 1.0	E ≤ 1.5	E ≤ 2.0	E ≤ 2.5	E ≤ 3.0	E ≤ 3.5
6	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
12	90.5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
18	85.7	95.2	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
24	76.2	81.0	85.7	100.0	100.0	100.0	100.0
30	81.0	85.7	85.7	100.0	100.0	100.0	100.0
36	85.7	85.7	95.2	95.2	100.0	100.0	100.0
42	81.0	95.2	95.2	100.0	100.0	100.0	100.0
48	81.0	90.5	90.5	100.0	100.0	100.0	100.0

En la Tabla 1.2.17 se aprecia que en el plazo peor para el Estrato 1 el 68.3 % de los casos el error de pronóstico de la altura de ola significativa es menor de 0,5 m, mientras que esta cifra es de 69,0 % de los casos para el Estrato 2 como aparece en la Tabla 1.2.18 y en el Estrato 3 como aparece en la Tabla 1.2.19 el 76,2 % en el plazo peor presenta errores de menos de 0,5 m.

Igualmente del análisis de las Tablas 1.2.17, 1.2.18 y 1.2.19 se puede deducir que para el Estrato 1 solamente el 12,7 % de los casos presenta errores en el pronóstico de la altura de la ola significativa superiores a los 2 m, esta cifra se reduce al 6,9 % de los casos en el Estrato 2 y al 4,8 % de los casos en el Estrato 3.

Para someter a prueba la significación estadística de las ecuaciones obtenidas se siguió el procedimiento de comprobar la significación del coeficiente de correlación múltiple de la ecuación. Este valor es equivalente al coeficiente de correlación simple entre los valores reales y calculados del predictando. Se consideran significativas al nivel de significación correspondiente aquellas ecuaciones cuyo coeficiente de correlación múltiple sea mayor que los valores críticos del coeficiente de correlación en dependencia del número de grados de libertad, que es igual al

1.3.3 Conclusiones

Los resultados de las corridas del WHIP son consistentes para el Océano Atlántico adyacente a las Bahamas y costa norte oriental de Cuba, se propone su puesta en práctica con fines de diagnóstico objetivo de los campos de olas.

La aplicación del WHIP no fue efectiva en el Golfo de México, por lo que se propone el desarrollo de otras variantes que incluyan los recorridos del viento y la batimetría.

Conociendo que la forma de extracción de los datos de entrada es manual, se trabaja para hacer que el WHIP pueda leer los mensajes de diagnóstico y pronóstico de los campos de presión atmosférica del ECMWF u otra fuente disponible, de modo que a la vez se reduzca el paso de cuadrícula a $5^{\circ} \times 5^{\circ}$.

1.4 Elaboración del régimen de oleaje extremo por métodos numéricos

1.4.1 Introducción

Para establecer los planes de evacuación y las estrategias del manejo de costas, es necesario conocer el régimen de oleaje extremo en el área de interés. Para ello, es preciso investigar las particularidades de los eventos meteorológicos, responsables de la ocurrencia de estos oleajes. En las costas de Cuba, se corresponden con los sistemas frontales, bajas extratropicales y los ciclones tropicales. No se cuenta con el volumen de información instrumental requerido para los cálculos de los elementos de ola. Por tal motivo, se acude a los métodos singulares (Peñate, 1991), los cuales se apoyan en la información meteorológica de archivo, utilizando un algoritmo matemático elaborado a partir de formulaciones conocidas y confiables.

En el presente texto se pretende mostrar la metodología de elaboración de la información de archivo y los rasgos generales del algoritmo aplicado, programado en lenguaje *Fortran* para PC IBM compatibles. Se logró obtener el régimen de oleaje extremo en aguas profundas. Además se elaboró una formulación para el cálculo de los elementos de ola al trasladarse hacia la costa, utilizando batimetrías de baja resolución. Los resultados obtenidos pueden ser utilizados para el manejo de costas y sus emergencias por penetraciones del mar.

1.4.2 Información utilizada

Se procesó la información meteorológica proveniente de las cartas sinópticas de los archivos del Instituto de Meteorología. Se analizaron los eventos con posibilidades de afectar por oleaje en algún punto de las costas de Cuba, dentro del área comprendida entre los 5 y 30 °N y los 65 y 95 °W.

La extensión temporal de las muestras, se estableció de acuerdo con la ocurrencia de los fenómenos: para los ciclones tropicales, desde 1919 hasta 1993 (325 casos) y para los sistemas frontales desde 1972 hasta 1994 (512 casos). Esta diferencia entre los períodos analizados, se debe a que la frecuencia de los sistemas frontales es mucho mayor, lo cual permite obtener una muestra lo suficientemente poblada en un intervalo de tiempo más corto.

Durante las investigaciones se detectó que las cartas de situación extrema de cada evento meteorológico mostraban su localización en el área comprendida entre los 5 y 25 °N y entre los 65 y 90 °W, por tal motivo el conteo de tales eventos se redujo a esta área (Figura 1.4.1).

Es válido aclarar que en la determinación del fetch, se incluye el área generadora de oleaje en muchos casos hasta las propias costas de los E.U., coincidiendo frecuentemente con el fetch geográfico.

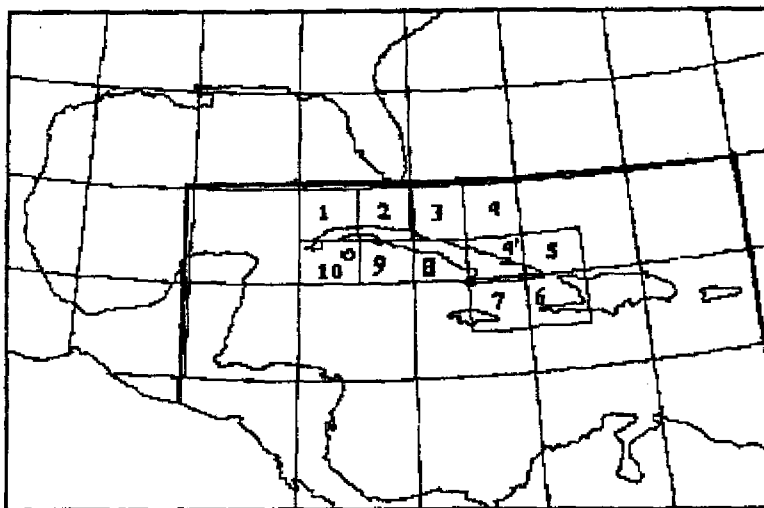


Figura 1.4.1 Mapa del área de conteo con la distribución de las cuadrículas

Cantidad de eventos por regiones costeras

Tabla 1.4.1 Cantidad de ciclones tropicales por cuadrículas, desde 1919 hasta 1993
Total de casos en la región de estudio: 325

Cuadrícula	1	2	3	4'	4	5	6	7	8	9	10
Casos	42	43	33	41	18	21	23	26	26	34	46

Tabla 1.4.2 Cantidad de frentes fríos por cuadrículas, desde 1972 hasta 1993 (Se incluyen solo los tramos de la costa norte)
Total de casos en la región de estudio: 512

Cuadrícula	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Casos	498	424	372	297	221	-	-	-	-	-

1.4.3 Obtención del campo de viento

Se aplica la formulación recomendada por Abuziarov y Shamraev (1974). Como datos de entrada, se utiliza el campo bórico superficial reflejado en la carta sinóptica. Se calcula el viento geostrófico, el cual es convertido por una relación empírica a la aproximación del viento cuasi - estacionario, generador del campo de olas. A continuación, se presentan las ecuaciones utilizadas:

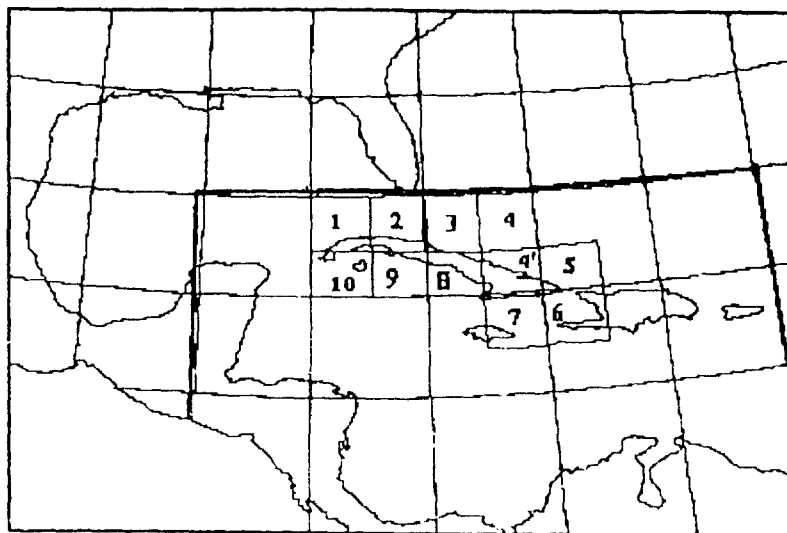


Figura 1.4.1 Mapa del área de conteo con la distribución de las cuadrículas

Cantidad de eventos por regiones costeras

Tabla 1.4.1 Cantidad de ciclones tropicales por cuadrículas, desde 1919 hasta 1993
Total de casos en la región de estudio: 325

Cuadrícula	1	2	3	4'	4	5	6	7	8	9	10
Casos	42	43	33	41	18	21	23	26	26	34	46

Tabla 1.4.2 Cantidad de frentes fríos por cuadrículas, desde 1972 hasta 1993 (Se incluyen solo los tramos de la costa norte)
Total de casos en la región de estudio: 512

Cuadrícula	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Casos	498	424	372	297	221	-	-	-	-	-

1.4.3 Obtención del campo de viento

Se aplica la formulación recomendada por Abuziaryov y Shamraev (1974). Como datos de entrada, se utiliza el campo bórico superficial reflejado en la carta sinóptica. Se calcula el viento geostrófico, el cual es convertido por una relación empírica a la aproximación del viento cuasi - estacionario, generador del campo de olas. A continuación, se presentan las ecuaciones utilizadas:

$$V_g = \left\{ \frac{1}{[\rho_a \cdot f]} \right\} \left(\frac{\partial p}{\partial s} \right) \quad (1.4.1)$$

$$V_m = K \cdot V_g \quad (1.4.2)$$

Donde :

V_g - Velocidad del viento geostrófico

ρ_a - Densidad del aire $\rho_a = \frac{P}{[R_a \cdot T_a]}$

P - Presión atmosférica.

R_a - Constante de los gases para el aire seco [287 joules / (Kg. °K)]

T_a - Temperatura del aire (en °K)

f - Parámetro de Coriolis ($f = 2 \omega \sin \phi$)

ω - Velocidad angular de la Tierra ($\omega = 7.292 \cdot 10^{-5}$ rad / s)

ϕ - Latitud geográfica local

$\frac{\partial p}{\partial s}$ - Gradiente bórico horizontal

K - Coeficiente empírico, que vincula la estratificación térmica con la velocidad del viento

V_m - Velocidad del viento medio (cuasi - estacionario)

Se elabora una rejilla rectangular para el área de influencia del organismo meteorológico. Sobre cada punto se determina la distancia entre las isobaras, en grados de meridiano ($\delta\lambda$), la cual posteriormente se traduce a metros:

$$\delta S = (\pi \cdot 180 / G) \cdot \delta\lambda \quad (1.4.3)$$

Donde:

δS -Distancia, en (m)

G -Radio de la Tierra ($6,371 \cdot 10^3$ m)

π -Constante ($\pi = 3,14$)

Posteriormente se calculan el gradiente bórico, el parámetro de Coriolis y la densidad del aire. Se fija el coeficiente empírico K que relaciona la estratificación térmica con la velocidad del viento por la tabla de Abuziarov y Shamraev (1974).

Tabla 1.4.3 Coeficiente que relaciona la estratificación térmica con la velocidad del viento

$T_w - T_a$ °C	< -0,5	-0,5 ; < 0,0	0,0 ; 2,0	> 2,0
$V_m < 20$ m/s	0,56	0,64	0,73	0,83
$V_m > 20$ m/s	0,45	0,58	0,68	0,78

Donde: $(T_w - T_a)$ – Diferencia de temperaturas agua - aire

Para los ciclones tropicales, se debe establecer un criterio que evite la presencia de valores no acotados. En tal caso, es conveniente la utilización de un dato conocido, como es la velocidad del viento máximo (sostenido al menos en un minuto), rectificadora por alguna relación empírica para su conversión al viento medio (CEDEX, 1993).

Una vez calculado el campo del viento, los valores obtenidos se asientan en una copia de la carta sinóptica correspondiente al evento meteorológico analizado. Los datos de viento observado se utilizan para el análisis de flujo y sobre el mismo se determina el fetch.

1.4.4 Cálculo de los elementos de ola en aguas profundas

En primer lugar, se establecen los factores limitantes del oleaje sobre aguas profundas. La persistencia se obtiene de forma aproximada, por el conteo de cartas sucesivas donde el viento se conserva en la misma dirección con un rango de $\pm 22,5^\circ$. Si el campo de viento es regular, el fetch se traza sobre las líneas de flujo desde el punto de interés hacia atrás, hasta desviarse del origen en más de 45° (Figura 1.4.2). Si es irregular, sobre la línea del fetch se marcan segmentos de velocidad cuasi-constante, de modo que entre los extremos la diferencia sea menor de 5 m/s. En presencia de un campo eólico complejo, característico de un ciclón tropical, es necesario utilizar el fetch en abanico, ubicando el punto por el viento de mayor intensidad que esté orientado hacia la costa. En su misma dirección se traza el rayo principal y a ambos lados de éste, los secundarios en intervalos de $\pm 22,5^\circ$. Sobre cada rayo se delimitan los segmentos de velocidad (Figura 1.4.3).

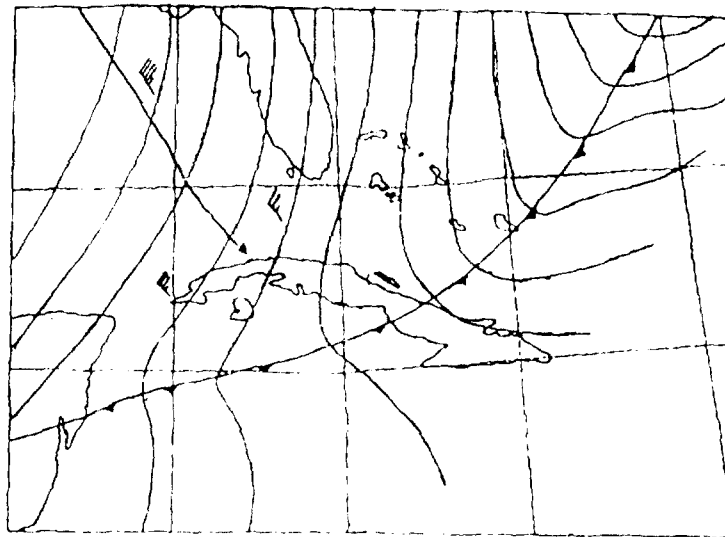


Figura 1.4.2 Fetch simple para el caso de un sistema frontal sobre el territorio nacional

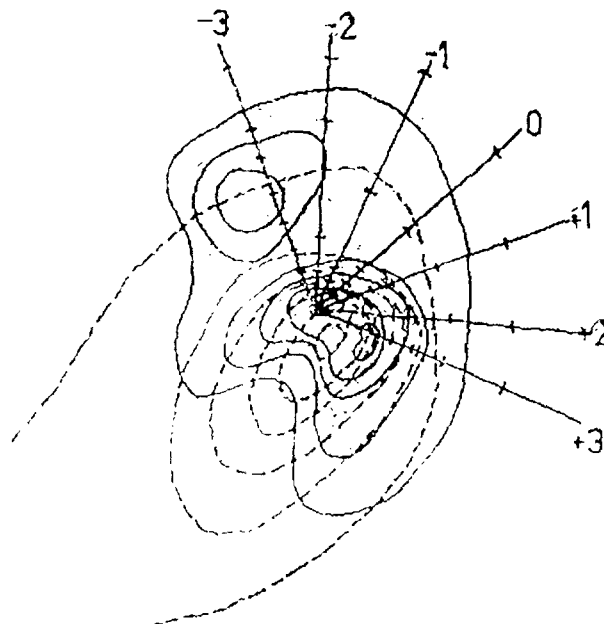


Figura 1.4.3 Fetch en abanico sobre un ciclón tropical, para un punto de la costa norte