

Perfeccionamiento del diagnóstico y pronóstico del estado de la superficie marina medidos por la red nacional de radares meteorológicos

*Claudio Alberto Sánchez Pedroso, Centro de Pronósticos
Griselda Makintoch Rodríguez y Hugo Rodríguez Méndez.*

E-mail: sanalb2005@yahoo.com

Centro de Meteorología Marina, Instituto de Meteorología, CITMA.

Resumen

En el presente trabajo se desarrolla un estudio sobre el comportamiento y carácter del estado de la superficie marina, que son generados por diferentes fenómenos meteorológicos de escala sinóptica y dan lugar a inundaciones costeras en el litoral de la Ciudad de La Habana.

Con la información que se obtiene a través de la identificación de imágenes radáricas del patrón de radioecos característicos del oleaje, el cual adopta la forma de un abanico desplegado, se determinaron las magnitudes de las distancias radiales máximas y mínimas sobre el indicador de un radar meteorológico convencional. Así se logra establecer la relación entre las variables radáricas y el alcance de las inundaciones costeras por penetración del mar.

Se diseñó una metodología observacional para el radar meteorológico de Casa Blanca y, por primera vez, se obtuvo un programa operacional para el pronóstico a muy corto plazo del alcance de las inundaciones costeras por penetración del mar en zonas del malecón habanero.

Se sugiere el empleo de los radares meteorológicos convencionales como una herramienta útil para realizar la vigilancia, el diagnóstico y el pronóstico a muy corto plazo de inundaciones costeras por penetración del mar.

Palabras claves: Radar, marejadas, inundaciones costeras, pronóstico.

Introducción

El litoral de Ciudad de La Habana, y en especial el tramo que corresponde al malecón capitalino son en extremo vulnerables a los efectos producidos por el paso de algunos fenómenos meteorológicos, que pueden generar inundaciones costeras debido a la penetración del mar. Este fenómeno constituye un sensible impacto para la población asentada a lo largo de este litoral, así como para las diversas instalaciones de las redes comerciales, hoteleras, hospitalarias, culturales y turísticas que resultan muy importantes para el desarrollo socioeconómico de la capital.

De ahí, que sobran razones para llevar adelante una investigación capaz de obtener un método de pronóstico a muy corto plazo con el empleo de información radárica, del alcance de la inundación costera por penetración del mar que pudiera esperarse, así como diseñar e introducir en la práctica sistemática de la vigilancia meteorológica, una metodología observacional apropiada para el radar meteorológico de Casa Blanca.

Los fenómenos meteorológicos que pueden generar estas inundaciones costeras son: frentes fríos, bajas extratropicales y ciclones tropicales.

En el caso de los frentes fríos, generalmente las afectaciones se ocasionan por su prolongación hacia el sur, desde la periferia de las bajas extratropicales que habitualmente se desplazan en dirección este, por encima de los 30 grados de latitud norte. Con menos frecuencia ocurre que el centro de la baja se acerca a las bajas latitudes, intensificándose la acción del frente frío sobre el territorio nacional. Esta situación suele dar lugar a la presencia de chubascos, tormentas eléctricas y fuertes vientos, que son generadores de oleajes extremos e incluso, inundaciones costeras por penetración del mar. No obstante, se debe prestar mucha atención al resto de los fenómenos meteorológicos citados, ya que todos sin excepción, pueden afectar la zona del malecón.

Estos eventos dependen de tres aspectos: el área por la que se desplazan los sistemas meteorológicos, la dirección hacia la cual estos se trasladan y la rapidez de su movimiento.

Importancia para las zonas costeras de Cuba

En las zonas costeras de Cuba viven 10 % de su población total, esto representa algo más de 1 millón de personas (PNUD, 1998) y en las áreas colindantes con el litoral capitalino, específicamente a lo largo del malecón habanero residen no menos de 40,000 habitantes.

Aquí se llevan a cabo labores portuarias, recreativas, turísticas, encuentros deportivos, así como de otros tipos y se ubican industrias, comercios, hoteles y otras instalaciones dotadas con equipamiento muy costoso de la tecnología más actual, donde se desarrollan múltiples e importantes actividades socioeconómicas. En resumen el cúmulo de seres humanos, los bienes materiales de tipo particular y estatal existente a lo largo del litoral de la Ciudad de La Habana, la convierte en una zona muy especial de alto grado de interés en relación con la incidencia de las inundaciones costeras por penetración del mar.

La tabla 1 muestra la frecuencia de los diferentes sistemas meteorológicos, así como los estados del mar asociados.

Todos estos sistemas meteorológicos dan lugar a condiciones de mar turbulenta y poseen patrones nubosos característicos que permiten identificarlos claramente, al ser captados en el indicador PPI, así como en la pantalla del ordenador acoplado a los radares meteorológicos, e incluso es posible observar y estudiar el comportamiento del oleaje que estos son capaces de generar haciendo uso de este mismo indicador, ya que es factible también la obtención de imágenes que constituyen el patrón propio del oleaje.

En este trabajo se logra, por vez primera, el planteamiento de ecuaciones para estimar la magnitud potencial de las inundaciones costeras por penetración del mar mediante el empleo de técnicas radáricas, desarrollado específicamente para el litoral de la Ciudad de La Habana, incluido el malecón de la capital. Se toman como elementos esenciales el alcance extremo de la inundación costera por penetración del mar, o sea la distancia máxima dentro de tierra que resulta inundada por el agua del mar, y las magnitudes medidas por el radar meteorológico del patrón de radioecos observado en cada contingencia.

El total de inundaciones costeras por penetración del mar en el malecón habanero en un período de 25 años, fue de 34 casos. De ellas le corresponde 53 % a las ocasionadas por los sistemas

frontales fuertes y moderados. Comparten el segundo orden las bajas extratropicales y los ciclones tropicales cada uno con 23,5 %. De ahí que la frecuencia de afectación al paso de los sistemas frontales merece especial atención, sin minimizar, en modo alguno, el interés sobre el resto de los sistemas. Por eso es conveniente buscar nuevas posibilidades de desarrollar métodos para la predicción y prevención de las inundaciones costeras por penetración del mar.

Las diferentes situaciones meteorológicas de escala sinóptica que dieron lugar a inundaciones costeras por penetración del mar en el litoral de la Ciudad de La Habana, incluido el malecón habanero entre los años 1975 y 2000 (Pérez *et al.*, 2001), se presentan en la tabla 2.

La imagen que aparece en la figura 1 corresponde a la llegada de un frente frío fuerte el 18 de enero de 1977, cuando en horas de la noche comenzaron a producirse inundaciones por penetración del mar en la costa norte de las provincias habaneras, incluido el malecón, las cuales se extendieron hasta el día 19. El campo de viento al paso del referido frente frío, adoptó componentes de región noroeste, y alcanzó intensidades significativas con rachas máximas de 79 km/h (22 m/s), debido a la interacción entre el anticiclón continental de 1029 hPa y el centro intenso de baja presión asociado.

Esta situación dio lugar a que detrás de la línea frontal se formara una zona generadora de oleaje sobre la porción oriental del Golfo de México. En la medida que el frente frío avanzaba hacia el sudeste, esta zona generadora se fue incrementando para quedar limitada por la costa norte de la región occidental de Cuba. En este proceso el *fetch* alcanzó 1000 km como valor extremo, y la *persistencia* fue de 12 horas, lo que originó alturas de olas del orden de 4-6 m (Fig. 1.).

En la zona costera correspondiente al malecón habanero, suelen registrarse las máximas inundaciones por *wave setup* (Mitrani *et al.*, 1997).

Generalmente los sistemas frontales que penetran en el Golfo de México y se desplazan hacia el este o el sudeste sobre el mismo, suelen generar fuertes vientos de región sur, que dan lugar a inundaciones costeras por *wind setup* en zonas bajas del litoral sur de las provincias occidentales. Traen además, tormentas severas asociadas, siguiéndoles fuertes vientos que van girando gradualmente hacia el noroeste y después al norte. Estos vientos son los responsables del fenómeno de *wave setup* en el litoral de la costa noroccidental de Cuba, con olas de 4-8 m de altura, que producen inundaciones costeras en ese litoral por penetración del mar.

Tabla 1. Distribución de frecuencia del estado del mar para los 34 casos de la muestra

Situaciones sinópticas que generan inundaciones costeras	Ligeras	Moderadas	Fuertes	Totales
Frentes fríos moderados	9	3	-	12
Frentes fríos fuertes	3	2	1	6
Bajas extratropicales	1	5	2	8
Tormentas tropicales	1	-	-	1
Huracanes	3	2	2	7

Tabla 2. Cronología de las situaciones meteorológicas de escala sinóptica que ocasionaron inundaciones costeras por penetración del mar en el litoral de la Ciudad de La Habana (1975-2000)

Fecha	Fenómeno	Categoría de la inundación costera
23-9-75	Huracán Eloise	Fuerte
19-1-77	F. F. Fuerte	Fuerte
2-3-80	F. F. Fuerte	Moderada
5-11-82	F. F. Fuerte	Ligera
18-3-83	Baja extratropical	Fuerte
27-2-84	F. F. Moderado	Moderada
29-3-84	F. F. Moderado	Ligera
23-11-84	F. F. Moderado	Ligera
4-1-85	F. F. Moderado	Ligera
12-2-85	F. F. Moderado	Ligera
29-10-85	Huracán Juan	Fuerte
19-11-85	Huracán Kate	Moderada
5-1-87	Baja extratropical	Fuerte
23-1-87	F. F. Moderado	Ligera
12-10-87	Huracán Floyd	Fuerte
25-1-88	F. F. Moderado	Ligera
12-4-88	Baja extratropical	Moderada
15-2-91	F. F. Moderado	Ligera
6-2-92	Baja extratropical	Fuerte
13-3-93	Baja extratropical	Fuerte
3-3-94	Baja extratropical	Moderada
14-11-94	Tormenta Tropical Gordon	Ligera
23-12-94	Baja extratropical	Ligera
4-10-95	Huracán Opal	Ligera
8-01-96	F.F. Fuerte	Ligera
8-03-96	F.F. Fuerte	Ligera
20-03-96	F.F. Moderado	Ligera
14-12-97	F.F. Moderado	Ligera
27-12-97	F.F. Fuerte	Ligera
4-02-98	Baja extratropical	Moderada
25-09-98	Huracán Georges	Ligera
15-03-99	F.F. Moderado	Ligera
15-10-99	Huracán Irene	Ligera
24-01-00	F.F. Moderado	Ligera

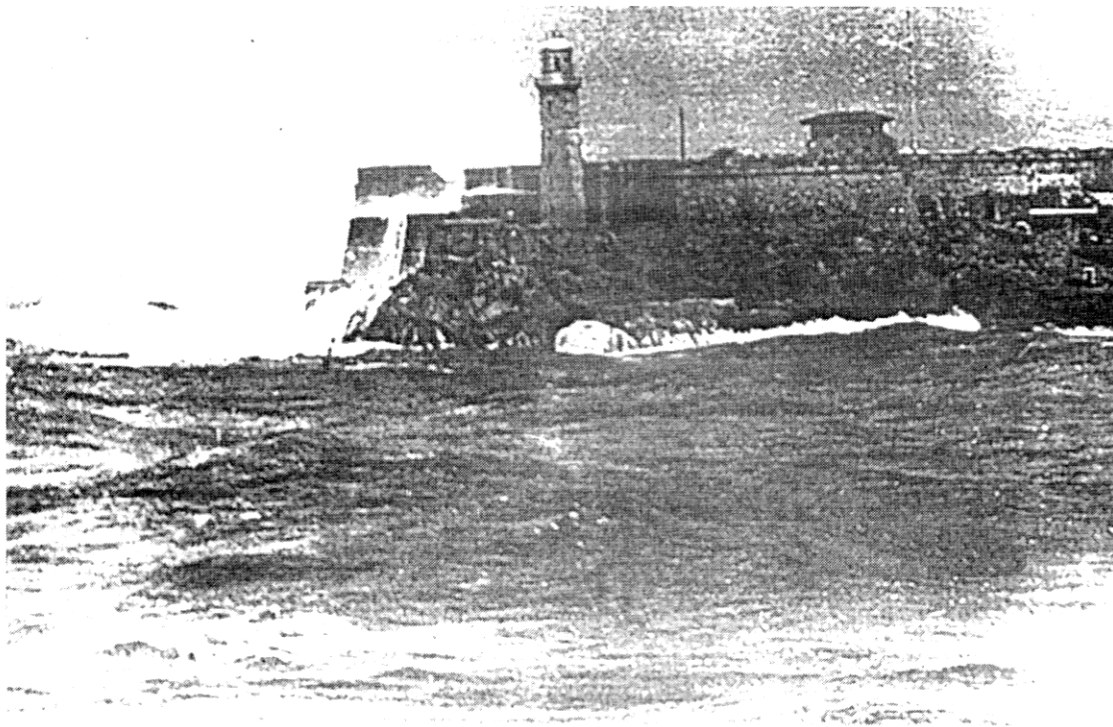


Fig. 1. Mar gruesa, con las olas rompiendo contra la estructura de la fortaleza del Morro de La Habana, cruzando por encima de su farola. Frente frío fuerte del día 18 de enero de 1977. (Fotografía tomada por A. del Cristo).

Los ciclones tropicales, por su parte, han originado las máximas velocidades de vientos en nuestro país, y han generado olas de más de 6 m de altura que han provocado grandes inundaciones costeras, sobre todo, asociadas a la surgencia. La influencia de estos organismos sobre el territorio cubano disminuye significativamente del occidente al oriente.

Sus trayectorias de afectación más comunes presentan entradas por la costa sur y salidas por la norte, aunque también los desplazamientos paralelos y cercanos a nuestras costas pueden provocar inundaciones costeras por penetración del mar.

La señal de retorno radárica que resulta de un campo de oleaje no es propiamente una imagen directa y fiel de la superficie del mar en estudio. Esta afirmación se fundamenta en la existencia de diversos fenómenos físicos, que intervienen en la forma en que se produce la dispersión de los campos electromagnéticos por las olas capilares.

Estas olas según su dimensión son pequeñas y se forman en cuanto se hace manifiesta la acción del viento sobre la superficie (rizos), o en la superficie de las olas de gravedad principales (olas secundarias) (Egorov, 1983) que viajan en dirección de la antena del radar. Teniendo esto en cuenta el retorno en la pantalla de radar será más intenso en

aquellas direcciones que coincidan con la dirección en que se propagan las ondas capilares, y por tanto con la dirección del viento local. Diversas experiencias han demostrado que en la medida que el viento local se incrementa, el valor de la sección eficaz de retrodispersión (σ) crece, y se obtienen imágenes más intensas. De aquí que para un mismo tipo de mar de leva, la señal de retorno captada en el radar será distinta cuando cambian las condiciones del viento local. Estos efectos producen modulaciones y distorsiones en la señal.

Definición del tipo característico de radioecos producidos por el oleaje

El radioeco característico que identifica una situación de oleaje, es aquel cuya morfología en el indicador de posición en planta (PPI) de un radar meteorológico, que se encuentre ubicado en la línea del litoral o en zonas costeras muy próximas a esta, y resulta en extremo similar a la que adopta un abanico desplegado. Apoyado en ello, cada vez que se hable sobre el «eco abanico» se estará haciendo referencia a la observación de imágenes en el indicador PPI de un radar meteorológico, relacionadas con una situación de oleaje.

Este comportamiento de la imagen detectada en el indicador PPI se explica como el resultado del fenómeno físico que constituye el retorno hacia el radar de la energía retrodispersada, producto de la intercepción de los lóbulos laterales del haz de ondas electromagnéticas con las minúsculas partículas de agua de mar, que flotan sobre la superficie marina. La imagen de este patrón se define en la literatura internacional como «sea clutter», y se asocia con los estados turbulentos del mar.

Del pasado al presente sobre la temática

El comportamiento alterado de la superficie marina y sus consecuencias ha sido desde tiempos remotos motivo de preocupación para muchas personas en el mundo, principalmente de aquellas que tienen sus asentamientos permanentes en las proximidades de los litorales.

Otras no sólo se preocuparon, sino que se ocuparon de acumular toda la información y la experiencia necesaria, para estudiar y analizar en detalle qué factores concurrían y de qué manera lo hacían, para así poder determinar los patrones que conducían a ese tipo de comportamiento. Por ello es posible hacer referencia a algunos trabajos realizados en la década del 90 hasta los años más recientes.

En la investigación desarrollada por I. Mitrani *et al.* (1994) se presenta un estudio sobre las características hidrometeorológicas de la zona costera del malecón habanero. Para el desarrollo de esta investigación adoptaron como criterio analizar el comportamiento de las mencionadas características para 325 casos de ciclones tropicales en el período 1919 hasta 1993; y para un total de 498 frentes fríos en el plazo de 1972 a 1993, se efectuaron cálculos del campo de viento, de los elementos de olas, de la sobreelevación del nivel del mar por arrastre del viento, vinculada con la marea de tormenta. Esto último en situaciones de ciclones tropicales.

Pérez Osorio *et al.* (1994) muestra el análisis hidrometeorológico y el tratamiento estadístico de las inundaciones costeras por penetración del mar ocurridas en el malecón habanero, así como la elaboración de una cronología sobre la afectación de este tipo de evento y los regímenes probabilísticos de su ocurrencia, mediante el empleo de una modelación estadística para todas las contingencias que tuvieron lugar durante el período 1970-1994. En esta investigación lograron determinar la relación de la variable altura de la ola significativa y la magnitud del alcance de la inundación costera

en los diversos escenarios en cada caso, sin constituir en sí mismo un método de aplicación para la predicción del referido fenómeno.

Y. Juantorena *et al.* (1997) desarrolla un procedimiento de aproximaciones para obtener la energía total en términos del espectro discreto de JONSWAP y de ese modo poder determinar solamente la altura significativa de las olas evaluando la energía total E , en la expresión $H_{1/3} = 4 * (E)^{1/2}$ y tomando en cuenta también el cálculo de la mar de leva en la que intervienen mecanismos de dispersión angular y longitudinal, siendo su expresión $H_{leva} = H_{viento} (D_a)^{1/2} * (D_l)^{1/2}$. En esta investigación el objetivo se circunscribe a lograr exclusivamente la predicción de 24 a 48 horas de la altura que alcanzan las olas al arribar a la línea costera, sin extenderse a la predicción del tipo de inundación costera que pudiera esperarse.

Pérez Osorio *et al.* (2001) presenta la caracterización de los fenómenos meteorológicos peligrosos que produjeron inundaciones costeras por penetración del mar en el malecón habanero dentro del período 1901 hasta el 2000, y las situaciones sinópticas que las ocasionaron, con el objetivo de que se utilice como herramienta de trabajo para predecir con suficiente antelación este fenómeno y así disminuir sus consecuencias. También se realiza una descripción del malecón habanero por tramos y los factores que producen las inundaciones costeras por penetración del mar.

Dentro del proyecto (PNUD, 1998) en su primer capítulo Pérez Parrado y García Concepción obtuvieron un modelo dinámico bidimensional para simular la ocurrencia de las surgencias que son capaces de generar los ciclones tropicales sobre las costas para un plazo de 18 horas, para 26 sectores costeros de Cuba, incluyendo el municipio especial Isla de la Juventud y sus períodos de retornos respectivos. Este modelo tiene de positivo su condición de ser ejecutable en tiempo real, aspecto que le ofrece operatividad en su aplicación para dar respuestas inmediatas, sobre lo que puede acontecer en los mencionados sectores con buena anticipación.

En el propio proyecto (PNUD, 1998) en ese mismo capítulo Santiago Portela, desarrolló un modelo de tipo sinóptico-estadístico para pronosticar la ocurrencia de inundaciones costeras en Cuba, así como su tiempo de afectación e intensidad con el objetivo de prevenir con suficiente anticipación su impacto y poder mitigar en lo posible sus efectos.

Todos los estudios realizados empleando el radar, a partir de la década del 90 del pasado siglo, coinciden en que están dirigidos al estudio de es-

pectros de olas, la forma en que se organizan sus corrientes y la modelación de ambas, empleando como fuente de información básica, radares de apertura sintética a bordo de satélites y de aviones (REPORT no. 42, WMO/TD-no. 938 1998.) Con el fin de monitorear la superficie marina Ziemer y Günther (1994), así como Dittmer (1995) hicieron uso de un radar náutico convencional provisto de banda X ($\lambda = 3,2$ cm), al que le acoplaron un convertidor A/D y un software de procesamiento para el análisis de las señales de video generadas.

De ese modo extrajeron la información de las imágenes, en las que se aprecia el fenómeno conocido como *sea clutter* y que es producto de la retrodispersión de la superficie del mar. A todo ese sistema se le llamó WaMoS II (*Wave Monitoring System*) (WMO, 1998). En ninguno de los casos trata las inundaciones costeras por penetración del mar haciendo uso de un radar convencional con la característica técnica de poseer banda S ($\lambda = 10$ cm).

Mediante una búsqueda en Internet fue posible conocer algunos aspectos del tratamiento que se le está dando al fenómeno *sea clutter* o estado turbulento del mar. En un artículo publicado por la entidad (LMSV) *Litton Marine Systems Vision* se pudo conocer que este tipo de patrón de radioecos es considerado por ellos un elemento indeseable, ya que introduce un efecto de oscurecimiento en el indicador PPI, limitando en gran medida la realización de algunas funciones como son las de rastreo de embarcaciones y boyas sobre la superficie marina en condiciones de estados severos de la mar y si esta situación viene acompañada por precipitaciones, las operaciones resultan mucho más complejas.

Por esas razones en las dos últimas décadas los constructores de radares han estado implementando varias técnicas para automatizar estos procesos para proporcionar una mejor y más consistente supresión del *sea clutter*. N. D. Walker (2005) en su artículo plantea que los huracanes generan surgencia, oleaje y lluvias, y contribuyen a la ocurrencia de extensas inundaciones costeras, particularmente en áreas de bajo relieve tal como el sudeste de Louisiana.

En ese artículo se investiga el uso de las imágenes del Radarsat-1 SAR para realizar el mapeo de los cambios del nivel del agua y de la inundación asociada con los eventos de tormentas tropicales y huracanes. Dos sistemas tales afectaron las costas de Louisiana en el periodo de dos semanas durante los meses de de septiembre y octubre de 2002. El cambio máximo del nivel del mar en la línea costera reportado fue de seis pies acompaña-

do por el paso del huracán Lili el día 3 de octubre del propio año. Un sistema más fuerte, el huracán Iván, impactó el área de Pensacola en septiembre de 2004 y aunque más alejado de Louisiana, causó cambios incluso mayores en el nivel del mar en algunas áreas. Para desarrollar esta labor fueron usadas las imágenes multitemporales del ScanSAR con el fin de distinguir los cambios espaciales y temporales del nivel del mar durante ambos eventos. Un extenso número de mediciones sobre el nivel del mar en la línea costera y mapas de de habitat fueron empleados como prueba fiel para el análisis.

Por otro lado el Comité de Observaciones Satelitarias sobre la Tierra (CEOS, 2003) expresa en el contexto del *nowcasting*, que es conocido que los modelos oceánicos de olas son tratados a través del pronóstico numérico del tiempo para el pronóstico de viento en superficie. Sin embargo, algunos errores son generados y pueden irse acumulando en olas a grandes distancias. Esto se debe a que las fuentes de datos resultan escasas en grandes extensiones. En ausencia de observaciones directas sobre el estado inicial de la ola, este es deducido a partir del comportamiento del viento. En la actualidad los datos se obtienen de aisladas boyas disponibles, desde altímetros acoplados en satélites y escaterómetros, así como de satélites de órbita baja con escaterómetros e instrumentos de microondas acoplados.

También los altímetros montados en satélites de órbita polar proporcionan información sobre el estado de la superficie marina con cobertura global y buena exactitud, pero su cobertura temporal y horizontal es limitada, los instrumentos del SAR ofrecen información sobre el espectro bidimensional de las olas con buena exactitud, pero su resolución de igual modo resulta limitada temporal y horizontalmente.

Es por esto que puede resultar una buena opción el empleo de radares fijos en tierra para el estudio, investigación y la aplicación de los resultados que se obtienen en el servicio sistemático de vigilancia meteorológica por radar.

A continuación se introducen algunos conceptos, definiciones y significados para una comprensión cabal del presente trabajo.

Conceptos, definiciones y significados

PPI. Expresión abreviada en idioma inglés, que significa indicador de posición en planta. Esto como dispositivo de un radar no es más que un tubo de

Para la obtención de la información mediante radar se realizó un experimento para lograr las imágenes óptimas del patrón de radioecos. Las situaciones correspondientes al período que abarca desde el 23-09-75 hasta el 19-11-85, un total de 12 casos fueron observados y estudiados haciendo uso del radar DECCA-42. Las comprendidas en el resto del plazo que va desde el 5-01-87 hasta 24-01-00 se siguieron y analizaron con el radar MRL-5.

Después de realizar múltiples mediciones se elaboró una metodología radárica. A la totalidad de la muestra se le aplicó como procedimiento estadístico primario un test comparativo para identificar los valores más representativos de las variables θ_{op} , como son el radio máximo ($R_{m\acute{a}x}$) y el radio mínimo ($R_{m\acute{i}n}$), sobre diferentes ángulos de elevación de la antena y se compararon los conjuntos de representaciones que constituían cada caso. De esa manera, se obtuvo un total de 510 mediciones, es decir 15 rastreos para cada uno de los 34 casos de estudio, los que hicieron factible que se pudiera determinar que para el radar meteorológico de Casa Blanca, el ángulo de elevación de antena óptimo sea $\theta_{op} = 0^\circ$, resultando aceptable, una oscilación de $0 < \theta < + 0.5$.

Los datos correspondientes a las variables radáricas se tomaron a partir de patrón de radioecos en cada caso, con un régimen observacional de 45 minutos cubriendo los plazos trihorarios.

Agregaremos que el patrón de radioecos que se observa, tanto en la pantalla PPI de un radar analógico, como en el display de un microprocesador que se encuentre acoplado a un equipo de radar digitalizado, es el resultado del retorno hacia el radar de la energía retrodispersada, producto de la intercepción de los lóbulos laterales del patrón de ondas electromagnéticas del radar. La imagen de este patrón se define en la literatura internacional como «sea clutter»; es decir, estado turbulento del mar.

Para obtener el resto de los datos se recurrió a las siguientes fuentes de información, en las que se identificaron el total de 34 casos en el período desde 1975 hasta el 2000.

La cronología de frentes fríos (González, 1999), donde fue posible comprobar que cada uno de los casos incorporados a la data, afectó el litoral norte de la Ciudad de La Habana.

La cronología de las inundaciones costeras por penetraciones del mar, en la cual se reseñan los diferentes tipos de sistemas que produjeron las referidas inundaciones costeras, su clasificación y

las fechas en que tuvieron lugar (Pérez Osorio *et al.*, 1994).

Las imágenes radáricas analógicas del patrón de radioecos, de abanico desplegado en el DECCA-42 y el MRL-5 sobre el indicador PPI, e incluidas las digitalizadas de este último sobre el display del microprocesador acoplado al mismo. A partir de las imágenes observadas se pudo obtener los valores de las variables radáricas tomadas en cuenta para este trabajo, como son las distancias radiales máximas y mínimas para cada situación.

Criterios para la selección de las variables

En primer orden se tomó como concepto básico que para que tenga existencia en el indicador PPI el patrón de radioecos de abanico desplegado, es obligatoria la intervención del viento en la formación de un estado turbulento de la superficie marina y que de manera simultánea su acción ocasiona la dispersión de hidrometeoros muy próximo a la superficie marina, para que puedan ser detectadas por el radar. Por esta razón se determinó seleccionar como variables de interés para esta investigación el radio máximo y mínimo del mencionado patrón de radioecos que son observados y tomados en el indicador PPI del radar. Como variable de salida o predictando la distancia que penetra el mar en tierra, o sea el alcance de la inundación costera.

$R_{m\acute{a}x}$: Distancia radial máxima del patrón de radioecos

$R_{m\acute{i}n}$: Distancia radial mínima del patrón de radioecos.

P_{mar} : Distancia que penetra el mar en tierra desde la línea del malecón capitalino.

En las dos primeras variables de las distancias se toma como punto de referencia el origen de coordenadas del radar o el centro de giro en las imágenes obtenidas en el PPI.

Los valores de la variable P_{mar} se obtuvo de los reportes preparados por los especialistas del Centro de Meteorología Marina, a partir de las observaciones realizadas en los propios escenarios ante cada contingencia y los correspondientes a las variables $R_{m\acute{a}x}$ y $R_{m\acute{i}n}$ de las mediciones realizadas sobre las imágenes del patrón de radioecos «Eco Abanico». Los datos obtenidos aparecen en la tabla 3.

Para facilitar la comprensión sobre la obtención de los valores extremos de las variables $R_{m\acute{a}x}$ y $R_{m\acute{i}n}$ se presenta, como ejemplo, la figura 3.

La imagen que se presenta en la figura 3 muestra una condición de marejada que fue captada por la estación de radar meteorológico de Casa Blanca

Tabla 3. Valores de las variables de las inundaciones costeras y del patrón de radioecos asociado a estas

P_{mar} (m)	$R_{m\acute{a}x}$ (km)	$R_{m\acute{i}n}$ (km)
670.0	60.0	43.0
620.0	55.0	47.0
390.0	46.0	40.0
100.0	38.0	32.0
580.0	54.0	49.5
450.0	48.0	44.0
100.0	38.0	33.0
85.0	35.0	31.0
90.0	37.0	33.0
50.0	25.0	22.0
660.0	58.0	52.0
400.0	48.0	45.0
690.0	60.0	56.0
75.0	34.0	30.0
590.0	54.0	50.0
100.0	38.0	33.0
500.0	49.0	46.0
80.0	35.0	33.0
640.0	55.0	50.0
580.0	50.0	46.0
480.0	46.0	42.0
90.0	37.0	34.0
45.0	26.0	22.0
55.0	28.0	25.0
45.0	26.0	22.0
57.0	30.0	24.0
54.0	29.0	25.0
52.0	28.0	24.0
58.0	30.0	26.0
470.0	47.0	43.0
55.0	28.0	23.0
56.0	29.0	25.0
52.0	27.0	23.0
50.0	26.0	22.0

el día 28 de octubre de 2001, y representada en el display de la computadora acoplada a este. Esta situación se debió al tránsito de un sistema frontal sobre el occidente de Cuba, que cruzó con cierta rapidez sobre la referida estación el día 27 de octubre de 2001. Este frente frío se clasificó como moderado al registrar vientos máximos sostenidos de 38 km/h, y fue del tipo revésino.

Determinación de los predictores que integran el algoritmo

De manera previa se asumió como predictores las variables $R_{m\acute{a}x}$ y $R_{m\acute{i}n}$, que podían formar parte del algoritmo y como predictando P_{mar} . Para precisar cuáles de los predictores quedarían incluidos se realizó un análisis de los coeficientes de correlación (Ver tabla 4).

Tabla 4. Coeficientes de correlación mutuos

Variables	Coefficiente de correlación mutuo
$P_{mar}, R_{m\acute{a}x}$	0,953868
$P_{mar}, R_{m\acute{i}n}$	0,941156
$R_{m\acute{a}x}, R_{m\acute{i}n}$	0,987716

De lo anterior se evidencia que existe un alto grado de correlación entre los predictores potenciales y el predictando, así como entre los predictores entre sí. Pero de los dos predictores potenciales el que exhibe el mayor valor de vínculo con el predictando es $R_{m\acute{a}x}$. Con estos elementos se determinó la exclusión de $R_{m\acute{i}n}$ del proceso de análisis de regresión que posteriormente se realizó.

Procesamiento estadístico de la muestra de datos

Al analizar las variables $R_{m\acute{a}x}$, y el predictando P_{mar} se pudo notar que mostraban una cierta tendencia

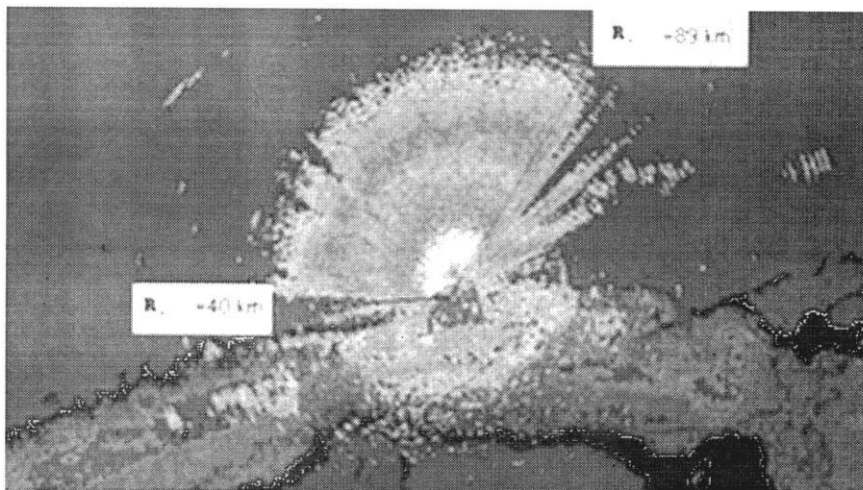


Fig. 3. Imagen digital del patrón de radioecos (Abanico desplegado).

a situarse en tres grupos. Por esta razón se decidió someter la muestra de datos a un análisis de su distribución de frecuencia. Se hallaron los intervalos en que oscilaron $R_{m\acute{a}x}$ y P_{mar} . Esto permitió realizar una adecuada estratificación de la muestra de datos entre grupos, la cual quedó conformada de la manera siguiente:

Estratificación de la muestra de datos en tres grupos

$R_{m\acute{a}x}$	P_{mar}
26	50
27	52
29	56
28	55
30	58
28	52
29	54
30	57
26	45
28	55
26	45
37	90
35	80
34	75
25	50
37	90
35	85

Grupo 2

$R_{m\acute{a}x}$	P_{mar}
47	470
46	480
50	580
49	500
39	100
54	590
48	400
38	100
48	450
54	580
38	100
46	390

Grupo 3

$R_{m\acute{a}x}$	P_{mar}
55	640
60	690
58	660
55	620
60	670

Analizando el orden de magnitud del predicando es evidente que los Grupos 2 y 3 tienen el mismo orden de magnitud, mientras que el primer grupo tiene un orden de magnitud menor, por eso se decidió utilizar dos estratos, el primero que coincide con el Grupo 1 y el segundo estrato que abarca los Grupos 2 y 3. Además, esto posibilita que el segundo estrato tenga el mismo número de casos y evita considerar como estrato el Grupo 3 que tiene una cantidad insuficiente de casos.

Por tanto se trabajará ahora con sólo dos estratos, que quedan conformados de la manera que se presenta a continuación.

Estrato 1

$R_{m\acute{a}x}$	P_{mar}
26	50
27	52
29	56
28	55
30	58
28	52
29	54
30	57
26	45
28	55
28	52
29	54
30	57
26	45
28	55
26	45
37	90
35	80
34	75
25	50
37	90
35	85

Estrato 2

$R_{m\acute{a}x}$	P_{mar}
47	470
46	480
50	580
49	500
39	100
54	590
48	400
38	100
48	450
54	580
38	100
46	390

Los resultados muestran el potencial de contingencia del malecón capitalino, cuando en el indicador PPI, o en la pantalla de la PC acoplada al radar de Casa Blanca se tienen imágenes de un patrón de radioecos en condiciones de inundaciones costeras.

En la tabla 5 se aprecia que los valores de $R_{m\acute{a}x}$ muestran marcada tendencia a oscilar desde 25 a 37 km, por lo que se tiene que el estado de la mar existente posee la capacidad para que tengan lugar inundaciones costeras por penetraciones del mar que califican en el orden de ligeras, las aguas pueden avanzar alrededor de 45 a 99 m.

Cuando los valores de $R_{m\acute{a}x}$ muestran marcada tendencia a variar desde 38 a 54 km, se tiene que el estado de la mar reinante posee potencial para que ocurran inundaciones costeras por penetración del mar que se clasifican como moderadas, el avance de las aguas puede tener un alcance que oscila aproximadamente entre los 100 y 590 m.

En las oportunidades en que los valores de $R_{m\acute{a}x}$ muestran marcada tendencia a oscilar desde 55 a 60 km, se tiene que el estado de la mar existente posee capacidad suficiente para que ocurran inundaciones costeras por penetración del mar fuertes, el avance de las aguas puede tener un alcance que oscila aproximadamente entre los 591 y 690 m.

Método diagnóstico radárico de inundaciones costeras

Los resultados alcanzados fueron sometidos a rigurosa comprobación, siguiendo como procedimiento la realización sistemática de observaciones, con el radar de Casa Blanca, aplicando la metodología observacional creada para estos fines. Al mismo tiempo se efectuaron las observaciones de campo ante inundaciones costeras por penetración del mar, lo más próximo posible al tiempo real. Los resultados recogidos en la tabla 5 constituyen el método diagnóstico radárico que permite a los operadores de radar informar sobre las características del patrón de radioecos, principalmente sobre el comportamiento de su $R_{m\acute{a}x}$, a los especialistas en predicción marina y sinóptica, que podrán contar con una herramienta útil y eficiente para emitir avisos sobre la evolución de este tipo de fenómeno.

Ecuaciones de pronóstico

Se efectuó el procesamiento estadístico de las variables P_{mar} y $R_{m\acute{a}x}$ para el primer estrato con el objetivo de conocer sus valores medios y las desviaciones estandar y realizar la regresión lineal simple (Tabla 6). Para el segundo estrato ver tabla 7.

Tabla 5. Análisis de los resultados obtenidos. Inundaciones costeras y radioecos

Tipos de inundaciones costeras y valores probables de su alcance		Distribución de frecuencia de los radioecos de la marejada		
		$R_{m\acute{a}x}$ (km)		
Tipos	P_{mar} (m)	25 - 37	38 - 54	55 - 60
Ligeras	45 - 99	17	X	X
Moderadas	100 - 590	X	12	X
Fuertes	591 - 690	X	X	5

Tabla 6. Resultados de la regresión lineal simple para el primer estrato

Variable	Media	Desviación Estandar	Correlación $R_{m\acute{a}x} P_{mar}$	Coef. Regresión
Independiente $R_{m\acute{a}x}$	29.88235	3.82234	0.97315	3.97157
Dependiente P_{mar}	61.70583	15.5995		

Intercepto: -56.97383 Error estandar del estimado: 3.70838 Total de casos 17

Tabla 7. Resultados de la regresión lineal simple para el segundo estrato

Variable	Media	Desviación Estandar	Correlación $R_{m\acute{a}x} P_{mar}$	Coef. Regresión
Independiente $R_{m\acute{a}x}$	49.70588	7.08665	0.95537	26.91728
Dependiente P_{mar}	471.76471	199.66331		

Intercepto: - 866.18243 Error estandar del estimado: 60.91411 Total de casos 17

La calidad de las ecuaciones obtenidas se puede corroborar de los residuos que para ambos estratos fueron calculados y se muestran en las tablas 8 y 9.

Tabla 8. Residuos para el primer estrato

Caso	P _{mar} Real	P _{mar} Estimada	Residuo
1	50.0	46.28686	3.71314
2	52.0	50.25843	1.742157
3	56.0	58.20156	-2.20156
4	55.0	54.22999	0.77001
5	58.0	62.17312	-4.17312
6	52.0	54.22999	-2.22999
7	54.0	58.20156	-4.20156
8	57.0	62.17312	-5.17312
9	45.0	46.28686	-1.28686
10	55.0	54.22999	0.77001
11	45.0	46.28686	-1.28686
12	90.0	86.00251	3.99749
13	80.0	82.03094	-2.03094
14	75.0	78.05938	-3.05938
15	50.0	42.31530	7.68470
16	90.0	86.00251	3.99749
17	85.0	82.03094	2.96906

Tabla 9. Residuos para el segundo estrato

Caso	P _{mar} Real	P _{mar} Estimada	Residuo
1	470.0	398.92966	71.07034
2	480.0	372.01236	107.98764
3	580.0	479.68149	100.31851
4	500.0	452.76419	47.23581
5	100.0	183.59142	-83.59142
6	590.0	587.35059	2.64941
7	400.0	425.84692	-25.84692
8	100.0	156.67413	-56.67413
9	450.0	425.84692	24.15308
10	580.0	587.35059	-7.35059
11	100.0	156.67413	-56.67413
12	390.0	372.01236	17.98764
13	640.0	614.26788	25.73212
14	690.0	748.85425	-58.85425
15	660.0	695.01971	-35.01971
16	620.0	614.26788	5.73212
17	670.0	748.85425	-78.85425

Las ecuaciones de pronóstico son:

Primer estrato: $P_{mar} = 3.97157R_{m\acute{a}x} - 56.97383$

Segundo estrato: $P_{mar} = 26.91728R_{m\acute{a}x} - 866.18243$

Ambas ecuaciones son válidas para el pronóstico a muy corto plazo, o sea para tres horas o menos. Estas ecuaciones reflejan un alto rigor cientifico, pues la prueba de significación demuestra que son significativas al nivel de 0,1 %, lo que quiere decir que estas ecuaciones tienen una probabilidad de comportarse bien en cualquier otra mues-

tra o en la población con un alto nivel de confianza de 99,9 %. El procedimiento estadístico para hallar el nivel de significación fue a través de comprobar la significación del coeficiente de correlación de las ecuaciones estadísticas halladas. Para el pronóstico operativo se creó un programa interactivo de fácil empleo.

Procedimientos metodológicos

Las instrucciones en su conjunto constituyen un manual (Anexo 1), que contiene la metodología que se adopta como procedimiento observacional para ser aplicada en la toma de datos al detectarse un

radioeco que tiene un patrón en forma de abanico desplegado, cuando se realiza la labor de sondeo empleando la función PPI del radar. Con la información que se obtiene mediante el empleo del radar meteorológico se pudo implementar un procedimiento observacional de vigilancia sistemática de la superficie marina, que permite el análisis y el pronóstico sobre la evolución del estado de la mar.

Conclusiones y recomendaciones

- Se proporciona una nueva visión del empleo de radares meteorológicos convencionales en el estudio y vigilancia del comportamiento del estado de la superficie marina en zonas costeras.
- Se demostró que el empleo de las estaciones de radar meteorológico puede contribuir a pronosticar a muy corto plazo la ocurrencia y alcance de las inundaciones costeras por penetración del mar, así se extienden las posibilidades de uso de estos costosos equipos.
- Se obtuvo un programa para el pronóstico a muy corto plazo del alcance de las inundaciones costeras por penetración del mar en el litoral del malecón habanero, con la utilización de la información radárica.
- Se recomienda extender estos estudios a las restantes estaciones de radar.

Bibliografía

Casals, R. (2003): «Los procesos de transformación de oleaje e incrementos del nivel del mar en Cayo Largo del Sur, Archipiélago de los Canarreos», Tesis de Maestría, INSMET, 54 pp.

CEOS (2003): «Wave height and spectrum», <http://ieeexplore.ieee.org/>

Egorov, N. I. (1983): *Oceanografía Física*, Vneshtorgizdat, URSS, 553 pp.

González, C. (1999): «Climatología de los frentes fríos que han afectado a Cuba desde 1916-1917 hasta 1996-1997», *Revista Cubana de Meteorología*, vol. 6, no. 1, 15-19 pp.

Juantorena, Y. (2003): «Desarrollo de un método de cálculo de los elementos de ola en los mares adyacentes y costas de Cuba mediante técnicas espectrales», Tesis en opción al grado científico de Doctora en Ciencias Meteorológicas, 166 pp.

Juantorena, Y., P. Beauballet y M. Sosa (1997): «Cálculo del oleaje en mar profundo, mediante técnica espectral en los sistemas frontales», 22 pp.

Litton Marine Systems Vision (2001): «Radar video adaptive processing», www.sperrymarine.northropgrumman.com/eSeaState-Newsletter/2001-Issues/Issue-7_November-2001/ - 58k.

Mitrani, I., M. Fontoya, L. Díaz y J. González (1984): «Determinación del régimen de oleaje y viento en la costa norte de La Habana», IV Exposición Forjadores del Futuro, Centro de Información y Divulgación de las BTJ, Código D. 5625 Mit. D., 15 pp.

Mitrani I., *et al.* (1994): «Características hidrometeorológicas generales de la zona costera correspondiente al malecón habanero», Instituto de Meteorología, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, 36 pp.

Mitrani I., *et al.* (2000): «Las Penetraciones del Mar en las Costas de Cuba, las Zonas más Expuestas su Sensibilidad al Cambio Climático», CITMA, Instituto de Meteorología, 100 pp.

Pérez, P., R. Casals, L. Díaz, R. Vega y A. del Sol (1994): «Análisis hidrometeorológico y estadístico de las penetraciones del mar ocurridas en el Malecón habanero», Departamento de Meteorología Marina, 56 pp.

Pérez, P., R. Casals y A. del Sol (2001): «Análisis de los fenómenos meteorológicos que provocaron penetraciones del mar en el Malecón habanero», *Revista Cubana de Meteorología*, vol. 8, no. 1, 50-58 pp.

Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (1998): «Proyecto Cuba 94/003. Desarrollo de técnicas de predicción de las inundaciones costeras, prevención y reducción de su acción destructiva», PNUD, 172 pp.

Sánchez, C. A., G. Makintoch y H. Rodríguez (2004): «Metodología radárica para el diagnóstico y pronóstico del oleaje en el litoral habanero», XI Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología y XIV Congreso Mexicano de Meteorología, en Cancún, Quintana Roo, México, C.D.

Sánchez, C. A., G. Makintoch y H. Rodríguez (2005): «Metodología radárica para el diagnóstico y pronóstico del oleaje en el litoral habanero», *Memorias Convención Trópico 2004*, La Habana, C.D.

Villasol, A., *et al.* (2003): «Estado del medio ambiente marino y costero del gran caribe. (-027). (proyecto ORPALC/ PNUMA /CIMAB)», VI Congreso de Ciencias del Mar 6th Congress on Marine Sciences.

WaMoS II (1998): «A wave and current monitoring system Report no. 42», WMO/TD- no. 938.

Walker, N. D. (2005): «Applications of Radarsat-1 Synthetic Aperture Radar (SAR) Data to Assess Hurricane-Related Coastal Flooding in the Northern Gulf of Mexico-8th International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments». <http://cat.inist.fr/>

Anexo 1

Manual de Instrucciones para el uso operativo de la metodología para el diagnóstico y pronóstico del estado de la superficie marina por el radar MRL-5 ubicado en Casa Blanca

La metodología consiste en realizar observaciones y mediciones siempre que sea detectada en el iniciador PPI el eco en forma de abanico desplegado. Este tipo de eco es generado cuando sobre la zona físico-geográfica se hace sentir mayormente la influencia de los fenómenos meteorológicos antes señalados. Estos fenómenos meteorológicos son capaces de imponer un régimen de vientos con componentes del cuarto o primer cuadrante (W - NW), (NW - W), (NW - N), (N - NW), (N - NE) y (NE - N). Se medirán las amplitudes radiales extremas del eco descrito en el indicador PPI. Es decir, se debe obtener para el sector apropiado, la extensión radial máxima-Radio máximo (R_{max}).

Todas las mediciones serán realizadas con el ángulo de elevación óptimo $qop = 0^\circ$, ya que la relación existente entre la distancia que separa al radar de Casa Blanca de la línea costera, que es aproximadamente 4 km y la altitud a la que se encuentra el eje de la antena parabólica sobre el nivel medio del mar (65 m) es tan pequeña que no es necesario obtener información empleando ángulos por encima o por debajo de cero. Se recomienda emplear sobre el PPI la escala de 100 km, ya que mayormente no existen reportes de este tipo de radioecos que alcancen distancias superiores. De esta manera se gana en resolución para determinar mejor los alcances de los radios máximos y mínimos del patrón de radioecos que se han detectado con forma de abanico desplegado.

Para tener una visión lo suficientemente clara sobre la evolución de este patrón de radioecos, deberán realizarse las observaciones y mediciones anotando estas de manera horaria, a partir de que surja y sea identificado en el indicador PPI por primera vez, hasta que este dé muestras progresivas de disipación. Por supuesto, esto último que tiene lugar cuando las magnitudes de las extensiones radiales máximas y sus valores de reflectividad correspondientes disminuyan sucesivamente. Se anotará la fecha, hora local y/o UTC, así como la dirección predominante del viento de la estación meteorológica de superficie de Casa Blanca. También la intensidad del viento predominante en m/s y cuál es el estado de la mar reinante en el plazo en que se están realizando las observaciones radáricas.

Esta información será remitida como criterio objetivo a los especialistas del Departamento de Meteorología Marina, para que indiquen si en ese momento existe oleaje o marejadas y el grado de estas últimas, así como la altura de las olas que se vinculan con ese estado.

Como la intención futura es que la metodología radárica para el diagnóstico y pronóstico a muy corto plazo de inundaciones costeras por penetración del mar, pueda ser aplicada en toda la Red de radares meteorológicos del archipiélago cubano, se elaboraron los procedimientos metodológicos que regulan la tarea de vigilancia meteorológica por radar sobre el comportamiento del estado de la mar para la estación de La Bajada, ubicada en la Península de Guahanacabibes, en la provincia de Pinar del Río; la de Punta del Este localizada en el municipio especial Isla de la Juventud; la de Pico de San Juan en la provincia de Cienfuegos y; la que está situada en La Gran Piedra en la provincia de Santiago de Cuba. Solo se exceptuó el radar MRL-5 de Camagüey, el cual debido a su ubicación está imposibilitado de poder captar en su PPI el patrón de radioecos, relacionado con la marejada.

Instrucciones para el uso operativo de la metodología de diagnóstico y pronóstico del estado de la superficie marina por los radares meteorológico de Punta del Este y de La Bajada ambos del tipo (RC-32B) japonés.

La metodología es análoga y difiere únicamente en que el ángulo de elevación de la antena que va desde 0 hasta 0,3 grados y que se recomienda aplicar en el PPI la escala de 50 km, ya que no existen reportes de ecos a distancias superiores.

Instrucciones para el uso operativo de la metodología para el diagnóstico y pronóstico del estado de la superficie marina por el radar meteorológico de Pico San Juan (MRL-5) soviético.

También en este caso, la metodología es similar excepto que se realizarán las observaciones siempre con un ángulo de decremento de la antena que van desde -1 hasta -2 grados y que se recomienda emplear la escala de 150 km.

Instrucciones para el uso operativo de la metodología para el diagnóstico y pronóstico del estado de la superficie marina por el radar meteorológico de La Gran Piedra (RC-32B) japonés.

En este caso, la metodología es también similar y solamente difiere en que se recomienda emplear la escala de 200 km.

Abstract

This paper reveals the results of a study about the pattern and characteristics of the marine surface, which find their origins in different synoptic scale meteorological phenomena, and facilitate the occurrence of coastlines flooding in Havana City.

The maximum and minimum magnitudes of radio distances of the conventional meteorological radar indicator were defined based on the information yielded by the identification of typical radar images of sea waves radio echoes pattern, which appear under the shape of a stretched out fan.

An observation method was especially designed for the meteorological radar in Casa Blanca and, for the first time, an operational program for short-term forecast was achieved to determine the potential outreach of flooding caused by sea surge along the shoreline areas of the capital.

It is suggested the use of conventional meteorological radars as a first hand instrument to carry out the surveillance, diagnosis and short-term forecast of shoreline flooding aused by sea surge.

Key words: radar, swells, coastal floods, forecast