

Pronóstico de Inundaciones Costeras en Cuba.

Parte II. Pronóstico de inundaciones costeras por sures en la costa sur occidental de Cuba.

AUTOR: MIGUEL A. PORTELA SANTIAGO, REINALDO CASALS TAYLOR

Centro de Pronóstico. Instituto de Meteorología. E-mail: portela@mail.met.inf.cu

Resumen

Se desarrollan dos métodos de análisis multivariado para el pronóstico de la ocurrencia de inundaciones costeras por penetración del mar por sures en la costa sur occidental de Cuba y para el pronóstico de la altura de la ola significativa asociada a esta situación

Introducción.

El objetivo de esta parte de la investigación fue obtener mediante análisis discriminante una ecuación para pronosticar la ocurrencia o no para el día siguiente de inundaciones costeras por penetración del mar en la costa sur de la región occidental de Cuba como consecuencia de la persistencia de vientos fuertes de región sur en una zona de aguas poco profundas. Igualmente se obtuvieron 8 ecuaciones mediante análisis de regresión no lineal para pronosticar la altura de la ola significativa durante las próximas 48 horas en intervalos de 6 horas para ser aplicadas cuando se presenten sures en esta zona.

En la Parte I del artículo se describieron las situaciones sinópticas favorables para la ocurrencia de inundaciones costeras en Cuba. Hay evidencias fehacientes de lo frecuentes y peligrosas que son las inundaciones costeras por sures en la costa sur occidental de Cuba. Esta situación, corresponde al Tipo 13 de la Parte I. Las definiciones, terminología, el algoritmo y los programas computacionales desarrollados son semejantes a los descritos en la Parte I de esta investigación. El enfoque que ahora se presenta es el primer intento de obtener un pronóstico de la ocurrencia, duración e intensidad de las inundaciones costeras, provocadas por sures, en la costa sur occidental de Cuba mediante técnicas multivariadas.

Los sures provocan inundaciones costeras en la costa sur occidental de Cuba principalmente entre los meses de enero a abril. La ocurrencia de inundaciones costeras en la costa sur de la región occidental de Cuba es, principalmente, debida al incremento del nivel del mar por el arrastre del viento sobre la superficie, ya que la acción directa del viento sur en el lugar, debido al hecho de que esta zona es de aguas someras, no puede desarrollar olas de gran altura. Sin embargo, el campo de viento va produciendo,

por la persistencia del mismo, un desplazamiento de las aguas en la superficie en la dirección del viento, o sea, hacia la costa sur de esta región las que, de acuerdo a las condiciones del fondo marino van abarcando una menor profundidad. La disminución del volumen disponible para ubicar esta irrupción de agua provoca que se eleve el nivel del mar de forma creciente a medida que se acerca al litoral hasta provocar una inundación costera en zonas bajas de este tramo.

En la muestra de trabajo se incluyen inundaciones costeras a partir del año 1970 hasta 1998. Esta fecha se escogió porque ya desde esa época se cuenta con una información archivada confiable. Por otra parte, en los 29 años que comprende la muestra de trabajo se registraron un total de 33 eventos, o sea, en promedio algo más de uno por año con 168 casos. La muestra obtenida en la Parte II de esta investigación constituye un cuarto estrato que se suma a los tres estratos obtenidos en la Parte I la cual fue procesada después de concluir la primera parte de la investigación. En la Parte II se consideraron los siguientes predictores potenciales:

Predictores potenciales de campo:

1. - Campo de la intensidad del viento en superficie y en el nivel de 850 hPa.
2. - Campo de la tendencia de la presión.
3. - Campo del viento al cuadrado en superficie y en el nivel de 850 hPa.
4. - Campo de Geopotencial del nivel de 850 hPa.

O sea, en total seis predictores de campo para un total de 10 estaciones. Además, se utilizaron 4 predictores de campo de la estación meteorológica de Batabanó que es de superficie y se vinculó con los

datos de la estación 78325 (Casa Blanca, La Habana) (Mitrani et al, p.32-34,2000), pero en definitiva, ninguno de éstos fue seleccionado.

Predictores potenciales empíricos:

- 1.- Persistencia (Duración).
- 2.- Fetch (Alcance o recorrido).
- 3.- Presión central de la baja.
- 4.- Presión del centro del anticiclón.
- 5.- Diferencia entre la presión central del anticiclón y del ciclón.
- 6.- Gradiente de presión entre la periferia y el centro de circulación.
- 7.- Angulo con que el ciclón tropical o la baja se aproxima a la costa.
- 8.- Rapidez de traslación del Sistema.
- 9.- Radio del viento máximo.
- 10.- Tamaño del Sistema (centro - última isobara cerrada)
- 11.- Viento máximo del Sistema.
- 12.- Distancia del Sistema al litoral.
- 13.- Tendencia de la presión central del Sistema.
- 14.- Presión en las boyas del golfo de México 42001, 42002 y 42003.
- 15.- Rapidez del viento en las boyas anteriores.
- 16.- Gradiente de presión entre dichas boyas y Brownsville.
- 17.- Tendencia de la intensidad del viento (cambio temporal).
- 18.- Gradiente de la velocidad del viento (cambio espacial).
- 19.- Zona generadora de oleaje (Si o No).
- 20.- Convergencia de las isobaras (Si o No).
- 21.- Altura de las olas en el momento inicial y 12 y 24 horas antes en la zona generadora
- 22.- Altura de la ola en el momento inicial y 12 horas antes en la costa sur occidental.

Relación de las inundaciones costeras en la costa sur de la región occidental de Cuba por sures.

Un logro importante de esta parte de la investigación fue impulsar la realización de la cronología de inundaciones costeras en la costa sur de La Habana (Casals, 2002), realizada a partir de la

cronología de los sures (Rodríguez y Ballester, 1985, Ballester, 2001). De esta cronología se extrajeron los casos que fueron utilizados en la muestra de trabajo y que aparecen en la Tabla 1.

Como se aprecia entre enero y abril ocurrieron 29 de las 33 inundaciones costeras que tuvieron lugar en el periodo estudiado que representa aproximadamente un 88% de las ocurridas, siendo marzo el mes en que más inundaciones costeras ocurrieron en la costa sur occidental de Cuba con 16.

Tabla 1. Eventos de las inundaciones costeras por sures en la costa sur occidental de Cuba utilizados.

AÑO	MES	DÍA
1970	2	3
1970	3	26
1971	2	8
1972	2	3
1972	3	31
1972	12	22
1973	3	26
1973	4	8
1978	3	3
1978	5	3,4
1979	1	22
1979	3	24
1980	3	30
1981	3	22
1982	3	6,7
1983	2	1,2
1983	3	6
1983	3	15
1983	4	24
1984	2	27
1984	3	28
1988	3	13
1988	4	30
1989	6	8
1991	3	3
1991	3	29
1993	3	13
1996	1	2
1996	3	18
1996	10	7
1997	4	27
1998	2	2
1998	2	16

Tabla 2. Distribución mensual de los eventos utilizados de ocurrencia de inundaciones costeras en la costa sur occidental de Cuba (1970-1998)

MESES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
NÚMERO	2	7	16	4	1	1	0	0	0	1	0	1
PORCENTAJE	6.1	21.2	48.5	12.2	3.0	3.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	3.0

Muestra dependiente

Se consideraron 168 casos constituidos por los 33 eventos que aparecen en la Tabla 1 entre 1970 y 1998. En la Tabla 2 aparece la distribución mensual de las inundaciones costeras por penetración del mar en la costa sur occidental de Cuba. Se incluyen los casos de los días mencionados, y de dos días antes y dos días después. No se incluye una muestra independiente debido a la pequeña cantidad de eventos. Se consideraron 110 predictandos y predictores a partir del fichero validado de los 96 datos iniciales.

Ecuaciones obtenidas.

Los predictores empíricos seleccionados fueron:

E1.- Altura inicial de la ola significativa en el lugar de inundación costera (metros).

E2.- Fetch (millas náuticas)

E3.- Presión en la boya 42002 (hPa).

E4.- Diferencia de presión entre la boya 42001 y Brownsville (hPa).

E5.- Si hay convergencia de isobaras 1, si no la hay 0.

E6.- Altura inicial de la ola significativa en la zona generadora (metros)

Los predictores de campo o sinópticos seleccionados fueron:

S1.- Altura geopotencial en 850 hPa en la estación 72240 (gpm).

S2.- Rapidez del viento al cuadrado en 850 hPa en la estación 72210 (nudos).

Con estos 8 predictores se hallaron las funciones discriminantes que aparecen en la Tabla 3

Tabla 3. Coeficientes de las funciones discriminantes.

Función Discriminante	Grupo 1	Grupo 2
Constante	-25670.56	-25584.37
E1	204.58	195.3491
E2	3.07452	3.05533
E3	54.54406	54.45274
E4	9.37045	9.10573
E5	33.19239	29.20866
E6	9.51705	10.28091
S1	-2.87922	-2.86852
S2	-0.00395	-0.00496

Para el método de regresión se utilizaron estos mismos predictores significativos e independientes. En las tablas 4 y 5 aparecen las ecuaciones lineales con predictores empíricos y sinópticos obtenidas, señalándose los predictores que intervienen de acuerdo a la notación introducida con anterioridad y los coeficientes de regresión respectivos en todos los plazos para el estrato 4 que coincide con el Tipo 13.

Tabla 4. Ecuaciones de regresión lineal con predictores empíricos.

PRED.	6	12	18	24	30	36	42	48
INT.	3.00468	0.82880	8.62269	6.34570	0.68999	0.42419	4.36894	-1.54554
E1	0.46201	0.35282	0.31822	0.31386	0.23191	0.11956	-0.02662	0.06559
E2	0.00062	0.00047	-0.00078	-0.00026	-0.00119	-0.00055	-0.00005	-0.00004
E3	-0.00295	-0.00077	-0.00827	-0.00589	-0.00037	-0.00014	-0.00381	0.00214
E4	-0.00680	-0.00816	-0.01988	-0.02197	-0.01340	-0.00885	-0.01467	-0.01304
E5	0.11702	0.04180	0.08069	0.02293	0.02126	-0.10080	0.03948	-0.02367
E6	0.02150	0.02393	-0.03172	-0.02727	-0.02453	0.00018	-0.09350	-0.09788

Tabla 5. Ecuaciones de regresión lineal con predictores sinópticos.

PRED.	6	12	18	24	30	36	42	48
INT.	2.91160	2.05316	3.14496	3.11610	1.83167	0.84258	1.01746	-0.65850
S1	-0.00178	-0.00120	-0.00186	-0.00169	-0.00093	-0.00033	-0.00037	0.00085
S2	0.00006	0.00001	-0.00008	-0.00018	-0.00013	-0.00009	-0.00017	-0.00013

Tabla 6. Ecuaciones de regresión cuadrática.

PLAZO	A	B	C	D	E	F
6	0.1859153	0.8371925	-1.060629	0.7027618	2.275811	-1.324024
12	-0.2712675	-0.0259437	-0.8555588	1.581135	1.439937	-0.0493346
18	-0.3908587	-0.8223367	-1.03125	1.757619	2.000151	0.7785053
24	-0.2537336	0.2818159	-1.140573	0.0906543	2.008314	0.4580865
30	-0.0916842	0.7934133	-1.129529	-0.6371588	2.824012	0.6409047
36	-0.3822612	-0.0116626	-2.279844	-2.371983	2.17721	6.969139
42	-0.1016791	0.0215701	-0.0130374	0.0204719	0.0563283	1.860757
48	-0.605867	-1.468152	-0.7761719	0.2789389	-0.6256245	4.3221550

Análisis de los resultados.

En el grupo de ocurrencia de inundaciones costeras el valor medio de la ola significativa inicial es de 1 metro, mientras que cuando no ocurre inundación costera el valor medio de la ola significativa inicial es solamente de 0.4 metros. El valor de la persistencia no se diferencia significativamente entre los casos de ocurrencia de inundación costera y los casos en que no ocurre inundación costera. El valor medio del fetch en el grupo en que ocurre inundación costera duplica al valor medio de este parámetro en el grupo de casos en que no ocurre inundación costera. Es muy significativo que el valor de la presión en la boya 42002 es cercano al valor normal en los casos en que no ocurre inundación costera, mientras que el valor medio de este parámetro es de 1007 hPa en los casos en que ocurre inundación costera en la costa sur occidental de Cuba. El gradiente de presión entre la boya 42001 y Brownsville es grande y positivo cuando ocurren inundaciones costeras, siendo negativo cuando no se produce este fenómeno. En los casos en que se producen inundaciones costeras hay convergencia de isobaras en la zona generadora y cuando no la hay no es probable que se produzca el fenómeno. Por otra parte, el valor medio de la altura significativa de la ola en la zona generadora es un metro mayor cuando se produce inundación costera. En el occidente del Golfo de México hay bajas presiones en las capas bajas de la atmósfera cuando ocurren inundaciones costeras en la costa sur occidental de Cuba mientras que son sustancialmente mayores cuando este fenómeno no ocurre. Por último, el viento en la porción nororiental del Golfo de México es mucho mayor cuando se producen inundaciones costeras en el tramo de costa estudiado que cuando no ocurre el fenómeno. De lo anterior, se deduce lo difícil que resulta hacer un pronóstico acertado de modo subjetivo a partir del análisis de valores de parámetros individuales, aún en el caso de considerar aquellos más informativos. De ahí, la importancia del diseño de métodos de pronóstico objetivos que sean

capaces de conjugar la influencia simultánea de un grupo de parámetros. De un total de 168 casos ocurridos en los 33 eventos estudiados, en el grupo 1 en que ocurre inundación costera hubo 36 casos, mientras que en los otros 132 casos no ocurrió inundación costera. La distancia generalizada de Mahalanobis tuvo un valor de 304.1944 lo que garantiza una informatividad muy alta. El método de análisis discriminante permitió clasificar correctamente el 92.3 % de los casos. Pero, en los casos en que ocurre inundación costera este indicador aumenta al 94.4 % de los casos. Mientras que en los casos en que no ocurre inundación costera el cumplimiento es del 91.7% de los casos. Es muy importante, además, desde el punto de vista de la práctica operativa que cuando la probabilidad asociada con la mayor función discriminante supera el 85% el cumplimiento se eleva al 98.8% de los casos. En otras palabras, solamente 2 de los 168 casos procesados fueron mal clasificados cuando la probabilidad de clasificación correcta fue de más del 85%. El análisis de las Tablas 7 y 8 permite corroborar lo anteriormente afirmado. También se aprecia que los errores van creciendo gradualmente hasta el plazo de 24 horas pero después los errores reflejan oscilaciones de forma que se mantienen acotados. El mayor error estándar en la ecuación cuadrática final es de 0.27 metros para el plazo de 24 horas. Sin embargo, al analizar el comportamiento de los errores absolutos medios que es un indicador de mayor importancia en el uso práctico de las ecuaciones se observa, como se refleja en la Tabla 8 que el mayor error ocurre para el plazo de 24 horas pero que es solamente de 0.22 metros. Esto es un resultado extraordinariamente bueno para cumplimentar adecuadamente la tarea de pronosticar el estado de la mar y la ocurrencia de inundaciones costeras. Asimismo los resultados alcanzados con las ecuaciones de regresión lineales para los predictores de forma separada son buenos pero no dan una respuesta de la misma calidad que la que se obtiene mediante el uso de un polinomio de segundo grado, cuyo ajuste es superior para todos los plazos.

Tabla 7. Error Standard de los diferentes métodos según los plazos. (m)

METODO	6	12	18	24	30	36	42	48
REGRE E	0.20402	0.24674	0.27690	0.30496	0.27186	0.25718	0.27750	0.28209
REGRE C	0.25661	0.26817	0.28644	0.29806	0.26376	0.25572	0.28049	0.29048
POL. SEG.	0.19100	0.23022	0.25245	0.27506	0.24814	0.23951	0.25705	0.26446

Tabla 8. Error absoluto medio del polinomio cuadrático según los plazos. (m).

METODO	6	12	18	24	30	36	42	48
POL. SEG.	0.15172	0.18453	0.20458	0.22256	0.19871	0.18721	0.20629	0.21182

Es interesante notar el porcentaje de casos que se ubica por debajo y por encima de diferentes cotas de error ya que los errores medios y estándar pueden reflejar en su valor la contribución de algunos casos con errores mucho mayores que los que usualmente ocurren.

Tabla 9. Porcentaje de casos con errores menores que el señalado. (m).

PLAZO	$E \leq 0.2$	$E \leq 0.4$	$E \leq 0.6$	$E \leq 0.8$	$E \leq 1.0$
6	83.9	98.8	100.0	100.0	100.0
12	78.6	95.2	98.8	99.4	100.0
18	80.4	89.9	97.6	100.0	100.0
24	73.2	90.5	100.0	100.0	100.0
30	78.0	92.9	98.8	100.0	100.0
36	82.1	92.9	98.8	98.8	100.0
42	74.4	91.7	98.8	100.0	100.0
48	78.6	91.7	98.8	100.0	100.0

En la Tabla 9 se aprecia que para todos los plazos en la totalidad de los casos el error de pronóstico de la altura de ola significativa es siempre menor de 1.0 metros. También se puede observar que en el peor plazo, prácticamente, el 90% de los casos tienen errores que no sobrepasan 0.4 m. Solamente el 1.2 % de los casos presenta errores en el pronóstico de la altura de la ola significativa superiores a los 0.8 metros.

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 coeficiente 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 número de casos menos 2. En la Tabla 10 aparecen los valores críticos del coeficiente de correlación simple para diferentes niveles de significación y el número de grados de libertad. En la Tabla 11 aparecen los coeficientes de correlación múltiples de las ecuaciones obtenidas para los diferentes métodos y plazos. Comparando los valores contenidos en las Tablas 10 y 11 de acuerdo al criterio antes expuesto todas las ecuaciones resultan significativas al nivel del 1% para todos los plazos. Debido a que el nivel de confianza de las ecuaciones obtenidas supera el 99 % es altamente probable que las ecuaciones obtenidas se comporten adecuadamente en la práctica bajo condiciones operativas de trabajo, es decir, que los errores que se produzcan estén acotados al recorrido de valores de los errores obtenidos en la muestra dependiente.

Tabla 10. Valor del coeficiente de correlación según el nivel de significación.

Grados de libertad	10 %	5 %	2 %	1 %
166	0.1057	0.1260	0.1502	0.1662

Tabla 11. Valor del coeficiente de correlación múltiple de las ecuaciones de regresión.

Ecuación	6	12	18	24	30	36	42	48
REGRE E	0.70880	0.47833	0.44182	0.40043	0.29351	0.26126	0.43913	0.46860
REGRE C	0.43959	0.25759	0.34259	0.42189	0.34419	0.23649	0.39351	0.38976
POLSEG	0.72925	0.50120	0.51194	0.53472	0.42494	0.32552	0.48418	0.53161

Conclusión.

Se impulsó la realización de una cronología detallada de las inundaciones costeras en la costa sur de la región occidental de Cuba. Se extendieron los métodos de pronóstico de las inundaciones costeras en Cuba para que incluyeran las producidas por sures en la costa sur de la región occidental de Cuba. El método de pronóstico por regresión se puede emplear, además, para la confección del pronóstico del estado del mar en la costa sur de la región occidental de Cuba, aún en caso de que no haya inundaciones costeras siempre que se dé la situación sinóptica típica señalada. La calidad de los resultados de las ecuaciones estadísticas obtenidas sobrepasa las expectativas iniciales por el alto porcentaje de cumplimiento, el pequeño valor de los errores medios y la alta significación de las ecuaciones finales. Los resultados de esta investigación dotan al Servicio Meteorológico de Cuba con nuevas herramientas para pronosticar las inundaciones costeras en la costa sur de la región occidental de Cuba. De esta forma este resultado contribuirá a tomar, de forma oportuna, decisiones sobre evacuaciones y otras medidas de mitigación que disminuyan las pérdidas materiales, más importante aún, minimicen las pérdidas humanas en esta importante zona costera para garantizar su desarrollo sostenible y seguro.

Referencias.

Ballester M. (2001): Base de datos de la cronología de los sures. En: Informe del resultado científico «Sistemas de Bajas presiones invernales y su influencia en la región occidental» del Proyecto 21012 «Prevención y Reducción de desastres provocados por fenómenos meteorológicos peligrosos»

Casals R. (2002): Cronología de las inundaciones costeras ocurridas en el sur de la provincia La Habana. *Revista Cubana de Meteorología*,9(1).

Mitrani I., R. Pérez, O.F. García, I. Salas, Y. Juantorena, M. Ballester, P. Beauballet, Q.I. Pérez, C. Rodríguez y F. Carreras (2000): Las penetraciones del mar en las costas de Cuba, las zonas más expuestas y su sensibilidad al cambio climático. *Insmet*. 100 pp. F-11-2001

Portela M.A. (1998): Elaboración de un método sinóptico-estadístico para el pronóstico de la ocurrencia de inundaciones costeras en Cuba. pp. 46-63 y Situaciones sinópticas típicas que originan inundaciones costeras en Cuba (1 a la 13) en el Anexo. En: Informe Técnico. Proyecto Cuba/94/003. Desarrollo de las Técnicas de Predicción de las Inundaciones Costeras, Prevención y Reducción de su Acción Destructiva. La Habana, Cuba. 172 pp. y anexo.

Rodríguez M., M. Ballester (1985): Cronología de los «sures» que han afectado a la mitad occidental de Cuba desde la temporada 1916-17 hasta la de 1977-78. Reporte de Investigación. No. 10. ACC. 7 pp.

Reconocimiento.

La extracción de los datos fue llevada a cabo por el Lic. Reinaldo Casals Taylor con la ayuda de Altagracia Ramos Aguilera. Se reconoce la ayuda de la Met. Daniela Arcia Llerena en la preparación del fichero de datos iniciales.

Abstrac.

Two multivariate analysis methods to forecast the occurrence of coastal sea floodings by southerly winds in the western south coast of Cuba and the significant waveheight associated to this situation are developed.