

Caracterización del efecto de acumulación para el cálculo de la dispersión de contaminantes y sus aplicaciones a lo largo de la Isla de Cuba

Autores: LOURDES ALVAREZ ESCUDERO
ROSENDO ALVAREZ MORALES
ALFREDO ROQUE RODRÍGUEZ

Instituto de Meteorología de Cuba

RESUMEN

Se describe el efecto de acumulación como el aumento de concentraciones producto de la aglomeración de desechos que se estaciona sobre una fuente como consecuencia de la ocurrencia de horas consecutivas de calma y su posterior desplazamiento en una dirección dada. Se describe la representatividad y tendencia de las calmas en 8 estaciones de Cuba. Se calculan las variables relacionadas con las calmas: horas de permanencia en calma, rumbo de salida de la calma, rapidez de salida de la calma y hora de salida de la calma. Se desarrolla un método para obtener una matriz de rumbo - rapidez de salida de la calma, que lleve implícito las horas de permanencia en calma y se dan diferentes variantes de la introducción de las matrices de acumulación en el pronóstico de concentraciones de contaminantes. Se muestra un ejemplo de pronóstico de concentraciones de SO₂ teniendo en cuenta el efecto de acumulación.

Introducción

Durante el experimento efectuado en Moa, provincia Holguín, Cuba, para determinar las concentraciones debidas a la dispersión de contaminantes provenientes del procesamiento industrial del níquel (Alvarez, et al., 1990) fue encontrada una contradicción entre los valores pronosticados y los medidos en una de las estaciones. Toda vez que el modelo utilizado para el pronóstico fue el de Berlyand - Alvarez con las modificaciones introducidas por Alvarez (Amaro et al., 1995), que contemplan el pronóstico para condiciones meteorológicas desfavorables, era necesario encontrar el fenómeno que da lugar a que los valores medidos fueran por encima de los máximos pronosticados.

La observación visual llevó a los autores a concluir que, dadas las características de la zona, ocurría en horas de la tarde una concentración de humo encima de la fuente debida a la ocurrencia de

calmas y que después ésta gran concentración de humo se movía, al soplar el viento en la dirección de la fábrica hacia el punto de medición creando los altos valores de concentraciones medidos.

Como es conocido los modelos de cálculo para la dispersión de contaminantes basan su aproximación a la realidad en ligaduras impuestas de antemano a la elaboración del modelo y una de las más importantes es que la emisión se considera para una fuente continua, o sea, emite la misma cantidad de contaminantes en el mismo tiempo. Esto, aunque no es completamente cierto se aproxima bastante a la realidad. Consideremos entonces la emisión de una fuente continua a la salida de la cual no existe un viento dispersor en condiciones de estabilidad atmosférica. El humo saldrá expulsado debido al forzamiento mecánico dado por los ventiladores de expulsión mas el tiro de una chimenea. Una vez que ha salido, al no encontrar un viento

dispersor se acumulará a la salida del conducto, aumentando su concentración durante todo el tiempo que transcurra sin que exista un viento capaz de dispersar a los contaminantes. Si en un momento dado el viento sopla en una dirección esta nube concentrada se moverá en esa dirección aumentando los valores de concentración a lo largo de la línea de ese rumbo haciendo fallar los valores calculados con un modelo de fuente continua. A todo este proceso de aglomeración de sustancias contaminantes debido a la ocurrencia de calmas y su posterior movimiento en una dirección provocando concentraciones mayores que las pronosticadas lo llamaremos "efecto de acumulación" (Alvarez, 1999, 2000).

Para caracterizar al efecto de acumulación utilizaremos parámetros como la dirección en que se moverá la nube de contaminantes después de cesar las calmas a lo que llamaremos rumbo de salida, la fuerza que adqui-

rirán los vientos después de abandonar la calma a lo que llamaremos rapidez de salida, la cantidad de horas consecutivas que el viento se encuentra en calma a lo que llamaremos horas de permanencia (Alvarez, 1992) y la hora del día en la que el viento sale de la calma a lo que llamaremos hora de salida.

El propósito de este trabajo es el estudio de las calmas, su representatividad y tendencia, el estudio de las variables permanencia en calma, rumbo, rapidez y hora de salida de la calma y como involucrar estos factores en el pronóstico de dispersión de contaminantes dando un ejemplo de la repercusión del efecto de acumulación para una fuente en particular.

Materiales y Métodos

Para el presente trabajo utilizaremos las mediciones de dirección (rumbo) y fuerza (rapidez) del viento en 8 estaciones meteorológicas ubicadas a lo largo del país. En la Tabla 1 podemos ver el nombre de la estación, el periodo utilizado para el análisis, la cantidad de observaciones válidas para el análisis, la cantidad de observaciones de calmas y su representatividad.

Para el trabajo clasificaremos las variables de viento de la siguiente forma:

- Rumbo: según la rosa de los vientos de 16 rumbos (unidad de permanencia 22.5°) (Alvarez, 1992).
- Calmas: Se considerarán a los vientos menores de 2 km/h (0.6 m/s) que es la velocidad a partir de la cual comienza a medir el instrumento.
- Fuerza: Los rangos de rapidez del viento se clasificarán de 1 en 1 m/s para los primeros 30 rangos, tres clases de 15 en 15 m/s y una última para mayores de 75 m/s, que es la forma en que se procesan los datos para el pronóstico.

Número de la estación	Nombre de la estación	Periodo de análisis	Total de observaciones válidas	Total de calmas	Porcentaje de representatividad de las calmas
314	San Juan y Martínez	1974 - 1998	62209	19797	32
325	Casablanca	1964 - 1998	102257	9197	9
343	Yabú	1971 - 1998	78563	29074	37
344	Cienfuegos	1971 - 1998	68650	17407	25
348	Caibarién	1971 - 1998	71580	19672	27
355	Camagüey	1970 - 1998	83195	16334	20
358	Puerto Padre	1970 - 1998	69219	9723	14
369	Maisí	1970 - 1998	72038	9393	13

Tabla 1. Número, nombre, periodo y cantidad de observaciones válidas, numero de observaciones con calmas y su representatividad con respecto al total de observaciones para cada una de las estaciones en estudio.

Análisis de los resultados

De las dos últimas columnas de la Tabla 1 vemos que las calmas representan un importante porcentaje de las mediciones de viento de ahí que el estudio de las implicaciones que esta condición meteorológica traiga consigo gana en importancia. Ahí observamos como las estaciones costeras por lo general son menos propensas a la ocurrencia de calmas que las que no lo son, con algunas excepciones como Caibarién donde las características de la franja de cayos que tiene cercana a las costa establece peculiaridades en el sistema de vientos. El mínimo de ocurrencia está en Casablanca y el máximo en Yabú.

Como la estación que menos años de observaciones posee es de 25, podemos realizar un análisis de la tendencia de las calmas en todas las estaciones. Para ello utilizaremos la siguiente metodología:

- a) Se graficó su comportamiento y se analizó si dada la cantidad de datos podía o no someterse a un análisis posterior.

- b) Se calculó el estadígrafo de Wald-Wolfowitz para determinar correlación interna.
- c) Se calculó el estadígrafo de Spearman y el de Mann-Kendall para determinar su tendencia global.
- d) Si era necesario por presentar contradicción entre las dos pruebas anteriores se realizaba la prueba global de Fisher. El cálculo de los estadígrafos se hizo según Sneyers (1990).
- e) Se tomaba una decisión usando la siguiente representación: 0 - serie homogénea, -1 - serie decreciente significativa (10% de significación), -2 - serie decreciente altamente significativa (5% de significación), +1 - serie creciente significativa, +2 - serie creciente altamente significativa y sin valor - los datos no eran suficientes para realizar un análisis.
- f) En caso de encontrarse un solo punto de cambio se estimaba este mediante las pruebas de Mann - Kendall y de Pettitt.

El resultado del análisis puede verse en la Tabla 2.

Número de la estación	Nombre de la estación	Longitud de la serie en años	Año de menor frecuencia de ocurrencia	Año de mayor frecuencia de ocurrencia	Análisis de la tendencia	Posible punto de cambio
314	San Juan y Martínez	25	1998	1986	-2	1990
325	Casablanca	35	1988	1975	-2	1978
343	Yabú	28	1998	1971	-2	---
344	Cienfuegos	28	1993	1988	0	---
348	Caibarién	28	1971	1994	+2	---
355	Camagüey	29	1992	1973	-2	1983
358	Puerto Padre	29	1984	1988	0	---
369	Maisí	29	1975	1997	0	---

Tabla 2. Análisis de tendencia de las calmas por estaciones.

El análisis arroja que en 4 de las 8 estaciones la tendencia de las calmas es a decrecer significativamente, con puntos de cambio en tres de ellas sobre el centro de la serie, en otras tres estaciones la serie de ocurrencia de calmas por años es homogénea y en una sola es creciente, en Caibarién. El decrecimiento de calmas por año en Casablanca puede atribuirse a un cambio en el sistema de vientos para esa región, pues por indagaciones hechas se ha comprobado que el instrumento de medición siempre fue el mismo (DINES), que no se ha cambiado de lugar ni se ha cambiado la metodología de medición en el periodo de análisis. Este estudio ameritaría un análisis de tendencia por rangos de viento para ver cuales aumentan en detrimento de las calmas.

Si analizamos la marcha anual de las calmas para todas las estaciones en estudio se observan dos grupos; uno compuesto por las estaciones más occidentales: San Juan y Martínez, Casablanca y Cienfuegos y otro por las más orientales: Yabú, Caibarién, Camagüey, Puerto Padre y Maisí. En general las calmas son menos frecuentes en los meses del periodo poco lluvioso y son más frecuentes en los meses del periodo lluvioso (mayo a octubre) para todas las estaciones, pero se observa una baja en el número de casos sobre el mes de julio para las estaciones pertenecientes al grupo de las más orientales. Esto parece obedecer a una mayor influencia anticiclónica subtropical sobre esta parte del país en ese periodo. El mes con mayor número de calmas es septiembre y el de menor marzo. La curva de mejor ajuste a la distribución representada para la serie de Casablanca (la más completa en observaciones) es de la forma:

$$\text{número de casos} = a + b \frac{2\pi}{T} \text{mes} + \sum_{i=1}^3 c_i \sin\left(\frac{2\pi}{T}\right) \text{mes} + \sum_{i=1}^3 d_i \cos\left(\frac{2\pi}{T}\right) \text{mes} \quad (1)$$

donde T es el periodo en este caso 12 meses. El coeficiente de correlación fue de 0.99 y el error relativo de aproximadamente 6 %.

A diferencia de la marcha anual la marcha diaria de las calmas es bastante similar para todas las estaciones en estudio. Los máximos de ocurrencia de calma están en las horas extremas del día (noche, madrugada y mañana) y los mínimos en horas de la tarde donde las frecuencias de ocurrencia pueden ser muy bajas. La curva del mejor ajuste para la distribución de la serie de Casablanca (la más completa en observaciones) tiene la forma (1) donde en lugar del mes está la hora del día y el periodo es de 24. Se obtuvo para el ajuste un coeficiente de correlación de 0.99 con un error relativo aproximado del 4%. Debe señalarse que con excepción de Casablanca y Camagüey, las restantes estaciones tienen un gran déficit de observaciones en los horarios 01, 04 y 22, por lo que para cualquier análisis esto debe tenerse en cuenta.

Como ya se comentó en la introducción para el estudio del efecto de acumulación son tan importantes las calmas en sí como las variables que le están asociadas como son: las horas de permanencia en calmas, el rumbo de salida de la calma, la rapidez de salida de la calma y la hora de salida de la calma. En la tabla 3 se resume el valor más frecuente de estas 4 variables para las estaciones en estudio.

Número de la estación	Nombre de la estación	horas de permanencia	rumbo de salida	rapidez de salida (m/s)	hora de salida
314	San Juan y Martínez	1	NE	1	07
325	Casablanca	1	E	1	07
343	Yabú	1	E	1	07
344	Cienfuegos	1	NE	1	07
348	Caibarién	1	E	3	07
355	Camagüey	1	E	1	07
358	Puerto Padre	1	E	1	07
369	Maisí	1	E	2	07

Tabla 3. Valor más frecuente para las 4 variables asociadas con la calma por estaciones.

En general la hora de salida preferente es la 07 y la hora de permanencia es 1, el rumbo de salida es generalmente el E con excepción de San Juan y Martínez y Cienfuegos donde es el NE y la rapidez de salida es generalmente 1 m/s con la excepción de Maisí donde es 2 y Caibarién donde es 3. Por el análisis hasta aquí realizado Caibarién resulta una estación con características muy particulares.

Si hacemos un análisis más general que implique frecuencia de ocurrencia de dos variables a la vez por rangos podemos trazar cartas características que nos darían una descripción más amplia del fenómeno de estudio. Utilizaremos tres tipos de cartas para cada una de las estaciones y son:

- carta característica de horas de permanencia en calmas contra rumbos de salida de la calma.
- carta característica de horas de permanencia en calma contra rapidez de salida de la calma.
- carta característica de horas de permanencia en calma contra hora de salida de la calma.

Un ejemplo de la representación gráfica de estas cartas puede observarse en la figura 1 para la estación de Cienfuegos.

Resumamos el comportamiento representado por estas cartas para cada estación:

San Juan y Martínez: Hay representación de hasta 50 casos para 4 y 5 horas de permanencia, los rum-

bos de salida preferentes están entre NNE y el ESE, la rapidez de salida entre 1 y 4 m/s y las horas preferenciales de salida de la calma están entre las 04 y las 10 con un máximo secundario en las 19.

Casablanca: Hay representación de hasta 50 casos para 3 horas de permanencia, los rumbos de salida preferentes están entre ENE y el S, la rapidez de salida entre 1 y 4 m/s y las horas preferenciales de salida de la calma están entre las 04 y las 10.

Yabú: Hay representación de hasta 50 casos para 6 horas de permanencia en algunos rangos, los rumbos de salida preferentes están entre NE y el SE, la rapidez de salida entre 1 y 5 m/s y las horas preferenciales de salida de la calma están entre las 04 y las 10 con un máximo absoluto para las 07 con 4 horas de permanencia.

Cienfuegos: Hay representación de hasta 50 casos para 2 horas de permanencia, los rumbos de salida preferentes están entre NE y el SE con un máximo secundario entre el SSE y el WSW, la rapidez de salida entre 1 y 4 m/s y las horas preferenciales de salida de la calma están entre las 04 y las 10 con un máximo secundario en las 19.

Caibarién: Hay representación de hasta 50 casos para 2 y 3 horas de permanencia, los rumbos de salida preferentes están entre NE y el SE, la rapidez de salida entre 1 y 8 m/s y las horas preferenciales de salida de la calma están entre las 04 y las 13 con un máximo secundario entre las 19 y las 22.

Camaguey: Hay representación de hasta 50 casos para 3 horas de permanencia, los rumbos de salida preferentes están entre N y el ESE, la rapidez de salida entre 1 y 6 m/s y las horas preferenciales de salida de la calma están entre las 04 y las 07 con otro máximo en las 07 para 3 horas de permanencia.

Puerto Padre: Hay representación de hasta 50 casos para 2 horas de permanencia, los rumbos de salida preferentes están entre el NNE y el SE, la rapidez de salida entre 1 y 4 m/s y las horas preferenciales de salida de la calma están entre las 04 y las 10.

Maisí: Hay representación de hasta 50 casos para 2 y 3 horas de permanencia, los rumbos de salida preferentes están entre el N y el ESE con un máximo secundario en el W, la rapidez de salida entre 1 y 4 m/s y las horas preferenciales de salida de la calma están entre las 01 y las 13.

Haciendo combinaciones con estas 4 variables podemos establecer cuales son las más frecuentes y la más peligrosa considerando para ello la de número de horas de permanencia con mayor representatividad. En la Tabla 4 mostramos las dos combinaciones más frecuentes por estaciones, especificadas como número de horas de permanencia, rumbo de salida, rapidez de salida y hora de salida y su representatividad con respecto al total de combinaciones en %. En la Tabla 5 tenemos un procedimiento parecido pero para la combinación más peligrosa especificando además el lugar que ocupa dentro de la lista de combinaciones.

Aunque las probabilidades de ocurrencia son bajas, existen y estas combinaciones tanto las más frecuentes como la más peligrosa, pueden ocurrir y por tanto deben tomarse en cuenta a la hora de realizar pronósticos de máxima afectación.



Figura 1. (A) Carta característica del número de casos de horas de permanencia contra rumbos de salida de la calma para la estación Cienfuegos en el periodo 1971 - 1998 con observaciones trihorarias. (B) Carta característica del número de casos de horas

Número de la estación	Nombre de la estación	1ra combinación más frecuente	% de representatividad con respecto al total de combinaciones	2da combinación más frecuente	% de representatividad con respecto al total de combinaciones
314	San Juan y Martínez	1, ENE, 2, 07	2.77	1, E, 2, 07	2.44
325	Casablanca	2, E, 1, 04	2.04	2, ESE, 1, 04	1.51
343	Yabú	1, E, 1, 04	1.59	1, E, 1, 22	1.46
344	Cienfuegos	1, NE, 1, 19	1.9	1, E, 1, 07	1.69
348	Caibarién	1, E, 3, 22	1.0	1, E, 4, 22	0.97
355	Camaguey	1, E, 1, 04	1.12	2, E, 1, 04	0.83
358	Puerto Padre	1, E, 3, 07	5.13	1, E, 1, 07	5.08
369	Maisí	1, E, 2, 07	1.26	1, E, 3, 07	1.11

Tabla 4. Combinaciones más frecuentes de las variables relacionadas con las calmas por estaciones.

de permanencia contra rapidez de salida de la calma para la estación Cienfuegos en el periodo 1971 - 1998 con observaciones trihorarias. (C) Carta característica del número de casos de horas de permanencia contra hora de salida de la calma para la estación Cienfuegos en el periodo 1971 - 1998 con observaciones trihorarias.

las concentraciones producidas por el efecto de acumulación, que pueden ser sumadas a las concentraciones obtenidas en el pronóstico normal para su rectificación.

Si repetimos este cálculo para los vientos que salen de la calma a la hora de salida más frecuente, obtendremos la matriz de probabilidades de rumbos contra rapi-

Aunque muchas de estas combinaciones pueden tener una probabilidad de ocurrencia baja, nunca deben obviarse cuando se trata de pronosticar dosis máximas, pues el hecho de que ocurran poco, no significa que no ocurran y siempre se debe estar preparado para la protección del hombre y su medio ambiente.

Número de la estación	Nombre de la estación	Combinación más peligrosa (por horas de permanencia)	% de representatividad con respecto al total de combinaciones	Posición que ocupa en la lista de combinaciones
314	San Juan y Martínez	5, E, 1, 07	0.64	31
325	Casablanca trihoraria	8, E, 1, 22	0.96	6
343	Yabú	5, E, 1, 13	0.97	9
344	Cienfuegos	3, SW, 1, 07	0.32	67
348	Caibarién	3, SE, 1, 07	0.22	83
355	Camagüey	4, E, 4, 07	0.68	9
358	Puerto Padre	4, E, 1, 07	0.56	30
369	Maisí	5, E, 2, 07	0.50	21

Tabla 5. Combinación más peligrosa (según el número de horas de permanencia) de las variables relacionadas con las calmas por estaciones.

Ahora bien, si poseemos las matrices de frecuencia de ocurrencia de horas de permanencia contra rumbos de salida de la calma y de horas de permanencia contra rapidez de salida de la calma, podemos por multiplicación matricial común lograr una matriz de frecuencia de ocurrencia de rumbos contra rapidez de salida de la calma, compaginando para ello adecuadamente las filas de una con las columnas de otra y multiplicando cada elemento por el número de horas de permanencia que representa (recordar que cuando se trabaja con datos trihorarios cada hora de permanencia significa 3 horas consecutivas de calma). La matriz resultado será una matriz de rumbos contra rapidez que lleva implícito la cantidad de horas de permanencia en calma y a la que llamaremos matriz de acumulación. Si a partir de ella realizamos un pronóstico de concentraciones tal y como se hace con la matriz rumbo - rapidez para los vientos en general, obtendremos

dez de salida de la calma a la hora que más salen los vientos de la calma. Esta matriz también puede ser usada con fines de caracterizar el efecto de acumulación dentro del pronóstico de concentraciones de contaminantes.

Como ejemplo mostraremos la matriz total de rumbo - fuerza del viento y la matriz de acumulación calculada como se explica en párrafos anteriores para la serie trihoraria de Cienfuegos (figura 2). Si comparamos estas matrices vemos como la de acumulación es mucho menos significativa que la total, pero muestra componentes con suficiente representatividad como para dañar los resultados del pronóstico, pues los valores de concentración obtenidos de la acumulación se suman a los obtenidos por el pronóstico clásico. Un ejemplo de pronóstico que conlleva la acumulación se muestra en la figura 3 para una hipotética fuente del compuesto yodo 133 ubicada en la estación Cienfuegos.

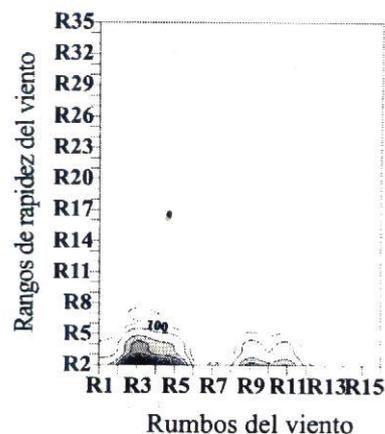
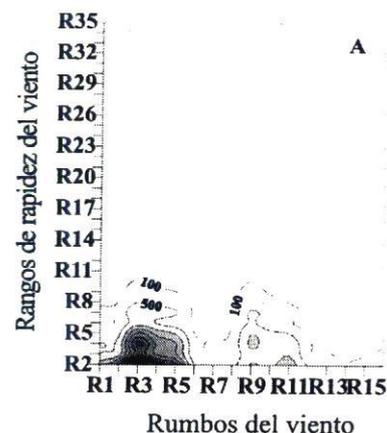


Figura 2. (A) Matriz de frecuencia de ocurrencia de rumbos contra rapidez del viento para la estación Cienfuegos en el periodo 1971 - 1998 con observaciones trihorarias. (B) Matriz de frecuencia de ocurrencia de viento (que lleva implícito la permanencia en calmas) por rumbos contra rapidez de salida de la calma para la estación Cienfuegos en el periodo 1971 - 1998 con observaciones trihorarias.

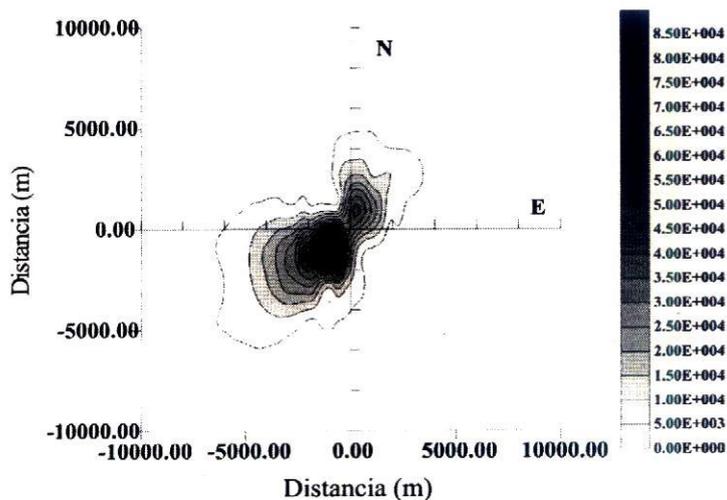


Figura 3. Pronóstico de concentraciones del compuesto I133 para una hipotética fuente ubicada en la estación de Cienfuegos teniendo en cuenta el efecto de acumulación. Las concentraciones están dadas en Bq/s.

Conclusiones y recomendaciones

Una vez expuesto el trabajo podemos arribar a las siguientes conclusiones:

Las calmas tienen una representatividad lo suficientemente alta con respecto al total de observaciones como para realizar su caracterización en las estaciones en estudio. La máxima representatividad se obtuvo en la estación Yabú (37%) y la mínima en Casablanca (9%).

En 4 de las estaciones en estudio (San Juan y Martínez, Casablanca (horaria y trihoraria), Yabú y Camagüey) la tendencia de la frecuencia de ocurrencia anual de calmas es decreciente altamente significativa, 3 son homogéneas (Cienfuegos, Puerto Padre y Maisí) y una creciente altamente significativa (Caibarién).

El estudio de la marcha anual de las calmas muestra mínimos en el período poco lluvioso y máximos en el período lluvioso (mayo a octubre). La curva de mejor ajuste a la distribución de la serie de Casablanca (más completa en observaciones) es la suma de un término lineal y tres armónicos.

El estudio de la marcha diaria de las calmas muestra aproximadamente mínimos en horas de la tarde y máximos en horas de la noche, la madrugada y la mañana. La curva de mejor ajuste a esta distribución de la serie de Casablanca es también la suma de un término lineal y tres armónicos.

A partir de la combinación de las 4 variables relacionadas con la calma: permanencia, rumbo, rapidez y hora de salida de la calma se puede determinar las combinaciones más frecuentes y la más peligrosa según el número de horas de permanencia. En general para todas las estaciones son combinaciones de 1 hora de permanencia, vientos del este o del primer cuadrante, rapidez de 1 m/s y hora de salida 07, aunque cada estación tiene sus peculiaridades.

Mediante las cartas características de horas de permanencia contra rumbos de salida, horas de permanencia contra rapidez de salida y horas de permanencia contra hora de salida de la calma, se puede determinar la probabilidad de ocurrencia de efectos conjuntos y evaluar sus implicaciones.

A partir de las cartas características de horas de permanencia contra rumbos de salida y horas de permanencia contra rapidez de salida de la calma se puede obtener por producto matricial una matriz rumbo - rapidez de salida de la calma que lleve implícito las horas de permanencia en calma. Esta matriz puede introducirse en los pronósticos de concentraciones de contaminantes y dar una rectificación del mismo por el efecto de acumulación.

Se recomienda la aplicación de la metodología del efecto de acumulación como rectificación a los pronósticos de concentraciones de sustancias contaminantes.

Se recomienda la extensión del estudio a otras estaciones del país para obtener matrices climáticas de las variables de acumulación con gran representatividad, que sirvan de referencia y comparación con las que se obtengan para estudios de fuentes emisoras lejanas a las estaciones meteorológicas.

Referencias

Alvarez, R. (1990): Caracterización de la dispersión de contaminantes en la zona minero - metalúrgica de Moa. Informe de Resultado. IDICT, Instituto de Meteorología. Academia de Ciencias de Cuba.

Alvarez, L., R. Alvarez (1992): La permanencia como propiedad general de las variables meteorológicas I. Resultados preliminares. Revista Cubana de Física, 12(2): 115-120.

Alvarez R.; L. Alvarez (2000): El efecto de acumulación y su influencia en el patrón de contaminantes. Revista Brasileña de Meteorología. 15 (1): 103 - 112

Amaro, M. L.; Alvarez R.; Lecha L.; Pérez D.; Soltura R.; González J. L.; Alfonso A.; González J.; Vega R.; Alvarez L.; Casals R.; Pérez P.; Juantorena Y.; Alvarez O.; Ramos E.; Linares M.; Rivero I.; Rodríguez G.; Rodríguez L. E.; Báez R. (1995): Informe de Seguridad. Central Electronuclear de Juraguá, 3 tomos. Instituto de Meteorología, Agencia de Medio Ambiente. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente.

Sneyers, R. (1990): On the statistical analysis of series of observations. Technical Report No. 143, WMO-No. 415, 192 pp.

ABSTRACT.

The effect of accumulation is described as the increment in concentration product of the mass of pollutant that gathers around a source as a consequence of the occurrence of several hours of calm and its later displacement in a given direction. The representativeness and tendency of the calms is described at 8 stations in Cuba. Some variables related with calms are also calculated: hours of permanency in calm, wind direction and speed upon exit of the calm and hour of exit. A method is developed to obtain a matrix of direction - speed of exit, that takes implicitly into account the hours of permanency in calm. Different approaches for the introduction of matrixes of accumulation in the forecast of pollutant concentrations are given. An example of SO₂ concentration forecast is shown, which considers the effect of accumulation.