

METEOROLOGIA

Caracterización química de la lluvia asociada a las ondas tropicales*

**Arturo RODRIGUEZ CASO
y ***Marina SOSA HURTADO

RESUMEN. *Las ondas tropicales constituyen, después de los ciclones tropicales, el sistema sinóptico más importante de los meses de verano en las regiones donde se presentan ya que el cruce de ellas trae consigo un incremento en los nublados y las precipitaciones. Se halló que las ondas tropicales no presentan, como promedio, valores de pH ácidos en la lluvia, así como que el grado de mineralización de la lluvia debido a las mismas es relativamente bajo. Fueron determinadas otras características químicas de la lluvia asociada a estos sistemas. El carácter ácido o no de la lluvia se debe al comportamiento del aire superior en los días precedentes al arribo de estos organismos al territorio cubano, lo cual se comprobó por el análisis de las trayectorias inversas de las partículas de aire.*

INTRODUCCION

Las ondas tropicales, conocidas también como ondas en los Estes, son especialmente hondonadas de bajas presiones que se hallan embebidas en la profunda corriente del Este en la zona tropical. Después de los ciclones tropicales, las ondas del Este constituyen el sistema más importante en los meses de verano en las regiones donde ellas se presentan, y el cruce de una de ellas por un lugar dado, trae consigo un incremento en los nublados y las precipitaciones (Sosa, 1985).

En los meses en que se presentan estos fenómenos en el área del Océano Atlántico (mayo a noviembre), para Cuba los meses

de mayor frecuencia son julio, agosto y septiembre, donde llegan como promedio de 2 a 3 ondas tropicales por mes y se desplazan con velocidades entre 20 y 30 km/h, pudiendo encontrarse ondas estacionarias, lentas y rápidas y algunas de ellas llegan incluso a intensificarse y desarrollarse, convirtiéndose en perturbaciones y huracanes.

Estas ondas tienen diferentes orígenes pero, para Cuba, las más comunes son las que

*Manuscrito aprobado en mayo de 1991.

**Centro Meteorológico Territorial de Camagüey,

***Instituto de Meteorología de la Academia de Ciencias de Cuba.

aparecen como reflejo de bajas frías superiores, las que ocurren por extensión de vaguadas de latitudes medias, las ondas de "v" invertidas y la clásica onda del Este planteada por Rielh en los años 40. Ellas pueden formarse sobre toda el área del Atlántico desde las costas de Africa hasta el Golfo de México, incluyendo por supuesto el Mar Caribe.

No existen en la literatura científica consultada por nosotros, trabajos referentes a la composición química de las lluvias asociadas a las ondas tropicales, por lo cual no tenemos resultados, obtenidos por otros autores, con los cuales comparar los nuestros, o que nos puedan servir de guía sobre los resultados a esperar.

MATERIALES Y METODOS

En la confección del presente trabajo se utilizaron los datos obtenidos en las estaciones meteorológicas de La Palma (Pinar del Río), Casablanca y Santiago de las Vegas (Ciudad de La Habana) y Santiago de Cuba en el período de 1984-1988.

Para la toma de muestras de lluvia se empleó un recipiente colector de material acrílico transparente de PVC. Las muestras se conservaron en un frasco plástico blanco a temperaturas inferiores a 8°C, enviándose posteriormente al Laboratorio Central del Departamento de Control de la Contaminación Atmosférica del Instituto de Meteorología de la Academia de Ciencias de Cuba.

A las muestras de lluvia se le realizaron las siguientes determinaciones: pH, conductividad, contenido de aniones (sulfato, cloruro, nitrato y bicarbonato) y contenido de cationes (amonio, sodio, potasio, calcio y magnesio).

Para el análisis meteorológico se consultaron los mapas del tiempo de superficie y de aire superior, así como las fotografías de los satélites meteorológicos correspondientes al día de afectación de la onda tropical y hasta los cinco días anteriores. Las trayectorias inversas se construyeron empleando la aproximación geostrofica (Serdiuk, 1988; Rodríguez y Sosa, 1989).

El procesamiento estadístico se efectuó en microcomputadoras personales empleando

los paquetes de programas estadísticos Abstat, Microstat y Supercalc 4, así como el programa para los ajustes a las distribuciones de frecuencia elaborado en el Departamento de Climatología del Instituto de Meteorología.

Empleando los resultados de los análisis químicos se realizaron algunas determinaciones complementarias que contribuyen a una mejor caracterización de la composición química de las precipitaciones.

1) Sulfato en exceso: Se calcula a partir de las concentraciones de sulfato y sodio en la lluvia, considerando que todo el sodio presente es de origen marino y teniendo en consideración la relación de estos iones en el agua de mar. Para el cálculo empleamos la ecuación No. 1 siguiente (Rodhe, 1982):

$$SO_4^{2-} = \left(SO_4^{2-} \right)_{med\ exp} \left(Na^+ \right)_{med\ exp} \cdot \left(SO_4^{2-} \right)_{agua\ de\ mar}$$

donde:

$$\left(SO_4^{2-} \right)_{agua\ de\ mar} = 0,25$$

agua de mar

2) Mineralización: La mineralización es la suma de las concentraciones de todos los iones, excepto el hidrógeno. Refleja la calidad de la lluvia, al dar una idea del grado de contaminación de las mismas (Drozdova et al., 1964; Comité Estatal de Hidrometeorología y Control del Medio Ambiente de la URSS, 1979):

$M = \sum c_i$ donde $c_i =$ concentración del ión i en mg/l

3) Deposición: Es una propiedad extensiva ya que depende de la cantidad de lluvia caída. Se calcula, según Mészáros (1981) a través de la fórmula:

$$D_i = C_i P_i \cdot 10^{-2}$$

$c_i =$ concentración del ión i en mg/l

$P_i =$ cantidad de lluvia caída en el día de afectación de la onda en mm.

$10^{-2} =$ factor a través del cual se obtiene la expresión de la deposición en unidades de $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{día}$.

RESULTADOS Y DISCUSION

En las tablas 1 a la 4 aparecen algunos esdógrafos descriptivos calculados para las muestras de lluvia asociada a algunas de las ondas tropicales que afectaron las estaciones contempladas en este trabajo durante los años 1984 a 1988.

El valor medio del pH de la lluvia en cada una de las estaciones estudiadas no corresponde a lluvias ácidas. Los valores medios obtenidos son 5,7 (La Palma); 5,8 (Casablanca y Santiago de las Vegas) y 5,9 (Santiago de Cuba). Tanto los valores mínimos y máximos absolutos para las ondas tropicales se encuentran en Santiago de Cuba con 4,5 y 8,4 respectivamente. La Palma presenta los valores medio y máximo más bajo y el mínimo más alto entre todas las estaciones.

Si tomamos en consideración los valores medios para hallar los ordenamientos iónicos de cada estación, en las precipitaciones correspondientes a las ondas tropicales, obtendremos los siguientes resultados:

Casablanca $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$
 $\text{Ca}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$

S. Vegas $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$
 $\text{Ca}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$

La Palma $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$
 $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{Mg}^{2+}$

Santiago de Cuba $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^-$

Si analizamos los ordenamientos iónicos, podemos apreciar algunas regularidades:

a) Casablanca y Santiago de las Vegas presentan el mismo ordenamiento. Los iones cuyos valores de concentración son más elevados son bicarbonato y calcio, siendo los de menor concentración nitrato y potasio. En ambas estaciones el amonio es el segundo catión en concentración por lo que juega un papel de relativa importancia en la composición química de las lluvias asociadas a las ondas tropicales, lo cual no parece ser el caso de la sal marina, ya que tanto el sodio como el cloruro ocupan el tercer lugar en el ordenamiento, a pesar del carácter costero de la estación Casablanca.

b) La Palma y Santiago de Cuba muestran el mismo ordenamiento aniónico, donde el sulfato es el anión más concentrado. En las lluvias sobre La Palma, a diferencia con las que ocurren en Casablanca y Santiago de las Vegas, el catión de mayor concentración es el sodio, mientras que los dos de menor concentración son NH_4^+ y Mg^{2+} . El Cl^- que debería ser el anión de mayor concentración en ambas estaciones costeras se encuentra en segundo lugar en las concentraciones relativas.

Se puede apreciar en las tablas 1 y 3 que el valor de la concentración media del sulfato en La Palma es superior al valor de la concentración media en Casablanca. No obstante, no se comprobó que fuera significativamente mayor aplicando el criterio paramétrico de Student (con 95% de confianza). Igualmente se verificó que las varia-

TABLA 1. Estadígrafos comunes de los datos de la composición química de las lluvias asociadas a las ondas tropicales en la estación Casablanca.

N = 14	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	pH	κ	SO ₄ ²⁻ -e	Min
media	3,68	3,11	0,67	0,21	1,17	0,68	0,10	0,14	1,63	5,8	22,65	3,52	20,40
Desv. Std.	1,67	2,55	0,72	10,03	1,17	1,44	0,20	0,26	3,36	0,54	15,82	1,57	13,45
Coef. var.	45,21	82,03	107,22	108,90	100,17	210,88	199,03	183,17	206,69	9,17	69,83	44,69	65,96
Min.	1,40	0,70	0,05	0,03	0,18	0,01	0,02	0,01	0,01	4,6	12,32	1,39	3,78
Max.	7,30	9,50	2,27	25,70	3,60	5,50	0,80	1,00	13,1	6,5	76,50	7,28	46,58
Ajus. a * la distrib. normal.	si	si	no	no	no	no	no	no	no	si	no	no	si

* El ajuste a la distribución normal se comprueba por medio de la prueba de chi-cuadrado, con 95% de confianza. Las concentraciones se expresan en mg/L, al igual que la mineralización. La κ se expresa en μS cm⁻¹.

TABLA 2. Estadígrafos comunes de los datos de la composición química de las lluvias asociadas a las ondas tropicales en la estación Santiago de las Vegas.

N = 18	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	pH	χ	SO ₄ ^{2-e}	Min
media	3,86	1,68	0,51	5,43	0,53	0,35	0,06	0,06	1,18	5,8	16,76	3,42	12,70
desp. std.	3,24	1,34	0,65	3,28	0,53	0,41	0,07	0,17	1,57	0,48	10,79	3,20	8,05
Coef. var.	83,90	80,17	127,52	60,42	99,55	115,84	117,41	106,79	132,95	8,27	64,38	93,69	63,38
min.	0,05	0,71	0,05	0,03	0,05	0,02	0,02	0,01	0,01	4,7	5,50	0,01	3,97
max.	11,1	5,3	2,40	11,90	2,29	1,43	0,28	0,60	5,64	6,7	51,00	10,70	34,77
Ajus. a* la distrib. normal	si	no	no	si	si	no	no	no	no	si	no	no	si

* El ajuste a la distribución normal se comprueba por medio de la prueba de chi-cuadrado con 95% de confianza.

Las concentraciones se expresan en mg/L, al igual que la mineralización.

La χ se expresa en $\mu\text{s cm}^{-1}$.

TABLA 3. Estadígrafos comunes de los datos de la composición química de las lluvias asociadas a las ondas tropicales en la estación La Palma.

N = 13	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	pH	χ	SO ₄ ²⁻ -e	Min
media	4,95	1,61	0,83	1,58	1,12	1,11	0,20	0,08	0,31	5,7	12,26	4,66	10,77
desv. std.	2,36	0,70	0,75	1,37	0,09	1,45	0,26	0,09	0,33	0,39	4,84	2,27	3,50
coef. var.	47,74	43,43	90,36	87,13	75,09	130,30	129,69	112,25	104,36	6,81	39,44	48,81	32,46
min.	0,05	0,99	0,05	0,03	0,05	0,01	0,02	0,01	0,01	5,2	4,67	0,15	2,48
max.	7,78	3,33	2,56	5,12	0,30	5,00	0,99	0,28	1,17	6,3	20,40	7,53	16,56
Ajus. * la distrib. normal.	si	si	si	si	no	si	si	no	si	si	si	si	si

* El ajuste a la distribución normal se comprueba por medio de la prueba chi-cuadrado con 95% de confianza.

Las concentraciones se expresan en mg/L, al igual que la mineralización.

La χ se expresa en $\mu\text{s cm}^{-1}$.

TABLA 4. *Estadígrafos comunes de los datos de la composición química de las ondas tropicales de la estación Santiago de Cuba.*

N = 26	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	pH	κ
media	5,52	4,16	2,06	5,9	31,86
desv. std.	7,07	2,65	2,95	0,96	23,23
coef. var.	125,27	62,30	138,61	15,99	71,50
min.	0,65	0,17	0,11	4,5	6,00
max.	35,00	10,32	10,10	8,4	123,60
ajust. a la distrib. normal.	no	si	no	si	no

TABLA 5. *Valores de frecuencia acumulada de los compuestos químicos presentes en la lluvia producida por las ondas tropicales.*

elemento	conc. hasta	Casablanca	La Palma	Stgo. Vegas
		%	%	%
SO ₄ ²⁻	4,5	78,32	30,77	55,56
Cl ⁻	3,5	64,29	100,00	88,89
NO ₃ ⁻	0,6	64,29	46,15	88,89
HCO ₃ ⁻	5,0	57,14	92,31	61,11
NH ₄ ⁺	0,3	14,29	100,00	38,89
Na ⁺	0,5	69,23	38,46	77,78
K ⁺	0,1	84,62	50,00	83,33
Mg ²⁺	0,1	76,92	42,86	44,44
Ca ²⁺	1,0	76,92	92,31	80,00
pH	5,6	28,57	46,15	38,89
κ	20,0	64,29	92,31	77,78
SO ₄ ^{2-e}	4,5	85,71	30,77	64,29
min.	15	50,00	92,31	72,22

ciones son iguales, según la prueba de Fisher para un nivel de confianza de 95%. En la Tabla 5 se muestra que mientras que en Casablanca 79% de las muestras tienen valores inferiores a 4,5 mg/l, en La Palma 69% de las muestras presentan valores superiores a 4,5 mg/l. El valor medio de la concentración del ión sulfato en La Palma es más del doble que el valor medio mensual en dicha estación en el período 1981-1987 (1,57 mg/l).

Sulfato en exceso

Los resultados encontrados para el sulfato en exceso en las lluvias asociadas a las ondas tropicales en Casablanca, Santiago de las Vegas y La Palma nos permite inferir que el aporte del sulfato marino es relativamente pobre, siendo prácticamente todo debido a fuentes antropogénicas.

Distribuciones de frecuencia

Las precipitaciones asociadas a las ondas tropicales muestran una gran diversidad en el ajuste de las distribuciones de frecuencia entre sí como veremos a continuación:

1) Casablanca

- a) distribución log-normal: HCO_3^- , Ca^{2+}
- b) distribución Gandin: NO_3^- , Na^+
- c) distribución Gumbel: SO_4^{2-} , SO_4^{2-e}
- d) distribución Frechet: NH_4^+ , electroconductividad
- e) distribución Goodrich: pH, K^+
- f) distribución exponencial: Cl^-

2) Santiago de las Vegas

- a) distribución normal: pH
- b) distribución log-normal: NO_3^- , HC_3^- , NH_4^+ , Na^+
- c) distribución exponencial: SO_4^{2-}
- d) distribución Gandin: K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}
- e) distribución Gumbel: SO_4^{2-}
- f) distribución Frechet: Cl^- , electroconductividad

3) La Palma

- a) distribución log-normal: K^+
- b) distribución exponencial: Cl^- , Ca^{2+}

c) distribución Gandin: HCO_3^- , Na^+ , electroconductividad

d) distribución Gumbel: NO_3^- , NH_4^+ , Mg^{2+}

e) distribución Goodrich: SO_4^{2-} , SO_4^{2-e}

f) distribución Frechet: pH

A cada elemento, en todas las estaciones meteorológicas, se les halló la distribución de frecuencia y la frecuencia acumulada. De los valores de frecuencia acumulada podemos extraer valiosas conclusiones acerca de la composición química de las lluvias asociadas a las ondas tropicales.

De los valores expuestos en la Tabla 5 se aprecia el carácter no ácido de la lluvia debida a las ondas, ya que en Casablanca, Santiago de las Vegas y La Palma solamente presentan valores inferiores a 5,6, el 29, 39 y 46% respectivamente, de las muestras analizadas.

Igualmente, el carácter relativamente limpio de las precipitaciones, o sea, la poca contaminación de las muestras se aprecia en los valores de la mineralización, donde se observa que 64% de las muestras tienen valores inferiores a 20 mg/l (Casablanca) mientras que 85 y 72% tienen valores inferiores a 13 y 15 mg/l en La Palma y Santiago de las Vegas.

Un análisis similar se puede hacer sobre cada uno de los componentes, lo cual no será hecho para no extender demasiado la discusión de los resultados.

Mineralización

Los resultados de la mineralización mostraron que la mayor se presentó en las lluvias sobre Casablanca, seguido de Santiago de las Vegas y La Palma.

Si recordamos que los valores medios de la mineralización en las lluvias mensuales para todas las estaciones de Cuba se encuentran entre 7 y 25 mg/l (Svistov *et al.*, 1988) podemos ver que los valores medios de la mineralización en la lluvia de las ondas tropicales se encuentran en ese rango,

siendo inferiores a los reportados para cada estación por separado. Esto nos permite afirmar que la lluvia debida a las ondas tropicales es relativamente *limpia* o sea, poco contaminada. No obstante, con excepción de los frentes fríos, este parámetro en las ondas tropicales es superior a otros sistemas sinópticos, tales como las hondonadas y las bajas presiones.

Hallamos la ley de distribución de frecuencia a que se ajusta la mineralización de cada estación, encontrando que son diferentes en cada una. La misma ajusta a Gumbel en Casablanca, log-normal en Santiago de las Vegas y Goodrich en La Palma.

Análisis de las trayectorias inversas

Se procedió a realizar el análisis de las trayectorias hacia atrás de dos ondas tropicales que cruzaron por la estación Casablanca: una de carácter ácido y otra neutral.

Análisis sinóptico de la onda tropical que produjo lluvia ácida (pH = 4,6) el 29 — 8 — 1984.

Esta onda tropical, procedente del Océano Atlántico, penetró en el Mar Caribe el 25 de agosto y se desplazó a unos 20 km/h, cruzando su eje sobre Casablanca el día 29 en horas de la tarde (Fig.1). Esta onda incrementó las precipitaciones a su paso por las distintas regiones del país (en Casablanca se registraron 31 mm de lluvia). En los niveles medios y bajos se observaba los días precedentes a la afectación de la onda al occidente de Cuba, una circulación anticiclónica continental, con flujo del cuarto y primer cuadrante sobre la estación Casablanca. De esta forma, las trayectorias recorridas por las parcelas de aire en los cinco días anteriores en el nivel de 50 hPa cruzaba sobre el Este de los Estados Unidos, una de las zonas más contaminadas en la actualidad en ese territorio (Fig. 2).

Análisis sinóptico de la onda tropical que produjo lluvia no ácida (pH = 6,5) el 28 6—1988

Al igual que el caso anterior esta onda tuvo su origen en el Océano Atlántico y penetró en el Mar Caribe el día 24 de junio, llegando a la estación Casablanca el día 28 (Fig. 3), produciendo un incremento en las precipitaciones. Esta onda tuvo una velocidad de traslación media de 20 km/h, pero al llegar al occidente se vio frenada debido a corrientes del Oeste en niveles medios que se prolongaba hasta el Golfo de México, situación que produjo la disipación de la onda sobre el Noroeste del Mar Caribe.

Sobre Cuba se presentó circulación anticiclónica los días precedentes al paso de la onda sobre Casablanca, pero ahora el centro no se hallaba sobre el continente, sino al Norte y cerca del Paso de la Mona en 500 hPa, por lo que el viento que soplabla en la estación era del Sur y Sudeste principalmente, y de poca velocidad. Por este motivo las trayectorias son cortas y completamente a favor de las manecillas del reloj (Fig. 4).

La diferencia en la composición química de la lluvia asociada a estas dos ondas tropicales y sobre todo, el carácter ácido o no de las mismas puede ser explicado por la diferencia presentada en la situación sinóptica los días precedentes a la llegada de cada una a la estación y el transporte a larga distancia de los contaminantes, no así, por el origen o formación de la onda, época del año, su desplazamiento al Oeste sobre el Caribe o su velocidad de traslación, condiciones éstas muy similares en ambos organismos analizados.

Deposición

Los valores de la deposición debida a la lluvia asociada a las ondas tropicales en cada una de las estaciones aparecen en la Tabla 6. En la misma aparecen el valor medio y el rango de valores expresados en $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{día}$.

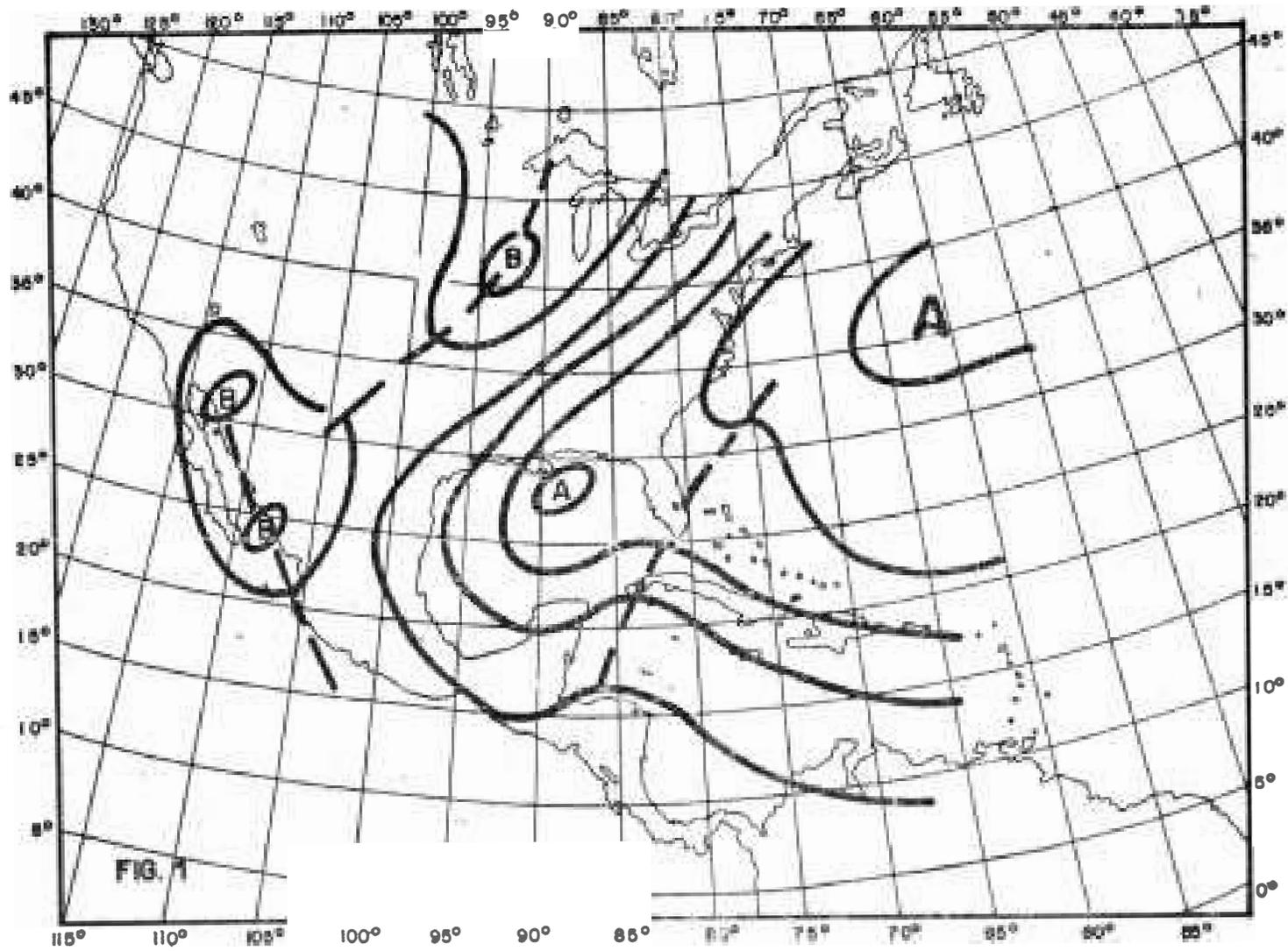


Fig. 1. Mapa de superficie correspondiente al 29 de agosto de 1984, a las 1800 GMT.

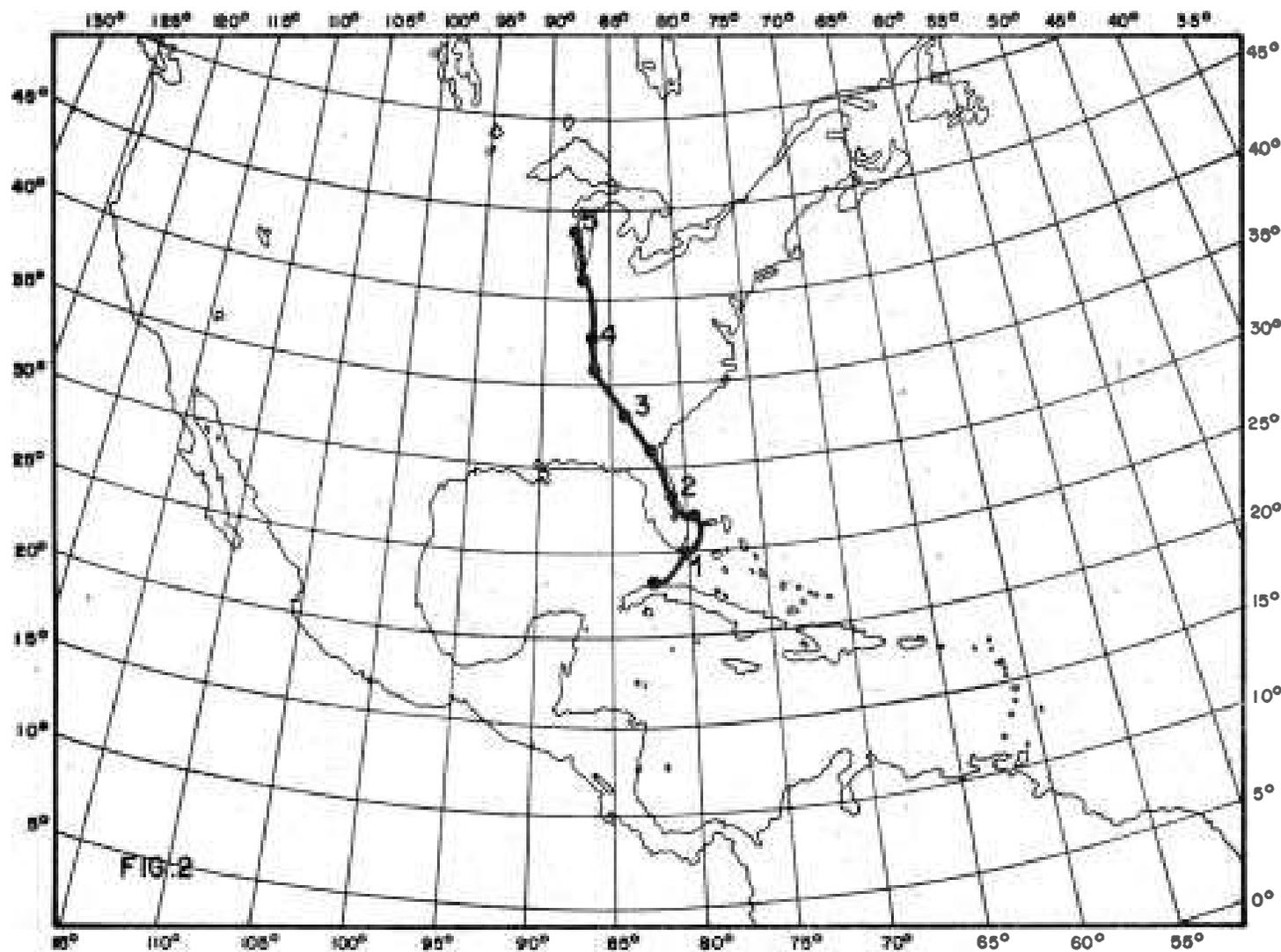


Fig. 2. Trayectoria seguida por las partículas de aire, según el flujo en 500 hPa, en los 5 días anteriores a la llegada de la onda al occidente de Cuba.

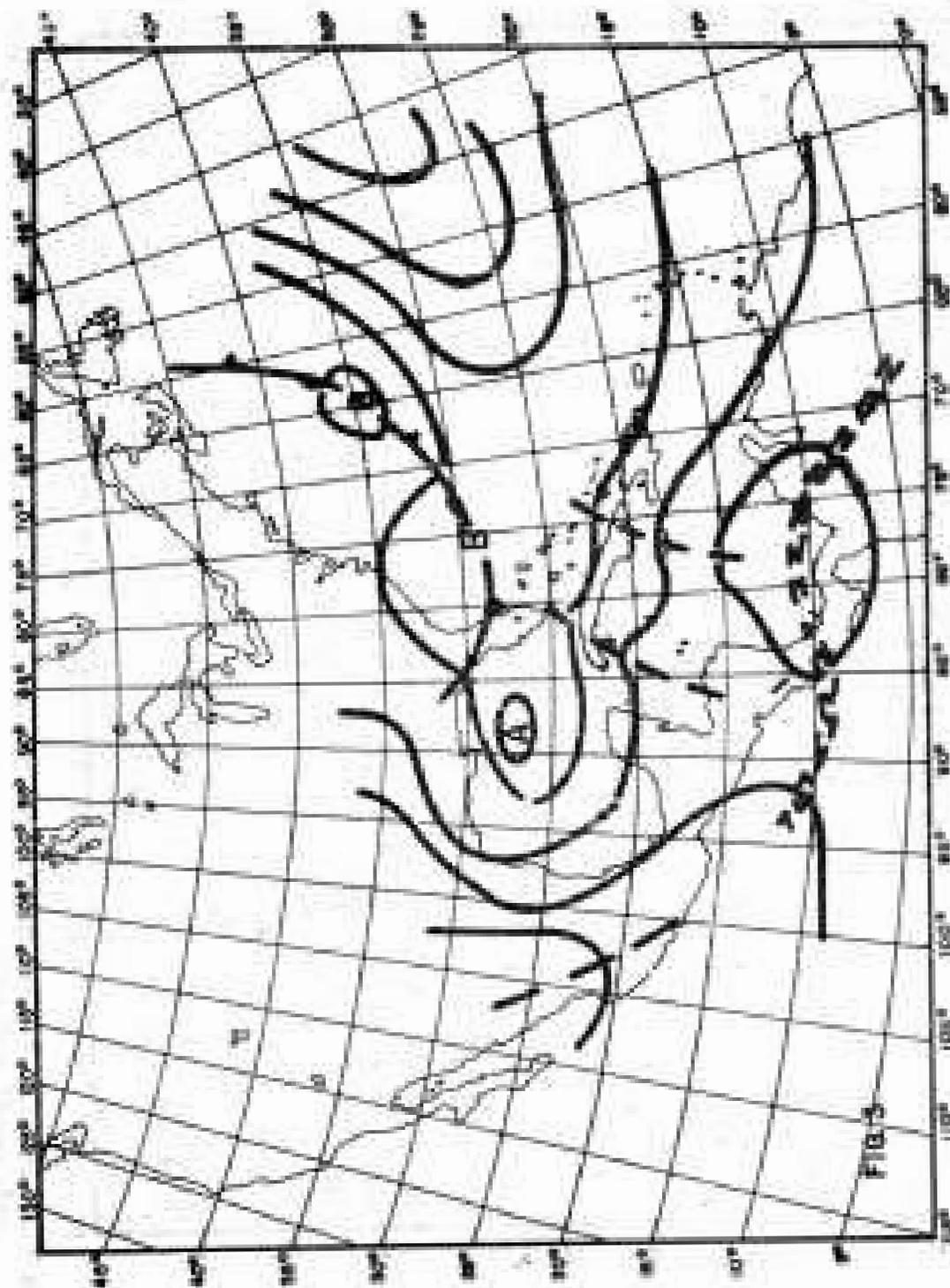


Fig. 3. Mapa de isoterms correspondiente al 28 de Junio de 1988, a las 1000 GMT.

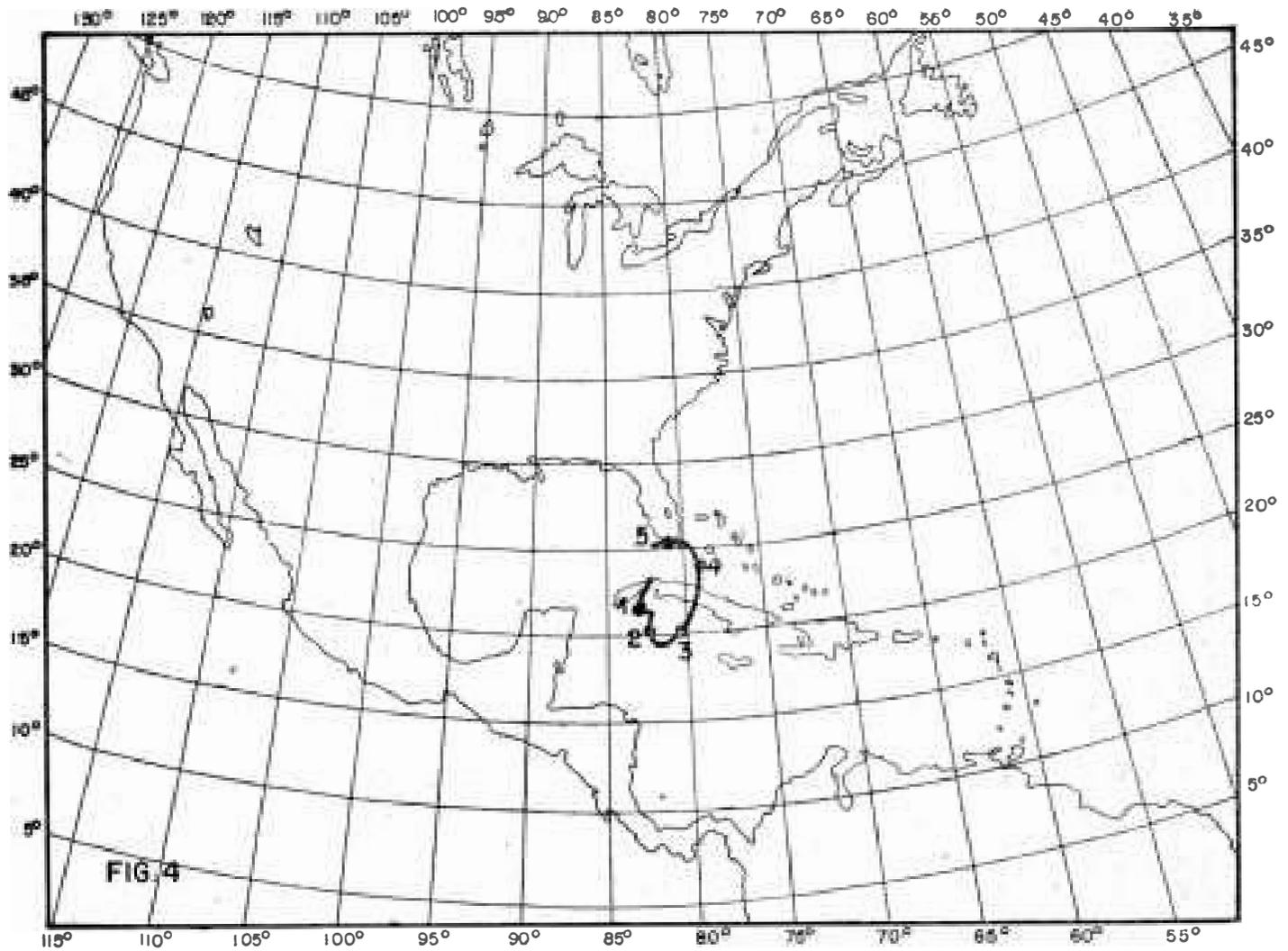


Fig. 4. Trayectoria seguida por las partículas de aire según el flujo de 500 hPa, en los 5 días anteriores a la llegada de la onda al occidente de Cuba.