

EL PERIODO DIURNO EN LAS LLUVIAS DE LOS ANDES ECUATORIALES

PIO PITA SUAREZ-COBIAN

Representante en Colombia de la Organización Meteorológica Mundial.

En el número de Noviembre de esta Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Bogotá, Vol. X, Nº 40, Noviembre de 1958, pp. 199-219, hay un estudio del Doctor HANS TROJER sobre las lluvias de la vertiente colombiana del Pacífico donde se analizan las periodicidades anual y diurna que presentan y se relacionan, la primera con las oscilaciones de la convergencia intertropical sobre el territorio colombiano, y la segunda, con la radiación solar como causa última de la inestabilidad del aire, de la oscilación diurna de temperatura y de las brisas. La mera existencia de un período diurno en la lluvia evidencia como agente principal la inestabilidad del aire, supone un influjo decisivo de las condiciones locales y una eliminación en mayor o menor grado de los efectos advectivos frontales tal como determinan la mayoría de las lluvias en las latitudes medias. Las condiciones locales pueden modificar la estabilidad de maneras tan diversas (diferente absorción de la radiación según se trate de bosque, sabana, agua, roca, arena, altitud, orientación de las pendientes, brisas, nubosidad, etc.) que el tema es inagotable, y en este trabajo se pretende considerarlo desde otro punto de vista muy interesante.

De los Anales del Observatorio Meteorológico Nacional y del Régimen de Lluvias en la Sabana de Bogotá (1941-1955) publicados por el Servicio Meteorológico de Colombia con observaciones horarias, del Boletín Meteorológico del Observatorio de Quito, con las medias mensuales de observaciones horarias y de las publicaciones de la Federación de Cafeteros 1952-1954 hemos deducido las curvas medias de precipitación horaria medida en milímetros (fig. 1ª) en que las estaciones están separadas en cuatro grupos.

Grupo A) Florida, Quito, San Bartolomé (Colegio de Bogotá) y Bogotá (Ciudad Universitaria) son las curvas más regulares, presentan un mínimo a 10 horas, un máximo absoluto entre 15 y 16 horas y otro más o menos acusado en las primeras horas del día.

Grupo B) Venecia, Blonay. — Curvas menos regulares, persiste el mínimo matutino entre 8 y 10 horas, presentan el máximo vespertino retrasado a 20 horas; el segundo en valor, entre 0 y 1 hora; se aprecian otros máximos relativos.

Grupo C) Dosquebradas, Chinchiná, Líbano. — Curvas muy irregulares; el mínimo matutino se retrasa, en Líbano ya es vespertino y se verifica en las horas de más calor; el máximo absoluto es el nocturno, a 3 h; el vespertino se verifica a diferentes horas.

Grupo D) Tambo, Tibacuy. — El mínimo matutino aparece ya menos marcado; los máximos son varios, pero mucho menos acusados que en los otros grupos.

Las ondulaciones mal definidas y las irregularidades de las últimas curvas pueden provenir 1º de tomar un período de tiempo escaso para obtener las curvas me-

dias; 2º de incluir lluvias producidas por causas ajenas al período diurno (inevitable mientras no funcione en Colombia la Meteorología Sinóptica que permita la selección de días para la estadística); 3º por actuar los

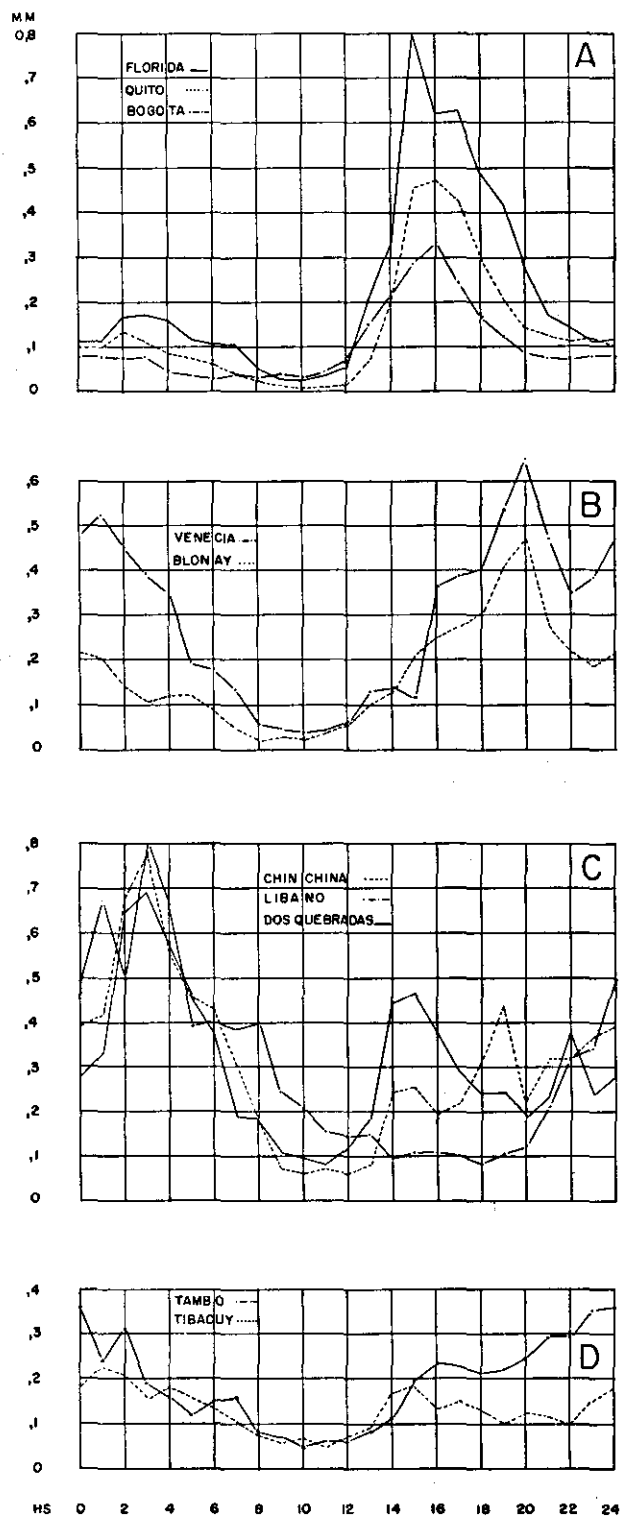


FIGURA 1

ISOPLETAS DE LLUVIA EN BOGOTA (mm.)

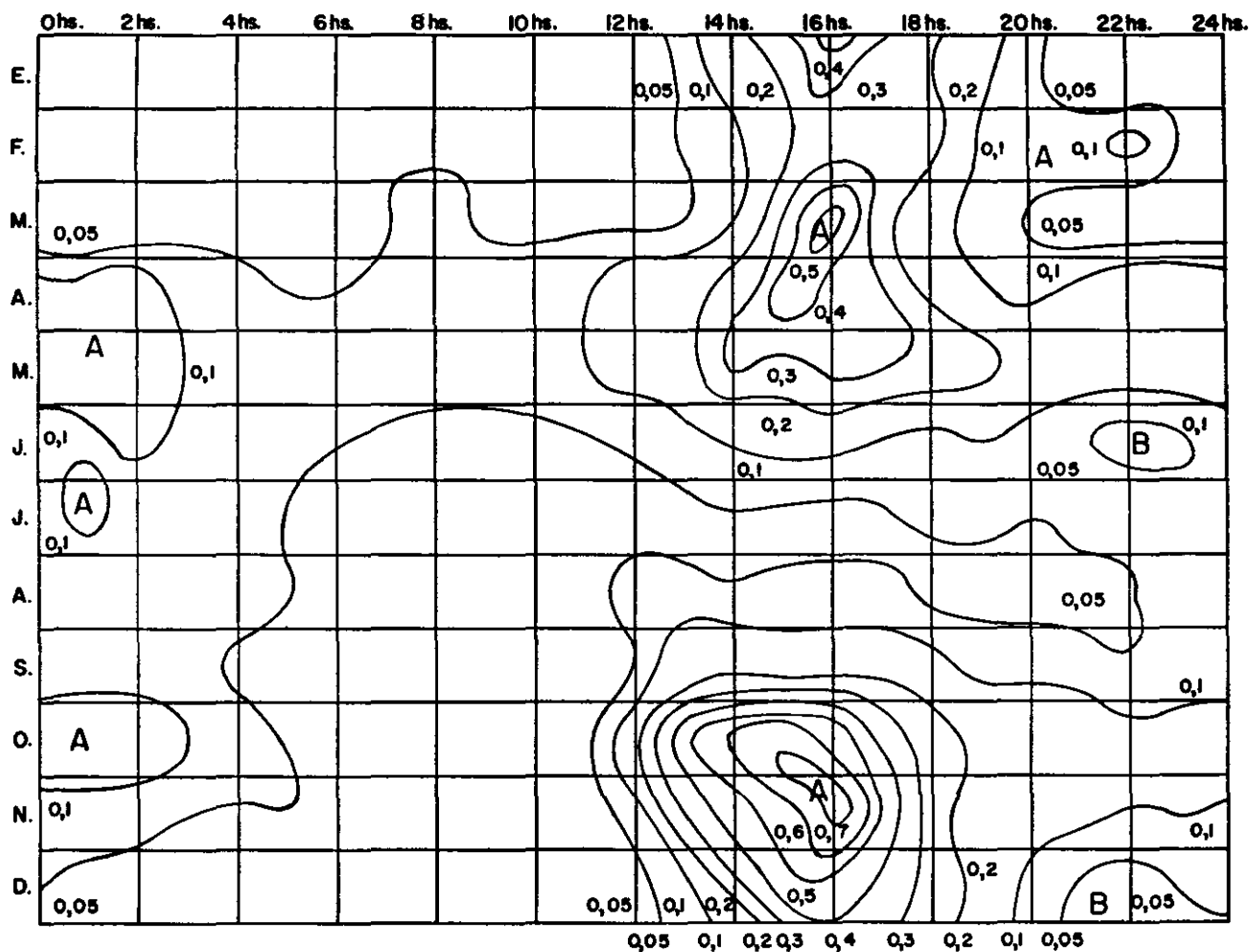


Fig. 2

ISOPLETAS DE LLUVIA EN FLORIDA (mm.)

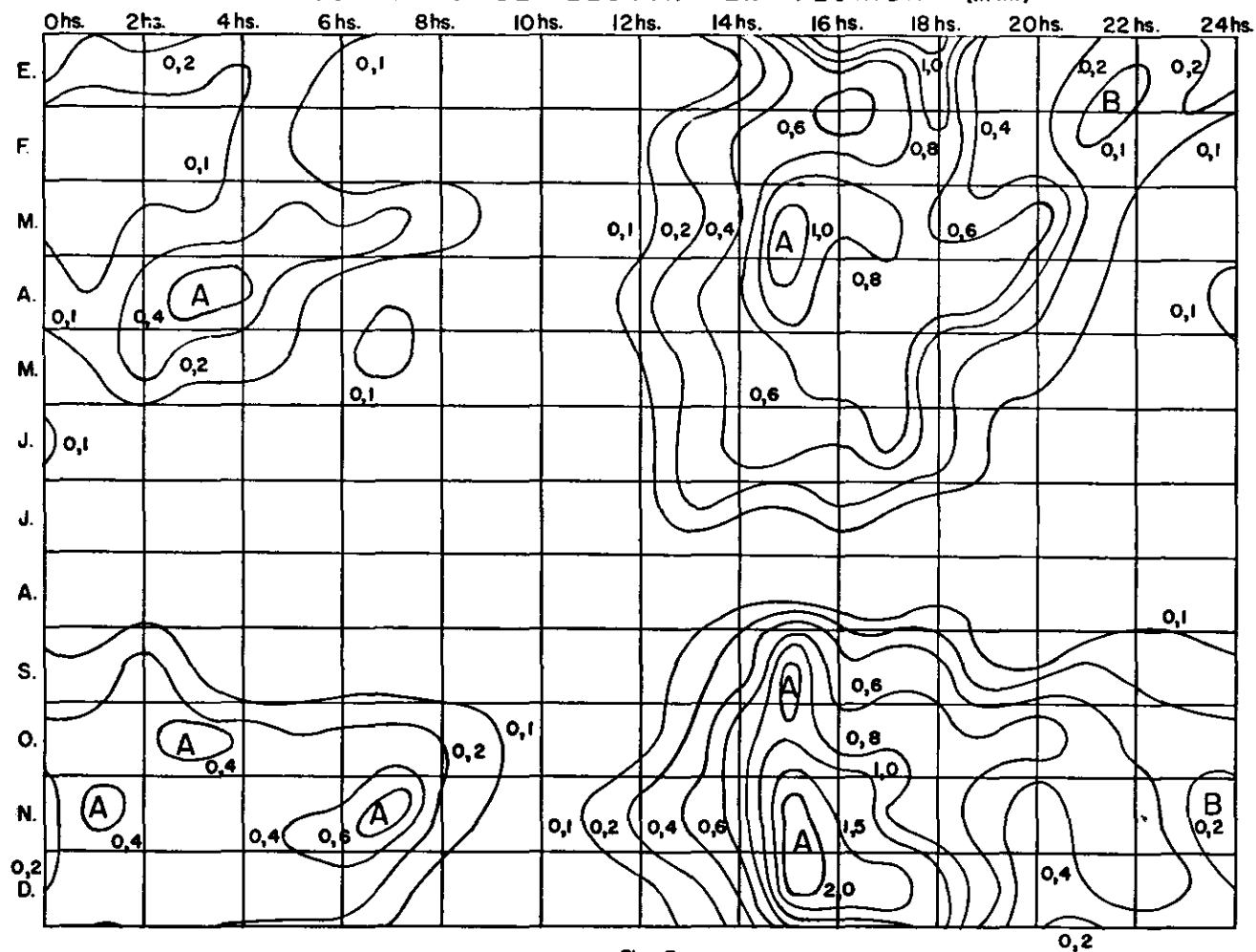


Fig. 3

ISOPLETAS DE LLUVIA EN ESTEBAN JARAMILLO (mm.)

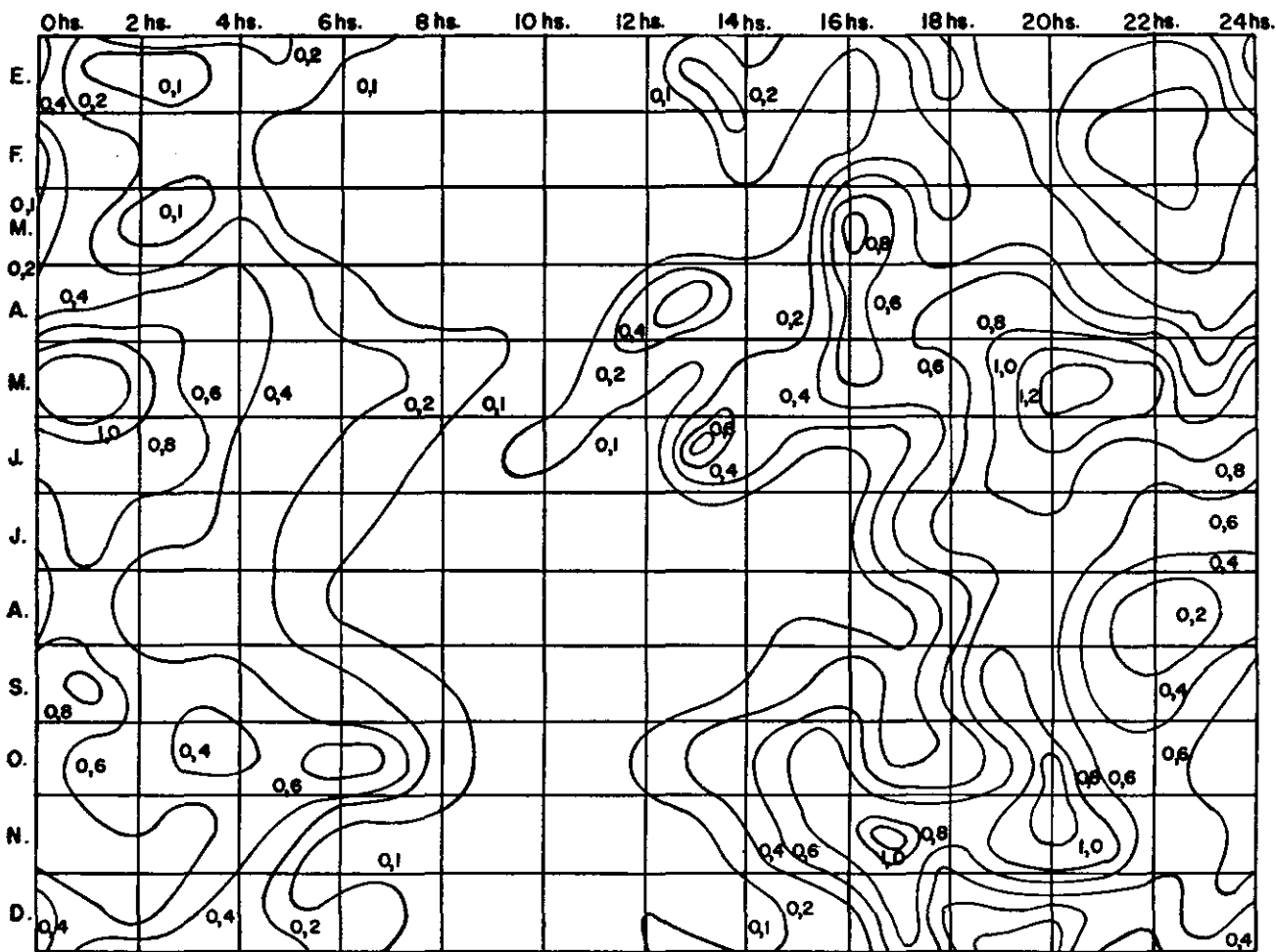


Fig. 4

ISOPLETAS DE LLUVIA EN LIBANO (mm.)

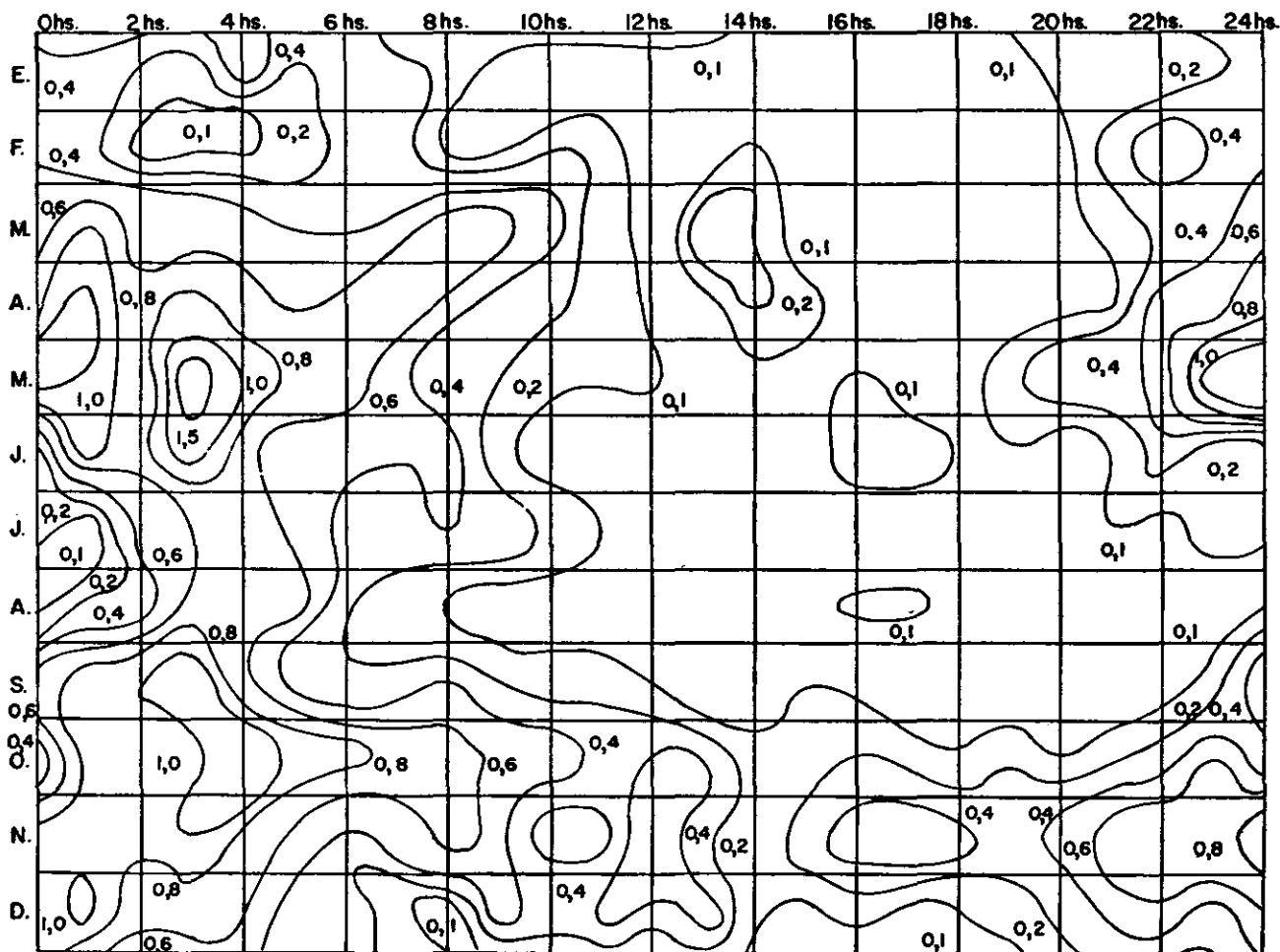


Fig. 5

agentes diurnos de diferente manera en el transcurso del año.

Para formar juicio sobre estos extremos y dar idea de la heterogeneidad de los elementos incorporados en estas curvas pueden servir las isoplethas hora-mes de lluvias horarias (figs. 2 a 5). Las de Bogotá y Florida del grupo A), muestran dos meses de sequía en que la lluvia es tan escasa que apenas desfigurará la curva media del año, meses en que los valores mayores de la lluvia se concentran alrededor de los máximos principales de marzo y noviembre, a 15 h en Florida, y 16 h en Bogotá; un máximo secundario constantemente situado entre 1 y 2 horas en Bogotá, (este máximo está peor definido en Florida, tal vez por haberse trazado las isoplethas con sólo los datos de tres años, plazo demasiado breve); un máximo anómalo en febrero en Bogotá, de valor pequeño para desfigurar la curva media.

Mucho más irregular es la distribución de las máximas en Venecia y Líbano, particularmente en la primera, de aquí que las curvas de las estaciones de sus grupos respectivos sean menos representativas; probablemente en ellas intervienen de diferente manera los factores que modifican las horas de mayores movimientos convectivos del aire. La radiación solar comienza a caldear el suelo por las laderas orientadas al Este (Líbano) donde, cuando el calor haya pasado al aire en contacto con aquel suelo, se iniciará la brisa del valle. El aire más caliente subirá por la ladera (brisa del valle), remontará las crestas, comenzará a condensar su vapor de agua en forma de nubes cumuliiformes acelerando su marcha ascensional, tanto más, cuanto mayor sea el contenido de humedad del aire y cuanto más amplio sea el valle o el llano extendido al pie de la cordillera que, con ligero retraso, sigue a la ladera oriental en su proceso de caldeoamiento. La diferente marcha de la temperatura entre ambas vertientes se ve claramente en el trabajo del doctor Trojer, pág. 207, curvas de Chinchiná y Líbano. En ésta, el aumento y descenso de la temperatura se anticipan a las de Chinchiná y se inician con mayor rapidez.

También con retraso algo mayor se inicia la brisa del valle en las laderas occidentales y como consecuencia de este conjunto de brisas, grandes masas nubosas coronarán las sierras e iniciarán la lluvia cerca de las divisorias: Son las que se producen entre 15 y 16 horas en Quito, Bogotá y Florida, situadas las dos primeras a más de 2.500 metros de altitud, al pie de las divisorias y al borde de un llano extenso, (de gran amplitud la sabana de Bogotá). Florida, a 1.790 m. está también en una altiplanicie al pie de una divisoria de gran altura. Véase en la fig. 6 la situación geográfica de cada estación, su altitud y su posición relativa a las crestas más próximas.

Es de advertir que cuando no haya otros agentes perturbadores más enérgicos, está al alcance del hombre desviar la brisa del valle, modificando el caldeoamiento natural del aire próximo al suelo. Así lo muestra la fotografía tomada en un día de calma por Don ANGEL IBARRA, encargado de la estación meteorológica de Palmira, en el Valle del Cauca. El calor de una hoguera donde se queman restos de caña de azúcar produce un movimiento convectivo del aire contrario al de la brisa, la corriente vertical llega a gran altura y provoca la formación de un potente cúmulus.

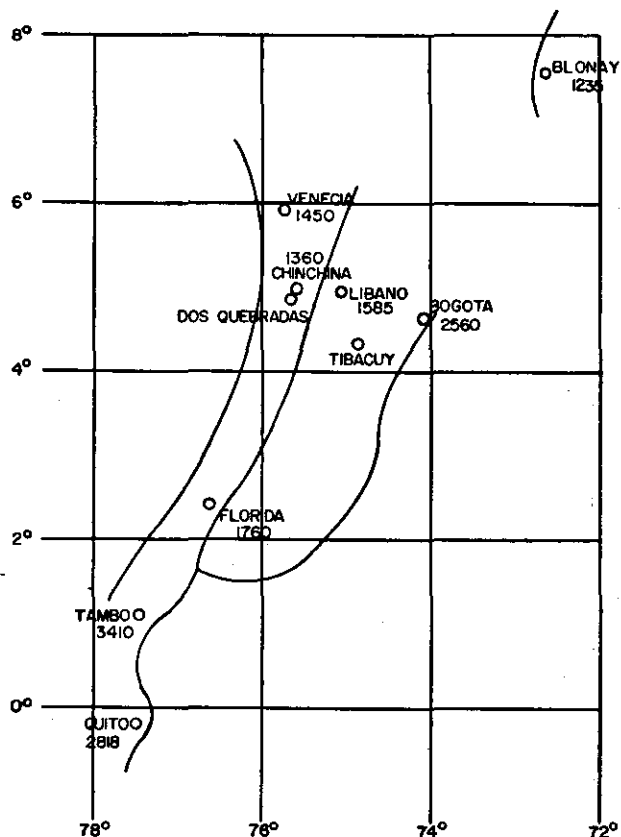
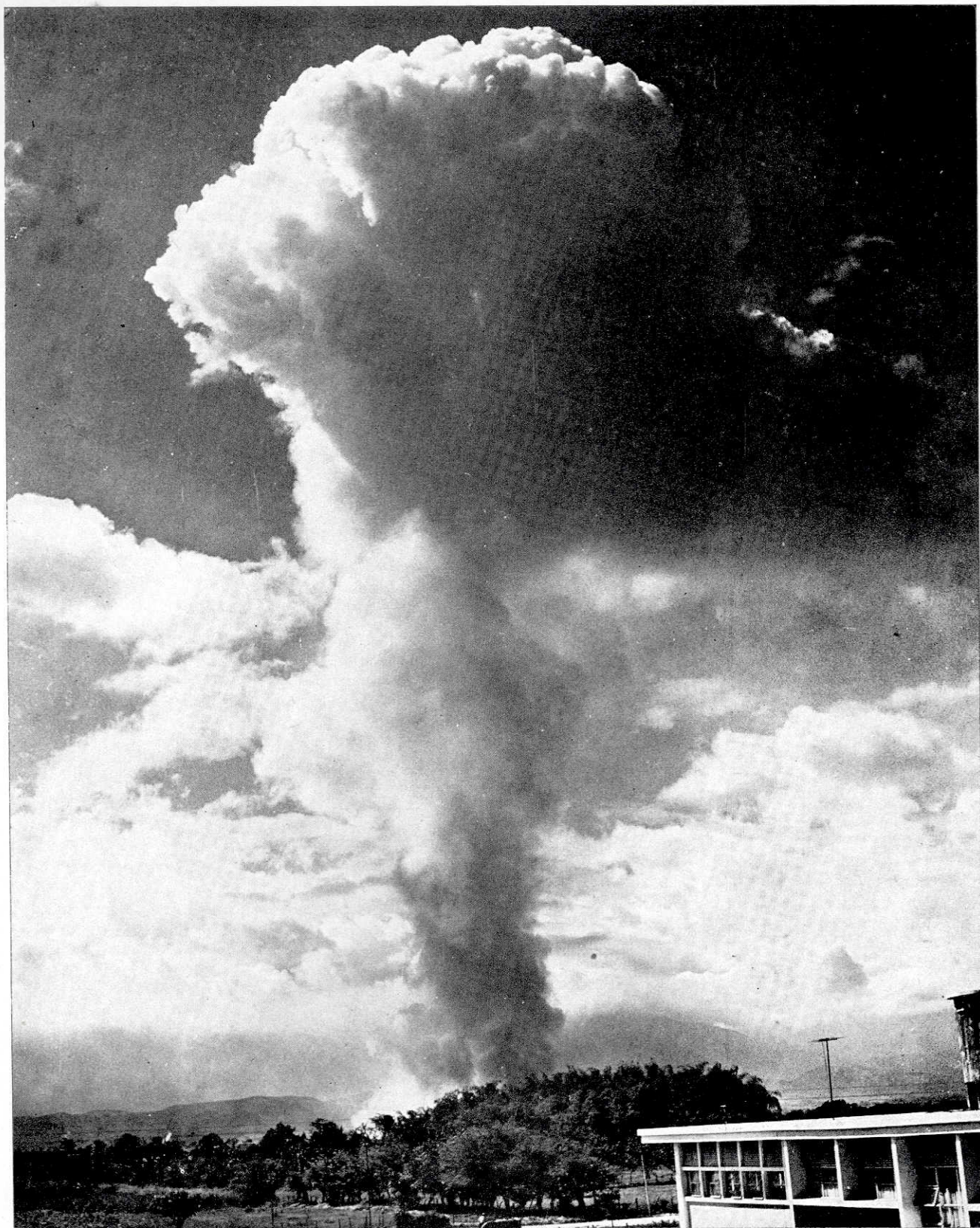


Fig. 6

Los cumulonimbus formados sobre las cordilleras serán transportados por las corrientes generales superiores del aire, (tal vez así contribuyan a la gran abundancia de lluvias en el Chocó ya que aquellas suelen tener fuerte componente. Este a la altura de las grandes masas nubosas) o bien extendidas por las contrabrisas hacia el centro de los valles. En estas condiciones al llegar la noche, las gotitas de agua de las porciones más altas de la nube, excelentes radiadores, se enfrían rápidamente por radiación y enfrían a su vez el aire que las envuelve; por el contrario, las porciones más bajas de las nubes y el aire inferior se enfrían con gran lentitud porque están abrigadas por la misma nube (una capa de nube o niebla de 50 metros de espesor bastan para absorber toda la radiación emitida por el suelo y devolvérsela en buena parte). El rápido enfriamiento de la masa nubosa por su parte superior y el muy lento en la inferior conducirá a un gradiente de temperatura superadiabático y a una subversión de las capas de aire con muy copiosas precipitaciones. Este puede ser el caso de las lluvias en Venecia y Blonay, con los máximos a 20 horas.

También al ponerse el sol radian rápidamente su calor al espacio las tierras más altas descubiertas de nubes, enfrían al aire próximo por contacto, y éste desciende por las laderas (brisas de montaña) adquiriendo las mayores velocidades hacia las 10 u 11 horas. Consecuencia de la brisa de montaña es la corriente ascendente del centro del valle que o bien por sí sola, o bien provocando el efecto de disparo en el aire labilizado por el proceso anteriormente descrito, dará lugar a nuevas y abundantes lluvias que pueden ser las de las estaciones del grupo C.

Todas estas estaciones se encuentran entre las cordilleras a uno y otro lado de la Central, en todas ellas



11 Julio 1958. Palmira. Formación de nubes por quema de desperdicios de caña, en la Granja de Palmira.

A las 10 a. m. Temp. 27°. Punto rocío, 17°. Nubosidad 4 oct.; Cu, Ac, Cb y Ci, luego Cs por evolución de Cb. Viento 1k/h. Humedad 67%.
Se inicia la quema a las 8 a. m. Temp. 21°4C. Humedad 67%. Nubosidad 3 oct. Cu; 1 Ci.

(Foto de D. Angel Ibarra).

hay, como puede verse en las curvas isopletas, dos épocas de lluvia al año que se dan algo después del equinoccio y dos épocas secas intermedias. Este régimen, común a todas ellas no se da, ni en Chocó ni en la vertiente oriental del Orinoco y Amazonas; en las cuencas de estos ríos, por lo menos en gran parte de ellas, la época de mayores lluvias es el solsticio de verano del hemisferio norte, precisamente coincidiendo con la mayor sequía de los valles entre cordilleras. Así puede verse en la fig 7 que representa el período anual de lluvias en Bogotá y Cáqueza, estaciones situadas a menos de 30 Kms. de distancia a uno y otro lado de la divisoria entre el Orinoco y el Magdalena.

Muy cerca de ambas estaciones, pero en la divisoria, en las lagunas de Chisacá, las lluvias máximas corresponden como en Cáqueza al solsticio de junio y para ellas, según puede verse en la fig 8, obsequio del Acueducto de Bogotá, el período diurno en el mes seco es muy semejante a las estaciones del grupo A, son lluvias exclusivamente de inestabilidad mientras que en el mes húmedo la curva presenta varios máximos mucho menos notables indicando que las causas de la lluvia fueron varias. Las ordenadas de la fig 8 representan porcentajes de la lluvia total.

CURVA ANUAL DE LLUVIA

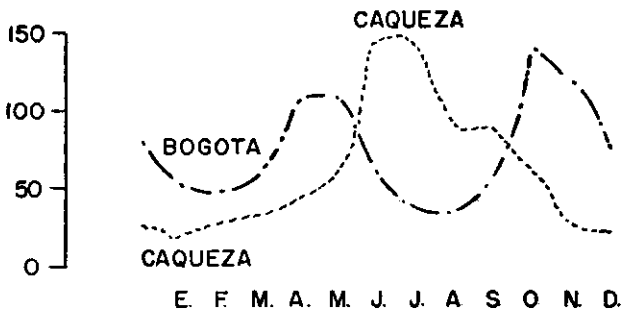


Fig. 7

Parece deducirse de aquí que en los meses de mayo, junio, julio y agosto dominan en los Llanos Orientales los vientos del SE proporcionando las mayores lluvias; estos vientos, al remontar la cordillera Oriental, experimentan el efecto foehn, son desecados, dejan en su ascensión en forma de lluvias la mayor parte de su contenido de vapor de agua, y ya no producen lluvias sobre los valles interiores.

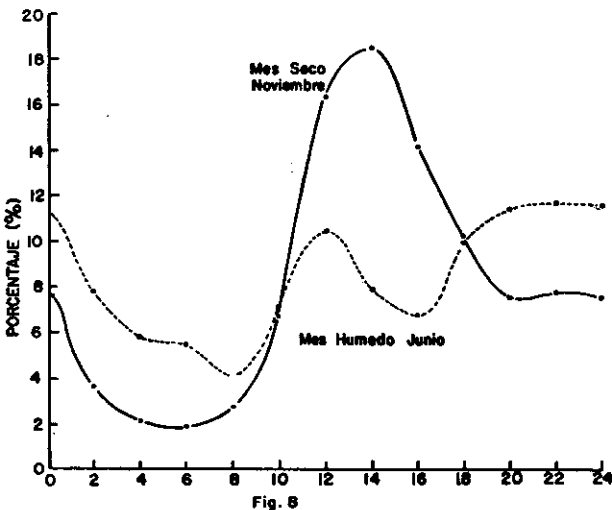


Fig. 8

Queda por discriminar en el grupo C el caso del mínimo vespertino de Líbano cuando en Dosquebradas y Chinchiná se da un máximo relativo. Las tres estaciones están muy próximas pero entre la primera y las otras dos está la cresta de la cordillera Central, la más elevada, con alturas coronadas de nieve, y probablemente en Líbano, en ladera orientada al Este, es donde por la tarde se recibe menos radiación por unidad de superficie, donde primero cesa la convección y donde las corrientes descendentes de la brisa se inician con anticipación atrayendo hacia abajo las masas que se elevan en la vertiente opuesta, donde todavía inciden los rayos solares con buen ángulo.

En las estaciones del grupo D parece probable que entren por mucho las lluvias orográficas que enmascaran las convectivas. Así Tibacuy está en una pendiente orientada al SE y seguramente participa en parte del régimen de lluvias de las estaciones altas de la vertiente a los Llanos Orientales, donde los máximos de lluvia se dan en los meses de junio, julio y agosto, cuando dominan los vientos del SE, o sea, los que llevan las masas de aire del Brasil sobre la cordillera Oriental.

El análisis armónico, por el método de Fourier, de las curvas de la fig. 1 permite apreciaciones cuantitativas interesantes. Su resultado está resumido en el cuadro I.

Este cuadro puede escribirse para mayor claridad sustituyendo los valores absolutos de las amplitudes por los relativos a la lluvia media horaria y las fases por las horas de los máximos de cada onda. Resultaría así el cuadro II.

La fidelidad de estos análisis para las estaciones del grupo A puede apreciarse en la fig. 9 que muestra en línea de puntos la lluvia diurna media de 15 años de Bogotá; al pie, las tres ondas que la componen deducidas del análisis y en línea llena, los valores que resultan de sumar aquellas.

Cabe ahora preguntar: Responden estas tres ondas a causas físicas o son simplemente un artificio matemático? En el primer caso, hasta qué punto la lluvia obedece a ese motivo?

Sobre la primera onda no cabe duda y hay que atribuírla a los movimientos convectivos del aire calentado. Los valores relativos de la amplitud, 90%, que aparecen

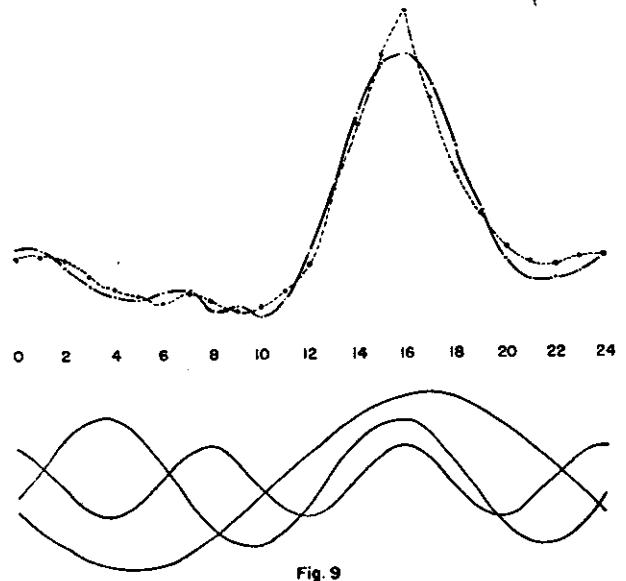


Fig. 9

CUADRO I

	Lluvia horaria media	AMPLITUDES			FASES					
		1ª onda	2ª onda	3ª onda	1ª onda		2ª onda		3ª onda	
<i>Grupo A.</i>										
Florida	0,22	0,20	0,18	0,07	12h 52m		21h 36m		6h 55m	
Quito	0,14	0,13	0,11	0,06	12 14		21 44		5 46	
S. Bartolomé	0,10	0,09	0,06	0,04	12 48		22 40		7 16	
Bogotá	0,10	0,09	0,07	0,04	13 24		23 6		6 51	
<i>Grupo B.</i>										
Venecia	0,29	0,24	0,04	0,06	7 56		20 40		22 18	
Blonay	0,19	0,16	0,05	0,03	10 7		17 28		1 4	
<i>Grupo C.</i>										
Dosquebradas	0,37	0,11	0,13			36		14		
Chinchiná	0,31	0,11	0,18	0,02	4 44		23 19			
Líbano	0,31	0,21	0,13	0,04	4 48		22 16		19 40	
<i>Grupo D.</i>										
Tambo	0,19	0,13	0,01	0,04	7 46		1 32		7 38	
Tibacuy	0,13	0,04	0,05	0,02	6h 0		0 0		7 24	

CUADRO II

	Amplitudes relativas % Períodos			HORAS DE LOS MAXIMOS											
				onda diurna	semidiurna				onda 1/3 de día						
					onda 1		onda 2		onda 1		onda 2		onda 3		
<i>Grupo A.</i>	24h	12h	8h	h	m	h	m	h	m	h	m	h	m	h	m
Florida	91	79	32	17	8	4	12	16	12	7	42	15	42	23	42
Quito	92	80	43	17	46	4	8	16	8	8	42	16	42	0	42
S. Bartolomé	87	60	35	17	12	3	40	15	40	7	35	15	35	23	35
Bogotá	87	63	35	16	36	3	33	15	33	7	42	15	42	23	42
<i>Grupo B.</i>															
Venecia	83	14	19	22	4	4	56	16	56	2	34	10	34	18	34
Blonay	84	29	15	19	53	6	12	18	12	3	1	11	1	19	1
<i>Grupo C.</i>															
Dosquebradas	35	57		1	16	3	20	15	20						
Chinchiná	67	42	13	1	12	3	38	15	38	3	26	11	26	19	26
Líbano	64	29	13	1	40	2	16	14	16	1	39	9	39	17	39
<i>Grupo D.</i>															
Tambo	69	8	20	22	14	2	14	14	14	7	27	15	27	23	27
Tibacuy	28	36	12	23	48	2	58	14	58	7	32	15	32	23	32
Quito, Abril	92	80	43	16	52	3	56	15	56	7	48	15	48	23	48
Bogotá, Marzo	114	101	77	15	52	4	25	16	25	8	11	16	11	0	11
Bogotá, Noviembre	122	87	51	16	16	3	22	15	22	7	20	15	20	23	20

ISOPLETAS DE LA PRESION EN QUITO (mb.)

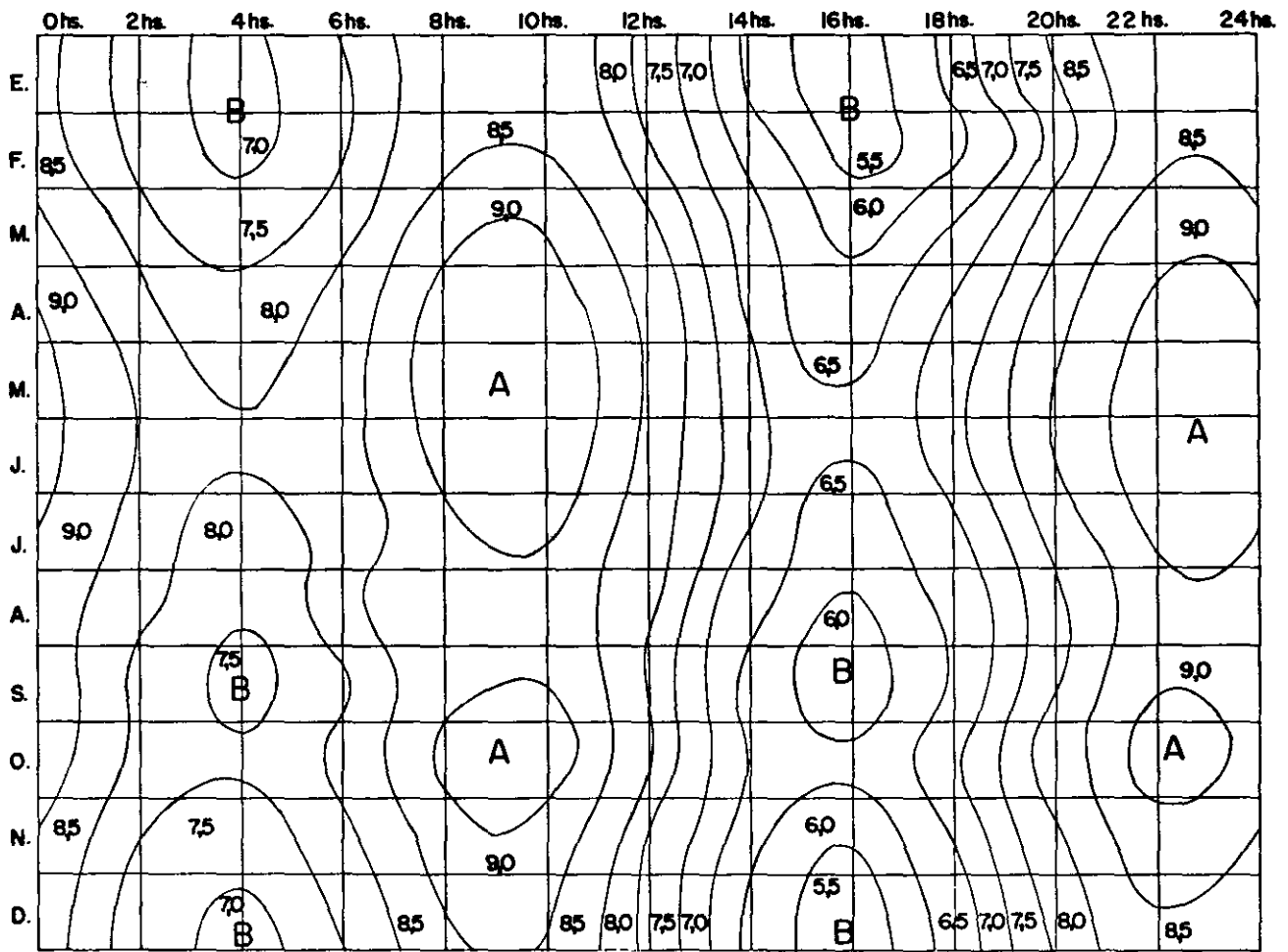


Fig. 10

en el cuadro II indican que en las estaciones del grupo A la convección por inestabilidad tiene efecto preponderante y se produce por la acción directa de la radiación solar.

Los resultados del análisis armónico circunscrito a los meses de mayor lluvia, abril para Quito, marzo y noviembre para Bogotá pueden verse al final del cuadro II; para Quito, el mismo que para el año entero; para Bogotá, unos valores relativos de las amplitudes que serían absurdos y darían lluvias negativas si no se compensaran mutuamente.

En las estaciones B las amplitudes de la primera onda, algo menores, conservan un valor relativo apreciable. En los otros grupos las amplitudes menores de todas las ondas, indican claramente la complejidad del proceso de labilidad del aire que no siempre se verifica de la misma forma ni a la misma hora.

La segunda onda, la semidiurna, se produce en las estaciones del grupo A con amplitudes elevadas aunque menores que las de la primera onda.

También la presión atmosférica, P, está sujeta a una onda semidiurna. Veamos la relación que puede haber entre unas y otras.

Analizadas las curvas medias diarias de presión de Chinchiná y Quito por la fórmula de Fourier resulta:

Para Chinchiná.

$$P = 857,7 + 1,3 \sin (t + 0h \ 26m) + 1,3 \sin (2t + 10h \ 10m) \text{ mb.},$$

para Quito

$$P = 727,8 + 0,8 \sin (t + 1h \ 56m) + 1,1 \sin (2t + 10h \ 12m) \text{ mb.}$$

Los mínimos de estas ondas tienen lugar en Chinchiná:

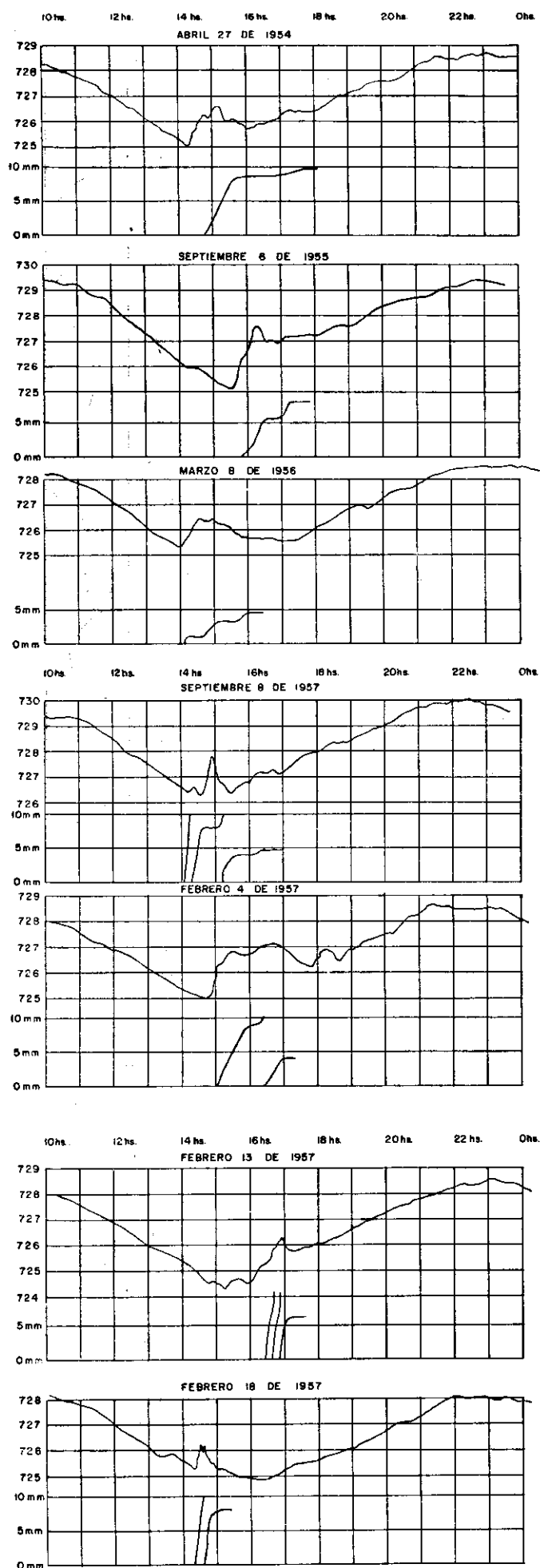
diurna a 17h 34m, semidiurna 3h 55m y 15h 55m en Quito:

diurna a 16h 4m, semidiurna 3h 54m y 15h 54m.

Es sorprendente la coincidencia de horas entre los mínimos de estas ondas con las de máximo de las ondas de lluvias de las estaciones A y aún de la semidiurna de Dosquebradas y Chinchiná; lógicamente parece deducirse una relación estrecha entre la lluvia y las oscilaciones de la presión.

Surge ahora la cuestión de si la lluvia al caer deja de pesar en el aire y provoca un descenso de la presión o si la lluvia es motivada por el ascenso y descenso alternativo de las capas de aire por la oscilación diurna de la presión.

En el primer supuesto, como en todas las estaciones hay un mínimo de lluvias de 8 a 12 h., podrían advertirse diferencias notables de amplitud y fases entre las



Figuras 11 a 17

curvas medias de presión de los meses secos y de los lluviosos. Las isopletas de presión hora-mes en Quito no presentan particularidades con relación a los meses más lluviosos (fig. 10) y por otra parte las fórmulas de Fourier en los meses secos y de lluvia y las lluvias medias en milímetros por día en los mismos meses son:

Chinchiná

Abril, $P = 858,3 + 1,43 \text{ sen } (t + 0h 17m) + 1,55 \text{ sen } (2t + 10h 31m) \dots$ Lluvia 14 mm.

Agosto, $P = 858,1 + 1,47 \text{ sen } (t + 0h 22m) + 1,10 \text{ sen } (2t + 9h 19m) \dots$ Lluvia 2 mm.

Quito

Abril, $P = 728,1 + 0,74 \text{ sen } (t + 1h 42m) + 1,17 \text{ sen } (2t + 10h 10m) \dots$ Lluvia 8,0 mm.

Agosto, $P = 727,9 + 0,85 \text{ sen } (t + 1h 57m) + 1,01 \text{ sen } (2t + 9h 56m) \dots$ Lluvia 0,8 mm.*

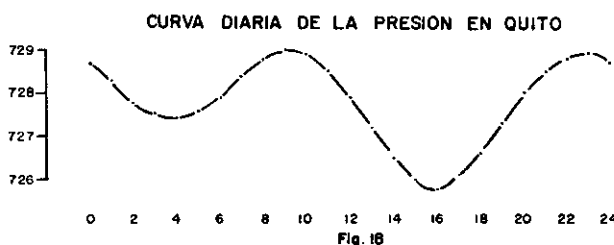
En Chinchiná se encuentra para las ondas semidiurnas de presión una diferencia de amplitudes de $1,55 - 1,10 = 0,45$ o sea una diferencia en las oscilaciones de 0,90 mb, muy de acuerdo en el orden de magnitud con la diferencia de las presiones ejercidas por el agua precipitada, $14 - 2 = 12 \text{ mm} \sim 1 \text{ mb}$, justificando así las ideas de Refsdal de atribuir la onda semidiurna de presión en el trópico a la lluvia de inestabilidad. Pero por otra parte, la escasa lluvia media diaria en Agosto, tanto en Chinchiná como en Quito, no puede justificar esta onda.

El influjo individual puede discutirse sobre las curvas de presión y lluvia obtenidas en el Observatorio de Quito donde funciona un excelente barómetro de gran precisión modelo Sprug-Fuess (figs. 11 a 17). Todas presentan la marcha de ambas cantidades entre 10 y 24 horas y si se comparan las curvas de presión con la de presión media, fig. 18 se observa:

1º Que el mínimo en las individuales se anticipa y se verifica:

Fecha	hora del mínimo	descenso desde 10h	descenso en la curva normal
27/4	14h 15m	3,1	2,6
6/9	15 30	4,2	3,1
8/5	14 00	2,8	2,4
8/9	14 10	2,9	2,5
4/2	14 40	3,1	2,8
13/2	14 40	3,5	2,8
18/2	13 25	2,4	2,0

2º Este cuadro muestra que el descenso de la presión anterior al chubasco es más rápido que en la curva normal. Posiblemente por el ascenso de grandes masas de aire húmedo, y por lo tanto, menos denso que se mez-



* Obsérvese que el primer coeficiente disminuye con la altitud contrariamente a como sucede en el trópico según HAURWITZ.

cla al aire superior más seco, o por los mismos movimientos convectivos del aire.

3º La presión experimenta un incremento brusco. Puede ser consecuencia de la condensación de grandes masas de vapor en gotitas líquidas que, suspendidas en el aire, harían aumentar la presión, a lo que contribuiría el aire que ocuparía el volumen del vapor condensado. La valoración de este efecto es difícil pues no es posible controlar las coagulaciones del coloide atmosférico, además las precipitaciones por inestabilidad son de distribución irregular y no basta un pluviómetro para poder hacer deducciones cuantitativas.

4º La lluvia comienza después de iniciado el ascenso de la presión. Se exceptúa el día 8 de septiembre.

5º Vuelve a descender la presión. Probablemente al perder el aire, por efecto de la lluvia, gran parte del agua líquida que llevaba en suspensión. La curva de descenso es muy irregular como corresponde al influjo contrario de las corrientes ascendentes, coagulación y precipitación. Con mayor razón, teniendo en cuenta que a las corrientes ascendentes rápidas corresponden otras descendentes más lentas, pero de volúmenes mayores.

6º No parece que de valores medios de presión y lluvia pueda deducirse un influjo de ésta en aquella: la presión media en Quito entre 10 y 23 horas es 727,5 mb. y la deducida de los 7 días de lluvia analizados 727,3.

El ascenso de las masas de aire con las oscilaciones diarias de la presión, del orden de 3 mb., no puede producir efectos apreciables en la cantidad de vapor que se condense, y no debe por tanto esperarse otro efecto de tales oscilaciones sobre la lluvia, en casos excepcionales, que el de cebo, el de disparo que desencadena una labilidad.

Descartado el influjo mutuo entre lluvia y presión, queda el dilema: o la onda semidiurna de lluvia en las estaciones A y Dosquebradas y Chinchiná es solamente un recurso matemático y fortuita la oposición de fases o sobre ambas, presión y lluvia, un mismo agente produce simultáneamente oposición de fases.

La tercera onda de 8 horas de período que aparece con la misma fase en las estaciones A y C, no parece que pueda tener relación con ningún agente físico. A pesar de la coincidencia de fases cabe suponer que aparece solamente al querer ajustar las sinusoides a las curvas de lluvia.

Réstame para terminar dar gracias al Dr. Roberto Torres y demás personal de Meteorología del Instituto Geográfico por la colaboración prestada, a D. Vicente Lauro Gómez y al Dr. Mena que me facilitaron las observaciones de Quito, al Dr. Alfredo López de la Empresa de Aguas de Bogotá y a la Federación de Cafeteros que me facilitaron sus publicaciones y a D. Angel Ibarra.