

CLIMATOLOGÍA DE DIFUSIÓN DE LA CIUDAD DE TIJUANA, B.C.

Por *Ernesto Jáuregui Ostos**

RESUMEN

La capa de aire fresco marítimo que prevalece durante gran parte del año en la cuenca aérea de Tijuana está limitada en su parte superior por una inversión de temperatura que restringe considerablemente la dilución vertical de los contaminantes que se emiten al aire en la ciudad que, por su población, es la cuarta en importancia en el país. El análisis de las líneas de flujo revela que durante el día hay un transporte de aire cuesta arriba del valle del río Tijuana (la brisa y los vientos de valle), mientras que por la noche y en la mañana se invierte el flujo al prevalecer el terral.

Los vientos de valle reforzados por la brisa del oeste favorecen la importación de contaminantes atmosféricos originados más allá de la línea fronteriza, los cuales se suman a las emisiones de fuentes locales. Los principales contaminantes en la cuenca aérea de Tijuana son los oxidantes y el polvo en suspensión. La nueva zona industrial en el noreste de la ciudad se encuentra favorablemente ubicada respecto a los vientos dominantes.

SUMMARY

The marine layer of cool air characteristic of Southern California prevails over the Tijuana basin during most of the year and is topped by an upper temperature inversion. This condition restricts dilution of air contaminants in the vertical especially during the summer when the average mixing height is much less than the inversion top resulting in severe trapping of emissions.

Streamline analysis shows that during the day there is a transport of air (and pollutants) upslope the river valley of Tijuana. At night and early morning a reversal of the flow is usually observed. The valley winds reinforced by the sea breeze from the west favour the transport of pollutants originating at the other side of the border in metropolitan San Diego. These contaminants are added to the local emissions in Tijuana which are mainly suspended particles and ozone.

* Investigador del Instituto de Geografía de la UNAM.

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene por finalidad, primero, describir brevemente los sistemas sinópticos que determinan el clima del área de Tijuana. También se examinan algunas de las variables meteorológicas más generales, para, finalmente, tratar con cierto detalle aquellas variables climatológicas que tienen mayor influencia en la dispersión y acarreo de los contaminantes que se arrojan a la atmósfera urbana.

2. LOS DATOS

La información climatológica se obtuvo de diversas fuentes; la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos mantiene en operación dos estaciones termopluviométricas en el área urbana de Tijuana (en la parte baja de la ciudad) y otra en la presa Abelardo Rodríguez en la parte alta de la cuenca del río Tijuana, a unos 15 Km al sureste de la ciudad (Fig. 1).

En estas estaciones se observan sólo las variables de temperatura y precipitación, además de la nubosidad y algunos fenómenos tales como la frecuencia de nieblas, tormentas eléctricas, etc. El viento, que es uno de los elementos climáticos más importantes para la difusión atmosférica, se observa sólo en forma muy general (viento dominante o prevaleciente en las últimas 24 horas y el que se registra al momento de la observación, que usualmente se hace cada día a las 8 a.m.).

También se contó para este estudio con los datos horarios que se registran en la estación meteorológica del aeropuerto de Tijuana (operada por SENEAM) situado al este de la ciudad y muy cerca de la línea fronteriza (Fig. 1). Finalmente, se ha complementado la información climatológica del área de Tijuana con los datos de las estaciones de San Diego (Servicio Meteorológico) y San Isidro (Ream Field), distantes unos 15 y 5 kms, respectivamente, hacia el nornoroeste de Tijuana (Fig. 4).

3. FISIOGRAFÍA

La ciudad de Tijuana se encuentra en la porción baja de la cuenca del río Tijuana. El

río, que sólo lleva agua ocasionalmente en la estación lluviosa, cruza por la ciudad según una dirección surestenoeste, antes de penetrar en territorio estadounidense en el Condado de San Diego, en donde toma curso hacia el poniente, antes de desembocar cerca del Océano Pacífico, en una planicie pantanosa a unos 3 kms al norte de la frontera (Fig. 4).

El área urbana de Tijuana se ha extendido hacia el poniente del río, ocupando las faldas de los cerros que se elevan unos 150 m y que separan la ciudad de la estrecha faja costera donde se ubica el fraccionamiento Playas de Tijuana. Hacia el oriente del río el terreno sube en forma abrupta un centenar de metros, hasta alcanzar la planicie de Otay donde se encuentra el aeropuerto (hacia el este). Hacia el sureste del centro de la ciudad y siguiendo el curso del río por su margen izquierda, el terreno se eleva gradualmente en La Mesa, hasta alcanzar la presa Rodríguez, a 140 m sobre el nivel del mar, que marca el límite sureste de la ciudad.

La cuenca media y alta del río Tijuana (que termina justamente en la presa), se encuentra separada de la planicie costera por una serranía de poca altura cuyos picos más elevados alcanzan unos 700 m (Fig. 4). Hacia el norte de la cuenca media del río Tijuana el terreno se eleva, a veces con escarpes fuertes, hasta elevaciones planas en forma de terrazas de 50 o 100 m, hacia la mesa de Otay. Cerca de las márgenes del río y aguas arriba de Tijuana el contorno del terreno se caracteriza por un estrechamiento de la cuenca, que culmina en el punto donde se encuentra la cortina de la presa Rodríguez. Directamente al norte de la presa está el cerro Colorado que es la mayor elevación (550 m) del área en estudio.

4. EL CLIMA

El clima de Tijuana es seco marítimo, del tipo mediterráneo, con lluvias invernales que se concentran en los meses de noviembre a abril; en este periodo se recoge el 91% del total de la precipitación anual que es de sólo 203 mm (ver tabla 1b); es decir, menos de 1/3 de la precipitación anual registrada en Tacubaya. Durante el verano, los cielos despejados de nubes dan por resultado abundante

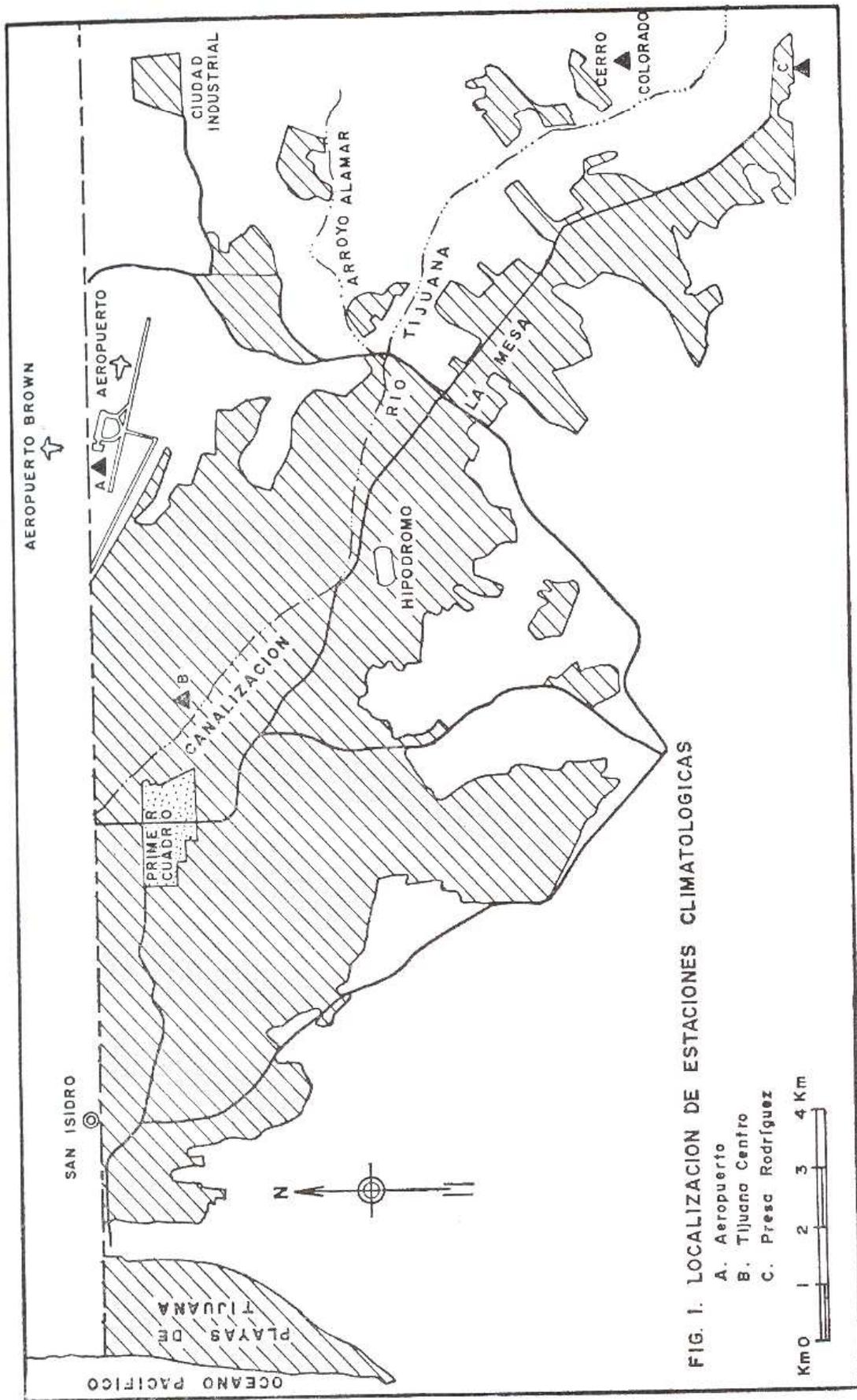


FIG. 1. LOCALIZACION DE ESTACIONES CLIMATOLOGICAS

- A. Aeropuerto
- B. Tijuana Centro
- C. Presa Rodriguez



insolación que eleva las temperaturas, al mediodía, por arriba de los 26°, mientras que en el invierno las masas de aire polar marítimo, conjuntamente con mayor frecuencia de días nublados, atemperan el clima de la región.

5. LOS SISTEMAS DE TIEMPO

El clima de la región de Tijuana está determinado por la cercanía del océano y por la posición e intensidad de la celda anticiclónica semipermanente del Norpacífico. El mar cercano ejerce influencia moderadora en la temperatura, mientras que el anticiclón determina que el verano sea seco y caluroso, en tanto que en invierno ocurren las lluvias.

a) *El anticiclón semipermanente del Norpacífico.*

El gradiente de presión y, en consecuencia, la intensidad del viento en la región de Tijuana está determinado por la intensidad del anticiclón del Norpacífico, hacia el oeste, así como por su posición relativa con la baja térmica superficial ubicada hacia el este, en el extremo noroeste de México y sur de Arizona.

En el invierno esta baja térmica es muy débil, mientras que el anticiclón del Pacífico, aunque se acerca más al continente (y hacia el sur), en esta época es también menos intenso que en verano. El desplazamiento del anticiclón hacia el sur permite que los sistemas frontales penetren más en el área del noroeste de México. Estos frentes fríos que barren las costas de la península y de Sonora y Sinaloa acarrearán en la estación fría nubosidad y precipitación en cantidades decrecientes a medida que avanzan hacia el sur de la región. Pero en el área de Tijuana son éstos los sistemas sinópticos que producen casi la totalidad de la precipitación anual.

Durante el verano el anticiclón del Norpacífico se intensifica (de 1022 mb en el invierno, la presión sube a 1027 mb) al mismo tiempo que se desplaza hacia el noroeste, alejándose de la costa. Al mismo tiempo, el centro de baja presión del noroeste de México se intensifica (de 1018 mb en invierno, la presión baja a 1005 mb en promedio), lo que resulta, en general, en un aumento del gradiente de presión

en el área del sur de California y norte de Baja California. La posición más al norte de la celda anticiclónica y su intensificación en esta época impide que los sistemas frontales se desplacen por la costa, por lo que en Tijuana las lluvias son muy escasas en el verano (tabla 1b).

b) *Los ciclones tropicales.*

Los vórtices ciclónicos que se originan en la Zona Intertropical de Convergencia del Pacífico Oriental, frente a las costas de Centroamérica, afectan excepcionalmente el extremo norte de la Baja California durante el verano y, así, en septiembre de 1976 el ciclón Kathleen (Fig. 2) pasó cerca del área en estudio produciendo lluvias abundantes en la cuenca del río Tijuana, y la presa Rodríguez alcanzó por primera vez su máximo almacenamiento. El Kathleen, que fue el primer ciclón que afectó el área en estudio desde el año de 1939, produjo deslaves en la carretera a Tecate, y la población de Tijuana se vio amenazada de inundaciones por la abundante precipitación.

Un año después, y siguiendo una trayectoria semejante, el ciclón Doreen volvió a afectar el área en estudio, acarreando abundantes lluvias, sobre todo en la planicie costera. En San Diego y Tijuana se recogieron de 30 a 50 mm, mientras pasó la perturbación que es muchas veces más de lo que se precipita normalmente en el mes de agosto. Lo errático de las trayectorias que siguen estas perturbaciones explica la enorme variabilidad de la lluvia en estos meses de verano en la región en estudio.

c) *Celda anticiclónica tibia sobre la Gran Cuenca (Montañas Rocallosas).*

Este tipo de anticiclón migratorio, que puede ser de núcleo frío o tibio, tiene una frecuencia, en el invierno, de uno cada 7 o 10 días en el sur de California y norte de Baja California. Una vez que pasa el frente frío el cielo se despeja y la subsidencia propia del anticiclón que viene detrás del frente ocasiona con frecuencia inversiones de temperatura en niveles superiores. Los cielos despejados que prevalecen entonces, inducen en las largas noches de invierno una fuerte pérdida de calor por radiación, que se manifiesta en la formación de una inversión superficial. Esta inversión super-

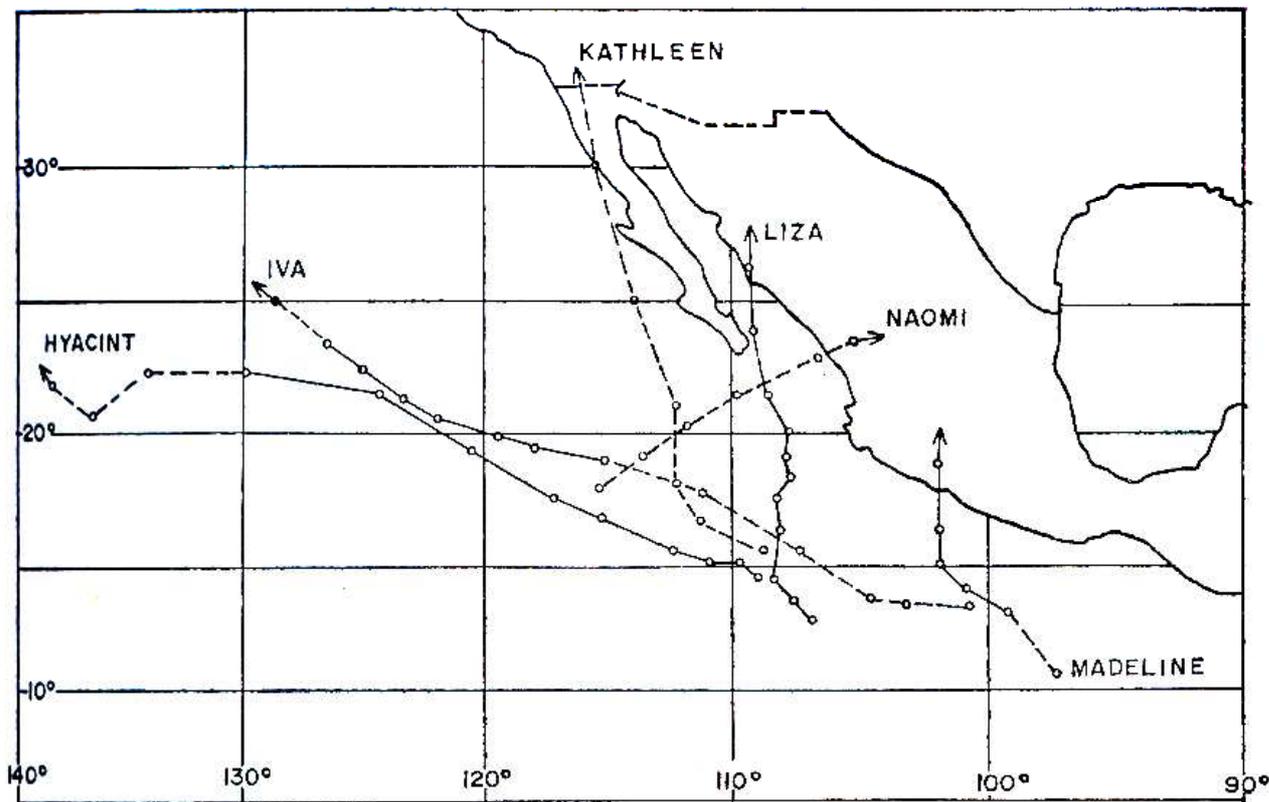


FIG. 2. TRAYECTORIAS DE CICLONES TROPICALES EN EL PACIFICO ORIENTAL EN 1976. (Monthly Weather Rev. Vol. 105, p. 512, 1976).

ficial alcanza su máxima intensidad al amanecer, y en pleno invierno puede persistir hasta el mediodía (U. S. W. B. T. P. 54). El flujo del aire de estas celdas tiende a contrarrestar o a debilitar el efecto de la brisa.

d) Anticiclón frío sobre la Gran Cuenca

Esta situación sinóptica se conoce en la literatura meteorológica como el "Santa Ana" y no es otra cosa que un anticiclón migratorio frío que se centra sobre las Rocallosas. El flujo anticiclónico produce vientos del noreste que descienden de las Rocallosas hacia la costa californiana del sur y el área en estudio. El calentamiento por el descenso de estos vientos de foehn se observa 24 o 36 horas después del paso del frente por la costa. Al llegar cerca de la costa estos vientos secos se encuentran por la tarde con la brisa, produciéndose ahí un flujo convergente.

e) Los sistemas frontales

Como se señaló más arriba, los frentes fríos que descienden por la costa californiana llegan al área en estudio durante el invierno, y son los principales sistemas que producen ahí la precipitación a medida que se desplazan hacia el sureste como frentes ocluidos, con un ritmo de uno cada 7 a 10 días. En el área San Diego Tijuana estos frentes se mueven en dirección casi de oeste hacia el este (u oestenoeste-estesureste) produciendo la mayor cantidad de nubes y precipitación en las áreas costeras, donde vienen acompañados de vientos moderados del oeste. Sólo cuando el frente es bastante marcado produce lluvias sobre las montañas, al este del área en estudio, y vientos fuertes del oeste.

Las llamadas "surgencias de humedad" que se originan en el Golfo de California no llegan a afectar el área de Tijuana.

6. LA TEMPERATURA

El régimen térmico de Tijuana está influido por la cercanía del mar. En la colonia Playas de Tijuana, sobre la costa, el clima es marítimo, como el que se observa en San Diego, pero unos kilómetros tierra adentro, en el centro de Tijuana, las temperaturas máximas y las mínimas (Fig. 3) son ya algo más elevadas que en la costa, mientras que la amplitud térmica anual se mantiene sensiblemente igual en ambos puntos. La abundante insolación de los cielos despejados (más de 20 por mes) que prevalecen en el verano (tabla 1a.) explica las elevadas temperaturas que se observan en esta época (de 28° en promedio). Por otra parte, las temperaturas mínimas sólo descienden a 14°-17°C.

En el invierno, la advección de aire frío de las masas de aire polar y el aumento de la nubosidad abaten la temperatura (las máximas a unos 20° y las mínimas a alrededor de 6°).

7. LA PRECIPITACIÓN

La temporada de lluvias en Tijuana comienza en noviembre y se prolonga hasta abril. En estos meses se colectan de 30 a 40 mm/mes. La precipitación es, generalmente, de carácter frontal, registrándose solamente 4 a 6 días por mes con lluvia apreciable (tabla 1b).

Como ya se mencionó en la sección 6, las lluvias, que excepcionalmente ocurren al final del verano, están asociadas a los ciclones tropicales del Pacífico Nororiental, que se desvían muy rara vez hacia el área en estudio, provocando ahí lluvias abundantes.

8. LA CIRCULACIÓN DEL AIRE SUPERFICIAL

La circulación del aire superficial en Tijuana está determinada por:

- a) La topografía
- b) La cercanía del mar y, finalmente,
- c) Los sistemas de tiempo o el gradiente barométrico regional.

Ya se vio en la sección anterior que los sistemas frontales productores de lluvia tienen

una frecuencia relativamente baja en Tijuana, por lo que los factores a) y b) (la topografía y las brisas) dominan la circulación de los vientos en el área en estudio.

a) *La topografía.* En ausencia de un gradiente barométrico regional acentuado, el aire frío que durante la noche escurre hacia el fondo del valle del río Tijuana se manifiesta por vientos que tienen una componente del este, ya que el eje del río está orientado sureste-noroeste. Además, en el perímetro oriente de la ciudad, la cañada que aloja el arroyo del Alamar (afluente del río Tijuana) tiene una orientación este-oeste. El aire frío nocturno que fluye cuesta abajo de este arroyo proviene, así, del este, y se une después con el escurrimiento de aire frío que desciende de la presa Rodríguez, para desembocar en la planicie del río Tijuana denominada "la canalización"; aquí, al penetrar en una sección más amplia, el viento catabático disminuye su intensidad. En la tabla 2a, que muestra la frecuencia de la dirección del viento en el centro de Tijuana, puede advertirse que los vientos en la mañana (y por la noche) soplan predominantemente del este o sureste, o aun del sur. Los vientos catabáticos o de montaña se observan también en el exeremo sureste de la ciudad, a la altura de la presa Rodríguez (tabla 2b) y en todas las estaciones del año.

En la tabla 2c aparece la frecuencia de la dirección e intensidad media del viento en el aeropuerto. Aquí se observa casi lo mismo que en las dos estaciones anteriores, aunque con más detalle, ya que en el aeropuerto se cuenta con observaciones horarias tanto de la dirección como de la intensidad del viento. En el período invernal se manifiestan claramente los vientos con componente del este; sin embargo, en el resto del año los vientos de montaña (del este) son menos frecuentes aquí. Esto se explica en parte porque el aeropuerto se localiza ya en la Mesa de Otay, es decir, en un lugar plano y elevado respecto a las dos estaciones previamente mencionadas.

b) *La brisa.* El otro factor decisivo en la circulación local del aire en Tijuana es el contraste térmico entre el agua del mar y la costa. Este contraste, que es más acentuado en el verano, determina el establecimiento de un flujo de aire hacia tierra, que generalmente co

FIG. 3. TEMPERATURA MAXIMA Y MINIMA PROMEDIO EN TIJUANA (Centro), PRESA RODRIGUEZ Y SAN DIEGO, CALIFORNIA.

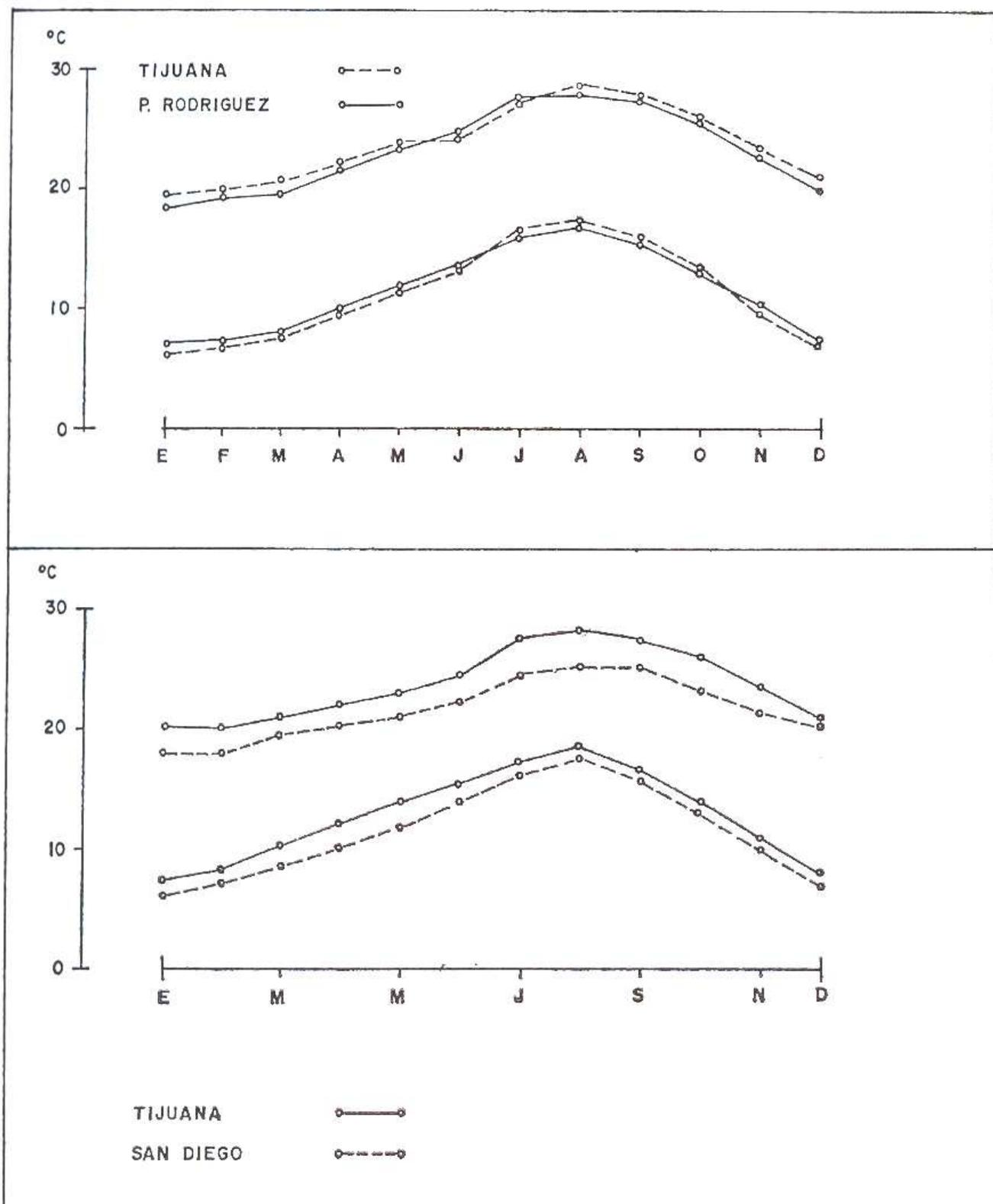


Tabla 1a.

	E		F		M		A		M		I	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
T. Máx.	19.8	18.9	20.0	19.5	20.6	19.7	22.2	21.9	23.2	23.4	24.5	24.9
T. Prom.	12.9	12.9	13.5	13.4	14.4	13.8	16.1	15.9	17.5	17.7	19.1	19.3
T. Mín.	6.1	6.9	7.1	7.4	8.2	8.0	10.0	10.0	11.8	12.0	13.7	13.8
Días Despejados	16	16	18	16	18	17	18	19	20	21	19	23
Días con lluvia apr.	6	6	4	6	4	6	2	4	1	2	0	0
Días con niebla	0	3	0	4	0	3	0	3	0	3	0	3

	J	A		S	O		N	D				
		1	2		1	2		1	2			
T. Máx.	27.5	27.9	28.2	28.3	27.5	27.9	26.0	25.6	23.5	22.9	21.0	19.9
T. Prom.	21.9	21.9	22.8	22.6	21.6	21.6	21.7	19.0	19.3	16.4	16.5	14.0
T. Mín.	16.3	16.0	17.5	16.9	15.7	15.5	12.9	13.0	9.7	10.2	7.0	7.7
Días Despejados	24	27	24	17	21	25	20	22	18	20	20	17
Días con lluvias apr.	0	0	0	0	0	1	1	1	4	4	4	6
Días con niebla	1	3	1	6	2	7	1	5	1	4	1	3

1. Tijuana

2. Presa Abelardo Rodríguez

Tabla 2a.

FRECUENCIA DEL VIENTO SUPERFICIAL EN TIJUANA
CENTRO (S.R.H.)

ENE.		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Calma	
	8 - 10	6	-	13	38	31	-	-	4	8	
	15 - 20	32	-	-	-	-	-	52	16	-	

ABR.	8 - 10	33	-	-	-	66	-	-	-	-	
	15 - 20	29	-	-	-	-	-	52	19	-	

JUL.	8 - 10	33	-	-	-	66	-	-	-	-	
	15 - 20	33	-	-	-	-	-	66	-	-	

OCT.	8 - 10	7	1	12	26	42	2	7	2	2	
	15 - 20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Tabla 2b.

FRECUENCIA DEL VIENTO SUPERFICIAL EN LA PRESA
RODRIGUEZ, B.C.N. AÑO 1977

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Calma
ENERO 8 - 10	6	-	13	38	31	-	-	4	8
15 - 20	32	-	-	-	-	-	52	16	-

ABRIL 8 - 10	33	-	-	-	66	-	-	-	-
15 - 20	29	-	-	-	-	-	52	19	-

JULIO 8 - 10	33	-	-	-	66	-	-	-	-
15 - 20	33	-	-	-	-	-	66	-	-

OCT. 8 - 10	7	1	12	26	42	2	7	2	2
15 - 20	-	-	-	-	-	-	-	-	-

mienza después de mediodía. En la tabla 2c puede verse que en el periodo de las 14 a las 22 horas el flujo dominante del aire es del oeste, con una intensidad bien acentuada, de unos 5 m/s. Este viento del oeste se manifiesta durante todo el año en Tijuana, teniendo su frecuencia máxima en el verano (tabla 2c, julio), cuando el calentamiento de la tierra en la región de Tijuana es máximo debido a la ausencia de nubes. Pero el mecanismo que contribuye principalmente al refuerzo o intensificación de la brisa en el verano es el establecimiento de la baja térmica más allá de las montañas de Baja California, en la región de los desiertos de Sonora y de California. El calentamiento de estas áreas desérticas es de tal magnitud en el verano, que la brisa (del oeste) prevalece aun durante la noche, y los vientos de terral (del este) casi no se presentan en esta época (tabla 2c).

c) *Vientos frontales.* Ya se dijo que la estación de lluvias en Tijuana es en el invierno. Las precipitaciones están asociadas al paso de masas de aire frío que, al aproximarse al área en estudio, perturban la circulación local y, así, el viento más frecuente, cada vez que llueve en el área, tiene una dirección del sur o suroeste, como puede verse en la tabla 3 que se refiere a la dirección del viento cada vez que llovió en San Diego.

d) *Frecuencia de situaciones de viento en calma.* Con ser un lugar sometido a la influencia de las brisas, el área de Tijuana experimenta con frecuencia condiciones de aire en calma. Las calmas ocurren por la noche y en la primera mitad del día (tabla 2c). En realidad, un elevado porcentaje de las calmas registradas en el aeropuerto de Tijuana, por la noche, son vientos cuya intensidad es menor de 1 m/s que corresponde al umbral de sensibilidad del anemómetro del aeropuerto. En la tabla 2c puede apreciarse que el terral o viento del este o sureste tiene una intensidad, en general, menor (de 2-3 m/s) que el de la brisa diurna del oeste (de 4.5 m/s). En la misma tabla 2c se ve que la frecuencia de las calmas es mayor en el verano y otoño, cuando es superior a 80% del tiempo, durante la noche.

9. ANÁLISIS DEL FLUJO SUPERFICIAL DEL AIRE.

En las figuras 4 a 11 aparece el análisis del flujo del aire superficial, en cuatro meses representativos de las cuatro estaciones: enero, abril, julio y octubre, y en dos periodos distintos del día: de las 0 horas a las 7 a.m., indicativo del régimen del viento terral y de las 12 a las 17 horas, como representativo del periodo del día en que predomina la brisa marina. Estos meses y periodos del día se han escogido con objeto de que coincidan con los de los mapas de líneas de flujo contenidos en la investigación que sobre el sur del estado de California han realizado Demarrais, Holzworth y Hosler (1965). En esta forma se han podido complementar los datos de frecuencia de vientos en ambos lados de la frontera. El dato de la dirección del viento que se observa en las estaciones de Tijuana (centro) y presa Rodríguez, a las 8 a.m., se ha tomado como representativo del periodo de las cero a las 7 a.m., ya que en estas estaciones sólo se hace una observación al día, por la mañana. Para estimar la dirección del viento después del mediodía (periodo 12 a 18 h), en estas dos estaciones se ha tomado el dato que se asienta en donde dice "viento dominante". En la estación del aeropuerto se han utilizado los mismos periodos empleados en las estaciones estadounidenses, ya que ahí se cuenta con observaciones horarias del viento.

La dirección del viento, que aparece en los mapas de las Figs. 4-11, es la más frecuente en el periodo señalado. Esta frecuencia máxima está anotada (en %) en el extremo trasero de la flecha, mientras que en la punta de ésta se ha colocado el número que corresponde a la intensidad media del dicho viento (en m/s). Cuando la frecuencia del viento predominante es comparativamente baja, se ha dibujado, también, la dirección del viento que le sigue en importancia.

Teóricamente, las líneas de flujo son siempre paralelas a la dirección del viento y, así, se han trazado, dentro de lo posible, en las figuras 4-11, suavizando su trazo. En la realidad, estas líneas van a ser más sinuosas e irregulares, sobre todo si se toma en consideración la topografía moderadamente accidentada del área en estudio. Los mapas de las líneas de

Tabla 2c.

FRECUENCIA DE LA DIRECCION (EN %) E INTENSIDAD MEDIA (m/s) DEL VIENTO SUPERFICIAL EN EL AEROPUERTO DE TIJUANA, B.C.N. (AÑOS 1977 y 1978).

ENERO

	N		NE		E		SE		S		SW		W		NW		Calma
	Frec.	Int.															
07-13	2	3	1	3	21	4	14	4	7	8	2	3	9	5	2	4	42
14-22	1	4	1	5	10	6	9	11	5	7	9	5	30	5	6	4	30
23-06	5	3	2	3	31	3	18	4	4	8	1	5	1	4	-	-	38

ABRIL

7-13	-	-	-	-	7	3	4	3	4	5	17	5	28	5	4	4	36
14-22	-	-	-	-	2	3	2	4	7	6	22	5	47	5	2	3	18
23-06	1	3	-	-	14	2	7	3	-	-	4	4	6	4	-	-	67

JULIO

7-13	-	-	-	-	-	-	-	-	1	5	12	4	45	5	-	-	42
14-22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	4	63	5	4	4	25
23-06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	2	-	-	97

OCTUBRE

7-13	-	-	-	-	5	2	1	3	-	-	13	4	23	5	2	3	56
14-22	-	-	-	-	-	-	1	6	1	2	26	5	61	5	2	4	10
23-06	-	-	-	-	3	2	1	4	-	-	-	-	5	2	2	1	89

Tabla 3.

FRECUENCIA DE LA DIRECCION DEL VIENTO CADA VEZ QUE
LLOVIO EN SAN DIEGO.
(Lindberg Field) (Tech. Paper 54 US W.-B.)

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	C
Octubre	7	12	12	5	23	14	15	6	6
Noviembre	3	11	12	13	27	11	6	15	2
Diciembre	3	12	20	18	25	8	6	4	4
Enero	9	12	7	23	25	11	6	7	5
Febrero	2	5	3	10	39	21	11	6	3
Marzo	3	5	10	4	29	21	17	9	2
Abril	6	2	4	4	40	17	16	10	1

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	C
Octubre	7	12	12	5	23	14	15	6	6
Noviembre	3	11	12	13	27	11	6	15	2
Diciembre	3	12	20	18	25	8	6	4	4
Enero	9	12	7	23	25	11	6	7	5
Febrero	2	5	3	10	39	21	11	6	3
Marzo	3	5	10	4	29	21	17	9	2
Abril	6	2	4	4	40	17	16	10	1

flujo indican el transporte horizontal del aire (y con él, el de los contaminantes gaseosos o sólidos que contiene) en el periodo del día señalado. Los periodos seleccionados corresponden a las horas en que está claramente establecido ya sea el régimen de vientos del mar (de las 12:00 a las 18:00 h) o el terral, o el viento de montaña, o ambos (de las 0:00 a las 7:00 h). En estos periodos soplan con más persistencia los vientos locales de mar y de tierra, mientras que entre las horas intermedias es razonable esperar que el flujo del aire sea cambiante, ya que en estos lapsos el viento debe girar de una dirección del oeste (la brisa) a otra con componente del este (el terral), al anochecer, y viceversa, al finalizar la mañana. El patrón de flujo que se observa, en general, a través del año, en las figuras 4-11, es lo que era de esperarse: es decir, en el periodo de las 12:00-18:00 horas se manifiesta claramente el régimen de vientos del mar (del oeste) modificados, a veces, ligeramente por la topografía. Estos vientos tienen, en general, una intensidad de 4 a 6 m/s. En el periodo de las 0:00 a las 7:00 h, se observan, a través del año, los vientos de tierra, es decir, con una componente del este o del sur. Solamente en el verano (Fig. 4) el terral no logra establecerse por la noche, prevaleciendo entonces la brisa del oeste debido, como ya se dijo, al excesivo calentamiento de las áreas desérticas vecinas del interior, fenómeno que ha sido señalado ya por De Marrais *et al.*

Además de señalar el transporte horizontal, el análisis de las líneas de flujo sirve para localizar las áreas de convergencia o divergencia del flujo. Sin embargo, dado lo ralo de la red de estaciones, no intentaremos dicho tipo de análisis sino sólo en términos muy generales.

a) *Flujo del aire superficial en el verano* (figuras 4 y 5).

En un mes típico del verano, como es julio, el flujo del aire es marcadamente del mar a la tierra, debido tanto al efecto de la brisa como al gradiente de presión originado por el anticiclón semipermanente del Norpacífico que, en esta época, se localiza a los 37°N y 152°W (De Marrais *et al.*, 1965); el resultado es una brisa bastante sostenida que penetra más allá del valle del río Tijuana (Fig. 5). Si se toma

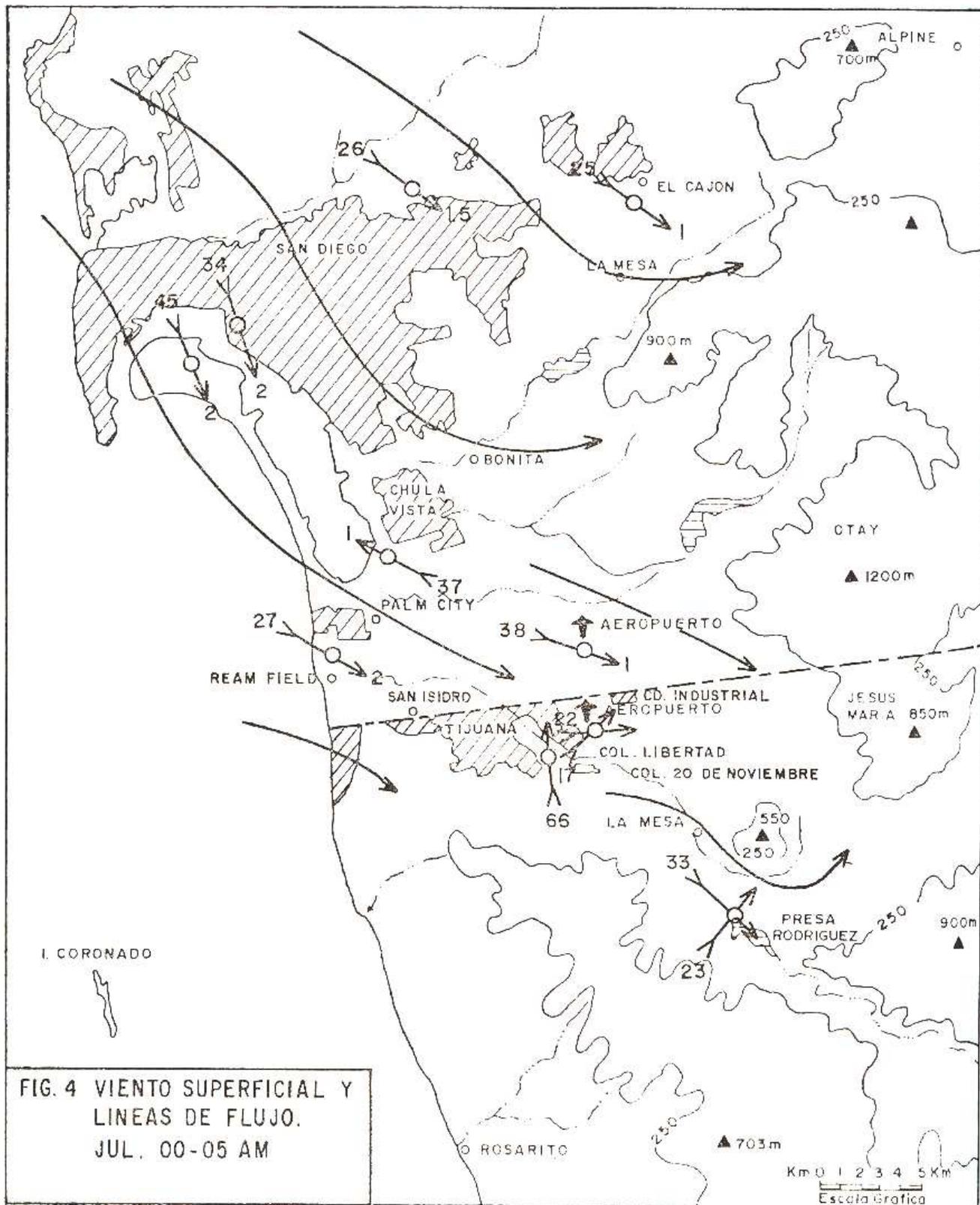
un periodo de 24 horas, el transporte neto del aire que pasa por Tijuana en el verano es mayor que en cualquiera otra época del año, ya que aun por la noche el flujo continúa en gran parte, siendo del oeste o noroeste (Fig. 4), por lo explicado más arriba. Esta condición es importante al considerar el transporte de contaminantes que pudieran originarse en el área metropolitana de San Diego.

b) *Otoño.*

Los mapas de flujo del aire en un mes del otoño (octubre) muestran el establecimiento del terral o vientos del este o sureste, en el área en estudio, durante la noche (Fig. 6), debido a menor calentamiento de las áreas desérticas, hacia el este, y el consecuente atenuamiento de la baja térmica; al mismo tiempo, el anticiclón del Norpacífico se debilita originándose un gradiente menos marcado. En consecuencia, las brisas del oeste son menos persistentes que en el verano (Fig. 7).

c) *Invierno.*

La intensidad de las brisas se reduce ligeramente en el invierno, en el área en estudio, debido al proceso de atenuamiento tanto del anticiclón semipermanente del Norpacífico como de la baja térmica que en esta época es casi imperceptible. Además, es en estos meses cuando las masas migratorias de aire polar producen las lluvias y perturban el régimen de vientos locales. Además, el contraste térmico entre el aire que se encuentra sobre el mar y el que reposa sobre tierra es pequeño, ya que las horas de insolación son más reducidas tanto por una mayor nubosidad como porque los días son, entonces, más cortos. Aun así, el efecto de los vientos de valle en el día refuerza la circulación de las brisas, siendo el resultado un transporte de aire cuesta arriba de la cuenca del río Tijuana, después del mediodía (Fig. 9). Por la noche y en la mañana prevalecen los vientos de montaña que soplan cuesta abajo del valle del río (Fig. 8). Es en esta época del año cuando estos vientos nocturnos alcanzan su máxima intensidad, por lo débil del gradiente regional y por el alejamiento de la zona de convergencia con las brisas mar adentro.



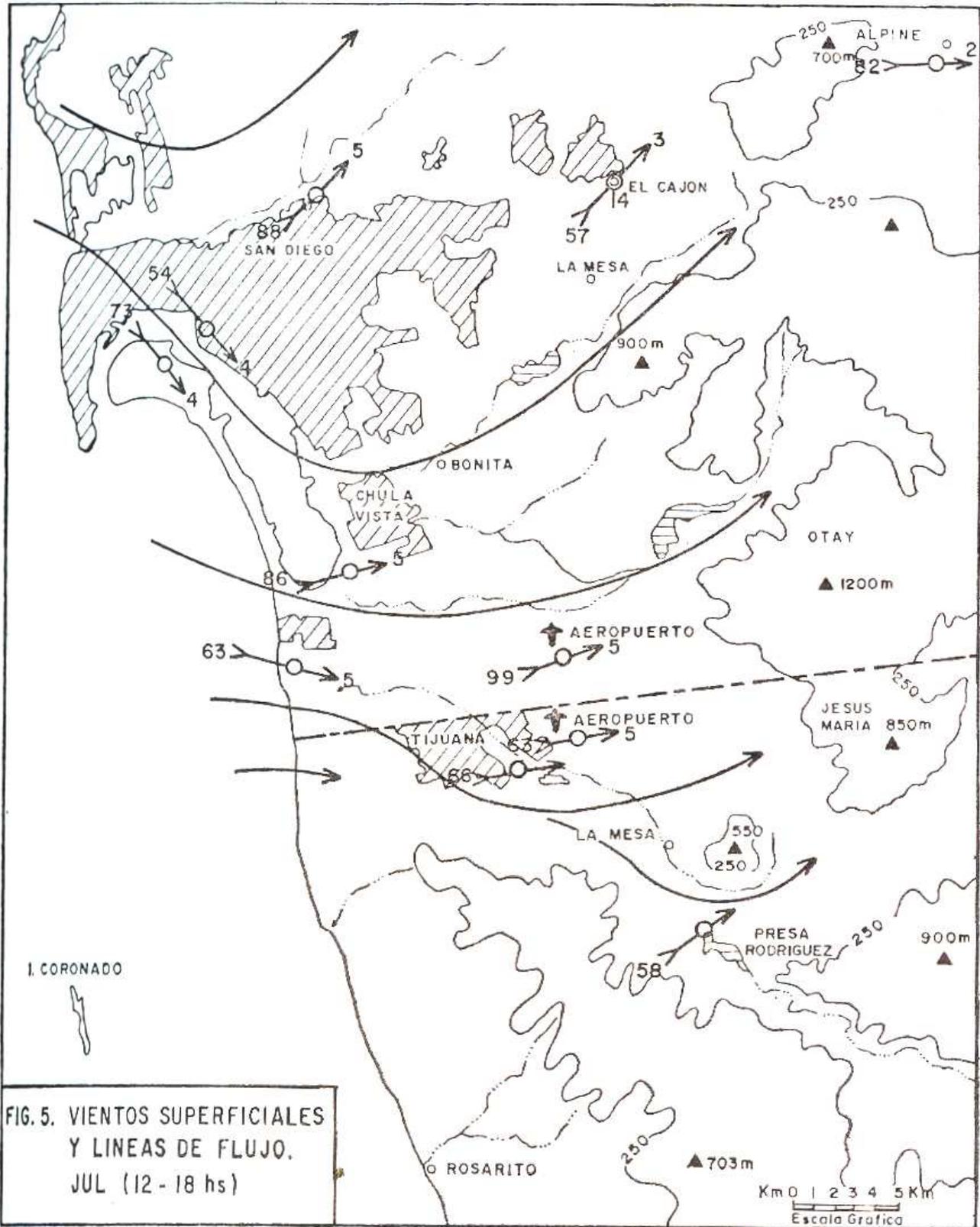
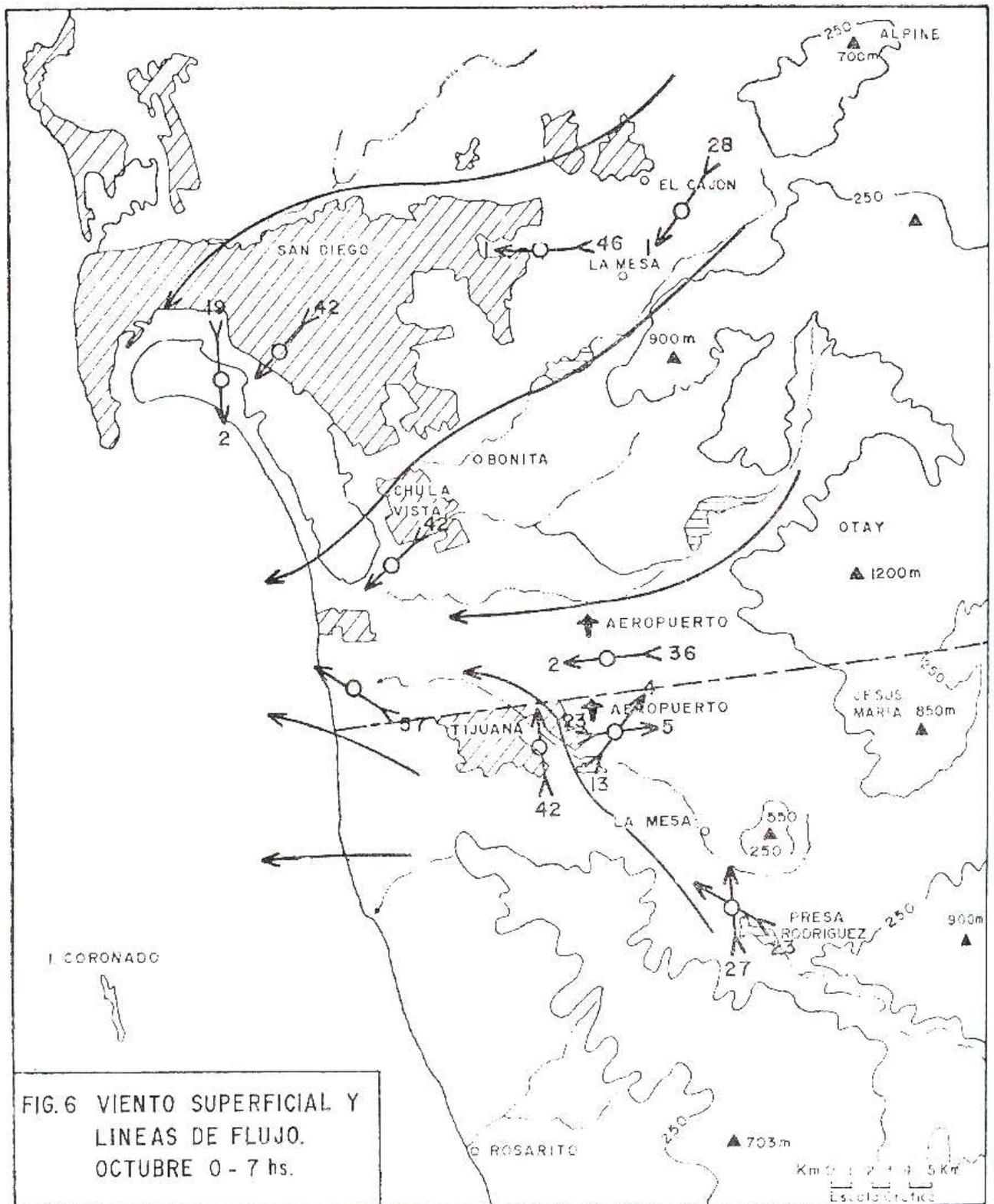


FIG. 5. VIENTOS SUPERFICIALES
Y LINEAS DE FLUJO.
JUL (12 - 18 hs)



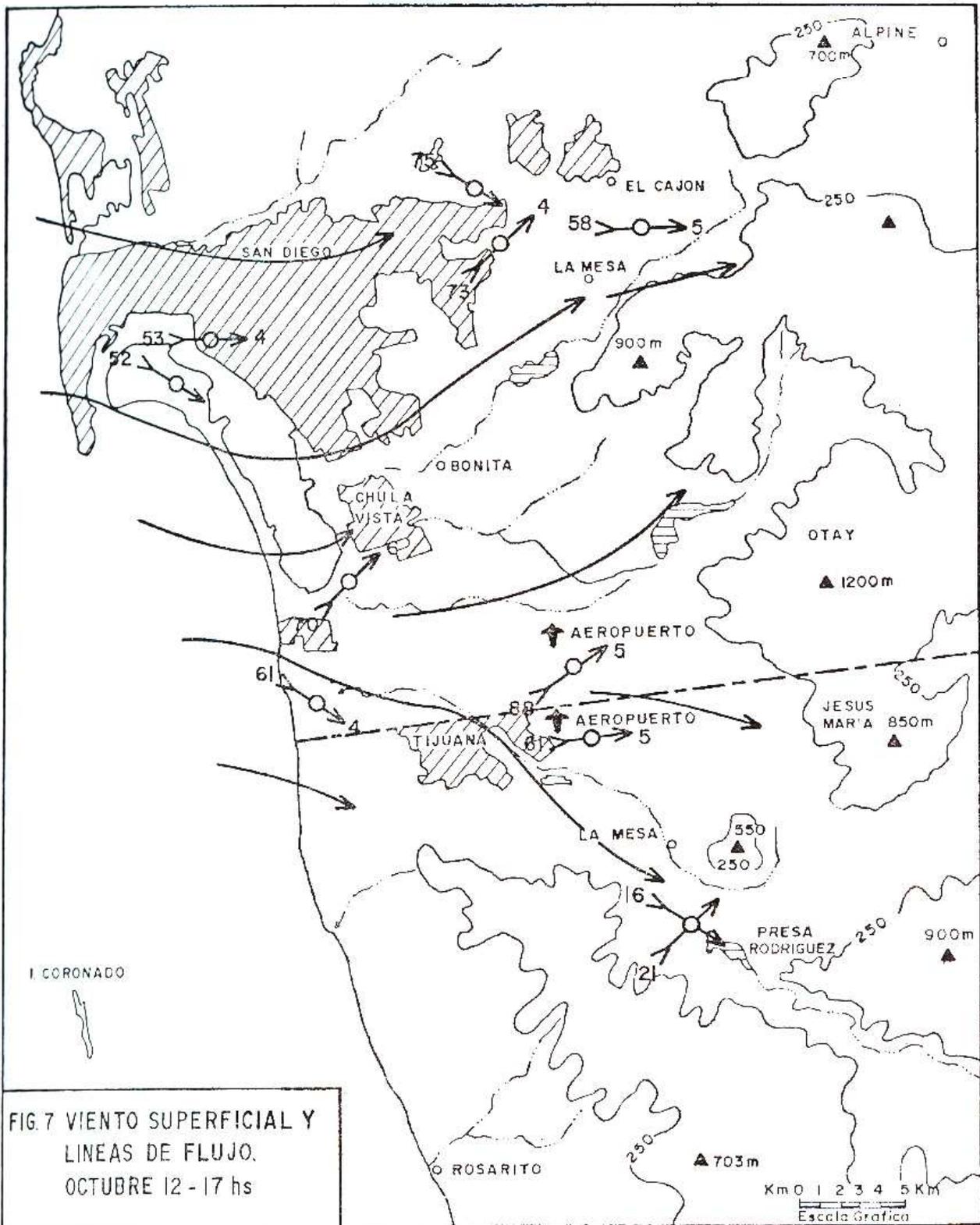


FIG. 7 VIENTO SUPERFICIAL Y LINEAS DE FLUJO. OCTUBRE 12 - 17 hs

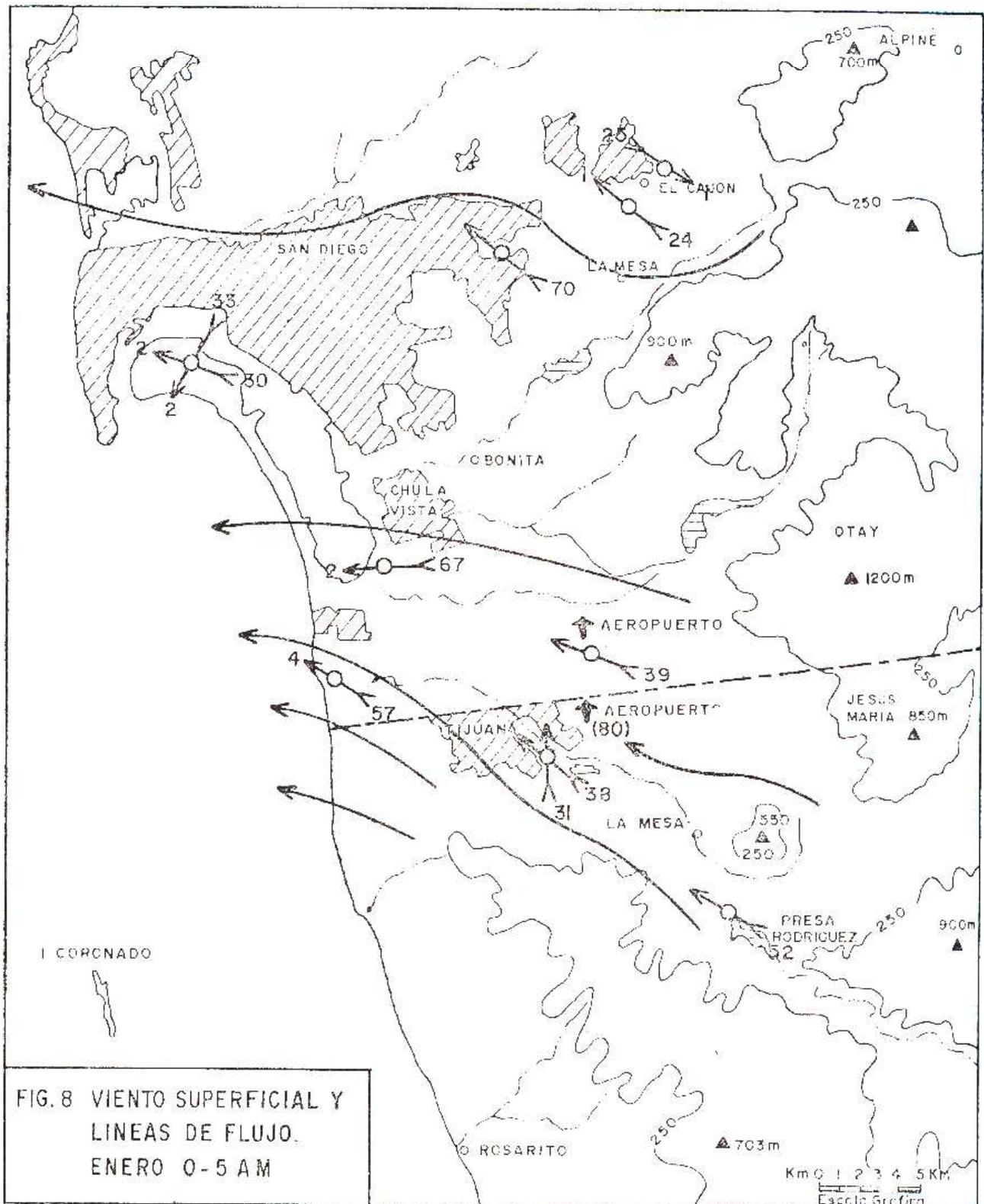


FIG. 8 VIENTO SUPERFICIAL Y LINEAS DE FLUJO. ENERO 0-5 AM

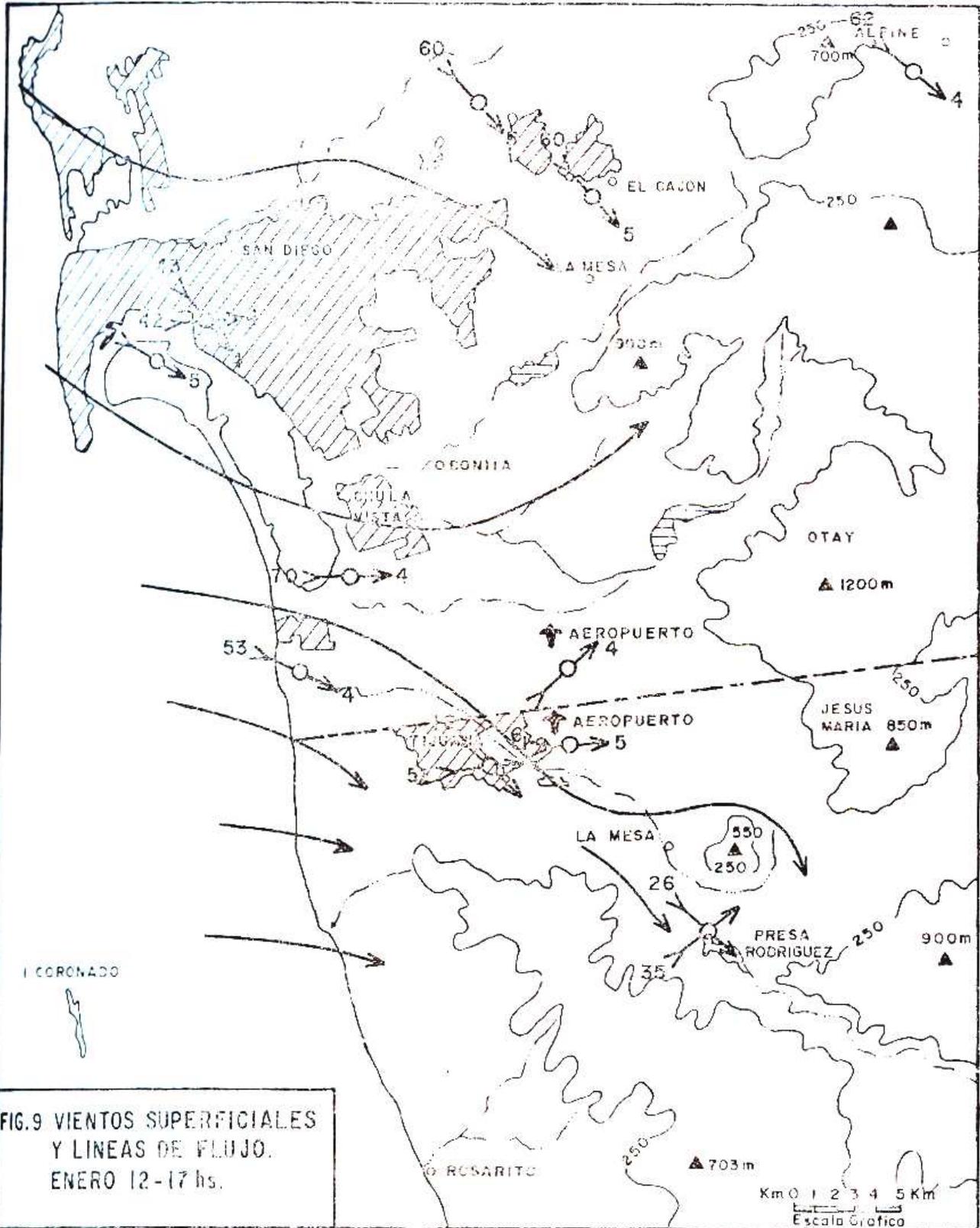


FIG.9 VIENTOS SUPERFICIALES Y LINEAS DE FLUJO. ENERO 12-17 hs.

d) *Primavera.*

El flujo del aire superficial es en abril semejante al de julio, aunque menos acentuado. Los contrastes térmicos tierra-mar comienzan a ganar importancia reforzando el flujo del aire del mar (Fig. 11). El reflujo del terral se manifiesta como vientos del sureste o sur, en el trecho del valle que va de la presa Rodríguez al centro de Tijuana (Fig. 10).

En resumen, del análisis de las líneas de flujo en el valle del río Tijuana y su vecindad, se desprende que se observa en el área, claramente, una circulación periódica del aire: los vientos de valle reforzados por la brisa del mar soplan después del mediodía, hasta el anochecer, en una dirección que tiene una componente del oeste, que puede ser oeste o noroeste. Los vientos de montaña o catabáticos prevalecen por la noche y en la mañana, siguiendo la dirección del eje del río, es decir, sureste o sur, o este. Estos vientos son más débiles que las brisas, alcanzando su mayor preponderancia en el invierno.

10. EL FLUJO DEL AIRE Y LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN TIJUANA

De acuerdo con el análisis de las líneas de flujo del aire superficial examinado en la sección anterior, pueden establecerse algunas conclusiones en cuanto al transporte de los contaminantes atmosféricos.

a) Durante la noche y en las primeras horas de la mañana, los contaminantes arrojados al aire en el área de Tijuana tienden a ser transportados hacia el noroeste de la ciudad, en dirección a San Isidro, Cal. En este periodo la estabilidad del aire restringe la dilución de los contaminantes. Poco después de que amanece aumentan drásticamente las emisiones vehiculares y las de fuentes fijas, cuando todavía el aire se encuentra estratificado y desplazándose muy lentamente hacia el noroeste. La inversión superficial es una característica casi permanente del aire en Tijuana, como se verá más adelante, por lo que la dispersión en la vertical se encuentra casi siempre restringida. Una vez que se establece el mecanismo de las brisas del oeste, después del mediodía, los con-

taminantes que viajaban hacia el noroeste convergen en el borde sur del área urbana de San Diego y poco después comienzan a ser transportados por el flujo inverso, en dirección hacia Tijuana. Como los vientos del oeste u oeste-noroeste son más intensos que el terral, el acarreo de los contaminantes se hace en forma más rápida, cuesta arriba de la cuenca, hasta llegar a la presa Rodríguez después del mediodía; las sustancias contaminantes quedan, así, represadas contra las laderas de las montañas, en las cercanías de la presa. Otra trayectoria alterna que exhibe la nube de smog es siguiendo el curso del arroyo el Alamar que tiene una dirección casi este-oeste. La nube de contaminantes proviene del área sur de San Diego, remonta primero el curso del río (en el centro de Tijuana, donde está la canalización) y recibe ahí la contribución de las fuentes de polución de Tijuana, para seguir después un brazo hacia la presa, y el otro por la cañada del arroyo Alamar, hacia el este, hasta llegar, rodeando por el oriente el cerro Colorado, a la zona de la presa Rodríguez. Una vez que anochece, la brisa-viento del valle se debilita hasta que, cerca de la medianoche, el flujo torna en reversa y la nube de impurezas vuelve a ser transportada lentamente hacia el centro de Tijuana y más allá de la línea fronteriza.

11. VARIACIÓN DIURNA DE LA INTENSIDAD DEL VIENTO EN TIJUANA

En la tabla 4 se muestra, en forma un poco más detallada que en la tabla 2c, la variación diurna de la intensidad del viento en dos meses representativos del año. En la estación fría la variación diurna del viento es poco marcada, y después del mediodía la intensidad del viento sube ligeramente respecto del periodo nocturno. En cambio, durante el verano la variación de la intensidad del viento es más acentuada, siendo el periodo de mayor turbulencia entre las 11 y las 22 horas, mientras que por la noche son muy frecuentes las condiciones de viento muy débil o en calma.

12. EL PERFIL TÉRMICO VERTICAL DEL AIRE EN TIJUANA

En las secciones anteriores se describieron los movimientos del aire en el sentido horizontal,

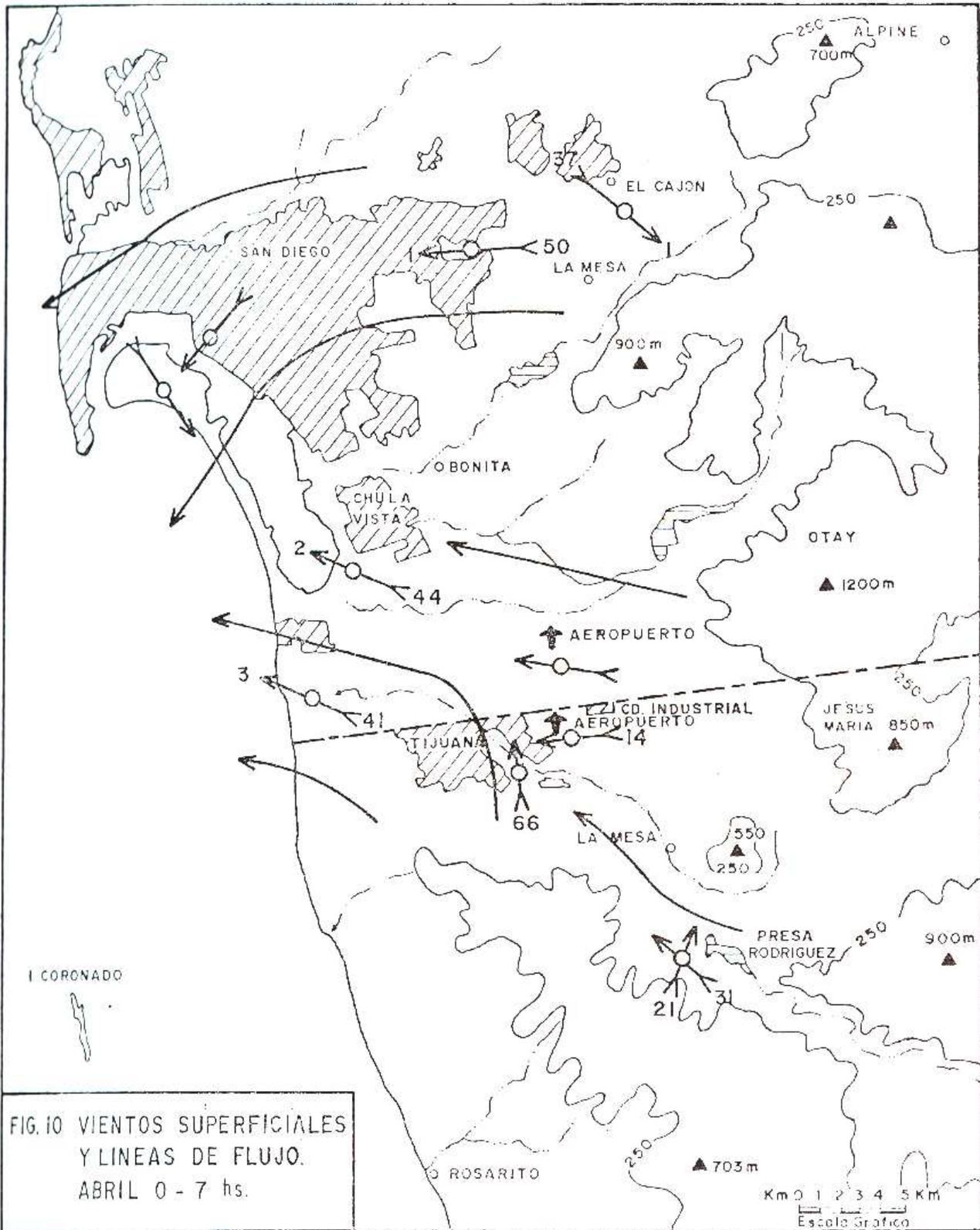


FIG. 10 VIENTOS SUPERFICIALES Y LINEAS DE FLUJO. ABRIL 0 - 7 hs.

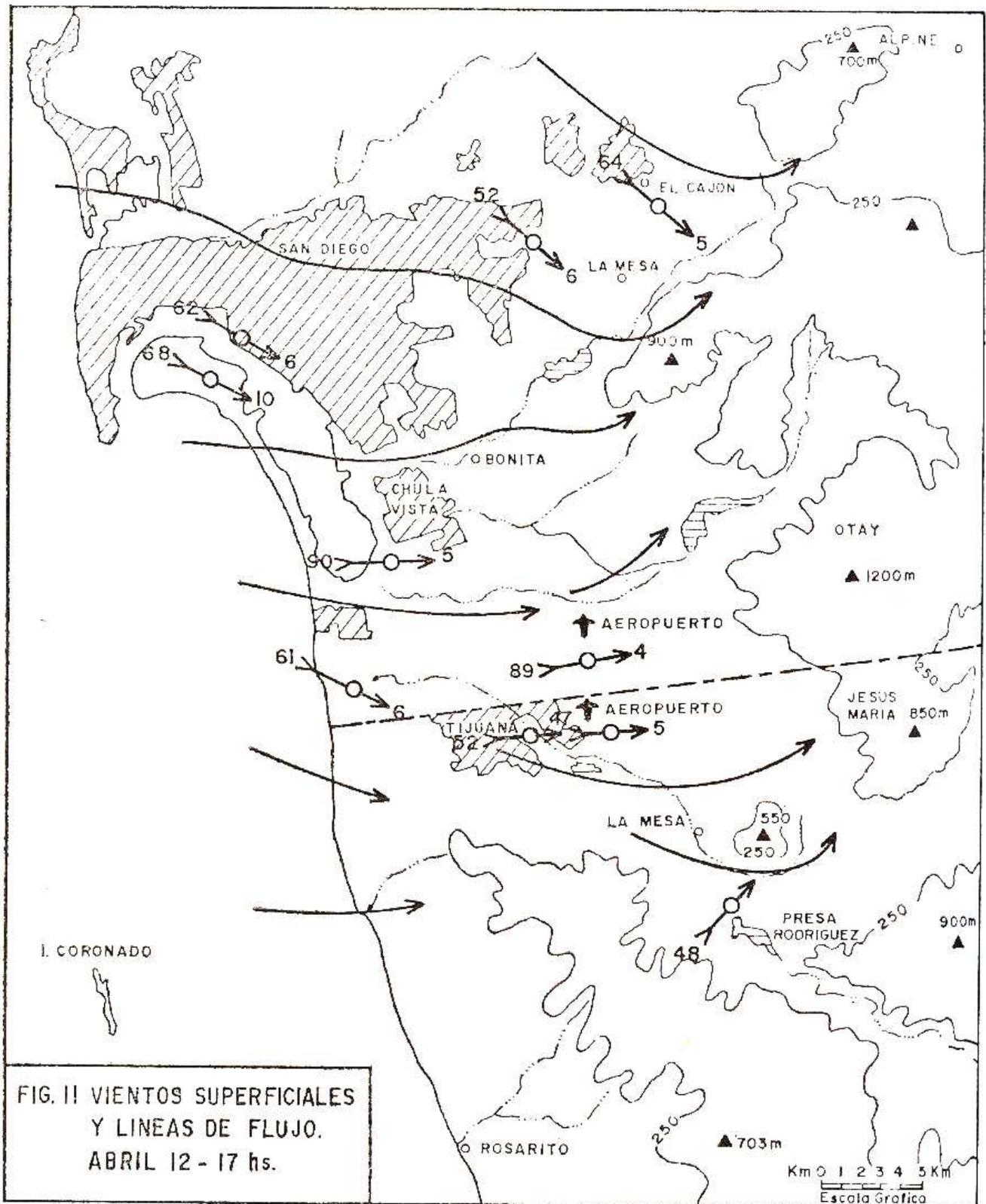


FIG. II VIENTOS SUPERFICIALES Y LINEAS DE FLUJO. ABRIL 12 - 17 hs.

Tabla 4.

VARIACION DIURNA DE LA INTENSIDAD DEL VIENTO (m/s)
Y FRECUENCIA DE CALMAS (AÑO 1975) EN EL AEROPUERTO
DE TIJUANA

		2 - 4	5 - 7	8 - 10	11 - 13	14 - 16	17 - 19	20-22	23 -01
E N	Int. m/s	4	4	4	5	5	5	5	4
	o/o calmas	45	34	33	55	20	11	55	38
J U	Int. m/s	0	2	4	5	6	5	4	2
	o/o calmas	100	95	86	19	0	0	32	95

		2 - 4	5 - 7	8 - 10	11 - 13	14 - 16	17 - 19	20 - 22	23 - 01
E N	Int. m/s	4	4	4	5	5	5	5	4
	o/o calmas	45	34	33	55	20	11	55	38
J U	Int. m/s	0	2	4	5	6	5	4	2
	o/o calmas	100	95	86	19	0	0	32	95

en el área en estudio; en seguida examinaremos las características del aire en cuanto a su capacidad de dilución en la vertical. Esta capacidad de dilución es una función del gradiente térmico vertical en la capa planetaria (el primer km). En general, el aire se encuentra estratificado por la noche, debido al enfriamiento del suelo, por radiación hacia el espacio. En estas condiciones se forman las inversiones superficiales de temperatura. El escurrimiento del aire frío, nocturno, hacia las partes bajas de la cuenca del río Tijuana, refuerza la inversión superficial. Una vez que el suelo comienza a calentarse después de la salida del Sol, la temperatura del aire superficial se eleva gradualmente hasta que la inversión desaparece o se "quema" poco antes del mediodía. A estas horas del mediodía prevalecen condiciones de aire turbulento, al establecerse un gradiente cercano al adiabático seco. Los contaminantes que se emitan al aire a estas horas se diluyen, así, en una capa cuya profundidad depende de la máxima temperatura que se alcanza en la superficie. Es la llamada "máxima capa de mezclado".

Para el análisis de la estabilidad atmosférica en Tijuana se han utilizado los datos de radio-sondeo de la estación North Island, en San Diego, distante unos 20 km de Tijuana.

En la tabla 5 se muestra la frecuencia mensual de las inversiones cuya base se encuentra abajo de los 700 m. Las inversiones superficiales tienen frecuencia mayor durante la estación fría. Como era de esperarse, son más frecuentes por la mañana que al terminar la tarde (a las 7 p.m.). En cambio, las inversiones a 500 y 700 m son algo más frecuentes en el verano. La mayor incidencia de inversiones superficiales en invierno señala que es en esta época cuando se presentan, en general, las condiciones menos favorables para la dispersión de contaminantes en Tijuana. Ya desde el mes de abril se reduce considerablemente la incidencia de inversiones, permaneciendo esta condición hasta casi el fin del verano, al terminar agosto. La persistencia de las brisas del oeste, durante gran parte del día, y la relativa ausencia de inversiones ayuda a que sea en la estación calurosa cuando más enérgicamente se realiza la difusión y el transporte de contaminantes atmosféricos en el valle de Tijuana. Sin embargo, la elevada frecuencia de las inversiones cuya

base se encuentra entre los 500 y 700 m, en el verano (tabla 5), indica que la dilución de las impurezas no puede penetrar más allá de estos niveles. Ya en septiembre comienza a ser predominante el enfriamiento de las capas de aire superficial, aumentando, consecuentemente, las inversiones.

13. LA PROFUNDIDAD DE LA CAPA DE MEZCLADO

I. Método Indirecto

En las figuras 12 a 15 aparecen los sondeos medios de la atmósfera correspondiente a San Diego, para los meses representativos de las 4 estaciones del año.

En estos diagramas se ha trazado también la altura máxima que, en promedio, alcanza la capa de mezclado en el área en estudio. Esto se ha hecho utilizando las temperaturas medias máximas observadas en Tijuana, en los meses de enero, abril, julio y octubre, suponiendo que el gradiente térmico vertical a esas horas es adiabático en la capa planetaria. Lo que primero se advierte en estas figuras es la marcada estabilidad del aire superficial que prevalece durante todo el año en el área en estudio, por la mañana.

a) *Enero*. En el invierno la capa de mezclado alcanza su mínima profundidad que es, en promedio, de 540 m. La diferencia térmica entre la base y la cima de la inversión es de unos 50°C (Fig. 12). El viento resultante dentro de la inversión es débil, con una componente del este (terral), mientras que en los niveles superiores se intensifica y gira hacia el noroeste.

b) *Abril*. El sondeo representativo de la primavera (Fig. 13) muestra que, en promedio, la atmósfera es menos estable debido quizá al efecto del paso de los frentes fríos que acarrear las lluvias. La capa de mezclado se hace más profunda y alcanza en promedio hasta los 2 200 m. En esta época los factores meteorológicos concurren fomentando la dilución de contaminantes ya que, además de aumentar la capacidad de dilución al incrementarse la capa de mezcla, las lluvias características de finales del invierno y principio de la primavera lavan o disuelven algunos de los contaminantes só-

Tabla 5.

FRECUENCIA CUMULATIVA MENSUAL DE LAS INVERSIONES
 CON BASE ABAJO DE 700 y 500 m. Y EN LA SUPERFICIE EN
 SAN DIEGO (NORTH ISLAND) A LAS 7 a.m. y 7 p.m.
 (U.S.W.B. T.P. 54, 1965)

Altura de la base (m)	E		F		M		A		M		J	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
700	66	51	68	43	49	46	28	42	43	57	46	64
500	65	45	64	41	44	39	19	31	27	40	28	43
Sup.	57	23	56	19	27	15	2	1	3	2	1	2

Altura de la base (m)	J		A		S		O		N		D	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
700	78	93	79	93	73	84	71	78	71	63	73	53
500	47	76	56	80	54	69	56	68	68	53	69	51
Sup.	3	5	3	2	15	18	24	17	48	26	61	31

1—7 a.m.

2—7 p.m.

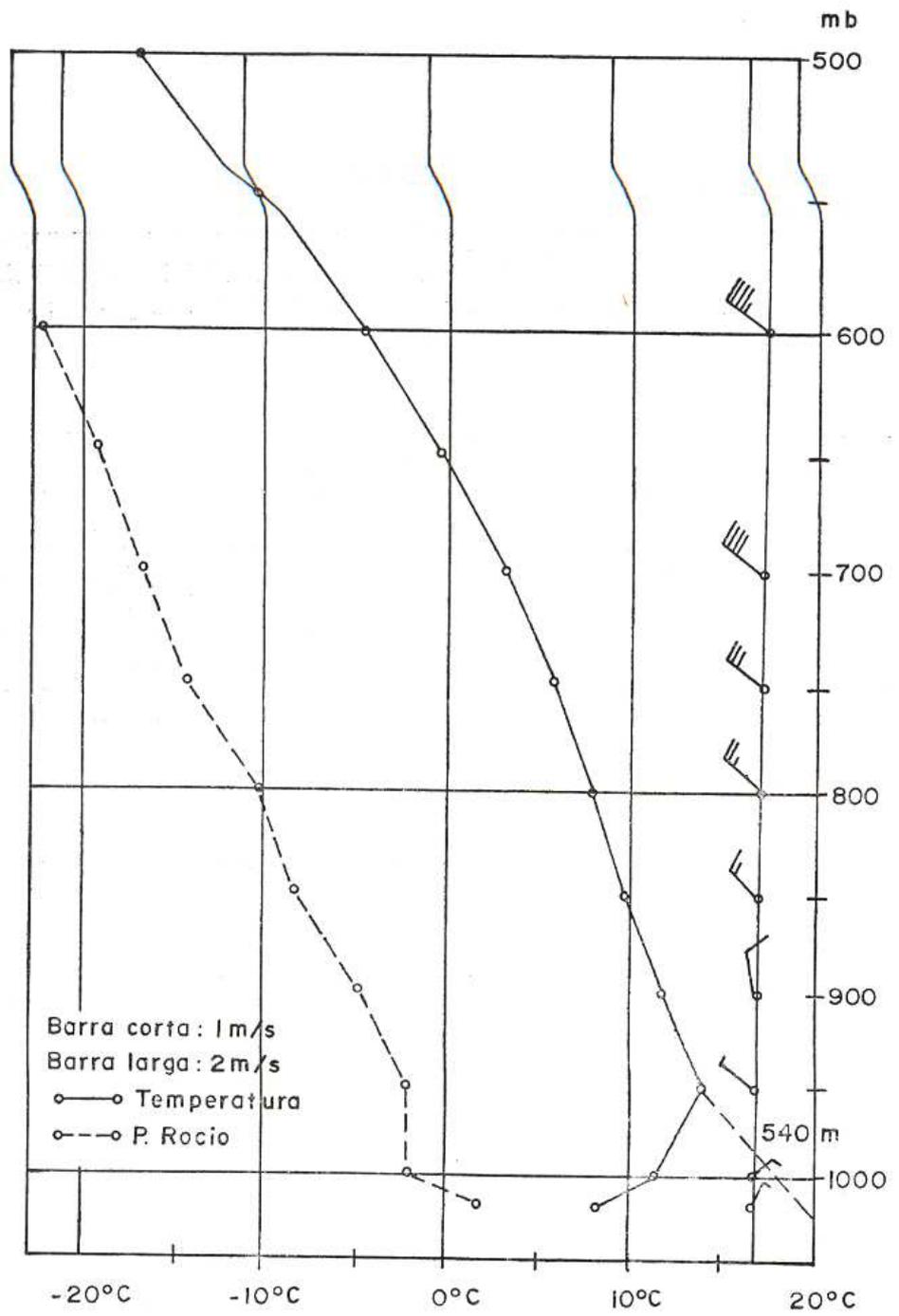


FIG. 12 SONDEO MEDIO DE SAN DIEGO EN ENERO.

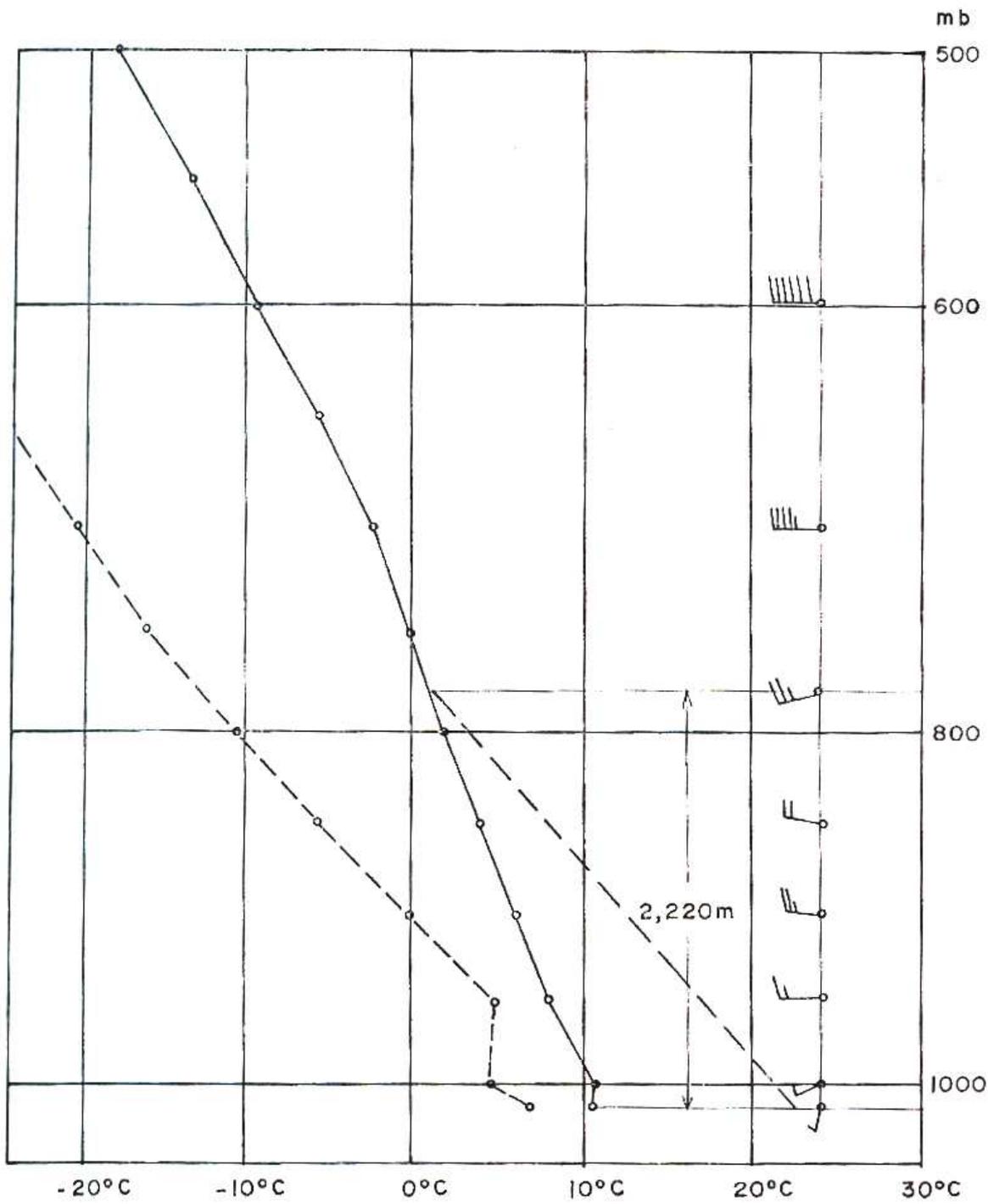


FIG. 13. SONDEO MEDIO DE SAN DIEGO EN ABRIL .

lidos y gaseosos (efecto de *wash-out* y *rain-out*). Los vientos vigorosos del sur, que generalmente están asociados con cada paso frontal (tabla 3), ayudan también a acarrear hacia el norte la nube de contaminantes.

c) *Julio*. Aun cuando el calentamiento máximo del suelo ocurre en el verano, el aire del mar es relativamente fresco debido a la corriente fría de California. El aire es, por tanto, bastante estable por la noche y en la mañana. Al alcanzar la temperatura, después del mediodía, su máximo valor, la capa de mezcla resultante llega a tener una profundidad de 800 m solamente (Fig. 14), ya que la inversión elevada persiste durante todo el tiempo. Los vientos dentro de la capa de mezcla son entonces débiles y tienen por la mañana una componente del sur (terral) (Fig. 14).

d) *Octubre*. En el otoño comienzan a aparecer nuevamente las inversiones superficiales en Tijuana. La inversión elevada del verano se debilita, lo que permite que la capa de mezclado alcance mayor profundidad (1 200 m. Fig. 15). Los vientos dentro de la capa de mezcla son débiles y con dirección del norte o noreste (terral), por la mañana.

En resumen, se puede concluir del examen del perfil térmico vertical, en el primer kilómetro del área San Diego-Tijuana, que la capa planetaria es predominantemente estable durante gran parte del año; tanto en el invierno como en el verano la capacidad de dilución de los contaminantes en la vertical es precaria. Las condiciones meteorológicas más favorables ocurren en la segunda mitad del invierno y al comenzar la primavera, cuando se profundiza la capa de mezcla; además, el efecto de lavado de la lluvia ayuda a reducir la contaminación aérea. En el verano son frecuentes sobre el área las inversiones poco elevadas, que restringen la dispersión de las impurezas más allá de los 600 m.

II. *El método directo de medición de la capa de mezclado*

El método para estimar la profundidad de la capa de mezclado, que se ha descrito arriba, se basa en que el grado de mezcla turbulenta vertical está regulado por la estabilidad de la atmósfera y, así, la altura que alcanza el mez-

clado aumenta a medida que el calentamiento solar del suelo fomenta una creciente actividad convectiva en la mañana; al alcanzarse la temperatura máxima del aire superficial se alcanza también la máxima penetración de la turbulencia convectiva. La altura de la capa de mezcla estará limitada al nivel en que el aire que sube por flotación (siguiendo un proceso adiabático) adquiere la temperatura del aire circundante, obtenida por la observación del radiosonda.

El método anteriormente descrito adolece del inconveniente de que, para estimar el grado de dispersión se recurre a medir la estabilidad del aire y no la turbulencia de éste, según señalan Tombach y Chan (1976).

La turbulencia comienza a manifestarse cuando el gradiente térmico vertical es algo superior al adiabático (1° por cada 100 m de ascenso), y ya se vio que este gradiente adiabático se propaga hacia arriba del nivel cercano al suelo a medida que el calentamiento solar es mayor.

De acuerdo con otro concepto, el parámetro que controla la difusión es la turbulencia y no la estabilidad del aire, ya que si bien una mayor estabilidad se correlaciona con una reducción de la capacidad de mezclado, en las regiones montañosas esto no es siempre cierto.

Un instrumento que se ha desarrollado recientemente, para medir directamente el grado de turbulencia del aire, es el llamado radar acústico o sodar. La señal que se recibe en este instrumento está relacionada con la turbulencia de microescala (de unos 10 cm). La ventaja del sodar consiste en que se puede medir en forma continua la profundidad de la capa de mezclado; en cambio, con las radiosondas sólo se cuenta con dos mediciones al día, debido a su alto costo.

La Oficina del Control de la Contaminación Atmosférica del Condado de San Diego cuenta desde hace varios años con observaciones continuas de la profundidad de la capa de mezcla, por medio de un sodar. En la Fig. 16 se muestra la variación mensual de la capa de mezcla en San Diego, para el año 1976.

Dada la imprecisión del límite superior de la capa turbulenta, la altura está dada con un valor máximo y otro mínimo separados 150 m el uno del otro.

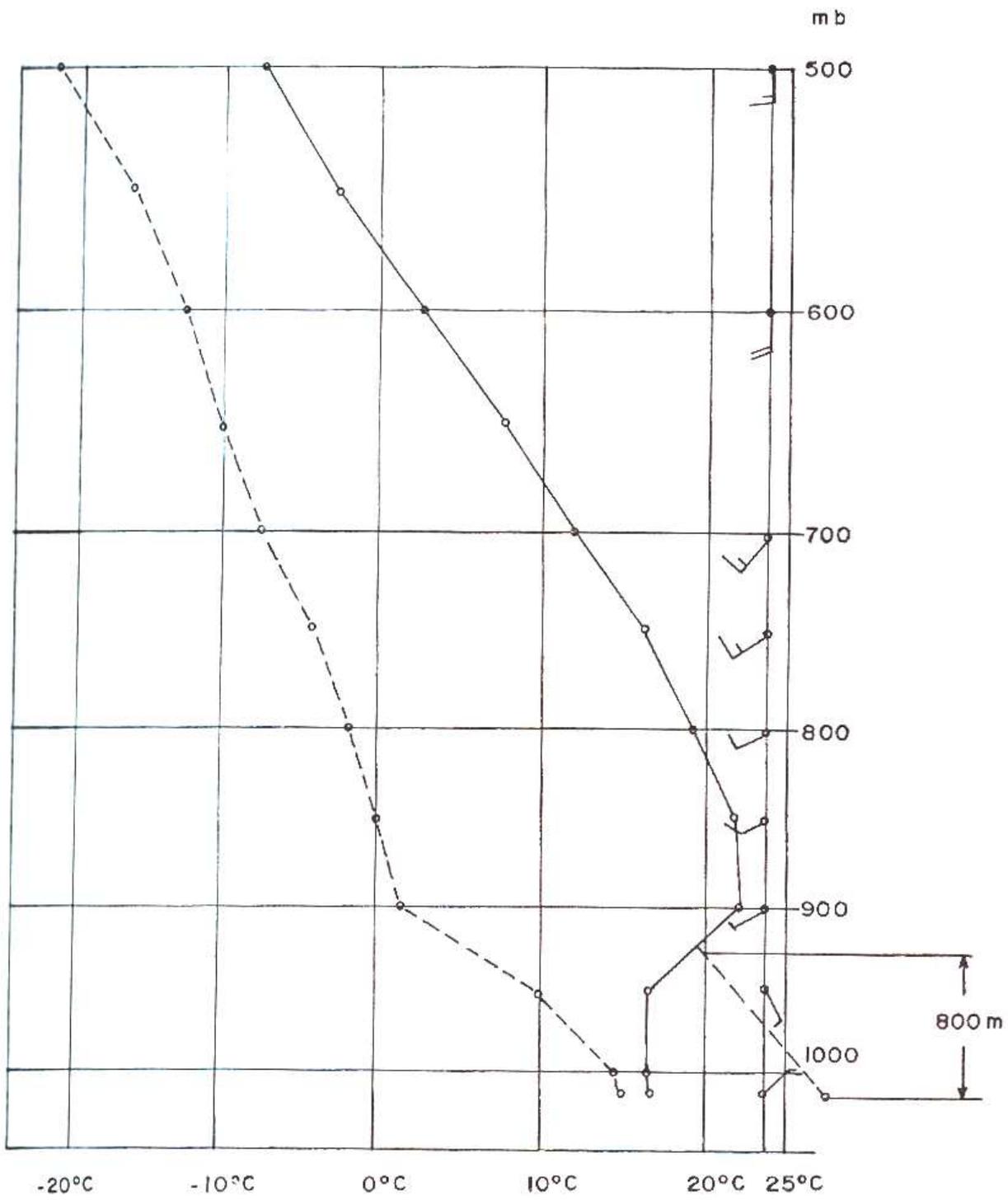


FIG. 14. SONDEO MEDIO DE SAN DIEGO EN JULIO.

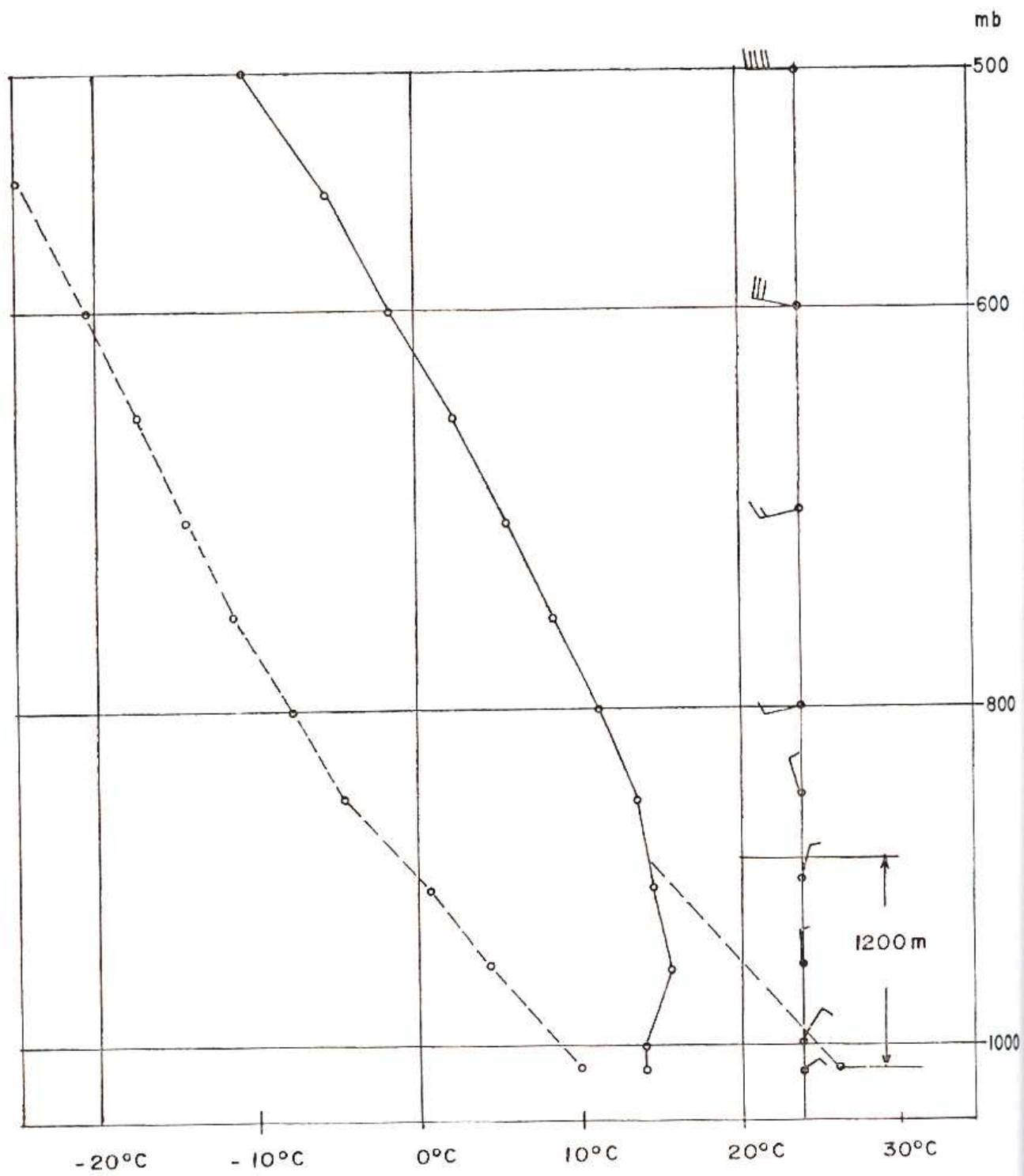
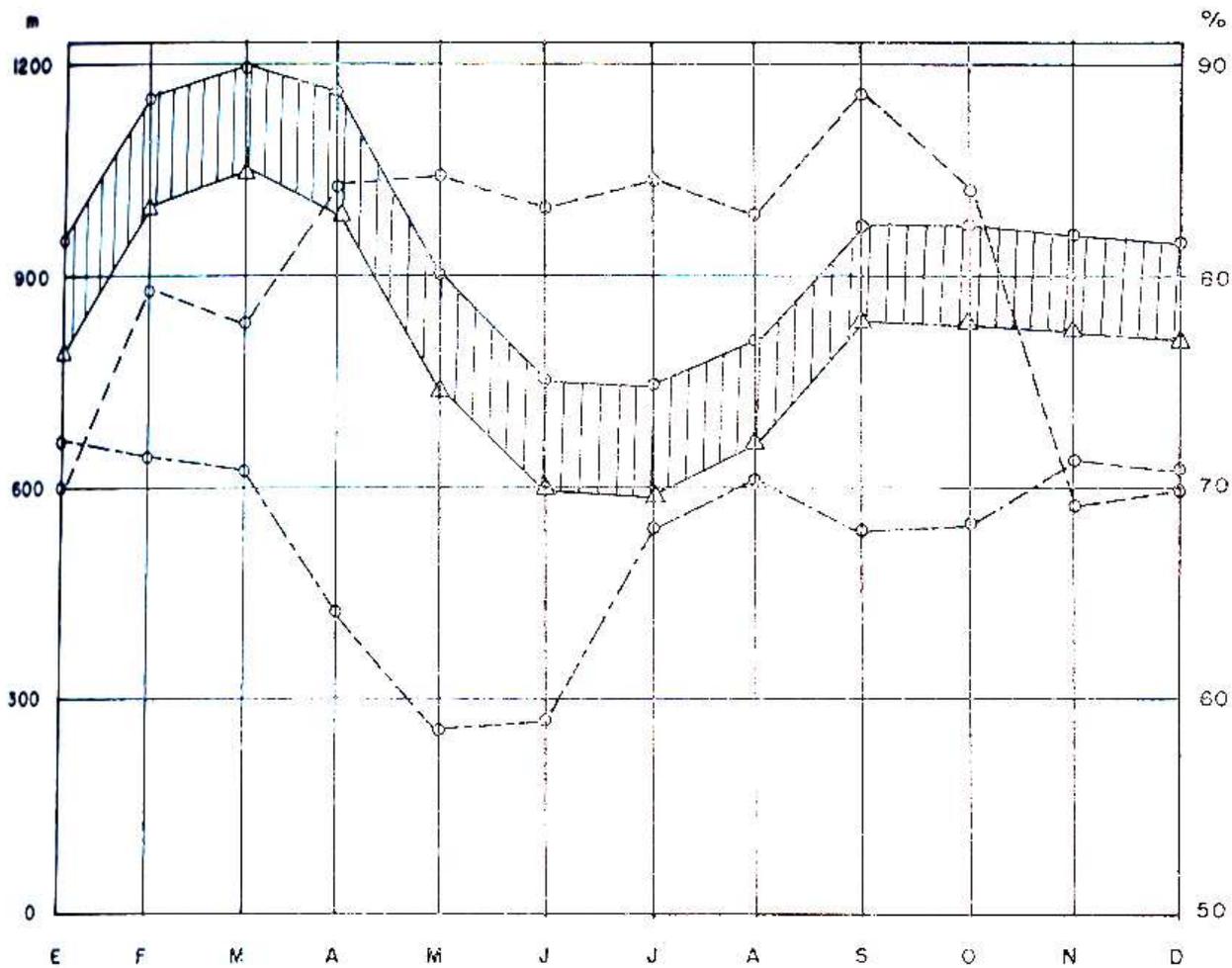


FIG. 15. SONDEO MEDIO DE SAN DIEGO EN OCTUBRE.



○—○ VALOR SUPERIOR DE LA PROF. MAXIMA DE LA CAPA DE MEZCLA.

△—△ VALOR INFERIOR DE LA PROF. MAXIMA DE LA CAPA DE MEZCLA

○---○ ALTURA MEDIA DE LA CIMA DE LA INVERSION POR LA TARDE

○-.-.-○ INSOLACION MEDIA EN % DE LA POSIBLE.

FIG. 16. VARIACION ESTACIONAL DE LA ALTURA MAXIMA DE LA CAPA DE MEZCLA, DE LA INVERSION DE TEMPERATURA Y DE LA INSOLACION EN SAN DIEGO. (SIMMONS, 1976).

La oficina de la APCD de San Diego, y el centro de Tijuana se encuentran a igual distancia del mar, aproximadamente, por lo que la altura de la capa de mezcla (ACM) observada en el sodar debe ser muy parecida a la correspondiente en Tijuana. Estos valores de la ACM del sodar de San Diego son algo inferiores a los que hemos estimado por el método indirecto. En la Fig. 16 se puede ver que la ACM es mínima en el verano (unos 700 m) y que se encuentra por debajo de la cima de la inversión vespertina, por lo que en estas condiciones la nube de impurezas queda atrapada en una capa poco profunda. En el resto del año la ACM aumenta a 900-1200 m y en los meses de invierno la cima de la inversión queda debajo de la ACM indicando que la inversión se rompe por la penetración de las celdas convectivas y, consecuentemente, la dispersión de contaminantes en la vertical aumenta considerablemente.

14. LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS EN TIJUANA

A pesar de que hasta la fecha no se ha muestreado en forma sistemática el aire en

Tijuana, la contaminación del aire que sufre la ciudad es evidente, por la alteración que ha sufrido la transparencia del aire. A las emisiones de gases y partículas de las fuentes (fijas y móviles) propias de Tijuana, a ciertas horas del día y acarreadas por la brisa, se suman los contaminantes que provienen del área metropolitana de San Diego.

Por medio de la red de muestreo (de 8 estaciones) que desde hace varios años funciona en el área metropolitana de San Diego y su vecindad, se ha podido comprobar que el principal contaminante ahí lo constituyen los oxidantes (medidos por el O_3). En la tabla 6 aparecen algunos datos de los principales contaminantes, medidos en 1977, en dos estaciones cercanas a Tijuana, por el lado norte: Chulavista, que se encuentra cerca de la costa y el aeropuerto de Brown, a unos 12 Km tierra adentro y directamente frente al aeropuerto de Tijuana.

En la tabla se advierte que la contaminación por oxidantes aumenta a medida que aumenta la distancia a la costa (69 días en Brown Field, contra sólo 49 días en Chulavista).

Tabla 6.
NIVELES DE CONCENTRACION DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS EN EL BORDE SUR DEL AREA URBANA DE SAN DIEGO EN 1977 (SAN DIEGO, AIR POLLUTION QUART 1977)

	Partículas Suspensas		Ozono	Ozono	SO_2	SO_2
	Días en que se excedió 100 $\mu g/m^3$	$\mu g/m^3$ máx. 24 hs.	máx. hora (p.p.m.)	Días en que se excedió la norma *	máx. hora (p.p.m.)	Días en que se excedió la norma.
Chulavista	2	100	0.210	49	0.070	0
Brown Field	0	110	0.180	69	0	0

* Norma Federal de E.U. 0.060 ppm (horario).

El contaminante que ocupa el segundo lugar en importancia es el polvo en suspensión el cual muestra también, como era de esperarse, un aumento en la dirección de tierra (tabla 6). El bióxido de azufre que en otras

atmósferas urbanas, como en la ciudad de México, es importante, en el caso del área Tijuana-San Diego ocupa un lugar muy secundario (tabla 6).

Tabla 7.

VALORES MAXIMOS Y PROMEDIO
DE PARTICULAS TOTALES EN SUS-
PENSION (Pts) EN DOS ESTACIONES
EN TIJUANA EN 1976.
(en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) (Márquez, 1977)

MES	PTS (MAX)	PTS (PROM)
May	293	207
Jun	426	252
Jul	228	156
Ago	336	197

No siendo Tijuana una ciudad industrial, las principales fuentes de contaminación son, por una parte, los vehículos automotores responsables de la atmósfera predominantemente oxidante y, por otra, las emisiones de humos de algunas fábricas como fundiciones, tabiqueras, quema de basura a cielo abierto, polvo levantado por la actividad vehicular en calles sin pavimento, etc.

Los únicos datos de muestreo con que se cuenta son los relativos al polvo total en suspensión, publicados por Márquez (1977), que revelan que este contaminante adquiere valores más altos que en el área vecina de San

Diego, según se aprecia al comparar las tablas 6 y 7. Los valores promedio de PTS observados en Tijuana son comparables a los que se registran en la zona oriente de la ciudad de México, aunque no tan elevados como los correspondientes a Ciudad Nezahualcóyotl.

Como consecuencia de la carga creciente de contaminantes en el aire de la ciudad de Tijuana comienza a observarse un decrecimiento de la visibilidad en el verano, a las horas en que usualmente la dilución del aire es mayor, es decir, después del mediodía, según se puede apreciar en la tabla 8.

Tabla 8.
VARIACION DIURNA DE LA VISIBILIDAD (EN MILLAS)
EN EL AEROPUERTO DE TIJUANA EN 1978.

Periodo (hrs)	1-3	4-6	7-9	10-12	13-15	16-18	19-21	22-24
Enero	12	11	10	9	10	11	12	12
Julio	11	11	11	9	6	4	5	7

Entre las 13 y las 18 horas la visibilidad decreció, en promedio, en el aeropuerto, a sólo 4 millas en julio. La abundante insolación en estos meses secos del verano asegura la reacción fotoquímica de los gases de combustión que emiten los vehículos de la zona San Diego-Tijuana, produciéndose la atmósfera oxidante de la capa marítima, característica de las áreas urbanas del sur de California, que ha sido estudiada por diversos autores (ver, p. ej. Neiburger, *et al*, 1961; Edinger, 1963).

Según Edinger (1963) este tipo de capa marítima rematada por una inversión es la de mayor potencial contaminante ya que, a medida que se calienta se vuelve más rica en polutantes. Así, las áreas de Tijuana potencialmente más afectadas por la contaminación son las que se encuentran a cierta altura sobre el fondo del valle del río Tijuana, que corresponden al nivel de la base de la inversión térmica.

15. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se examinan los principales factores meteorológicos relacionados con la contaminación atmosférica en el valle de Tijuana. Por su cercanía con el mar, el clima de Tijuana es de carácter marítimo. La capa de aire fresco marítimo que prevalece durante gran parte del año está limitada en su parte superior por una inversión de temperatura que restringe considerablemente la dilución de los contaminantes en el sentido vertical. La época del año más favorable para la dilución de contaminantes ocurre al final del invierno y principios de la primavera, cuando los sistemas frontales productores de las lluvias visitan el área en estudio. Tanto los vientos enérgicos que acompañan a estas perturbaciones, como el efecto de "lavado" de la lluvia fomentan la reducción de los niveles de contaminación.

En el área en estudio se observan los vientos catabáticos que descienden (con una componente del este o del sur) de las partes altas

de la cuenca, en dirección hacia el mar, durante la noche y las primeras horas de la mañana. Después del mediodía se observan los vientos de valle que, reforzados por la brisa marina y el gradiente general de presión, son más enérgicos (sobre todo en el verano) que los vientos nocturnos. Estos vientos de valle tienen una dirección del noroeste al sureste, o del oeste, es decir, cuesta arriba de la cuenca del río Tijuana y, aunque ocurren a la hora de mayor calentamiento solar (por tanto de mayor turbulencia) no son suficientemente enérgicos para acarricar y diluir los contaminantes locales y, en cambio, favorecen la inportación de los contaminantes originados más allá de la línea fronteriza, los cuales se canalizan cuesta arriba del valle del río.

El muestreo del aire, que desde hace algún tiempo se lleva a cabo en estaciones al sur de San Diego y cercanas a la línea fronteriza, demuestra que los principales contaminantes en la cuenca aérea de Tijuana son los oxidantes y el polvo en suspensión.

Aun cuando el ritmo de inyección de contaminantes todavía no excede la capacidad natural de dilución que tiene la capa planetaria en el área en estudio, es probable que con el acelerado crecimiento de la ciudad se llegue a alcanzar un deterioro indeseable de la calidad del aire en Tijuana que ya es, en la actualidad, la cuarta ciudad del país, con un crecimiento de 68% en los últimos 8 años (S.I.N., 1979). En la actualidad se observa ya un deterioro de la transparencia del aire en Tijuana (ver fotos). La nueva zona industrial que comienza a desarrollarse en el extremo noreste de la ciudad se encuentra, afortunadamente, bien localizada respecto a los vientos dominantes, ya que las impurezas lanzadas al aire ahí serán acarreadas, la mayor parte del tiempo, hacia fuera del área urbana.

La red de estaciones tanto meteorológicas como de muestreo de contaminantes, que la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente tiene proyectado instalar próximamente, permitirá mejor conocimiento de la climatología de difusión en el área de Tijuana.

BIBLIOGRAFÍA

- Close, D., D. Gilbert y G. Peterson** (ed) (1970) *The Climates of San Diego Country*. Univ. of California Agric. Extension Service in cooperation with ESSA and U.S. W.B.
- De Marrais, G., A. Holzworth y Ch. Hosler** (1965) "Meteorological Summaries Pertinent to Atmospheric Transport and Dispersion over Southern California". U.S. Weather Bureau, Wash. *Tech Paper No. 54*.
- Edinger, J.** (1963) "Modification of the Marine Layer over Coastal Southern California". *Fourm. Appl. Meteor.* Vol. 2 706-712.
- Ellison, N.** (1978) *San Diego's Air Pollution, 1977*. County of San Diego, Air Pollution Control District. 9150 Chesapeake Dr., San Diego, Cal.
- Neiburger, M., D. Johnson y C. Chien** (1961) "Studies of the Structure of the Atmosphere over Eastern Pacific ocean" Univ. of California *Publications in Meteorology*. Vol. 1, Noñ 1é 1-53.
- Simmons, W.** (1976) *Annual Report, Calendar Year 1976; Air Pollution Quarterly*, San Diego County, Air Pollution Control District. Vol. 6, No. 1. 9150 Chesapeake Dr. San Diego, Cal.
- S.I.N.** (1979) "El Crecimiento de las Ciudades Fronterizas". Comentario en *Excelsior*, 3 de Feb. de 1979.