

PATRONES DE FLUJO DE AIRE SUPERFICIAL Y SU RELACIÓN CON EL TRANSPORTE DE CONTAMINANTES EN EL VALLE DE MÉXICO

Ernesto Jáuregui Ostos*

Elda Luyando**

Resumen

Se utilizaron datos de 11 estaciones anemométricas para analizar e interpretar, para diversas horas del día, los patrones de flujo del aire superficial para el área urbana de la ciudad de México y su entorno en la planicie de la cuenca de México. El propósito del análisis es determinar la influencia de los componentes locales y regionales del viento observado y de este modo evaluar para diversos periodos del día la difusión y transporte de contaminantes atmosféricos. Los vientos catabáticos nocturnos y de las primeras horas de la mañana combinados con la circulación centrípeta inducida por la isla de calor tienden a contener la dispersión lateral de los polutantes. Además, la estabilidad de la capa planetaria en dicho periodo restringe la dispersión en la vertical, lo cual explica el máximo de contaminantes primarios en la mañana. Después del mediodía, al iniciarse la mezcla turbulenta en la vertical culmina el ozono como resultado de la insolación, el cual es transportado por el viento regional hacia el sur y poniente.

Palabras clave: Patrones de flujo del aire, climatología urbana, contaminación atmosférica.

Summary

Based on 11 urban/suburban/rural surface wind stations an analysis of surface wind flow patterns is attempted for Mexico City and its surrounding rural area. The observed wind patterns in the valley are the result of interaction between regional, slope and heat-island-induced winds according to the hour of the day. During the night and early morning the "rural" winds and the downslope drainage of cool air combine to bring about a convergent flow toward the city center. During this period (when vehicle emissions reach a peak) lateral and vertical dispersion of primary pollutants are restricted. Around noon, an unstable layer is established and the regional winds come down to the ground and transport and disperse pollutants toward the south of the city and beyond.

Key words: Urban air flow patterns, air pollution, urban climatology.

* Centro de Ciencias de la Atmósfera, Circuito Exterior, Universidad Nacional Autónoma de México, 04510 México., D. F.

** Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F.

1. Introducción

Ubicada a una altura de 2 250 m la cuenca de México, de unos 80 km de largo en la dirección N-S y de unos 50 km en el sentido E-W, se encuentra rodeada de altas montañas especialmente hacia el SE, S y Poniente mientras que por el N y NE las elevaciones son relativamente menores.

La elevada altura y la ubicación todavía en el trópico imprimen al clima del valle rasgos tanto tropicales, como es la regularidad de las lluvias así como de las latitudes templadas, como es evidente en la estación seca con la invasión de masas de aire polar.

Ya en una escala local, las montañas que circundan el valle determinan variaciones de algunos factores del clima tales como la lluvia y la temperatura, así como la circulación superficial de los vientos.

El flujo de aire en el valle está condicionado tanto por influencias térmicas como por factores dinámicos.

En este trabajo se intentará describir e interpretar las variaciones diurnas y estacionales de los patrones de flujo del aire que se observan en la cuenca de México, especialmente en la porción Sur donde se localiza la ciudad de México, y su relación con niveles de concentración de algunos contaminantes atmosféricos, tales como el SO₂ y los polvos suspendidos.

2. Los datos

Se han utilizado los datos meteorológicos y de calidad de aire de la red de muestreo (manual y automático) que mantiene la SEDUE, así como los datos del radiosondeo y vientos del observatorio del Aeropuerto Internacional "Benito Juárez" de la ciudad de México perteneciente al Servicio Meteorológico Nacional.

3. Antecedentes

En uno de los primeros trabajos que sobre el clima de la ciudad de México se han escrito, el climatólogo Bárcena (1893), al referirse a la circulación de los vientos del valle, dice que éstos "soplan predominantemente del NW sobre todo en otoño e invierno, siendo estos vientos húmedos y fríos por lo que la presión barométrica sube cuando soplan de dicha dirección". Bárcena prosigue diciendo que la intensidad de los vientos (observada desde el Observatorio Central ubicado en aquellos años en la azotea del Palacio Nacional) en el valle no sobrepasan en promedio 1 m/s, aunque señala que los vientos arrafagados soplan en las tardes de la primavera y después, ya en el verano, precediendo o acompañando a las tempestades".

Al referirse a los vientos a la altura de las nubes, el mismo autor apunta con acierto que la dirección dominante de las nubes es del SW (en las secas) pero en la estación lluviosa proceden del primer cuadrante (del NE).

La descripción anterior de Bárcena sobre los vientos del centro del valle de hace un siglo es clara y continúa siendo vigente ya que, tanto los sistemas atmosféricos de macro-escala (o sinópticos) y el entorno orográfico, permanecen invariables.

Ya en el actual siglo, Jáuregui (1965) hace una descripción breve de los vientos superficiales y de altura en el valle en el contexto del bioclima de la cuenca de México.

4. El viento regional

El régimen de vientos de un lugar como el área en estudio es el resultado de dos componentes:

- a) sistemas atmosféricos de macro escala (o regionales);
- b) el flujo del aire impuesto por la topografía.

a) Los sistemas de macro-escala

Como ya se mencionó (sección 1) los sistemas atmosféricos que visitan estacionalmente el área de estudio son:

- La corriente de vientos del Oeste durante el semestre centrado en el invierno. Las masas de aire frío (continental) asociadas a esta corriente ocasionan además de un descenso de temperatura, algunas precipitaciones, siendo la circulación de los vientos entonces predominantemente del NW o del SW. Cuando el paso del frente no trae humedad (sobre todo al final de las secas), los vientos turbulentos levantan el polvo dando origen a un tipo de tolvanera que se caracteriza por ser generalizada en amplias áreas del valle que incluyen ahora las laderas deforestadas del Sur (véase Jáuregui, 1989). Estos vientos invernales son, en general, más intensos que los alisios de la estación húmeda.
- Los vientos alisios.

La otra gran corriente que invade el área de estudio es la húmeda de los alisios que imprime una circulación del Este. Aunque localmente muy turbulentos en la proximidad de las nubes de tormenta, como lo señala Bárcena, los alisios son en promedio menos intensos, sobre todo arriba de la capa planetaria, es decir, arriba del efecto de fricción por las montañas, que su contraparte invernal.

5. Los vientos termotopográficos

La multiplicidad de cuevas que tienen las montañas del valle originan regiones de vientos a micro y meso escala que varían espacial y temporalmente según la cantidad de radiación solar que reciban las laderas y su respectiva respuesta de acuerdo con su albedo.

A escala de todo el valle, el régimen de vientos será el resultado de la contribución de cada cañada o depresión que desciende hacia la planicie.

El modelo conceptual del régimen de vientos en el valle de un río es el propuesto por Defant (1951). Según este concepto, durante el día con el Sol dando en ambas laderas, el aire sobre ellas se calienta más que en la planicie, dando origen este calentamiento diferencial a una circulación del aire superficial cuesta arriba de las montañas, llamada vientos de valle (o anabáticos). El fenómeno opuesto durante

la noche (mayor enfriamiento en las laderas) produce escurrimiento del aire frío que confluye al fondo del valle o vientos de montaña o drenaje (catabáticos) (figura 1).

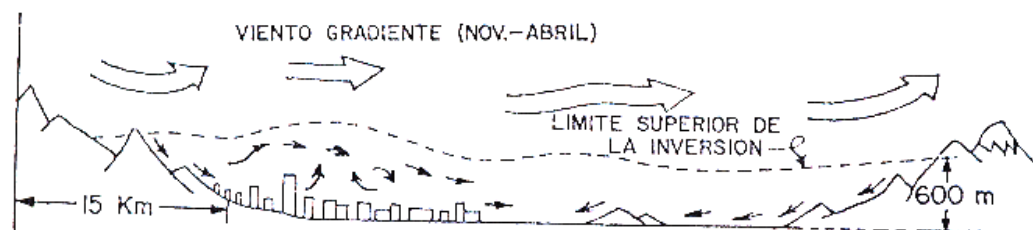


Figura 1. Esquema del flujo de aire nocturno, inversión térmica y vientos regionales en la Cuenca de México.

En la situación real de un valle que como el de México no es valle sino una cuenca, cuyo fondo es plano y casi sin pendiente y cuyas montañas presentan innumerables cañadas con diversas orientaciones, amén de otras montañas que como las serranías de Guadalupe y Santa Catarina sobresalen en medio de la planicie, hacen que el modelo de Defant parezca un tanto demasiado simplificado, lo que aparentemente es una característica necesaria de muchos modelos.

Sin embargo, como se verá después, algunas de las manifestaciones de dicho modelo están presentes en la circulación de los vientos observada en el valle de México.

Ahora bien, la circulación local, orogénica, arriba descrita, para manifestarse requiere que los llamados vientos regionales o sinópticos sean muy débiles. Esto ocurre en el área de estudio en condiciones anticiclónicas de gradiente barométrico débil uno o dos días después del paso de un frente o vaguada.

Estos días (y noches) despejados con aire casi en calma favorecen la circulación de vientos locales (de valle y montaña). En estas noches de cielos sin nubes, el enfriamiento por radiación nocturna favorece el escurrimiento del aire frío al fondo del valle produciendo una confluencia de aire frío hacia el centro de la planicie dando lugar a la formación de aire estable, estratificado, que, en condiciones extremas origina la llamada inversión del gradiente térmico vertical. En ese momento, la circulación local se encuentra desacoplada de los vientos regionales o sinópticos (como se ilustra esquemáticamente en la figura 1, que fluyen por encima de la inversión que actúa como una puerta cerrada hacia la circulación superior durante la noche y las primeras horas de la mañana.

Sin embargo, una vez que los rayos del Sol calientan el aire frío superficial, la energía turbulenta resultante favorece el descenso hasta la superficie de la cantidad de movimiento del viento regional, unas horas después del mediodía; es entonces cuando los vientos alcanzan su máxima intensidad. Al caer la tarde, el balance energético en la interfase suelo-atmósfera se vuelve otra vez negativo (es decir, el suelo pierde más calor del que recibe y como consecuencia el aire cercano al suelo se estabiliza a lo largo de la

noche y hasta el amanecer. A medida que el aire frío escurre por gravedad al fondo de la cuenca durante la noche, el gradiente térmico entre las cuevas y el centro del valle (a la misma altitud) se debilita ocasionando que el viento de montaña pierda intensidad o se estanque al final del periodo de enfriamiento nocturno. Esta condición se ilustra en la **figura 2** donde se muestra que la frecuencia de aire en calma al pie de las cuevas del poniente (Tacubaya) es menor que en el centro de la planicie (Aeropuerto) donde converge el aire que drena desde todas las direcciones. Es aquí (en el Aeropuerto) donde es mayor la profundidad (hasta 300 m) del aire frío en las mañanas del invierno, lo cual se refleja también en un mayor número de días con aire muy estable al amanecer, según se aprecia en la **tabla 1**.

Tabla 1. Frecuencia (%), intensidad y profundidad medias de inversiones superficiales observadas a las 6 AM, en el Aeropuerto Internacional "Benito Juárez" del D. F., periodo 1978, 1979 y 1981

		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Frec.	1	87	84	87	90	86	20	31	51	20	42	53	67
Inv.	2	95	88	90	85	62	34	38	42	33	45	91	88
Int.	1	4.1	3.5	3.3	2.7	3.0	1.1	0.9	0.8	1.0	2.0	2.0	2.5
°C	2	3.8	2.8	3.3	2.2	1.7	1.7	0.8	1.0	1.2	1.8	3.2	3.4
Prof.	1	3.6	2.6	2.4	2.3	2.3	1.7	1.3	1.4	1.2	2.1	2.8	2.6
(m) x 100	1	2.8	2.5	2.3	2.4	1.9	1.4	1.0	1.0	2.0	2.6	2.8	3.7

1 — promedio de días 1-15

2 — promedio de días 16-31.

En contraste con lo anterior, con la llegada de un sistema frontal o de una onda del Este, los vientos asociados a dichos sistemas predominan y la circulación local de vientos desaparece o es muy débil.

6. Patrones de circulación de los vientos superficiales en el área urbana de la ciudad de México

Las **figuras 3 a 10** muestran rosas de viento superficial para una red de 4 a 5 estaciones anemométricas que durante el año 1976 manejó la entonces Secretaría del Mejoramiento del Ambiente (ahora Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE)). Las rosas se han hecho para cuatro horas del día (6, 10, 14 y 20 horas) y comprenden cada una seis meses: el periodo seco de noviembre a abril y el de lluvias de mayo a octubre. En estas mismas figuras se han trazado las líneas de flujo del aire superficial a las cuales el vector del viento más frecuente es siempre tangente. En el extremo de las barras de frecuencia aparece, para cada dirección, la intensidad media del viento (m/s).

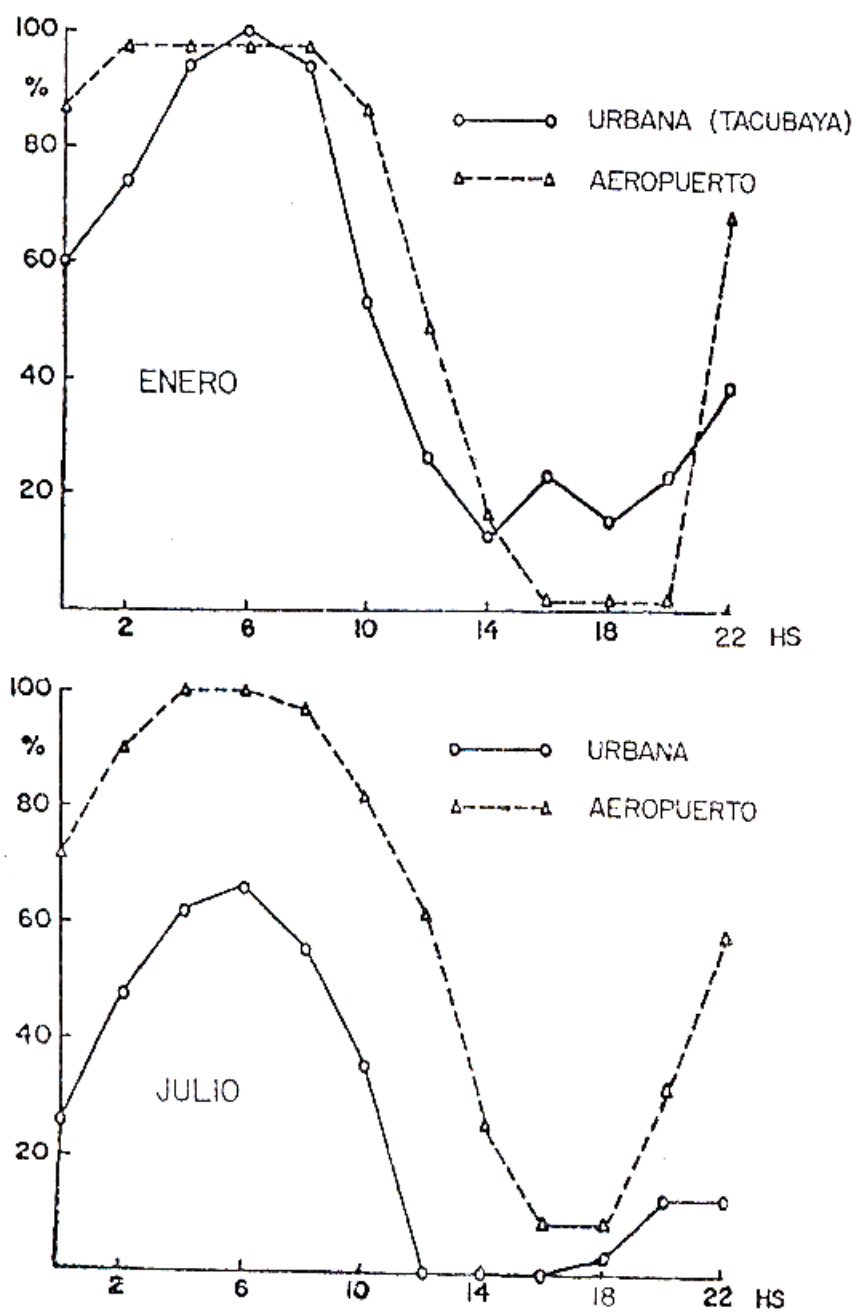


Figura 2. Frecuencia de calmas en dos sitios de la cuenca: en el piedemonte (Tacubaya) y en la planicie (Aeropuerto) en 1980.

Las estaciones anemométricas se ubican en las cuatro esquinas de la capital: Tlalnepantla al NW, Xalostoc al NE, Plateros al SW e Ixtapalapa al SE. Además, para el periodo lluvioso funcionó la estación del centro en la esquina de Insurgentes con Avenida Chapultepec. En la actualidad la red meteorológica SEDUE cuenta con 25 estaciones, aunque los registros no son continuos durante los 12 meses de los años recientes.

a) Los vientos catabáticos (figuras 3, 6, 7 y 10)

Por encontrarse las estaciones Tlalnepantla y Xalostoc no lejos de la serranía de Guadalupe, Mixcoac e Ixtapalapa cerca de las montañas del Sur y Poniente, los vientos ahí revelan la influencia de los vientos de montaña por la noche (20 hr) y al amanecer (6 hr) y soplan así del N o NE en el sector N de la ciudad y del SW, W y S en el Sur (figuras 3, 6, 7 y 10). Este patrón de circulación es tal que las líneas de flujo del aire a esas horas reflejan predominantemente una convergencia del viento hacia el centro del área urbana durante todo el año.

b) Los vientos del valle y de gradiente (figuras 5 y 9)

Como se señaló anteriormente, los vientos de valle se establecen una vez que la energía del Sol ha disipado la capa nocturna de aire estable, es decir, alrededor del mediodía. Dichos vientos tendrían en general una componente del E o NE (es decir, de la planicie hacia las montañas) o del S para las estaciones del N. Sin embargo, dichos vientos locales rara vez se manifiestan ya que, a esas horas del mediodía, el viento regional o sinóptico que se mantiene usualmente por arriba de la inversión en el periodo nocturno, desciende hasta la superficie al mediodía al destruirse la capa de aire estable.

Es por esta razón que los mapas del mediodía (figuras 5 y 9) no acusan un efecto claro de los vientos del valle (sobre todo en las secas), (figura 5), sino más bien revelan la influencia del viento regional (figura 9) que, en las lluvias son los alisios del Este.

c) Vientos de transición

Los mapas de las 10 hrs (figuras 4 y 8) son de transición entre el régimen nocturno de vientos de drenaje y los vientos regionales por lo que pueden mostrar patrones de flujo muy diverso a dicha hora.

En el caso de la estación de Tlalnepantla el viento que domina ahí todo el año es del N o NW, ya que obedece al efecto de canalización o estrechamiento del flujo aéreo ocasionado por el "punto" o paso entre montañas que se encuentra viento arriba de la estación. La presión atmosférica es predominantemente mayor hacia el N de la Serranía de Guadalupe que sobre la capital, debido al calentamiento del aire originado por la "isla de calor".

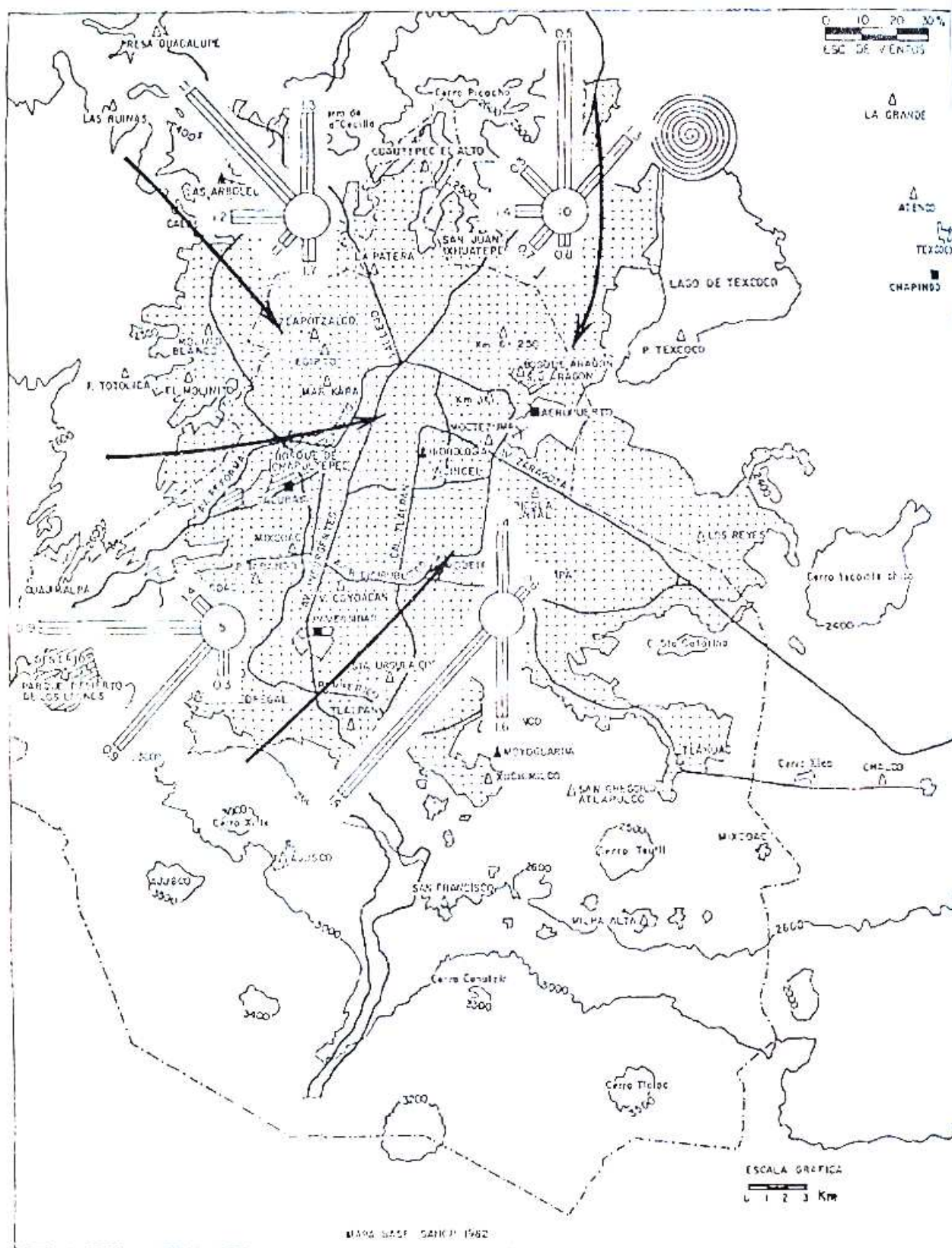


Figura 3. Rosas del viento de superficie (noviembre-abril, 1976). Calmas $< 0.2 \text{ m/s}$ 6 hr.

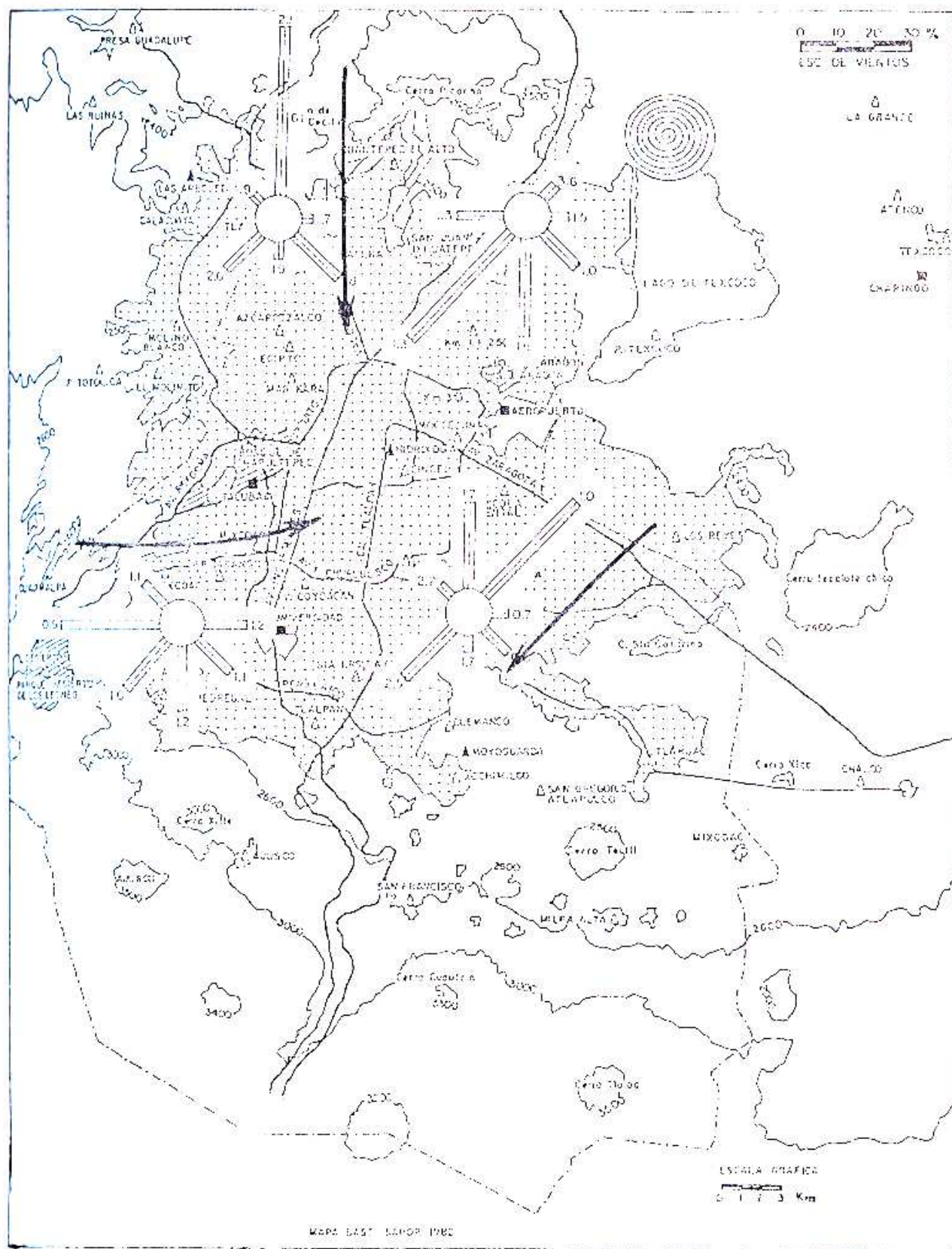


Figura 4. Rosas del viento de superficie (noviembre-abril, 1976). Calmas <0.2 m/s, 10 hr.

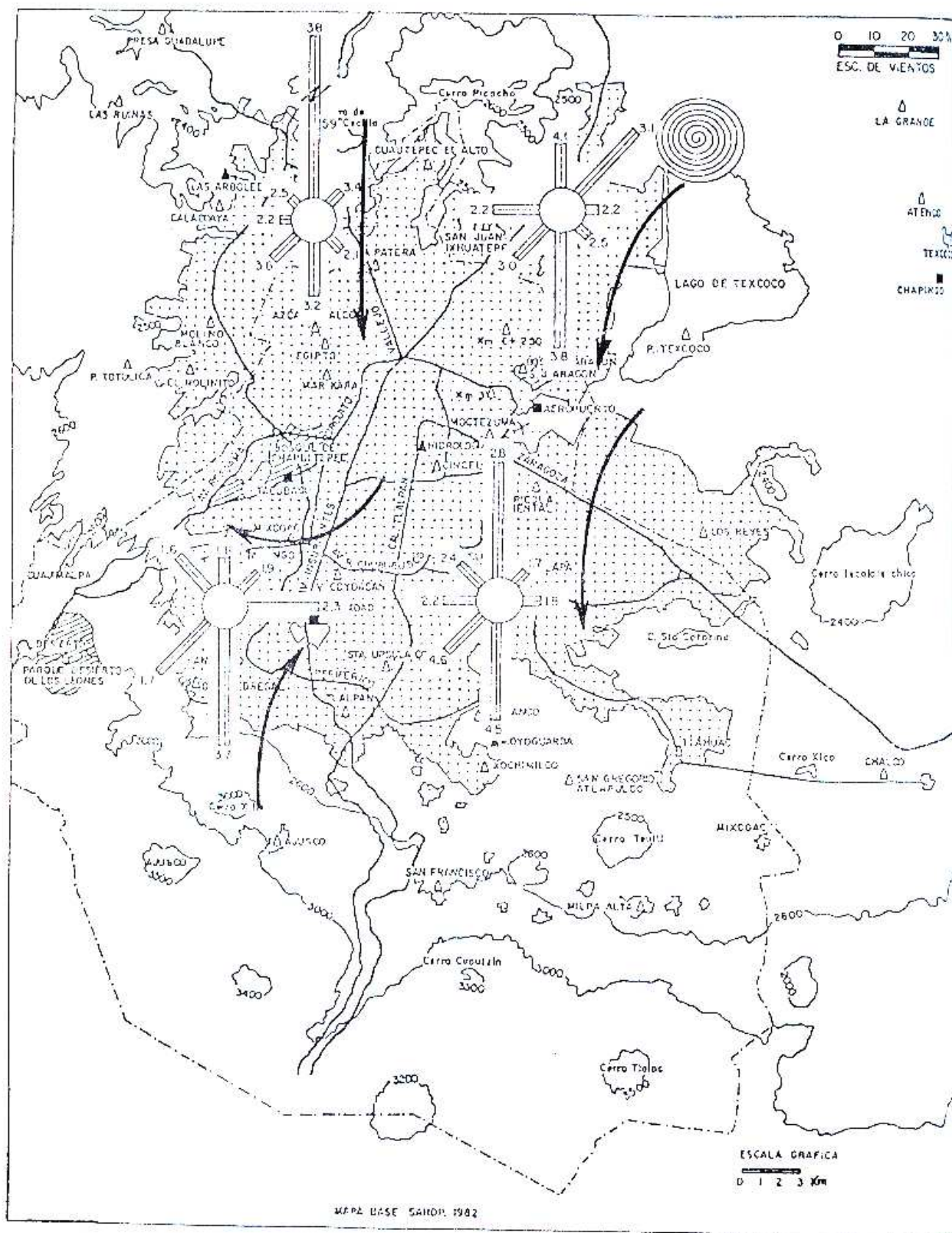


Figura 5. Rosas del viento de superficie (noviembre-abril, 1976). Calmas <0.2 m/s, 14 hr.

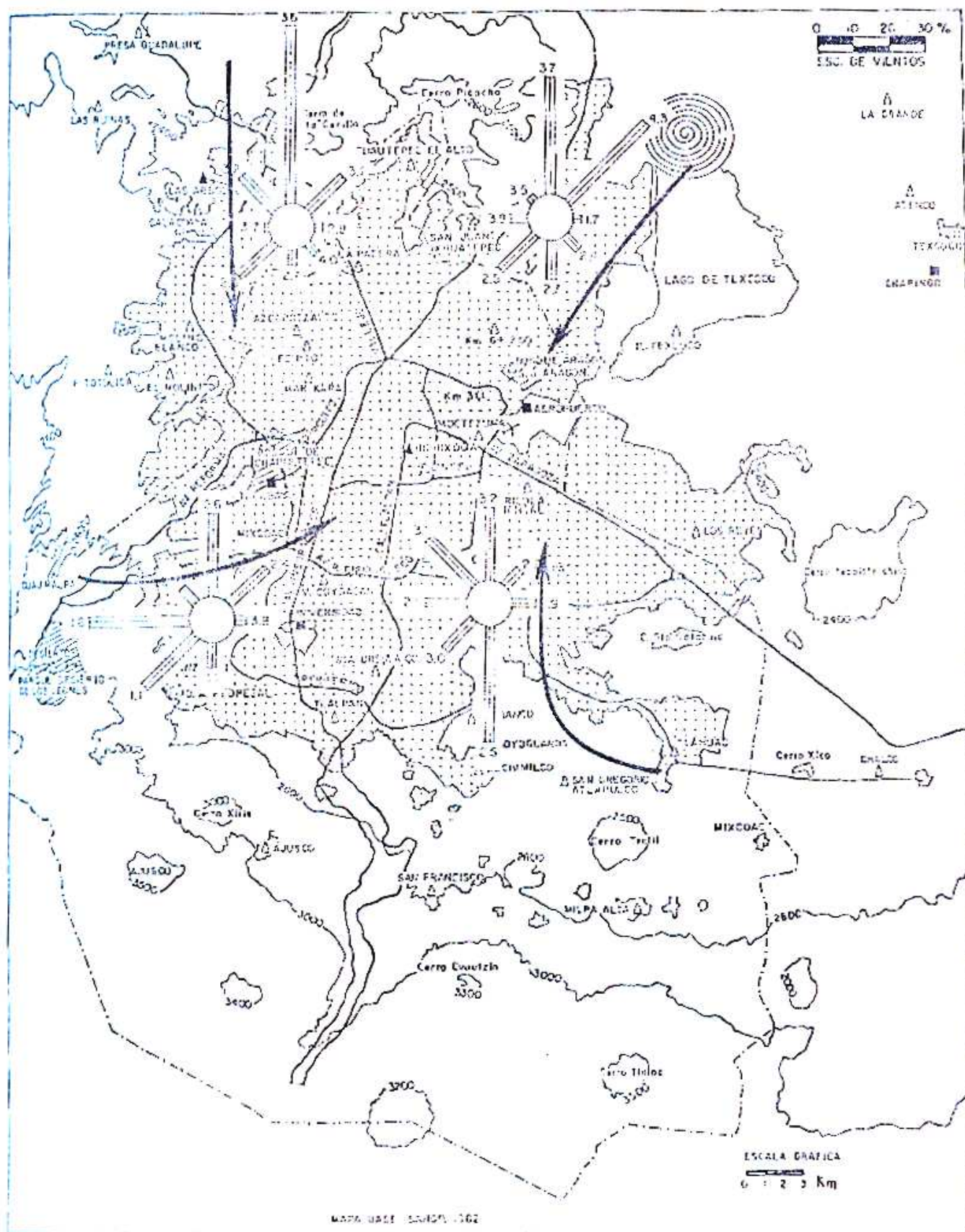
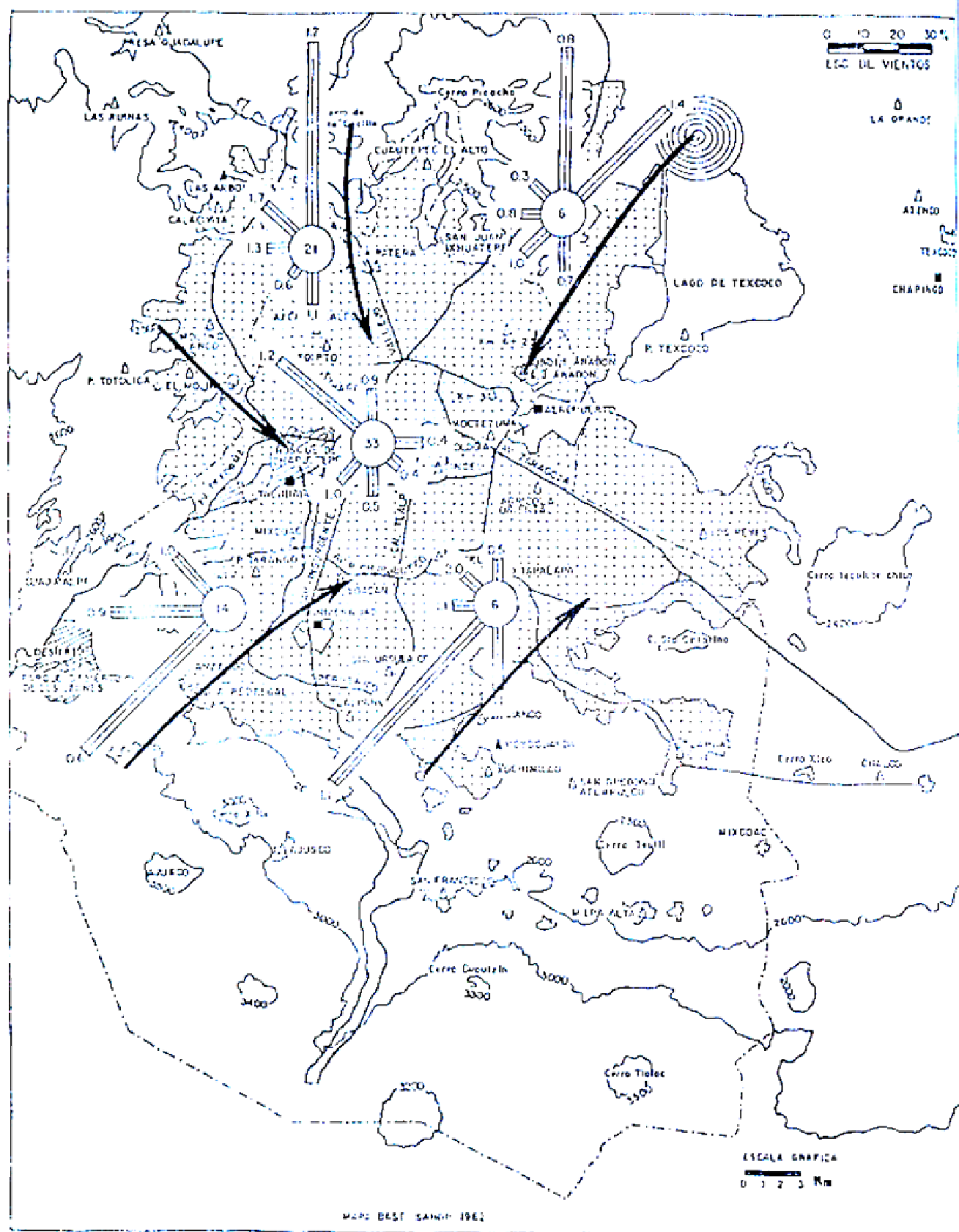
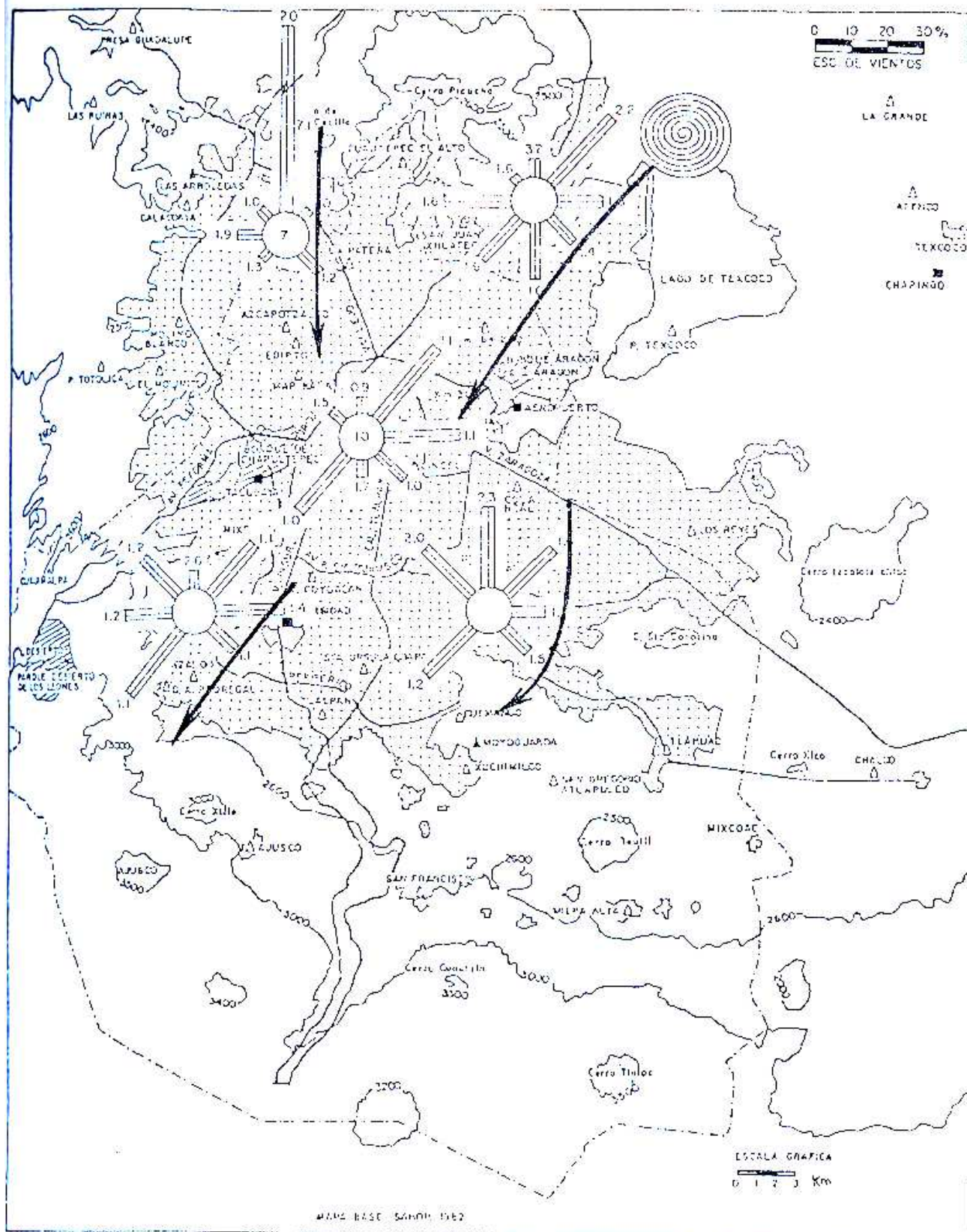
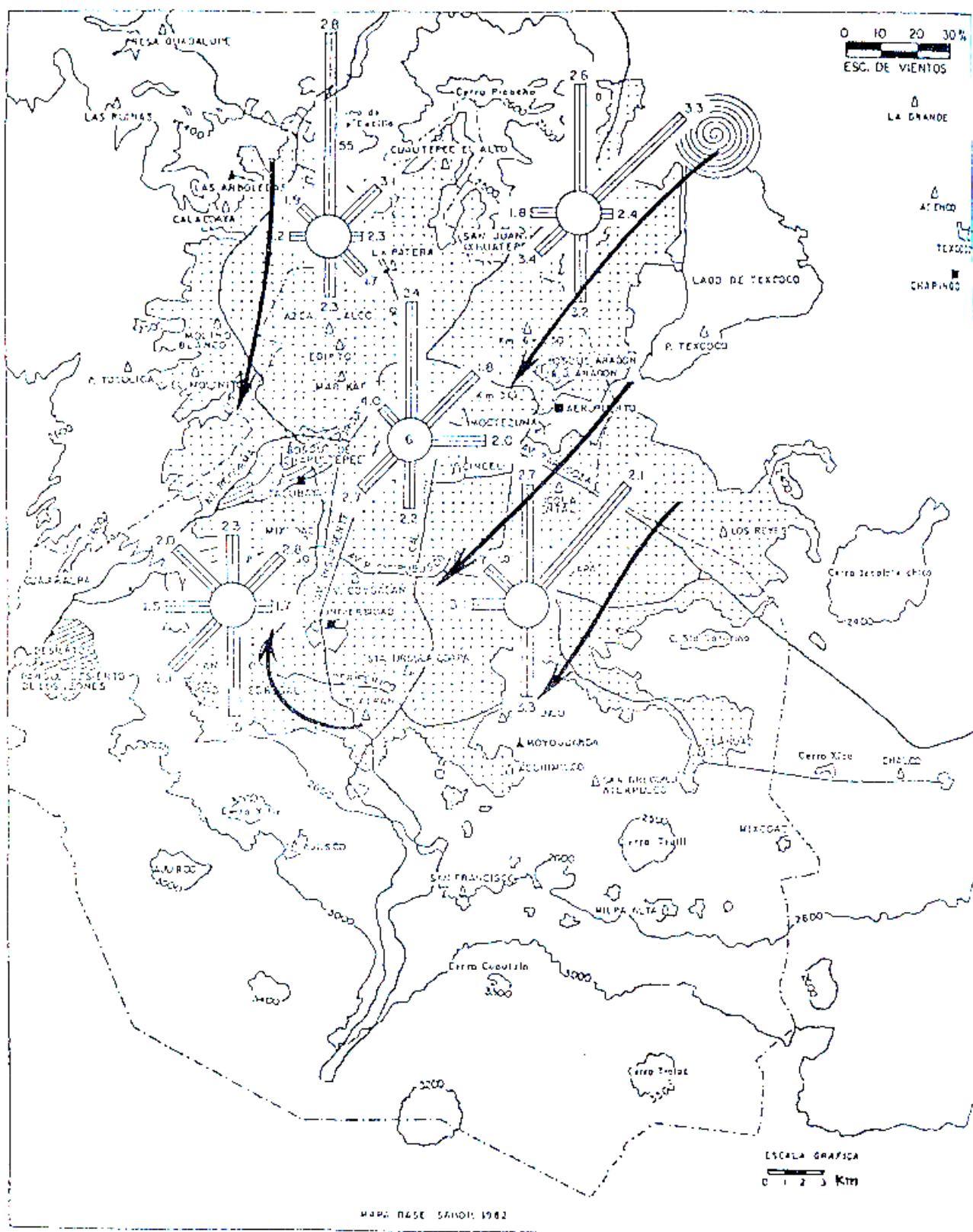


Figura 6. Rosas del viento de superficie (noviembre-abril, 1976). Calmas < 0.2 m/s, 20 hr.







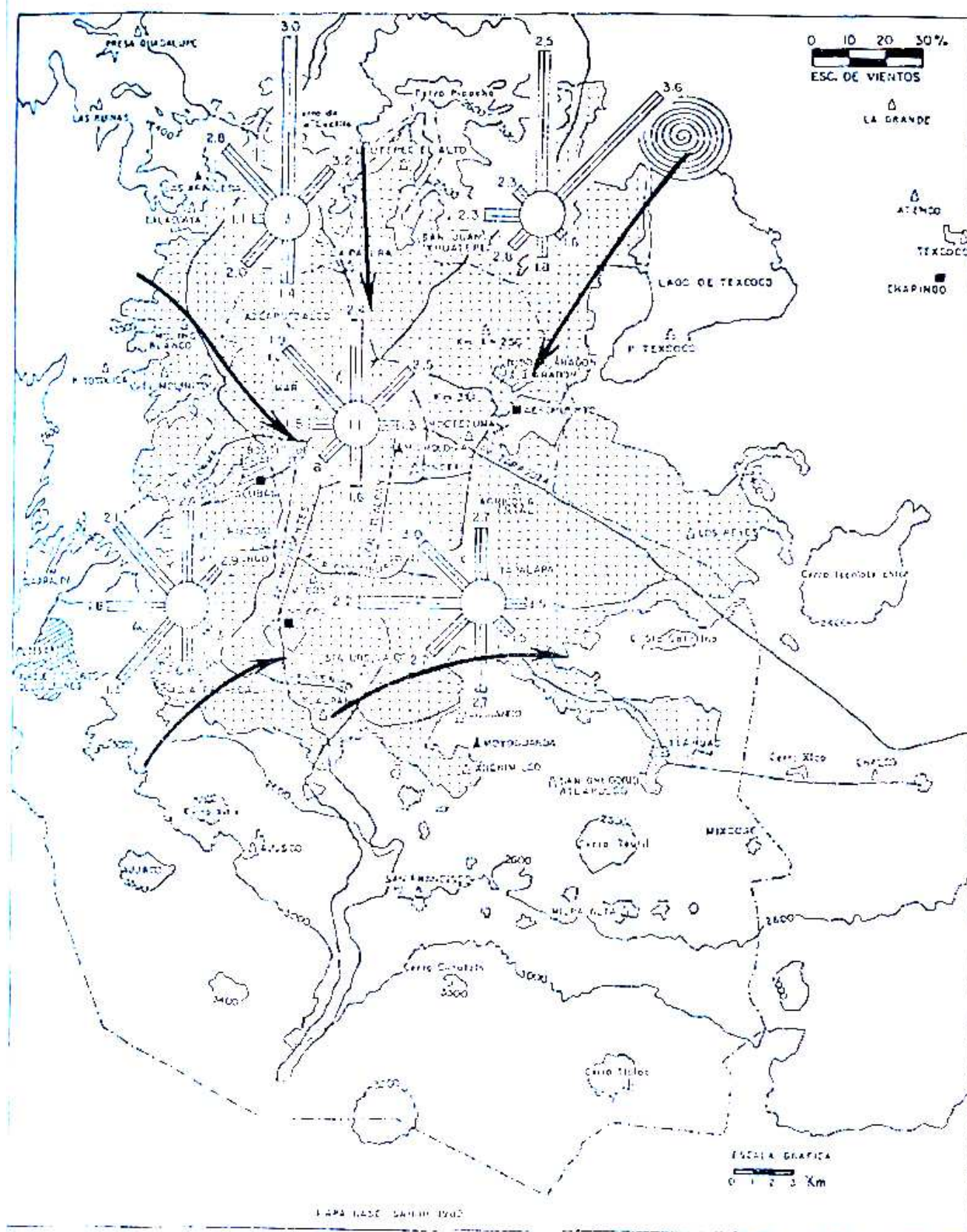


Figura 10. Rosas del viento de superficie (mayo-octubre, 1976). Calmas <0.2 m/s, 20 hr.

7. Efecto de la "isla de calor" sobre la circulación de vientos en la ciudad

El contraste térmico ciudad/campo es un fenómeno universalmente observado desde el siglo XIX. La llamada "isla de calor" es el resultado, entre otras causas, de la sustitución de superficies rurales cubiertas de vegetación por los materiales de mayor capacidad y conductividad térmica de que está hecha la ciudad. La lenta pérdida del calor de las construcciones urbanas durante la noche y la obstrucción del cielo en los cañones urbanos, en comparación con el campo circundante libre de obstáculos para la libre radiación contribuye también a acentuar, sobre todo al amanecer, la isla de calor.

Este aire caliente nocturno genera una circulación convergente hacia el núcleo de la isla que es evidente en situaciones de gradiente (barométrico) regional débil (véase Jáuregui, 1988a). Es el llamado viento "rural" cuya intensidad puede ser de 1 a 2 m/s.

8. Los vientos y sus efectos en los niveles de contaminación

a) Periodo nocturno y mañanas

En la sección anterior se ha visto como, a escala de la ciudad de México, el régimen de vientos superficiales es tal que por la noche y hasta las primeras horas de la mañana, de las montañas del N (Serranía de Guadalupe), Poniente (Serranía de Las Cruces) y Sur (Chichinautzin-Ajusco) los vientos descendentes (catabáticos) concurren hacia el centro geométrico del área urbana.

Esta circulación es reforzada durante dicho periodo por los vientos rurales. La estructura térmica de esta circulación convergente es tal, que el aire frío se encuentra en los niveles más bajos. Esta estratificación origina la formación de las inversiones superficiales de temperatura, que, como se sabe, desalientan la dispersión de los contaminantes hacia arriba.

Condiciones más desfavorables para la dilución de contaminantes no se podría presentar, ya que por una parte, dentro de este periodo ocurre el pico principal de emisiones vehiculares (entre las 7 y las 10 hrs) a una capa de aire estable y así, los polutantes no se diluyen ni hacia arriba (por la presencia de la inversión térmica) ni lateralmente hacia fuera, ya que a esas horas los vientos son, como se ha visto, convergentes. No es, por lo tanto, sorprendente que a estas horas de la mañana se observen los máximos niveles de los principales contaminantes, tales como el SO_2 , PTS, CO (véase Jáuregui, 1988b).

En las figuras 11 y 12 se muestra el análisis de las líneas de flujo del aire superficial basado en la dirección dominante del viento a 2 horas de la mañana: 6 hrs (figura 11) y 10 hrs (figura 12) para el año 1982. Para este año se contó con datos anemométricos para una estación urbana (Tacubaya) 3 sub-urbanas (Aeropuerto, Tláhuac y Granjas Guadalupe) y 4 rurales (Tizayuca, Acolman, Texcoco y Plan Texcoco).

Esta red de estaciones abarca no tan solo el área que ocupa la ciudad, sino que comprende también el centro de la planicie. Como ya se mencionó, las líneas de flujo se trazan de modo que el vector (o barra) que representa al viento es siempre tangente a dichas líneas. Se observa en las figuras 11 y 12 que tanto en la estación seca

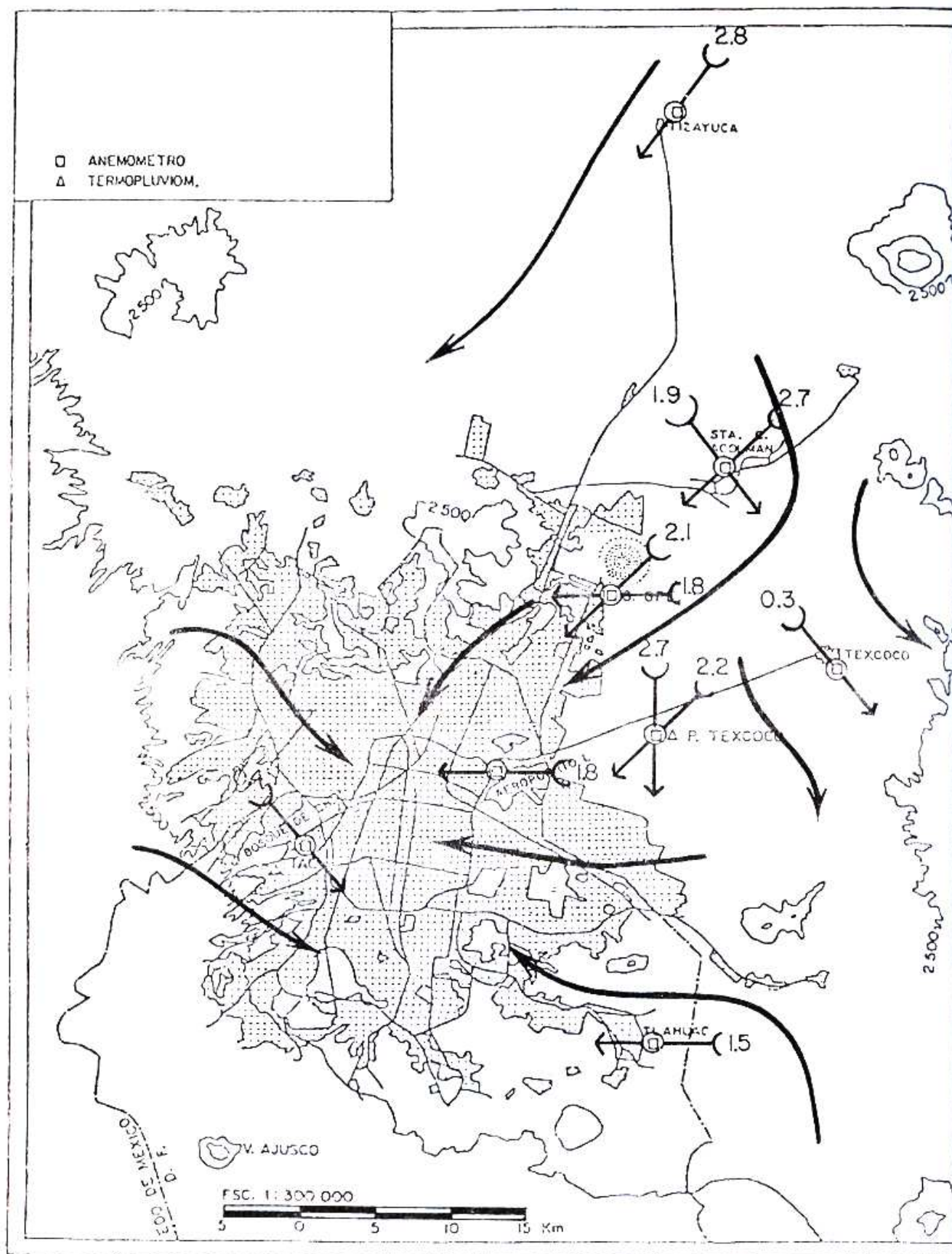


Figura 12. Julio 1982, 10 hr.

(representada por enero) como en el periodo lluvioso (figura 12) el aire superficial converge hacia la ciudad en el periodo matutino, siendo mayor (1 a 1.5 m/s) la intensidad de dicho flujo en la planicie y en el borde oriental de la ciudad que en su interior (de menos de 1 m/s). Esto se debe a la pérdida de energía que sufren los vientos rurales al chocar contra las construcciones urbanas.

En resumen, del análisis de líneas de flujo del viento superficial en el periodo nocturno y matutino, se desprende que a esas horas la tendencia del transporte de contaminantes es a concentrarlos en el ámbito urbano y cerca de las fuentes de emisión principales (en la zona industrial del N y en el Centro de la ciudad (véase figuras 9 y 10 en Jáuregui, 1988a).

b) Periodo vespertino

El periodo vespertino que comprende desde el mediodía hasta la puesta del Sol se caracteriza, como ya se vio en la sección 6, por una mayor turbulencia de origen térmico por el calentamiento del Sol. Es entonces cuando se manifiestan (muy débilmente) los vientos de valle. La desaparición del aire estable nocturno implica, como ya se menciona, que desciende hasta el suelo la corriente regional en turno: los alisios del E en verano y los vientos del W en el periodo seco. Dichas corrientes refuerzan en algunos lugares a los vientos topográficos de valle (anabáticos), (especialmente en las lluvias) como se aprecia en las figuras 12 y 14. La circulación de vientos del NE en este periodo impulsa los contaminantes de la ciudad hacia el S y SW. A medida que se realiza este transporte, la mayoría de los contaminantes (NO_x , SO_2 , CO, CO_2 , polvos) se diluyen en una capa cuya profundidad crece por la turbulencia convectiva hasta alcanzar un máximo a la mitad de la tarde. El resultado es que los niveles de dichos contaminantes se abaten drásticamente después del mediodía (véase figuras 5 a 7 en Jáuregui, 1988b).

Sólo el ozono, que se forma de las emisiones de óxidos de nitrógeno en presencia de la luz solar, tiene un comportamiento distinto a los anteriores, ya que, a medida que su precursor (los NO_x) es transportado por la corriente de vientos (figuras 13 y 14) se va generando (y acumulando contra las montañas del S y SW) por la presencia de radiación ultravioleta en las mañanas soleadas que prevalecen aun durante la estación lluviosa. El resultado de este proceso es que el O_3 a pesar del efecto de dilución de la turbulencia vespertina alcanza su culminación después del mediodía y los máximos niveles de dicho polutante se observan en el sur de la ciudad, lo que no implica que sean en ocasiones también elevados en el centro (véase figura 8 en Jáuregui, 1988b).

Qué tan persistente es la circulación de N a S (o NE a SW) que ilustran las figuras 13 y 14? En el borde oriente de la ciudad y en 1982 (estación Aeropuerto) los vientos del sector N (NW, N y NE) dominaron (un 56%) sobre los vientos del sector S (SW, S y SE) (un 44%) a lo largo del año y durante el periodo de las 12 a 18 horas (tabla 2). Por la noche (2 a 8 hrs) esta dominancia se invirtió ahí y en Tláhuac por la influencia de los vientos de drenaje. Sin embargo, el mismo análisis para el borde poniente de la ciudad (Tacubaya) revela que ahí la prevalencia de los vientos del sector N es aun mayor a lo largo de un ciclo anual en el borde poniente de la ciudad; lo que explica

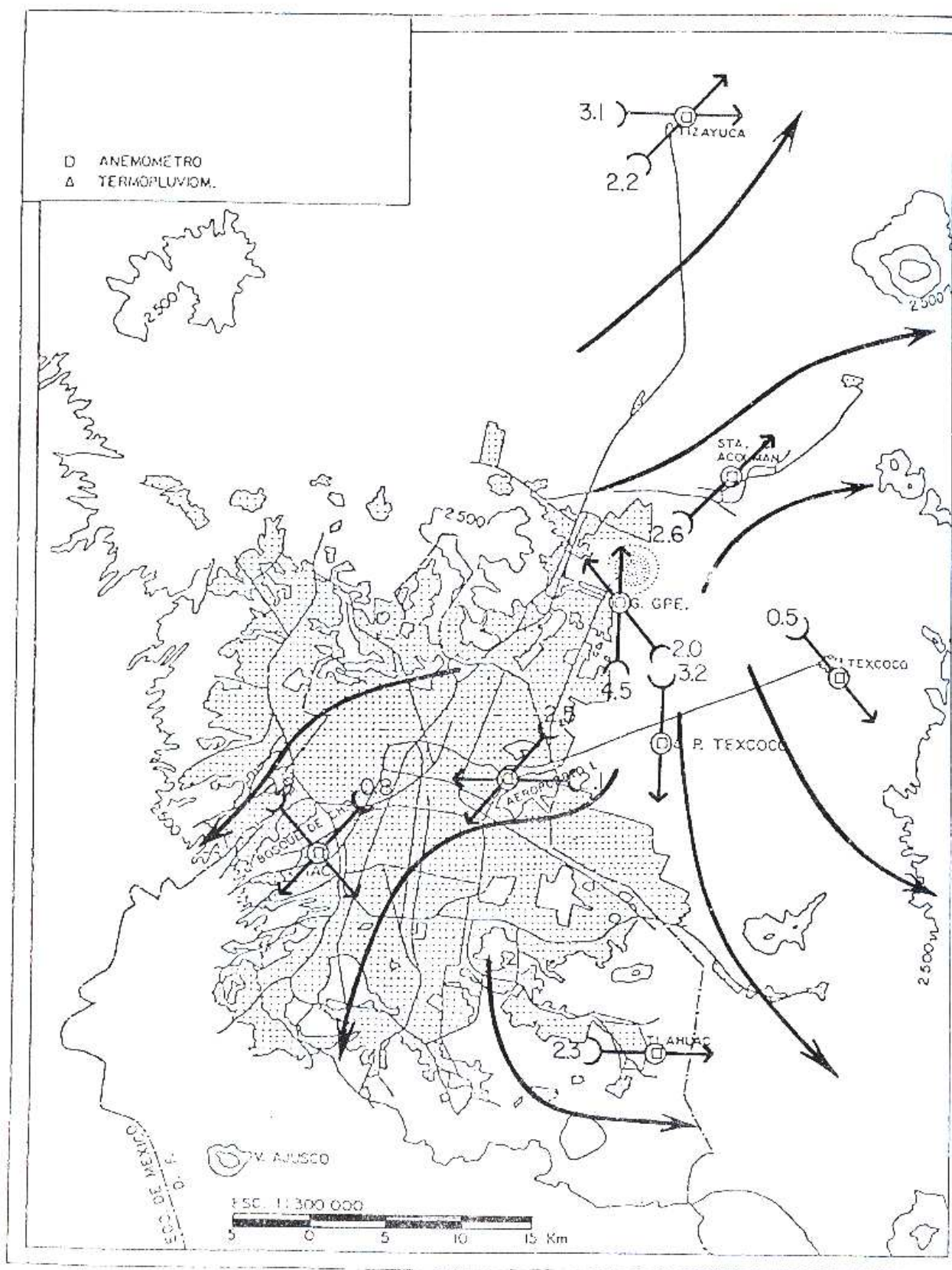


Figura 13. Enero 1982, 14 hr.

la persistencia de los altos niveles de ozono en todo el año en los sectores SE, SW y Centro de la ciudad. En la **figura 15** se muestran las isoconcentraciones (promedio de máximas diarias) de O_3 para el semestre de secas de 1987. Estos niveles no solo son altos, sino que con frecuencia rebasan en un amplio sector de la ciudad la norma de salubridad que es de 0.11 partes por millón (EPA, 1976).

En algunos meses de dicho año (1987) (como mayo y junio) y en la zona SW de la ciudad no hubo días en que no se rebasara la norma por O_3 (**tabla 3**).

Tabla 2. Frecuencia (%) de vientos de direcciones sector norte, 1) NW, N y NE; sector sur, 2) SE, S y SW en el año de 1982

Estación	12 — 18 hrs		2 — 8 hrs	
	1	2	1	2
Tacubaya	75	25	88	12
Aeropuerto	56	44	47	53
Tláhuac	44	56	20	80

Tabla 3. Frecuencia (%) de días en que se rebasó la norma para el ozono en cinco sectores del D. F. durante el primer semestre (enero-junio) para dos periodos: 1978 (1) y 1987 (2)

		E	F	M	A	M	J
NW	1	0	0	0	0	0	0
	2	13	25	55	63	100	73
Centro	1	13	60	76	87	19	0
	2	68	39	42	47	100	97
SE	1	0	0	0	0	0	0
	2	40	79	10	87	94	100
NE	1	6	4	0	0	0	7
	2	65	46	58	47	61	80

Fuente: SEDUE.

Pero otros sectores de la ciudad (del centro y NW) revelan también para 1987 la misma dominancia del O_3 por arriba de la norma. Aunque los niveles máximos de O_3 en toda la ciudad se continúan presentando en el rincón SW debido a su acumulación, tanto por el transporte prevaleciente de N a S a esas horas, como por las emisiones locales de NO_x e hidrocarburos, se advierte (en la **tabla 3**) una elevación generalizada en toda la ciudad de los oxidantes respecto al año anterior de 1978. En dicho año había rumbos de la ciudad como el NW, SE y NE en que el O_3 no fue el contaminante prevaleciente.

La figura 16 ilustra los enormes incrementos alcanzados en la prevalencia del ozono en el transcurso de la última década (1978-1988) en los diversos sectores del centro y SW de la ciudad que eran en 1978 (y siguen siendo actualmente) los más afectados por los gases oxidantes. En los últimos años la nube de O_3 se ha extendido sobre la ciudad, pues en los sectores NE y SE que en los años setenta solo registraban de 2 a 6 días/año con dominancia de ozono (en 1987) registraban de 80 a 119 días con altas concentraciones de este gas nocivo para la salud. Hasta los años setenta la contaminación principal en la ciudad eran los polvos o partículas y el dióxido de azufre.

A partir de 1987, debido a un cambio en la composición de la gasolina que se consume en el D. F., si bien bajaron los niveles de plomo en el aire de la ciudad (véase Bravo, *et al.*, 1988) se comenzaron a observar concentraciones cada vez más elevadas de oxidantes transformándose la atmósfera del D. F., de predominante polvosa y azufrosa a oxidante.

Lo anterior no significa que se hayan eliminado los polvos (aunque sí se han reducido considerablemente los que provenían del vaso de Texcoco gracias a las acciones del Plan Texcoco) (Jáuregui, 1989) sino que dicho contaminante, aunque sigue presente, sobre todo en la estación seca, ha sido desplazado por el ozono.

Si la tendencia de los niveles de O_3 mostró una elevación dramática en la década 1978-87, dichos incrementos se acusan aun en el periodo reciente de cinco años 1986-90 en que la calidad del aire, determinada por el IMECA, revela un deterioro significativo (22% de incremento del IMECA) aun en periodo tan breve, según se aprecia en la tabla 4a. En esta tabla se observa que en general para toda la ciudad la calidad del aire durante el periodo 1986-90 ha pasado de satisfactoria (menos de 100 unidades IMECA en 1986-87) a no satisfactoria durante los últimos tres años habiéndose incrementado (en un 83%) el número de días en que se violó la norma (usualmente por O_3) de 86 días (en 1986) a 105 en 1990. Estas cifras son un promedio para las cinco zonas de la ciudad y reducen por lo tanto el número de días malos.

En la tabla 4b aparece la estadística para cada uno de los cinco sectores en que la SEDUE ha dividido la ciudad. Se puede apreciar de la tabla que los sectores donde ha ocurrido un mayor deterioro de la calidad del aire son el centro y los sectores SE y SW. Por otra parte el sector mejor librado es el NE que aun cuando contiene en sus límites instalaciones fabriles se localiza en general (por la tarde) viento arriba del grueso de las emisiones de la ciudad como lo muestran los mapas de líneas de flujo del aire superficial (figuras 11 y 12).

En la misma tabla 4 se aprecia que en general la tendencia de la contaminación en este corto periodo de cinco años fue creciente hasta 1988 habiéndose estabilizado o aun decrecido (sector NE) ligeramente. El decrecimiento en el índice IMECA en 1989 bien se puede explicar por el inicio del programa "un día sin auto" y otras acciones de SEDUE o a condiciones más favorables de ventilación del valle en dicho año.

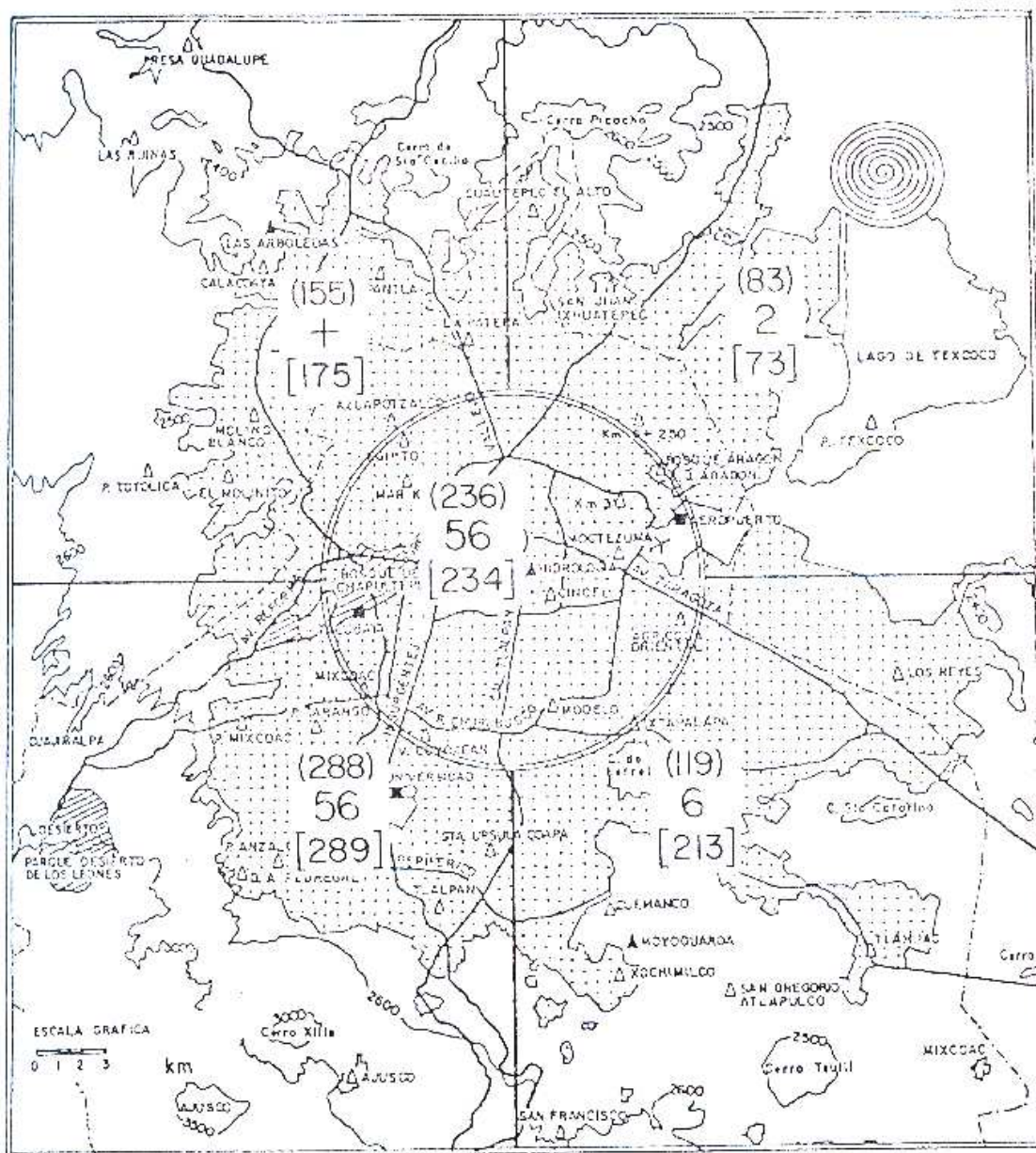


Figura 16. Número de días en que se excedió la norma (0.11 ppm) para el O_3 en 1978 en los cinco sectores de la ciudad de México.

- No se contó con observaciones de ozono, () 1987 y [] 1990.

Tabla 4a. Promedios anuales de cinco sectores del índice de contaminación (IMECA) y frecuencia anual de días con violación a la norma (promedio de los cinco sectores), periodo 1986-90

	1986	1987	1988	1989	1990	Incremento (%)
IMECA	86	95	110	101	105	22
Frec. (%)	30	41	53	49	55	83

Fuente: SEDUE.

Tabla 4b. Promedio anual del IMECA por sectores de la ciudad de México

	1986	1987	1988	1989	1990	Incremento (%)
NW	(89)	(112)	(178)	(161)	(175)	(97)
	77	87	102	100	104	35
	[9]	[0]	[0]	[13]	[9]	
NE	(79)	(34)	(99)	(112)	(73)	(8)
	90	62	88	86	75	(17)
	[10]	[0]	[0]	[13]	[9]	
C	(44)	(210)	(245)	(116)	(234)	(532)
	64	108	116	96	114	78
	[9]	[0]	[0]	[12]	[9]	
SW	(217)	(254)	(317)	(276)	(289)	(33)
	118	127	153	125	146	23
	[15]	[0]	[0]	[12]	[10]	
SE	(98)	(142)	(128)	(169)	(213)	(217)
	81	89	91	97	84	3
	[14]	[0]	[0]	[13]	[11]	

Entre paréntesis, número de días por año en que se excedió la norma.

Entre llaves, número de días en que no hubo datos del IMECA, periodo 1986-1990.

Fuente: SEDUE.

9. Conclusiones

El patrón de la circulación de vientos superficiales en la cuenca de México es el resultado de la interacción tanto de los vientos regionales o de macro escala, como de los vientos locales inducidos por la topografía. Ya a escala de la ciudad de México a los dos factores anteriores se sobrepone una circulación centrípeta de intensidad variable que se genera por la llamada isla de calor.

En este trabajo se presentan las rosas de viento y líneas de flujo correspondientes a una red anemométrica que abarca tanto estaciones urbanas como aquellas ubicadas en la planicie del valle. El objetivo del análisis de líneas de flujo para diversos periodos del día es el de determinar la influencia de las componentes locales y sinópticas del viento observado, así como el poder evaluar sus efectos en la difusión y el transporte de los contaminantes que se emiten en la capital.

Los vientos de drenaje nocturnos y la circulación centrípeta o (viento rural) principalmente nocturna dan por resultado una convergencia del aire que tiende a contener la dispersión lateral de los contaminantes en el periodo nocturno y de la mañana. La estabilidad propia del aire en dicho periodo restringe la difusión vertical de los polutantes presentándose a esas horas el pico mayor de concentraciones de los contaminantes primarios. Durante el periodo vespertino, aun cuando la turbulencia del aire en esas horas diluye hacia arriba las emisiones, la irradiación solar origina la formación de oxidantes que alcanzan su culminación por la tarde, siendo transportados en general, hacia el sector S y SW por la circulación dominante desde el cuadrante N.

La prevalencia por la tarde y, a través del año de vientos del sector N, NE y NW origina un deterioro mayor de la calidad del aire por la formación de O_3 en los sectores del S y Poniente de la ciudad.

Finalmente, al comparar los niveles de polución observados en la última década se advierte para el caso del O_3 una dramática declinación de los días con buena calidad del aire, sobre todo en los sectores del centro y SW de la capital. Ahí, los gases oxidantes son ahora una componente casi permanente de la atmósfera vespertina que por sus altas concentraciones, no solo deben dañar la salud de la población, sino también son la causa de la destrucción por amarillamiento y despoblación gradual, pero segura de los bosques del Poniente y Sur de la cuenca de México, a donde dicho gas es impulsado finalmente por la circulación de los vientos (Jáuregui, *et al.*, 1990). Si bien, los efectos del ozono sobre la vegetación del valle, han sido ampliamente documentados (Bauer y Hernández, 1986; Krupa y Bauer, 1978; Hernández, Bauer y Krupa, 1982; Hernández y Bauer, 1985; Hernández y Bauer, 1984) desde la década de los setenta, las consecuencias ciertamente nocivas a corto y largo plazo de la atmósfera oxidante sobre la salud de la población quedan todavía por explorarse. Conviene apuntar sin embargo, que la tendencia de los niveles de polución para el corto periodo de cinco años (1986-90) señala una estabilización a partir de 1989 lo que podría deberse entre otros a algunas acciones tomadas por SEDUE para reducir las emisiones en la ciudad.

Reconocimiento

Se agradece a las autoridades de SEDUE el acceso a los datos de calidad del aire y al Servicio Meteorológico y Comisión de Aguas del Valle de México por los datos anemométricos. El ingeniero A. Estrada realizó los dibujos, la señorita G. Zárraga se encargó del trabajo estenográfico. La pasante E. Luyando colectó datos anemométricos y elaboró los mapas de trayectoria del viento (figuras 11 a 14). El pasante R. Reséndiz procesó datos de calidad del aire.

Referencias

- Bárcena, M., "El clima de la ciudad de México", Oficina Tipográfica, Secretaría de Fomento, Servicio Meteorológico Nacional, 1983.
- Bauer, M. L. y T. Hernández, "Contaminación: una amenaza para la vegetación", Colegio de Posgraduados, Centro de Fitopatología, 1986.
- Bravo, H., F. Perrin, R. Rosas y R. Torres, "Efecto del cambio de gasolina en los niveles de plomo y O₃ en el D. F.", *Memoria*, IV Congreso Nacional Saneamiento Ambiental, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, A. C., Querétaro, Qro., 1988.
- Defant, F., "Local winds", *Compendium of Meteorology* 655-673, Am. Meteor. Soc. Boston, 1951.
- Hernández, T., L. Bauer y S. Krupa, "Daño por gases oxidantes en pinos en el Ajusco", *Revista Chapingo*, 33-34, 1982, págs. 19-28.
- Hernández, T. y L. Bauer, "Evolución del daño por gases oxidantes en *pinus Hartwegii* en el Ajusco", *Agrociencia*, 56, México, 1984, págs. 183-194.
- Hernández T. y L. Bauer, "Photochemical oxidant damage on *pinus Hartwegii*", XII Congreso Nacional de Fitopatología, Guanajuato, México, 1985.
- Jáuregui, E., "Mesoclima y bioclima del Valle de México", *Boletín* núm. 1, Instituto de Geografía, UNAM, México, 1965, págs. 99-123.
- Jáuregui, E., "Local wind and air pollution interaction in the Mexico Basin", *Atmósfera*, 1, 1988a, págs. 131-140.
- Jáuregui, E., "Efectos del clima urbano sobre los niveles de contaminantes en la ciudad de México", *Geografía y Desarrollo*, vol. 1 (2), México, 1988b, págs. 37-44.
- Jáuregui, E., "The dust storms of Mexico City", *Int. Journal of Climatology*, vol. 9, 1989, págs. 169-180.
- Jáuregui, E., L. I. Bauer, A. Quevedo, P. R. Miller y D. Alvarado, "Ozone characterization in a mountain forest near Mexico City", en *Memorias Primer Simposio Internacional sobre Clima Urbano, Contaminación del Aire y Planeación en Ciudades Tropicales*, Guadalajara, México, noviembre, 1990.
- Krupa, S. y L. Bauer, "Efecto de aeropolutantes en la vegetación del Valle de México", Res. VIII Congreso Nacional de Fitopatología, Oaxtepec, México, 1978.
- U. S. Environmental Protection Agency. Pollutant Standard Index, "Fuideline for Public Reporting of Daily Air Quality", EPA-450/2-76-013, Res. Triangle Park, N. C., USA, 1976.