

LAS CAUSAS DE LA SEQUIA CLIMATICA EN LA REGION COSTANERA DE SANTA MARTA COLOMBIA⁽¹⁾

Por REIMER HERRMANN
Universidad de Giessen

RESUMEN

En la región costanera de Santa Marta se realiza en el manto de la vegetación un cambio muy rápido en la composición florística, desde un rastrojo con follaje (monte espinoso tropical), rico en especies suculentas, pero periódicamente con hojas caducas (veranero deciduo) a causa de la sequía, expresión misma de una gran aridez, hacia un bosque tropical estacional, siempre verde (bosque húmedo tropical).

Las causas para este cambio de vegetación son las siguientes:

1. Divergencias en las corrientes horizontales en el sistema de los vientos alisios como consecuencia de los diferentes coeficientes de fricción sobre el mar y la tierra. Estas divergencias producen un movimiento descendente de aire de las capas superiores de la atmósfera sobre la región costanera, lo que dificulta la formación de precipitación.

2. Movimiento descendente del aire una vez que la corriente haya pasado las montañas sobre la costa.

3. Divergencias en las corrientes horizontales y estabilización de las masas de aire en relación con el movimiento cíclico diurno en la región costanera.

4. Vientos catabáticos, del tipo de Föhn, que se forman durante el período de sequía en el sistema de valle de los ríos Piedra-Manzanares, y que debido a un alto déficit de saturación y alta velocidad del viento, producen una evapotranspiración potencialmente alta.

1. *El problema.*

Sobre la faja costanera al este del divorcio de aguas en un mismo valle entre los ríos Piedra y Manzanares, es decir 20 kms. al oriente de Santa Marta, existe un bosque tropical-estacional siempre verde. Pero al occidente de dicho divorcio de aguas, en el mismo valle, se presenta un bosque tropical parcialmente verde (semi-deciduo), (bos-

que seco-tropical), seguido por otro bosque de llanura baja, periódicamente seco, con hojas caducas (bosque verde de lluvia o veranero deciduo), (bosque muy seco tropical), para confundirse en los alrededores de Santa Marta con un rastrojo de follaje, rico en especies suculentas (monte espinoso tropical), de ubicación dispersa y abierta en unas partes (cardonales) y más compacto en otras (espinares). Aparte de algunas condiciones ecológicas especiales, parece que este cambio de las formaciones vegetales obedece a una fuerte disminución de la precipitación media anual, desde más de 1.000 mm. al este del divorcio de aguas, hasta menos de 500 mm. en los alrededores de Santa Marta. De estas observaciones resulta la siguiente pregunta: ¿Por qué se presenta en esta región costanera tan marcado contraste climático sobre un espacio tan estrecho?

2. *Estructuración.*

La explicación de este interesante fenómeno se desarrolla como sigue:

2.1. Descripción geográfica de la faja costanera y de la parte noroeste de la Sierra Nevada como regiones naturales, hasta donde sea necesario para la respuesta a nuestra pregunta.

2.2. Descripción de la ubicación de la región costanera en relación con la circulación atmosférica planetaria.

2.3. Para la explicación se presentan las siguientes cuatro hipótesis:

2.3.1. Divergencias y convergencias horizontales de las corrientes alisias, como consecuencia de los coeficientes de fricción sobre mar y tierra.

¹ El autor agradece a la Deutsche Forschungsgemeinschaft por la ayuda para sus investigaciones hidrológicas y climáticas; al Profesor E. Guhl y doctor W. Pannenbecker por los valiosos consejos y ayuda. Además da las gracias al Instituto Tropical de la Universidad de Giessen, en cuya dependencia exterior, en Santa Marta —el Instituto Colombo-Alemán— fue recibido gentilmente como huésped.

- 2.3.2. Divergencias en las corrientes horizontales y movimientos descendentes de la atmósfera, como consecuencia del sobrepasar estas corrientes las montañas cercanas a la costa fuera del espacio de fricciones.
- 2.3.3. Divergencias horizontales y estabilización de masas de aire caliente sobre el mar, en relación con los vientos diurnos cíclicos.
- 2.3.4. Vientos catabáticos del tipo Föhn.
- 2.3.5. En una visión final se discute sobre una hipótesis algo más antigua, que responsabiliza a las aguas frías ascendentes en la parte meridional del Mar Caribe como causa de la sequía.

3. Descripción geográfica de la región costanera de Santa Marta y de la parte nor-occidental de la Sierra Nevada.

Como una de las sierras montañosas costaneras más altas del mundo se levanta en la costa colombiana del Caribe como un pilar (Horst) aislado, la Sierra Nevada de Santa Marta hasta casi 6.000 metros de altura. La parte noroccidental de la Sierra está subdividida por una red hidrográfica epicéntrica en ramales cordilleranos que llevan dirección perpendicular sobre la costa, y que en el norte caen bruscamente sobre el mar.

Exceptuando algunos pequeños patios costaneros en el norte y noroeste, sólo en el occidente se ha formado una llanura costanera de 2-5 kms. de ancho, compuesta de conos aluviales y terrazas. Este esquema está interrumpido al oriente de Santa Marta por un sistema orográfico de valle con dirección este-oeste y tectónicamente determinado. Este sistema de valle con una línea divisoria de aguas de 450 mts. de altura entre los cursos inferiores del río Manzanares en el occidente y del río Piedras en el oriente, separa una serranía costanera de hasta unos 900 mts. de altura (Cerro Las Bóvedas) del pilar (Horst) del propio macizo en el sur.

Como ya se indicó en la introducción, se realiza en la región del divorcio de aguas entre los ríos Piedras y Manzanares, un cambio muy marcado en las formas de vegetación, tanto en el orden horizontal como también en el vertical (véase fig. 1).

Al oriente del divorcio de aguas entre los ríos Manzanares-Piedras se encuentra un bosque tropical-estacional, siempre verde, que sólo después de cruzar la divisoria de las aguas en dirección occidental, es reemplazado por una faja de bosque parcialmente siempre verde de 2 kms. de ancho, que se extiende en dirección N-S. El resto de la faja costanera está cubierto por un bosque seco y deciduo (antiguamente denominado bosque muy seco tropical). (C. Pérez, 1962: 6-71). Únicamente las lomas en los alrededores de Santa Marta

están cubiertas por un rastrojo con follaje que cambia periódicamente entre seco y cacudo (veranero deciduo). (R. Schnetter, 1969: 289-303). La excepción de esta regla indicadora de la ubicación de la vegetación desde la húmeda hasta la en extremo árida, la hacen solamente las formaciones vegetales de las vegas en los valles y los patios costaneros con alto nivel freático.

2.1.4. Esta distribución de la vegetación es reflejo de la distribución de la precipitación (véase fig. 2). Como es de esperar, la precipitación crece inicialmente con el aumento de la altura sobre el nivel del mar, hasta cerca de los 1.600 mts., para luego disminuir nuevamente (R. Herrmann, 1970: 64). Además aumenta en la región costanera al este y al sur de Santa Marta. La mayor sequía se encuentra en los alrededores mismos de Santa Marta.

2.2. La circulación atmosférica planetaria en la región costanera de Santa Marta.

La presente exposición sigue en lo esencial las investigaciones de J. F. Lahey (1968), H. Trojer (1959: 289-373) y S. Hastenrath (1966: 694-711 y 1967: 203-215). La parte meridional del mar Caribe está ubicada en el flanco sur-occidental sobre el centro de alta presión del Atlántico norte. La situación de las corrientes atmosféricas sobre este flanco está sujeta a un cambio estacional anual, que a su vez repercute sobre el régimen de los vientos y la estratificación atmosférica, y a través de éstos, tiene también repercusión sobre el régimen de las precipitaciones en la región costanera de Santa Marta.

Durante el verano del hemisferio norte el eje del centro de alta presión del Atlántico norte, está desplazado muy hacia el norte. Vientos orientales se extienden desde el suelo hasta dentro de la parte superior de la Tropósfera. El epicentro de estos vientos orientales con altas velocidades, se encuentra durante esta época del año sobre la parte septentrional del Mar Caribe. En la región costanera de Santa Marta se presentan durante esta misma época predominantes vientos orientales con escasa velocidad. Predomina una estratificación atmosférica inestable, con fuerte movimiento ascendente del aire. Durante el "pequeño" período de sequía en los meses de julio y agosto, este movimiento ascendente se ve de vez en cuando interrumpido por un débil movimiento descendente.

El "verano" * (abril hasta noviembre) con su movimiento de aire ascendente, es el período estacional anual durante el cual se forman las precipitaciones. Durante el "invierno", desde fines de

* El autor se refiere a los períodos estacionales anuales de insolación sobre el hemisferio norte. Pero no a la región ecuatorial donde no existen períodos anuales estacionales térmicos de verano e invierno. Aquí se aplican estos conceptos a los períodos de lluvia (invierno) y sequía (verano), es decir a los períodos hídricos anuales.

noviembre hasta marzo, el epicentro de los vientos del este de la parte inferior de la Tropósfera, es decir los alisios, se encuentra en la región sur del Mar Caribe. Desde noviembre empieza a disminuir el movimiento ascendente del aire hasta invertirse durante los meses de enero, febrero y marzo en un fuerte movimiento descendente. Con este movimiento descendente se producen inversiones, cuyas alturas e intensidad son variables y dependen del tipo de los movimientos verticales macro-espaciales. Estos movimientos descendentes macro-espaciales impiden toda formación de precipitación. Este esquema puede ser alterado por turbaciones provenientes de la ITC que causan abundantes precipitaciones. Durante el tiempo de nuestro estudio, desde agosto de 1967 hasta junio de 1968, al parecer se presentó una alteración de esta índole únicamente una sola vez.

La misma ITC solamente en casos muy excepcionales llega a cubrir la región costanera de Santa Marta, tal como lo comprueba S. Hastenrath (1967: 213), y como lo muestran las fotografías de satélites del programa ESSA 8 R. Anderson *et al.* (1969: 4 B 4).

Debido a las formas del ciclo anual de la circulación general de la atmósfera, se explica también el ciclo anual de la formación de la precipitación, pero no así la fuerte diferenciación espacial.

Aquí es necesaria una introducción al hecho de la circulación atmosférica para poder entender la explicación de la siguiente hipótesis, con la cual se trata de explicar la diferenciación espacial en la distribución de la precipitación.

2.3. Las hipótesis sobre la diferenciación espacial en la distribución de la precipitación.

2.3.1. Divergencias y convergencias horizontales de corrientes atmosféricas en el espacio de fricción, como causa de la diferente distribución de la precipitación.

La divergencia horizontal del vector del viento v : $\Delta_h v$ está dada por (H. Faust, 1968: 18)

$$\Delta_h \cdot v = \frac{\delta v_x}{\delta x} + \frac{\delta v_y}{\delta y}$$

siendo aquí "X" la coordenada horizontal paralela sobre la costa e "y" la coordenada horizontal perpendicular sobre la costa.

La importancia de la divergencia y convergencia horizontal de corrientes, para la distribución de la precipitación, la expusieron de manera especial para la región costanera septentrional de Alemania, H. Maede (1951: 26-30) y E. Prager (1952: 259-267). Maede (1951: 26) explica la escasez de precipitación en la parte sur del Mar Báltico, debido a que la mayoría de los vientos soplan de la tierra hacia el mar. Durante este proceso se presenta en las capas inferiores con alteración por fricción pero con iguales gradientes, una aceleración del viento sobre el mar. Esta se explica

por un coeficiente de fricción menor sobre el mar que sobre la tierra. Pero como durante el paso de la corriente atmosférica de la tierra al mar no se puede producir un déficit de masa a causa de la determinante de la continuidad, tiene que descender aire de estratos más altos. Este proceso difícil, como es fácil de comprender, la formación de la precipitación.

Pero a la inversa sucede, como lo ha demostrado E. Prager (1952: 263) que una corriente proveniente del mar con dirección hacia la tierra, provoca con su más alta fricción sobre ésta una convergencia de corriente horizontal, asociada con un movimiento ascendente del aire y tendencia hacia la formación de precipitaciones.

La interpretación matemática de estos procesos la logró primeramente para corrientes marinas K. Hidaka (1950: 47-56). Las ecuaciones obtenidas por él sirvieron para que Bryson y Kuhn (1961: 289) basados en ellas, desarrollaran para las corrientes atmosféricas un monograma con cuya ayuda se puede calcular la divergencia (con antecedentes negativos convergentes), de las corrientes horizontales para cada sector de la costa. Para seguir a Bryson y Kuhn (1961) en el cálculo de las divergencias, es necesario el conocimiento del coeficiente de fricción de la corriente atmosférica sobre el mar y la tierra, el parámetro de coriolis y el vector horizontal del viento y la dirección de la costa. Como no se pudo obtener por separado el coeficiente de fricción para la región costanera de Santa Marta, se utilizaron los valores indicados por Bryson y Kuhn (1962: 289). Pero se debe considerar aquí que el coeficiente de fricción sobre el mar no es una constante (G. Neumann, 1948: 193-203), sino que depende del movimiento del mar y que seguramente la áspera superficie de las montañas costaneras de Santa Marta produce valores más altos de los que indican Bryson y Kuhn (1961). Pero en el caso de nuestro estudio se trata solo de la comparación de diferentes sectores de la costa (véase Fig. 3), para éstos sin embargo podemos suponer un similar coeficiente de fricción.

Ahora se parte de las siguientes bases:

Para el sector de la costa que nos interesa, los valores del parámetro de coriolis, coeficiente de fricción y vector del viento deben considerarse como constantes. Solo el valor "dirección de la costa" es variable. Por lo mismo dividimos el trayecto de la costa desde la desembocadura del río Piedras en el oriente hasta la boca del río Gaira al sur de Santa Marta, en cinco sectores, cada cual con dirección general fija. Para cada sector se calcularon las divergencias (respectivamente convergencias) para las épocas culminantes de los períodos estacionales anuales de sequía (enero, febrero, marzo) y de lluvia (septiembre, octubre, noviembre). Los valores sobre dirección y fuerza del viento necesarios para los cálculos, se tomaron del cuadrante correspondiente a Santa Marta del Pilot Charts des United States Naval Oceanographic Office (1967). Del uso e interpre-

tación de los datos de los anemómetros de la torre de control del aeropuerto y de la casa de huéspedes del Instituto Colombo-Alemán hubo que prescindir, ya que estas son el resultado de influencias complejas microclimáticas.

Para los meses de lluvia se fijó una fuerza del viento de $v = 5 \text{ m s}^{-1}$ y para el período de sequía de $v = 8 \text{ m s}^{-1}$, la dirección predominante del viento durante ambas épocas estacionales anuales es $= 50^\circ$.

La fuerte componente del vector del viento hacia tierra en el sector costanero del río Piedras lleva hacia una fuerte convergencia de corriente horizontal de $\Delta_h \cdot v = -19 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. Con el cambio de rumbo del desarrollo de la costa en 100° en el segundo sector y hasta 0° en el quinto sector se producen divergencias de corrientes horizontales (antecedente positivo) crecientes $\Delta_h \cdot v = 0 \text{ s}^{-1}$ hasta $\Delta_h \cdot v = +19 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ durante el tiempo seco, y $\Delta_h \cdot v = +9 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ durante la época de lluvias.

Una comparación del mapa de precipitación —que únicamente muestra la situación del año de 1967, excepcionalmente seco— con la ubicación de las formaciones vegetales en su orden, desde lo húmedo hasta lo árido, indica en seguida la relación de esta situación con el valor de divergencias de corriente horizontal: así por ejemplo la Isoyeta de 50 cms. o respectivamente el incremento de la vegetación xerófila, se encuentra en regiones con las más fuertes divergencias de corrientes horizontales. Al contrario de esta situación, en la zona dominada por una convergencia de corriente, al oriente del divorcio de aguas de los ríos Piedras-Manzanares, crece el bosque tropical-estacional siempre verde y es también allá donde caen las más altas precipitaciones.

La aplicación de esta interpretación matemática sobre la región al sur del río Gaira no es permitida, ya que aquí, debido a la alta Sierra, se hace sentir fuertemente su característica ubicación de sotavento, de tal manera que aquí los vientos alisios, permanentes y constantes en su dirección, son reemplazados por débiles vientos con ciclos diurnos de mar y valle y de tierra y montaña. Esta misma situación también es válida durante la época de lluvias en los cursos inferiores de los ríos Gaira y Manzanares (véase sección 2.3.3.).

J. Lahey (1958) llega básicamente a las mismas conclusiones; pero debido a una demasiado pequeña escala de trabajo (él estudió toda la costa meridional del Caribe) no pudo sin embargo reconocer en la faja costanera de Santa Marta la región de las fuertes convergencias.

2.3.2. Divergencias de corrientes y movimiento descendente del aire son las consecuencias del sobrefluír ésta las montañas cercanas a la costa.

Frecuentemente se puede observar que durante las tardes las altas nubes de manantial (Cumuli congesti) que se presentan por encima del macizo

de San Lorenzo, son desplazadas por la corriente general del oriente en dirección hacia el mar. Durante este proceso las nubes en seguida se disuelven en algunas manchas de cúmulos, y luego desaparecen del todo. Este hecho permite deducir que también por encima del espacio de fricción cercana al suelo, existe una divergencia de corriente horizontal tal como ya F. Lahey (1958: 104) lo determinó para otros sectores costaneros de la parte meridional del mar Caribe.

El movimiento descendente del aire, resultado de esta divergencia, no se puede separar, según los datos de las informaciones disponibles de un movimiento descendente que resulta como consecuencia de los procesos de vibración al sobrefluír la corriente de los alisios la parte noroccidental de la Sierra Nevada de Santa Marta. Índice de estas vibraciones son nubes altocúmulos y altostratus lenticularis con dirección norte-sur (véase fig. 4).

2.3.3. La influencia del ciclo diurno de la circulación atmosférica.

Durante los meses que tienen componente del viento ascendente en la corriente de los alisios, es decir, durante el período de lluvias, se forman sistemas de vientos con ciclos diurnos. Estos están compuestos por una circulación reforzada de los viento de montaña-valle (A. Wagner, 1938: 408-449) y otra de los vientos tierra-mar (F. Defant, 1950: 404-425). Durante la época de sequía, la componente del viento oriental, provocada por la brisa (véase sección 2.3.4.) es tan fuerte que el viento de mar-valle que sopla durante el día desde el occidente, solo se hace sentir al sur de la desembocadura del río Gaira, región ubicada al sotavento de la alta Sierra Nevada.

Para poder explicarse la muy marcada sequía en Santa Marta y sus alrededores, es necesario analizar en este capítulo la situación durante el período de lluvias.

Durante el día sopla un viento de mar-valle desde el occidente, que penetra en los valles de la Sierra hacia arriba. En la corriente supuesta de compensación con dirección occidental que está incorporada en la corriente de los alisios, se forma una divergencia horizontal sobre el valle inferior de los ríos Manzanares y Gaira. Esta determina un descenso de masas de aire desde arriba, lo cual impide la formación de precipitaciones. Complementariamente se logra una estabilización del aire por el enfriamiento de éste en contacto con el agua del mar más fresca. (F. Lahey, 1958: 104). La divergencia de los valles tropicales durante el día y la sequía por ella provocada ya la determinó C. Troll hacia tiempo (1952).

Durante la noche sopla un viento de montaña hacia el mar a poca altura del suelo incorporado en la corriente este-oeste de los alisios. Pero al parecer no se forma una corriente alta de compensación en dirección opuesta, ya que las nubes cúmulos que se forman sobre el mar por lo general no fluyen hacia la tierra firme. Este fenómeno

tiene como consecuencia un fuerte movimiento descendente del aire sobre la tierra firme, desde la Tropósfera mediana y superior, y por lo mismo es opuesto a la formación de precipitaciones.

La regla encontrada por W. Weischet (1969: 304) según la cual en las altas montañas de los trópicos húmedos interiores y alejados de las costas la inversión de las divergencias durante el día sobre los estrechos valles de erosión, se convierte durante la noche en una convergencia, no se cumple en este caso y por lo mismo estos valles también durante la noche son pobres en precipitación. Esta regla es válida en la forma descrita para la parte inferior del valle de los ríos Manzanares y Gaira, ya que el sistema de convección que se forma durante la noche sobre el mar, no influye sobre la región costanera de Santa Marta.

2.3.4. Vientos catabáticos del tipo de Föhn.

Como ya se ha descrito, se extiende al oriente de Santa Marta, entre un ramal cordillerano costanero de la Sierra Nevada y el Horst propiamente dicho del macizo (véase fig. 1), un valle con dirección este-oeste, subdividido por un divorcio de aguas y ocupado en su parte occidental por el río Manzanares y en el sector oriental por el río Piedras. Durante las épocas con un tiempo que se caracteriza por movimientos descendentes del aire y una clara inversión del alisio en alturas de 1.400-1.800 mts. se forma en este valle la "brisa", un viento catabático del tipo de Föhn, que puede al-

canzar hasta la fuerza de un huracán. Frecuentemente están unidos a la brisa desarrollos diabáticos tanto secos como húmedos (véase fig. 5 h. tab. 1) y la formación de un muro (frente) de Föhn (véase fig. 4). Condición previa para la formación de la brisa es una corriente aliso fresca de estable estratificación bajo una clara inversión en altura entre 1.400-1.800 metros. Según el principio de Arquímedes se precipita este aire al valle del Manzanares ocupado por masas de aire cálido indiferentemente estratificadas. Según L. Prandtl (1942: 226) es válido para el cálculo de la velocidad durante la caída de la brisa, suponiendo que sea sin fricción (véase fig. 6).

$$\omega_0 = \sqrt{2gh \frac{f_2 - f_1}{f_2}}$$

ω_0 = velocidad calculada sin fricción.

g = aceleración terrestre.

h = diferencias de altura.

f = densidad de la atmósfera.

Si se supone una diferencia altimétrica de 1.500 mts. y un cambio de la temperatura de $\Delta t = 4^\circ \text{C}$., lo que dentro de la situación meteorológica regional sería lo acertado, entonces resulta una velocidad sin fricción de $\omega_0 = 20 \text{ m s}^{-1}$ lo que corresponde a las observaciones obtenidas.

TABLA 1

| Situación de la temperatura en el valle de los ríos Manzanares-Piedras. | | | | | | |
|---|-------|--------|----------------|-----------------|--|-----------------------|
| [La numeración que lleva cada lugar de observación en la tabla indica en el mapa (fig. 2) su ubicación respectiva]. | | | | | | |
| 1.1. Salida para toma de valores el día 20-12-1967. reducida a la hora 21 ^h | | | | | | |
| | H (m) | t (°C) | ΔH (m) | Δt (°C) | $\Delta t \times 100$ | (°C m ⁻¹) |
| | | | | | $\frac{\Delta t \times 100}{\Delta H}$ | |
| 1. ICA | 23 | 28.3 | | | | |
| | | | 427 | 4.7 | 1.1 | |
| 2. Divorcio de aguas | 450 | 23.6 | | | | |
| | | | 100 | 0.4 | 0.4 | |
| 3. Lado barlovento de paso | 350 | 24.0 | | | | |
| | | | 230 | 1.1 | 0.48 | |
| 4. Km. 24 | 120 | 25.1 | | | | |
| 1.2. Salida para toma de valores el día 24-12-1967. reducida a la hora 12m. | | | | | | |
| | H (m) | t (°C) | ΔH (m) | Δt (°C) | $\Delta t \times 100$ | (°C m ⁻¹) |
| | | | | | $\frac{\Delta t \times 100}{\Delta H}$ | |
| 5. Selva de Oro | 50 | 29.9 | | | | |
| | | | 330 | 3.6 | 1.09 | |
| 6. Divorcio de aguas en el paso carre- | 380 | 26.3 | | | | |
| | | | 260 | 1.3 | 0.5 | |
| 4. Km. 24 | 120 | 27.6 | | | | |

Como consecuencia se deja al descubierto la región del divorcio de aguas (véase fig. 5), como resultado por la inversión hacia arriba se forma un sifón en el cual se acelera adicionalmente la corriente atmosférica. Las circunstancias del tiempo durante el cual se cumplen estas condiciones, se presentan casi exclusivamente desde mediados de diciembre hasta la mitad de marzo, de manera que la brisa se limita a esta época del año. Una descripción e interpretación detallada de la brisa se encuentra donde R. Herrmann (1970).

Por causa del descenso adiabático seco de la atmósfera, quiere decir con un muy grande déficit de saturación del aire, la brisa actúa en forma desecante; y con frecuencia existe un déficit de saturación. $E - e > 21$ mb. Como al mismo tiempo existe una fuerte insolación y velocidades del viento hasta 30 m s^{-1} se forma una evapotranspiración potencial muy alta, que tiene como consecuencia una rápida absorción del agua del suelo. Especialmente coinciden los efectos de la brisa con los cursos inferiores de los ríos Manzanares y Gaira, hasta la franja costanera nor-occidental, es decir con los territorios marcadamente áridos.

En el lado barlovento ascendente de la brisa, predomina con frecuencia una nubosidad de inversión, la cual no permite una alta insolación, y a veces está asociada a una llovizna fina o por lo menos produce un déficit de saturación menos $E - 2 < 4$ mb. De esta situación en asocio de una menor velocidad del viento, se deduce que allí durante el período de sequía, que es la época más frecuente de la presencia de la brisa, existe una evaporación potencial mucho menor —hasta lluvias se presentan de vez en cuando— que en el lado descendente, o sea allá donde reina la “verdadera” brisa.

2.3.5. La influencia de las aguas frías ascendentes sobre la formación de la precipitación.

G. Schott (1931: 225) afirmó que la causa de la sequía climática en el mar Caribe meridional era las frías aguas ascendentes. Pero según un mapa de F. Lahey (1958: Mapa 104) la diferencia de temperatura entre el aire y el agua en la región costanera de Santa Marta solo es $\Delta t = 0.6^\circ \text{C}$. Como esta diferencia es válida para toda la franja costanera, no se puede explicar con ella la aridez de Santa Marta frente al clima húmedo en la región de la desembocadura del río Piedras. Una correlación entre la diferencia de temperatura del mar y del aire con la frecuencia de precipitación en la región del Lago de Maracaibo hecha por F. Lahey (1958: 250) muestra que el factor de correlación en caso de la más alta frecuencia de precipitación es $r < 0.3$. No obstante los datos poco seguros para este argumento, se puede sin embargo concluir que la influencia de las aguas frías ascendentes solo puede ser mínima. Y esto todavía más si se considera que el agua fría ascendente se produce con viento desde la tierra, quiere decir cuando ya

existe de todas maneras una divergencia de corriente horizontal. De manera que esta divergencia de corriente horizontal está ubicada en el orden de las causantes del fenómeno de la sequía antes del agua fría ascendente. Este último, en el mejor de los casos, sólo puede acentuar el fenómeno.

Cuáles de las causas, las que a su vez y en parte están causalmente determinadas y unidas entre sí, son las que contribuyen y en qué grado a la formación de esta región árida, no se puede determinar exactamente en el orden cuantitativo. Ante todo porque hasta la fecha no existen todavía para el territorio en mención valores exactos de los elementos meteorológicos y cartas de tiempo en escala mayor. Pero es de suponer que las divergencias en el espacio de fricción son las que obstaculizan en mayor grado la formación de la precipitación.

SUMMARY:

In the coastal fringe of Santa Marta/Colombia there is a very rapid change of plant formation from a drought deciduous succulent shrubland showing great driness to a tropical evergreen seasonal forest showing great humidity. The causes of this change of vegetation are:

1. Divergence caused by different frictional resistance of the trade winds over sea and land. This divergence brings about a subsidence of air over the coastal fringe from the overlying air layers preventing the formation of rainfall.
2. Subsidence of air after passing over the mountains near the coast.
3. Stress-differential induced divergence and the stabilizing of air in connection with the alternating land and sea breezes.
4. Dry katabatic winds, which occur during the dry season in the Piedras-Manzanares valley system and bring about high saturation deficits and high wind speeds causing high potential evapotranspiration.

ZUSAMMENFASSUNG:

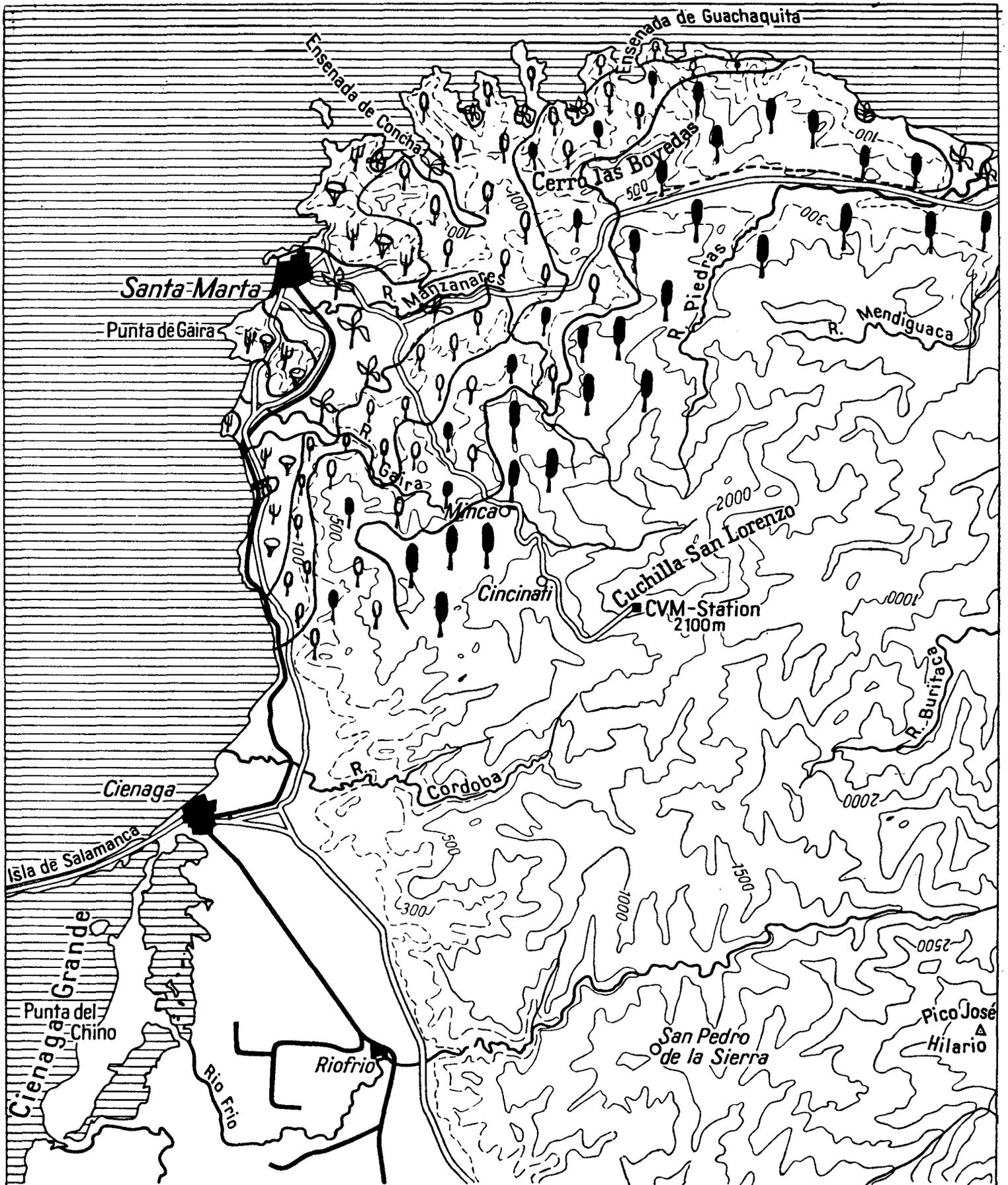
Im Küstengebiet von Santa Marta/Kolumbien findet ein sehr rascher Wechsel von einem große Trockenheit anzeigenden trockenkahlen sukkulentenreichen Laubgebüsch zu einem feuchten immergrünen tropischen *Saisonwald* statt. Die Ursachen für diesen Vegetationswechsel sind.

1. Horizontale Strömungsdivergenzen in der Passatströmung infolge unterschiedlicher Reibungskoeffizienten über der See und dem Land. Diese Divergenzen erzwingen ein Nachsinken von Luft aus den oberen Luftschichten über dem Küstengebiet, wodurch die Niederschlagsbildung gehemmt wird.

2. Absinkbewegung in der Luft nach dem Überströmen der küstennahen Gebirge.
3. Horizontale Strömungsdivergenzen und Stabilisierung der Luft im Zusammenhang mit tagesperiodischen Winden im Küstensaum.
4. Föhnartige Fallwinde, die während der Trockenzeit im Piedras-Manzanares Talsystem entstehen und aufgrund hoher Sättigungsdefizite und Windgeschwindigkeiten eine hohe potentielle Evapotranspiration erzeugen.

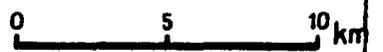
BIBLIOGRAFIA

- ANDERSON, R. et al.: Application of Meteorological Satellite Data in Analysis and Forecasting. *ESSA Technical Report NESG 51* (1969) 4 B 4.
- BRYSON, R. A. u. P. M. KUHN: Stress-differential Induced Divergence with Application to Littoral Precipitation. *Erdkunde*, 15 (1961) 287-294.
- DEFANT, F.: Theorie der Land-und Seewinde. *Arch. Meteor. Geophys. Bioklimat. A*, 1 (1949) 404-425.
- FAUST, H.: *Der Aufbau der Erdatmosphäre*. Braunschweig. (1968) 1-307.
- HASTENRATH, S.: On General Circulation and Energy Budget in the Area of the Central American Seas. *J. Atm. Sci.*, 23 (1966) 694-711.
- HASTENRATH, S.: Rainfall Distribution and Regime in Central America. *Arch. Meteor. Geophys. Bioklimat. B*, 15 (1967) 201-241.
- HERRMANN, R.: Deutungsversuch der Entstehung der "Brisa", eines föhnartigen Fallwindes der nordwestlichen Sierra Nevada de Santa Marta, Kolumbien. *Mitt. Inst. Colombo-Alemán Invest. Cient.*, 4 (1970) im Druck.
- HERRMANN, R.: Zur regionalhydrologischen Analyse und Gliederung der nordwestlichen Sierra Nevada de Santa Marta (Kolumbien). *Hab. —Schr. Nat.—Wiss. Fak. Univ. Gießen* (1969) 1-170.
- HIDAKA, K.: Divergence of surface drift currents in terms of wind stresses, with special application to the location of upwelling and sinking. *Japan. J. Geophys.*, 1 (1955) 47-56.
- LAHEY, J. F.: On the origin of dry climate in northern South America and the Southern Caribbean. *Dept. Meteor. Univ. Wisconsin, Sci. Rep.*, 10 (1958) 1-290.
- MAEDE, H.: Strömungsdivergenz als Ursache für Niederschlagsarmut der südlichen Ostsee. *Z. Meteor.*, 5 (1951) 26-30.
- NEUMANN, G.: Über den Tangentialdruck des Windes und die Rauigkeit der Meeresoberfläche. *Z. Meteor.*, 2 (1948) 193-203.
- PRAGER, E.: Der Niederschlag auf See und an der Dünenflachküste. *Ann. Meteor.*, 5 (1952) 259-267.
- PÉREZ, C.: Estudio ecológico para el manejo de las cuencas de los ríos Gaira y Manzanares de la Sierra Nevada de Santa Marta. *Rev. ACODAL*, 15 (1962) 6-71.
- PRANDTL, L.: *Führer durch die Strömungslehre*. Braunschweig (1942) 1-345.
- SCHNETTER, R.: Die Vegetation des Cerro San Fernando und des Cerro La Llorona im Trockengebiet bei Santa Marta, Kolumbien. *Ber. dt. Bot. Ges.* 81 (1969) 289-302.
- SCHOTT, G.: Kaltes Wasser vor der Küste von Venezuela und Kolumbien. *Ann. Hydr.*, 59 (1931) 224-227.
- TROJER, H.: Fundamentos para una zonificación meteorológica y climatológica del trópico especialmente de Colombia. *Cenicafé, Bol. Inform. Centr. Nac. Invest. Café*, 10 (1959) 289-373.
- TROLL, C.: Die Lokalwinde der Tropengebirge und ihr Einfluß auf Niederschlag und Vegetation. *Bonner Geogr. Abh.* 9 (1952) 124-182.
- UNITED STATES NAVAL OCEANIC OFFICE: *Pilot Charts of the North Atlantic Ocean*. August 1967 - August 1968. Washington 1967-1968.
- WAGNER, A.: Theorie und Beobachtung der periodischen Gebirgswinde. *Gerlands Beitr. Geophys.*, 52 (1938) 408-449.
- WEISCHET, W.: Klimatologische Regeln zur Vertikalverteilung der Niederschläge in Tropengebirgen. *Z. Ges. Erdkde*, 100 (1969) 287-306.



Formaciones vegetales cerca de la costa

- | | | | |
|---|---|---|---------------------------------|
|  | Rastrojo con follaje, rico en especies suculentas periodicamente seco con hojas caducas |  | Bosque estacional siempre verde |
|  | Bosque periodicamente seco con hojas caducas |  | Asociaciones de los valles |
|  | Bosque tropical parcialmente verde (semi-decيدuo) |  | Carreteras |
| | |  | Ferrocarriles |



Precipitación promedio anual (año hidrológico 1967)

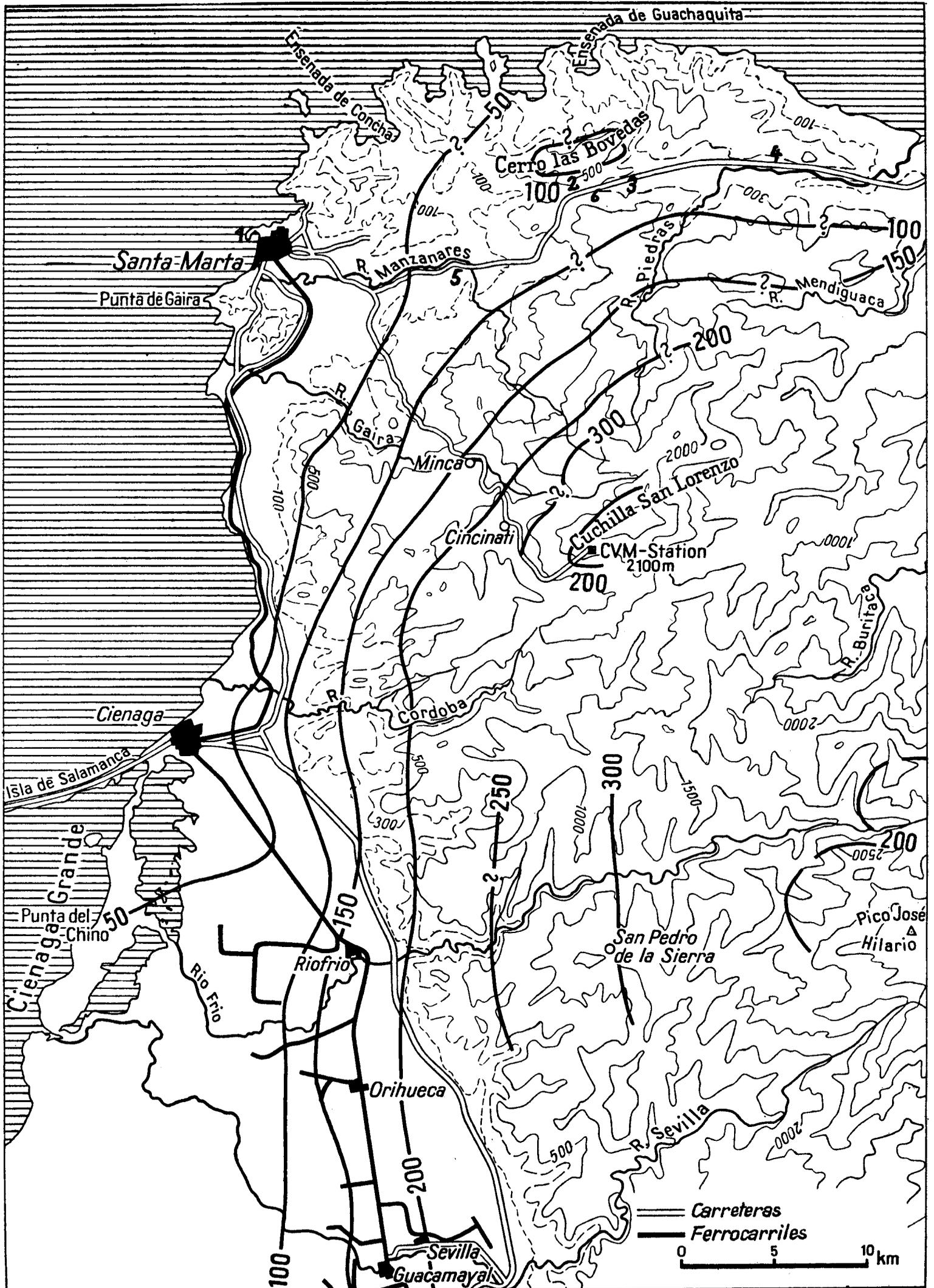


FIGURA 2.

Divergencia horizontal (+) y convergencia horizontal (-) de la corriente de aire

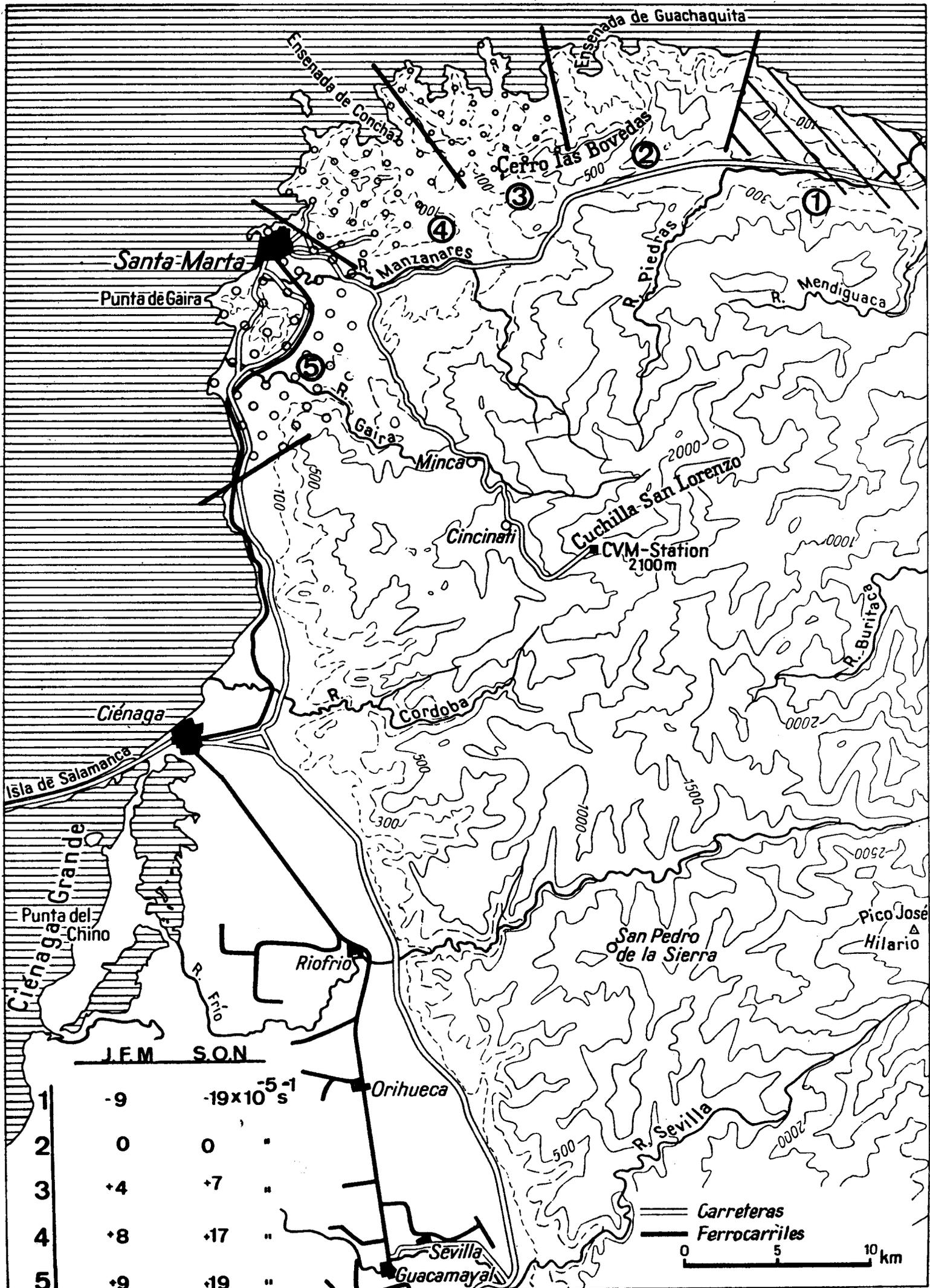


FIGURA 3.

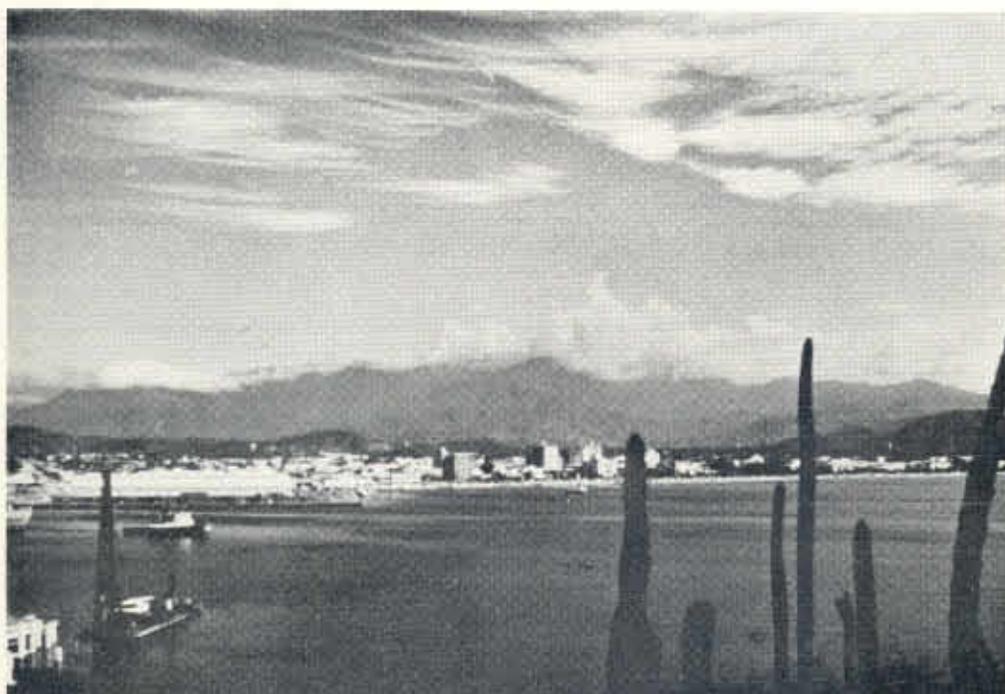


FIGURA 4. Nubes sobre la Sierra Nevada:19 - 12 - 1967.

1. Izquierda: una "Föhnmauer" bajo una inversión atmosférica.
2. Derecha: nubes de convección.
3. Arriba: nubes lenticularis.

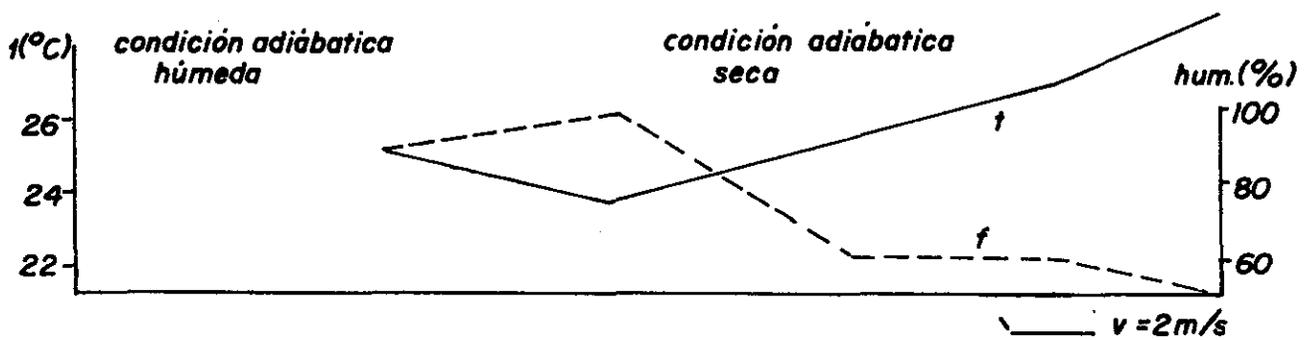
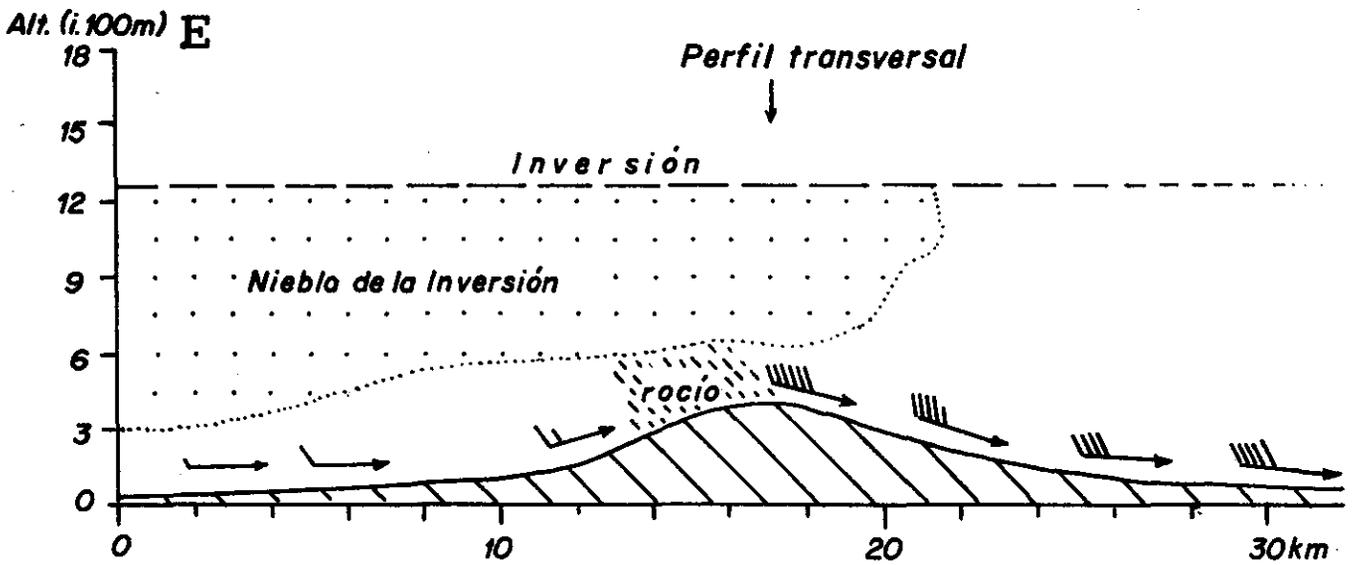
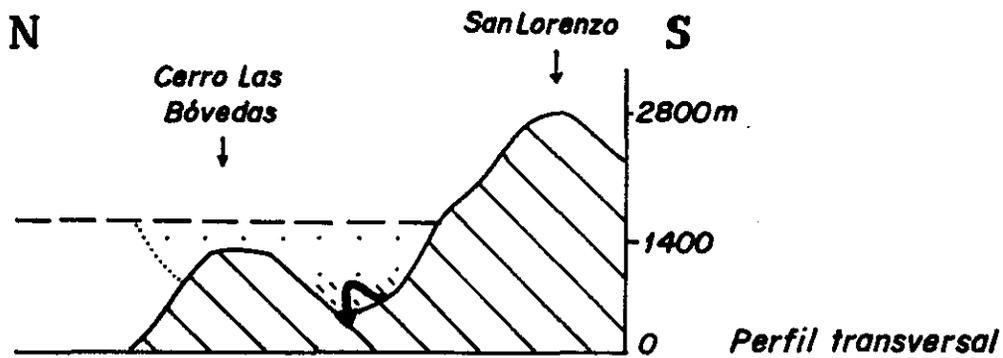


FIGURA 5.