

INFLUENCIA DE LA PROPAGACION ANOMALA EN LAS OBSERVACIONES DE RADAR

Ernesto H. Berbery y Armando Brizuela

CONSEJO NACIONAL DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS Y TECNICAS

COMISION NACIONAL DE INVESTIGACIONES ESPACIALES

RESUMEN

En condiciones de super-refracción suelen presentarse anomalías en las pantallas de radar, debido a que la energía del radar se propaga siguiendo una trayectoria curva, la cual puede alcanzar o superar la curvatura de la superficie terrestre, ocasionando así la aparición de ecos de segundo barrido y aumento del tamaño de ecos, sean de terreno o nube. Se estudió la ocurrencia de estos casos (llamados "conductos") y su influencia en las tareas de observación del Programa Nacional de Lucha Antigranizo.

Se usaron los datos de 546 sondeos de las últimas 5 temporadas, además de la información de las películas de radar y datos de precipitación de la mesorred ubicada en la zona de estudio.

No se consideraron conductos originados por descendente de tormenta.

Se hallaron 40 casos de conducto, y su distribución durante el día presenta un mínimo en horas vespertinas. Los casos de conducto en capas bajas se presentan en los sondeos de la mañana y los elevados indistintamente a la mañana o a la tarde, lo cual es coherente con el origen de la inversión que los produce: De radiación para los primeros y de subsidencia para los segundos.

Se halló que la frecuencia de formación de conductos es 7,3%, de los cuales el 17,3% está asociado con eventos convectivos y que los ángulos máximos para los cuales existe conducto, son menores a $0,5^\circ$. Las conclusiones principales son que estos conductos estarían asociados con tiempo bueno y que no influyen en las observaciones de radar.

ABSTRACT

In super-refraction conditions, anomalies often appear on the radar

screens since the radar energy propagates following a curved trajectory which can equal or even surpass the earth's surface curvature producing in this way the appearance of second scan echoes and enlarging the echoes size (ground or cloud echoes). The occurrence of these cases, (called "ducts") and their effect on the observation tasks of the National Hail Suppression Programme was studied.

Data from 546 soundings of the last 5 summer campaigns were used, as well as information from radar films and rain data from the mesonetwork - placed in the study area.

Ducts due to storm downdraft were not taken into consideration.

40 duct occurrences were found and their day distribution presents a minimum in the evening. Low layer ducts are seen in the morning soundings and the elevated ones in the morning or the afternoon indistinctly, which agrees with the origin of the inversion that produces them: Radiation for the first ones and subsidence for the second ones. It was found that the ducts formation frequency is 7,3% from which only 17,3% is associated with convective events, and that the maximum angles for which a duct exists are smaller than $0,5^\circ$. The principal conclusions are that ducts would be associated with fine weather and they do not influence radar observations.

1. INTRODUCCION

1.1 Presentación del problema y objetivos.

La propagación de ondas electromagnéticas en la atmósfera, emitidas por un radar meteorológico, está influenciada por la distribución espacial y temporal del índice de refracción. El efecto de la variación vertical del índice - provoca una desviación respecto a la propagación lineal. En una atmósfera standard se produce un curvamiento del haz hacia abajo, pero en la atmósfera real - puede curvarse en mayor o menor grado que en el caso standard, dando lugar en el primer caso a lo que se llama super-refracción y en el segundo a la subrefracción, con el consiguiente error en la medición de las alturas.

En los casos de super-refracción, si la curvatura del haz [igual a o supera a la curvatura de la Tierra, la energía emitida se verá "atrapada" en una

capa permitiendo al radar observar objetos más lejanos que en condiciones normales (Battan, 1973). Esto es lo que se llama un "conducto".

Este tipo de fenómenos da lugar a la aparición en la pantalla de radar de ecos anómalos, como ser aumento en cantidad y tamaño de los ecos de terreno, aparición de ecos de blancos que se encuentran más allá del rango habitual de trabajo del radar, etc.

Por todo esto se vio la necesidad de estudiar el fenómeno, teniendo como objetivos conocer: a) las condiciones bajo las cuales se forman los conductos, clasificarlas y ver su importancia en las distintas anomalías mencionadas anteriormente; b) las modificaciones en las alturas por curvatura del haz; y c) las influencias en las tareas operativas y de investigación.

1.2 Índices de refracción

Las ecuaciones empleadas en la determinación de los distintos índices de refracción atmosférica son las que se detallan a continuación.

El índice de refracción (n):

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

dónde: c: velocidad de la energía electromagnética en el vacío.

v: velocidad de la energía electromagnética en la atmósfera.

Cuando se trabaja en la atmósfera suele ser más cómodo emplear el índice refractivo, dado por la ecuación:

$$N = (n-1) \times 10^6 \quad (2)$$

Para el cual se ha determinado que en una atmósfera húmeda vale:

$$N = 77,6 \frac{P}{T} - 5,6 \frac{e}{T} + 3,75 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (3)$$

dónde: P: presión atmosférica (mb); T: temperatura (°K); e: presión de vapor (mb)

Se suele modificar el índice refractivo N, de manera de poder identificar los conductos y sus características más fácilmente. Para ello se define el índice de refracción modificado, M, como:

$$M = \frac{Z}{R} \times 10^6 + N \quad (4)$$

con: Z=altura sobre la superficie terrestre; R=radio de la tierra.

De la ecuación general para la trayectoria del haz en la atmósfera (Battan, 1973), se puede obtener la relación entre el ángulo θ_z (formado por la tangente al haz y la horizontal) y el índice de refracción modificado, a la altura Z. Esto es:

$$\theta_z = \sqrt{\theta_0^2 + 2(M_z - M_0) \cdot 10^{-6}} \quad (5)$$

De esta ecuación se ve que, si para una dada capa el M en el tope es menor que en la base, el ángulo superior será menor que el inferior. Por lo tanto existirá en este caso un ángulo $\theta_0 = (\theta_0)_{MAX}$ para el cual $\theta_z = 0$. Esto indica que para cualquier $\theta_0 < (\theta_0)_{MAX}$ la energía emitida quedará confinada en esa capa. Esto puede ocurrir cuando hay una fuerte disminución de humedad con la altura combinada con una isoterma o un aumento de la temperatura con la altura.

El $(\theta_0)_{MAX}$ se obtiene a partir de la ecuación (5), en la cual se toma la condición $\theta_z = 0$:

$$(\theta_0)_{MAX} = \sqrt{2(M_0 - M_{min}) \times 10^{-6}} \quad (6)$$

2. TECNICAS EMPLEADAS

2.1 Descripción del programa

El programa empleado para los cálculos de este trabajo, tiene como base la rutina de interpolación que para otros fines emplearon Weinstein y Davis (1968). En él se tiene como datos de entrada a la presión, la temperatura y la temperatura de rocío (T_d) o la humedad relativa, de los niveles standard y significativos de los radiosondeos.

En base a estos datos se interpola linealmente en cada capa a las siguientes variables: logaritmo de la presión, temperatura y humedad relativa. El proceso es hecho entre superficie y 4000 metros. El límite de altura se eligió debido a que a esa altura ya prácticamente no hay posibilidad de formación de cond ductos.

El paso siguiente es calcular los valores de dichas variables cada 20 metros. Luego calcula para cada nivel a partir de estos datos las siguientes variables: presión de vapor (e), presión de vapor de saturación (e_s), índice refractivo (N) y su error (ΔN), índice de refracción modificado (M) y gradiente ver-

tical del mismo ($\Delta M / \Delta Z$), imprimiendo en una matriz: presión, altura, temperatura, humedad relativa, presión de vapor, índice refractivo y su error, índice de refracción modificado y su gradiente vertical.

En base a esta información el programa provee: a) gráfico de los - perfiles de T, T_d y M; b) identificación de una inversión en M y en caso de existir, cálculo del ángulo máximo para ese conducto.

2.2. Trazado de rayos.

Para estudiar los errores en las alturas por curvatura del haz, se partió de una atmósfera estratificada verticalmente en la cual se consideró que el cuadrado del índice de refracción varía linealmente con la altura. Esta suposición está justificada ya que los coeficientes de correlación de los casos analizados fueron superiores a 0.97.

Aplicando la Ley de Snell con las condiciones mencionadas anteriormente se puede llegar a la ecuación:

$$Z = x \operatorname{tg} \theta_0 - \frac{ax^2}{4n_0^2 \cos^2 \theta_0} \cdot 10^{-6} \quad (7)$$

donde el origen del sistema de coordenadas está en la antena del radar, y x= distancia horizontal; θ_0 = ángulo de elevación de la antena; n_0 = índice de refracción en superficie; a= pendiente de la recta $n^2 = aZ + n_0^2$

2.3 Datos utilizados

Se dispuso de 546 sondeos cuya distribución horaria y mensual se muestra entre paréntesis en la tabla I. Dichos sondeos son parte de los que se hicieron en 5 campañas del Programa Nacional de Lucha Antigranizo (PNLAG) en la estación El Plumerillo de Mendoza a las 00:00 TMG (21 hora local), 12:00 TMG (9 hora local) y 18:00 TMG (15 hora local). Cada campaña cubre el período de octubre a marzo.

Se contó además con fotografías de radar. Sólo se usaron aquellas que reúnan las condiciones necesarias para el análisis y que comprenden una - parte de la temporada 77/78, cuando el radar estaba instalado en El Challao. La determinación de días y horas en que se produjo precipitación se realizó a par-

tir de los datos de la mesorred ubicada en la zona de estudio.

3. RESULTADOS

Los resultados aquí descritos se basan en la información de radio-sondeos ya comentada. No han sido detectados los casos de conducto debidos a tormentas, que son un fenómeno más local (De este tipo de conducto se describe un solo caso, el que debió ser analizado con otra técnica).

3.1. Estadística de los resultados

3.1.1. Frecuencias horarias y mensuales. De la muestra considerada se obtuvieron 40 casos en los cuales había conducto. Su distribución por mes y hora de sondeo se puede ver en la tabla 1.

Se observa que el número de conductos encontrados representa el 7,3% de los casos considerados.

De todos los sondeos de 12:00 TMG, hay un 9,3% que presentan conducto mientras que para las 18:00 TMG, un 7,2% lo tienen. En cambio para las 00:00 TMG el porcentaje se reduce al 1,3%.

Obsérvese que para los sondeos de 12:00 TMG, en los meses de enero y febrero la proporción de conductos es marcadamente inferior al 10% mientras que para el resto de los meses los valores son mayores. Para los sondeos de 18:00 TMG, no se observa una particularidad definida, ya que las proporciones oscilan alrededor del 7%.

3.1.2. Distribución de alturas y ángulos. En la figura 1(a), pese a la cantidad de datos considerados (40), ya aparece una distribución bimodal, con una moda entre 0 y 600 m y la otra entre 2400 y 3000 m.

Al separar las distribuciones por horas (figura 1 (b) y (c)) se observa que cada uno de esos máximos corresponde a la distribución de las 12:00 TMG y 18:00 TMG respectivamente, es decir que a la mañana hay un mayor número de conductos en superficie (sin que por esto el número de conductos en altura deje de ser importante), en tanto que a la tarde, todos los conductos salvo uno están a más de 1200 m.

La distribución de ángulos máximos correspondientes a los conductos

calculados con la ecuación (6), es semejante a una distribución exponencial (ver figura 2 (a)) y de hecho se comprobó que así es al ajustarla por la función de densidad:

$$f(\theta) = \frac{e}{\bar{\theta}} e^{-\theta / \bar{\theta}} \quad \text{donde: } \bar{\theta} = 0,14$$

El test χ^2 dio que eran similares al nivel de 37%, es decir muy por encima del nivel de significancia de 10%. No se observan diferencias entre los histogramas de 12 TMG y 18 TMG por separado (figura 2 (b) y (c)), también comprobado con el test χ^2 , el que dio $P \approx 34\%$, es decir que ambas distribuciones son similares al nivel de 10%. En cambio se encuentra alguna diferencia al clasificar los ángulos de acuerdo a la altura del conducto (figura 2 (d) y (e)). Con el uso del test χ^2 se comprobó que la similitud se rechaza al nivel del 5%.

En estas figuras se observa que los conductos de altura en su gran mayoría tienen ángulos menores que $0,2^\circ$ en cambio en las capas inferiores hay más frecuencia de ángulos mayores, pese a que no sobrepasaron los $0,5^\circ$.

Los resultados de 3.1.1. y 3.1.2. son coherentes con el origen de la inversión que los produce: De radiación para los de superficie y de subsidencia para los de altura.

3.2. Casos de conductos y tormentas.

En el conjunto de conductos encontrados (40), se observó que el 17% correspondía a sondeos representativos de eventos convectivos y el resto (83%) a sondeos no vinculados a ese tipo de fenómenos.

Hasta aquí se ha hecho referencia a conductos que tienen su origen en inversiones de subsidencia o radiación. El caso particular de inversión y conducto debido a la corriente descendente de una tormenta es un fenómeno más breve en el tiempo (del orden de una hora) y del cual en base a la información utilizada se pudo hallar un solo caso, para el que se hizo un análisis de las fotografías de radar y secuencia horaria de las variables involucradas siguiendo el método aplicado por Quinteros de Menzies y Di Lorenzo (1978).

Ese caso se produjo el día 6 de febrero de 1978, debido a una tormenta ubicada al este del radar (figura 3 (e) y (f)). En esa misma región, y con el

radar ubicado en El Challao, habfa una amplia zona de ecos de terreno, la cual fue aumentando su tamafo durante la evoluci3n de la tormenta, como se ve en la figura 3 (a) a (d).

La secuencia horaria de presi3n, temperatura y humedad en El Plumerrillo, evidencian la influencia de la descendente (figura 4, (b), (c) y (d)), de donde al calcular el ndice refractivo, se observ3 su aumento en 20 unidades-N para el mismo perodo (fig. 4 (a)).

En el sondeo correspondiente a las 21:00 H0A no aparece la inversi3n de M, probablemente porque en ese lugar ya se habfa debilitado por mezcla, pero no ocurre lo mismo en el resto de la regi3n donde perdura la situaci3n.

3.3 Errores en las alturas por curvatura del haz.

De los 40 casos con conducto, se tomaron los sondeos que tenfan valores extremos en el ndice de refracci3n para cada tipo de conducto. Sus valores aplicados en la ecuaci3n (7) permitieron obtener las curvas mostradas en la figura 5.

Los errores en las alturas medidas por el radar (con elevaci3n de 1°) debido a variaciones en n , junto con los que se cometen por curvatura de la Tierra y tambi3n por ancho de haz, supuesto que la antena del radar tenga un 3ngulo de apertura de 1,5°, se muestra en la tabla siguiente:

DISTANCIA	100 Km	125 Km	200 Km
ΔZ (n)	100 m	160 m	410 m
ΔZ (curvatura de la Tierra)	780 m	1220 m	3120 m
ΔZ (ancho del haz)	1300 m	1640 m	2600 m

Es evidente de aquf que los errores por variaci3n del ndice de refracci3n son menos del 10% que los errores debidos a ancho del haz, para el rango m3ximo del radar F P S -18 (125 Km).

4. CONCLUSIONES

Del an3lisis de los resultados obtenidos se encontr3 que:

- a) Existe una baja frecuencia de formaci3n de conductos (7,3%), acentu3ndose esta

- característica en las horas vespertinas (1,3%).
- b) Los conductos de superficie son hallados en los sondeos matutinos, mientras que los elevados tienen mayor frecuencia de aparición hacia la tarde.
 - c) En ningún caso los ángulos máximos de elevación de antena, para los cuales existe conducto, son mayores que $0,5^\circ$.
 - d) La mayoría de los conductos se produjeron con sondeos no representativos de eventos convectivos (83%).

Estos resultados sugieren (con las limitaciones dadas por el tamaño de la muestra) que la producción del tipo de conductos estudiados está vinculada con situaciones de buen tiempo. Esto coincide con los resultados de otros autores (Quinteros de Menzies y Di Lorenzo, 1978), que asocian a los ecos anómalos con fenómenos de buen tiempo. No se incluye aquí a los conductos producidos por descendentes de tormentas, de los cuales se estudió un solo caso. Este parece ser más intenso que los que tienen su origen en inversiones de subsidencia o radiación. Asimismo podría ser motivo de otro estudio ya que la experiencia demuestra que son los que más afectan en la observación de tormentas.

- e) El error debido a curvatura del haz por variación del índice de refracción es despreciable frente a los errores típicos de las mediciones de radar, de lo que se concluye que los conductos del tipo de los estudiados no influyen en las observaciones de radar ya sea para fines operativos o de investigación.

BIBLIOGRAFIA

- Battan, L.J., 1973; Radar Observation of the atmosphere; University of Chicago Press
- Bean, D.R. y Dutton, E.J., 1966; Radio Meteorology; National Bureau of Standards, Washington
- Quinteros de Menzies, C.Y. y Di Lorenzo, N.L., 1978; Ecos de ángeles en la pantalla de un radar; Meteorológica, 8 y 9, 487-496
- Weinstain, A. y Davis, L., 1968; A parameterized numerical model of cumulus convection. Rept. 11 NSF Grant GA-777, Pennsylvania State University.

T A B L A I

MES HORA (TNG)	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	ENERO	FEBRERO	MARZO	TOTAL
0	0 (8)	0 (6)	0 (16)	0 (22)	1 (14)	0 (9)	1 (75)
12	3 (19)	3 (26)	7 (41)	1 (67)	4 (56)	4 (26)	22 (235)
18	1 (24)	3 (26)	3 (39)	4 (57)	4 (64)	2 (26)	17 (236)
TOTAL	4 (51)	6 (58)	10 (96)	5 (146)	9 (134)	6 (61)	40 (546)

DISTRIBUCION DE CONDUCTOS POR HORA Y MES EN LA MUESTRA CONSIDERADA.
ENTRE PARENTESIS, CANTIDAD DE SONDEOS QUE FORMAN LA MUESTRA.

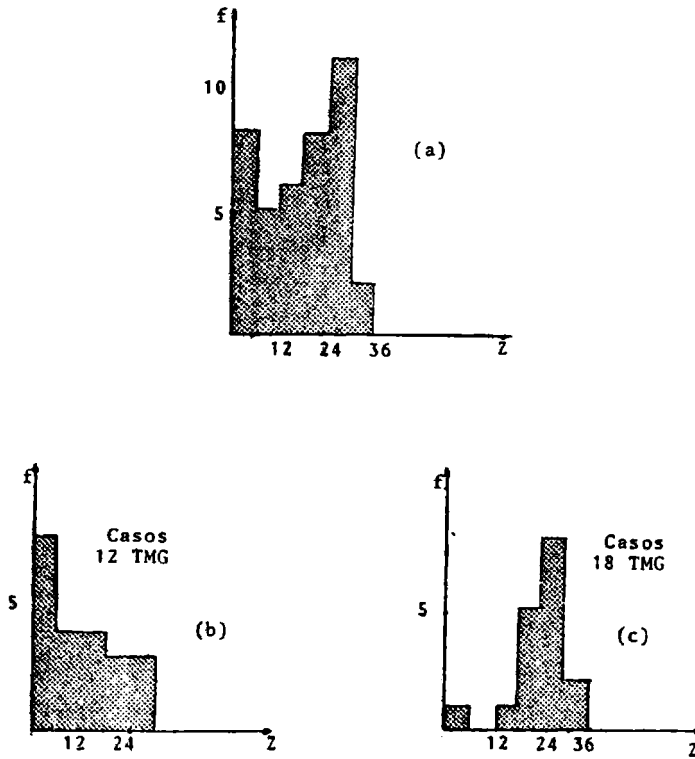


FIGURA 1 . Histogramas de alturas de conductos

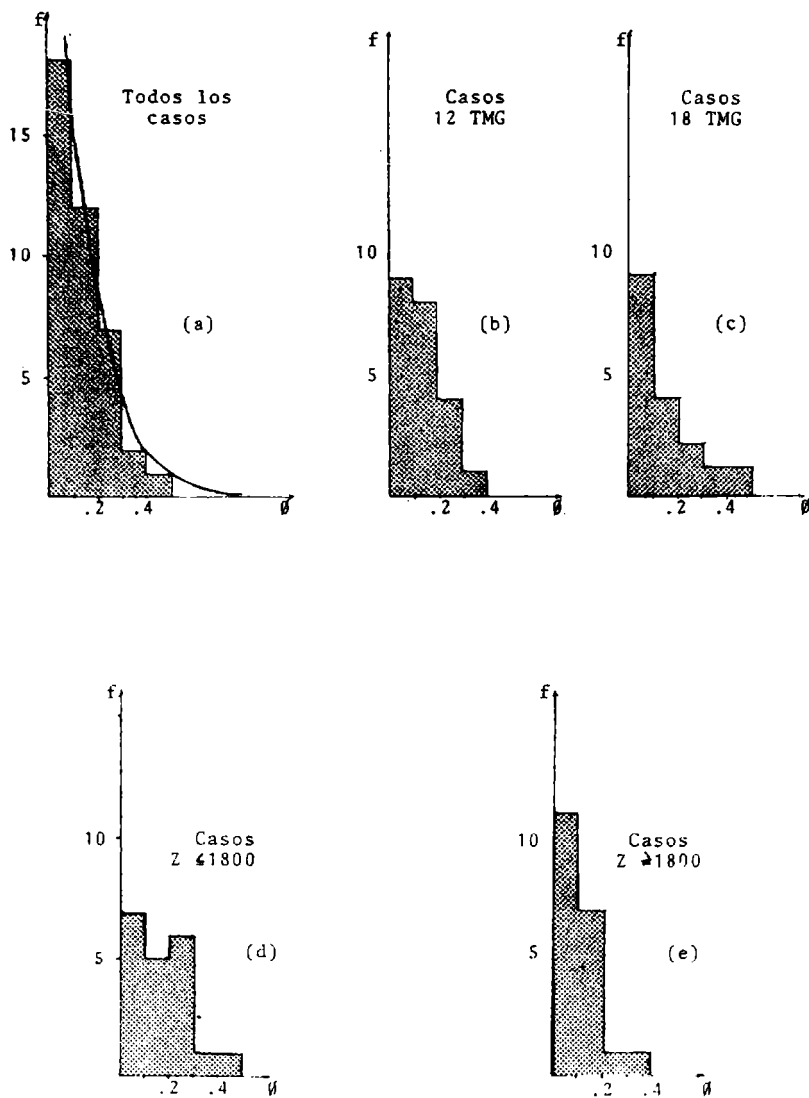


FIGURA 2. Histogramas de ángulos máximos

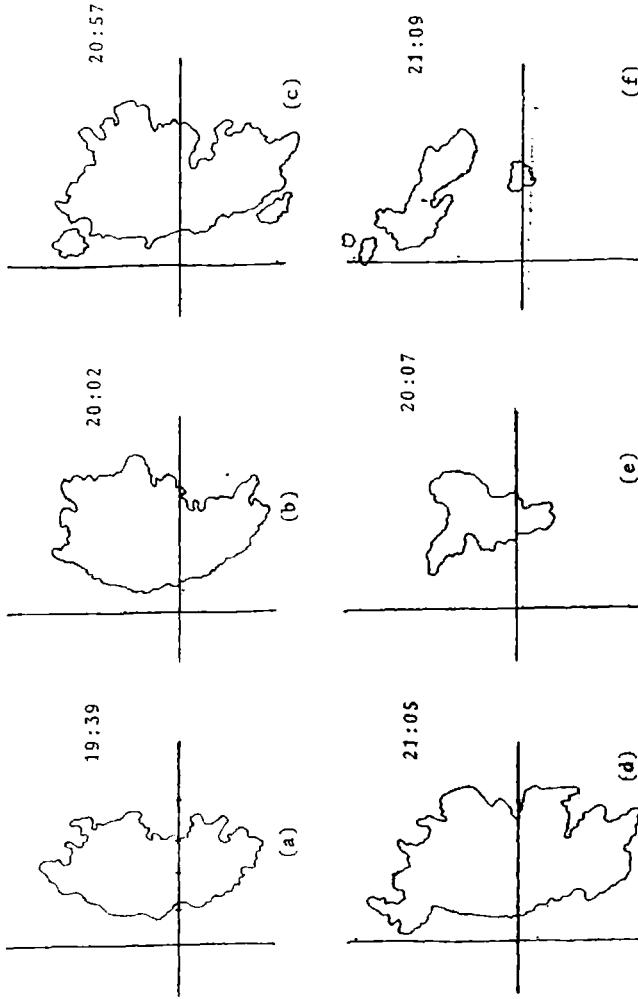


FIGURA 3. (a),(b),(c),(d): Ecos de terreno a 2° de elevación
(e),(f): Ecos de nube a 5° de elevación

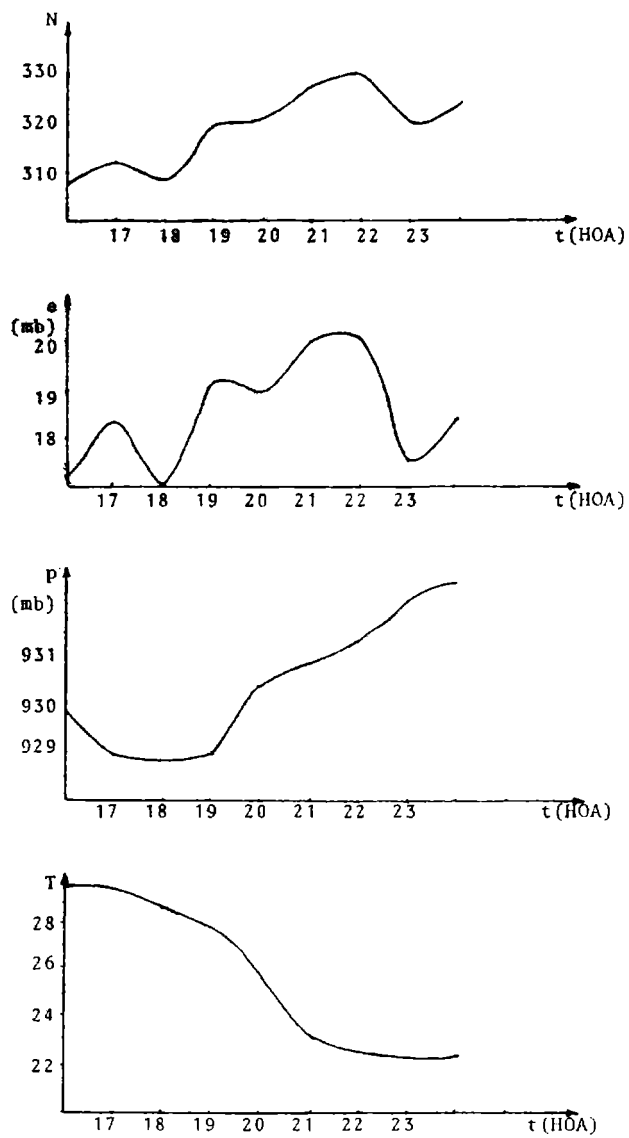


FIGURA 4. Día 6-2-1978

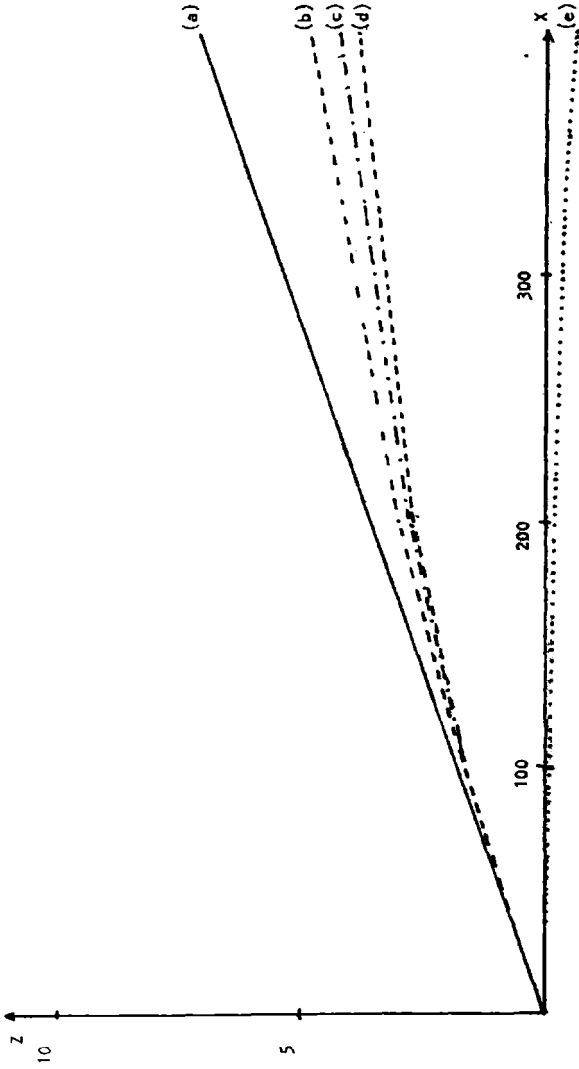


FIGURA 5. Trayectorias del haz del radar con 1° de elevación de antena

- (a): Atmósfera homogénea (índice de refracción constante)
- (b): Atmósfera con gradiente de M igual a $518/4000$ m
- (c): Atmósfera standard con gradiente de M igual a $472/4000$ m
- (d): Atmósfera con gradiente de M igual a $457/4000$ m
- (e): Curvatura de la Tierra

