

T.S-9(1/2)

R. 317

U N I V E R S I D A D   D E   S E V I L L A

FACULTAD DE FISICA - DEPARTAMENTO DE OPTICA

DETERMINACION Y ESTUDIO DE ALGUNAS VARIABLES

DE ELECTRICIDAD ATMOSFERICA EN SEVILLA

VOLUMEN I

Memoria presentada para aspirar  
al Grado de Doctor en Ciencias  
Físicas por  
JUAN LEAL GALBIS

Sevilla, 1980

UNIVERSIDAD DE SEVILLA  
FACULTAD DE FISICA  
SECRETARIA

14-11-80

ENTRADA N.º 408



R.317

U N I V E R S I D A D D E S E V I L L A

FACULTAD DE FISICA - DEPARTAMENTO DE OPTICA

DETERMINACION Y ESTUDIO DE ALGUNAS VARIABLES

DE ELECTRICIDAD ATMOSFERICA EN SEVILLA

MEMORIA presentada para aspirar  
al grado de Doctor en Física,



JUAN LEAL GALBIS

Licenciado en Ciencias Físicas

EL DIRECTOR



RAFAEL MARQUEZ DELGADO  
Catedrático-Director del  
Departamento de Optica

EL CO-DIRECTOR



VICENTE HERNANDEZ MONTIS  
Profesor Agregado de "Optica y  
Estructura de la Materia"

Sevilla, 1980

A la memoria del Dr. L. Koenigsfeld



Deseo expresar mi sincero agradecimiento al Prof. Dr. D. Rafael Márquez Delgado y al Prof. Dr. D. Vicente Hernández Montis, Director y Co-director, respectivamente del presente trabajo por el gran interés y valiosas sugerencias a lo largo de su realización.

Quiero testimoniar igualmente mi gratitud al Dr. D. Manuel Ruiz Hoyos, Jefe del Servicio Regional de Meteorología por su colaboración y facilidades al poner a nuestra disposición algunos datos que figuran en ésta Memoria.

A D. Manuel Lozano Linares por su colaboración en las medidas experimentales.

A todos los compañeros del Departamento en los que siempre he encontrado la ayuda que necesitaba.

A la Srta. Mencos y a los Sres. Velázquez e Hidalgo por su eficaz ayuda en la confección de esta Memoria.

Al Centro de Cálculo de esta Universidad por las facilidades y apoyo al gran volumen de cálculos que hemos llevado a cabo.

# I N D I C E

## VOLUMEN I

Pág.

I.	INTRODUCCION .....	8
II.	ANTECEDENTES HISTORICOS .....	12
	II.1. Primeros descubrimientos .....	13
	II.2. Período electrostático .....	15
	II.3. Período moderno .....	20
III.	OBJETO DEL TRABAJO Y PLAN GENERAL DEL MISMO .....	23
IV.	ESTADO ELECTRICO DE LA ATMOSFERA .....	26
	IV.1. Intensidad .....	26
	IV.2. Conductividad .....	35
	IV.3. Corriente aire-tierra .....	45
	IV.4. Carga volumétrica .....	48
V.	SISTEMAS DE MEDIDA .....	53
	V.1. Intensidad del campo, densidad de corriente aire-tierra y conductividad .....	53
	V.2. Densidad de carga volumétrica .....	58
	V.3. Medida directa de la conductividad por el método de Gardien .....	61
VI.	DESCRIPCION DE LAS INSTALACIONES .....	64

VI.1.	Zona urbana: Edificio de la Universidad .....	62
	- Sistema de medida de $\underline{E}$ y $\underline{J}$ .....	62
	- Determinación de $\underline{\rho}$ .....	67
	- Montaje del registro continuo .....	68
	- Contaminación atmosférica y velocidad del viento .....	69
	- Aparato de Gerdien para la medida de $\underline{\Lambda}$ ..	71
VI.2.	Zona rural: Finca del término de La Algaba (Sevilla) .....	72
VII.	SISTEMATICA DE LAS MEDIDAS .....	78
VIII.	PRECISION DE LAS MEDIDAS ELECTRICAS .....	82
VIII.1.	Intensidad del campo .....	82
VIII.2.	Densidad de corriente aire-tierra .....	83
VIII.3.	Conductividad .....	84
VIII.4.	Densidad de carga volumétrica .....	86
VIII.5.	Empleo del registro gráfico .....	86
IX.	MEDIDAS REALIZADAS Y CLASIFICACION DE LAS MISMAS .	90
IX.1.	Zona urbana .....	90
IX.2.	Zona rural .....	96
X.	RESULTADOS .....	99
X.1.	Zona urbana.....	99

	<u>Pág.</u>
1) Días no perturbados .....	107
2) Días perturbados .....	112
- Relaciones empíricas entre parámetros eléctricos .....	117
1) Días no perturbados .....	117
2) Días perturbados .....	120
X.2. Valores medios de las variables .....	120
1) Días no perturbados .....	121
2) Días perturbados .....	126
X.3. Influencia de la dirección del viento ..	128
X.4. Representaciones gráficas .....	131
X.5. Registro continuo del potencial eléctrico co .....	140
X.6. Medidas simultáneas de la conductividad polar $\Lambda_+$ .....	146
X.7. Nuevas correlaciones $E-w$ , $E-M_R$ y $M_R-w$ .	152
X.8. Medidas simultáneas del campo eléctrico en dos estaciones próximas .....	153
X.9. Expresión del contenido del aire en par- tículas en suspensión como función de la conductividad .....	159
- Obtención de $Z$ a partir de $\Lambda_+$ .....	159
- Relación entre $M$ y $Z$ .....	162

	<u>Pág.</u>
X.10. Zona rural .....	169
- Correlaciones entre las variables ....	171
XI. INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS .....	176
XI.1. Zona urbana .....	177
- Correlaciones entre los valores indi-	
viduales de las variables .....	177
- Correlaciones entre los valores me-	
dios .....	193
XI.2. Zona rural .....	195
XI.3. Medidas simultáneas de $\Lambda+$ .....	197
XI.4. Conductividad y contaminación .....	199
XI.5. Registro continuo del potencial eléctri-	
co del aire .....	202
XI.6. Representaciones gráficas utilizando va-	
lores medios .....	206
XI.7. Medidas simultáneas del campo .....	209
XII. CONCLUSIONES .....	211
XIII. BIBLIOGRAFIA .....	217
APENDICES	
I. FUNDAMENTO DEL APARATO DE GERDIEN.....	225
II. DETERMINACION DE LA CAPACIDAD <u>C</u> .....	230

TABLA 1.	MEDIDAS REALIZADAS EN LA AZOTEA DE LA UNIVERSIDAD.....	4
TABLA 10.	VALORES MEDIOS DE LAS SERIES DE LA AZOTEA DE LA UNIVERSIDAD.....	53
TABLA 15.	MEDIDAS SIMULTANEAS DE LA CONDUCTIVIDAD POLAR $\Lambda_{+}$ ENCONTRANDOSE EL CILINDRO DE GERDIEN EN EL INTERIOR DE LA CASETA 1.....	67
TABLA 16.	MEDIDAS SIMULTANEAS DE LA CONDUCTIVIDAD POLAR $\Lambda_{+}$ ENCONTRANDOSE EL CILINDRO DE GERDIEN SOBRE EL TECHO DE LA CASETA 1.....	79
TABLA 17.	MEDIDAS REALIZADAS EN LA ALGABA.....	84
FIGURAS 30 a 171.	REGISTRO CONTINUO DEL CAMPO ELECTRICO.	96
FIGURAS 180 a 203.	REGISTRO SIMULTANEO DEL CAMPO ELECTRICO EN DOS ESTACIONES PROXIMAS.....	170

## I. INTRODUCCION.

La observación, haciendo uso de instrumentos adecuados, del estado eléctrico de la atmósfera bajo cielo despejado o con escasa nubosidad- en las capas próximas al suelo (\*), revela los siguientes hechos fundamentales:

1) Existe en el aire un campo eléctrico, de dirección sensiblemente vertical y sentido descendente, cuya intensidad sufre variaciones -tanto espaciales como temporales- de características muy diversas, oscilando -al nivel del suelo- en torno a un valor medio del orden de los 100 V/m.

---

(\*) Supuesto llano, horizontal y libre de obstáculos.

2) La atmósfera, en las citadas capas, posee una débil conductividad eléctrica, debida a la presencia en ellas de iones de ambos signos.

3) Por regla general, la carga total que poseen los iones positivos de un cierto volumen de aire no es de igual cuantía que la correspondiente a los iones negativos contenidos en el mismo. Ello da por resultado la existencia de una carga espacial neta que, según el caso, puede ser de uno u otro signo.

4) Es posible detectar una corriente aire-tierra como consecuencia, principalmente, del campo eléctrico y de la mencionada ionización.

En situaciones meteorológicas muy distintas a las que suelen predominar con cielo despejado, tales como las que se dan en el seno de una tormenta, la magnitud de las manifestaciones eléctricas se hace -según es bien sabido- mucho más acusada, no sólo en los valores medios de los parámetros característicos, sino asimismo en lo que se refiere a las fluctuaciones experimentadas por algunos de ellos.

Así sucede con la intensidad del campo que, bajo la nube tormentosa, llega a alcanzar valores del orden de los 10.000 V/m, estando además invertido por regla general con respecto al sentido descendente del campo de buen tiempo. Y a causa del movi-



miento y evolución de esa nube, así como debido a las descargas -rayos- que se producen en su interior o entre la nube y la tierra, dicha intensidad sufre variaciones -rapidísimas en el caso de las descargas- muy considerables.

Por otra parte, se observan entonces nuevos procesos determinados por la intensa actividad eléctrica de la citada nube. En tiempo despejado, el transporte de carga entre la atmósfera y el suelo lo efectúa casi exclusivamente la corriente iónica aire-tierra, antes mencionada, muy débil de intensidad. En el caso de la tormenta, sin embargo, aparece una importante corriente de convección, constituida por las cargas que normalmente poseen las precipitaciones -lluvia o granizo-. Y hay que considerar además la carga cedida al suelo por las violentas descargas disruptivas de los rayos, así como la contribución de aquellas corrientes cuyo origen se debe a la ionización por choque -efecto corona-.

El contraste entre ambos tipos de fenómenos eléctricos -los de buen tiempo y los de tiempo tormentoso- que se manifiesta, según hemos visto, tanto cualitativa como cuantitativamente, se patentiza de forma especial en los efectos de los mismos relativos a la carga que recibe la superficie terrestre. Así, mientras que la corriente aire-tierra de buen tiempo aporta por regla general carga positiva -y tiende a destruir, por

consiguiente, el campo atmosférico-, en cambio, los distintos tipos de corriente ya citados, mediante los cuales se verifica el transporte de carga en el seno de la tormenta, ceden fundamentalmente a dicha superficie carga negativa, contribuyendo pues al mantenimiento del campo.

Precisamente el problema fundamental en electricidad atmosférica lo plantea esa destrucción continua del campo atmosférico que tiene lugar a causa de la corriente iónica aire-tierra. Dado que el valor medio del mismo se mantiene, no obstante, estacionario, ha de existir al menos algún proceso antagónico capaz de compensar tal efecto disipativo. El generador más importante responsable de este segundo proceso se encuentra -según se admite hoy- en las tormentas (1) a (7).

## II. ANTECEDENTES HISTORICOS.

Haremos aquí mención de aquellos Investigadores mas destacados y de los descubrimientos fundamentales realizados por ellos, que han hecho posible -a través de varias etapas de progreso lento y dificultoso- nuestra visión actual acerca de los fenómenos de electricidad atmosférica.

Siguiendo a Israëli (3)(\*), consideramos tres períodos en dicho desarrollo: II.1. el correspondiente a los primeros descubrimientos; II.2. el período electrostático, y II.3. el período moderno. A continuación nos ocuparemos brevemente de los mismos.

---

(\*) Véase también (8)

11.1. Primeros descubrimientos.- La observación de las chispas obtenidas en los experimentos electrostáticos de los primitivos Investigadores hubo de hacerles pensar, Indudablemente, en esas otras "chispas" -los rayos- que, a una escala mucho mayor, se manifiestan en el curso de las tormentas. ¿Serían -no obstante la diferencia de escalas- ambos fenómenos de una misma naturaleza? Ya en 1708, W.Wall expresa claramente esa opinión.

Hasta mediados del siglo XVIII, sin embargo, no se realizan los experimentos iniciales destinados a comprobar la validez de semejante hipótesis. Es a Benjamin Franklin al que corresponde el mérito de haber propuesto por primera vez una técnica adecuada a dicha finalidad (4),(9). Pero la prioridad de su empleo no pertenece a él, sino al francés D'Alibard, quien -siguiendo la idea de Franklin- el 10 de mayo de 1752, en una localidad próxima a Versalles y en presencia de una nube de tormenta, obtiene chispas eléctricas mediante una punta metálica elevada a 12,2 m de altura. En junio del mismo año, realiza el propio Franklin sus primeros experimentos en Filadelfia. Otro Investigador francés, De Romas, ensaya más adelante -al igual que Franklin- con una cometa, llegando a obtener chispas de 3 m de longitud.

Todas esas observaciones ponen de manifiesto, efectivamente

te, la existencia de "electricidad" en la nube tormentosa. Pero en 1752 se revela además otro hecho que, a diferencia del anterior, carecía de antecedentes que lo hicieran previsible. En ese año, Lemonnier utiliza un mástil vertical de madera, de 10 m, en cuyo extremo superior se encuentra -aislada mediante un soporte de vidrio- una punta de hierro. Un cable unido a ésta y asimismo convenientemente aislado penetra en el local donde se realizan los experimentos, en los que se detecta la electrificación del extremo inferior del mismo. Lo curioso es que dicho estado eléctrico se presenta también en ausencia de tormentas, incluso bajo cielo totalmente despejado. La electricidad atmosférica no sería pues una propiedad exclusiva de las nubes, sino que se encontraría localizada igualmente en el propio aire. Lemonnier pudo observar además la variación diurna que experimenta ese estado -el hoy llamado campo eléctrico de buen tiempo-, variación que fue estudiada más adelante, de forma muy cuidadosa y prolongada, por el italiano Beccaria.

Por otra parte, en 1785, Coulomb da cuenta a la Academia francesa de un descubrimiento fundamental: la existencia de una débil conductividad eléctrica en el aire. Pero tal descubrimiento no es tomado en consideración en aquella época, y ha de transcurrir un siglo para que sea debidamente reconocido y se empiece a valorar el papel decisivo que desempeñan las propiedades

conductoras del aire en la fenomenología de la electricidad atmosférica.

11.2. Período electrostático. Así llamado porque durante el mismo -cuya duración es de unos 100 años a partir del descubrimiento de Coulomb- se intenta una explicación de los hechos observados en términos puramente electrostáticos.

De Saussure es una figura importante de los comienzos de ese período. Utilizó en sus investigaciones un electrómetro constituido por dos esferitas de médula de saúco que, suspendidas de sendos hilos metálicos, se hallaban en contacto en ausencia de carga, separándose en mayor o menor grado al cargarse. El conjunto, aislado dentro de una caja conductora, hacía contacto con una varilla metálica exterior, dispuesta verticalmente. Con dicho electrómetro inicialmente descargado y la caja en conexión a tierra, pudo observar De Saussure que las esferitas se iban separando progresivamente al elevar el instrumento en el aire. Basándose en las numerosas observaciones realizadas -incluso a 3.400 m de altitud en el Col du Géant- llegó a la conclusión de que las esferas se cargaban mediante un proceso de inducción electrostática debido a la presencia en el aire de cargas eléctricas positivas localizadas en las capas altas. Pudo confirmar los resultados obtenidos por Beccaria,

y puso de manifiesto además la variación anual que experimenta el estado eléctrico de la atmósfera.

Volta efectuó más adelante una observación de gran interés. Al acercar una llama a un conductor aislado y descargado, éste adquiriría una carga si se encontraba al aire libre, y en cambio permanecía descargado dentro de una habitación. Ello hizo pensar a Volta que la causa de dicho efecto había de buscarse en la electricidad atmosférica. El fenómeno en cuestión encontró una aplicación práctica en el llamado colector de llama, utilizado durante algún tiempo en las medidas del campo eléctrico.

Para explicar la presencia de electricidad en el aire supuso Volta que en el proceso de evaporación del agua procedente de la superficie terrestre tiene lugar una separación de carga, siendo positiva la que adquiere el vapor y quedando cargada la tierra negativamente. Es la primera vez que se menciona esa carga negativa que posee el suelo. Aunque la hipótesis de Volta no se considera válida hoy día, hay que destacar, sin embargo, el papel fundamental que dicho Investigador atribuye al ciclo del agua en la naturaleza como responsable del estado eléctrico del aire.

Erman hizo notar que al desplazar horizontalmente el electrómetro de De Saussure, acercándolo a un árbol o a un edificio,

se observan en su lectura variaciones análogas a las que tienen lugar cuando se baja dicho instrumento aproximándolo al suelo. Pensó que en el primer caso no podía invocarse como causa de tal efecto la supuesta carga espacial del aire, y llegó a la conclusión de que era la "electricidad de la tierra", es decir, la carga negativa del suelo, la única responsable del mismo.

Esa fue también la idea sustentada por Peltier, quien hizo uso en sus observaciones de una versión modificada por él del citado electrómetro. Este investigador se dio cuenta de que el electrómetro sólo acusa diferencias entre los respectivos estados eléctricos del equipo móvil y de su caja -lo que llamamos hoy diferencia de potencial-. Por consiguiente, la indicación del instrumento podría interpretarse perfectamente admitiendo que el suelo está cargado negativamente y que el aire también posee carga de ese signo pero en menor cuantía; y, en consecuencia, aparece como positivo. Esa carga negativa del aire procedería de la que existe en la superficie terrestre, parte de la cual sería transportada por el vapor de agua durante el proceso de evaporación, explicándose así las variaciones observadas en el estado eléctrico de la atmósfera, así como la electrización de las nubes.

Deben mencionarse asimismo los nombres de Pouillet (1827)



y Dellman. El primero investigó experimentalmente la supuesta separación de carga ligada a la evaporación de soluciones salinas y alcalinas. Según él, en el primer caso, el vapor adquiere carga positiva, quedando cargada la solución negativamente; invirtiéndose la polaridad del fenómeno en el segundo caso. Creyó poder explicar así el origen de las cargas atmosférica y terrestre como resultado de la evaporación del agua del mar.

Dellman destaca por su contribución al mejoramiento de las técnicas de medida. Sus trabajos se publicaron en la segunda mitad del pasado siglo, entre 1853 y 1870.

La figura más sobresaliente del período electrostático es, sin duda, Lord Kelvin, quien sistematizó los resultados conocidos en su época sobre los fenómenos de electricidad atmosférica, permitiendo una formulación rigurosa de los mismos al introducir en esa disciplina los conceptos de campo, potencial y líneas vectoriales.

Por otra parte, los electrómetros diseñados por él -en particular, el de cuadrantes- hicieron posible la realización de medidas verdaderamente precisas del campo atmosférico. Sustituyó con ventaja el colector de llama de Volta por mechas incandescentes; ideó el colector de gotas, y, mediante el empleo de una placa aislada, al nivel del suelo y en conexión a un elec-

trómetro, pudo efectuar determinaciones absolutas, en las cuales el sistema de medición no introduce distorsión alguna en el campo.

A él se debe además la primera instalación de registro continuo del gradiente de potencial, que se encuentra en Kew, cerca de Londres. Dicha estación de medida ha venido funcionando ininterrumpidamente desde 1861.

Poco después surgieron instalaciones análogas en otros países, permitiendo recoger numerosos datos en diversas localidades. A finales de siglo se realizaron medidas incluso en las regiones polares.

El final del período electrostático está marcado por los trabajos de Exner (1849-1926), que diseñó instrumentos portátiles con los cuales llevó a cabo -en unión de sus discípulos- un gran número de observaciones, extendidas también al mar y a zonas tropicales. Destacó la necesidad de las medidas absolutas al objeto de poder comparar entre sí los datos obtenidos en distintas estaciones y tratar de integrarlos en un modelo coherente. Supuso que el suelo posee carga negativa adquirida por la tierra durante su formación, y que parte de la misma se incorpora al aire a causa de la evaporación. Las variaciones del campo eléctrico irían pues asociadas al ciclo hidrológico.

11.3. Período moderno.- La carga negativa de la superficie terrestre podría mantenerse efectivamente, de acuerdo con la teoría de Exner, si el aire no fuera conductor. Tal era la creencia general en la época en que fue propuesta dicha teoría. Poco después, sin embargo, en 1887, Linss comprobó la validez de las observaciones efectuadas por Coulomb unos 100 años antes, a las que ya hemos hecho referencia; observaciones que pusieron de manifiesto una débil conductividad por parte del aire.

Aunque a los resultados obtenidos por Linss no se les prestó de momento la debida atención, los trabajos de Schuster (1884-90) y, principalmente, de Elster y Geitel (1889), demostraron sin lugar a dudas la existencia de dicha conductividad, encontrando ésta su justificación dentro de la teoría iónica (J.J. Thompson, 1898). En los primeros años de este siglo, Elster y Geitel, asimismo, encontraron en la radiactividad del aire una de las claves que permiten explicar el origen de los iones presentes en él.

Una vez establecida definitivamente la conductividad eléctrica de la atmósfera y la ionización como causa de la misma, se abre a la electricidad atmosférica un nuevo y fecundo campo de investigación. Ya en la última decena del pasado siglo se desarrollan las técnicas fundamentales para la medida de los

distintos parámetros relacionados con ambos fenómenos: conductividades polares, movillidades, concentraciones iónicas, procesos de recombinación, carga volumétrica, etc. El llamado espectro iónico se amplía más adelante con el descubrimiento de los iones pesados, o iones de Langevin, realizado por éste en 1905. y el de los iones intermedios (1909) que se debe a Pollock.

Pero, por otra parte, la ionización del aire planteó desde el principio un grave problema -ya mencionado en la introducción-. Aunque muy débil en circunstancias normales (\*), la conductividad atmosférica debería producir la pérdida de la carga negativa de la tierra -y la desaparición consiguiente del campo eléctrico- en un período de una media hora. Sin embargo, como tal efecto no tiene lugar, hay necesidad de admitir la existencia de al menos algún proceso capaz de restablecer continuamente el citado campo.

Entre 1920 y 1927, C.T.R. Wilson y A. Wigand plantearon en diversos trabajos una hipótesis según la cual el proceso en cuestión radicaría en la actividad tormentosa que, de forma ininterrumpida, está actuando con mayor o menor intensidad en uno u otro lugar del globo.

---

(\*) Nos referimos a las capas más bajas de la atmósfera..

Tal hipótesis no fue aceptada inicialmente. La estructura que en aquella época se suponía para la nube de tormenta no se avenía, al parecer, con la misma. Sus posibilidades no pudieron ser valoradas plenamente hasta que Whipple y Scrase (1936), por una parte, adujeron argumentos estadísticos convincentes a favor de ella; y Simpson y Scrase (1937), y también Simpson y Robinson (1941), por otra, investigaron directamente la estructura eléctrica de ese tipo de nubes.

Así, como hace notar Israël (3), se cierra el ciclo que, iniciado a mediados del siglo XVIII con las primeras observaciones acerca de la electricidad de las tormentas, ha de volver a éstas, casi dos siglos más tarde, considerándolas como el generador más importante responsable del mantenimiento del campo eléctrico de la atmósfera (\*).

---

(\*) Véanse también, en relación con dicho problema, (10), (11) y (12).



### III. OBJETO DEL TRABAJO Y PLAN GENERAL DEL MISMO.

Entre 1934 y 1936, en el Observatorio Meteorológico del antiguo edificio de la Universidad de Sevilla, F. Martín Bravo realizó un interesante estudio experimental acerca de las descargas atmosféricas por efecto corona que tenían lugar en una punta expuesta a cierta altura en condiciones meteorológicas de tiempo tormentoso (13).

Más recientemente, a partir de 1962, se han venido efectuando -dentro de las actividades del Departamento de Óptica de esta Universidad- diversos trabajos (14) a (21), en los que se investigó, por una parte, el efecto corona observado en buen tiempo, tanto en una punta metálica como en el cable de un globo cautivo; y, por otra, la anomalía local del campo eléctrico del aire.

No tenemos noticias de ningún otro trabajo sobre electricidad atmosférica que se haya llevado a cabo en Sevilla o en sus inmediaciones.

Por ello, y teniendo en cuenta que en la investigación descrita en la memoria de nuestra Tesina de Licenciatura (19), así como en trabajos anteriores (16), (18), se puso de manifiesto una marcada influencia de ciertos factores locales sobre el campo, decidimos emprender un amplio estudio de la citada anomalía, tomando en consideración otras variables eléctricas además de la intensidad del campo -que era la única a cuya determinación se había procedido anteriormente (\*)-.

Este es el tema de la Investigación experimental cuya exposición detallada constituye el objeto de la presente memoria y que en líneas generales se ha llevado a cabo en las tres fases siguientes:

1) Montaje de dos instalaciones análogas -situadas, respectivamente, sobre la azotea del edificio de la Universidad y en una zona rural próxima a Sevilla- que permiten determinar cuatro parámetros eléctricos. Las medidas correspondientes pue-

---

(\*) En (20) se midieron también la densidad de corriente aire-tierra y la conductividad del aire.

den complementarse con datos relativos a la contaminación del aire por partículas en suspensión y a la velocidad del viento.

2) Utilización de dichas instalaciones -fundamentalmente, de la que se encuentra en la Universidad- en distintas épocas del año, realizando numerosas medidas de las diversas variables. Aunque el interés de tales medidas se centra en los días de buen tiempo -despejado o con nubosidad escasa-, se han extendido asimismo a otros de cielo cubierto.

3) Proceso de los datos obtenidos en orden a la búsqueda de posibles correlaciones entre las variables en cuestión, intentándose, en su caso, la justificación teórica de las mismas.

Antes de referirnos de forma detallada a cada una de esas fases, se requiere una descripción previa de las características fundamentales de aquellos parámetros objeto de nuestras medidas, así como de algunas de sus relaciones mutuas, a fin de disponer de un contexto adecuado cuando, más adelante, tratemos de interpretar los resultados obtenidos.



## IV. ESTADO ELECTRICO DE LA ATMOSFERA

### IV.1. Intensidad.

Variación con la altura.- Según ya indicamos en la introducción, las líneas vectoriales del campo, en condiciones de buen tiempo, van dirigidas por regla general hacia abajo. Ello es consecuencia de la carga negativa existente en la superficie terrestre y de la distribución de carga positiva localizada en el aire a distintas alturas. La ley de dicha distribución puede determinarse indirectamente midiendo cómo varía la intensidad del campo  $E$  al ascender en la atmósfera.

En efecto, tales medidas revelan una marcada disminución de  $E$  con la altura  $h$ . Gish (3) propuso, para dar cuenta de ella,

la siguiente fórmula empírica (véase la fig.1):

$$E_h = 81,8 e^{-4,52 h} + 38,6 e^{-0,375 h} + 10,27 e^{-0,121 h} \text{ V/m}, \quad \{1\}$$

en la que  $h$  viene dada en km.

Tomemos un sistema de coordenadas cartesianas con origen en el suelo, siendo el sentido positivo del correspondiente eje  $z$  el de la vertical ascendente. Teniendo el vector  $\vec{E}$  dirección asimismo vertical -pero sentido descendente-, el teorema de Gauss nos permite escribir que

$$\frac{dE_z}{dz} = \frac{\rho}{\epsilon_0},$$

siendo  $\rho$ , la densidad de carga volumétrica a la altura  $z$ , y

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}.$$

Es decir,

$$\rho = \epsilon_0 \frac{dE_z}{dz}$$

Pero  $E_z = -E_h$ . Por consiguiente, sustituyendo  $h$  por  $z$  en el segundo miembro de {1} y calculando a partir de esa expresión

$\frac{dE_z}{dz}$ , resulta:

$$\rho = 3,27 \cdot 10^{-12} e^{-4,52z} + 0,128 \cdot 10^{-12} e^{-0,375z} + 0,011 \cdot 10^{-12} e^{-0,121z} \text{ C/m}^3, \quad \{2\}$$

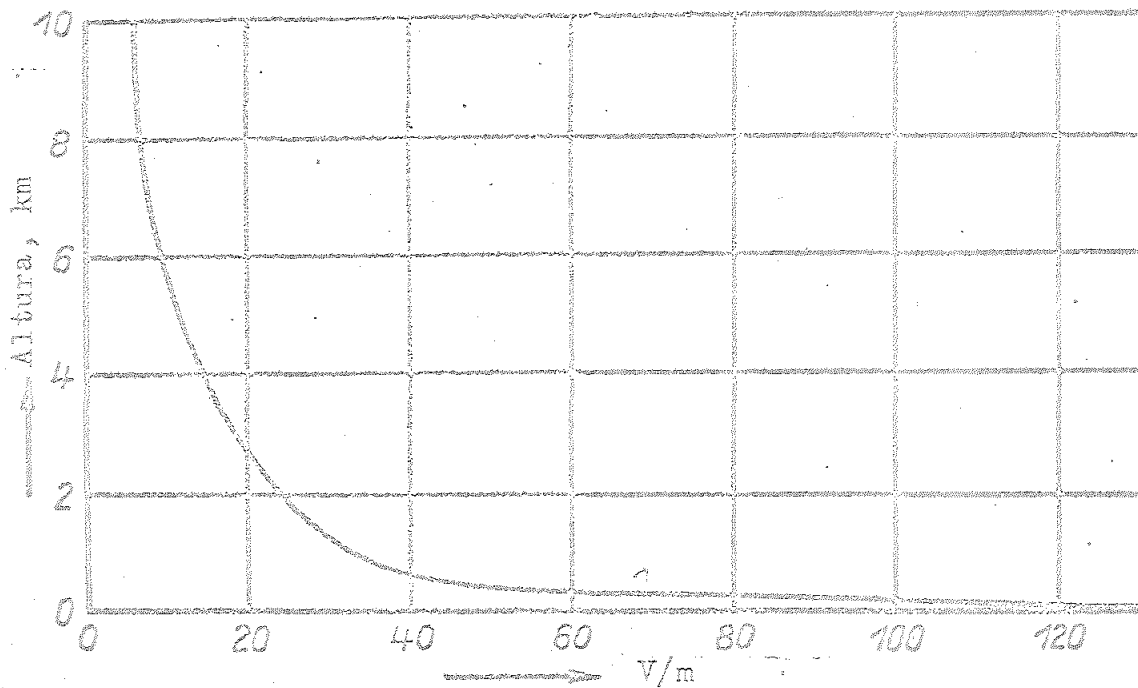


Figura 1

o bien,

$$\rho = 2.045 \cdot 10^7 e^{-4,52z} + 8.006 \cdot 10^5 e^{-0,375z} + 6.874 \cdot 10^4 e^{-0,121z}; \quad \{3\}$$

fórmula que permite el cálculo del número de cargas elementales por  $m^3$ , en función de la altura ( $z = h$ ).

Hemos de señalar, sin embargo, que los resultados obtenidos a partir de las fórmulas anteriores -representativas del comportamiento medio de ambas magnitudes,  $\underline{E}$  y  $\underline{\rho}$ , basado en cierto número de datos -pueden discrepar considerablemente de los valores particulares suministrados por una determinada serie de sondeos. (Véase a ese respecto la fig.2, que da cuenta de los resultados de 28 sondeos realizados por Koenigsfeld mediante radiosonda en 1954).

Las medidas de la intensidad del campo sobre la superficie terrestre en una cierta localidad están sometidas -al igual que los otros parámetros eléctricos- a fluctuaciones muy diversas, de algunas de las cuales nos ocuparemos en seguida. Y, por otro lado, los correspondientes valores medios suelen variar -a veces, notablemente- de una a otra estación de medida. Por regla general, las estaciones situadas en -o próximas a- zonas urbanas presentan los valores más elevados.

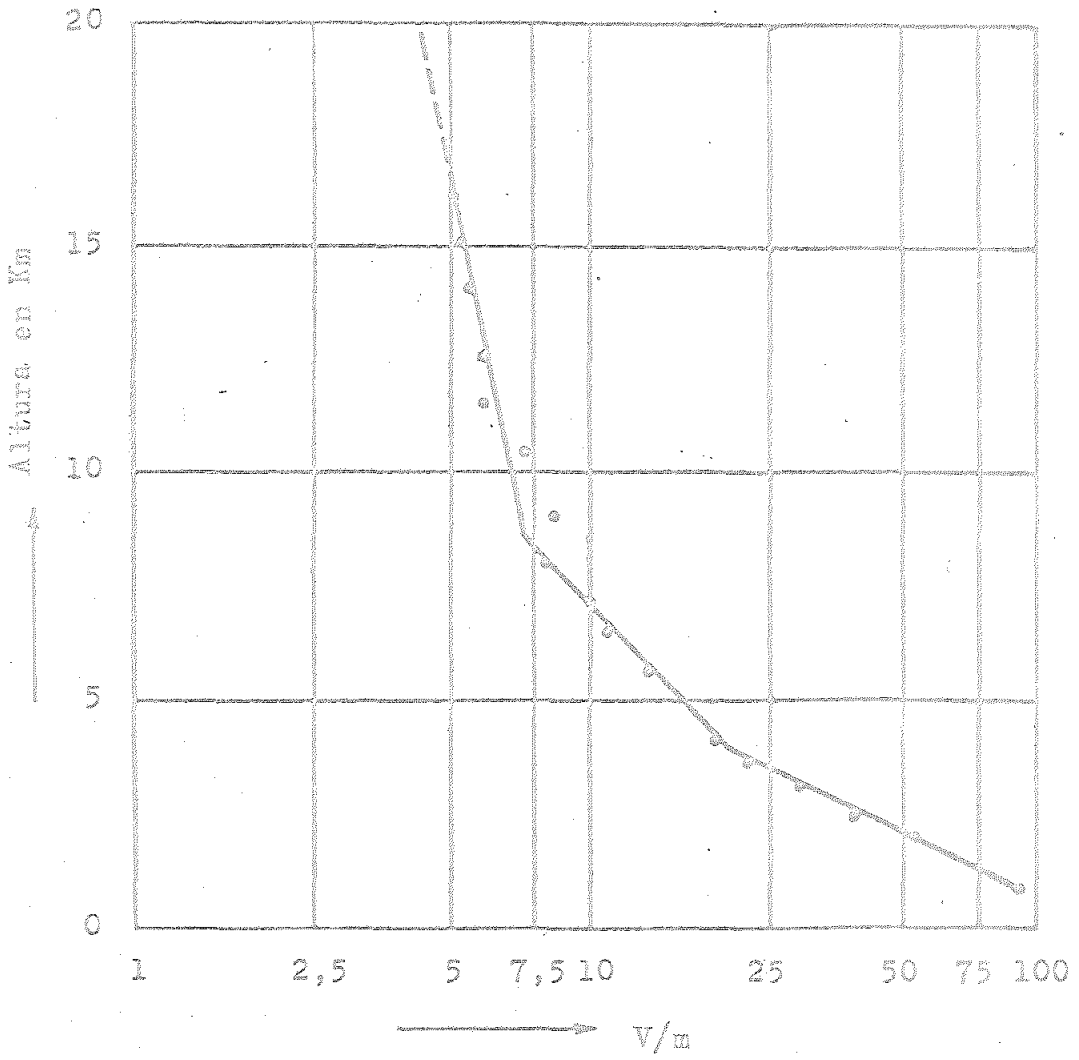


Figura 2

Influencia de la latitud.- En aquellas observaciones realizadas sobre el mar se pone de manifiesto una clara dependencia de  $E$  con la latitud. Tal efecto es imputable al cambio de conductividad del aire que refleja las variaciones originadas en la distribución de la radiación cósmica por el campo magnético terrestre. El hecho de que ese efecto no se detecte en las estaciones continentales ha de atribuirse a su enmascaramiento por otras influencias locales de mayor cuantía.

Variaciones temporales.- Pueden ser periódicas y no periódicas. Dentro del primer grupo suelen distinguirse, de acuerdo con el valor del correspondiente período, cuatro tipos fundamentales: diurnas, anuales, y de periodicidad igual a 27 días y 11 años, respectivamente.

a) Variaciones diurnas.- En las estaciones de medida continentales situadas al nivel del suelo, la evolución de la intensidad del campo a lo largo del día puede presentar un mínimo hacia las 4 h y un máximo hacia las 18 h. Esta es la oscilación simple de tipo continental (fig.3,a). O bien, dicha intensidad experimenta una doble oscilación, con mínimos hacia las 4 h y las 14 h, y máximos alrededor de las 9 h y las 21 h. Tanto en este caso como en el anterior, tales horas se refieren al tiempo local (fig.3,b).

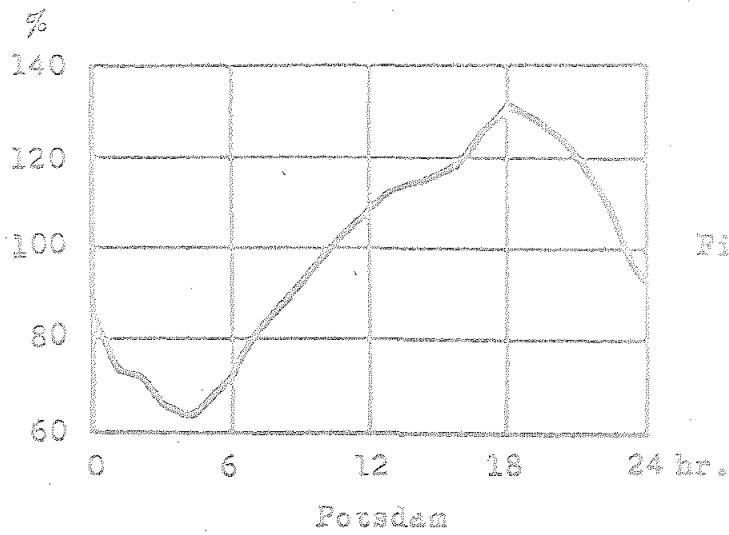


Figura 3,a

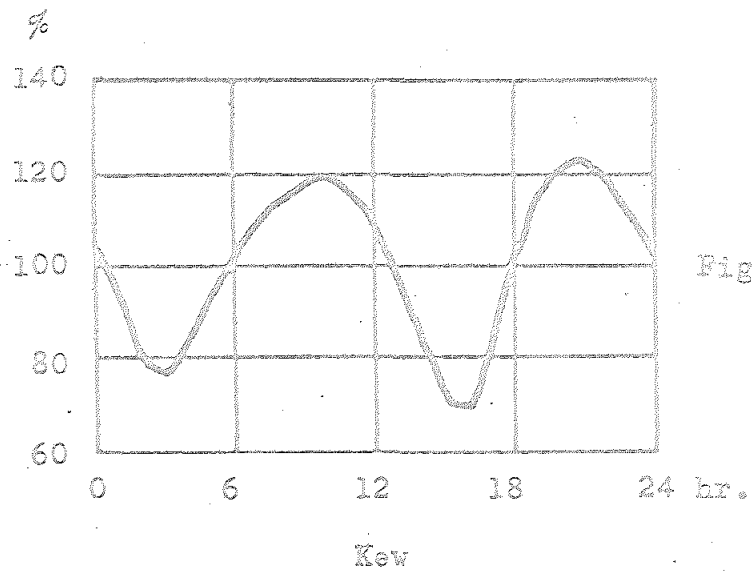


Figura 3,b

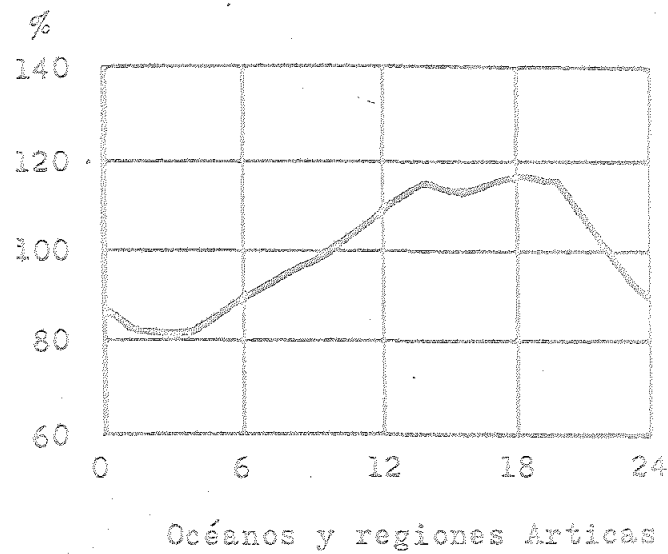


Figura 3,c

Una tercera modalidad la constituye una oscilación simple que se rige por el tiempo universal y afecta, por ello, simultáneamente a toda la tierra. El mínimo tiene lugar entonces hacia las 4 h y el máximo entre las 16 h y las 18 h. A diferencia de los dos primeros tipos que son exclusivos de las estaciones continentales, este último se observa en las medidas efectuadas sobre el océano, así como en las regiones polares (fig.3,c).

b) Variaciones anuales.- La intensidad del campo presenta una marcada variación anual que aparece ilustrada en la fig.4. En ella, la curva 1 expresa el comportamiento medio de estaciones continentales situadas en el hemisferio norte; y la 2, el que se observa en las estaciones del hemisferio sur. La curva 3 se refiere a toda la tierra, mientras que la 4 representa las medidas realizadas en el océano. Puede verse que, en todos los casos, los valores mínimos se dan en los meses que corresponden al verano en el hemisferio norte.

c) Periodicidades de 27 días y de 11 años.- Las primeras irían ligadas al movimiento de rotación del sol en torno a su eje, y las segundas al ciclo de las manchas solares. La correlación entre esos fenómenos y las variaciones del campo eléctrico terrestre ha sido puesta de manifiesto en algunos casos, pero, sin embargo, no ha podido ser confirmada en otras ocasiones.



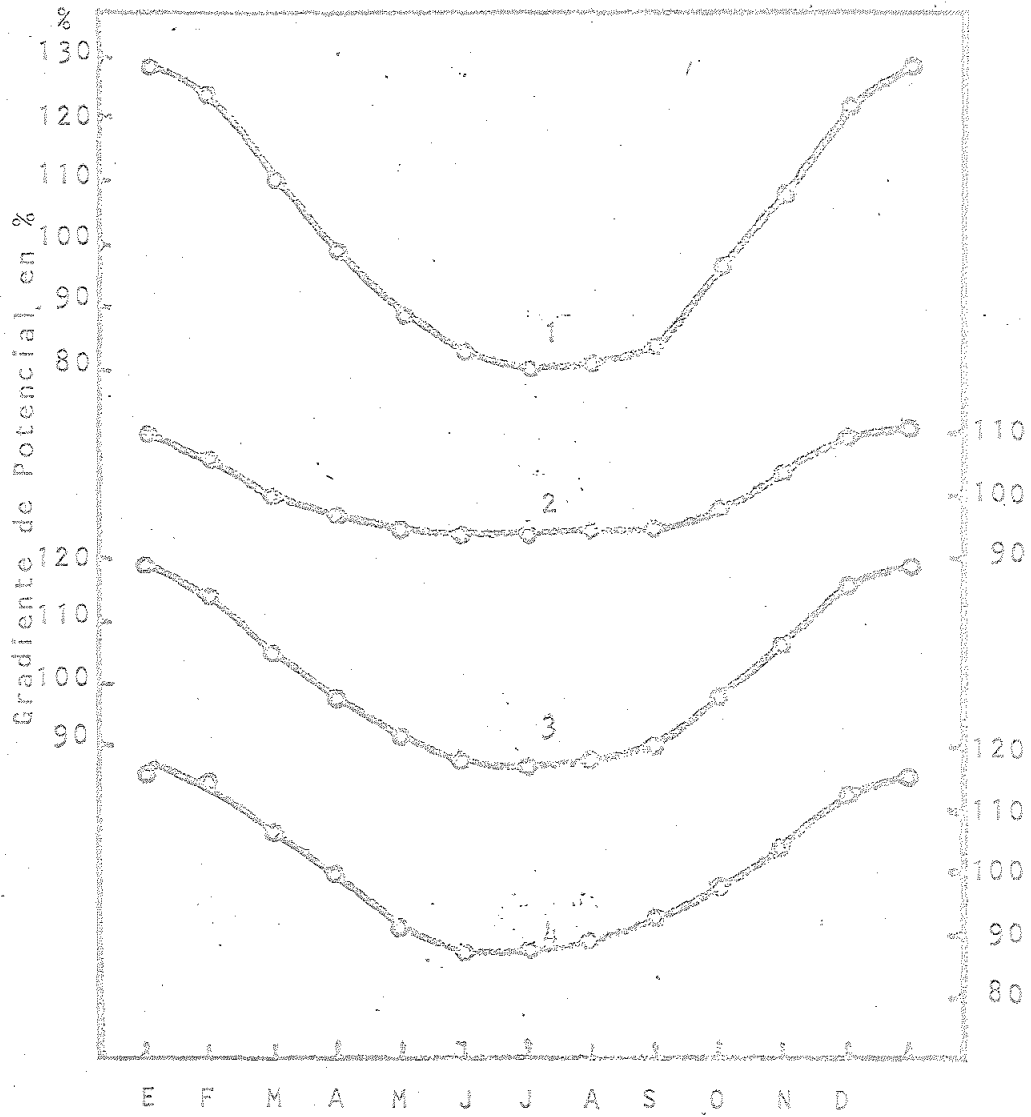


Figura 4

## IV.2. Conductividad

La atmósfera, al nivel del suelo, presenta normalmente una débil conductividad. Elster y Geitel, en Alemania (1889), y Wilson, en Inglaterra (1900), reconocieron como causa de la misma la existencia en el aire de iones gaseosos de ambos signos, cuyo comportamiento había sido estudiado en el laboratorio a fines del siglo pasado.

Los iones atmosféricos pertenecen a diversos tipos. Su clasificación suele hacerse atendiendo a su movilidad -determinada por el tamaño correspondiente-. Se habla así del llamado espectro iónico del aire, en el cual se establecen las concentraciones de los distintos grupos en función de las movilidades respectivas. Israël (3) distingue en dicho espectro cinco tipos principales, cuyas características se resumen en la siguiente tabla:

	Denominación	Movilidad	Tamaño
Iones atmosféricos primarios	Iones pequeños	$k \geq 1,0 \text{ cm}^2/\text{Vs}$	$r < 6,6 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$
Iones atmosféricos secundarios	Iones intermedios pequeños	$1,0 > k \geq 0,01$	$6,6 < r < 78$
	Iones intermedios grandes	$0,01 > k \geq 0,001$	$78 < r < 250$
	Iones grandes	$0,01 > k \geq 0,00025$	$250 < r < 750$
	Iones ultra-grandes	$k < 0,00025$	$r > 750$ (hasta $r=10^{-5} \text{ cm}$ )

Los iones grandes fueron descubiertos por Langevin en París, en 1905. Posteriormente, hacia 1915, Pollock descubre en Sydney los iones intermedios.

Sobre los continentes, la ionización atmosférica en las capas próximas al suelo reconoce tres causas principales: la radiactividad del terreno; la radiactividad de las emanaciones gaseosas contenidas en el aire, y la radiación cósmica. En cambio, sobre el océano, la ionización correspondiente se debe casi de modo exclusivo a la radiación cósmica.

Tanto esta última radiación como aquéllas emitidas por las sustancias radiactivas, actúan directamente sobre las moléculas del aire expulsando electrones de las mismas. Por regla general, la molécula ionizada pierde un electrón, que tiene, como tal partícula libre, una vida muy breve, ya que rápidamente se une a una molécula neutra la cual adquiere así carga negativa. En condiciones normales, ambas moléculas -la que perdió el electrón y la que lo ha ganado- se rodean, por atracción electrostática, de cierto número de moléculas neutras, originándose de ese modo los iones pequeños de ambos signos - ionización primaria -, llamados también rápidos a causa de su elevada movilidad.

La captación de tales iones pequeños por parte de las partículas que constituyen la fase dispersa del aerosol atmosférico

da lugar a los iones grandes -o bien, a los intermedios-. La formación de éstos se verifica, pues, a expensas de los primeros -ionización secundaria-.

Simultáneamente con los diversos procesos cuyo resultado es la creación de iones, actúan otros mecanismos que tienden a reducir su número. Así, al chocar entre sí dos iones pequeños de signos opuestos, se produce la neutralización de ambos -recombinación-, dando lugar nuevamente a moléculas neutras. Por otra parte, la captación antes mencionada mediante la cual se forman iones grandes a expensas de los pequeños, es también causa, evidentemente, de la desaparición de estos últimos. Si los procesos generadores y destructores de iones llegan a compensarse en un determinado lugar, se alcanzará en él una situación de equilibrio, permaneciendo estacionario el contenido iónico del aire.

La conductividad eléctrica atmosférica  $\Lambda$  puede expresarse inmediatamente en función de dicho contenido:

$$\Lambda = e \sum_{i,j} (n_i^+ k_i^+ + n_j^- k_j^-),$$

donde  $e$  es la carga de cada ión (\*);  $n_i^+$  y  $n_j^-$ , los números respectivos por unidad de volumen, y  $k_i^+$  y  $k_j^-$ , las movi-  
 lidades correspon-

---

(\*) Se considera igual para todos ellos. Normalmente,  $e=1,60 \cdot 10^{-19} \text{C}$ .

dientes. Las sumas anteriores habrán de extenderse a todos los tipos de iones que integran el espectro iónico del lugar en cuestión.

Ahora bien, las dos "líneas" fundamentales de ese espectro están constituidas por los iones pequeños -de movilidad aproximadamente igual a  $1,5 \text{ cm s}^{-1}/\text{V cm}^{-1}$ - y los grandes -cuya movilidad media es de  $3 \cdot 10^{-4} \text{ cm s}^{-1}/\text{V cm}^{-1}$ -. Si nos limitamos, pues, a esos dos tipos y llamamos  $\underline{n}^+$ ,  $\underline{n}^-$ ;  $\underline{N}^+$ ,  $\underline{N}^-$  a las concentraciones, y  $\underline{k}^+$ ,  $\underline{k}^-$ ;  $\underline{K}^+$ ,  $\underline{K}^-$  a las movilidades respectivas, será entonces:

$$\Lambda = e(n^+k^+ + N^+K^+ + n^-k^- + N^-K^-),$$

o bien,

$$\Lambda = \Lambda_+ + \Lambda_-,$$

siendo

$$\Lambda_+ = e(n^+k^+ + N^+K^+), \quad \Lambda_- = e(n^-k^- + N^-K^-)$$

las llamadas conductividades polares.

La contribución a la conductividad de los iones grandes suele ser despreciable, sin embargo, debido al escaso valor que presenta su movilidad (véase anteriormente) en comparación con la correspondiente a los pequeños. Son, pues, éstos los que deter-

mínima -prácticamente- la conductividad del aire en la baja atmósfera, según puede observarse claramente tabulando los valores de  $\Lambda_+$ ,  $n^+$ , y de  $\Lambda_-$ ,  $n^-$  para distintas estaciones (3).

Con respecto a las variaciones que experimenta la conductividad en el transcurso del tiempo, consideraremos en primer lugar las del período diurno.

En las estaciones continentales se observa una marcada variación a lo largo del día, alcanzándose los valores más elevados durante la noche (fig.5,a). Sobre el océano las fluctuaciones son, por el contrario, de escasa magnitud. La conductividad, que se mantiene baja en las horas nocturnas, pasa por un máximo antes del mediodía y por un mínimo al final de la tarde. Tal comportamiento -casi exclusivo de la conductividad positiva- es opuesto al observado en las estaciones terrestres, presentando con respecto a éste una inversión especular (3).

Son manifiestos asimismo los cambios anuales anuales (fig. 5,b). Haciendo referencia a las llamadas "estaciones geofísicas", la conductividad es mínima en invierno (noviembre-febrero), y máxima en verano (mayo-agosto), con valores intermedios en los equinoccios (marzo-abril y septiembre-octubre).

Variación con la altura. - Gerdien (1905) y Wigand (1914,1921)

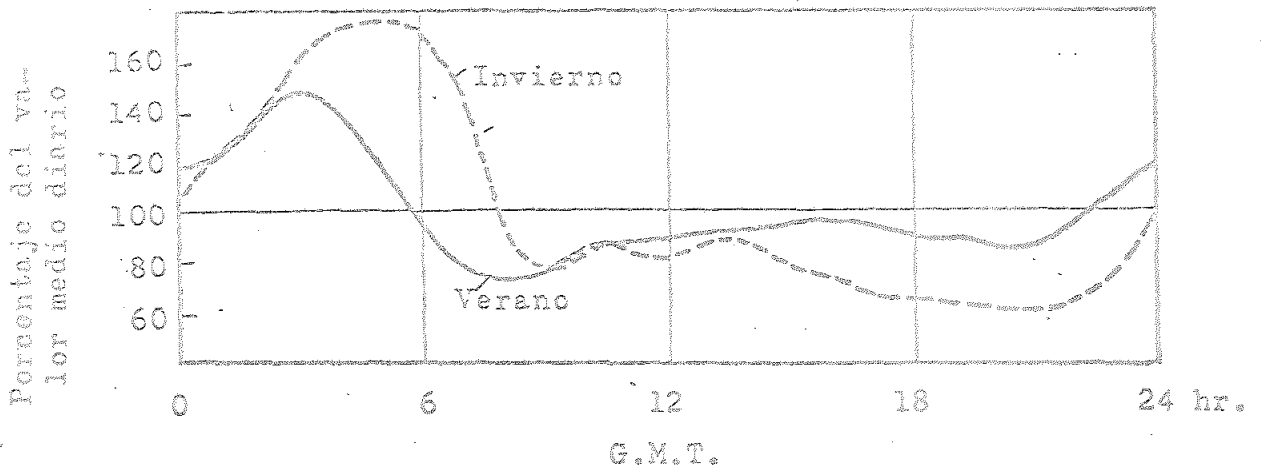


Figure 5,a

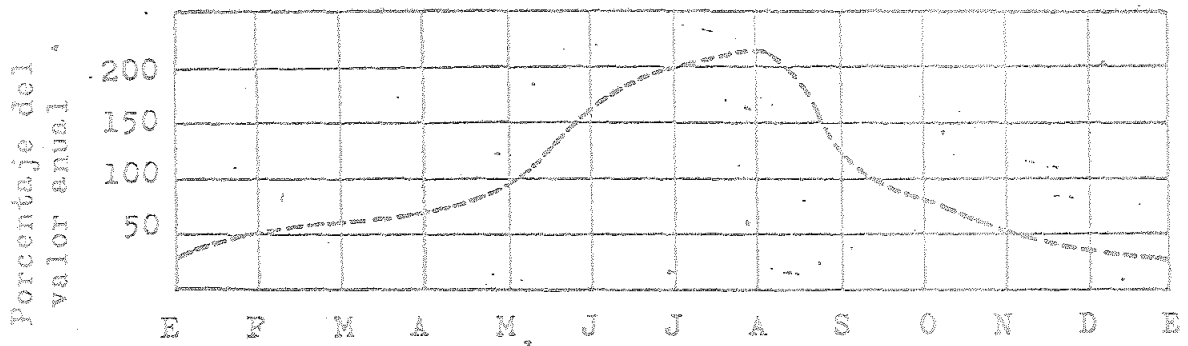


Figure 5,b

fueron los primeros en investigar la variación de la conductividad con la altura, realizando con tal objeto ascensiones en globo libre. Wigand, que llegó a alcanzar los 9.000 m, efectuó medidas, tanto de la conductividad  $\underline{\Lambda}$  como de la intensidad del campo  $\underline{E}$ . En ellas se puso de manifiesto de forma neta un aumento de la primera y una disminución de la segunda en función de la altura, permaneciendo sensiblemente constante el producto de ambas magnitudes, es decir, la densidad de corriente aire-tierra  $\underline{J}$ .

Antes nos hemos referido a los principales agentes ionizantes en las capas de aire más próximas al suelo. Uno de ellos es la radiación cósmica. Precisamente ese crecimiento de la conductividad con la altura -a partir de cierto valor de ésta- se debe al aumento de intensidad que experimenta dicho agente, que es el que produce, prácticamente, toda la ionización hasta alturas por debajo del límite inferior de la ionosfera.

La disminución correspondiente del campo no es más que una consecuencia -según veremos- del citado aumento de la conductividad y del carácter casi estacionario de  $\underline{J}$ , producto de  $\underline{\Lambda}$  y  $\underline{E}$ .

En 1935, la ascensión del "Explorer II" permitió la determinación directa de la conductividad hasta la altitud de 22 km. A los 10 km, dicho parámetro era ya unas 10 veces superior al valor correspondiente al nivel del suelo, y a los 18 km, 40 ve-



ces mayor. A partir de esta altura, sin embargo, la conductividad disminuye. Resultado notable, que se ha atribuido a la presencia de núcleos de condensación -cuyo origen estaría relacionado con la capa de ozono- en esos niveles.

En otros sondeos posteriores, tales como los efectuados en Nuevo Méjico en 1935, haciendo uso de una radiosonda, la conductividad crecía, en cambio, de forma monótona con la altura (se alcanzaron los 30 km). Los valores medios se ajustan muy bien a los calculados habida cuenta de la dependencia de la radiación cósmica con la altura, según puede observarse -para ambas conductividades polares- en las figs. 6, a y b (3).

Por otra parte, numerosas medidas llevadas a cabo en la troposfera han puesto de manifiesto ciertas discontinuidades en la variación de la conductividad con la altura, que se producen precisamente en las superficies de separación de las diversas capas de aire en las que la bruma presenta distintas densidades (fig.7). Ello sucede dentro de la llamada zona de intercambio en la baja troposfera.

En relación con lo anterior pueden considerarse dos regiones en dicha troposfera: la capa inferior -hasta el límite de la zona de intercambio-, en la que la conductividad está determinada fundamentalmente por el contenido del aire en núcleos de con-

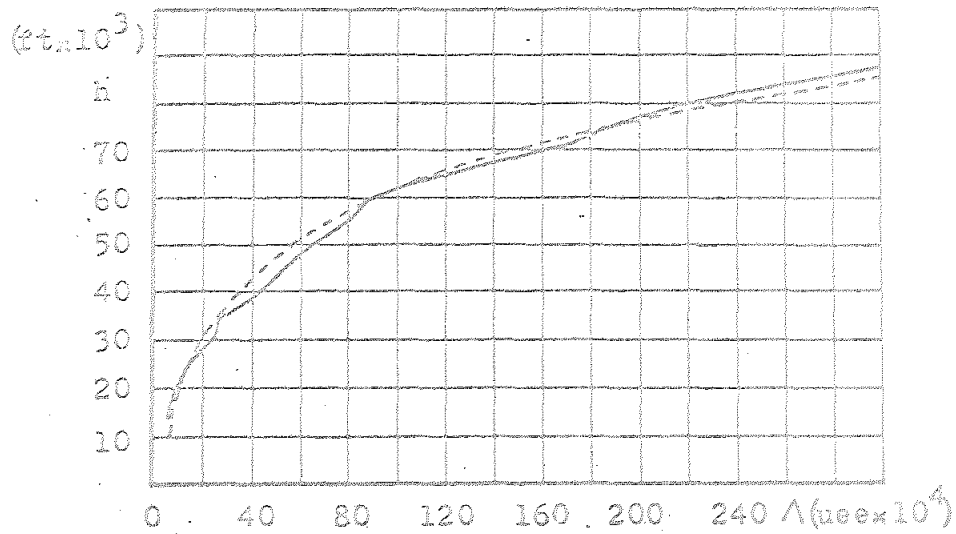


Figura 6,a

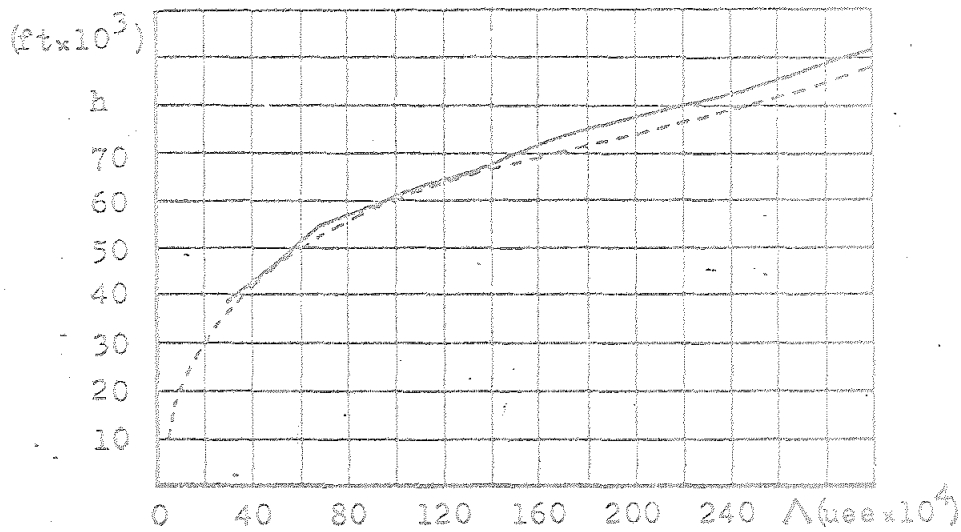


Figura 6,b

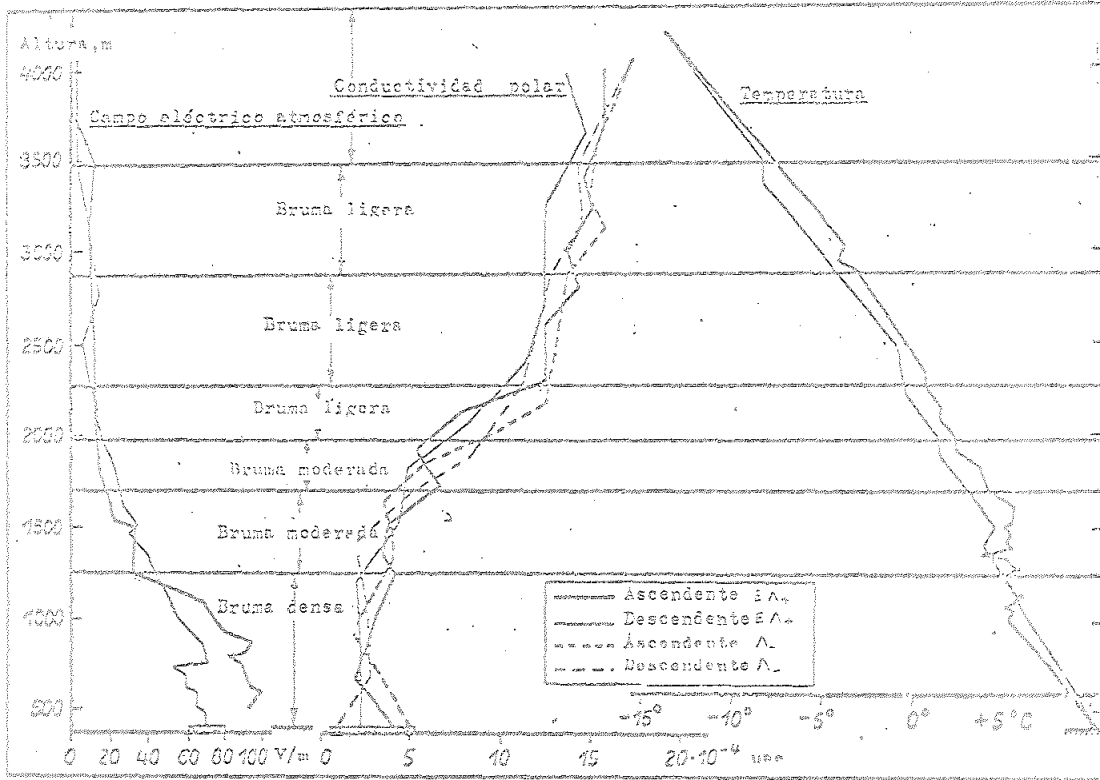


Figura 7

densación -origen de los iones gruesos-, y la superior, afectada de modo casi exclusivo por la radiación cósmica.

### IV.3. Corriente aire-tierra

En la atmósfera existe un campo eléctrico. Y, por otra parte, el aire posee normalmente una cierta conductividad, consecuencia de su contenido iónico. Tales hechos nos llevan forzósamente a la conclusión de la presencia asimismo en la atmósfera de un campo de corrientes, responsable de un intercambio de carga eléctrica entre el aire y el suelo.

Designando por  $\underline{J}$  el módulo del vector corriente correspondiente a ese campo -es decir, la densidad de corriente expresada en  $\underline{A/m^2}$ - y siendo  $\underline{E}$  y  $\underline{\Lambda}$ , respectivamente, las magnitudes de la intensidad del campo eléctrico y de la conductividad, la ley de Ohm nos permite escribir que

$$J = \Lambda E.$$

La existencia en el aire de una carga volumétrica neta de densidad  $\underline{\rho}$  (véase más adelante) puede dar lugar además a corrientes de convección que contribuirían -juntamente con el efecto de

conducción- al citado intercambio de carga.

Lo anterior se refiere a condiciones de buen tiempo. Por otro lado, la elevada intensidad de los campos que se manifiestan en los procesos tormentosos da origen a otros dos tipos de fenómenos de conducción de mucha mayor cuantía: la corriente de descarga en puntas o efecto corona, y las corrientes de enorme intensidad propias de las descargas disruptivas que constituyen los rayos. A éstas hay que agregar la corriente de convección debida a las diversas formas de precipitación -que, en general, están cargadas aunque no procedan de cúmulonimbus-.

La corriente aire-tierra (\*) experimenta también -al igual que el campo y la conductividad- variaciones periódicas, fundamentalmente de períodos diurno y anual. Sin embargo, las características de ambos tipos de variaciones -amplitud de las mismas, posición de máximos y mínimos, etc- se modifican considerablemente según la localidad. Las curvas de la fig. 8, a y b corresponden a la estación de Kew (2).

---

(\*) Nos referimos a la corriente de conducción en ausencia de perturbaciones.

Porcentaje del va-  
lor medio diario

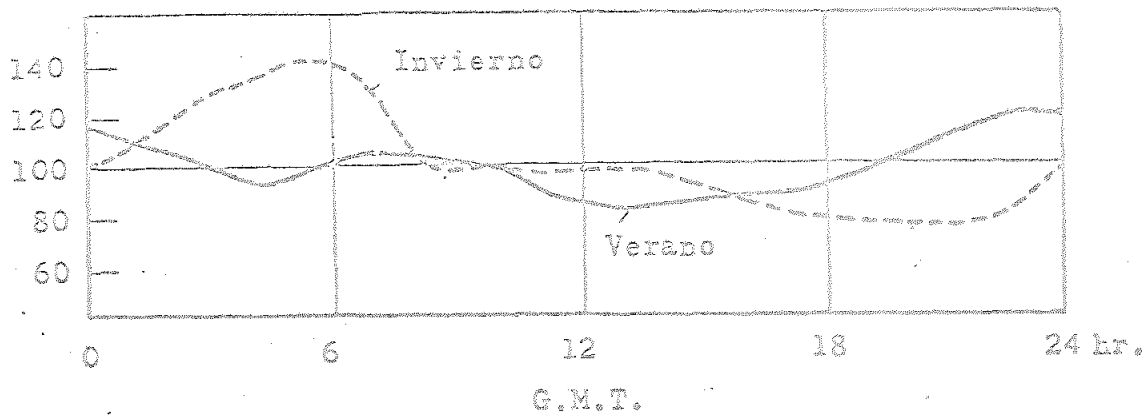


Figura 8, a

Porcentaje del  
valor anual

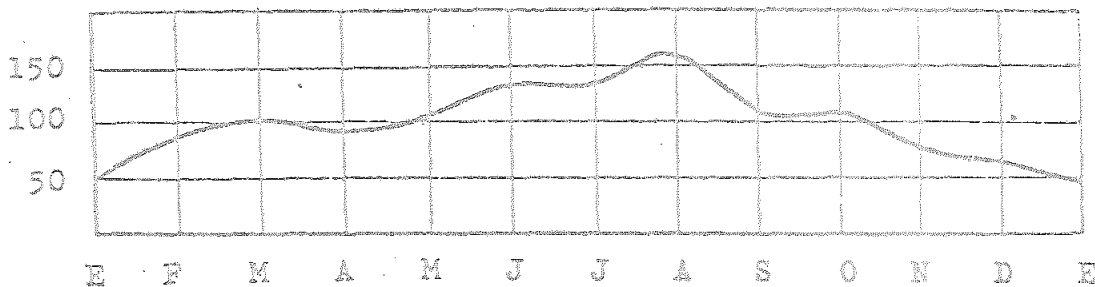


Figura 8, b

#### IV.4. Carga volumétrica

La carga eléctrica que transportan los iones positivos -incluidos los distintos tipos de esas partículas- contenidos en un cierto volumen de aire no suele ser exactamente igual en valor absoluto a la que corresponde a los negativos. Dicho volumen posee, pues, en general, una carga neta de uno u otro signo. La densidad  $\rho$  con que está distribuida constituye otro parámetro de electricidad atmosférica al que ya nos hemos referido anteriormente; de modo especial, al hablar de la intensidad del campo eléctrico y de su variación con la altura.

Vimos entonces que, de acuerdo con la ecuación de Poisson, la disminución que experimenta el campo al ascender en la atmósfera implica la presencia en el aire de una carga positiva, cuya densidad en función de la altura viene dada por la expresión {2}. Pero, precisamente, la citada disminución de  $E$  es consecuencia del aumento de la conductividad a alturas crecientes.

En efecto, consideremos dos capas de aire, 1 y 2, de conductividades respectivas  $\Lambda_1$  y  $\Lambda_2$  ( $\Lambda_1 < \Lambda_2$ ), separadas por una superficie horizontal, siendo la capa 1 la inferior (fig.9). Suponiendo que inicialmente la intensidad del campo  $E$  fuera igual en ambas capas, se tendría, según la ley de Ohm, que

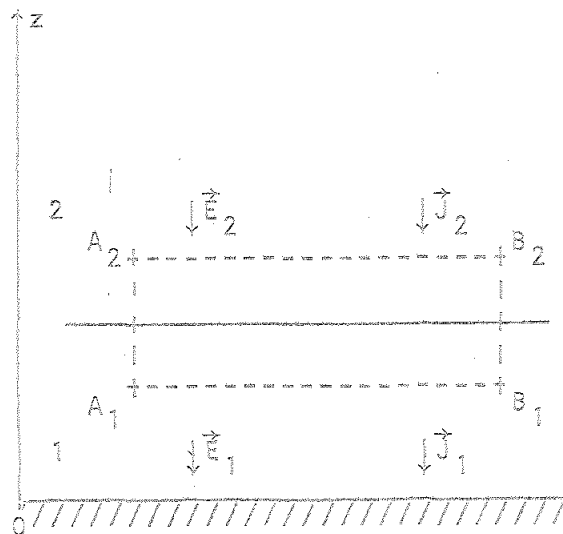


Figura 9

$$J_1 = \Lambda_1 E,$$

$$J_2 = \Lambda_2 E,$$

donde  $J_1$  y  $J_2$  representan las correspondientes densidades de corriente.

En tal caso,

$$J_1 < J_2.$$

Debido a ello, la región  $A_1 B_1 A_2 B_2$  se enriquecería en iones positivos, ya que -estando  $\vec{E}$  dirigido hacia abajo- es mayor el



número de los que penetran por  $A_2B_2$  que el de los que salen por  $A_1B_1$ . Y, asimismo, disminuiría su contenido en iones negativos, puesto que por  $A_1B_1$  entran menos de los que salen por  $A_2B_2$ . Por consiguiente, la zona próxima a la superficie de separación entre las dos capas adquiriría una carga positiva neta cuya densidad iría creciendo al transcurrir el tiempo. Tal proceso provocaría evidentemente una desigualdad progresiva entre las intensidades del campo  $E_1$  y  $E_2$  -por debajo y por encima, respectivamente, de esa superficie- en el sentido

$$E_1 > E_2,$$

con lo cual, de modo automático, tenderían a igualarse  $J_1$  y  $J_2$ . Si llegase a ser  $J_1 = J_2$  cesaría totalmente toda acumulación de carga, conservándose constante la densidad de la misma en la zona en cuestión.

Aunque la disminución de la conductividad con la altura es el hecho fundamental al que se debe la aparición en la atmósfera de carga volumétrica (22), ésta puede originarse también mediante procesos muy diversos: efecto Lenard (3), (23), efecto Blanchard (24), (24), electrización del polvo transportado por el viento (25), erupciones volcánicas (11), combustiones, actividades industriales, etc. (\*)

---

(\*) No nos referimos aquí a la separación de cargas ligada a los fenómenos que tienen lugar en el seno de la nube de tormenta.

Las medidas de  $\rho$  no han sido tan numerosas como las de otros parámetros eléctricos. Por tal motivo, no es prudente generalizar los resultados obtenidos por algunos investigadores en determinadas estaciones.

Se ha observado que el aire próximo al suelo, hasta alturas de unos cuantos metros, posee normalmente una carga neta, positiva o negativa según el caso, siendo los valores medios de su densidad del orden de  $2 \cdot 10^{-11}$  C/m<sup>3</sup>.

La fórmula {2} dada anteriormente suministra cierta información acerca de cómo varía por término medio la densidad  $\rho$  con la altura -por encima de esa zona inmediata a la superficie terrestre-. En sondeos individuales, sin embargo, se han encontrado de hecho marcadas discrepancias con respecto a las previsiones de dicha fórmula, algunas de las cuales serían debidas a las discontinuidades presentes en la capa de bruma dentro de la cual se realizan las observaciones en cuestión.

En un determinado lugar, la carga volumétrica sufre también -al igual que los parámetros ya mencionados- variaciones diurnas y anuales. La figura 10,a nos ilustra sobre las primeras, y la 10,b, constituye un ejemplo de las segundas.

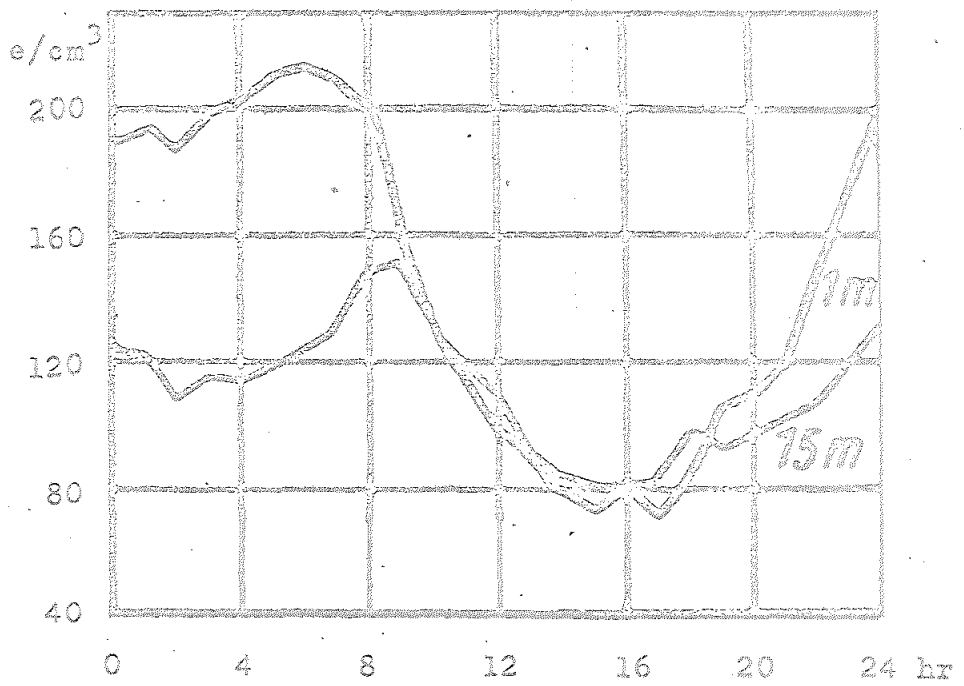


Figura 10, a

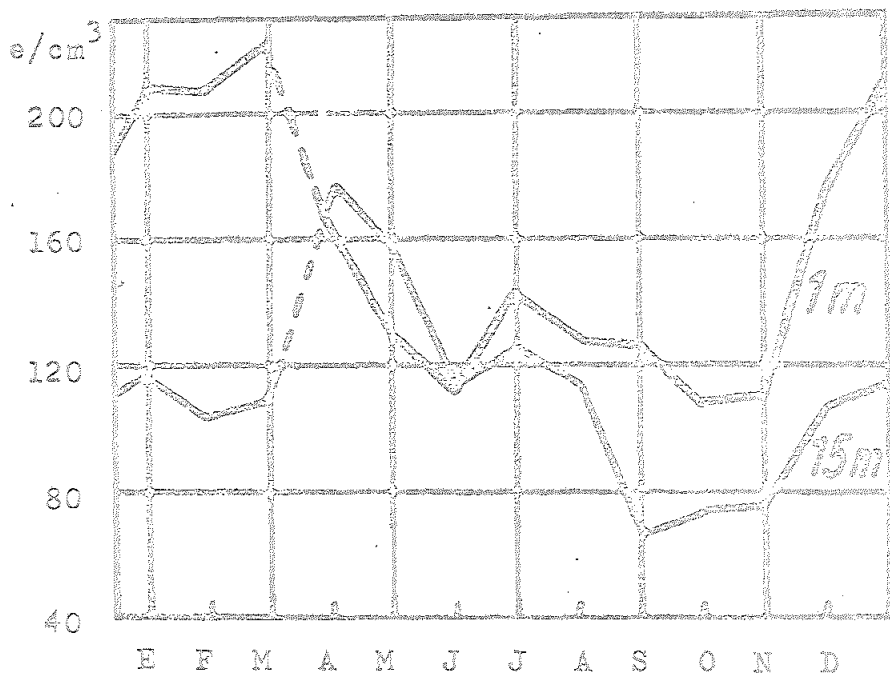


Figura 10, b

## V. SISTEMAS DE MEDIDA

Describiremos a continuación la metodología que hemos seguido en la determinación de las distintas variables eléctricas, explicando en primer lugar las bases teóricas de la misma.

### FUNDAMENTO TEORICO

#### V.1. Intensidad del campo, densidad de corriente aire-tierra y conductividad

Chalmers (26) propuso en 1961 un procedimiento (\*) que per-

---

(\*) Tal procedimiento constituye una versión moderna del método propuesto por Wilson en 1908.

mite la medida conjunta, casi simultánea, de  $\underline{E}$  y de  $\underline{J}$ , haciendo posible el cálculo de  $\underline{\Lambda}$  (\*) a partir de la ley de Ohm.

Se dispone en él de una placa metálica horizontal, aislada, a ras del suelo, que puede cubrirse mediante una lámina paralela en conexión a tierra, con lo cual dicha placa  $\underline{P}$  queda, o no, expuesta al campo eléctrico atmosférico según la posición adoptada por esa lámina (fig. 11).

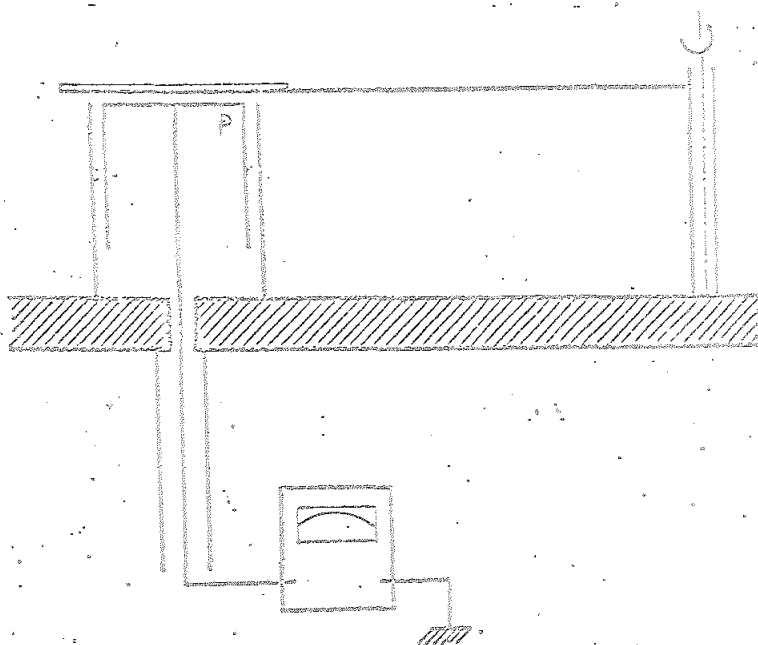


Figura 11

(\*) Normalmente, de  $\underline{\Lambda}_+$ .

Supongamos que, estando cubierta y descargada la placa en cuestión, se descubre en un cierto instante  $t_1$ . Sea  $Q_1$  la carga eléctrica inducida en ella por la acción del campo. La intensidad  $E_1$  de éste, en ese instante, es

$$E = \frac{Q_1}{\epsilon_0 S},$$

donde  $S$  es el área de la placa y  $\epsilon_0$  la permitividad del aire -igual, prácticamente, a la del vacío-.

Inmediatamente después, se conecta  $P$  a tierra momentáneamente, aislándose de nuevo -instante  $t_1' \approx t_1$ - y se deja expuesta al campo -y, por consiguiente, a la corriente aire-tierra- durante un intervalo  $\Delta t = t_2' - t_1'$ . Al término del mismo se observa la carga  $\Delta Q$  que acusa el instrumento de medida conectado a  $P$ , se cubre ésta, se descarga y se procede otra vez a la determinación del campo como anteriormente - $E_2$ , correspondiente a  $t_2 \approx t_2'$ - . Sea  $Q_2$  la carga inducida en este caso. Se tendrá entonces que

$$E_2 = \frac{Q_2}{\epsilon_0 S}.$$

Y, llamando  $E$  a la semisuma de  $E_1$  y  $E_2$ ,

$$E = \frac{1}{2 \epsilon_0 S} (Q_1 + Q_2).$$

Ahora bien, en nuestro montaje la placa iba conectada a un electrómetro en el cual se lefa, en cada caso, el potencial adquirido  $-V_1$  en  $t_1$  y  $V_2$  en  $t_2$ . Puede, pues, escribirse que

$$Q_1 = CV_1, \quad Q_2 = CV_2,$$

siendo  $C$  la capacidad del sistema placa-electrómetro.

Por tanto,

$$E = \frac{C}{2 \epsilon_0 S} (V_1 + V_2). \quad \{4\}$$

La carga  $\Delta Q$  antes mencionada es debida, por una parte, a la carga  $\Delta q$  que aporta a la placa la corriente aire-tierra, y, por otra, a la variación que sufre la carga inducida si -como sucede en general- se modifica el campo durante el intervalo  $\Delta t$ .

Es decir,

$$\Delta Q = \Delta q + Q_2^i - Q_1^i.$$

Correspondiendo  $Q_1^i$  y  $Q_2^i$ , respectivamente, a las cargas inducidas en los instantes  $t_1^i$  y  $t_2^i$ . Pero como éstos coinciden sen-

siblemente con  $t_1$  y  $t_2$ , se tiene asimismo que

$$\Delta Q = \Delta q + Q_2 - Q_1.$$

O bien,

$$\Delta q = \Delta Q + Q_1 - Q_2.$$

El valor medio de la densidad de corriente  $\underline{J}$  durante el citado intervalo es

$$J = \frac{1}{S} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{1}{S} \frac{\Delta Q + Q_1 - Q_2}{\Delta t}.$$

Y, siendo  $\underline{\Delta V}$  el incremento que experimenta el sistema placa-electr6metro en  $\underline{\Delta t}$ , resulta

$$J = \frac{C}{S} \frac{\Delta V + V_1 - V_2}{\Delta t}. \quad \{5\}$$

Finalmente, si dividimos {4} por {5} se obtiene un cierto promedio de la conductividad polar  $\underline{\Lambda_+}$  (\*) durante el intervalo en cuesti6n:

$$\Lambda_+ = 2 \epsilon_0 \frac{1}{\Delta t} \frac{\Delta V + V_1 - V_2}{V_1 + V_2}.$$

---

(\*) Se supone que  $\underline{\vec{E}}$  est6 dirigido hacia abajo.



en cuya expresión, no figura la capacidad  $C$  del sistema.

La precisión del valor obtenido haciendo uso de la fórmula anterior mejorará, evidentemente, al aumentar la estabilidad del campo.

## V.2. Densidad de carga volumétrica

El método utilizado en la medida de la densidad de carga volumétrica  $\rho$  contenida en el aire constituye una variante -ideada por nosotros- del conocido sistema de la jaula de Kelvin (2), (3). Su fundamento es el siguiente:

Supongamos un cilindro metálico hueco de radio  $R$ , conectado a tierra, cuyo interior estuviera ocupado por el aire con densidad de carga  $\rho$  uniforme (\*). Prescindiendo del efecto de las bases, el campo creado por la misma tendría simetría cilíndrica; es decir, el potencial  $V$  en cualquier punto  $P$  de ese volumen sólo dependería de su distancia  $r$  al eje del cilindro (fig. 12). En tal caso, y según la ecuación de Poisson,

---

(\*) En la práctica, dicha carga se disiparía gradualmente por difusión hacia las paredes del cilindro. (Véase más adelante).

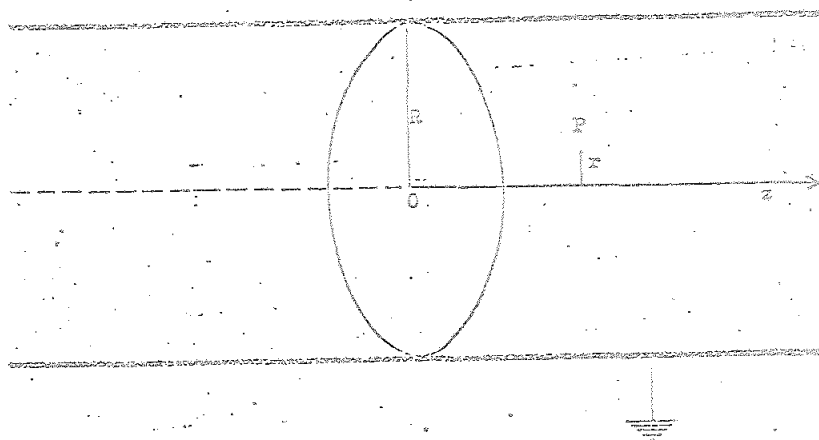


Figura 12

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dV}{dr} \right) = - \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

0 sea,

$$\frac{d}{dr} \left( r \frac{dV}{dr} \right) = - \frac{\rho}{\epsilon_0} r$$

De aquí se deduce:

$$\int_0^r d \left( r \frac{dV}{dr} \right) = - \frac{\rho}{\epsilon_0} \int_0^r r dr,$$

$$r \frac{dV}{dr} = - \frac{\rho}{2\epsilon_0} r^2.$$

Por consiguiente,

$$dV = - \frac{\rho}{2\epsilon_0} r dr.$$

Integrando esta ecuación entre 0 y R, y recordando que V<sub>R</sub> = 0, se obtiene:

$$V_0 = \frac{\rho}{4\epsilon_0} R^2.$$

De donde, finalmente,

$$\rho = \frac{4\epsilon_0}{R^2} V_0. \quad \{6\}$$

Fórmula que nos permite el cálculo de  $\rho$  a partir de la medida del potencial V<sub>0</sub> en el centro del cilindro.

Al deducir la expresión anterior se ha prescindido -según ya dijimos- de la influencia de las bases como factor capaz de modificar la simetría cilíndrica del volumen de aire considerado. A fin de averiguar la cuantía del error cometido por tal causa, hemos empleado además para el cálculo del potencial la siguiente fórmula (27):

$$V_p = \sum_{n,s} \frac{32/\pi^3 \beta_{os} (2n+1)}{J_1(\pi\beta_{os}) \{[(2n+1)/l]^2 + (\beta_{os}/a)^2\}} \operatorname{sen} \left[ \frac{\pi z}{l} (2n+1) \right] J_0 \left[ \frac{\pi\beta_{os} r}{a} \right], \quad \{7\}$$

que suministra el potencial -en unidades electrostáticas- en un punto  $P$ , de coordenadas cilíndricas  $(r, z)$ , dentro de un cilindro cerrado de radio  $a$  y generatriz  $l$ , que se encuentra -tanto su superficie lateral como sus bases- al potencial cero, y en cuyo interior existe una distribución homogénea de carga de densidad cúbica igual a la unidad. (El eje  $z$  coincide con el eje del cilindro y su origen está situado en una de las bases).

En ella,  $\beta_{os}$  representa la raíz  $s$ -ésima de la ecuación  $J_0(\pi\beta) = 0$ ; y  $J_0$  y  $J_1$  son respectivamente, las funciones de Bessel de orden cero y uno. En nuestro caso,  $r=0$  y  $z=l/2$ , ya que medimos el potencial en el centro del cilindro.

En el próximo apartado, al exponer los datos relativos a las instalaciones, daremos cuenta del resultado obtenido a partir de esta última expresión.

### V.3. Medida directa de la conductividad por el método de Gerdien

El fundamento de ese procedimiento, bien conocido, se describe con detalle en el Apéndice I. En él se justifica la expresión:

$$\lambda = \epsilon_0 \frac{C_1}{C} \frac{1}{t} \ln \frac{V_0}{V}, \quad \{8\}$$

donde  $C$  representa la capacidad del condensador cilíndrico;  $C_1$ , la capacidad total del sistema colector -incluido el electrómetro-;  $V_0$ , el potencial inicial de éste, y  $V$ , el potencial final al cabo de  $t$  segundos.

Al deducir dicha fórmula se supone que el transporte de carga sólo tiene lugar a través del aire. Pero, dado que en la práctica se producen también ciertas pérdidas a través de los soportes aislantes del conjunto cilindro-electrómetro, es necesario corregir la fórmula en cuestión valorando debidamente tales pérdidas.

A ese respecto, sea  $R$  la resistencia equivalente de los aislantes, y  $V$  el potencial del colector en un cierto instante. La corriente  $V/R$  produce en el intervalo  $dt$  una disminución de carga

$$dq = - \frac{V}{R} dt,$$

que origina un cambio  $(dV)_R$  en  $V$ :

$$(dV)_R = \frac{dq}{C_1}$$

Así, pues,

$$C_1 (dV)_R = - \frac{V}{R} dt.$$

Por consiguiente, siendo  $dV$  la variación total que experimenta  $V$  durante ese pequeño intervalo, se tiene (\*):

$$\lambda \frac{C}{\epsilon_0} V dt + \frac{V}{R} dt = -C_1 dV.$$

Es decir,

$$\left( \frac{\lambda}{\epsilon_0} + \frac{1}{CR} \right) dt = - \frac{C_1}{C} \frac{dV}{V}.$$

E integrando,

$$\lambda = \frac{\epsilon_0}{C} \left( C_1 \frac{1}{t} \ln \frac{V_0}{V} - \frac{1}{R} \right).$$

que es la fórmula utilizada por nosotros en estas medidas.

---

(\*) Véase el Apéndice I.

## VI. DESCRIPCION DE LAS INSTALACIONES

### VI.1. Zona urbana: Edificio de la Universidad

Las instalaciones correspondientes se encuentran sobre dos casetas de techo plano, de 2 m de altura, situadas en la azotea -a 15 m del nivel de la calle- de aquella parte del edificio que ha venido ocupando la Facultad de Ciencias. Designaremos respectivamente a esas casetas con los números 1 y 2 (fig. 13).

#### Sistema de medida de $E$ y de $J$

Se ha utilizado una placa circular de cobre de 20 cm de diámetro, que, montada sobre aislantes de teflón y rodeada por

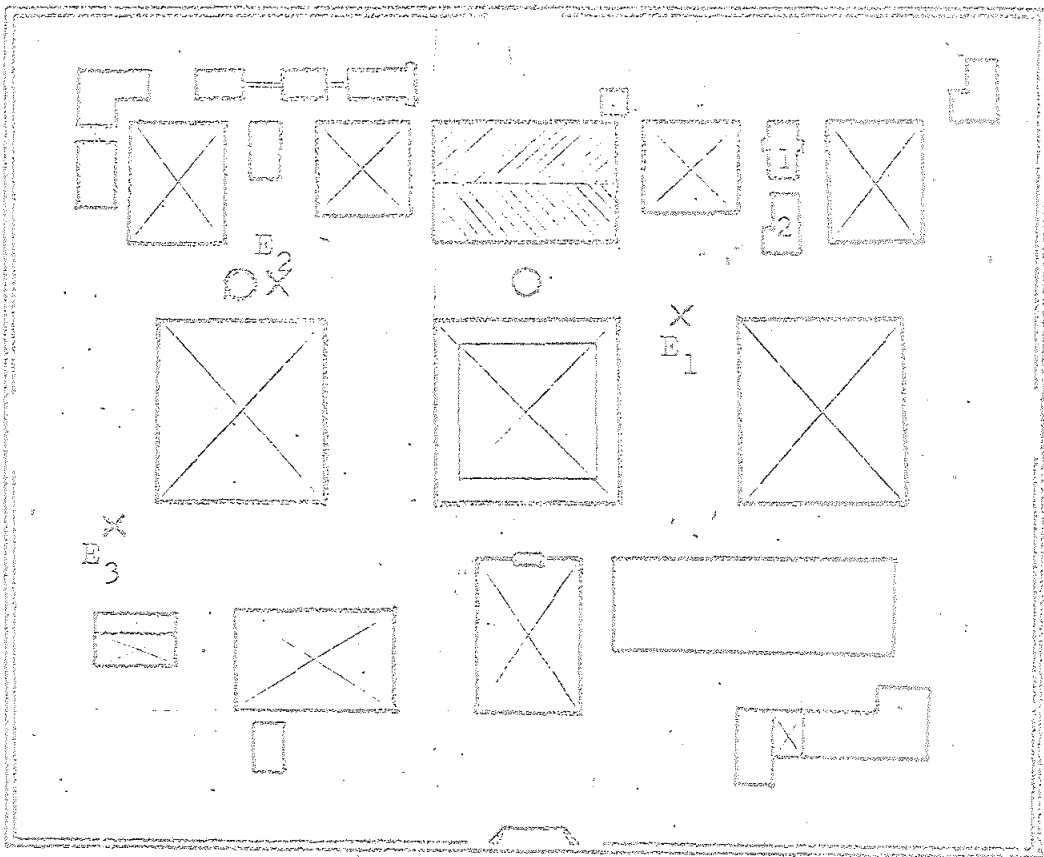


Figura 13

Croquis de la azotea

1 Situación de la caseta de medida n°1

2. Situación de la caseta de medida n°2

E<sub>1</sub> Estación para la medida simultánea del campo a 35m.

E<sub>2</sub> Idem a 100m.

E<sub>3</sub> Idem a 150m.



una envoltura cilíndrica coaxial -cuyo diámetro es de 22 cm- del mismo material, se halla dispuesta horizontalmente a 22 cm de altura sobre el techo de la caseta 1. Dicha placa puede cubrirse mediante un disco circular metálico de radio igual a 40 cm, unido a una varilla recta de 115 cm de longitud, capaz de girar en torno a un eje vertical. El movimiento del disco, que se consigue con ayuda de un sistema de palancas accionadas desde el interior de la caseta, se efectúa en un plano horizontal, quedando aquél, una vez cubierta la placa, a 1 cm de ella. Tanto la envoltura cilíndrica como el citado disco van conectados a tierra. La placa, por su parte, está unida a uno de los bornes de un electrómetro Keithley -cuyo otro borne va puesto a tierra-, instalado dentro de la caseta, mediante un cable convenientemente apantallado que penetra por un orificio practicado en el techo de la misma.

El artificio descrito permite medir -según hemos visto anteriormente- la intensidad del campo  $\underline{E}$ , así como la densidad de corriente aire-tierra  $\underline{J}$ . Lo que hace posible el cálculo inmediato de la conductividad  $\underline{\Lambda}$  (\*).

---

(\*) En rigor, de una de las conductividades polares, que, dado el sentido normal de  $\underline{E}$  -hacia abajo-, corresponde a  $\underline{\Lambda}_+$ .

### Determinación de $\rho$

Se dispone con tal objeto de un cilindro de chapa de hierro de 1,5 mm de espesor cuya generatriz mide 3,5 m, siendo su diámetro de 1,26 m, que va montado con su eje horizontal sobre una estructura metálica provista de ruedas. Las dos bases del cilindro poseen aberturas circulares coaxiales. La anterior -aquella por la que penetra el aire, de 20 cm de diámetro- puede cerrarse mediante un disco con bisagras. En la abertura posterior -de diámetro igual a 17 cm- va instalado un aspirador, gracias al cual se produce la entrada forzada del aire en el cilindro.

El potencial del campo originado por la carga volumétrica en el interior del cilindro se mide utilizando un colector radiactivo situado en su centro. Una delgada varilla metálica dispuesta a lo largo del eje en la mitad posterior del cilindro y convenientemente aislada, le sirve de soporte, y permite asimismo la conexión de dicho colector con un segundo electrómetro Keithley -fuera del cilindro- en el que se lee el potencial en cuestión (fig. 14).

El citado cilindro se encuentra hoy instalado sobre el techo de la caseta n° 2. Inicialmente, sin embargo (\*), se colocó

---

(\*) Más adelante se especifica cuáles son las medidas realizadas en cada situación.

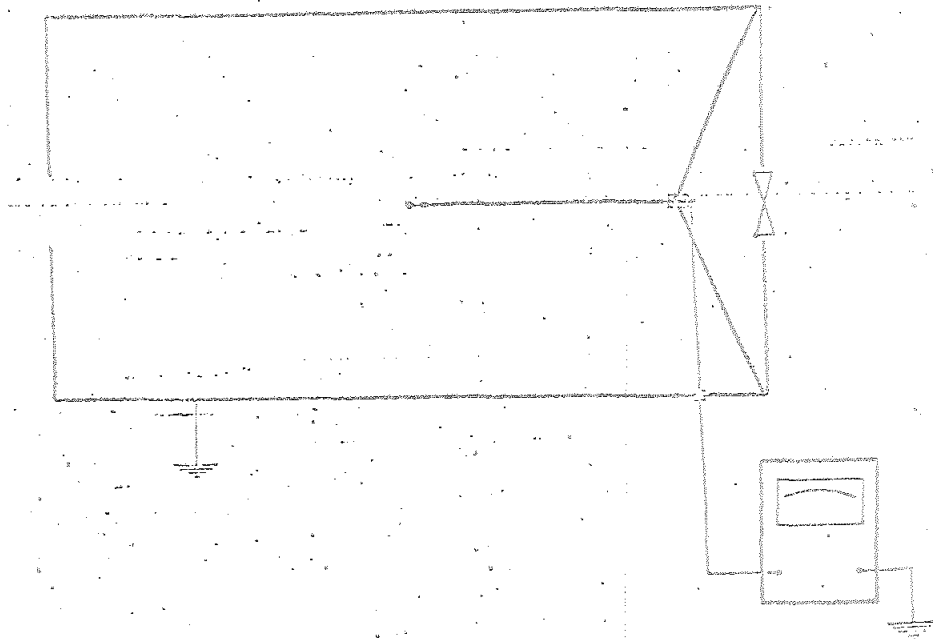


Figura 14.

en el suelo de la azotea, junto a una de las paredes de la caseta n° 1.

#### Montaje de registro continuo

Además del sistema descrito con el que se mide de forma discontinua la intensidad  $E$  del campo atmosférico, hemos realizado un montaje que hace posible la obtención de un registro continuo de ese parámetro. La instalación correspondiente consta

de un colector radiactivo unido a uno de los extremos de una varilla metálica de 60 cm de longitud que se proyecta horizontalmente a través de una ventana de la caseta n° 1. En esas condiciones, el colector queda a una altura de 90 cm sobre el suelo de la azotea, y a 35 cm de distancia de la pared de la caseta. El otro extremo de la varilla -en el interior de la caseta- va sujeto a un aislante de teflón, el cual, por medio de una resistencia eléctrica, se mantiene a temperatura superior a la del ambiente al objeto de evitar la posible condensación de la humedad sobre su superficie, consiguiéndose así un buen grado de aislamiento. La varilla va conectada a un electrómetro digital PAR, cuya salida acciona un aparato registrador.

### Contaminación atmosférica y velocidad del viento

Paralelamente a las medidas de los diversos parámetros eléctricos, se efectuaron asimismo otras de estas dos variables.

La contaminación a que nos referimos es la debida a partículas en suspensión en el aire -humos, principalmente-. Es posible determinarla con comodidad midiendo el grado de ennegrecimiento que experimenta un papel de filtro a través del cual se hace pasar un volumen conocido de aire (28), (29). La instala-

ción de filtraje utilizada por nosotros está constituida por un soporte para el filtro (\*), un contador de aire y una bomba aspirante -de émbolo- accionada por un motor de 1/3 CV. El soporte, protegido por un embudo invertido, se coloca al aire libre a una altura de 2 m junto a la caseta n° 2, dentro de la cual va dispuesto el resto del equipo.

La valoración del ennegrecimiento del papel se realiza mediante un reflectómetro "EEL".

Sobre el techo de esa caseta y a 2,35m por encima del mismo, se dispuso un anemómetro de Robinson. Se trata de un instrumento totalizador que permite la determinación inmediata de la velocidad media del viento en un cierto intervalo.

Se hizo uso asimismo en ciertos casos (\*\*\*) de una instalación destinada al registro continuo de la velocidad del viento, instalación que consta de un segundo anemómetro convencional, el cual -mediante un generador- acciona un galvanómetro en cuya escala se lee directamente dicha velocidad en m/s. Un rectificador tipo puente transforma la señal alterna en continua, y ésta, amplificada, actúa sobre el sistema registrador (\*\*\*).

---

(\*) Tipo "Whatman-1".

(\*\*) Paralelamente a algunos de los registros continuos de E.

(\*\*\*) Idéntico al empleado para el campo.

### Aparato de Gerdien para la medida de $\Delta$

El utilizado por nosotros fue construido en el Departamento y corresponde al modelo clásico (3), (fig. 15). Tanto el colector axial -de 25 cm de longitud- como el cilindro exterior -de generatriz igual a 59 cm- son de latón. Sus radios valen, respectivamente, 0,75 y 8 cm.

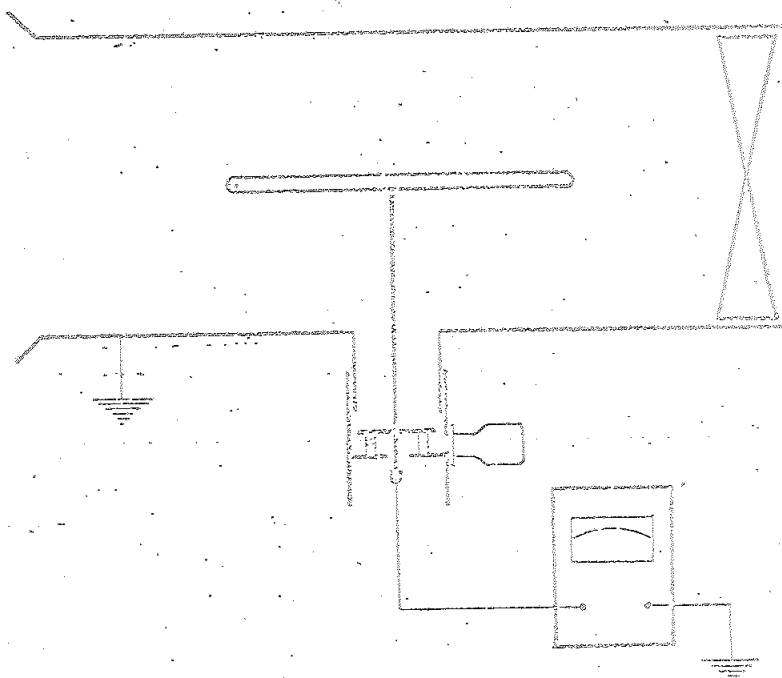


Figura 15

A una de las bases del cilindro va acoplado un aspirador eléctrico, capaz de suministrar un flujo de aire a la velocidad de 5 m/s.

Como instrumento de medida del potencial se hizo uso de un electrómetro digital PAR.

Al objeto de conseguir un buen aislamiento, se dedicó especial atención al arfiticio que sirve de soporte a la varilla vertical soldada al colector (\*).

#### VI.2. Zona rural: Finca del término de La Algaba (Sevilla)

La finca donde hemos dispuesto nuestra segunda estación de medidas se halla en una zona totalmente llana, bordeada en parte por el Guadalquivir, a unos 14 Km de la Universidad. Dentro de ella se eligió un recinto despejado, sin árboles ni edificaciones en un radio de 60 m. Las instalaciones destinadas a la determinación de los parámetros eléctricos comprenden los mismos elementos que han sido descritos anteriormente al ocuparnos de la estación de Sevilla; es decir, un montaje para las medidas conjuntas de  $\underline{E}$  y de  $\underline{J}$ , y otro que permite valorar  $\underline{\rho}$ . Por otra parte, se ha procedido aquí también a la medida sistemática de la velocidad del viento, así como -en algunos casos- al filtraje de un cierto volumen de aire a fin de estimar su

(\*) El cilindro va dispuesto horizontalmente.

contenido en partículas en suspensión.

### Sistema de medida de $E$ y de $J$

Su fundamento es idéntico al del montaje equivalente hecho en la Universidad. En esta estación, sin embargo, la placa receptora va montada casi a ras del suelo sobre aislantes de teflón, pudiendo cubrirse con ayuda de una segunda placa conectada a tierra. El mecanismo mediante el cual se acciona -a mano- esta placa ha sido objeto sucesivamente de dos formas distintas.

En la primera, el movimiento de la placa en cuestión se efectuaba horizontalmente, en línea recta, gracias a una varilla de 6 m capaz de deslizarse sobre soportes clavados en el suelo. En la segunda, dicha placa, unida a uno de los extremos de una varilla de 35 cm de longitud, puede desplazarse en un plano horizontal al girar en torno a un eje vertical que pasa por el otro extremo; consiguiéndose el desplazamiento con un juego de dos poleas -una de ellas, montada en ese eje-, distantes entre sí 7 m, y conectadas por medio de un hilo ligero. Ambas disposiciones hacen posible que el observador se encuentre a considerable distancia de la placa receptora, de manera que las determinaciones del campo son, sensiblemente, medidas absolutas.



El electrómetro Keithley que mide el potencial adquirido por la citada placa se halla dispuesto próximo a ella. Por tal motivo, y teniendo en cuenta la posición del observador, éste no puede efectuar a simple vista la lectura de su escala. Para obviar este inconveniente se hizo uso de un anteojo de precisión en cierto número de medidas. No obstante, en la mayor parte de las mismas la lectura correspondiente no se hacía directamente en el electrómetro, sino en un milivoltímetro conectado a él y situado ante el observador en cuestión.

#### Determinación de $\rho$

En este caso, el cilindro que hemos hecho construir con chapa de hierro de 2 mm de espesor, tiene 4,50 m de generatriz y 0,96 m de diámetro. La abertura circular de una de las bases, de 25 cm de diámetro, sirve de alojamiento al aspirador eléctrico destinado a extraer de forma continua del interior del cilindro el aire que -en el transcurso de las medidas- entra por la abertura opuesta, de diámetro igual a 20 cm. Montado dicho cilindro en un chasis metálico sobre ruedas, su eje queda a 0,90 m del suelo (fig. 16).

Por el punto medio de su generatriz más elevada, penetra verticalmente en el cilindro a través de un pequeño orificio



Figura 16

una delgada varilla de hierro aislada con teflón, en cuyo extremo inferior -situado precisamente en el eje- se dispone el colector radiactivo. Al otro extremo de la varilla, convenientemente protegido del campo eléctrico exterior, va unido uno de los bornes del electrómetro Kelthley que sirve para medir la diferencia de potencial existente entre el colector y la superficie del cilindro, en conexión a tierra.

En el esquema de la fig. 17 puede verse la posición del cilindro relativa a la placa utilizada en las medidas de E y J.

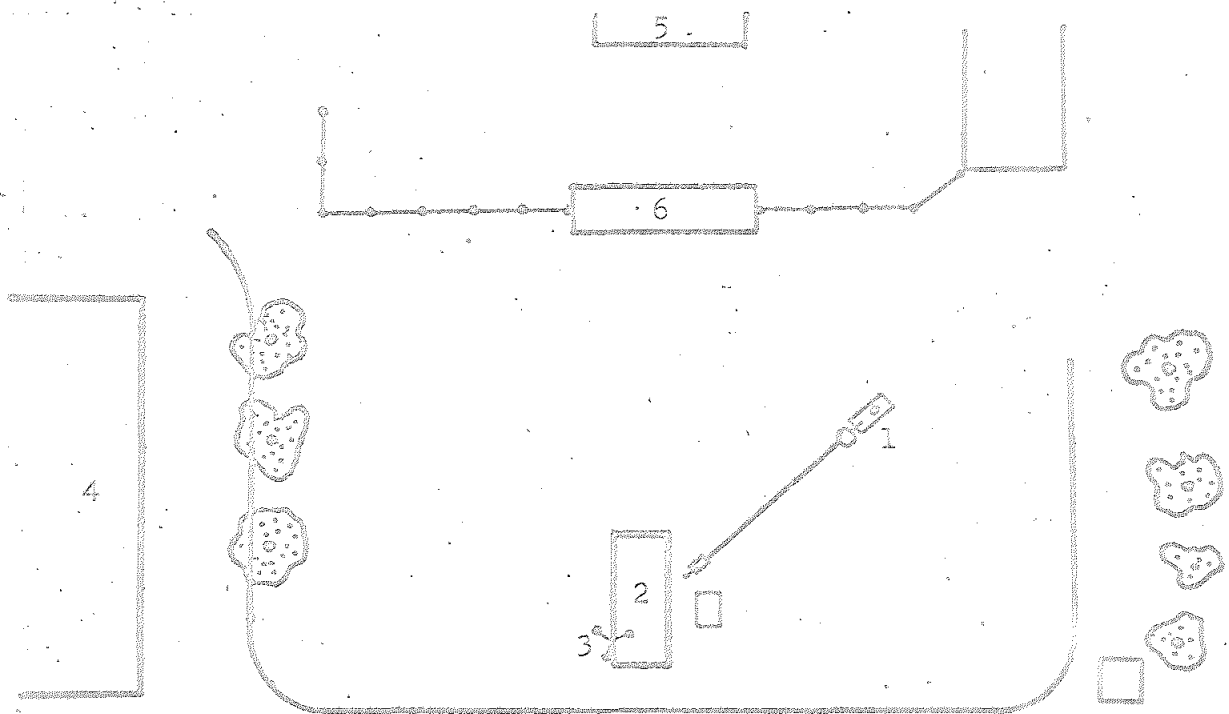


Figura 17

- 1 Placa para la medida de  $E$  y  $J$
- 2 Cilindro para la determinación de  $\rho$
- 3 Anemómetro
- 4 Edificación
- 5 Establo
- 6 Abrevadero

## VII. SISTEMÁTICA DE LAS MEDIDAS

Una serie completa de observaciones comprende la determinación conjunta -casi simultánea- de las siguientes variables: intensidad del campo eléctrico,  $\underline{E}$ ; densidad de corriente aire-tierra,  $\underline{J}$ ; conductividad eléctrica,  $\underline{\Lambda}$ ; densidad de carga volumétrica,  $\underline{\rho}$ ; contenido del aire en partículas,  $\underline{M}_R$  y velocidad media del viento,  $\underline{w}$ .

Cinco minutos antes de comenzar cada serie se conectaba el electrómetro de que va provisto el cilindro destinado a la medida de  $\underline{\rho}$ , al objeto de determinar posteriormente la lectura inicial del instrumento estando dicho cilindro totalmente cerrado y sin funcionar el aspirador.

En la tabla siguiente se especifica el orden establecido

para las distintas operaciones comprendidas en una de las series:

<u>Tiempo (minutos)</u>	<u>Operación</u>
0	Se pone en marcha la bomba que aspira el aire para la determinación de $M_R$ .
1,0	Primera lectura del cero del electrómetro (*). Empezamos a funcionar el aspirador del cilindro una vez abierta la entrada del aire.
1,5	Lectura inicial del anemómetro.
2,5	Se mide $V_1$ y, a continuación, se deja al descubierto la placa colectora. (véase pág. 55)
3,5	Se lee el electrómetro del cilindro -primera determinación de la densidad de carga: $\rho_1$ .
6,0	Nueva lectura del electrometro -cálculo de $\rho_2$ .
7,5	Se determina $\Delta V$ y, seguidamente -antes de $5 s$ -, $V_2$ .
8,5	Tercera lectura del electrómetro (**) -cálculo de $\rho_3$ . Inmediatamente después se corta la aspiración y se cierra la abertura de entrada del cilindro, al objeto de efectuar, pasados 5 min, una segunda determinación del cero.

(\*) Nos referimos al instrumento acoplado al cilindro.

(\*\*) Sin contar la observación previa del cero.

<u>Tiempo (minutos)</u>	<u>Operación</u>
11,0	Lectura final del anemómetro.
12	Han pasado 500 l de aire a través del filtro que se utiliza en la medida de $M_R$ . Se para el motor que acciona la bomba.
13,5	Se verifica la segunda lectura del cero del electrómetro, finalizando así la serie.

La media aritmética de las tres medidas de la densidad de carga,  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $\rho_3$  -una vez corregidas teniendo en cuenta las dos lecturas del cero-, nos suministra el valor  $\rho$  de dicha magnitud, correspondiente a cada serie, que hemos utilizado en los cálculos.

En junio de 1976 se puso en marcha una nueva técnica que permite reducir al máximo los pequeños intervalos  $t_1' - t_1$  y  $t_2' - t_2$ . (Véase pág. 55). Con tal objeto, se conectó un registro a la salida del electrómetro destinado a la medida del campo y de la corriente, en el que quedaban inscritos los desplazamientos correspondientes a  $V_1$  y  $V_2$ , así como a la variación  $\Delta V$ . Simultáneamente y por otro canal, se procedía a registrar asimismo gráficamente la densidad de carga volumétrica  $\rho$ .

En este caso, el intervalo durante el cual se medía  $\Delta V$  era 6 min, en vez de los 5 min de las series anteriores.

Las gráficas obtenidas suministraban los valores de  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $\Delta V$  y  $\rho$  en cada serie. Este último se determinaba por integración, haciendo uso de un planímetro.

Mediante dicha técnica se cubrían cuatro objetivos:

- a) La reducción a unas décimas de segundo de los intervalos respectivos antes mencionados.
- b) El obtener información sobre las características del cambio  $\Delta V$  experimentado por el potencial.
- c) Una valoración más representativa de la carga espacial media.
- d) Una mayor precisión en las determinaciones de las distintas variables.

Se dispuso, por otra parte, dentro de la caseta, un marcador de vueltas que indicaba el recorrido del anemómetro.



## VIII. PRECISION DE LAS MEDIDAS ELECTRICAS

### VIII.1. Intensidad del campo

Recordemos que el valor de  $E$  tabulado en cada serie se obtiene a partir de la fórmula {4},

$$E = \frac{C}{2 \epsilon_0 S} (V_1 + V_2),$$

como media aritmética de  $\underline{E_1}$  y  $\underline{E_2}$ :

$$E_1 = \frac{CV_1}{\epsilon_0 S}, \quad E_2 = \frac{CV_2}{\epsilon_0 S}$$

Tanto  $\underline{V_1}$  como  $\underline{V_2}$  se determinaban -según ya se dijo- median-

te un electrómetro Keithley 602, utilizándose con tal objeto la escala de 0-10 voltios. En ella podía apreciarse 0,05 V. Suponiendo que, por término medio,  $V_1 = V_2 = 2$  voltios, se obtiene, un error relativo del orden del 2,5% para la medida de cada una de ambas variables (\*)

### VIII.2. Densidad de corriente aire-tierra

En la expresión empleada para el cálculo de  $\underline{J}$  (5),

$$J = \frac{C}{S} \frac{\Delta V + V_1 - V_2}{\Delta t},$$

la medida de  $\underline{\Delta V}$  se realizaba con un error inferior a 0,025 V (escala de 0-3 voltios). Por consiguiente, el límite máximo de error en la suma  $\underline{\Delta V + V_1 - V_2}$  es de 0,125 V, ya que, como anteriormente, el límite correspondiente a  $\underline{V_1}$  y  $\underline{V_2}$  es igual a 0,05 V. Tomando como valor medio de dicha suma 0,5 V, se obtiene un 25% para el error relativo de la misma. Tal porcentaje representa también -como promedio- el error relativo de que viene afectada  $\underline{J}$ , puesto que el de  $\underline{\Delta t}$  es totalmente despreciable en comparación

---

(\*) Por lo que respecta a la medida de  $\underline{C}$ , véase el Apéndice II.

con esa cifra (\*).

Ha de tenerse presente, por otra parte, la imprecisión que en la determinación de  $\underline{J}$  puede introducir -en el caso de que el campo varíe con rapidez en los instantes inicial y final de la misma- el hecho de no coincidir exactamente los extremos del intervalo  $\underline{\Delta t}$  con aquellos instantes,  $\underline{t_1}$  y  $\underline{t_2}$ , en los que se miden, respectivamente,  $\underline{V_1}$  y  $\underline{V_2}$ .

### VIII.3. Conductividad

Determinación de la ley de Ohm:

Teniendo en cuenta la fórmula empleada para el cálculo de  $\underline{\Lambda_+}$ ,

$$\underline{\Lambda_+} = 2 \epsilon_0 \frac{1}{\underline{\Delta t}} \frac{\underline{\Delta V} + \underline{V_1} - \underline{V_2}}{\underline{V_1} + \underline{V_2}},$$

así como los valores anteriores para los distintos márgenes de error, resulta ser del 27,5%, por término medio, el límite del error relativo que puede afectar a esa variable.

---

(\*) El tiempo  $\underline{\Delta t}$  era de 5 min, medido con un cronómetro que apreciaba 0,2 s.

Medida por el método de Gerdien:

La fórmula {8},

$$\Lambda_+ = \epsilon_0 \frac{C_1}{c} \frac{1}{t} \ln \frac{V_0}{V},$$

nos permite obtener el error relativo de  $\Lambda_+$  en función de  $\Delta t$ ,

$\Delta V_0$  e  $\Delta V$ :

$$\frac{\Delta \Lambda_+}{\Lambda_+} = \frac{\Delta t}{t} + \frac{\frac{\Delta V_0}{V_0} + \frac{\Delta V}{V}}{\ln \frac{V_0}{V}}.$$

Tomando como valores representativos de nuestras medidas,

$$t = 360 \text{ s,}$$

$$t = 0,2 \text{ s,}$$

$$V_0 = 103 \text{ V,}$$

$$\Delta V_0 = \Delta V = 0,1 \text{ V,}$$

$$V = 102 \text{ V,}$$

resulta

$$\frac{\Delta \Lambda_+}{\Lambda_+} = 0,2.$$

#### VIII.4. Densidad de carga volumétrica

En este caso se hizo uso de la expresión {6},

$$\rho = \frac{4\epsilon_0}{R^2} V_0.$$

La lectura de  $V_0$  -en la escala de 0-1 voltio del electrómetro Keithley- se efectuaba con una precisión de 0,005 V. Lo que da lugar a un error relativo de  $\rho$  del 1% para  $\underline{V_0} = 0,6$  V.

#### VIII.5. Empleo del registro gráfico

Al tratar de la sistemática de las medidas se describió la técnica utilizada en el caso del grupo VI (pág. 80), señalándose entre sus ventajas la mayor precisión que esa técnica era capaz de suministrar.

Efectivamente, refiriéndonos a la intensidad del campo, en cada medida de  $\underline{V_1}$  -y de  $\underline{V_2}$ - se dibujaba sobre el papel del registro una raya de longitud proporcional a la cuantía de la misma (\*), y en la cual podía apreciarse fácilmente el medio

---

(\*) 25 mm equivalían a 1 V. Véanse las figs. 18 y 19.

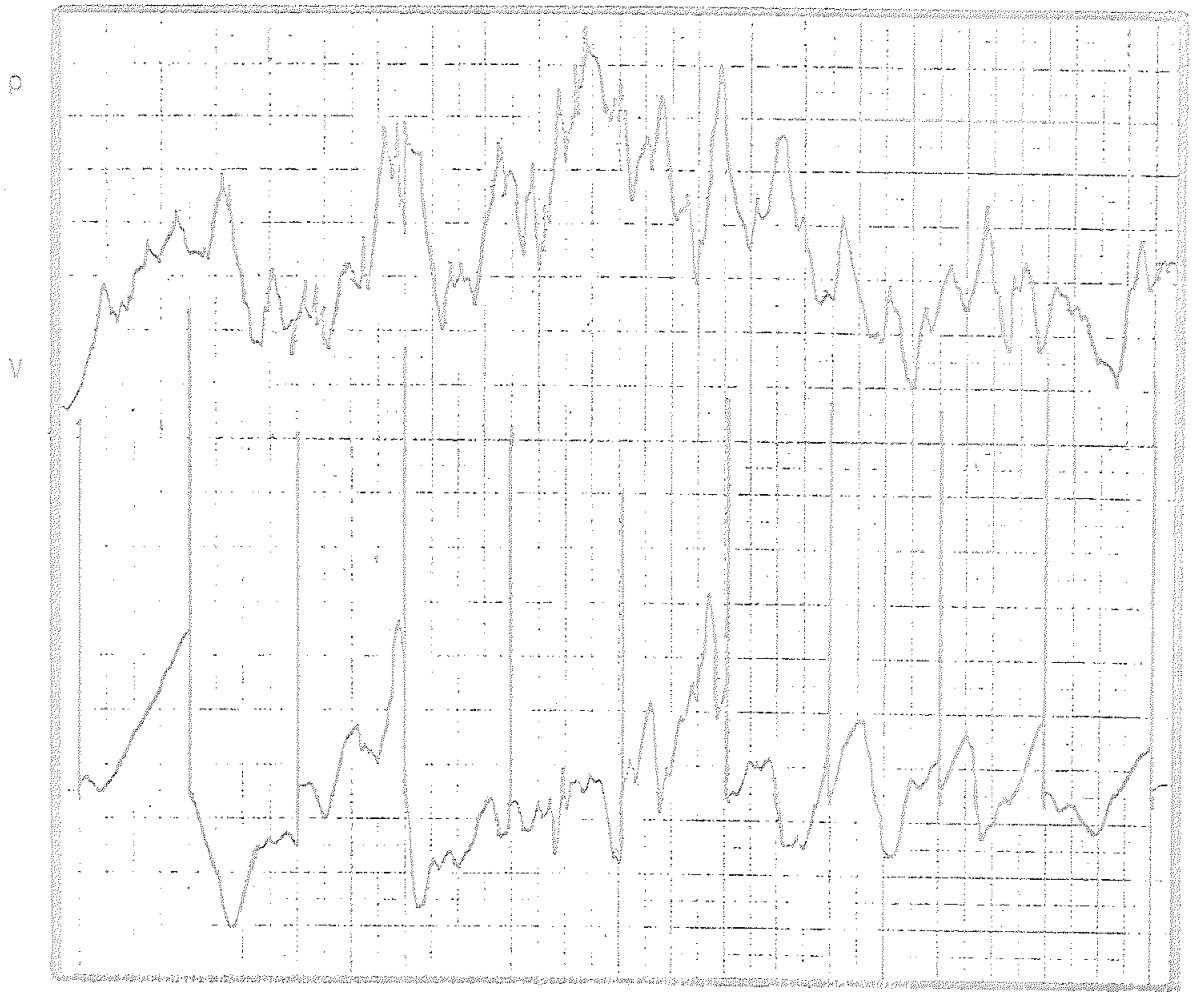


Figura 18

t

D

V

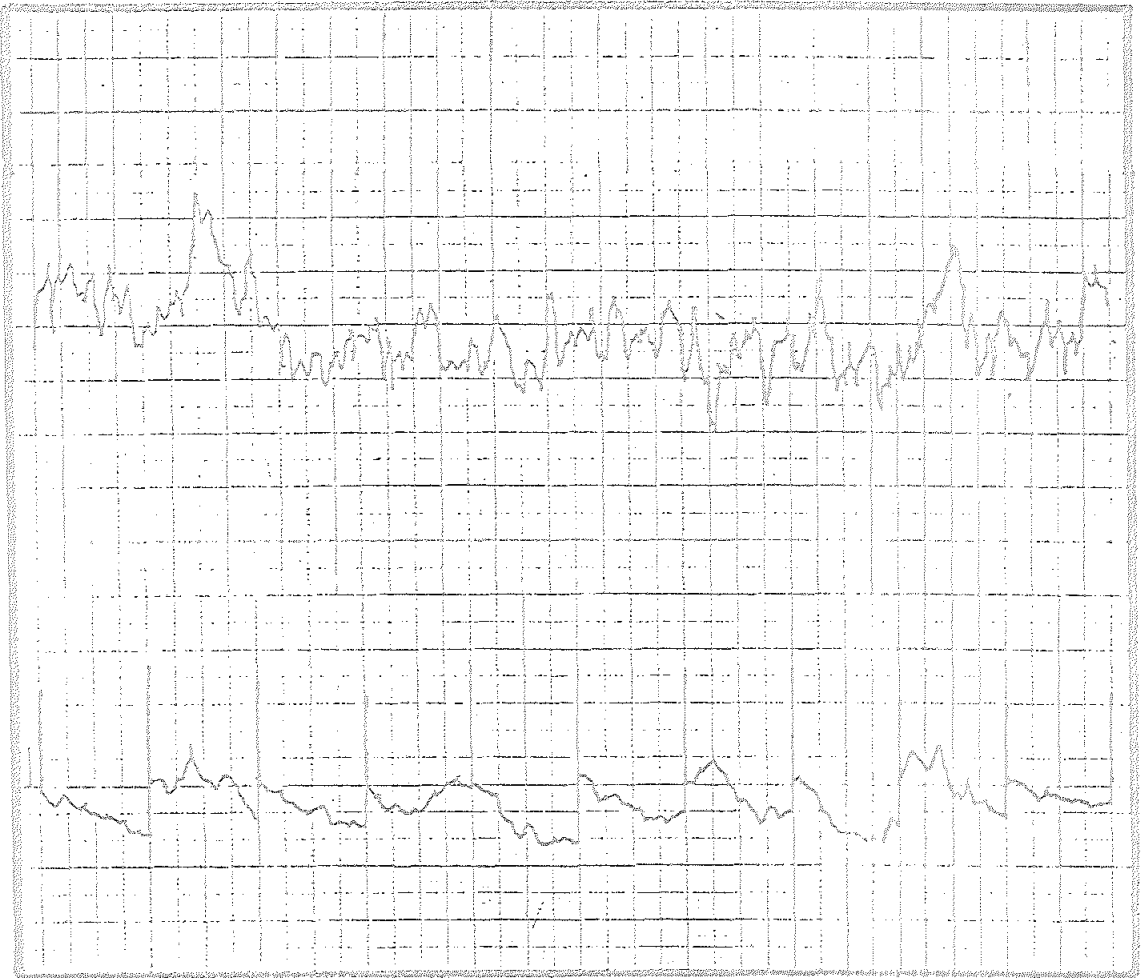


Figura 19

t

milímetro, lo que corresponde a 0,02 V. El error de que viene afectada cada determinación de  $E$  no resulta así superior al 1%.

Por lo que respecta a la densidad de corriente y dado que la suma  $\Delta V + V_1 - V_2$  se conoce con una precisión de  $\pm 0,06$  V, se obtiene un límite máximo de error relativo del 12%. Siendo pues del 13% el valor de dicho límite para la conductividad.

Y en cuanto a la densidad de carga volumétrica, ésta se obtenía a partir de  $V_0$  (véase pág.60), cuyo registro continuo tenía lugar simultáneamente con las medidas del campo (\*). Con ayuda de un planímetro procedíase al cálculo del valor medio del citado parámetro  $-y$ , por consiguiente, de la densidad de carga-. De ese modo, el error cometido no excedía del 1%.

---

(\*) Las figuras 18 y 19 constituyen dos muestras de ambos tipos de gráficas.



## IX. MEDIDAS REALIZADAS. CLASIFICACION DE LAS MISMAS

### IX.1. Zona urbana

La obtención de datos relativos al conjunto de las variables ya mencionadas -o bien a algunas de ellas- a cuya determinación hemos procedido, se llevó a cabo en el transcurso de distintas etapas -seis en total- comprendidas entre mayo de 1972 y septiembre de 1976. Teniendo en cuenta esa circunstancia de índole cronológica, se han reunido los citados datos en seis grupos (\*):

---

(\*) La formación de tales grupos se justifica también en algún caso por otras razones: como son el empleo de técnicas diferentes o a la medida de nuevas variables. Posteriormente en 1978-79 se efectuaron otras mediciones a las que se hace referencia en el apartado X.6.

Grupo I	:	Del 17-5-72	al	12-9-72.
Grupo II	:	Del 22-11-71	al	29-12-72.
Grupo III	:	Del 3-1-73	al	26-3-73.
Grupo IV	:	Del 8-10-73	al	21-12-73.
Grupo V	:	Del 8-1-74	al	6-4-74.
Grupo VI	:	Del 9-6-76	al	22-9-76.

La información detallada correspondiente a las series de medidas de todos ellos, se consigna en la tabla 1.711.

La primera columna, encabezada por N, contiene el número de orden respectivo. La letra que en raras ocasiones aparece entre paréntesis a la derecha de uno de estos números, indica alguna circunstancia, o condición, que pudiera haber afectado a los valores obtenidos (\*). Seguidamente, después de la fecha y hora -esta última, la del comienzo de las medidas-, se da cuenta del estado del cielo en lo que a nubosidad se refiere: nubes bajas (N.B.), medias (N.M.) y altas (N.A.), así como el número de octantes (Oc) de cielo cubierto en cada caso (\*\*).

dw corresponde a la dirección predominante del viento, viniendo expresada su velocidad media w -en un intervalo de 10 min- en m/s. Los valores tabulados de la intensidad del campo E, de la densidad de corriente aire-tierra J y de la conductivi-

---

(\*) Por ejemplo en las series 9, 26 y 100.

(\*\*) Datos facilitados por el Servicio Meteorológico.

dad  $\underline{\Lambda}$  (\*), están medidos en  $\underline{V/m}$ ,  $10^{-12} \underline{A/m^2}$  y  $10^{-15} \underline{\Omega^{-1}m^{-1}}$ , respectivamente.

En aquella parte de la tabla que contiene las observaciones pertenecientes a los grupos II, III, IV, V y VI, aparecen además los valores de la densidad de carga  $\underline{\rho}$  ( $10^{-11} \text{ C/m}^3$ ).

Una nueva columna -encabezada por  $\underline{M_R}$  figura en último término en el grupo III a partir de la serie n° 64, y asimismo en los dos grupos siguientes. Ahí se incluyen las medidas de la contaminación atmosférica -contenido del aire en partículas en suspensión, expresado en  $\mu\text{g/m}^3$ -.

Los datos de cada grupo se han repartido en dos subgrupos, 1 y 2. El primero comprende los días totalmente despejados, o bien aquellos en los que la nubosidad se limitaba a nubes altas o medias- días que calificaremos de "no perturbados". Y en el segundo se incluyen las observaciones realizadas en presencia de nubes bajas, a las que podría atribuirse, en principio, alguna influencia de tipo eléctrico -"días perturbados"-.

Por otra parte, hemos distribuido todos los datos de los seis grupos en dos grandes bloques, A y B. El A está formado

---

(\*) Se trata de  $\underline{\Lambda+}$

por los grupos I y VI -con un total de 1232 series de medidas (\*)-, y el B por los cuatro restantes, II, III, IV y V. Ello se justifica por la cronología de los distintos grupos, ya que de ese modo se hallan reunidas en el bloque A las observaciones efectuadas entre mayo y septiembre, y en el B las correspondientes a los meses comprendidos entre octubre y abril, ambos inclusive.

También aquí se han separado los días no perturbados de los perturbados, lo que da lugar en definitiva a cuatro bloques más pequeños, que designaremos, respectivamente, por A-1, A-2, B-1 y B-2.

De las 1232 series antes citadas que integran el bloque A, sólo 232 pertenecen a los días perturbados (A-2); es decir, un 18,8% del total. En cambio, de las 579 series del bloque B, 196 -un 33,9%- se incluyen en ese tipo de días.

A continuación, en las tablas 2 y 3 se expresan los valores medios de las respectivas variables para el conjunto de todas las observaciones, así como para aquéllas incluidas en los distintos bloques y subgrupos. Asimismo aparecen consignados

---

(\*) De esas series únicamente las del grupo VI (564) contienen valores de  $\underline{0}$ .

Tabla 2

	Variable	Máximo	N	Medio	Mínimo	N	Máx./Mín.
Subgrupo I-1	E	3515	10	1220	100	475	35,2
	J	3,7	47	0,6	0,1		37,0
	A	30,7	495	5,8	0,9	143	34,1
	P						
	V	5,10	244	1,81	0,23	10	22,2
Subgrupo VI-1	E	4050	545	1695	260	565	15,6
	J	7,6	367	0,6	0,1		76,0
	A	59,4	467	4,2	0,3	267	198,0
	P	20,91	510	6,48	0,06	247	348,5
	V	3,15	150	1,32	0,24	242	13,1
Bloque A-1	E	4050	545	1445	100	475	40,5
	J	7,6	367	0,6	0,1		76,0
	A	59,4	467	5,0	0,3	267	198,0
	P	20,91	510	6,48	0,06	247	348,5
	V	5,10	244	1,56	0,23	10	22,2
Subgrupo III-1	E	5230	82	2460	1190	98	4,4
	J	1,7	83	0,7	0,1		17,0
	A	10,2	75	3,3	0,5	61	20,4
	P	15,80	61	2,26	0,27	99	58,5
	V	3,67	98	1,26	0,03	85	122,3
Subgrupo III-1	E	3970	13	1990	920	98	4,3
	J	2,4	121	0,6	0,1		24,0
	A	14,0	41	3,9	0,6	140	23,3
	P	7,40	13	1,59	0,15		49,3
	V	3,93	41	1,84	0,01	133	393,0
Subgrupo IV-1	E	5280	153	1790	530	72	10,0
	J	2,3	3	0,7	0,0	122	
	A	16,1	72	4,5	0,1	122	161,0
	P	42,67	132	4,03	0,18	64	237,0
	V	4,20	125	1,73	0,15	153	28,0
Subgrupo V-1	E	4040	104	1980	870	19	4,6
	J	2,6	6	0,8	0,1		26,0
	A	17,5	15	4,5	0,7	8	25,0
	P	17,03	24	2,97	0,82	28	20,8
	V	4,67	16	1,75	0,25	24	18,7
Bloque B-1	E	5280	153	2000	530	72	10,0
	J	2,4	6	0,8	0,0	122	
	A	17,5	13	3,9	0,1	122	175,0
	P	42,67	132	2,74	0,15		284,5
	V	4,67	16	1,69	0,01	133	467,0

Table 5

Variable	Máximo	N	Medio	Mínimo	N	Máx./Mín.
Subgrupo I-2						
E	2470	642	1260	410	410	6,0
J	1,5	417	0,6	0,1		15,0
A	14,0	401	5,2	1,2	257	11,7
P	-----	-----	-----	-----		
v	4,55	261	1,71	0,18	417	25,3
Subgrupo VI-2						
E	3410	524	1770	100	230	34,1
J	1,7	479	0,5	0,1		17,0
A	75,0	229	4,4	0,4	483	187,5
P	11,83	142	5,38	0,53	2	22,3
v	4,48	229	1,40	0,08	148	56,0
Bloque A-2						
E	3410	524	1420	100	230	34,1
J	1,7	479	0,6	0,1		17,0
A	75,0	229	5,0	0,4	483	167,5
P	11,83	142	5,38	0,53	2	22,3
v	4,55	261	1,61	0,08	148	56,9
Subgrupo II-2						
E	3290	3	1855	650	32	5,1
J	3,1	7	0,6	0,1		31,0
A	15,9	7	3,7	0,6	153	26,5
P	6,81	7	1,71	0,27	31	25,2
v	4,93	13	1,82	0,18	7	27,4
Subgrupo III-2						
E	3450	105	2070	870	101	4,0
J	1,7	30	0,7	0,1		17,0
A	12,1	78	4,1	0,6	80	20,2
P	4,18	86	1,44	0,05	104	83,6
v	3,93	41	1,49	0,25	34	15,7
Subgrupo IV-2						
E	3580	133	1750	390	6	9,2
J	2,6	110	0,8	0,1		26,0
A	24,0	18	5,5	0,5	19	48,0
P	21,52	133	2,82	0,19	113	113,3
v	4,22	73	1,38	0,03	48	140,7
Subgrupo V-2						
E	3940	105	1850	290	35	10,1
J	2,4	99	0,9	0,1		24,0
A	44,2	34	7,2	1,2	38	86,8
P	5,62	61	2,28	0,36	93	15,6
v	5,45	35	1,97	0,53	80	10,3
Bloque B-2						
E	3940	105	1430	290	35	10,1
J	3,1	7	0,6	0,1		31,0
A	44,2	34	4,0	0,5	19	88,4
P	21,52	133	1,63	0,05	104	430,4
v	5,45	35	1,26	0,03	48	181,7

los valores extremos -máximo y mínimo- que se obtuvieron para cada una de las variables, con indicación del número de orden N de la observación correspondiente y del cociente Máx/Mín de ambos valores en cada caso.

### IX.2. Zona rural

Las medidas efectuadas en la estación de La Algaba comprenden un total de 378 series distribuidas en tres grupos que corresponden a distintos períodos, como se indica a continuación:

Grupo	N° de series	Período
I	38	3/6/74 - 23/7/74
II	240	2/6/77 - 14/7/77
III	100	17/10/77 - 8/11/77

Los resultados de todas esas medidas van incluidos en la tabla 17.TII, en la que -al igual que en la 17.TI- se expresa asimismo la información relativa al estado del cielo en lo que a nubosidad se refiere.

Por otra parte, la tabla 4 contiene los respectivos valores máximos, mínimos y medios de las diversas variables pertenecientes a cada uno de los grupos.



Tabla 4

Grupo	Variable	Máximo	N	Medio	Mínimo	N	Máx./Mín.
Grupo I	E	137	15	68	6	3	45,7
	J	1,1	22	0,2	0,0		
	Λ	19,7	36	3,4	0,1	15	197,0
	ρ	3,13	1	1,54	0,21	22	14,9
	v	4,32	20	1,37	0,23	10	18,8
Grupo II	E	167	132	95	3	193	55,7
	J	5,8	28	0,9	0,2		29,0
	Λ	413,0	193	13,1	1,2		344,2
	ρ	8,00	101	1,53	0,15		53,3
	v	3,03	208	1,07	0,00		
Grupo III	E	154	16	93	31	99	5,0
	J	1,1	15	0,2	0,0		
	Λ	3,5	100	1,6	0,1		35,0
	ρ	2,00		1,12	0,62		3,2
	v	2,13	38	0,88	0,03		71,0

## X. RESULTADOS

### X.1. Zona urbana

Señalemos primeramente la gran magnitud que poseen en general los valores de  $E$ . La causa fundamental de este hecho es de carácter topográfico; es decir, depende de la situación de la placa sobre la que -por la acción del campo atmosférico- se induce la carga eléctrica acusada por el electrómetro. Recuérdese que aquella placa va dispuesta a 20 cm por encima del techo de la caseta n° 1, el cual se halla, a su vez, a unos 2 m sobre el nivel de la azotea. Ello da lugar a una compresión muy marcada de las superficies equipotenciales próximas a dicha placa, con el aumento consiguiente de  $E$ .

Era de esperar que ese efecto topográfico se manifestase asimismo en los valores de la densidad de corriente  $j$ . Y así sucede, en efecto: dicho parámetro se muestra también, por tér-

mino medio, más elevado de lo normal. En este caso, sin embargo, el incremento en cuestión es de menor cuantía, ya que la citada densidad se ve afectada además por una conductividad reducida.

Lo anterior puede verse con claridad si comparamos los valores medios totales ( $\bar{E}$ ,  $\bar{J}$ ,  $\bar{\Lambda}$ ) que resultan de nuestras medidas (tabla 5) con los correspondientes promedios ( $\bar{E}_3^1$ ,  $\bar{J}_3$ ,  $\bar{\Lambda}_3^1$ ) dados por Chalmers (2). El cociente  $\bar{E}_1^1/\bar{E}_3^1$  es igual a 12,2 y, sin embargo,  $\bar{J}_1/\bar{J}_3$  es sólo 2,8. Pero, en cambio,  $\bar{\Lambda}_1/\bar{\Lambda}_3$  vale 0,27.

Por otra parte, la densidad de carga  $\bar{\rho}$  obtenida por nosotros es superior al promedio  $\rho_3^1$ .

Un examen detallado de los datos correspondientes a los diversos subgrupos revela algunas peculiaridades de interés que reseñamos a continuación.

#### Subgrupo I

1) Generalmente hay simultaneidad entre los respectivos valores mínimos de la densidad de corriente  $\underline{J}_m$  y de la conductividad  $\underline{\Lambda}_m$ . (Téngase en cuenta que el valor de  $\underline{J}_m$  se presenta en numerosas series). Dicha simultaneidad no se observa cuando la velocidad del viento es mucho mayor que el promedio.

Table 5

	Est.1	Est.2	Est.3	Unidades
$\bar{E}$	1580	92	130	V/m
$\bar{J}$	$6,7 \cdot 10^{-12}$	$5,6 \cdot 10^{-13}$	$2,4 \cdot 10^{-12}$	A/m <sup>2</sup>
$\bar{\Lambda}$	$4,8 \cdot 10^{-15}$	$9,1 \cdot 10^{-15}$	$1,8 \cdot 10^{-14}$	$\Omega^{-1} m^{-1}$
$\bar{\rho}$	$5,0 \cdot 10^{-11}$	$1,4 \cdot 10^{-12}$	$1,0 \cdot 10^{-11}$	C/m <sup>3</sup>
$\bar{v}$	1,60	1,05		m/s

Est.1 Azotea de la Universidad.

Est.2 Término de La Alga.

Est.3 Valores medios suministrados  
por Chalmers.

2) El máximo de la densidad de corriente  $\underline{J}_M$  no coincide con el máximo de conductividad  $\underline{\Lambda}_M$ , aunque sí es muy elevado el valor que corresponde a ésta. En tal caso, la velocidad del viento es superior a la media.

3)  $\underline{J}_M$  coincide con el valor mínimo de la velocidad del viento  $\underline{w}_m$  en los días perturbados.

4)  $\underline{\Lambda}_M$ , en los días perturbados, tiene lugar con vientos de velocidad muy superior a la media.

5) En las series 243 y 341, tanto  $\underline{E}$  como  $\underline{J}$  son negativos; es decir, el sentido de esas variables aparece invertido. En ambos casos la velocidad del viento fue elevada (\*)

6) El mínimo del viento  $\underline{w}_m$  coincide con el máximo del campo  $\underline{E}_M$  para días perturbados.

7) Existe concordancia entre  $\underline{E}_M$  y  $\underline{J}_M$  en la serie 475; pero ahí, sin embargo, la conductividad, lejos de ser también mínima, es muy alta. Y la velocidad del viento, por otra parte, no lo es tanto como correspondería a ese valor del campo.

---

(\*) En relación con los restantes datos de dicha magnitud.

Subgrupo II

- 1) Con referencia a los días perturbados,  $w_m$  coincide con  $J_M$  y  $\Lambda_M$ , así como con el valor máximo de la densidad de carga volumétrica  $\rho_M$ .
- 2) También en esos días hay correspondencia entre  $E_M$  y  $J_M$ . Pero, en tal caso, la conductividad no es mínima, por ser alta la velocidad del viento.
- 3) Para los días no perturbados,  $\rho_M$  coincide con  $J_M$  y  $\Lambda_M$ .
- 4) A  $J_M$  le corresponden siempre valores muy bajos de  $\Lambda$ .

Subgrupo III

- 1) En los días no perturbados,  $w_M$  coincide con  $\Lambda_M$  y con un valor de  $J$  casi máximo, siendo  $\rho$  aproximadamente igual a su valor medio. Algo parecido se observa también en los días perturbados. Compárese esa situación con 2) del subgrupo I y 1) del subgrupo II.
- 2)  $J_M$  y  $\Lambda_M$  no coinciden entre sí. (Véase el apartado anterior).
- 3) A  $J_m$  le corresponde siempre  $\Lambda_m$ . Lo que asimismo ocurría, prácticamente, en los subgrupos I y II -1) y -4), respectivamente.

4)  $\underline{E}_M$ , para los días no perturbados, coincide con  $\underline{P}_M$ ; no siendo mínima la velocidad del viento, aunque sí muy próxima a ese valor.

5) En los días perturbados,  $\underline{E}_M$  coincide sensiblemente con  $\underline{p}_m$ . Se observa así una situación inversa a la anterior.

#### Subgrupo IV

1) A  $\underline{J}_M$  en días no perturbados le corresponde un valor de  $\underline{\Lambda}$  muy superior a la media. Resultado que es común asimismo a los grupos anteriores.

2)  $\underline{J}_m$  coincide con  $\underline{\Lambda}_{mi}$ , tanto en los días no perturbados como en los perturbados.

3) En los días no perturbados coinciden entre sí  $\underline{E}_m$  y  $\underline{\Lambda}_M$ .

4)  $\underline{E}_m$  se corresponde con un valor muy elevado de  $\underline{\Lambda}$  en los días perturbados.

5) Por otra parte, es también muy alto el valor de  $\underline{\Lambda}$  que coincide con  $\underline{E}_M$  en los días perturbados y, en los no perturbados, lo que se observa igualmente en el grupo III-1).

6) El mínimo del viento coincide con  $\underline{E}_M$  en los días no perturbados.

### Subgrupo V

- 1) Hay coincidencia entre  $\underline{J}_m$  y  $\underline{\Lambda}_m$ , lo mismo en días perturbados que no perturbados.
- 2) A  $\underline{\Lambda}_m$  le corresponde un valor de  $\underline{J}$  próximo al máximo.
- 3) La densidad de carga  $\underline{\rho}$  es máxima -no siéndolo simultáneamente  $\underline{E}$ - cuando  $\underline{w}$  es mínima. En tal caso,  $\underline{J}$  y  $\underline{\Lambda}$  presentan valores muy altos -véase el grupo (I -1)-.
- 4)  $\underline{E}_m$  coincide con  $\underline{w}_M$  en los días no perturbados.

### Subgrupo VI

- 1) Existe correspondencia entre  $\underline{J}_m$  y  $\underline{\Lambda}_m$ , tanto en los días perturbados como en los no perturbados.
- 2) A  $\underline{\Lambda}_M$  le corresponde una densidad de corriente casi máxima.
- 3) En los días no perturbados, para  $\underline{\rho}_m$ , coincide  $\underline{J}_m$  con un valor casi mínimo de la conductividad.
- 4) Los valores más elevados de  $\underline{\Lambda}$  se presentan generalmente con los vientos más fuertes.
- 5) También aquí, como en el grupo anterior, hay coincidencia entre  $\underline{E}_m$  y  $\underline{w}_M$  en los días perturbados.



### Correlaciones entre las variables

Al objeto de determinar posibles interdependencias se ha procedido al cálculo de los respectivos coeficientes de correlación entre las diversas variables, coeficientes que pertenecen a uno de los tipos siguientes (véase tablas 6 y 7).

a) De una variable en función de otra exclusivamente, prescindiendo de las restantes. Se trata en este caso de correlaciones simples. Así, p. ej.,  $R_{EW}$  representa la correlación entre  $E$  y  $w$  correspondiente a una función de la forma  $E = cte \cdot w^n$ , siendo  $n$  un cierto exponente cuyo valor óptimo puede calcularse.

b) Suponiendo que una variable es función de otras dos, y hallando la correlación existente entre la primera y una de éstas cuando la tercera permanece constante. Los coeficientes que expresan tales correlaciones se han representado por minúsculas.  $r_{J\Lambda(\rho)}$  es, pues, el coeficiente de  $J$  como función de  $\Lambda$  y  $\rho$  para valores constantes de esta última.

c) Considerando la dependencia entre uno de los parámetros y otros tres en el supuesto de que los dos últimos se mantienen invariables. Tal es el caso, p. ej., de  $E$  frente a  $\rho$ ,  $\Lambda$  y  $w$ .  $r_{E\rho(\Lambda w)}$  expresa esa correlación con  $\Lambda$  y  $w$  constantes.

d) Uno de los parámetros como función de dos variables. P. ej., E dado por una expresión de la forma

$$E = \text{cte.} \Lambda^m w^n,$$

siendo el coeficiente de correlación  $R_{E\Lambda w}$ .

e) Funciones de tres variables, del tipo

$$E = \text{cte.} \Lambda^m \cdot w^n \cdot \rho^p.$$

Coficiente:  $R_{E\Lambda w \rho}$ .

#### 1) Días "no perturbados"

De la tabla 6 cabe destacar los siguientes resultados:

1) Las correlaciones existentes entre E y w, así como entre J y Λ (coeficientes  $R_{Ew}$  y  $R_{J\Lambda}$ , respectivamente), se manifiestan con nitidez en todos los subgrupos. En el primer caso, el coeficiente de correlación -siempre negativo- es, en valor absoluto, sensiblemente más elevado en el bloque A (-0'729) que en el B (-0'528). En cambio, en relación con las variables J y Λ sucede todo lo contrario, ya que en los respectivos coeficientes son 0'617 y 0'809.

2) La dependencia entre E y w en el bloque B<sub>1</sub> no se ve afectada en absoluto al considerar J constante " $r_{Ew(J)}$ ", y só-

Tabla 6

	SG.I	SG.II	SG.III	SG.IV	SG.V	SG.VI	B.A	B.B	Total
R <sub>EU</sub>	0,451	0,219	0,206	0,107	0,227	0,445	0,397	0,174	0,366
R <sub>EA</sub>	-0,516	-0,395	-0,172	-0,388	-0,288	-0,262	-0,453	-0,336	-0,440
R <sub>ER</sub>	-----	0,585	-0,173	0,543	0,312	-0,018	-----	0,208	-----
R <sub>EW</sub>	-0,787	-0,616	-0,521	-0,548	-0,416	-0,608	-0,729	-0,528	-0,605
R <sub>JA</sub>	0,495	0,768	0,920	0,763	0,823	0,737	0,617	0,809	0,642
R <sub>JE</sub>	-----	-0,010	0,270	-0,188	0,168	0,160	-----	0,050	-----
R <sub>JV</sub>	-0,406	-0,063	-0,094	-0,057	-0,022	-0,222	-0,284	-0,066	-0,203
R <sub>AE</sub>	-----	-0,242	-0,196	-0,431	0,006	0,189	-----	-0,057	-----
R <sub>AV</sub>	0,358	0,298	0,103	0,221	0,188	0,213	0,338	0,203	0,287
R <sub>EV</sub>	-----	-0,620	-0,130	-0,430	-0,208	0,111	-----	-0,242	-----
R <sub>EU</sub> (P)	-----	0,261	0,266	0,254	0,186	0,454	-----	0,167	-----
R <sub>EU</sub> (W)	0,233	0,229	0,185	0,091	0,240	0,400	0,289	0,164	0,312
R <sub>EA</sub> (P)	-----	-0,322	-0,143	-0,191	-0,305	-0,263	-----	-0,332	-----
R <sub>EA</sub> (W)	-0,407	-0,281	-0,139	-0,327	-0,235	-0,171	-0,321	-0,274	-0,349
R <sub>ER</sub> (J)	-----	0,602	-0,243	0,577	0,285	-0,101	-----	0,203	-----
R <sub>ER</sub> (A)	-----	0,549	-0,244	0,447	0,328	0,033	-----	0,201	-----
R <sub>ER</sub> (W)	-----	0,329	-0,284	0,407	0,253	0,063	-----	0,097	-----
R <sub>EW</sub> (J)	-0,740	-0,618	-0,515	-0,546	-0,422	-0,583	-0,700	-0,526	-0,582
R <sub>EW</sub> (A)	-0,753	-0,568	-0,514	-0,514	-0,385	-0,586	-0,686	-0,498	-0,557
R <sub>EW</sub> (P)	-----	-0,398	-0,557	-0,415	-0,378	-0,610	-----	-0,503	-----
R <sub>JA</sub> (P)	-----	0,789	0,918	0,774	0,834	0,729	-----	0,814	-----
R <sub>JA</sub> (W)	0,750	0,826	0,939	0,797	0,842	0,823	0,790	0,842	0,747
R <sub>JE</sub> (A)	-----	0,283	0,233	0,271	0,287	0,031	-----	0,164	-----
R <sub>JE</sub> (W)	-----	-0,063	0,282	-0,180	0,175	0,191	-----	0,035	-----
R <sub>JV</sub> (A)	-0,719	-0,477	-0,484	-0,358	-0,317	-0,574	-0,665	-0,400	-0,527
R <sub>JV</sub> (P)	-----	-0,088	-0,062	-0,155	0,013	-0,244	-----	-0,056	-----
R <sub>AE</sub> (J)	-----	-0,366	-0,139	-0,484	-0,236	0,107	-----	-0,166	-----
R <sub>AE</sub> (W)	-----	-0,076	0,212	-0,404	0,047	0,170	-----	-0,008	-----
R <sub>AV</sub> (J)	0,740	0,542	0,486	0,410	0,363	0,571	0,680	0,441	0,556
R <sub>AV</sub> (P)	-----	0,194	0,132	0,034	0,193	0,197	-----	0,197	-----
R <sub>EV</sub> (J)	-----	-0,622	-0,109	-0,449	-0,207	0,152	-----	-0,240	-----
R <sub>EV</sub> (A)	-----	-0,592	-0,154	-0,379	-0,213	0,075	-----	0,236	-----

Tabla 6 (continuación)

	SG.I	SG.II	SG.III	SG.IV	SG.V	SG.VI	B.A	B.B	Total
$\bar{R}_{EP}(Av)$	-----	0,321	-0,265	0,318	0,272	0,094	0,154	0,099	-0,237
$\bar{R}_{JA}(Cv)$	-----	0,825	0,938	0,805	0,848	0,817	0,786	0,848	0,748
$\bar{R}_{JV}(Ap)$	-----	-0,400	-0,466	-0,287	-0,273	-0,578	-0,670	-0,380	-0,550
$\bar{R}_{AV}(Jp)$	-----	0,430	0,477	0,246	0,330	0,565	-----	0,418	-----
$R_{EJW}$	0,800	0,642	0,544	0,553	0,470	0,686	0,755	0,546	0,654
$R_{EAV}$	0,826	0,654	0,535	0,612	0,468	0,623	0,761	0,577	0,666
$R_{EJAP}$	-----	0,789	0,925	0,783	0,839	0,737	0,619	0,815	0,645
$R_{JAV}$	0,797	0,827	0,939	0,797	0,842	0,853	0,809	0,843	0,759
$R_{JAV}$	-----	0,089	0,277	0,242	0,168	0,289	0,344	0,075	0,214
$R_{EAVJ}$	-----	0,697	0,619	0,653	0,509	0,686	0,756	0,552	0,679
$R_{EVAJ}$	-----	0,698	0,579	0,662	0,526	0,627	0,768	0,583	0,689
$R_{EAVJ}$	-----	0,827	0,943	0,818	0,853	0,834	0,814	0,844	0,761

lo muy ligeramente en el bloque A<sub>1</sub> (\*).

3) El coeficiente de correlación entre las variables mencionadas E y w sufre un pequeño descenso -no significativo- en ambos bloques cuando se calcula para Λ constante "r<sub>EW(Λ)</sub>".

4) En los subgrupos II, IV y VI -sobre todo en los dos primeros-, la correlación de E frente a w se reduce de modo apreciable -aunque las diferencias no sean significativas- al tomar ρ constante "r<sub>EW(ρ)</sub>".

5) Los valores de r<sub>JΛ(ρ)</sub> correspondientes a los diversos subgrupos y bloques no discrepan prácticamente de los obtenidos para R<sub>JΛ</sub>.

6) Sin embargo, r<sub>JΛ(w)</sub> aumenta con respecto a R<sub>JΛ</sub>, de manera especial en los subgrupos I y VI (bloque A-1), en cuyo caso las diferencias entre ambos coeficientes -en particular la que corresponde al primer subgrupo- son claramente significativas.

7) El considerar ρ constante además de w "r<sub>JΛ(ρw)</sub>" no introduce cambios sensibles con respecto a los valores de los coeficientes r<sub>JΛ(w)</sub>.

8) Se observa una correlación inversa moderada entre E y

---

(\*). Los cambios que experimentan los coeficientes en este caso no llegan a ser significativos.

$\underline{\Delta}$  en el subgrupo I -y también, de menor cuantía, en los subgrupos II y IV-. El coeficiente del subgrupo IV (-0'388) baja drásticamente al calcularlo para  $\underline{p}$  constante (-0'191)(\*). Por otra parte, cuando  $\underline{w}$  no varía disminuyen asimismo los coeficientes de esos grupos.

9) En los subgrupos II y IV aparece una correlación marcada entre  $\underline{E}$  y  $\underline{p}$  ( $R_{\underline{E}\underline{p}} > 0'5$ ). Señalemos el descenso que experimentan los respectivos coeficientes de ambos grupos al mantener  $\underline{w}$  constante " $r_{\underline{E}\underline{p}(\underline{w})}$ ".

10) Únicamente el subgrupo I presenta una escasa correlación entre  $\underline{\Delta}$  y  $\underline{w}$  ( $R_{\underline{\Delta}\underline{w}} = 0'358$ ). Para  $\underline{j}$  constante, sin embargo, la correlación entre dichas variables se incrementa notablemente en todos los casos, pudiendo calificarse de marcada en los subgrupos I ( $r=0,704$ ), II ( $r=0,542$ ) y VI ( $r=0,571$ ).

11) Entre  $\underline{p}$  y  $\underline{w}$  existe una correlación inversa marcada ( $R=-0,620$ ) en el subgrupo II, y sólo moderada ( $R=-0,430$ ) en el IV.

12) Al final de la tabla 6 se incluyen aquellos coeficientes que expresan las correlaciones de  $\underline{E}$  y de  $\underline{j}$  frente a otros dos o tres variables. Los valores así obtenidos -si se excep-

---

(\*) Nos referimos, por supuesto, a su valor absoluto.

túen los de  $R_{Jpw}$  son significativos en todos los grupos, encontrándose diversas correlaciones elevadas ( $R > 0,75$ ), e incluso muy elevadas ( $R > 0,90$ )

## 2) Días "perturbados"

Se hace referencia a la tabla 7 que pone de manifiesto diversas regularidades:

1) La correlación entre  $\underline{E}$  y  $\underline{w}$  ( $R_{\underline{Ew}}$ ) -con respecto a los días "no perturbados"- es algo más elevada en los subgrupos II y VI, y aumenta notablemente en el subgrupo V. En cambio, desaparece en el III.

La correlación existente entre  $\underline{J}$  y  $\underline{\Lambda}$  ( $R_{\underline{J\Lambda}}$ ) -en relación asimismo con esos días- se reduce de modo significativo en los subgrupos III, V y VI.

2) Las diferencias entre los respectivos valores de  $R_{\underline{Ew}}$  y  $r_{\underline{Ew}(J)}$  para los distintos subgrupos son, en general, de escasa cuantía.

3) También difieren poco entre sí  $R_{\underline{Ew}}$  y  $r_{\underline{Ew}(\Lambda)}$ .

4) En los subgrupos IV y V el coeficiente de correlación entre  $\underline{E}$  y  $\underline{w}$  disminuye ligeramente -en valor absoluto- cuando se considera  $\underline{p}$  constante.

Tabla 7.

	SG. I	SG. II	SG. III	SG. IV	SG. V	SG. VI	B.A	B.B	Total
R <sub>EJ</sub>	0,429	0,132	0,043	-0,327	0,133	0,478	0,394	-0,011	0,213
R <sub>EA</sub>	-0,360	-0,431	-0,118	-0,622	-0,667	-0,452	-0,461	-0,478	-0,466
R <sub>EP</sub>	-----	0,434	0,119	0,308	0,353	-0,187	-----	0,164	-----
R <sub>EW</sub>	-0,754	-0,663	-0,086	-0,572	-0,609	-0,678	-0,720	-0,435	-0,544
R <sub>JA</sub>	0,583	0,823	0,494	0,835	0,531	0,493	0,553	0,727	0,637
R <sub>JP</sub>	-----	-0,096	-0,158	0,179	0,148	-0,037	-----	0,040	-----
R <sub>JW</sub>	-0,429	0,164	-0,307	0,191	-0,241	-0,327	-0,304	0,011	-0,122
R <sub>AP</sub>	-----	-0,332	-0,139	-0,019	-0,145	0,133	-----	-0,057	-----
R <sub>AW</sub>	0,203	0,502	-0,015	0,431	0,269	0,258	0,300	0,291	0,293
R <sub>AW</sub>	-----	-0,170	0,191	-0,363	-0,293	0,094	-----	-0,175	-----
F <sub>EJ</sub> (P)	-----	0,194	0,063	-0,408	0,087	0,480	-----	-0,018	-----
F <sub>EJ</sub> (W)	0,178	0,326	0,018	-0,270	-0,018	0,369	0,262	-0,007	0,176
F <sub>EA</sub> (P)	-----	-0,338	-0,103	-0,648	-0,665	-0,439	-----	-0,476	-----
F <sub>EA</sub> (W)	-0,322	-0,152	-0,120	-0,507	0,659	-0,390	-0,370	-0,408	-0,382
F <sub>EP</sub> (J)	-----	0,453	0,128	0,394	0,340	-0,193	-----	0,165	-----
F <sub>EP</sub> (A)	-----	0,342	0,104	0,378	0,348	-0,138	-----	0,156	-----
F <sub>EP</sub> (W)	-----	0,436	0,138	0,131	0,230	-0,168	-----	0,099	-----
F <sub>EW</sub> (J)	-0,699	-0,700	-0,077	-0,549	-0,600	-0,628	-0,685	-0,002	-0,534
F <sub>EW</sub> (A)	-0,745	-0,572	-0,088	-0,430	-0,599	-0,651	-0,687	-0,352	-0,482
F <sub>EW</sub> (P)	-----	-0,664	-0,112	-0,519	-0,565	-0,675	-----	-0,418	-----
F <sub>JA</sub> (P)	-----	0,843	0,483	0,852	0,565	0,503	-----	0,731	-----
F <sub>JA</sub> (W)	0,758	0,868	0,514	0,850	0,637	0,632	0,709	0,757	0,709
F <sub>JP</sub> (A)	-----	0,331	-0,104	0,354	0,268	-0,119	-----	0,119	-----
F <sub>JP</sub> (W)	-----	-0,070	-0,106	0,272	0,083	-0,007	-----	0,043	-----
F <sub>JW</sub> (A)	-0,688	-0,507	-0,345	-0,340	-0,470	-0,540	-0,591	-0,305	-0,419
F <sub>JW</sub> (P)	-----	0,151	-0,286	0,279	-0,209	-0,325	-----	0,018	-----
F <sub>AP</sub> (J)	-----	-0,447	-0,071	-0,311	-0,267	0,174	-----	-0,123	-----
F <sub>AP</sub> (W)	-----	-0,289	-0,139	0,163	-0,072	0,113	-----	-0,006	-----
F <sub>AW</sub> (J)	0,617	0,655	0,165	0,503	0,483	0,510	0,590	0,412	0,485
F <sub>AW</sub> (P)	-----	0,479	0,012	0,455	0,239	0,249	-----	0,286	-----
F <sub>AW</sub> (W)	-----	-0,157	0,152	-0,411	-0,268	0,087	-----	-0,176	-----
F <sub>EW</sub> (A)	-----	-0,004	0,191	-0,393	-0,267	0,062	-----	-0,166	-----



Tabla 7 (continuación)

	SG.I	SG.II	SG.III	SG.IV	SG.V	SG.VI	B.A	B.B	Total
$R_{EP(AW)}$	-----	0,414	0,124	0,252	0,244	-0,129	-----	0,106	-----
$R_{JA(EW)}$	-----	0,888	0,507	0,849	0,647	0,637	-----	0,758	-----
$R_{JW(AE)}$	-----	-0,535	-0,333	-0,233	-0,429	-0,538	-----	-0,292	-----
$R_{AW(JE)}$	-----	0,661	0,179	0,432	0,443	0,505	-----	0,400	-----
$R_{EJW}$	0,763	0,706	0,088	0,613	0,609	0,730	0,743	0,011	0,564
$R_{EAW}$	0,783	0,672	0,147	0,707	0,803	0,736	0,764	0,569	0,632
$R_{JAE}$	-----	0,872	0,502	0,857	0,578	0,504	-----	0,732	-----
$R_{JAW}$	0,808	0,872	0,578	0,856	0,664	0,681	0,740	0,757	0,714
$R_{JEW}$	-----	0,178	0,324	0,328	0,254	0,327	-----	0,044	-----
$R_{EWJR}$	-----	0,786	0,167	0,638	0,637	0,740	-----	0,167	-----
$R_{EWAe}$	-----	0,739	0,191	0,729	0,816	0,741	-----	0,756	-----
$R_{JAEW}$	-----	0,613	0,579	0,866	0,675	0,685	-----	0,758	-----

5) No existen diferencias apreciables entre los valores correspondientes de  $R_{J\Delta}$  y  $r_{J\Delta(\rho)}$ .

6) Tal como se puso de manifiesto en los datos de los días "no perturbados", la correlación entre  $J$  y  $\Delta$  mejora sensiblemente para  $w$  constante. Dicho efecto se acentúa en los subgrupos I, V y VI.

7) No se modifican prácticamente los valores de  $r_{J\Delta(w)}$  al considerar, además,  $\rho$  constante -  $r_{J\Delta(\rho w)}$ .

8) Los subgrupos IV y V muestran una marcada correlación inversa de  $E$  frente a  $\Delta$  (-0,622 y -0,667), respectivamente). Se observa aquí una clara diferencia con los días "no perturbados". Para  $\rho$  constante, dichos coeficientes son -0,648 y -0,665. Y para  $w$  constante, -0,507 y -0,659. Señalemos, por otra parte, que en el subgrupo II,  $R_{E\Delta} = -0,431$  y  $r_{E\Delta(w)} = 0,152$ .

9) En el subgrupo II,  $R_{E\rho} = 0,434$ , siendo inferior a 0,4 en todos los restantes subgrupos -en el VI, se hace negativo-.

10) El coeficiente de correlación entre  $\Delta$  y  $w$ , que sólo en el subgrupo II alcanza la cota de 0,5 ( $R_{\Delta w} = 0,502$ ), aumenta en todos los casos para  $J$  constante, obteniéndose una correlación marcada en los subgrupos I, II, IV y VI -en el II,  $r_{\Delta w(J)} = 0,655$ - . Recuérdese que ese mismo efecto se observaba en los días "no perturbados".

11) Tan sólo en el grupo IV se manifiesta una escasa correlación entre  $\underline{p}$  y  $\underline{w}$  ( $R_{\underline{pw}} = -0,363$ ).

12) También aquí -como en los días "no perturbados"- se alcanzan valores más altos en las correlaciones múltiples, tanto de  $\underline{E}$  como de  $\underline{J}$ , frente a dos o tres variables (\*)

En un total de 220 de las series de medidas que figuran en la tabla 1.TII se determinó también -además de las variables eléctricas y de la velocidad del viento- el contenido del aire en partículas en suspensión,  $\underline{M}_R$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), valorado mediante el procedimiento reflectométrico al que ya se hizo referencia.

Damos a continuación los coeficientes de correlación calculados, respectivamente, para esa variable con cada una de las restantes:

$$R_{EM_R} = -0,011$$

$$R_{OM_R} = 0,532$$

$$R_{JM_R} = -0,087$$

$$R_{M_RW} = -0,230$$

$$R_{\Delta M_R} = -0,058$$

---

(\*) En el caso de  $R_{J\underline{pw}}$  sólo se obtienen valores marginales en los subgrupos  $\underline{J\underline{pw}}$  III, IV y VI. Por otra parte, en el subgrupo III son únicamente  $R_{\underline{J\underline{\Delta p}}}$ ,  $R_{\underline{J\underline{\Delta w}}}$  y  $R_{\underline{J\underline{\Delta ow}}}$  aquéllos que superan el valor 0,5.

Así, pues, sólo la carga espacial manifiesta una correlación moderada con la citada contaminación.

Más adelante nos ocuparemos de algunas medidas, realizadas posteriormente, en la que sí pudo demostrarse la influencia de  $M_R$  sobre otros parámetros.

### Relaciones empíricas entre los parámetros eléctricos

#### 1). Días "no perturbados"

Los anteriores coeficientes de correlación entre dos variables cualesquiera,  $y$ ,  $x$ , corresponden a dependencias de la forma:

$$y = \text{cte.}x^n.$$

El valor óptimo de  $n$  para cada subgrupo, en los casos en que la correlación hallada es significativa, aparece consignada en la tabla 8, en cuya primera columna figuran las dos variables en cuestión.

Cuando se considera una variable  $z$  como función de otras,  $x$ ,  $y$ , tales relaciones se expresan mediante la fórmula

$$z = \text{cte.}x^m y^n,$$

Indicándose los respectivos valores de  $\underline{m}$  y  $\underline{n}$  en la tabla 8.

Por último, la tabla 8 contiene los valores calculados para los exponentes  $\underline{m}$ ,  $\underline{n}$  y  $\underline{p}$  en las funciones del tipo

$$u = \text{cte.} x^m y^n z^p,$$

correspondientes a las correlaciones múltiples de una variable frente a otras tres.

## 2) Días "perturbados"

Se han considerado como anteriormente las funciones:

$$y = \text{cte.} x^m,$$

$$z = \text{cte.} x^m y^n,$$

$$u = \text{cte.} x^m y^n z^p,$$

que representan las dependencias estudiadas entre las diversas variables. La tabla 9 da cuenta de los respectivos valores óptimos de los exponentes que en ellas figuran.

## X.2. Valores medios de las variables

A partir del conjunto de todas las series de observaciones

Tabla 8

	Subgrupo I			Subgrupo II			Subgrupo III			Subgrupo IV			Subgrupo V			Subgrupo VI			Bloque A			Bloque B			Total		
	m	n	p	m	n	p	m	n	p	m	n	p	m	n	p	m	n	p	m	n	p	m	n	p	m	n	p
E/A	0,47			0,30			0,54			0,23			0,44			0,64			0,46			0,35			0,45		
E/A	-0,53			-0,68			-0,41			-0,84			-0,51			-0,36			-0,53			-0,66			-0,54		
E/R				1,25			0,55			1,01			0,48			-0,02						0,48					
E/M	-0,86			-1,59			-1,90			-1,07			-0,68			-0,69			-0,78			-1,27			-0,75		
J/A	0,49			0,77			1			0,76			0,39			0,77			0,63			0,79			0,65		
J/V	-0,43			-0,09			-0,13			-0,05			-0,02			-0,18			-0,26			-0,05			-0,20		
√/R				-0,30			0,26			-0,39			0,01			0,15						-0,07					
√/V	0,38			0,44			0,16			0,20			0,17			0,18			0,31			0,25			0,29		
R/V				-0,75			-0,15			-0,45			-0,22			0,12						-0,25					
F/A	0,82	1,89		0,10	-0,23		0,06	-0,14		0,04	-0,23		0,11	-0,23		0,23	-0,47		0,18	-0,62		0,07	-0,22		0,21	-0,45	
F/V	-1,50	3,06		-0,13	-0,21		-0,05	-0,14		-0,13	-0,25		-0,12	-0,23		-0,10	-0,51		-0,32	1,11		-0,12	-0,20		-0,23	-0,42	
J/A				0,82	0,16		1,02	0,08		0,85	0,23		0,89	0,21		0,77	0,03					0,81	0,08				
J/V	0,74	-0,64		0,87	-0,23		0,93	-0,14		0,82	-0,26		0,92	-0,21		0,86	-0,50		0,79	-0,60		0,88	-0,20		0,76	-0,42	
S/A				-0,12	0,14	-0,14	-0,05	0,04	-0,13	-0,07	0,16	-0,21	-0,12	0,16	0,20	-0,11	0,07	-0,50				-0,12	0,04	-0,20			
S/V				0,88	0,14	-0,14	0,94	0,04	-0,13	0,93	0,16	-0,20	0,88	0,16	0,20	0,89	0,07	-0,50				0,88	0,04	-0,20			

Tabla 9

	Subgrupo I			Subgrupo II			Subgrupo III			Subgrupo IV			Subgrupo V			Subgrupo VI			Bloque A			Bloque B			Total		
	n	n	p	n	n	p	n	n	p	n	n	p	n	n	p	n	n	p	n	n	p	n	n	p	n	n	p
E/J	0,46			0,23			0,06			-0,50			0,14			0,47			0,40			-0,32			0,23		
E/A	-0,42			-0,62			-0,14			-1,23			-0,81			-0,46			-0,51			-0,75			-0,58		
E/C	-----			1,14			0,29			0,48			0,27			-0,17			-----			0,32			-----		
E/V	-0,04			-0,88			-0,08			-1,28			-0,52			-0,60			0,75			-0,62			-0,62		
J/A	0,60			0,81			0,44			0,92			0,63			0,51			0,60			0,77			0,60		
J/V	-0,48			0,11			-0,22			0,24			-0,20			-0,30			0,33			0,01			-0,12		
N/C	-----			-0,46			-0,29			-0,02			-0,09			0,12			-----			-0,07			-----		
N/V	0,22			0,35			-0,01			0,49			0,19			0,22			0,28			0,26			0,27		
C/V	-----			-0,09			0,07			-0,53			-0,32			0,09			-----			-0,13			-----		
E/Jw	0,12	-0,56		0,13	-0,53		0,01	-0,09		-0,10	-0,24		-0,01	-0,71		0,29	-0,66		0,18	-0,63		-4,19	-0,31		0,13	-0,46	
E/Aw	-0,19	-0,57		-0,07	-0,45		-0,10	-0,09		-0,23	-0,17		-0,45	-0,54		-0,29	-0,68		-0,24	-0,62		-0,25	-0,23		-0,27	-0,39	
J/Ac	-----	-----		0,90	0,15		0,53	-0,05		0,76	0,22		0,48	0,30		0,49	-0,11		-----	-----		0,69	-0,06		-----	-----	
J/Vw	0,68	-0,51		1,00	-0,48		0,54	-0,42		0,84	-0,17		0,54	-0,50		0,60	-0,54		0,65	-0,51		0,74	-0,23		0,69	-0,34	
E/A <sup>2</sup> v	-----	-----		-0,01	0,12	-0,4	-0,09	0,05	-0,12	-0,25	0,12	-0,11	-0,44	0,20	-0,50	-0,28	-0,10	-0,67	-----	-----		-0,25	-0,05	-0,22	-----	-----	
J/A <sup>2</sup> v	-----	-----		0,89	0,15	0,0	0,54	-0,02	-0,4	0,82	0,18	-0,11	0,55	0,17	-0,45	0,61	-0,08	-0,23	-----	-----		0,74	0,04	-0,22	-----	-----	

contenidas en el bloque A, se ha procedido al cálculo de los respectivos valores medios de las distintas variables, teniendo en cuenta la hora dentro de la cual se hicieron las medidas correspondientes. Tales promedios se han determinado asimismo con los datos del bloque B.

Los resultados obtenidos para ambos bloques se incluyen en la tabla 10.T.II en la que aparece reseñado en cada caso el número N de las medidas que se utilizaron en el cálculo del promedio en cuestión.

### Correlaciones

#### 1) Días "no perturbados"

En la tabla 11 se detallan los diversos coeficientes de correlación entre los valores medios de las variables (\*) que corresponden a días no perturbados. Destacan en ella los resultados siguientes:

- 1) R<sub>EW</sub> mejora en todos los grupos en relación con los da-

---

(\*) Se han omitido los pertenecientes a los grupos IV y V.



Tabla 11

	SG.I	SG.II	SG.III	SG.IV	SG.V	SG.VI	B.A	B.B	Total
R <sub>BJ</sub>	0,478	0,635	0,378			0,544	0,486	0,443	0,489
R <sub>BA</sub>	-0,579	-0,325	-0,120			-0,468	-0,584	-0,211	-0,596
R <sub>BC</sub>		0,731	0,392			-0,059		0,517	
R <sub>BV</sub>	-0,645	-0,653	-0,682			-0,744	-0,823	-0,698	-0,707
R <sub>JA</sub>	0,414	0,503	0,865			0,457	0,404	0,771	0,391
R <sub>JC</sub>		0,478	0,391			0,020		0,414	
R <sub>JV</sub>	-0,484	-0,465	-0,099			-0,358	-0,446	-0,214	-0,385
R <sub>AP</sub>		-0,209	0,178			0,064		0,070	
R <sub>AV</sub>	0,415	0,142	0,239			0,417	0,441	0,238	0,384
R <sub>PV</sub>		-0,770	-0,282			0,178		-0,452	
R <sub>BJ(P)</sub>		0,476	0,265			0,546		0,294	
R <sub>BJ(W)</sub>	0,147	0,494	0,427			0,445	0,238	0,420	0,332
R <sub>BA(C)</sub>		-0,258	-0,210			-0,484		-0,289	
R <sub>BA(W)</sub>	-0,469	-0,310	0,061			-0,289	-0,434	-0,065	-0,497
R <sub>BC(J)</sub>		0,630	0,287			-0,080		0,409	
R <sub>BC(A)</sub>		0,717	0,423			-0,029		0,345	
R <sub>BC(W)</sub>		0,472	0,285			0,116		0,315	
R <sub>BV(J)</sub>	-0,798	-0,523	-0,700			-0,701	-0,775	-0,689	-0,644
R <sub>BV(A)</sub>	-0,815	-0,648	-0,678			-0,681	-0,776	-0,682	-0,645
R <sub>BV(P)</sub>		-0,207	-0,647			-0,747		-0,608	
R <sub>JA(C)</sub>		0,702	0,878			0,457		0,817	
R <sub>JA(W)</sub>	0,772	0,649	0,920			0,714	0,748	0,866	0,632
R <sub>JC(A)</sub>		0,690	0,480			-0,010		0,567	
R <sub>JC(W)</sub>		0,212	0,380			0,091		0,364	
R <sub>JV(A)</sub>	-0,792	-0,627	-0,627			-0,679	-0,760	-0,643	-0,630
R <sub>JV(P)</sub>		-0,173	0,013			-0,368		-0,033	
R <sub>AP(J)</sub>		-0,592	-0,347			0,062		-0,430	
R <sub>AP(W)</sub>		-0,158	0,263			-0,011		0,205	
R <sub>AV(P)</sub>		-0,030	0,306			0,413		0,303	
R <sub>PV(J)</sub>		-0,704	-0,266			0,198		-0,409	
R <sub>PV(A)</sub>		-0,765	-0,340			0,167		-0,484	



Tabla II (continuación)

	SG.I	SG.II	SG.III	SG.IV	SG.V	SG.VI	B.A	B.B	Total
$R_{BP}(\Lambda v)$	-----	0,451	0,279			0,118	-----	0,386	-----
$R_{JA}(\rho v)$	-----	0,707	0,919			0,764	-----	0,862	-----
$R_{Jv}(\Lambda \rho)$	-----	-0,088	-0,561			-0,687	-----	-0,511	-----
$R_{EJv}$	0,848	0,753	0,750			0,801	0,834	0,760	0,745
$R_{EAv}$	0,881	0,694	0,684			0,762	0,859	0,699	0,790
$R_{JAp}$	-----	0,780	0,898			0,457	-----	0,851	-----
$R_{JAv}$	0,831	0,739	0,920			0,757	0,804	0,873	0,699
$R_{Jv}$	-----	0,502	0,391			0,368	-----	0,415	-----
$R_{EwJc}$	-----	0,805	0,756			0,803	-----	0,770	-----
$R_{Eva\rho}$	-----	0,766	0,713			0,772	-----	0,740	-----
$R_{JA\rho v}$	-----	0,782	0,931			0,763	-----	0,893	-----

tos respectivos de la tabla 6 -series individuales en días no perturbados-, y de modo especial en los grupos III y VI.

2) Al considerar  $\underline{J}$  constante, la correlación  $\underline{E-w}$  disminuye apreciablemente en el grupo II.

3) El coeficiente  $r_{\underline{E-w}(\underline{\Lambda})}$  es algo inferior a  $R_{\underline{E-w}}$  en los grupos I y VI. Tales diferencias, sin embargo, no llegan a ser significativas.

4) En el grupo II desaparece la correlación entre  $\underline{E}$  y  $\underline{w}$  para  $\underline{p}$  constante.

5) Los valores de  $R_{\underline{J-\Lambda}}$  son inferiores en todos los casos a los correspondientes de la tabla 6. El descenso se acentúa especialmente en los grupos III y VI. No obstante es de resaltar el valor 0,702 que alcanza  $r_{\underline{J-\Lambda}(\underline{p})}$  en el grupo II.

6) Las correlaciones entre  $\underline{J}$  y  $\underline{\Lambda}$  se hacen más patentes en los coeficientes  $r_{\underline{J-\Lambda}(\underline{w})}$ ; siendo, en particular, muy elevada la del grupo III. Y en los grupos II y VI,  $r_{\underline{J-\Lambda}(\underline{pw})}$  es aún algo superior a  $r_{\underline{J-\Lambda}(\underline{w})}$ .

7) A diferencia de lo que ocurría con las series individuales,  $R_{\underline{E-J}}$  es ahora significativo en todos los grupos. El incremento más notable se presenta en el grupo II, en el que dicho coeficiente crece desde 0,219 (tabla 6) a 0,635.

8) Las correlaciones anteriores se reducen de modo apre-

clable en los grupos II y III, -desapareciendo prácticamente en este último-al calcular  $r_{EJ(\rho)}$ . Por otra parte,  $r_{EJ(w)}$  es netamente inferior a  $R_{EJ}$  en los grupos I y II, como asimismo -aunque en menor cuantía- en el VI; siendo algo mayor en el III.

9) Aparece una marcada correlación entre  $E$  y  $\rho$  en el grupo II. En el III, tal correlación sólo es moderada. Ambas disminuyen para  $J$  constante y sufren ligeras modificaciones cuando  $\Lambda$  se mantiene invariable - $r_{E\rho(\Lambda)}$ -. Para  $w$  constante, Únicamente es significativo  $r_{E\rho(w)}$  ( $=0,472$ ) en el subgrupo II.

10) Una correlación inversa marcada se manifiesta asimismo entre  $E$  y  $\Lambda$  en el subgrupo I ( $R_{E\Lambda} = -0,579$ ), y más reducida en el VI ( $R_{E\Lambda} = -0,468$ ). En el grupo II dicha correlación es marginal ( $R_{E\Lambda} = -0,325$ ).  $R_{E\Lambda}$  ha aumentado, pues -en valor absoluto-, en los grupos I y VI con respecto a los valores correspondientes de la tabla 6.

11)  $R_{J\rho}$  alcanza valores significativos (0,478 y 0,391, respectivamente) en los subgrupos II y III; lo que no sucedía en las series individuales. Tales valores aumentan sensiblemente (0,690 y 0,480) para  $\Lambda$  constante.

12) Son de notar también las correlaciones de tipo inverso entre  $J$  y  $w$  en los subgrupos I, II y VI. En cambio, en la tabla sólo es algo significativo  $R_{Jw}$  en el subgrupo I. Es ila-

mativo el hecho de que  $r_{JW(\Lambda)}$  mejora de forma muy notable en relación con  $R_{JW}$  en todos los grupos. Incluso en el grupo III la correlación -que no se manifestaba en  $R_{JW}$ - se hace ahora marcada.

13) Se observa cierta correlación directa entre  $\underline{\Lambda}$  y  $\underline{w}$  en los grupos I y VI. Esta última no se presenta en la tabla 6.

14) En el grupo II,  $R_{ow} = -0,770$ . Y  $r_{ow(\Lambda)}$  alcanza un valor marginal en el III.

## 2) Días "perturbados"

Se han calculado además los coeficientes de correlación simple entre las distintas variables utilizando los valores medios de éstas en días perturbados, coeficientes que se incluyen en la tabla 12. A la vista de la misma y tomando como término de comparación la tabla anterior, cabe señalar lo siguiente:

1)  $R_{EW}$ , que disminuye algo en el grupo I (\*), se incrementa en los grupos II y VI, y sufre una variación drástica en el III, pasando de  $-0,682$  (tabla 7) al valor positivo  $0,223$ .

2) En general, la correlación entre  $\underline{J}$  y  $\underline{\Lambda}$  se mantiene sensiblemente al mismo nivel que en la tabla 7.

---

(\*) En valor absoluto.

Table 12

	SG.I	SG.II	SG.III	SG.IV	SG.V	SG.VI	B.A	B.B	Total
R <sub>EG</sub>	0,509	0,358	-0,100			0,200	0,347	0,312	0,302
R <sub>EA</sub>	-0,442	-0,567	-0,190			-0,802	-0,658	-0,183	-0,625
R <sub>Ee</sub>	-----	0,466	0,310			-0,335	-----	0,231	-----
R <sub>EW</sub>	-0,784	-0,748	0,223			-0,879	-0,799	-0,401	-0,629
R <sub>JA</sub>	0,517	0,554	0,881			0,399	0,449	0,781	0,502
R <sub>Je</sub>	-----	0,333	-0,134			0,304	-----	-0,121	-----
R <sub>JW</sub>	-0,450	-0,132	0,259			-0,309	-0,383	-0,325	-0,358
R <sub>AC</sub>	-----	-0,159	-0,141			0,481	-----	-0,243	-----
R <sub>Aw</sub>	0,307	0,558	-0,059			0,617	0,453	0,082	0,338
R <sub>ew</sub>	-----	-0,547	0,086			0,174	-----	-0,075	-----

3) La correlación de E frente a J disminuye considerablemente en el grupo II y desaparece en los grupos III y VI.

4)  $R_{\underline{E}\underline{D}}$  se reduce a un valor moderado en el grupo II, es sólo marginal en el III y se hace negativo ( $=-0,335$ ) en el VI.

5) En el grupo I es menor -en magnitud-  $R_{\underline{E}\underline{A}}$  que el valor correspondiente de la tabla 7. Aumenta, por el contrario, dicho coeficiente en el grupo II y también -de modo notable- en el VI.

6) La correlación entre J y p presenta únicamente valores marginales en los grupos II y VI.

7) Desaparece en este caso la correlación entre J y w que se observa en el grupo II de la tabla anterior.

8)  $R_{\underline{\Lambda}\underline{D}}$  alcanza un valor positivo de 0,481 en el grupo VI.

9) Se manifiesta una marcada correlación directa de Λ frente a w en los grupos II y VI. Y también -pero de tipo inverso- entre p y w en el grupo II.

### X.3. Influencia de la dirección del viento

Al objeto de averiguar si las correlaciones halladas entre

Los distintos pares de variables se ven afectados por la dirección del viento, hemos distribuido los datos correspondientes a las diversas medidas -en días no perturbados- en dos conjuntos, según que esa dirección, para el viento predominante durante la realización de las mismas, tuviera componente este u oeste.

Por supuesto, quedan excluidos de ambos conjuntos los datos obtenidos en aquellas ocasiones en las que el viento sopla-  
ba del norte o del sur.

Los respectivos coeficientes de correlación se incluyen en la tabla 13, en la que aparece indicado también el porcentaje de medida del subgrupo en que se presenta tal circunstancia.

Habida cuenta de que el número de series de un determinado subgrupo no es igual en los dos conjuntos, sólo resultan significativas las diferencias entre los valores tabulados para un mismo coeficiente en los siguientes casos (\*):

$R_{EW}$  y  $R_{JA}$ , en el subgrupo I;  $R_{JO}$ , así como  $R_{AO}$ , en los subgrupos II y VI (\*\*);  $R_{JW}$  en el I y en el II, y  $R_{AW}$ , en el II.

---

(\*) Del carácter significativo de esas diferencias pueden no participar los coeficientes que se comparan.

(\*\*) Ahí, las diferencias son especialmente marcadas.



Tabla 13

	DIRECCION DEL VIENTO W								DIRECCION DEL VIENTO E									
	SG.I	SG.II	SG.III	SG.IV	SG.V	SG.VI	B.A	B.B	Total	SG.I	SG.II	SG.III	SG.IV	SG.V	SG.VI	B.A	B.B	Total
R <sub>EW</sub>	0,450	0,571	0,294	0,190	0,630	0,351	0,390	0,425	0,394	0,299	-0,018	0,216	0,123	0,379	0,164	0,258	0,153	0,182
R <sub>EW'</sub>	-0,451	-0,049	-0,114	-0,500	-0,426	-0,198	-0,500	-0,278	-0,499	-0,551	-0,473	-0,181	-0,372	-0,235	-0,329	-0,432	-0,326	-0,462
R <sub>EW''</sub>	-----	0,751	0,010	0,778	0,111	-0,144	-----	0,270	-----	-----	0,728	0,289	0,482	0,530	0,174	-----	0,288	-----
R <sub>EW'''</sub>	-0,537	-0,611	-0,381	-0,618	-0,650	-0,546	-0,781	-0,434	-0,738	-0,592	-0,723	-0,652	-0,579	-0,561	-0,408	-0,549	-0,594	-0,413
R <sub>EW''''</sub>	0,457	0,784	0,912	0,752	0,426	0,839	0,575	0,743	0,573	0,619	0,880	0,914	0,730	0,758	0,870	0,749	0,809	0,742
R <sub>EW'''''</sub>	-----	0,693	-0,104	0,056	-0,218	0,258	-----	0,053	-----	-----	-0,122	0,301	-0,199	0,047	-0,115	-----	0,064	-----
R <sub>EW''''''</sub>	-0,411	-0,596	-0,501	0,018	-0,411	-0,101	-0,284	-0,265	-0,285	-0,176	0,212	-0,133	-0,088	-0,124	-0,188	-0,215	-0,034	-0,093
R <sub>EW'''''''</sub>	-----	0,334	-0,119	-0,483	-0,325	0,362	-----	-0,154	-----	-----	-0,428	0,163	-0,431	-0,334	-0,198	-----	-0,160	-----
R <sub>EW''''''''</sub>	0,419	-0,292	-0,182	0,432	0,286	0,208	0,413	0,010	0,375	0,341	0,504	0,135	0,240	0,258	0,027	0,181	0,259	0,182
R <sub>EW'''''''''</sub>	-----	0,675	0,064	-0,738	0,342	0,194	-----	-0,177	-----	-----	-0,865	-0,269	-0,532	-0,295	-0,044	-----	-0,325	-----
%	58,6	22,2	11,5	9,4	16,7	58,0	58,3	13,5	47,2	32,2	50,0	69,0	69,8	38,3	11,3	22,4	60,7	31,9

En cambio, al considerar, no los subgrupos por separado, sino el total de las medidas, resultan significativas las diferencias en cuestión para todos los coeficientes salvo el  $R_{EA}$ .

#### X.4. Representaciones gráficas

Con los datos que aparecen en la tabla 14 relativos a los promedios de las variables eléctricas y de la velocidad del viento a distintas horas -tanto para el bloque A como para el B en días no perturbados-, se han dibujado las gráficas representativas de la variación temporal de cada una de esas variables en los dos bloques (figs. 20 a 29).

La fig. 20 (bloque A) revela claramente la notable disminución que experimenta E a lo largo del día. Si se compara ese comportamiento del campo con la correspondiente variación diurna de la velocidad del viento w, queda patente la dependencia inversa entre ambas variables puesta de manifiesto anteriormente en el valor de  $-0,823$  calculado para  $R_{EW}$  en el bloque A (\*)

---

(\*) Recordemos que en él se hallan comprendidas las observaciones de los meses de verano.

Tabla 14

BLOQUE A

<u>H</u>	<u>N</u>	<u>E</u>	<u>J</u>	<u>A</u>	<u>C</u>	<u>v</u>
8h	14	1770	0,54	3,1		0,84
9h	96	1700	0,66	4,4	7,68	1,28
10h	191	1760	0,72	4,8	6,93	1,35
11h	167	1750	0,69	4,2	6,08	1,15
12h	178	1830	0,68	4,0	5,38	1,22
13h	74	1250	0,59	5,2	5,30	1,51
16h	9	980	0,64	7,0	8,90	1,47
17h	104	770	0,44	6,1	6,92	2,31
18h	101	740	0,47	6,6	7,06	2,32
19h	51	710	0,48	7,1	8,84	2,49
20h	15	720	0,35	5,1		2,43

BLOQUE B

<u>H</u>	<u>N</u>	<u>E</u>	<u>J</u>	<u>A</u>	<u>C</u>	<u>v</u>
8h	35	1805	0,63	4,0	4,02	1,54
9h	6	2670	0,83	3,2	2,71	0,94
10h	18	1835	0,70	4,3	1,30	1,68
11h	86	1860	0,80	4,4	1,84	1,99
12h	38	2125	0,81	3,6	1,51	1,94
13h	49	2010	0,90	4,8	2,00	1,94
16h	31	1870	0,80	4,9	2,80	1,65
17h	18	2370	1,35	4,0	2,17	1,13
18h	25	2300	0,81	3,5	3,48	1,20
20h	20	2100	0,64	3,9	9,29	0,99

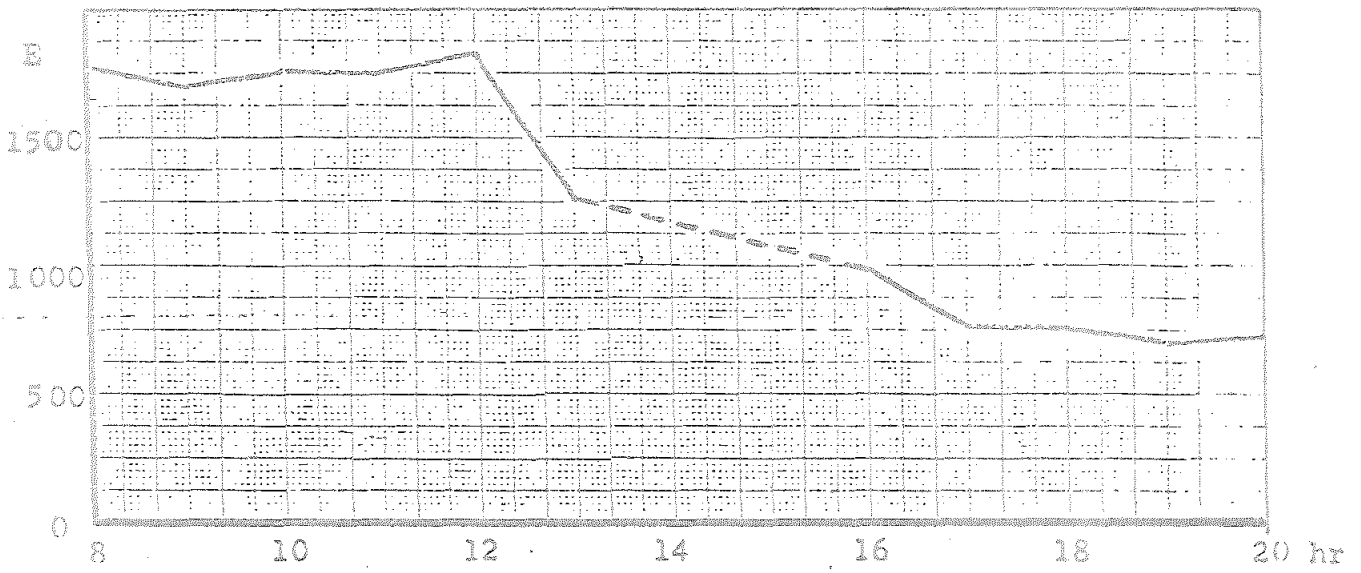


Figura 20

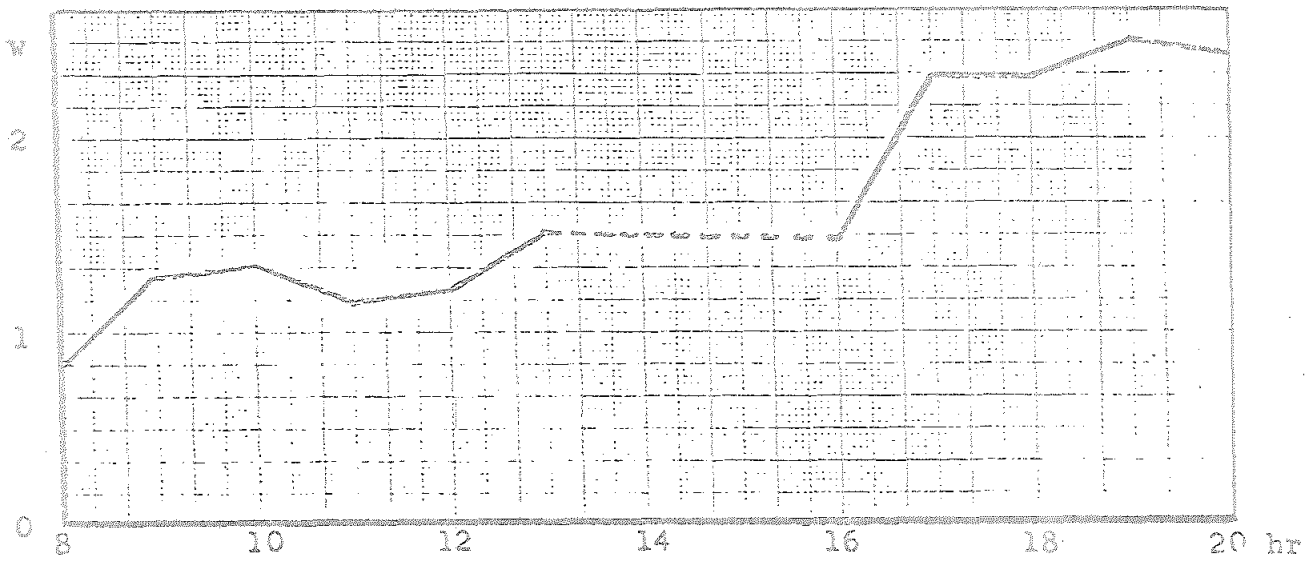


Figura 21

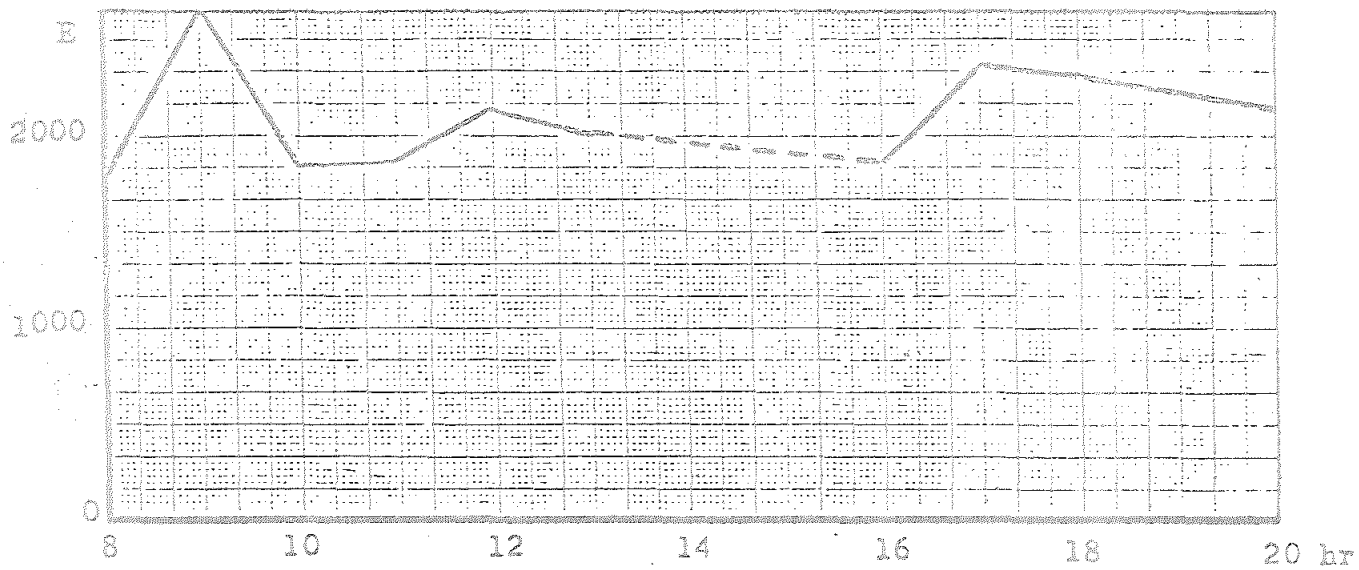


Figura .22

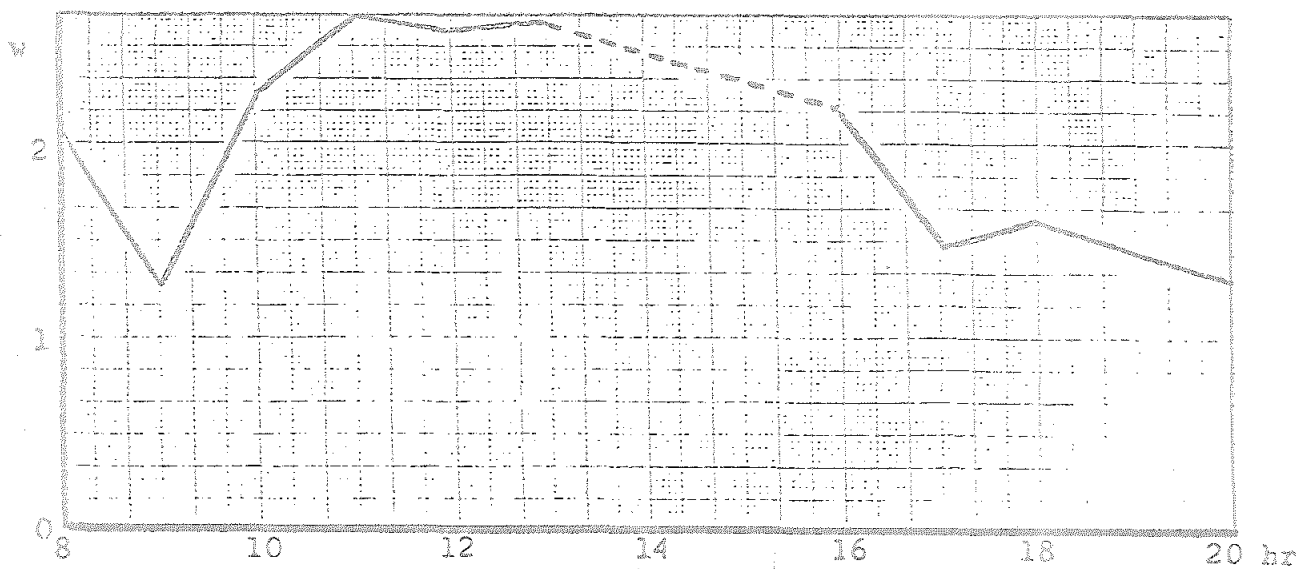


Figure 23

En cambio, en la gráfica de la fig. 22 (bloque B) puede verse que crece de nuevo por la tarde, siendo de notar los tres máximos -el primero, muy pronunciado- que se presentan, respectivamente, a las 9, a las 12 y a las 17 h. A cada uno de ellos le corresponde un mínimo -también muy acusado el primero en la velocidad del viento (fig. 23).

Hay que señalar el crecimiento de  $\Delta$  -en el bloque A- en el transcurso del día (fig. 25), en relación inversa con la disminución de  $E$  ya citada, durante el mismo período (fig. 20). Compárense, por otra parte, la gráfica respectiva de  $w$  y de  $\Delta$  (figs. 21 y 25) en el intervalo comprendido entre las 8 y las 13 h: el paralelismo entre ambas resulta evidente.

Se observa asimismo un cierto paralelismo entre las variaciones de  $J$  y de  $\Delta$  en el bloque A (figs. 24 y 25), tanto desde las 8 a las 12 h como entre las 16 y las 20 h, siempre que consideremos separadamente esos intervalos. Sin embargo,  $\Delta$ , a diferencia de  $J$  alcanza los valores más elevados por la tarde.

Destaquemos, por último, la disminución de  $p$  durante la mañana en los bloques A y B (figs. 28 y 29), así como el notable aumento que en este segundo caso sufre dicha variable en las últimas horas de la tarde.

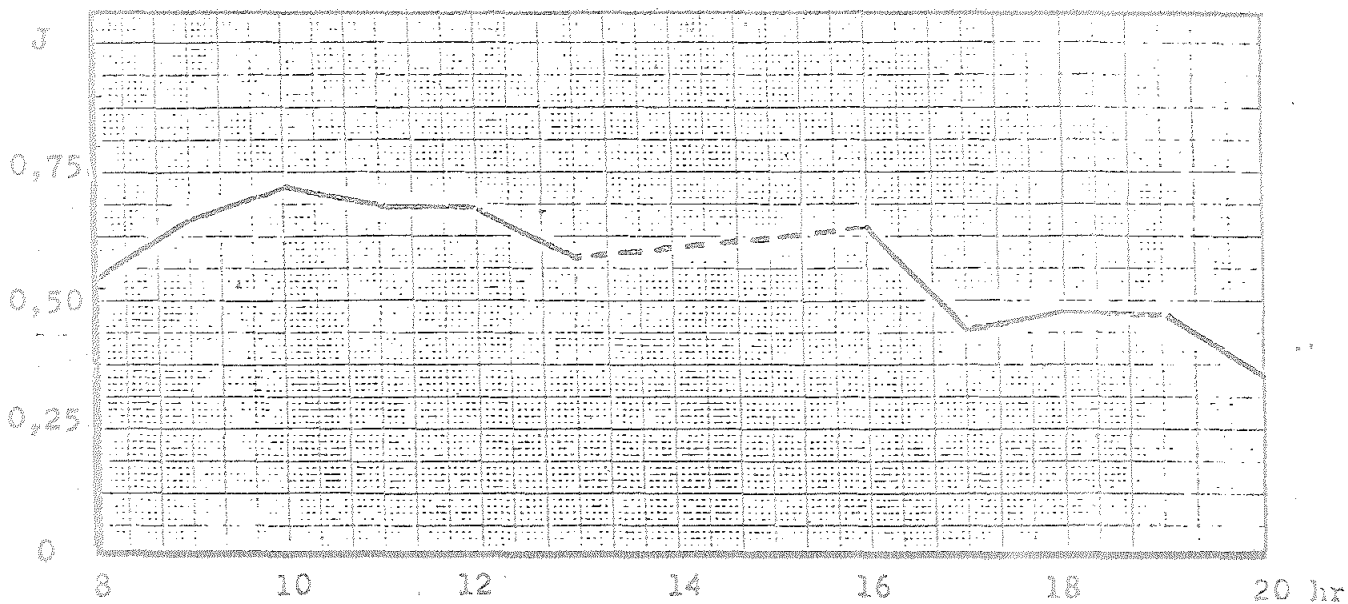


Figura 24

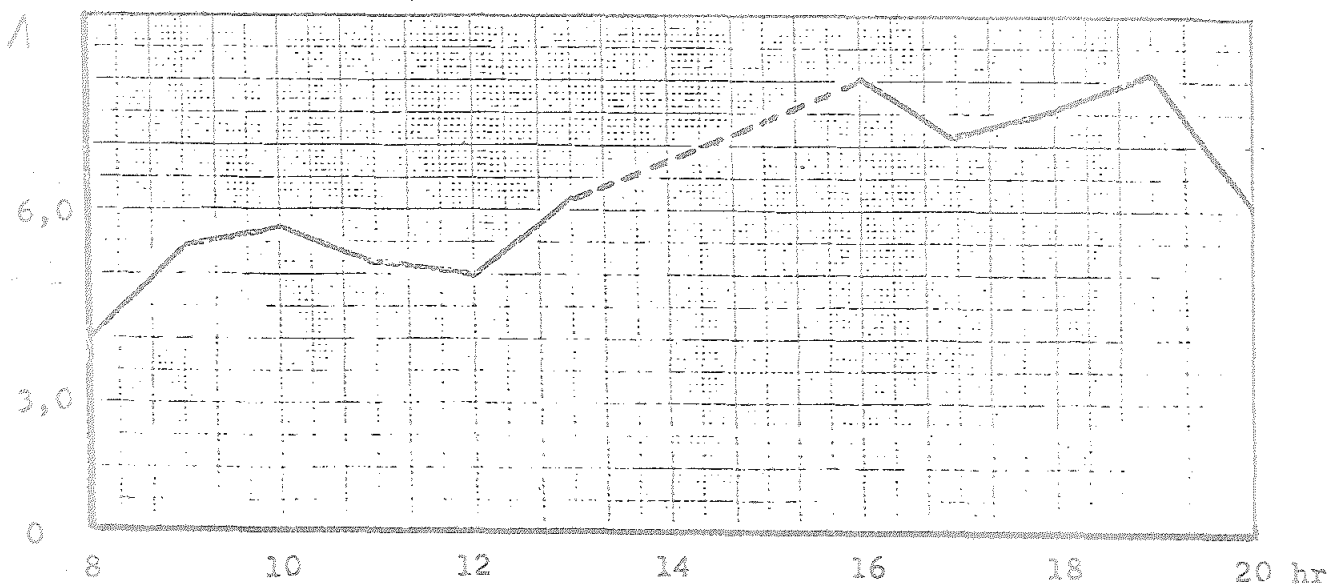


Figura 25

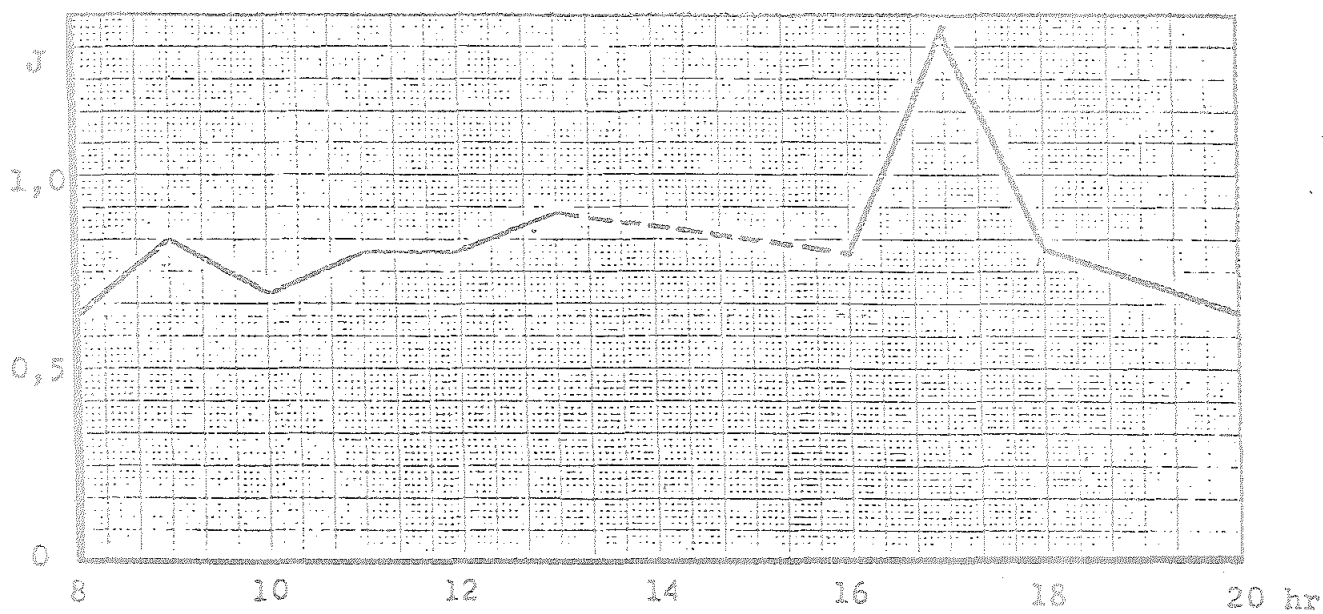


Figura 26

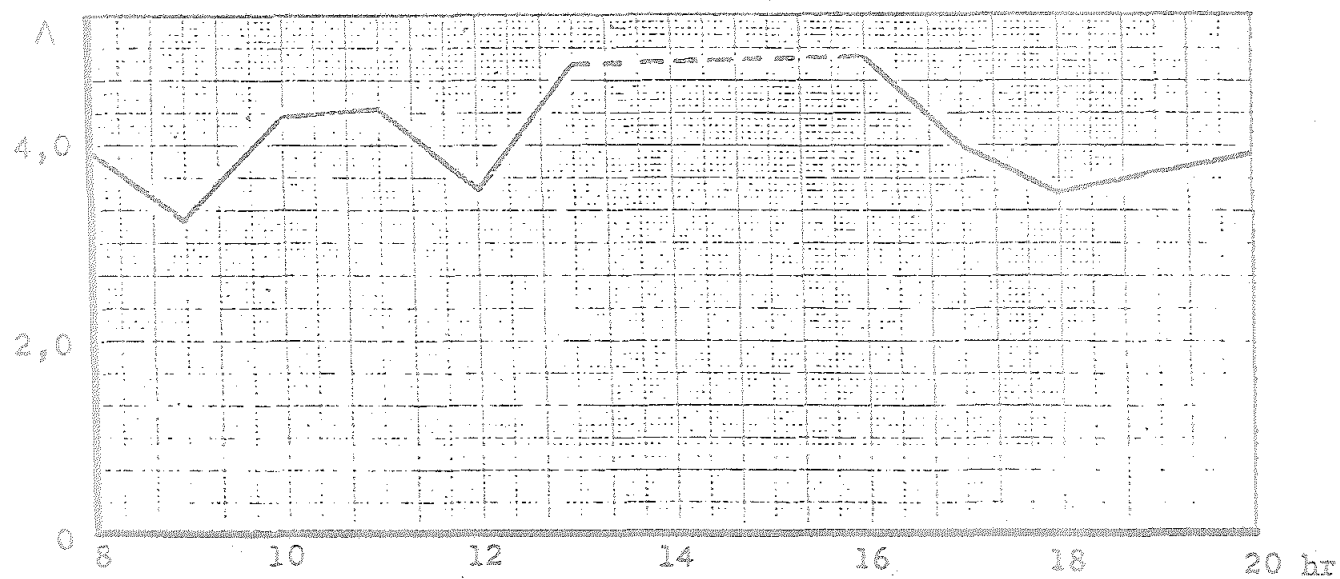


Figura 27



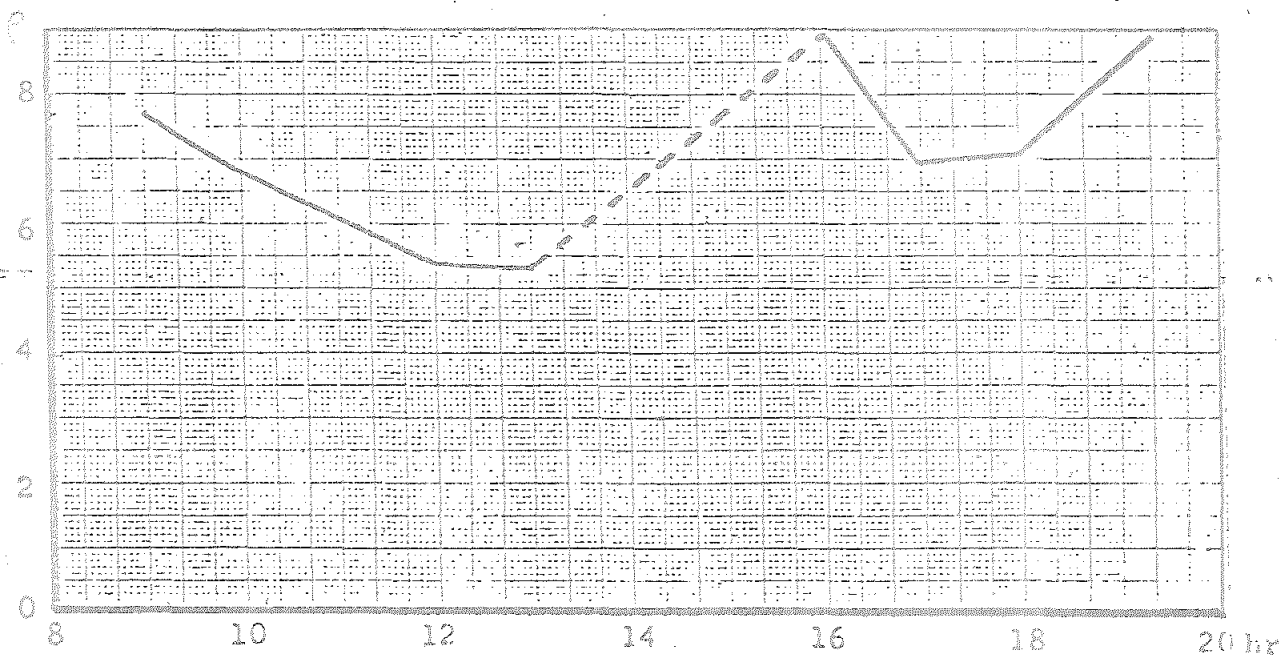


Figura 28

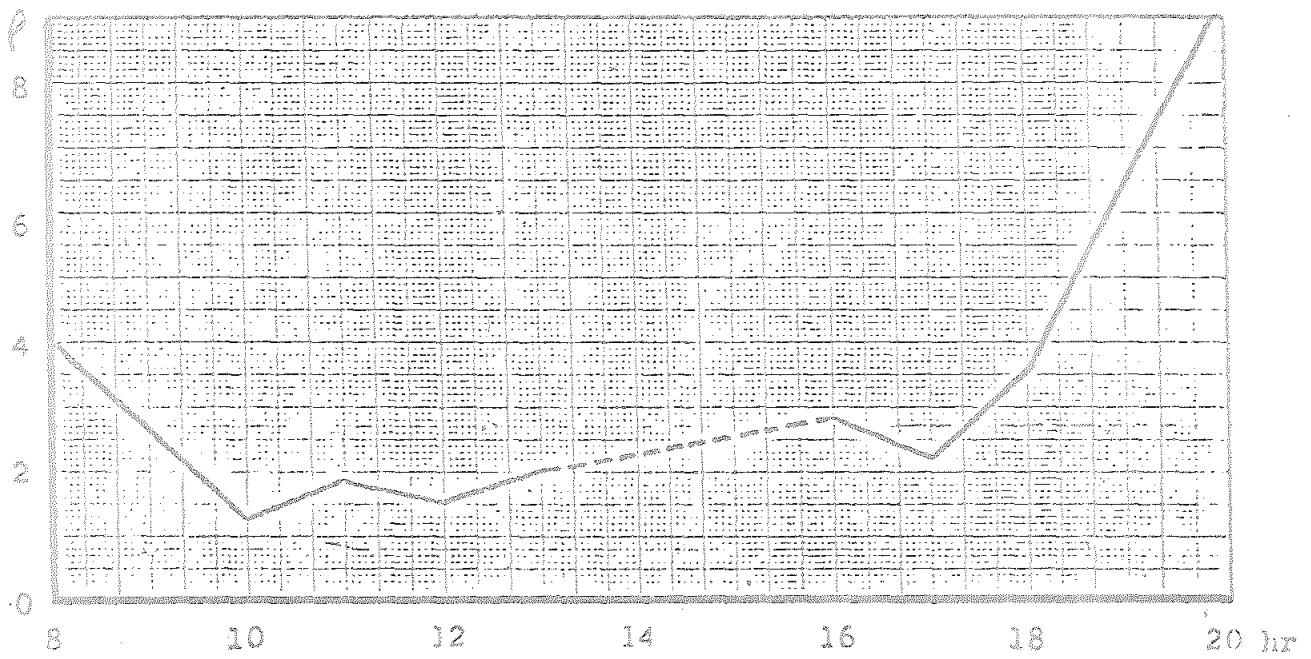


Figura 29

### X.5. Registro continuo del potencial eléctrico

Por medio de la instalación ya descrita (pág. 68) se obtuvieron, durante el primer semestre del año 77, diversos registros del potencial eléctrico del aire en la estación de la Universidad que se reproducen -a escala reducida- en las figs. 30 TII a 171TII. Cierta número de tales registros vienen acompañados por las correspondientes gráficas simultáneas de la velocidad del viento.

En las figs. 172 y 173 se ha representado la variación diurna -absoluta y relativa, respectivamente- de la amplitud del ruido, determinada a partir de las citadas gráficas del potencial. Es de notar la marcada disminución que experimentan ambas magnitudes después de las 18 h, así como el máximo de la primera que tiene lugar a las 12 h.

Utilizando los registros gráficos del potencial se han formado cuatro grupos:

Grupo I	(30 días)	: Del 17-1 al 28-2,
Grupo II	(20 días)	: Del 2-3 al 30-3,
Grupo III	(28 días)	: Del 14-4 al 30-5,
Grupo IV	(19 días)	: Del 6-6 al 8-7.

Del comportamiento medio del potencial en cada uno de ellos dan cuenta las figs. 174 a 177. y, por otra parte, promediando el total de los datos suministrados por los distintos grupos se

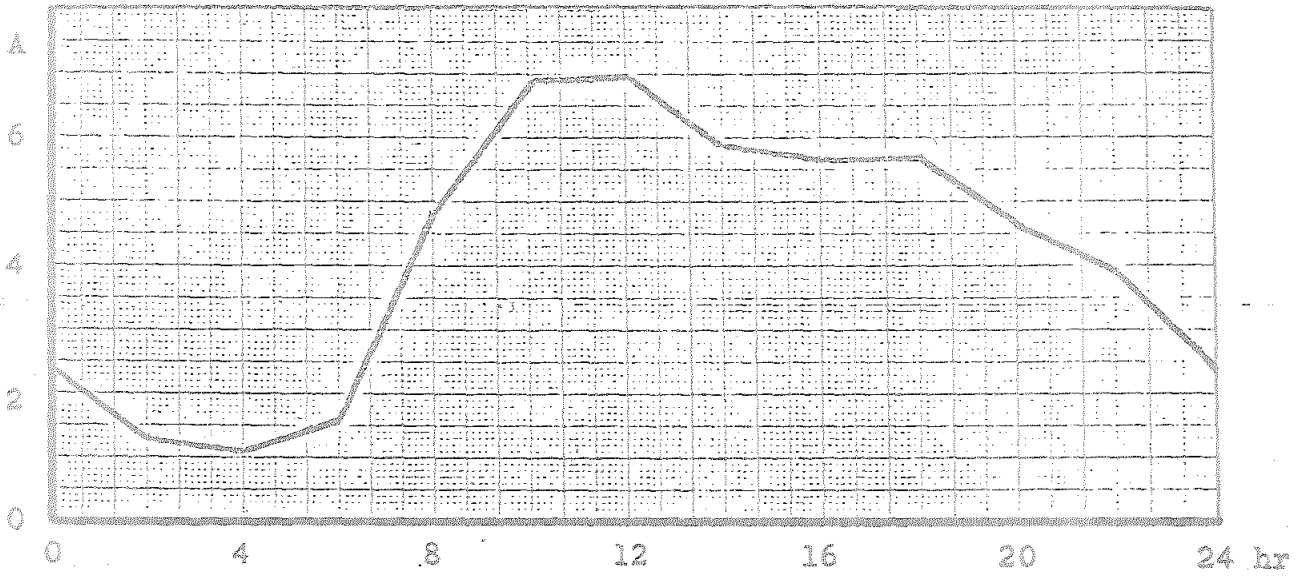


Figura 172

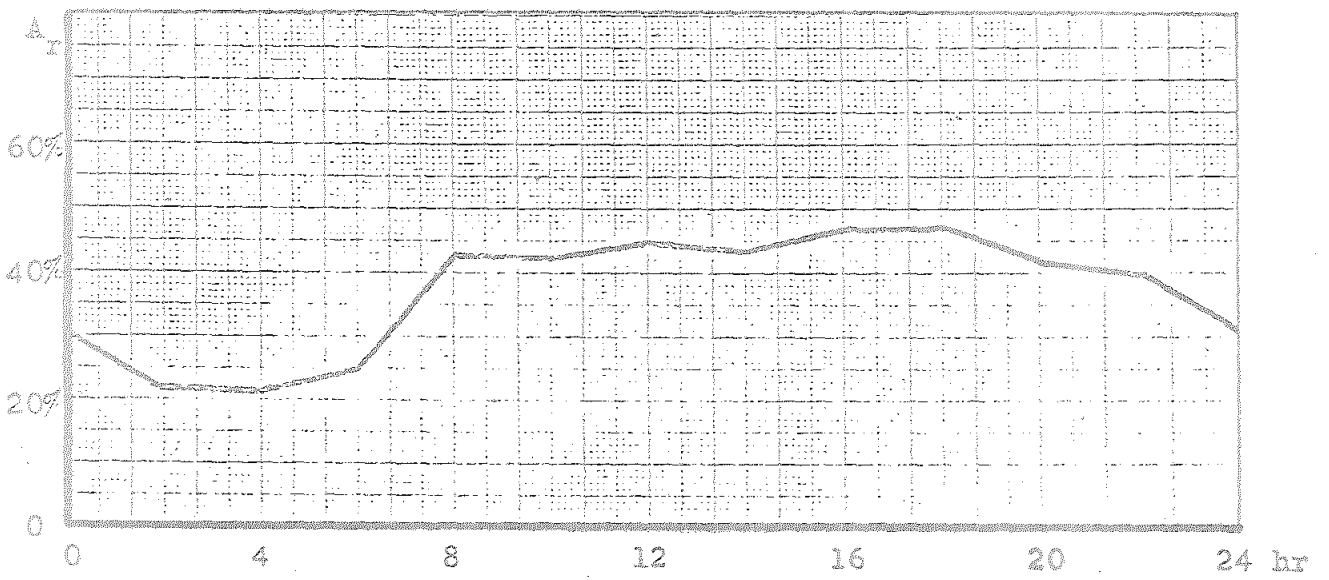
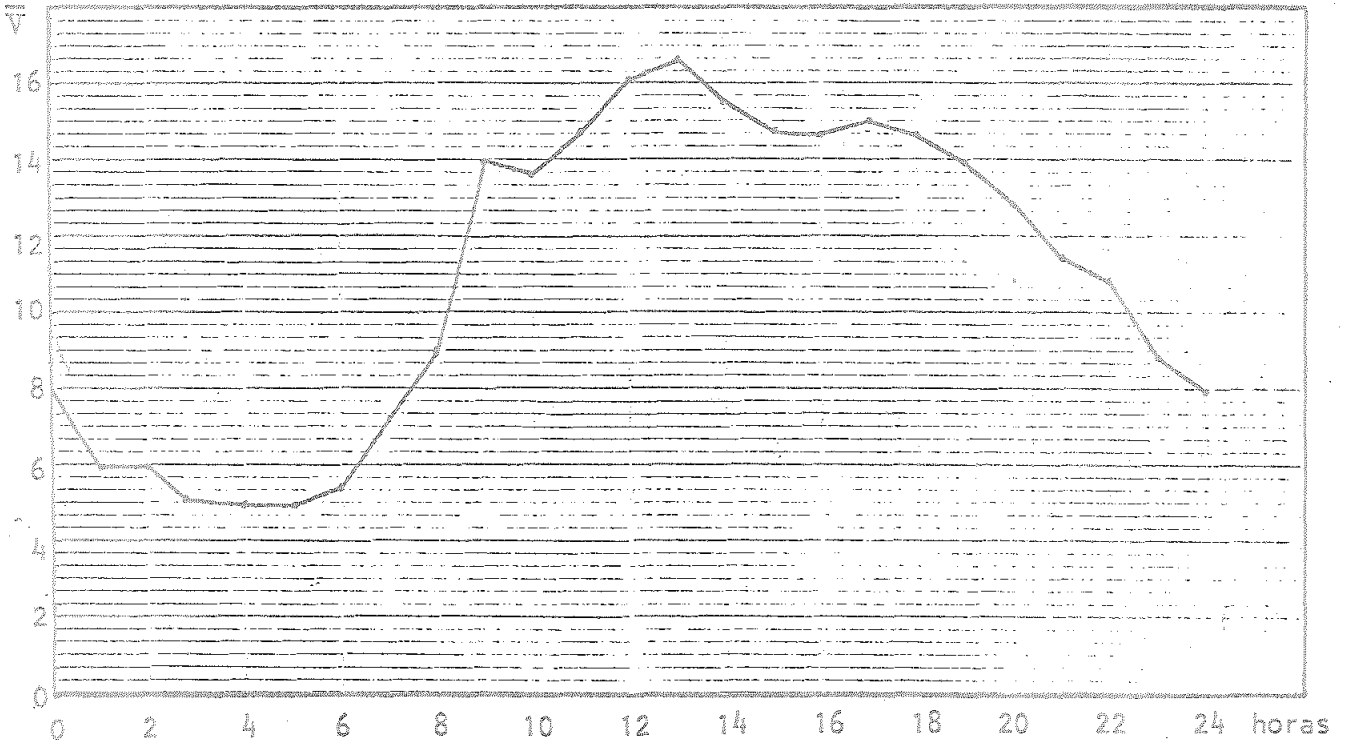
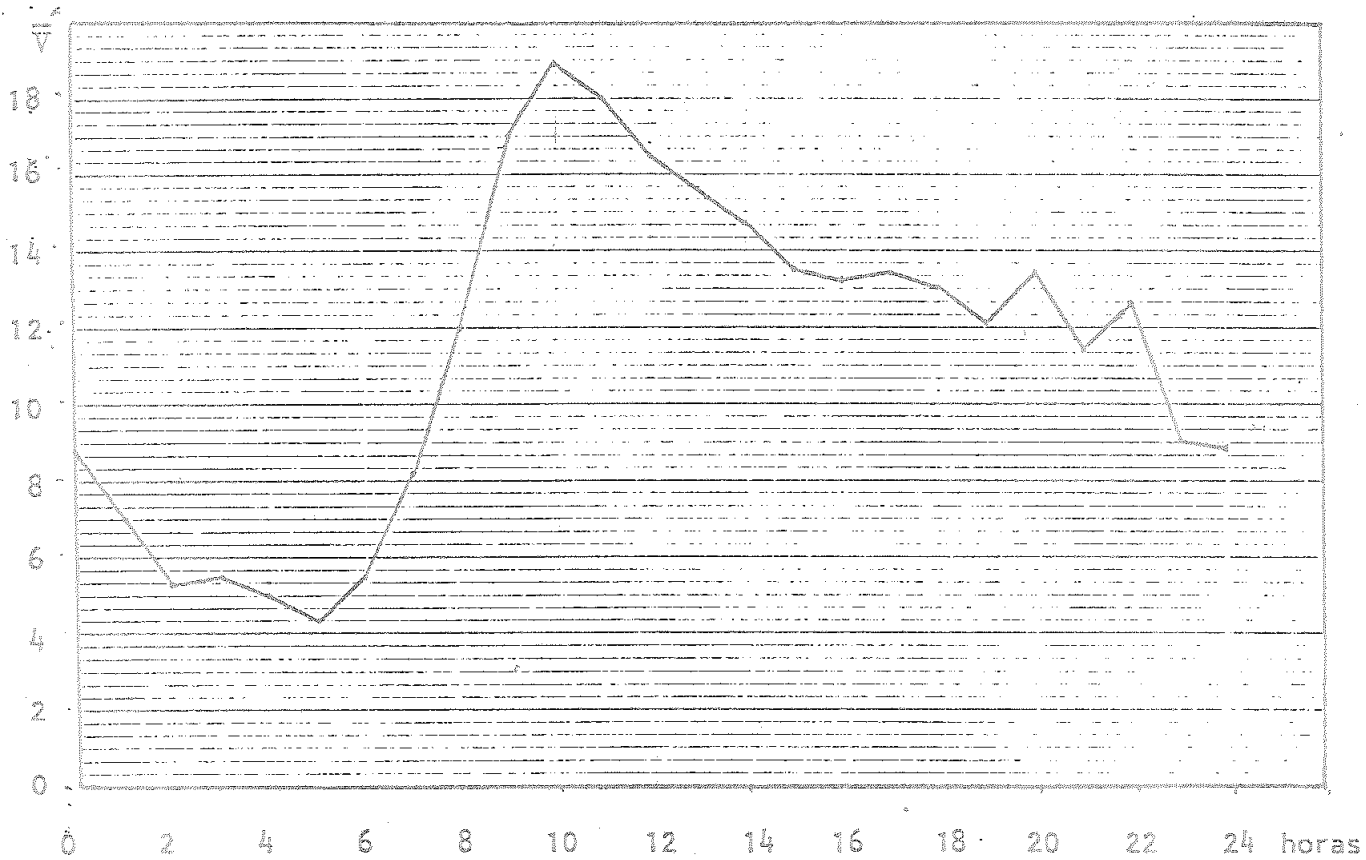


Figura 173



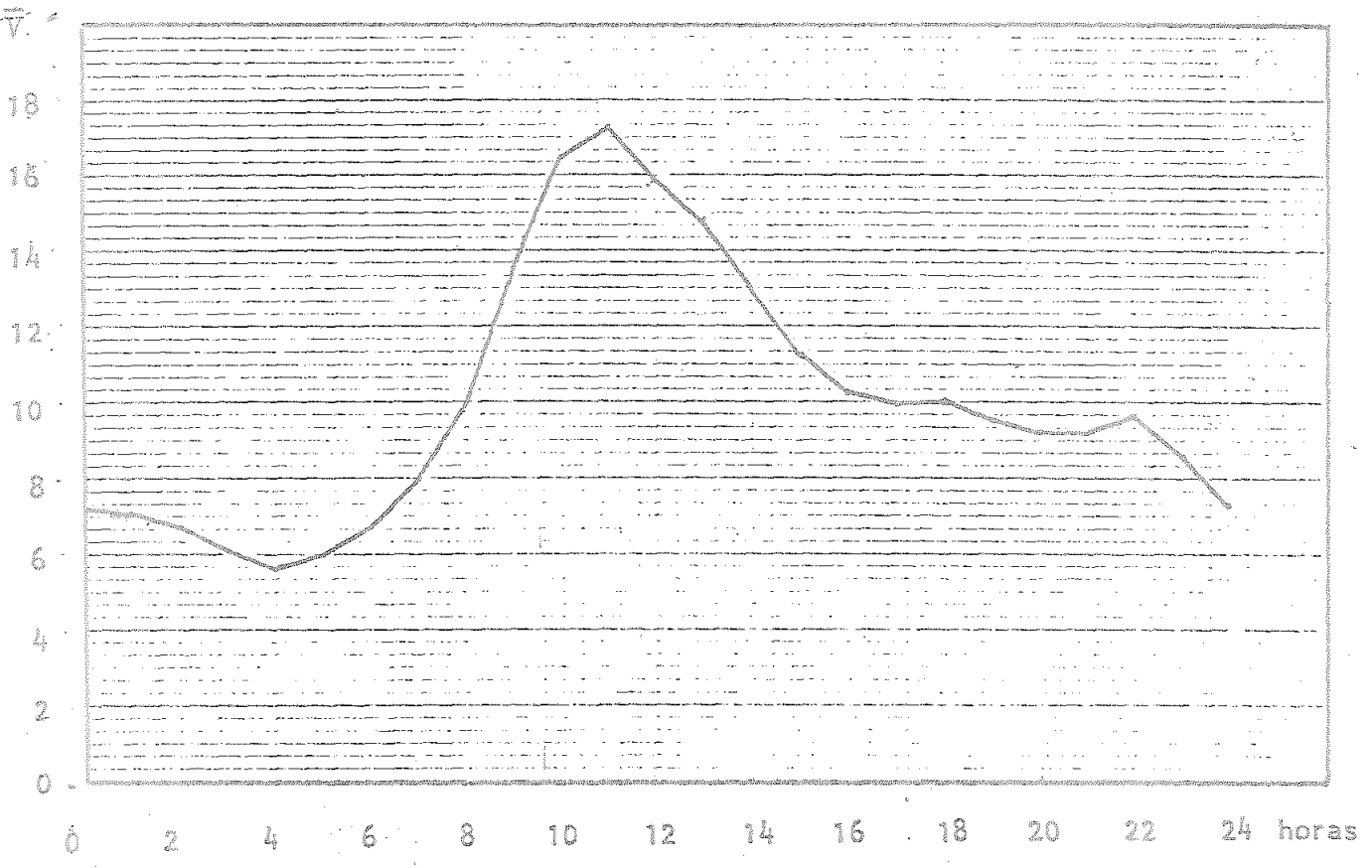
17- 1-77 a 28- 2-77

Figura 174



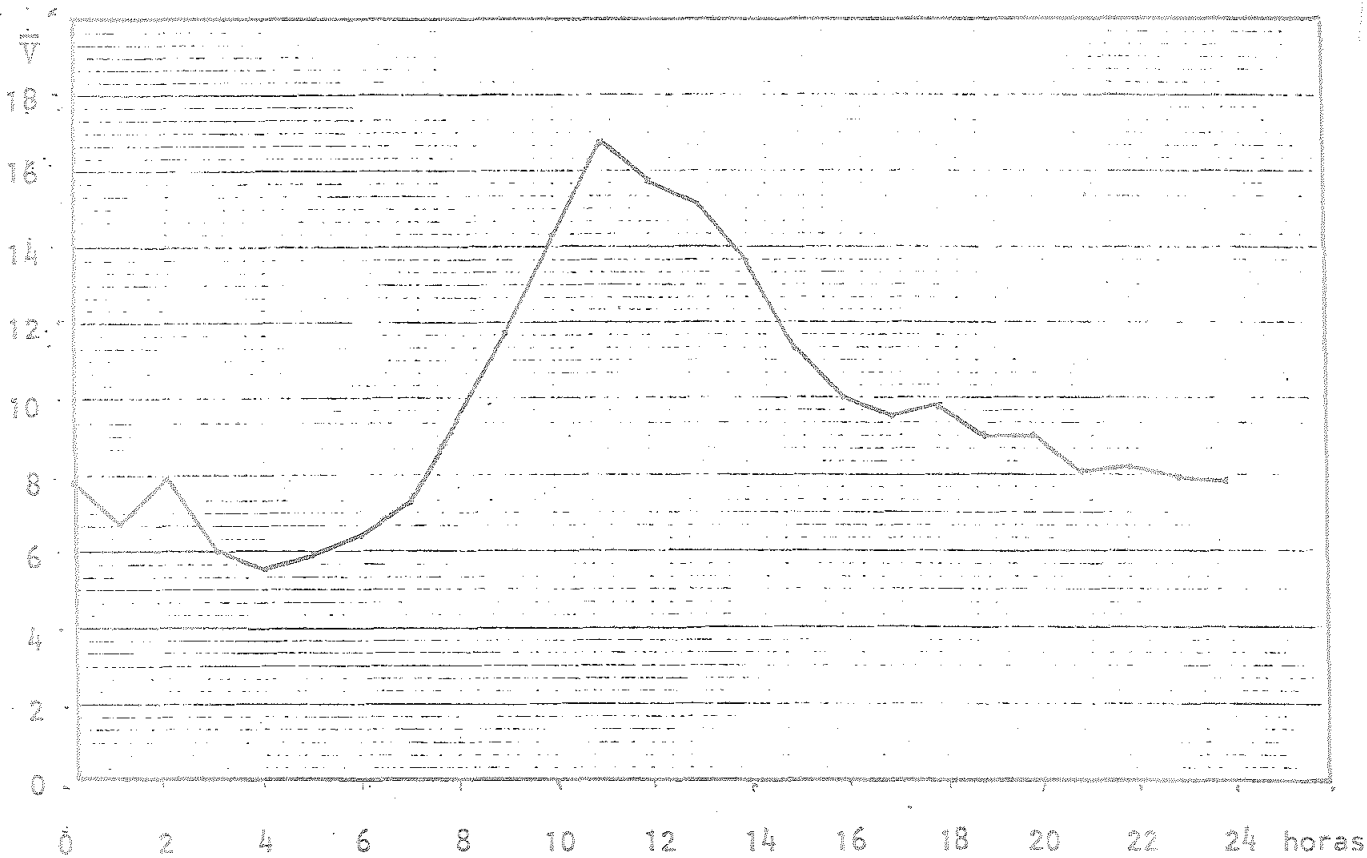
2- 3-77 a 30- 3-77

Figura 175



17- 4-77 a 30- 5-77

Figura 176



8- 6-77 a 8- 7-77

Figura 177



obtuvo la gráfica de la fig.178. Refiriéndonos en particular a esta última, son de destacar ante todo el mínimo de potencial -y, por consiguiente, del campo- hacia las 4h, y el máximo que se presenta hacia las 11h. Tales valores corresponden, respectivamente, al 48% y al 150% de la media diurna del potencial. El segundo máximo que se observa por la tarde, alrededor de las 17h, sólo representa un 114% de ese promedio.

#### X.6. Medidas simultáneas de la conductividad polar $\Lambda_+$

Nos hemos referido ya a las medidas de  $\Lambda_+$  con el aparato de Gerdien, muchas de las cuales se realizaron al mismo tiempo que las determinaciones indirectas de dicho parámetro, a partir de  $\underline{J}$  y de  $\underline{E}$ , mediante aplicación de la ley de Ohm.

Las tablas 15.TII y 16.TII contienen los datos obtenidos en esas observaciones simultáneas. En ellas,  $\underline{\Lambda}_1$  y  $\underline{\Lambda}_2$  (\*) corresponden, respectivamente, a ambos procedimientos de medida, el

---

(\*) Los números tabulados, multiplicados por  $10^{-15}$ , expresan la conductividad en  $\Omega^{-1}m^{-1}$ .

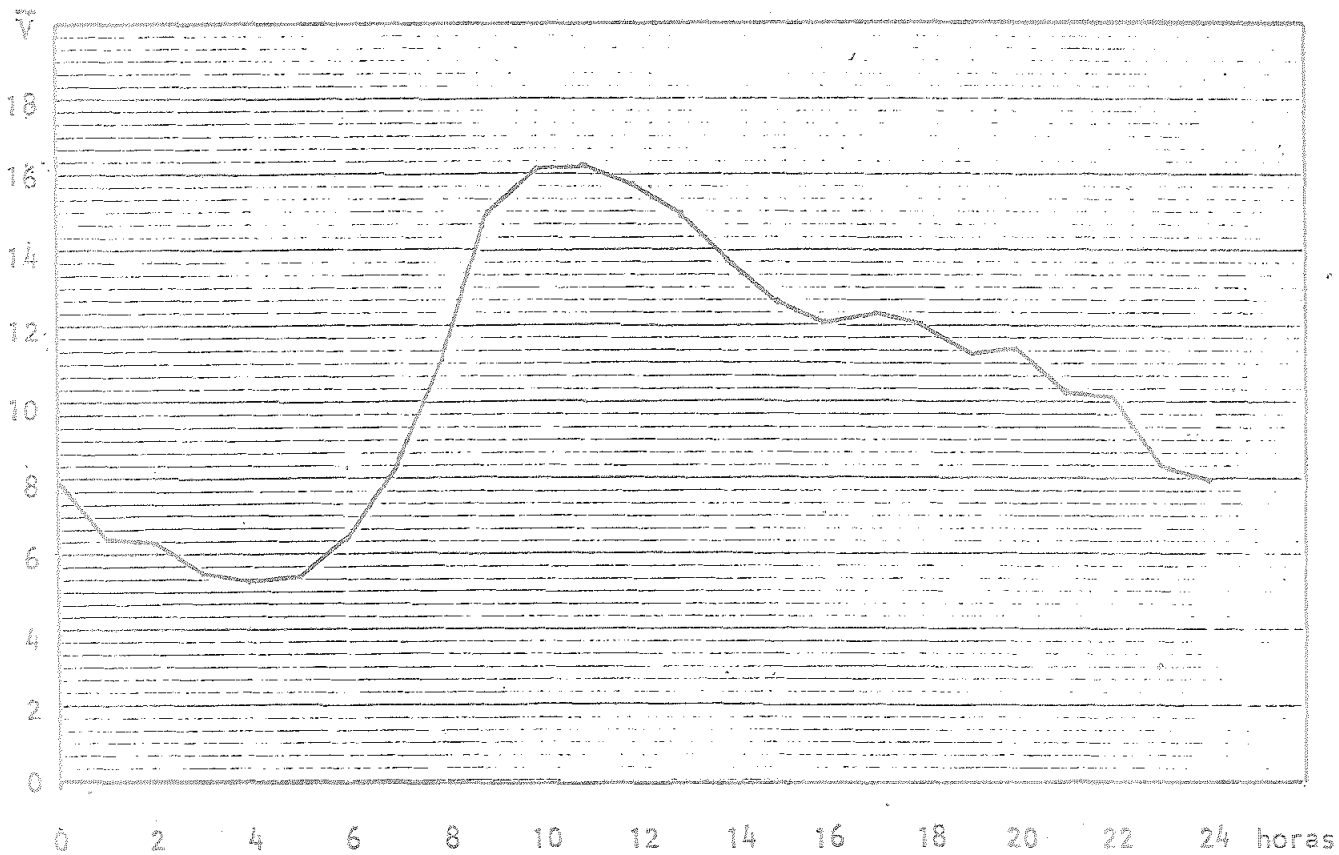


Figura 178

Indirecto, (ley de Ohm) y el directo (método de Gerdien)(\*).

La primera columna indica el número de orden  $N$  de la serie. En la fila encabezada por éste figura en cada caso un valor de  $\Lambda_1$  y otro de  $\Lambda_2$  (\*\*), promedios respectivos de un cierto número de valores individuales que aparecen reseñados debajo. Al igual que en las tablas 1.TII y 10.TII, se da cuenta en éstas del estado del cielo y de la dirección y velocidad del viento, consignándose asimismo los datos de  $E$  y de  $J$ .  $M$  expresa el contenido del aire en partículas en suspensión calculado en función de  $\Lambda_2$  por medio de una fórmula de la que nos ocuparemos más adelante.  $M_R$  (\*\*\*) corresponde a ese mismo contenido valorado mediante filtraje y reflectometría (véase la pág. 69). A  $M'$ , por último, haremos referencia posteriormente.

Consideremos en primer lugar la tabla 15.TII. Puede observarse que  $\Lambda_1$  es, en la mayoría de los casos, menor que  $\Lambda_2$ . Este resultado repercute, por supuesto, en los valores medios de ambos parámetros. Del total de 99 series de medidas que figuran

---

(\*) En aquellas observaciones incluidas en la tabla 15.TII, el aparato de Gerdien se hallaba en el interior de la caseta n°1, inmediatamente próximo a una ventana.

Las medidas de  $\Lambda_2$  que se anotan en la tabla 16.TII fueron hechas encontrándose dicho aparato -debidamente apantallado- sobre el techo de esa caseta, no lejos de la placa receptora.

(\*\*) Siempre que se hicieron medidas simultáneas.

(\*\*\*) Tanto  $M$  como  $M_R$  se miden en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

en dicha tabla, el número de ellas que cuentan con valores de  $\Lambda_1$  (\*) es de 43, siendo la media de esos valores igual a  $5,5 \cdot 10^{-15}$ . En cambio, la media correspondiente a los valores simultáneos de  $\Lambda_2$  (\*\*) es de  $7,1 \cdot 10^{-15}$ .

Por otra parte, suponiendo que tales datos de  $\Lambda_1$  y  $\Lambda_2$  estén relacionados por una expresión lineal del tipo

$$\Lambda_1 = a\Lambda_2 + b;$$

se obtienen, para valores óptimos de ambas constantes,

$$a = 0,48, \quad b = 2,15,$$

con un coeficiente de correlación de 0,197 tan sólo.

Admitiendo una dependencia de la forme

$$\Lambda_1 = m\Lambda_2^n,$$

resultan:

$$m = 6,81, \quad n = 0,66,$$

En este caso, sí se observa una correlación moderada (0,453).

(\*) Nos referimos a los promedios ya mencionados, representativos de cada serie.

(\*\*) Que son promedios, asimismo, de las medidas realizadas en cada una de las series.

Es de notar también el hecho de ser muy diferentes las relaciones respectivas de  $\Lambda_1$  y  $\Lambda_2$  con otras variables -en particular, con  $J_-$ : las correspondencias encontradas anteriormente para  $\Lambda_1$  no se manifiestan con  $\Lambda_2$ . No obstante, los resultados son más satisfactorios cuando se emplean los promedios representativos de las distintas series.

Por el contrario, tales discrepancias desaparecen prácticamente al comparar con  $\Lambda_1$  las medidas directas de la conductividad -a que antes hemos aludido- realizadas sobre el techo de la caseta ( $\Lambda_2$  en la tabla 16.TII). Se obtienen entonces para ambas variables valores medios globales que coinciden entre sí sensiblemente:

$$\bar{\Lambda}_1 = 4,64 \cdot 10^{-15}, \quad \bar{\Lambda}_2 = 4,52 \cdot 10^{-15} \Omega^{-1} m^{-1}.$$

La fórmula lineal a que se ajustan las medidas individuales es ahora

$$\Lambda_1 = 0,88 \Lambda_2 + 0,67,$$

con un coeficiente de correlación de 0,85. (\*)

Y tomando los promedios correspondientes a las series, la relación es

$$\Lambda_1 = 0,92 \Lambda_2 + 0,54,$$

---

(\*) Véase fig. 179

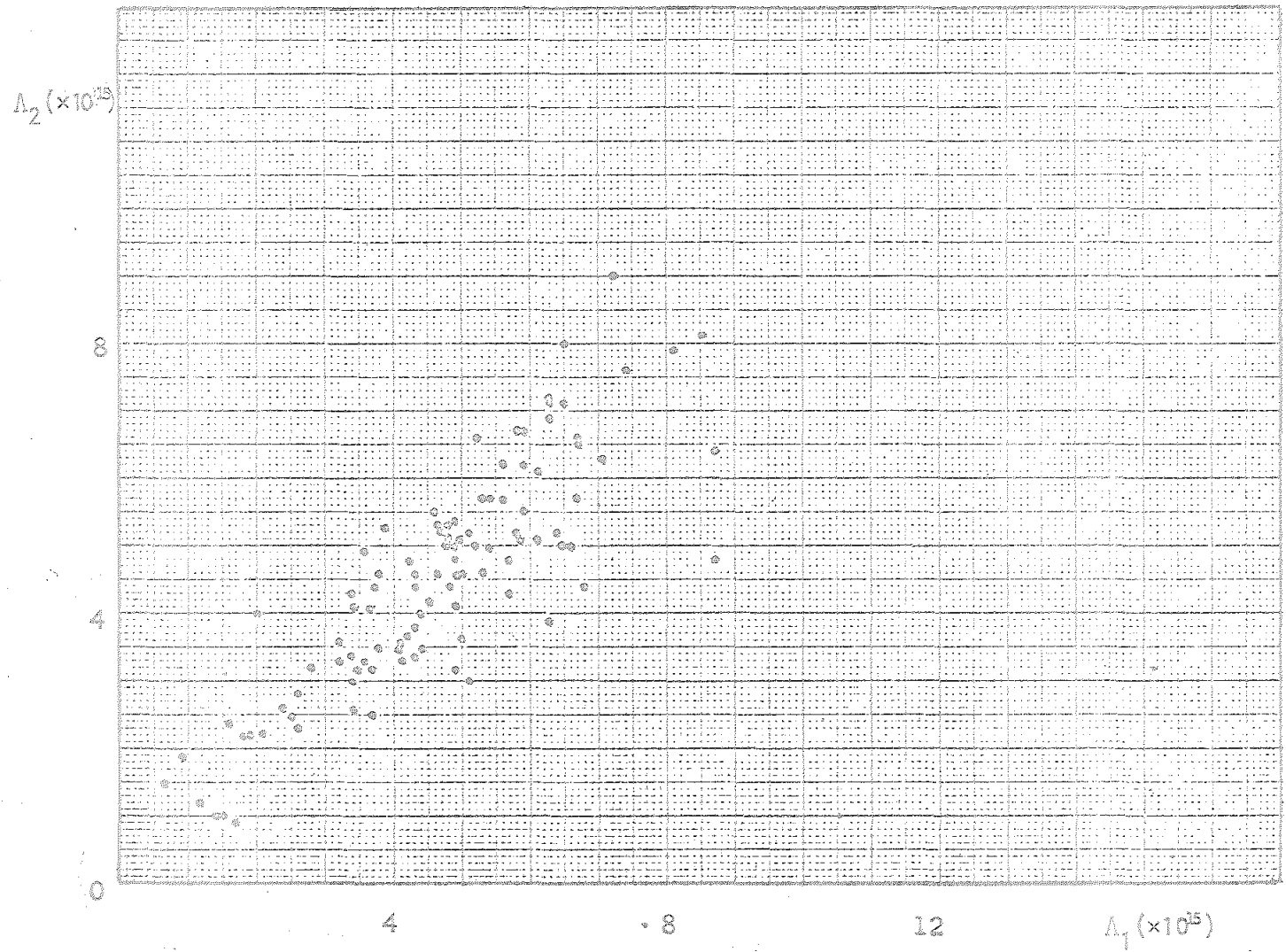


Figura 179

y el coeficiente, 0,952.

Señalemos que en esta última expresión, a una pendiente próxima a la unidad le corresponde una ordenada en el origen de escasa cuantía.

Por otro lado, no existen diferencias de consideración en el comportamiento de  $\Lambda_1$  y  $\Lambda_2$  en lo que a sus relaciones respectivas con otras variables se refiere.

#### X.7. Nuevas correlaciones $E-w$ , $E-M_R$ y $M_R-w$

En el transcurso de las determinaciones simultáneas de conductividad a las que nos referimos en el apartado anterior, se hicieron también -aunque no en todas las ocasiones- medidas de la intensidad del campo  $E$ , cuya dependencia con la velocidad del viento  $w$  y con el grado de contaminación  $M_R$  (\*) hemos estudiado.

El filtraje del aire en cada caso duraba unos 35 min por término medio -se realizaban en ese tiempo 5 ó 6 medidas de  $E$ -

---

(\*) Así como la dependencia mutua  $M_R-w$ .

siendo de 45 min aproximadamente los intervalos correspondientes durante los cuales se promediaba  $\underline{w}$ .

Cada uno de los valores de  $\underline{M}_R$  y  $\underline{w}$  así obtenidos se ha relacionado con la media de esas 5 ó 6 medidas, procediéndose al cálculo de los coeficientes  $\underline{R}_{EW}$ ,  $\underline{R}_{EM_R}$  y  $\underline{R}_{M_RW}$  con los siguientes resultados:

$$R_{EW} = 0,629 \quad (N = 65),$$

$$R_{EM_R} = 0,619 \quad (N = 68),$$

$$R_{M_RW} = 0,544 \quad (N = 96),$$

donde  $\underline{N}$  representa el número de pares de valores de ambas variables utilizado en dicho cálculo.

#### X.8. Medidas simultáneas en el campo eléctrico en dos estaciones próximas

Duperier, en 1932 (28), dio cuenta de los resultados obtenidos al comparar el registro del potencial eléctrico del aire en la estación de "Val Joyeux" -a treinta kilómetros de París-, con las determinaciones simultáneas de la intensidad del campo



efectuadas mediante un dispositivo transportable, cuya distancia horizontal al citado sistema registrador se variaba entre ciertos límites (\*)

Tales resultados pusieron de manifiesto la existencia de un acusado paralelismo entre las fluctuaciones del campo observadas en ambos puntos.

Más adelante, Duperier, Vidal y Collado (29) encuentran nuevamente ese paralelismo en las medidas llevadas a cabo en España, en la Universidad de Valencia, donde estudian además el comportamiento simultáneo de la conductividad y de la carga espacial del aire.

Hemos creído de interés el incluir en este trabajo algunas observaciones destinadas a investigar dicho efecto en nuestra estación urbana; y, con tal objeto, se compararon los datos de la intensidad del campo suministrados por la instalación de la caseta 1, con los obtenidos en la medida del potencial eléctrico recurriendo al empleo de un sistema portátil -que podía desplazarse por la azotea del edificio de la Universidad-.

La salida del electrómetro Keithley conectado a la placa

---

(\*) Se hicieron medidas a 15 m, 300 m e incluso 1200 m. También se modificó la correspondiente distancia vertical.

receptora de la instalación mencionada se llevó a un registrador Y-tiempo en el cual, cada vez que se descubría dicha placa, se dibujaba una raya vertical de longitud proporcional al campo  $E_o$  medido en ese instante. Un segundo registrador X-Y, en paralelo con el anterior, acusaba asimismo los valores de  $E_o$  introducidos en X.

El sistema portátil al que hemos aludido estaba constituido por un colector radiactivo -convenientemente aislado con terflón y dispuesto en una estructura metálica sobre el suelo de la azotea- en conexión con un electrómetro P.A.R. cuya salida se llevó, por medio de un cable coaxial, al segundo canal del primer registro, así como al canal Y del segundo. Se hicieron medidas continuas con dicho sistema en tres posiciones, siendo sus distancias respectivas a la caseta 1, de 35 m ( $V_1$ ), 100 m ( $V_2$ ) y 150 m ( $V_3$ ), aproximadamente.

El citado colector iba apantallado a fin de reducir el valor del potencial adquirido por el mismo, consiguiéndose así que la lectura en el registro fuera de cuantía muy parecida a la medida correspondiente de  $V_o$  (\*)

La placa se descubría -y se cubría inmediatamente después-

---

(\*) Potencial del conjunto placa-electrómetro Keithley, a partir del cual se calcula  $E_o$ .

repetitiéndose la operación a intervalos de 1 min (\*). Se obtenía de ese modo un registro discontinuo de  $\underline{E}_o$ .

Tanto las observaciones  $\underline{V}_1$  -realizadas a la distancia de 35 m- como las  $\underline{V}_3$  -a 150 m- quedan consignadas directamente en los registros continuos -curvas en negro- de las gráficas 180 T II a 188 T II y 183 T II a 203 T II, respectivamente. Las curvas en rojo se dibujaron uniendo los puntos correspondientes a las medidas discontinuas de  $\underline{E}_o$ .

En cambio, en las gráficas 189 T II a 192 T II que pertenecen a las observaciones  $\underline{V}_2$  -a 100 m de la placa-, las curvas en negro se obtuvieron uniendo entre sí aquellos puntos, tomados del registro continuo, que se corresponden con los de  $\underline{E}_o$  (\*\*).

En la mayoría de esas gráficas puede apreciarse una gran semejanza entre las curvas respectivas de ambas estaciones, así como una notable simultaneidad entre las fluctuaciones de las mismas; efectos que se hacen más patentes en las que corresponden a la distancia de 35 m.

---

(\*) En las observaciones realizadas a la distancias de 35 m se redujo ese intervalo.

(\*\*) En todos los casos, 2,5 cm de la escala vertical -en la gráfica original- equivalen, aproximadamente, a 1 V en la medida de  $\underline{V}_o$ , y a 10 V en las de  $\underline{V}_1$ ,  $\underline{V}_2$  y  $\underline{V}_3$ .

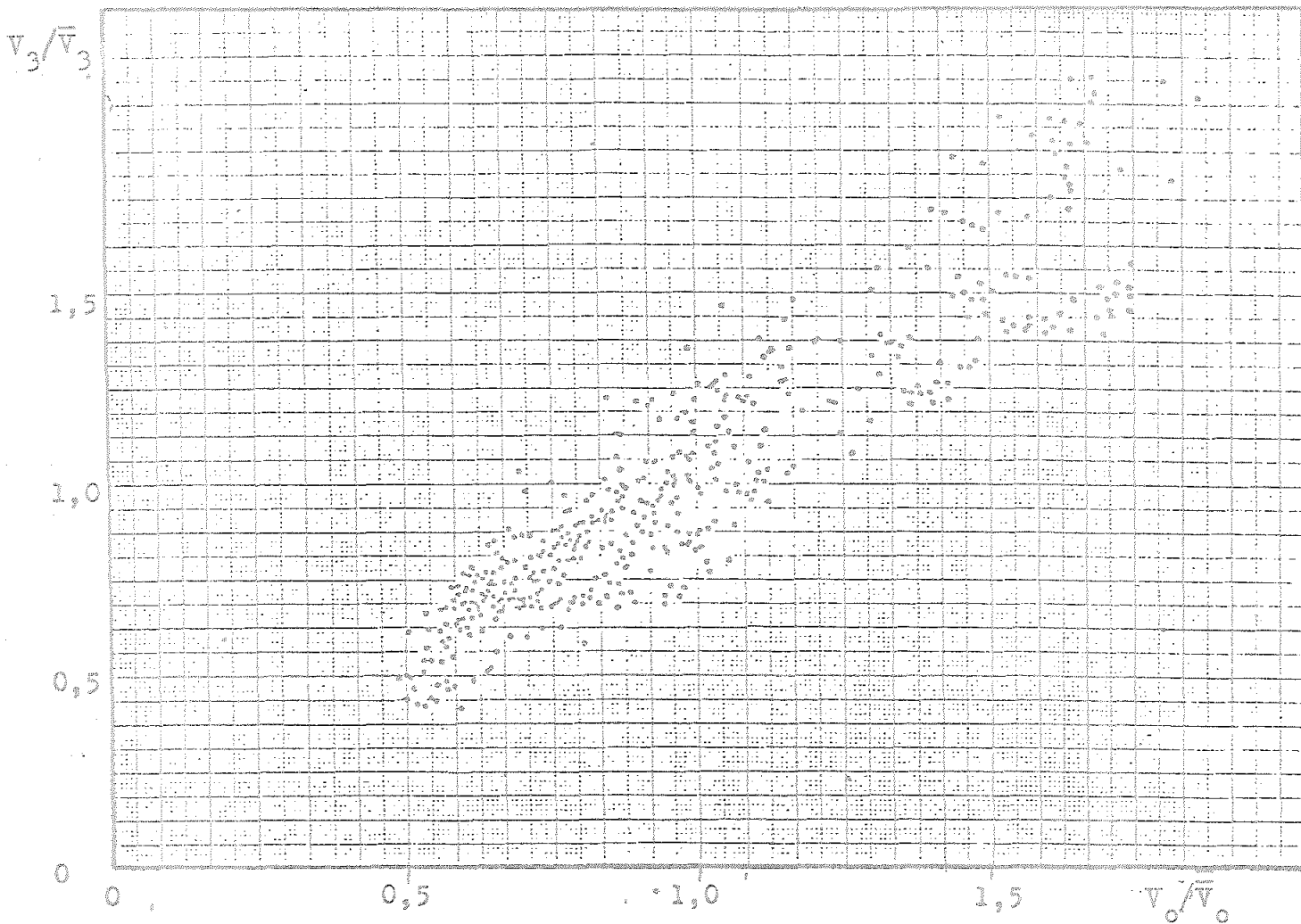


Figura 204

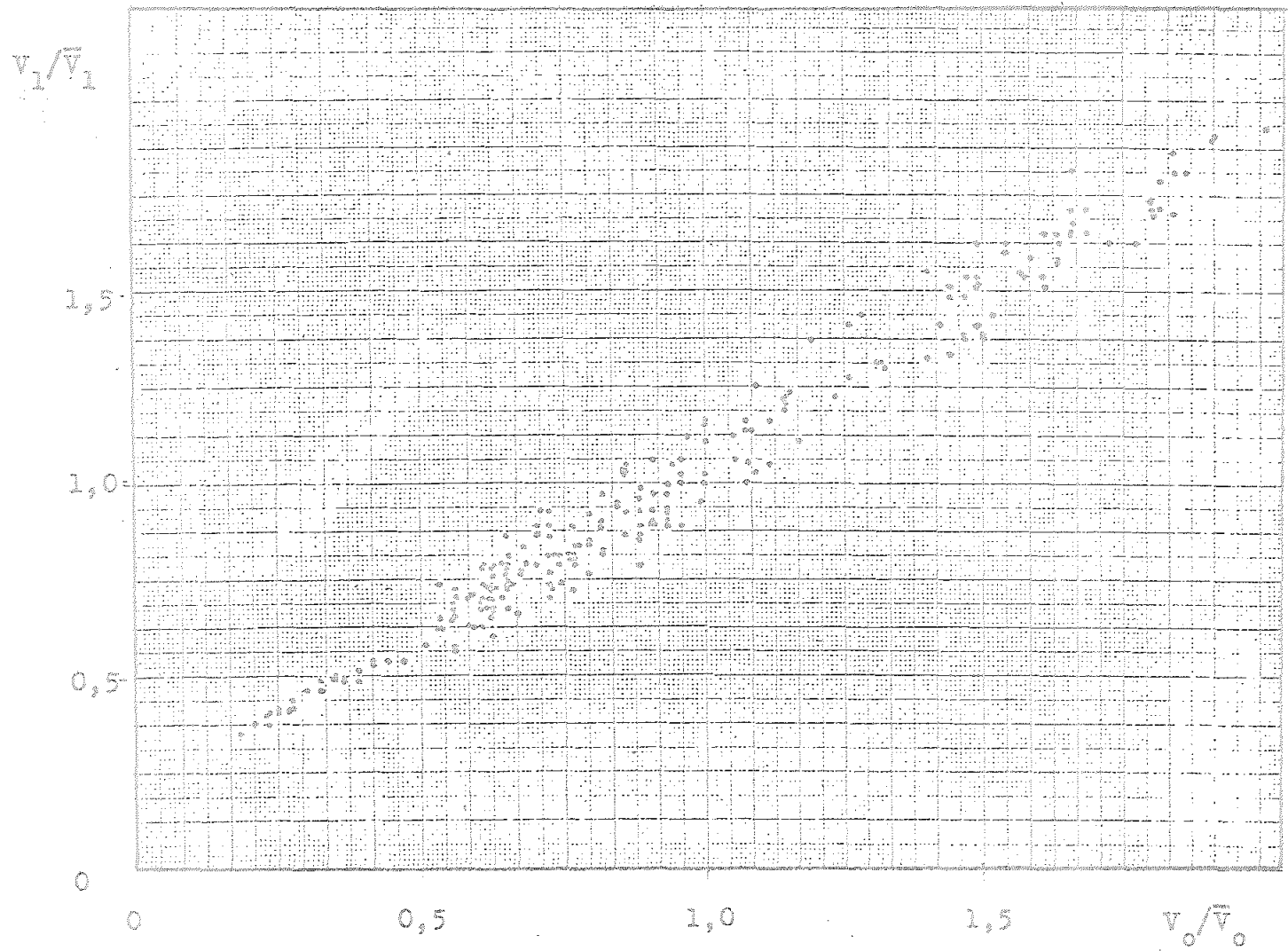


Figura 205

Como comprobación de lo anterior se ha calculado la correlación existente entre los valores  $\underline{V_1}/\bar{V}_1$  y  $\underline{V_0}/\bar{V}_0$  para un total de 233 medidas simultáneas (\*) tomadas al azar de las gráficas, obteniéndose un coeficiente de 0,986 (véase la fig. 204).

También se ha procedido a dicho cálculo con los valores de  $\underline{V_3}/\bar{V}_3$  frente a los de  $\underline{V_0}/\bar{V}_0$ , tomando en este caso los datos directamente del registro X, T. El coeficiente en cuestión es igual entonces a 0,912 (fig. 205).

#### X.9. Expresión del contenido del aire en partículas en suspensión como función de la conductividad

Recientemente, A. Manes (30) ha hecho uso de una fórmula que permite estimar el grado de contaminación del aire -su contenido en partículas- a base de los datos obtenidos midiendo la conductividad eléctrica (\*\*) del mismo -véase también (31). Su fundamento es el siguiente:

a) Obtención de  $\underline{Z}$  a partir de  $\underline{\Lambda_+}$

(\*)  $\bar{V}_1$  y  $\bar{V}_0$  representan los respectivos valores medios.

(\*\*) Concretamente, la conductividad polar  $\underline{\Lambda_+}$ .

La velocidad con que varía la concentración de los iones pequeños positivos contenidos en el aire viene dada por

$$\frac{dn_+}{dt} = q - \alpha n_+ n_- - n_{12} n_+ N_2 - n_{10} n_+ N_0,$$

donde  $n_+$  y  $n_-$  representan, respectivamente, las concentraciones -densidades numéricas- en el instante  $t$  de los iones pequeños de ambos signos;  $N_2$  y  $N_0$ , las concentraciones respectivas de los iones grandes negativos y de los núcleos neutros;  $\alpha$ , el coeficiente de recombinación de los iones pequeños entre sí;  $n_{12}$ , el coeficiente de recombinación de los iones pequeños positivos con los iones grandes negativos;  $n_{10}$ , el coeficiente correspondiente a la recombinación de dichos iones positivos con los núcleos desprovistos de carga, y  $q$ , el número de pares de iones pequeños producidos -por unidad de tiempo y de volumen- por la acción de los agentes ionizantes.

Si consideramos condiciones de equilibrio ( $\frac{dn_+}{dt} = 0$ ), y admitiendo que

$$n_+ = n_- = n, \quad N_1 = N_2 = N, \quad (*)$$

será

---

(\*)  $N_1$  representa, por supuesto, la densidad numérica de los iones grandes positivos.

$$q = \alpha n^2 + n(\eta_{12} N + \eta_{10} N_0) = \alpha n^2 + nN(\eta_{12} + \eta_{10} \frac{N_0}{N}).$$

Y haciendo

$$\eta_{12} + \eta_{10} \frac{N_0}{N} = \beta,$$

resulta

$$q = \alpha n^2 + \beta nN.$$

De donde

$$N = \frac{1}{\beta} \left( \frac{q}{n} - \alpha n \right).$$

Ahora bien,

$$\Lambda_+ = n_+ k_+ e = nk_+ e.$$

Por consiguiente, eliminando  $n$  entre esta expresión y la anterior, se obtiene:

$$N = \frac{1}{\beta} \left( \frac{qk_+ e}{\Lambda_+} - \frac{\alpha \Lambda_+}{k_+ e} \right).$$

Por otra parte, el número total de núcleos -tanto neutros como cargados- es

$$Z = N_1 + N_2 + N_0 = 2N + N_0,$$



y si se admite que  $N_0 = 3N$ ,

$$Z = 5N.$$

Así, pues,

$$Z = \frac{5}{\beta} \left( \frac{qk_+e}{\Lambda_+} - \frac{\alpha\Lambda_+}{k_+e} \right). \quad \{9\}$$

En dicha expresión (30),

$$\alpha = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1},$$

$$\beta = 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1},$$

$$k_+ = 1,14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1},$$

$$q = 6 \cdot 10^6 \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1},$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}.$$

#### b) Relación entre $\underline{M}$ y $\underline{Z}$

La ley de distribución de Junge (32) nos suministra el número  $\underline{dN}$  de partículas en suspensión en el aire, por unidad de volumen, de radios comprendidos entre  $\underline{r}$  y  $\underline{r+dr}$  (\*):

$$dN = C \lg e r^{-4} dr = Kr^{-4} dr.$$

La masa de las mismas -de densidad  $\underline{\rho}$ - es

---

(\*) Aquí,  $\underline{N}$  no representa, pues, lo mismo que en el apartado anterior.

$$dM = \frac{4}{3} \pi \rho r^3 dN = \frac{4}{3} \pi \rho K r^{-1} dr.$$

Por lo tanto,

$$\Delta N \Big|_{r_1}^{r_2} = K \int_{r_1}^{r_2} r^{-4} dr = \frac{K}{3} \left( \frac{1}{r_1^3} - \frac{1}{r_2^3} \right),$$

$$\Delta M \Big|_{r_1}^{r_2} = \frac{4}{3} \pi \rho K \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \frac{4}{3} \pi \rho K \ln \frac{r_2}{r_1},$$

Y

$$\frac{\Delta M}{\Delta N} = 4\pi\rho \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{\frac{1}{r_1^3} - \frac{1}{r_2^3}}.$$

La masa  $M$  correspondiente al número total  $Z$  de núcleos será, entonces,

$$M = 4\pi\rho \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{\frac{1}{r_1^3} - \frac{1}{r_2^3}} Z.$$

Y tomando (30)

$$\rho = 1000 \text{ kg m}^{-3},$$

$$r_1 = 60 \text{ nm} = 6 \cdot 10^{-8} \text{ m},$$

$$r_2 = 6000 \text{ nm} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ m},$$

resulta

$$\begin{aligned} M &= 12,5 \cdot 10^{-18} Z \quad (\text{kg/m}^3 \text{ de aire}) \\ &= 12,5 \cdot 10^{-9} Z \quad (\mu\text{g/m}^3 \text{ de aire}). \end{aligned}$$

Al tener en cuenta la expresión de  $Z$  {9} y los correspondientes valores numéricos antes indicados, se obtiene por último la siguiente fórmula que relaciona directamente a  $M$  con  $\Lambda_+$ :

$$M = \frac{6,84 \cdot 10^{-13}}{\Lambda_+} - 5,48 \cdot 10^{14} \Lambda_+ \quad (\mu\text{g/m}^3). \quad \{10\}$$

Una etapa de nuestro trabajo, desarrollada -con algunas interrupciones- desde octubre de 1978 a mayo de 1979, se destinó al estudio de la posible dependencia entre ambas variables en Sevilla, efectuándose medidas de  $\Lambda_+$  por el método de Gardien (\*) y determinando, por otra parte, el contenido del aire en partículas (véase la pág. 69).

Las tablas 15 TII y 16 TII hacen referencia a esas observaciones. En ellas,  $\Lambda_1$  y  $\Lambda_2$  corresponden, respectivamente, a los valores de  $\Lambda_+$  calculados mediante la aplicación de la ley de Ohm y a los resultados de las medidas realizadas con el apa-

---

(\*) En muchos casos se empleó asimismo el procedimiento indirecto del cálculo de  $\Lambda_+$  a partir de la ley de Ohm.

rato Gerdién (\*).  $M_R$  expresa el dato experimental de la contaminación del aire, y  $M$  el que suministra la fórmula (10), al sustituir en ella en cada caso, como valor de  $\Lambda_+$ , el promedio de unos 5 ó 6 valores individuales de  $\Lambda_2$  obtenidos durante el tiempo que duraba el filtraje del aire (\*\*).

Y en cuanto a los datos que se incluyen en la columna encabezada por  $M^1$ , provienen de una expresión de la forma

$$M^1 = A \frac{1}{\Lambda_+} + B \Lambda_+,$$

para el cálculo de cuyos coeficientes  $A$  y  $B$  se ha procedido así:

Escribiendo dicha fórmula para cada par de valores de  $\Lambda_+$  ( $=\Lambda_2$ ) y de  $M_R$  y sumando las correspondientes ecuaciones, se obtiene

$$\Sigma M_R = A \Sigma \frac{1}{\Lambda_+} + B \Sigma \Lambda_+ \quad \{11\}$$

(\*) Los valores de  $\Lambda_2$  incluidos en la tabla 15 TII se obtuvieron hallándose dicho aparato en el interior de la caseta 1, junto a una de las ventanas -provista de una abertura adecuada- de la misma.

Se hicieron también algunas medidas con el aparato en cuestión -convenientemente apantallado- sobre el techo de esa caseta, a corta distancia de la placa destinada a la determinación de  $E$  y  $J$ . Los resultados de tales medidas figuran en la tabla 16 TII.

(\*\*) El volumen filtrado era del orden de  $1 \text{ m}^3$ .

Por otra parte, si se multiplica previamente cada una de dichas ecuaciones por  $\frac{1}{\Lambda_+}$  y a continuación se efectúa la suma, resulta

$$\sum_R M_R \frac{1}{\Lambda_+} = N A + B \sum \Lambda_+^2, \quad \{12\}$$

siendo  $N$  el número de sumandos.

Quedan, pues, determinados ambos coeficientes al resolver el sistema formado por {11} y {12}. Sus respectivos valores numéricos -utilizando para el cálculo los 99 datos de  $M_R$  y  $\Lambda_2$  de la tabla 15-TII son:

$$A = 2,87 \cdot 10^{-13}, \quad B = 8,9 \cdot 10^{14}.$$

Por consiguiente,

$$M' = 2,87 \cdot 10^{-13} \frac{1}{\Lambda_+} + 8,9 \cdot 10^{14} \Lambda_+.$$

Se han calculado asimismo esos coeficientes prescindiendo de 8 series de observaciones que pueden considerarse anómalas. En tal caso,

$$M' = 3,36 \cdot 10^{-13} \frac{1}{\Lambda_+} + 1,1 \cdot 10^{14} \Lambda_+. \quad \{13\}$$

Finalmente, haciendo uso de los datos de  $\Lambda_2$  contenidos en la tabla 16 TII, se obtuvo la fórmula

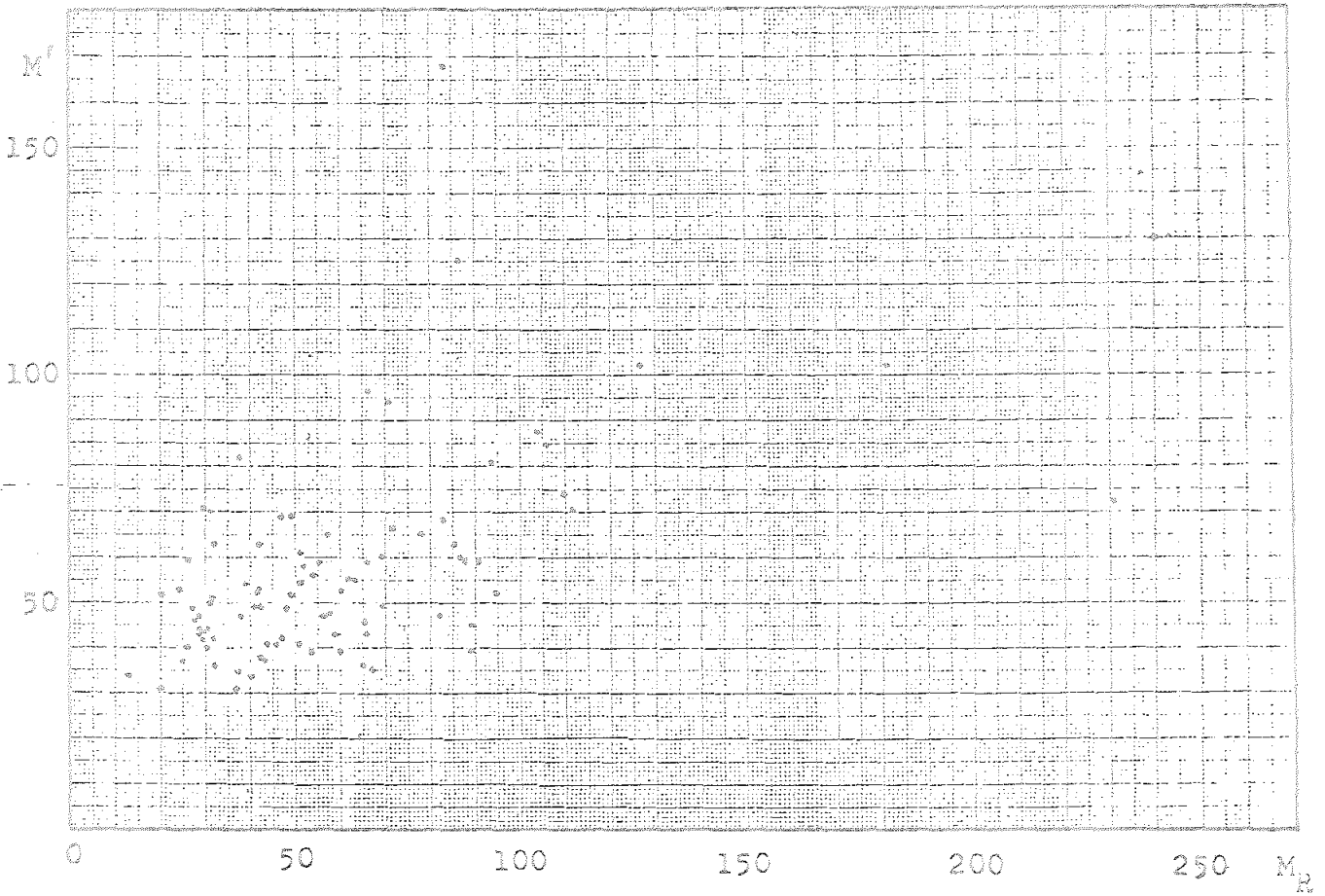


Figura 206

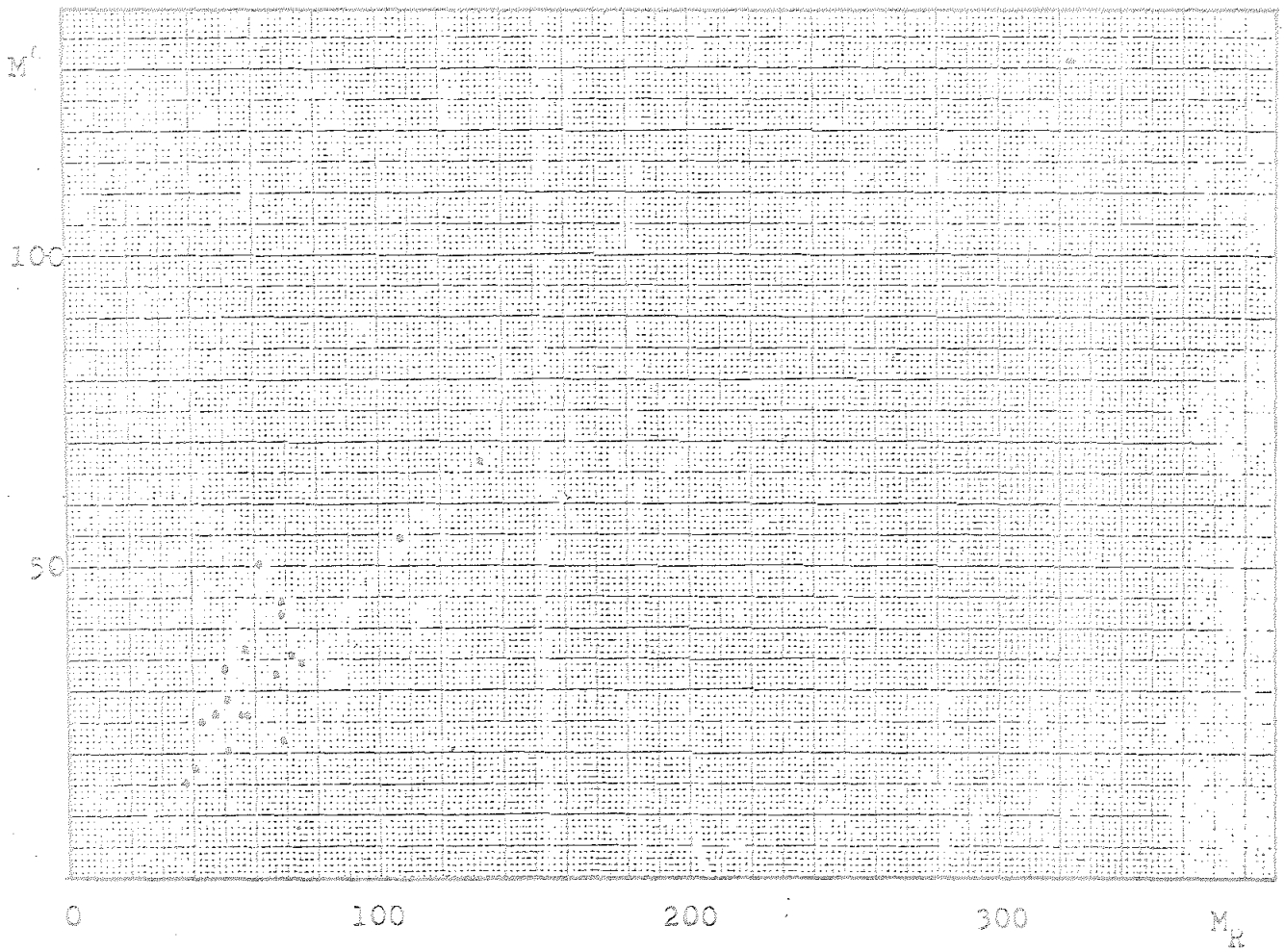


Figura 207

$$M^i = 3,16 \cdot 10^{-13} \frac{1}{\Lambda_+} - 1,5 \cdot 10^{15} \Lambda_+ \quad \{14\}$$

A fin de determinar hasta qué punto se ajusten los valores de  $M^i$  calculados mediante las expresiones {10}, {13} y {14} a las medidas del grado de contaminación  $M_R$ , se ha efectuado en cada caso el cálculo de la correlación existente entre ambas variables (\*). Los coeficientes respectivos son: 0,507, 0,625 y 0,957 (\*\*).

#### X.10. Zona rural

Destacamos seguidamente ciertas características de los resultados, puestas de manifiesto al hacer un examen detenido de la tabla 17 TII.

#### Grupo I

- 1) En la serie 3 se dan los valores mínimos del campo  $E_m$  y

(\*) Véanse las figs. 206 y 207.

(\*\*) El cálculo de errores para este último -con una certeza del 95%- conduce a unos límites extremos de 0,890 y 0,983.



de la densidad de corriente  $\underline{J}_m$ . La densidad de carga  $\underline{\rho}$  es ahí, sin embargo, superior a la media.

2) A  $\underline{J}_m$  le corresponde el mínimo de conductividad  $\underline{\Lambda}_m$  en la serie 16. (Cuando la corriente es mínima, la conductividad siempre es pequeña, salvo en la serie 3).

3) El valor máximo de la densidad de corriente  $\underline{J}_m$  se presenta simultáneamente con una conductividad elevada y una densidad de carga mínima.

#### Grupo II

1) El mínimo de la velocidad del viento  $\underline{W}_m$  coincide con  $\underline{J}_m$  en la serie 6, y con  $\underline{\Lambda}_m$  en la 7.

2) En general, existe correspondencia entre  $\underline{J}_m$  y  $\underline{\Lambda}_m$ .

3) Cuando  $\underline{J}$  es máxima, la conductividad es alta, muy superior a la media.

4) En la serie 142 se da la circunstancia de que  $\underline{J}_m$  coincide con un valor más bien elevado de  $\underline{\Lambda}$ ; pero, en cambio,  $\underline{\rho}$  es mínima.

5) A  $\underline{\Lambda}_M$  le corresponden  $\underline{E}_m$  y  $\underline{\rho}_m$ .

#### Grupo III

1) El mínimo de  $\underline{w}$  coincide con el de  $\underline{\rho}$  (serie 3).

- 2) Se dan simultáneamente  $\underline{J}_m$  y  $\underline{\rho}_m$ .
- 3)  $\underline{E}_M$  se corresponde con  $\underline{\rho}_m$  y con una densidad de corriente elevada.
- 4) Coinciden entre sí  $\underline{J}_m$  y  $\underline{\Lambda}_m$ .
- 5) En la serie 92, tanto  $\underline{J}$  como  $\underline{\Lambda}$  y  $\underline{\rho}$  presentan valores mínimos.

#### Correlaciones entre las variables

Al igual que en el caso de las medidas realizadas en la zona urbana, se han calculado diversos coeficientes de correlación -tanto sencilla como múltiple- correspondientes a los datos obtenidos en la zona rural. Tales coeficientes -referidos a cada grupo en particular, así como al conjunto de las observaciones- aparecen detallados en la tabla 18, que puede compararse con las tablas 6 y 7.

A la vista de dicha tabla, destacamos los siguientes resultados:

- 1) La correlación  $\underline{E}$  y  $\underline{w}$ , tan patente en casi todas las medidas de la zona urbana, desaparece aquí por completo.

Tabla 18

	G. I	G. II	G. III	Total
$R_{RJ}$	0,109	0,256	0,138	0,165
$R_{EA}$	-0,486	-0,467	-0,156	-0,276
$R_{ER}$	-0,150	0,391	-0,164	0,144
$R_{EV}$	0,062	-0,149	-0,160	-0,131
$R_{JA}$	0,814	0,620	0,941	0,869
$R_{JP}$	-0,242	0,063	-0,324	0,058
$R_{JW}$	0,103	0,112	-0,308	0,164
$R_{AR}$	-0,123	-0,235	-0,411	-0,024
$R_{AW}$	0,066	0,238	-0,254	0,185
$R_{w}$	0,100	-0,101	0,614	0,114
$R_{EJ}(P)$	0,076	0,252	0,091	0,159
$R_{EJ}(w)$	0,103	0,278	0,094	0,191
$R_{EA}(P)$	-0,514	-0,419	-0,248	-0,275
$R_{EA}(w)$	-0,492	-0,449	-0,206	-0,258
$R_{EP}(J)$	-0,128	0,389	-0,127	0,137
$R_{EP}(A)$	-0,242	0,327	-0,253	0,143
$R_{EP}(w)$	-0,157	0,382	-0,084	0,161
$R_{Ew}(J)$	0,051	-0,185	-0,125	-0,162
$R_{Ew}(A)$	0,108	-0,044	-0,209	-0,085
$R_{Ew}(C)$	0,078	-0,120	-0,076	-0,150
$R_{JA}(P)$	0,814	0,654	0,937	0,839
$R_{JA}(w)$	0,814	0,615	0,938	0,865
$R_{JP}(A)$	-0,246	0,274	0,203	0,159
$R_{JP}(w)$	-0,255	0,075	-0,180	0,040
$R_{Jw}(A)$	0,085	-0,047	-0,211	0,007
$R_{Jw}(P)$	0,132	0,119	-0,146	0,159
$R_{AP}(J)$	0,131	-0,350	-0,331	-0,151
$R_{AP}(w)$	-0,131	-0,218	-0,334	-0,046
$R_{Aw}(J)$	-0,031	0,216	0,111	0,087
$R_{Aw}(P)$	0,079	0,222	-0,002	0,189
$R_{w}(J)$	0,129	-0,109	0,571	0,106
$R_{w}(A)$	0,109	-0,048	0,578	0,121

Tabla 18 (Continuación)

	G.I	G.IV	G.VII	Total
<sup>2</sup> EP(AV)	-0,257	0,326	-0,166	0,155
<sup>2</sup> JAV(PV)	0,814	0,649	0,947	0,868
<sup>2</sup> JAV(AP)	0,116	-0,036	-0,413	-0,025
<sup>2</sup> JAV(JC)	-0,049	0,192	0,390	0,105
<sup>R</sup> EJW	0,120	0,312	0,185	0,439
<sup>R</sup> EAW	0,495	0,469	0,259	0,288
<sup>R</sup> JAP	0,826	0,656	0,944	0,873
<sup>R</sup> JAV	0,815	0,621	0,944	0,869
<sup>R</sup> JPV	0,274	0,134	0,352	0,169
<sup>R</sup> EWJC	-0,171	0,476	0,197	0,318
<sup>R</sup> EWAP	0,543	0,550	0,304	0,323
<sup>R</sup> JAPV	0,829	0,657	0,953	0,873

2) En cambio, se mantiene la correlación entre  $\underline{J}$  y  $\underline{\Lambda}$ , que alcanza valores significativos en todos los grupos; pudiendo calificarse de marcada ( $R_{\underline{J}\underline{\Lambda}} = 0,620$ ) en el grupo II, de elevada ( $R_{\underline{J}\underline{\Lambda}} = 0,814$ ) en el I, y de muy elevada ( $R_{\underline{J}\underline{\Lambda}} = 0,941$ ) en el III. Los respectivos coeficientes no experimentan cambios apreciables al considerar a  $\underline{w}$ , o a  $\underline{p}$ , constantes " $r_{\underline{J}\underline{\Lambda}(\underline{w})}$ , " $r_{\underline{J}\underline{\Lambda}(\underline{p})}$ " (\*). Ni tampoco para  $\underline{p}$  y  $\underline{w}$  ambas constantes " $r_{\underline{J}\underline{\Lambda}(\underline{p}\underline{w})}$ ".

3) Sólo en los grupos I y II se presenta una correlación inversa moderada entre  $\underline{E}$  y  $\underline{\Lambda}$ .

4) El coeficiente de  $\underline{E}$  frente a  $\underline{p}$  es ligeramente significativo ( $R_{\underline{E}\underline{p}} = 0,391$ ) en el grupo II.

5) En ninguno de los grupos se observa dependencia entre  $\underline{\Lambda}$  y  $\underline{w}$ .

6) Aparece una marcada correlación directa entre  $\underline{p}$  y  $\underline{w}$  en el grupo III ( $R_{\underline{p}\underline{w}} = 0,614$ ), siendo algo más pequeños  $r_{\underline{p}\underline{w}(\underline{J})}$  y  $r_{\underline{p}\underline{w}(\underline{\Lambda})}$  que  $R_{\underline{p}\underline{w}}$ .

7) También en el grupo III se manifiesta una cierta correlación -de tipo inverso; sólo moderada- entre  $\underline{\Lambda}$  y  $\underline{p}$ .

---

(\*) Nótese la diferencia con lo que ocurría a este respecto en la zona urbana.

8) Existen correlaciones marginales -únicamente en el grupo III- entre  $\underline{J}$  y  $\underline{p}$  ( $R_{\underline{Jp}} = -0,324$ ), así como entre  $\underline{J}$  y  $\underline{w}$  ( $R_{\underline{Jw}} = -0,308$ ).

9) Por lo que respecta a los coeficientes de correlación múltiple, destacan sobre todo los que corresponden, en los tres grupos -de modo especial en el I y el III-, a  $R_{\underline{J\Delta p}}$ ,  $R_{\underline{J\Delta w}}$  y  $R_{\underline{J\Delta pw}}$ , los cuales se mantienen en los respectivos niveles de  $R_{\underline{J\Delta}}$ . Por otra parte, son significativos los valores de  $R_{\underline{E\Delta w}}$  en los grupos I y II -y, en menor grado,  $R_{\underline{Jpw}}$  en el III-, siéndolo asimismo  $R_{\underline{Ew\Delta p}}$  en esos grupos.

## XI. INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS

En el apartado X de esta memoria nos hemos limitado a exponer -más o menos detalladamente, según el caso- aquellos resultados que, bien de forma inmediata o mediante el cálculo o pertinente, pueden deducirse los datos suministrados por nuestras medidas.

Tal exposición, en lo que atañe a esos resultados, ha sido meramente descriptiva, desprovista de comentarios y explicaciones acerca de los distintos hechos (\*), ya que la posible justificación de los más destacados, así como las consideraciones oportunas a ese respecto, constituyen el objeto exclusivo de este apartado.

---

(\*) Exceptuando lo dicho en las págs. 99 y 100 en relación con la elevada magnitud que presentan los valores de E y también, aunque en menor grado, los de J.

## XI.1. Zona urbana

### Correlaciones entre los valores individuales de las variables

Hacemos referencia nuevamente a la tabla 6 y asimismo al apartado X.1, en el que nos ocupamos de los respectivos coeficientes de correlación entre esos valores individuales obtenidos en las diversas series de medidas.

De entre todas las correlaciones halladas, sobresalen indudablemente, tanto por la cuantía de las mismas como por su persistencia en los diferentes grupos, las que existen entre E y w por una parte, y entre J y A por otra (\*). Y esas características se mantienen, no sólo en los días perturbados, sino también -prescindiendo de  $R_{EW}$  en el grupo III- en los perturbados.

Consideremos en primer lugar la correlación de E frente a w. Mathias, en su Traité d'Electricité Atmosphérique et Tellurique (33) (\*\*), refiriéndose al efecto del viento sobre el gradiente de potencial eléctrico de la atmósfera, dice lo siguiente: "Cuando no existe causa perturbadora local, las medias de

---

(\*) Inversa y directa, respectivamente.

(\*\*) Pág. 58.



una larga serie de observaciones no permiten generalmente detectar la influencia del viento sobre la caída de potencial. Dicha influencia, sin embargo, se manifiesta en numerosas circunstancias particulares". Más adelante, agrega: "Parece, pues, que el gradiente de potencial se halla sometido a la influencia del viento, tendiendo a disminuir al crecer la velocidad de éste; de dos estaciones próximas, es aquélla en la que el viento sopla con más fuerza la que presenta valores más débiles del campo eléctrico".

Cabe destacar de lo anterior esa mención de causa perturbadora local, a la cual, según ese autor, deben atribuirse los efectos del viento; puesto que también en nuestras observaciones se evidencia el origen local de la correlación. Esta falta totalmente en los resultados correspondientes a la estación de medida de la zona rural.

En su obra Atmospheric Electricity, Vol. II (3)(\*), Israël al describir cómo se ve afectada la intensidad del campo eléctrico por distintos factores meteorológicos- considera asimismo la influencia del viento, confirmando el hecho de que al aumentar su velocidad tiende a reducirse dicha intensidad. Y hace

---

(\*) Pág. 394.

Intervenir, para explicar en general esos efectos meteorológicos, las variaciones del contenido del aire en partículas en suspensión y los cambios locales de conductividad y de carga espacial. Un aumento de la velocidad del viento acrecentaría los procesos de intercambio vertical en la atmósfera, con el descenso consiguiente de la concentración de las partículas en las capas próximas al suelo. Se reducirían así la resistividad y el gradiente de potencial del aire.

Por otra parte, según Ette (34): "Los valores medios de los elementos eléctricos de la atmósfera son afectados de forma muy marcada por el viento, en particular durante el régimen de "Austausch" cuando es elevada la producción de carga espacial por los procesos industriales y de origen natural". Cita posteriormente un caso -estudiado por Wait en Australia- en el que el gradiente de potencial y la corriente aire-tierra crecían ambos al hacerlo la velocidad del viento; lo que se debía a las grandes concentraciones de carga espacial producidas por incendios de matorrales. En otro caso, por el contrario -en el observatorio de la montaña de Mauna Loa-, tanto el campo como la corriente disminuían cuando aumentaba la velocidad del viento, siendo positiva la carga espacial.

Los tres autores citados -entre otros- hacen, pues, referencia explícita a la modificación que experimenta la intensidad

del campo por la acción del viento. Tanto Ette como Israël aducen como causa explicativa del efecto observado las variaciones de la carga espacial, y el segundo menciona también los cambios de concentración de las suspensiones en el aire. Pero hemos de tener presente que la influencia de esos cambios sobre el campo se ejerce asimismo a través de la carga espacial. Tal influencia puede ser directa, debida a las cargas eléctricas que posean las partículas del aerosol atmosférico; o bien indirecta, provocada por la redistribución de carga que se origina al variar la conductividad en una cierta zona, cuyo mecanismo fue descrito en la pág. 48.

En todo caso, son, pues, las alteraciones que sufre -de un modo o de otro- la carga volumétrica del aire como consecuencia del viento, las determinantes de la acción que éste ejerce sobre la intensidad del campo.

La carga que aparece a causa de los citados cambios de conductividad inducidos al variar la concentración de aerosol, no parece que pueda desempeñar, en nuestro caso, un papel importante en lo concerniente a la influencia del viento sobre el campo (\*). Y ello por dos razones fundamentales: la velocidad del vien-

---

(\*) No se olvide que sólo nos referimos por el momento a las medidas individuales.

to afecta mucho menos a los valores de la conductividad, según revelan los coeficientes de correlación calculados -en los días no perturbados sólo se presenta una correlación marginal en el grupo I entre  $\underline{\Lambda}$  y  $\underline{w}$ , y en los perturbados únicamente dan correlaciones moderadas los grupos II y IV-; y la separación de dicha carga no es, por supuesto, instantánea, ya que depende del tiempo de relajación del aire ( $\tau$ ) (\*).

Utilizando el promedio de la conductividad correspondiente a nuestras medidas (tabla 5), resulta para  $\underline{\tau}$  un valor algo mayor de 30 min, muy superior, evidentemente, al intervalo de 10 min durante el cual se determinaba la velocidad media del viento.

Aún prescindiendo de esa carga ligada a las variaciones de conductividad, ha de considerarse, sin embargo, la que transporta directamente la fase dispersa del aerosol, en la que predominará, según el caso, la de uno u otro signo. En la estación de la Universidad, las determinaciones de  $\underline{\rho}$  han dado en todos los grupos -salvo contadísimas excepciones en algunas series anómalas- valores positivos. Sin pretender que la densidad de carga medida tenga exclusivamente dicho origen, sí parece razonable

---

(\*)  $\tau = \epsilon_0 / \Lambda$ .

tener en cuenta la contribución parcial a la misma de los iones contenidos en la citada fase. Un argumento a favor de lo anterior constituye la correlación marcada existente entre  $\underline{p}$  y  $\underline{M}_R$  ( $R_{\rho M_R} = 0,532$ ).

Otro proceso que, dado el sentido descendente del vector  $\underline{E}$  de buen tiempo, debe producir carga volumétrica positiva en las inmediaciones del suelo, es el llamado efecto electrodo.

Sea un volumen de aire en forma de paralelepípedo recto de altura  $h$  y base unidad -situada la inferior a nivel del suelo-. Su base superior estará atravesada por una doble corriente iónica (\*).

Con  $\underline{E}$  dirigido hacia abajo, los iones positivos se desplazarán en idéntico sentido y los negativos en sentido contrario. En régimen estacionario, todos los iones positivos que penetran por esa base "salen" por la inferior -es decir, ceden su carga a la tierra-. El volumen considerado no experimenta, pues, ninguna variación en su contenido de carga positiva como consecuencia de la corriente aire-tierra. Sin embargo, la salida de iones negativos por la base superior no se halla compensada, ya que no puede haber penetración de los mismos por la inferior. Se

---

(\*) Se prescinde de posibles corrientes de convección.

produce así en dicho volumen una pérdida neta de iones negativos. Y predomina, por consiguiente, la carga positiva (\*). Tal es el resultado del mencionado efecto (3), (35), (36).

La referida acumulación de carga positiva tendría lugar del modo descrito en ausencia de todo proceso capaz de disiparla, tendiéndose a un estado de equilibrio con un cierto valor estacionario de  $\rho$ . De hecho, el viento constituye un eficaz factor disipativo de la carga en cuestión, y es de esperar, por tanto, que al aumentar su velocidad se reduzca -o llegue a desaparecer por completo- el efecto electrodo. Dado que éste depende de  $J$ , parámetro que -por causas de índole topográfica- alcanza valores más elevados de lo normal en nuestra estación de medida de la azotea de la Universidad, puede preverse que se manifiesta ahí ostensiblemente, siendo apreciable su influencia sobre las medidas de  $E$ .

Además de los tres procesos generadores de carga espacial a los que hemos hecho referencia, cabría considerar, en determinadas ocasiones, la producción de la misma mediante fricción en el polvo levantado por un fuerte viento. Hemos observado,

---

(\*) Téngase presente que este predominio no se debe a que la concentración de iones positivos sea mayor que la normal, sino al hecho de reducirse la correspondiente a los negativos.

efectivamente, en algunos casos en los que se daba esta condición, descensos de  $E$  hasta alcanzar valores anormalmente bajos, llegando incluso a invertirse su sentido (\*). La carga producida en tales circunstancias sería, entonces, de signo negativo.

La variación inversa de la intensidad del campo con la velocidad del viento -de acuerdo con nuestras observaciones- debe atribuirse fundamentalmente, según ya indicamos, a los cambios que experimenta la carga espacial. Puesto que ésta es positiva, al aumentar dicha velocidad tendría lugar en general una disminución de  $\rho$ . Es decir debería manifestarse asimismo una correlación inversa entre  $\rho$  y  $w$ .

Pero en las medidas de  $\rho$  realizadas en la azotea de la Universidad, únicamente se ha encontrado tal correlación- marcada y moderada respectivamente-, en los grupos II y IV pertenecientes a los días no perturbados; así como en el grupo IV -de los días perturbados-, aunque sólo marginal. Hemos de tener presente, sin embargo, que la información que suministran esas medidas es puramente local, restringida al punto donde se efectúan; y el campo, en cambio, está determinado por el conjunto de todas las cargas existentes en el instante que se considera, y no tan

---

(\*) Véanse tabla I TII, grupo I series 243 y 341.

sólo por aquéllas situadas en las proximidades del lugar donde se mide.

En los citados grupos de los días no perturbados la intervención de  $\rho$  en la correlación E-w se revela con claridad en los valores de  $r_{Ew(\rho)}$ , ya que la magnitud de este coeficiente es netamente inferior a la de  $R_{Ew}$  en ambos casos, respectivamente. Por otra parte, tanto en uno como en otro grupo, es marcada la correlación directa E-p.

Aludimos también anteriormente a la correlación hallada entre la densidad de corriente J y la conductividad  $\Lambda$ , que alcanza valores elevados ( $R_{J\Lambda} > 0,75$ ) en cinco de los doce grupos (\*) y llega a ser muy elevada ( $R_{J\Lambda} > 0,90$ ) en uno de ellos.

Según los datos de la tabla 8, las fórmulas empíricas que expresan la dependencia entre J y  $\Lambda$  en aquellos grupos para los cuales  $R_{J\Lambda} > 0,70$ , son, para los días no perturbados,

Grupo	II	III	IV	V	VI
J =	$\Lambda^{0,77}$	$\Lambda^1$	$\Lambda^{0,76}$	$\Lambda^{0,89}$	$\Lambda^{0,77}$

(\*) Incluyendo todas las observaciones, tanto en días no perturbados como perturbados.



y para los perturbados (tabla 9):

Grupo	II	IV
	$J = \Lambda^{0,81}$	$\Lambda^{0,92}$

En los primeros (días no perturbados), el exponente de  $\Lambda$  presenta una regularidad notable en los grupo II, IV y VI, con un valor medio de 0,766.

Es curioso comparar ese resultado con la fórmula propuesta por Hogg en 1950 (2), (3),

$$J = 0,6 \Lambda_0^{2/3}, \quad \{15\}$$

a la que se ajustaban los valores medios de ambas variables  $J$  y  $\Lambda$  obtenidos durante largos períodos. En ella,  $J$  se expresa en unidades de  $10^{-14} \text{ Am}^{-2}$  y  $\Lambda_0$ , que representa la conductividad al nivel del suelo, se mide en unidades de  $10^{-16} \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$ .

Al objeto de justificar teóricamente esa fórmula, considera dicho autor la siguiente ley de variación de la conductividad con la altura:

$$\Lambda = \Lambda_0 + Az^2,$$

En la que  $A$  es una constante. Es posible obtener así la resistencia  $R$  de una columna vertical de aire de base unidad,

comprendida entre la superficie terrestre y el nivel inferior de la ionosfera ( $z \approx 8 \cdot 10^4$  m):

$$R = \int_0^{8 \cdot 10^4} \frac{dz}{\Lambda_0 + Az^2} \approx \frac{\pi}{2\sqrt{A}} \Lambda_0^{-1/2}$$

Y siendo, en régimen estacionario,

$$J = \frac{V}{R},$$

resulta

$$J = \frac{2\sqrt{A}}{\pi} V \Lambda_0^{1/2}.$$

Si los promedios de  $\underline{J}$  y  $\underline{\Lambda}_0$  se extienden a intervalos lo suficientemente amplios como para compensar los cambios del potencial ionosférico  $\underline{V}$ , puede escribirse que

$$J = \text{cte.} \cdot \Lambda_0^{1/2}.$$

Fórmula que, de todos modos, discrepa apreciablemente de la {15}, ya que la diferencia entre los respectivos exponentes de  $\underline{\Lambda}$  es de un 25%.

La discrepancia entre esta última expresión y nuestra fórmula empírica con exponente 0,7,

$$J = \text{cte.} \Lambda^{0,7},$$

es aún mayor, por supuesto. Ello, sin embargo, carece de importancia; para explicar esa fórmula no puede utilizarse en modo alguno el razonamiento anterior, por ser valores "instantáneos" (\*) los que se relacionan en la misma.

El parecido entre ambos exponentes (0,7 y 0,667) queda, pues, como un hecho curioso -repetimos-, como simple coincidencia.

Conviene señalar aquí una diferencia fundamental entre las correlaciones  $\underline{E} - \underline{w}$  de las que nos ocupamos anteriormente, y estas otras que se presentan entre  $\underline{J}$  y  $\underline{\Lambda}$ . En el primer caso, podían hacerse conjeturas a priori sobre la posibilidad de una dependencia de tipo indirecto entre dichas variables -habida cuenta de la influencia del viento sobre la carga espacial-; pero, naturalmente, sin seguridad alguna de que tal dependencia se manifestase en toda ocasión, o, en caso afirmativo, lo hiciera en uno u otro sentido.

Por el contrario, en el segundo caso sabemos de antemano

---

(\*) En realidad, se trata de promedios durante intervalos de 5 minutos.

que  $\underline{J}$  y  $\underline{\Lambda}$  vienen ligadas en todo momento por la ley de Ohm (\*). Pero lo que revelan nuestras medidas en varios grupos es el hecho de que, en el curso de las mismas, los cambios experimentados por la conductividad son de mayor cuantía que los correspondientes al campo; siendo esa circunstancia tanto más patente, por supuesto, cuanto más elevado resulta el coeficiente de correlación calculado.

Por otra parte, al no existir relación funcional directa entre  $\underline{E}$  y  $\underline{w}$ , toda correlación significativa entre ambas variables -aunque sólo sea moderada- constituye un dato de interés, pues indica un cierto comportamiento del campo no observable en cualquier otra circunstancia.

No sucede así cuando se trata de  $\underline{J}$  y  $\underline{\Lambda}$ ; a causa de la ley de Ohm siempre es de esperar la existencia de alguna correlación entre ellas. Por tal motivo, sólo nos parece oportuno destacar aquellos casos en los cuales  $R_{\underline{J}\underline{\Lambda}}$  es superior a 0,7.

En definitiva, en 7 de los 12 grupos -reseñados en la pág. 91- se pone de manifiesto que las variaciones de la densidad de corriente aire-tierra vienen determinadas fundamentalmente por las que sufre la conductividad. Y siendo ésta una magnitud

---

(\*) Que, precisamente, se ha utilizado para obtener  $\underline{\Lambda}$ .

que depende de modo exclusivo del lugar en que se mide (\*), puede afirmarse el predominio -en buen número de nuestras observaciones- de la influencia a que está sometida  $\underline{J}$  por parte de factores puramente locales.

Es interesante comprobar, en relación con lo anterior, el aumento en todos los grupos de la correlación  $\underline{J}-\underline{\Lambda}$  al considerar a  $\underline{w}$  constante  $-r_{\underline{J}\underline{\Lambda}(w)}$ . Resultado explicable a la vista de la relación inversa  $\underline{E}-\underline{w}$ : si no cambia la velocidad del viento, es de esperar que se reduzca la magnitud de las variaciones del campo, introduciéndose así, o acrecentándose, una cierta proporcionalidad entre  $\underline{J}$  y  $\underline{\Lambda}$ .

La influencia indirecta de tipo inverso que, en condiciones cuasiestáticas, ejercen sobre el campo los cambios experimentados por la conductividad, sólo se han observado -como ya señalamos- en algunos casos. Únicamente se presenta una correlación marcada ( $|R| > 0,5$ ) entre ambas variables en el grupo I de los días no perturbados, y en los grupos IV y V de los perturbados. Atribuimos ese resultado a la falta, o escasa vigencia, de tales condiciones en el curso de las correspondientes medidas.

---

(\*) Recordemos que la conductividad en un punto es función de la carga, de la movilidad y de la concentración de los diferentes tipos de iones presentes en el entorno del mismo.

Por otra parte,  $R_{E\rho}$  es superior a 0,5 tan sólo en los subgrupos II y IV de los días no perturbados, aunque alcanza valores que revelan una correlación moderada -a veces, marginal- en cuatro de los restantes grupos, incluyendo los días perturbados. La escasa dependencia de  $E$  frente a  $\rho$  es explicable, creemos, teniendo presente que nuestras medidas nos informan acerca de la densidad de carga en un determinado punto próximo a aquél en que se mide el campo, cuyo valor debe influir sobre éste, pero nunca de forma exclusiva y no siempre de modo predominante (\*).

La diferencia existente entre  $R_{E\rho}$  y  $r_{E\rho(w)}$  en los mencionados grupos II y IV -sobre todo en el primero- aparece como una consecuencia de la correlación que entre ellos se manifiesta, tanto entre  $E$  y  $w$  como entre  $\rho$  y  $w$ .

Si un aumento de la velocidad del viento contribuyera siempre a reducir la concentración de las partículas contaminantes presentes en el aire -y, por consiguiente, del número de iones generados-, dicho aumento daría lugar en todo caso a un crecimiento paralelo de la conductividad. Se comprende, sin embargo, que pueda observarse un efecto opuesto si el viento tiende, por el contrario, a introducir tales partículas en el lugar de ob-

---

(\*) Recuérdese lo dicho a ese respecto en la pág. 184.

servación. Ello ha podido ocurrir repetidas veces en el transcurso de aquellas de nuestras medidas realizadas en los meses de invierno, a causa de los humos procedentes de las chimeneas de calefacción, principalmente de las situadas en el propio edificio de la Universidad.

No es, pues, de extrañar la escasa cuantía de las correlaciones halladas entre  $\underline{\Lambda}$  y  $\underline{w}$ ; las cuales, no obstante, crecen de modo notable cuando se calculan los coeficientes  $r_{\underline{\Lambda w}(j)}$ , debido a la proporcionalidad inversa que existe entre  $\underline{\Lambda}$  y  $\underline{E}$  para  $\underline{j}$  constante, así como a la dependencia, también inversa, que presenta  $\underline{E}$  con respecto a la velocidad del viento.

Suponiendo que la carga volumétrica se fuera acumulando a causa del efecto electrodo, sería previsible un aumento de  $\underline{\rho}$  en períodos de calma o de viento escaso; efecto que se observaría asimismo si la carga en cuestión se debiera a la que transportan -por razón de su origen- las partículas contaminantes. De hecho, tal correlación inversa ha sido observada por nosotros, pero sólo en los grupos II y IV. Su ausencia en los restantes casos puede quizás explicarse mediante consideraciones análogas a las que hicimos antes al tratar de la correspondencia  $\underline{\Lambda}-\underline{w}$ .

### Correlaciones entre los valores medios

Refiriéndose a los días perturbados (tabla 12), hemos de destacar aquí de nuevo, en primer lugar, la mejora experimentada por  $R_{EW}$  en relación con los valores respectivos de la tabla 7.

Al parecer, es posible justificar dicha mejora mediante la explicación dada anteriormente a la existencia de la correlación inversa entre ambas variables  $E$  y  $w$ , en términos de variaciones de la carga volumétrica. Efectivamente, la influencia sobre el campo de tales variaciones debe ser instantánea; pero la magnitud de las mismas -en particular de la disminución de  $\rho$  al diluirse esa carga por la acción del viento (\*)-, por tratarse de un proceso acumulativo, ha de incrementarse con la duración del período durante el cual se observa la citada influencia. De ahí que, al promediar en intervalos más largos que los correspondientes a las series individuales, aparezca reforzada la dependencia en cuestión.

Ese hecho se pone de manifiesto asimismo en el descenso que sufre  $r_{EW(0)}$  con respecto a  $R_{EW}$  en el grupo II -en el cual es muy marcada la correlación entre  $E$  y  $\rho$ -, apreciablemente mayor

---

(\*) Que será, en general, el efecto predominante.



que la diferencia entre ambos coeficientes para el mismo grupo de la tabla II.

Un efecto de signo opuesto aparece al comparar entre sí los respectivos valores de  $R_{JA}$  incluidos en las tablas 6 y 11. Dicho coeficiente disminuye en todos los grupos -de modo especial en el II y VI- cuando se calcula utilizando las medias horarias. Y aumenta, por el contrario,  $R_{EJ}$ , pudiendo observarse que -con la excepción del grupo III- tanto  $R_{JA}$  como  $R_{EJ}$  son sensiblemente de la misma magnitud para esos valores medios.

Anteriormente llegamos a la conclusión (pág. 189) de que, en general, "las variaciones de la densidad de corriente a tierra vienen determinadas fundamentalmente por las que sufre la conductividad". A la larga, sin embargo, -es decir, considerando intervalos más amplios que aquéllos que corresponden a las medidas individuales-, parece no existir predominio entre unas y otras variaciones -las de  $\underline{A}$  y las de  $\underline{E}$ - en los cambios experimentados por  $\underline{J}$ .

Pero lógicamente, la correlación entre  $\underline{J}$  y  $\underline{A}$  se revela con claridad en los coeficientes  $r_{JA(w)}$ , dada la dependencia de  $\underline{E}$  con respecto al viento. Para  $w$  constante, las variaciones de  $\underline{E}$  tienden a reducirse, y  $\underline{J}$  se ajustará en mayor grado a las modificaciones que experimente  $\underline{A}$ .

## XI.2. Zona rural

La persistencia de la correlación inversa campo-viento constituye probablemente el hecho más señalado de todas las observaciones efectuadas en la zona urbana (\*), hecho de cuya posible justificación nos ocupamos con detenimiento en el apartado XI.1.

La situación a ese respecto cambia por completo cuando se pasa a la zona rural, al faltar entonces tal correlación en los tres grupos en que se distribuyen las medidas realizadas en la misma.

Ahora bien, ese resultado, precisamente, suministra un argumento a favor de la interpretación antes dada relativa a la influencia del viento sobre la intensidad del campo. En la zona rural es muy escasa la contaminación atmosférica -prácticamente nula, si se compara con la que existe por término medio en la ciudad-, debiendo serlo asimismo, por consiguiente, la carga neta transportada por las correspondientes partículas en suspensión.

Podría considerarse, por otra parte, la carga originada

---

(\*) Recuérdese que dicha correlación sólo deja de manifestarse en el grupo III de los días perturbados.

por efecto electrodo, que el viento tiende a disipar. Las condiciones que posibilitan tal efecto son muy distintas, evidentemente, en esta estación de medida de la zona rural -débil intensidad del campo y placa receptora a ras de tierra- que en aquella de la Universidad, en la cual, por razones topográficas, el campo se mantiene elevado por regla general y la placa se halla sobre el techo de ladrillo de una caseta de la azotea.

Cabe pensar, sin embargo, en la aparición de una carga volumétrica de signo negativo en virtud del proceso siguiente:

Las sustancias radiactivas contenidas en el suelo hacen crecer la ionización del aire -con el consiguiente aumento de su conductividad- en la capa en contacto con él. En períodos de calma o de viento muy escaso, ello daría lugar a una acumulación de iones negativos en el límite superior de dicha capa, tendiéndose a una situación de equilibrio con  $J$  constante en altura (2).

Ha de tenerse presente, además, otro mecanismo generador de carga espacial, la fotosíntesis, capaz de producir oxígeno ionizado (37) (\*).

---

(\*) Nuestra estación de medida, situada en plena zona verde, linda por una parte con un extenso naranjal y por otra con campos de césped.

Es posible que uno u otro de esos procesos -o, a veces, ambos- hayan sido responsables de cierto número de observaciones que dieron valores negativos de  $\rho$ , acompañados con cierta frecuencia de inversiones de  $\vec{E}$  y  $\vec{J}$ . En aquellos casos de velocidad del viento relativamente elevada, habría que descartar la primera hipótesis del efecto electrodo generalizado.

Por lo que respecta a la correlación  $J-\Lambda$ , que se mantiene aquí como en la zona urbana -superándose incluso en el grupo III ( $R_{J\Lambda} = 0,941$ ) el máximo valor de 0,920 allí obtenido para el coeficiente en cuestión-, nos remitimos a las consideraciones hechas anteriormente (pág. 188) sobre el significado de la misma.

### XI.3. Medidas simultáneas de $\Lambda_+$

Al referirnos a las determinaciones de la conductividad polar  $\Lambda_+$  realizadas simultáneamente mediante dos procedimientos -aplicación de la ley de Ohm y empleo de la técnica de Gerdien- (pág. 146), señalamos las discrepancias encontradas entre los resultados respectivos, puestas de manifiesto cuando el aparato de Gerdien se hallaba en el interior de la caseta 1. En tal caso, los valores calculados a partir de la ley de Ohm ( $\Lambda_1$ ) eran

sistemáticamente más bajos que los obtenidos por el segundo método ( $\Lambda_2$ ), y, por otro lado, la correlación entre ambas series de valores, expresada por la fórmula

$$\Lambda_1 = a\Lambda_2 + b,$$

resultaba prácticamente nula; siendo  $R_{\Lambda_1 \Lambda_2} = 0,453$  para una dependencia de la forma

$$\Lambda_1 = m \Lambda_2^n.$$

Habida cuenta de lo anterior, hemos de llamar la atención sobre estos dos hechos: la relativa aleatoriedad entre los valores individuales de  $\Lambda_1$  y  $\Lambda_2$  en los dos tipos de medidas, y la circunstancia de ser apreciablemente menor la conductividad obtenida de la ley de Ohm (\*).

Se confirma así que es indispensable medir  $\underline{J}$  y  $\underline{\Lambda}$  en el mismo punto -o, en su defecto, en puntos suficientemente próximos- si se intenta relacionar entre sí ambas variables haciendo uso de la citada ley (3).

Y en cuanto a la inferioridad de  $\underline{\Lambda}_1$  con respecto a  $\underline{\Lambda}_2$ , creemos pueda atribuirse a la elevada magnitud de  $\underline{J}$  a causa de la

---

(\*) Recuérdese que  $\bar{\Lambda}_1 = 5,5 \cdot 10^{-15} \Omega^{-1} m^{-1}$ , y  $\bar{\Lambda}_2 = 7,1 \cdot 10^{-15} \Omega^{-1} m^{-1}$ .

ubicación de la placa receptora sobre el techo de la caseta; lo que origina, posiblemente, en las inmediaciones de dicha placa, un empobrecimiento del aire en iones positivos, dado que éstos son barridos rápidamente por la acción del fuerte campo.

Que esa desigualdad entre las dos conductividades no puede imputarse a la diversidad de los procedimientos de medida, lo prueban claramente los resultados de las determinaciones de  $\Lambda_2$  efectuadas sobre el mismo techo de la caseta 1, a corta distancia de la placa. Tales resultados apoyan también la conclusión anterior acerca de la necesidad de medir  $\underline{J}$  y  $\underline{\Lambda}$  en puntos muy próximos. En efecto, en esas condiciones se obtuvo una correlación elevada ( $R=0,850$ ) entre los valores individuales de  $\underline{\Lambda}_1$  y  $\underline{\Lambda}_2$ , y muy elevada ( $R = 0,952$ ) al considerar los valores medios de las series. La concordancia entre  $\bar{\Lambda}_1$  y  $\bar{\Lambda}_2$  es asimismo muy patente:

$$\bar{\Lambda}_1 = 4,64 \cdot 10^{-15} \Omega^{-1} \cdot m^{-1}, \quad \bar{\Lambda}_2 = 4,52 \cdot 10^{-15} \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$$

#### XI.4. Conductividad y contaminación

En el apartado X.9. se obtuvo la relación

$$M = \frac{6,84 \cdot 10^{-13}}{\Lambda_+} - 5,48 \cdot 10^{14} \Lambda_+ \text{ (}\mu\text{g/m}^3\text{)},$$

que expresa el contenido del aire en partículas en suspensión  $M$ , en términos de la conductividad polar  $\Lambda_+$ .

La deducción de la misma se basaba en la supuesta validez de ciertas condiciones generales -existencia de equilibrio iónico y cumplimiento de la ley de Junge-, dependiendo los coeficientes numéricos que en ella figuran de alguna otra hipótesis adicional -como el admitir que  $N_o = 3N-$ , y, naturalmente, de los valores asignados a los diversos parámetros que intervienen en su formulación.

Es muy dudoso que en el curso de todas nuestras medidas pudiera considerarse establecido el equilibrio iónico. Recordemos que buen número de ellas se vieron afectadas, en mayor o menor grado, por los gases y humos procedentes de las chimeneas de calefacción próximas. Dada la variabilidad temporal de tales influencias, cabe cuestionar asimismo la vigencia de la ley de distribución de Junge.

Y, por otra parte, teniendo en cuenta que ciertos investigadores proponen para  $\alpha$  valores diferentes del utilizado en dicha fórmula -aunque éste sea el que suele admitirse generalmen-

te- (\*), que  $N_o/N$  parece estar comprendido entre 3,0 y 2,1 (2), y que, en nuestro caso -dado el valor positivo de  $\rho^-$ , es probable que  $n_+/n_-$  sea superior a la unidad, no son de extrañar (\*\*) las discrepancias observadas entre  $M$  y  $M_R$  (tabla 15 III). El coeficiente de correlación entre ambas variables es sólo de 0,446.

En la citada fórmula {10}, el sustraendo del segundo miembro es muy pequeño comparado con el minuendo. Por ello se ha estudiado la correlación de  $M_R$  frente a  $1/\Lambda_+$ , encontrándose el valor de 0,488 para el correspondiente coeficiente, y una dependencia de la forma

$$\underline{M}_R = 8,59 + 281,44 \frac{1}{\Lambda_+}$$

Ya vimos cómo mediante el empleo de una fórmula empírica del tipo

$$M' = A \frac{1}{\Lambda_+} + B\Lambda_+,$$

era posible conseguir valores del grado de contaminación ( $M'$ )

(\*) Según Luhr y Bradbury,  $\alpha = 1,23 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ ; según Sayers,  $\alpha = 2,4 \cdot 10^{-6}$ , y para Nolan,  $\alpha = 1,4 \cdot 10^{-6}$  (2).

(\*\*) Aún prescindiendo de la incertidumbre de otros valores numéricos utilizados en la fórmula.



que se aproximaban más a los obtenidos experimentalmente ( $\bar{M}_R$ ). Los coeficientes respectivos  $R_{M_1 M_R}$  para tres versiones de la misma fueron, según se indicó,  $0,507$ ,  $0,625$  y  $0,957$ , coincidiendo además, prácticamente, en el primer caso los valores medios de las dos contaminaciones -calculada y medida-:

$$\bar{M} = 56,2 \mu\text{g}/\text{m}^3, \quad \bar{M}_R = 56,4 \mu\text{g}/\text{m}^3.$$

Creemos, pues, que nuestros resultados -no obstante sus evidentes limitaciones- confirman en líneas generales las conclusiones del trabajo de Manes (30).

#### XI.5. Registro continuo del potencial eléctrico del aire

Entre las variaciones de índole periódica que experimenta la intensidad del campo atmosférico en un cierto lugar, destaca sin duda la diurna (pág. 31). Cuando ésta se observa en estaciones de medias libres de influencias locales perturbadoras, el curso de la misma es el resultado, principalmente, de fenómenos eléctricos a escala global -la acción de las tormentas que se desarrollan simultáneamente en toda la tierra-, y, en consecuencia, se rige por el tiempo universal. Precisamente el estudio

de esa variación ha llevado a considerar a dicha actividad tormentosa como el proceso fundamental responsable del mantenimiento del campo terrestre (3), (6).

Pero si predominan por el contrario las citadas influencias locales, son ellas las que imponen sus características a la variación diurna observada; de manera que el análisis de ésta puede informarnos indirectamente acerca de la naturaleza, cuantía, evolución, etc., de tales influencias.

Recordemos que, en nuestro caso, los registros del potencial se hicieron en la estación de la Universidad, sometida a las condiciones de la zona urbana. Las acciones locales sobre dicho parámetro han de ser, pues, determinantes en buena medida de la forma a que se ajusta la citada variación.

Considerando la fig. 178, en la cual se representa el promedio de la variación diurna del potencial correspondiente a todos los días reseñados en el cuadro de la pág. 140, destacan en ella, indudablemente, el mínimo que se produce a las 4 h y el máximo que tiene lugar de 10 a 11 h, ambos muy acusados.

El descenso del potencial que se inicia a partir de ese máximo se anula a las 16 h, alcanzándose entonces un segundo mínimo mucho más alto que el anterior y escasamente señalado. Una hora después, aparece otro máximo cuyo valor apenas si dis-

crepa de este último mínimo; iniciándose luego un nuevo descenso algo escalonado.

En las figs. 3a y 3b (2) se dan ejemplos representativos de los dos tipos que presenta -según las condiciones- la variación diurna del campo en estaciones continentales: oscilación simple y doble, respectivamente. ¿Con cuál de ellos puede equipararse nuestra gráfica?

En realidad, sus características se resumen en un aumento bien definido del potencial entre el mínimo de las 4 y el máximo de las 10-11, y un descenso posterior del mismo más lento y fluctuante que la subida previa. Puede hablarse, así, de oscilación simple. Lo que sucede, sin embargo, es que aquí el máximo se alcanza mucho antes que en el caso de la fig. 3a. Al parecer, esta última curva corresponde al tipo más frecuente de oscilación simple. Pero también existen gráficas más parecidas a la obtenida por nosotros. La fig. 208 (3) confirma claramente ambos extremos.

Ya hemos aludido en varias ocasiones a la decisiva influencia que ejercen sobre el campo los cambios experimentados por la carga espacial, sea cualquiera el origen de los mismos. El marcado crecimiento de  $V$  a partir de las 4 de la madrugada es el resultado del aumento paralelo que sufre el contenido del

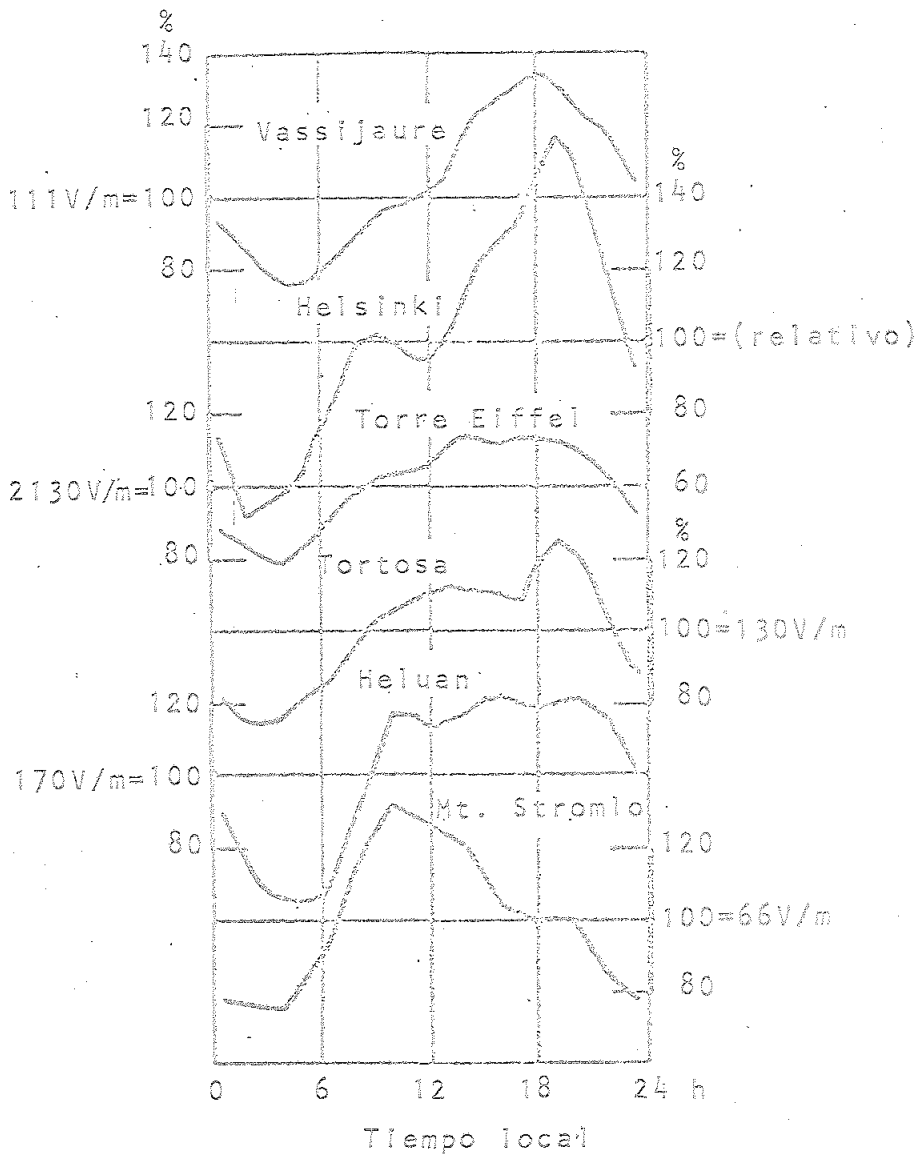


Figura 208

aire en partículas en suspensión -circulación de vehículos, humos domésticos, actividades industriales, etc.-. La citada carga responsable del efecto observado se originaría principalmente como consecuencia del descenso de la conductividad ligado a la formación de iones gruesos.

Pasadas las 10 o las 11, adquiere progresivamente más importancia un proceso disipativo debido a la convección térmica y a un aumento, en general, de la turbulencia atmosférica, que tiende a diluir la densidad numérica de tales partículas. Lo que se traduce en una disminución del campo (\*).

#### XI.6. Representaciones gráficas utilizando valores medios

En el apartado X.4. señalamos ciertas regularidades puestas de relieve al examinar -de forma individual o conjunta- algunas de las gráficas allí mencionadas.

El hecho repetidamente comprobado de la dependencia de ti-

---

(\*) Un análisis muy detallado de la variación diurna de  $E$  determinada por circunstancias locales puede verse en (3), pág.370.

Señalemos también, en particular, los trabajos de Kawano (38), (39).

po Inverso entre  $\underline{E}$  y  $\underline{w}$  se revela una vez más -según ya vimos- en las gráficas de las figs. 20 y 21. Sobre la posible justificación de semejante hecho, nada nuevo hay que añadir ahora a las consideraciones expuestas con anterioridad a ese respecto.

En un punto dado y en un cierto instante, los respectivos valores de  $\underline{J}$ ,  $\underline{E}$  y  $\underline{\Lambda}$  (\*) vienen ligados por la ley de Ohm,

$$\underline{J} = \underline{\Lambda} \underline{E},$$

que, suponiendo condiciones estacionarias - $\underline{J}$  independiente de la altitud-, puede escribirse asimismo de la forma

$$\underline{J} = \frac{\underline{V}}{\underline{R}}, \quad (16)$$

siendo  $\underline{V}$  el potencial de la electrosfera -considerada como una región equipotencial- y  $\underline{R}$  la resistencia de una columna vertical de aire de sección unidad comprendida entre dicha zona y la superficie terrestre (2), (3).

Combinando ambas expresiones se obtiene

$$\underline{E} = \frac{1}{\underline{\Lambda}} \frac{\underline{V}}{\underline{R}}. \quad (17)$$

---

(\*) En nuestro caso,  $\underline{\Lambda}_+$ .

De {16} se deduce inmediatamente que

$$\frac{dJ}{J} = \frac{dV}{V} - \frac{dR}{R}$$

Y, a partir de {17},

$$\frac{dE}{E} = \frac{dV}{V} - \frac{dR}{R} - \frac{d\Lambda}{\Lambda}$$

Como vemos, en el caso de que puedan despreciarse las variaciones de V, los cambios de J reflejan de modo exclusivo aquéllos que experimenta R; mientras que E se ve afectado además por las variaciones puramente locales de Λ (\*).

Pudiera ocurrir, por otra parte, que V y R variasen en sentidos opuestos de manera que sus incrementos relativos se compensaran entre sí. En esas circunstancias, J permanecería inalterada, y E sólo acusaría los cambios de Λ.

En condiciones cuasi-estáticas, es de esperar pues -en general-, una mayor variabilidad, tanto de Λ como de E, que de J. Eso es precisamente lo que parecen confirmar en cierta medida las gráficas respectivas de las figs. 22 y 23.

---

(\*) Admitiendo que todas esas variaciones sean cuasi-estáticas, es decir, suficientemente lentas comparadas con el tiempo de relajación del aire (3).

### XI.7. Medidas simultáneas del campo

Las determinaciones simultáneas de la intensidad del campo eléctrico mediante la instalación de la caseta 1, y del potencial del aire sobre la azotea de la Universidad en un punto a cierta distancia de dicha instalación, fueron hechas -según se indicó en X.8- al objeto de comprobar los resultados obtenidos, muchos años antes, por Duperier (28), así como por Duperier, Vidal y Collado (29).

Nuestras mediciones confirmaron efectivamente aquellos resultados, incluso para distancias de 150 m, y ello no obstante la diversidad de los procedimientos utilizados: determinación de la carga inducida sobre la placa receptora para la medida de  $E$ , y empleo de un colector radiactivo unido al electrómetro que permitía valorar  $V$  en el segundo punto.

Es de notar el hecho de que en obras sobre electricidad atmosférica que incluyen bibliografías tan abundantes, como los tratados clásicos de Chalmers (2) y de Israël (3), ignoren totalmente los trabajos citados. Deben existir, sin embargo, otras investigaciones específicas relativas a esa cuestión, que nosotros lamentamos no conocer. Pero es evidente que, en todo caso, la simultaneidad mencionada se da por supuesta de forma implícita cuando se utiliza el llamado "factor de reducción al plano"



para transformar en valores absolutos aquellas medidas de  $\underline{E}$  afectadas por la topografía de la estación de observación. Tal procedimiento es viable si en las inmediaciones de ésta existe una segunda estación libre de tales influencias. Su justificación lleva consigo, indudablemente, el admitir fluctuaciones paralelas y simultáneas de la intensidad del campo en ambas estaciones (\*).

Un estudio destinado al esclarecimiento de las causas de ese comportamiento exigiría, en principio, averiguar su dependencia con la distancia entre las dos estaciones, y asimismo la realización de observaciones -de  $\underline{E}$  y de  $\underline{p}$ - en altura. La investigación de semejantes problemas excedía de nuestras posibilidades, y, por consiguiente, carecemos de los elementos necesarios para explicar el origen de las regularidades tan marcadas que hemos tenido ocasión de comprobar.

---

(\*) Véase (3), pág.334.

## XII. CONCLUSIONES

Las cuatro primeras se refieren a las técnicas y sistemas de medida, y las siguientes a los resultados más relevantes.

1) Para la determinación de la intensidad del campo eléctrico  $E$  y de la densidad de corriente aire-tierra  $J$ , hemos montado una instalación, basada en la técnica propuesta por Chalmers (26), que nos ha permitido efectuar medidas discontinuas -y prácticamente simultáneas- de aquellas variables; la incorporación de un electrómetro de precisión; en lugar del electrómetro balístico utilizado por aquél, ha simplificado de manera apreciable la aplicación de la técnica.

2) A partir de las medidas de  $\underline{E}$  y  $\underline{J}$ , y haciendo uso de la ley de Ohm, es posible el cálculo de una de las conductividades polares -normalmente  $\underline{\Lambda}_+$ -. En nuestro caso, la mayor dificultad radica en la escasa precisión de las medidas de  $\underline{J}$ , lo que podría soslayarse utilizando para tales medidas una escala más sensible del electrómetro; ello impediría, sin embargo, la rapidez de las lecturas indispensables para el uso correcto del procedimiento.

3) Nueva mejora de la citada técnica supuso la adopción de un procedimiento de registro gráfico -utilizado en el grupo VI-, el cual, no sólo simplifica las medidas, sino que permite reducir el límite de error de  $\underline{J}$  y, por tanto, de  $\underline{\Lambda}$ .

4) Respecto a la medida de la densidad de carga volumétrica  $\rho$ , el sistema ideado por nosotros presenta dos ventajas en relación con el sistema clásico de la "jaula de Kelvin" -del que constituye una variante-: la primera es que, al producirse la admisión forzada del aire en el interior del cilindro, la medida no se ve influenciada por la velocidad del viento, y la segunda, que se consigue un apantallamiento total con respecto al campo exterior, ya que se utiliza chapa continua en lugar de una tela metálica.

También aquí hemos conseguido una mejora notable utilizando el sistema de registro gráfico.

5) Los valores de la intensidad del campo eléctrico obtenidos en la zona urbana de Sevilla, son bastante más elevados que el valor medio de dicho parámetro en las estaciones continentales (130 V/m)(\*). El promedio de todas nuestras observaciones es 12,2 veces superior a dicho valor.

Este aumento tan destacado de  $\underline{E}$  se explica, en primer lugar, por la topografía de la estación de medida, y, en segundo lugar, -y en cuantía muy inferior-, por la ubicación urbana de la estación.

Asimismo se ha determinado la curva de variación diurna del campo eléctrico y se ha comparado con las de comportamiento medio en estaciones continentales.

6) La media de las determinaciones de  $\underline{\Lambda}$  en la zona urbana es inferior al valor dado por Chalmers para las estaciones continentales (\*\*)(véase pág. 101). La relación entre ambas es de 0,27. Esto se explica, por una parte, como debido a la reducción que en la conductividad produce la contaminación del aire, y por otra, como consecuencia del efecto que consideramos en la conclusión siguiente.

---

(\*) (2), pág. 450.

(\*\*) Este último valor corresponde a la conductividad total  $\underline{\Lambda}_+$ .

7) Respecto de la densidad de corriente aire-tierra, y a causa de la elevada magnitud de  $\underline{E}$ , el valor medio de nuestras medidas es 2,8 veces mayor que el que aparece tabulado en el libro de Chalmers (pág. 450). La elevada densidad de corriente aire-tierra (\*) que incide sobre la placa receptora de la instalación urbana, origina, en nuestra opinión, un empobrecimiento de la concentración iónica del aire en el entorno de dicha placa, fenómeno que lleva consigo una reducción de los valores de la conductividad medida en las proximidades de la misma.

8) En cuanto a la densidad de carga volumétrica  $\underline{\rho}$ , en la citada tabla de Chalmers sólo se indica su orden de magnitud ( $10^{-11}$  C/m<sup>3</sup>). El valor promedio obtenido por nosotros en la estación urbana es de  $5,0 \cdot 10^{-11}$  C/m<sup>3</sup>.

9) Comparando de igual modo los promedios de las observaciones efectuadas en la zona rural con los valores correspondientes a las estaciones continentales, las relaciones respectivas son:

$$E_r/E_c = 0,71; \quad \Lambda_r/\Lambda_c = 0,55; \quad J_r/J_c = 0,23; \quad \rho_r/\rho_c = 0,14.$$

10) La dependencia de tipo inverso existente entre la intensidad del campo  $\underline{E}$  y la velocidad del viento  $\underline{w}$ , constituye un

---

(\*) Elevada, por supuesto, en términos relativos.

hecho de observación casi constante en la estación de medida urbana -sólo dejó de manifestarse en el subgrupo 11.2-.

Dicho efecto lo consideramos ligado fundamentalmente a la disminución de la concentración de carga volumétrica en la cúpula de aire contaminado situada sobre la ciudad; disminución que se producirá, por regla general, como consecuencia de un aumento de  $w$ . Por otra parte, la influencia de dicho aumento de  $w$  sobre la dilución de las propias partículas contaminantes, con el crecimiento consiguiente de la conductividad, ha de provocar, de modo indirecto, una reducción del campo.

11) Tanto en la zona urbana como en la rural, se ha encontrado, en varios grupos de medidas, una correlación directa entre  $\underline{J}$  y  $\underline{\Lambda}_+$ , lo que sugiere la existencia -en un lugar dado- de una mayor variabilidad de éste último parámetro con respecto a la que presenta la intensidad del campo.

12) Se ha estudiado -en la zona urbana- la simultaneidad de las fluctuaciones que experimenta el potencial eléctrico atmosférico en distintos puntos, comprobándose dicha simultaneidad hasta una distancia horizontal máxima de 150 m.

13) Por el contrario, la falta de correspondencia entre los

valores de la conductividad obtenidos en dos puntos próximos, confirma la necesidad de medir  $\underline{A}$  y  $\underline{E}$  en el mismo punto si se pretende determinar indirectamente  $\underline{J}$ , haciendo uso de la ley de Ohm (3).

14) En condiciones de equilibrio iónico y previo un estudio experimental adecuado, creemos -fundándonos en nuestras observaciones- que es posible valorar convenientemente el contenido del aire en partículas en suspensión a base de los datos suministrados por las medidas de conductividad, tal como se describe en el trabajo.

15) La influencia de la contaminación  $\underline{M}$  sobre  $\underline{E}$ , así como la dependencia que presenta  $\underline{M}$  frente a  $\underline{w}$ , sólo se ha manifestado claramente al ampliar a 40 min el intervalo durante el cual se efectuaba el correspondiente filtraje del aire destinado a la valoración de  $\underline{M}$ .

XIII. BIBLIOGRAFIA

- (1) B. F. J. Schonland: Atmospheric Electricity. Methuen & Co. Ltd., 1953.
- (2) J. A. Chalmers: Atmospheric Electricity. Pergamon Press, 1967.
- (3) H. Israël: Atmospheric Electricity, Vol. I, Vol. II. IPST, 1971, 1973.
- (4) R. H. Golde (ed.): Lightning, Volume 1: Physics of Lightning. Academic Press, 1977.
- (5) R. Markson: "Solar modulation of atmospheric electrification and possible implications for the Sun-weather relationship." Nature, 273, p. 103, 1978.



- (6) R. Markson and M. Muir: "Solar Wind Control of the Earth's Electric Field." Science, 208, p. 979, 1980.
- (7) J. V. Iribarne and H.-R. Cho: Atmospheric Physics. D. Reidel Publishing Company, 1980.
- (8) B. Schonland: The Flight of Thunderbolts. Clarendon Press, 1964.
- (9) R. Meador: Franklin - Revolutionary Scientist. Ann Arbor Science Publishers, Inc., 1975.
- (10) I. M. Inyanitov and E. V. Chubarina: Electricity of the Free Atmosphere. IPST, 1967.
- (11) D. C. Blanchard: "The Electrification of the Atmosphere from Bubbles in the Sea." Progress in Oceanography, Volume 1. Pergamon Press, 1963.
- (12) L. Wählin: "A Possible Origin of Atmospheric Electricity." Foundations of Physics, Vol. 3, No. 4, p. 459, 1973.
- (13) F. Martín: "Corrientes eléctricas verticales originadas por la acción de las puntas bajo nubes tormentosas, lluvia, etc." Servicio Meteorológico Nacional,

Serie A (Memorias), nº 15. Madrid, 1943.

- (14) C. Moreno: "Contribución al estudio de la electricidad atmosférica: El potencial eléctrico del aire y la corriente de descarga a través de una punta metálica conectada a tierra." Tesina. Universidad de Sevilla, 1962.
- (15) R. Romero: "Estudio de la descarga en corona en la atmósfera por medio de globos cautivos." Tesina. Universidad de Sevilla, 1963.
- (16) V. Hernández, J. Muñoz, M. Marín y L. Ternero: "Correlaciones entre el campo eléctrico del aire y otras variables atmosféricas." Anales de la Universidad Hispalense, Vol. XXIII, pág. 91, 1963.
- (17) M. Marín: "La descarga en corona en el cable de un globo cautivo en función de su altura, del campo eléctrico del aire y de la velocidad del viento." Tesina. Universidad de Sevilla, 1964.
- (18) V. Hernández y E. Fedriani: "La anomalía local del campo eléctrico atmosférico en Sevilla." Universidad de Sevilla, 1968.

- (19) J. Leal: "Estudio del campo eléctrico atmosférico en Sevilla: Influencia de la velocidad del viento y de la contaminación del aire." Tesina. Universidad de Sevilla, 1971.
- (20) M. Lozano: "Intensidad del campo eléctrico atmosférico, corriente aire-tierra y conductividad del aire en la zona urbana de Sevilla." Tesina. Universidad de Sevilla, 1972.
- (21) M<sup>a</sup> B. Arregui: "Medidas de electricidad atmosférica en una zona rural próxima a Sevilla." Tesina. Universidad de Sevilla, 1978.
- (22) B. Vonnegut: "Atmospheric Electrostatics." A. D. Moore (ed.): Electrostatics and its Applications. John Wiley & Sons, 1973.
- (23) S. W. Tromp: Medical Biometeorology. Weather, Climate and the Living Organism. Elsevier Publishing Company, 1963.
- (24) D. C. Blanchard: From Raindrops to Volcanoes. Adventures With Sea Surface Meteorology. Doubleday & Company, Inc., 1967.

- (25) D. J. Harris: "Electrical Effects of the Harmattan Dust Storms." Nature, 214, p. 585, 1967.  
D. J. Harris: "Atmospheric electric field measurements during the Harmattan dust haze in Northern Nigeria." S. C. Coroniti and J. Hughes (eds.): Planetary Electrodynamics, Volume 1, p. 39. Gordon and Breach, 1969.
- (26) J. A. Chalmers: "The measurement of the vertical electric current in the atmosphere." J. Atmosph. Terr. Phys., 24, p. 297, 1962.
- (27) Ph. Morse and H. Feshback: Methods of Theoretical Physics, Part II. McGraw-Hill, 1953.
- (28) A. Duperier: "Sobre las fluctuaciones del campo eléctrico terrestre." Publ. del Serv. Met. Esp., serie A, nº 2, 1932.
- (29) A. Duperier, J. M. Vidal y G. Collado: "Las fluctuaciones simultáneas del potencial eléctrico, de la conductibilidad y de la carga espacial del aire." Servicio Meteorológico Español, Serie A, núm. 8. Barcelona, 1938.
- (30) A. Manes: "Particulate Air Pollution Trends Deduced from Atmospheric Electrical Conductivity Measurements

- at Bet-Dagan (Israel)." H. Dolezalek and R. Reiter (eds.): Electrical Processes in Atmospheres. Steinkopff, 1977.
- (31) J. M. Vidal: "Conductibilidad eléctrica del aire." Servicio Meteorológico Nacional, Serie A (Memorias), núm. 17. Madrid, 1945.
- (32) Ch. E. Junge: Air Chemistry and Radioactivity. Academic Press, 1963.
- (33) E. Mathias et collaborateurs: Traité d'électricité atmosphérique et tellurique. Les Presses Universitaires de France, 1924.
- (34) A. I. I. Ette: "An Effect of Space Charge Advection on Vertical Air-Earth Current Measurements." Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie A, Vol. 21, No. 2 - 3, p. 329, 1972.
- (35) S. C. Coroniti (ed.): Problems of Atmospheric and Space Electricity. Elsevier Publishing Company, 1965.
- (36) W. C. A. Hutchinson: "Electric space charge within 20 meters of the ground." S. C. Coroniti and J. Hughes (eds.): Planetary Electrodynamics, Volume 1, p. 25.



Gordon and Breach, 1969.

W. A. Hoppel: "Electrode effect: comparison of theory and measurement." S. C. Coroniti and J. Hughes (eds.): Planetary Electrodynamics, Volume 2, p. 167. Gordon and Breach, 1969.

- (37) G. R. Raeger et collaborateurs: Problèmes d'ionisation et d'aéro-ionisation. Maloine S. A. Éditeur, 1975.
- (38) M. Kawano: "The Coefficient of Eddy Diffusivity Estimated by the Method of Atmospheric Electricity." Journ. Met. Soc. Japan, Vol. 35, No 6, p. 29, 1957.
- (39) M. Kawano: "The Local Anomaly of the Diurnal Variation of the Atmospheric Electric Field." L. G. Smith (ed.): Recent Advances in Atmospheric Electricity, p. 161. Pergamon Press, 1958.
-

A P E N D I C E S

## I. FUNDAMENTO DEL APARATO DE GERDIEN

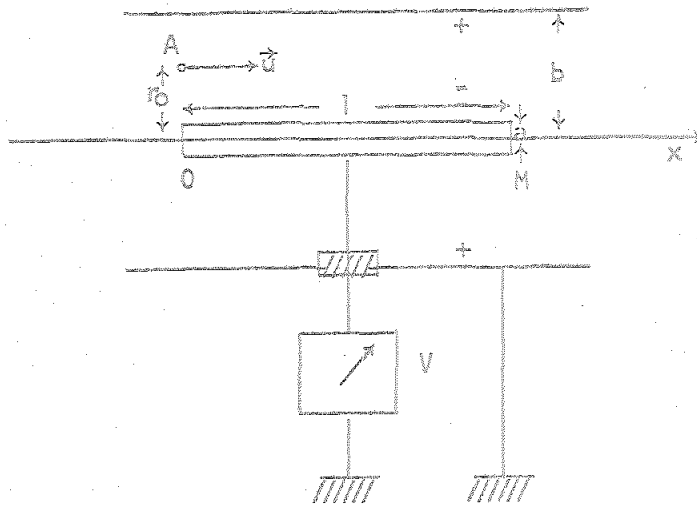
Se trata en esencia de un condensador cilíndrico. En el esquema de la fig. 1-1 se representan, en sección meridiana, el cilindro de radio  $b$  y la varilla coaxial de radio  $a$  y longitud  $l$ , conectada a un electrómetro (\*), que constituyen sus dos armaduras.

Si, en el instante  $t$ , el ión  $A$  de la figura se encuentra en el punto de abscisa  $x$ , a la distancia  $r$  del eje, sus coordenadas en el instante  $t + dt$  vendrán dadas, respectivamente, por  $x + dx$  y  $r + dr$ , siendo

---

(\*) Entre el cilindro y la varilla se establece inicialmente una tensión  $V_0$ , que da lugar -en el caso considerado- a un campo eléctrico entre ambas armaduras dirigido hacia el eje.





$$dv = u dt,$$

$$dr = -k_+ E dt,$$

donde  $k_+$  es la movilidad de los iones positivos, y  $E$  la intensidad del campo en el punto en cuestión.

Es decir,

$$dr = \frac{k_+ E}{u} dx.$$

Teniendo en cuenta que

$$E = \frac{1}{r} \frac{V}{\ln \frac{b}{a}} \quad (*),$$

(\*) Llamando  $V$  a la tensión del condensador en ese instante.

resulta:

$$r \, dr = - \frac{k_+}{u} \frac{V}{\ln \frac{b}{a}} \, dx.$$

Y si suponemos que el ión A incide sobre la varilla en el extremo M de la misma, será:

$$\int_b^a r \, dr = - \frac{k_+ V}{u \ln \frac{b}{a}} \int_0^b dx,$$

$$r_0^2 - a^2 = \frac{2 k_+ V}{u \ln \frac{b}{a}} l. \quad \{1-1\}$$

Fórmula que nos da la máxima distancia al eje r<sub>0</sub> a que puede encontrarse un ión al pasar frente a 0, para ser captado por dicha varilla.

Por consiguiente, el número de iones positivos de densidad numérica n<sub>+</sub> captados en dt, vale

$$\pi(r_0^2 - a^2) u dt \cdot n_+,$$

y la carga transportable por ellos,

$$\pi(r_0^2 - a^2) u dt \cdot n_+ e \quad (*)$$

(\*) e = 1,6 · 10<sup>-19</sup> c.

Esa carga da lugar a una disminución  $dV$  de la tensión del condensador, de manera que

$$\pi(r_0^2 - a^2) u n_+ e dt = -C_1 dV, \quad (2-1)$$

siendo  $C_1$  la capacidad del conjunto condensador-electrómetro.

Combinando (1-1) y (2-1), se obtiene:

$$\pi \frac{2k_+ V l}{\ln \frac{b}{a}} n_+ e dt = C_1 dV.$$

Pero la capacidad del condensador es

$$C = \frac{2\pi \epsilon_0 l}{\ln \frac{b}{a}} \quad (*),$$

y la conductividad debida a los iones positivos,

$$\Lambda_+ = k_+ n_+ e.$$

Así, pues,

$$\frac{\Lambda_+}{\epsilon_0} dt = - \frac{C_1}{C} \frac{dV}{V}.$$

---

(\*)  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  F/m.

Y recordando que el valor inicial de  $\underline{V}$  era  $\underline{V}_0$ , la integración de esta expresión nos conduce finalmente a la fórmula

$$\Delta t = \epsilon_0 \frac{C_1}{C} \frac{1}{\Delta t} \ln \frac{V_0}{V},$$

en la que  $\Delta t$  representa el intervalo durante el cual la tensión disminuye desde  $\underline{V}_0$  a  $\underline{V}$ .

## II. DETERMINACION DE LA CAPACIDAD $C$

Hemos utilizado dos procedimientos para la medida de la capacidad  $C$  del sistema destinado a la determinación del campo  $E$  y de la corriente aire-tierra  $J$ , cuyo fundamento teórico fue descrito en el Apartado V. En el primero, se crea sobre la placa un campo eléctrico artificial mediante una lámina paralela a la misma, situada sobre ella a una distancia  $d$ , que va unida al polo positivo de una batería de tensión  $U$ . Si es  $V$  la indicación del electrómetro unido a la placa en tales condiciones y  $Q$  la carga que recibe dicho instrumento, se tiene, evidentemente, que

$$C = \frac{Q}{V}, \quad \{1-11\}$$

donde  $C$  es la capacidad del conjunto placa-electrómetro que tratamos de hallar.

Por otra parte,

$$Q = \sigma S = \epsilon_0 \frac{U}{d} S, \quad \{2-II\}$$

siendo  $\sigma$  el valor absoluto de la densidad de carga adquirida por la placa, de superficie  $S$ .

Combinando {1-II} y {2-II} se obtiene finalmente la expresión

$$C = \epsilon_0 \frac{S}{d} \frac{U}{V},$$

que nos permite el cálculo inmediato de la capacidad en cuestión.

El empleo del segundo procedimiento nos da  $C$  en función de la capacidad  $C'$  -conocida- de un condensador que se monta en paralelo con el electrómetro. Es decir, utilizando el mismo montaje anterior, sea  $V'$  la lectura del electrómetro una vez conectado ese condensador. En tal caso,

$$C + C' = \frac{Q}{V'}$$

Eliminando  $Q$  entre esta última expresión y {1-II}, resulta

$$\frac{C}{C + C'} = \frac{V'}{V}$$

de donde,

$$C = C' \frac{V'}{V - V'}$$

Los resultados obtenidos utilizando los procedimientos anteriores fueron comprobados posteriormente por medida directa con un Puente Universal Hewlett-Packard 4265B.

UNIVERSIDAD DE SEVILLA  
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS

Reunido el Tribunal integrado por los abajo firmantes  
el día de la fecha, para juzgar la Tesis Doctoral de  
D. Juan Real Galbis  
título: "Determinación y estudio de algunas va-  
riables de Electricidad Atmosférica en Sevi-  
lla."

Se acordó otorgarle la calificación de Sobresaliente cum laude

Sevilla, 10 de noviembre 1.980  
El Vocal, El Vocal, El Vocal,



Presidente,



El Secretario,



El Doctorado,

