



El Relámpago sobre el Río Catatumbo: un fenómeno de Plasmas Atmosféricos



Nelson Falcón (UC-Venezuela IAC-España)

Falcon, et al “Modelo Electroatmósferico del Relámpago sobre el Río Catatumbo”. *Ciencia* 2000, 8, 2,155-167. *Sci. J. From Exp. Faculty of Sc “Microfísica del Relámpago del Catatumbo” Ingeniería UC* 2000, 7, 1, 47-53. The Catatumbo lightning *Sci. Am* Submitting.



Parque Nacional "Ciénagas de Juan Manuel"





OBSERVACIONES HISTÓRICAS

- **1597.** Lope de Vega ⤵ poema épico *La Dragoneta*.
- **1799.** Alexander von Humboldt
“explosiones eléctricas que son como fulgores fosforescentes...”
- **1841.** Agustín Codazzi: “como un relámpago continuado” para casi todas las noches del año, incluso en el período de sequía”.
- **1911.** Centeno-Grau: “El fenómeno es más claro y visible en épocas de sequía...” (Enero-Abril y Julio-October) causado por tormentas eléctricas permanentes y fuentes geotermales, magnéticas o radiactivas.

OBSERVACIONES HISTÓRICAS

■ **1966 y 1970.** Zavrostky (Expediciones Sta. Barbara y cuenca del río Escalante):

“...se perfilan con cierta precisión varios epicentros dentro del área de la Gran Ciénaga al Oeste del Lago”.

■ **1987.** Sabino y Zavrostky (ULA, 4 Expedición, Mayo de 1987):
Confirma varios epicentros hacia la Gran Ciénaga”producido por una tormenta permanente inducida por acumulación de sustancias radioactivas en el subsuelo y frentes fríos en el abra de San Antonio ”

Fenomenología

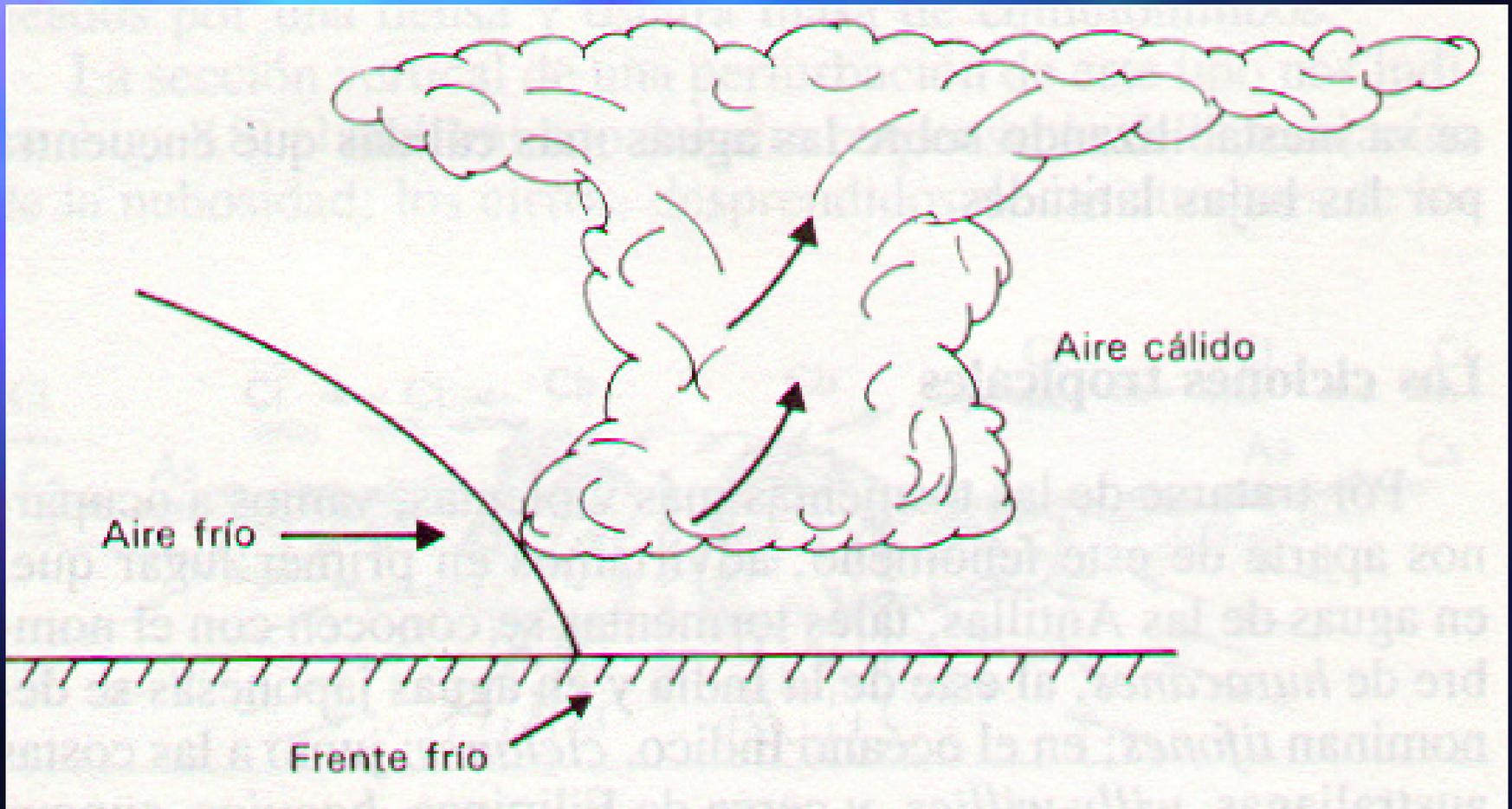
- 1. Se presenta en dos regiones bien localizadas.**
- 2. Continuo resplandor fosforescente (relámpago) en zonas localizadas del cielo, durante toda la noche..**
- 3. El fenómeno se visualiza después de la desaparición de la luz cenital, nunca durante el día.**
- 4. La visibilidad varia según la pluviosidad: mayormente en verano y cesa luego de precipitaciones.**
- 5. Nivel queráunico nulo.**



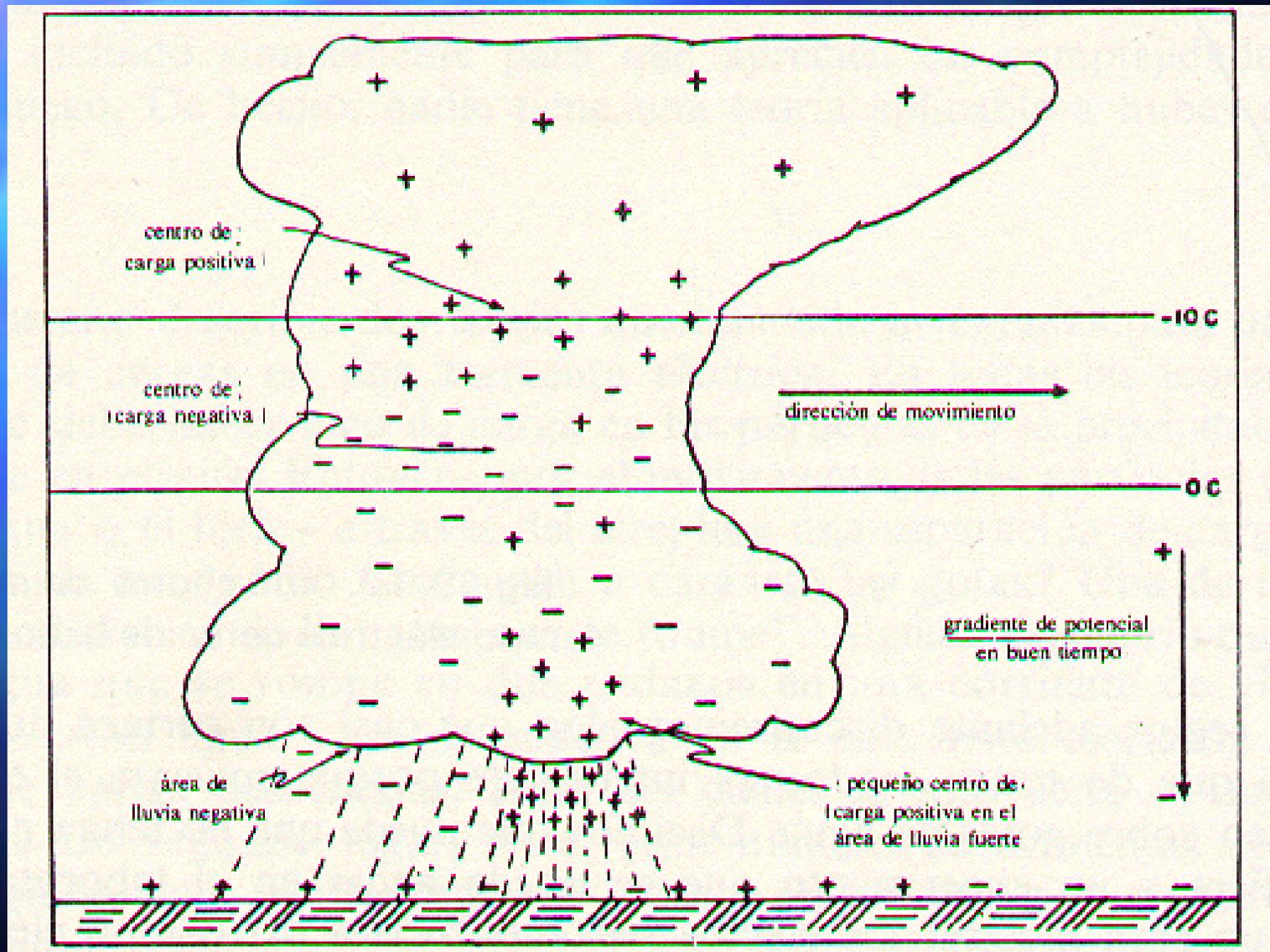
Los Yupas y los Wayuu, lo atribuyen a la presencia del espíritu de los guajiros (Jepira en lengua wayuu) los cuales resplandecen por los yoluja o almas de los muertos.

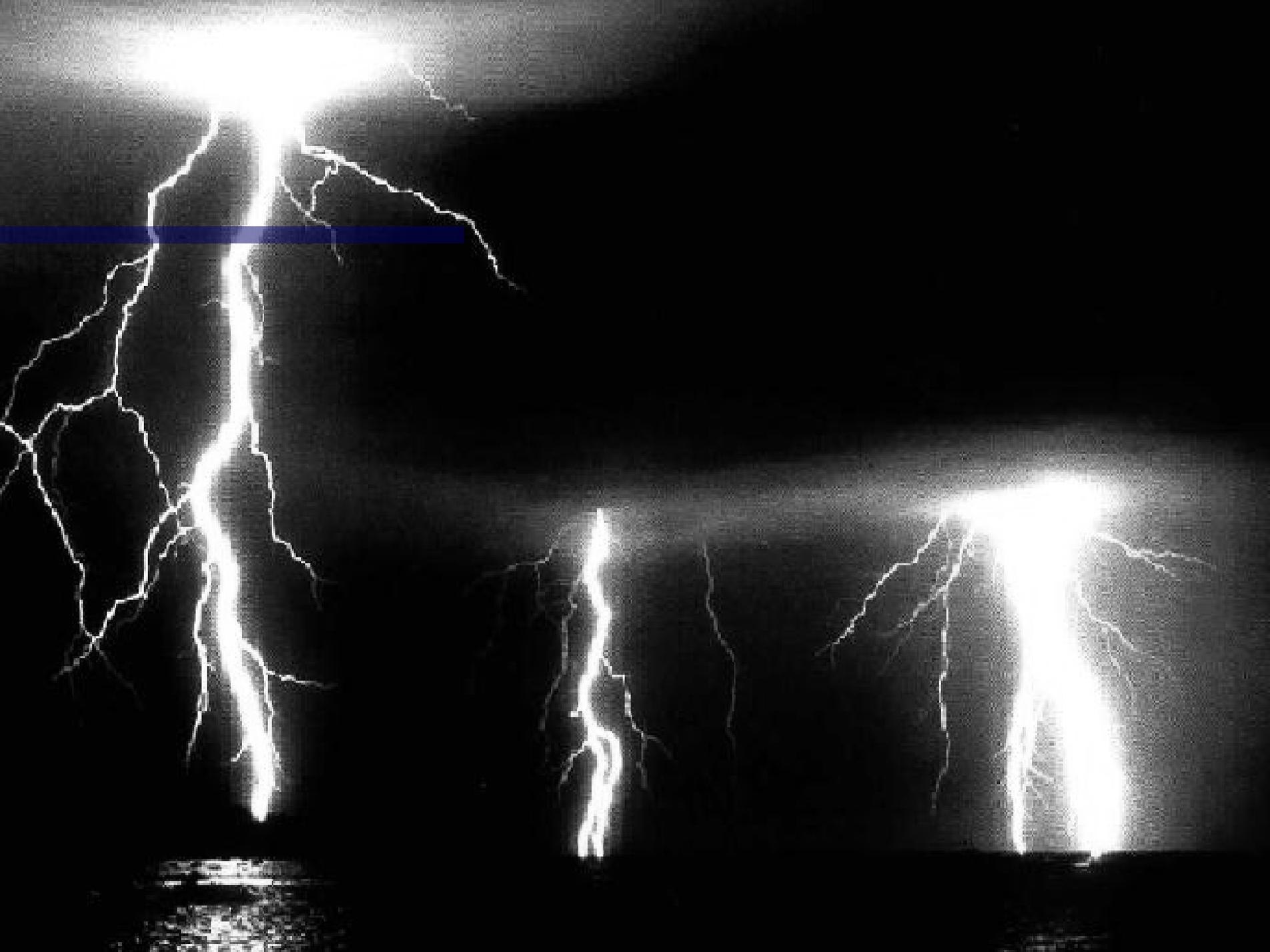


Mecanismos Clásicos

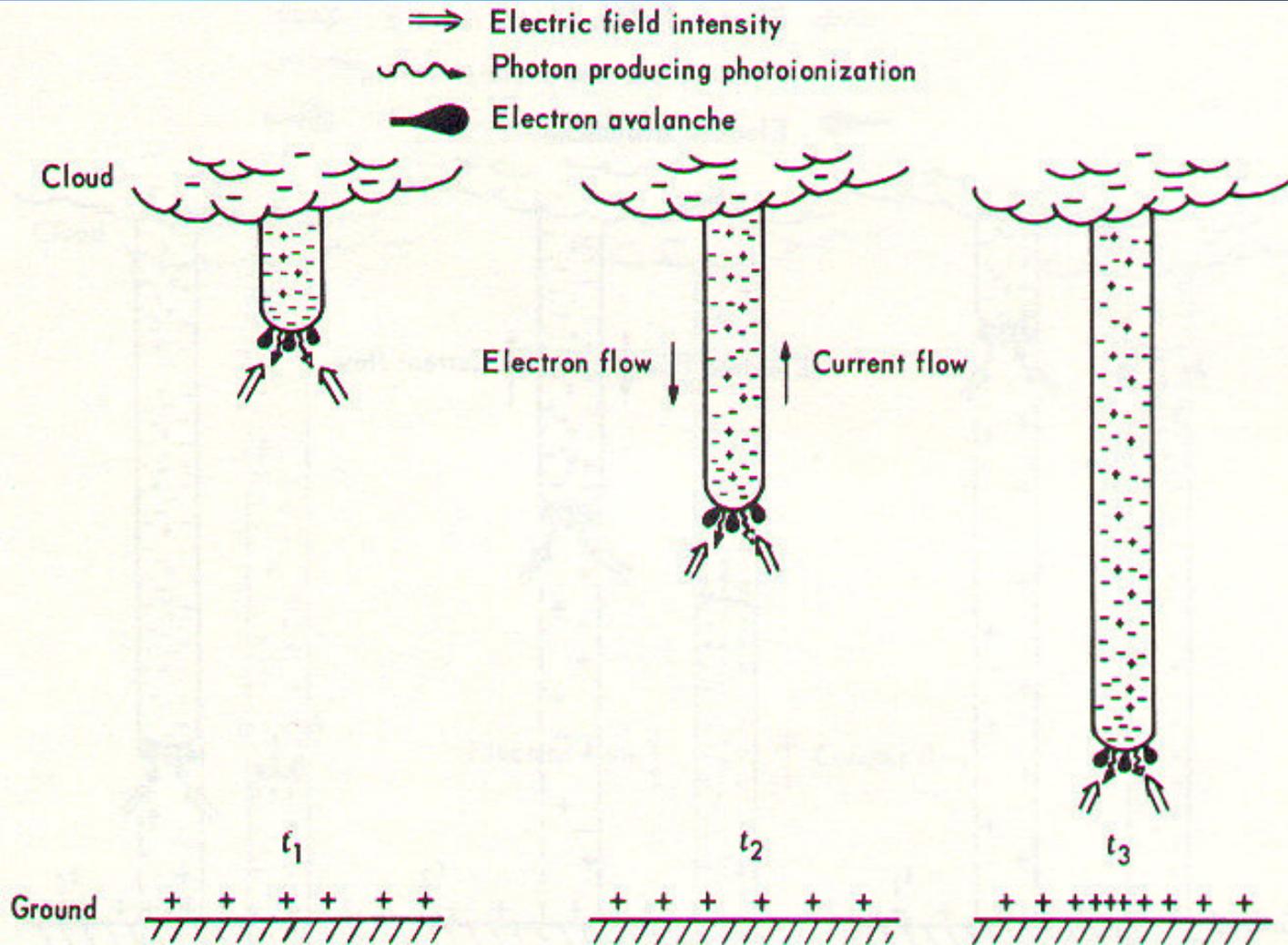


Mecanismos Clásicos

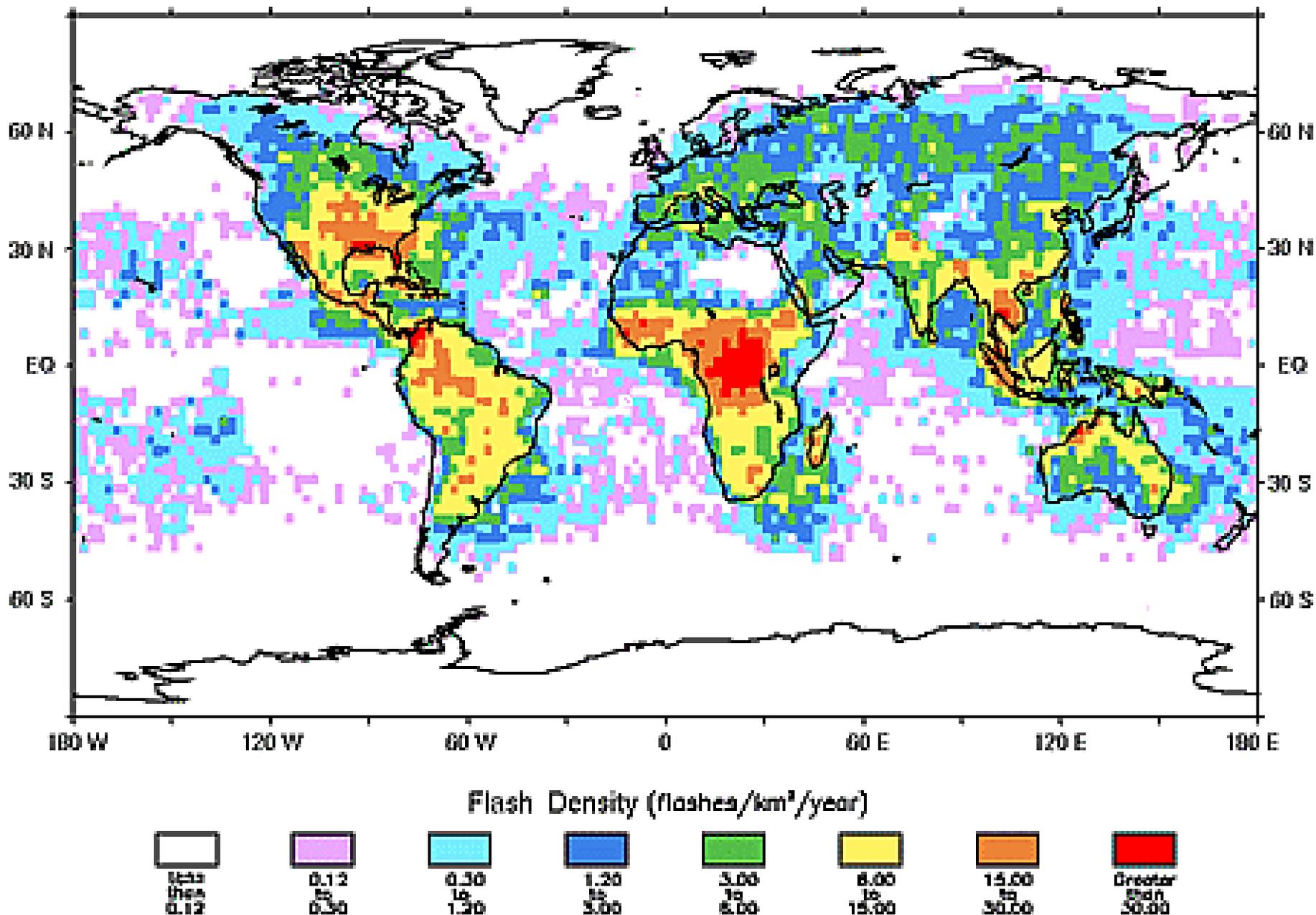




Mecanismos Clásicos



OTD Lightning Observations for September 1995 through August 1996



Observaciones 1998-2000

Puntos de observación:

- “Los Encontrados” (río Catatumbo) ($09^{\circ}03,89'N$ $72^{\circ}14,14' W$ 440 msnm)
- “Punta Chamita” (delta al sur del Lago de Maracaibo) ($09^{\circ}05,77' N$ $71^{\circ}42,88' W$ 196 msnm)
- la laguna La Negra ($09^{\circ}14'13'' N$ $72^{\circ}06'33 W$ 36 msnm)
- las orillas del río Bravo ($09^{\circ}14'15'' N$ $72^{\circ}06'31'' W$ 41 msnm)



Más intenso durante la sequía.

Visibilidad entre 19 y 04 HLV. Dependencia del observador.

Indetectable por satélites (“Optical transient Detector”).

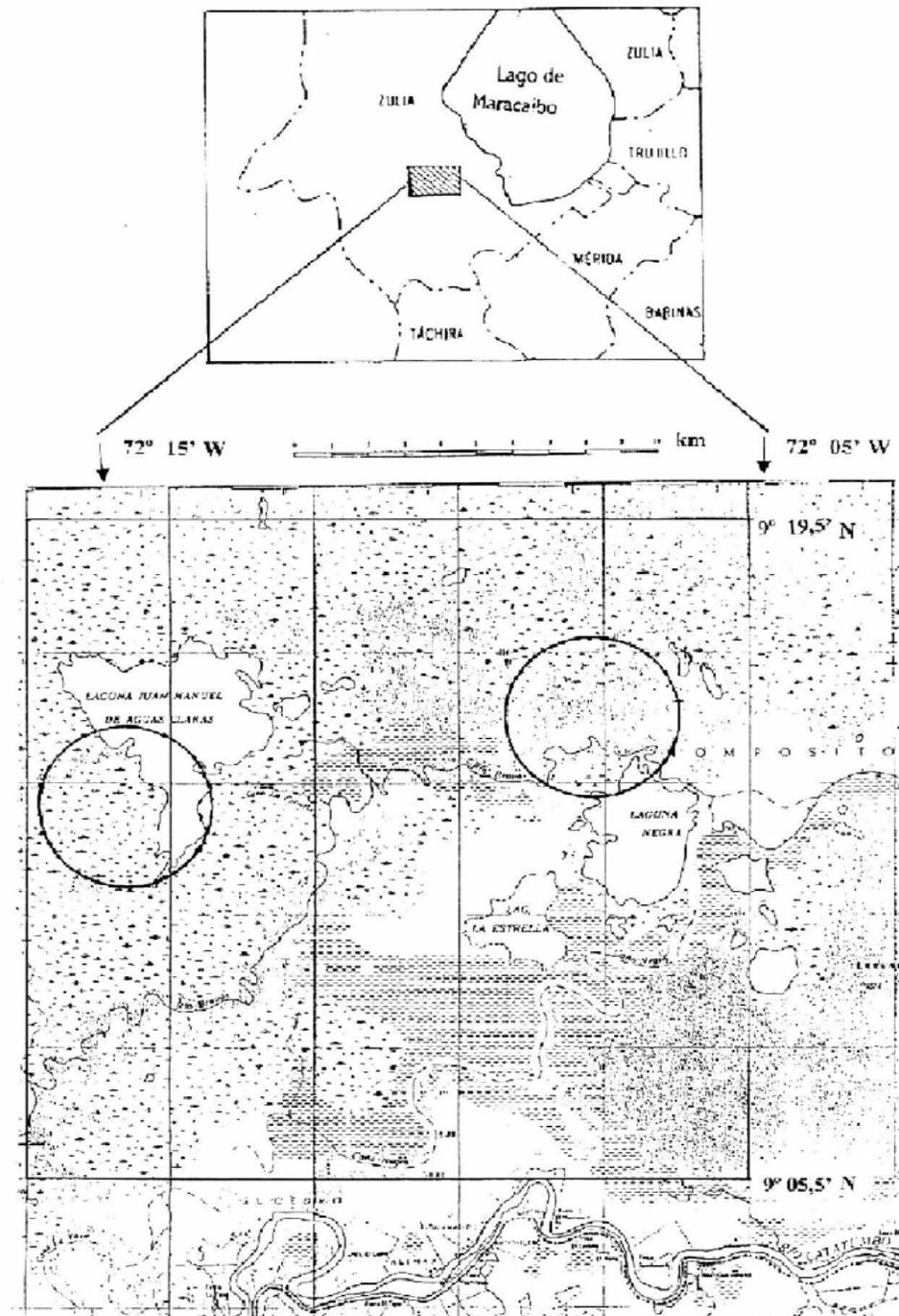


$\langle T \rangle$ entre 16 y 40 descargas/minutos

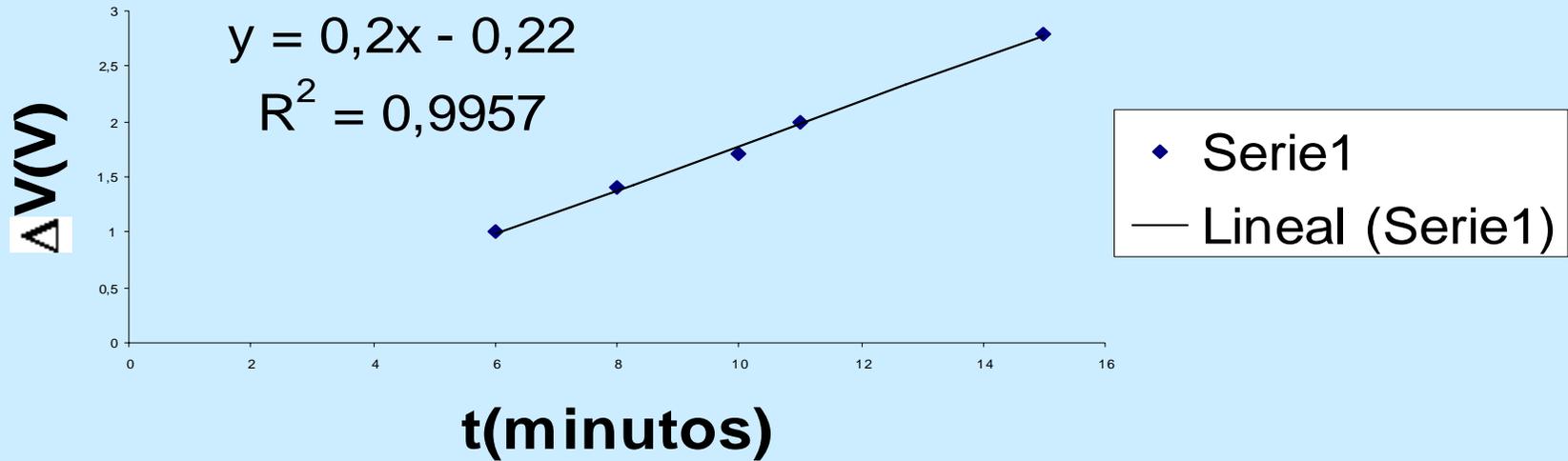
\Rightarrow oscilación rápida, transporte nulo de partículas.



Episcentros



Variación del Potencial Eléctrico Atmosférico



Actividad eléctrica atmosférica

($0,015 \mu\text{C}$, $t = 900 \text{ s} \Rightarrow dV/dt \approx 0,33 \text{ V/s}$).

T > entre 16 y 40 descargas/minutos

\Rightarrow oscilación rápida, transporte nulo de partículas



Nivel queráunico nulo

⇒ descargas internas a la nube

Descargas sin moda característica

⇒ origen estocástico.

Descargas tipo Townsend .



**Totalidad de las
descargas en el interior
de las nubes.**

**Fluorescencia y
descargas típicas de
gas rico en H II.**





Descargas nube-nube y su relativo confinamiento
(sin extensas formaciones nubosas)

⇒ no es típica tormenta eléctrica.

Ausencia de descargas nube-tierra y tierra-nube



⇒ descarta fuentes geomagnéticas y radiactivas.

Carencia de anomalías magnéticas

No existen fuentes geotermales (fumarolas, géiser o temperaturas anormalmente altas en las aguas de las lagunas).

⇒ descarta fuentes geotermales en el substrato.

Discusión de Observaciones

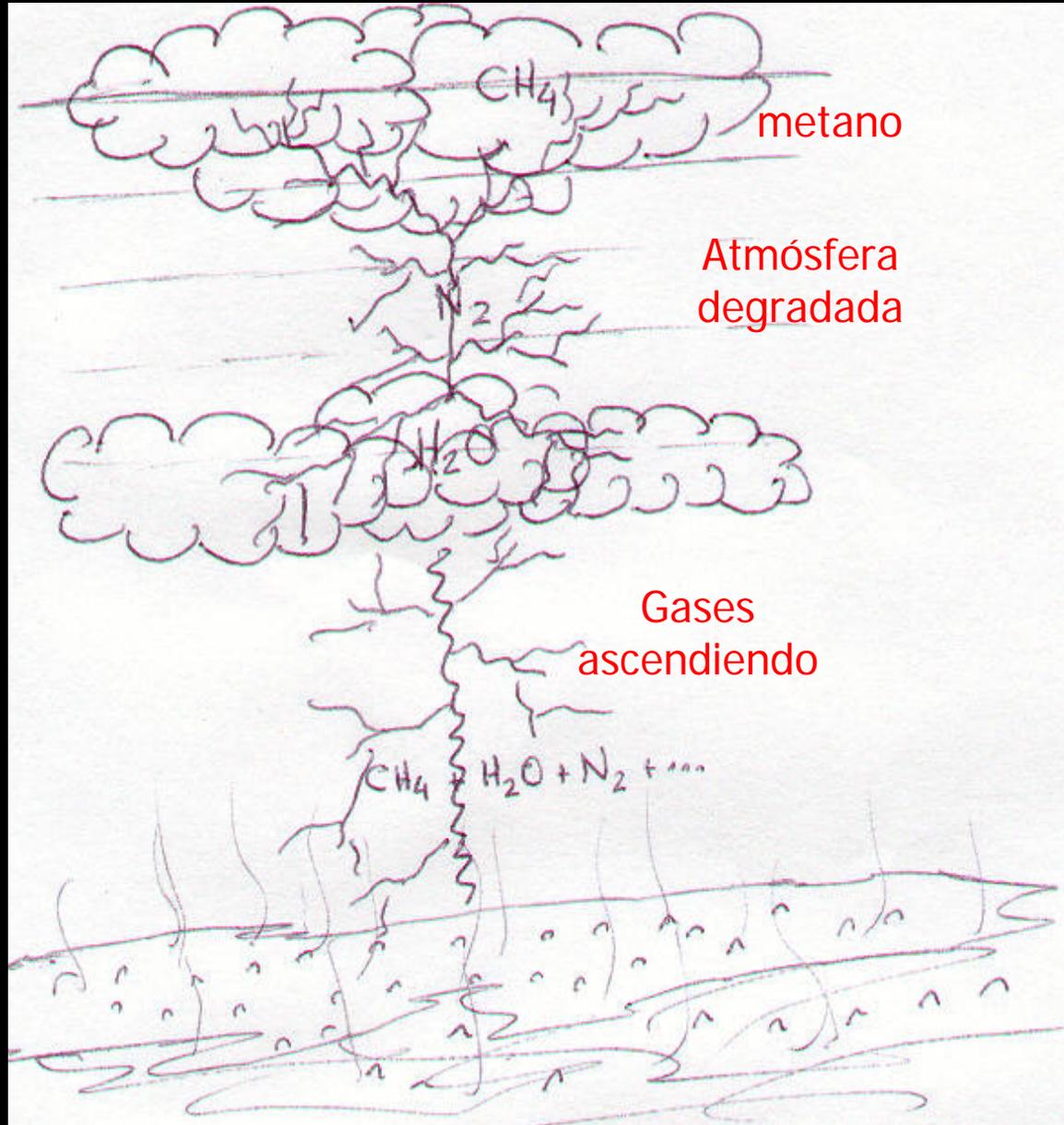
1. Se presenta en dos regiones bien localizadas, al interior de las Ciénagas, y no sobre el Catatumbo. Ello sugiere a los gases de los pantanos como agentes causales.
2. Es un fenómeno nube-nube. Descarta las fuentes geomagnéticas, geotermales o radioactivas como agentes causales.
3. Posee carácter inaudible debido a que el fenómeno ocurre a gran altura, formándose una onda cónica y amortiguándose el sonido dentro de la nube.
4. No parece originarse como una tormenta eléctrica común: la coloración, la aparición únicamente nocturna, la relación con la humedad y la pluviosidad no concuerdan con tal modelo.

Fenomenología en las Ciénagas de Juan Manuel

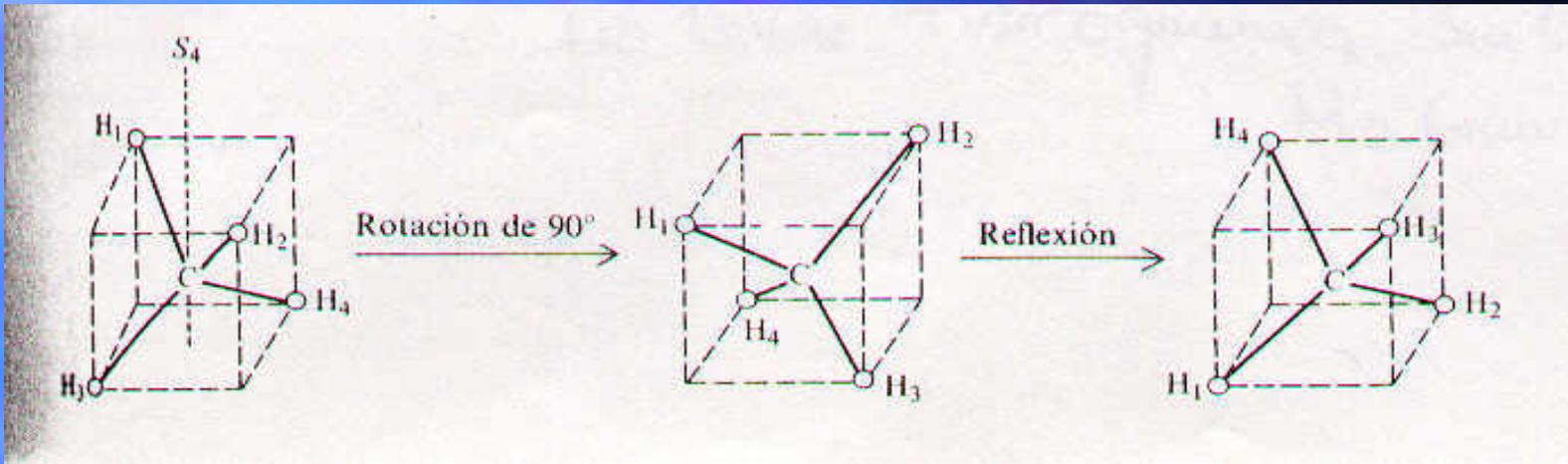
Pantanos (300.000 Hectáreas) \Rightarrow CH_4

- Abundancia mayor verano Insoluble en agua
 \rightarrow se eleva encima de nubes de H_2O .
- Incrementa actividad luego del ocaso
 \leftrightarrow ausencia de irradiancia evita fotodisociación
- Color y espectroscopía \rightarrow $\text{H}\alpha$ (121,57 nm).
- CH_4 $\sigma = 18 \text{ Mbn}$, (H_2O 14, N_2 $6 \cdot 10^{-5}$ O_2 $9 \cdot 10^{-3}$)
 \leftrightarrow Fluorescencia
- Relámpago \rightarrow estados metaestables CH_4 , CH_3

Modelo Microfísico



Simetría del Metano



Estados metaestables ~ Δt **descarga difusa** (relámpago) ~ [ns, ms]

- Gradiente barotrópico atmosférico \mapsto **condensación cristales tetraédricos**.
- Simetría T_d \mapsto **piroeléctricidad**. (Landau, 1981).

\mapsto autopolarización \mapsto **descargas (rayos)**

$$D_i = D_{oi} + \varepsilon_{ik} E_k$$

- Importante en fenómenos oceanográficos (Suess et al, 1999).

Modelo Microfísico

1. Modelamos el gas en la aproximación de Lorent de Electrones-Molécula (Marr, G. 1967, Spitzer, Jr. 1969)

$$\text{Log}_{10} \left| \frac{x^2}{1-x^2} P \right| \cong -5040 \frac{V}{T} + \frac{5}{2} \text{Log}_{10} T - 6.5$$

2. El desplazamiento eléctrico como (Landau, L.; Lifshitz, E. 1981)

$$D_i = D_{oi} + \varepsilon_{ik} E_k$$

3. Se considera el gas en equilibrio hidrostático y un modelo lineal para la tropósfera (Rogger, 1977)

- Ubicación del Epicentro y **altura de la columna de gas.**

Angulo de elevación $6^\circ \pm 0,01^\circ \rightarrow$ distancia al epicentro:

$$d = h / \operatorname{tg} \alpha \approx 24.km \quad (1)$$

Las descargas ocurren entre capas de nubes separadas $9^\circ \pm 0,01$

$$\Delta h = d \operatorname{tg}(9^\circ) \cong 3,8km \quad (2)$$

- Presión y Temperatura atmosférica modelo lineal de la troposfera:

$$P = P_0 \operatorname{Exp}(-0116h) \quad (3)$$

$$P_1 = 75,6 \text{ kPa} \quad P_2 = 48,1 \text{ kPa} \quad (4)$$

$h = 41 \text{ m snm} \rightarrow 31^\circ\text{C}$ decrece como $\Gamma \approx -1^\circ\text{C}/100\text{m}$, tenemos:

$$T_1 = 6^\circ\text{C} \quad T_2 = -33^\circ\text{C} \quad (5)$$

Velocidad cuadrática media de las partículas

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3k}{2m} T} \quad (6)$$

Bajo equilibrio térmico depende de la masa de las partículas

$$\left| \frac{\bar{v}_{CH_4}}{\bar{v}_{H_2O}} \right| \approx \sqrt{\frac{m_{H_2O}}{m_{CH_4}}} \approx 1,1 \quad \left| \frac{\bar{v}_{CH_4}}{\bar{v}_{H_2O}} \right| \approx \sqrt{\frac{m_{aire}}{m_{CH_4}}} \approx 1,4 \quad (7)$$

La movilidad de las moléculas de metano es mayor que las otras.

• **Factor de ionización del metano** (Howtson, 1970)

$$\log_{10} \left| \frac{x^2}{1-x^2} P \right| \cong -5040 \frac{V}{T} + \frac{5}{2} \log_{10} T - 6.5 \quad \rightarrow x = 58\%. \quad (8)$$

Temperatura del plasma electrónico

El metano está confinado por el equilibrio hidrodinámico pero no alcanza su equilibrio térmico.

Descarga → ionización del material y la energía liberada incrementa la temperatura de canal.

$\Delta H = 104 \text{ kcal/mol}$ → temperatura del gas electrónico:

$$T_e = \frac{2}{3k} \Delta H \approx 35.000 K \quad (9)$$

Velocidad y tiempo de vida de los portadores

Los electrones libres, generados por ionización y colisiones tendrían velocidad promedio superior a las moléculas de la nube, de (6) y (9) se sigue que:

$$\overline{v_e} \cong 890 \text{ km/s} = 0,003c \quad (10)$$

supersónica y no relativista (tipo Townsend).

(a) **Densidad de corriente**, para concentración del 30% de metano en la nube .

$$\approx 5,1 \cdot 10^{11} \text{ A/cm}^2 \quad (12)$$

(b) Diferencia de potencial y Campo Eléctrico local (**E**).

E del orden del campo eléctrico atmosférico: 100 V/m (Feymann et al; 1985),

$$\Delta V = E \Delta h \approx 220 \text{ kV} \quad (13)$$

Para una descarga máxima, la intensidad de corriente es del orden de 130 MA (rayo típico de 1 cm con diámetro en el canal de descarga).

La resistividad eléctrica del canal (rayo) en la descarga alcanza $3,3 \cdot 10^{-11} \Omega/\text{m}$

Carga total y Número de portadores por rayo.

La velocidad de la propagación de una descarga (rayo) es mayor que la velocidad de los portadores, $c/3$ (Golde, 1984) por lo cual la duración de la descarga es

$$t \cong \frac{\Delta h}{c/3} \approx 0,4 \mu\text{s} \quad (14)$$

del Orden de magnitud del τ del plasma electrónico en gases ionizados

- .. Plasma electrónico $\tau \sim 0,9 \mu\text{s}$ (Delcroix, 1969) lapso al cabo del cual el plasma se enfría y la descarga se detiene.
- .. La intermitencia es inherente al tiempo de relajación de T del plasma.
- .. Por otra parte $Q \approx 52$ coulombios y el número de portadores de carga

$$n = \frac{Q}{e} = \frac{It}{e} \approx 3 \cdot 10^{20} \quad (15)$$

- .. $P = 3 \cdot 10^{13}$ W. Si la descarga es máxima, el tiempo de transito es del orden de $\frac{1}{2} \mu\text{s}$ y la energía liberada alcanza 1 MJ.

La concentración de portadores (15) y la temperatura electrónica (9) **$\log n = 20,5$ y $\log T_e = 4,5$** , corresponden a descarga gaseosa fuerte (gas de Lorentz de electrones-moléculas; Delcroix, 1969).

Para estos valores la interacción electrón-ión y electrón-molécula puede ser despreciada, y es **tipo Townsend** o automantenida.

Características Físicas de las Descargas

Máxima separación entre nubes $\Delta h = 3,8 \text{ km} \pm 0,1$	Temperatura del Plasma Electrónico $T_e \approx 35 \text{ 000 K}$
Camino libre medio de las partículas $l \approx 410^{-7} \text{ m}$	Tiempo de vida portadores de carga $\tau \approx 51 \text{ ns}$
Número de portadores $n \approx 3 \text{ } 10^{20} \text{ partículas}$	Duración de la descarga (rayo) $\tau \approx 0,4 \text{ } \mu\text{s}$
Velocidad media de los portadores $\langle V_e \rangle \approx 891 \text{ km/s}$	Densidad de Corriente $J = 10^{11} \text{ A/cm}^2$
Intensidad de corriente $I_{\text{max}} \approx 130 \text{ MA}$	Máxima diferencia de potencial $V = 220 \text{ kV}$
Resistividad del canal de descarga $\rho \cong 3,3 \text{ } 10^{-11} \text{ } \Omega/\text{m},$	Carga transportada por rayo $Q=52 \text{ C}$
Máxima energía por descarga $U \leq 1 \text{ MJ}$	Potencia de la descarga $P = 3 \text{ } 10^{13} \text{ W}$

Conclusiones

- El metano sería el agente causal para comprender el "Relámpago del Catatumbo".
- La concentración del CH₄ en las nubes convectivas causaría la separación de cargas eléctricas, posibilitando las descargas (rayos) así como la fosforescencia observada.
- El mecanismo propuesto está en acuerdo con el nivel de conocimientos acerca de las descargas eléctricas en gases ionizados y con las propiedades fisico-químicas del metano.
- En el día no ocurre el fenómeno porque la irradiancia solar fotodisocia el metano. Después del ocaso solar o durante un eclipse total, se manifiesta la actividad eléctrica antes del cambio de la temperatura.

- La concentración de metano en la troposfera varía localmente hasta incluso concentraciones del 0,1 % (Carman & Vincent, 1999).
- Hielo Inflamable de Metano en el Océano (Suess et al, 1999).

Relámpago del Catatumbo al NE

Imagen justo despues del Ocaso

Conclusiones

- Durante y después de precipitaciones intensas y/o prolongadas, la actividad disminuye o desaparece por completo porque las precipitaciones arrastran el metano hacia la superficie.
- Durante la estación seca la evaporación y la temperatura se incrementan, permitiendo la volatilidad del gas y su rápido ascenso a las nubes altas donde se formarían cristales autopolarizados eléctricamente.
- Los vientos no disipan la acumulación relativa del metano porque éste queda atrapado al interior de las nubes. Este proceso de acumulación puede ser favorecido por la existencia de un centro local de baja presión (Gol, 1963) situado entre los ríos Bravo y Catatumbo para cotas inferiores a tres mil metros.

“ es la concentración de millones de cocuyos (luciernagas) que todas las noches se reúnen en el Catatumbo para rendirle tributo a los padres de la creación”

Chamán Owakala

(étnia Warí, cordillera de Perijá, Sur del Lago de Maracaibo)

Modelo Electroatmosférico del *“Relámpago del Catatumbo”*

Al sur del lago de Maracaibo (Venezuela) se presenta un relámpago permanente denominado “Faro de Maracaibo” o “Relámpago del Catatumbo”. El carácter local, antiguo y recurrente del fenómeno tiene características únicas, siendo motivo de controversias su comprensión. Se presenta el resultado de las expediciones realizadas con el fin de caracterizar el fenómeno y se propone un modelo microfísico para la actividad eléctrica atmosférica observada en la región. Se destaca la importancia del gas Metano como agente causal de la actividad eléctrica atmosférica.

- 
1. Lope de Vega, F. *Obras Escogidas: la Dragontea*. Tomo II . Madrid. Pp 324. **1953**.
 2. Humboldt, A. *Viaje a las regiones equinocciales del Nuevo Continente*. Tomo III, pp 226. Caracas. Traducción por Lisandro Alvarado. **1956**.
 3. Codazzi, A. *Resumen de la Geografía de Venezuela*. Biblioteca Vzlna. De Cultura. Caracas. Pp 23. **1960**.
 4. Centeno-Grau, M. Bol. Ac. De Cs. F.,Mat. Y N. 28, 79,353-365. **1968**
 5. Zavrostky, A. Revista Forestal Venezolana N° 25, Ediciones ULA. Mérida, **1975**.
 6. Zavrostky, A. Carta Ecológica . Ediciones ULA N° 56. Mérida (Venezuela) **1991**.
 7. Golde, R. 1977 "Physics of Lightning". Academic Press London.
 8. Howarson, A. M. 1970 "Descargas eléctricas en Gases" . Edit. Urmo. Bilbao
 9. Landau, L.; Lifshitz, E. 1981 "Electrodinámica de los medios Continuos". Reverté Barcelona, pp.70-73.
 10. Marr, G. 1967 "Photoionization Processe in gases". Academic Press. London
 11. Rogers, R. 1976 "Física de las Nubes". Reverté. Barcelona.
 12. Spitzer, Jr. 1969."Física de los gases totalmente ionizados". Alhambra Edit. Barcelona.