

## **2.3 Teoría microscópica de la resistencia**

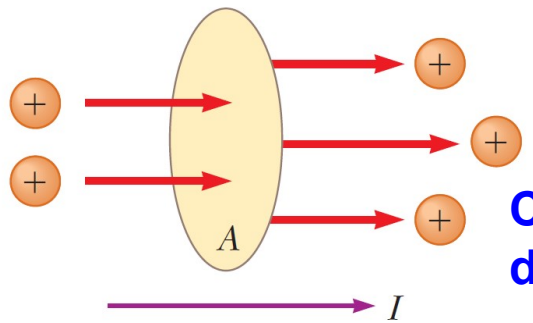
**Seguridad eléctrica**

**Aplicaciones:**

**Física de las descargas  
atmosféricas**



## Repaso de clases anteriores

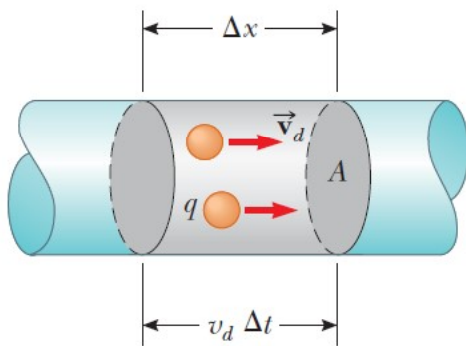


$$I_{prom} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

Convencionalmente se asigna a la corriente la misma dirección que la del flujo de la carga positiva.

La unidad del SI para la corriente es el **ampere (A)**:  $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$



$$I_{prom} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = nqAv_d$$

$$v_d = \frac{I_{prom}}{nqA}$$

$$J = \frac{I}{A} = nqv_d$$

**Densidad de corriente J:**

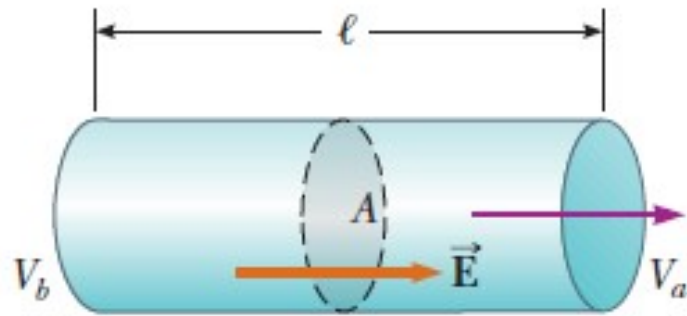
LEY DE OHM: En muchos materiales (inclusive la mayor parte de los metales) la relación de la densidad de corriente al campo eléctrico es una constante  $\sigma$  (conductividad eléctrica) que es independiente del campo eléctrico que produce la corriente.

$$J = \sigma E$$

$$\rho = \frac{E}{J}$$

El inverso de la conductividad es la resistividad  $\sigma = 1/\rho$

# Repaso de clases anteriores



$$J = \sigma E$$

Si el campo es uniforme:  $E = \Delta V / \ell$

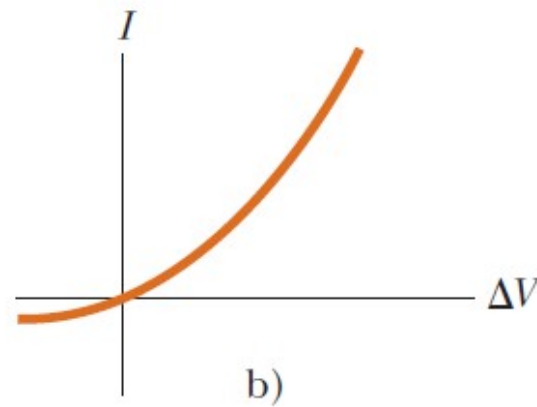
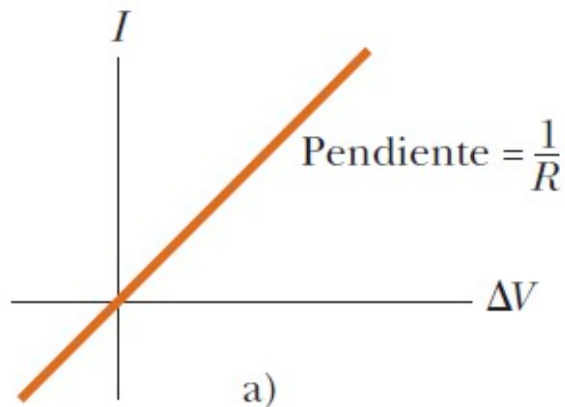
$$(I/A) = \sigma \Delta V / \ell$$

**Resistencia del conductor R:**

$$R \equiv \frac{\Delta V}{I}$$

La unidad de resistencia en el S.I. es el **ohm** ( $\Omega$ )

$$R = \frac{\rho L}{A}$$



**MATERIAL ÓHMICO  
Y NO ÓHMICO**





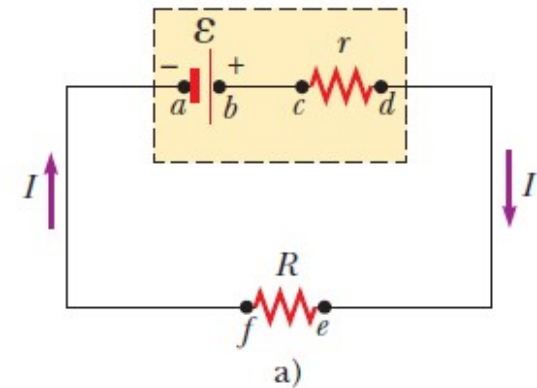
## Repaso de clases anteriores

Se utiliza una batería o pila (**fuerza electromotriz**) como fuente de energía, o más comúnmente, *fuerza de fem*.

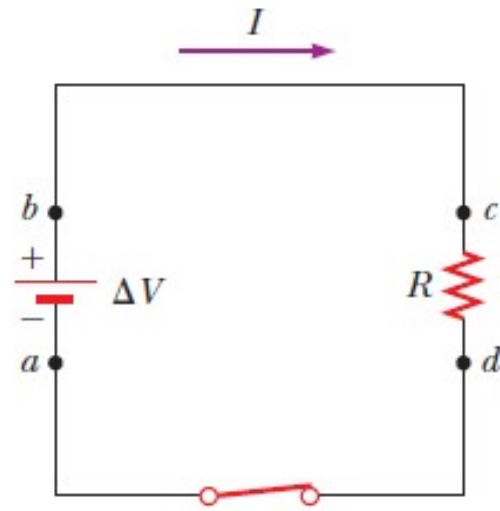
La fem  $\epsilon$  de una batería es el voltaje máximo posible que ésta puede suministrar entre sus terminales.

Si la fem es ideal:  $V_{ab} = \Delta V = \epsilon$

Y además:  $\epsilon = I \cdot R$

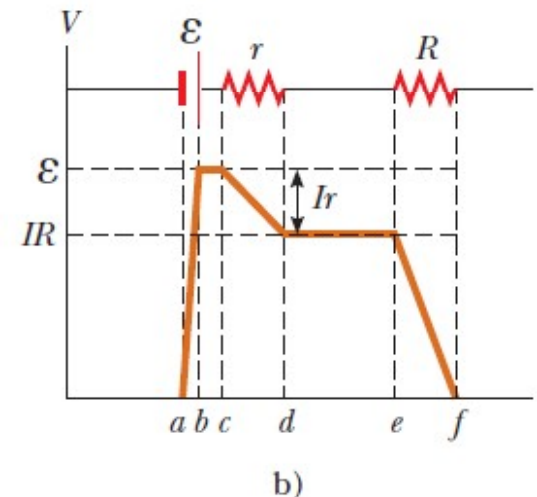


En una fem real existe una **resistencia interna**  $r$ , por lo que el voltaje entre las terminales de la batería  $\Delta V$  vale:  $\Delta V = \epsilon - Ir$



### POTENCIA ELÉCTRICA

$$\mathcal{P} = I \cdot \Delta V = I^2 R = \frac{\Delta V^2}{R}$$



La pérdida de potencia en forma de energía interna (calor) en un conductor de resistencia  $R$ , a menudo se llama **calentamiento Joule**; esta transformación también es conocida como una **pérdida  $I^2R$** .

## Repaso de clases anteriores

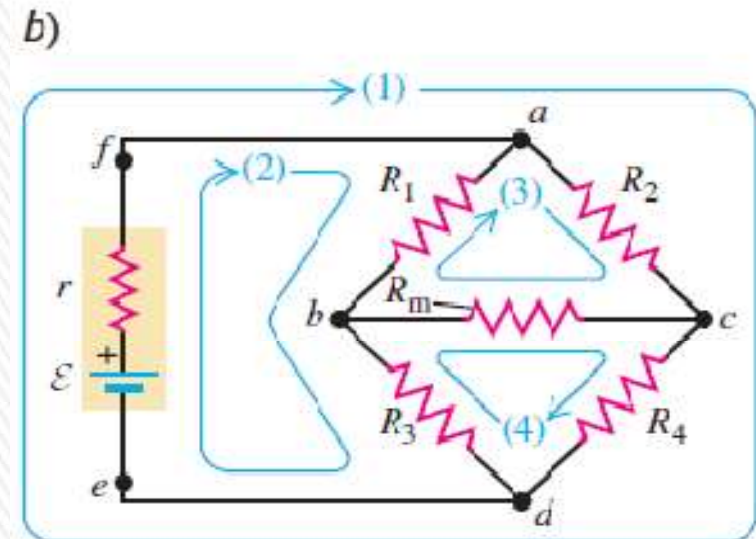
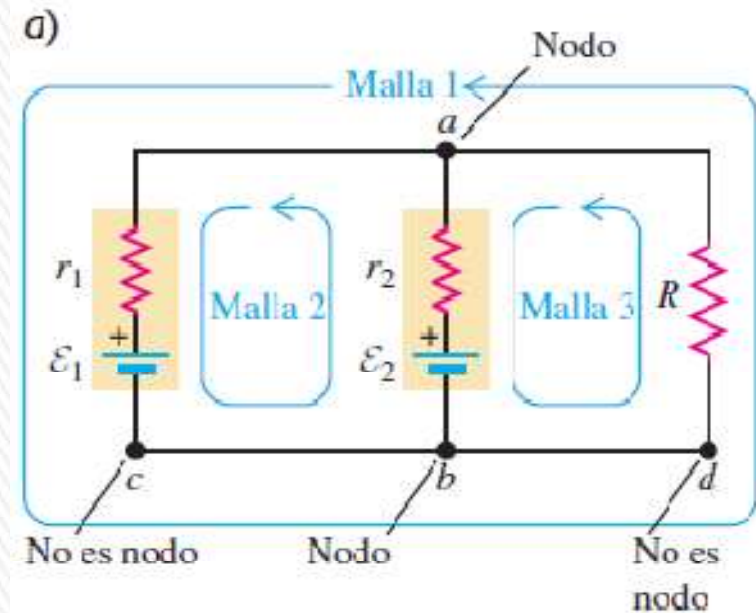
### Reglas de Kirchhoff

**Nodo** (o **unión**) en un circuito es el punto en que se unen tres o más conductores.

**Espira** (o **mall**) es cualquier trayectoria cerrada de conducción.

**Regla de Kirchhoff de los nodos:** La suma algebraica de las corrientes en cualquier nodo es igual a cero:  $\sum I = 0$

**Regla de Kirchhoff de las mallas:** La suma algebraica de las diferencias de potencial en cualquier malla, incluso las asociadas con las fem y las de elementos con resistencia, debe ser igual a cero:  $\sum V = 0$ .



## Repaso de clases anteriores

### Resistores en serie y en paralelo

$$R_{EQ} = R_1 + R_2 + R_3 \dots = \sum_{i=1}^n R_i$$

La resistencia equivalente de cualquier número de resistores en serie es igual a la suma de sus resistencias individuales.

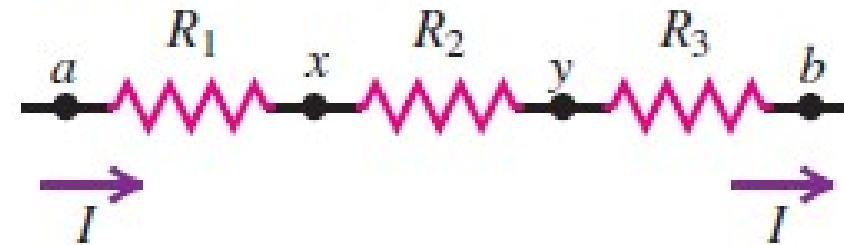
$$\frac{1}{R_{EQ}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$

Para cualquier número de resistores en paralelo, el recíproco de la resistencia equivalente es igual a la suma de los recíprocos de sus resistencias individuales.

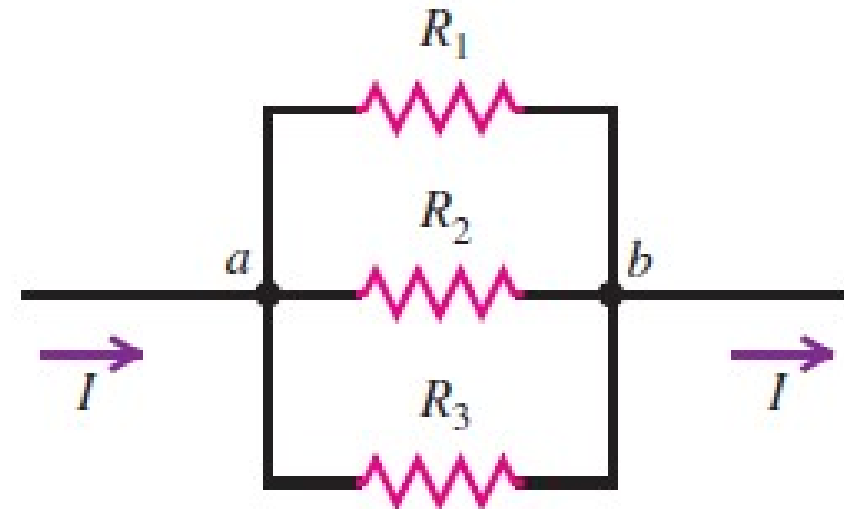
Para el caso especial de dos resistores en paralelo

$$R_{EQ} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

a)  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$  en serie

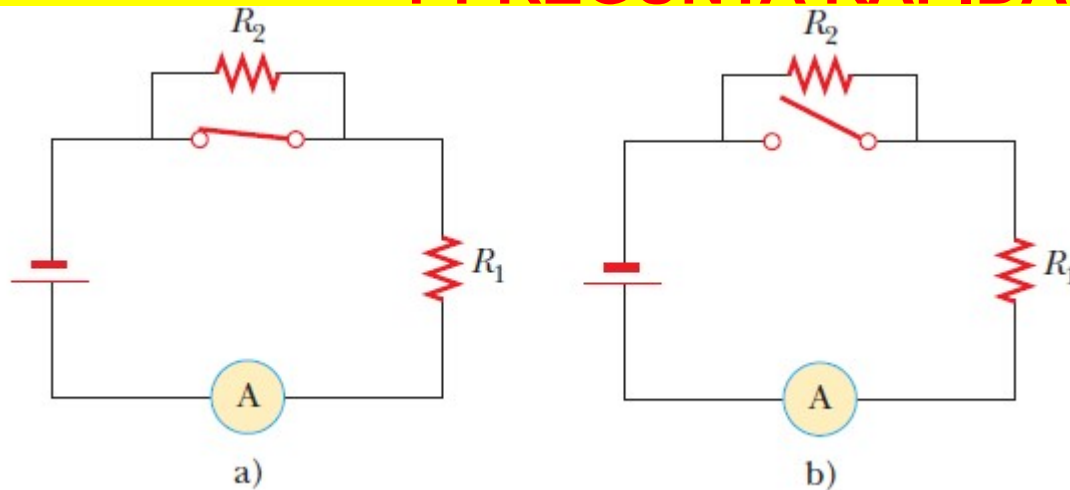


b)  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$  en paralelo





## 1-PREGUNTA RÁPIDA (QUICK QUIZ)



Cuando se cierra el interruptor del circuito de la figura a, no hay corriente en  $R_2$ , porque la corriente encuentra una trayectoria alterna de resistencia cero a través del interruptor. Existe corriente en  $R_1$ , la cual se mide con un amperímetro (dispositivo para la medición de corriente) en la parte baja del circuito. Si se abre el interruptor (figura b), existe corriente en  $R_2$ .

¿Qué sucede con la lectura del amperímetro cuando se abre el interruptor?

- a) La lectura asciende,
- b) la lectura desciende, o
- c) la lectura no cambia.

**Respuesta: b) la lectura desciende**

Cuando se abre el interruptor, los resistores  $R_1$  y  $R_2$  están en serie, así que la resistencia total del circuito es mayor que cuando el interruptor estaba cerrado. Como resultado, la corriente disminuye.

## 2- PREGUNTA RÁPIDA (QUICK QUIZ)

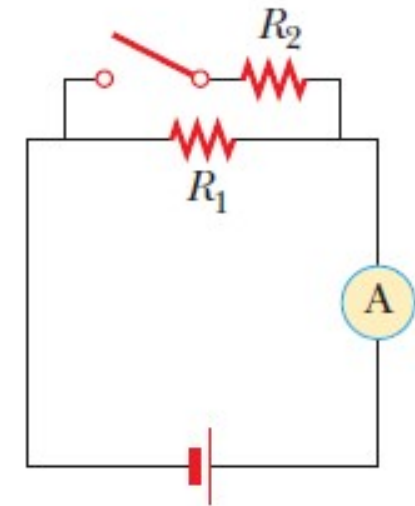
Con el interruptor abierto del circuito de la figura a, no hay corriente en  $R_2$ . No obstante, hay corriente en  $R_1$ , y se mide con el amperímetro que está del lado derecho del circuito.

Si se cierra el interruptor (figura b), existe corriente en  $R_2$ . ¿Qué ocurre con la lectura del amperímetro cuando el interruptor se cierra?

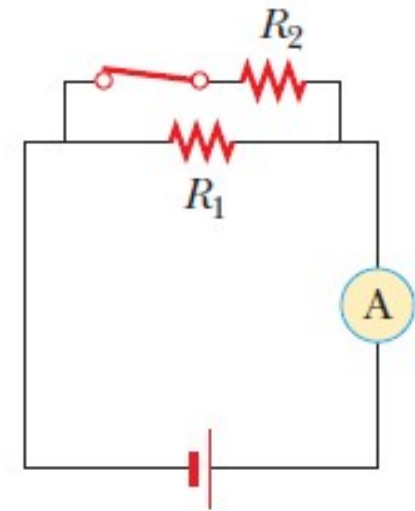
- a) La lectura asciende,
- b) la lectura desciende, o
- c) la lectura no cambia.

**Respuesta:** a) La lectura asciende.

Cuando se cierra el interruptor, los resistores  $R_1$  y  $R_2$  están en paralelo, así que la resistencia total del circuito es menor que cuando el interruptor estaba abierto. Como resultado, la corriente aumenta.



a)



b)



## PREGUNTA RÁPIDA (QUICK QUIZ)

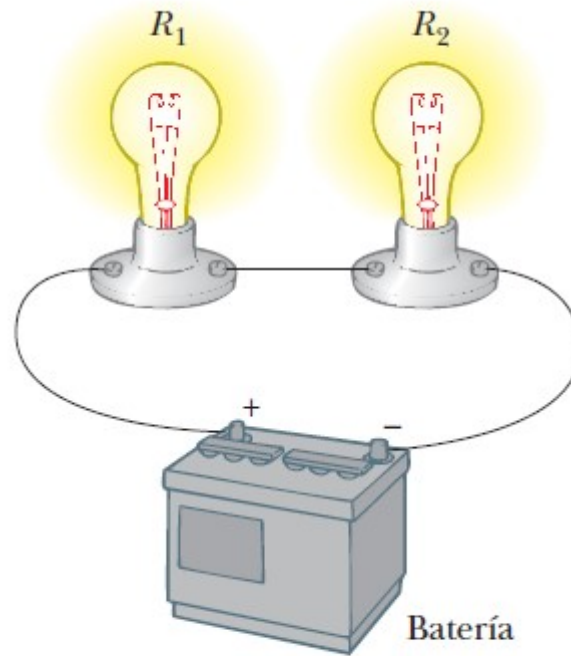
Considere las siguientes opciones:

- a) aumenta,
- b) disminuye,
- c) permanece igual.

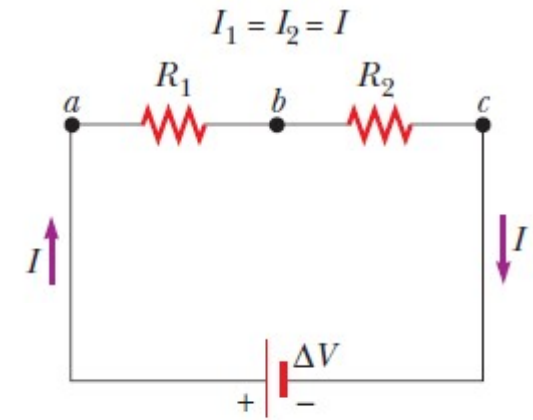
A partir de estas opciones, elija la mejor respuesta para las siguientes situaciones. En la figura se agrega un tercer resistor en serie con los primeros dos.

i) ¿Qué ocurre con la corriente en la batería?

ii) ¿Qué ocurre con el voltaje entre las terminales de la batería?



a)



b)

**Respuesta: i) –b) disminuye; y ii) a) aumenta**

**i), b)** Agregar otro resistor en serie aumenta la resistencia total del circuito y por tanto reduce la corriente en el circuito.

**ii), a).** La diferencia de potencial a través de las terminales de la batería aumenta porque la corriente reducida resulta en una menor disminución de voltaje a través de la resistencia interna.

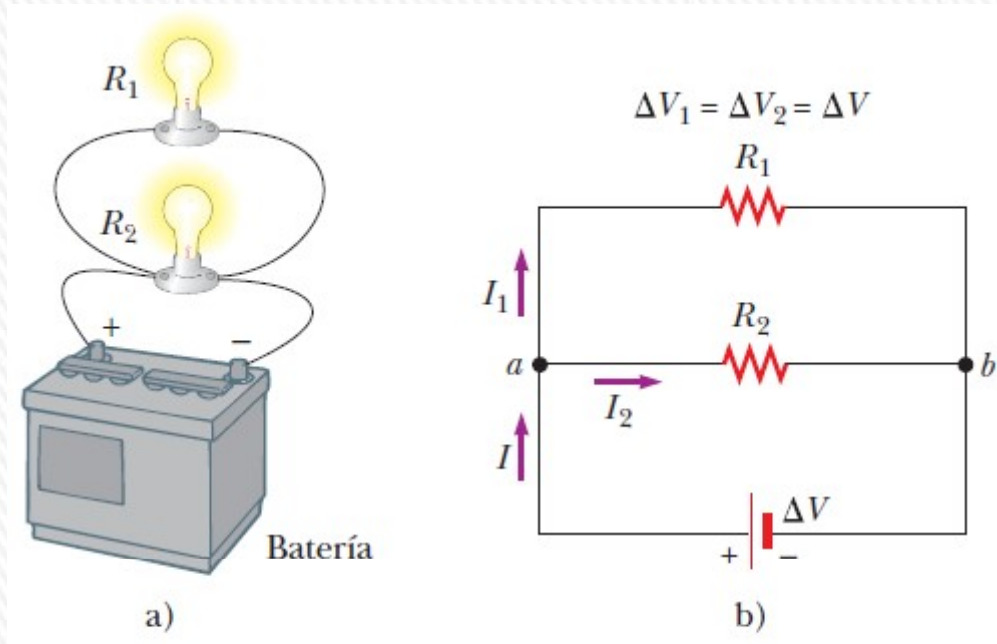
## PREGUNTA RÁPIDA (QUICK QUIZ)

Considere las siguientes opciones:

- a) aumenta,
- b) disminuye,
- c) permanece igual.

A partir de estas opciones, elija la mejor respuesta para las siguientes situaciones.

- i) En la figura se agrega un tercer resistor en paralelo con los dos primeros. ¿Qué ocurre con la corriente en la batería?
- ii) ¿Qué ocurre con el voltaje entre las terminales de la batería?



**Respuesta: i), a – aumenta; ii) b) disminuye.**

a). Si se conectara en paralelo un tercer resistor, la resistencia total del circuito disminuiría y la corriente en la batería aumentaría.

ii), b). La diferencia de las terminales disminuiría porque la corriente aumentada resulta en una mayor caída de voltaje a través de la resistencia interna de potencial a través.

# Teoría microscópica de la resistencia

Modelo clásico de conducción eléctrica en metales (1900, Paul Drude) conduce a ley de Ohm y que resistividad en metales relacionada con movimiento de electrones.

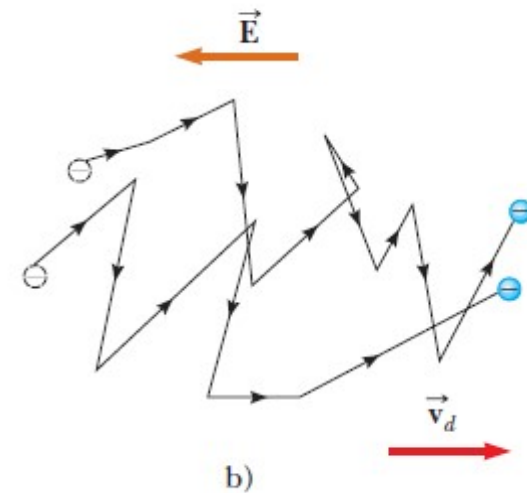
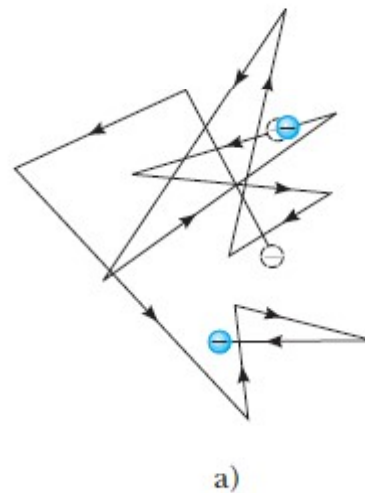
**Conductor:** arreglo de átomos normales más conjunto de electrones libres (**electrones de conducción**).

Estos electrones están unidos a sus átomos respectivos cuando éstos no forman parte de un sólido, pero obtienen movilidad cuando estos átomos forman un sólido.

Sin un campo eléctrico los electrones de conducción se mueven al azar a través del conductor con una

**velocidad térmica media ( $u$ )** (promedio del orden de  $10^6$  m/s, similar a lo que sería un gas de electrones).

La rapidez de arrastre  $v_d$  es del orden de  $10^{-4}$  m/s.



**Recorrido libre medio ( $\lambda$ ):** distancia media que recorre un electrón entre las colisiones que experimenta con los iones del conductor.



# Teoría microscópica de la resistencia

Al aplicarse un  $E$ , los electrones libres se desplazan lentamente en sentido opuesto al  $E$ , con **rapidez de arrastre  $v_d$**  (típicamente  $10^{-4}$  m/s).  
Suposiciones:

1. Movimiento del electrón después de una colisión es independiente de su movimiento antes de la colisión.
2. Energía adquirida en exceso por los electrones en el  $E$  se pierde en los átomos del conductor cuando chocan. La energía proporcionada a los átomos aumenta su energía vibratoria, lo que hace que la temperatura del conductor aumente.

Electrón libre masa  $m_e$  y carga  $q = (-e)$  bajo acción de un  $E$  constante, experimenta una fuerza  $F = qE$ . Al aplicar la segunda ley de Newton,

$$\bar{a} = \frac{qE}{m_e}$$

$v_i$  velocidad inicial del electrón en el instante posterior a una colisión

$$\bar{v}_f = \bar{v}_i + \bar{a}t = \bar{v}_i + \frac{qE}{m_e} t$$

# Teoría microscópica de la resistencia

Valor promedio de  $\mathbf{v}_f$  (para todos los posibles tiempos entre colisiones  $t$  y todos los posibles valores de  $\mathbf{v}_i$  de los electrones): valor promedio de  $\mathbf{v}_i$  es cero (se supone que las velocidades iniciales están distribuidas aleatoriamente sobre todos los posibles valores); valor promedio de 2do. término es  $(q\mathbf{E}/m_e)\tau$ , con  $\tau$  *intervalo de tiempo promedio entre colisiones sucesivas*.

Pero el valor promedio de  $\mathbf{v}_f$  es igual a la velocidad de arrastre:

$$\bar{\mathbf{v}}_{f \text{ prom}} = \bar{\mathbf{v}}_d = \frac{q\mathbf{E}}{m_e} \tau$$

Relacionando  $v_d$  con la densidad de corriente  $J$   $J = nqv_d = \frac{nq^2E}{m_e} \tau$

De acuerdo a la ley de Ohm,  $J = \sigma E$ , se obtienen las siguientes correspondencias para conductividad y resistividad de un conductor:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{nq^2}{m_e} \tau$$

Según este modelo ni conductividad ni resistividad dependen de la intensidad del E.

**Característica de un conductor que obedece la ley de Ohm.**

# Teoría microscópica de la resistencia

Se pueden obtener expresiones similares usando el **recorrido libre medio**  $\lambda$  y la **velocidad térmica**  $u$ , en lugar del  $\tau$  (tiempo medio entre choques).

Cada vez que un electrón choca con un ion, se desvía al azar y pierde la tendencia a moverse según la fuerza eléctrica que experimenta.

Su próximo choque se produce al cabo de un tiempo que satisface:  $\tau = \lambda/u$ .

$$\rho = \frac{m_e}{nq^2\tau} = \frac{m_e u}{nq^2\lambda}$$

$n$  y  $\lambda$  dependen del material, la velocidad térmica  $u$  depende de la temperatura.

$\lambda$ , es del orden de 100 veces la distancia interatómica: los electrones viajan a través de la red cristalina del conductor de forma totalmente libre y no chocan hasta que se encuentran con una desviación de la estructura regular de la red: que puede ser una impureza o un ion de la red algo desplazado de su posición de equilibrio debido a su movimiento vibratorio térmico.



# Ejemplo

¿Cuál es el tiempo libre medio entre colisiones  $\tau$  en los electrones de conducción en el cobre y cuál es la trayectoria libre media  $\lambda$  para estas colisiones?  
Suponga una rapidez térmica  $u$  de  $1,6 \times 10^6$  m/s, y  $n = 1,1 \times 10^{29}$  e/m<sup>3</sup> y la resistividad del cobre  $\rho = 1,7 \times 10^{-8}$   $\Omega \cdot m$

$$\rho = \frac{m_e}{ne^2\tau} \quad \tau = \frac{m_e}{ne^2\rho}$$

$$\tau = \frac{m_e}{ne^2\rho} = \frac{9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}}{\left(1,1 \times 10^{29} \frac{1}{m^3}\right) (1,60 \times 10^{-19} \text{ C})^2 (1,7 \times 10^{-8} \Omega \cdot m)} = 1,9 \times 10^{-14} \text{ s}$$

$$\lambda = u \cdot \tau = (1,6 \times 10^6 \text{ m/s}) (1,9 \times 10^{-14} \text{ s}) = 3,0 \times 10^{-8} \text{ m}$$



## EJEMPLO: Ejercicio 2.1.15

**Electricidad atmosférica-** Se puede realizar un modelo simple de la actividad eléctrica terrestre de la siguiente forma.

La superficie terrestre se puede considerar como un conductor, y se constata que con buen tiempo, es decir sin nubes de tormenta, existe un campo eléctrico con un valor promedio de 120 V/m, dirigido hacia el centro de la Tierra.

Este campo eléctrico no es uniforme y disminuye con la altura.

Cuando se dan las condiciones de tormenta eléctrica, este campo en la atmósfera, cercano al suelo invierte su sentido y aumenta en varios órdenes de magnitud (de 10,0 a 500 kV/m).

En la atmósfera existen portadores de carga libres (iones), con una densidad no uniforme, aumentando con la altura. A partir de los 40-60 km de altura, la atmósfera tiene una conductividad suficiente como para considerarla conductora y por lo tanto equipotencial. A esta zona que comienza a esa altura y se extiende indefinidamente se le da el nombre de **electrósfera**.

La diferencia de potencial entre la superficie terrestre y la electrósfera es de 200 a 500 KV, con un valor medio de 300 KV).

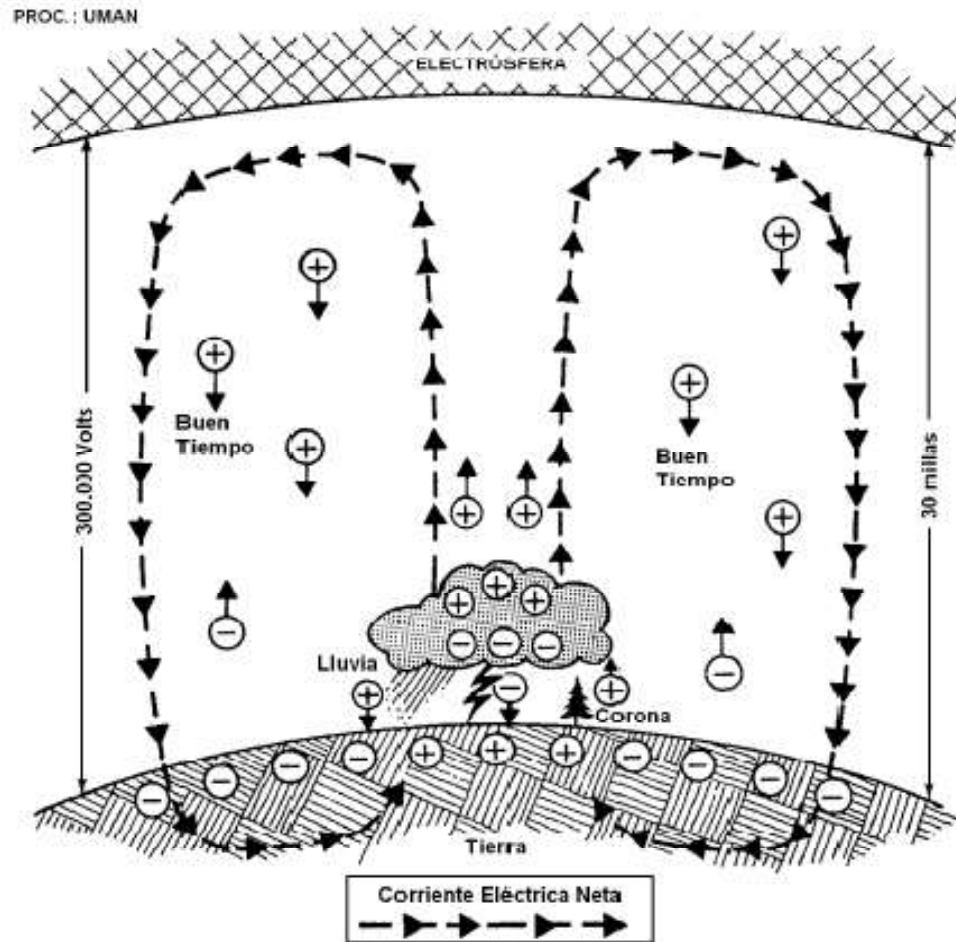
Como hay partículas cargadas en presencia de un campo eléctrico, las mismas se desplazan, produciendo una densidad de corriente  $J$  (corriente por unidad de área) con buen tiempo, como se muestra en la figura.

Esta densidad de corriente en buen tiempo se ha medido experimentalmente, y se obtiene un valor de  $J = 2,00$  a  $4,00$  pA/m<sup>2</sup>.

También se sabe que cada segundo están "cayendo" entre 40 y 100 rayos a la tierra y cada uno de ellos transfiere una carga negativa promedio de 20 coulombs.



## EJEMPLO: Ejercicio 2.1.15



a) A partir del campo eléctrico sobre la superficie terrestre con buen tiempo, determina la densidad superficial de carga  $\sigma$ , y suponiendo que la misma es uniforme en todo el planeta, estima el valor de la carga sobre la superficie terrestre.

¿Corresponde a un exceso de cargas positivas o negativas?

b) Determina a partir de la densidad media de corriente, la intensidad total que entra sobre la superficie del planeta. A partir del valor hallado estima el tiempo que tardaría la Tierra en descargarse, suponiendo que en todo el planeta hay buen tiempo.

c) Explica por qué efectivamente no se produce dicha descarga, y se sigue manteniendo cargada.

d) Realiza un modelo de capacitor para las condiciones de buen tiempo y determina el valor de su capacitancia. ¿Podrías realizar otro modelo de capacitor para la situación de una nube de tormenta y el suelo?



# CAMPO ELÉCTRICO ATMOSFÉRICO

## Características del campo eléctrico atmosférico con buen tiempo

La atmósfera con buen tiempo tiene un campo eléctrico uniforme  $E$ , o gradiente de potencial, vertical y orientado hacia abajo (es decir entrante hacia la Tierra), de 100 a 130 V/m.

Sin embargo este valor puede variar bastante, incluso puede llegar a cambiar en su sentido.

Presenta una variación diurna ligada a la variación de la conductividad de las capas más bajas de la atmósfera y la actividad solar.

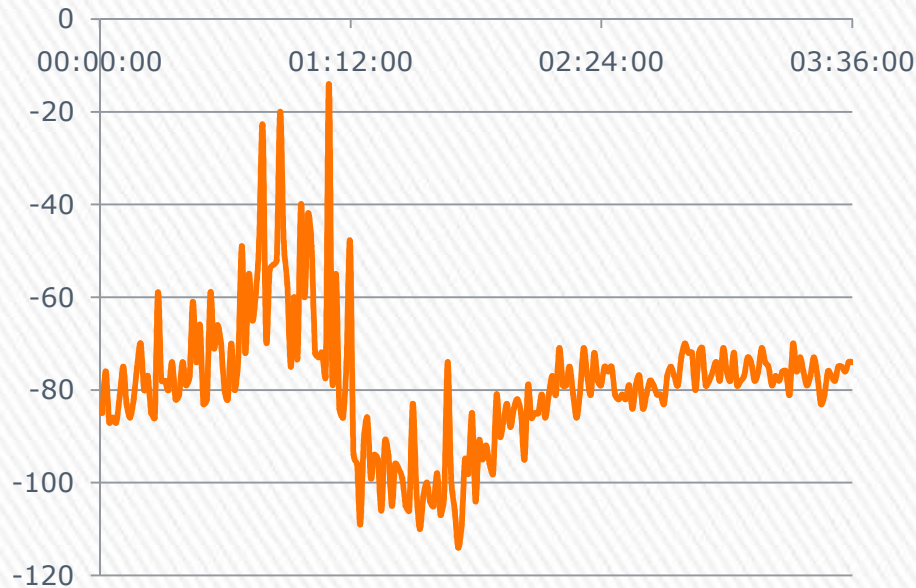
El campo eléctrico en condiciones perturbadas, y más aún de tormenta, tiene un valor y dirección variables, siendo muy afectado por las cargas de las nubes y por la concentración de partículas tales como aerosoles u otras provenientes de la contaminación.

Las variaciones del campo eléctrico en buen tiempo dependen de:

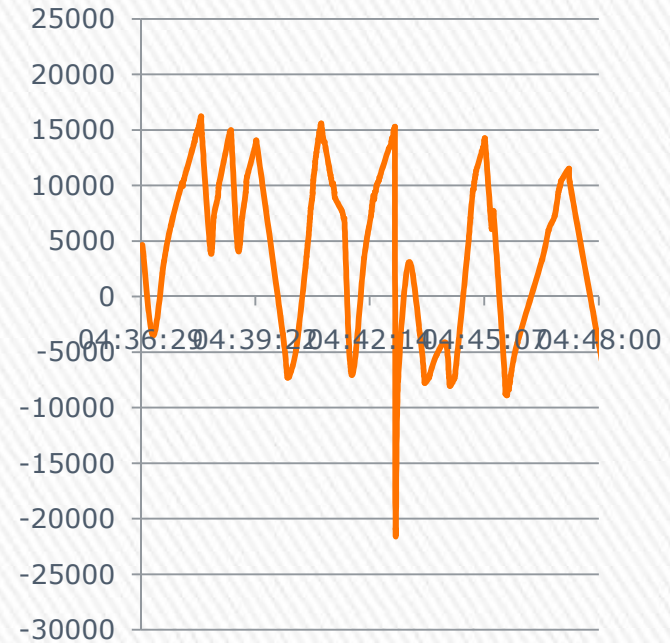
- ubicación geográfico (latitud y longitud),
- altitud,
- nubosidad y condiciones del tiempo (meteorológicas),
- concentración de aerosoles y actividades tecnológicas
- cambios diurnos y anuales debido a la actividad solar y de los rayos cósmicos.

# CAMPO ELÉCTRICO ATMOSFÉRICO

## Características del campo eléctrico atmosférico



Campo eléctrico con buen tiempo

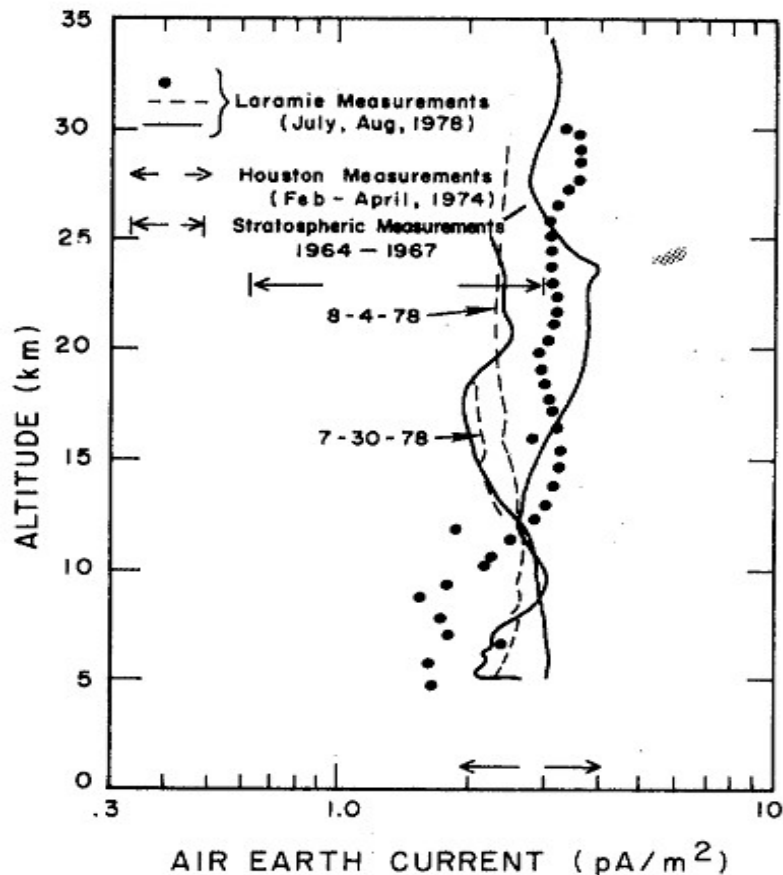


Campo eléctrico con proximidad de tormenta

## Variación de E con la latitud:

Región:	Ecuador	60° latitud	Polo sur	Áreas industriales
Campo (V/m)	120	155	71	200-500

# CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA ATMOSFÉRICA



Variación de la densidad de corriente  $J$  en  $\text{pA/m}^2$  con la altura

**Conductividad eléctrica ( $\sigma$ )** constante de proporcionalidad en la relación existente entre la densidad de corriente ( $J$ ) y el campo eléctrico ( $E$ ):  $J = \sigma E$  por lo que la conductividad viene expresada en  $\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ .

A partir de esta conductividad atmosférica y de la existencia de un campo eléctrico, se puede hablar de una densidad corriente y por tanto de una corriente eléctrica.

Por tanto se puede decir que hay una corriente constante que fluye hacia la superficie de la tierra. Esta corriente se llama **corriente neta aire-tierra**.

Esta corriente varía a lo largo del día y del lugar geográfico.

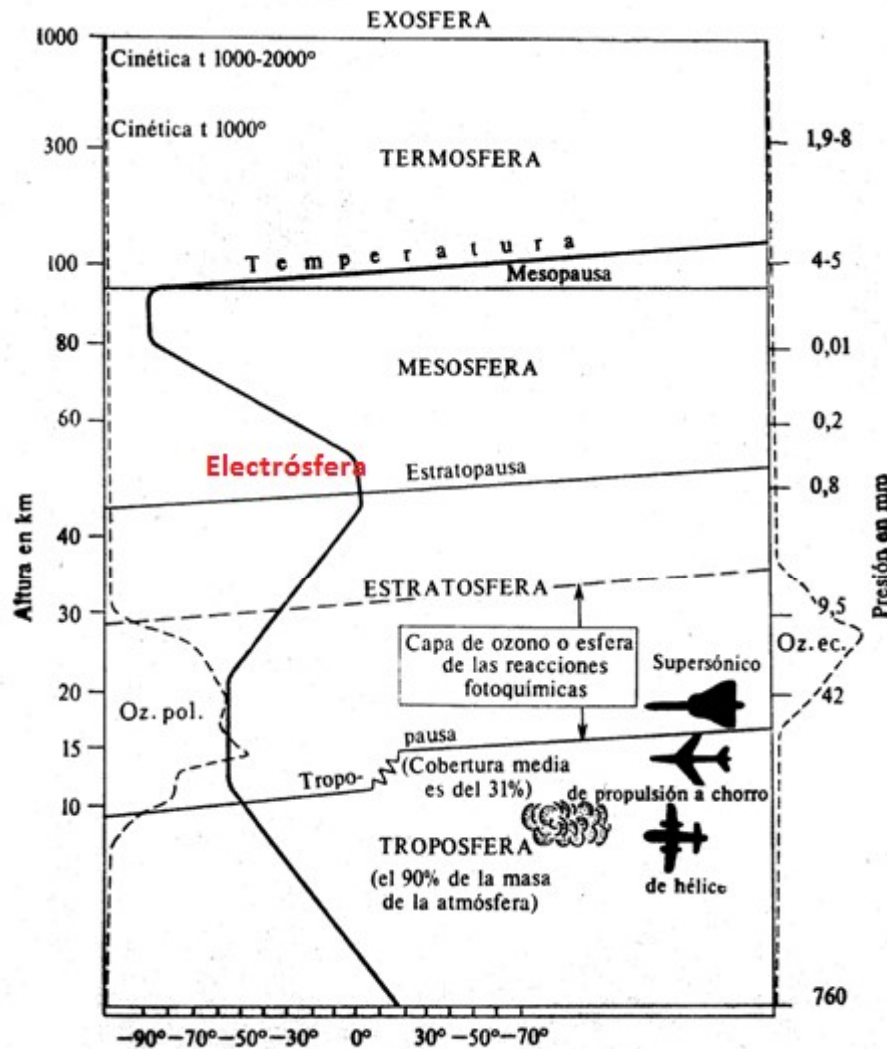
## DENSIDAD DE CORRIENTE ATMOSFÉRICA

Se puede considerar que la misma varía entre 1 y 4  $\text{pA/m}^2$  (es decir de 1 a  $4 \times 10^{-12} \text{ Am}^2$ ).

Se puede asumir como valores medios: para los continentes 2,3  $\text{pA/m}^2$  para los mares 3,3  $\text{pA/m}^2$ .



# ATMÓSFERA TERRESTRE



Capa de mezcla de gases que rodea a nuestro planeta con una composición casi constante hasta 25 km.

75 % de su masa se encuentra en los primeros 11 km de altura (tropósfera).

Componentes: oxígeno (20,95 % en volumen) y nitrógeno (78,09 %); 0,93% de argón, 0,03% de anhídrido carbónico y otros gases como el neón, xenón y helio en mucho menor proporción.

- **Capas de la atmósfera terrestre:**
- *tropósfera,*
- *estratósfera,*
- *mesósfera y*
- *termósfera (ionósfera)*
- *exósfera.*

**Electrósfera: es la región a partir de la cual se puede considerar equipotencial por su conductividad**

# Física de las Descargas Atmosféricas

Promedialmente en todo instante se están produciendo alrededor de 2.000 tormentas eléctricas en el mundo, ocupando las nubes de tormenta entre el 1 al 10% de la superficie terrestre.

Cada segundo caen  $44 \pm 5$  rayos

Alrededor de 2.000 personas al año fallecen por una descarga directa

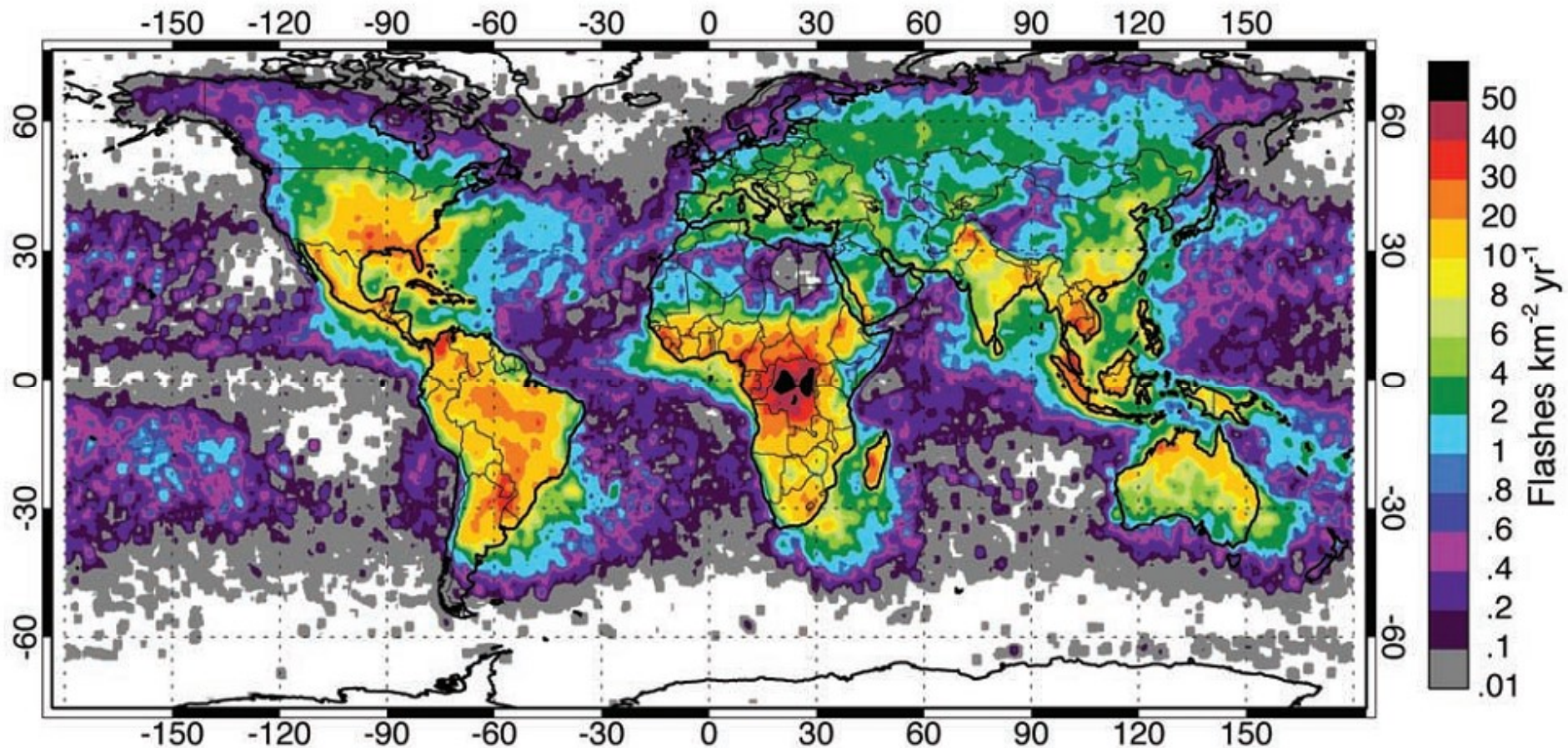
## Descargas atmosféricas





# FRECUENCIA Y DISTRIBUCIÓN DE TORMENTAS

Cantidad de rayos caídos por año y por kilómetro cuadrado



The annualized distribution of total lightning activity (in units of  $\text{fl km}^{-2} \text{yr}^{-1}$ ).

The Optical Transient Detector (OTD) is a space-based instrument specifically designed to detect and locate lightning discharges as it orbits the Earth.



# FRECUENCIA Y DISTRIBUCIÓN DE TORMENTAS

## Ranking de las 10 regiones con registros con más rayos

Pos.	Lugar	Nº flashes /(km <sup>2</sup> .año)	Días de tormenta
1	Kamembe, Ruanda	82,7	221
2	Boende, República Democrática del Congo	66,3	118
3	Lusambo, República Democrática del Congo	52,1	119
4	Kananga, República Democrática del Congo	50,3	139
5	Kuala Lumpur, Malasia	48,3	180
6	Calabar, Nigeria	47,4	216
7	Franceville, Gabón	47,1	?
8	Fortaleza, Argentina	42,7	57
9	Ocana, Colombia	39,9	?
10	Concepción, Paraguay	37	?

**Sin embargo hay otras regiones donde la actividad eléctrica incluso llega a triplicar a las registradas en esta tabla, como el denominado " Relámpago del Catatumbo" con un valor de 250.**

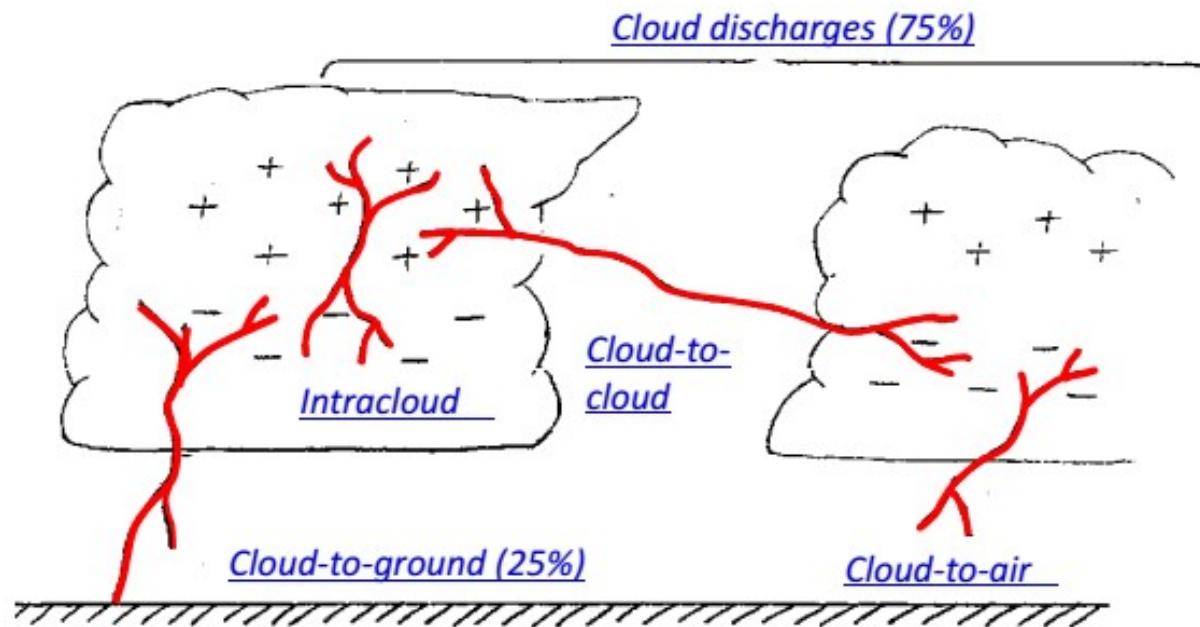
**En Uruguay se estimaba 5 rayos/(año.km<sup>2</sup>)**

# TIPOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Hay cuatro tipos de descargas atmosféricas básicas:

- 1) Intranube (relámpago) (la más frecuente) –Intracloud lightning (IC)
- 2) Entre nube y tierra o tierra-nube (rayo) (cloud to ground CG)
- 3) Entre dos nubes (menos frecuente) (cloud to cloud: CC)
- 4) Entre la nube y al aire circundante

## 2. Types of Lightning Discharges



Types of lightning discharges from cumulonimbus

# TIPOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

## INTRA-NUBE





# TIPOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

## NUBE-TIERRA (C-G)



Héctor Korenko -2016 -Física de las Descargas atmosféricas



# TIPOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

## NUBE-NUBE (C-C)



# TIPOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

## NUBE-AIRE (C-A)





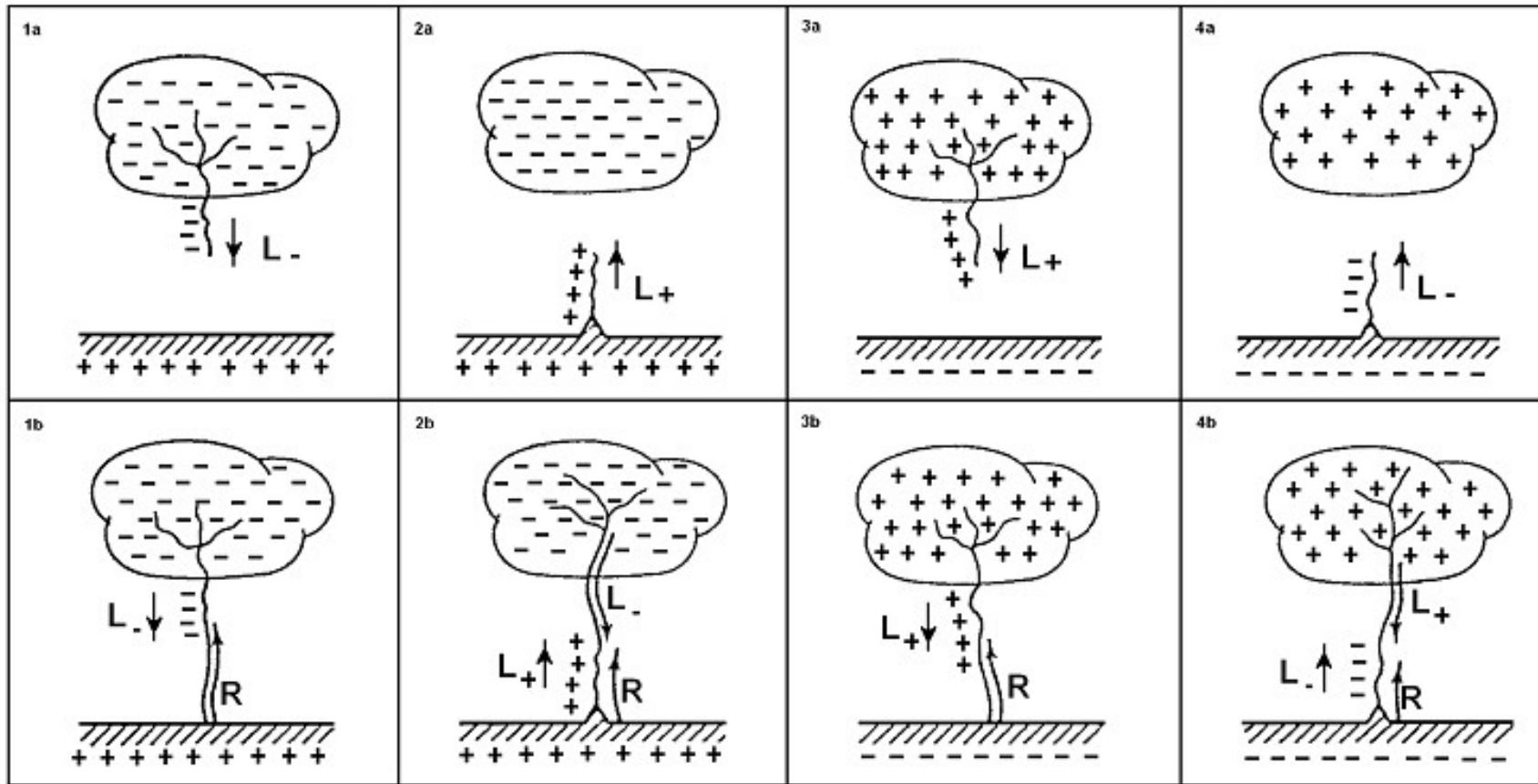
# TIPOS DE RAYOS

**-CG (90%)**

**+GC**

**+CG (10%)**

**-GC**



**a) Guías, b) Descargas de retorno**



# VALORES REPRESENTATIVOS DE LAS MAGNITUDES FÍSICAS DE LAS DESCARGAS

## DESCARGA COMPLETA

Magnitud	Mínimo	Representativo	Máximo
Velocidad de propagación ( $m/s$ )	$2,0 \times 10^7$	$8,0 \times 10^7$	$1,6 \times 10^8$
Velocidad de subida ( $kA/\mu s$ )	—	40	>100
Tiempo de subida ( $\mu s$ )	>0,2	1	>4,5

Magnitud	Mínimo	Representativo	Máximo
Número de descargas	1	3-4	26
Intervalo de tiempo entre descargas individuales en ausencia de corriente continua ( $ms$ )	3	40	100
Duración de una descarga completa ( $s$ )	$10^{-2}$	0,2	2
Carga transferida incluyendo la corriente continua (Coul)	3	25	90

## EJEMPLO: Ejercicio 2.1.15

a) A partir del campo eléctrico sobre la superficie terrestre con buen tiempo, determina la densidad superficial de carga  $\sigma$ , y suponiendo que la misma es uniforme en todo el planeta, estima el valor de la carga sobre la superficie terrestre. ¿Corresponde a un exceso de cargas positivas o negativas?

Zona entre la superficie terrestre y la electrósfera.

**A partir del campo eléctrico atmosférico medio  $E_0$ , determinaremos la densidad de carga superficial  $\sigma$ .**

Considero a la superficie terrestre como un conductor plano infinito, por lo que su campo eléctrico vale:

$$E_0 = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad \sigma = \epsilon_0 E_0$$

Considerando que la permitividad del aire es aproximadamente igual a la permitividad del vacío:  $\epsilon_0 = 8,8542 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N}\cdot\text{m}^2)$  y tomando un valor de  $E_0 = 120 \text{ V/m}$

**Se obtiene un valor de  $\sigma = 1,06 \times 10^{-9} \text{ C/m}^2$**

Corresponde a una carga negativa ya que el campo es entrante a la superficie terrestre.

Considerando un radio medio de la Tierra igual a  $R = 6.371 \text{ km}$  y suponiendo a la misma como una esfera uniformemente cargada con la densidad de carga  $\sigma$  anteriormente calculada, se tiene que la carga neta de la Tierra vale:

$$Q_T = (4\pi R^2)\sigma = 5,42 \times 10^5 \text{ C} \quad (\text{carga negativa})$$

$$Q_T = -5,4 \times 10^5 \text{ C} \quad (540.000 \text{ Coulombs de carga negativa})$$



## EJEMPLO: Ejercicio 2.1.15

b) Determina a partir de la densidad media de corriente, la intensidad total que entra sobre la superficie del planeta. A partir del valor hallado estima el tiempo que tardaría la Tierra en descargarse, suponiendo que en todo el planeta hay buen tiempo.

b) Tomo como densidad de corriente el valor medio:  $J = 3,00 \times 10^{-12} \text{ A/m}^2$

La corriente total vale:

$$I = J \cdot A = J \cdot 4\pi R^2 = (3,00 \times 10^{-12}) 4\pi (6,371 \times 10^6)^2 = 1,53 \times 10^3 \text{ A}$$

La carga total Q se descargaría en un tiempo t:

$$t = \frac{Q}{I} = \frac{5,42 \times 10^5}{1,53 \times 10^3} = 354 \text{ s.}$$

**I = 1.530 A   t = 354 s   La Tierra se descargaría en menos de 6 minutos!**



## EJEMPLO: Ejercicio 2.1.15

c) Explica por qué efectivamente no se produce dicha descarga, y se sigue manteniendo cargada.

c) Se producen entre 40 y 100 rayos en cada segundo, que transportan una carga de -20 C.

$$I_{\text{rayos mínimo}} = \dot{n}Q = 40 \frac{1}{\text{s}} (20 \text{ C}) = 800 \text{ A}$$

$$I_{\text{rayos máxima}} = \dot{n}Q = 100 \frac{1}{\text{s}} (20 \text{ C}) = 2000 \text{ A}$$

Los rayos están transfiriendo una corriente equivalente de 800 a 2000 A hacia la Tierra que compensa la corriente de buen tiempo que "escapa" de la misma.

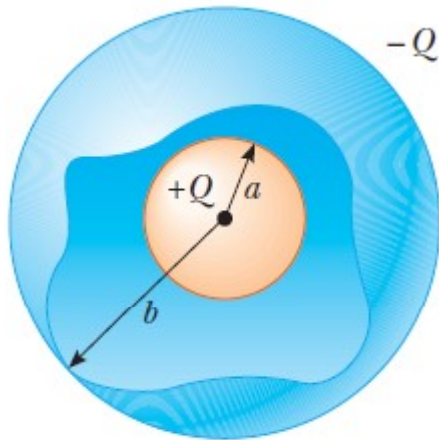




## EJEMPLO: Ejercicio 2.1.15

d) Realiza un modelo de capacitor para las condiciones de buen tiempo y determina el valor de su capacitancia. ¿Podrías realizar otro modelo de capacitor para la situación de una nube de tormenta y el suelo?

d) Para buen tiempo realizo un modelo de capacitor esférico. Habíamos visto que:



$$C = \frac{ab}{k_E (b - a)}$$

$$C = \frac{ab}{k_E (b - a)} = \frac{4\pi\epsilon_0 ab}{(b - a)} = \frac{4\pi\epsilon_0 R(R + d)}{d}$$

$$\frac{4\pi(8,85 \times 10^{-12})(6371 \times 10^3)(6421 \times 10^3)}{50 \times 10^3} = 9,10 \times 10^{-2} \text{ F}$$

Si modelo a la Tierra como un capacitor plano:

$$(8,85 \times 10^{-12}) \frac{4\pi(6,371 \times 10^6)^2}{50 \times 10^3} = 90,3 \times 10^{-3} \text{ F}$$

$$C_{plano} = \epsilon \frac{A}{d} = \epsilon \frac{4\pi R^2}{d} =$$

Con ambos modelos obtengo que la capacitancia vale aprox.:  **$C = 9,0 \times 10^{-2} \text{ F}$**

Sin embargo, esto es sólo una estimación, considerando que el medio entre las placas es aislante, lo cual sabemos que no lo es, ya que hay una corriente continua entre las placas...



## EJEMPLO: Ejercicio 2.1.15

La ventaja del modelo plano, es que me permite usarlo para la situación de mal tiempo, ya que la tormenta es local.

Podemos usar los datos correspondiente a la tormenta: valor del campo eléctrico, distancia de la nube a la superficie, área de la nube...

