

# VULNERABILIDAD DE LA RED ESPAÑOLA DE TRANSPORTE ELÉCTRICO DE ALTA TENSIÓN ANTE LAS CORRIENTES INDUCIDAS GEOMAGNÉTICAMENTE

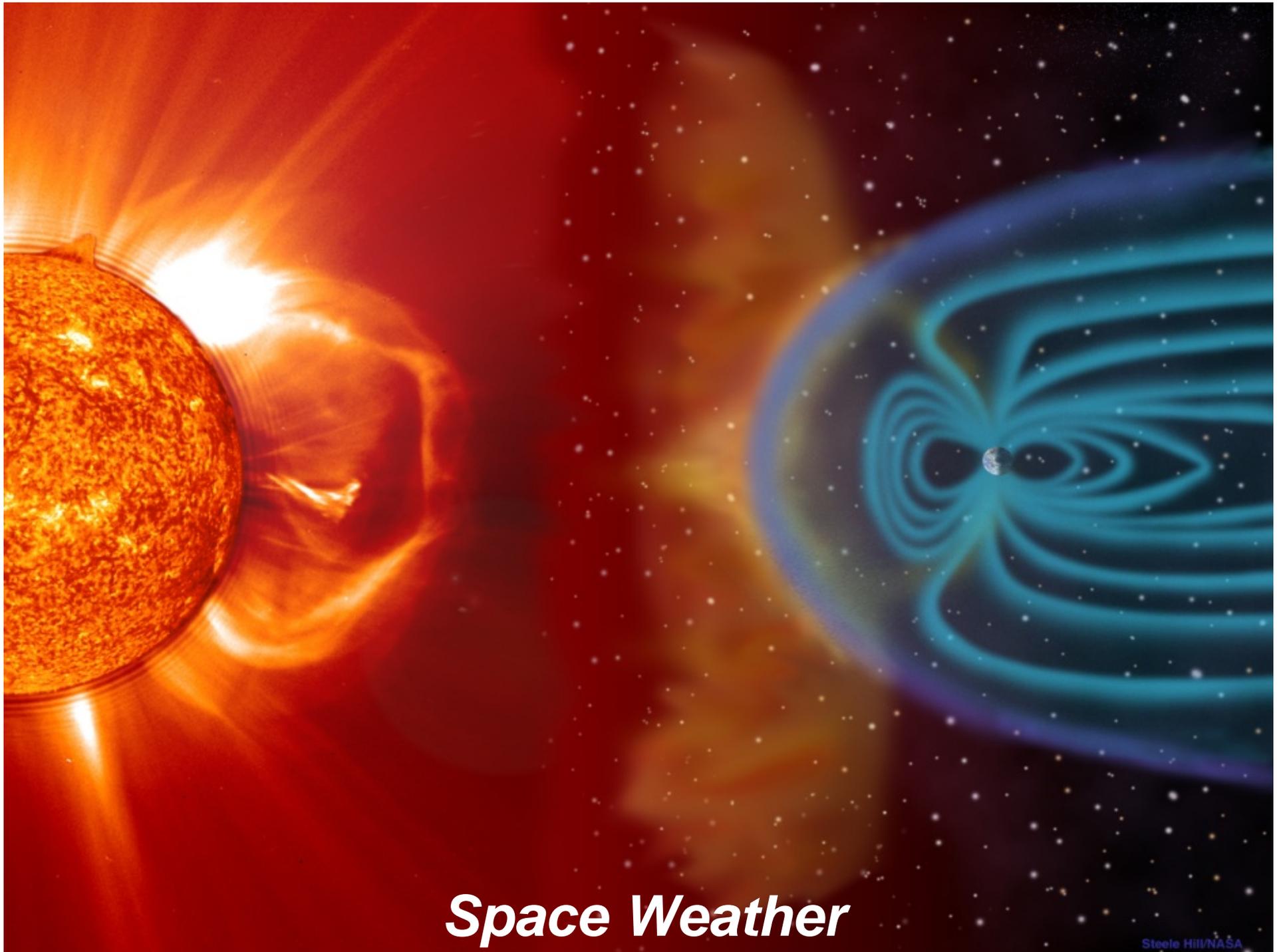


J. Miquel Torta  
Observatori de l'Ebre, CSIC – URL

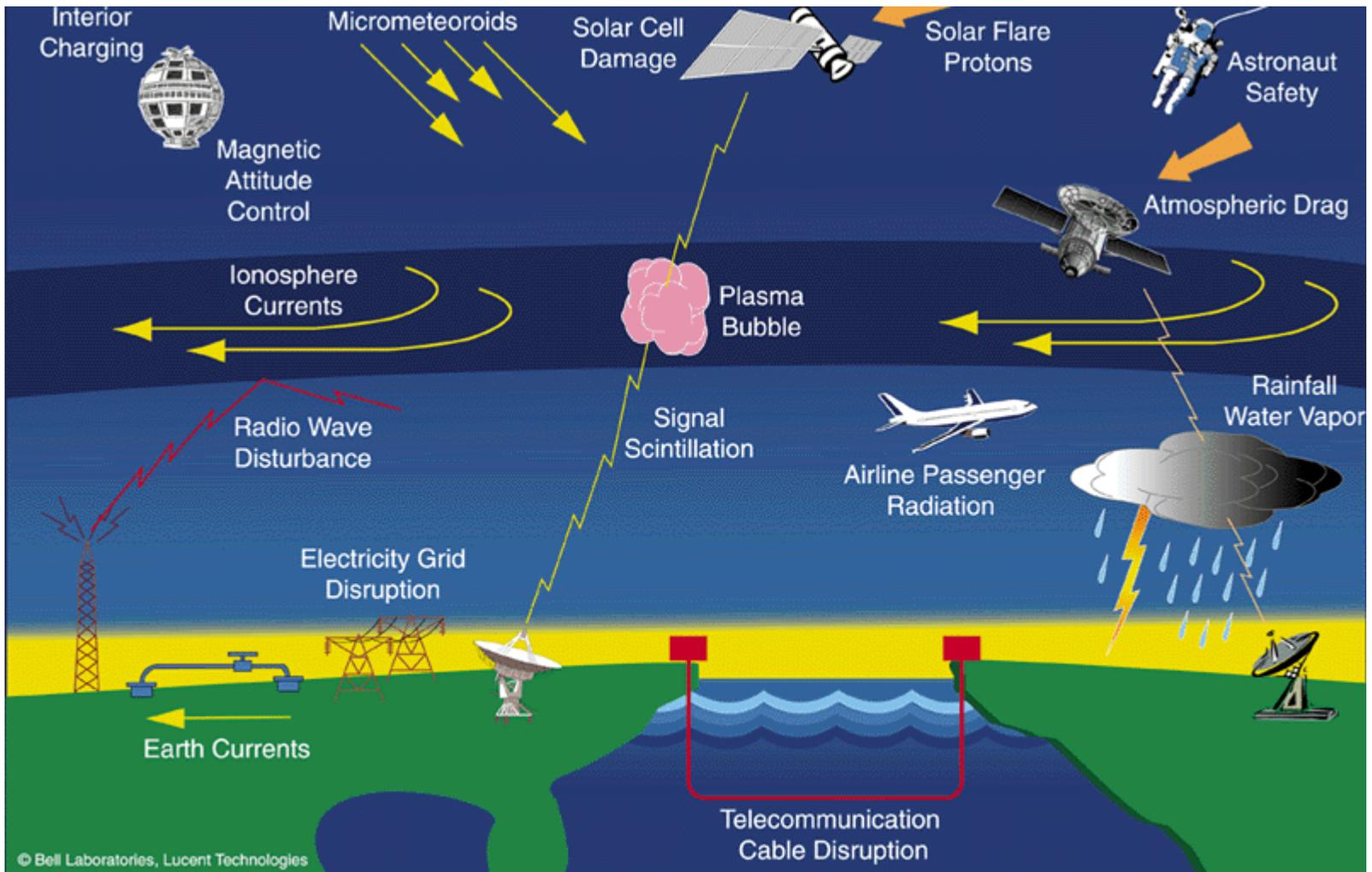
*jmtorta@obsebre.es, <http://www.obsebre.es>*

*Proyecto financiado por:*





# *Space Weather*



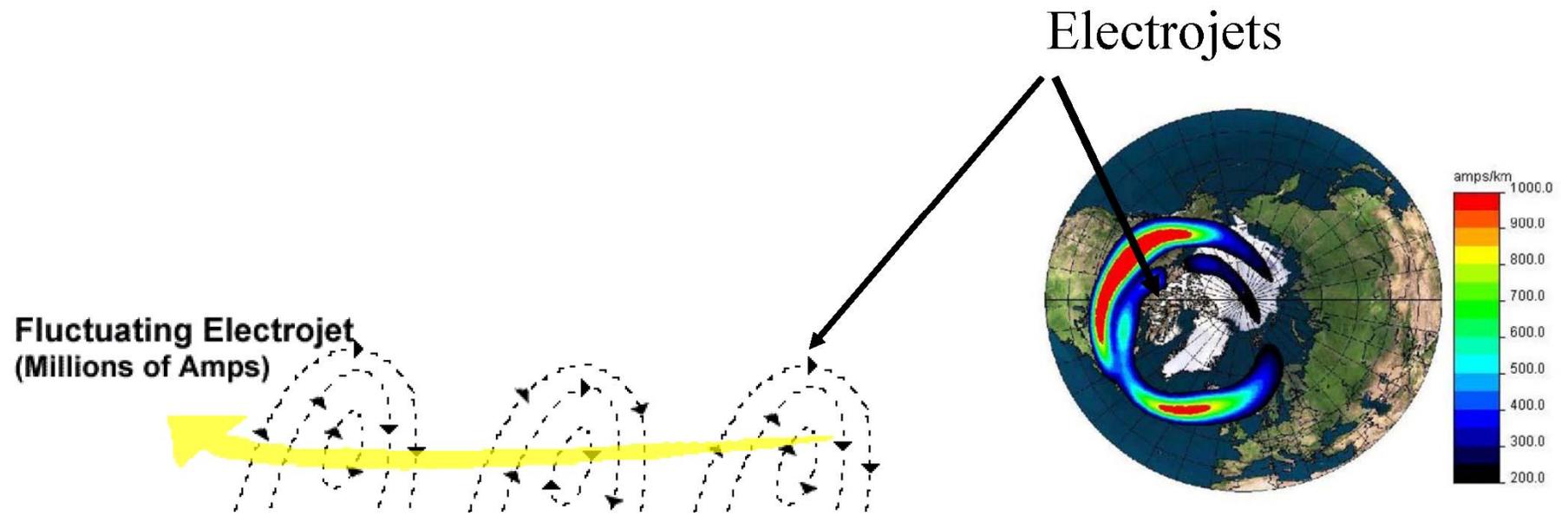
**The effects of magnetic storms - what scientists call space weather - extend from the ground to geostationary orbit and beyond.**

**Corrientes inducidas geomagnéticamente (GICs) en la superficie de la Tierra en:**

- Redes de transporte eléctrico
- Oleoductos y gasoductos
- Cables de telecomunicaciones
- Equipamientos ferroviarios

Bajo condiciones perturbadas del Sol, el grado de ionización en la magnetosfera y en la ionosfera aumenta y se produce un aumento significativo de sus sistemas de corrientes eléctricas, que son la fuente de los campos magnéticos en la superficie de la Tierra.

Los electrojets aurorales pueden alcanzar valores de MA



Como consecuencia de la ley de Faraday, asociadas a las variaciones en el tiempo del campo magnético se induce un campo eléctrico en la superficie de la Tierra. Este campo eléctrico actúa como una fuente de voltaje a través de las redes de transporte eléctrico.

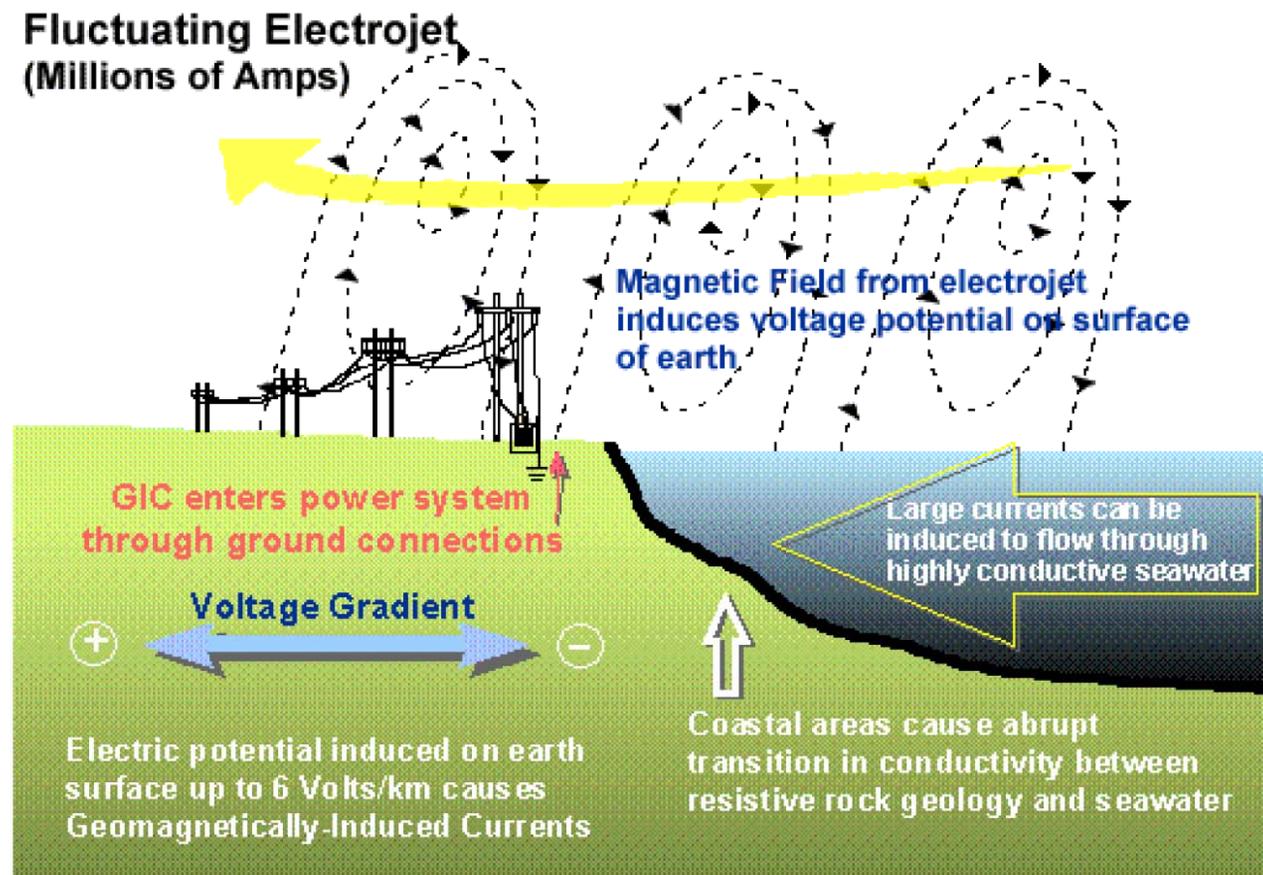
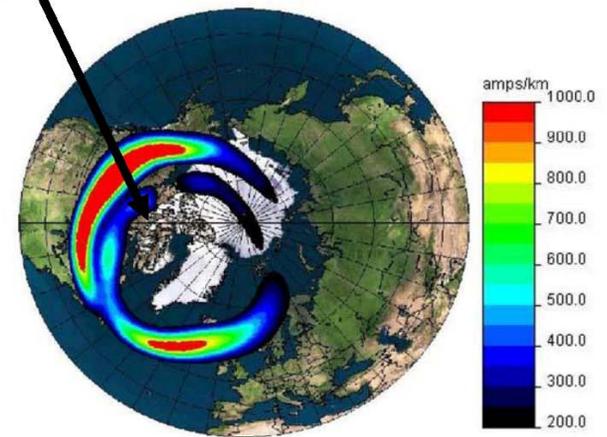


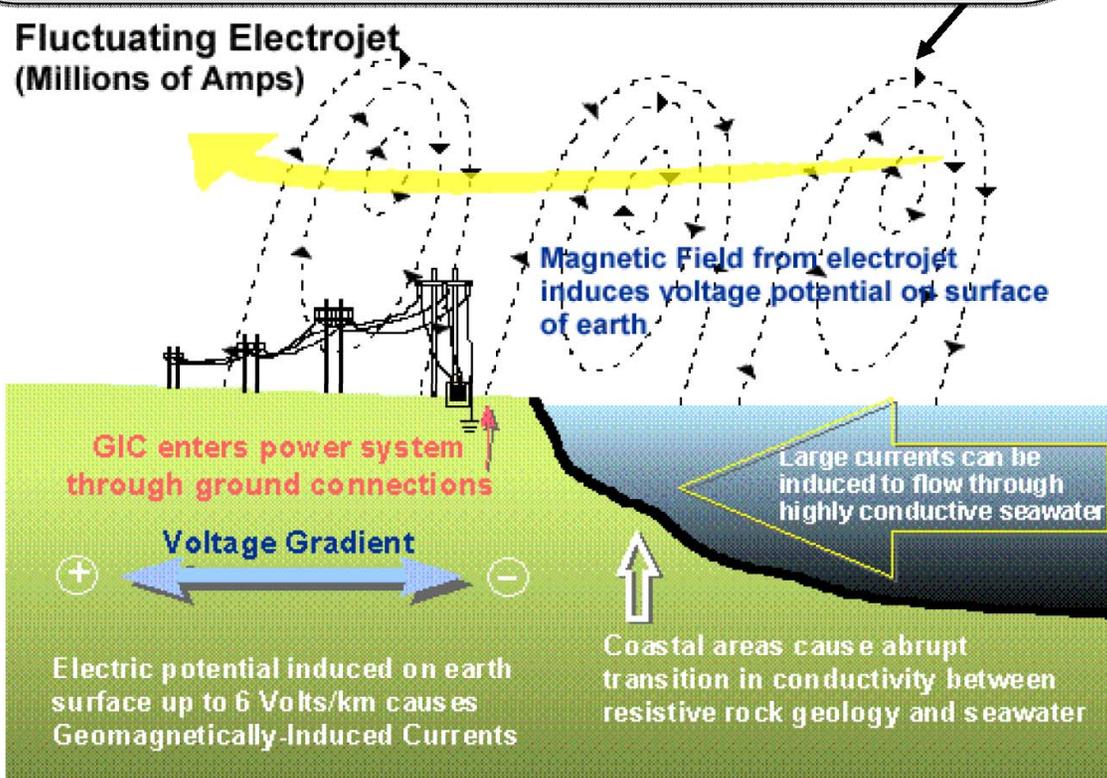
Figure: John Kappenman (Metatech)

A los campos em asociados con el electrojet auroral se les suma el efecto de las corrientes eléctricas inducidas en la Tierra. Y, a su vez, las corrientes inducidas en los neutros de los transformadores dependen de la topología de la red y las características de los mismos.

### Electrojets



**Fluctuating Electrojet  
(Millions of Amps)**



### 3D Conducting Earth

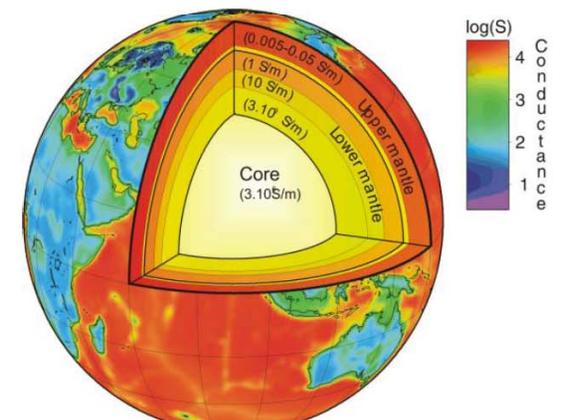


Figure: Alan Thomson (BGS)

# Un problema a resolver en dos pasos:

Obtención del campo geoelectrico a partir de los cambios en el campo geomagnetico (Ley de Faraday):

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{A}$$

$$\left( \nabla \times \mathbf{E} = - \frac{d\mathbf{B}}{dt} \right)$$

un problema puramente geofísico, independiente del sistema tecnológico

Cálculo de las GICs debidas a un campo geoelectrico en un sistema conductor cuya topología y resistencias son conocidas. **Es un problema ingenieril**

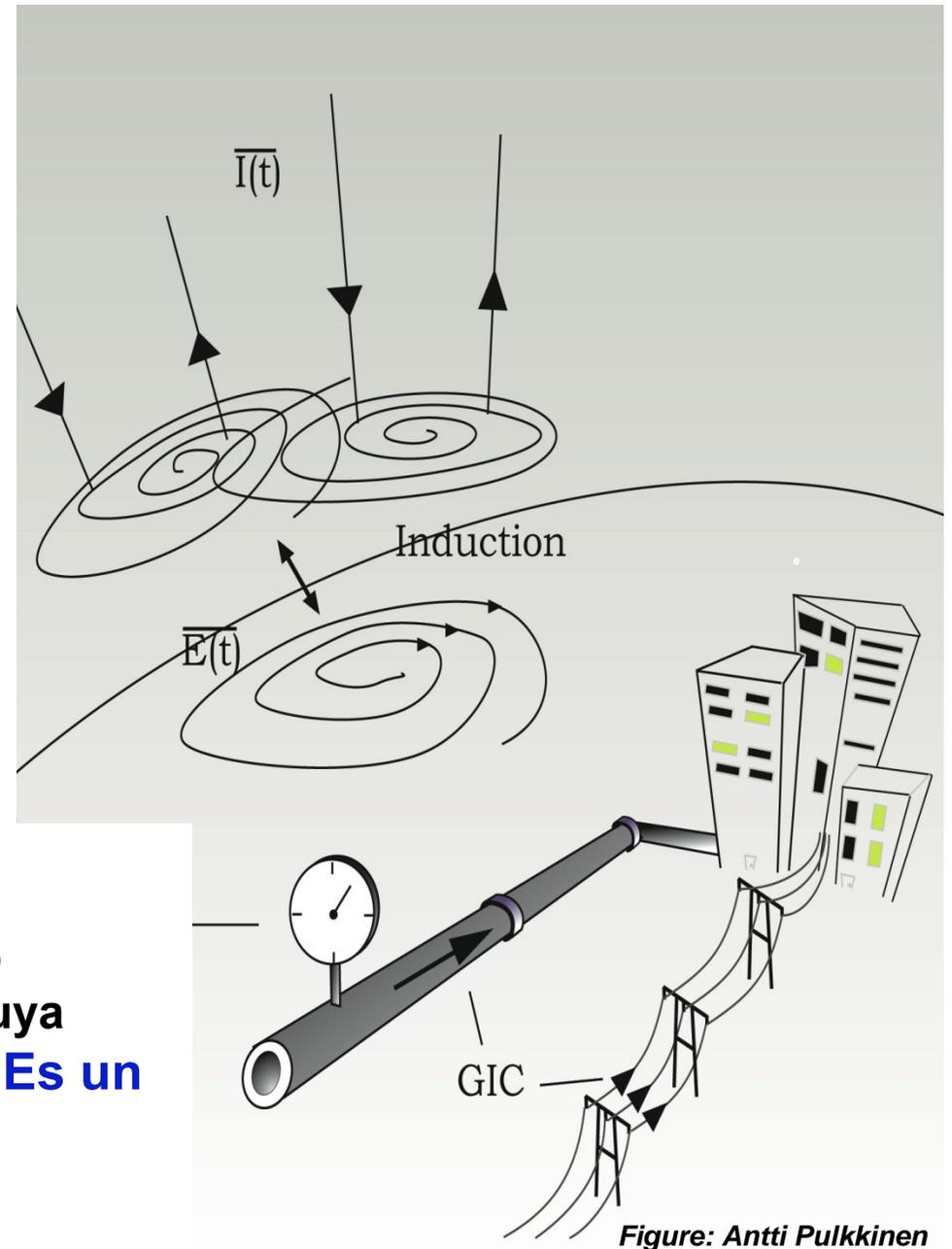


Figure: Antti Pulkkinen

# Un problema a resolver en dos pasos:

## 1) Problema geofísico

- **Asumiendo una onda plana**

- Los campos eléctricos y magnéticos son horizontales y espacialmente constantes en la superficie de la Tierra.

- Si la Tierra es uniforme:

$$E_{x,y}(t) = \pm \frac{1}{\sqrt{\pi\mu_0\sigma}} \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sqrt{t-t'}} \frac{dB_{y,x}(t')}{dt'} dt'$$

- El campo eléctrico está afectado por los valores pasados de la variación del campo magnético.

- La integral se puede obtener de forma numérica:

$$E(t_n) = \frac{2}{\sqrt{\pi\mu_0\sigma\Delta}} (R_{n-1} - R_n - \sqrt{m}b_{n-m})$$

donde:  $b_n = B_n - B_{n-1}$        $R_n = \sum_{i=n-m+1}^n b_i \sqrt{n-i+1}$

$\Delta$  = intervalo de muestreo       $m$  = tiempo de integración

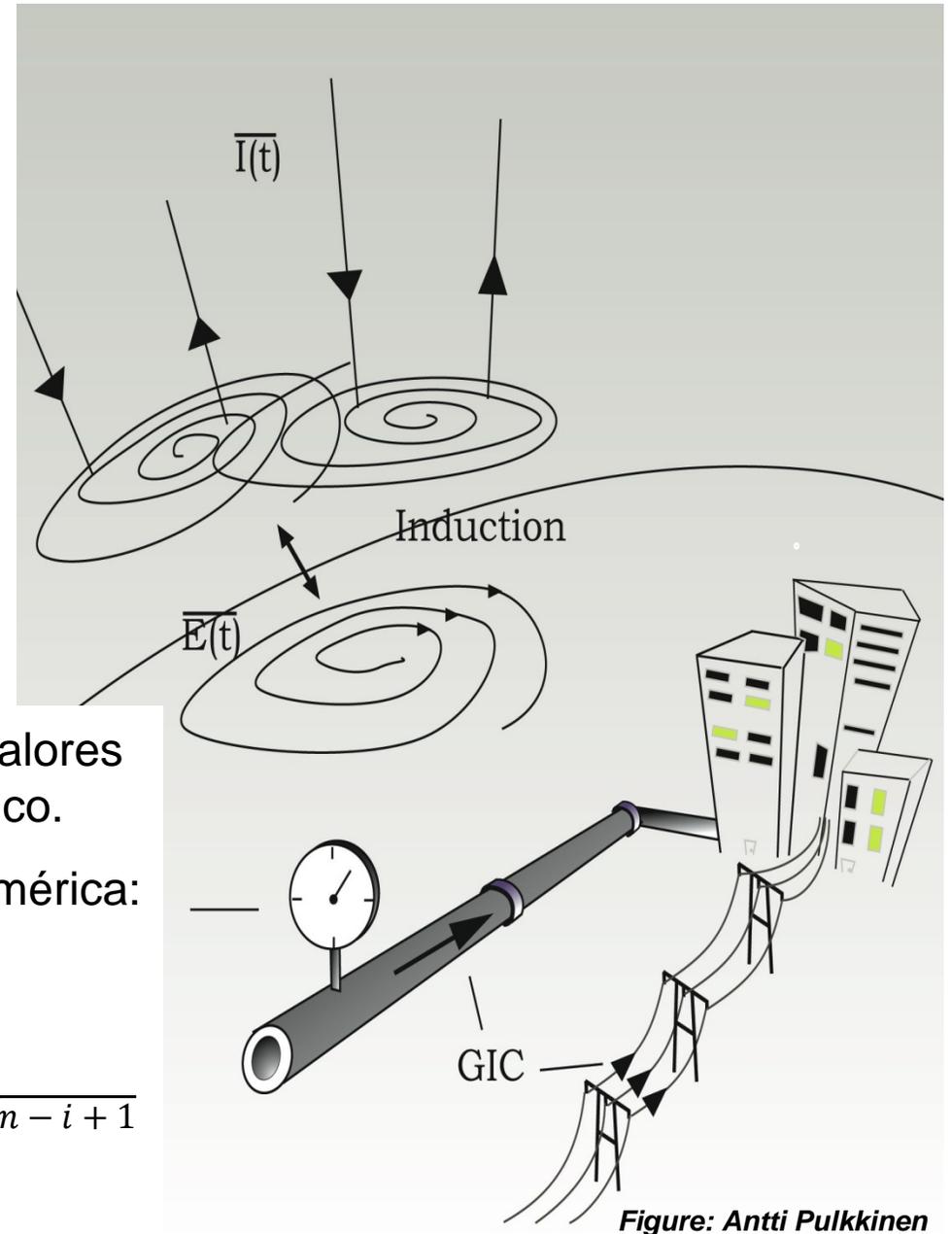
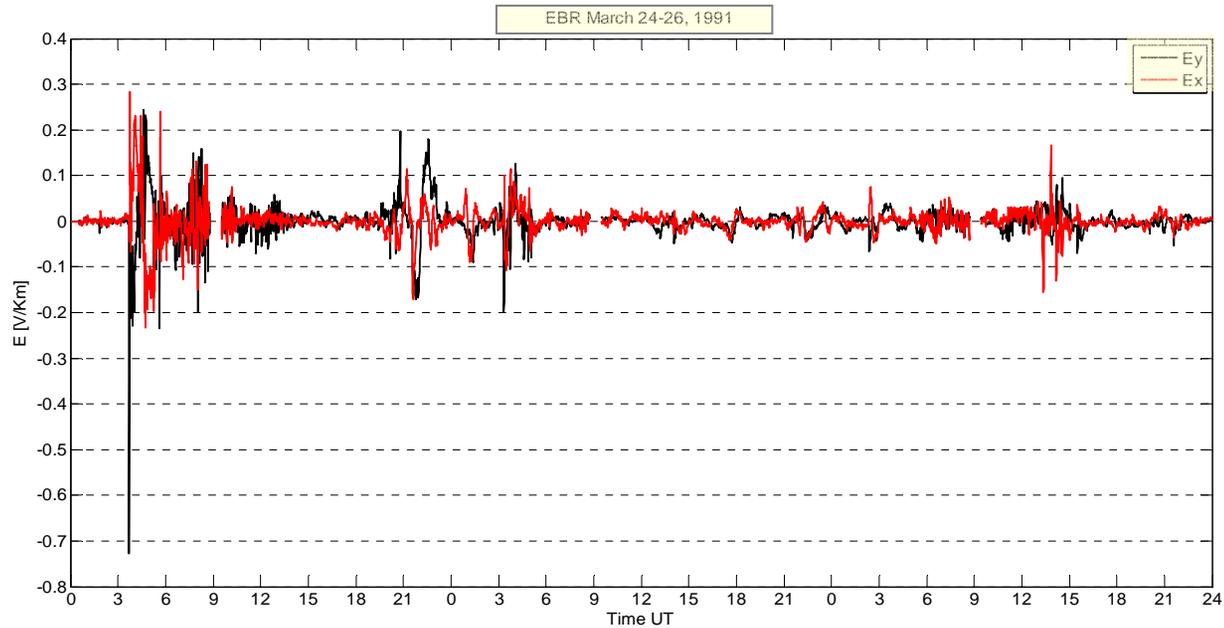
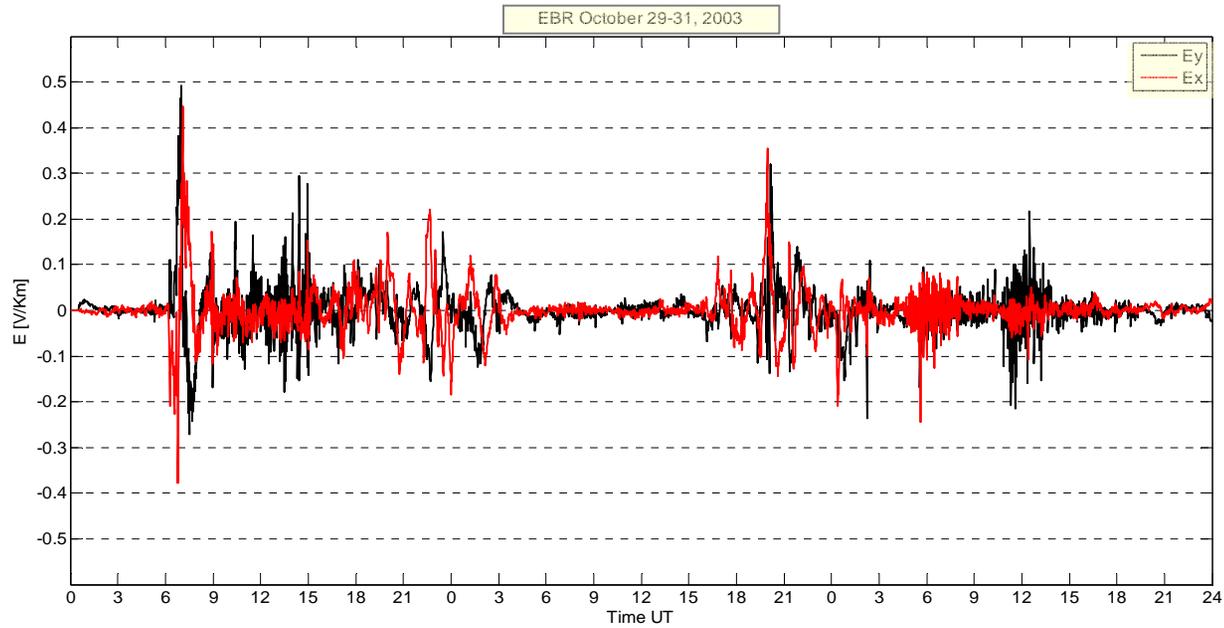


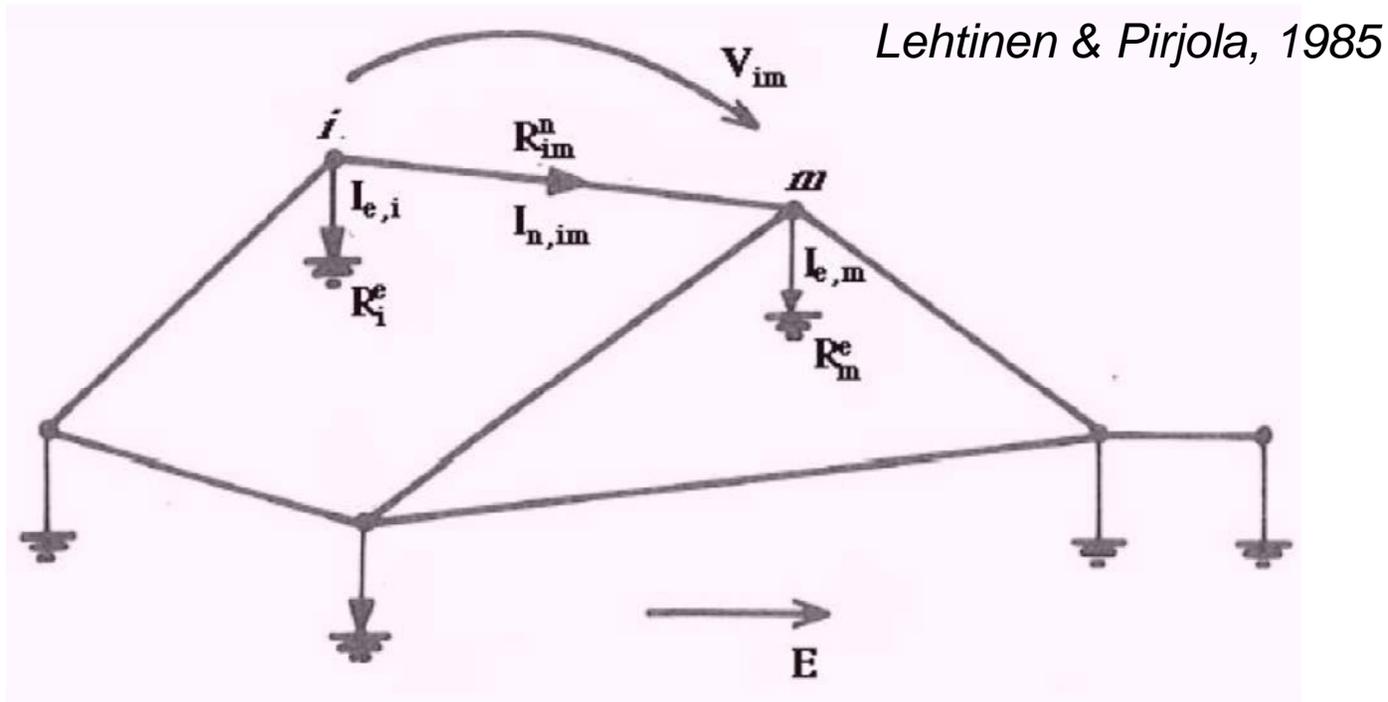
Figure: Antti Pulkkinen

# Componentes Este ( $E_y$ ) y Norte ( $E_x$ ) del campo geoelectrico ( $\sigma = 10^{-3}$ S/m)



# Modelización de la red eléctrica:

- Circuito en CC. aplicando las leyes de Ohm y de Kirchhoff
- Red dividida en nodos con puesta a tierra → **Formulación matricial**



GIC que fluye hacia tierra en cada nodo

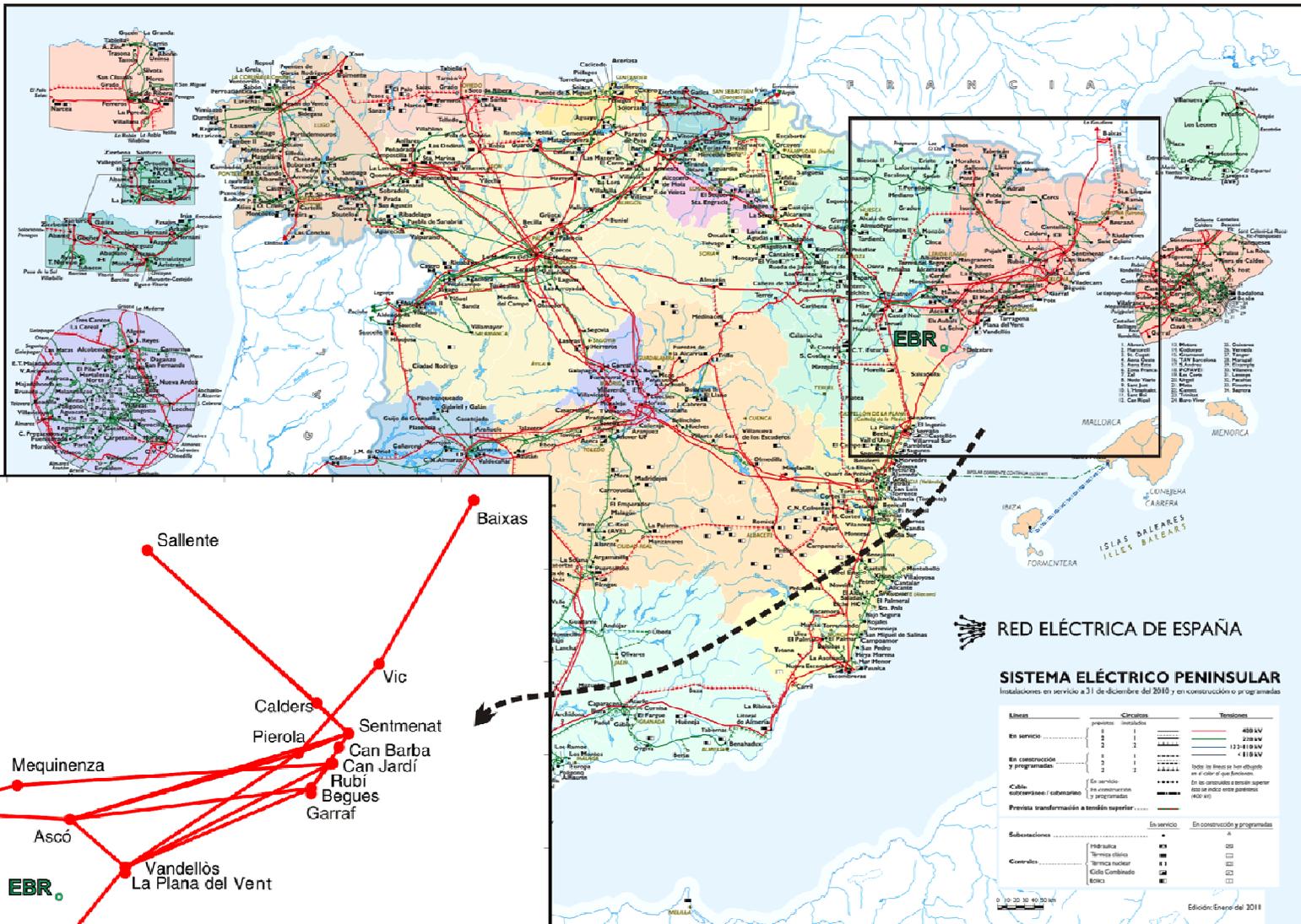
$$I_i = - \sum_{j \neq i} \frac{V_{ij}^o}{R_{ij}} - \sum_j Y_{ij} U_j^{cor}$$



$$\mathbf{I} = (\mathbf{1} + \mathbf{YZ})^{-1} \mathbf{J}$$

donde:  $V_{ij}^o = \int_{L_{ij}} \mathbf{E}^o \cdot d\mathbf{l}$ ,  $U_j^{cor} = \sum_{i=1}^m Z_{ji} I_i$

$$Y_{ij} = \begin{cases} \frac{-1}{R_{ij}}, & i \neq j \\ \sum_{k \neq i} \frac{1}{R_{ik}}, & i = j \end{cases}, \quad Z_{ij} = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ \sum_{k \neq i} R_{ik}^e, & i = j \end{cases}, \quad J_i = \sum_{j \neq i} \frac{V_{ij}^o}{R_{ij}}$$



**RED ELÉCTRICA DE ESPAÑA**

**SISTEMA ELÉCTRICO PENINSULAR**

Instalaciones en servicio a 31 de diciembre del 2010 y en construcción o programadas

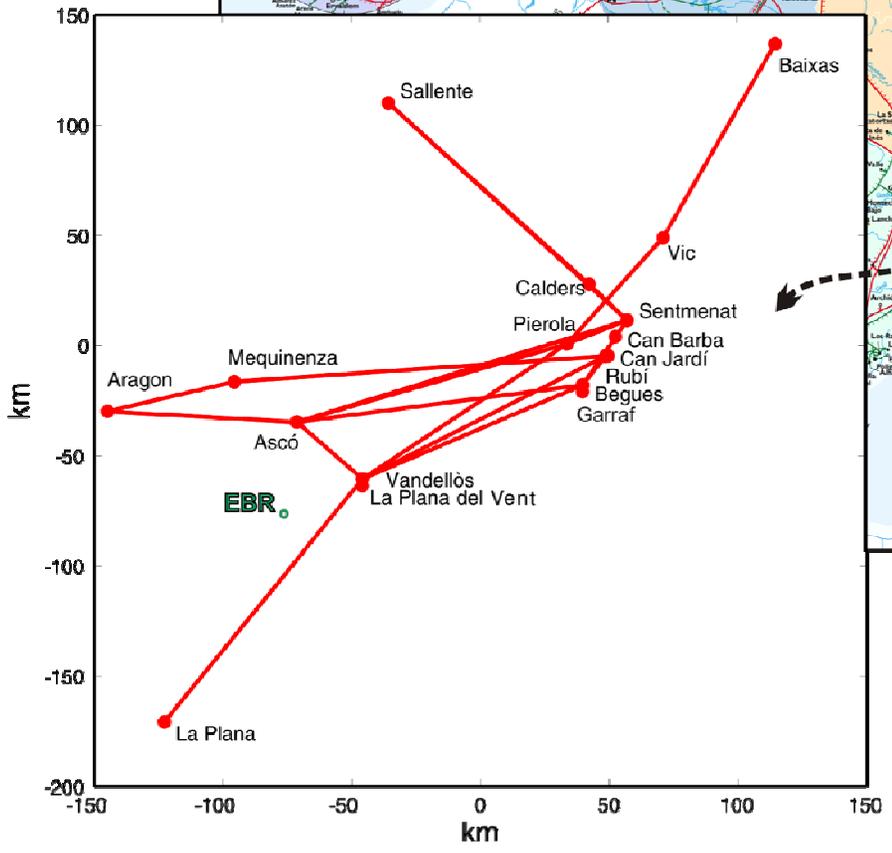
Líneas	Circuitos		Tensiones	
	En servicio	En construcción y programadas	En servicio	En construcción y programadas
En servicio	1	1	400 kV	275 kV
En construcción y programadas	2	2	132-110 kV	66 kV

Todas las líneas se han dibujado en el color de que funcionan.

Cables	Tensiones superiores a 110 kV		
	En servicio	En construcción y programadas	
Subestaciones	En servicio	En construcción y programadas	
Central:	PSB nuclear	■	□
	Térmica clásica	■	□
	Térmica nuclear	■	□
	Gas Combinado	■	□
	Hidro	■	□

0 10 20 30 40 50 km

Edición: Enero del 2011



# Datos utilizados para calcular las matrices de admitancia de la red y de impedancia a tierra para el cálculo de las GIC:

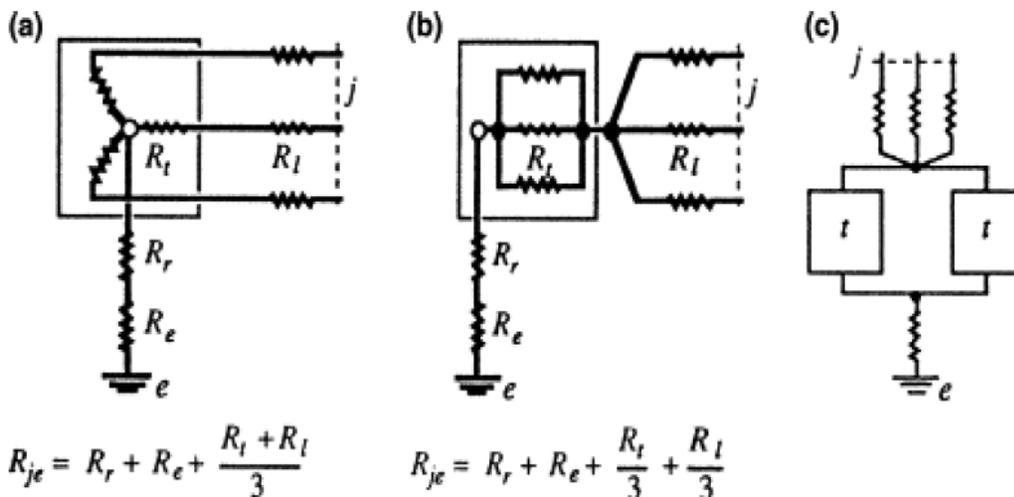
- Posiciones geográficas de cada subestación y conexiones

- Resistencias de las líneas

Resistencia de la línea, longitud, núm. de conductores/fase y núm. de líneas

- Resistencias de cada subestación

Suma de las resistencias de los transformadores con todas las fases en paralelo y resistencias de las reactancias.

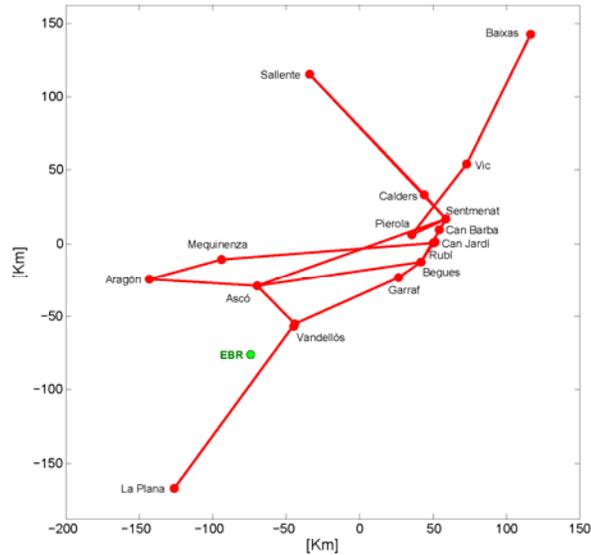


*Posibles configuraciones de transformadores*



*Transformador en la subestación de Vandellòs*

# Modelización de las GICs



## Modelo de la red eléctrica

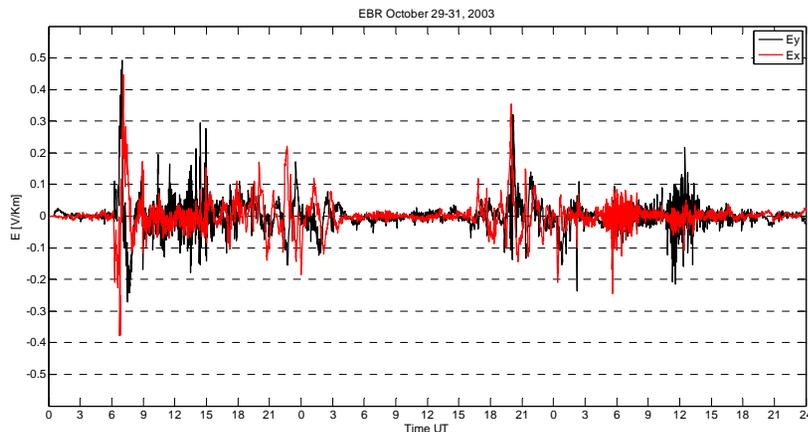
Matriz de admitancia de la red      Matriz de impedancias a tierra

GIC →

$$\mathbf{I} = (\mathbf{1} + \mathbf{YZ})^{-1} \mathbf{J}$$

Proporcional a:

**Fuente: Campo eléctrico a partir de los magnetogramas del Observatorio del Ebro**



# Combinación de los apartados de Geofísica y de Ingeniería Eléctrica:

## 1) CALCULO DE LAS GIC's EN CADA NODO

Si el campo eléctrico se considera espacialmente constante en la región de análisis, de este modo el cálculo de las GIC's en cada nodo es directo:

$$I_{GIC}(t) = aE_x(t) + bE_y(t)$$

donde **a** y **b** son parámetros constantes [ A Km / V ] para cada nodo que dependen de la geometría y de las resistencias de la red. Se obtienen mediante la aplicación de campos de 1 V / Km en las direcciones N y E, respectivamente.

Station	<i>a</i>	<i>b</i>
ASCÓ	2.87	-81.14
BEGUES	-9.07	59.57
CALDERS	12.46	26.22
CAN BARBA	-16.62	51.81
CAN JARDÍ	12.80	44.85
GARRAF	-11.29	26.02
MEQUINENZA	6.86	-26.76
PIEROLA	-45.60	-22.79
PLANA DEL VENT	-31.78	4.54
RUBÍ	19.33	64.96
SALLENTE	83.90	-63.63
SENTMENAT	9.52	102.88
VANDELLÒS	-25.57	7.14
VIC	-8.45	2.22

*Constantes válidas para finales de octubre de 2011*

## 2) CALCULO DE LAS GIC's EN CADA TRANSFORMADOR

La corriente total que fluye en el nodo se comparte entre sus neutros. Las constantes  $a_T$  y  $b_T$  se derivan de las constantes  $a$  y  $b$  utilizando el divisor de corriente correspondiente:

$$I_{GIC}(t) = a_T E_x(t) + b_T E_y(t)$$

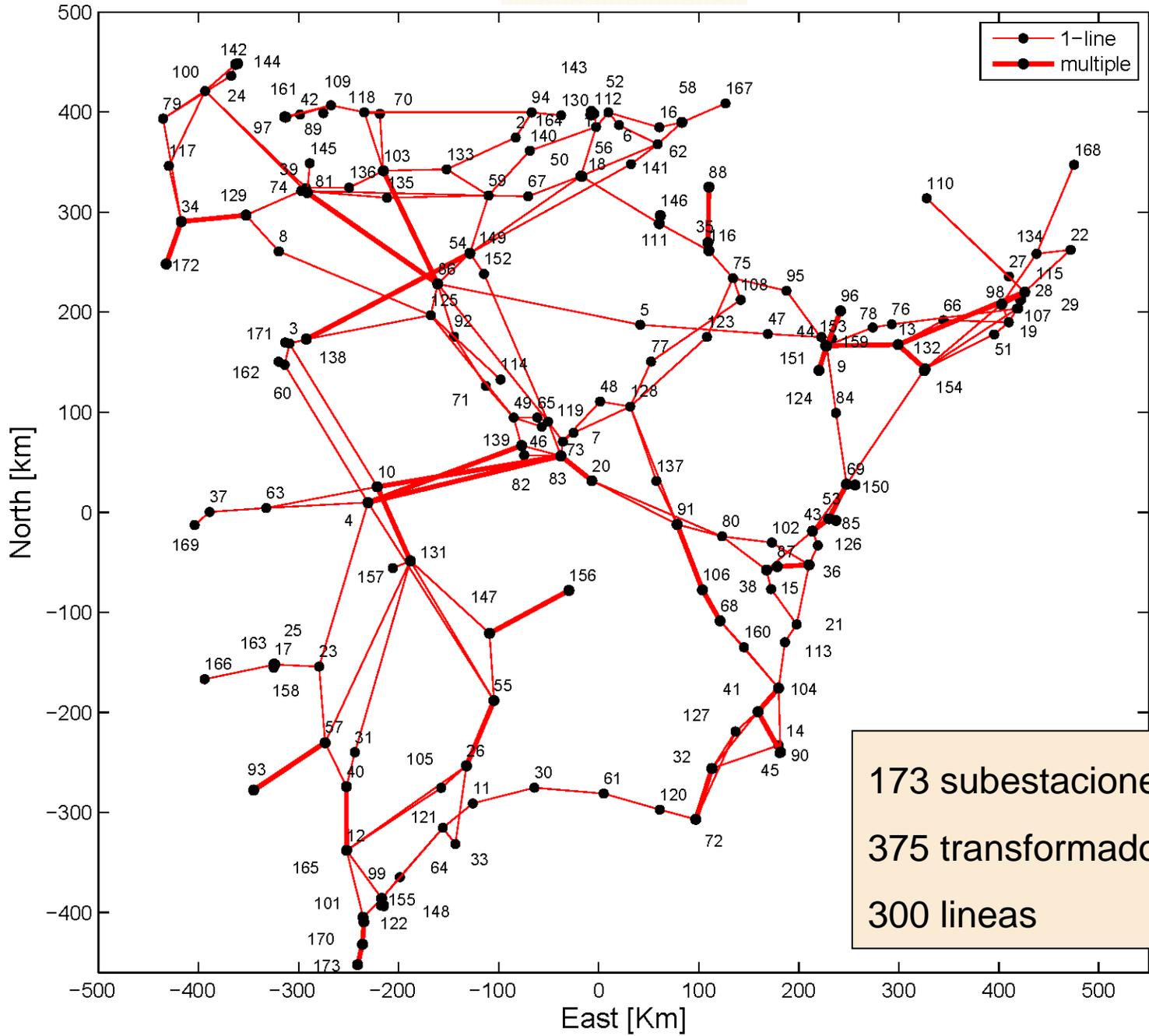
Las GICs dependen de la longitud de las líneas que confluyen en ese nodo y, a su vez, del número y resistencias de los transformadores.

**Resultados publicados en:**

**Torta et al. (2012):** Geomagnetically induced currents in a power grid of northeastern Spain, *Space Weather*, **10**, S06002, doi:10.1029/2012SW000793

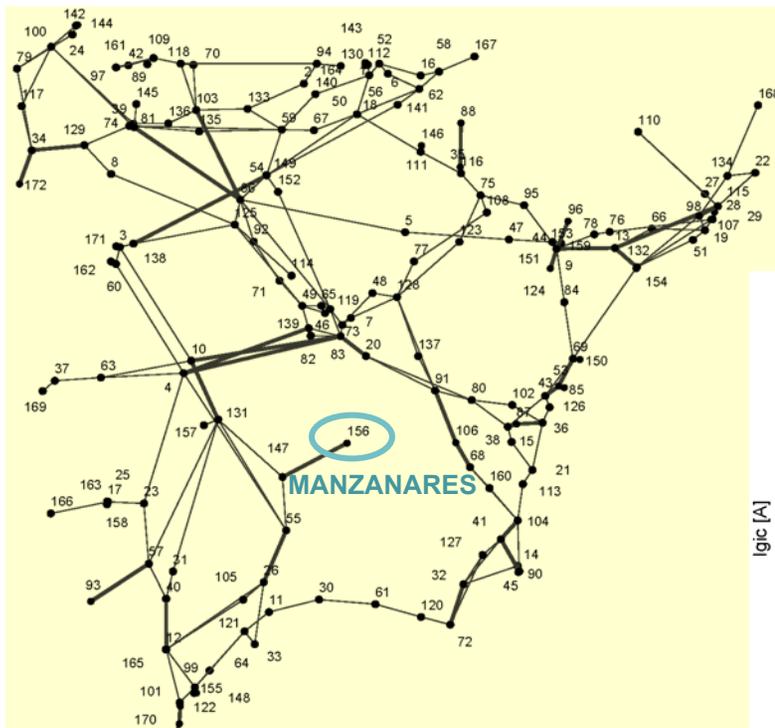
Station	Number of trafos	Transformer	a	b	$a_T$	$b_T$
ASCÓ	3	TG1	2.87	-81.14	1.22	-34.51
		TG2			1.22	-34.51
		TR3			0.43	-12.12
BEGUES	2	ATR3	-9.07	59.57	-4.53	29.78
		ATR4			-4.53	29.78
CALDEERS	1	TR1	12.46	26.22	12.46	26.22
CAN BARBA	2	TR6	-16.62	51.81	-8.31	25.91
		TR7			-8.31	25.91
CAN JARDÍ	1	ATR4	12.80	44.85	12.80	44.85
GARRAF	1	TR1	-11.29	26.02	-11.29	26.02
MEQUINENZA	1	ATR2	6.86	-26.76	6.86	-26.76
PIEROLA	2	TR1	-45.60	-22.79	-22.61	-11.30
		ATR4			-22.99	-11.49
PLANA DEL VENT	2	TG1	-31.78	4.54	-15.89	2.27
		TG2			-15.89	2.27
RUBÍ	2	ATR7	19.33	64.96	10.20	34.29
		ATR8			9.13	30.67
SALLENTE	4	TG1	83.90	-63.63	21.54	-16.34
		TG2			21.20	-16.08
		TG3			20.63	-15.65
		TG4			20.52	-15.57
SENTMENAT	3	ATR2	9.52	102.88	3.12	33.72
		ATR3			3.34	36.07
		ATR4			3.06	33.09
VANDELLÒS	3	TR1	-25.57	7.14	-5.76	1.61
		TR2			-6.92	1.93
		TG1			-12.89	3.60
VIC	4	ATR1	-8.45	2.22	-1.01	0.27
		ATR2			-1.25	0.33
		ATR3			-1.25	0.33
		ATR4			-4.95	1.30

# 400 kV network

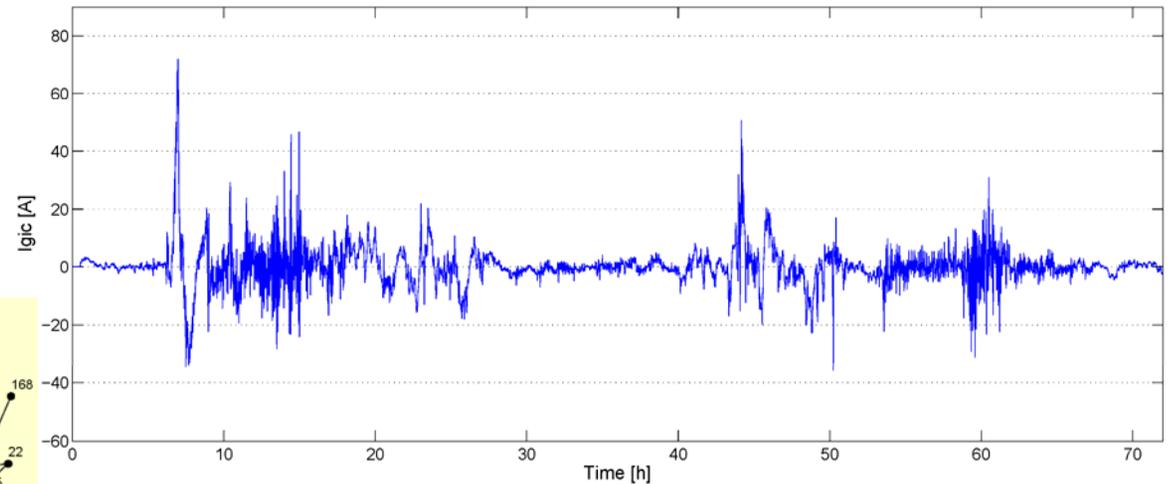


29-31 Octubre 2003 (Halloween)

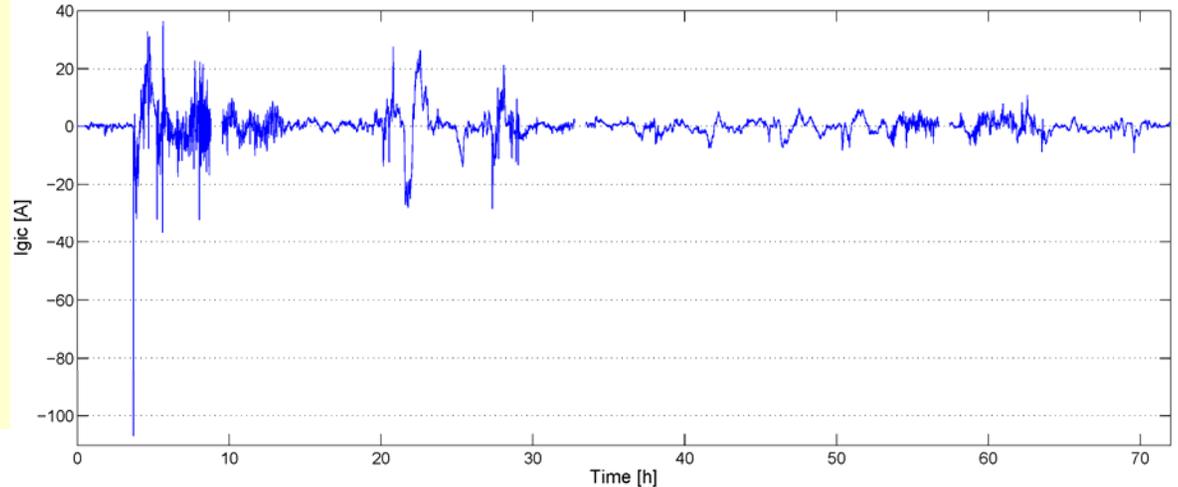
# PREDICCIÓN DE LAS GIC'S EN LOS NODOS/ TRANSFORMADORES DE LA RED



GIC-MANZANARES 29-10-2003



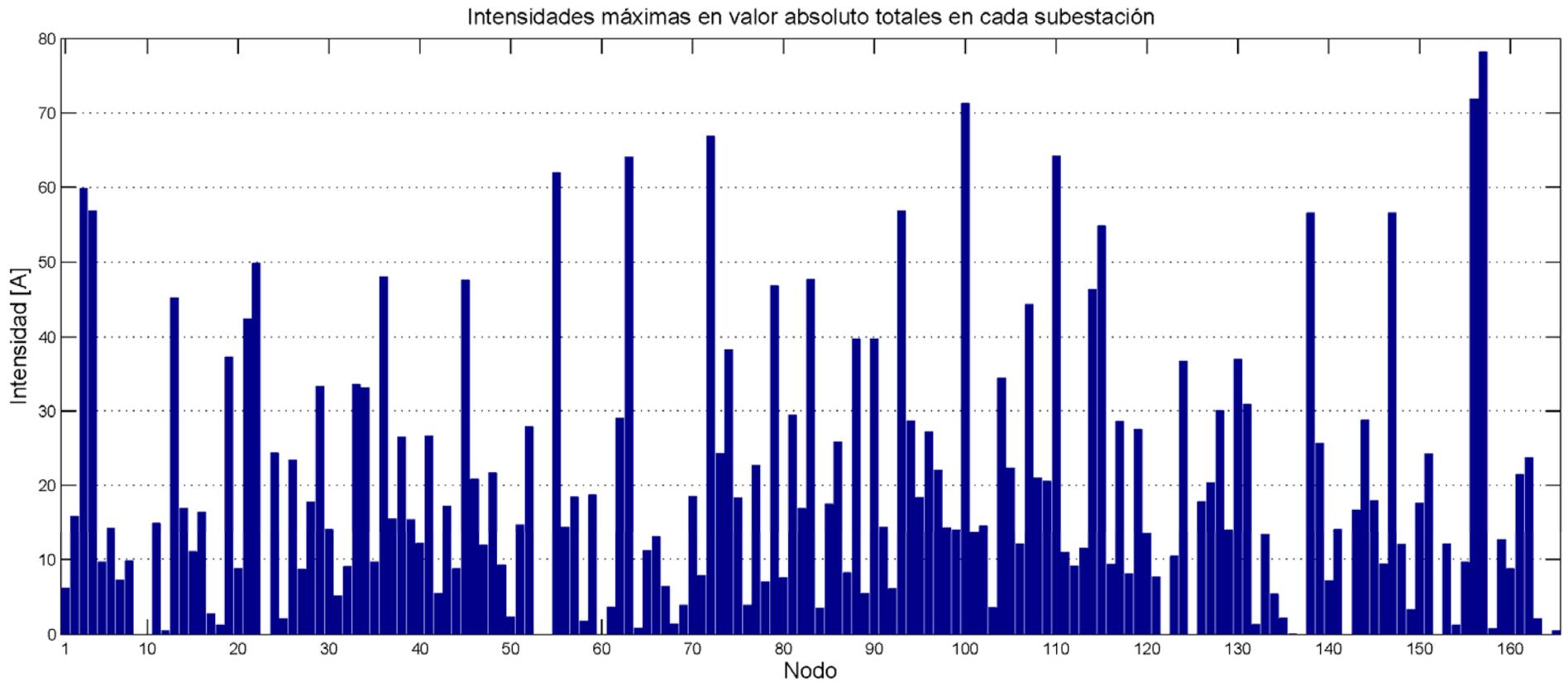
GIC-MANZANARES 24-03-1991



24-26 Marzo 1991 (comienzo más abrupto)

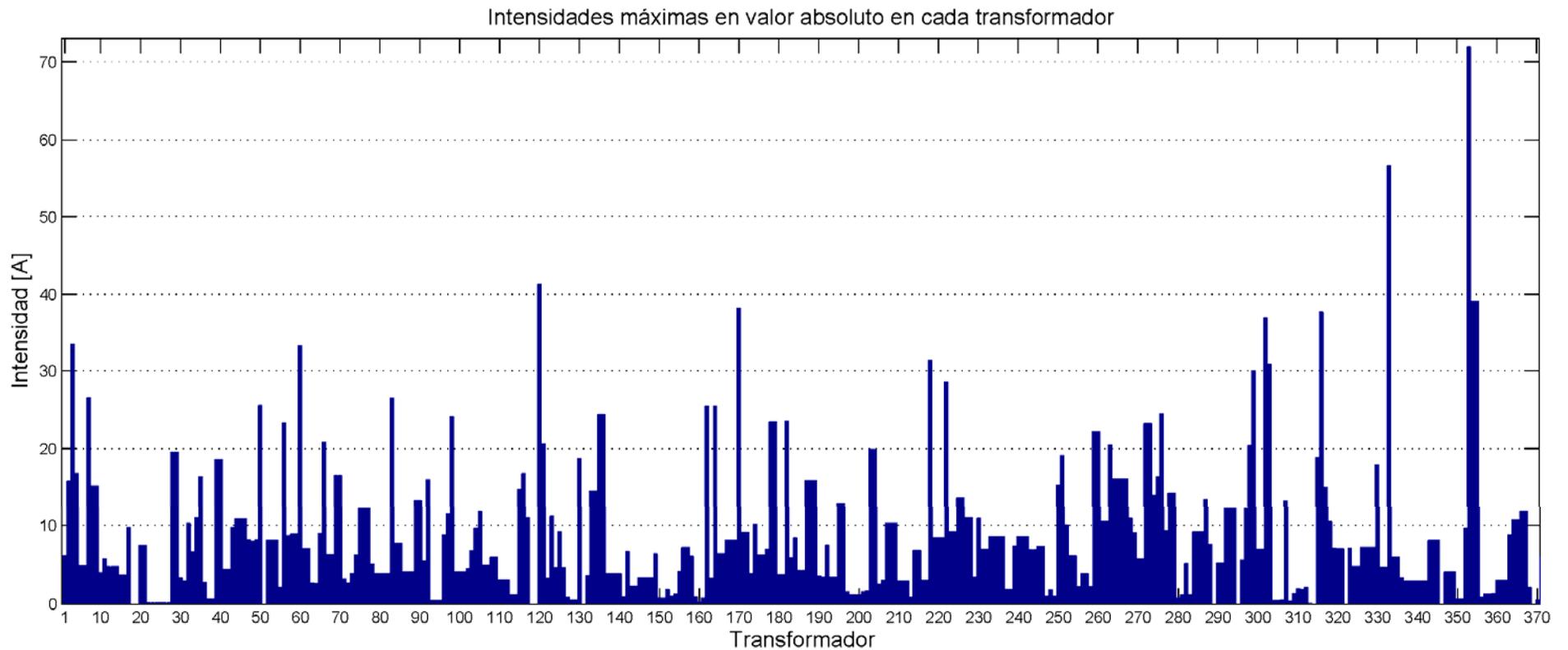
*Según la configuración actual de la red y con todos los elementos funcionando*

# CORRIENTES MÁXIMAS TOTALES EN LOS NODOS DE LA RED



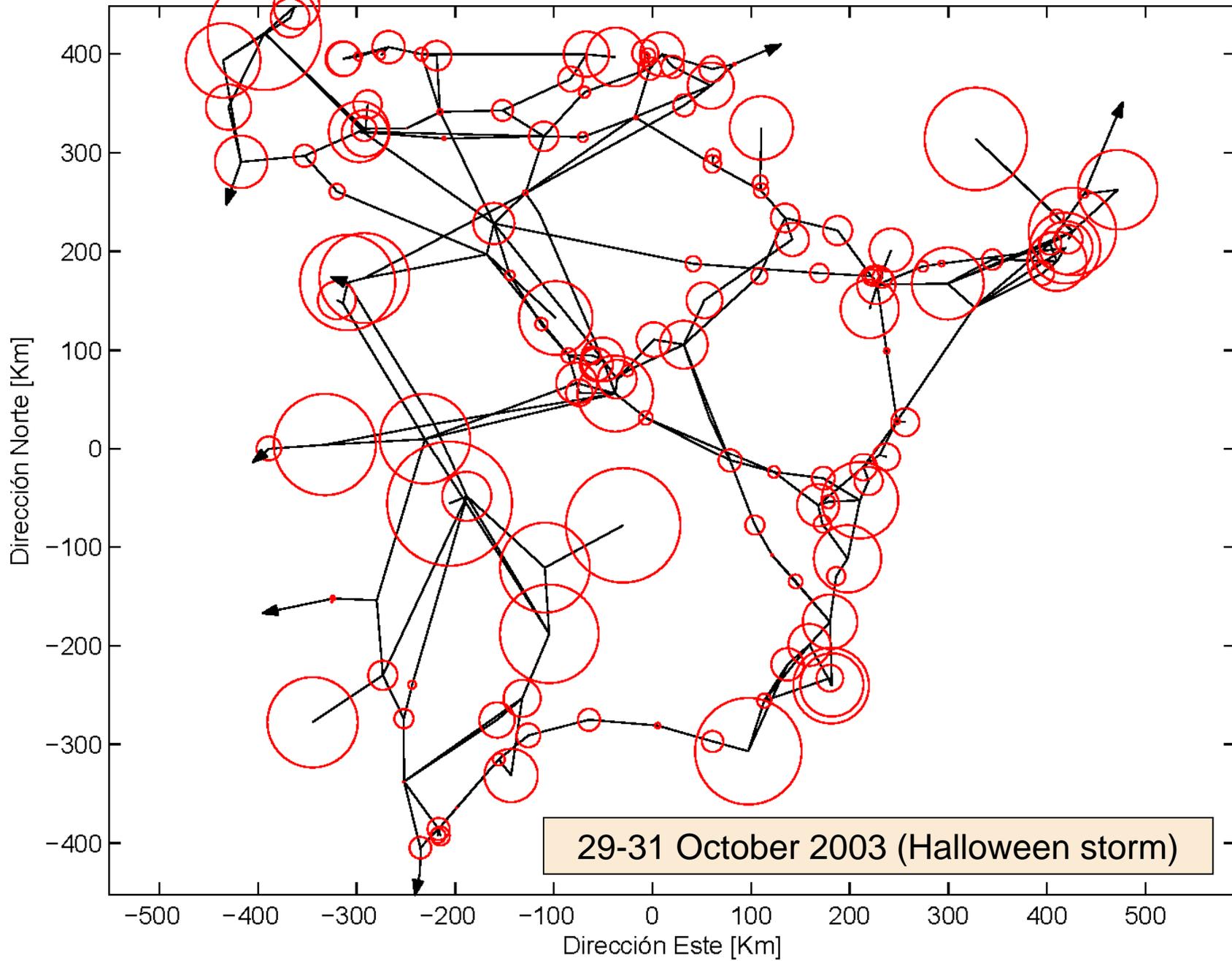
*GICs máximas totales en valor absoluto calculadas en los nodos de la red eléctrica de 400 kV durante el periodo 29-31 de Octubre de 2003*

# CORRIENTES MÁXIMAS EN LOS TRANSFORMADORES DE LA RED

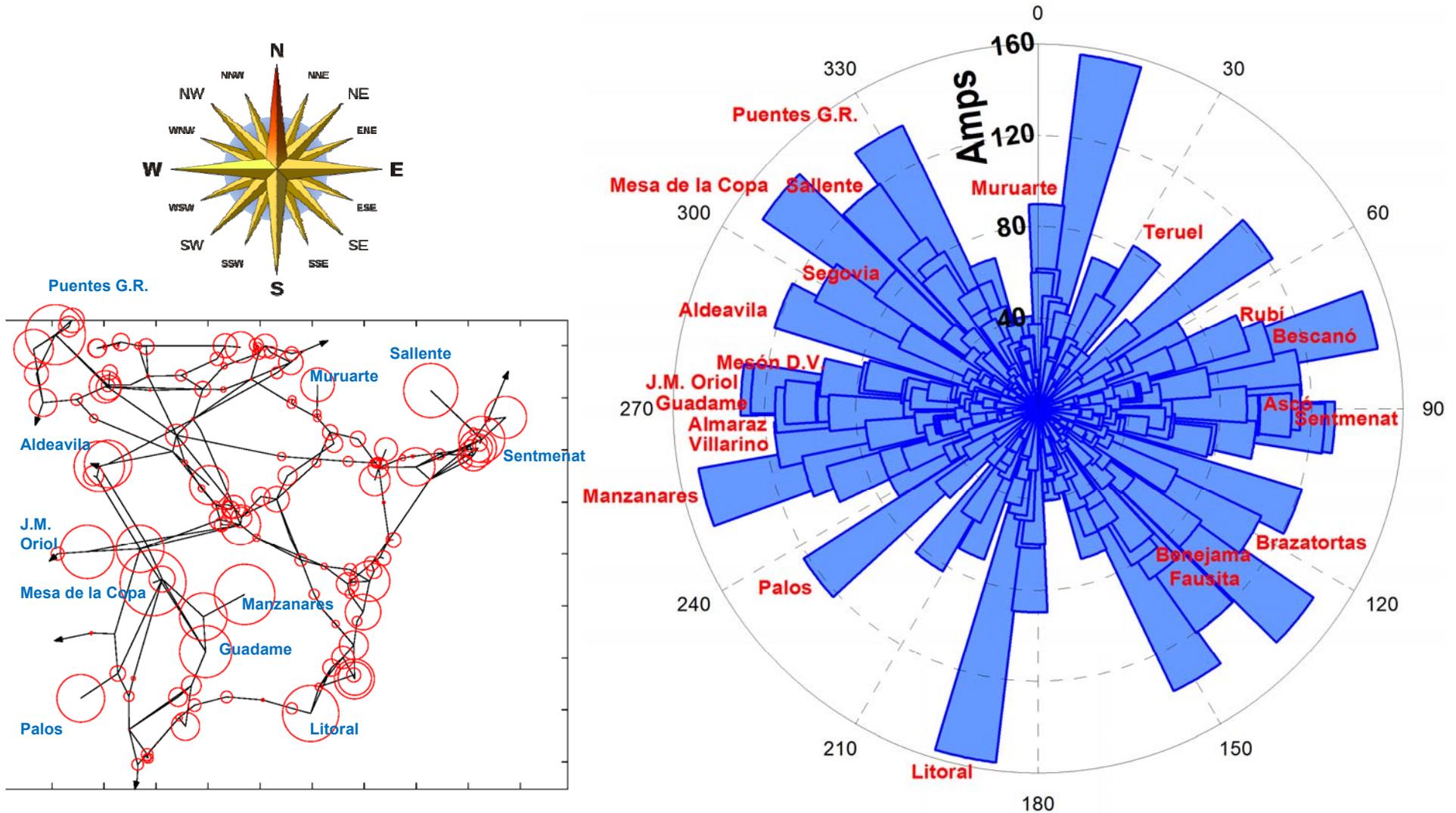


*GICs máximas totales en valor absoluto calculadas en los transformadores de la red eléctrica de 400 kV durante el periodo 29-31 de Octubre de 2003*

GIC max = 78.199 A



# Análisis de vulnerabilidad de la red

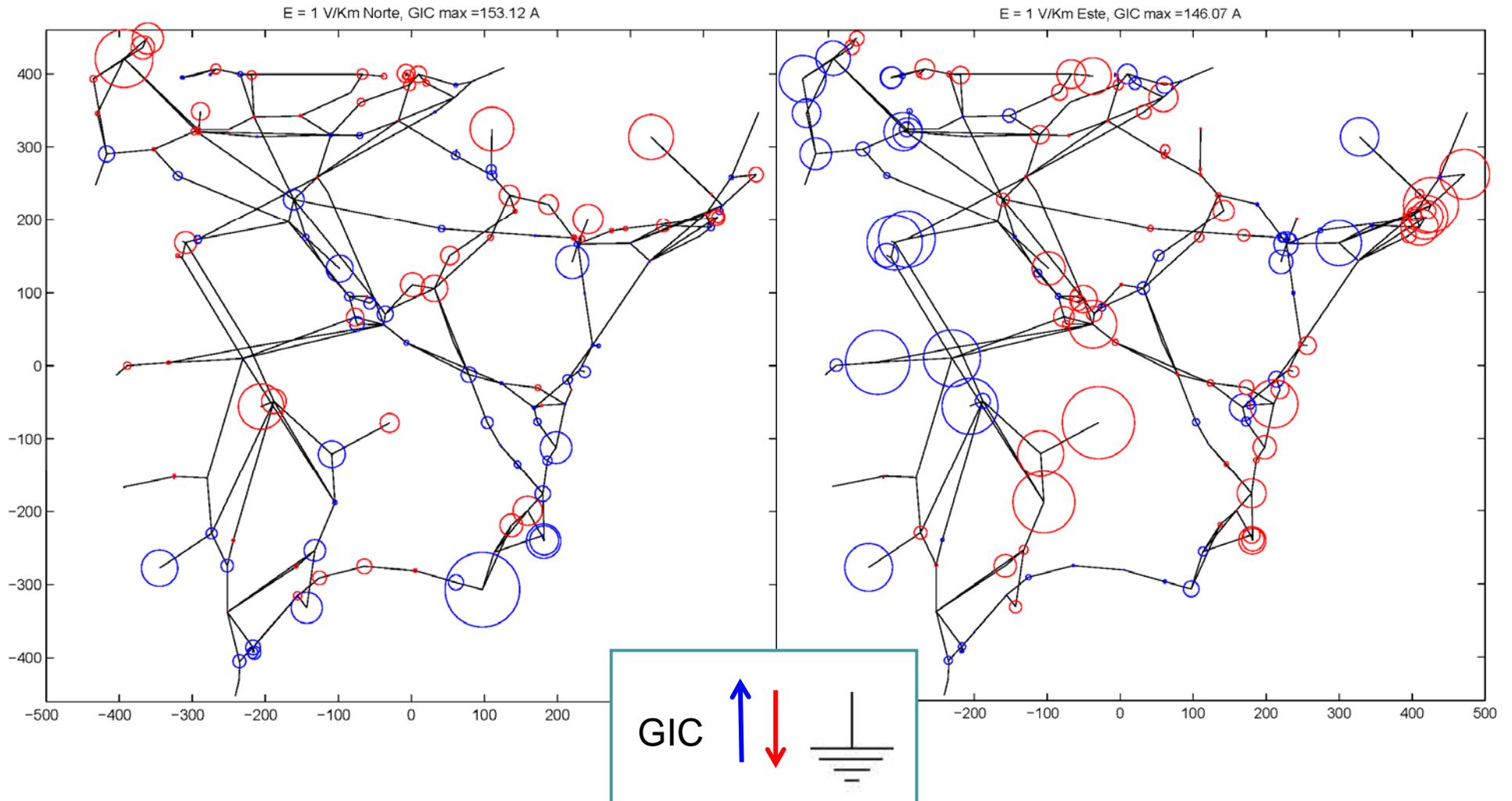


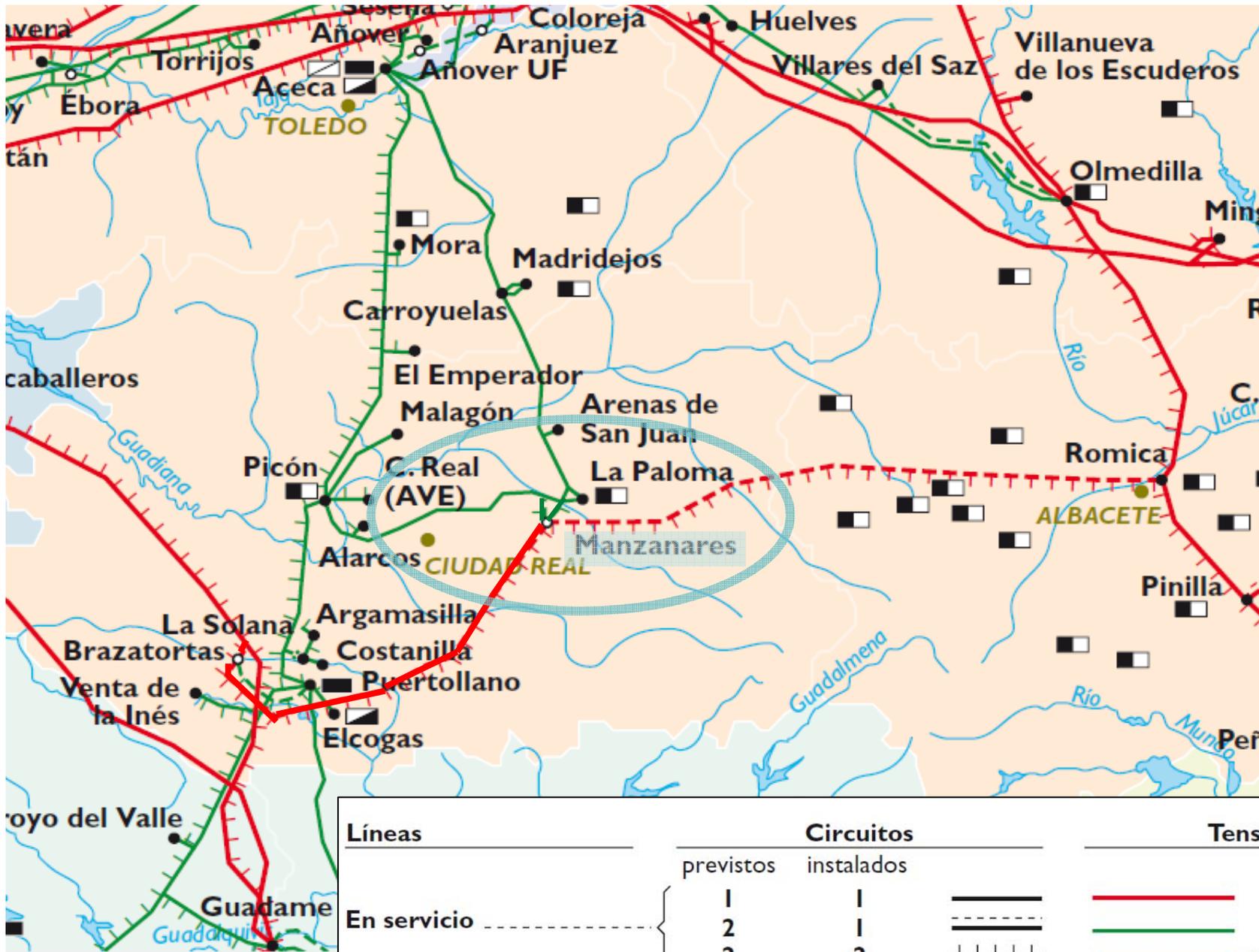
*Direcciones del campo geoelectrico en las que se obtiene la GIC máxima en cada una de las subestaciones aplicando un campo eléctrico de un 1 V/Km. La longitud de los barras es proporcional a la magnitud de la GIC*

# Análisis de vulnerabilidad de la red



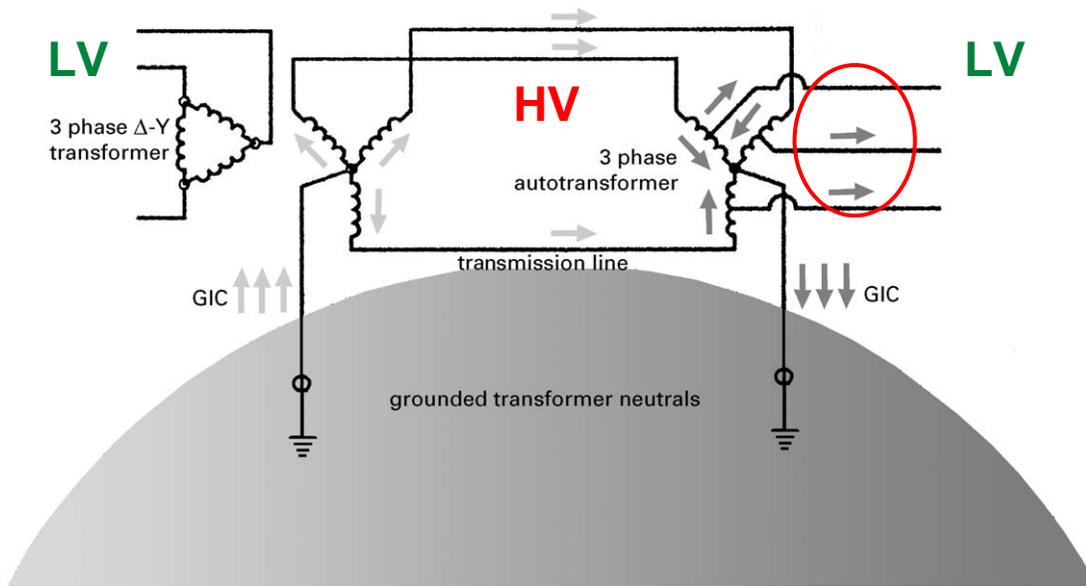
$E = 1 \text{ V/km}$





Líneas	Circuitos		Tensiones	
	previstos	instalados		
En servicio	1	1		400 kV
	2	1		220 kV
	2	2		132÷110 kV
En construcción y programadas	1	1		< 110 kV
	2	1		
	2	2		

Todas las líneas se han dibujado en el color al que funcionan.

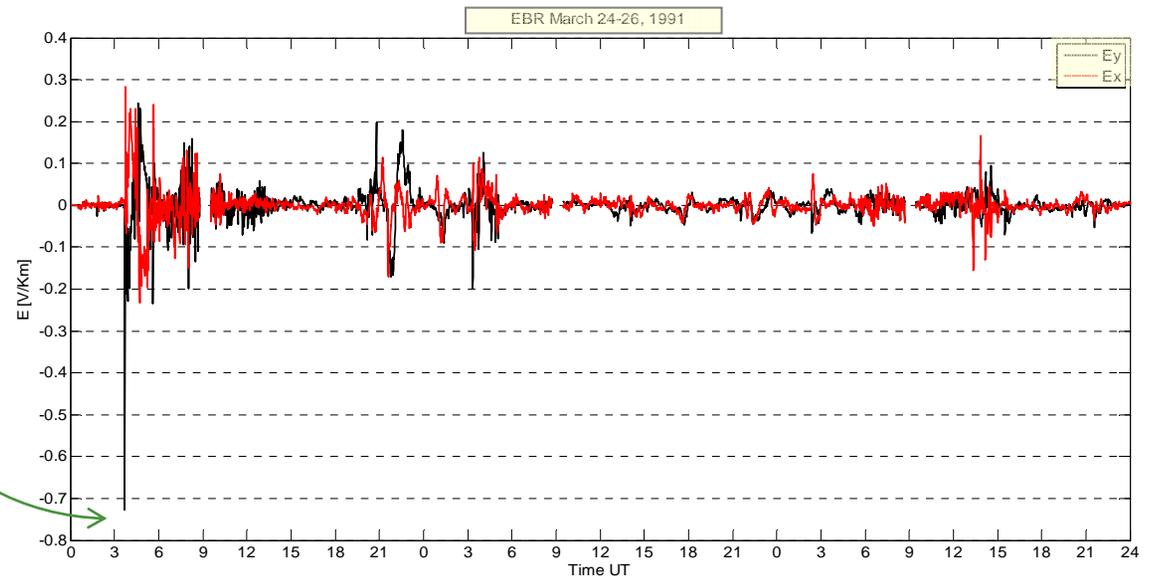


**En los autotransformadores (ATP) hay conexión galvánica entre las líneas de alta (HV) y baja tensión (LV), permitiendo el paso de las GICs entre ambas, mientras que en los transformadores  $\Delta$  -Y (TRP, TM) no.**

*Constantes de red en los transformadores más vulnerables*

Subestación	nº nodo	trafos	Ref. trafo	nº trafo	$a_T$	$b_T$
MANZANARES	156	1	ATP1	353	39.10	146.07
BRAZATORTAS	147	1	ATP1	333	-55.61	93.44
GUADAME	55	2	ATP1	120	-5.81	83.73
LOMBA	74	1	ATP2	170	13.66	-77.51
VILLARINO	138	2	ATP3	316	-10.63	-76.47
UDALLA	130	1	TRP3	302	11.73	74.93
CAN JARDI	29	1	ATP4	60	24.66	67.66
ALDEADAVILA	3	4	ATP1	3	25.43	-62.76
LITORAL	72	5	ATP2	162	-58.33	-12.17
LITORAL	72	5	ATP1	164	-58.33	-12.17
PENAGOS	94	1	ATP1	222	22.18	58.18
MESA DE LA COPA	157	2	ATP2	354	46.62	-56.56
MESA DE LA COPA	157	2	ATP1	355	46.62	-56.56
TRILLO	128	1	TM1	299	54.23	-25.26
ALMARAZ CN	4	3	ATP1	7	-0.23	-53.76
COFRENTES	38	1	TM1	83	-6.26	-53.72
PALOS	93	4	ATP1	218	-41.23	-53.38
BESCANO	22	4	ATP1	50	15.34	51.95
VALDECABALLEROS	131	1	ATP1	303	51.00	-30.66
SENTMENAT	115	3	ATP4	276	-1.28	49.67
J.M.ORIOL	63	6	ATP2	135	3.10	-49.41
J.M.ORIOL	63	6	ATP1	136	3.10	-49.41
MONTEARENAS	81	2	ATP1	182	6.13	-47.68
MESON D.V.	79	2	ATP1	178	6.90	-47.45
MESON D.V.	79	2	ATP2	179	6.90	-47.45
TOTANA	127	1	ATP1	298	46.60	8.99

Rank	Date	Peak aa (nT)	Peak $\text{dB}_H/\text{dt}$ (nT/min)
1	24 Mar 1991	363	177
2	14 May 1921	680	135
3	15 Jul 2000	440	112
4	13 Jul 1982	497	110
5	13 Mar 1989	715	92
6	29 Oct 2003	715	83
7	26 Jul 2004	228	82
8	31 Mar 2001	284	72
9	28 Mar 1946	656	70
10	24 Nov 2001	445	69
11	06 Nov 2001	306	64
12	05 Jun 1991	363	64
13	13 Nov 1960	568	55
14	09 Nov 2004	363	55
15	08 Nov 1991	578	50
16	08 Jul 1928	656	50



**Basándonos en una estimación para el período de retorno de 100 años de un hipotético caso extremo en el Observatorio del Ebro (*Torta et al., 2013*), un campo de 1.2-1.3 V/Km podría perfectamente producirse.**

*Torta et al. (2013): Predicción y monitorización de corrientes inducidas geomagnéticamente en transformadores de alta tensión en Cataluña. Proc. 7ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica, S03, 222-224, 2013*

# CONCLUSIONES

- **El modelo retrospectivo predice campos eléctricos del orden de 0.7 V/Km y corrientes de más de 100 A en el neutro de un determinado autotransformador de la red.**
- **Cuando se disponga de la información relativa a las redes de 220 y 110 KV conectadas con la de 400 KV, deberán revisarse los resultados en los autotransformadores.**
- **En el período de retorno de 100 años podrían producirse campos eléctricos superiores a 1 V/Km, con lo que GICs de 50-80 A son escenarios realistas en determinadas estaciones con un único transformador delta - estrella.**

**¡Gracias por la atención!**

