

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA
FACULTAD DE CIENCIAS ASTRONOMICAS Y GEOFISICAS
DEPARTAMENTO DE GEOMAGNETISMO Y AERONOMIA**

**EFFECTO DE LAS VARIACIONES TEMPORALES DEL CAMPO MAGNETICO
TERRESTRE REGISTRADO EN EL OBSERVATORIO MAGNETICO DE LAS ACACIAS
SOBRE LAS DETERMINACIONES DEL POTENCIAL REGISTRADO EN EL
GASODUCTO PUNTA LARA, ARGENTINA – SANTA ANA, URUGUAY.**

**INFORME TECNICO
POR JULIO CESAR GIANIBELLI Y NICOLAS QUAGLINO**

RESUMEN. La información proporcionada por la empresa LOXX consistió de un registro del potencial V (en mV) cada 1 minuto (en T.U.), en la cabecera del gasoducto situado en la ciudad de Santa Ana (SA) en Uruguay, es analizada en conjunto con los datos de la intensidad del Campo Geomagnético registrado en el Observatorio Magnético de las Acacias, con la finalidad de observar efectos de inducción. Se correlaciona la información disponible con los datos del viento solar provistos por sondas espaciales. Se concluye que es necesario registros en intervalos de tiempo extensos en las cabeceras del gasoducto para definir mejores funciones de ajuste de los niveles críticos de posible acción corrosiva.

INTRODUCCION

El Campo Magnético registrado en un observatorio magnético está compuesto por el campo principal generado por un geodínamo residente en el Núcleo Externo de la Tierra, que representa el 95 % del valor total determinado en forma absoluta en ese observatorio. El 5 % restante corresponde a los campos producidos por la Corteza de la Tierra (aprox. 2 %), el campo producido por las corrientes de origen externo representadas por el Sistema de Corrientes Ionosféricas, Corriente Anillo, Corriente de la Magnetopausa, Corriente de la Cola de la Magnetósfera y Efectos de los Sistemas de Corrientes de los Casquetes Polares (aprox. 2.8 %). El 0.2 % restante de dicho campo total registrado corresponde a la inducción en la Corteza, Hidrósfera, Astenósfera, Litósfera y Manto Inferior producidos por los sistemas de corrientes externos ya mencionados. Estos sistemas de corrientes externas son producidos por el efecto de la conexión Sol-Tierra. Los sistemas de corrientes ionosféricas son responsables de las variaciones diurnas y su origen es por el efecto termoionizante del Sol. Los otros sistemas de corrientes son producidos por el efecto colectivo de las partículas cargadas que son eyectadas por la actividad de la Corona Solar.

El Observatorio Magnético de Las Acacias (LAS, Lat.: -35°0; Long.: 302°3) se encuentra ubicado en la región de la Anomalía Magnética del Atlántico Sur. El valor de la Intensidad Total del campo registrado allí es el menor en toda la superficie de la Tierra, de 23333 nT, y con una disminución de 49,7 nT/año. En la Figura 1, observamos la ubicación del Observatorio de Las Acacias (UNLP), Trelew (UNLP) y Vassouras (Brasil), que patrullan la evolución del mínimo producido por el campo principal. Este mínimo tiene una importancia fundamental en la relación Sol-Tierra ya que permite que partículas cargadas provenientes del Viento Solar penetren más profundamente en la cavidad magnetosférica correspondiente a esta región, en especial en las postrimerías del Equinoccio de primavera y Solsticio de verano en el Hemisferio Sur. Esto se evidencia en la actividad de perturbación observada en los registros digitales de estos Observatorios magnéticos.

Para el estudio conexión Sol-Tierra de los fenómenos registrados en superficie por el Observatorio Magnético de Las Acacias, se utilizaron las observaciones de la velocidad y densidad del Viento solar hechas por la Sonda ACE (Advanced Composition Explorer). Esta sonda se encuentra ubicada en el punto de libración gravitacional L1 entre la Tierra y el Sol (ver figura 2). Como parámetros terrestres de actividad resultantes de esta conexión se seleccionó el índice trihorario “ap” y la amplitud de las variaciones del campo magnético trihorarias δF (amplitud de F) registradas en LAS.

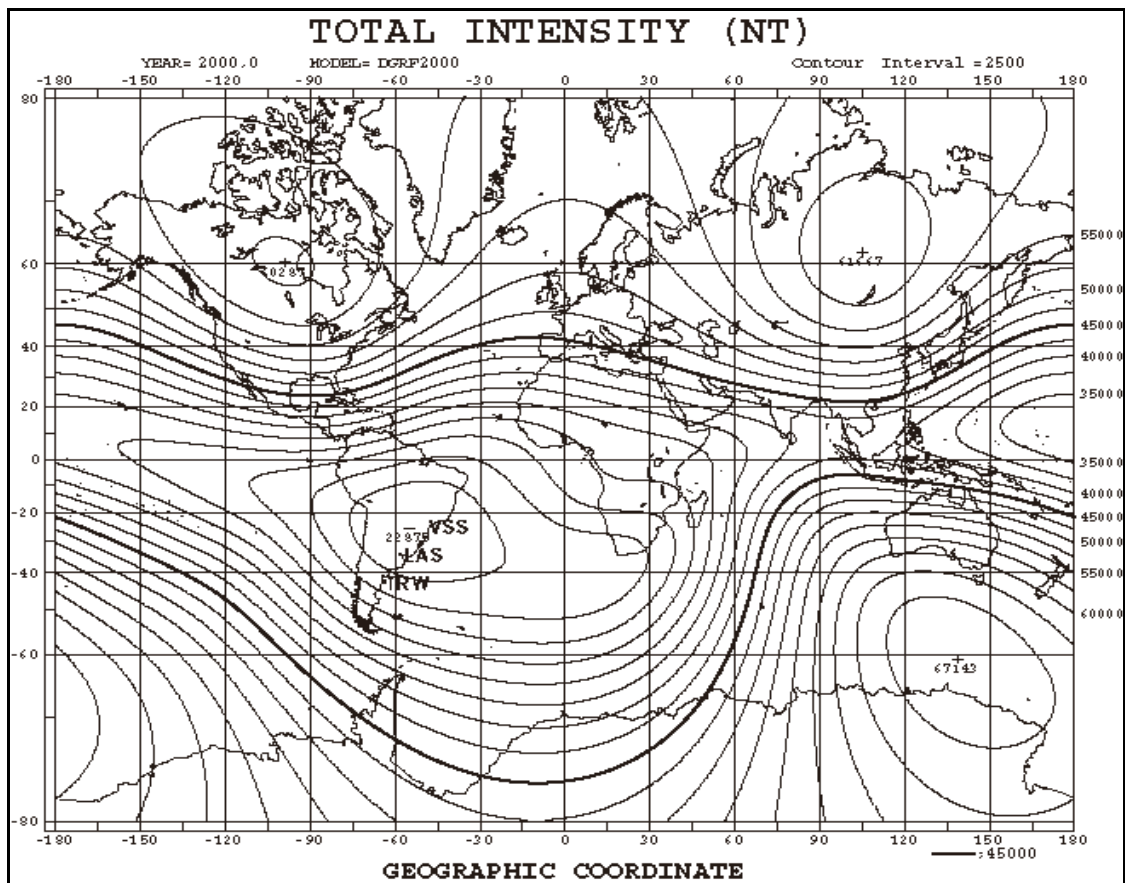


Figura 1.

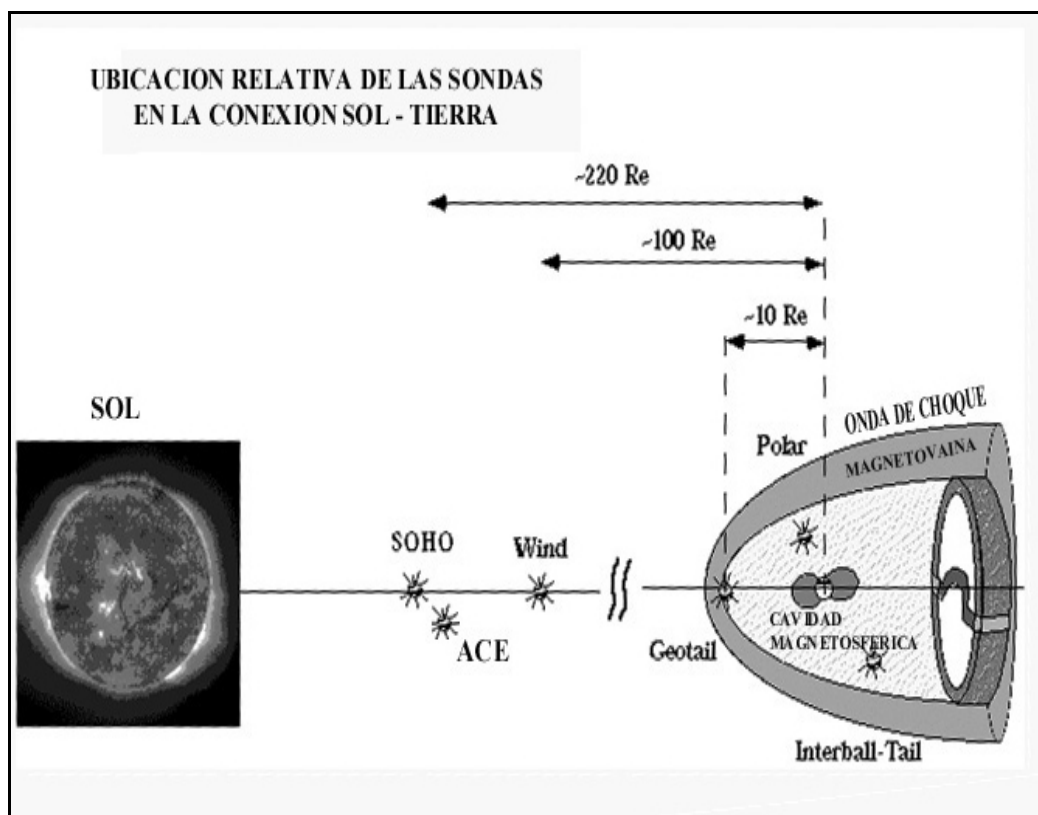


Figura 2

La información proporcionada por la empresa LOXX consistió de un registro del potencial V (en mV) cada 1 minuto (en T.U.), en la cabecera del gasoducto situado en la ciudad de Santa Ana (SA) en Uruguay, dividido en un primer registro desde el día 1 de noviembre a las 19:13 TU hasta el 13 de diciembre de 2006 a las hs 12:07 TU. Y un segundo registro desde el 13 de diciembre de 2006 a las 13:42 hs TU. hasta el 25 de enero de 2007 a las 11:38 TU. Asimismo por un intervalo menor en la cabecera del gasoducto en la localidad de Punta Lara (Argentina) desde el 18 de diciembre de 2006 a las 14:11 TU hasta el 26 de diciembre de 2006 a las 21:16 TU.

Para este estudio se dispone de la intensidad total del campo magnético registrado en LAS durante los meses de noviembre de 2006, diciembre de 2006 y enero de 2007. En los mismos intervalos de tiempo se extractaron de las bases de datos internacionales el índice trihorario “ap” y la densidad y velocidad del viento solar registradas por la sonda ACE .

METODOLOGIA DE TRABAJO

Con los registros cada 1 minuto se determinan los intervalos perturbados, a partir de los datos originales y en sus derivadas. Se analizan la relación con los parámetros medidos por la sonda ACE y los registros de F en LAS y el potencial en SA.

Se construyen nuevas series de tiempo consistentes en los valores máximos y mínimos cada 3 horas del potencial registrado en SA, su valor medio y la amplitud. De la misma manera para F, y solamente determinando el promedio trihorario de la densidad de partículas y velocidad del viento solar para confeccionar modelos de comportamiento. Se analizan los registro de Punta Lara con el fin de comprobar su similitud con los realizados simultáneamente en SA y extender los resultados a este lugar de registro.

Finalmente se analizan las amplitudes cada 48 horas a partir de de las series de datos originales con ventanas a intervalos de 48 horas para verificar el comportamiento de los modelos propuestos en el método anterior.

ANALISIS DE LOS DATOS Y RESULTADOS

Los registros del potencial en SA están formados por los registros obtenidos en dos intervalos de tiempo, donde se observan datos perdidos en diferentes ventanas , desde 1 minuto hasta 50 minutos. Se interpolaron los datos en los huecos de 1 y 2 minutos, y se determinó la cantidad de intervalos sin registro para dichas ventanas temporales. La figura 3 muestra la cantidad de datos perdidos por intervalos de tiempo de 3 ó más minutos consecutivos, de lo que se desprende que la consistencia de los registros de potencial es aceptable.

La determinación de los intervalos perturbados se realizó comparando los registros de F en LAS y del potencial en SA y sus respectivas derivadas temporales, en ventanas mensuales correspondientes a los meses de noviembre de 2006, diciembre de 2006 y enero de 2007.

Las figuras 4 a 9 muestran la selección de los intervalos perturbados, indicados como A, B, C, D y E.

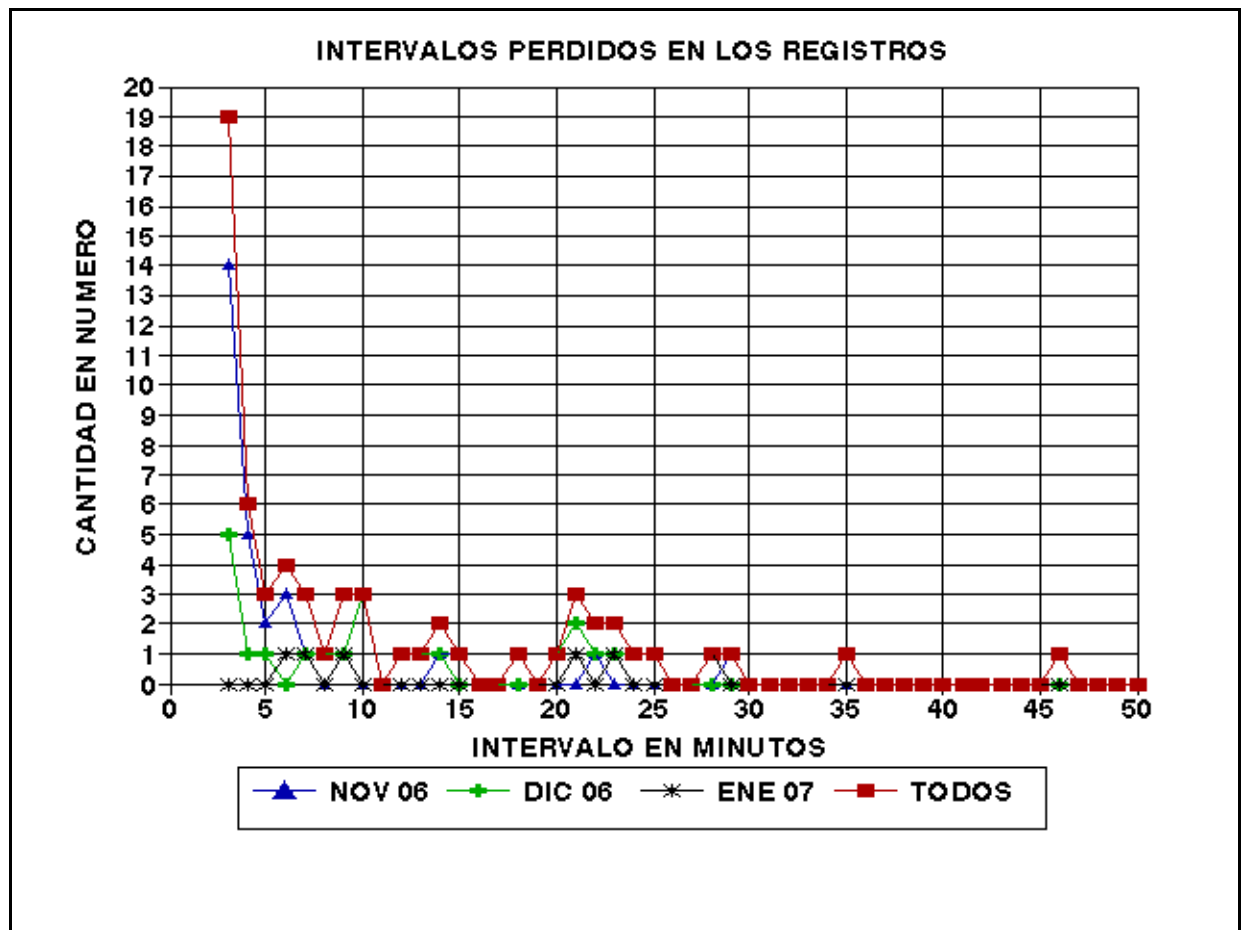


Figura 3

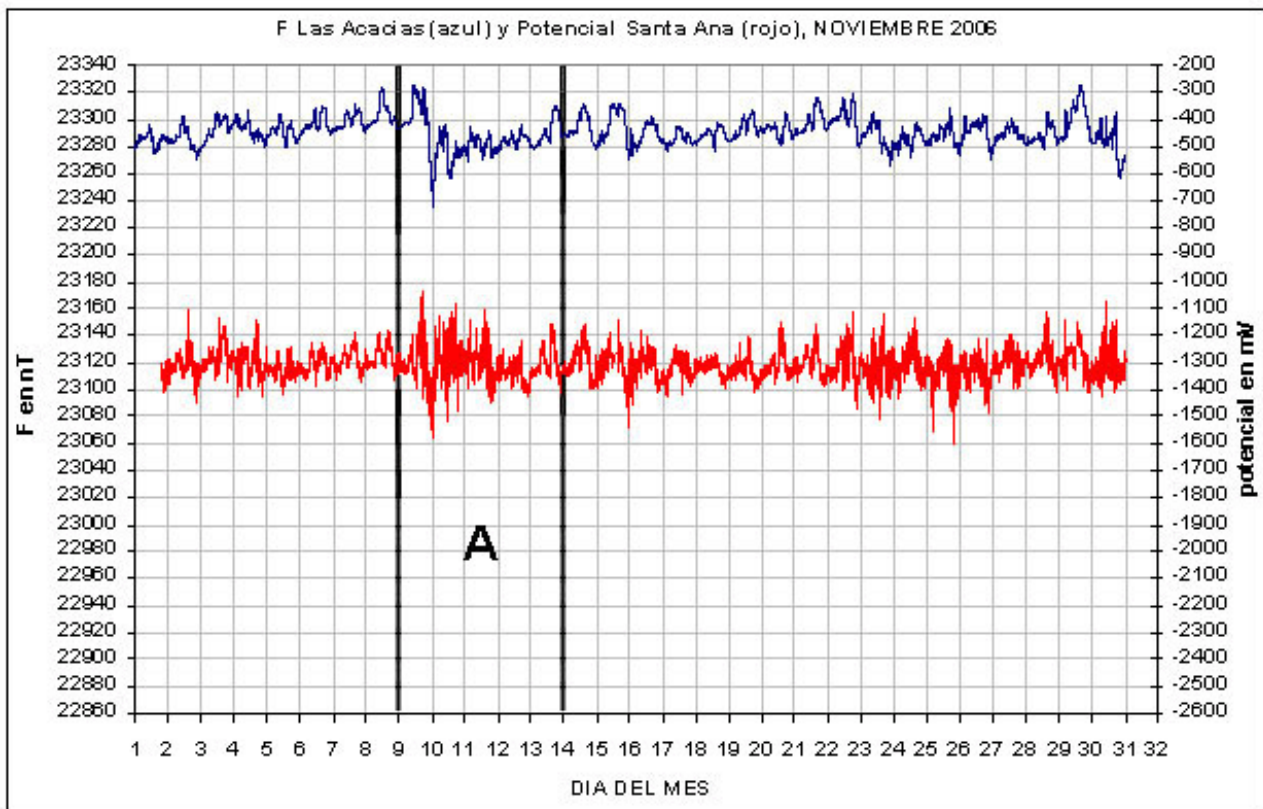


Figura 4

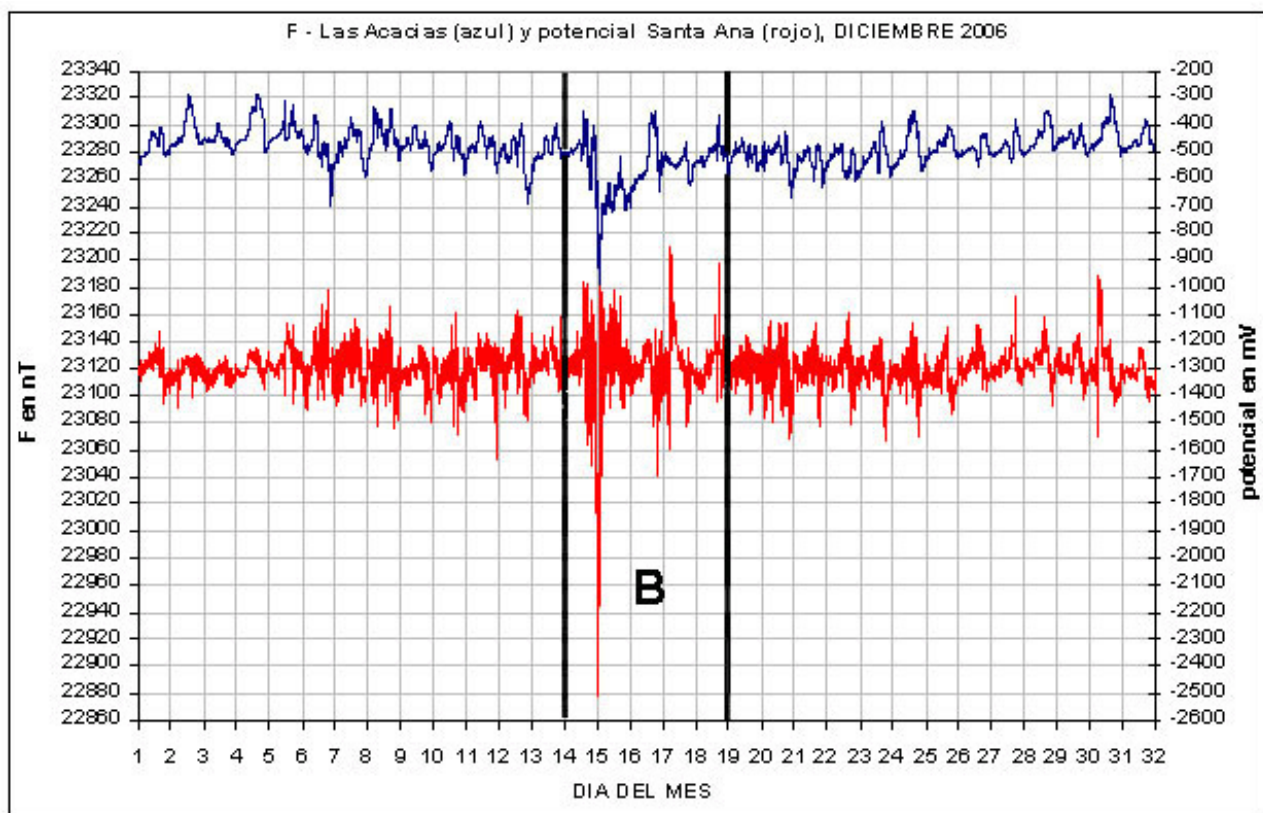


Figura 5

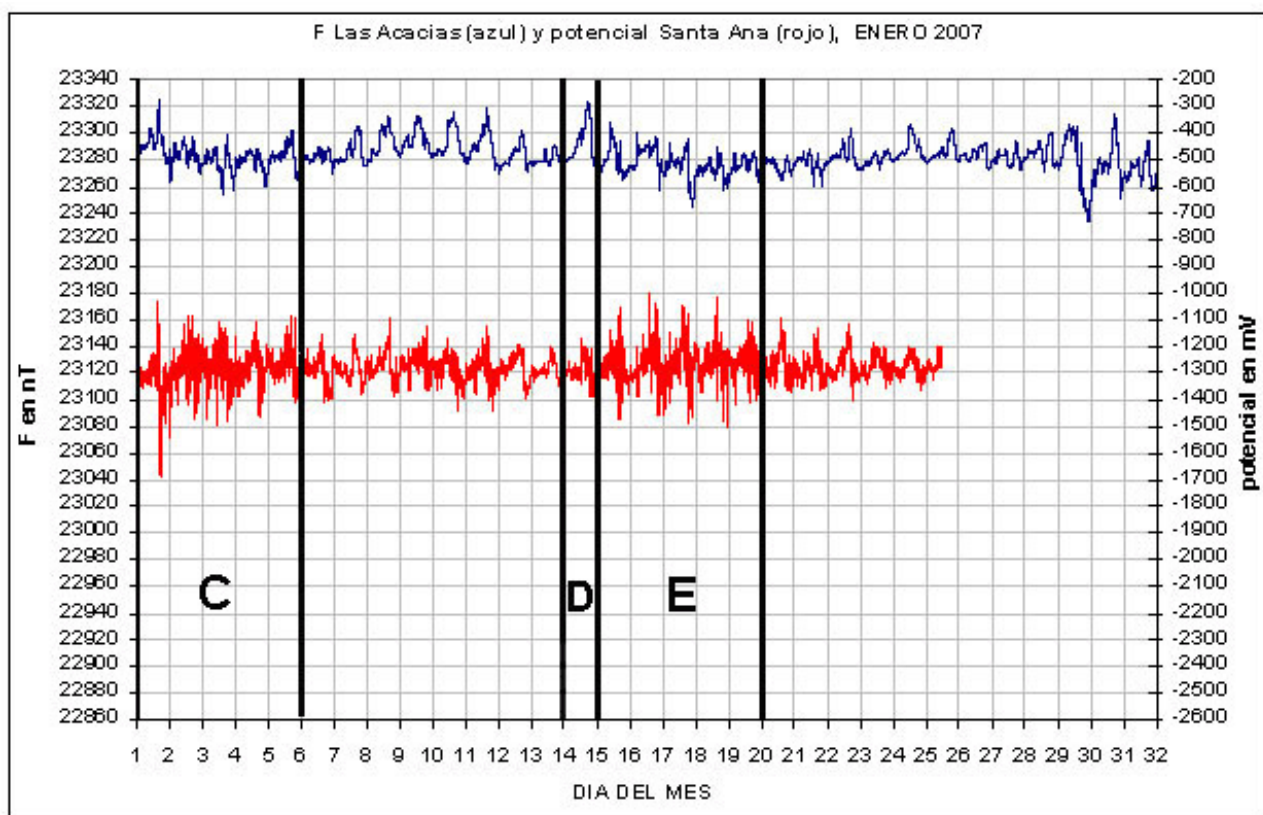


Figura 6

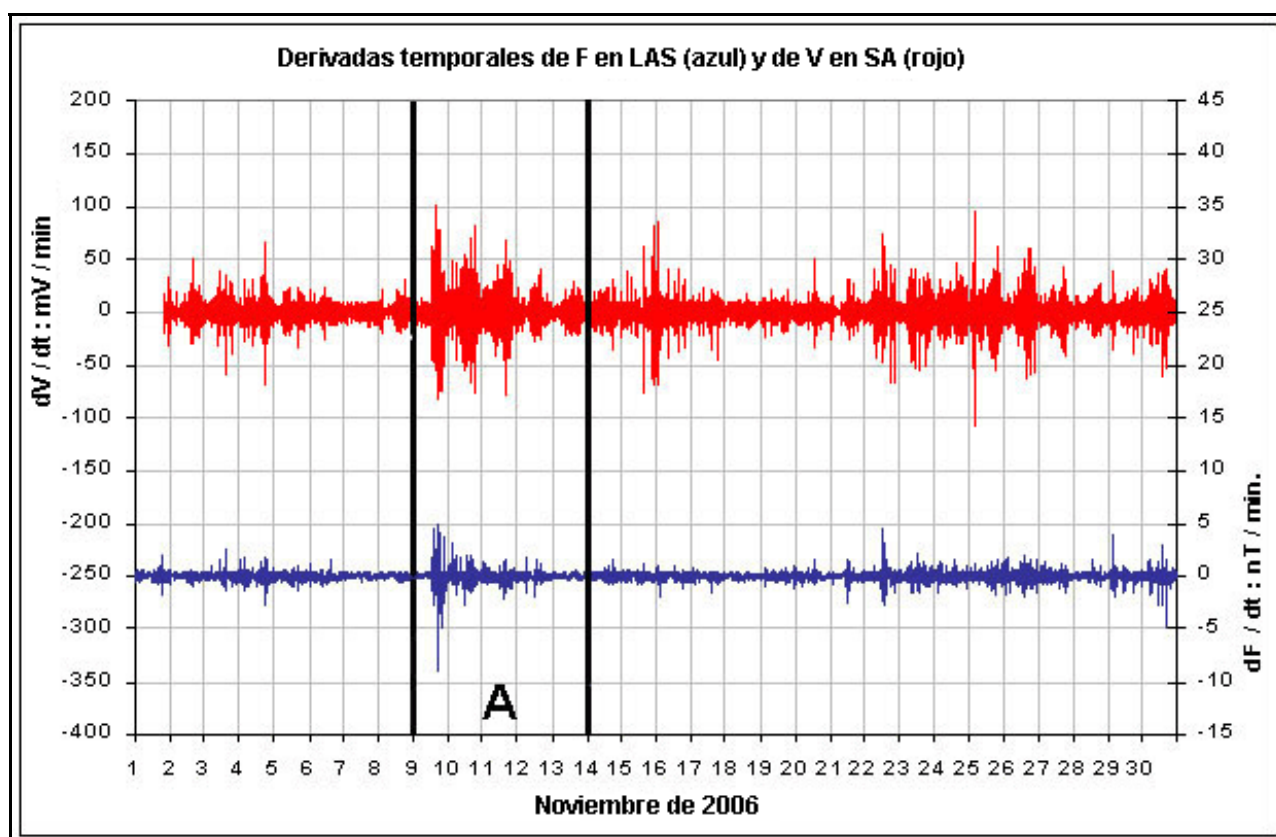


Figura 7

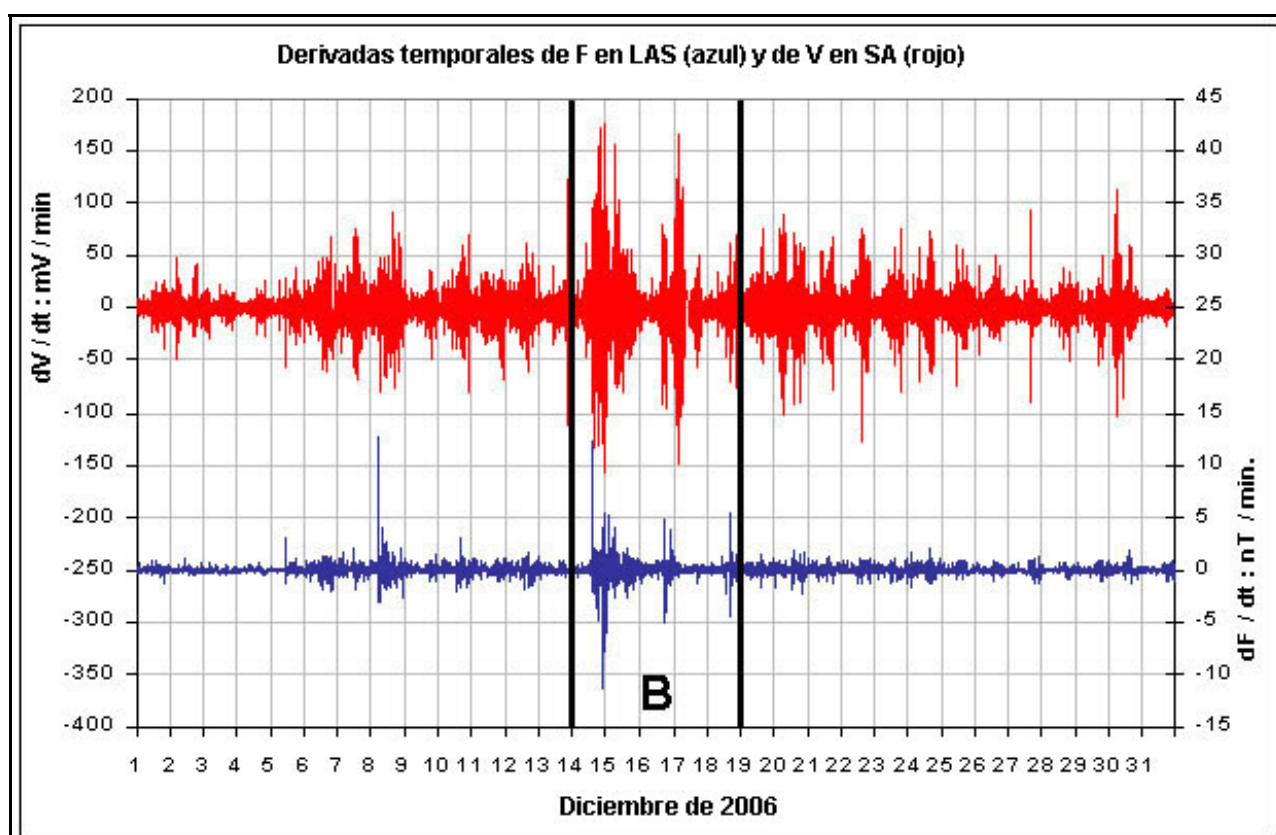


Figura 8

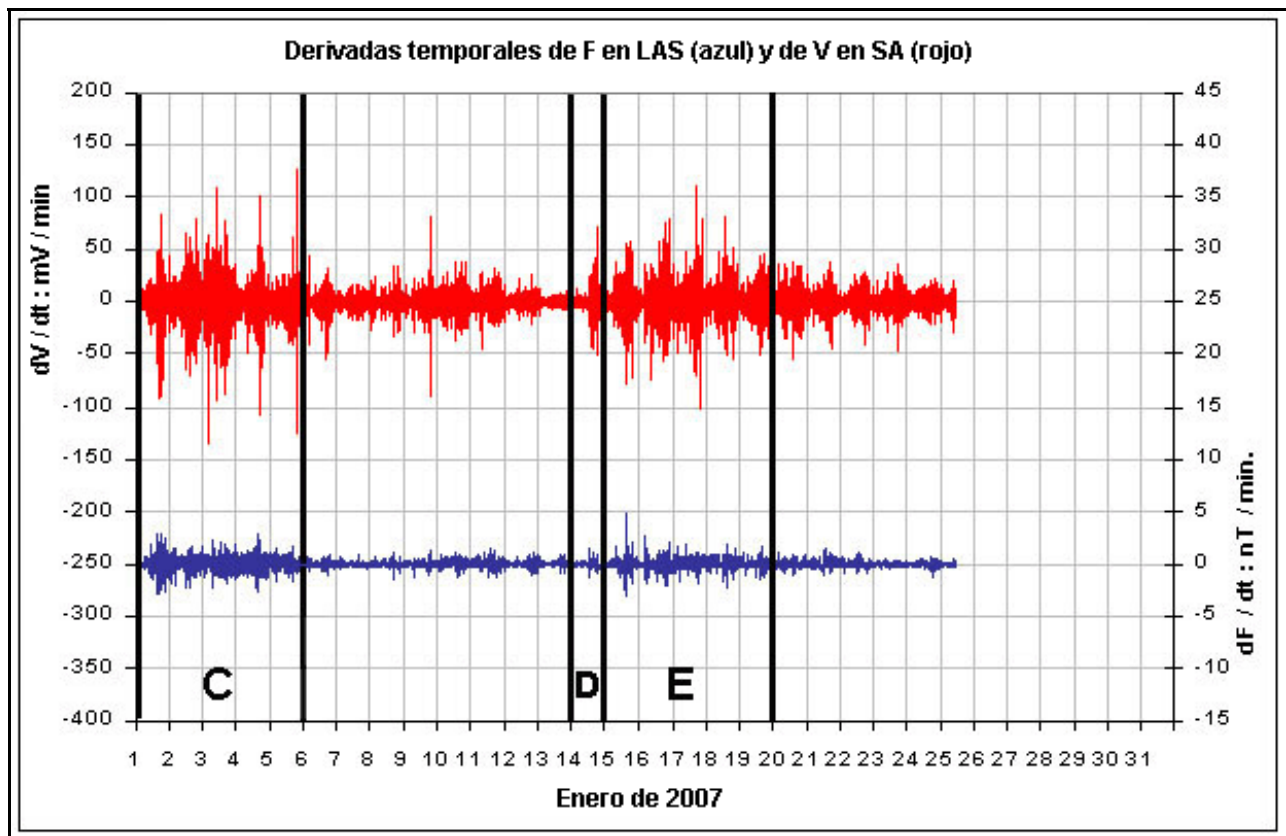


Figura 9

En las figuras 10 a 14 se muestra en detalle la relación entre los efectos de las perturbaciones producidas por los parámetros densidad de partículas y velocidad del Viento Solar sobre el Campo Magnético terrestre, y las variaciones del potencial registrado en SA. Las tormentas magnéticas registradas y mostradas en las figuras 10, 11.a 11.b, 12 y 14, permiten establecer que la mayor tormenta del período de registro fue la ocurrida entre el 14 y 18 de diciembre de 2006, con perturbaciones del potencial apreciables, comprendidas entre -850 mV y -2500 mV (ver las figuras 6 y 7).

La figura 13 es muy interesante ya que muestra en un registro relativamente calmo de F y V, impulsos en la densidad y velocidad del viento solar (marcados en la figura con una elipse), y sus respectivas respuestas en los registros de F y V. El intervalo de tiempo determinado desde que la sonda ACE recibe el impulso y la recepción en el registro de superficie terrestre de dicha perturbación es de aproximadamente 67 minutos, verificándose con la velocidad del viento solar de 362 Km/seg que la sonda ACE se ubica a la distancia correspondiente al punto L1, y comprobando la eficacia del sistema.

Siguiendo con la metodología de análisis se procedió a analizar las series temporales trihorarias correlacionando las siguientes variables: índice ap, velocidad promedio del viento solar, potencial promedio, amplitud del potencial (δV), amplitud de F (δF) y valor promedio de F.

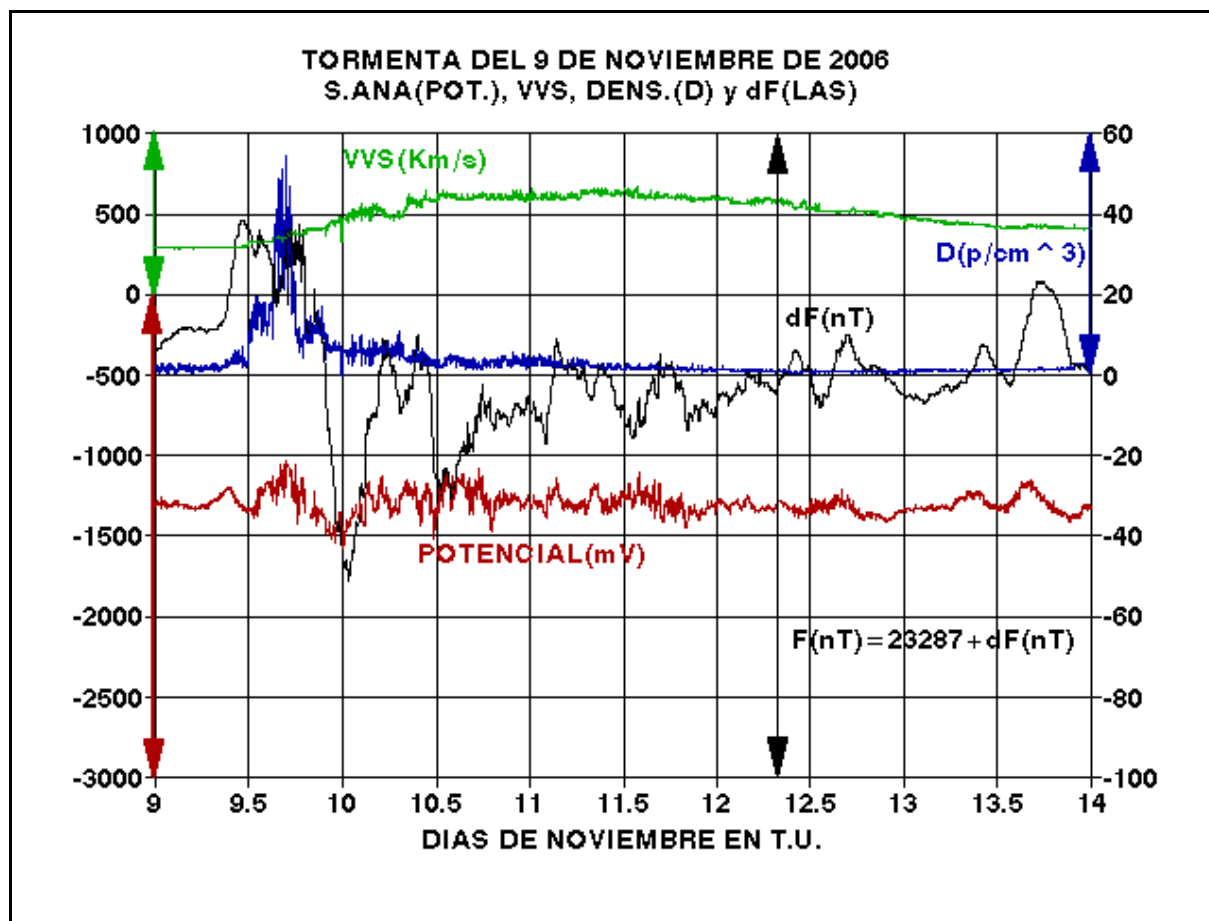


Figura 10

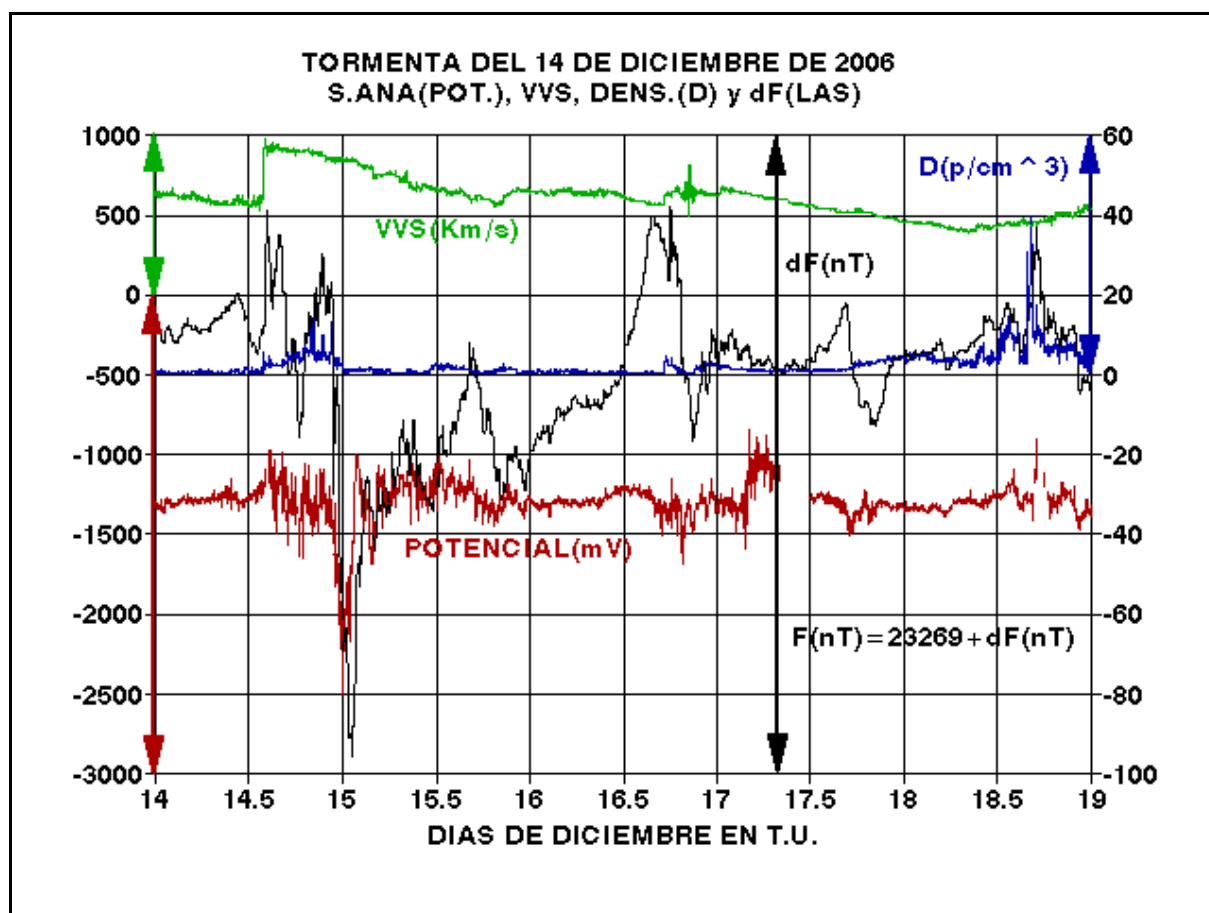


Figura 11.a

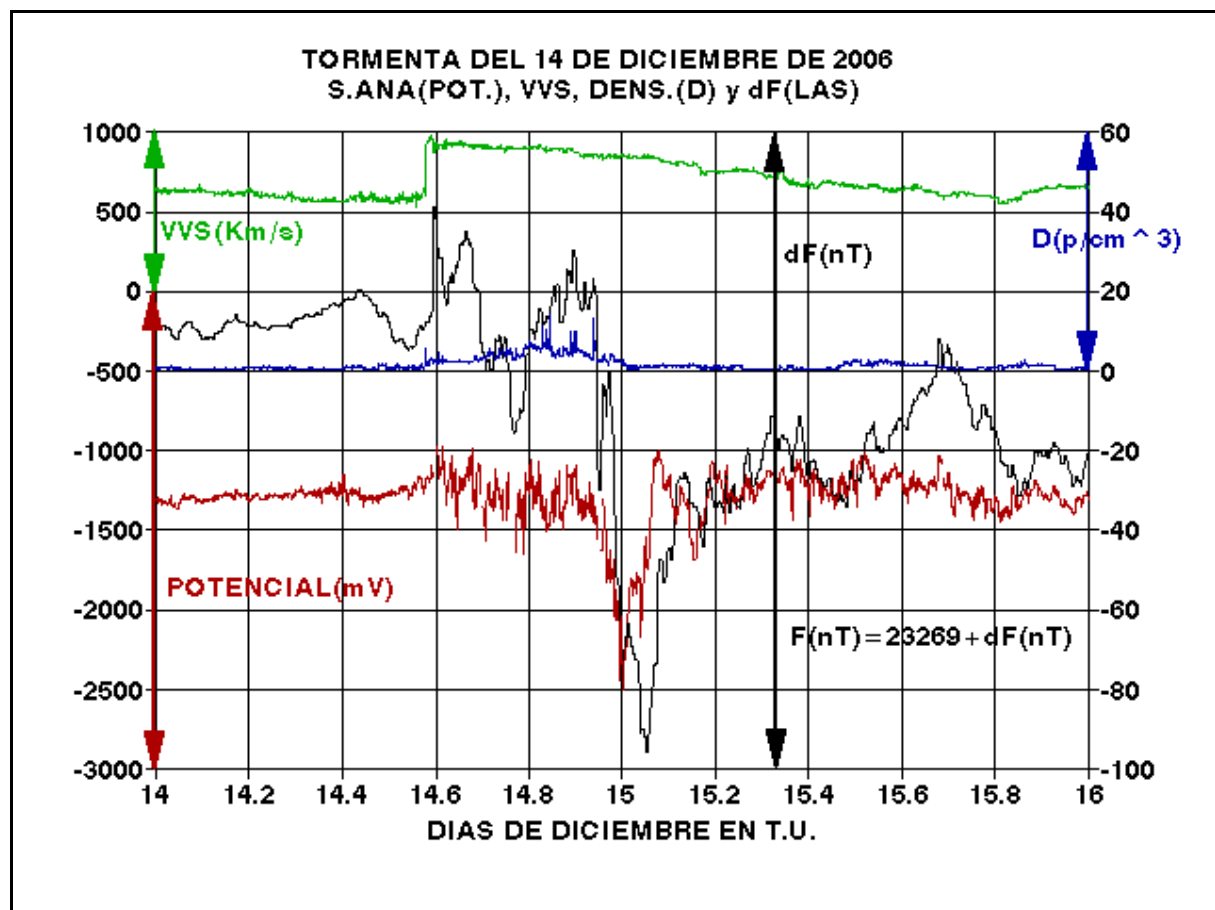


Figura 11.b

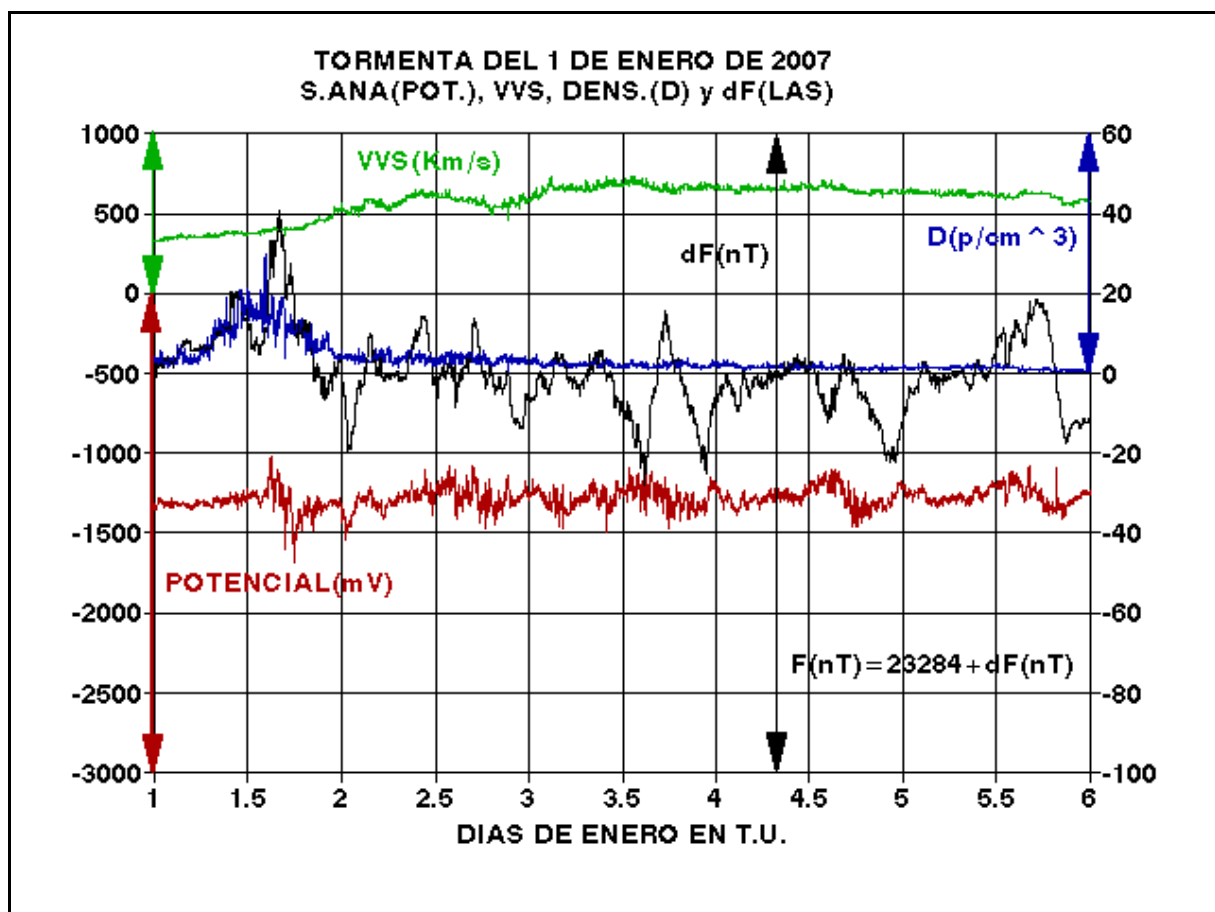


Figura 12

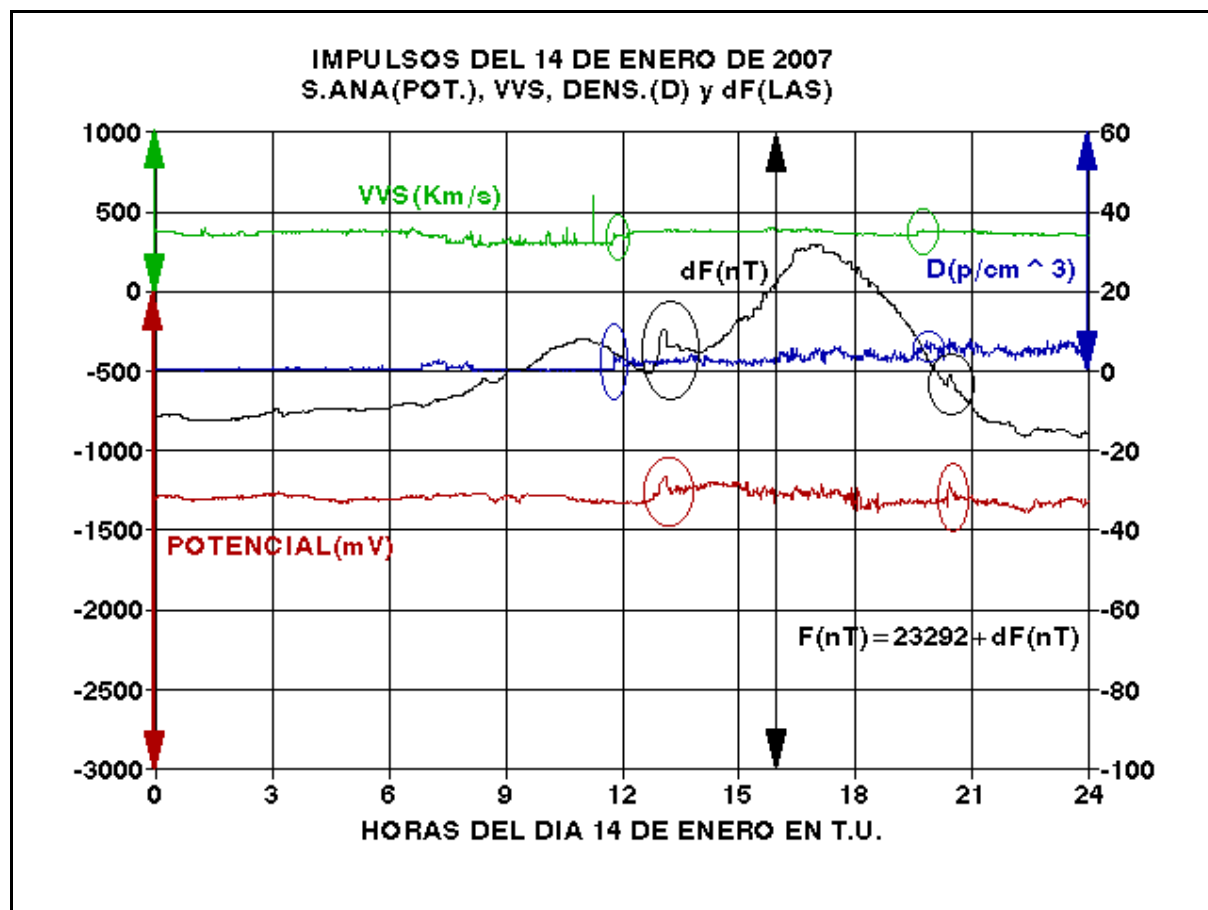


Figura 13

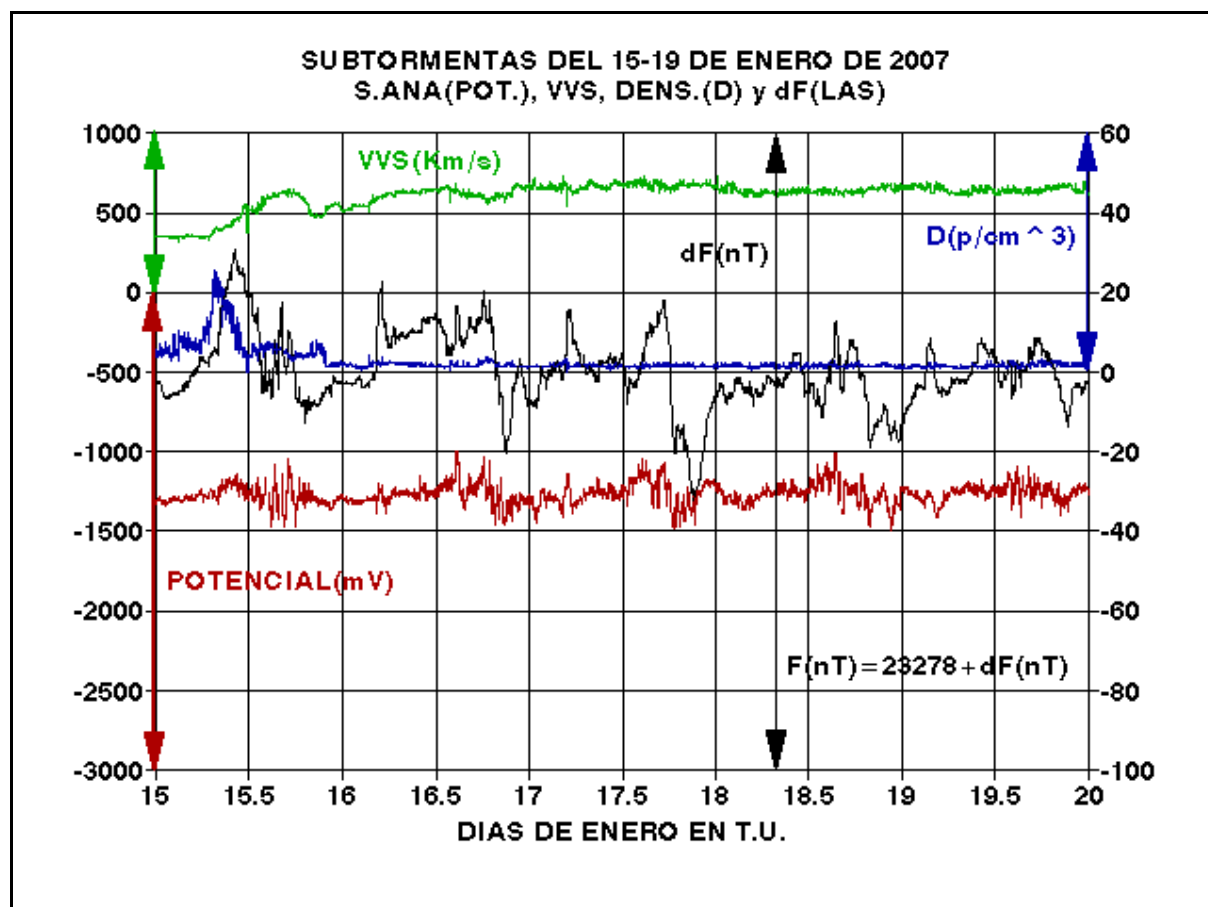


Figura 14

Los gráficos siguientes muestran:

La figura 15 la relación entre el índice a_p , la densidad de partículas (d) y la velocidad del viento solar (VVS) en función del tiempo, observándose una muy buena correlación entre el índice a_p y los cambios en la VVS y d .

La figura 16 vincula la amplitud promedio de F en LAS (δF) cada 3 horas y el índice a_p , con el fin de observar que éste último presenta una regular relación con δF . Esto se debe a los procesos de suavización y achatamiento de las series temporales involucradas en el cálculo de este índice de carácter mundial y que detecta principalmente fenómenos vinculados a cambios pronunciados con VVS y en menor grado con d .

La figura 17 muestra la relación de las amplitudes trihorarias de F (δF) y del potencial V (δV), observándose una relación muy buena de causa y efecto.

En la figura 18 se muestra el promedio del potencial en SA versus el índice a_p . Puede observarse cierta causalidad de la actividad global sobre las variaciones del potencial, las que se indican con las letras “A” a la “G” en la figura 18. Los signos de interrogación dentro de la figura están indicando eventos en a_p no muy bien detectados en el promedio de VSS.

La figura 19 permite evaluar una relación un poco más precisa de la VVS, a_p y el promedio del potencial en SA trihorarios, comparado con lo presentado en la figura 18.

En cambio la figura 20 muestra que los eventos “A” hasta la “G” de las figuras 18 y 19, tienen una vinculación directa entre la acción geoefectiva de las variaciones del VVS y los eventos registrados en LAS y SA en lo referente a amplitudes registradas, y cuya relación se mostró en la figura 17.

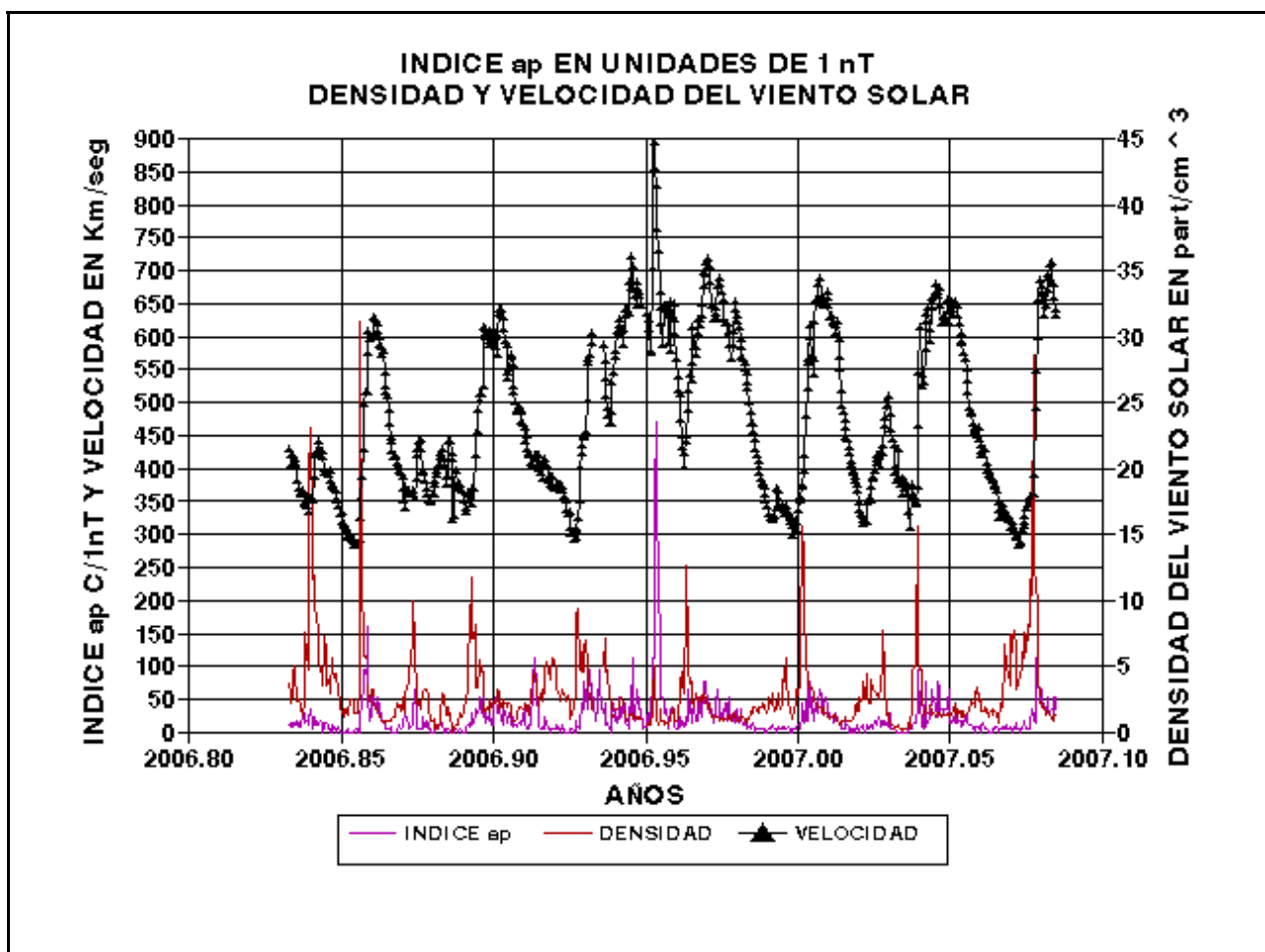


Figura 15

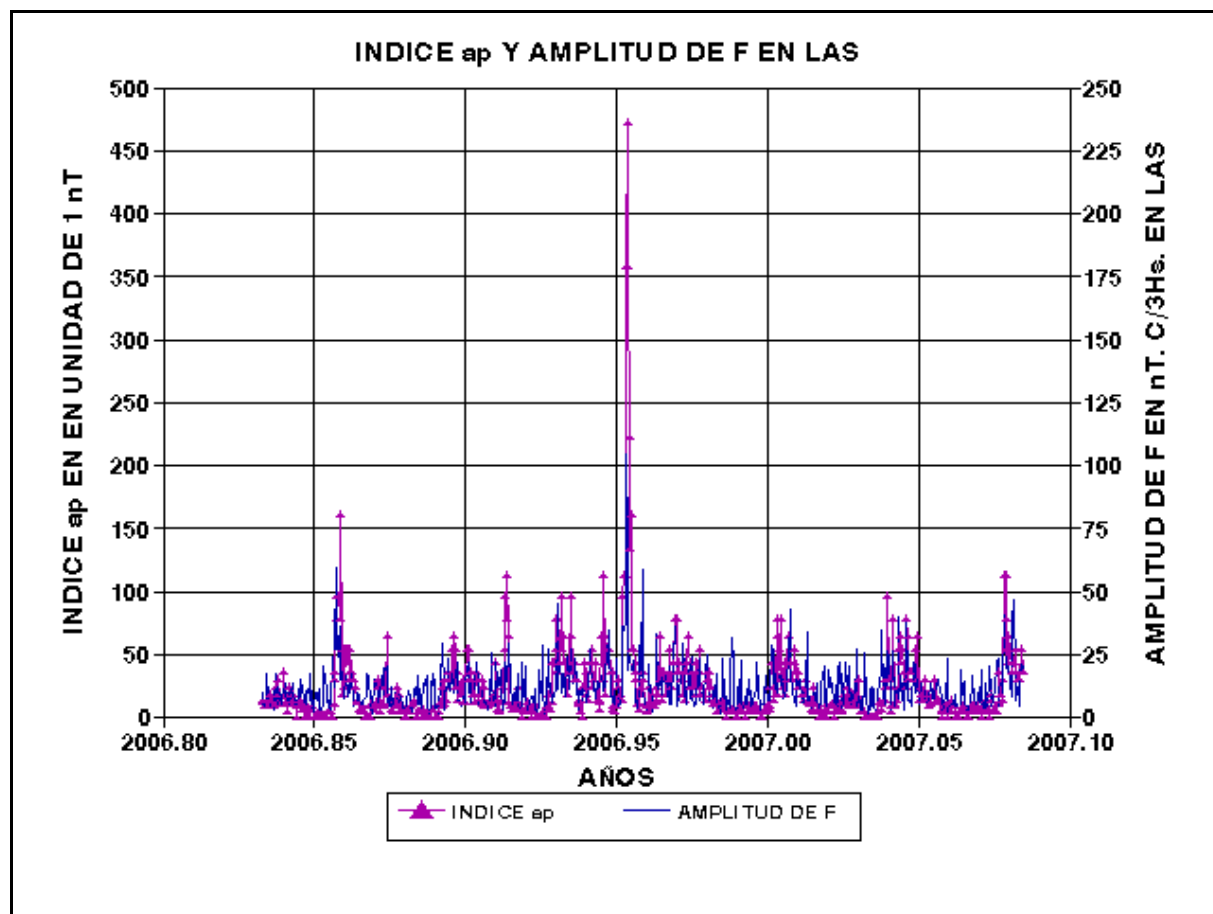


Figura 16

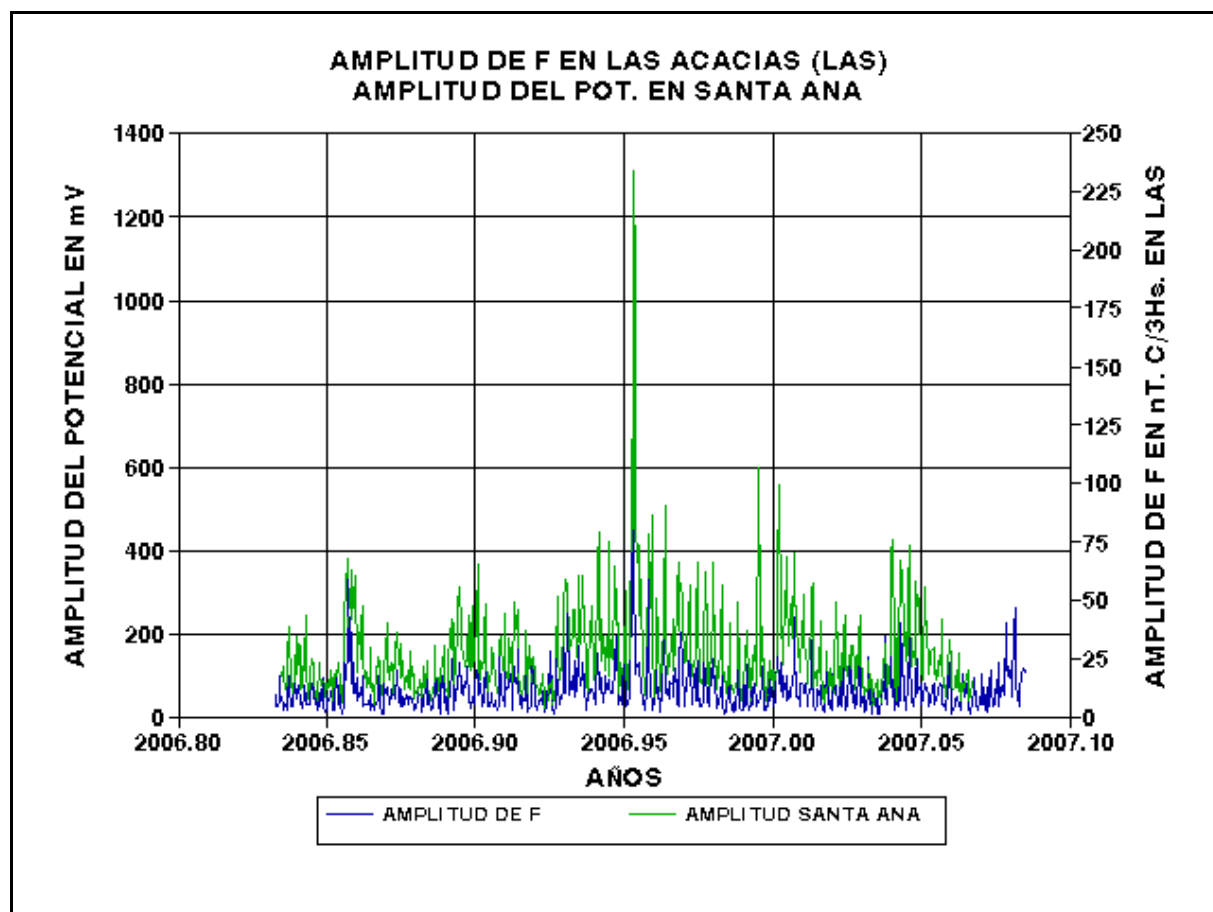


Figura 17

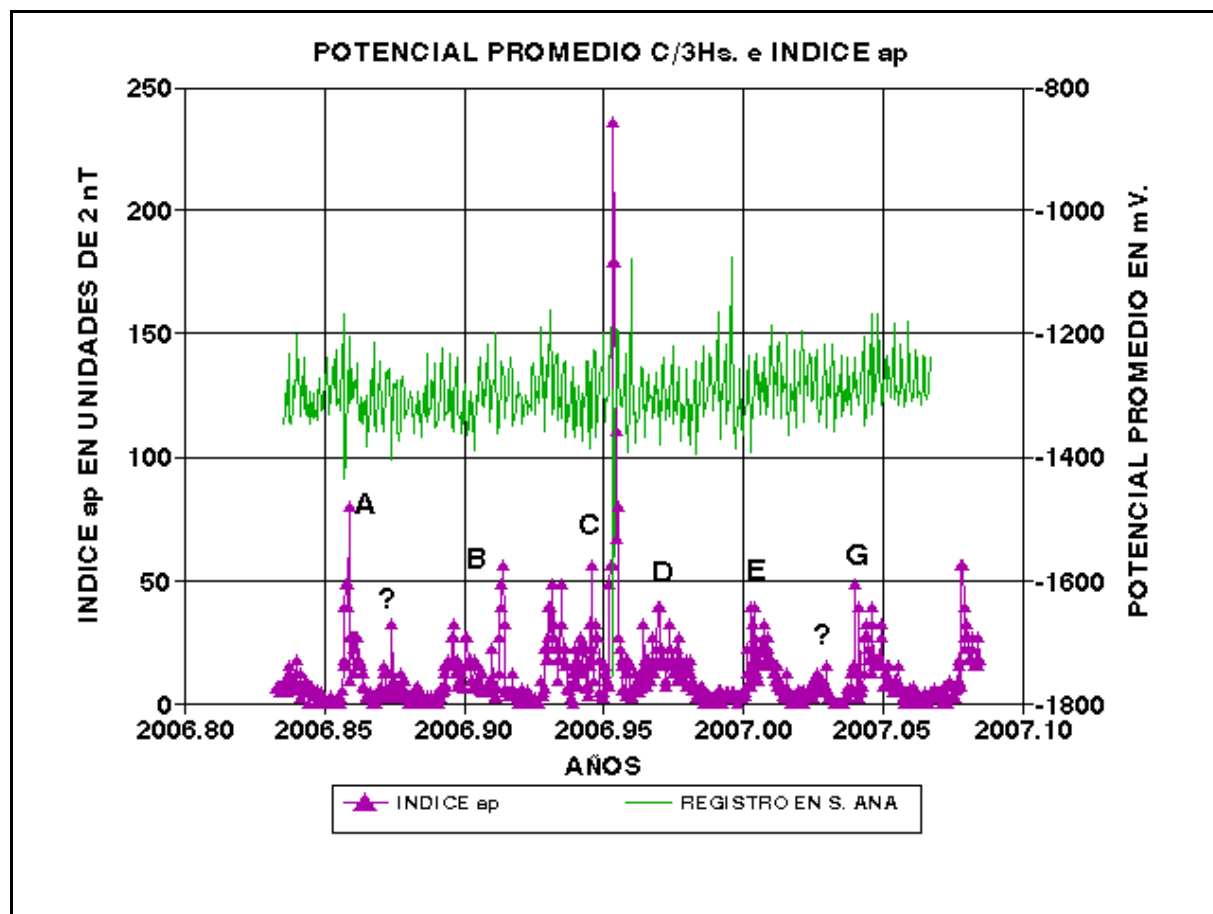


Figura 18

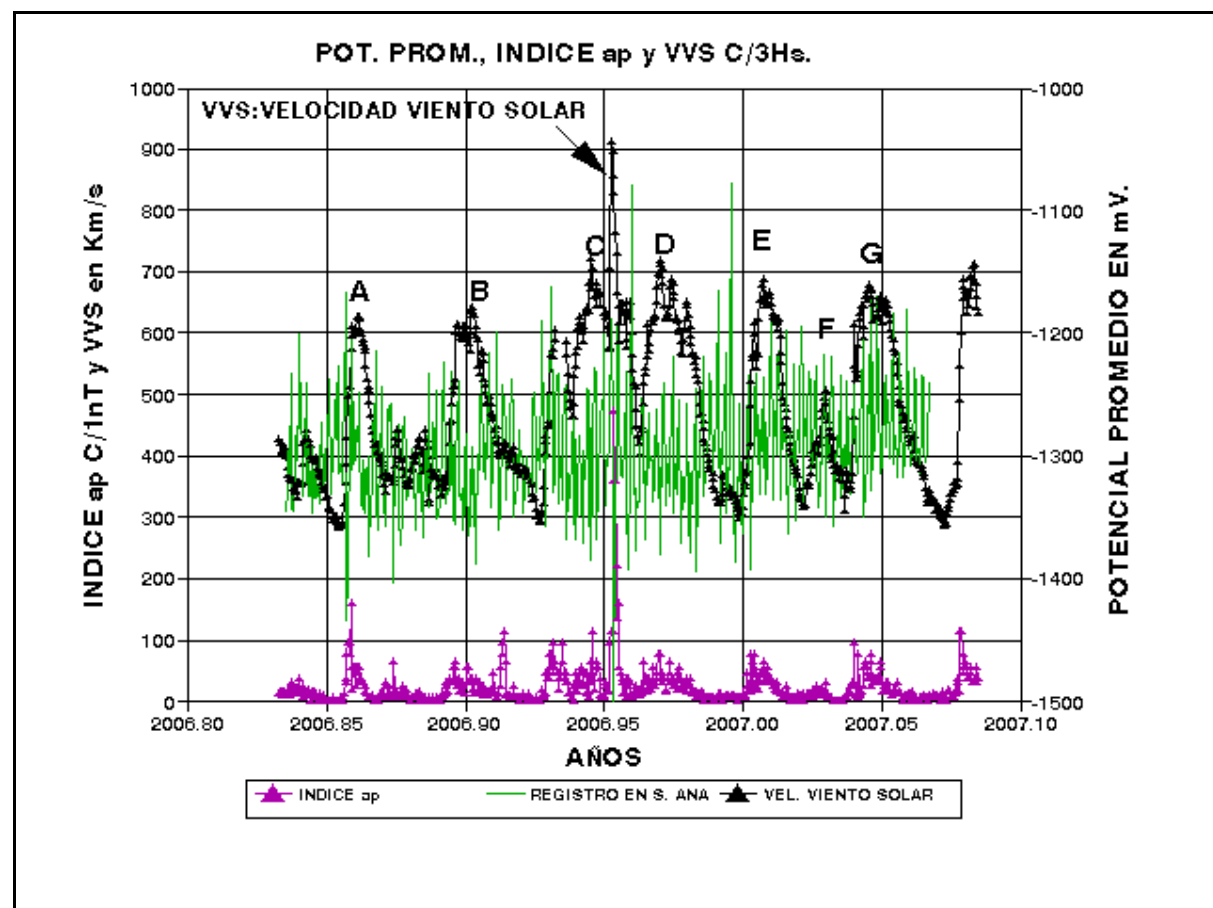


Figura 19

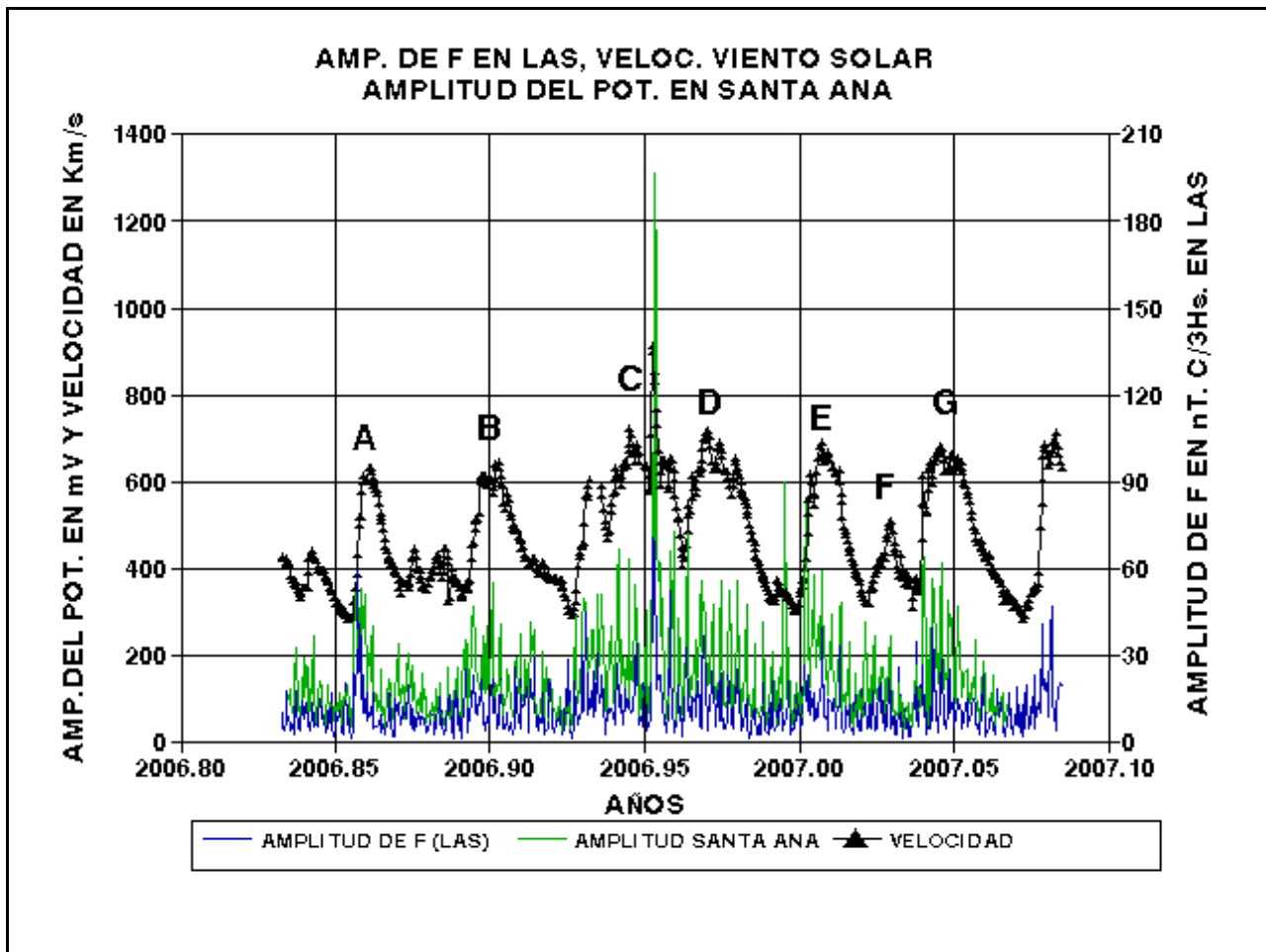


Figura 20

De estos gráficos se procedió a analizar los dos conjuntos de registros del potencial V. El primer registro es el realizado entre el 1° de noviembre de 2006 y el 13 de diciembre de 2006, y el segundo registro es el realizado entre el 13 de diciembre de 2006 y el 25 de enero de 2007. Se determinaron las rectas de ajuste para cada uno de ellos y se las compara con la recta determinada para F en LAS. Esto se muestra en la figura 21, donde la tendencia del 1° registro es mucho menor que la del 2° registro, lo cual podría deberse a cambios en los valores medios del intervalo de la VVS, en cada uno de ellos.

$$\overline{VVS}(1^{\circ} \text{ registro}) = 445.0 \text{ Km/s}$$

$$\overline{VVS}(2^{\circ} \text{ registro}) = 502.3 \text{ Km/s}$$

$$\overline{ap}(1^{\circ} \text{ registro}) = 19.7 \text{ nT}$$

$$\overline{ap}(2^{\circ} \text{ registro}) = 24.4 \text{ nT}$$

$$\overline{F}_{LAS}(1^{\circ} \text{ registro}) = 23290.1 \text{ nT}$$

$$\overline{F}_{LAS}(2^{\circ} \text{ registro}) = 23281.5 \text{ nT}$$

Se demuestra que el incremento de la \overline{VVS} produce perturbaciones mayores en el índice \overline{ap} , y por ende el efecto global promedio de los sistemas de corrientes magnetosféricas e ionosféricas hace decrecer el valor medio de F (\overline{F}), al que se le suma la tendencia a disminuir del campo de origen interno. Esto también se observa en los valores medios calculados de los máximos y mínimos trihorarios de F en LAS, para el intervalo comprendido en el 1° y 2° registros, resultando:

$$\overline{F_{MAX}}(1^{\circ} \text{ registro}) = 23295.5 nT$$

$$\overline{F_{MAX}}(2^{\circ} \text{ registro}) = 23287.4 nT$$

$$\overline{F_{MIN}}(1^{\circ} \text{ registro}) = 23284.7 nT$$

$$\overline{F_{MIN}}(2^{\circ} \text{ registro}) = 23275.1 nT$$

Por lo tanto se procedió a determinar una función que represente la variación de los valores máximos y mínimos del potencial para el conjunto de datos correspondiente al 1° registro de SA y al 2° registro de SA en forma independiente.

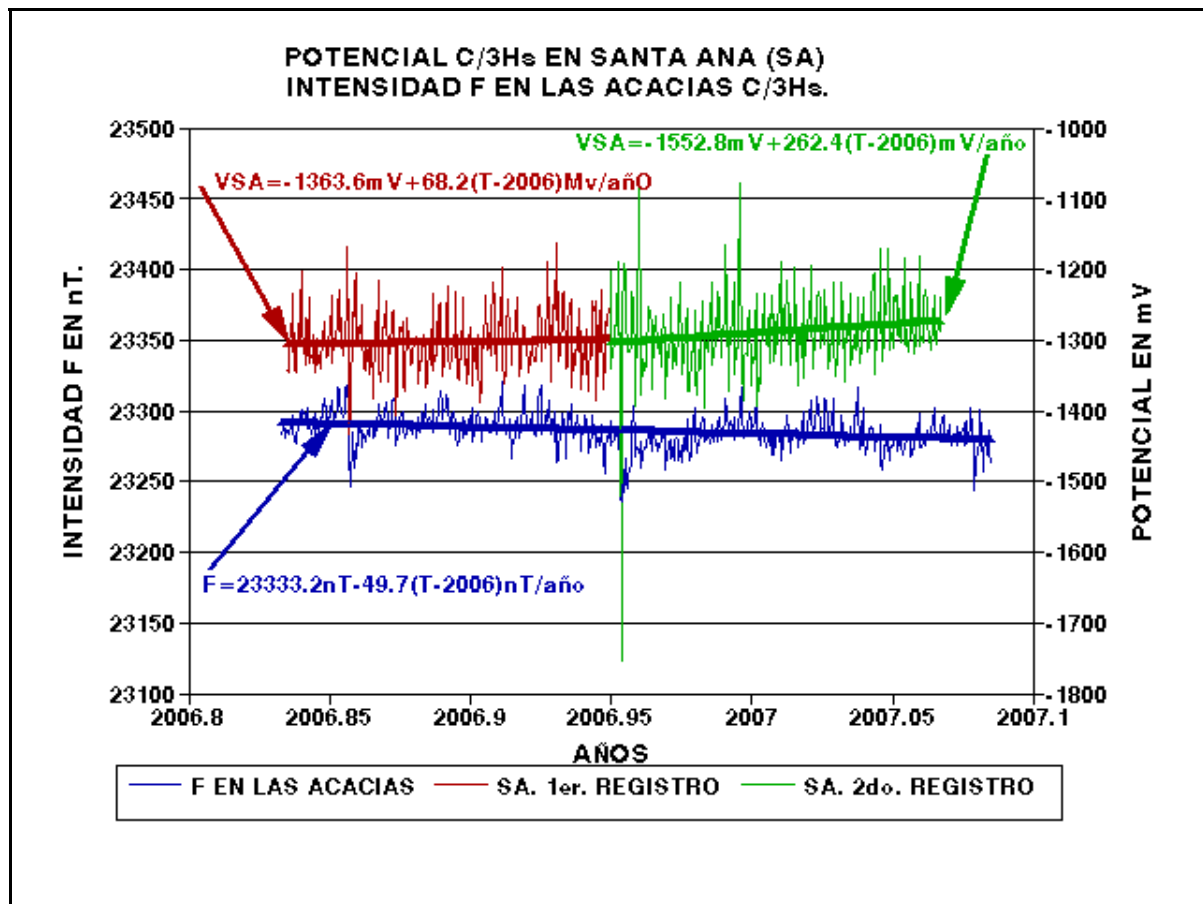


Figura 21

La función de mejor ajuste fue del tipo $V = A + B \log(\delta F)$, siendo (δF) la amplitud trihoraria de F registrada en LAS. Los resultados se muestran en las figuras 22 y 23, donde se incorporó el índice ap como elemento de evaluación de la actividad magnética media global.

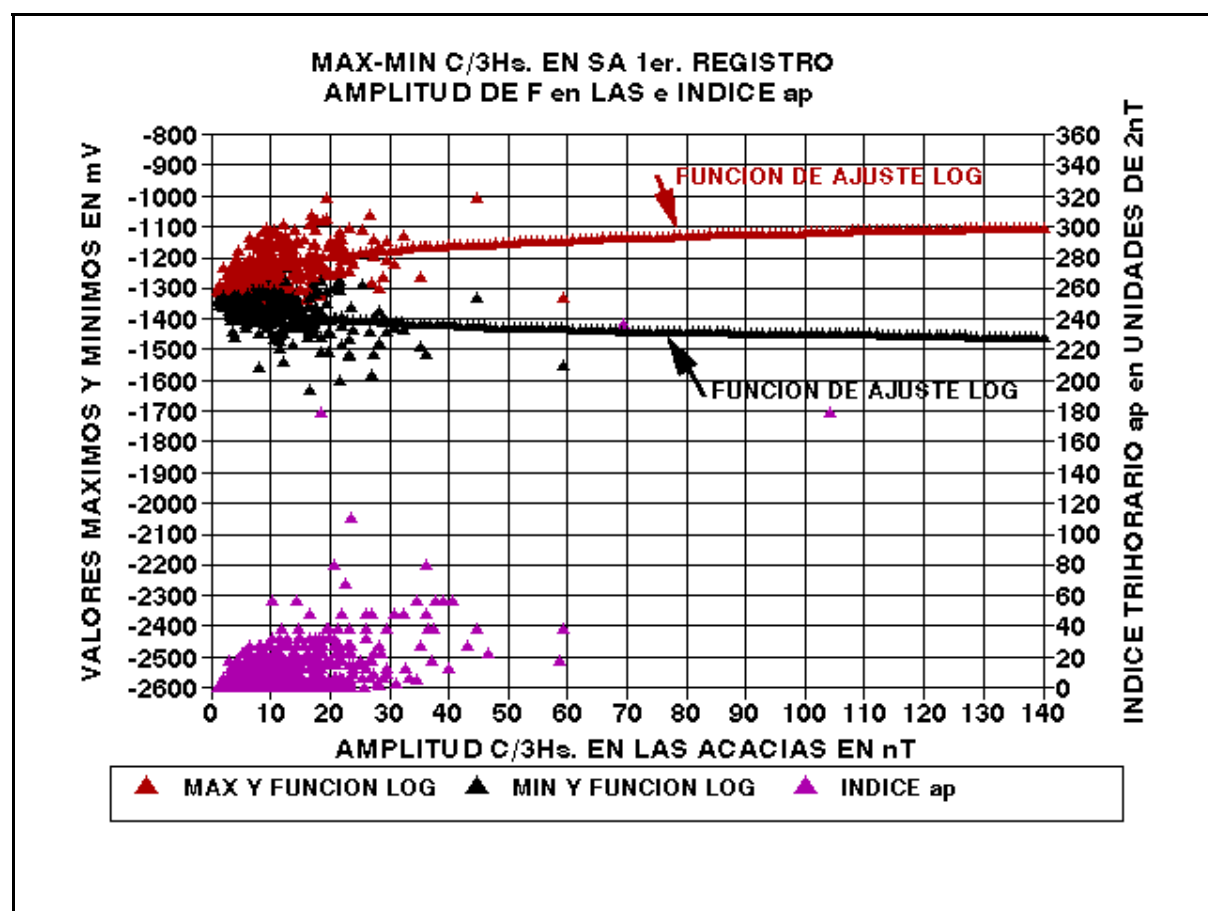


Figura 22

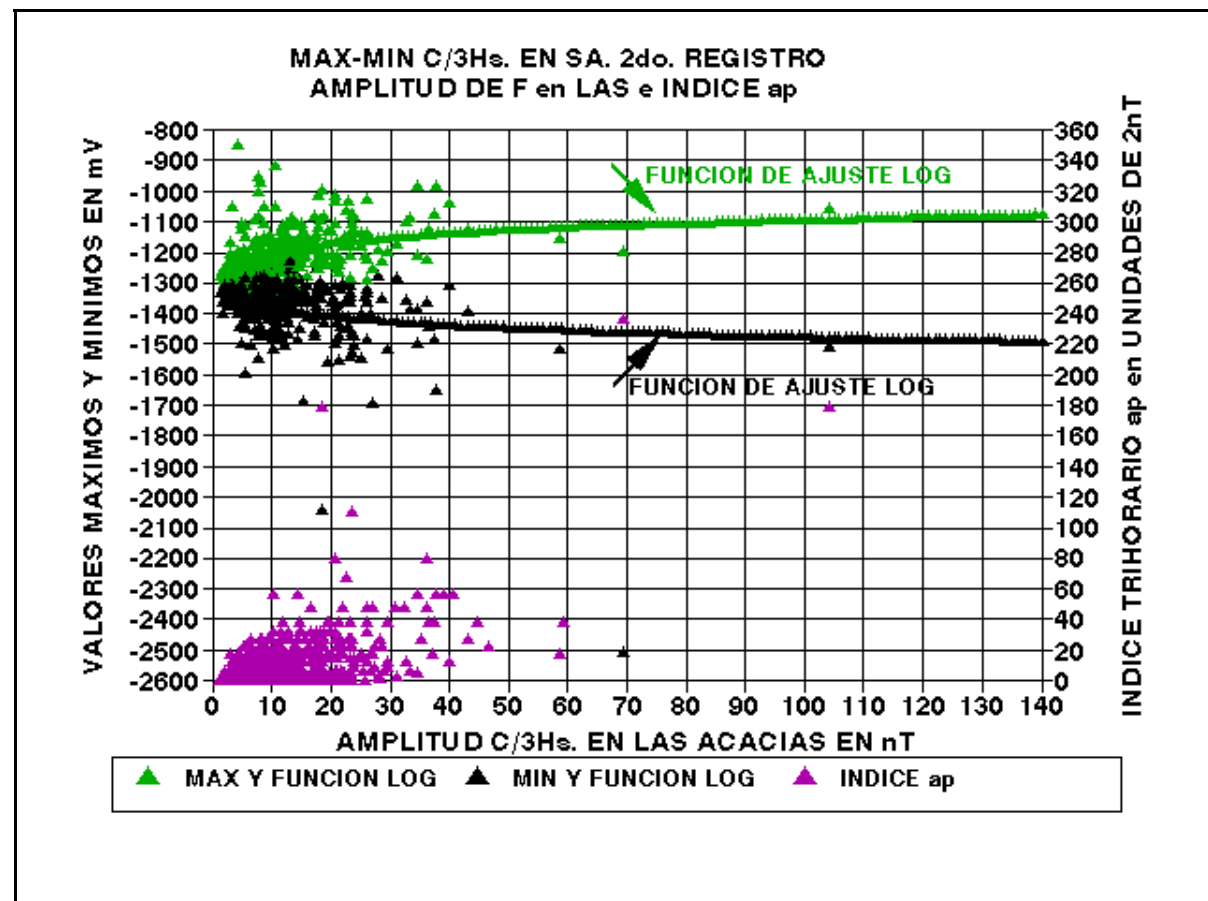


Figura 23

En la figura 24 se graficaron las funciones determinadas utilizando el método de mínimos cuadrados , habiendo previamente linealizado el sistema mediante la aplicación de un cambio de escala. Los resultados son los siguientes:

1º registro de SA:

$$SA_{MAX}(mV) = -1338.7mV + 109.1 \log[\delta F(nT)]mV / nT \quad , \quad \sigma = 52.5mV$$

$$SA_{MIN}(mV) = -1305.7mV - 72.1.1 \log[\delta F(nT)]mV / nT \quad , \quad \sigma = 52.3mV$$

con $0 < \delta F \leq 350nT$

2º registro de SA:

$$SA_{MAX}(mV) = -1314.7mV + 110.7 \log[\delta F(nT)]mV / nT \quad , \quad \sigma = 67.4mV$$

$$SA_{MIN}(mV) = -1277.0mV - 99.6 \log[\delta F(nT)]mV / nT \quad , \quad \sigma = 94.5mV$$

con $0 < \delta F \leq 350nT$

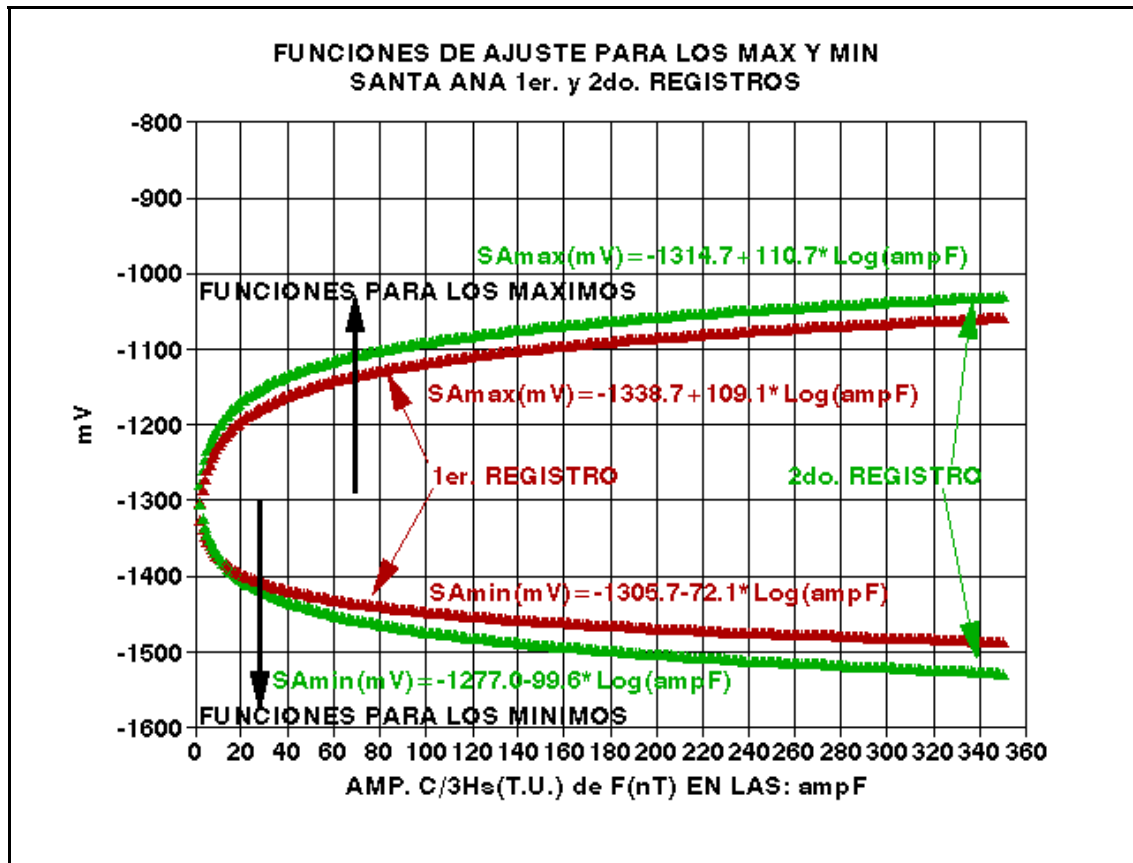


figura 24

Se determinó la desviación estandar del ajuste y se recalcularon para el 1º y 2º registros las funciones en $\pm 3\sigma$ con el fin de determinar el intervalo de validez de las mismas. Esto se presenta en las figuras 25 y 26. En esta última figura se observan dos valores extremos del potencial (entre los -2000 y -2500 mV) para un δF menor que 80 nT.

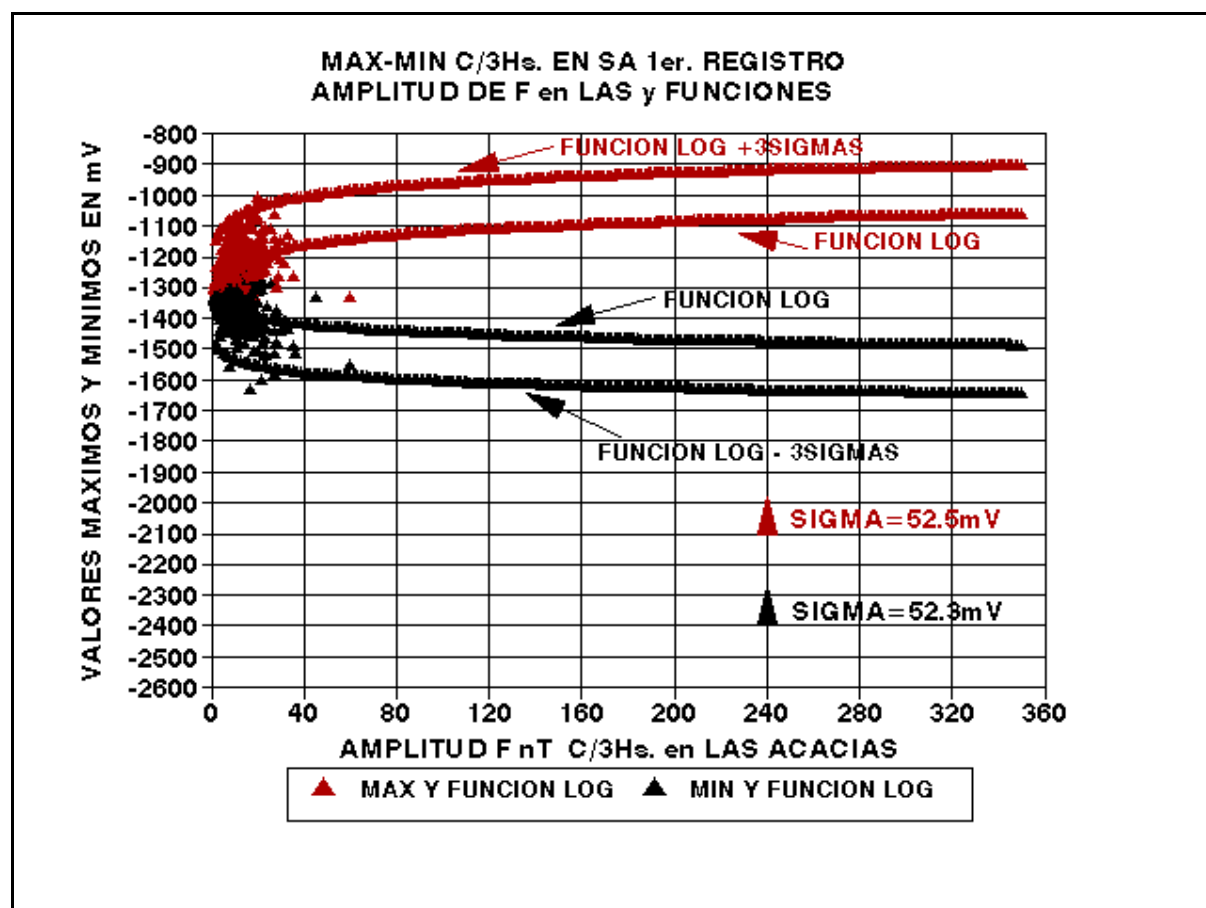


Figura 25

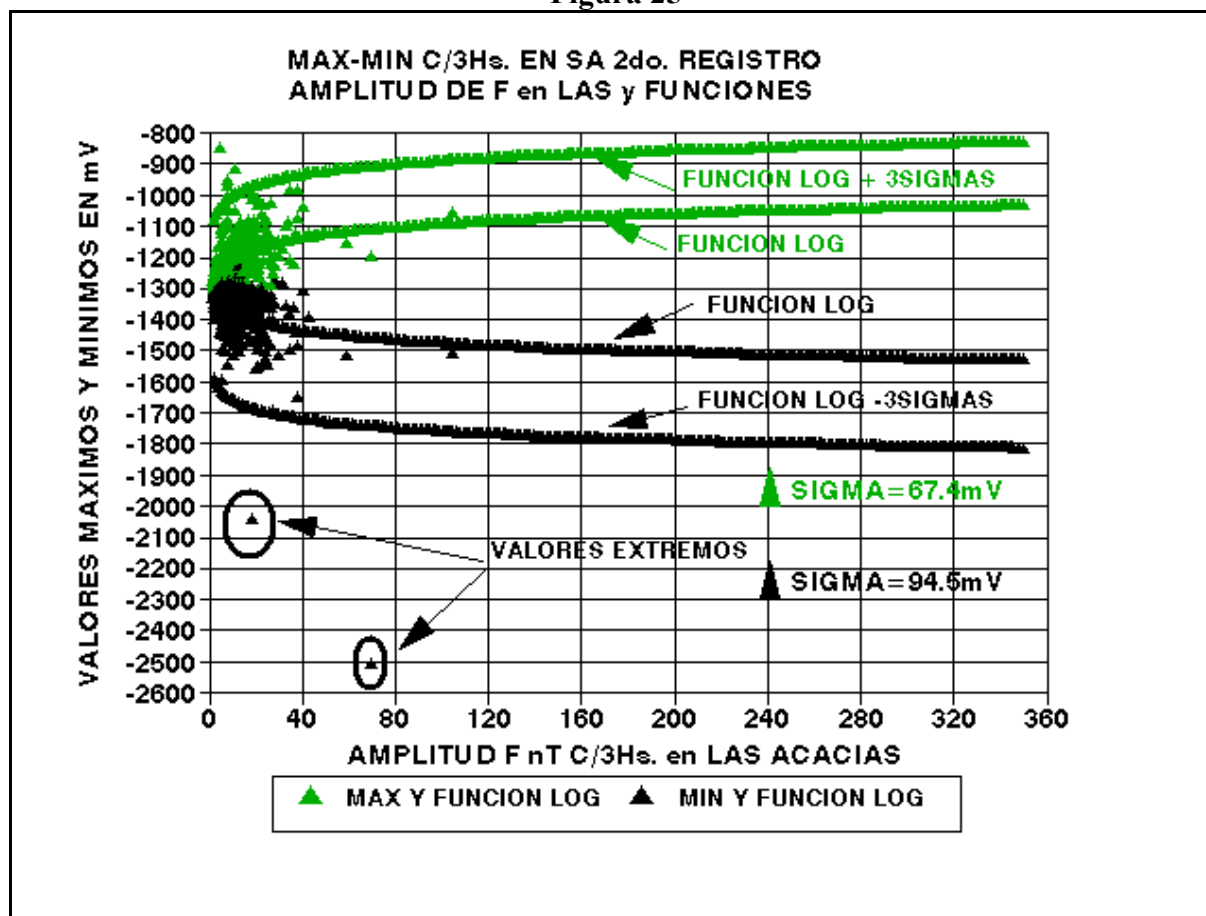


Figura 26

Finalizado este análisis y para tener mayor estadística, se realizaron ajustes con diferentes tipos de funciones sobre las series de potencial V promedio cada 3 horas, valores máximos y mínimos respecto de la amplitud δF , para todo el intervalo comprendido entre el 1° de noviembre de 2006 y el 25 de enero de 2007.

La figura 27 muestra las rectas de ajuste para el potencial V y el campo F promediados cada 3 hs. De ella se deduce que el crecimiento de V es de 136.4 mV/año. Esto no es un indicativo terminante que pueda inducir a suponer que a medida que decrece F , pueda crecer en su valor medio V , pero como se mencionó anteriormente, es posible que ondas de largo período en la VVS generen cambios equivalentes en el potencial inducido.

Al conjunto de datos $(\delta V, \delta F)$ se le ajustaron distintos modelos analíticos: lineal, logarítmicos de orden 1, 2 y 4 (en la escala semilogarítmica) y potencial (en escala bilogarítmica). Estos resultados se muestran en las figuras 28 en escala semilogarítmica, y en la figura 29 en escala bilogarítmica.

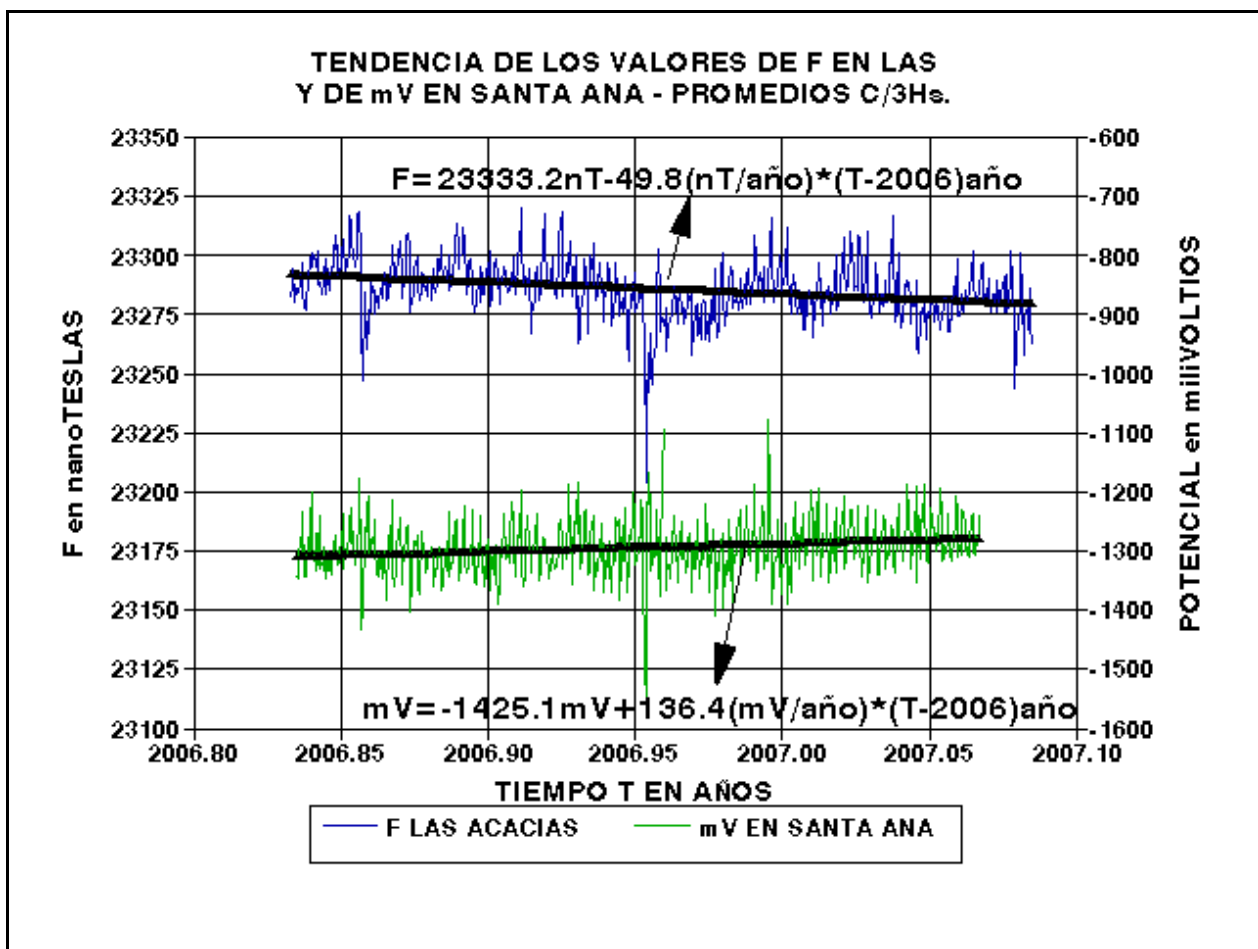


Figura 27

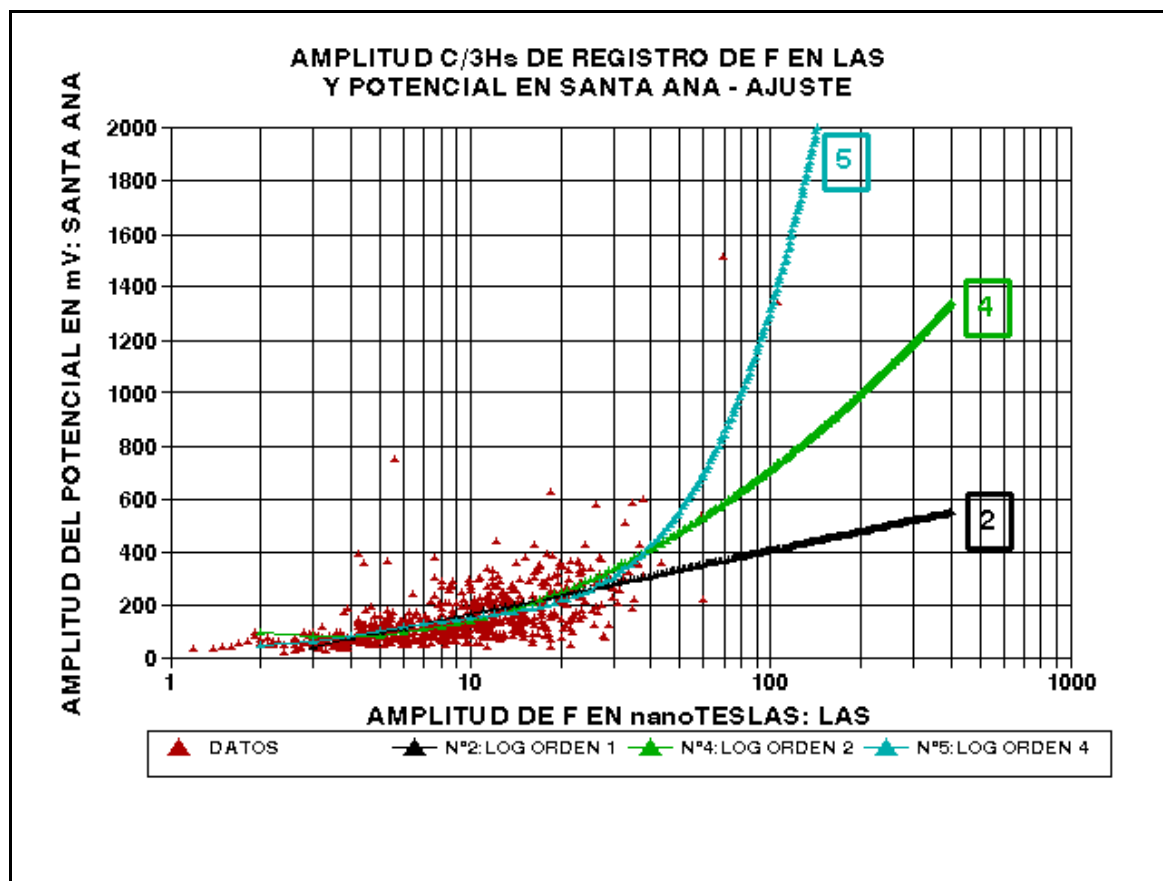


Figura 28

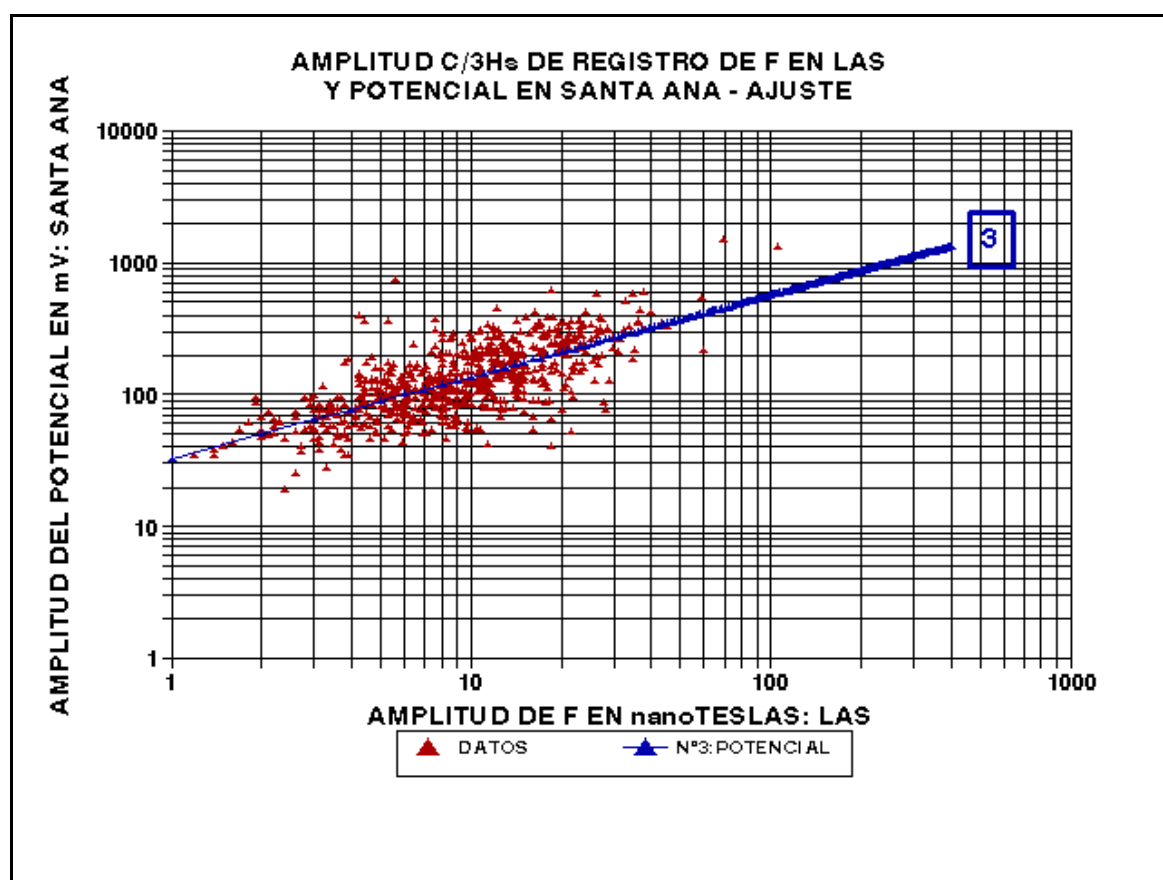


Figura 29

En la figura 30 se muestran en escala normal todos los modelos y los datos. Los resultados de estos ajustes son los siguientes:

(3)Función Potencial: $\delta V(mV) = 33.024 (\delta F(nT))^{0.61579}$

Funciones Logarítmicas:

(2)Expresión lineal : $\delta V(mV) = -71.51 + 237.65 \log(\delta F(nT))$

(4)Expresión de orden 2: $\delta V(mV) = 169.857 - 327.463 \log(\delta F(nT)) + 298.187 [\log(\delta F(nT))]^2$

(5)Expresión de orden 4: $\delta V(mV) = \sum_{k=0}^N A_k [\log(\delta F(nT))]^k$, para: $N = 4$ y $A_0 = 135.371$

$$A_1 = -722.058$$

$$A_2 = 1867.395$$

$$A_3 = -1653.171$$

$$A_4 = 523.518$$

(1)Recta: $\delta V(mV) = 46.017 + 9.633 (\delta F(nT))$

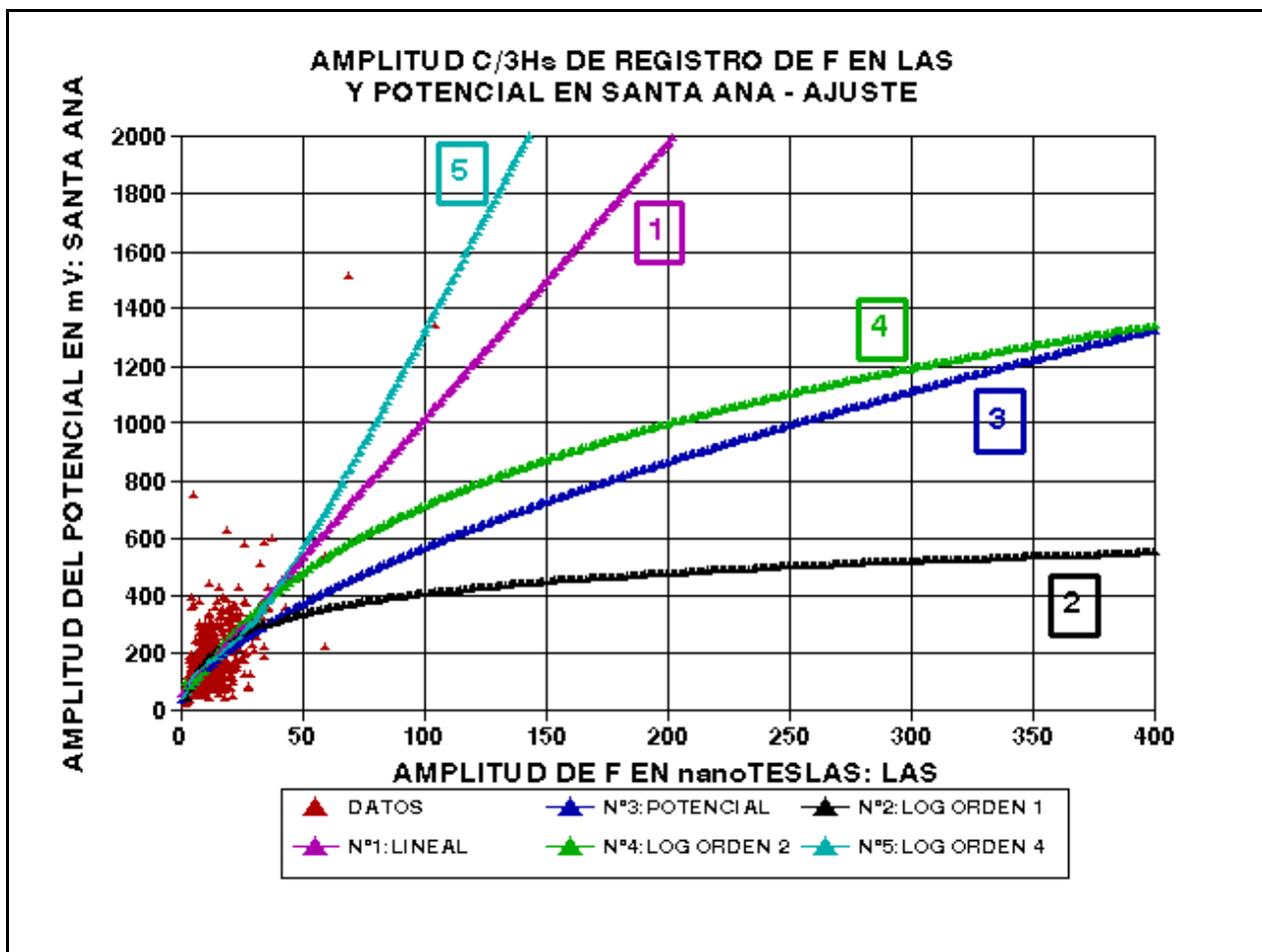


figura 30

La siguiente tabla muestra el valor de la amplitud pico a pico sobre la recta de ajuste de cada modelo analítico utilizado para valores de δF (pico a pico) de 50, 100, 150, 200, 250, 300 y 350 nT.

Recta de ajuste: $V(mV) = -1425.1(mV) + 136.4\left(\frac{mV}{año}\right)(T - 2006.0)(año) \pm \frac{1}{2}\delta V(mV)$

δF	(1) recta	(2)log orden 1	(3) potencial	(4) log orden 2	(5) log orden 4
nT	$\delta V(mV)$	$\delta V(mV)$	$\delta V(mV)$	$\delta V(mV)$	$\delta V(mV)$
50	528	332	367	474	553
100	1009	404	563	708	1312
150	1491	446	723	869	2111
200	1972	475	863	995	2897
250	2454	498	990	1099	3657
300	2936	517	1107	1188	4389
350	3417	533	1217	1266	5094

La figura 31 y 32 muestran el aspecto general del registro en SA y Punta Lara TCS y Punta Lara TGS. Por simple observación son registros en oposición de amplitud (desfasados 180 °) y valor de base aumentados en 2500 mv para TCS y 2450 mV para TGS (ver figuras 31 y 32); efectuadas estas correcciones se observa que los registros del gasoducto TCS se encuentran en fase y sus amplitudes son casi coincidentes con las observaciones de Santa Ana. En cuanto a TGS, es un registro totalmente amortiguado y solo muestra variaciones de tendencia (ver figura 33). Por lo tanto la información sobre el comportamiento relativo del potencial espontáneo registrado con parámetros geofísicos terrestres y espaciales, se reducen a la serie temporal del registro del potencial de Santa Ana.

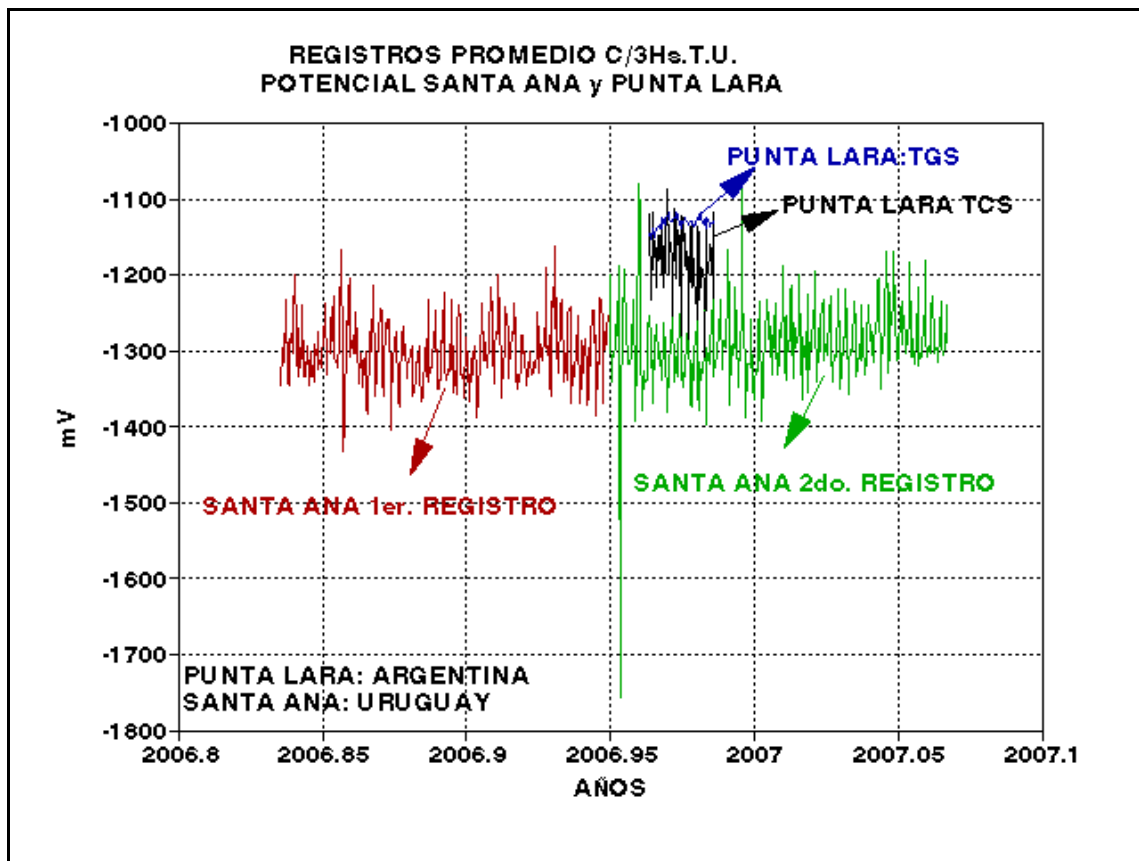


Figura 31

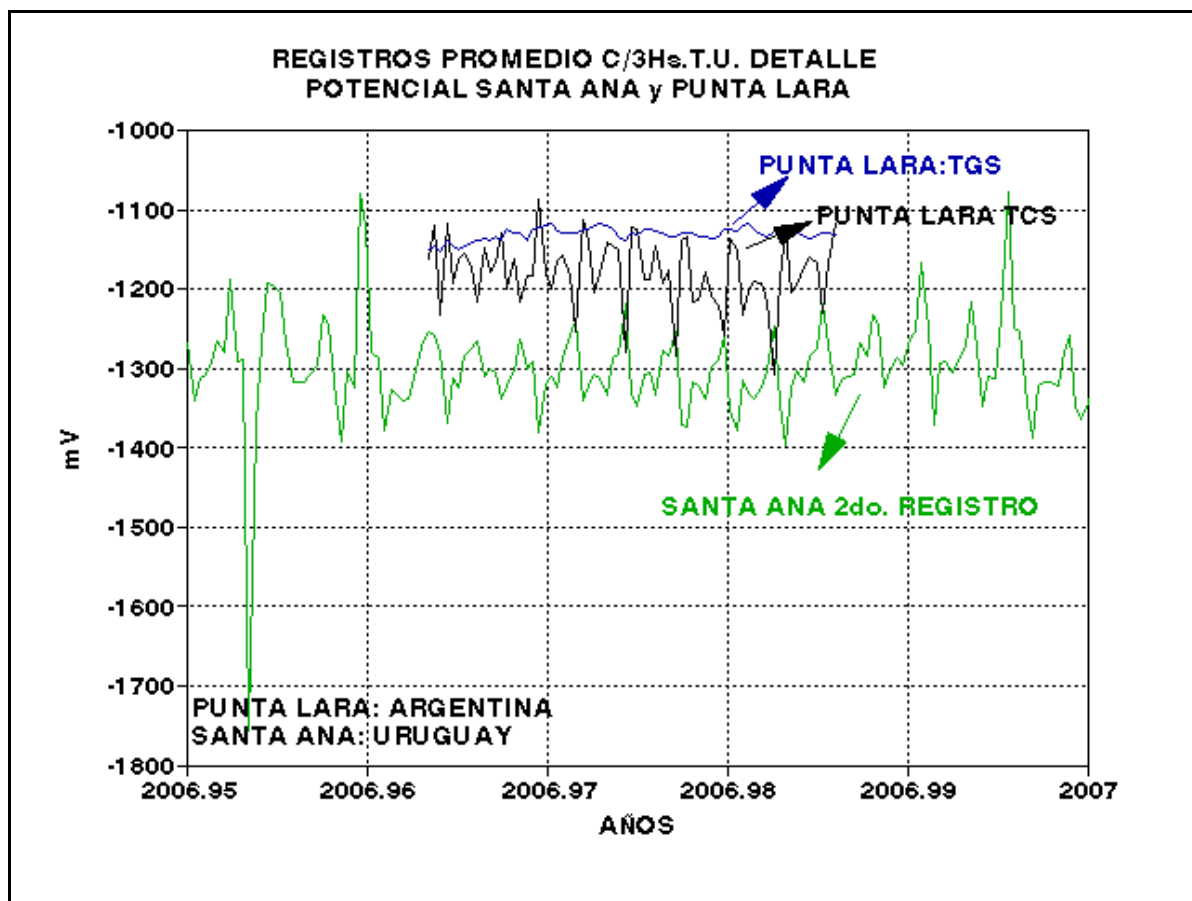


Figura 32

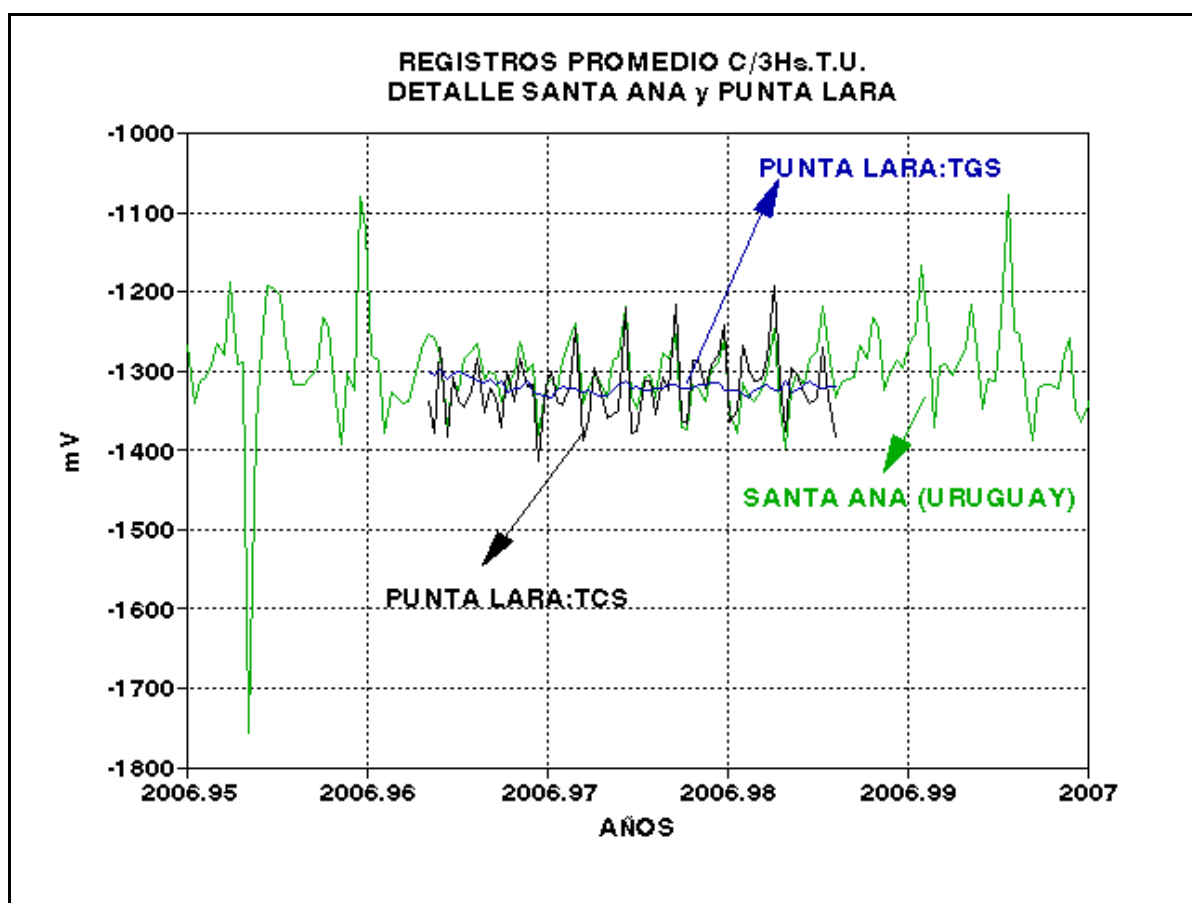


Figura 33

Por inspección de las gráficas 10, 11.a, 11.b, 12 y 14, las amplitudes máximas de V y de F se producen en intervalos menores o iguales a 48 horas. Para ello se analizaron las amplitudes promedio del potencial V y de F utilizando una ventana móvil de 48 horas de amplitud cada 3 horas, en todo el intervalo de registro de Santa Ana. Con la misma técnica utilizada con los promedios trihorarios, se calcularon funciones del tipo lineal, logarítmica (ver figura 34 en escala semilogarítmica) y potencial (ver figura 35 en escala bilogarítmica), y cuya gráfica global se muestra en la figura 36. Sus expresiones analíticas son las siguientes:

Recta: (1) $\delta V (mV) = -12.9747 + 9.3378 (\delta F (nT))$, para $\delta F \geq 20nT$

Logarítmica: (2) $\delta V (mV) = -1364.3 + 1091.1 \log(\delta F (nT))$, para $\delta F \geq 20nT$

Función Potencial: (3) $\delta V (mV) = 14.316 (\delta F (nT))^{0.8695}$, para $\delta F \geq 20nT$

Entonces la tabla de valores de amplitudes tiene para δV en función de δF los siguientes resultados:

δF nT	(1)Recta	(2)logarítmica	(3)potencial
50	454	490	430
100	921	818	785
150	1388	1010	1117
200	1855	1146	1434
250	2322	1252	1741
300	2788	1338	2040
350	3255	1417	2333

Cumplimentando con la relación: $V (mV) = -1425.1 + 136.4(T - 2006.0) \pm 0.5 \delta V$

En rojo se marcó la región donde los valores extremos mínimos son menores que -2500 mV

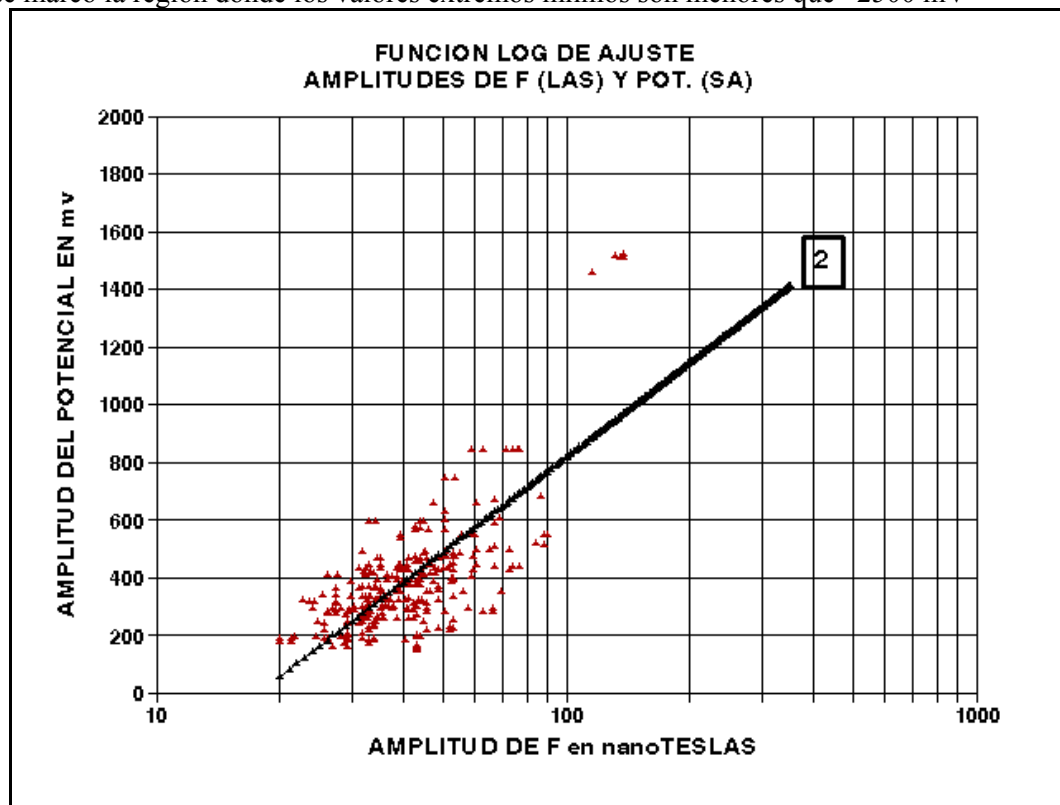


Figura 34

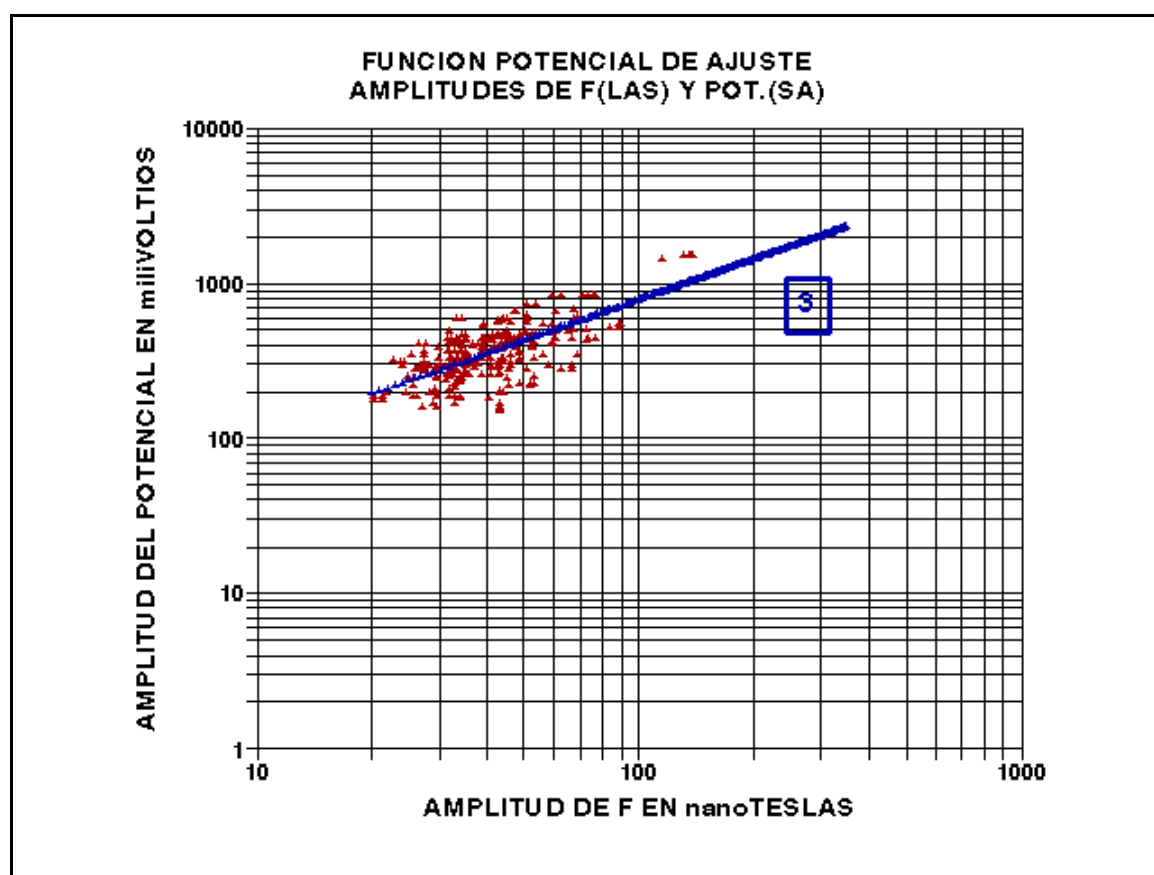


Figura 35

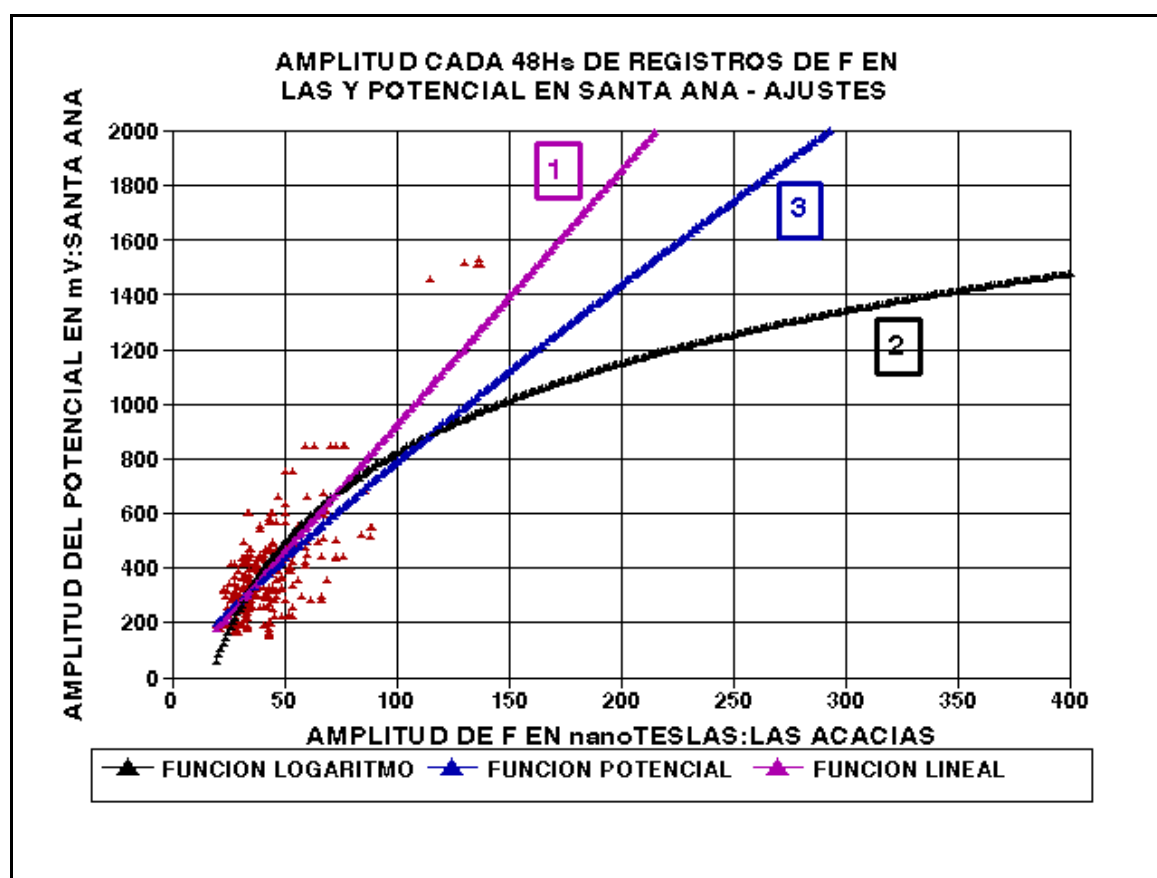


Figura 36

Finalmente se calcularon las funciones para los valores máximos y mínimos absolutos para el potencial cada 48 horas en función de δF . Los resultados se grafican en las figuras 37 y 38.

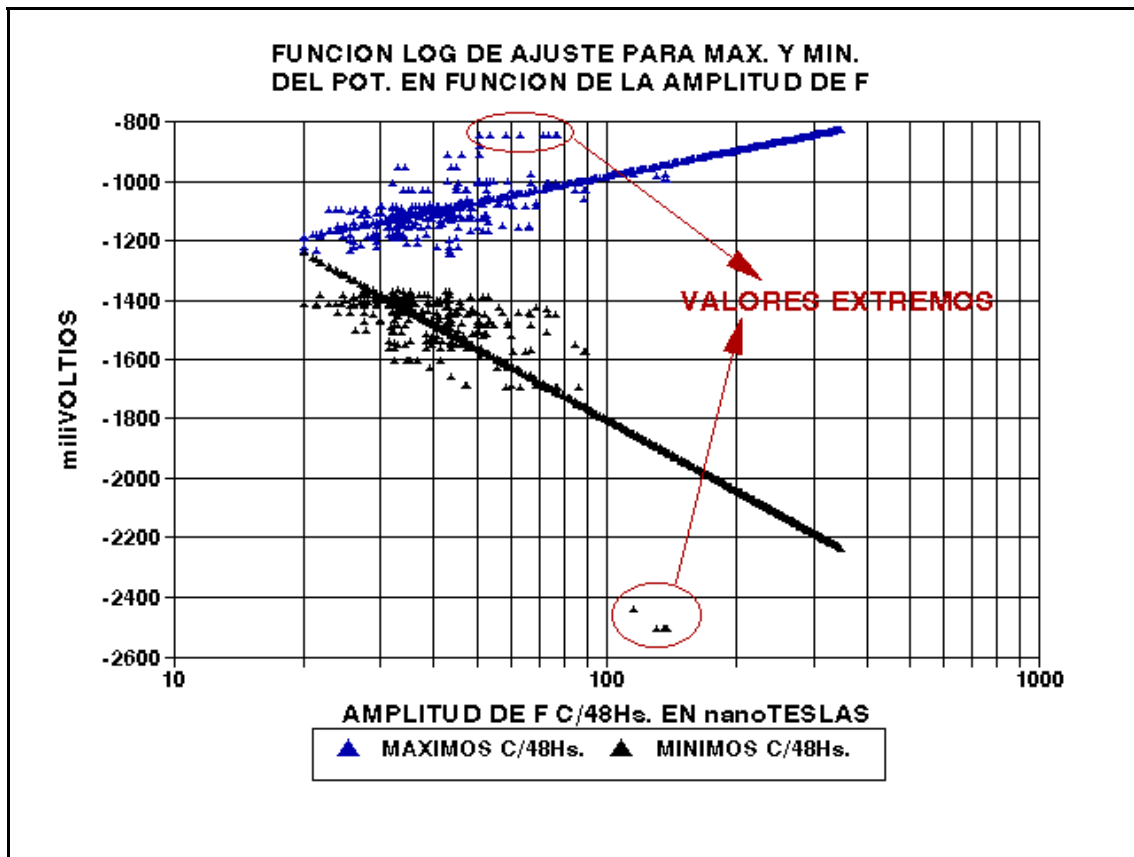


Figura 37

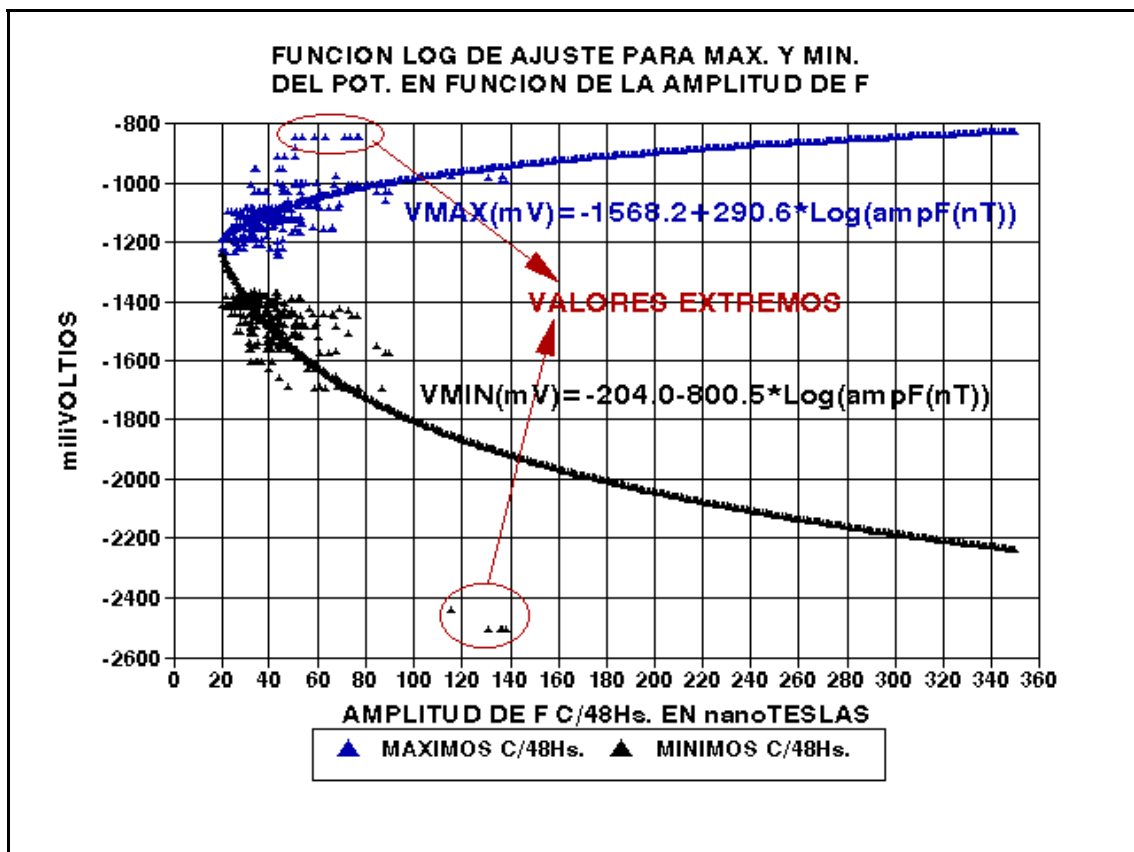


Figura 38

Las expresiones son las siguientes:

$$V_{MAX} (mV) = -1568.2mV + 290.6(mV / nT) \log(\delta F(nT))$$

$$V_{MIN} (mV) = -204.0mV - 800.5(mV / nT) \log(\delta F(nT))$$

estas expresiones ahora son pronunciadamente asimétricas respecto de la recta $V = -1200mV$, como lo son los valores V_{MIN} respecto de V_{MAX} .

El decrecimiento de V_{MIN} respecto de V_{MAX} en función de δF se muestra en la figura 39.

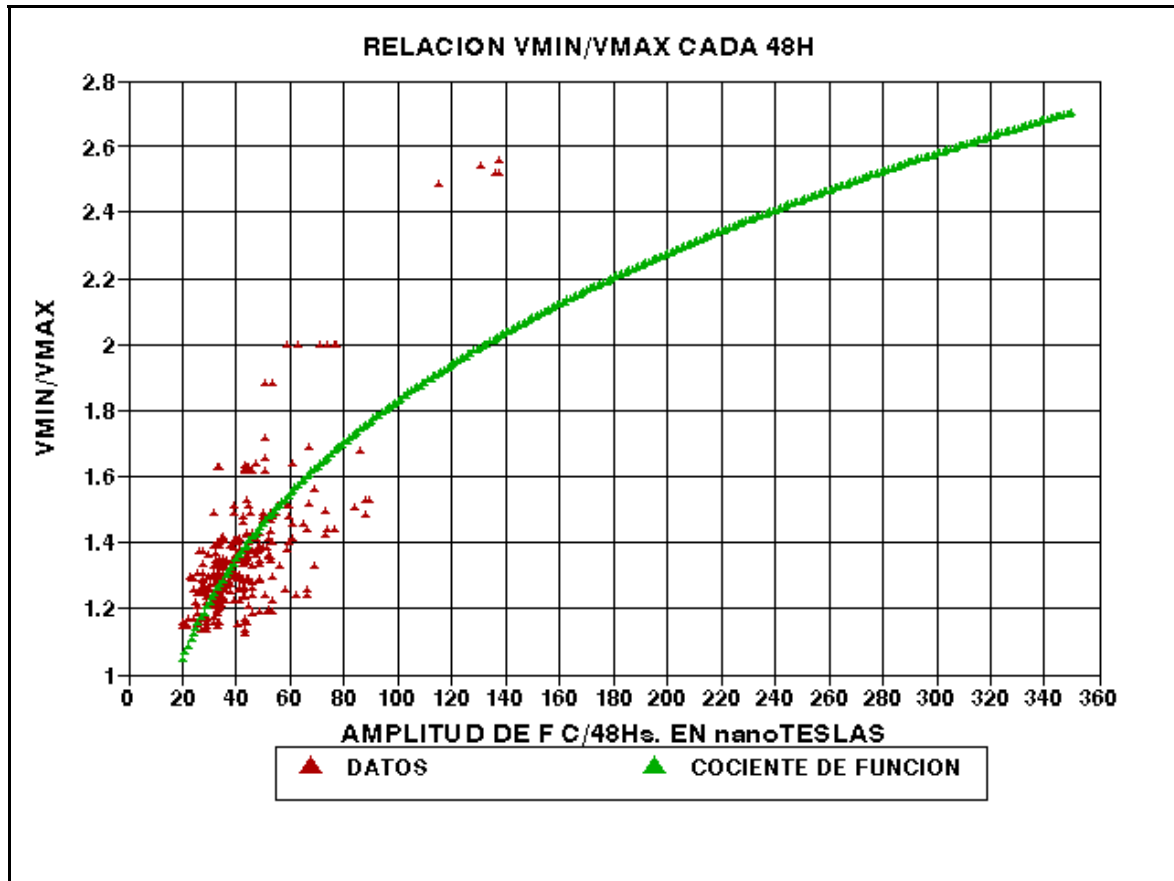


Figura 39

De esta figura se desprende que para tormentas con amplitudes de 300 nT el valor del potencial mínimo será casi 2.6 veces el valor de amplitud del potencial máximo alcanzado en un intervalo de 48 horas. Sin embargo del cociente de V_{MIN}/V_{MAX} a partir de los datos, encontramos que para $\delta F = 140nT$, ya se tienen valores de 2.6 y de 2 para $60 < \delta F < 80$, como valores máximos.

Esto nos indica una vez más un comportamiento asimétrico de las observaciones, producto del efecto de la actividad de las tormentas magnéticas y en especial del efecto de la corriente anillo, que tiende a producir un pronunciado decrecimiento de F en esta región.

CONCLUSION

Del análisis realizado con la información producida por la Empresa LOXX Service, se desprende que la actividad perturbadora registrada en el potencial espontáneo V (mV) está en correlación con las perturbaciones en la intensidad total F del Campo Magnético registrado en Las Acacias. Ambos registros muestran una marcada relación con la variable geoeffective del VVS (velocidad del Viento Solar). Las funciones calculadas permiten identificar para las variaciones de la amplitud de la

intensidad F del campo magnético distintos umbrales de variabilidad del potencial V . Cabe aclarar que el escenario geoespacial del evento en estudio corresponde a la finalización del Ciclo Solar N° 23, con un Número de Manchas Solares promedio mensual menor que 30 y por ende la cantidad de tormentas magnéticas de carácter mayor ó severo es menor. A esto se le superpone el efecto de encontrarse el Hemisferio Sur en el solsticio de verano.

Las dos tormentas magnéticas registradas, una en noviembre de 2006 y otra en diciembre de 2006, muestran que para una relación de amplitud pico a pico de la tormenta registrada en el mes de diciembre (días 14-15), respecto de la noviembre (días 9-10) de 1.6, la relación correspondiente a la amplitud en mV del potencial V registrado en Santa Ana 1° registro, respecto de el 2° registro, es de 2.7, lo cual es otro indicativo de que Santa Ana 2° registro se comporta con una respuesta más perturbada que lo esperado .

Las tablas 1 y 2, y la figura 39, son un resultado aplicable para pronosticar futuros eventos de inducción en el gasoducto, según se comporte la amplitud de la perturbación magnética. Un mejor ajuste sería posible si se dispondría de por lo menos 1 año de registro continuo en las dos cabeceras del gasoducto (Santa Ana y Punta Lara), lo que facilitaría notablemente determinar los umbrales de los valores máximos y mínimos del potencial inducido en función de δF y definir mejor aún la función que la represente.

LOXX SERVICE CO.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

FACULTAD DE CIENCIAS ASTRONOMICAS Y GEOFISICAS

DEPARTAMENTO DE GEOMAGENTISMO Y AERONOMIA

La Plata , 21 de abril de 2007

<http://www.loxxservice.com>

geofisicogianibelli@yahoo.com.ar