

# Observación y análisis de la variación de parámetros geofísicos de un pozo ubicado en el piedemonte llanero

FÉLIX HUMBERTO MONTAÑO MEJÍA  
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá

## RESUMEN

Este artículo presenta el desarrollo de instrumentación especializada que se diseñó y se puso en funcionamiento con el fin de realizar la observación y el análisis de la variación de parámetros geofísicos de un pozo ubicado en el piedemonte llanero. La instrumentación está compuesta por una estación remota para el registro multiparámetro y una estación local en la cual se analizan los registros bajados de la estación remota mediante la interrogación periódica.

PALABRAS CLAVE: PROSPECCIÓN GEOFÍSICA, TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA, PIEDEMONTE, PARÁMETROS GEOFÍSICOS

## ABSTRACT

This paper shows geophysical characterization near a shallow well located in the Llano University (Villavicencio), which was conveniently selected because it's Piedemonte Llanero proximity, zone characterized by a very active fault system. The specialized instrumentation development is also described that was designed and started up to carry out a telemetry observation using a multiparameter remote station located near the well under observation and one local station in the National University of Colombia (Bogotá) from where geophysical parameters variations an analysis are permanently monitored.

KEY WORDS: GEOPHYSICAL PROSPECTING, ELECTRICAL TOMOGRAPHY, PIEDEMONTE, GEOPHYSICAL PARAMETERS

## INTRODUCCIÓN

Dado que Colombia está localizada en un ambiente sismotectónico de gran actividad y con alta frecuencia de sismos, existe la necesidad de contribuir con las observaciones de la actividad sísmica enfocada en los fenómenos premonitorios. Este proyecto de investigación consideró el desarrollo de instrumentación especializada que permita el registro permanente de parámetros geofísicos de un pozo somero y su entorno, la interrogación desde una estación local y el análisis de los resultados.

## LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El pozo de observación se localiza a unos 10 km al SE de la ciudad de Villavicencio, en predios de la Universidad del Llano, 50 m al este de los laboratorios de Ingeniería electrónica. Sus coordenadas geográficas son:

Latitud: 4°.04.485' norte  
(941.800 Planas origen Bogotá)  
Longitud: 73°.35.061' oeste  
(1'055.400 Planas origen Bogotá)

La altura es de 369 m sobre el nivel del mar. Se encuentra localizado sobre un terreno plano, en una zona donde la pluviosidad promedio anual alcanza 2700 mm.

## MARCO GEOLÓGICO

La zona preferencial para el inicio de las observaciones se ubica en la ciudad de Villavicencio, próxima al borde oriental de la cordillera Oriental de Colombia, en los departamentos de Meta, Cundinamarca y Casanare, conocida como piedemonte llanero. Es una zona caracterizada por un

sistema de fallas muy activo, denominado Sistema de falla del borde llanero, que incluye en su parte central las fallas de Altamira, Acacias, Guayuriba, Colepato, Cumaral, Tesalia, Lengupá, Guaicaramo, Servitá, Santa María y Yopal, entre otras (Paris y Romero, 1994; Ingeominas, 1998; Ingeominas, Upes, 1999; Sarria A, 1990). Estas fallas son en su mayoría de tipo inverso y de empuje (Page, 1986), con una componente destrual apreciable, y definen el límite entre rocas paleozoicas y cretácicas de la cordillera y los estratos menos perturbados del Terciario y Cuaternario que infrayacen en los Llanos Orientales, al este de la cordillera. El área local donde se encuentra el pozo corresponde a terrazas cuaternarias de origen aluvial, y por tanto, de composición areno gravosa, seguramente asociadas a los ríos Ocoa y Guayuriba.

## ENTORNO GEOFÍSICO

Se intenta hacer una breve descripción tanto de la naturaleza dinámica de tipo regional que caracteriza el área, como de algunas características físicas locales en y alrededor del pozo.

### SISMOTECTÓNICA

El área de estudio está caracterizada por una sismicidad relativamente superficial (< 50 km), que genera movimientos por esfuerzos, principalmente compresivos entre 0.1 y 1.1 cm/año que pueden generar sismos de magnitud cercana a  $M_s = 7$  (Vergara *et al.*, 1995).

### CAMPOS GRAVITACIONAL Y MAGNÉTICO

Los valores absolutos de los campos gravitacional y magnético proporcionan una referencia regional sobre ubicación global y características regionales del área. Estos valores cambian en el tiempo y puede ser más útil encontrar valores relativos o anomalías que dan interferencias sobre

distribución local de densidades (caso gravimétrico) o susceptibilidades magnéticas (caso magnético); a la vez se pueden proporcionar ideas sobre estructuras generales.

El valor del campo gravitacional,  $g$ , cercano a predios de la Universidad de Llano es de 977852 mgal (1 gal = 1 cm/s), para 1998, mientras que el campo magnético en junio de 2000 era del orden de 31800 nT (nano Teslas). La anomalía de Bouguer en el área cercana a Villavicencio es del orden de -100 mgal, indicando una profundidad del orden de 40 km al manto y localmente dominada por sedimentos de comparativamente baja densidad.

**CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA**

Los métodos eléctricos utilizados en este trabajo –sondeos eléctricos verticales, SEV, tomografía de resistividad eléctrica, TER, y potenciales espontáneos, SP– proporcionan información de mayor detalle y caracterizan particularmente el sitio, pudiéndose iniciar una observación de sus valores en el tiempo, para asociarlos con cambios físicos del subsuelo.

**UBICACIÓN DE SONDEOS Y TOMOGRAFÍAS**

La figura 1 muestra la ubicación de los estudios eléctricos y las tomografías realizadas en la Universidad del Llano.

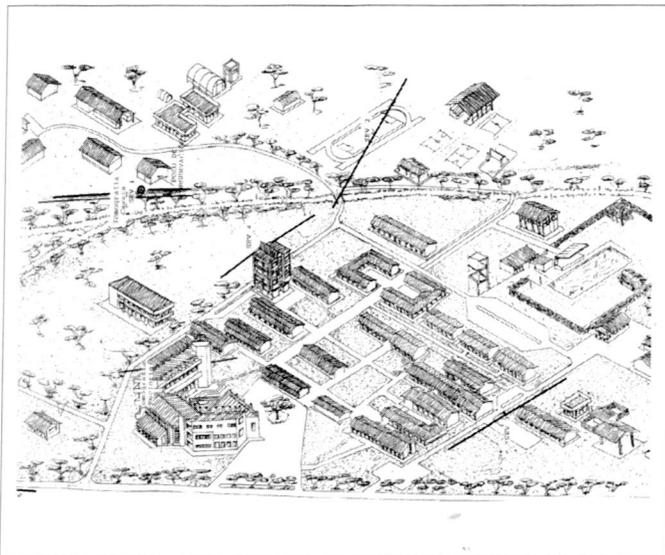


Figura 1. Ubicación de SEV y tomografías

**CARACTERIZACIÓN CON SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES**

TABLA 1. LOCALIZACIÓN DE SEV

SEV	Latitud	Longitud	Descripción
1	4°.04.485'	73°.35.061'	Pozo de observación
2	4°.04.329'	73°.35.010'	Cancha de fútbol
3	4°.04.319	73°.35.057	Veterinaria
4	4°.04.270	73°.35.101	Electrónica
5	4°.04.424'	73°.35.287'	Malla externa
6	4°.04.518'	73°.35.110'	Vía hacia el Ideam

Las siguientes figuras muestran los resultados de los SEV, con su respectiva interpretación.

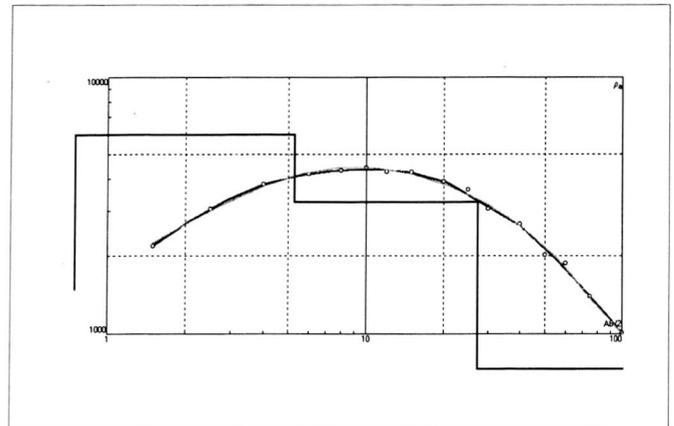


Figura 2. SEV 1 Pozo de observación. R.M.S.: 2.13%

TABLA 2. INTERPRETACIÓN POZO DE OBSERVACIÓN

N	$\rho$	h	d	Profundidad
1	1491	0.75	0.75	-0.75
2	5965	4.536	5.286	-5.286
3	3240	21.95	27.236	-27.236
4	659.8			

- Con N : Capa número
- $\rho$  : Resistividad de la capa en ohmios-metro.
- h : Espesor de la capa en metros (m)
- d : Profundidad de la base de la capa en metros
- R.M.S. : Raíz cuadrática media, de desviación entre los resultados del modelo y los datos obtenidos.

$$R.M.S. = \left[ \frac{\sum_{i=01}^{mm} (n_j - n_i)^2}{m^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

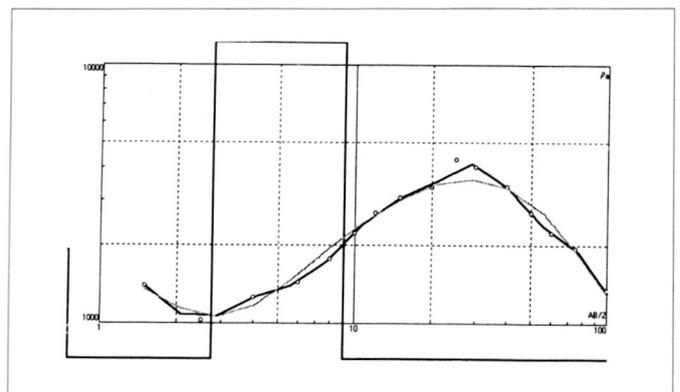


Figura 3. SEV 2 Cancha de fútbol. R.M.S.: 4.1%

TABLA 3. INTERPRETACIÓN CANCHA DE FÚTBOL

<i>N</i>	$\rho$	<i>h</i>	<i>d</i>	Profundidad
1	1914	0.75	0.75	-0.75
2	646	1.99	2.74	-2.74
3	16016	6.33	9.07	-9.07
4	714			

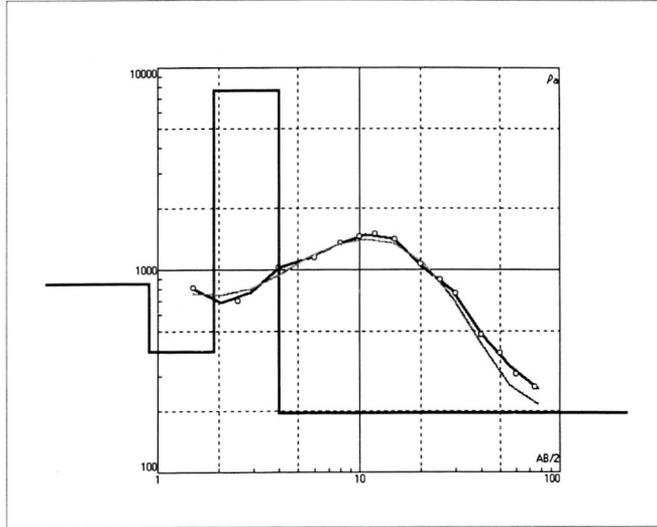


Figura 4. SEV 3 Veterinaria. R.M.S.: 6.32%

TABLA 5. INTERPRETACIÓN ELECTRÓNICA

<i>N</i>	$\rho$	<i>h</i>	<i>d</i>	Profundidad
1	191	1.26	1.26	-1.26
2	3888	21.9	23.2	-23.2
3	45.9			

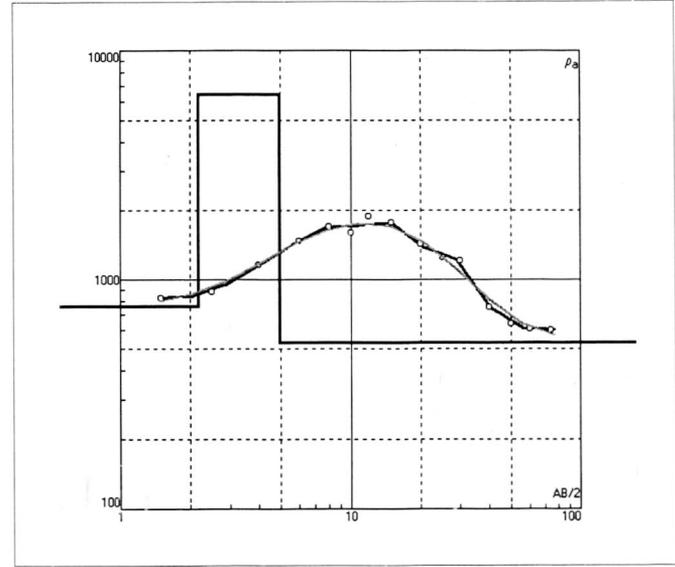


Figura 6. SEV 5 Exterior Unillano. R.M.S.: 4.52%

TABLA 4. INTERPRETACIÓN VETERINARIA

<i>N</i>	$\rho$	<i>h</i>	<i>d</i>	Profundidad
1	857	0.9	0.9	-0.9
2	395	0.998	1.9	-1.9
3	7674	2.1	4	-4
4	244			

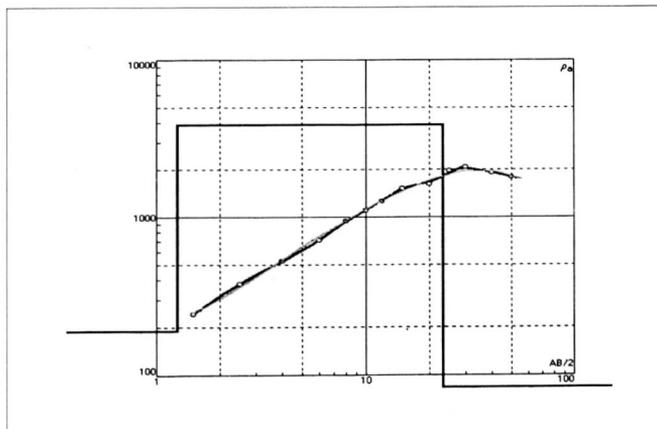


Figura 5. SEV Electrónica. R.M.S.: 4.31%

TABLA 6. INTERPRETACIÓN EXTERIOR UNILLANO

<i>N</i>	$\rho$	<i>h</i>	<i>d</i>	Profundidad
1	763	2.18	2.18	-2.185
2	6484	2.76	4.94	-4.942
3	530			

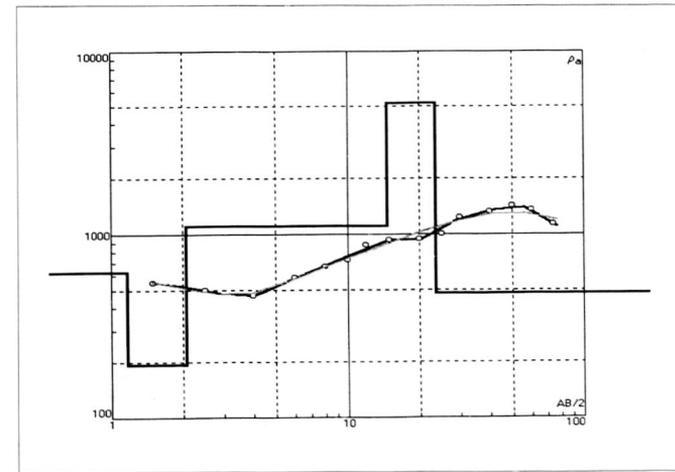


Figura 7. SEV Exterior IDEAM. R.M.S.: 4.6%

TABLA 7. INTERPRETACIÓN EXTERIOR IDEAM

N	$\rho$	h	d	Profundidad
1	625	1.17	1.17	-1.17
2	195	0.907	2.08	-2.08
3	1107	12.6	14.7	-14.68
	2180	8.71	23.4	-23.39
	477			

Los SEV muestran que en los primeros 75 m dominan valores de resistividad eléctrica que varían entre 150 y 5000 Ohm-metro. Estos valores son típicos de sedimentos areno gravosos, sin contenidos metálicos y más o menos saturados. Por observación directa de resistividades en diferentes litologías en el área, se ha establecido la siguiente correlación de resistividades con litologías:

TABLA 8. RESUMEN DE PROPIEDADES ELÉCTRICAS DEL SUBSUELO

Rango de resistividad Ohm-m	Rango de Profundidad m	Litología probable
190 - 1900	0.8 - 1.3	Efectos superficiales
195 - 750	1.2 - 25	Arenas más o menos saturadas
> 1000	1.0 - 25	Gravas y conglomerados
< 100		Arcillas

**TOMOGRAFÍA**

La naturaleza del subsuelo y su relativa continuidad se puede apreciar mejor, con la suposición de no continuidad lateral de las unidades, en la que se apoya la TER; quizás, esta es la herramienta que permitirá un mejor seguimiento de las propiedades físicas del subsuelo.

La siguientes figuras muestran dos secciones realizadas, una con centro en el pozo con dirección N40E y otra localizada a una distancia en línea recta de 200 m en cercanías a la Rectoría de la Universidad.

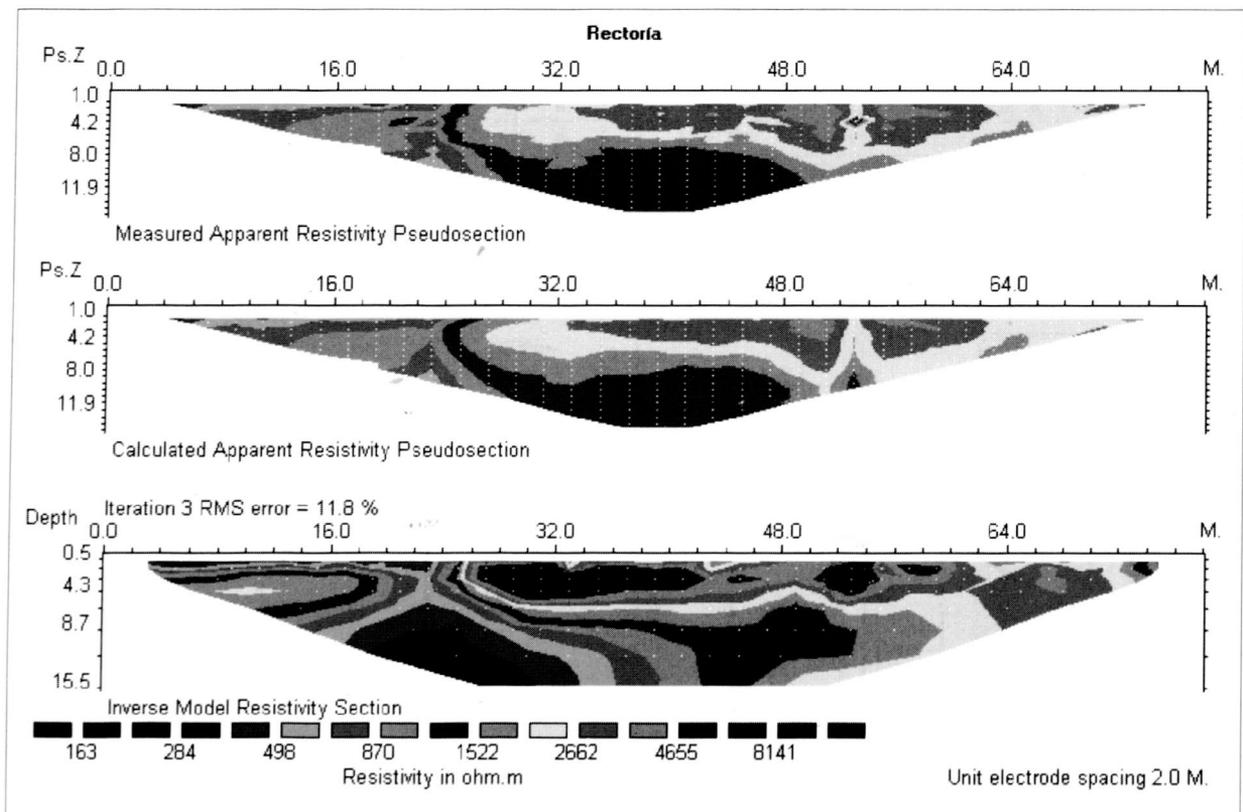


Figura 8. Tomografía rectoría

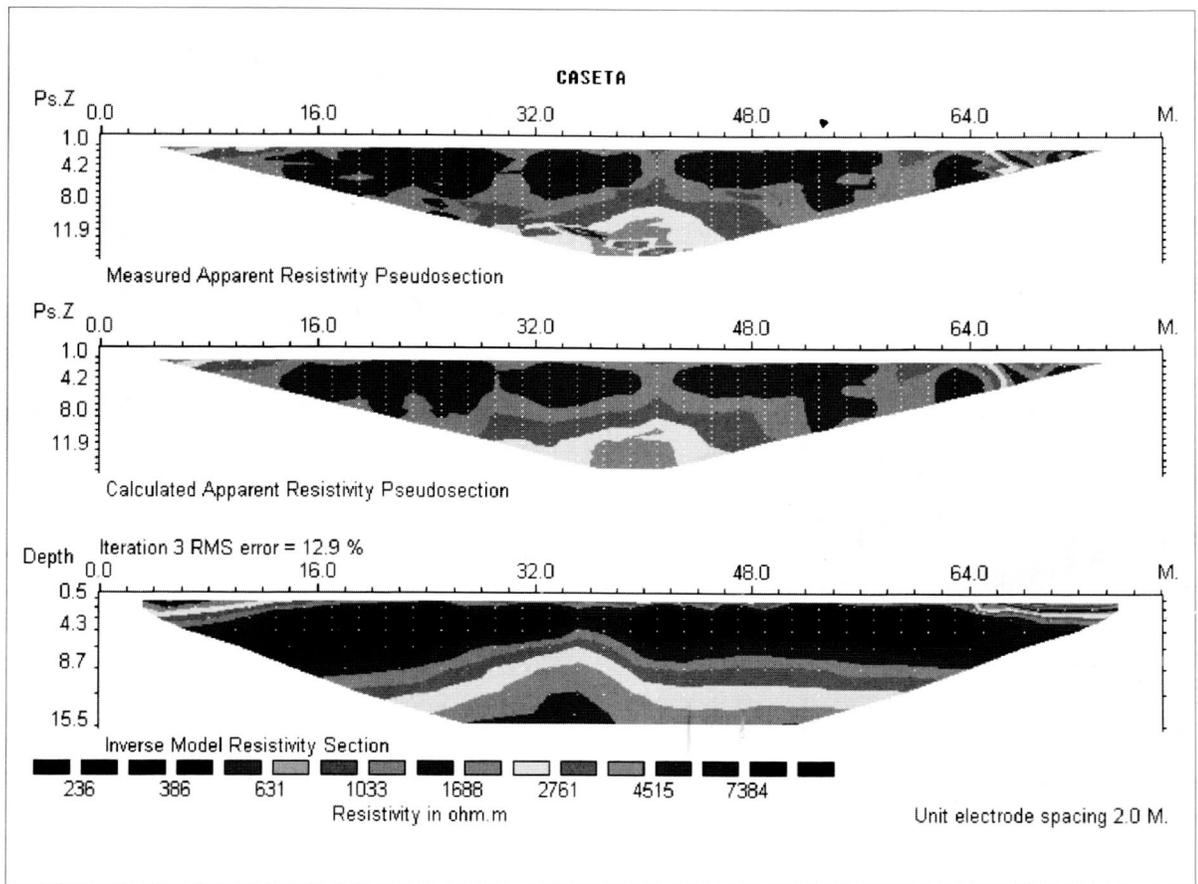


Figura 9. Tomografía Pozo de observación

Como se aprecia en las secciones, dominan los valores altos de resistividad eléctrica (sedimentos gruesos), como ya se había inferido a partir de los SEV.

#### POTENCIALES ESPONTÁNEOS

Dentro de la caracterización eléctrica de sitio, la otra herramienta utilizada fue la medición de potenciales espontáneos, conocidos como SP. Con esta herramienta se miden diferencias de potencial eléctrico entre dos puntos cualesquiera de la superficie generados por efectos electroquímicos o electrocinéticos.

Como hipótesis inicial, se esperaba que un medio sometido a esfuerzos diferenciales genera un patrón de estos SP y cuya variación temporal estuviera asociada a variación de esfuerzos. Se realizaron medidas de SP en un área cercana al pozo, la separación de electrodos fue de 5 m y se hizo a lo largo de los radios, con separaciones de 30°. Las lecturas se realizaron sobre un círculo de radio máximo de 50 m. En la figura 10 se muestran los resultados.

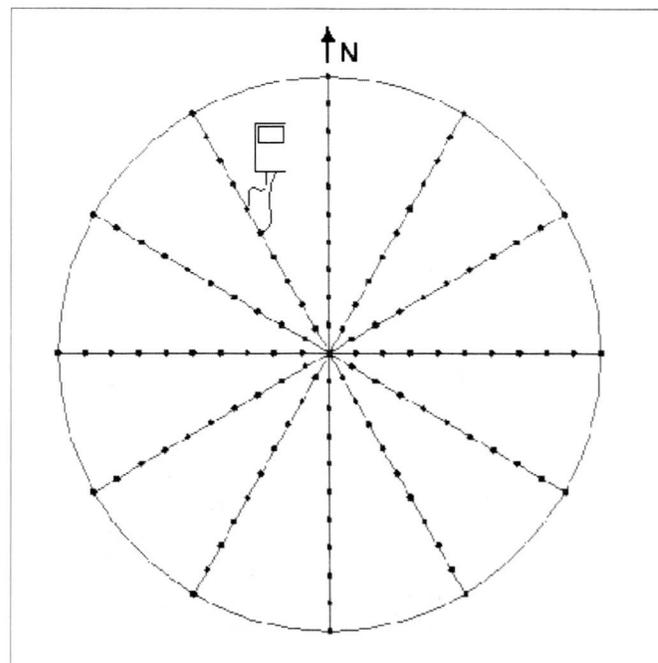


Figura 10. Medición de potencial espontáneo

Los valores observados de SP se obtuvieron con electrodos polarizables, y muestran patrones que, en principio, coinciden con la tendencia de las geoformas; los valores máximos están alineados en una dirección aproximada N40E y los mínimos son perpendiculares a los anteriores (véase figura 11). Los valores mínimos son del orden de 10 mV (milivoltios) y los máximos, un orden de magnitud mayor (100 mV).

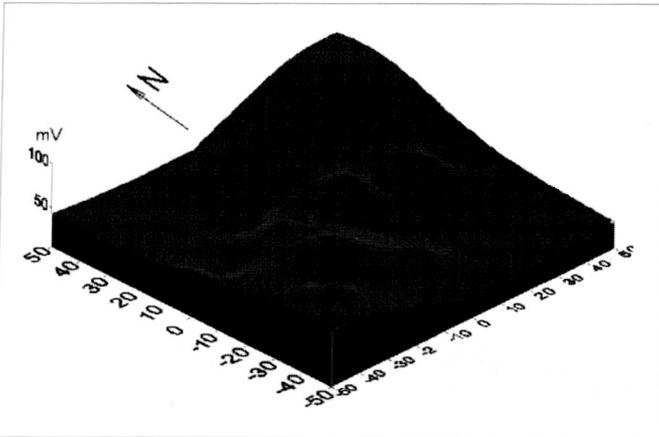


Figura 11. Comportamientos potenciales espontáneos con electrodos polarizables

Dado que se trata de observaciones iniciales realizadas con el fin de estimar la magnitud, es prematuro atribuir a fenómenos compresionales. Es posible que esta manifestación eléctrica se deba a ruidos antrópicos u otros efectos aún desconocidos; sin embargo, se recomienda en el futuro observar atentamente las variaciones en amplitud y los patrones de comportamiento. También se recomienda repetir las pruebas utilizando electrodos no polarizables (acoplados a un amplificador de instrumentación), con el fin de eliminar los efectos de polarización de los electrodos.

## DISEÑO INSTRUMENTAL

La parte básica del presente proyecto comprende el diseño y la caracterización de un sistema de adquisición y proceso de información geofísica, seleccionada de acuerdo con experiencias internacionales (Asteriadis,

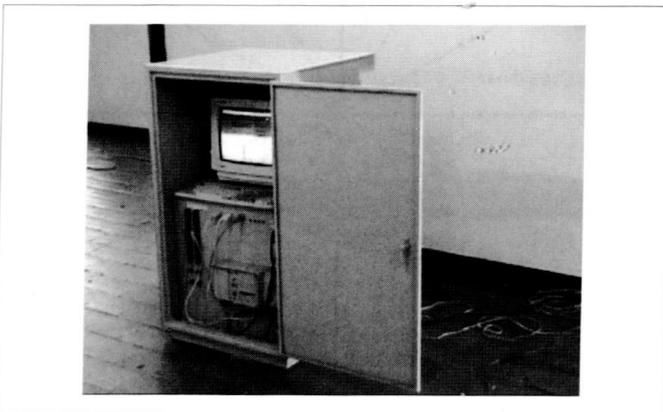


Figura 12. Foto de la estación remota



Figura 13. Foto de la estación local

1999, 2000). El instrumental está compuesto de una estación para ser instalada en el sitio de observación (estación remota) y de otra de recepción y análisis en el laboratorio de procesos (estación local). Las figuras 12 y 13 y muestran las dos estaciones.

### ESTACIÓN REMOTA

Se trata de una aplicación de software y hardware, diseñada para funcionar sobre un computador personal, que proporciona comunicación con los dispositivos de campo (principalmente sensores), almacena la información registrada en archivos planos, y también permite la supervisión de la evolución de señales en el sitio de interés.

### ESTACIÓN LOCAL

La constituye la Unidad de interrogación y proceso (UIP), ubicada en el Laboratorio de Posgrado de Geofísica, en la Universidad Nacional de Colombia. Se reduce básicamente a un computador con plataforma Windows, algunas herramientas de Office con software de comunicaciones y de instrumentación.

Esta estación tiene las siguientes funciones:

- Interfase del usuario con la estación remota.
- Interrogar la estación remota, bajar los archivos generados por las diferentes variables.
- Transferir archivos y aplicativos o modificaciones a la estación remota con el fin de mejorar o adecuar los procesos.
- Manejar la información y procesarla.

## RESULTADOS INSTRUMENTALES

A continuación se presentan algunos ejemplos del software desarrollado para la estación local y remota.

### ESTACIÓN REMOTA

La siguiente figura corresponde al desarrollo del instrumento virtual que permite al usuario en el sitio o de manera remota observar cada una de las variables escogidas para la observación y el registro.

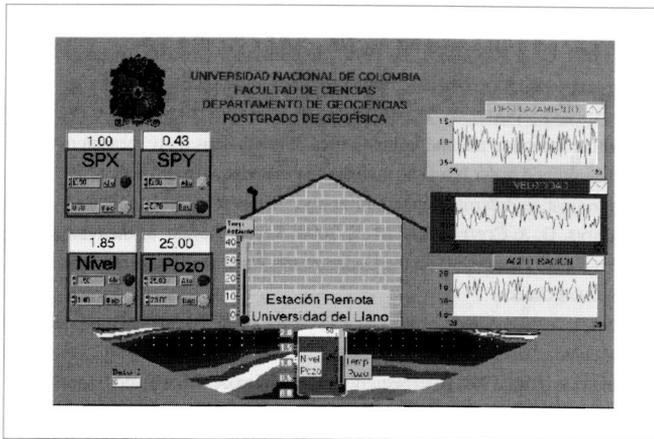


Figura 14. Integración de señales en la estación remota

### ESTACIÓN LOCAL

Dado que se requiere leer y analizar la información recogida en terreno por la estación remota, se diseñaron varios instrumentos virtuales que permiten leer los archivos de forma secuencial tal como se generaron pero a la velocidad que elija el analista.

Las rutinas contemplan la posibilidad de leer los registros parcial o totalmente y aplicarles diferentes procesos de análisis.

A continuación se presentan algunos ejemplos de los programas de análisis de datos.

### Software de análisis de datos y ajuste polinomial

En la figura 15 aparece el instrumento virtual de análisis de datos y ajuste polinomial. Este aplicativo generalmente debe ejecutarse en la estación local con el fin de tomar cualquier archivo de los registrados en la estación remota y reproducirlos mediante este instrumento, el cual le permite al analista observar los valores mínimo, máximo, promedio, la violación a límites de alarma y la curva de tendencia.

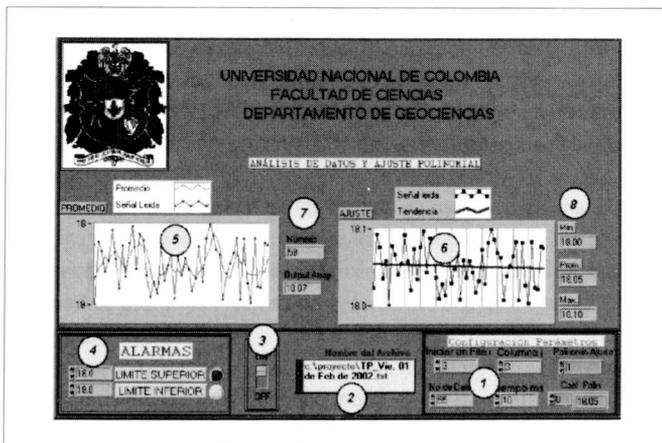


Figura 15. Instrumento virtual de análisis de datos y ajuste polinomial

El instrumento cuenta con ventanas para la configuración del número de datos por muestrear, el grado del polinomio de ajuste, la localización de los datos, etc.

### Software de análisis de datos filtro Butterworth

En la figura 16 se presenta el instrumento virtual que le permite al usuario reproducir los datos registrados en la estación remota y pasarlos por un filtro de Butterworth. El instrumento tiene la posibilidad de configurarle los parámetros del número de señales por muestrear, el orden del filtro, la frecuencia de corte, el tipo de filtro (pasa altos, pasa bajos, etc.). Presenta como resultados en pantalla la señal leída, el variograma de los datos elegidos, la señal filtrada, el valor máximo, mínimo y el promedio de la señal leída.

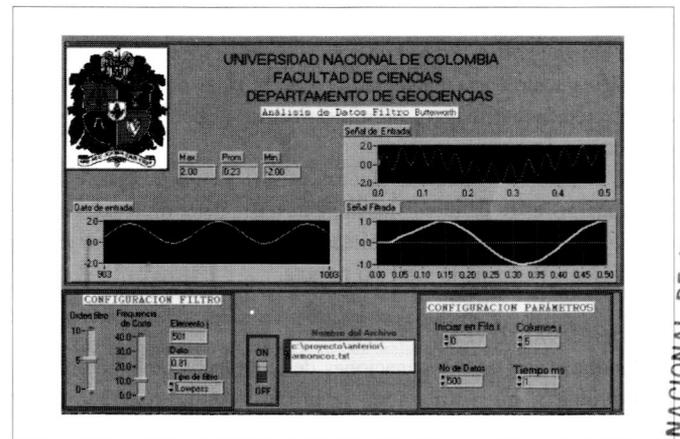


Figura 16. Instrumento virtual filtro de Butterworth

## RESULTADOS GENERALES, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### RESULTADOS

- Desde el punto de vista geofísico, se realizó una caracterización preliminar en el entorno de un pozo ubicado en la Universidad del Llano pudiéndose iniciar una observación de sus valores en el tiempo, para asociarlos a cambios físicos del subsuelo.
- Se inició una base de datos con medidas de SP, TER y SEV, para su control y observación temporal en un área de actividad tectónica.
- Se diseñó, construyó y caracterizó una estación multiparámetro de acceso remoto para observaciones sismológicas.
- Se implementó y adecuó la estación local para el análisis de la información recogida por la estación remota.
- Se implementó un sistema de comunicación entre la estación local y la remota, con el cual se puede interrogar desde la estación local la estación multiparámetro, descargar en la estación local la información registrada en tiempo pasado u observar el comportamiento en tiempo real. Desde la estación local hacia la remota se puede hacer transferencia de archivos y modificaciones de programas, etc.

- Se probó la configuración de la estación remota desde la estación local.
- Se desarrolló, utilizando un programa para la implementación de instrumentos virtuales, el software para la adquisición, interpretación y análisis de datos.
- Se planteó un método para la medición de SP (potenciales espontáneos), el cual permite estimar errores en la medición.

#### CONCLUSIONES

La entrega de las estaciones se constituye en un aporte instrumental que permite la observación y el análisis sistemático de fenómenos premonitorios de actividad sísmica en el piedemonte llanero.

A la Universidad Nacional de Colombia se le facilita promover actividades de investigación en el campo de la sismotectónica mediante el desarrollo de nuevos proyectos encaminados a la obtención de información de parámetros premonitorios de sismicidad.

El sitio elegido para dar inicio a las observaciones preliminares es estratégicamente conveniente, entre otras razones por su proximidad con el piedemonte llanero, la infraestructura disponible, la cooperación interinstitucional, etc.

Se realizaron registros de algunas variables en la zona de estudio. Sin embargo, estos datos son insuficientes para determinar patrones de comportamiento; sólo se han utilizado en la puesta en marcha y en el acondicionamiento de la estación remota.

#### RECOMENDACIONES

- Continuar con las investigaciones de fenómenos premonitorios de actividad sísmica utilizando la infraestructura generada como resultado del desarrollo de este proyecto.
- Estudiar los potenciales espontáneos en diferentes zonas próximas al piedemonte llanero, observar las tendencias y evaluar su comportamiento como fenómeno premonitorio de sismicidad.
- Dado que la estación remota posee 16 entradas analógicas, implementar otras señales como emanación de radón, señales meteorológicas, etc.
- Se recomienda que la Universidad Nacional de Colombia y la Universidad del Llano fortalezcan el convenio interinstitucional con el cual se garantiza la continuidad de las investigaciones de fenómenos premonitorios.
- Poner en marcha de manera definitiva de las estaciones y el monitoreo y análisis continuo de la información.
- Entregar a la Universidad Nacional de Colombia el diseño de estaciones remotas y una metodología de interrogación con el fin de implementar una red de estaciones.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTERIADIS, G. & ARABELOS, D. 1999: "Equidistance Ordering of Large Earthquakes in the Aegean and Surrounding Areas". Survey Review.
- ASTERIADIS, G., ARABELOS, D., CONTADAKIS, M. E., & OTHERS. 1999: The use of outlier detecting method in time series of continuous daily measurements of underground water level and temperature in earthquake prediction of investigation. Internal Report University Aristotelic of Thessalonik.
- ASTERIADIS, G. & CONTADAKIS, M. E. 2000: Recent Results of the research for Preseismic Phenomena on the Underground Water and Temperature in Pieria, Northern Greece.
- BRICEÑO, L. A. 2001: Observación y análisis de la variación de parámetros geofísicos en un pozo en el piedemonte llanero.
- INGEOMINAS, UPES. 1997: Microzonificación sísmica de Santa Fe de Bogotá.
- INGEOMINAS. 1998: Estudio general de amenaza sísmica de Colombia.
- NATIONAL INSTRUMENTS. 1999: Measurement and Automation Catalogue.
- NATIONAL INSTRUMENTS. 2000: LabVIEW Básico I Manual del curso.
- NATIONAL INSTRUMENTS. 2000: LabVIEW Básico II Manual del curso.
- PAGE, W. D. 1986: Geología y sismicidad del nordeste de Colombia. ISA, Integral, Woodward & Clyde Consultants, 281 pp.
- PARIS, G. y J. ROMERO. 1994: Fallas activas en Colombia. Bol. Geol. Vol. 34, Nos. 2-3. Ingeominas, pp. 5-25.
- SARRIA, A. 1990: Ingeniería sísmica, Ediciones Uniandes-Ecoe.
- VERGARA, H., TABOADA, A., ROMERO, J., PARIS, G. y E. Castro. 1995: Neotectónica del borde llanero: resultados preliminares. Memorias del Seminario de Sismotectónica del borde llanero. J. Valdiri, editor. Ingeominas, 115 pp.