





# ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS SÍSMICOS SOMEROS 2D EN LA FALLA DE BUCARAMANGA EN EL ÁREA DE PIEDECUESTA (SANTANDER)

JULIÁN ANDRÉS VARGAS PARRA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS ESCUELA DE GEOLOGÍA BUCARAMANGA 2009







# ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS SÍSMICOS SOMEROS 2D EN LA FALLA DE BUCARAMANGA EN EL ÁREA DE PIEDECUESTA (SANTANDER)

# JULIÁN ANDRÉS VARGAS PARRA

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Geólogo

> Director Ph.D. GERMÁN YURI OJEDA BUENO

> Codirector Ph.D. WILLIAM MAURICIO AGUDELO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS ESCUELA DE GEOLOGÍA BUCARAMANGA 2009 A Díos, por ser la luz en mí camíno. A mís padres Jorge y Sofía, quíenes con su apoyo y gran amor, Han hecho de mí el hombre que soy. A mí hermana Sandra y a su esposo Díego, Gracías por creer en mí y por su confianza y caríño. A mí tía Marína, por ser otra mama para mí. A Gabríela, mí adorada sobrína por sus sonrísas. A Deícy y Alejíto, con todo su amor, Me dan fuerzas para seguír adelante. A mís amígos y amígas, jamás los olvídare.

### AGRADECIMIENTOS

Les doy mis más sinceros agradecimientos, ya que sin ustedes no habría culminado esta etapa:

A German Yuri Ojeda, gracias por darme la oportunidad de hacer mi tesis en el ICP. Gracias por gastar parte de su valioso tiempo en el desarrollo de este trabajo, por sus enseñanzas, consejos y por hacer de mí, un mejor profesional.

A William Agudelo y Saúl Guevara, gracias por toda su colaboración y gestión en el desarrollo de este trabajo, gracias por todos sus valiosos aportes y por sus esfuerzos porque se cumplieran los objetivos.

A la Universidad Industrial de Santander, a la Escuela de Geología y a todo su cuerpo docente, en el especial al Profesor Jorge Eduardo Pinto, por sus buenos aportes en este trabajo.

Al ICP-ECOPETROL, y a todos los funcionarios y contratistas del área de Geofísica en especial a Andrés Calle, Jorge Monsegny, Diego Barrera, Dany Rueda y Alexandra Plata, quienes me dieron la oportunidad de aprender y ratificar mi inclinación en el método sísmico.

A Carlos Andrés Pérez y a Maria Teresa Duarte, Gracias, jamás tendré como pagarles esa gran ayuda que recibí de ustedes en la tesis, este trabajo también es de ustedes.

A todos mis amigos del Grupo de Investigación Petrosísmica, Cristian Zafra, Elkyn Hernández, Omar Pinto, Diego Rivera y a un gran amigo Diego Torres.

## CONTENIDO

	pág.
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	2
2.1 Objetivo General	2
2.2 Objetivos Específicos	2
3. GENERALIDADES	3
3.1 Localización Geográfica	3
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
5. MARCO GEOLÓGICO	5
5.1 Evolución Geológica	5
5.2 Litologías	8
5.3 Geología Estructural	11
5.4 Geomorfología	13
6. MARCO TEORICO	22
6.1. Adquisición de Datos Sísmicos 2D.	22
6.1.1. Equipo de Adquisición de Datos Sísmicos 2D.	24
6.1.2 Diseño de Adquisición de Datos Sísmicos 2D	28
6.2 Procesamiento de Datos Sísmicos 2D.	29
6.3 Interpretación de Datos Sísmicos 2D.	32

7. ANTECEDENTES

8	B. METODOLOGÍA	37
8	8.1 Fase de Precampo	37
8	8.2 Fase de Campo	39
8	8.2.1. Línea de Refracción 1	39
8	8.2.2. Línea de Refracción 2	42
8	8.2.3. Línea de Reflexión 1	44
8	8.2.4. Línea de Reflexión 2	46
8	8.2.5 Topografía de las Líneas Sísmicas	48
8	8.3 Fase de Oficina	48
8	8.4 Fase de Redacción y Edición de Informes	50
8	8.5 Fase de Entrega y Sustentación	50
ę	9. RESULTADOS	51
ć	9.1 Línea de Refracción 1	51
ć	9.2 Línea de Refracción 2	54
ć	9.3 Línea de Reflexión 1	58
ć	9.4 Línea de Reflexión 2	60
	10. CONCLUSIONES	62
_		
	TRABAJO A FUTURO	66
		~-
ł	SIBLIOGRAFIA	67
,		75
1	WEBGKAFIA	75

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área de trabajo	3
Figura 2. Mapa Geológico del Área de Trabajo	8
Figura 3. Modelo Hipotético del depósito de flujo de escombros como	
cono de deyección durante el pleistoceno	11
Figura 4. Falla de rumbo sinextral	12
Figura 5. Fallas asociadas con el Sistema de Fallas Bucaramanga-	
Santa Marta	12
Figura 6. Mapa de sombras donde se aprecia la expresión	
morfoestructural de las fallas asociadas con la falla de Bucaramanga	13
Figura 7. Curvas de nivel del área de trabajo	14
Figura 8. Modelado 3D del área de trabajo	14
Figura 9. Imagen satelital del Lago de Falla	17
Figura 10. Ondas Sísmicas Reflejadas hacia los Geófonos	23
Figura 11. Offset Vs. Tiempo	23
Figura 12. (a) Geófono. (b) Vista interior del geófono. (c) Movimiento	
interno del geófono al llegar la onda a éste	26
Figura 13. Modelo de reflexión y grafica distancia-tiempo	29
Figura 14. Línea de Refracción 1	40
Figura 15. Diseño de la Línea de Refracción 1	41
Figura 16. Línea de Refracción 2	42
Figura 17. Diseño de la Línea de Refracción 2	43
Figura 18. Línea de Reflexión 1	44
Figura 19. Diseño de la Línea de Reflexión 1	45
Figura 20. Línea de Reflexión 2	46
Figura 21. Diseño de la Línea de Reflexión 1	47
Figura 22. Línea de refracción 1, Perfil	51

Figura 23. Línea de refracción 1, contraperfil	51
Figura 24. Comparación del perfil y contraperfil	52
Figura 25. Perfil de la refracción 1	53
Figura 26. Línea de refracción 2, Perfil	54
Figura 27. Línea de refracción 2, contraperfil	55
Figura 28. Perfil de la refracción 2	58
Figura 29. Tomografía de la refracción 2	59
Figura 30. Secuencia de procesamiento realizado para las dos líneas de	
reflexión	58
Figura 31. Lectura del disparo	58
Figura 32. Imagen apilada con trazas wiggles	59
Figura 33. Imagen apilada con escala de grises	59
Figura 34. Un disparo de la línea de reflexión 2	60
Figura 35. Imagen apilada de la línea de reflexión 2	60
Figura 36. Interpretación de la línea de reflexión 2	61
Figura 37. Modelo estructural de la falla de Bucaramanga en el estrato	
somero.	61

# LISTA DE FOTOGRAFÍAS

pág.

Foto 1. Neis de Bucaramanga altamente meteorizado sobre la vía ICP-	
Iglesia Los Ermitaños	9
Foto 2. Foliación con orientación variada sobre el camino finca la	
españolita – Vereda Granadillo	9
Foto 3. Flujo de escombros en la vía Barrio pinares – Iglesia Los	
Ermitaños	10
Foto 4. Lomo estructural, donde se observa los barrios La Cumbre y	
Altos de Bellavista en el norte de Floridablanca	14
Foto 5. Silla de falla	15
Foto 6. Lago de falla	15
Foto 7. Facetas triangulares	18
Foto 8. Valles en V con fuertes pendientes	19
Foto 9. Áreas afectadas por la presencia de vacas	19
Foto 10. Fotointerpretación de imágenes aéreas	20
Foto 11. Fuente sísmica, porra de 18 libras	24
Foto 12. Portátil y el Somersi	25
Foto 13. Geófono multicomponente, acoplado con plastilina sobre la vía	26
Foto 14. Placa Metálica con geófono que mide el tiempo en que inicia	
el disparo	27
Foto 15. Teodolito, equipo de topografía	28
Foto 16. Porte de Equipo de Seguridad durante la adquisición	38
Foto 17. Diseño de la Línea de Refracción 1	41
Foto 18. Diseño de la Línea de Refracción 2	43
Foto 19. Diseño de la Línea de Reflexión 1	45
Foto 20. Vista Panorámica de un Sector de la Línea de Reflexión 2	47
Foto 21. Geófono Multicomponente Acoplado con Plastilina	48

## LISTA DE TABLAS

## pág.

Tabla 1. Fotografías aéreas empleadas para el análisis morfotectónico	17
del sistema de fallas Bucaramanga – Santa Marta	
Tabla 2. Parámetros de diseño de la línea de refracción 1	40
Tabla 3. Parámetros de diseño de la línea de refracción 2	42
Tabla 4. Parámetros de diseño de la línea de reflexión 1	44
Tabla 5. Parámetros de diseño de la línea de reflexión 2	46

#### RESUMEN

**TÍTULO**: ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS SÍSMICOS SOMEROS 2D EN LA FALLA DE BUCARAMANGA EN EL ÁREA DE PIEDECUESTA (SANTANDER) \*

AUTOR: VARGAS PARRA, Julián Andrés \*\*

PALABRAS CLAVES: Adquisición Sísmica, Sísmica Somera, Falla de Bucaramanga, Sísmica 2D.

#### DESCRIPCIÓN:

La falla activa sinextral de Bucaramanga atraviesa el Área Metropolitana de Bucaramanga (Colombia), lugar de cerca de 1,5 millones de habitantes. La imagen de la geometría somera de esta falla es crucial para entender la recurrencia de procesos tectónicos sismogénicos que pueden haber ocurrido en el pasado geológico reciente. Las secciones sísmicas de la industria que cruzan esta falla no resuelven el estrato somero. Por tal motivo, la recolección de datos sísmicos de alta resolución de la zona de falla, es un parámetro relevante.

En este trabajo, un experimento sísmico somero de alta resolución 2D (reflexión y refracción) es el procedimiento. Una porra de 18 libras es la fuente de energía usada, generando pulsos sísmicos con frecuencias entre 10 y 200 Hz. Los datos son grabados con un sistema digital de 32 canales. Este equipo usado permitió adquirir datos de reflexión y refracción y tasas de muestreo de 0.25 milisegundos. Los datos fueron procesados usando hardware y software disponible en el INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETRÓLEO de ECOPETROL.

Entender la historia de deformación reciente de la falla de Bucaramanga es clave para revelar el campo de esfuerzos modernos que pueden tener resultados en la permeabilidad por fracturas adicionalmente inducidas en los reservorios de gas y petróleo de la cuenca adyacente del valle medio del magdalena. Adicionalmente, este proyecto explota una sinergia potencial muchas veces pasada por alto: siguiendo los conceptos y tecnologías de la industria del petróleo y aplicarlos a problemas geológicos socialmente significativos.

<sup>\*</sup> Trabajo de Grado.

<sup>\*\*</sup> Facultad de Ingenierías Físico Químicas. Escuela de Geología. Director: Ph.D. Germán Yuri Ojeda Bueno. Codirector: Ph.D. William Mauricio Agudelo.

#### ABSTRACT

**TITLE:** 2D SEISMIC DATA ACQUISITION AND PROCESSING OF THE BUCARAMANGA FAULT ZONE IN PIEDECUESTA (SANTANDER) \*

AUTHOR: VARGAS PARRA, Julián Andrés \*\*

**KEY WORDS:** Seismic acquisition, Shallow Seismic, Bucaramanga Fault, 2D Seismic.

#### DESCRIPTION:

The active, 220 km-long, left-lateral Bucaramanga Fault traverses the metropolitan area of Bucaramanga (Colombia), home to over 1.5 million people. Imaging the shallow geometry of this fault is crucial for understanding the recurrence of seismogenic tectonic processes that may have occurred in the recent geological past. Industry seismic sections across this fault do not resolve shallow strata; collection of high-resolution seismic data across the fault zone is of paramount relevance.

In this work, a 2D high-resolution shallow seismic experiment (reflection and refraction) is underway. An 18 lb sledgehammer is being used as energy source, generating seismic pulses with frequencies between 10 and 200 Hz. Data are being recorded with a 32 channel digital system. This equipment allows acquisition of both reflection and refraction data at sampling rates up to 0.25 milliseconds. Data was processed using hardware and software available at the INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETROLEO of ECOPETROL.

Understanding the recent deformational history of the Bucaramanga fault is a key point to unveil modern stress fields that may have resulted in inducing additional fracture permeability at oil and gas reservoirs in adjacent Middle Magdalena Valley Basin. In addition, this project exploits an often overlooked potential synergy: borrowing concepts and technology from oil industry, and applying them to socially significant geological problems.

<sup>\*</sup> Grade Work.

<sup>\*\*</sup> Faculty of Engineerings Physique Chemical. Geology School. Director: Ph.D. Germán Yuri Ojeda Bueno. Co-director: Ph.D. William Mauricio Agudelo.

#### 1. INTRODUCCIÓN

El área metropolitana de Bucaramanga está ubicada en el Nororiente de Colombia, a 422 Km. de la capital Bogotá. Posee una población de cerca de 1,2 millones de habitantes. Esta ciudad es atravesada por el sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta, la cual se distingue perfectamente en imágenes de satélite, desde el cerro Jurisdicciones (en la Sierra Nevada de Santa Marta) hasta su terminación en la falla de Soapaga (en Boyacá), tiene aproximadamente 600 Km. de longitud, 160° de azimut y presenta un buzamiento este a Vertical. Su movimiento es de rumbo sinextral con componente Inversa en algunos sectores. Esta falla es muy interesante geológicamente porque puso en contacto rocas de edad Jurasica y Neógenas muy recientes con rocas muy antiguas de edad precámbrica y solo un gran evento tectónico puede hacer esto posible.

Muchos autores han estudiado la falla en superficie como sus geoformas y hasta su historia de evolución, pero no se conoce su geometría en el estrato somero, y se desconoce si su actividad reciente afecto las capas más superficiales del abanico aluvial o si el evento de depositación fue posterior al último evento sísmico producido por la falla. Si la actividad de la falla fue posterior a la depositación los reflectores estarán dislocados, evidencia de actividad reciente de la falla.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo General

Obtener una sección sísmica de alta resolución que permita visualizar la geometría superficial de la falla de Bucaramanga en el área de Piedecuesta.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Implementar la metodología de obtener imágenes de alta resolución, usando la técnica de la ventana optima y el offset optimo.
- Visualizar si existen reflectores dislocados en el estrato somero, con el fin de dar argumentos geofísicos de la actividad reciente de la falla.
- Observar y entender geológicamente el comportamiento de los reflectores a tiempos menores de 350 milisegundos, comparándolos con la geomorfología superficial.
- Usar conceptos y tecnología de la industria del Petróleo para aplicarlos en problemas geológicos sociales significativos.
- Generar conocimiento por medio de la sísmica somera de alta resolución, para estudiar la falla de Bucaramanga.

#### 3. GENERALIDADES

#### 3.1 Localización Geográfica

El área de trabajo esta ubicado en Piedecuesta (Santander) (**Ver Figura 1**), municipio ubicado a 17 Km. al Sur de Bucaramanga, la capital del Departamento de Santander. Sobre la vía que de Bucaramanga conduce a Piedecuesta en el Km. 7 están las instalaciones del Instituto Colombiano del Petróleo de ECOPETROL, allí existe un carreteable que atraviesa aproximadamente perpendicular la falla de Bucaramanga y sube a unas veredas de Piedecuesta ubicadas en la parte alta del macizo de Santander y dentro de esta vía el sitio es optimo para realizar las líneas sísmicas 2D, debido a la poca presencia de ruido ambiental.



**Figura 1.** Localización del área de trabajo. Líneas rojas: líneas de reflexión, Líneas de refracción. Fuente: Google Earth. 2009

#### 4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La falla de Bucaramanga es una falla regional. Las secciones sísmicas disponibles que cruzan esta falla no muestran claramente su efecto sobre el estrato somero. Por lo tanto, se desconoce si se dislocan los reflectores del abanico aluvial, o si la depositación del cuaternario es posterior al último evento tectónico. Esta incertidumbre es de fundamental importancia, pues es necesario conocer la edad del último pulso de fallamiento (la edad de las rocas falladas más jóvenes) a lo largo de esta dislocación. Conocer una evidencia reciente de la actividad de la falla tendría implicaciones geológicas, económicas, sociales y ambientales.

Con unos experimentos sísmicos de refracción y de reflexión 2D, se pueden obtener imágenes de alta resolución, que representen con un alto grado de precisión la estructura del subsuelo, en este caso ver el comportamiento de los estratos someros del área de estudio.

## 5. MARCO GEOLÓGICO

#### 5.1 Evolución Geológica

En el Macizo de Santander se encuentran las rocas más antiguas del área con edad precámbrica (Proterozoico), la cual es una roca metamórfica llamada Neis de Bucaramanga agrupada por Neis Biotíticos, Cuarzofeldespáticos y Hornblendíticos, Anfibolitas y Migmatitas. Este Neis hacia parte de un megaterreno cuyo basamento se encontraba conectado probablemente con el escudo de Guayanas (Irving, 1971).

Se formo una cuenca marina durante el proterozoico, se depositaron clastos con aportes ígneos alcalinos, la cual, luego se vieron deformados por intrusiones de composición granodiorita y cuarzomonzonita a finales del proterozoico y sometidos a un metamorfismo de alto grado, como es el caso del Neis de Bucaramanga que alcanzo la facie de Anfibolita zona de la Silimanita superior.

En el Paleozoico Temprano se depositó una megasecuencia grano decreciente cíclica de ambientes de talud submarino (Etayo, et al. 1983). Se produce la Orogenia Caledoniana, la cual afecta los depósitos Cámbrico-Ordovícico, produciendo fuertes plegamientos y un metamorfismo de muy bajo a localmente bajo grado hasta la facies Esquistos verdes conformándose la Formación Silgará y la unidad metasedimentaria en el Macizo de Santander, que consta de esquistos micáceos, estaurolitas, granatíferos, anfibolíticos, calcáreos, cuarcitas moscovitas y biotíticas, mármoles y filitas.

A mediados del Devoniano se reanuda la sedimentación pericontinental sobre la margen oriental del Océano Proto-Atlántico (Iapetus) (Etayo, et al. 1983). Después del hiato estratigráfico en el intervalo Devónico superior-Carbonífero inferior, se sucede el avance de un mar transgresivo (Pensilvaniano-Pérmico). Se inicia una tectónica de fallamiento en respuesta a movimientos epirogénicos que forman

relieves de mesas y valles; los avances y retrocesos del mar se suceden en un paisaje árido como lo evidencia la alternancia de sedimentitas rojas y calizas biogénicas (Formación Diamante).

A comienzos del Triásico se inicia la apertura del Paleocaribe por formación de fosa tectónica de hundimiento (graben), con actividad volcánica más o menos intensa que separa a Norte y Suramérica. El "megaterreno ancestral" comienza a fraccionarse, algunas áreas empiezan a hundirse y en las cuales sólo se depositaron algunos abanicos aluviales (Formación Tiburón), pero por este tiempo el "megaterreno ancestral" se solda el "megaterreno autóctono" (Toussaint y Restrepo, 1989). En las fases finales del Triásico y comienzos del Jurásico, se inicia la ruptura de La Pangea mediante un proceso de formación de cuenca intercontinental, cuyas ramificaciones afectan gran parte del Cratón Suramericano (se forman, cuencas de tracción).

A principios del Jurásico se inicia un proceso de formación de cuencas en lo que hoy son los valles Medio del Magdalena y el del Cesar (Estrada, 1972). Este proceso se inicia en una franja estrecha dando origen a sedimentitas jurásicas, que por esfuerzos distensivos empieza a hundirse en bloques escalonados, provocado por un fallamiento normal, formándose de esta manera el graben primario. En lo referente al actual nororiente colombiano, se forman algunas cuencas (Valle Medio del Magdalena, Cesar, Perijá, Mérida, Maracaibo), que fraccionan el "megaterreno ancestral" por hundimiento en bloques escalonados siguiendo un patrón en zig-zag, limitado por dos sistemas de falla, uno N-NE y otro NW-SE que lo desplaza, cuyo elemento principal es la Falla de Bucaramanga-Santa Marta. Se suceden breves incursiones marinas (Formación Bocas), seguidas de una sedimentación fluviolacustre, acompañada de un incipiente vulcanismo explosivo (Formación Jordán) que aporta en parte material de relleno de estas cuencas; simultáneamente ocurre la intrusión de cuerpos granodioríticos en el Macizo de Santander. A finales del Jurásico y comienzos del Cretácico se deposita la potente secuencia fluvial del Grupo Girón.

En el Cretácico temprano la sedimentación continental da paso de manera gradual a la ingresión marina, que inicialmente inunda las entradas de las ramificaciones del Paleo-rift del Magdalena y luego invade áreas mayores (Etayo, et al. 1989), depositándose una espesa secuencia de areniscas, lutitas y calizas de las formaciones cretácicas en las provincias del Valle Medio del Magdalena, Maracaibo y áreas menores en las provincias de Santander y Mérida. En el Cretácico tardío y comienzos del Terciario, se produce el retiro del mar, acompañado de un levantamiento diferencial. En este tiempo termina la larga etapa distensiva y se produce una inversión de esfuerzos, que desde el Paleoceno da inicio a la etapa compresiva.

En el Paleoceno medio ocurre el levantamiento de la provincia del Macizo de Santander. Durante este lapso la erosión remueve gran parte de la megasecuencia cretácica, y aporta el material que forma las diversas y potentes unidades terciarias. Durante el Mioceno medio se inicia el levantamiento generalizado de la Cordillera Oriental colombiana. En el Mioceno medio-tardío se produce una fase de compresión más intensa, y se forma en la parte occidental del "supraterreno de la Cordillera Oriental", una cadena plegada cabalgante con vergencia al occidente y un sistema de cabalgamiento con vergencia hacia el oriente en la región oriental (Bloque de Pamplona). Esto hace que el "terreno Santander" se comporte como un horst cuyos flancos oriental y occidental cabalgan sobre el "terreno Valle Medio del Magdalena" al occidente y "terrenos Maracaibo y Llanos" al oriente.

Durante el Mioceno tardío y el Plioceno, la Falla Bucaramanga-Santa Marta, tuvo su desplazamiento de rumbo sinextral de aproximadamente 100 km. La última fase compresiva en la Cordillera Oriental se produce desde el Mioceno tardío y se continúa hasta el presente generada por el desplazamiento de la placa Suramericana hacia el occidente. En el Mioceno temprano-Plioceno-Pleistoceno se deposita la secuencia molásica del Grupo Real. Entre el Pleistoceno y el Holoceno, se producen grandes depósitos fluviales semiconsolidados y pequeños depósitos

glaciares; se destacan los que cubren el Valle Medio del Magdalena y los que constituyen Bucaramanga, entre otros.

#### 5.2 Litologías

En el área de trabajo aparecen 2 litologías, las cuales son separadas por el sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta (**Ver Figura 2**)



Figura 2. Mapa Geológico del Área de Trabajo

Al costado Oriental del sistema de fallas, aparece el Macizo de Santander compuesto por rocas metamórficas del Neis de Bucaramanga, nombre propuesto por Goldsmith y otros (1971 en Ward et al., 1973) (**Ver Foto 1**) de edad Precámbrica, altamente meteorizado con intrusiones ígneas de edad Triásico-Jurásico. Este Neis esta compuesto principalmente de neis semipelítico, neis hornbléndico, anfibólita y esquisto, presenta una textura gruesa a media y su foliación tiene orientación variable, indicativa de perturbaciones tectónicas severas. (**Ver Foto 2**).



Foto 1. Neis de Bucaramanga altamente meteorizado sobre la vía ICP-Iglesia Los Ermitaños



Foto 2. Foliación con orientación variada sobre el camino finca la españolita - Vereda Granadillo

Al costado occidental de la falla aparecen rocas sedimentarias recientes de edad pleistoceno (**Ver Foto 3**), producidas por flujos de escombros como conos de deyección, provenientes de la denudación de los materiales alterados que componen el Macizo de Santander (**Ver Figura 3**), constituidos esencialmente por fragmentos de rocas ígneas y metamórficas, tamaño grava y bloque, principalmente neises y granodiorita, esporádicamente anfibolitas y esquistos, en matriz areno-limosa. Estos depósitos sedimentarios se han venido acumulando mediante repetidos episodios de descargas torrenciales, probablemente violentas, por lo que los espesores y sus proporciones granulométricas y volumétricas son muy variados, su espesor no sobrepasa los 20 metros.



Foto 3. Flujo de escombros en la vía Barrio pinares – Iglesia Los Ermitaños



**Figura 3.** Modelo Hipotético del depósito de flujo de escombros como cono de deyección durante el pleistoceno. Fuente: [Tomado de]: Ingeominas 2001b

#### 5.3 Geología Estructural

La zona de falla Bucaramanga-Santa Marta se ha cartografiado en una longitud de 600 Km. Su desplazamiento es de rumbo sinextral (**Ver figura 4**), acompañado de grandes desplazamientos verticales. Boinet, T., et al, 1989 propone un desplazamiento de unos 100 Km. Con base en la perforación del pozo Algarrobo (municipio del Difícil, en el departamento del Magdalena), donde existen esquistos metamórficos similares a aquellos de la provincia NW de la Sierra nevada de Santa Marta, pero situados a unos 100 Km. mas al sur.

En la zona de trabajo se están generando zonas de convergencia (zonas de compresión con desarrollo de levantamientos), formándose patrones anastomosados, donde aparecen fallas paralelas, conjugadas y dextrales (Beltran, 2002).



Figura 4. Falla de rumbo sinextral



**Figura 5**. Fallas asociadas con el Sistema de Fallas Bucaramanga-Santa Marta Fuente: [Tomado de]: Beltrán y Rey (2002)

Las fallas paralelas presentan un desplazamiento sinextral igual que la falla principal. Las fallas conjugadas presentan un ángulo bajo al unirse con la falla principal y las fallas dextrales desplazan la falla principal, las fallas paralelas y conjugadas (Beltran, 2002).

Al interpretar una imagen de relieve (**Ver Figura 6**) se puede observar una serie de fallas que cruzan la falla de Bucaramanga casi perpendicularmente, y que concuerdan con las fallas dextrales propuestas por Beltran, 2002 y que hacen parte del sistemas de fallas Bucaramanga-Santa Marta.



**Figura 6**. Mapa de sombras donde se aprecia la expresión morfoestructural de las fallas asociadas con la falla de Bucaramanga, Línea Roja: Falla de Bucaramanga. Líneas Amarillas: Fallas asociadas con la falla de Bucaramanga

#### 5.4 Geomorfología

El modelado del relieve esta intimadamente ligado a procesos tanto exógenos, como el clima, y como endógenos, relacionados a las fuerzas internas que afectan la corteza, es decir, es el resultado de una compleja interacción de factores litológicos, tectónicos, enmarcado en una indispensable variable adicional como lo es el tiempo. En este capitulo abordaremos los rasgos geomorfológicos producidos por la presencia de la falla de Bucaramanga en el área de trabajo, la cual es la responsable de la topografía de la zona. Si se observa las diferencias entre las curvas de nivel a ambos lados de la falla (**Ver Figura 7**), se identifica que la zona de con desarrollo de levantamientos es en el área del macizo. Un modelamiento del área de trabajo muestra mas claramente ese cambio de topografía (**Ver Figura 8**).



Figura 7. Curvas de nivel del área de trabajo



**Figura 8**. Modelado 3D del área de trabajo. Línea negra: Falla de Bucaramanga, Línea roja: Líneas de Reflexión, Líneas azules: Líneas de Refracción

En el área de trabajo aparecen geoformas que demuestran la actividad reciente de la falla, estas geoformas son de origen estructural-denudacional. Estos son aquellas generadas a partir de la combinación de procesos endógenos (internos) y exógenos (externos), los cuales crean cambios significativos sobre la superficie, donde es el tectonismo es el encargado de desarrollar las formas del relieve más relevantes.

Estas son algunas de las geoformas que aparecen sobre el área metropolitana de Bucaramanga:

**1. Lomo Estructural:** Lomo de la superficie del terreno acompañado por plegamiento y fallamiento. Geoformas de este tipo aparecen a lo largo del trazo de la falla de Bucaramanga, destacándose el lomo donde está construido el barrio La Cumbre y Altos de Bellavista en Floridablanca (**Ver Foto 4**).



**Foto 4.** Lomo estructural, donde se observa los barrios La Cumbre y Altos de Bellavista en el norte de Floridablanca

2. Silleta de Falla: Son geoformas que se refieren aquellos quiebres de pendiente que presentan forma de cabalgadura o montura, situados en una cresta o interfluvio y que son el resultado del desplazamientos vertical o subvertical de planos de falla. Reconocidas principalmente a lo largo de todo el trazo de la falla de Bucaramanga, siendo relevante el observado en la vereda granadillo (**Ver Foto 5**).



Foto 5. Silla de Falla

Lagos de Falla: Son depresiones asociadas a zonas de fallas de rumbo. Ocurren dentro de un conjunto de fallas paralelas, que traslapan sus segmentos, respondiendo a cambios de esfuerzos regionales. Aparecen geoformas de este tipo en inmediaciones del barrio lagos del Cacique al oriente de Bucaramanga (Ver Foto 6 y Figura 9).



Foto 6. Lago de Falla



Figura 9. Imagen satelital del Lago de Falla. Fuente: Google Earth 2009

### 4. Facetas Triangulares

Superficie de forma triangular o trapezoidal inclinada, cuyo ápice apunta hacia arriba, que se presenta en la cara libre de un interfluvio cuando es cortado por una falla. Aparecen geoformas de este tipo al este de Piedecuesta (**Ver Foto 7**)

#### 5.5 Interpretación de Imágenes Aéreas

En el área de trabajo se realizo la interpretación de unas fotografías aéreas tomadas por el Instituto Agustín Codazzi (IGAC). En la **tabla 1** se resume los datos de las fotos aéreas.

VUELO	ESCALA	AÑO	FOTOS
C-2596	1:10.000	1996	46,47,48

Tabla 1. Fotografías aéreas empleadas para el análisis morfotectónico del sistema de fallasBucaramanga – Santa Marta



Foto 7. Facetas Triangulares. Fuente: [Tomado de]: Coronado y Mejía (2006)

El análisis morfotectónico se realizó con base en el vuelo C-2596, con cubrimiento del sector del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP de ECOPETROL). El sector norte comprendido entre la Finca La Españolita y la vereda Granadillo y el sector sur entre los Barrios San Carlos y San Francisco en Piedecuesta.

#### Morfotectónica

El drenaje en el sector oriental de la falla es dendrítico y subparalelo, con cañadas en V, con una densidad de drenaje muy alta y altas pendientes (**Ver Foto 8**) en los cauces laterales; generalmente cada quebrada presenta un cauce principal de pendientes variables de 3% a 10% y cañadas laterales con pendientes superiores al 10%.

En este sector se observa áreas que están sido deforestadas para siembra de cultivos y pastoreo de vacas y cabras. (**Ver foto 9**).



**Foto 8**. Valles en V con fuertes pendientes, Vía a los Ermitaños 1 Km. al oriente del ICP, al fondo se observa el valle donde esta ubicado el municipio de Piedecuesta Fuente: Autor del Proyecto



**Foto 9**. Áreas afectadas por la presencia de vacas. Vía a los Ermitaños 1,5 Km. al oriente del ICP Fuente: Autor del Proyecto

La traza de falla es muy notoria, y continua, tanto en imágenes de satélite como en fotografías aéreas (Ver **Foto 10**). Controla y enfila numerosos drenajes y su plano de falla sirve de contacto entre litologías con diferente resistencia a los procesos erosivos. La traza de falla en este sector es principalmente curvilínea a ligeramente sinuosa, cartografiable en 2 Km. equivalente a un 0,3 % de su longitud total. Posee una dirección aproximada N15W, esencialmente de tipo de rumbo y plano de falla buzando al oeste, que permite un movimiento asociado de tipo inverso. La mayor parte de su trazo se presenta cubierto.



**Foto 10.** Fotointerpretación de imágenes aéreas. Líneas rojas: Líneas sísmicas, Líneas azules: drenajes, Líneas negras: vías, Línea verde: Falla de Bucaramanga, Líneas punteadas verdes: fallas asociadas a la falla de Bucaramanga

En el sector occidental de la falla se observa el flujo de escombros producidos por conos deyección con pendientes menores a 10 grados y esta pendiente disminuye hacia el occidente. El 50 % de este área esta urbanizada, allí esta ubicado el ICP y sus laboratorios, en el sur aparece un conjunto de casas del barrio Pinares. Hacia el Norte del ICP aparece una finca de la propiedad de la Universidad Santo Tomas (El Limonal). El otro 50 % son fincas.

Se cartografían 5 posibles fallas (Ver **Foto 10**) que serian de movimiento dextral según Beltrán (2002), que fueron movidas por el desplazamiento de rumbo de la falla de Bucaramanga. Estas fallas están alineadas y cuando llegan al contacto con la falla de Bucaramanga cambian de dirección bruscamente. Las fallas 1 y 2 que atraviesan el área de trabajo y las instalaciones del ICP, son las responsables de la topografía en el sector oriental del centro de investigaciones de ECOPETROL y pueden ser vistas en imágenes sísmicas someras.

#### 6. MARCO TEÓRICO

Existen varios métodos geofísicos de prospección, pero en este trabajo solo se tendré en cuenta el método sísmico, el cual es muy utilizado en la exploración petrolera, por lo tanto es el método con más tecnología desarrollada y sin contar que es el método que puede generar una imagen estructural del subsuelo con mayor detalle, tanto que es como tomarle una foto al subsuelo sin tener que perforar. El método sísmico consiste en una adquisición de datos, un procesamiento matemático para mejorar la imagen y una interpretación de la imagen.

#### 6.1 Adquisición de Datos Sísmicos 2D

Consiste en generar una perturbación mediante una fuente sísmica, que es manejada por un Disparador, donde coordina que la fuente golpee o explote cerca de la superficie; lo cual genera una onda, que empieza a viajar a través de los estratos rocosos. Estas ondas son refractadas y reflejadas por las capas rocosas hacia la superficie (**Ver Figura 10**); allí unos receptores llamados geófonos, que se encuentran en un arreglo 2D, vibran cuando llegan las ondas y cada uno genera una señal eléctrica, la cual es transportada por cables a unos centros de computo donde son digitalizadas y gravadas sobre formato *".segy"* formato internacional adoptado por la Sociedad de Geofísicos de Exploración (SEG).

El dato recibido en cada disparo es llamado **"Shot record"**, el cual consiste de unas trazas que representan la señal eléctrica desde los geófonos, para generar una imagen donde la horizontal represente la distancia entre geófonos y la fuente (offset) y la vertical represente el tiempo que gasto la onda en su recorrido. (**Ver Figura 11**)



Figura 10. Ondas Sísmicas Reflejadas hacia los Geófonos Fuente: [Tomado de]: www.geosphereinc.com



Tiempo de arribo de la primera onda P para el primer geofono.

Figura 11. Offset Vs. Tiempo. Fuente: [Tomado de]: Gaya. 2004

## 6.1.1 Equipo de Adquisición de Datos Sísmicos 2D

 Fuente Sísmica: una porra de masa 18 libras que sirve como fuente de disparo en la adquisición, la cual se sabe que son capaces de generar pulsos sísmicos con frecuencias de entre 10 y 200 Hz (Keiswetter y Steeples, 1994). (Ver Foto 11).



Foto 11. Fuente Sísmica, porra de 18 libras

- Portátil: computador en el cual se guardan las señales de los disparos generados en campo durante la adquisición para luego ser llevados a la sala de trabajo y procesarlos con un software. (Ver Foto 12)
- Somersi: este equipo electrónico permite la adquisición simultánea de datos sísmicos con treinta y dos (32) canales, y tasas de muestreo de hasta 0.25 milisegundos. (Ver Foto 12).


Foto 12. Portátil y el Somersi

Geófonos: son los detectores de las ondas que llegan a la superficie. El electromagnético es el más sencillo y el más empleado de los varios tipos de geófonos (Ver Figura 12a). Se constituye de una bobina y de un imán (Ver Figura 12b). Uno de estos dos elementos está fijado rígidamente con respecto a la superficie terrestre de tal manera, que se moverá junto con la superficie terrestre en respuesta a los movimientos sísmicos. El otro es el elemento inerte y cuelga sujetado por un resorte en un soporte fijo. La bobina está sujetada rígidamente con respecto a la superficie terrestre y el imán, que cuelga sujetado por un resorte en el cajón, es el elemento inerte. Cualquier movimiento relativo entre la bobina y el imán produce una fuerza electromotriz entre los terminales de la bobina (Ver Figura 12c). El voltaje correspondiente a esta fuerza electromotriz es proporcional a la velocidad del movimiento. En la mayoría de los geófonos construidos para la prospección sísmica, la bobina presenta el elemento inerte y el imán forma una parte del cajón, que se mueve, si la superficie, en que se ubica el cajón, se mueve. La sensibilidad del geófono depende de la fuerza del imán, de la cantidad de espiras de la bobina y de la configuración del sistema. El tamaño de los geófonos electromagnéticos no sobresale la altura de 10 cm.



**Figura 12. (a)** Geófono. **(b)** Vista interior del geófono. **(c)** Movimiento interno del geófono al llegar la onda a éste. Fuente: [Tomado de]: www.geovirtual.cl

También se utilizo en este proyecto un geófono multicomponente, el cual detecta las ondas en las 3 componentes: longitudinal, transversal y vertical. (**Ver Foto 13**)



Foto 13. Geófono multicomponente, acoplado con plastilina sobre la via. Fuente: Autor del Proyecto

• Placa Metálica: placa que recibe el impacto de la fuente. (Ver Foto 14)



Foto 14. Placa Metálica con geófono que mide el tiempo en que inicia el disparo

- **GPS:** Sistema de Posicionamiento Global, este posicionador permite saber la ubicación del sitio de trabajo para llevarlos a un mapa de localización.
- Cinta Métrica: utilizada para medir distancias y ubicar correctamente los geófonos.
- Estacas: utilizadas para ubicar los sitios de disparos.
- Equipo de Topografía: equipo usado para conocer la altura de los puntos donde se encuentran los geófonos, y con ese dato realizar en el procesamiento correcciones de estáticas de elevación. Consta de un teodolito, una mira y un jalón. (Ver Foto 15)



Foto 15. Teodolito, Equipo de Topografía

# 6.1.2. Diseño de Adquisición de Datos Sísmicos 2D

El diseño implementado en este trabajo, se baso en el trabajo hecho por Hunter (1984), en el cual propone que en capas superficiales no consolidadas que tengan aproximadamente 20 metros de espesor el método de reflexión puede ser muy eficiente usando equipos de adquisición con 12 canales para mapear la topografía de la interfase capa no consolidada y capa rocosa. Propone 2 técnicas: una es la técnica de la **ventana optima** que requiere de un arreglo de 12 canales que puedan ser posicionados con respecto a la fuente tanto que el reflector de la capa rocosa sea observado con mínima interferencia, (**Ver Figura 13**).

El geófono mas cercano a la fuente se ubica después del ruido "Ground Roll" y de allí se ubican el resto de geófonos en un arreglo 2D.



Figura 13. Modelo de reflexión y grafica distancia-tiempo. Fuente: [Tomado de]: Hunter (1984)

La otra técnica es el *Offset Optimo,* se toma un offset común, para toda la línea sísmica, utilizando solo un canal, y luego del disparo se mueve la fuente y el geófono manteniendo el mismo offset común. Esta técnica no requiere correcciones NMO en el procesamiento.

Las líneas de refracción de este trabajo requirieron utilizar un arreglo de geófonos muy usado por la industria conocido como Perfil Contraperfil, en el cual se dispara en sentidos contrarios para tener una mejor imagen de las velocidades de las ondas.

#### 6.2 Procesamiento de Datos Sísmicos 2D

En el procesamiento de datos de sísmica superficial se utilizan los mismos algoritmos, incluso el mismo software, que en sísmica profunda. En particular, en este trabajo se desarrollará con un paquete comercial de software (ProMax)

ampliamente usado en el procesado de la sísmica de exploración petrolera. El procesamiento consiste en la elección y posterior aplicación de los parámetros y algoritmos de tratamiento adecuados a los datos sísmicos adquiridos en el campo (datos brutos) con el fin de obtener secciones sísmicas de calidad.

El objetivo fundamental de todo procesado multiseñal es aislar en los registros las reflexiones de los otros eventos sísmicos que se superponen a ellas (ruido ambiental, Ground Roll, onda aérea, etc.). Actualmente, debido al gran incremento del volumen de datos (mayor capacidad instrumental) y al desarrollo de nuevos algoritmos (mayor potencia de cálculo), el dominio de las técnicas de procesado es el pilar básico de la prospección geofísica.

Otro factor decisivo en sísmica de alta resolución que afecta al procesamiento es la necesidad de preservar las altas frecuencias ya que las estructuras geológicas superficiales están en el límite de la detectabilidad sísmica y la aplicación de filtros para suprimir los eventos que no pertenecen a reflexiones caen, a menudo, en el mismo rango de frecuencias, de manera que cualquier disminución de este rango supone una menor definición de la sección sísmica.

Es también un precepto que todo algoritmo empleado durante el procesado debe preservar el máximo posible las reflexiones originales, de manera que su aplicación no se superponga a éstas creando "artifactos" que puedan considerarse como falsas reflexiones. Esta la secuencia básica de procesamiento que se tendrá en cuenta en este trabajo.

Tratamientos de Pre-apilamiento:

Almacenamiento: los datos de campo fueron grabados en formatos SEG-Y, compatible con el software utilizado y formato recomendado por la Society of Exploration Geophysicists (SEG).

Cargar la Geometría: Se definió correctamente las coordenadas (X, Y, Z) de cada una de las estaciones (fuentes y receptores), así como algunas otras características como el offset, entre otras. Algunos de estos datos deben ser introducidos manualmente, mientras que otros ya se encuentran en los headers de los ficheros de cada registro sísmico. Una vez definida la geometría de la línea sísmica se procede a su implantación de manera que cada traza de cada uno de los tiros de campo queda perfectamente ubicado.

Eliminación de Trazas: Se eliminaron total o parcialmente, aquellas trazas que presentan ruido o malas conexiones. El mal funcionamiento del geófono implica la perdida de una traza, pero no se presento cambios en la polaridad.

Lecturas de las Primeras Arribos: el conjunto de estas lecturas también se utiliza para calcular el campo de velocidades de refracción y así obtener un primer modelo del subsuelo.

Filtro Pasabandas: Se diseñó un filtro pasabandas de Ormsby definido por el trapecio 30-40-80-100 Hz.

Aplicación de las Correcciones Estáticas: Era importante realizarlas ya que en sísmica superficial las frecuencias son muy elevadas, las primeras capas son heterogéneas y presentan bajas velocidades. Además el área presentaba cambios topográficos que obligaron a realizar correcciones por elevación.

Control de Ganancia Automática (AGC): Se aplico esta función de ganancia para aumentar la amplitud de las trazas.

Deconvolución: Se aplico en esta etapa, con el fin de aumentar la resolución temporal de las reflexiones.

31

Correcciones NMO: Se aplico para que la trayectoria hiperbólica de los eventos de reflexión fueran transformados, en el eje del tiempo, en una línea horizontal (paso a offset cero) de manera que todas las trazas al ser sumadas estarán en fase.

Tratamientos de Apilamiento:

Apilamiento: Se crea una imagen de los reflectores presentes en el subsuelo de offset cero.

# 6.3 Interpretación de Datos Sísmicos 2D

En esta etapa se toma la imagen sísmica apilada en tiempo y se determina la presencia de estructuras que pueden correlacionarse con la geología de campo y así entender las estructuras en superficie. Estas estructuras a escala de este trabajo solo pueden ser fallas.

No es fácil interpretar sísmica somera debido que en el estrato somero la capa rocosa no se encuentra muy compacta, además puede estar presente el nivel freático, y esto genera problemas en la imagen sísmica.

#### 7. ANTECEDENTES

**Paris y Romero (1994)**, informaron según un trabajo realizado de las fallas de Colombia el cual hacen unos comentarios acerca de la falla más importante que se encuentra en la región que es la falla de Bucaramanga, describe el movimiento de esta y sitios donde se pueden observar bien los mejores rasgos Neo-tectónicos en Bucaramanga ubicados en el Norte y Sur de la ciudad.

**Campbell (1965)**, se dedica a hacer una compilación de la evolución histórica de la geología de esta parte Nororiental de Colombia, a la cual se refiere como las provincias Andinas Orientales todo esto lo plasma en una serie de mapas paleogeográficos que van desde el campaniano hasta el Aquitaniano Superior, con el fin de dar a conocer desde sus orígenes a la que el denomina como Falla de Santa Marta, pero que es la misma Falla de Bucaramanga-Santa- Marta que conocemos en la actualidad y cuyo trazo es de 550 Km la cual considera como una Falla de desgarre (Tipo Wrench) y a su vez muestra las evidencias que confirman esta última apreciación.

El trabajo de **Boinet, et al. (1984)**, publicado en la Revista de Geología Norandina, también hace referencia a la Falla de Bucaramanga y el importante papel que esta desempeñó en la denominada Orogenia Andina. De igual manera, es importante resaltar los eventos geológicos que dieron origen a la conformación paleo-geográfica de Colombia para el Jurásico tiempo para el cual se depositan algunas de las formaciones de interés en nuestro estudio.

**Paris et al. (2000),** divide en secciones al sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta: Para la sección Bucaramanga, propone que es una falla linear con características topográficas bien definidas donde el gran abanico aluvial de Bucaramanga muestra movimientos sinextrales en rumbo, evidenciados por el desplazamiento del nivel base de las corrientes y el incremento en el grado de disección de la superficie del abanico de Bucaramanga hacia el suroeste, este desplazamiento tiene un promedio de compensación vertical de cerca de 20 m, aunque gran parte es sinestral (lateral – izquierdo). Dentro de las expresiones geomorfológicas de callamiento de este sistema de fallas tenemos: Lomos flexurales, control tectónico de drenajes en "L", facetas triangulares, silletas, desplazamiento de corrientes, lagos de falla, escarpes de falla y fuertes rupturas en la pendiente. Adicionalmente, depósitos aluviales Cuaternarios muestran desplazamientos y volcamiento.

Muchos autores se han preocupado por entender la cinemática y la función de esta falla en la configuración geográfica y geológica de esta parte Nororiental de Colombia. **Ujueta (2003)**, por ejemplo, se ocupa en este informe de hacer un recuento histórico sobre los diferentes conceptos expresados por los autores originales que hablan acerca de la definición de la Falla y pasando por estas primeras consideraciones descripciones genéricas se llega hasta una de las posturas modernas que se tienen con respecto a las consideraciones Regionales de la Falla de Santa-Marta Bucaramanga y donde no se le considera como una sola, sino como dos Fallas paralelas de comportamientos similares.

Hunter, Pullan, Burns, Gagne, y Good (1984), argumentan que en áreas donde la capa meteorizada exceda de 20 metros de espesor el método de reflexión es importante para mapear la interfase de la capa meteorizada y la capa rocosa, por medio de 2 técnicas: la primera la ventana optima que requiere de doce (12) canales espaciados con respecto a la fuente de manera que el reflector de la capa rocosa se observe con mínima interferencia, el primer geófono se coloca después del ruido superficial conocido como "*Ground Roll*". La segunda técnica es el offset óptimo usando la técnica de la ventana óptima y tomando un offset común recomiendan 3 m para espaciar todos los geófonos, y así identificar eventos de una sección de Offset común.

**Knapp y Steeples (1986)**, ellos consideran que como los datos sísmicos son tomados en campo es importante determinar la calidad de la sísmica, dependiendo de parámetros como el objetivo del levantamiento y la localidad geológica. Además recomiendan usar porra como fuente de energía de sísmica somera de alta resolución, filtrado de datos antes de las conversiones análogo-digitales y un diseño de geófonos que sirvan para atenuar el ruido conocido como *Ground Roll*.

**Millar, Pullan, Waldner, y Haeni (1986)**, hacen una comparación entre las fuentes sísmicas someras, en el refugio de animales salvajes en Atlantic City (USA) por su costo, la preparación del área de disparo, fácil uso y energía obtenida en el disparo.

Keiswetter y Steeples (1994), fundamentan las características de los impactos con porra en 3 lugares de geología superficial diferente, placas de diferente composición y ubicación del impacto en la placa. Además agregan que para aumentan la amplitud sísmica, es importante repetir disparos para mejorar la imagen señal/ruido. También comentan que al disparar sobre la placa en el lugar no centrado genera frecuencias no constantes entre 6 y 12 db.

**Anderson y Akingbade (2000)**, fundamentan las técnicas de reflexión sísmica, el cual señala unos principios que se deben tener en cuenta para realizar una adquisición de datos sísmicos someros.

**Prado, Malagutti, y Dourado (2002)**, en este estudio ellos examinan los cambios simples en los parámetros del sistema como masa de la Porra (fuente sísmica), área de la placa que recibe el impacto de la porra y hasta el material de la placa, en la frecuencia y la amplitud en unas adquisiciones en pavimentos de asfaltos en áreas urbanas en la ciudad de Sao Paulo (Brasil).

González, Boyce, y Koseoglu (2003), comentan que una poderosa herramienta de geofísica para la investigación del Cuaternario es la sísmica de reflexión adaptada

para profundidades someras. La sísmica de reflexión brinda registros continuos del subsuelo útiles en hidroestratigrafía. Más específicamente, la sísmica de reflexión que sirve para definir los límites verticales y laterales de los acuíferos y acuitardos y hacer inferencias sobre la conectividad hidráulica de acuíferos vecinos, antes de la perforación de pozos, o con escasos pozos.

**Hornbach (2004)**, en su trabajo mostró que se puede realizar adquisiciones sísmicas de bajo costo. Argumenta que debido a los avances en tecnologías análogas a digital se puede construir un sistema de datos sísmicos multicanal que puedan ser usados a bajo costo.

**Engelkemeir y Khan (2007)**, estudia la falla activa de Houston a partir de sísmica somera a través de adquisición de datos lidar.

# 8. METODOLOGÍA

La realización de las actividades propuestas en el cronograma de esta tesis fueron posible sólo gracias al total respaldo y apoyo técnico, económico y humano brindado por parte del Instituto Colombiano del Petróleo de ECOPETROL, a la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander y al Campo Colorado.

Para cumplir con los objetivos trazados en este estudio, la metodología que se cumplió se presenta a continuación.

# 8.1 Fase de Precampo

La primera fase de este trabajo correspondió a la recopilación de estudios regionales y locales acerca de la geología del área del Macizo de Santander y al flanco este de la cuenca del valle medio del magdalena; del mismo modo se realizo la geología de campo para buscar evidencias neotectónicas y la realización de la interpretación de fotos aéreas. También se trabajo en la búsqueda de información publicada acerca del empleo de adquisición sísmica somera de alta resolución y el procesamiento de esas señales.

A través de imágenes aéreas se selecciono los sitios donde se llevaría a cabo las líneas sísmicas, por tal motivo se gestiono la autorización de ingreso a los predios del ICP y de 2 fincas aledañas, luego de explicarles a los propietarios los alcances del proyecto y la promesa de reparar cualquier daño a sus predios.

Como política institucional de ECOPETROL se implemento unas normas de seguridad para el personal, en el manejo de los equipos y conservar el medio ambiente en campo.

Las reglas que se implementaron fundamentalmente fueron:

 Es obligatorio el uso del equipo básico de protección personal en el área de adquisición. El equipo de protección consiste de casco, chaleco reflectivo, guantes, botas, gafas, equipo de protección de oídos, y el uso de ropa cómoda. (Ver Foto 16).



Foto 16. Porte de Equipo de Seguridad durante la adquisición

2. Antes de iniciar todo trabajo se debe realizar y documentar el respectivo análisis de riesgo. Las personas que serán disparadores deberán saber como golpear la platina con la porra para evitar daños físicos y las personas que moverán los geófonos, deberán analizar cualquier riesgo e inclusive controlar el transito de vehículos por el área de trabajo.

- Esta prohibido el porte de alcohol o drogas ilícitas y personas bajo sus efectos.
- 4. Toda persona que colabore con la adquisición deberá tener seguro medico EPS o Salud UIS
- 5. Todo desecho de comida, bolsas, papel, o material no reciclable no podrá ser dejado en el área de trabajo. Por lo tanto debe ser dejado sobre las bolsas de basura que se ubicaran, para así mantener el área de trabajo como fue encontrado y preservar el medio ambiente.

#### 8.2 Fase de Campo

La fase de campo se llevo en el Noreste de Piedecuesta con las líneas sísmicas 2D y se trataran a continuación:

# 8.2.1. Línea de Refracción 1

La primera línea sísmica fue una línea de refracción paralela a la dirección de la falla de Bucaramanga, con el objetivo de conocer las velocidades de las capas someras y encontrar la distancia crítica. Esto se llevo a cabo dentro de las instalaciones del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) (**Ver Figura 14**). Se hizo usando la técnica de refracción perfil-contraperfil.



Figura 14. Línea de Refracción 1. Fuente: [Tomado de]: Google Earth. 2009

Los parámetros usados en el diseño implementado en esta línea fueron (Ver **tabla 2**)

Numero de canales	Numero Total de Disparos	Distancia entre disparos(m)	Máximo offset(m)	Tasa de muestreo(ms)	Longitud total del registro(s)
5	37	1	37	3	1

Tabla 2. Parámetros de diseño de la línea de refracción 1

El diseño implementado en la línea de refracción 1 (Ver **Figura 15 y Foto 17**) consistió en colocar 5 canales espaciados cada uno de 1 metro y a un metro del ultimo se produjo el primer disparo. Siguiendo una línea recta, los disparos se espaciaron cada uno también de un metro así hasta llegar a 37 m. Luego, se colocaron los 5 canales a los 37 m y se disparo cada metro, pero en sentido contrario. Cada canal tenía 3 geófonos.



Figura 15. Diseño de la Línea de Refracción 1, Punto: Posición de disparo, Triangulo: Canal



Foto 17. Diseño de la Línea de Refracción 1

# 8.2.2. Línea de Refracción 2

Esta línea sísmica de refracción se llevo a cabo dentro de 2 fincas: El Limonal de la Universidad Santo Tomas y una finca privada de descanso. Esta línea se hizo perpendicular a la falla de Bucaramanga, considerando que estaríamos atravesando la falla. (Ver **Figura 16**). Se hizo usando la técnica de refracción perfil-contraperfil.



Figura 16. Línea de Refracción 2. Fuente: [Tomado de]: Google Earth. 2009

Los parámetros usados en el diseño implementado en esta línea fueron (Ver **tabla 3**)

Numero de canales	Numero Total de Disparos	Distancia entre disparos(m)	Máximo offset(m)	Tasa de muestreo(ms)	
5	100	10	70	25	

Tabla 3. Parámetros de diseño de la línea de refracción 2

El diseño implementado en la línea de refracción 2 (**Ver Figura 17 y Foto 18**) consistió en colocar 5 geófonos y cada uno separado a 5 metros, siguiendo una línea recta, pero a partir del primer geófono, se ubico los disparos cada 10 metros hasta llegar a 70 metros. Luego, se colocaron los 5 geófonos a los 70 metros, haciendo lo mismo pero en sentido contrario.



Figura 17. Diseño de la Línea de Refracción 2. Punto: Posición de disparo, Triangulo: Geófono



Foto 18. Diseño de la Línea de Refracción 2

# 8.2.3 Línea de Reflexión 1

Se diseñó la primera línea de reflexión paralela a la falla Bucaramanga (Ver **Figura 18**), a partir de los datos obtenidos en las líneas de refracción y tomando en cuenta a Veermer (2004) que decía: "número de receptores igual número de disparos" y "distancia entre receptores igual distancia entre fuentes" y a Hunter, et. al. (1984) con su propuesta de la ventana optima.



Figura 18. Línea de Reflexión 1. Fuente: [Tomado de]: Google Earth. 2009

Los parámetros usados en esta línea sísmica se resumen en la tabla 4:

Numero de canales	Numero Total de Disparos	Distancia entre disparos y distancia entre receptores(m)	Máximo offset(m)	Tasa de muestreo(ms)
12	120	2	56	25

Tabla 4. Parámetros de diseño de la línea de reflexión 1

El diseño consistió (**Ver Figura 19 y Foto 19**) en: ubicar 12 receptores separados cada 2 metros, con respecto al último receptor se midió 12 metros "ventana óptima" (tomada con base al experimento de refracción, donde se determinó el punto crítico) y ubicamos el primer disparo, luego cada 2 metros se fue a disparar hasta completar el disparo 12. Posteriormente se retiro el primer receptor y se desplazo para que este sea el ultimo receptor siempre y cuando se respete el espaciamiento entre receptores que en nuestro caso es 2 metros, luego se midió con respecto al último canal 12 metros "ventana optima" y ubicamos nuestro primer disparo y luego cada 2 metros disparamos hasta llegar al disparo 12, esta operación se repitió hasta mover 10 veces los receptores.



**Figura 19.** Diseño de Línea de Reflexión 1. Triángulos azules: representa los geófonos. Puntos rojos: representan los disparos



**Foto 19.** Diseño de Línea de Reflexión 1 Triángulos azules: representa los geófonos. Puntos rojos: representan los disparos

# . 8.2.4 Línea de Reflexión 2

La segunda línea de reflexión (**Ver Figura 20)** fue hecha perpendicularmente a la falla de Bucaramanga, utilizando la vía ICP-Los Ermitaños, y luego entrando a las instalaciones del ICP.



Figura 20. Línea de Reflexión 2. Fuente: [Tomado de]: Google Earth. 2009

Los parámetros usados en esta línea sísmica se resumen en la tabla 5:

Numero de canales	Offset común (m)	Numero Total de Disparos	Distancia entre disparos (m)	Máximo offset(m)	Tasa de muestreo(ms)
1	27	1440	3	800	25

**Tabla 5.** Parámetros de diseño de la línea de reflexión 2

Para el diseño implementado (**Ver Figura 21 y Foto 20**), se tuvo en cuenta el trabajo realizado por Hunter, et. al. (1984) de mantener un offset común de 27 metros y un solo canal, ese canal contenía un geófono multicomponente, el cual en el pavimento se acoplo con plastilina (**Ver Foto 21**). La distancia fuente receptor fue la misma 27 m y después de un disparo se movía la fuente y el receptor 3 m, pero manteniendo el offset común.



Figura 21. Diseño de Línea de Reflexión 2



Foto 20. Vista Panorámica de un Sector de la Línea de Reflexión 2



Foto 21. Geófono Multicomponente Acoplado con Plastilina

#### 8.2.5 Topografía de las Líneas Sísmicas

Las líneas de Refracción 2 y Reflexión 2 requerían realizar la topografía de los receptores, debido a cambios en las curvas de nivel por donde pasaba las líneas sísmicas. (**Ver foto 22**).

# 8.3 Fase de Oficina

La fase de oficina está representada por el procesamiento de las señales obtenidas en campo. El software que se uso fue Promax de Halliburton, disponible en el Instituto Colombiano del Petróleo, luego de tener las imágenes procesadas se realizo un análisis de la información obtenida para interpretar esos datos y sacar conclusiones.



Foto 22. Mira topográfica, equipo de topografía

# 8.4 Fase de Redacción y Edición de Informes

De la mano con el proceso de oficina se fue trabajando en la elaboración de los respectivos informes a entregar dentro de los plazos señalados en el cronograma de actividades y que se ajusta al calendario académico del año 2009 propuesto por el Consejo Académico de la UIS para los programas de pregrado.

#### 8.5 Fase de Entrega y Sustentación

Esta es la última etapa planificada para el proyecto; en ésta, se planea hacer entregar del informe final de investigación dentro de los plazos señalados por las directivas del proyecto y teniendo en cuenta el calendario académico de la universidad vigente para el primer período académico de 2009.

# 9. RESULTADOS

# 9.1 Línea de Refracción 1

El reflector fuerte es ruido Ground Roll. Para esta línea de refracción comparamos los primeros arribos del perfil y del contraperfil para ver si son iguales pero en sentido contrario. (**Ver Figura 22 y 23**)



Figura 22. Línea de refracción 1 Perfil



Figura 23. Línea de refracción 1, contraperfil

Si se compara las figuras 22 y 23, claramente se observa son las mismas graficas pero en sentido contrario (**Ver Figura 24**), lo cual indica que podemos tomar esos valores de los primeros arribos, para calcular las velocidades de las primeras capas y la distancia critica.



Figura 24. Comparación del perfil y contraperfil

De la figura 22 obtenemos que:

- Velocidad Primera Capa (V1)= 400 m/seg.
- Velocidad Segunda Capa (V<sub>2</sub>)= 1200 m/seg.
- Profundidad Estrato Somero = 6 m.

Para hallar la distancia crítica se basó en la Figura 22 Distancia Vs. Tiempo y se usó la siguiente ecuación:

```
Distancia crítica= (X<sub>c</sub>)
```

$$(Xc) = 2h \sqrt{\frac{V_2 + V_1}{V_2 - V_1}}$$

Donde:

V<sub>2</sub> = Velocidad Segunda Capa=1200 m/s

V<sub>1</sub> = Velocidad Primera Capa=400 m/s

h = Profundidad= 6 m

Si reemplazamos los valores obtenemos que (X<sub>c</sub>)=16 m Si (X<sub>c</sub>)= 16 entonces:

- Distancia Reflexión-Primaria = 16 metros.
- Distancia Refracción = 16-37 metros.

Al graficar elevación vs. distancia obtenemos el perfil de la refracción 1 (**Ver Figura 25**)



**Figura 25.** Perfil de la refracción 1. Línea negra: superficie, línea azul: Interfase 1, línea roja: interfase 2

Obtenemos de la figura 25 que la primera capa tiene una velocidad de 400 m/s correlacionables con suelos alterados y fragmentos de rocas metamórficas e ígneas (Flujo de escombros) con espesores entre los 6 y los 13 m. La segunda capa tiene una velocidad de 1200 m/s correlacionables con arenas y arcillas saturadas, posiblemente del tope de la formación Girón con espesor de 14 m.

#### 9.2 Línea de Refracción 2

El reflector fuerte es ruido Ground Roll. Se observan las imágenes de perfil (**Ver Figura 26**) y contraperfil (**Ver Figura 27**) iguales pero en sentido contrario, lo cual nos permite tomar correctamente los primeros arribos.



Figura 26. Línea de refracción 2, perfil



Figura 27 Línea de refracción 2, contraperfil

De la figura 26 obtenemos que:

- Velocidad Primera Capa (V1)= 480 m/seg.
- Velocidad Segunda Capa (V<sub>2</sub>)= 1320 m/seg.
- Profundidad Estrato Somero = 5 m.

Distancia crítica (X<sub>c</sub>)

$$(Xc) = 2h \sqrt{\frac{V_2 + V_1}{V_2 - V_1}}$$

Donde:

- V<sub>2</sub> = Velocidad Segunda Capa=1320 m/s
- V<sub>1</sub> = Velocidad Primera Capa=480 m/s
- h = Profundidad=5 m

Si reemplazamos los valores obtenemos que (X<sub>c</sub>)= 20 m

Si (X<sub>C</sub>)= 20 entonces:

- Distancia Reflexión-Primaria = 0-20 metros.
- Distancia Refracción = 20-70 metros.

Al graficar elevación vs. distancia obtenemos el perfil de la refracción 1 (**Ver Figura 28**) con ayuda de los datos topográficos. Una interfase 3 es vista en la imagen pero no se toma en los resultados ya que la poca energía de la fuente, no garantiza que esa interfase sea correcta.



Distancia (m)

**Figura 28.** Perfil de la refracción 2 Línea gris: superficie donde se colocaron los geofonos, Línea azul interfase 1, línea roja interfase 2, línea negra interfase 3

Una imagen de tomografía (Ver Figura 29) muestra las velocidades de las ondas P.



Figura 29. Tomografía de la refracción 2. Triángulos rojos: superficie donde se ubicaron los geófonos

Obtenemos de la figura 28 que la primera capa tiene una velocidad de 480 m/s correlacionables con suelos alterados y fragmentos de rocas metamórficas e ígneas (Flujo de escombros) con espesores entre los 5 y los 9 m. La segunda capa tiene una velocidad de 1320 m/s correlacionables con rocas ígneas y metamórficas saturadas del neis de Bucaramanga con espesor de 18 m.

Para las dos siguientes líneas, que son líneas de reflexión requerían más procesamiento, por eso se implemento esta secuencia básica de procesamiento (**Ver Figura 30**).



Figura 30. Secuencia de procesamiento realizado para las dos líneas de reflexión

# 9.3 Línea de Reflexión 1

El programa al leer los datos hace un trace display (**Ver Figura 31**) para visualizar los datos.



Figura 31. Lectura de un disparo

En la figura 31 claramente se observa un disparo con 12 trazas con información de campo. Luego se aplica la secuencia de procesamiento (**Ver Figura 30**) para apilar la imagen. Ya apilada la imagen se muestra en trazas "Wiggles" (**Ver Figura 32**) y en escala de grises (**Ver Figura 33**).



Figura 32. Imagen apilada con trazas wiggles



Figura 33. Imagen apilada con escala de grises

Las figuras 31 y 32 son la misma, pero a pesar de realizar toda la secuencia de procesamiento, no se puede realizar una interpretación de esta imagen, ya que el trabajo de oficina no permitió que la imagen fuera mejorada y así observar estructuras del subsuelo.

# 9.3 Línea de Reflexión 2

Al observar un trace display (**Ver Figura 34**) se observa un disparo antes de aplicar la secuencia de procesamiento.



Figura 34. Leyendo el header de la línea de reflexión 2

Luego de aplicar la secuencia de procesamiento se obtiene una excelente imagen apilada (**Ver Figura 35**) en donde se observa fácilmente estructuras del subsuelo.



Figura 35. Imagen apilada de la línea de reflexión 2
En la figura 35 en la parte superior se observa la topografía de la superficie de la línea sísmica 2D.

La interpretación de esta imagen se muestra a continuación (Ver Figura 36).



Figura 36. Interpretación de la línea de reflexión 2

Pero estas fallas requieren de un modelo estructural que explique porque aparecen mas fallas en la imagen sísmica (**Ver Figura 37**)



Figura 37. Modelo estructural de la falla de Bucaramanga en el estrato somero

## **10. CONCLUSIONES**

Los resultados de la línea de refracción 1 muestra que en el ICP el flujo de escombros tiene espesores entre los 6 y los 13 metros. Debajo de este flujo de escombros posiblemente están rocas de la formación Girón. Ambas interfases presentan un pequeño buzamiento hacia el sur, que debe estar relacionado con los esfuerzos producidos por la falla de Bucaramanga.

La velocidad de la interfase 1 de la línea de refracción 1 es 400 m/s y de la interfase 2 es 1200 m/s correlacionables con suelos alterados y fragmentos de rocas ígneas y metamórficas (Flujo de escombros) y con arenas y arcillas saturadas (Formación Girón) respectivamente.

La línea de refracción 2 muestra el contacto entre el flujo de escombros y el neis de Bucaramanga. El espesor del cuaternario oscila entre los 5 y los 9 m, a medida que disminuye la topografía aumenta su espesor. Debajo de esta formación reciente aparece el neis de Bucaramanga meteorizado y saturado en agua con un espesor de 18 m y debajo de este, están rocas del neis de Bucaramanga mas compactas.

En la línea de refracción 2 las velocidades de la interfase fueron 480m/s y 1320 m/s correlacionables con suelos alterados y fragmentos de rocas ígneas y metamórficas (Cuaternario) y rocas metamórficas saturadas en agua (Neis de Bucaramanga).

La línea de reflexión 1 a pesar de aplicar una secuencia básica de procesamiento y usar software de alta tecnología en la industria del petróleo como Promax y geodepth solo fue posible apilar la sección sísmica, pero no se pudo interpretar la imagen, debido a que no se logro obtener una sección sísmica con estructuras visibles para realizar una interpretación confiada. El diseño de la línea era perfecto para ver estructuras ya que se aplico la técnica de la ventana óptima de Hunter (1984), cabe la posibilidad de que hubo problemas en la toma de datos, mas específicamente, problemas con los receptores, ya que el día anterior a la adquisición llovió y el terreno estaba mojado. Adicionalmente los cables que llevan la señal obtenida por los geófonos fallaban, debido a que el terreno presentaba plantas y arbustos con espinas y varias veces cortaron los cables. Desafortunadamente no se logro interpretar esta imagen, ya que esta sección sísmica era importante para observar las estructuras en el subsuelo.

En la línea de reflexión 2 usando el método del offset optimo de Hunter (1984), resulto perfecto para la interpretación de la estructura somera de la falla de Bucaramanga, ya que permito observar una serie de fallas paralelas que cortaban el flujo de escombros en el norte de Piedecuesta.

Se observaron 5 fallas paralelas (inversas y normales) en la línea de reflexión 2 con un ángulo de 120 grados. Estas fallas cambian la topografía del área de trabajo (**Ver Figura 36**), pero es la falla A, la cual cambia drásticamente las curvas de nivel. Por lo tanto esta debe ser la falla principal de Bucaramanga que menciona (Beltrán, 2002). Es claro que a partir de esta falla A la pendiente se hace fuerte y solo una falla principal puede generar este cambio abrupto.

Un modelo estructural que explicaría esas 5 fallas es el visto en la **Figura 37**, para lo cual todas las fallas están asociadas a la falla principal. Su geometría tiene forma de flor positiva, se compara con el trabajo hecho por Woodcook (1986) para mostrar que la interpretación es correcta. No se sabe que tan profunda seria la flor.

En la **figura 37** aparece una pequeña falla dextral según (Beltrán 2002) casi vertical, la cual se correlaciona con la falla 1 de la **foto 10** la cual es una falla que se interpreto en fotografías aéreas. Esta falla marca la dirección de una quebrada que pasa por las instalaciones del ICP en el sector conocido como el chircal. La presencia de foliación con orientación variada, lagos de falla, silletas de falla, lomos estructurales entre otras, muestra la actividad neotectónica de la falla de Bucaramanga, pero no existía una prueba del pleistoceno que demostrara que esa actividad continuaba. Aquí con la **figura 37** demuestro que esa actividad se mantiene durante estos últimos 50 mil años, ya que se produce fallamiento posterior a la depositación del cuaternario, negando lo dicho por Boinet y Mendoza (1989) donde en su trabajo dicen que la actividad de la falla de Bucaramanga se detuvo en este periodo.

El hecho de que la falla sea tan activa con sismos de menos de 50 mil años, obliga a que el área metropolitana de Bucaramanga se mantenga en alto riesgo, y se cree todos los mecanismos para estar alertas y mejor preparados ante cualquier sismo de gran poder.

Aquí en este trabajo no me da herramientas para correlacionar el nido sísmico de Bucaramanga y la falla de Bucaramanga.

La interpretación de imágenes aéreas permitió observar los movimientos de las fallas asociadas a la falla de Bucaramanga, la alineación de drenajes, la topografía, los cambios litológicos, la topografía, la geomorfología para analizar y observar como la actividad reciente de la falla a cambiado el relieve del área de trabajo.

La geología de campo mostró que no es fácil encontrar buenos afloramientos en el área de trabajo, ya que la presencia de la falla tiene al neis, una roca compacta, en una roca semiconsolidada altamente meteorizada con foliación variada y además triturada. El cuaternario de la zona, llamado flujos de escombros, (**Ver Foto 3**), se encontró que esta compuesto por fragmentos del neis de Bucaramanga y rocas ígneas intrusitas en proceso de compactación. La escala de interés de este trabajo se caracterizo por un subsuelo muy heterogéneo en el cual las capas mas superficiales presentaban grados de compactación diferentes dando lugar a cambios bruscos de velocidad, de manera que se generan muchas fases sísmicas; ondas superficiales y difracciones.

La porra a pesar de ser la mejor fuente sísmica somera de alta resolución, no alcanza superar los 80 metros de profundidad debido a que no genera la suficiente energía para que la onda viaje a través de las capas mas profundas, y si se necesita observar estructuras o eventos a profundidades superiores a los 100 metros se requiere cambiar la fuente.

La sísmica de alta resolución somera es una de las técnicas geofísicas más útiles para la prospección del subsuelo. Su gran potencial de aplicación en el reconocimiento de estructuras geológicas la hace una gran herramienta para los geólogos y geofísicos.

Un aspecto del tratamiento de los registros sísmicos que más se enfoco fue el de la eliminación del ruido que se superpone a las reflexiones superficiales, ya que el ruido ground roll apareció en las líneas sísmicas.

Se destaca la necesidad de obtener toda la información sobre el área de estudio antes de la adquisición de datos sísmicos, para implementar un buen arreglo de geófonos, y así mejorar la imagen sísmica.

El uso de la tecnología petrolera funciona para solucionar problemas geológicos socialmente significativos, ya que esta presenta grandes avances tecnológicos y de muy bajo costo.

## TRABAJO A FUTURO

Si se cambiara la fuente sísmica por una de mayor poder, llegaría alcanzar mayores profundidades. Para tener mejor resolución debería usarse geófonos nuevos o en muy buen estado, un diseño de arreglo de geófonos 3D buscando mejorar la imagen de la geometría estructural de la falla de Bucaramanga.

## **BIBLIOGRAFÍA**

ALMEYDA, W. (2003). Evaluación del Riesgo Sísmico del Sistema de Acueducto de Bucaramanga a partir del Estudio de Microzonificación Sísmica Indicativa de Bucaramanga (Colombia). Acueducto de Bucaramanga.

ANDERSON, N.; and, AKINGBADE, A. (2000). Overview of the Shallow Seismic Reflection Technique. University of Missouri. USA.

AVERSANA, P. (2000). Improvement in Seismic Acquisition by 3D Global Offset Approach. Enterprice Oil Italian. Italia.

BELTRAN, R. y REY, A. (20002) Comportamiento Estructural asociado al sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta y diaclasas, para definir una red de drenaje subterráneo en el Macizo de Santander, sección entre Piedecuesta (Río de Oro) y Bucaramanga (Río Surata). Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander.

BOINET, T., BOURGOIS, J., MENDOZA, H., VARGAS, R., (1989) La Falla de Bucaramanga (Colombia) su función durante la orogenia andina., Geología Norandina # 11.

CAMPBELL, C.J. (1965). The Santa–Marta Wrench Fault of Colombia and its Regional Settings. Fourth Caribbean Geological Conference. Trinidad. p. 247-261.

CASTRO, E.; y BERNAL, L. (1992). Localización Preliminar de Amenazas en los Departamentos de Santander y Norte de Santander, Colombia. Primeras Jornadas Sísmicas del Noreste Colombiano. Memoria: 9-48. Bucaramanga. CEDIEL, F. (1968). El Grupo Girón una Molaza Mesozoica de la Cordillera Oriental. Boletín Geológico del Servicio Geológico Nacional. Bogotá D.C. Vol. XVL. Nº 1-3. p. 5-96.

CEDIEL, F.; and SHAW, R.P.; and, CACERES, C. (2003). Tectonic Assembly of the Northern Andean Block, in C. Bartolini, R.T. Buffler, and J. Blickwede, eds. The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon Habitats, Basin Formation, and plate tectonics: AAPG Memoir 79, p. 815–848.

CORONADO, W. y MEJIA, C., (2006). Cartografía Geológica y Caracterización estructural con fines hidrogeológicos en el sector nororiental de la cuenca del Río de Oro. Tesis de para optar al título de Geólogo. Escuela de Geología, UIS, Bucaramanga.

CHAPARRO, A. y GUERRERO, A. (1991). Geología y Geotecnia de la Zona Oriental del Área Metropolitana de Bucaramanga. Tesis de para optar al título de Geólogo. Escuela de Geología, UIS, Bucaramanga.

DE PORTA, J. (1959). La Terraza de Bucaramanga. Boletín de Geología UIS # 3. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Publicaciones UIS. p. 5-15.

DENGO, C.A.; and, COVEY, M.C. (1993). Structure of the Eastern Cordillera of Colombia: Implications for Trap Styles and Regional Tectonics. AAPG Bulletin. Vol. 77. p. 1315-1337.

DÍAZ, G.; y, SUÁREZ, M. (1998). Evidencias Neotectónicas del Sistema de Fallas del Suárez en su Confluencia con el Sistema de Fallas de Bucaramanga. Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.

ENGELKEMEIR, R.; and, KHAN, S. (2007). Near-surface Geophysical Studies of Houston Faults. University of Houston. USA.

ESTRADA, A. (1972). Geology and Plate Tectonics History of the Colombian Andes. M.Sc. Thesis (Inédita), Stanford University. Stanford. 115 p.

ETAYO, F., et al. (1983). Mapa de Terrenos Geológicos de Colombia. Publicaciones Geológicas Especiales Ingeominas. Bogotá D.C. (14-I):1-235.

EVANS, B. (1997). A Handbook for Seismic Data Acquisition in Exploration, Geophysical Monograph Series. Society of Exploration Geophysicists. Nº 7.

GAYA, M. (2004). Procesado de Sísmica de Reflexión Superficial en el Complejo Turbíditico de Ainsa (Huesca-España). Tesis. Universidad Politécnica de Cataluña. p. 100.

GEOLOGICAL SURVEY OF DENMARK, (2003). Acquisition of Refraction and Multichannel Reflections Seismic Data Off the Faroe Islands and Optionally Off West Greenland. Dinamarca.

GELVEZ, J. (2006). Geochemistry of Jurassic-Early Cretaceous Clastic Sediments from the Santander Massif. Eastern Cordillera, Colombia: Provenance and Tectonic implications. Tesis de Maestría. Shimane University.

GÓMEZ, E.; JORDAN, T.; ALLMENDINGER, R.; and, CARDOZO, N. (2005). Development of the Colombian Foreland-basin System as a Consequence of Diachronous Exhumation of the Northern Andes. Cornell University. Ithaca. New York 14853. USA. GÓMEZ, J.A. (1980). Actividad Sísmica en el Departamento de Santander. Boletín de Geología Nº 14. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. (28):3-23.

GONZALEZ, G.; BOYCE, J.; y, KOSEOGLU, B. (2003). Sísmica de Reflexión de Alta Resolución en el Estudio del Cuaternario de Áreas de Pie de Monte. Revista de la Asociación Geológica Argentina. Buenos Aires. 58 (1):78-84.

GRAY, E. (2000). A Filter Circuit Board for the Earthworm Seismic Data Acquisition System. Unites States Geological Survey. USA.

INGEOMINAS (1977). Mapa Geológico del Cuadrángulo H-12. Bucaramanga.

INGEOMINAS (2001a). Mapa Geológico Generalizado del Departamento de Santander. Memoria Explicativa. Bucaramanga.

INGEOMINAS (2001b). Zonificación Sismogeotécnica Indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga. Bogotá D.C.

INGEOMINAS (2008). Zonificación de amenazas por movimientos de masa de algunas laderas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta.

IRVING, E.M. (1971). La Evolución Estructural de los Andes más Septentrionales de Colombia. Boletín Geológico. Ingeominas. Bogotá. 19 (2):1-89.

JULIVERT, M. (1958). La Morfoestructura de la Zona de las Mesas al SW de Bucaramanga. Boletín de Geología UIS # 1. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Publicaciones UIS. p. 7-45.

JULIVERT, M. (1959). Geología de la Vertiente W del Macizo de Santander en el Sector de Bucaramanga. Boletín de Geología UIS # 3. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Publicaciones UIS. p. 15-32.

JULIVERT, M. (1961). Geología de la Vertiente W de la Cordillera Oriental en el Sector de Bucaramanga. Boletín de Geología UIS # 8. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Publicaciones UIS. p. 39-43.

JULIVERT, M.; y, TÉLLEZ, N. (1963). Sobre la Presencia de Fallas de Edad Precretácica y Post-Girón (Jura-Triásico) en el Flanco W del Macizo de Santander (Cordillera Oriental, Colombia). Boletín de Geología # 12. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Publicaciones UIS. p. 5-17.

HORNBACH, M. (2004). Development of Low Cost, Portable Multi-channel Seismic Data Acquisition System for Classroom Experiments and Independent Studies. Journal of Geosciences Education. Vol. 52. Nº 4. University of Wyoming. USA.

HUNTER, J.; PULLAN, S.; BURNS, R.; GAGNE, R.; and, GOOD, R. (1984). Shallow Seismic Reflection Mapping of the Overburden-bedrock Interface with the Engineering Seismograph-some Simples Techniques.

LEÓN, L.A. (1991). Mapa Geológico del Departamento de Santander. Escala 1:800.000. Boletín de Geología # 20. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Publicaciones UIS. (35):53-63.

KEISWETTER, D.; and, STEEPLES, D. (1994). Practical Modifications to Improve the Sledgehammer Seismic Source. Geophysical Research Letter. Vol. 21. N° 20. p. 2203-2206.

71

KNAPP, R.; and, STEEPLES, D. (1986). High-resolution Common-depth-point Reflection Profiling: Field Acquisition Parameter Design. Geophysics. Vol. 51. N° 2. p. 283-294. 14 figs.

MARCERA, M. y SALAMANCA, P. (1993). Cartografía geológica y estratigráfica a detalle y Zonificación geotécnica del sector oriental del Área Metropolitana de Bucaramanga. Tesis para optar al título de Geólogo. Escuela de Geología, UIS, Bucaramanga.

MILLER, R.; PULLAN, S.; WALDNER, J.; and, HAENI, F. (1986). Field Comparison of Shallow Seismic Sources. Geophysics. Vol. 51. Nº 11. Kansas Geological Survey. USA.

NAVAS, J. (1962). Geología del Carbonífero al N de Bucaramanga. Boletín Geología UIS # 11. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Publicaciones UIS. p. 23-34.

NIÑO, A., VARGAS P., (1993) Modelo de evolución para el abanico de Bucaramanga (Colombia). Revista Facies UIS Vol 2.

ORDÓÑEZ, O. (2000). Rocas en Zonas de Falla. Universidad Nacional de Colombia. Medellín.

PARIS, G.; y, ROMERO, J. (1994). Fallas Activas en Colombia. Boletín Geológico de Ingeominas. Vol. 34. Nº 2-3. Bogotá D.C. 1994. p. 14-15.

PRADO, R.; MALAGUTTI, W.; and, DOURADO, J. (2002). The Use of Shallow Seismic Reflection Technique in Near Surface Exploration of Urban Sites: An Evaluation in the City of Sao Paulo. Brazil. Brazilian. Journal of Geophysics. Vol. 19. 2001. p. 3.

PULIDO, N. (2003). Seismictectonics of the Northern Andes (Colombia) and the Development of Seismic Networks. Bulletin of the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering. Special Edition. Japan. p. 69-76.

RUTH, M. (2006). Practical Interpretation of Multi-Component Seismic Data, Transform Software and Services, Inc. Denver. USA.

SARIBUDAK, M. (2006). Integrated Geophysical Studies Over an Active Growth Fault in Houston. Environmental Geophysics Associates. Earth-Wave Geosciences. Houston, USA.

STEEPLES, D.; and, KEISWETTER, D. (1994). Practical Modifications to Improve the Sledgehammer Seismic Source. Geophysical Research Letter. Vol. 21. N° 20. University of Kansas. USA.

TOUSSAINT, J.F.; y, RESTREPO, J.J. (1989). Acreciones Sucesivas en Colombia: Un Nuevo Modelo de Evolución Geológica. V Congreso Colombiano de Geología. Memoria. Bucaramanga. p. 127-146.

UJUETA, G. (2003). La Falla de Santa Marta – Bucaramanga no es una sola falla: son dos fallas diferentes: la Falla de Santa Marta y la Falla de Bucaramanga. Geología Colombiana. Nº 28. Bogotá D.C. p. 133-158.

VARGAS, C.; and, MONTES, L. (2007). Seismic Structure of South-Central Andes of Colombia by Tomographic Inversion. Geofísica Internacional. Colombia. Vol. 26. N° 2. p. 117-127.

VARGAS, G.; y, NIÑO, A. (1992). Patrones de Fracturamiento Asociados a la Falla de Bucaramanga. Tesis. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 95 p.

VERMEER, G. (2001). Fundamentals of 3D Seismic Survey Design. Geophysical Advice Zieltjes. Oldemarkt. The Netherlands.

WARD, W.; et al. (1973). Geología del Cuadrángulo H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona, Departamento de Santander y Norte de Santander. Ingeominas. Boletín Geológico Nº 21. Bogotá D.C. (1-3):1-32.

YILMAZ, O., ESER M., (2003) a Unified Workflow for Engineering seismology, Fifth natinal conference, 26-30 Mayo.

YILMAZ, O. (2001) Seismic data Analysis-processing, inversion and interpretation of seismic data, SEG, Oklahoma.

YOKOKURA, T. (1999). Seismic Investigation of an Active Fault Off Kobe: Another Disaster in the Making? Geological Survey of Japan. Tsukuba. Ibaraki. Japan.

## WEBGRAFÍA

http:// www.geosphereinc.com

http:// www.geovirtual.cl

Google Earth. 2008. [Software libre de Imágenes Satelitales].