

**MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOFÍSICO PARA EVALUAR EL POTENCIAL
HIDROGEOLOGÍCO DE LA FORMACIÓN LOS SANTOS EN LA MESA DE LOS
SANTOS – SANTANDER, COLOMBIA.**

SERGIO ANDRES GARCIA ARIAS

EMILIO ANDRES GOMEZ GARCIA



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2015

**MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOFÍSICO PARA EVALUAR EL POTENCIAL
HIDROGEOLOGÍCO DE LA FORMACIÓN LOS SANTOS EN LA MESA DE LOS
SANTOS – SANTANDER, COLOMBIA.**

SERGIO ANDRES GARCIA ARIAS

EMILIO ANDRES GOMEZ GARCIA

**Trabajo de Grado para optar al título de
Geólogo.**

Director:

JUAN DIEGO COLEGIAL GUTIERREZ

Geólogo PhD.

Codirector:

SULLY GÓMEZ ISIDRO

Ingeniera Civil PhD.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGIENERÍAS FÍSICO - QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2015

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos principalmente a Dios que nos dio la capacidad para realizar y culminar con éxito esta etapa tan importante en nuestras vidas.

A la Universidad Industrial de Santander y a la escuela de geología que acompañada de nuestros profesores contribuyeron en nuestra formación académica y personal con la enseñanza de los conocimientos y las herramientas necesarias para poder afrontar todas aquellas situaciones que surjan en nuestras vidas como profesionales.

A nuestro director de proyecto, doctor en Geología, profesor Juan Diego Colegial Gutiérrez Y nuestra codirectora la Ingeniera civil Sully Gómez Isidro, por su tiempo, orientación y recomendaciones brindadas en todas las etapas del trabajo de grado para que este saliera adelante.

A nuestro colega Juan Camilo Gómez Royero por su constante apoyo, ayuda y orientación en las actividades realizadas para el desarrollo y cumplimiento de los objetivos propuestos en esta pasantía de investigación.

A la empresa Hidroingeniería S.A.S por su colaboración en el préstamo de los equipos requeridos durante la realización de este trabajo.

DEDICATORIA

El presente trabajo va dedicado en primer lugar a mis padres, especialmente a mi querida madre Luz Mila Garcia Carrillo por brindarme todos los días de mi vida su abundante amor y alegría para llenar mi alma de felicidad, sin su constante Sacrificio, apoyo, comprensión y motivación no habría alcanzado los objetivos tanto personales como profesionales que he logrado hasta ahora y que me han formado como una persona de buenos principios y valores.

A mi abuela Elba y mi abuelo Darío, que siempre han estado a mi lado para complacerme y mostrarme un ejemplo de mutuo amor y perseverancia que puede superar cualquier adversidad.

A mis hermanos Darío Luis y Elba Luz, que han sido mi fuente de inspiración para seguir adelante y lograr todas las cosas que conseguido.

A mi novia Nathalie, por su constante amor y su gran apoyo en la mayor parte de esta bonita etapa que hoy estoy muy cerca de culminar exitosamente.

A todos mis amigos por su amistad incondicional que de una u otra manera han aportado grades enseñanzas a mi vida.

Muchas gracias a todos.

Emilio.

DEDICATORIA

A mi hija Danna Isabella.

*Por ser mi fuente de INSPIRACIÓN y ALEGRÍA. Por su cariño,
ternura, comprensión y momentos felices.*

A mi madre Yanitza.

*Por apoyarme en todo momento, por la motivación constante de
salir adelante y ser una persona de bien, pero ante todo, por
su AMOR.*

A mi padre Pedro.

*Por todas las enseñanzas de perseverancia, constancia y el
VALOR para salir adelante que me ha infundado, y por su amor.*

A mi hermana Yacira.

*Por ser un EJEMPLO de responsabilidad y deseos de superación,
y por su amor.*

*...A Todos aquellos familiares, amigos y maestros que me
apoyaron directa o indirectamente para escribir y concluir
esta tesis..*

Sergio.

CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCIÓN	22
1. OBJETIVOS.....	24
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	24
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	24
2. JUSTIFICACIÓN.....	25
3. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA.....	27
4. METODOLOGÍA	28
5. MARCO GENERAL DE LA GEOFÍSICA.....	30
5.1 GEOFÍSICA APLICADA.....	30
5.2 GEOFÍSICA	32
5.3 MÉTODOS GEOFÍSICOS.....	33
5.3.1. TRE.....	33
5.3.2. SEDT	38

6. GEOLOGÍA DE LA MESA DE LOS SANTOS.....	44
6.1. GEOMORFOLOGÍA.....	44
6.2. ESTRATIGRAFÍA	46
6.2.1. Columnas estratigráficas.....	55
6.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	69
6.3.1 Estrías.....	74
6.3.2 Diaclasas	74
7. ANÁLISIS HIDROGEOLÓGICO DE LA FORMACIÓN LOS SANTOS	78
7.1. ANTECEDENTES.....	78
8. MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOFISICO PRELIMINAR DE LA FORMACIÓN LOS SANTOS	97
8.1 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	99
8.1.1 Resultados tomografías	101
8.1.2 Resultados de los sondeos electromagnéticos	112
8.2 APLICACIÓN DEL SOFTWARE LeapFrog Geo 2.2.1	126
8.3 PLANTEAMIENTO DEL MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOFISICO PRELIMINAR DE LA FORMACIÓN LOS SANTOS	134
9. CONCLUSIONES	138
10. RECOMENDACIONES.....	140

BIBLIOGRAFÍA.....141

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
FIGURA 1. LOCALIZACIÓN GENERAL DE LA MESA DE LOS SANTOS EN EL DEPARTAMENTO DE SANTANDER EN EL MUNICIPIO DE LOS SANTOS. LA MESA DE LOS SANTOS ESTÁ DELIMITADA POR LOS RÍOS CHICAMOCHA AL S-E, SOGAMOSO AL W, MANCO AL NE Y QUEBRADA LOS MONTES AL N.	27
FIGURA 2. ETAPAS DEL PROCEDIMIENTO DE INVERSIÓN ELÉCTRICA.....	35
FIGURA 3. FOTOGRAFÍA TOMADA DURANTE LA ADQUISICIÓN DE DATOS EN CAMPO.	36
FIGURA 4. FOTOGRAFÍA TOMADA DURANTE LA ADQUISICIÓN DE DATOS EN CAMPO.	37
FIGURA 5. TERRAMETER ABEM LS, EQUIPO UTILIZADO PARA LA MEDICIÓN DE LOS DATOS DE RESISTIVIDAD.	38
FIGURA 6. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL MÉTODO ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO.....	40
FIGURA 7. FOTOGRAFÍA TOMADA DURANTE LA ADQUISICIÓN DE DATOS EN CAMPO.	42
FIGURA 8. COMPONENTES DE WALKTEM SYSTEM.	43
FIGURA 9. MAPA DE UNIDADES MORFOGENÉTICAS DETERMINADAS A PARTIR DE LA FOTOINTERPRETACIÓN DE FOTOGRAFÍAS AERIAS Y EXPLORACIÓN DE CAMPO.	45
FIGURA 10. MAPA GEOLÓGICO DE LA MESA DE LOS SANTOS. SE OBSERVA LA LOCALIZACIÓN DE LAS SECCIONES ESTRATIGRÁFICAS CORRESPONDIENTES A LA PUNTA Y CARRIZAL REALIZADAS POR RINCON, M. 2008. Y LA LOCALIZACIÓN DE LAS SECCIONES ESTRATIGRÁFICAS CORRESPONDIENTES A LA NAVARRA Y EL CALICHO REALIZADAS POR ALDANA, S. 2008.	47
FIGURA 11. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DE LA MESA DE LOS SANTOS.	48
FIGURA 12. CONGLOMERADO DEL MIEMBRO INFERIOR DE LA FORMACIÓN LOS SANTOS. VEREDA EL POZO Y TABLAZO - MESA DE LOS SANTOS.	50

FIGURA 13. CONTACTO ONDULOSO NETO ENTRE LOS MIEMBROS SUPERIOR E INTERMEDIO DE LA FORMACIÓN LOS SANTOS, VEREDA ESPINAL BAJO - MESA DE LOS SANTOS.	51
FIGURA 14. ESTRATIFICACIÓN CUNEIFORME Y ESTRATIFICACIÓN CRUZADA EN EL MIEMBRO SUPERIOR DE LA FORMACIÓN LOS SANTOS. QUEBRADA LOS POZOS - VEREDA TABACAL.	52
FIGURA 15. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DE LA FORMACIÓN LOS SANTOS, SECCIÓN CARRIZAL (MESA DE LOS SANTOS).	57
FIGURA 16. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DE LA FORMACIÓN LOS SANTOS, SECCIÓN LA PUNTA (MESA DE LOS SANTOS).	58
FIGURA 17. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DE LA FORMACIÓN LOS SANTOS, SECCIÓN EL CALICHO (MESA DE LOS SANTOS).	59
FIGURA 18. VISTA PANORÁMICA DE LA FORMACIÓN LOS SANTOS EN LA SECCIÓN ESTRATIGRÁFICA DE “EL CALICHO”	60
FIGURA 19. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DE LA FORMACIÓN LOS SANTOS, SECCIÓN LA NAVARRA (MESA DE LOS SANTOS).	61
FIGURA 20. VISTA PANORÁMICA DE LA FORMACIÓN LOS SANTOS EN LA SECCIÓN ESTRATIGRÁFICA DE LA NAVARRA.	62
FIGURA 21. CONGLOMERADO ARENOLODOSO Y ARENISCA CONGLOMERÁTICA CON LAMINACIÓN DISCONTINUA PLANA PARALELA, MIEMBRO INFERIOR DE LA FORMACIÓN LOS SANTOS EN LA SECCIÓN LA NAVARRA.	63
FIGURA 22. CONGLOMERADO ARENOSO Y ARENISCA CONGLOMERÁTICA DEL MIEMBRO INFERIOR DE LA FORMACIÓN LOS SANTOS EN LA SECCIÓN EL CALICHO EN CONTACTO DISCORDANTE ANGULAR CON LA FORMACIÓN JORDÁN.	64
FIGURA 23. ARCILLOLITA ILÍTICA CON LAMINACIÓN DISCONTINUA PLANA PARALELA Y CONVOLUTA, MIEMBRO MEDIO DE LA FORMACIÓN LOS SANTOS EN LA SECCIÓN DE LA NAVARRA.	65
FIGURA 24. PANORÁMICA DEL MIEMBRO MEDIO, SECCIÓN CARRIZAL.	66
FIGURA 25. LAMINACIÓN CRUZADA, MIEMBRO MEDIO SECCIÓN CARRIZAL.	66
FIGURA 26. PANORÁMICA DEL MIEMBRO MEDIO, SECCIÓN LA PUNTA.	67
FIGURA 27. INTRACLASTOS DE LIMOLITA. MIEMBRO SUPERIOR SECCIÓN LA PUNTA.	68

FIGURA 28. CONTACTO ENTRE EL MIEMBRO MEDIO Y EL SUPERIOR DE LA FORMACIÓN LOS SANTOS EN LA SECCIÓN DE LA NAVARRA. EN EL MIEMBRO SUPERIOR SE NOTA LA ESTRATIFICACIÓN EN ARTESA.	69
FIGURA 29. MAPA ESTRUCTURAL DE LA MESA DE LOS SANTOS.	70
FIGURA 30. BLOQUES ESTRUCTURALES DE LA MESA DE LOS SANTOS ESTABLECIDOS POR VARGAS, C. 2008.	75
FIGURA 31. MAPA DE POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO DE LA MESA DE LOS SANTOS PROPUESTO POR HINCAPIE & VELOZA, OCTUBRE 2009; DONDE SE ESTABLECE LA FORMACIÓN LOS SANTOS COMO LA ZONA DE MAYOR POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO.	79
FIGURA 32. MAPA DE ZONAS DE INTERÉS HIDROGEOLÓGICO EN DE LA MESA DE LOS SANTOS Y BORDE OCCIDENTAL DEL MACIZO DE SANTANDER.	80
FIGURA 33. FOTO DE FRACTURAS ABIERTAS DEL MIEMBRO SUPERIOR DE LA FORMACIÓN LOS SANTOS, VEREDA LA FUENTE, MESA DE LOS SANTOS.	83
FIGURA 34. MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE DIACLASAS ABIERTAS Y CERRADAS EN LA MESA DE LOS SANTOS.	84
FIGURA 35. MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA DENSIDAD DE FRACTURAMIENTO EN LA MESA DE LOS SANTOS.	85
FIGURA 36. MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS RANGOS DE BUZAMIENTO DE LAS DIACLASAS EN LA MESA DE LOS SANTOS.	86
FIGURA 37. A) SUBLITARENISCA DE GRANO MEDIO CON MATRIZ LIMO ARCILLOSA PRODUCTO DE ALTERACIÓN CON POROSIDAD PRIMARIA INTERGRANULAR Y POROSIDAD SECUNDARIA ASOCIADA A MICROFRACTURAS Y REEMPLAZAMIENTO (NII). B) CUARZOARENISCA LIGERAMENTE LIMOSA CON BAJO GRADO DE CEMENTACION, POROSIDAD PRIMARIA INTERGRANULAR Y POROSIDAD SECUNDARIA ASOCIADA A DISCOLUCION DE MATRIZ Y LÍTICOS (NII).	90
FIGURA 38. C) SUBITARENISCA DE GRANO GRUESO LIGERAMENTE GRANULAR CON MATRIZ LIMO ARCILLOSA DONDE SE OBERVA FL, PP INTERGRANULAR Y PS ASOCIADA A MICROFRACTURAS (NII). D) SUBITARENISCA DE GRANO GRUESO CON MATRIZ LIMO ARCILLOSA Y POROSIDAD PRIMARIA INTERGRANULAR Y MICROPOROSIDAD, AUMENTO DE POROSIDAD SECUNDARIA ASOCIADA A MICROFRACTURAS (NII).	91

FIGURA 39. IMAGEN DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 2D INTERPRETADA POR GÓMEZ, C.; WANDURRAGA, L.; MOLINA, M.; SARMIENTO, M., 2014, DONDE SE RESALTAN LA ZONA CENTRAL SATURADA DE AGUA, QUE ESTÁ RODEADA POR ROCA FRACTURADA CON AGUA.	96
FIGURA 40. VALORES DE RESISTIVIDAD PARA ROCAS COMUNES, ESTABLECIDAS POR PALACKY 1987.....	98
FIGURA 41. RESISTIVIDAD EN DISTINTOS MEDIOS GEOLÓGICOS COMUNES.	98
FIGURA 43. LOCALIZACIÓN DE LOS SEDT Y LAS TRE EN LA MESA DE LOS SANTOS MEDIANTE EL SOFTWARE LIBRE GOOGLE EARTH, LA LÍNEA VERDE REPRESENTA LA LÍNEA DE CORTE REALIZADA A PARTIR DE LOS SEDT, LA LÍNEA AZUL OSCURO ES LA TRE01, LA LÍNEA ROJA ES LA TRE02 Y LA LÍNEA MORADA LA TRE03. LOS CÍRCULOS AZULES CORRESPONDEN A POZOS Y LOS TRIÁNGULOS AZULES A ALJIBES. TOMADO Y MODIFICADO DE INVESTIGACIÓN GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA EN LA MESA DE LOS SANTOS, SECTOR NORDESTE DE CURITÍ Y BORDE OCCIDENTAL DEL MACIZO DE SANTANDER, DEPARTAMENTO DE SANTANDER, PINTO ET AL. 2007.....	100
FIGURA 44. A) INTERPRETACIÓN REALIZADA A LA TRE 01, DONDE SE APRECIAN LAS ZONAS DE MAYOR POTENCIAL DE SATURACIÓN DE AGUA (COLOR AZUL), INTERPRETADAS COMO ACUÍFEROS. B) CORTE GEOLÓGICO REALIZADO A PARTIR DEL MAPA GEOLÓGICO DE LA MESA DE LOS SANTOS, EN EL MISMO LUGAR DONDE SE REALIZÓ LA TOMOGRAFÍA Y A IGUAL PROFUNDIDAD, SE APRECIAN LOS TRES MIEMBROS DE LA FORMACIÓN LOS SANTOS. (PARA INTERPRETAR Y GENERAR EL CORTE GEOLÓGICO SE UTILIZÓ EL SEDT 02, EL MAPA GEOLÓGICO PLANCHA 120-IV-D Y EL SOFTWARE GOOGLE EARTH).....	101
FIGURA 45. A) INTERPRETACIÓN REALIZADA A LA TRE 02, DONDE SE APRECIAN LAS ZONAS DE MAYOR POTENCIAL DE SATURACIÓN DE AGUA (COLOR AZUL), INTERPRETADAS COMO ACUÍFEROS. B) CORTE GEOLÓGICO REALIZADO A PARTIR DEL MAPA GEOLÓGICO DE LA MESA DE LOS SANTOS, EN EL MISMO LUGAR DONDE SE REALIZÓ LA TOMOGRAFÍA Y A IGUAL PROFUNDIDAD, SE APRECIÁ SOLO EL MIEMBRO SUPERIOR DE LA FORMACIÓN LOS SANTOS. (PARA INTERPRETAR Y GENERAR EL CORTE GEOLÓGICO SE UTILIZÓ EL SEDT 04, LA COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DE LA SECCIÓN LA PUNTA (RINCON, M. 2008.), EL MAPA GEOLÓGICO PLANCHA 120-IV-B Y EL SOFTWARE GOOGLE EARTH.	104

FIGURA 46. A) INTERPRETACIÓN REALIZADA A LA TRE 03, DONDE SE APRECIAN LAS ZONAS DE MAYOR POTENCIAL DE SATURACIÓN DE AGUA (COLOR AZUL), INTERPRETADAS COMO ACUÍFEROS B) CORTE GEOLÓGICO REALIZADO A PARTIR DEL MAPA GEOLÓGICO DE LA MESA DE LOS SANTOS, EN EL MISMO LUGAR DONDE SE REALIZÓ LA TOMOGRAFÍA Y A IGUAL PROFUNDIDAD, SE APRECIAN LOS TRES MIEMBROS DE LA FORMACIÓN LOS SANTOS Y UN FALLAMIENTO DE RUMBO CON COMPONENTE NORMAL. (PARA INTERPRETAR Y GENERAR EL CORTE GEOLÓGICO SE UTILIZÓ EL SEDT 04, LA COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DE LA SECCIÓN LA PUNTA (RINCON, M. 2008.), EL MAPA GEOLÓGICO PLANCHA 120-IV-B Y EL SOFTWARE GOOGLE EARTH).	107
FIGURA 47. RANGOS DE RESISTIVIDAD ASOCIADOS A LOS TIPOS DE ROCA EXISTENTES EN LA MESA DE LOS SANTOS, UTILIZADAS POR HINCAPIÉ, G. Y VELOZA, J. 2009 Y MOYANO, I. 2010 EN SUS TRABAJOS.....	110
FIGURA 48. REINTERPRETACIÓN DE LA TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 2D DE GÓMEZ, C.; WANDURRAGA, L.; MOLINA, M.; SARMIENTO, M., 2014	111
FIGURA 49. PROCESAMIENTO DEL SEDT 01 MEDIANTE EL SOFTWARE VIEWTEM.	113
FIGURA 50. PROCESAMIENTO DEL SEDT 02 MEDIANTE EL SOFTWARE VIEWTEM.....	114
FIGURA 51. PROCESAMIENTO DEL SEDT 03 MEDIANTE EL SOFTWARE VIEWTEM.....	115
FIGURA 52. PROCESAMIENTO DEL SEDT 04 MEDIANTE EL SOFTWARE VIEWTEM.....	117
FIGURA 53. PROCESAMIENTO DEL SEDT 05 MEDIANTE EL SOFTWARE VIEWTEM.....	118
FIGURA 54. PROCESAMIENTO DEL SEDT 06 MEDIANTE EL SOFTWARE VIEWTEM.....	119
FIGURA 55. INTERPRETACIÓN DE LOS VALORES DE RESISTIVIDAD PARA CADA UNO DE LOS SEDT, ORDENADOS DE IZQUIERDA A DERECHA (SEDT 01-02-03-04-05-06).....	121
FIGURA 56. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DE LA FORMACIÓN LOS SANTOS Y FORMACIÓN JORDÁN EN LA MESA DE LOS SANTOS.	123
FIGURA 57. CORTE GEOLÓGICO REALIZADO A PARTIR DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR LOS SEDT PARA LA FORMACIÓN LOS SANTOS, EN LA MESA DE LOS SANTOS.	126
FIGURA 58. VALORES DE RESISTIVIDAD DE LA TRE 01 INGRESADOS EN EL PROGRAMA LEAPFROG GEO 2.2.1.	127
FIGURA 59. SIMULACIÓN DE MODELO MEDIANTE LEAPFROG GEO, DONDE EL TONO AZUL CORRESPONDE A RESISTIVIDADES MENORES A 500 OHM*M, EL TONO CELESTE A	

RESISTIVIDADES ENTRE 500 A 700 OHM*M, EL TONO VERDE A RESISTIVIDADES ENTRE 700 A 1500 OHM*M, EL TONO AMARILLO RESISTIVIDADES ENTRE 1500 A 2500 OHM*M, EL TONO NARANJA RESISTIVIDADES ENTRE 2500 A 3000 OHM*M, Y EL TONO ROJO CORRESPONDE A RESISTIVIDADES SUPERIORES A 3000 OHM*M.....	128
FIGURA 60. VALORES DE RESISTIVIDAD DE LA TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA 2 Y 3 INGRESADOS EN EL PROGRAMA LEAPFROG GEO, DONDE SE APRECIA LA INTERSECCIÓN DE LAS DOS TOMOGRAFÍAS.	129
FIGURA 61. SIMULACIÓN DE MODELO 3D A PARTIR DE LAS DOS TOMOGRAFÍAS MEDIANTE LEAPFROG GEO, DONDE SE APRECIAN LAS RESISTIVIDADES MENORES A 500 OHM*M. ...	130
FIGURA 62. SIMULACIÓN DE MODELO 3D A PARTIR DE LAS DOS TOMOGRAFÍAS MEDIANTE LEAPFROG GEO, DONDE SE APRECIAN LAS RESISTIVIDADES DE 500 A 700 OHM*M (A); RESISTIVIDADES DE 700 A 900 OHM*M (B); RESISTIVIDADES DE 900 A 1600 OHM*M (C); RESISTIVIDADES MAYORES A 1600 OHM*M (D).	131
FIGURA 63. MODELO 3D OBTENIDO A PARTIR DE LOS SEIS SONDEOS REALIZADOS PARA LA FORMACIÓN LOS SANTOS Y CADA UNO DE SUS MIEMBROS, ADEMÁS SE OBSERVA LA DISPOSICIÓN DEL BASAMENTO HIDROGEOLOGÍCO, FORMACIÓN JORDÁN, Y LOS DEPÓSITOS DE CUATERNARIO.	132
FIGURA 64. CORTE GEOLÓGICO OBTENIDO A PARTIR DEL MODELO 3D MEDIANTE LEAPFROG GEO.....	133
FIGURA 65. MODELO HIDROGEOFÍSICO PARA LA FORMACIÓN LOS SANTOS EN LA MESA DE LOS SANTOS-SANTANDER. EN EL CUAL SE APRECIA LA DISPOSICIÓN DE LOS ACUÍFEROS EN BASE UNA INTERPRETACIÓN ASOCIADA LOS RESULTADOS DE LAS TOMOGRAFÍAS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA Y EL MODELO LITOLÓGICO OBTENIDO MEDIANTE LOS SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS, CON APOYO EN LA BIBLIOGRAFÍA.	134

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Características de los sondeos electromagnéticos en dominio del tiempo.....	112
Tabla 2. Valores de resistividad máxima registrada para cada una de las cinco zonas interpretadas en los SEDT realizados en la Mesa de Los Santos para la Formación Los Santos.....	122
Tabla 3. Espesores obtenidos para cada una de las cinco zonas interpretadas en los SEDT realizados en la Mesa de Los Santos para la Formación Los Santos.....	124
Tabla 4. Valor de Resistividad Promedio y Espesor promedio para cada una de las cinco zonas establecidas mediante los SEDT realizados en la Mesa de Los Santos para la Formación Los Santos.....	125

RESUMEN

TÍTULO: MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOFÍSICO PARA EVALUAR EL POTENCIAL HIDROGEOLOGICO DE LA FORMACIÓN LOS SANTOS EN LA MESA DE LOS SANTOS – SANTANDER, COLOMBIA.*

AUTORES: Sergio Andrés García Arias, Emilio Andrés Gómez García **

PALABRAS CLAVES: Formación Los Santos, Mesa De Los Santos, Modelo Hidrogeofísico, Tomografías De Resistividad Eléctrica (TRE), Sondeos Electromagnéticos En Dominio Del Tiempo (SEDT).

DESCRIPCIÓN:

La Mesa de los Santos presenta problemas en el suministro de agua debido a la escasez y contaminación de las pocas fuentes hídricas presentes en esta región del oriente colombiano; el municipio de los Santos, es una zona de escasa cobertura vegetal, es por esta razón que en época de verano la mayoría de las quebradas permanecen secas, y algunas solo son canales naturales de drenaje que únicamente transportan caudal en el momento en que se presenta la lluvia.

A partir de la aplicación de métodos de exploración geofísica como lo son las Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE) y los Sondeos Electromagnéticos en Dominio del Tiempo (SEDT), se plantea un modelo conceptual hidrogeofísico, que pretende contribuir en el mejoramiento del conocimiento de los almacenamientos de aguas subterráneas de las rocas subyacentes en la región geográfica de la Mesa de Los Santos.

Las Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE) presentaron en algunas zonas valores bajos de resistividad en la Formación Los Santos inferiores a los 1000 ohm*m, lo que se asocia a áreas saturadas con agua. Por su parte el método de los Sondeos Electromagnéticos en Dominio del Tiempo (SEDT) ayudo a establecer las resistividades y los espesores promedios para los miembros de la Formación Los Santos, que corresponden a valores de 1813.83 ohm*m y 68.28 m para el miembro superior, 50.35 ohm*m y 19 m para el miembro medio, 564.67 ohm*m y 186.32 m para el miembro inferior.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Director: Juan Diego Colegial, Geólogo PhD. Codirector: Sully Gómez Isidro, Ingeniera Civil PhD.

ABSTRACT

TITLE: HYDROGEOPHYSICAL CONCEPTUAL MODEL TO EVALUATE THE HYDROGEOLOGICAL POTENTIAL FOR LOS SANTOS FORMATION IN THE MESA DE LOS SANTOS - SANTANDER, COLOMBIA

AUTHORS: Sergio Andrés García Arias, Emilio Andrés Gómez García **

KEY WORDS: Los Santos Formation, Mesa de Los Santos, Hydrogeophysical Model, Electrical Resistivity Tomography (ERT), Time Domain Electromagnetic Sounding (TDEM).

DESCRIPTION:

Mesa de los Santos has problems in water supply due to the scarcity and pollution of the few water sources in this region of eastern Colombia; the town of Santos, is an area of low vegetation cover, is for this reason that in summer most of the streams remain dry, and some are just natural drainage channels that only carry flow at the time it occurs the rain.

Since the application of geophysical exploration methods such as the Electrical Resistivity Tomography (ERT) and Time Domain Electromagnetic Sounding (TDEM), in this document a Hydrogeophysical conceptual model is proposed to improve the knowledge of groundwater storage of the underlying rocks in the geographical region of the Mesa de Los Santos.

The Electrical Resistivity Tomography (ERT) presented in some areas low resistivity values in the Los Santos Formation below 1000 ohm * m, which is associated with water-saturated areas. Meanwhile, the Time Domain Electromagnetic Sounding (TDEM) helped establish the resistivities and thicknesses averages for members of the Los Santos Formation, which correspond to values of 1813.83 ohm * m and 68.28 m for the upper member, 50.35 ohm * m and 19 m for the middle member, 564.67 ohm * m and 186.32 m for the lower member.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Director: Juan Diego Colegial, Geólogo PhD. Codirector: Sully Gómez Isidro, Ingeniera Civil PhD.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de este trabajo pretende contribuir en el mejoramiento del conocimiento de los almacenamientos de aguas subterráneas de las rocas subyacentes en la región geográfica conocida como la Mesa de Los Santos, a través de la aplicación de métodos geofísicos (geoeléctricos y electromagnéticos).

La Mesa de Los Santos se localiza a 60 kilómetros aproximadamente de la ciudad de Bucaramanga en el departamento de Santander y comprende parte de los municipios de Los Santos, Piedecuesta y Girón, debido a factores geomorfológicos y climáticos, esta región geográfica evidencia limitaciones hidrológicas que se agravan por la creciente demanda del recurso hídrico, particularmente en el uso agropecuario y humano, y la contaminación de las pocas fuentes hídricas existentes; se ha considerado el recurso subterráneo como una alternativa importante de abastecimiento de agua y por lo tanto, se pretende profundizar en el conocimiento del subsuelo de la zona.

El trabajo realizado consiste en una pasantía de investigación que se enfoca principalmente en la realización de pruebas pilotos utilizando dos herramientas tecnológicas muy utilizadas en geología en los últimos tiempos, la primera es una tomografía de resistividad eléctrica (TRE) que permite conocer las dimensiones y profundidad de estructuras o cuerpos en el subsuelo mediante la realización de imágenes en dos dimensiones de la variación espacial de la resistividad eléctrica con la profundidad, la segunda son sondeos electromagnéticos en dominio del tiempo (SEDT), estos son modelos unidimensionales creados a partir de la inversión de datos adquiridos en campo y tienen por objetivo medir la resistividad del terreno, a partir de los datos obtenidos se elabora un modelo conceptual hidrogeofísico de

la formación los santos aflorante en esta región, el cual es calibrado a partir del conocimiento geológico regional y local existente.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Proponer un modelo conceptual hidrogeofísico para evaluar el potencial hidrogeológico de la Formación los Santos en la Mesa de los Santos, mediante la aplicación del método de tomografías de resistividad eléctrica (TRE) 2D y el método de sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDT).

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una revisión bibliográfica del método de tomografías de resistividad eléctrica 2D (TRE) y el método de sondeos electromagnéticos en dominio del tiempo (SEDT) y su aplicación en la hidrogeología.
- Recopilar y analizar la información geológica e hidrogeológica disponible de la formación Los Santos en la región de la Mesa de los Santos.
- Adquirir mediante los métodos geoeléctricos (TRE) y electromagnéticos (SEDT) los datos necesarios para la creación de modelos en 1D y 2D de la Formación los Santos.
- Procesar e interpretar los datos obtenidos en campo a través de la aplicación de las TRE y los SEDT utilizando el software apropiado.

2. JUSTIFICACIÓN

La Mesa de los Santos presenta problemas en el suministro de agua debido a la escasez y contaminación de las pocas fuentes hídricas presentes en esta región del oriente colombiano; el municipio de los Santos, es una zona de escasa cobertura vegetal, es por esta razón que en época de verano la mayoría de las quebradas permanecen secas, y algunas solo son canales naturales de drenaje que únicamente transportan caudal en el momento en que se presenta la lluvia (EOT Municipio de Los Santos-Santander).

Con el pasar de los años estas dificultades se han ido incrementando y actualmente afectan mayormente el consumo de agua potable en la región y el sector agrícola y ganadero.

Se han realizado estudios en la Mesa de los Santos con el propósito de prospectar, conocer o identificar zonas con alto potencial de acumulación del recurso de agua subterránea, entre los cuales se encuentran los trabajos de: Pinto, J. et al. 2007, enfocado en la caracterización de los puntos más favorables para la acumulación de aguas subterráneas en el subsuelo; Gómez, C., Wandurraga, L., Molina, M., Sarmiento, M. 2014, analizan la situación hidrogeológica de la Mesa de los Santos; entre otros trabajos de grado y publicaciones de revistas.

Esta pasantía de investigación se desarrolla con el objetivo de generar un modelo conceptual hidrogeofísico de la formación los Santos a partir de la aplicación de métodos geofísicos muy utilizados durante los últimos años como son las tomografías de resistividad eléctrica (TRE) 2D y los sondeos electromagnéticos en

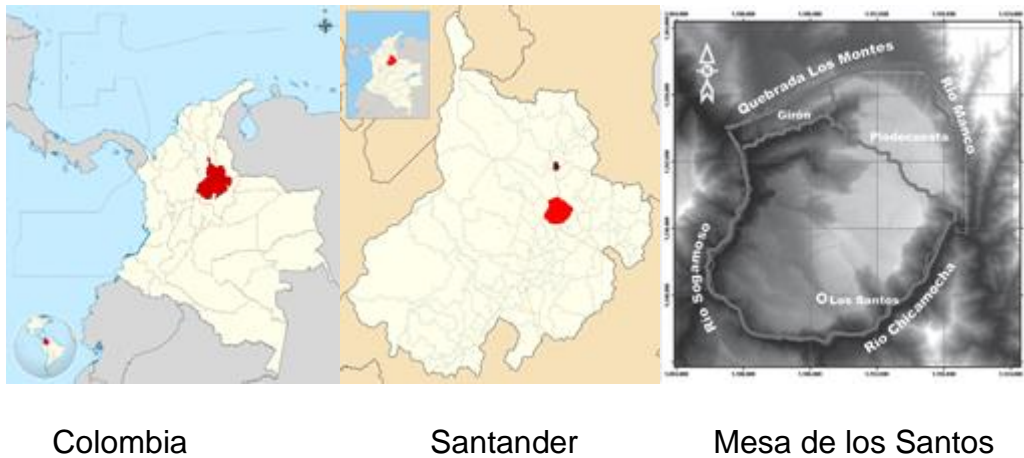
el dominio del tiempo (SEDТ), los cuales han dado buenos resultados en la exploración de aguas subterráneas en áreas geológicas complejas.

Finalmente se considera necesario realizar este proyecto como un aporte nuevo y diferente a los ya realizados en el ámbito hidrogeológico para la formación Los Santos (Mesa de Los Santos, Santander), con el apoyo de información secundaria obtenida de trabajos anteriores, contribuir en la búsqueda de posibles alternativas de abastecimiento hídrico que mitiguen la escasez de agua que ha afectado esta región en los últimos años.

3. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

La zona de la Mesa de Los Santos está localizada en la Provincia de Soto al Nororiente Colombiano en la vertiente Occidental de la Cordillera Oriental en la región central del Departamento de Santander, comprende parte de los municipios de Los Santos, Piedecuesta y Girón; con una extensión de 430km². Está delimitada al Norte por la Quebrada Los Montes; al Noreste por el Rio Manco hasta su desembocadura con el rio Chicamocha que se encuentra limitando esta zona hacia el Sur y al Oeste por el Rio Sogamoso hasta el sitio conocido como Las Juntas, lugar donde se unen los Ríos Chicamocha, Suarez y Sogamoso, *figura 1*.

Figura 1. Localización general de La Mesa de Los Santos en el departamento de Santander en el municipio de Los Santos. La Mesa de Los Santos está delimitada por los Ríos Chicamocha al S-E, Sogamoso al W, Manco al NE y Quebrada Los Montes al N.



Fuente: Díaz, E. 2008; y Wikipedia [Adaptado por los Autores]

4. METODOLOGÍA

El término “modelo” en el lenguaje común es extremadamente polisémico, el Webster's New Encyclopedic Dictionary entre otras definiciones propone, que un modelo es una descripción o analogía usada para ayudar a visualizar algo que no puede ser directamente observado.

Un modelo conceptual hidrogeofísico, es una representación gráfica del sistema de agua subterránea que se realiza incorporando toda la información geológica, hidrogeológica y geofísica disponible en un simple esquema.

Para este modelo inicialmente se recopila y analiza la información existente procedente de artículos, revistas, trabajos de investigación, entre otras fuentes de interés científico que se relacionan con el objeto del presente trabajo de grado; todo esto con el fin de obtener un conocimiento previo Geológico, geomorfológico, estratigráfico, estructural e Hidrogeológico del área de estudio.

La fase siguiente consiste en definir la litología dominante, espesores, continuidades, estructuras de los acuíferos y de las unidades confinantes de manera que se pueda identificar los límites de las estructuras, las características y el comportamiento de los acuíferos.

Posteriormente se lleva a cabo la asignación del área de interés y el reconocimiento geológico de la misma. El trabajo de campo se realiza en una campaña de tres días, se realizan tres (3) Tomografías de Resistividad Eléctrica 2D (TRE) y seis (6) sondeos electromagnéticos en dominio del tiempo (SEDT). La ubicación y extensión

de las TRE y los SEDT se determinaran teniendo en cuenta las limitaciones y distribuciones del terreno. El equipo utilizado para la adquisición de las TRE será TERRAMETER ABEM LS; y para la adquisición de los SEDT el WalkTEM (TL-1k6).

Seguidamente en trabajo de oficina se realiza el procesamiento de los datos obtenidos a través de las Tomografías de Resistividad Eléctrica 2D (TRE), este se hace con el software RES2DINVx64, desarrollado por la compañía Geotomosoft. Para los Sondeos Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo (SEDT) el procesamiento de los datos se realiza mediante el software ViewTEM, el cual fue desarrollado para la empresa ABEM por el Grupo de Hidrogeofísica de la Universidad de Aarhus, Dinamarca.

Finalmente a partir de los resultados obtenidos después de la realización del procesamiento de los datos, a través de los métodos de exploración (TRE) y (SEDT), y el análisis de la información secundaria, se propone un modelo conceptual hidrogeofísico preliminar para evaluar el potencial hidrogeológico de la Formación los Santos, en la región de la Mesa de los Santos.

5. MARCO GENERAL DE LA GEOFÍSICA

La geofísica estudia la composición de la tierra y su dinámica, sobre la base de medidas de campos físicos que normalmente se realizan desde la superficie del planeta o desde el aire. El objetivo es deducir las propiedades o el estado físico de las rocas y minerales que componen la tierra, junto a su composición interna, a partir de diversos fenómenos físicos (Lorenzo, A.J., 2010).

La exploración geofísica comprende una amplia gama de disciplinas entre las que se pueden mencionar: Geología, Física, Química y Electrónica. Estas disciplinas se encuentran íntimamente relacionadas en la “Geofísica”, por lo cual se puede dividir en dos grupos:

La Geofísica Pura, dedicada exclusivamente al estudio de la física de la Tierra sólida; y la Geofísica Aplicada o Exploración Geofísica, esta se puede considerar como el arte de aplicar las ciencias físicas al estudio de la estructura y composición de las diversas capas de la Tierra.

5.1 GEOFÍSICA APLICADA

La geofísica aplicada desde sus inicios jugo un papel preponderante en la determinación de la geometría de los acuíferos, dado su bajo costo y rapidez, con relación al de los sondeos mecánicos. Con el progreso de la humanidad y su acelerado crecimiento, que trajo consigo la escasez de recursos hídricos; fue necesaria la inversión de recursos en desarrollos más técnicos y perfeccionados (Lorenzo, A.J., 2010).

- Aplicación de los métodos geofísicos

Lorenzo, A.J. (2010) en el Programa de Formación Iberoamericano en Materia de Aguas, trata el tema “Introducción a la Geofísica” y explica que algunos métodos geofísicos sirven para medir y caracterizar cualquier cosa, pero otros no, a menudo es necesario utilizar más de un método para lograr obtener la información deseada. Cada método geofísico tiene una serie de características especiales que le hace distinto de los demás. Estas características son:

- Propiedades físicas que dependen de lo que se desea medir (conductividad eléctrica, contrastes de densidad, susceptibilidad magnética, etc.).
- La logística humana y materiales necesarios para llevar a cabo ese método.
- Presupuesto económico disponible para aplicar ese método.
- Escala a la que se desea medir, detección de anomalías a nivel Regional o a nivel Local.

Además todos los métodos geofísicos son aplicados en este tipo de temas

- Caracterización de estructuras generales como lo son:
 - Morfología de cuencas sedimentarias
 - Posición y salto de fallas
 - Condiciones de borde
 - Localización de paleocanales y valles enterrados
 - Localización de acuíferos

- En rocas sedimentarias son especialmente útiles para caracterizar:

- Potencia de aluvial sobre roca firme
- Profundidad y potencia de capas
- Naturaleza litológica de las capas y del sustrato
- Extensión lateral de capas

5.2 GEOFÍSICA

Lorenzo, A.J. (2010) plantea las tareas que resuelven cada Método Geofísico, cuando el objetivo en la exploración geofísica tiene fines hidrogeológicos:

❖ Métodos geoelectrónicos:

- Determinación del espesor del acuífero.
- Determinar la posición y el salto de falla.
- La resistividad permite efectuar una cierta clasificación de la litología, siendo necesario conocer la resistividad de la formación para poder evaluar la calidad del agua.
- Determinación de la dirección del flujo, con ayuda de trazadores.
- Evaluar las características hidráulicas de los aluviales: si hay arcilla intercalada, serán de mejores propiedades hidráulicas cuanto más resistivos; si no hay arcilla, la porosidad será mejor cuanto más baja sea la resistividad; si existe agua salada, los terrenos resistivos serán asignados a zonas porosas con agua dulce.

❖ Métodos electromagnéticos:

- Exploración de acuíferos colgados.

- Medición de la salinidad e intrusión marina (si puede determinarse la resistividad de la formación, puede deducirse la calidad del agua).
- Posicionando la interface agua dulce-salada.

Sus mayores ventajas sobre los métodos de corriente continua es que son más sensibles a pequeñas variaciones de resistividad, que las medidas se pueden hacer más rápidamente y facilitan las investigaciones a mayores profundidades. En general son más efectivos en la detección de conductores que de resistivos.

5.3 MÉTODOS GEOFÍSICOS

5.3.1. TRE

Alrededor de la década de los 90's surgió la técnica conocida como *Tomografía Eléctrica* (2D y 3D) con la necesidad de tener una imagen de distribución exacta de resistividades, y apegarse más a la geología, en ocasiones complejas como lo son la caracterización de fallas y fracturas, y la detección de contactos entre unidades litológicas de diferente naturaleza.

La *Tomografía eléctrica* es un método de resistividad multielectródico, basado en la modelización 2D de la resistividad del terreno mediante el empleo de técnicas numéricas (elementos finitos o diferencias finitas). (SERRANO, 2003)

El objetivo principal de este método se basa en obtener una sección 2D de resistividades reales del subsuelo, modelo a partir del cual podremos determinar la presencia o no de filtraciones de agua en profundidad, mediante la localización de

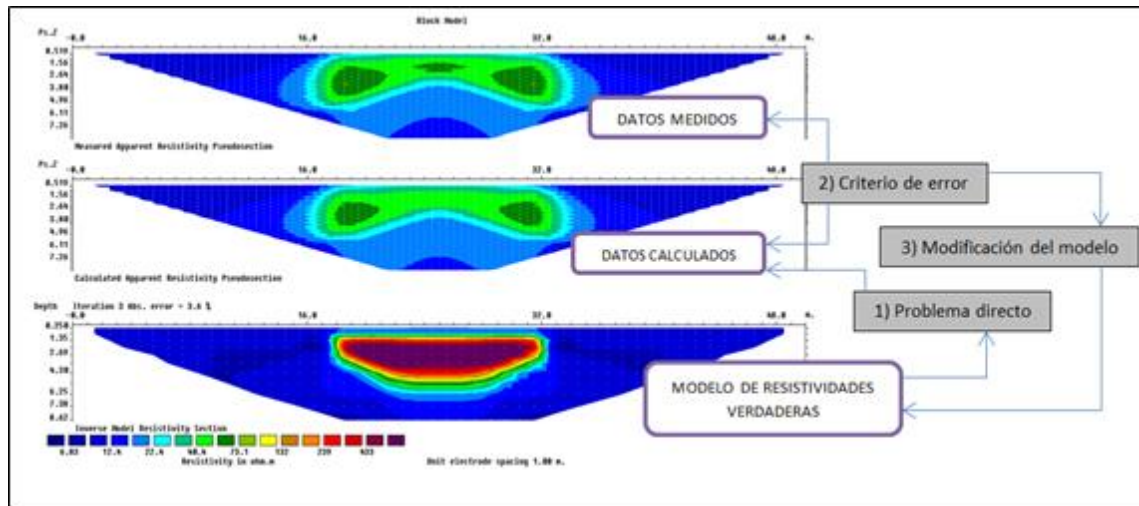
áreas en donde tengamos una disminución anómala del valor de la resistividad del terreno. Para ello será preciso el empleo de un programa de inversión, para transformar las resistividades aparentes obtenidas de la campaña de campo, a valores de resistividad real. (SERRANO, 2003).

- Fundamentos de la técnica de la tomografía eléctrica

El procedimiento para la generación de una *Tomografía Eléctrica* mediante inversión, inicia con la toma de los datos de resistividad aparente medidos en campo, representados en forma de pseudoperfil. Seguidamente se genera un modelo hipotético de resistividades verdaderas del subsuelo, y se resuelve lo que se define como “cálculo del problema directo”, se llega al modelo de resistividades aparentes que se derivaría del mismo. Estas resistividades aparentes se comparan con las realmente medidas, y se calcula el error entre estos modelos. A través de este error se modifica el modelo hipotético real de resistividades verdaderas, y se repite el proceso anterior. De este modo, tras una serie de iteraciones, se consigue un modelo de resistividades verdaderas del subsuelo que da explicación a las resistividades aparentes medidas (Arlandi, 2005).

La *Figura 2* describe gráficamente el procedimiento de inversión desarrollado para la generación de una *Tomografía Eléctrica*.

Figura 2. Etapas del procedimiento de inversión eléctrica.



Fuente: Gómez, J. 2013. [Adaptada por los Autores]

En la campaña de campo realizada para la adquisición de datos mediante la TRE se utilizó el equipo Terrameter ABEM LS, como se observa en la *figura 3*.

Figura 3. Fotografía tomada durante la adquisición de datos en campo.



Figura 4. Fotografía tomada durante la adquisición de datos en campo.



Este equipo es un avanzado sistema de adquisición de datos para mediciones de Resistividad, consta de 72 electrodos, un set de cables LUND (4 cables con 21 salidas a un intervalo de 10 metros), dos (2) conectores de cables y 75 Jumpers cable electrodo, como se observa en la *figura 5*.

Figura 5. Terrameter ABEM LS, equipo utilizado para la medición de los datos de resistividad.



Fuente: Manual de instrucción del equipo ABEM [Adaptada por los Autores]

5.3.2. SEDT

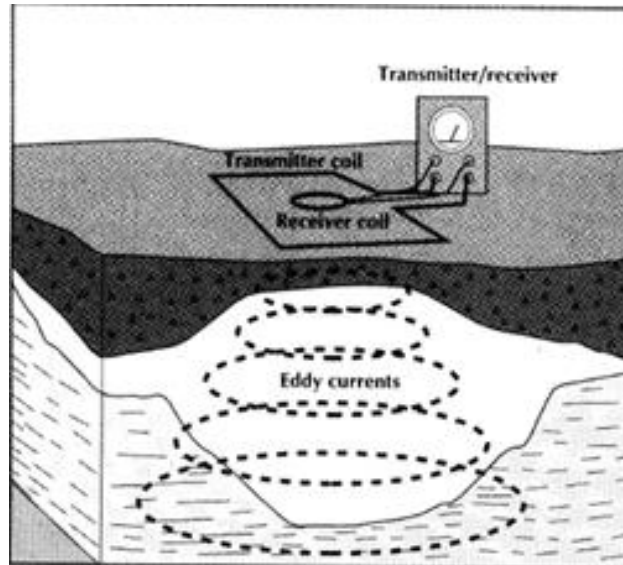
Las técnicas electromagnéticas de exploración geofísica se utilizan cada vez más para estimar la resistividad del subsuelo, como una alternativa a los métodos de corriente directa (TRE).

Los métodos electromagnéticos constituyen el grupo de mayor diversidad en prospección geofísica, tanto a nivel metodológico como instrumental, de modo que su ámbito de aplicación es muy amplio: evaluación de recursos minerales, exploración de aguas subterráneas, cartografía de plumas contaminantes,

investigación de recursos geotérmicos, cartografía de contaminación de suelos, detección de cavidades naturales o artificiales, localización de fallas geológicas, etc.

Estas técnicas pueden ser divididas especialmente en dos grupos: *los sondeos electromagnéticos en el dominio de la frecuencia (SEDF)* y *los Sondeos electromagnéticos en el dominio tiempo (SEDT)*. El método SEDT es un método electromagnético de fuente controlada en el dominio del tiempo, que utiliza la difusión de un campo electromagnético transitorio (Granda Sanz et al., 1987; Nabighian y Macnae, 1991; McNeill, 1994). El emisor consiste en un cable puesto en el suelo, donde alternativamente se inyecta y se corta la corriente. Durante el período de inyección de corriente se crea un campo magnético primario estático, perpendicular al bucle del emisor. Al cortar la corriente, una fuerza electromotriz, inducida por la variación de flujo del campo primario, produce corrientes de Foucault en los cuerpos conductores que penetran y se propagan en el subsuelo, *Figura 6*. Como consecuencia de pérdidas de resistencia calórica estas corrientes crean un campo magnético secundario en la superficie cuya amplitud decrece con el tiempo.

Figura 6. Representación gráfica del método electromagnético en el dominio del tiempo



Fuente: Sorensen, 1996. En Lorenzo, A.J. 2010 [Adaptada por los Autores]

Como el campo magnético secundario se genera cuando el campo primario está desconectado, puede medirse con relativa facilidad. Cuando en el subsuelo hay cuerpos de conductividad eléctrica elevada, la atenuación de las corrientes parásitas es significativamente menor que en los malos conductores. Por tanto, la medida de la relación de decrecimiento del campo secundario proporciona una forma de detectar la presencia de cuerpos conductores en el subsuelo y estimar su conductividad (Lorenzo, A.J. 2010).

El dispositivo de medida más usual consiste en situar la bobina receptora en el centro de la bobina emisora (generalmente cuadrada), e incluso utilizar la misma bobina para las dos funciones. En esta configuración, la medida del campo decreciente en el centro de la bobina es equivalente a la medida de la resistividad en función de la profundidad (análoga al método de SEV en corriente continua). La

profundidad de investigación es función del retardo (delay time) del campo decreciente y es independiente de la separación entre las bobinas emisora y receptora. Al aumentar el tiempo, la intensidad de corriente se propaga a mayores profundidades. La dimensión de la bobina emisora condiciona la profundidad de investigación del método. Por ejemplo, con bobinas de 500 metros de lado pueden alcanzarse hasta 2 km de penetración, aunque se pierde resolución en las primeras capas. (Lorenzo, A.J. 2010).

En la campaña de campo realizada para la adquisición de datos mediante los SEDT se utilizó el equipo WalkTEM™, como se observa en las *figura 7*. Para este trabajo se utilizó una bobina trasmisora de 40x40 metros y dos bobinas receptoras de 10x10 metros y 0.5x0.5 metros, de esta manera se alcanzaron profundidades mayores a 300 metros.

Figura 7. Fotografía tomada durante la adquisición de datos en campo.



Figura 8. Componentes de WalkTEM system.



Fuente: Manual de instrucción del equipo. [Adaptada por los autores]

6. GEOLOGÍA DE LA MESA DE LOS SANTOS

6.1. GEOMORFOLOGÍA

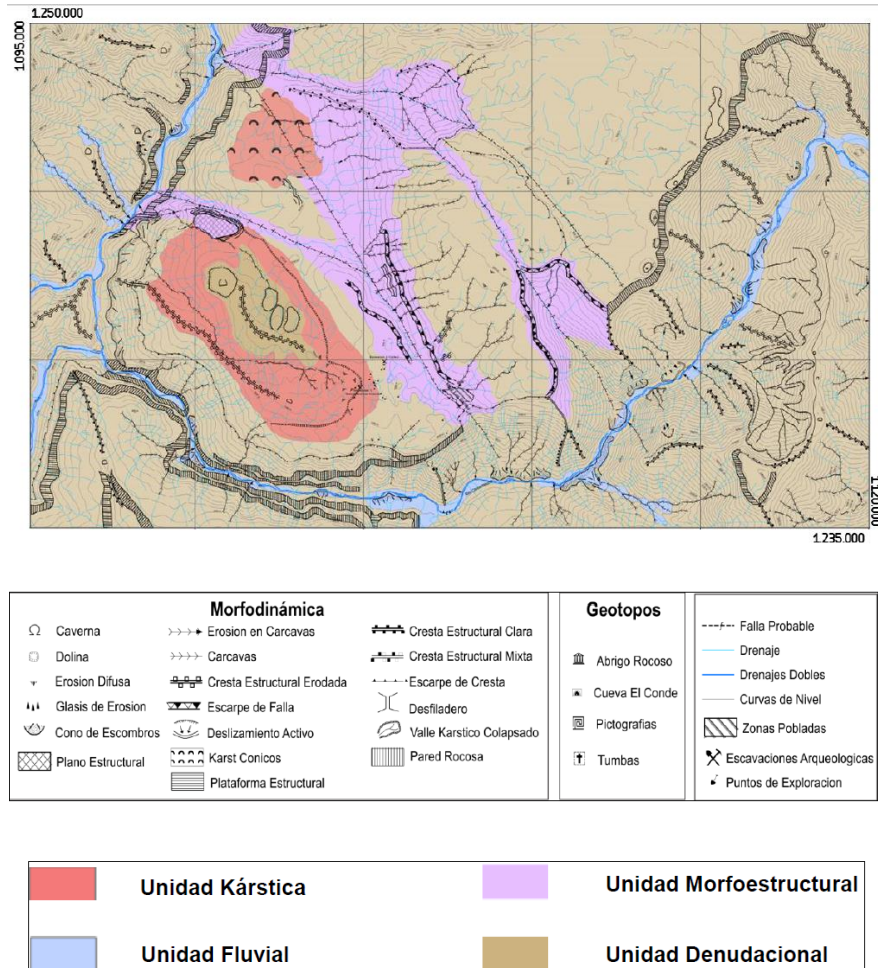
La morfología de la Mesa de Los Santos expresa que la topografía es aproximadamente paralela a los planos de estratificación, interrumpida por algunas variaciones locales debido a la presencia de fallas y pliegues abiertos. El relieve es plano con una ligera inclinación al SW.

- Ambiente morfogenético

En Gómez, J. y Cuervo, R. 2012 basan el término "Morfogenesis" en la relación con el origen, la evolución del relieve y con los procesos modeladores que actúan sobre él.

Gómez, J. y Cuervo, R. 2012 establece que entre las unidades geomorfológicas, se destaca la predominancia de zonas correspondientes a un ambiente morfogenético de tipo denudacional, seguida en menor proporción de zonas con influencia morfoestructural. En menor proporción se delimitaron zonas caracterizadas por la presencia de fenómenos karsticos hacia el W de su zona de estudio.

Figura 9. Mapa de unidades morfogeneticas determinadas a partir de la fotointerpretacion de fotografias aereas y exploracion de campo.



Fuente: Gómez, J. y Cuervo R. 2012.[Adaptada por los autores]

- Ambiente morfoestructural

Corresponde a las geformas generadas por la dinamica interna de la tierra, especialmente las asociadas a plegamientos y fallamientos. Incluye el AMBIENTE NEOTECTONICO (Geformas originadas por la actividad tectonica activa y que se ha prolongado durante el Cuaternario). Gómez, J. y Cuervo, R. 2012. tambien

agrupan aquellas geoformas generadas a partir de la combinación de procesos endógenos (internos) y exógenos (externos), los cuales crean cambios significativos sobre la superficie. Para Gómez, J. y Cuervo, R. 2012 la Mesa de los Santos, es un sistema morfoestructural de bajo ángulo, con buzamiento al occidente.

6.2. ESTRATIGRAFÍA

En el trabajo de grado “cartografía geológica a escala 1:25.000 de La Mesa de Los Santos, departamento de Santander”. Vargas, C. 2008, define la litoestratigrafía para la Mesa de Los Santos de la siguiente manera:

Las Formaciones presentes en el área cartografiada comprenden rocas de edad Paleozoica correspondiente a la Formación Silgará (OSs), rocas ígneas de edad Mesozoica representadas por el Granito de Pescadero (J_{1gp}), y Formación Jordán (J_{1-2j}) y rocas del Cretácico Inferior representadas por las Formaciones Los Santos (K_{1ls}), Cumbre (K_{1c}), Rosablanca (K_{1r}), Paja (K_{1p}) Tablazo (K_{1t}), Cuerpos intrusivos de posible edad Paleozoica y Mesozoica y depósitos consolidados y no consolidados Cuaternarios. Estas unidades se componen en su mayoría por sedimentos siliciclásticos, lodolitas y carbonatos, *figura 10 y 11*.

Figura 10. Mapa geológico de la Mesa de Los Santos. Se observa la localización de las Secciones estratigráficas correspondientes a La Punta y Carrizal realizadas por Rincon, M. 2008. Y la localización de las Secciones estratigráficas correspondientes a la Navarra y El Calicho realizadas por Aldana, S. 2008.

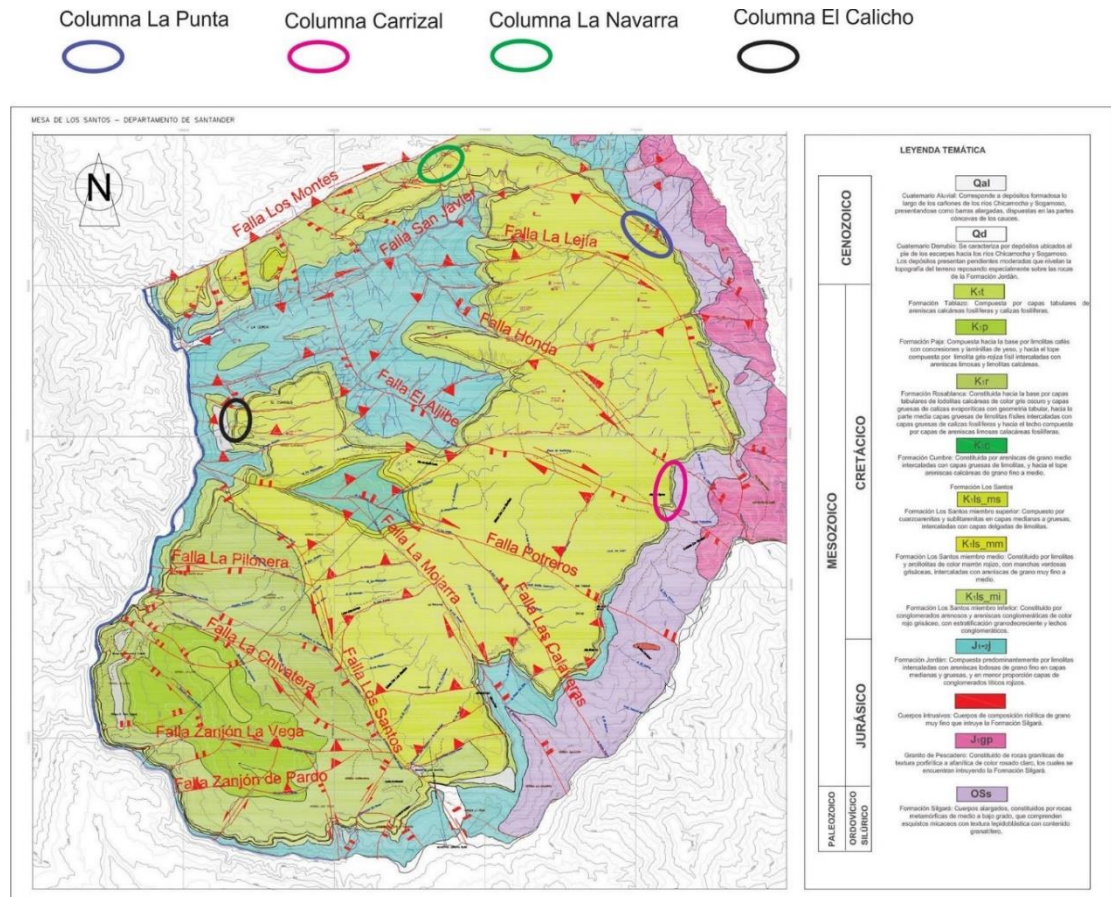
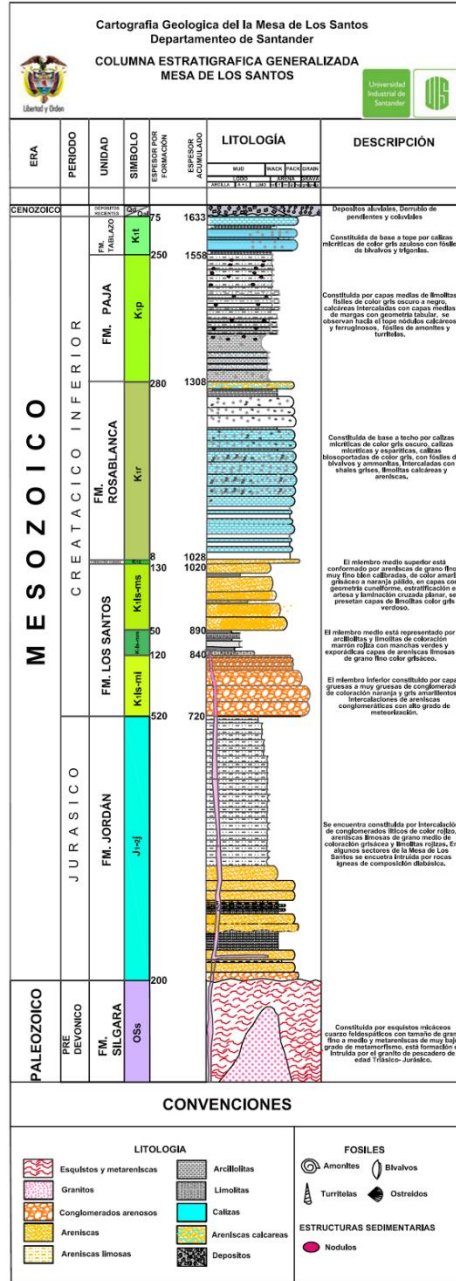


Figura 11. Columna estratigráfica de la Mesa de Los Santos.



Fuente: Vargas, C. 2008 (Anexo 2. Columna Estratigráfica Generalizada Mesa de Los Santos.)

[Adaptada por los autores]

- Formación Silgará (OSs).

La Formación Silgará está constituida por rocas metamórficas de estructura esquistosa bien definida y muy fina, comprenden principalmente esquistos micáceos cloríticos de textura lepidoblástica con mineral accesorio el granate.

- Granito de Pescadero (J_{1gp})

El granito de Pescadero se muestra intruyendo la Formación Silgará y está constituido por rocas ígneas de textura porfirítica a afanítica.

- Formación Jordán (J_{1-2j})

La Formación Jordán está compuesta predominantemente por limolitas intercaladas con areniscas lodosas de grano fino en capas medianas y gruesas con geometría plana paralela y en menor proporción capas de conglomerados líticos rojizos.

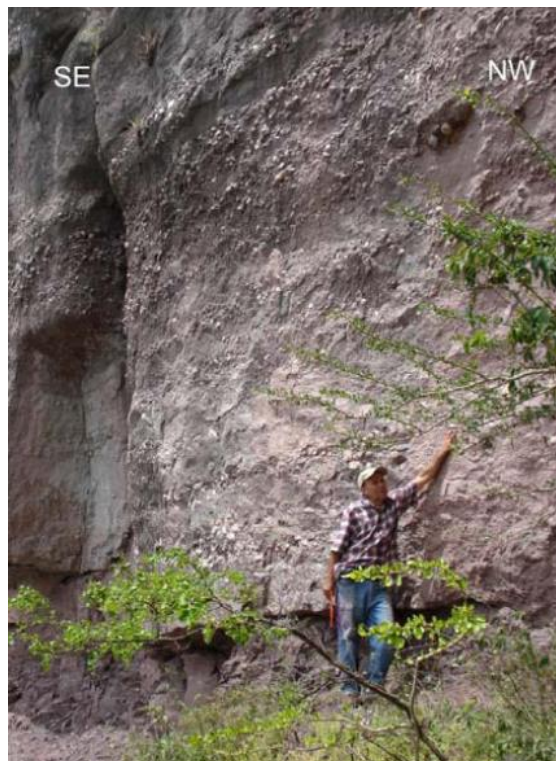
La Formación Jordán presenta contacto inconforme y fallado con la infrayacente Formación Silgará, y contacto en discordancia angular con la suprayacente Formación Los Santos al Sur y Oeste de la zona.

- Formación Los Santos (K_{1ls})

La Formación Los Santos se subdivide en tres miembros litoestratigráficos.

El *miembro inferior*, figura 12, está constituido por capas medias a gruesas de conglomerados arenosos y areniscas conglomeráticas de color rojo grisáceo, con estratificación grano decreciente, laminación cruzada y lechos conglomeráticos, de composición sublitoconglomerática y sublitaarenita. Este miembro presenta un cambio facial hacia el SO de la Mesa y constituido por areniscas cuarzosas de grano medio a muy grueso.

Figura 12. Conglomerado del Miembro Inferior de la Formación Los Santos. Vereda el Pozo y Tablazo - Mesa de Los Santos.



Fuente: Pinto, J. et. al. 2007. [Adaptada por los autores]

El *miembro medio*, figura 13, está constituido por limolitas y arcillolitas de color marrón rojizo con manchas verdosas grisáceas producto de la reducción de materia orgánica, intercaladas con areniscas de grano muy fino a medio. En este miembro se observa laminación plano paralela y cruzada.

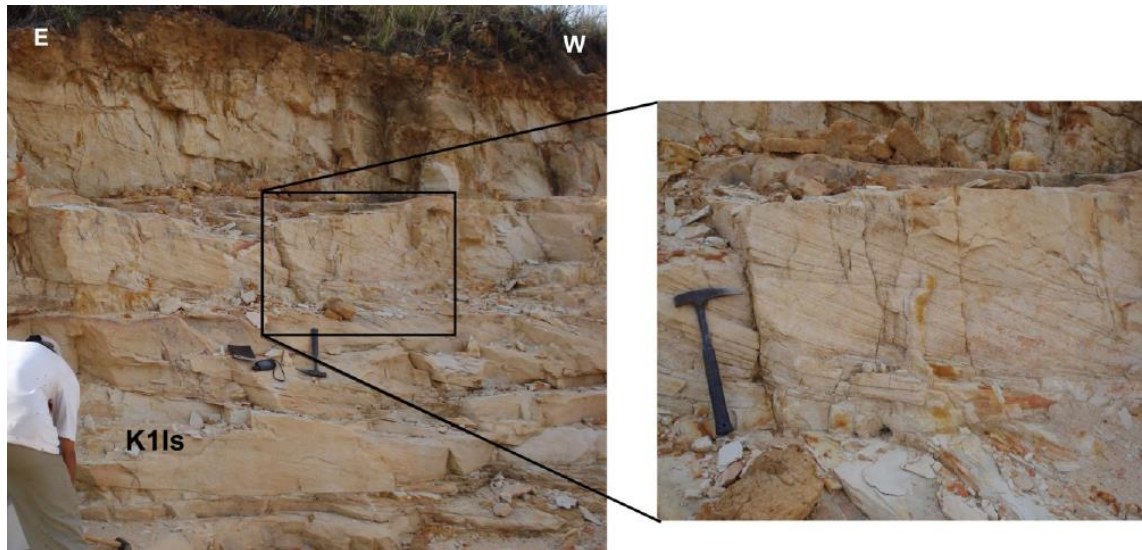
Figura 13. Contacto ondulado neto entre los miembros Superior e Intermedio de la Formación Los Santos, vereda Espinal Bajo - Mesa de Los Santos.



Fuente: Pinto et. Al 2007. [Adaptada por los autores]

El *miembro superior*, figura 14, está compuesto por cuarzoarenitas y sublitarenitas en capas medianas a gruesas con geometría cuneiforme de color gris amarillo pálido, con estructuras internas como laminación cruzada, planoparalela y en artesa.

Figura 14. Estratificación cuneiforme y estratificación cruzada en el miembro superior de la Formación Los Santos. Quebrada Los Pozos - Vereda Tabacal.



Fuente: Pinto et. Al 2007. [Adaptada por los autores]

La Formación Los Santos se encuentra en discordancia angular con la infrayacente Formación Jordán y en contacto concordante con la suprayacente Formación Cumbre.

- Formación Cumbre (K_{1c})

La formación cumbre está constituida por capas medianas a gruesas de areniscas de grano medio de color gris verdoso claro, intercaladas con capas gruesas de limolitas gris verdoso con laminación plano paralela y areniscas calcáreas de grano fino a medio de color gris amarillento, esta formación aflora únicamente en la vereda el calicho al Oeste de La Mesa de Los Santos.

Esta formación se encuentra en contacto concordante neto con la infrayacente formación Los Santos y en contacto concordante transicional con la suprayacente formación Rosablanca.

- Formación Rosablanca (K_{1r})

Esta formación está constituida predominantemente por rocas carbonatadas. El contacto estratigráfico de la Formación Rosablanca con la infrayacente Formación Cumbre es concordante transicional y con la suprayacente Formación Paja es concordante neto.

- Formación Paja (K_{1p})

La Formación Paja hacia la base presenta limolitas cafés oscuras con concreciones de caliza de 0.1–1.0m de diámetro con amonites y láminas de yeso blanco fibroso muy fino. Hacia el techo se observan limolitas micáceas color grises y rojizas, muy físilas con fracturas rellenas, impresiones de amonites y concreciones de caliza de diámetro de 4–30cm de diámetro, intercaladas con capas de arenisca arcillosa de espesor de 1m y limolitas calcáreas de espesor de 30cm.

Los contactos estratigráficos de la Formación Paja con la infrayacente Formación Rosablanca y la suprayacente Formación Tablazo son concordantes transicionales.

- Formación Tablazo (K_{1t})

La Formación Tablazo presenta capas gruesas tabulares de areniscas calcáreas de grano fino a medio fosilífero (bivalvo) y calizas fosilíferas, presenta fuerte diaclasamiento, con fracturas abiertas y rellenas de calcita.

- Cuerpos Intrusivos

En la Mesa de Los Santos se identificaron dos tipos de cuerpos intrusivos, uno de composición riolítica y otro de composición diabásica.

Los diques riolíticos intruyen a la Formación Silgará, esta roca presenta color rosado pálido y cristales idiomórficos de plagioclasa, cuarzo, feldespato potásico, mica biotita, óxidos y minerales producto de alteración como sericita y clorita.

Los diques diabásicos intruyen la Formación Jordán y Los Santos, es una roca de coloración verde gris intenso afanítica compuesta de plagioclasa cálcica y óxidos, clorita y calcita como minerales de alteración.

La edad del dique riolítico se considera provisionalmente del Jurásico por su similitud composicional con las rocas de esta edad, aflorantes en los alrededores de Bucaramanga. (Ward *et al.* 1973). El dique de composición de diabásica se le ha asignado una edad establecida por criterios de campo la cual corresponde a Cretácico Inferior.

- Depósitos Aluviales

Se encuentran por encima del nivel de los actuales cauces de los ríos Sogamoso y Chicamocha, su origen es hidrogravitacional y conforman franjas relativamente angostas en sentido NE-SO.

- Depósitos de Derrubios

Corresponden a los depósitos de pendientes de origen local, siendo de los más notorios, se observan en los escarpes de la Mesa de Los Santos hacia el Cañón del Río Chicamocha, se depositan sobre rocas de la Formación Jordán y presentan rangos variables de espesor, suavizando la topografía de la zona donde se depositan.

6.2.1. Columnas estratigráficas

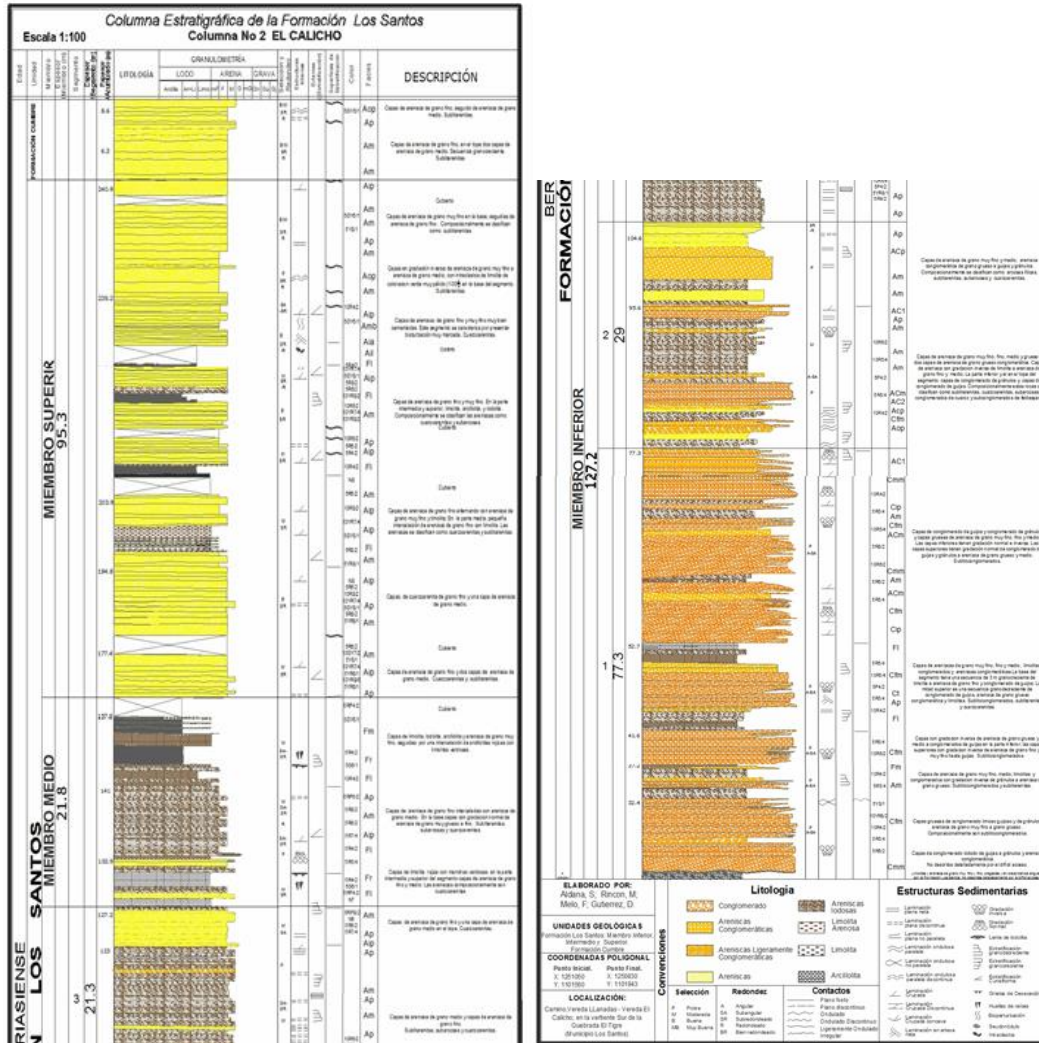
El espesor de la Formación Los Santos en la Mesa es de 300m, presentando variaciones notables, así: 245 m en la vereda la Navarra al Norte, 165 m en el lugar llamado Tres Esquinas-La Punta al Noreste, 130 m en la Vereda Carrizal al Este y en la Vereda la Loma al Suroeste y 280 m en la Vereda El Calicho al Oeste. (Vargas, C. 2008)

Rincon, M. 2008 en su trabajo de grado titulado “Estratigrafía de la Formación Los Santos en las secciones estratigráficas La Punta, Carrizal (Mesa de Los Santos) y La Cuevana (Curiti), Departamento de Santander” Realiza el levantamiento de dos

columnas estratigráficas, sección Carrizal *figura 15* y sección La Punta *figura 16*. Localizadas al Noreste y Este de La Mesa de Los Santos respectivamente *figura 10*.

Aldana, S. 2008 realiza el levantamiento de dos columnas estratigráficas de la Formación Los Santos en su trabajo “Estratigrafía de la Formación Los Santos en las secciones de La Navarra y El Calicho en la Mesa de Los Santos (Departamento de Santander)” sección *El Calicho figura 17 y 18*, sección La Navarra *figura 19 y 20*. Localizadas al Oeste y Norte de La Mesa de Los Santos respectivamente *figura 10*.

Figura 17. Columna estratigráfica de la Formación Los Santos, sección El Calicho (Mesa De Los Santos).



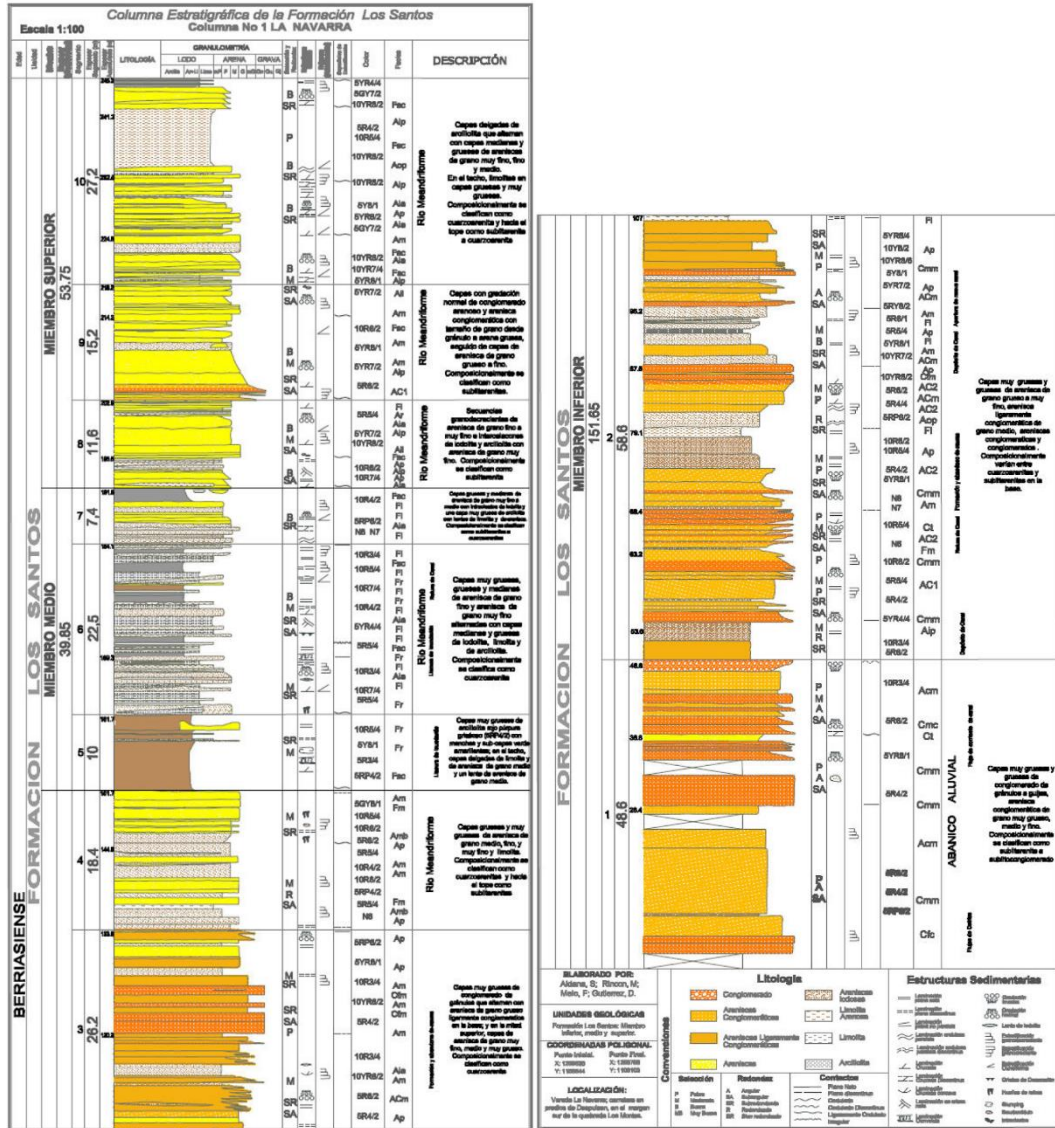
Fuente: Aldana, S. 2008. [Adaptada por los autores]

Figura 18. Vista panorámica de la Formación Los Santos en la sección estratigráfica de “El Calicho”.



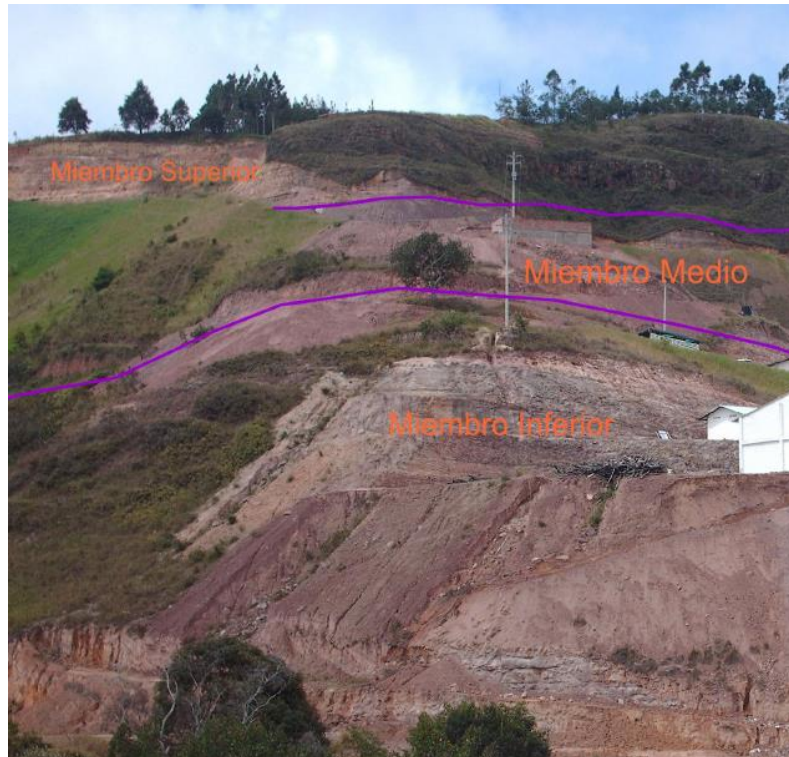
Fuente: Aldana, S. 2008. [Adaptada por los autores]

Figura 19. Columna estratigráfica de la Formación Los Santos, sección La Navarra (Mesa De Los Santos).



Fuente: Aldana, S. 2008. [Adaptada por los autores]

Figura 20. Vista panorámica de la Formación Los Santos en la sección estratigráfica de La Navarra.



Fuente: Aldana, S. 2008

Miembro Inferior

Espesores registrados: 127.2m y 151.65m (Aldana, S. 2008.), 56.5m y 56m (Rincon, M. 2008)

El miembro inferior en las secciones estratigráficas es representado por conglomerados matriz soportados que están alternados con arenisca conglomeráticas y areniscas de grano medio, observándose de base a tope un decrecimiento de grano, Rincon, M. 2008.

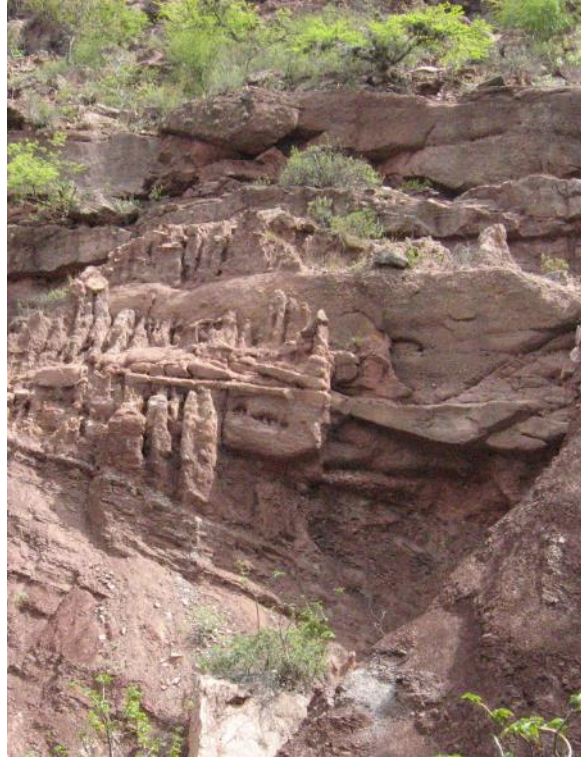
El *miembro Inferior*, figuras 21 y 22, se caracteriza por su alto contenido de grava. Está compuesto por conglomerados, areniscas conglomeráticas, areniscas ligeramente conglomeráticas algunas limolita de cuarzos y arcillolita ílíticas. Este miembro tiene una tendencia granodecreciente por lo cual el contacto entre el miembro Inferior y el Medio es transicional. Composicionalmente son sublitoconglomerados y sublitarenitas, Aldana, S. 2008.

Figura 21. Conglomerado arenolodoso y arenisca conglomerática con laminación discontinua plana paralela, Miembro Inferior de la Formación Los Santos en la sección La Navarra.



Fuente: Aldana, S. 2008. [Adaptada por los autores]

Figura 22. Conglomerado arenoso y arenisca conglomerática del Miembro Inferior de la Formación Los Santos en la sección El Calicho en contacto discordante angular con la Formación Jordán.



Fuente: Aldana, S. 2008. [Adaptada por los autores]

Miembro medio

Espesores registrados: 21.8m y 39.85m (Aldana, S. 2008), 22.65m y 41m (Rincon, M. 2008).

Para las secciones La Punta, *figura 27* y Carrizal, *figuras 23, 24, 25, 26* (Mesa de los Santos) *el miembro medio* presenta variaciones de tamaños de grano,

representados por arenisca lodosa, limolita arenosa, limolita, lodolitas y algunas capas de arcillolita, Rincon, M. 2008.

El *Miembro Medio*, *figura 22*, se distingue por su granulometría fina de arenisca de grano medio a arcillolita ílítica; y por sus tonalidades rojizas y púrpuras con manchas verde grisáceo dejadas por reducción de materia orgánica (raíces). En la sección de 'La Navarra' de este miembro es donde la proporción de arcilla es mayor respecto a las otras secciones realizadas en la Mesa de Los Santos. En dicha sección también el miembro tiene su mayor espesor, las capas de limolita de cuarzos y arcillolita ílíticas son de mayor espesor que en la sección El Calicho. La composición de las areniscas las clasifica en subarcosas y cuarzoarenitas, Aldana, S. 2008.

Figura 23. Arcillolita ílítica con laminación discontinua plana paralela y convoluta, Miembro Medio de la Formación Los Santos en la sección de La Navarra.



Fuente: Aldana, S. 2008. [Adaptada por los autores]

Figura 24. Panorámica del Miembro medio, sección Carrizal.



Fuente: Rincon, M. 2008. [Adaptada por los autores]

Figura 25. Laminación cruzada, Miembro medio sección Carrizal.



Fuente: Rincon, M. 2008. [Adaptada de los autores]

Figura 26. Panorámica del Miembro medio, sección La punta.



Fuente: Rincon, M. 2008 [Adaptada por los autores]

Miembro Superior

Espesores registrados: 95.3m y 53.75m (Aldana, S. 2008.), 33m y 48.7m, Rincon, M. 2008.

El miembro superior está conformado por alternancias de arenisca de grano medio a fino y muy fino y capas con geometría cuneiforme, laminación cruzada plana a paralela plana; en la sección La Punta este miembro presenta alternancias con algunas capas de limolita y arcillolita, *figura 27*, Rincon, M. 2008.

El *Miembro Superior*, *figura 28*, está compuesto por areniscas de grano fino, muy fino y medio con intercalaciones y alternancias de areniscas con limolita de cuarzos y arcillolita ilíticas en las secciones La Navarra y El Calicho. En la sección de La

Navarra se presentan, además, capas delgadas conglomeráticas de gránulos mientras en 'El Calicho' solo se presentan areniscas y limolita de cuarzos. Estas rocas están bien cementadas (5 y 20% de cemento siliceo); siendo las más cementadas las del techo en la sección del Calicho y en general todo el miembro superior de esta sección mientras en la Navarra tienen menos cemento y en cambio tienen más matriz. Composicionalmente son principalmente cuarzoarenitas con algunas sublitarenitas y subarcosas, Aldana, S. 2008.

Figura 27. Intraclastos de limolita. Miembro superior sección La Punta.



Fuente: Rincon, M. 2008 [Adaptada por los autores]

Figura 28. Contacto entre el Miembro Medio y el Superior de la Formación Los Santos en la sección de La Navarra. En el Miembro Superior se nota la estratificación en artesa.



Fuente: Aldana, S. 2008. [Adaptada por los autores]

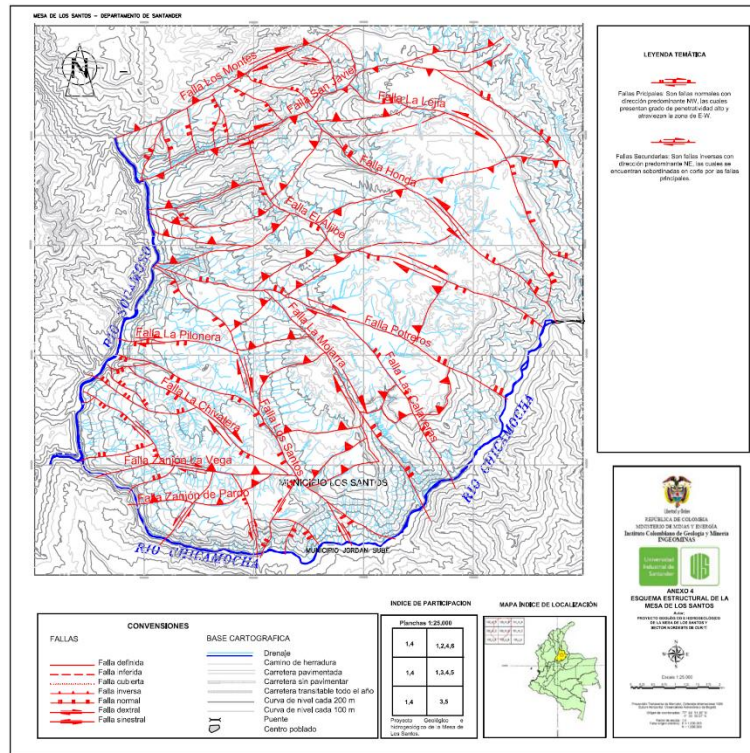
6.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

El área de la Mesa de Los Santos se caracteriza por corresponder a una zona relativamente estable tectónicamente, a pesar de estar localizada cerca del llamado Nido Sísmico de Bucaramanga y de las Fallas Bucaramanga y Suárez (Julivert y Navas, 1964).

La Mesa de Los Santos está afectada por una tectónica compresiva en bloques en la que predomina el fallamiento inverso con pliegues abiertos en dirección Nor-NE y NW. Las estructuras regionales predominantes son la Falla del Suárez y la Falla Bucaramanga, las cuales generaron una porosidad secundaria debido al fracturamiento, también se encuentra afectada por una serie de fallas y flexiones menores de diferente naturaleza, que desde el punto de vista hidrológico son importantes, ya que controlan el comportamiento del flujo subterráneo, Gómez, C.; Wandurraga, L.; Molina, M.; Sarmiento, M., 2014.

Pinto, J. et al. 2007, realiza el mapa estructural de Mesa de Los Santos, figura 29, en el proyecto, “investigación geológica e hidrogeológica de La Mesa de Los Santos, sector Nordeste de Curiti y borde occidental del macizo de Santander”

Figura 29. Mapa estructural de la Mesa de Los Santos.



Fuente: Pinto, J. et al. 2007. En Vargas, C. 2008 (Anexo 4. Esquema estructural de la Mesa de Los Santos.) [Adaptada por los autores]

Vargas, C. 2008 mediante la cartografía geológica de la Mesa de Los Santos agrupa las fallas en tres grupos (fallas principales, fallas secundarias, fallas menores), estos tienen características geométricas y cinemáticas particulares *figura 29*, descritas a continuación:

- **Fallas Principales**

Las fallas principales son fallas normales con expresiones rectas, sinuosas y curvas, con dirección preferencial NO, paralelas y subparalelas en su gran mayoría. Estas fallas afectan la secuencia sedimentaria Jurásica y Cretácica, así mismo rocas del basamento. Muestran disposición subvertical con vergencias características de los procesos tectónicos y, un grado de penetrabilidad alto por lo que se encuentran en toda el área. En este tipo de fallas se resaltan:

Falla Los Santos

Se encuentra ubicada al suroeste de la zona de estudio, su trazo presenta dirección NO y se observa sobre las vertientes de la quebrada Seca, Resumidero, Los Santos y Santera. Muestra un trazo sinuoso al noroeste hacia el río Sogamoso y curvo al sureste hacia el río Chicamocha.

La falla muestra una extensión aproximada de 14Km, esta estructura corresponde a una de las fallas más importantes de la zona y una de las más profundas comportándose como una falla de rumbo dextral con componente normal y vergencia al SO, afectando toda la secuencia de rocas aflorantes en la zona. El movimiento de la falla se evidencia mediante fotointerpretación y observaciones de campo, mostrando un salto de aproximadamente 80m.

Falla Potreros

La Falla Potreros se ubica en la parte central de la zona, es una falla principalmente de rumbo dextral con componente normal y vergencia hacia el NE. Presenta una curvatura en la zona del escarpe del Río Chicamocha y recto en la parte plana de la Mesa. Su longitud aproximada es de 13 Km. Presenta una dirección NO, controla cauces de las quebradas La Laja, la Custodia y la quebrada de la cual toma su nombre Potreros. Esta falla afecta litología de las Formaciones Silgará, Jordán y Los Santos, mostrando un salto vertical de aproximadamente 40 m.

Falla El Aljibe

La falla El Aljibe se encuentra al Noreste de la zona de estudio, muestra un comportamiento rectilíneo en la parte sureste del trazo de falla y un comportamiento sinuoso hacia el noroeste del trazo de falla. La falla lleva el nombre de la quebrada el Aljibe controlando parte de su cauce, principalmente es una falla dextral con componente normal y vergencia SO. La falla afecta litologías como el Granito de Pescadero y las Formaciones Silgará, Jordán y Los Santos, mostrando un salto vertical de 50 m.

- **Fallas Secundarias**

Las fallas secundarias son fallas inversas las cuales presentan dirección preferencial NE. Muestran expresión sinuosa y curva. Estas se encuentran subordinadas en relación de corte, por lo que se encuentran en su mayoría contenidas dentro de las fallas principales. En este tipo de fallas se resaltan:

Falla San Javier

La Falla San Javier es una estructura con dirección NE y exhibe un trazo recto con poca sinuosidad. Al noroeste de la zona, controla parcialmente el curso de las quebradas Los Fríos, las Juntas, San Javier y el Loro, y posiblemente la responsable de los escarpes que se presentan en la zona. Es una falla de rumbo con componente inversa y vergencia al SE y con longitud aproximada de 13 Km. Afecta litologías de rocas metamórficas de la Formación Silgará, rocas ígneas del Granito de Pescadero, rocas sedimentarias de las Formaciones Jordán y Los Santos. Muestra un salto muy corto en la vertical de aproximadamente 10 m hacia el noreste de la falla y de aproximadamente 100 m, al sureste de la misma.

Falla Los Montes

La Falla Los Montes es una falla de dirección NE, con un trazo recto de longitud aproximada de 9Km, solo afecta las litologías de la Formación Jordán y Los Santos. Ubicada al Norte como límite de la zona de estudio, se presenta como una falla dextral inversa con vergencia al NW. El trazo rectilíneo de esta estructura controla casi en su totalidad la quebrada Los Montes y parcialmente la quebrada las Minas.

- **Fallas Menores**

Las fallas menores en la zona de la Mesa de Los Santos se observan en dirección E-O. Estas fallas pueden ser producto de tectónica localizada por acción de relajación y/o acomodación del material después de eventos tectónicos. Entre estas se destacan las fallas La Pilonera, Zanjón La Vega y Zanjón de Pardo.

6.3.1 Estrías

En el análisis estructural Vargas, C. 2008, define el predominio de dos direcciones NO-SE que coinciden con los segmentos de fallas principales y E-O coherente con el trazo de fallas menores de la zona; los ángulos de buzamiento de las fallas están comprendidos entre 80 y 90°. De igual manera establece para el campo de fuerzas de deformación un máximo de compresión subhorizontal con orientación aproximada N-S, y un máximo de extensión subhorizontal de orientación aproximada E-O, con valores máximo σ_1 : 345/14, mínimo σ_3 :81/21 e intermedio σ_2 : 225/64.

La interpretación final Vargas, C. 2008 dice que se presenta un tipo de deformación en tectónica frágil, lo que correspondería a un patrón normal transcurrente.

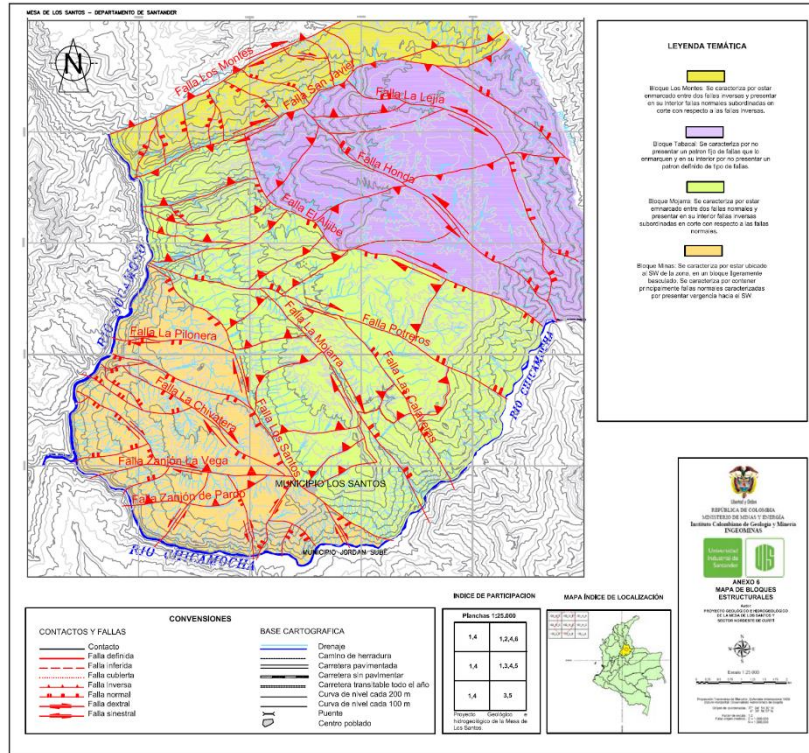
6.3.2 Diaclasas

Vargas, C. 2008 considera que el sistema de fracturamiento de la Mesa de Los Santos presenta una distribución homogénea con respecto a la geometría de la zona. En su análisis obtuvo un predominio en dirección N80-90O que concuerda con la tendencia de las principales fallas cartografiadas en la zona, con ángulo de inclinación predominante de 80-90°. El diagrama rosa de planos de fractura obtenido por Vargas, C. 2008, muestra un sistema de fracturamiento radial distensivo para el área total de estudio, el cual concuerda con el pequeño basculamiento de los bloques en la parte suroeste de la zona.

Vargas, C. 2008 relaciona los datos de fracturas con los tipos de fallas cartografiadas en la zona, dividió la zona en bloques estructurales de acuerdo a

características y tipos de fallas identificadas en la zona, obteniendo como resultado cuatro bloques estructurales, distribuidos de la siguiente forma, *figura 30*.

Figura 30. Bloques estructurales de la Mesa de Los Santos establecidos por Vargas, C. 2008.



Fuente: Vargas, C. 2008 (Anexo 5. Mapa de bloques estructurales.) [Adaptada por los autores]

- **Bloque Montes**

El bloque Los Montes se encuentra ubicado al norte de la Mesa de Los Santos. El bloque presenta una dirección preferencial N80-90° en el diaclasamiento, el cual corresponde a fracturas sintéticas de las fallas inversas o antitéticas de las fallas normales del bloque, y una segunda dirección muy marcada N10-20° la cual puede

ser una dirección sintética de las fallas normales o antitéticas de las fallas inversas del bloque, estas fracturas muestran ángulos de buzamiento muy marcado en 80-90°.

- Bloque Tabacal

El bloque Tabacal se encuentra ubicado al noreste de la Mesa de Los Santos, muestra una dirección preferencial N70-80O el cual corresponde a fracturas sintéticas de las fallas normales o antitéticas de las fallas inversas del bloque, estas fracturas muestran ángulos de buzamiento muy marcado en 80-90°.

- Bloque Mojarra

El bloque Mojarra se encuentra ubicado en la parte central de la Mesa de Los Santos, muestra una dirección preferencial N70-80O el cual corresponde a fracturas sintéticas de las fallas normales o antitéticas de las fallas inversas del bloque, estas fracturas muestran ángulos de buzamiento muy marcado en 80-90°. Este bloque presenta un comportamiento estructural similar al comportamiento estructural general de la zona, mostrando el comportamiento radial de las fracturas, lo cual indica una distensión en el bloque.

- Bloque Minas

El bloque las Minas se encuentra ubicado al sureste de la Mesa de Los Santos, muestra una dirección preferencial de diaclasas N10-20E el cual corresponde a

fracturas antitéticas de las fallas normales, estas fracturas muestran ángulos de buzamientos de 80-90°, estas fracturas muestran ángulos de buzamiento muy marcado entre 80-90°.

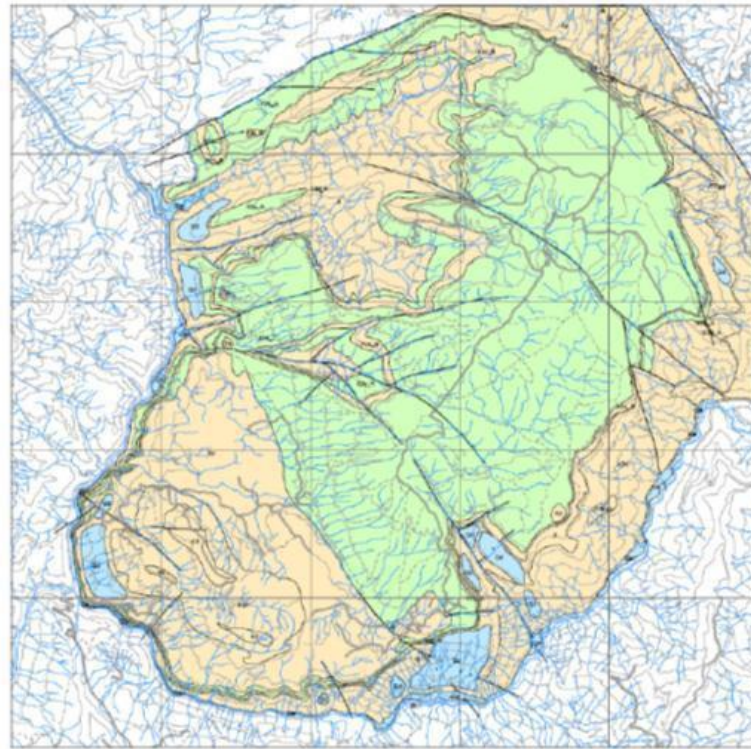
7. ANÁLISIS HIDROGEOLÓGICO DE LA FORMACIÓN LOS SANTOS

7.1. ANTECEDENTES

Algunos trabajos realizados en la región de La Mesa de Los Santos comprenden estudios geológicos que incluyen el análisis de las estructuras y la evolución morfoestructural de esta zona (Julivert, 1958), por otro lado (Julivert et al., 1964), (Barrero y Navas, 1964) realizan la cartografía geológica detallada a escala 1:50.000, donde se da una breve descripción estratigráfica y tectónica de la región. Más adelante en 1985 el antiguo Ingeominas, en la actualidad servicio geológico colombiano público una edición especial del proyecto cretácico el cual contiene un análisis sedimentológico y tectónico de las unidades cretácicas.

En cuanto a estudios hidrogeológicos. Gómez, C.; Wandurraga, L.; Molina, M.; Sarmiento, M., 2014 presentan los resultados de Hincapie & Veloza, Octubre 2009 definiendo la formación Los Santos como el área de mayor potencial hidrogeológico, esta ocupa el área más extensa de la meseta y define zonas de interés hidrogeológico de carácter discontinuo con alto grado de fracturamiento, *figura 31*. Las rocas que conforman el área de alto potencial son altamente consolidadas, por lo cual presentan en gran parte de la formación porosidad secundaria de acuerdo a su grado e interconexión entre fracturas.

Figura 31. Mapa de Potencial Hidrogeológico de La Mesa de Los Santos propuesto por Hincapie & Veloza, Octubre 2009; donde se establece la formación Los Santos como la zona de mayor potencial hidrogeológico.

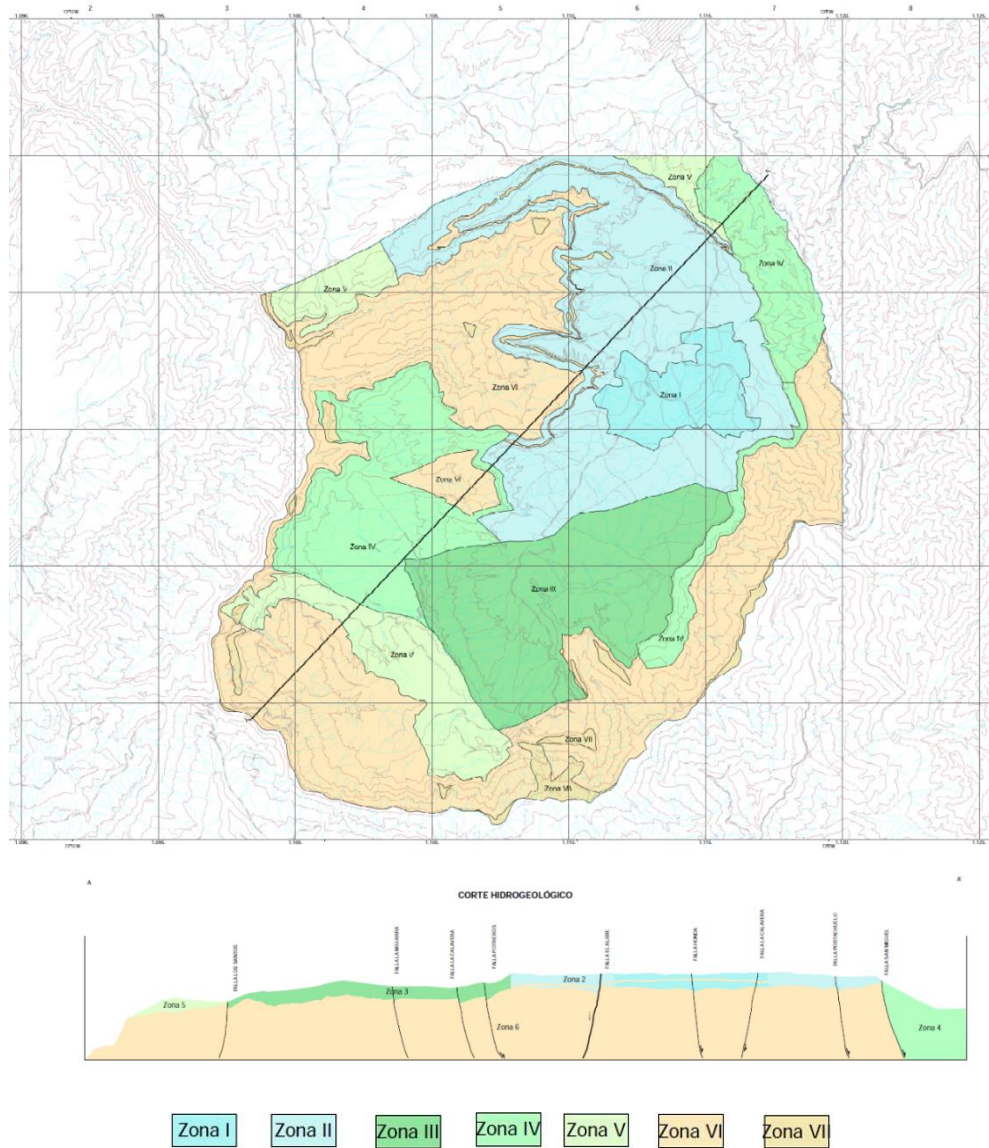


 Zona de alto potencial Hidrogeológico  Zona de bajo potencial Hidrogeológico

Fuente: Hincapie & Veloza, Octubre 2009 [Adaptada por los autores]

Pinto, J. et al. 2007, con colaboración del INGEOMINAS y la UIS realiza el proyecto, “investigación geológica e hidrogeológica de La Mesa de Los Santos, sector Nordeste de Curiti y borde occidental del macizo de Santander”, a partir de este se obtuvo información relacionada con la cartografía geológica, los análisis de algunas características hidrogeológicas de las rocas aflorantes, la estratigrafía, la geología estructural y la geología de arcillas, y además se obtienen siete zonas de interés hidrogeológico, *figura 32*.

Figura 32. MAPA DE ZONAS DE INTERÉS HIDROGEOLÓGICO EN DE LA MESA DE LOS SANTOS Y BORDE OCCIDENTAL DEL MACIZO DE SANTANDER.



Fuente: J. Clavijo, J. Pinto, D. Gutierrez, J. Mora, N. Rojas, I. Adarme, S. Aldana, N. Contreras, E. Diaz, L. Melo, G. Reátiga, M. Rincon, C. Vargas. Revisado: 2007 – INGEOMINAS [Adaptada por los autores]

- Zona I (Interés hidrogeológico: Alto)

Unidades Geológicas: Formación Los Santos miembro Superior

- Zona II (Interés hidrogeológico: Alto)

Unidades Geológicas: Formación Los Santos, miembro Inferior y miembro Superior.

- Zona III (Interés hidrogeológico: Medio)

Unidades Geológicas: Formación Los Santos.

- Zona IV (Interés hidrogeológico: Medio)

Unidades Geológicas: Formación Rosablanca, Formación Los Santos, Formación Jordán, Granito de Pescadero y Formación Silgará.

- Zona V (Interés hidrogeológico: Bajo)

Unidades Geológicas: Formación Rosablanca, Formación Los Santos y Formación Jordán.

- Zona VI (Interés hidrogeológico: Bajo)

Unidades Geológicas: Formación Tablazo, Formación Paja, Formación Rosablanca, Formación Los Santos, Formación Jordán, Granito de Pescadero y Formación Silgará.

- Zona VII (Interés hidrogeológico: Bajo)

Unidades Geológicas: Depósitos aluviales, coluviones y depósitos de derrubios.

Por su parte Gómez, C.; Wandurraga, L.; Molina, M.; Sarmiento, M., 2014, consideran la presencia de un acuífero en el norte de la formación los santos, ya que esta formación contiene porosidad primaria, porosidad por microfracturas y disolución, y porosidad secundaria que se manifiesta por diaclasas abiertas con buzamiento EW entre 80° a 90°. Hacia el sur el miembro superior de la formación Los Santos se caracteriza por su alto grado de fracturamiento, donde se encuentran diaclasas abiertas con ángulos de buzamiento NS de 80° a 90° considerando así esta zona como un acuífero fracturado. De esta forma se establece que el miembro superior de la formación Los Santos presenta mayor potencial hidrogeológico por tener una porosidad primaria media y porosidad secundaria alta, lo que genera un aumentando en la permeabilidad.

Contreras, N. 2008 realiza aportes del diaclasamiento, *figura 33*, para la Formación los Santos a partir de un total de 767 datos de diaclasas o fracturas. Se realizó un proceso geoestadístico mediante el software Tectonics FP 1.6.4 con el fin de determinar las familias principales de diaclasas y su interconexión; además generó

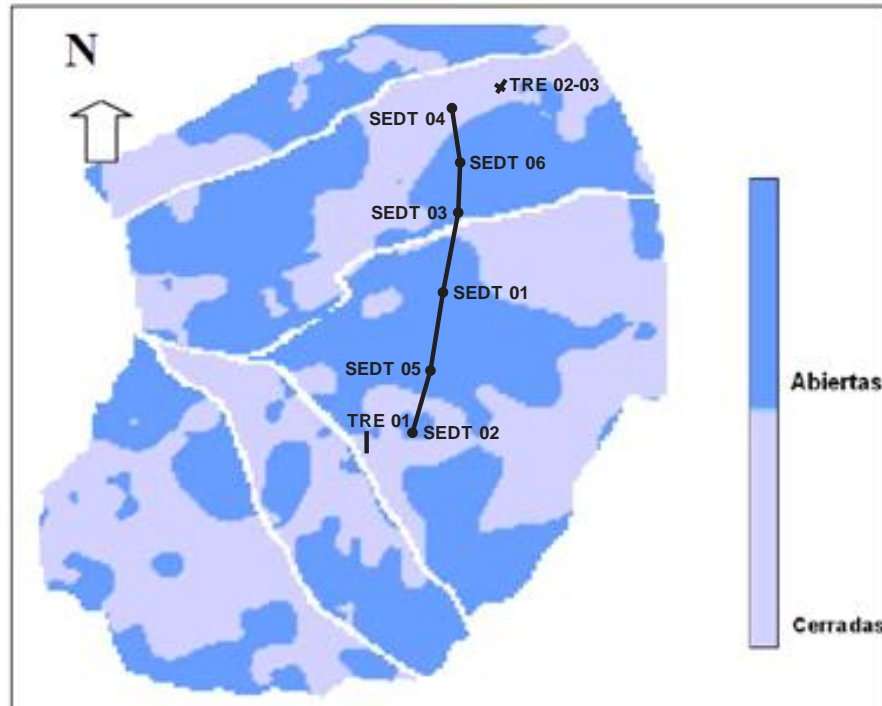
el mapa de distribución de la apertura de las diaclasas donde refleja las áreas de mayor dominio de diaclasas abiertas o diaclasas cerradas, *figura 34*.

Figura 33. Foto de fracturas abiertas del miembro superior de la formación Los Santos, Vereda La Fuente, Mesa de Los Santos.



Fuente: Contreras, N. 2008. [Adaptada por los autores]

Figura 34. Mapa de distribución de diaclasas abiertas y cerradas en la Mesa de Los Santos.



Fuente: Contreras, N. 2008. [Adaptada por los autores]

A partir de los datos tomados de la distribución espacial de las diaclasas Contreras, N. 2008 generó un mapa de la distribución espacial de la densidad de fracturamiento, *figura 35*.

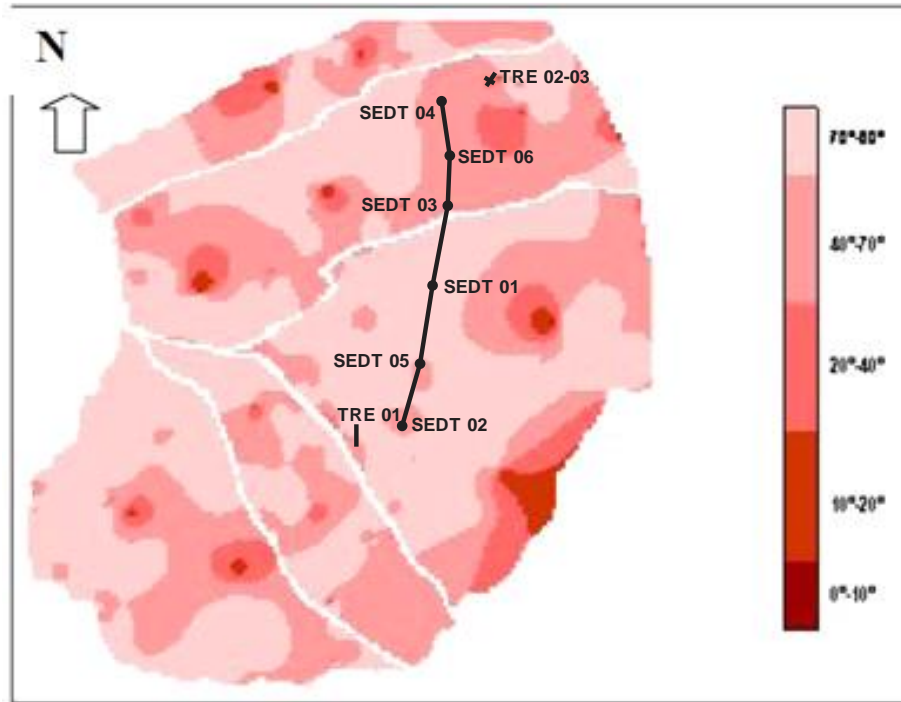
Figura 35. Mapa de distribución espacial de la densidad de fracturamiento en la Mesa de Los Santos.



Fuente: Contreras, N. 2008. [Adaptada por los autores]

Contreras, N. 2008 también realizó un mapa de distribución del buzamiento que muestra la mayoría de diaclasas en toda la zona con buzamientos entre 70° y 90° , y otros menores entre 40° y 70° , figura 36.

Figura 36. Mapa de distribución espacial de los rangos de buzamiento de las diaclasas en la Mesa de Los Santos.



Fuente: Contreras, N. 2008. [Adaptada por los autores]

Contreras, N. 2008 tomando como base los resultados expuestos a través del análisis de los tres rasgos de fracturamiento generales de la Formación Los Santos, establece que existen tres zonas que posiblemente permiten la infiltración, la circulación del agua y la recarga del acuífero. Estas zonas son, el sureste de La Mesa donde predominan las diaclasas abiertas con alta a media densidad de fracturamiento; la zona centro y noreste que contiene diaclasas abiertas con baja densidad de fracturamiento y el norte de La Mesa que presenta diaclasas cerradas y abiertas con baja densidad de fracturamiento. En estas tres zonas los buzamientos son en su mayoría entre 70° y 90°, esto implica que en áreas de altas precipitaciones ocurra una rápida infiltración del agua.

Contreras, N. 2008 analiza algunos pozos perforados e inventariados por INGEOMINAS-UIS (2008) con profundidades entre 35 m y 108 m, acompañados de los informes de perforación de la compañía Terramundo Drilling e Infiere que las familias de diaclasas que están interconectadas posiblemente facilitan el flujo de agua a través del acuífero en dirección del buzamiento, ya que los buzamientos entre 40° y 70° dominan el sector noreste de la Mesa; en el sector centro de la Mesa de Los Santos las familias de diaclasas presentan buzamientos preferencialmente entre 70° y 90° y una apertura entre 1 y 10 cm. De manera general infiere que las fracturas son un canal de alta permeabilidad que contribuye al flujo de agua hasta su posterior almacenamiento en areniscas más profundas con mayor porosidad primaria que las situadas hacia el tope de la Formación Los Santos.

El análisis de las perforaciones que realizó Contreras, N. 2008 menciona profundidades desde 8,5 m hasta 25 m para el inicio de presencia de flujo de agua en la roca, llegan a los 80,3 m hasta 88 m (profundidad máxima de las perforaciones); algunos pozos presentaron zonas de saturación de agua desde los 65,6 m hasta 85 m (profundidad máxima de las perforaciones); otros pozos presentan a partir de los 88 m roca sin fractura.

Contreras, N. 2008 define que el miembro superior de la Formación Los Santos puede ser uno de los acuíferos fracturados, ya que este aflora en superficie y algunos pozos no tan profundos sólo alcanzan los 27 y 35 m.

Contreras, N. 2008 concluye que con la distribución espacial y el análisis geoestadístico se reconocen dos sectores de gran interés. El primero ubicado al noreste de la Mesa, probablemente constituye un acuífero en el que las fracturas son de gran importancia pues permiten la recarga del acuífero y el flujo de agua en ciertas direcciones. El segundo sector que corresponde al centro de la Mesa, es un

sector que a profundidad presenta mayor grado de fracturamiento lo que indica un acuífero fracturado.

Rincon, M. 2008 concluye que teniendo en cuenta las características granulométricas descritas para las secciones estratigráficas, el miembro superior de la sección La Punta (Mesa de los Santos) y La Cuevana (Curiti) se identifican posibles acuíferos y para la sección Carrizal (Mesa de los Santos) acuíferos fracturados; el miembro medio se comporta como un acuitardo al igual que el miembro inferior el cual presenta alto contenido de matriz limo arenosa.

Melo, L. 2008 define que las capas de arcillolita del miembro medio tienen mayor conductividad lateral, debido a que este miembro está constituido por niveles gruesos de arcillolitas, constituyéndose como un miembro impermeable; el miembro superior presenta niveles de areniscas separados por capas delgadas y muy delgadas de arcillolitas por tal motivo este miembro puede contener pequeños acuíferos.

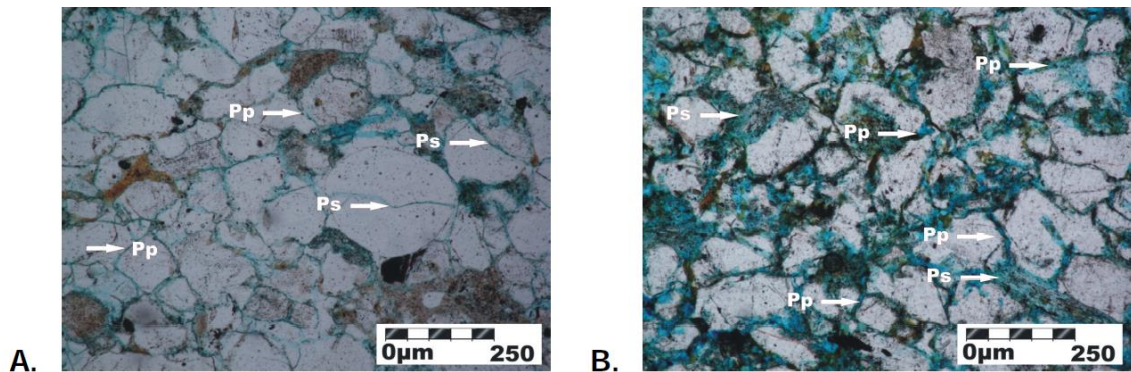
Hidrogeológicamente Melo, L. 2008 en base a la información obtenida del análisis de arcillas, establece que la Formación Los Santos presenta porcentajes altos de arcilla, la cual suministra características impermeables a los niveles de limolitas y arcillolitas que se encuentran intercalados con capas de areniscas. El grado de impermeabilidad se ve afectado por la disminución del porcentaje de la fracción de arcilla, debido al aumento de 50% de la fracturación gruesa (arena fina y limo) en cada una de las capas de areniscas del Miembro Superior de esta formación, las cuales se consideran como capas menos impermeables.

Según (Gómez, C.; Wandurraga, L.; Molina, M.; Sarmiento, M., 2014) la formación Los Santos o Tambor (Kita) cuenta con diferente estratigrafía y tipo de porosidad en cada uno de sus miembros, haciendo que el miembro superior e inferior se distinguen por sus altas porosidades secundarias lo que indica que se pueden presentar acuíferos fracturados permitiendo el almacenamiento del agua en esta zona. A diferencia del miembro medio este se caracteriza por su baja porosidad primaria, debido a su matriz arcillosa que lo define como un posible acuitardo, aunque al Este y al Oeste de la zona donde aflora este miembro, por su aumento de porosidad se pueden presentar acuíferos fracturados.

Díaz, E. 2008 define que el Miembro Superior de la Formación Los Santos, en el Norte presenta porosidad primaria media con variaciones texturales hacia el Sur, presentando un aumento de porosidad intergranular hacia el centro y una compactación de las rocas hacia el Este y el Oeste que reducen su porosidad primaria y aumentan su porosidad secundaria por fracturamiento, y de esta manera la define como la unidad geológica con mayor potencial hidrogeológico. *Figura 37.*

Figura 37. A) Sublitarrenisca de grano medio con matriz limo arcillosa producto de alteración con porosidad primaria intergranular y porosidad secundaria asociada a microfracturas y reemplazamiento (NII). B) Cuarzoarenisca ligeramente limosa con bajo grado de cementación, porosidad primaria intergranular y porosidad secundaria asociada a disolución de matriz y líticas (NII).

Abreviaturas: NII – luz polarizada plana, Pp – porosidad primaria, Ps – porosidad secundaria.

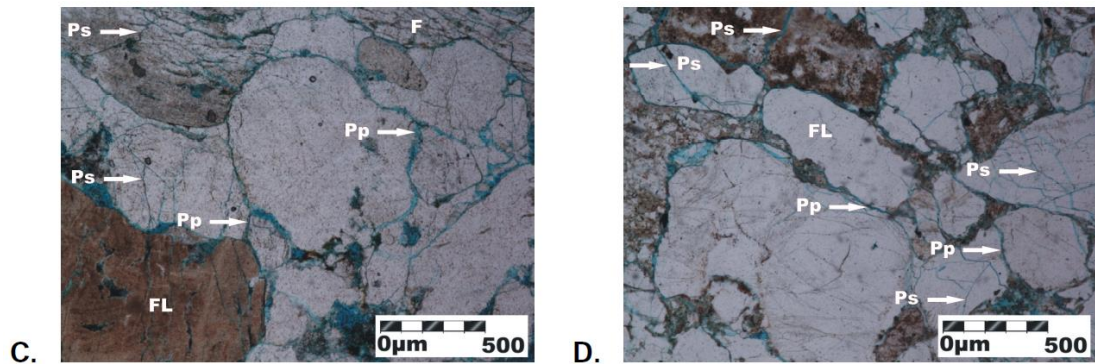


Fuente: Díaz, E. 2008. [Adaptada por los autores]

Para Díaz, E. 2008 el Miembro Inferior, *figura 38*, presenta alto contenido de matriz arcillosa de composición ilitica principalmente, que reducen su porosidad primaria y su permeabilidad, hacia el Sur presenta un aumento en la cementación, compactación y permeabilidad producto del fracturamiento, que permite que esta formación tenga potencial hidrogeológico alto a medio en estos sectores.

Figura 38. C) Subitarenisca de grano grueso ligeramente granular con matriz limo arcillosa donde se observa FI, Pp intergranular y Ps asociada a microfracturas (NII). D) Subitarenisca de grano grueso con matriz limo arcillosa y porosidad primaria intergranular y microporosidad, aumento de porosidad secundaria asociada a microfracturas (NII).

Abreviaturas: P – porosidad, Gnt – granate, NII – luz polarizada plana, FL - fragmento lítico, F- feldespato, Pp – porosidad primaria, Ps – porosidad secundaria.



Fuente: Díaz, E. 2008. [Adaptada por los autores]

Adarme, I. 2008 realizó estudios Físicoquímicos a las aguas subterráneas en la Mesa de Los Santos, los valores de conductividad (El agua pura es un buen conductor de la electricidad, sin embargo el agua subterránea está bastante influenciada por los cationes y aniones que el medio circundante aporta en ella.) obtenidos los agrupa en tres rangos, un rango alto (1000 a 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) presente en la zona Sur Oeste, cerca de las minas, las cuales pueden estar afectando el agua del lugar; un segundo rango (50 a 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, este rango de conductividad eléctrica es el aceptado para el agua subterránea), localizado hacia los escarpes en el Este, una pequeña franja al Oeste, así como un sector en el Norte de la Mesa de Los Santos; el tercer rango de valores es bajo (0 a 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$), domina el centro, el Oeste y la zona escarpada del Noreste, estos valores son más bajos que los aceptados para aguas subterráneas, esto puede deberse a que en dichas zonas, el agua se hace más superficial, lo que implica que sea menor el recorrido y el tiempo

de permanencia del agua en el acuífero, indicando una baja concentración de sólidos y sales disueltas.

Gómez, C.; Wandurraga, L.; Molina, M.; Sarmiento, M., 2014 agregan que los valores de conductividad bajos se relacionan principalmente con la mezcla de aguas subterráneas con aguas superficiales por el tránsito de estas a través de fracturas.

En el artículo de Minpetgeo-Uis e Ingeominas, 2009 "evaluación hidrogeológica preliminar de las unidades geológicas de la Mesa de Los Santos, Santander" se establece que en la Mesa de Los Santos se presenta mayor potencial hidrogeológico asociado al Miembro Superior de la Formación Los Santos ya que este posee una porosidad primaria media y porosidad secundaria alta, lo que genera un aumento en la permeabilidad. El Miembro Inferior aunque presenta baja porosidad primaria, aumenta su permeabilidad por el fracturamiento de la roca. Se considera como unidad sin interés hidrogeológico por su baja porosidad y permeabilidad el Miembro Medio de Los Santos.

Más específicamente Minpetgeo-Uis e Ingeominas, 2009; para cada miembro define en general, el Miembro Inferior presenta alto contenido de matriz arcillo arenosa de composición illítica (50-90%) que reduce notoriamente la permeabilidad y lo definen como un posible acuitardo. Sin embargo, hacia el este y oeste de la Mesa de los Santos la secuencia se considera como un acuífero fracturado ya que presenta porosidad primaria intergranular de 5% asociado a microporosidad de la matriz, y porosidad secundaria del 10% asociado a microfracturas, y porosidad secundaria por alta densidad de fracturamiento, con diaclasas abiertas cuya dirección preferencial es NW-SE. Generalmente, el Miembro Superior presenta baja porosidad primaria debido al alto contenido de matriz arcillosa; se define como un posible acuitardo. Hacia el este y oeste de la zona donde aflora el Miembro Medio,

se presenta un aumento en la permeabilidad asociada a la porosidad secundaria por fracturamiento y le confiere carácter de un posible acuífero fracturado. El Miembro Superior en el centro de la Mesa, presenta alta porosidad primaria (15%) asociado a porosidad intergranular y disolución de matriz y líticas, y porosidad secundaria con una densidad media a baja de fracturas con dirección N20-50E y con buzamientos entre 80° y 90°. El fracturamiento aumenta hacia el este, pero las diaclasas son cerradas. En esta zona se encuentran cinco pozos con profundidades entre 35 y 105 m, 36 aljibes entre 2.7 y 19 m, y 12 manantiales. En el norte el Miembro Superior, presenta una porosidad total que varía de 8 a 12%, porosidad primaria de 6 a 8% y porosidad de 4 a 6% por microfracturas y disolución, la porosidad secundaria se manifiesta con diaclasas abiertas de 340° a 360° de azimuth y otras en dirección EW con buzamientos entre 80° y 90°; la densidad de fracturamiento aumenta hacia los escarpes. Según el inventario de puntos de agua subterránea, en esta zona se ubican 29 pozos que presentan profundidades entre 23 y 108 m, 98 aljibes entre 1.5 a 19.5 m, y 73 manantiales. Hacia el sur el Miembro Superior, se caracteriza por su alta densidad de fracturamiento; predominan las diaclasas abiertas en sentido N-S y ángulo de buzamiento principal de 80° a 90° y en menor proporción se presentan ángulos entre 50° y 70°. En esta zona se encuentran 9 pozos cuyas profundidades oscilan entre los 29 y 100 m; 23 aljibes y 36 manantiales. Este miembro se considera como un acuífero en el norte de la Mesa y como acuífero fracturado hacia el sur.

Pinto et al. 2007, establecen para las formaciones sedimentarias y no sedimentarias porosidades secundarias que favorecen la percolación, infiltración y almacenamiento de fluidos en las rocas, que en algunos casos aumentan la porosidad general. Las posibles direcciones de flujo del agua están relacionadas con el tipo, dirección, densidad e inclinación de fallas y diaclasas. La presencia de estas estructuras hace posible el flujo de agua a una escala de tipo local o regional.

Gómez, C.; Wandurraga, L.; Molina, M.; Sarmiento, M., 2014, las unidades correspondientes a los depósitos cuaternarios, como lo son los depósitos aluviales y coluviones (exposición limitada), tienen un escaso espesor, debido a su matriz arcillosa y arenolodosa y es por esto que se restringen como acuíferos.

Gómez, C.; Wandurraga, L.; Molina, M.; Sarmiento, M., 2014 mencionan en su trabajo los resultados obtenidos por Moyano, I. 2010 para el Proyecto, Exploración SUB09-21 de Aguas Subterráneas en la Mesa de los santos realizado por INGEOMINAS en el 2010, este proyecto cuenta con información del trabajo de Hincapié, G. y Veloza, J. 2009, en el que se realizaron 78 Sondeos eléctricos Verticales (SEV); de los cuales para la Formación Los Santos se realizaron un total de 39 SEV, principalmente en las zonas norte y centro del área de trabajo del proyecto.

Los autores Hincapié, G. y Veloza, J. 2009 y Moyano, I. 2010 para la Formación Los Santos informan que la resistividad que presenta esta unidad es alta (promedio de 1700 ohm-m) indicando rocas consolidadas con baja saturación y baja porosidad primaria, sin embargo mediante la comparación de algunos de los sondeos con columnas de pozos existentes e información de otras perforaciones se puede apreciar que el flujo de agua subterránea dentro de la formación ocurre a través de fracturas y en niveles con resistividades que oscilan entre los 200 a 1220 ohm-m según su mayor o menor grado de fracturamiento y contenido de agua, la cual adicionalmente registra una baja conductividad eléctrica.

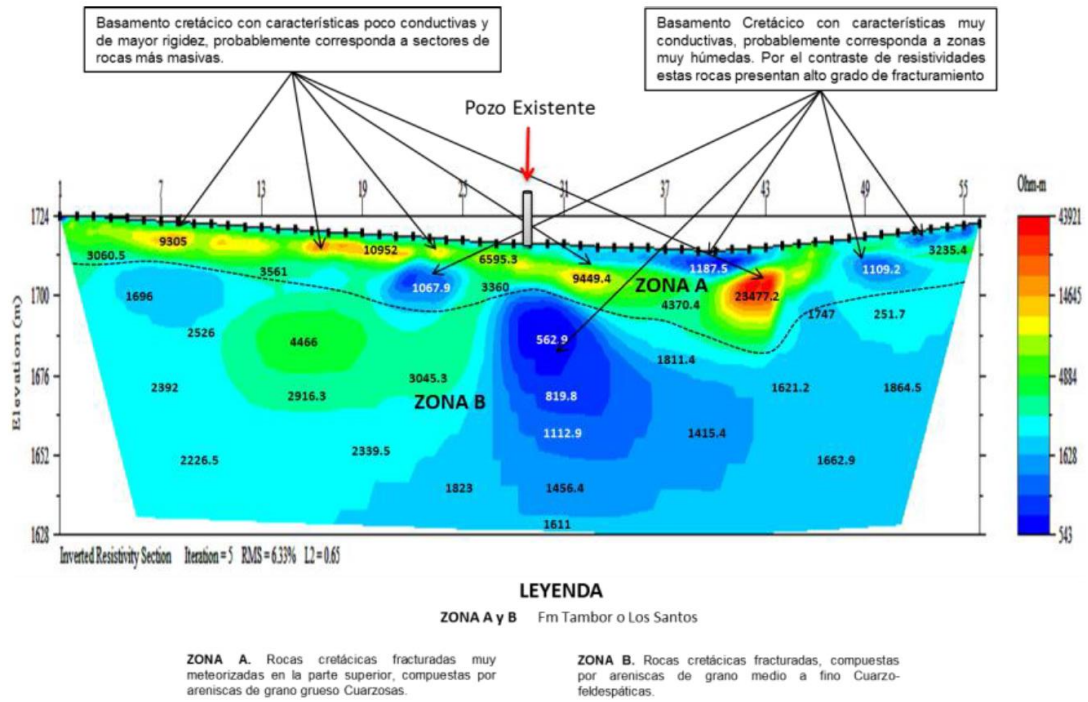
Hincapié, G. y Veloza, J. 2009 y Moyano, I. 2010 en base a los resultados obtenidos y tomando como base la interpretación de los modelos geoelectricos de los sondeos realizados (cortes, mapas de iso-resistividad) consideran que se encuentra una mayor posibilidad para el almacenamiento de agua subterránea en las cercanías a

los planos de falla en donde los esfuerzos han generado un mayor fracturamiento de los cuerpos de roca. Para esta formación se estima un espesor cercano a los 200 m a partir de la información interpretada de algunos de los sondeos realizados. Afirman los autores.

Con los resultados de las SEV Hincapié, G. y Veloza, J. 2009 concluyen que la Formación Los Santos presenta una resistividad alta (promedio de 1700 ohm*m), con un predominio de valores entre los 200 y 490 ohm-m interpretados como areniscas fracturadas con baja porosidad primaria y contenido moderado a medio de agua almacenada dentro de los espacios entre las fracturas (porosidad secundaria); de acuerdo a la información obtenida de columnas litológicas y otros datos de pozos se encuentra que las rocas con resistividades mayores (490 a 1220 ohm-m), interpretadas como areniscas con bajo a moderado grado de fracturamiento y/o saturación, se encuentran produciendo agua. Moyano, I. 2010 concluye lo mismo en su informe.

Gómez, C.; Wandurraga, L.; Molina, M.; Sarmiento, M., 2014 realizaron una tomografía eléctrica 2D a través de un equipo que calcula la resistividad con interés estructural e hídrico subterráneo, alcanzaron una profundidad de investigación Geofísica de 100 metros. El modelo final de inversión de datos lo obtuvieron por medio del Software Earthimager 2D, en el cual ilustra la distribución real de las resistividades del subsuelo, *figura 39*.

Figura 39. Imagen de Tomografía Eléctrica 2D interpretada por Gómez, C.; Wandurraga, L.; Molina, M.; Sarmiento, M., 2014, donde se resaltan la zona central saturada de agua, que está rodeada por roca fracturada con agua.



Fuente: Gómez, C.; Wandurraga, L.; Molina, M.; Sarmiento, M., 2014 [Adaptada por los autores]

8. MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOFISICO PRELIMINAR DE LA FORMACIÓN LOS SANTOS

A una roca, como conductor de la corriente eléctrica, se le considera como un agregado que consta de tres fases: sólido (minerales), líquido y gas. La resistividad del tal agregado depende de los siguientes factores, *figuras 40 y 41*:

- La resistividad de los minerales que forman la fase sólida de la roca.
- La resistividad de los líquidos y gases que rellenan los poros de la roca.
- La temperatura, humedad y porosidad de la roca.
- La textura de la roca, la forma y distribución de sus poros.
- Los procesos que ocurren en el contacto entre los líquidos de los poros y el mineral.

La resistividad se mide en ohm·centímetro u ohm·metro. En la exploración eléctrica se utiliza el ohm·metro, por ser una unidad mayor ($1 \text{ ohm}\cdot\text{m} = 100 \text{ ohm}\cdot\text{cm}$).

Figura 40. Valores de resistividad para rocas comunes, establecidas por Palacky 1987.

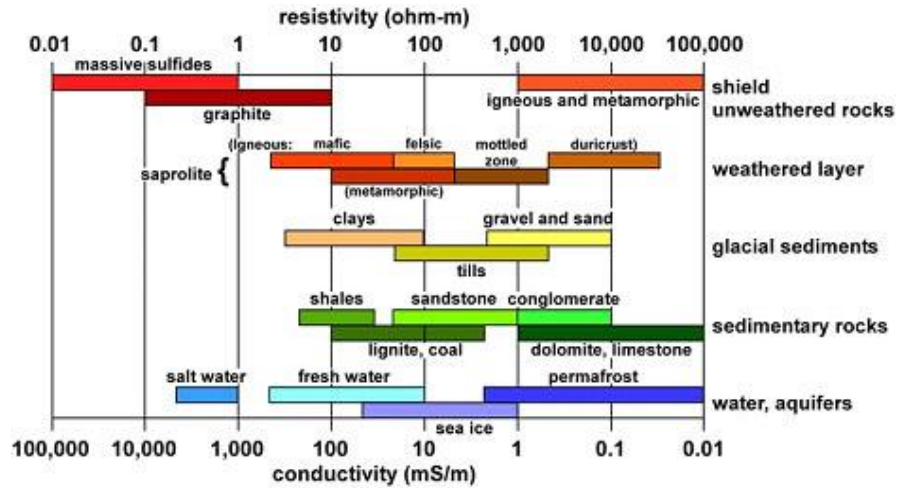
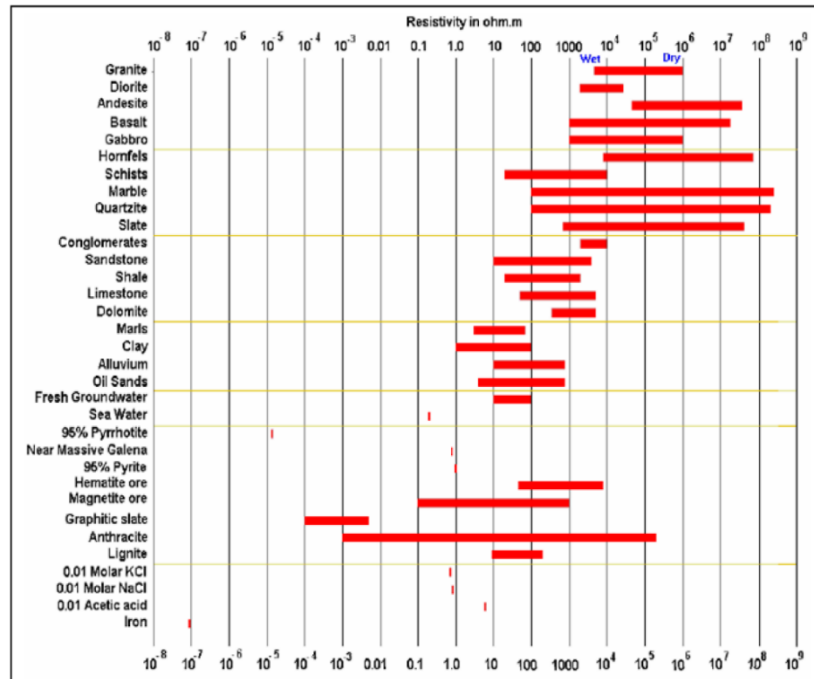


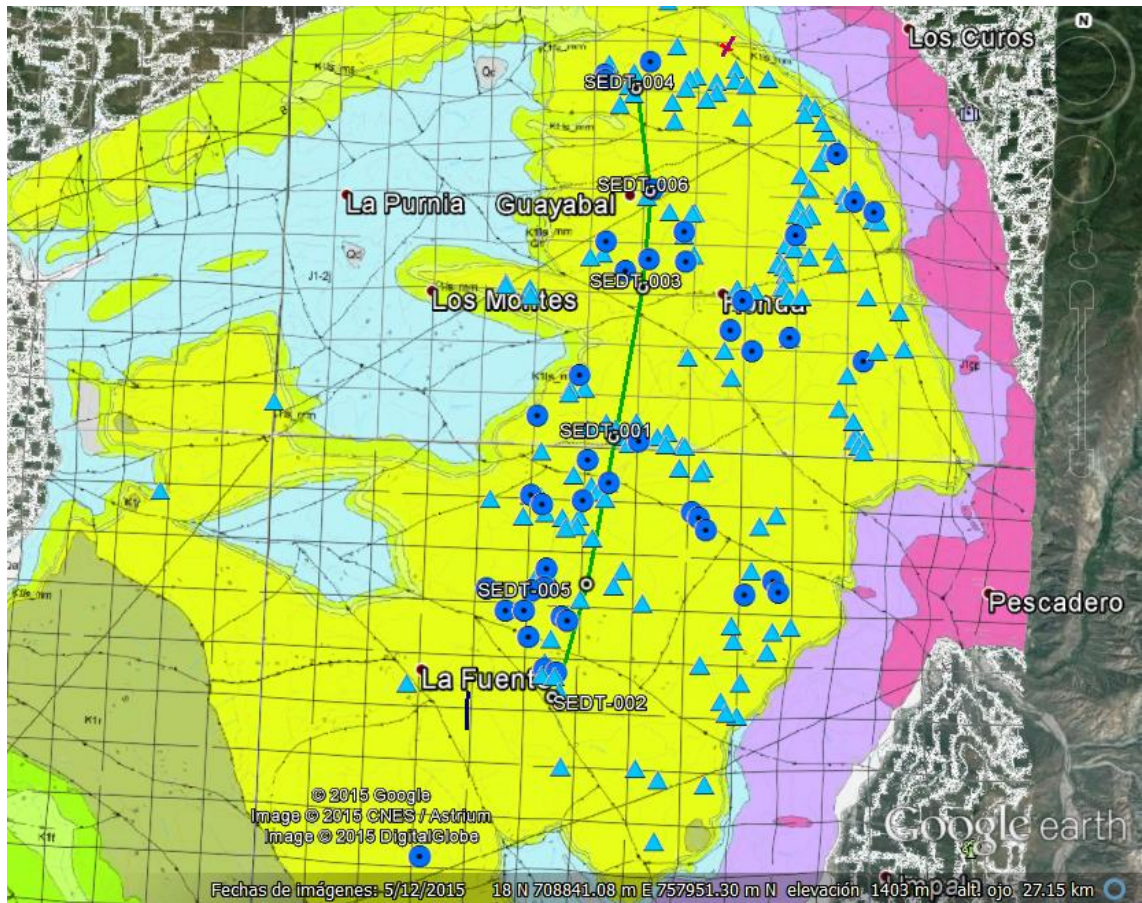
Figura 41. Resistividad en distintos medios geológicos comunes.



8.1 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En base a los diferentes valores de resistividad encontrados mediante bibliografía se establece un rango de resistividad de 1 a 500 ohm*m para zonas saturadas con agua para explotación, acuíferos, aclarando que este rango de debe al fracturamiento presente en la Formación Los Santos, *figura 43*.

Figura 43. Localización de los SEDT y las TRE en la Mesa de los Santos mediante el software libre Google Earth, la línea verde representa la línea de corte realizada a partir de los SEDT, la línea Azul oscuro es la TRE01, la línea Roja es la TRE02 y la línea Morada la TRE03. Los círculos azules corresponden a Pozos y los triángulos azules a Aljibes. Tomado y modificado de Investigación Geológica e Hidrogeológica en La Mesa de los Santos, Sector Nordeste de Curití y Borde Occidental del Macizo de Santander, Departamento de Santander, Pinto et al. 2007



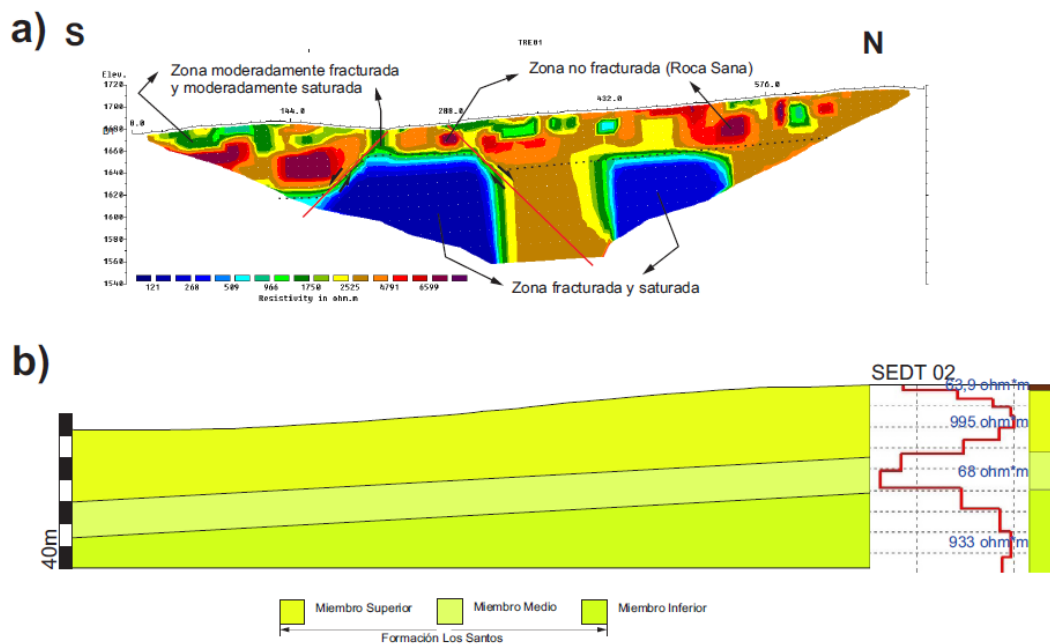
Para cada TRE se realizó un corte geológico tomando como fuente la geología de la zona, los espesores obtenidos de los SEDT más cercanos y las columnas

estratigráficas levantadas más cercanas. Estos cortes se aproximan a las mismas dimensiones que las TRE.

8.1.1 Resultados tomografías

- TOMOGRAFÍA 1

Figura 44. a) Interpretación realizada a la TRE 01, donde se aprecian las zonas de mayor potencial de saturación de agua (color azul), interpretadas como acuíferos. b) Corte geológico realizado a partir del Mapa Geológico de la Mesa de los Santos, en el mismo lugar donde se realizó la tomografía y a igual profundidad, se aprecian los tres miembros de la Formación Los Santos. (Para interpretar y generar el corte geológico se utilizó el SEDT 02, el Mapa Geológico Plancha 120-IV-D y el software Google Earth).



La TRE01 oscila entre los 1700m - 1560m alcanzando así una profundidad de 140m aproximadamente, tiene una longitud de 720 metros y generó un error absoluto de 6.9%. La topografía tiene una pendiente que buza hacia el Sur. *Figura 44.*

El aljibe 120-IV-D-036 F y pozo 120-IV-D-041 F son los más cercanos a la TRE01, estos puntos son obtenidos de “Investigación Geológica e Hidrogeológica en La Mesa de los Santos, Sector Nordeste de Curití y Borde Occidental del Macizo de Santander, Departamento de Santander”.

Código Estación: 120-IV-D-036 F (Aljibe)	Código Estación: 120-IV-D-041 F (Pozo)
Norte: 1245405 Este: 1107787	Norte: 1245765 Este: 1110382
Altitud: 1664	Altitud: 1684
Litología: Areniscas	Litología: Areniscas
Unidad Geológica: Los Santos	Unidad Geológica: Los Santos
Profundidad (m): 4,9	Profundidad (m): 38
Condición del Punto: En uso	Propósito: Producción
Uso del Agua: Principal; Abas. Doméstico	Condición del Punto: En uso Uso del Agua: Principal; Abas.
Estadística del Uso del Agua: 5 personas	Público Estadística del Uso del Agua: 55 personas
Nivel Estático (m) (verano): 4	Nivel Estático (m) (verano): 10,3
Nivel Estático (m) (invierno): 4,2	Nivel Estático (m) (invierno): 9,2
	Caudal (l/s) (verano): 0,22
	Caudal (l/s) (invierno): 0,3

Mediante el corte geológico realizado para la TRE01 se aprecia que los tres miembros de la Formación Los Santos están registrados en la tomografía, aunque del miembro inferior solo se observa la parte superior.

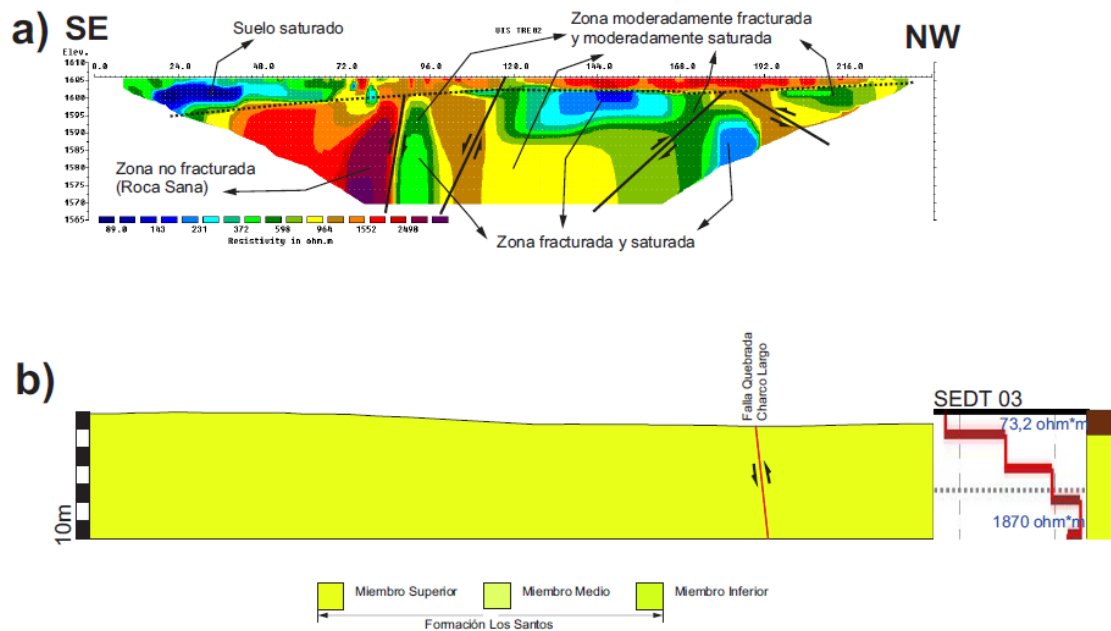
Mediante una línea punteada se demarca el comportamiento de bloques de valores de resistividad asociables a roca sana, la interpretación de este lineamiento evidencia la presencia de dos fracturas, una al Sur de la tomografía y otra en el centro de esta, a las que podría dársele una característica cinemática.

En esta tomografía se aprecian dos zonas de interés saturadas de agua, correspondientes a acuíferos (tonos azules) uno al Sur de la tomografía a una profundidad de 20m aproximadamente, y el otro al Norte de la tomografía a una profundidad de 37m aproximadamente; estos acuíferos están acumulándose en los tres miembros de la formación Los Santos. De igual manera se aprecian zonas moderadamente saturadas (tono celeste a verde oscuro) dispuestas alrededor de los dos acuíferos; se observa una conexión del acuífero del Sur con la superficie a través de la fractura. Esta conexión con la superficie permite entender que la recarga de este acuífero proviene de aguas lluvias y que la fractura es la vía de circulación del agua. Las fracturas que se encuentran en el centro y norte de la TRE no presentan conexión con la superficie.

Estas zonas de saturación moderada de agua presentan espesores de 10 - 20 metros, están en contacto con la superficie y se encuentran en el rango del nivel estático del aljibe y pozo más cercanos a la TRE.

- TOMOGRAFÍA 2

Figura 45. a) Interpretación realizada a la TRE 02, donde se aprecian las zonas de mayor potencial de saturación de agua (color azul), interpretadas como acuíferos. b) Corte geológico realizado a partir del Mapa Geológico de la Mesa de los Santos, en el mismo lugar donde se realizó la tomografía y a igual profundidad, se apreció solo el miembro superior de la Formación Los Santos. (Para interpretar y generar el corte geológico se utilizó el SEDT 04, la columna estratigráfica de la sección La Punta (Rincon, M. 2008.), el Mapa Geológico Plancha 120-IV-B y el software Google Earth.



La TRE02 oscila entre los 1600m - 1570m alcanzando así una profundidad de 35 metros aproximadamente, tiene una longitud de 240 metros y genero un error absoluto de 1.8%. La topografía es horizontal. *Figura 45.*

El aljibe 120-IV-B-047 R y pozo 120-IV-B-015 R son los más cercanos a las TRE02 y TRE03, estos puntos son obtenidos “Investigación Geológica e Hidrogeológica en La Mesa de los Santos, Sector Nordeste de Curití y Borde Occidental del Macizo de Santander, Departamento de Santander”.

Código Estación: 120-IV-B-047 R (Aljibe)	Código Estación: 120-IV-B-015 R (Pozo)
Norte: 1257466 Este: 1113719	Norte: 1257564 Este: 1112062
Altitud: 1653	Altitud: 1616
Litología: Areniscas	Litología: Areniscas
Unidad Geológica: Los Santos	Unidad Geológica: Los Santos
Profundidad (m): 14,9	Condición del Punto: En uso
Condición del Punto: En uso	Propósito: Producción
Uso del Agua: Principal; Abas. Público	Uso del Agua: Principal, Abas. Domestico; Secundario, Galpones
Estadística del Uso del Agua: 225	Estadística del Uso del Agua:
Nivel Estático (m) (verano): 13,4	Nivel Estático (m) (verano): 0,35
Nivel Estático (m) (Invierno): 14,3	Nivel Estático (m) (Invierno): 12,09
	Caudal (l/s) (verano): 4,88
	Caudal (l/s) (Invierno):

Mediante el corte geológico realizado para la TRE02 solo se aprecia el miembro superior de la Formación Los Santos, al NW se aprecia la Falla de la Quebrada Charco Largo.

Mediante una línea punteada se demarca el limite suelo roca, aunque no se evidencia un lineamiento que permita definir claramente fracturas como en la TRE01, se interpretan cuatro fracturas, a las que podría dársele una característica

cinemática. Dos al SE y las otras dos al NW, estas dos últimas pueden asociarse a la Falla de la Quebrada Charco Largo, la TRE02 se encuentra cerca de la intersección de dos fallas locales.

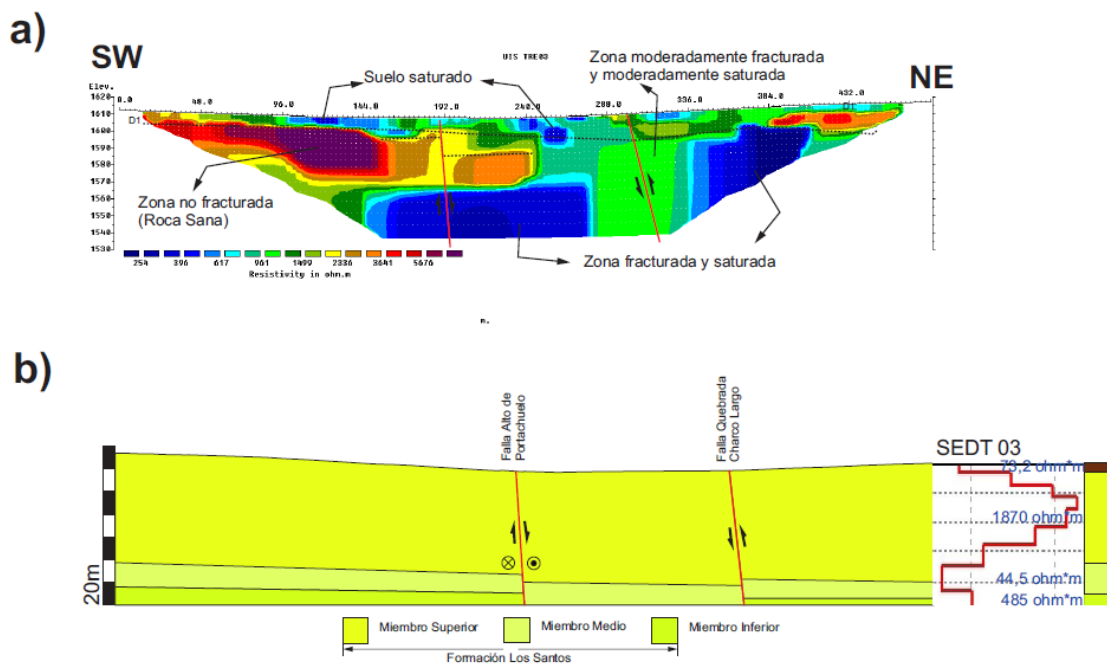
En esta tomografía se aprecian dos zonas de interés saturadas de agua, correspondientes a acuíferos (tonos azules a verde oscuro) uno al SE de la tomografía a una profundidad de 5m aproximadamente, y el otro al NW de la tomografía a una profundidad de 3m aproximadamente; estos acuíferos están acumulándose solamente en el miembro superior de la Formación Los Santos. El acuífero del SE está delimitado por dos fracturas; mientras que el acuífero del NW se puede dividir a su vez en dos acuíferos que se comportan como uno solo, debido a la acción de una fractura que los divide. Sobre la línea de límite suelo - roca se aprecia el suelo, que está saturado de agua.

Las zonas moderadamente saturadas (tono amarillo, marrón y naranja) están rodeando a los acuíferos, lo que puede corresponder a una conexión de los acuíferos entre sí, de igual manera hay una conexión con la superficie, lo que indicaría nuevamente una recarga por aguas lluvias, al igual que en la TRE01 se aprecia la presencia de una fractura en contacto con la superficie. Algo evidenciable en la TRE02 es que al SE pasando el límite suelo roca, se aprecia roca sana y al NW roca fracturada y saturada con agua, este cambio está definido por la fractura más al SE de la Tomografía.

Se puede apreciar que a partir de 3 a 5 metros empieza la zona saturada con agua, a diferencia de los niveles estáticos del aljibe y el pozo que tienen un promedio mayor a 10 metros.

- TOMOGRAFÍA 3

Figura 46. a) Interpretación realizada a la TRE 03, donde se aprecian las zonas de mayor potencial de saturación de agua (color azul), interpretadas como acuíferos b) Corte geológico realizado a partir del Mapa Geológico de la Mesa de los Santos, en el mismo lugar donde se realizó la tomografía y a igual profundidad, se aprecian los tres miembros de la Formación Los Santos y un fallamiento de rumbo con componente normal. (Para interpretar y generar el corte geológico se utilizó el SEDT 04, la columna estratigráfica de la sección La Punta (Rincon, M. 2008.), el Mapa Geológico Plancha 120-IV-B y el software Google Earth).



La TRE03 oscila entre los 1615m - 1535m alcanzando así una profundidad de 80 m aproximadamente, tiene una longitud de 480m y generó un error absoluto de 1.7%.

La topografía es casi horizontal, con una pequeña depresión en su centro. *Figura 46.*

El aljibe 120-IV-B-047 R y pozo 120-IV-B-015 R son los más cercanos a las TRE02 y TRE03, estos puntos son obtenidos de “Investigación Geológica e Hidrogeológica en La Mesa de los Santos, Sector Nordeste de Curití y Borde Occidental del Macizo de Santander, Departamento de Santander”.

Código Estación: 120-IV-B-047 R (Aljibe)	Código Estación: 120-IV-B-015 R (Pozo)
Norte: 1257466 Este: 1113719	Norte: 1257564 Este: 1112062
Altitud: 1653	Altitud: 1616
Litología: Areniscas	Litología: Areniscas
Unidad Geológica: Los Santos	Unidad Geológica: Los Santos
Profundidad (m): 14,9	Condición del Punto: En uso
Condición del Punto: En uso	Propósito: Producción
Uso del Agua: Principal; Abas. Público	Uso del Agua: Principal, Abas. Domestico; Secundario, Galpones
Estadística del Uso del Agua: 225	Estadística del Uso del Agua:
Nivel Estático (m) (verano): 13,4	Nivel Estático (m) (verano): 0,35
Nivel Estático (m) (Invierno): 14,3	Nivel Estático (m) (Invierno): 12,09
	Caudal (l/s) (verano): 4,88
	Caudal (l/s) (Invierno):

Mediante el corte geológico realizado para la TRE03 se aprecian los tres miembros de la formación Los Santos, además dos fallas, la Falla Alto de Portachuelo y la Falla de la Quebrada Charco largo; generando tres bloques “tectónicos”, en el bloque central solo se encuentran el miembro superior y medio de la formación.

Mediante una línea punteada se delimita el límite suelo - roca, también se interpreta otro lineamiento no tan continuo que correspondería a una fractura al SW de la tomografía. Al igual que la TRE02 esta tomografía se encuentra cerca a la intersección de dos fallas locales.

En esta tomografía se aprecian dos zonas de interés saturadas de agua, correspondientes a acuíferos (tonos azules) uno al SW de la tomografía a una profundidad de 45m aproximadamente, y el otro al NE de la tomografía a una profundidad de 13m aproximadamente; estos acuíferos están acumulándose en los tres miembros de la Formación Los Santos. Sobre la línea de límite suelo roca se aprecia el suelo con saturación de agua.

Las zonas moderadamente saturadas (tono celeste a verde) están rodeando a los acuíferos, lo que corresponde a una posible conexión de los acuíferos entre sí, de igual manera hay una conexión con la superficie, lo que indicaría nuevamente una recarga por aguas lluvias, al igual que en la TRE01 y TRE02 se aprecia que las dos fracturas están en contacto con la superficie, pero solamente la del NE está permitiendo un movimiento de aguas. Esta fractura se encuentra en medio de los dos acuíferos, pero a su vez está conectándolos.

Se puede apreciar que a partir de los 5 metros ya hay saturación de agua, a diferencia de los niveles estáticos del aljibe y el pozo, con un promedio mayor a 10 metros.

Hincapié, G. y Veloza, J. 2009 junto con Moyano, I. 2010 en sus trabajos presentan una tabla propia de rangos resistividades asociados a los tipos de roca existentes en la Mesa de los Santos como resultado a la interpretación de los resultados de los

SEVs, *figura 47*. Estos valores de resistividad se asemejan a la interpretación realizada a las tres TREs, con la diferencia que Hincapié y Moyano presentan una relación con la litología y el fracturamiento.

Figura 47. Rangos de resistividad asociados a los tipos de roca existentes en la Mesa de los Santos, utilizadas por Hincapié, G. y Veloza, J. 2009 y Moyano, I. 2010 en sus trabajos.

RESISTIVIDAD ($\Omega.m$)	INTERPRETACIÓN
1 a 5	Arcillas, margas, arcillolitas y limolitas saturadas, suelos residuales saturados.
5 a 12	
12 a 30	
30 a 80	Arcillolitas y limolitas moderadamente saturadas. Areniscas altamente fracturadas saturadas.
80 a 200	Areniscas fracturadas con media saturación de agua. Calizas fracturadas saturadas.
200 a 490	Areniscas fracturadas con media a moderada saturación de agua. Calizas moderadamente saturadas.
490 a 1220	Areniscas moderadamente fracturadas y/o con moderada a baja saturación de agua Calizas con baja saturación y fracturamiento.
1220 a 3050	Areniscas pobremente fracturadas con baja saturación de agua. Calizas masivas.
3050 a 7630	Areniscas masivas secas a pobremente saturadas
Mayores a 7630	Rocas masivas secas

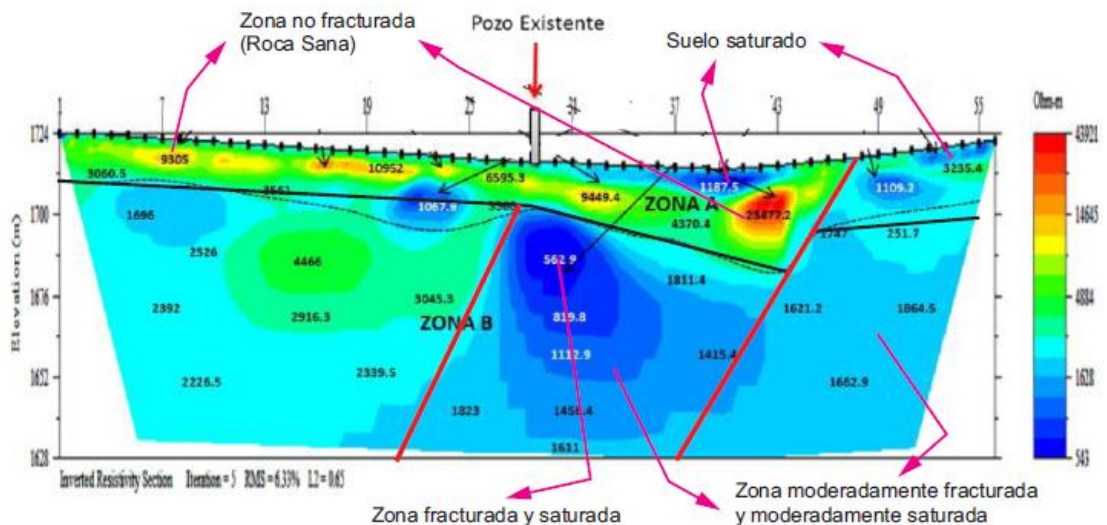
Fuente: Hincapié, G. y Veloza, J. 2009 [Adaptada por los autores]

La Tomografía Eléctrica 2D interpretada por Gómez, C.; Wandurraga, L.; Molina, M.; Sarmiento, M., 2014, presenta una extensión de 55 metros aproximadamente, alcanza una profundidad de 96 metros aproximadamente, *figura 39*. Realizando una reinterpretación a la tomografía *figura 48*, se observan dos fracturas, definidas mediante la interpretación de un lineamiento con tendencia horizontal, dividiendo la

Zona A de la Zona B (Zonas establecidas por Gómez, C.; Wandurraga, L.; Molina, M.; Sarmiento, M., 2014). La cinemática de estas fracturas no se puede establecer debido a que no se conoce el rumbo de la tomografía.

Estas fracturas dividen a la Zona B en tres bloques “tectónicos”, dos de ellos con saturación de agua (bloques a la derecha de la imagen), el otro con roca más sana (Bloque de la izquierda de la imagen). Se tiene en cuenta la misma escala que las TRE01, TRE02 y TRE03. Igualmente se aprecia un lineamiento

Figura 48. Reinterpretación de la Tomografía Eléctrica 2D de Gómez, C.; Wandurraga, L.; Molina, M.; Sarmiento, M., 2014



Realizando la nueva interpretación a la Tomografía 2D, se aprecia una semejanza con los resultados de las TREs, de igual manera la Tomografía 2D aclara que la acumulación de agua se da en los tres miembros, las fracturas son un componente

importante para esta acumulación, ya sean como medio impermeable o como canal de recarga y/o conexión al movimiento de aguas.

8.1.2 Resultados de los sondeos electromagnéticos

Los Sondeos Electromagnéticos en Dominio del Tiempo, *tabla 1*, representan un perfil de resistividad en profundidad de la roca. A grandes rasgos se aprecia que en todos los sondeos se pueden diferenciar cinco sectores debido a la variación de resistividades.

La eficiencia del sondeo se marca hasta la línea punteada verde, a partir de este punto se dificulta la realización de un claro procesamiento ya que se presenta mucho ruido en los resultados.

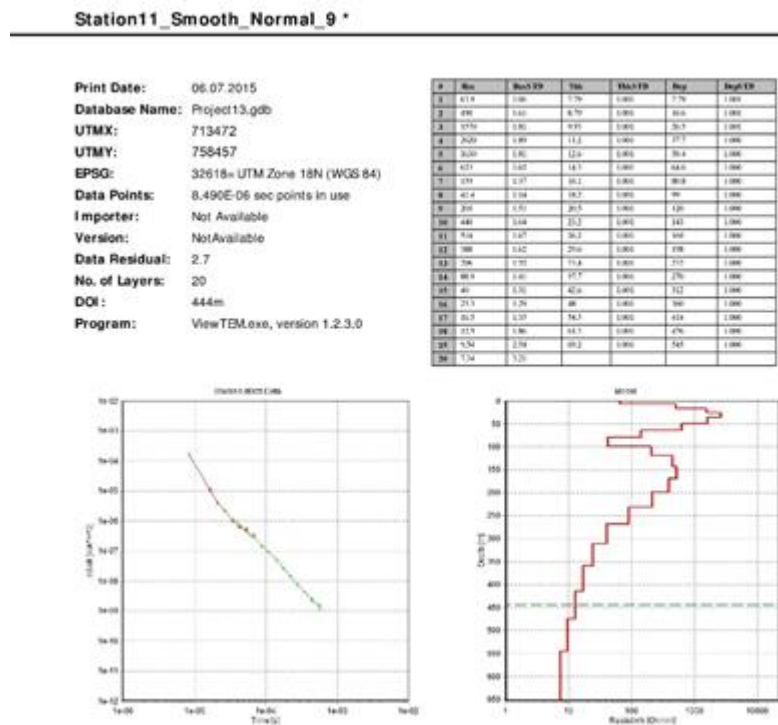
Tabla 1. Características de los sondeos electromagnéticos en dominio del tiempo.

	SEDT 01	SEDT 02	SEDT 03	SEDT 04	SEDT 05	SEDT 06
Profundidad efectiva (DOI)	444 m	377 m	398 m	417 m	457 m	349 m
Data Residual	2.7	3.1	1.4	1.5	1.7	1.3
Resistividad Máxima	2620 ohm*m	995 ohm*m	1870 ohm*m	1810 ohm*m	2870 ohm*m	718 ohm*m

Resistividad Mínima	7.34 ohm*m	41.5 ohm*m	73.2 ohm*m	55.3 ohm*m	54.4 ohm*m	55.2 ohm*m
------------------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------

- SEDT 01

Figura 49. Procesamiento del SEDT 01 mediante el software ViewTEM.



Las cinco zonas que se aprecian en el SEDT 01 se definen como, *figura 49*:

1. De 0 a 7.79 m de profundidad con un Valor de resistividad de 63.9 ohm*m.
2. De 7.79 a 80.8 m de profundidad con un valor de resistividad mínimo de 139 ohm*m y un valor máximo de 2620 ohm*m.
3. De 80.8 a 99 m de profundidad con un valor de resistividad de 41.4 ohm*m.
4. De 99 a 270 m de profundidad con un valor de resistividad mínimo de 88.9 ohm*m y un valor máximo de 514 ohm*m.
5. De 270 a 445 m de profundidad (Profundidad efectiva aproximada) con un valor de resistividad mínimo de 12.5 ohm*m y un valor máximo de 40 ohm*m.

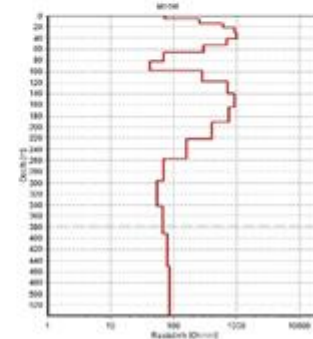
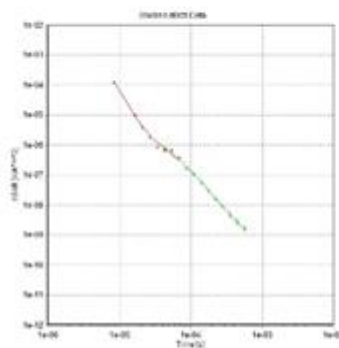
- **SEDT 02**

Figura 50. Procesamiento del SEDT 02 mediante el software ViewTEM.

Station3_Smooth_Normal_1 *

Print Date: 06.07.2015
 Database Name: Project13.gdb
 UTMX: 712484
 UTM Y: 753510
 EPSG: 32618= UTM Zone 18N (WGS 84)
 Data Points: 8.490E-06 sec points in use
 Importer: Not Available
 Version: Not Available
 Data Residual: 3.1
 No. of Layers: 20
 DOI: 377m
 Program: ViewTEM.exe, version 1.2.3.0

#	Sec	Start ID	End	Start ID	End	Start ID
1	73.7	0.00	4.47	0.000	5.43	1.000
2	226	0.00	7.26	0.000	11.7	1.000
3	509	0.00	8.79	0.000	22.9	1.000
4	974	0.76	9.25	0.000	31.8	1.000
5	100	0.75	20.4	0.000	43.0	1.000
6	499	0.68	11.0	0.000	31.4	1.000
7	227	0.00	13.3	0.000	30.9	1.000
8	44	0.27	15	0.000	41.7	1.000
9	41.9	0.27	17	0.000	48.7	1.000
10	260	0.50	19.3	0.000	138	1.000
11	734	0.84	19.0	0.000	179	1.000
12	101	0.97	28.8	0.000	168	1.000
13	748	0.96	27.0	0.000	199	1.000
14	801	0.82	18.1	0.000	133	1.000
15	574	0.80	15.1	0.000	136	1.000
16	48.9	0.00	16.7	0.000	197	1.000
17	518	0.67	44.8	0.000	142	1.000
18	817.7	0.99	76.0	0.000	191	1.000
19	75	0.27	37.1	0.000	436	1.000
20	60.9	0.00				



Las cinco zonas que se aprecian en el SEDT 02 se definen como, *figura 50*:

1. De 0 a 6.43 m de profundidad con un Valor de resistividad de 63.9 ohm*m.
2. De 6.43 a 66.7 m de profundidad con un valor de resistividad mínimo de 258 ohm*m y un valor máximo de 995 ohm*m.
3. De 66.7 a 98.7 m de profundidad con un valor de resistividad mínimo de 41.5 ohm*m y un valor máximo de 68 ohm*m.
4. De 98.7 a 258 m de profundidad con un valor de resistividad mínimo de 158 ohm*m y un valor máximo de 933 ohm*m.
5. De 258 a 375(Profundidad efectiva aproximada) m de profundidad con un valor de resistividad mínimo de 53.8 ohm*m y un valor máximo de 68.5 ohm*m.

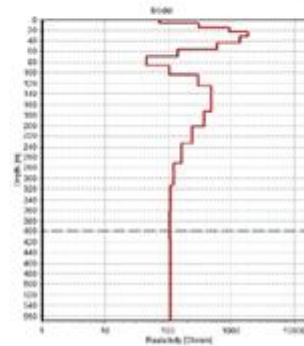
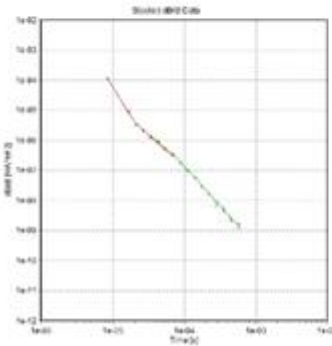
- **SEDT 03**

Figura 51. Procesamiento del SEDT 03 mediante el software ViewTEM.

Station5_Smooth_Normal_3 *

Print Date: 06.07.2015
 Database Name: Project13.gdb
 UTMX: 713955
 UTM Y: 761369
 EPSG: 32618- UTM Zone 18N (WGS 84)
 Data Points: 8.490E+06 sec points in use
 Importer: Not Available
 Version: Not Available
 Data Residual: 1.4
 No. of Layers: 20
 DOI: 398m
 Program: ViewTEM.exe, version 1.2.3.0

#	Res	Depth (m)	Min	Max	Depth (m)	Min	Max
1	73.2	1.11	6.78	1000	6.78	1000	
2	141	1.59	70.3	1000	70.3	1000	
3	141	1.76	86.2	1000	86.2	1000	
4	102	1.86	86.2	1000	86.2	1000	
5	106	1.81	11	1000	11	1000	
6	106	1.07	11.4	1000	11.4	1000	
7	141	1.78	14	1000	14	1000	
8	141.7	1.12	15.9	1000	15.9	1000	
9	102	1.18	17.9	1000	17.9	1000	
10	106	1.76	30.7	1000	30.7	1000	
11	476	1.07	31.8	1000	31.8	1000	
12	485	1.07	31.8	1000	31.8	1000	
13	106	1.08	39.3	1000	39.3	1000	
14	102	1.01	42.8	1000	42.8	1000	
15	101	1.74	17.1	1000	17.1	1000	
16	115	1.02	44.5	1000	44.5	1000	
17	107	1.07	47.2	1000	47.2	1000	
18	106	1.04	71.7	1000	71.7	1000	
19	107	1.04	82.2	1000	82.2	1000	
20	106	0.80					

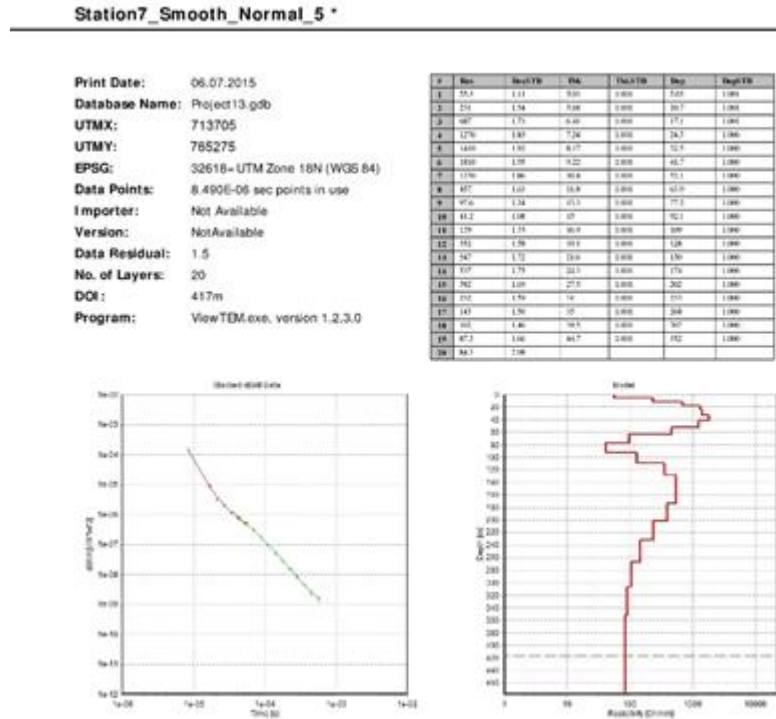


Las cinco zonas que se aprecian en el SEDT 03 se definen como, *figura 51*:

1. De 0 a 6.78 m de profundidad con un Valor de resistividad de 73.2 ohm*m.
2. De 6.78 a 70.3 m de profundidad con un valor de resistividad mínimo de 141 ohm*m y un valor máximo de 1870 ohm*m.
3. De 70.3 a 86.2 m de profundidad con un valor de resistividad de 44.5 ohm*m.
4. De 86.2 a 272 m de profundidad con un valor de resistividad mínimo de 102 ohm*m y un valor máximo de 485 ohm*m.
5. De 272 a 400 (Profundidad efectiva aproximada) m de profundidad con un valor de resistividad mínimo de 106 ohm*m y un valor máximo de 123 ohm*m.

- SEDT 04

Figura 52. Procesamiento del SEDT 04 mediante el software ViewTEM.



Las cinco zonas que se aprecian en el SEDT 04 se definen como, *figura 52*:

1. De 0 a 5.03 m de profundidad con un Valor de resistividad de 55.3 ohm*m.
2. De 5.03 a 77.2 m de profundidad con un valor de resistividad mínimo de 97.2 ohm*m y un valor máximo de 1810 ohm*m.
3. De 77.2 a 92.1 m de profundidad con un valor de resistividad de 41.2 ohm*m.

4. De 92.1 a 307 m de profundidad con un valor de resistividad mínimo de 102 ohm*m y un valor máximo de 547 ohm*m.
5. De 307 a 420(Profundidad efectiva aproximada) m de profundidad con un valor de resistividad mínimo de 84.3 ohm*m y un valor máximo de 87.3 ohm*m.

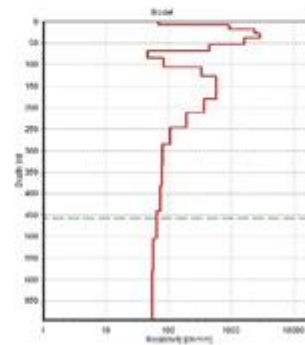
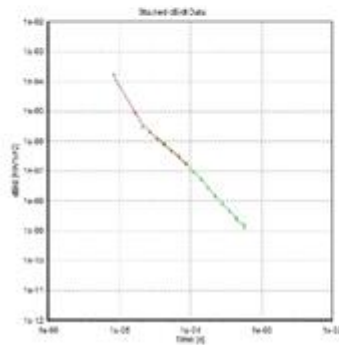
- **SEDT 05**

Figura 53. Procesamiento del SEDT 05 mediante el software ViewTEM.

Station9_Smooth_Normal_7 *

Print Date: 06.07.2015
 Database Name: Project13.gdb
 UTMX: 713055
 UTM Y: 755654
 EPSG: 32618- UTM Zone 18N (WGS 84)
 Data Points: 8.490E-06 sec points in use
 Importer: Not Available
 Version: Not Available
 Data Residual: 1.7
 No. of Layers: 20
 DOI: 457m
 Program: ViewTEM.exe, version 1.2.3.0

#	Res	Res STD	RA	TA/RTB	Slp	Slp STD
1	197.2	1.04	9.28	1.000	9.28	1.000
2	161	1.06	9.11	1.000	17.4	1.000
3	260	1.07	8.95	1.000	26.2	1.000
4	2070	1.12	11.9	1.000	33.4	1.000
5	5070	1.42	23.4	1.000	37.5	1.000
6	484	1.79	37.7	1.000	46.7	1.000
7	457	1.14	47.9	1.000	50.9	1.000
8	62.7	1.17	64.4	1.000	55.8	1.000
9	776	1.15	23.9	1.000	52.7	1.000
10	676	1.48	34.7	1.000	57.0	1.000
11	764	1.71	27.9	1.000	6.00	1.000
12	773	1.66	10.9	1.000	51.1	1.000
13	239	1.51	37.9	1.000	20.7	1.000
14	896	1.79	49.0	1.000	20.7	1.000
15	76.8	1.40	45.1	1.000	17.0	1.000
16	77.7	1.76	56.0	1.000	16.1	1.000
17	74.2	1.27	37.7	1.000	6.00	1.000
18	44.9	1.66	47.0	1.000	7.96	1.000
19	573	1.85	73.9	1.000	17.0	1.000
20	74.4	1.66				



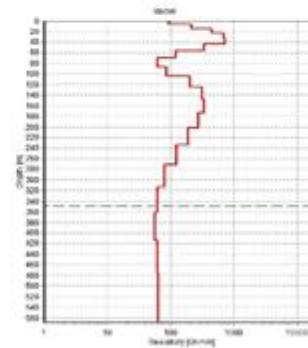
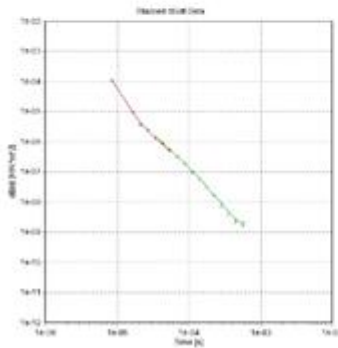
Las cinco zonas que se aprecian en el SEDT 05 se definen como, *figura 53*:

1. De 0 a 8.28 m de profundidad con un Valor de resistividad de 69.2 ohm*m.
 2. De 8.28 a 68.7 m de profundidad con un valor de resistividad mínimo de 440 ohm*m y un valor máximo de 2870 ohm*m.
 3. De 68.7 a 85.9 m de profundidad con un valor de resistividad de 45.7 ohm*m.
 4. De 85.9 a 287 m de profundidad con un valor de resistividad mínimo de 84.5 ohm*m y un valor máximo de 576 ohm*m.
 5. De 287 a 460(Profundidad efectiva aproximada) m de profundidad con un valor de resistividad mínimo de 74.2 ohm*m y un valor máximo de 78.8 ohm*m.
- **SEDT 06**

Figura 54. Procesamiento del SEDT 06 mediante el software ViewTEM.

Print Date: 06.07.2015
 Database Name: Project13.gdb
 UTMX: 714026
 UTM Y: 763345
 EPSG: 32618= UTM Zone 18N (WGS 84)
 Data Points: 8,490E+06 sec points in use
 Importer: Not Available
 Version: Not Available
 Data Residual: 1.3
 No. of Layers: 20
 DOI: 343m
 Program: ViewTEM.exe, version 1.2.3.0

#	Res	Res(Y)	TA	TA(Y)	Res	Depth
1	92.2	1.01	6.78	1.00	6.78	1.00
2	718	1.76	70.4	1.00	70.4	1.00
3	417	1.01	86.2	1.00	71.3	1.00
4	119	1.08	6.78	1.00	12.8	1.00
5	718	1.08	70.4	1.00	41.9	1.00
6	119	1.01	86.2	1.00	76.3	1.00
7	119	1.38	242	1.00	76.3	1.00
8	60.4	1.77	300	1.00	60.3	1.00
9	60.4	1.71	375	1.00	78.4	1.00
10	78.7	1.49	202	1.00	124	1.00
11	333	1.01	272	1.00	147	1.00
12	333	1.76	272	1.00	171	1.00
13	272	1.71	272	1.00	202	1.00
14	333	1.77	304	1.00	174	1.00
15	119	1.08	375	1.00	172	1.00
16	78.7	2.36	453	1.00	174	1.00
17	60.4	1.71	471	1.00	168	1.00
18	37.2	1.24	503	1.00	144	1.00
19	60.4	1.62	603	1.00	174	1.00
20	41.9	0.66				

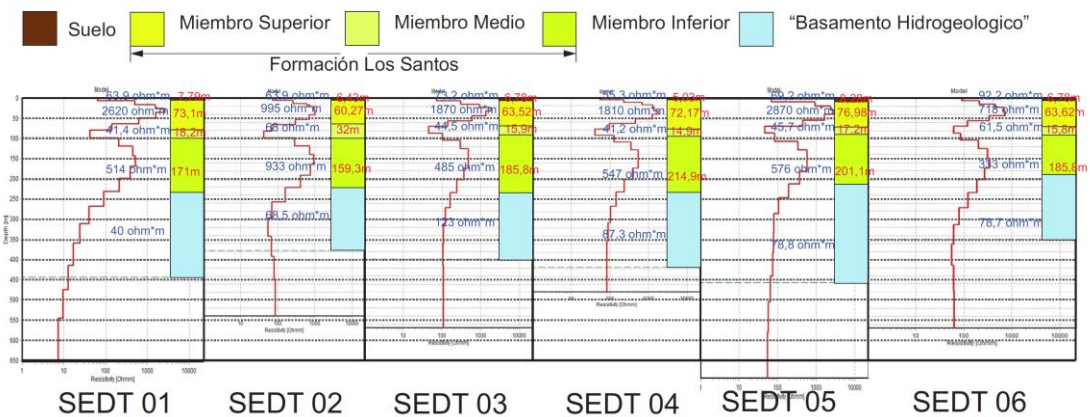


Las cinco zonas que se aprecian en el SEDT 06 se definen como, *figura 54*:

1. De 0 a 6.78 m de profundidad con un Valor de resistividad de 92.2 ohm*m.
2. De 6.78 a 70.4 m de profundidad con un valor de resistividad mínimo de 119 ohm*m y un valor máximo de 718 ohm*m.
3. De 70.4 a 86.2 m de profundidad con un valor de resistividad de 61.5 ohm*m.
4. De 86.2 a 272 m de profundidad con un valor de resistividad mínimo de 86.8 ohm*m y un valor máximo de 333 ohm*m.
5. De 272 a 300(Profundidad efectiva aproximada) m de profundidad con un valor de resistividad mínimo de 60.4 ohm*m y un valor máximo de 78.7 ohm*m

Para la interpretación, *figura 55*, los SEDT se correlacionan de manera simultánea; para ello se utiliza la interpretación visual que se deriva de las imágenes anteriores (*figuras 49, 50, 51, 52, 53 y 54*) y las siguientes tablas (*tabla 1, 2, 3, 4*).

Figura 55. Interpretación de los valores de resistividad para cada uno de los SEDT, ordenados de izquierda a derecha (SEDT 01-02-03-04-05-06).



Las cinco zonas se definen así:

Zona 1= Suelo.

Zona 2= Miembro Superior de la Formación Los Santos.

Zona 3= Miembro Medio de la Formación Los Santos.

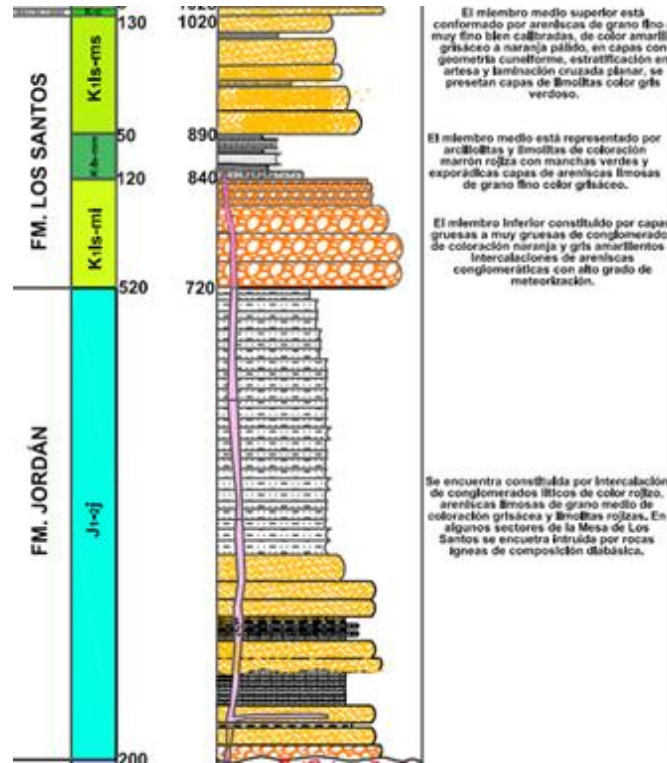
Zona 4= Miembro Inferior de la Formación Los Santos.

Zona 5= "Basamento Hidrogeológico"

Tabla 2. Valores de resistividad máxima registrada para cada una de las cinco zonas interpretadas en los SEDT realizados en la Mesa de Los Santos para la Formación Los Santos.

Resistividad Máxima (ohm*m)	SEDT 01	SEDT 02	SEDT 03	SEDT 04	SEDT 05	SEDT 06
Suelo	63.9	63.9	73.2	55.3	69.2	92.2
M. Superior	2620	995	1870	1810	2870	718
M. Medio	41.4	68	44.5	41.2	45.7	61.5
M. Inferior	514	933	485	547	576	333
“Basamento Hidrogeológico”	40	68.5	123	87.3	78.8	78.7

Figura 56. Columna estratigráfica de la Formación Los Santos y Formación Jordán en la Mesa de Los Santos.



Fuente: Vargas, C. 2008 (Anexo 2. Columna Estratigráfica Generalizada Mesa de Los Santos.)

[Adaptada por los autores]

Los valores de resistividad para el Suelo se aproximan entre ellos; el M. Superior presenta valores altos de resistividad entre 995 y 2870 ohm*m; el M. Medio presenta dos valores bajos de resistividad entre 41.2 y 68 ohm*m; el M. Inferior presenta un valor intermedios de resistividad entre 333 y 933 ohm*m; los valores de resistividad para el “Basamento Hidrogeológico” son limitados, debido a la profundidad en que se encuentra, ya que a mayor profundidad el sondeo presenta mayor ruido, presenta valores de resistividad baja entre 40 y 123 ohm*m.

Tabla 3. Espesores obtenidos para cada una de las cinco zonas interpretadas en los SEDT realizados en la Mesa de Los Santos para la Formación Los Santos.

Espesor (m)	SEDT 01	SEDT 02	SEDT 03	SEDT 04	SEDT 05	SEDT 06
Suelo	7.79	6.43	6.78	5.03	8.28	6.78
M. Superior	73.1	60.27	63.52	72.17	76.98	63.62
M. Medio	18.2	32	15.9	14.9	17.2	15.8
M. Inferior	171	159.3	185.8	214.9	201.1	185.8
“Basamento Hidrogeológico”	No se define espesor debido a que no se registra límite inferior o base.					

Se aprecia que los espesores son cercanos entre sí para el Suelo; el M. Superior también presenta valores cercanos entre sí; en el M. Medio se aprecia un valor alto de espesor (32 m), los demás valores son semejantes; en el M. Inferior los valores son cercanos; el “Basamento Hidrogeológico” no presenta espesor debido a que los sondeos no logran profundidad para establecer su base.

Tabla 4. Valor de Resistividad Promedio y Espesor promedio para cada una de las cinco zonas establecidas mediante los SEDT realizados en la Mesa de Los Santos para la Formación Los Santos.

	Promedio Espesor (m)	Promedio Resistividad (ohm*m)
Suelo	6.85	69.62
M. Superior	68.28	1813.83
M. Medio	19	50.35
M. Inferior	186.32	564.67
“Basamento Hidrogeológico”	X	79.38

De igual manera se realiza un corte geológico con ayuda de los espesores obtenidos en cada uno de los SEDT, *figura 57*.

Figura 58. Valores de resistividad de la TRE 01 ingresados en el programa LeapFrog Geo 2.2.1.

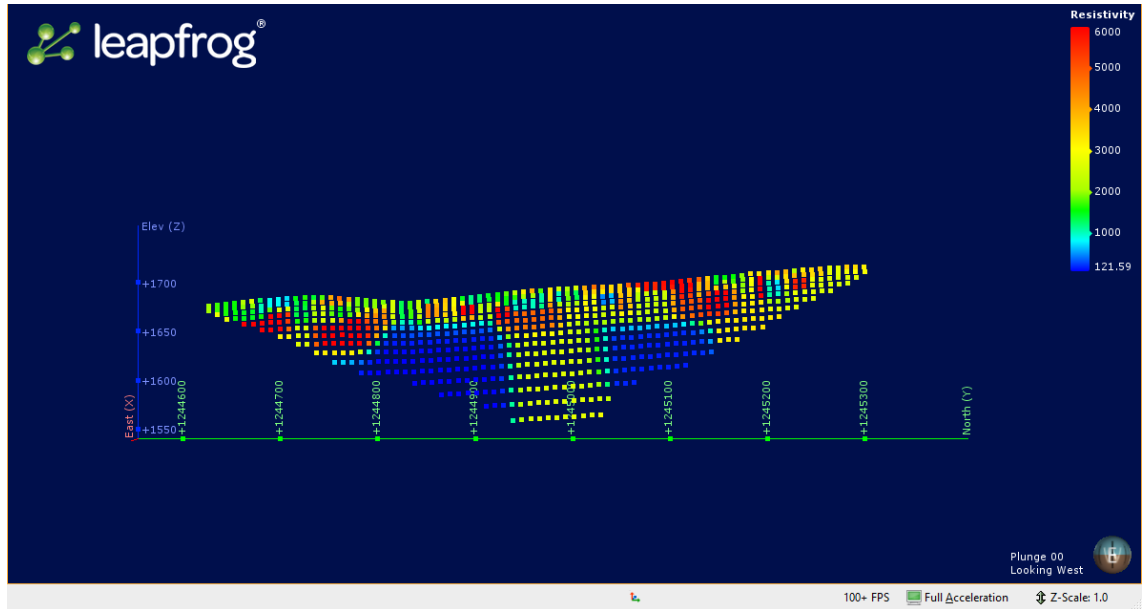
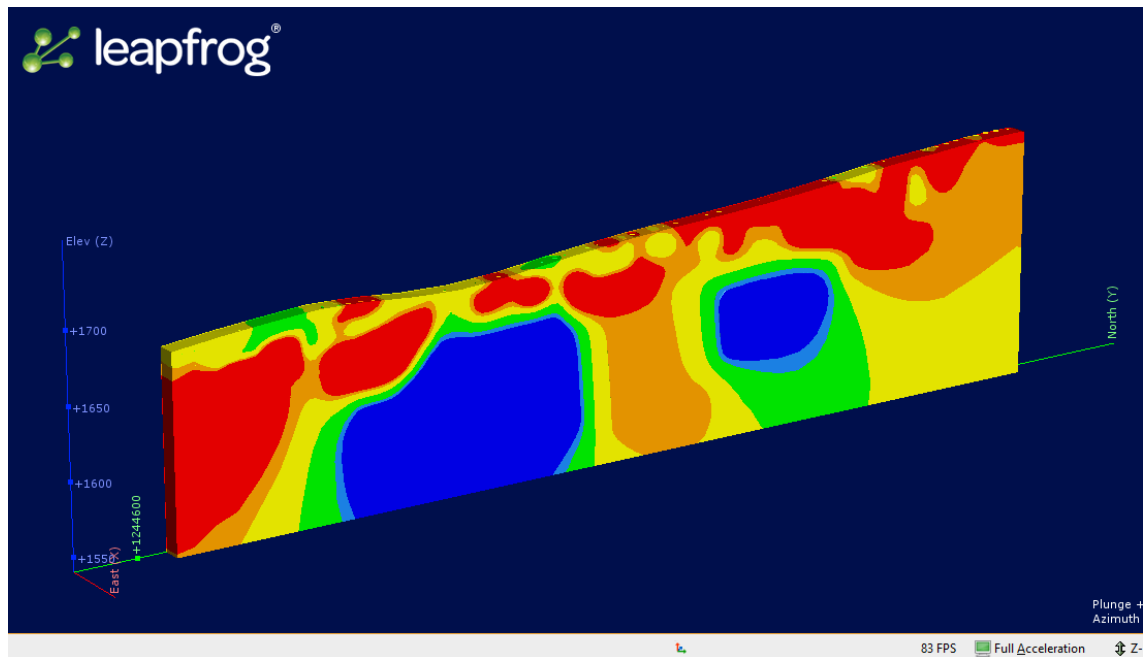


Figura 59. Simulación de modelo mediante LeapFrog Geo, donde el tono azul corresponde a resistividades menores a 500 ohm*m, el tono celeste a resistividades entre 500 a 700 ohm*m, el tono verde a resistividades entre 700 a 1500 ohm*m, el tono amarillo resistividades entre 1500 a 2500 ohm*m, el tono naranja resistividades entre 2500 a 3000 ohm*m, y el tono rojo corresponde a resistividades superiores a 3000 ohm*m.



Modelamiento TRE 2 y TRE 3

Las TRE2 y TRE3, *figuras 60 y 61*, se procesan en LeapFrog Geo 2.2.1 de manera conjunta, ya que están se intersectan. Las TREs ahora manejan una escala común en los tonos de resistividad, facilitando la interpretación por colores.

Figura 60. Valores de resistividad de la Tomografía de Resistividad Eléctrica 2 y 3 ingresados en el programa LeapFrog Geo, donde se aprecia la intersección de las dos tomografías.

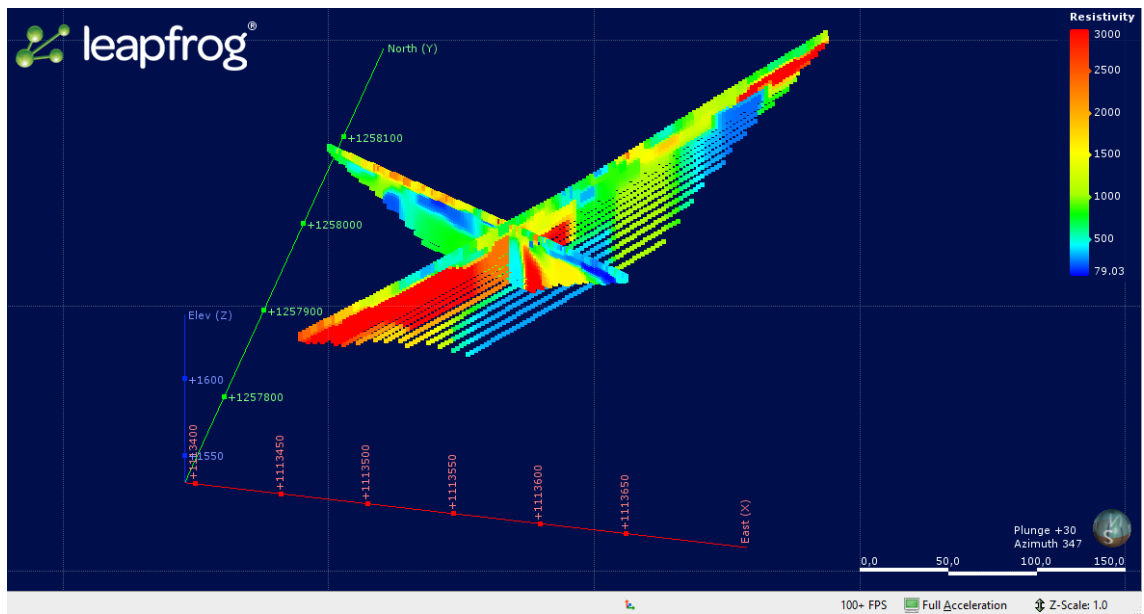
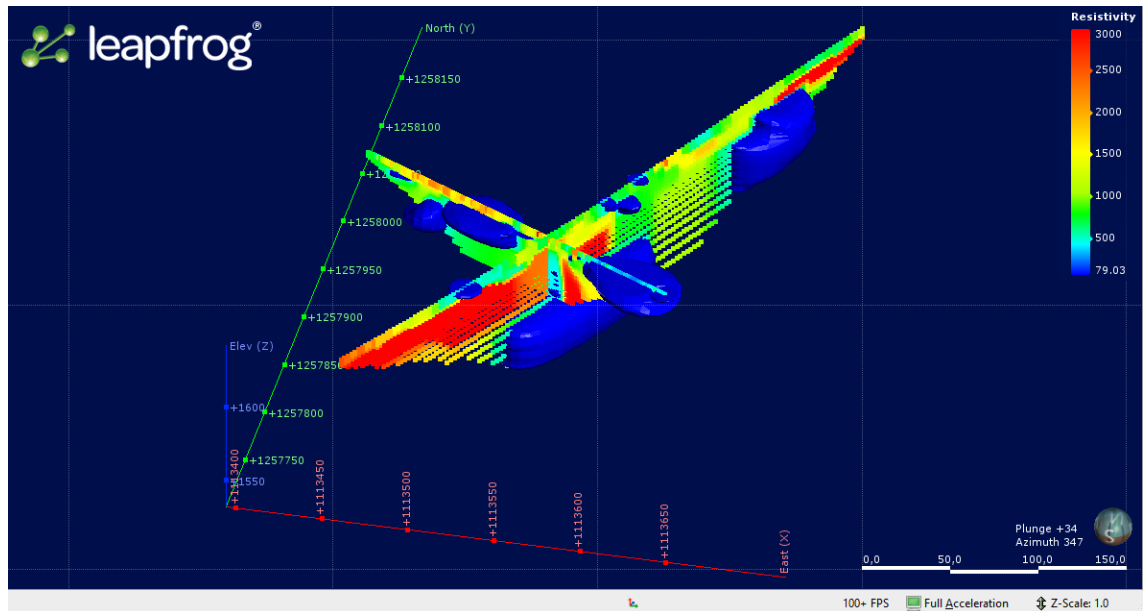
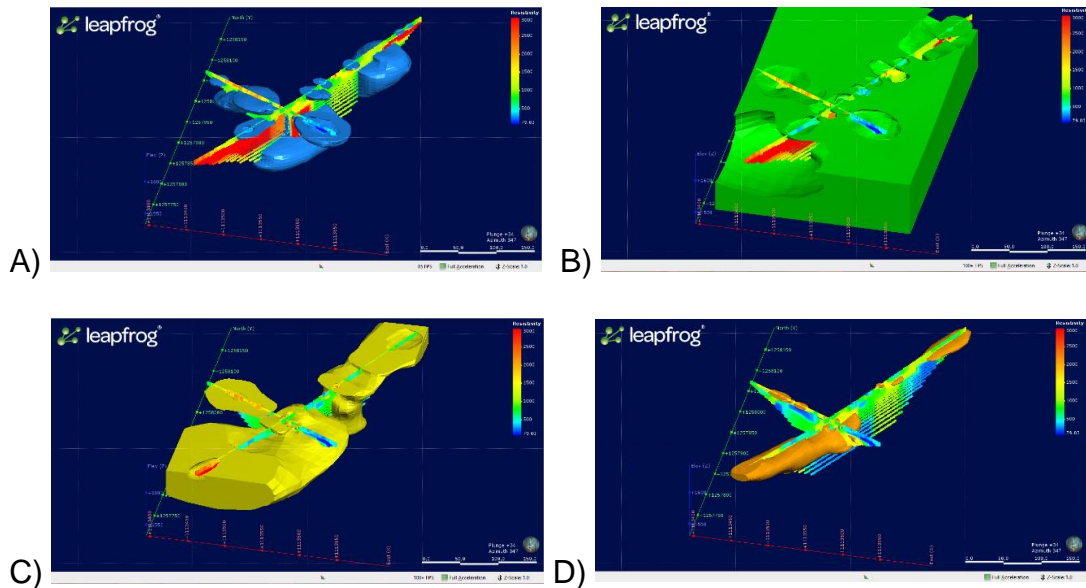


Figura 61. Simulación de modelo 3D a partir de las dos tomografías mediante LeapFrog Geo, donde se aprecian las resistividades menores a 500 ohm*m.



Los valores inferiores a los 500 ohm*m serían las zonas con saturación de agua, se aprecian dos sectores a profundidad definidos como acuíferos; más cercano a la superficie se encuentran saturaciones de agua en el suelo.

Figura 62. Simulación de modelo 3D a partir de las dos tomografías mediante LeapFrog Geo, donde se aprecian las resistividades de 500 a 700 ohm^*m (A); resistividades de 700 a 900 ohm^*m (B); resistividades de 900 a 1600 ohm^*m (C); resistividades mayores a 1600 ohm^*m (D).



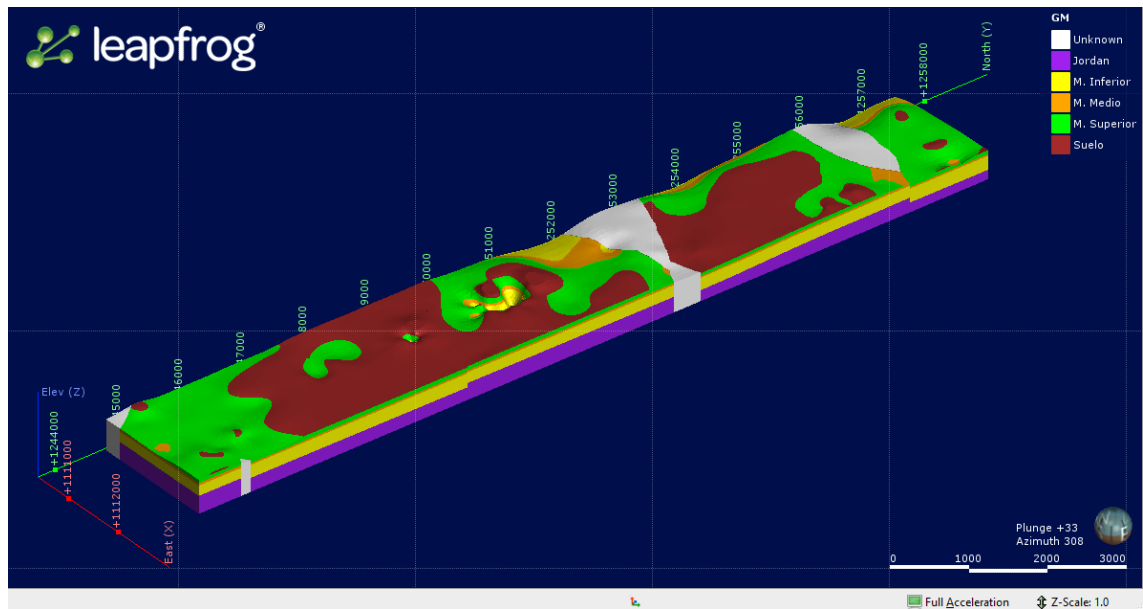
En el rango de 500 a 700 ohm^*m se observa que en el punto de intersección hay una anomalía de resistividad eléctrica, la cual correspondería a agua infiltrada, este sitio se puede interpretar como el punto donde se está recargando uno de los acuíferos profundos.

EL modelo generado permite observar que el área estudiada está dominada por resistividades relacionadas a zonas saturadas con agua, también se pueden evidenciar las fracturas establecidas para TRE02 y TRE03, de una manera más conjunta y dinámica

Modelamiento Sondeos

Mediante el software LeapFrog Geo 2.2.1 se generó un modelo 3D en base a los seis SEDT para un pequeño bloque de la Mesa de los Santos, para apreciar el comportamiento de los miembros de la Formación Los Santos. *Figura 63.*

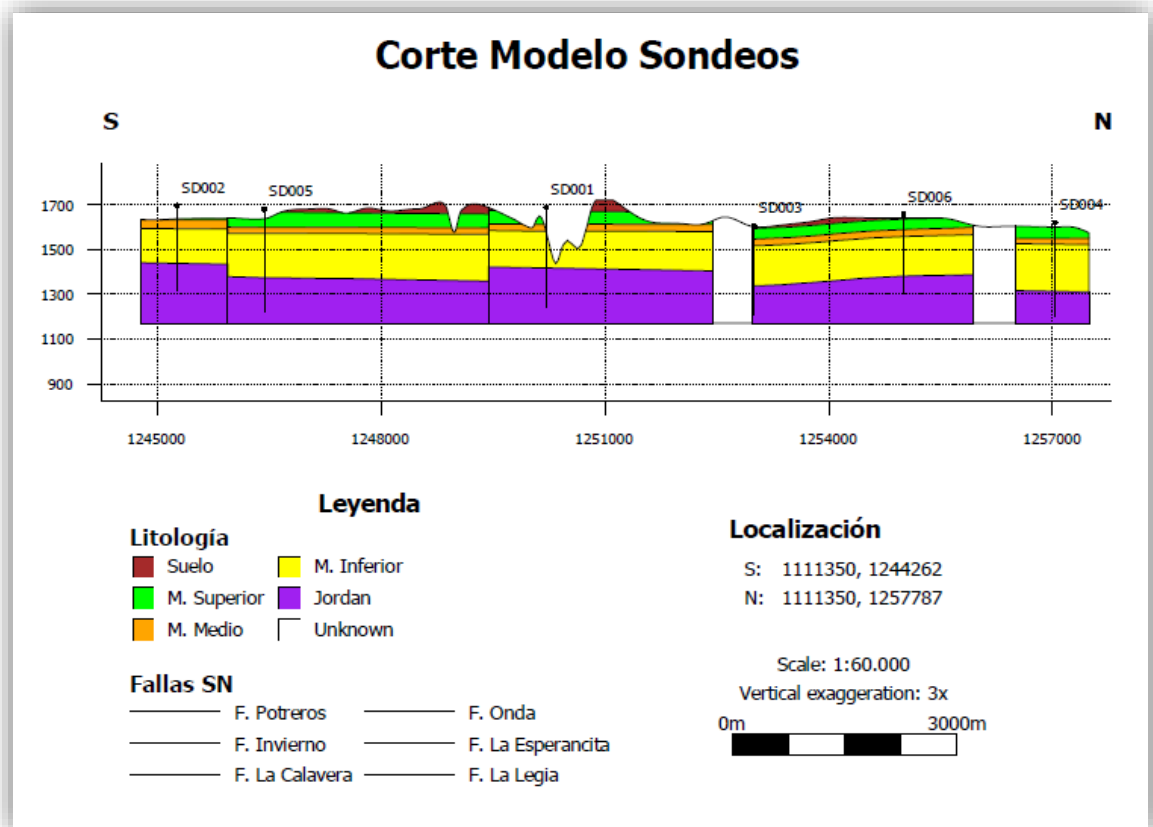
Figura 63. Modelo 3D obtenido a partir de los seis sondeos realizados para la Formación Los Santos y cada uno de sus miembros, además se observa la disposición del basamento hidrogeológico, Formación Jordán, y los depósitos de cuaternario.



De igual manera a través del software se pudo realizar el corte mostrado a continuación, *figura 64*, a este se le aplicó una exageración en vertical de 3 veces

el valor real, de esta manera se logran observar los buzamientos de los miembros y con la interpretación que realiza el software se aprecia una exageración del espesor del suelo, también influyen los pocos puntos de SEDT realizados al momento de generar el modelo 3D.

Figura 64. Corte geológico obtenido a partir del modelo 3D mediante LeapFrog Geo.

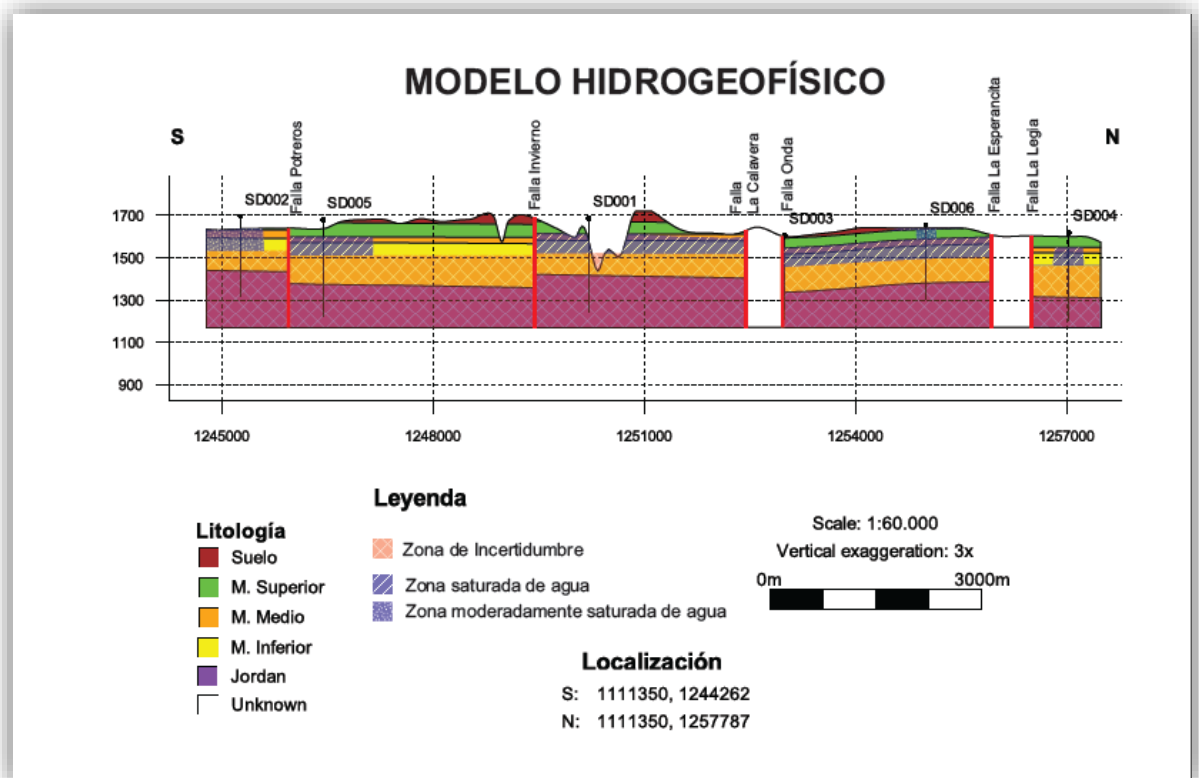


El corte obtenido correspondería al Modelo Litológico para la Formación los Santos en la Mesa de Los Santos, Santander, los bloques en blanco son producto a que en

esas áreas no se posee información de SEDTs que aporten datos de espesores para el modelamiento.

8.3 PLANTEAMIENTO DEL MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOFISICO PRELIMINAR DE LA FORMACIÓN LOS SANTOS

Figura 65. Modelo Hidrogeofísico para la Formación Los Santos en la Mesa de Los Santos-Santander. En el cual se aprecia la disposición de los acuíferos en base una interpretación asociada los resultados de las tomografías de resistividad eléctrica y el modelo Litológico obtenido mediante los sondeos electromagnéticos, con apoyo en la bibliografía.



Para el planteamiento del modelo preliminar hidrogeofísico de la Formación Los Santos se parte del Modelo Litológico, de tal manera que se conoce el comportamiento de cada uno de los Miembros de la Formación los Santos. Se procede a una interpretación en conjunto de las TREs y el Modelo Litológico.

La Formación los Santos en toda su extensión puede presentar acumulación de agua, esto se observó en las TREs, pero teniendo como limitante el fracturamiento y el comportamiento de las fracturas. Esto concuerda con la bibliografía consultada. Por lo tanto se representó en el modelo posibles zonas con alta saturación de agua (representado en las TREs como los sectores con resistividades inferiores a 1000 ohm*m).

El Miembro Superior según la bibliografía se considera como el de mayor potencial para la acumulación de agua, sin embargo en los resultados se observan valores de resistividad entre los 718 a 2620 ohm*m para los SEDTs, solamente los SEDT02 y SEDT06 (995 y 718 ohm*m respectivamente) presentan valores de resistividad de saturación moderada de agua. De igual manera los resultados de las TREs para el Miembro Superior relacionan a este miembro con una saturación moderada, con algunas zonas con saturación alta de agua.

El Miembro Medio por su litología registra valores de resistividad inferiores a los 70 ohm*m en los SEDTs, no se define un comportamiento hidrogeológico. Al momento de observar los resultados de las TREs, se aprecia en la TRE01 y la TRE03 que el miembro medio está comportándose como acuífero, esto correspondería a que el Miembro Medio presenta saturación de agua producto del fracturamiento, discriminando su característica litológica.

El Miembro Inferior en los SEDTS presenta valores de resistividad inferiores y muy cercanos a los 500 ohm*m, con excepción del SEDT02 con 933 ohm*m, interpretándose como una zona con saturación alta de agua. En la TRE01 y TRE03 donde alcanza a observarse este miembro, también es posible apreciar que en este hay saturación de agua. Se debe tener en cuenta que solo se delimita la parte superior del miembro debido a que las TRES no registran todo su espesor, y por esto se establece una zona de incertidumbre.

Las fracturas identificadas en las TRES pueden presentar una relación cinemática con la tectónica local; este marcado fracturamiento puede servir como trampa o vía para el flujo de agua. Como ya se ha mencionado antes la principal razón para la saturación y acumulación de agua en los miembros de la Formación los Santos se debe a la porosidad secundaria; en el Mapa de distribución espacial de la densidad de fracturamiento en la Mesa de Los Santos de Contreras, N. 2008 el Modelo Hidrogeofísico se encuentra en una zona de densidad media de fracturamiento.

En base al Mapa de Bloques estructurales de la Mesa de Los Santos establecidos por Vargas, C. 2008., el Modelo Hidrogeofísico se encontraría en dos bloques estructurales, divididos por la Falla Invierno, el Bloque al Norte corresponde al Bloque Tabacal y el Bloque al Sur corresponde al Bloque Mojarra. De tal manera que al Norte el diaclasamiento presenta una dirección preferencial N70-80W y buzamiento muy marcado en 80-90°. Al Sur el diaclasamiento muestra una dirección preferencial N70-80W y buzamiento muy marcado en 80-90°. En el Mapa de distribución espacial de los rangos de buzamiento de las diaclasas en la Mesa de Los Santos de Contreras, N. 2008, al Norte define buzamientos entre 40-70°, y al Sur buzamientos entre 70-80°. Estos rangos de buzamiento aunque discrepan entre sí, pueden facilitar la infiltración de las aguas lluvias al subsuelo; con un flujo del

agua subterránea N70-80W, según el Mapa de distribución de diaclasas abiertas y cerradas en la Mesa de Los Santos de Contreras, N. 2008, el Modelo se localiza en un sector continuo de diaclasas abiertas, lo que facilitaría el flujo de agua subterránea.

9. CONCLUSIONES

- Mediante la aplicación de los Sondeos Electromagnéticos en Dominio del Tiempo (SEDT) fue posible establecer las resistividades y los espesores promedios para los miembros de la Formación Los Santos, 1813.83 ohm*m y 68.28m para el miembro superior, 50.35 ohm*m y 19m para el miembro medio 564.67 ohm*m y 186.32 m para el miembro inferior.
- Se presentó un corte geológico realizado por el software LeapFrog Geo 2.2.1 a partir de los datos obtenidos a través de la aplicación de los SEDT, este corte atraviesa la formación los santos en dirección S-N y genero un modelo litológico del subsuelo.
- Las Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE) permitieron definir zonas en la Formación Los Santos con resistividades inferiores a 1000 ohm*m, estas áreas se pueden definir como zonas saturadas con agua subterránea.
- El agua se encuentra almacenada en los tres miembros de la Formación; debido a que las TRE no permitieron definir los límites horizontales de cada miembro, se compararon las TRE con los cortes geológicos realizados para cada una de las tomografías a la misma escala, los espesores de cada miembro se definieron mediante los resultados obtenidos a través de los SEDT y las columnas estratigráficas disponibles de la formación Los Santos.

- Los valores de resistividad obtenidos mediante la aplicación de las TRE y la interpretación para cada una de ellas coinciden con los valores de resistividad definidos por Hincapié, G. y Veloza, J. 2009 y Moyano, I. 2010. En el trabajo “Recursos del subsuelo: Informe hidrogeológico de La Mesa de Los Santos”.
- Los métodos indirectos TRE y SEDT ofrecen una buena correlación cualitativa, ya que los resultados obtenidos coinciden con estudios anteriores y con la geología de la zona.
- Los acuíferos presentes en la Formación los Santos están fracturados, la primera hipótesis a la recarga de los acuíferos corresponde a la infiltración proveniente de las aguas lluvias, esto se puede observar en las tomografías donde se aprecian zonas de resistividades bajas a intermedias que conectan a los acuíferos con la superficie.
- La acumulación y transporte de las aguas es producto del diaclasamiento de la Formación Los Santos, el movimiento de aguas sigue el rumbo de las diaclasas, que varía dependiendo el sector de la Mesa de los Santos.

10. RECOMENDACIONES

- Se propone realizar más TRE Y SEDT sobre la misma línea de corte para una realizar una mejor correlación e interpretación de los resultados, y a su vez utilizar los mismos para generar un modelo hidrogeofísico más completo de la Formación los Santos ya sea mediante un modelo 2D o a través del software LeapFrog Geo un modelo 3D.
- Se recomienda aplicar otros métodos geofísicos que puedan identificar las estructuras horizontales presentes en el subsuelo, como lo es la refracción sísmica.
- Realizar un plan para controlar la explotación de aguas subterráneas en la Formación los Santos por parte de los habitantes de esta región, ya que esta formación es la principal portadora de este recurso hídrico en la zona de la Mesa De los Santos.

BIBLIOGRAFÍA

ADARME AMADO, Iván René. Análisis espacial de cuatro parámetros Físico-Químicos del agua subterránea, en la Mesa de Los Santos Departamento de Santander. Bucaramanga, 2008, 34p. Trabajo de Investigación presentado como requisito para optar el título de Geólogo. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físicoquímica.

ALDANA MARTÍNEZ, Sonia Cristina. Estratigrafía de la Formación Los Santos en las secciones de La Navarra y El Calicho en la Mesa de Los Santos (Departamento de Santander). Bucaramanga, 2008, 39p. Trabajo de investigación presentado como requisito para obtener el título de Geóloga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físicoquímica.

ARLANDI RODRÍGUEZ, Manuel. Geofísica aplicada a la obra civil. Madrid, 2005.

CONTRERAS VASQUEZ, Nathalia María. Análisis del fracturamiento presente en la Formación Los Santos al Noreste y Centro de la Mesa de Los Santos, Departamento de Santander. Bucaramanga, 2008, 27p. Trabajo de Investigación para optar el Título de Geóloga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físicoquímica.

DIAZ ALVAREZ, Eliana Jimena. Análisis preliminar del potencial hidrogeológico en La Mesa de los Santos, región central del Departamento de Santander. Bucaramanga, 2008, 36p. Trabajo de Investigación para optar el Título de Geóloga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físicoquímica.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Compendio, tesis y otros trabajos de grado. Quinta Actualización. Bogotá. ICONTEC, 2002.

GOMÉZ GOMÉZ, Jesús David; CUERVO SILVA, Rubén Giovanni. Estudio geológico enfocado a la caracterización paisajística de la Mesa de los Santos, Santander,

Colombia. Bucaramanga, 2012, 181p. Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de Geóloga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Fisicoquímica.

GOMEZ SANCHEZ, Carlos Fabian; WANDURRAGA JIMENEZ, Leonardo; MOLINA NARVAEZ, Mabell; SARMIENTO ROMERO, Mayra. Análisis de la situación hidrogeológica de la Mesa de los Santos, Departamento de Santander. Bogotá D.C, 2014, 114p. Trabajo de grado para obtener el título de especialista en Recursos Hídricos. Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería, Programa de especialización en recursos Hídricos.

GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN MINERALOGÍA, PETROLOGÍA Y GEOQUÍMICA-MINPETGEO-UIS E INGEOMINAS. "EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA PRELIMINAR DE LAS UNIDADES GEOLÓGICAS DE LA MESA DE LOS SANTOS, SANTANDER". Boletín de Geología vol. 31, N° 1, enero - junio de 2009, P. 61-70.

HINCAPIE, Gloria, VELOZA, Jairo. RECURSOS DEL SUBSUELO: INFORME HIDROGEOLÓGICO DE LA MESA DE LOS SANTOS. Bogotá, octubre 2009, 75p. INGEOMINAS.

MANILLA ACEVES, A.A. (2003)"Geofísica aplicada en los proyectos básicos de ingeniería civil"; Secretaria de comunicaciones y transportes instituto Mexicano del transporte. Publicación Técnica No. 229. Sanfandila, Qro.

MELANO ROJAS, Luis Francisco. Mineralogía de arcillas y estudio microestructural de la Formación los Santos en la Mesa de Los Santos y sector de Curiti. Bucaramanga, 2008, 37p. Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de Geólogo. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Fisicoquímica.

MOYANO NIETO, Ismael Enrique. PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES –SEV- EN LA MESA DE LOS SANTOS,

DEPARTAMENTO DE SANTANDER. Bogotá, Febrero de 2010, 50p. PROYECTO SUB09-21: AGUAS SUBTERRANEAS. INGEOMINAS.

LORENZO FERRÁS, Arturo. J. Área Temática 4.11 Hidrogeología IV: "Introducción a la Geofísica" en: Programa de Formación Iberoamericano en Materia de Aguas, (20-24, Septiembre, 2010: Ciudad de la Habana, Cuba). Memoria disponible en la Web.

<http://www.pnuma.org/aguamiaac/CODIA%20HIDROGEOLOGIA/MATERIAL%20ADICIONAL/PONENCIAS%20HIDROGEOLOGIA/PONENTES/TEMA%206%20Geofisica/INTRODUCCION%20A%20LA%20GEOFISICA.pdf>

PINTO, J. et al. Proyecto de investigación geológica e hidrogeológica en la Mesa de Los Santos, sector Noreste de Curití y borde occidental del Macizo de Santander, Departamento de Santander. Memoria explicativa de la investigación geológica e hidrogeológica en la Mesa de Los Santos y sector Noreste de Curití. UIS e INGEOMINAS. Bucaramanga, diciembre de 2007.

RINCON GOMEZ, Mayra Andreina. Estratigrafía de la Formación Los Santos en las secciones estratigráficas La Punta, Carrizal (Mesa de los Santos) y La Cuevana (Curiti), Departamento de Santander. Bucaramanga, 2008, 45p. Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de Geóloga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Fisicoquímica

ROYERO, J., CLAVIJO, J. 2001. Mapa Geológico Generalizado Departamento de Santander. Escala 1:400.000. Memoria Explicativa.

SERRANO ONTIVEROS, J. (2003). "Tema 3: TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA" {En línea}, {01 de Febrero de 2015} Disponible en: (<https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6231/8/07.pdf>).

VARGAS JEREZ, Claudia Yaneth. Cartografía geológica a escala 1:25.000 de la Mesa de Los Santos, Departamento de Santander. Bucaramanga, 2008, 59p. Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de Geóloga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Fisicoquímica.