

Reconocimiento de los factores geológicos que afectan el normal funcionamiento del proyecto presa la leona en el municipio de Suaita; soporte para el planteamiento y desarrollo de alternativas de solución

Nicolás Andrés Díaz Martínez, Paula Andrea Díaz Orozco

Director:

Juan Diego Colegial Gutiérrez

Geólogo, PhD. en Geología.

Codirector:

Guillermo Vargas Pieschachón

Geólogo

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2018

Dedicatoria

Dedico en primer lugar a Dios porque de él es el poder y toda la gloria

Lo dedico a mis padres por su inmenso amor, apoyo incondicional y sacrificios. Por esto y muchas cosas más los honraré a ellos durante el resto de mi vida.

Mi novia y compañera de tesis Paula, ya que sin su apoyo nada de esto sería posible

Finalmente a mis familiares, amigos y todas aquellas personas que de alguna manera hicieron parte de todo este proceso de formación profesional y enriquecimiento personal.

Nicolás Andrés Díaz Martínez

Dedicatoria

Agradezco a Dios principalmente por permitirme llegar a este punto de mi carrera; quiero dedicar este logro a mis padres que han sido mis pilares, motor y apoyo incondicional cada día, a mi Hermana que ha sido mi guía y soporte en todas las adversidades, a mi novio le doy gracias por ser mi coequipero y compañía en este trabajo, y agradezco a toda mi familia, tíos, primos y abuelos por ser mi principal motivación siempre en cada paso recorrido y en especial a ese angelito que me cuida desde el cielo todos los días.

Paula Andrea Díaz Orozco

Agradecimientos

Brindamos nuestro agradecimiento a la Gobernación de Santander por permitirnos participar de este proyecto que hace parte de la secretaria de infraestructura departamental, de igual manera el apoyo que nos brindaron durante todo el desarrollo del mismo.

Agradecemos enormemente a la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander, por permitirnos tener acceso a los equipos de geofísica, herramientas de campo y espacios de laboratorios con las que cuenta la escuela.

A nuestro director de tesis Juan Diego Colegial Gutiérrez por su apoyo y compromiso durante todo el proyecto.

A los diferentes funcionarios y conductores de la gobernación que nos apoyaron y facilitaron el desarrollo de las actividades propuestas durante la fase de campo.

Tabla de contenido

	Pág.
1. Introducción	19
1.1 objetivos.....	21
1.1.1 objetivo general	21
1.1.2 objetivos específicos	21
1.2 planteamiento del problema.....	22
1.3 justificación.....	24
2. Generalidades.....	25
2.1 localización.....	25
2.2 fisiografía y clima.....	27
2.3 antecedentes y marco geológico.....	28
2.3.1 antecedentes.....	28
2.3.2 marco geológico	37
3. Metodología	41
3.1 plan de trabajo	41
3.1.1 recopilación bibliográfica.....	43
3.1.2 reconocimiento de la zona de campo.....	44
3.1.3 trabajo de campo.....	45
3.1.4 trabajo de interpretación	46
3.1.5 elaboracion de informe final.....	47
4. Marco estratigráfico	48
4.1 estratigrafía local	48
4.1.1 formación tablazo	50
4.2 estratigrafía del sitio de presa.....	52

4.2.1 metodología	52
4.2.2 descripción secciones levantadas.....	53
4.2.3 sección estratigráfica aguas abajo.....	54
4.2.3.1 facies arenisca calcárea con gravas calcáreas (acgc).....	55
4.2.3.2 facies caliza fosilífera (cf)	57
4.2.3.3 facies shale arenoso (sha)	59
4.2.4 sección estratigrafica aguas arriba.....	60
4.2.4.1 facies caliza microcristalina (cm)	61
4.2.4.2 facies arenisca calcárea con gravas calcáreas (acgc).....	62
4.2.5 contribuciones estratigráficas para el desarrollo de la presa.....	61
4.3 interpretacion ambiental.....	64
4.3.1 contribuciones a partir de la interpretación ambiental para el desarrollo de la presa.....	68
4.4 análisis petrográfico	69
4.4.1 matriz siliciclástica (npb-06-01)	70
4.4.2 matriz siliciclástica (npa-04-01).	72
4.4.3 clasto calcáreo (npa-03-01)	74
4.4.4 arenisca fina lodosa (npa-01-01)	75
4.4.5 caliza fosilífera (npb-06-01)	77
4.4.6 contribuciones a partir del análisis petrográfico realizado para el desarrollo de la presa.....	79
5. Geología estructural	78
5.1 marco estructural regional.....	79
5.2 marco estructural local	81
5.2.1 fracturas y diaclasas sobre el sitio de presa	82
5.3 contribuciones estructurales para el desarrollo de la presa...85	
6. Concepto de karst.....	84
6.1 definición.....	85

6.2 evidencias de karstificación.....	87
6.3 análisis de ph	89
6.3.1 definición de ph	89
6.3.2 resultados	90
7. Métodos geofísicos	92
7.1 georadar (gpr).....	93
7.1.1 equipo	95
7.1.2 adquisición de datos.....	96
7.1.3 resultados	97
7.1.3.1 sección transversal no 2.	98
7.1.3.2 sección transversal no 4	100
7.1.3.3 sección transversal no 5	102
7.1.4 contribuciones a partir del análisis de resultados de gpr para el desarrollo de la presa.....	105
7.2 geoelectrica.....	104
7.2.1 equipo utilizado	105
7.2.2 procesamiento.....	106
7.2.3 resultados	106
7.2.4 contribuciones a partir de geoelectrica para el desarrollo de la presa.....	109
8. Discusión de resultados.....	109
9. Conclusiones	111
10. Recomendaciones	113
11. Bibliografía	114

Tabla de figuras

	Pág.
<i>Figura 1. Mapa geológico del área de estudio con la localización de la presa la leona e identificación de formaciones.</i>	23
<i>figura 2. Mapa de sombras generado sobre el área de trabajo.</i>	26
<i>figura 3. Inicios de obra presa la leona año 2007.....</i>	29
<i>figura 4. Estado de la presa año 2007</i>	29
<i>figura 5. Estado de la presa año 2007-2008.....</i>	30
<i>figura 6. Estado de la presa año 2008.....</i>	31
<i>figura 7. Estado de la presa año 2011.....</i>	32
<i>figura 8. Estado de la presa año 2011-2012.....</i>	33
<i>figura 9. Estado de la presa año 2014.....</i>	34
<i>figura 10. Estado de la presa año 2015-2016.....</i>	35
<i>figura 11. Estado de la presa año 2017-2018.....</i>	36
<i>figura 12. Provincias geológicas de basamento de colombia.....</i>	37
<i>figura 13. Esquema facial generalizado de algunas de las formaciones encontradas cerca al área de estudio</i>	38

- figura 14. *Columna estratigráfica generalizada de la cuenca del valle medio del magdalena, el recuadro describe la localización temporal de la formación tablazo.* 40
- figura 15. *Diagrama resumen, plan de trabajo.* 42
- figura 16. *Mapa geológico general de la zona de estudio a escala 1:10000, con localización del muro de presa, vías, drenajes principales y datos estructurales.* 49
- figura 17. *Modelo diagramático de la cuenca del cretácico inferior de la cordillera oriental valle de magdalena.* 50
- figura 18. *Corte s-n en el valle alto del río magdalena mostrando la evolución de la depositación y de la tectónica durante el cretácico.*..... 51
- figura 19. *Sección estratigráfica levantada aguas abajo del sitio de presa, las estrellas amarillas indican recolección de muestras y las rojas indican realización de sección delgada.* 54
- figura 20. *Disolución sobre la arenisca calcárea de gravas de caliza, ubicada en sección estratigráfica levantada aguas abajo.* 55
- figura 21. *Caliza fosilífera en contacto con arenisca calcárea con gravas de caliza aguas abajo, localizado en sección estratigráfica.* 57
- figura 22. *Caliza fosilífera, apreciación de las conchas de bivalvos presentes; fracturas con evidencia de disolución sobre la caliza fosilífera.; apreciación de los tamaños de las conchas de bivalvos a escala real.*..... 58
- figura 23. *Shale arenoso, se observa el alto grado de meteorización debido a la saturación de agua, localizado en sección estratigráfica generalizada.* 60
- figura 24. *Sección estratigráfica levantada aguas arriba del sitio de presa. Las estrellas amarillas indican recolección de muestras y las rojas indican realización de sección delgada.* 61

- figura 25. *Caliza microcristalina, en contacto con arenisca calcárea con gravas de caliza, localizada en sección estratigráfica generalizada.* 62
- figura 26. *Planos de partición natural o fracturas sobre capa de arenisca calcárea con gravas de caliza.* 63
- figura 27. *Arenisca calcárea con gravas de caliza, se observan los clastos semi-redondeados de caliza dentro de la matriz silisiclástica, localizada dentro de la sección estratigráfica generalizada.*..... 64
- figura 28. *La figura de la parte superior hace referencia a los posibles escenarios para la formación de capas nodulares en ambiente de plataforma; la figura de la parte inferior muestra el cambio de tamaños de los nódulos calcáreos de base a tope en la secuencia.* 67
- figura 29. *Descripción esquemática de entornos y facies depositadas en un ambiente de plataforma carbonatada.* 68
- figura 30. *Esquema donde se pueden apreciar las facies de un ambiente típico de plataforma carbonatada, el posible ambiente de depositación pertenece a foreslope.* 68
- figura 31. *Arenisca calcárea compuesta principalmente por cristales de cuarzo, bioclastos y micrita (mic), la figura a nx, figura b ni y figura c muestra de mano.* 71
- figura 32. *Diagrama triangular para la clasificación de rocas intermedias según correns(1949), el círculo rojo representa la clasificación que obtuvo la muestra.* 72
- figura 33. *Muestra de arenisca calcárea* 73
- figura 34. *Micrita la cual presenta en su mayoría lodo micrítico, cristales de cuarzo y esparita (esp) en menor cantidad, aumento 5x en nx.* 75
- figura 35. *Cuarzoarenita con moscovita, mo y minerales opacos, aumento 5x en nx y nii.* 76

- Figura 36. *Micrita la cual presenta en su mayoría lodo micrítico, cristales de cuarzo y esparita en menor cantidad, aumento 5x en nx.....72*
- Figura 37. *Corte esquemático sobre los 6km2 cartografiados, se puede apreciar la inclinación de las capas producto del sinclinal suaita-chima.....73*
- Figura 38. *Corte esquemático en dirección ne-sw sobre el vaso de la presa la leona, la capa de color marrón hace referencia al material colmatado no consolidado sobre el vaso....75*
- Figura 39. *Planos de estratificación y diaclasas presentes en la capa de arenisca calcárea sobre el sitio de presa.....76*
- Figura 40. *Esquema idealizado sobre el sitio de presa, donde se pueden apreciar la orientación de las estructuras presentes vistas en planta.....77*
- Figura 41. *Esquema sobre la formación generalizada de ambientes kársticos.....78*
- Figura 42. *Evidencias de karstificación sobre el área de embalse.....79*
- Figura 43. *Evidencias de karstificación; a y b: disolución en forma concéntrica sobre quebradas adyacentes, esto puede corresponder al principio de formación de dolinas; c y d: fracturas sobre el vaso de la presa ensanchadas producto de la karstificación.....80*
- Figura 44. *Escala de ph.....81*
- Figura 45. *Evidencias de oxidación del agua y karstificación en el sitio de presa.....82*
- Figura 46. *Esquema sobre el funcionamiento del gpr.....86*
- Figura 47. *Antena de 100mhz utilizada en la adquisición de datos.....87*

Figura 48. <i>Principales transectas obtenidas a partir de georadar</i>	90
Figura 49. <i>Sección no 2 en correlación con la sección estratigráfica generalizada del área de presa y ensayos de perforación</i>	90
Figura 50. <i>Sección no 4 en correlación con la sección estratigráfica generalizada del área de presa y ensayos de perforación.</i>	92
Figura 51. <i>Sección no 5 en correlación con la sección estratigráfica generalizada del área de presa y ensayos de perforación</i>	94
Figura 52. <i>Ubicación del equipo utilizado para el análisis de geoelectrica</i>	97
Figura 53. <i>Pseudosección de resistividad obtenida a partir del software ipi2win</i>	100
Figura 54. <i>Curva teórica que muestra el modelo de resistividad verdadera, obtenido a partir del software ipiwin2, con error del 2.74%</i>	100

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Tabla con resultados de geoelectrica.....	96

Lista de anexos

Anexo a. Mapa geológico del área de estudio a escala 1:10000 con la localización de las muestras y sitio de presa.

Anexo b. Corte geológico sobre el área de estudio.

Anexo c. Ensayos mediante análisis con georadar sobre el sitio de presa.

Anexo d. Secciones estratigráficas levantadas en el sitio de presa.

Anexo e. Tabla de secciones delgadas.

Resumen

Título: Reconocimiento de los factores geológicos que afectan el normal funcionamiento del proyecto presa la leona en el municipio de Suaita; soporte para el planteamiento y desarrollo de alternativas de solución.¹

Autores: Diaz Martinez, Nicolas A. Diaz Orozco, Paula A.²

Palabras clave: Presa la Leona, fracturas, geología, suaita, filtración, rehabilitación.

Descripción:

En cercanías al municipio de Suaita, ubicada sobre la quebrada la Bejuca se encuentra la presa la Leona, la cual no ha podido cumplir su objetivo principal que es almacenar agua para suplir al municipio en época de sequía. El área de embalse se está soportando sobre una secuencia predominantemente calcárea perteneciente a la Formación Tablazo, por lo que es indispensable centrar la atención en como los procesos de disolución están afectando los cuerpos litológicos presentes.

A partir del trabajo de campo realizado y los métodos geofísicos utilizados, se determinó la capa que está relacionada directamente con el sitio de presa y por lo tanto con el almacenamiento del agua. Esta capa es denominada arenisca calcárea con gravas calcáreas; la cual debido a su carácter textural y composición, es propensa a presentar disolución, karstificación y permeabilidad secundaria.

La conjugación de datos de campo, datos de laboratorio y métodos geofísicos han brindado un mejor panorama del problema que presenta el área de embalse, donde se identificó claramente la karstificación como el factor detonante principal de las infiltraciones. Esta problemática de disolución junto a un control estructural local y un pH ácido del agua son los principales factores que han afectado el área de embalse.

¹ Proyecto de grado

² Escuela de Geología, Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Director: Juan Diego Colegial Gutiérrez.

Abstract

Title: Recognition of the geological factors that affect the normal functioning of the proyecto presa la leona in the municipality of Suaita; support for the planting and development of solution alternatives. ¹

Authors: Diaz Martinez, Nicolas A. - Diaz Orozco, Paula A. ²

Keywords: La Leona dam, fractures, geology, suaita, filtration, rehabilitation.

Description:

In the vicinity of the municipality of Suaita, on the Quebrada la Bejuca, the La Leona dam is located, which has not been able to fulfill its main objective, which is to store water to supply the municipality in times of drought. The reservoir area is being supported on a predominantly calcareous sequence belonging to the Tablazo Formation, so it is essential to focus attention on how the dissolution processes are affecting the lithological bodies present.

From the field work carried out and the geophysical methods used the layer that is directly related to the dam site and therefore to the storage of the water was determined. This layer is called calcareous sandstone with calcareous gravels; which due to its textural character and composition is prone to present dissolution, karstification and secondary permeability.

The conjugation of field data, laboratory data and geophysical methods have provided a better overview of the problem presented by the reservoir area, where karstification was clearly identified as the main detonating factor of the infiltrations. This problem of dissolution together with a local structural control and an acid pH of water are the main factors that have affected the reservoir area. Bearing in mind that infiltrations may occur in the entire reservoir area and the depth of the fractures can not be calculated with certainty, a waterproofing of the dam vessel can be attempted from geotextiles and the behavior of the system analyzed.

¹ Graduation project

² School of Geology, Faculty of Physicochemical Engineering, Director: Juan Diego Colegial Gutiérrez.

1. Introducción

Este proyecto tiene como finalidad el reconocimiento de los factores geológicos de tipo estructural y estratigráfico que tienen influencia en el funcionamiento del proyecto de construcción de la Presa la Leona desarrollado en zonas aledañas al municipio de Suaita, especialmente el área cercana a la quebrada la Bejuca, donde desde el 2007 se buscó brindar a la comunidad un mejor abastecimiento en el servicio de agua potable, desafortunadamente a causa de distintas fallas sobre la infraestructura de la obra, desde los diseños iniciales se han presentado filtraciones que no permiten que la presa cumpla con su objetivo principal, por esta razón se han realizado desde entonces intervenciones técnicas buscando determinar qué factores han contribuido al desarrollo de este fenómeno pero hasta la actualidad no se han encontrado mejoras ante la situación.

Por este motivo se busca realizar una revisión integral de la geología de la zona junto a una visión actual del estado de la Presa, para esto se realizará una caracterización que contenga cartografía con más detalle, levantamientos estratigráficos y con el apoyo de técnicas geofísicas tales como sondeos eléctricos verticales y análisis de GPR poder correlacionar los datos obtenidos en campo con los resultados de éstas técnicas.

Finalmente a partir del trabajo de campo y tras la recopilación de los datos interpretados plantear posibles alternativas de solución, esto con el fin de contribuir al debido funcionamiento de la Presa.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Identificar y caracterizar mediante técnicas de exploración directas e indirectas (GPR y geoeléctrica), los distintos parámetros geológicos que están afectando el funcionamiento de la presa la Leona construida sobre la quebrada la Bejuca, con el fin de reforzar el sistema de abastecimiento de agua potable del municipio de Suaita.

1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar cartografía geológica a escala 1:10000 del área de estudio que comprende aproximadamente 6km².
- Realizar levantamiento de sección estratigráfica a escala 1:50 sobre las unidades aflorantes, a partir de ello identificar la capa que está directamente relacionada con el sitio de presa y el almacenamiento de agua.
- Identificar fenómenos de karstificación en el sitio de presa y zonas aledañas.
- Identificar fenómenos de karstificación en el subsuelo a partir de la utilización de GPR y geoeléctrica.

- Realizar prueba de PH, para el agua estancada en el sitio de presa.
- Determinar los principales factores externos que han afectado las rocas que soportan la presa, tales como la erosión, meteorización, y disolución; de igual forma los efectos de la tectónica sobre los cuerpos litológicos.

1.2 Planteamiento del problema

El proyecto Presa la Leona hasta la actualidad no ha tenido ningún tipo de uso eficiente respecto a los objetivos concretos del proyecto. Las principales problemáticas evidenciadas son fracturas en el vaso de la presa las cuales producen filtraciones y la colmatación de la presa producto de la alta tasa de sedimentación. La estructura está localizada sobre una secuencia de rocas sedimentarias que han sufrido plegamiento y se establece más concretamente sobre la Formación Tablazo (Ver figura 1) la cual está conformada por rocas Sedimentarias clásticas y calcáreas propias de ambiente marino que para esta área han sido afectadas drásticamente por fenómenos de meteorización y erosión.

El fracaso en el normal funcionamiento de la presa radica en distintos factores como el desconocimiento geológico detallado de la zona y el mal desarrollo de un estudio geotécnico e hidráulico. Lo cual es de suma importancia al momento de la realización de cualquier proyecto de construcción de obras civiles.

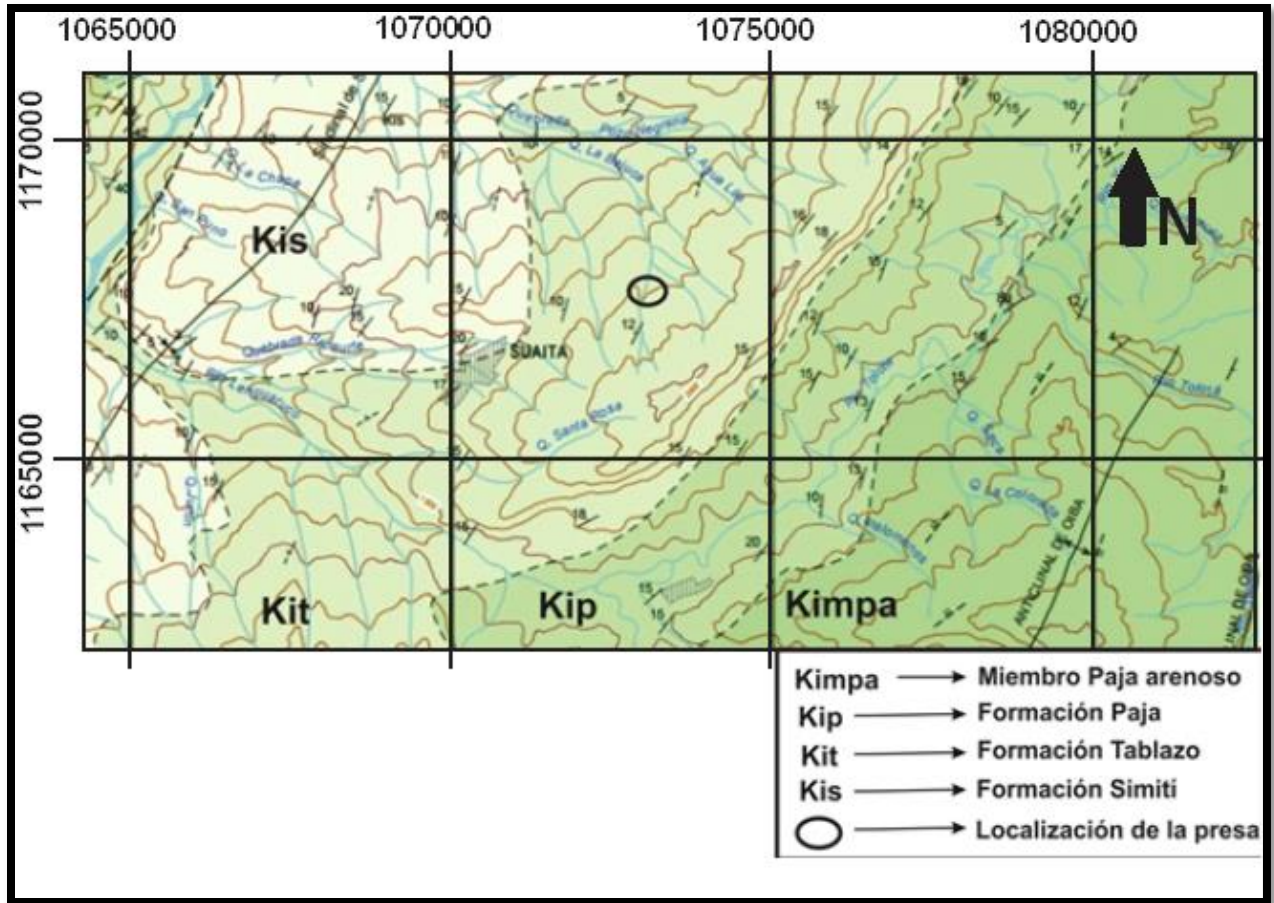


Figura 1. Mapa geológico del área de estudio con la localización de la presa la Leona e identificación de formaciones. Fuente: Tomado y modificado de la plancha 151-III-C del IGAC, SGC (2015).

1.3 Justificación

El Municipio de Suaita, en la actualidad no cuenta con un abastecimiento de agua potable óptimo y eficaz capaz de suplir las necesidades básicas de la población; a razón de la problemática se inició desde el 2007 el desarrollo de un proyecto que planteaba la construcción de una presa con la cual se lograra un buen aprovechamiento del recurso hídrico de la región; tras el desarrollo ingenieril de la obra, desde ese entonces, se han presentado distintas fallas sobre la estructura, que involucran desde el recurso material utilizado para la construcción hasta los aspectos geológicos que conforman el área y que directamente han venido afectando el desarrollo normal de las actividades que lleva a cabo una presa.

La estructura ha sido afectada posiblemente por factores geológicos de tipo litológico y estructural principalmente; de igual forma procesos de disolución, erosión, sedimentación y karstificación. Mediante trabajo de campo y utilización de métodos geofísicos (GPR, Geoeléctrica), se busca conocer la disposición y comportamiento de las unidades o miembros presentes en el área y como se ven afectados por estos procesos.

Con un debido manejo de toda esta información se puede contribuir a que se planteen y desarrollen planes de acción si es posible de carácter inmediato por parte de la gobernación de Santander, entidad encargada directamente del proyecto; sobre la problemática que se establece en el municipio.

2. Generalidades

2.1 Localización

La zona de estudio se encuentra localizada en la plancha 151-III-C (Charalá) del IGAC a escala 1:25000, presenta coordenadas X: 1073000-1075000 y Y: 1167000-1168500. Esta zona se ubica hacia la parte nororiental del municipio Santandereano de Suaita; Este municipio se encuentra sobre la vía Bucaramanga-Bogotá, desviando (margen derecho) en el municipio de Vado Real y continuando sobre esta vía 2km aproximadamente.

La presa La Leona se encuentra sobre la quebrada La Bejuca. Es pertinente dejar en claro que estudios anteriores indicaban la localización de la presa sobre la quebrada La Vega, pero con ayuda de trabajo de campo e imágenes satelitales se pudo dar un mejor detalle de esta localización (Figura 2).

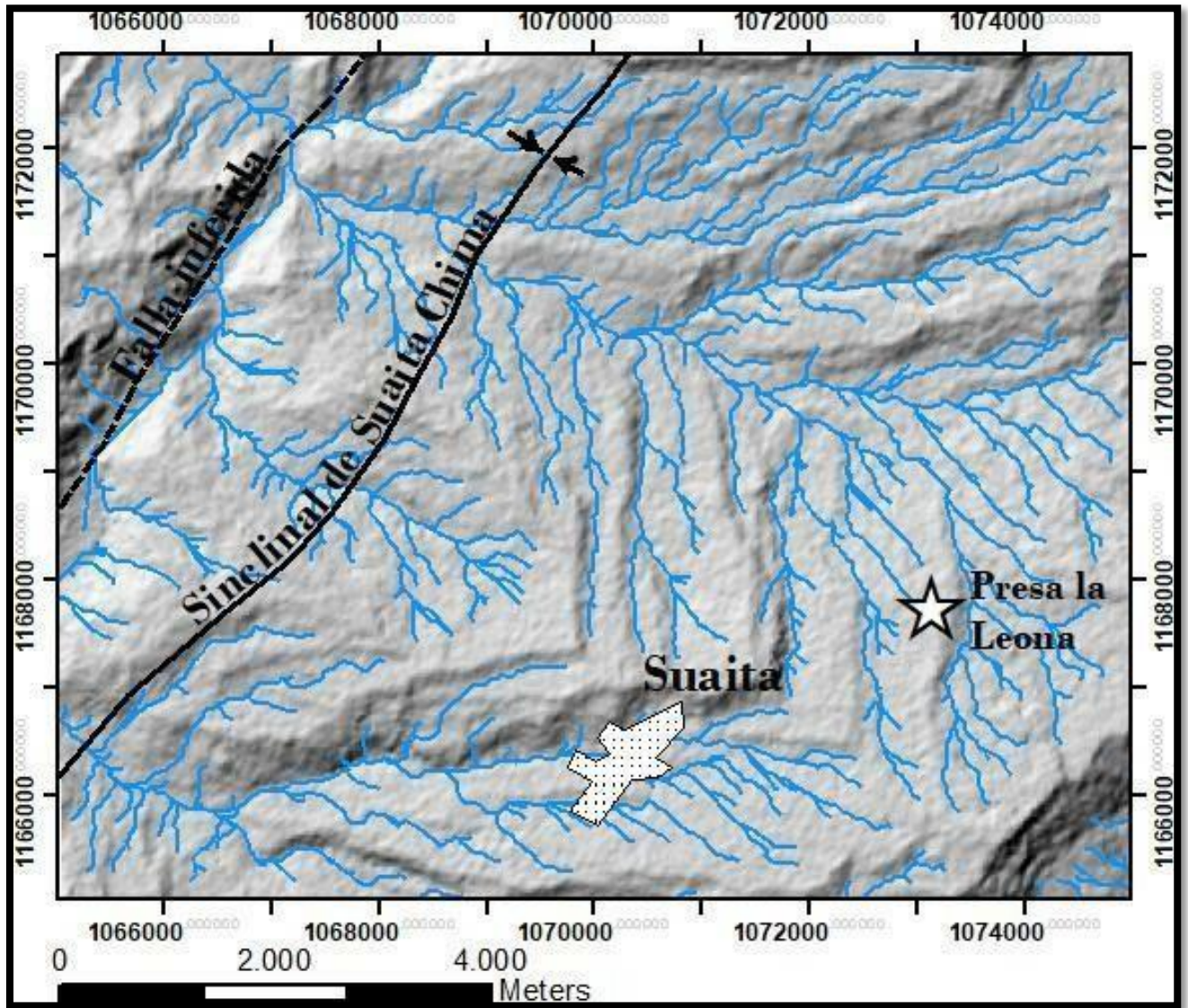


Figura 2. Mapa de sombras generado sobre el área de trabajo, se pueden apreciar rasgos estructurales y principales drenajes de la zona de estudio.

2.2 Fisiografía y Clima

Santander es uno de los departamentos más montañosos del país y gran parte de su territorio corresponde a la Cordillera Oriental, donde el relieve es escarpado a moderado; sin embargo, en su extremo occidental posee una amplia zona baja y plana. El Departamento de Santander está representado por dos grandes regiones naturales como son la Cordillera Oriental y el Valle Medio del Magdalena (IGAC, 1992), cuyas características geomorfológicas muestran contrastes bien marcados.

El municipio de Suaita posee la curva pluviométrica de mayor humedad de 3300 mm anuales; por otra parte la menor pluviosidad está en los 2400 mm promedio anuales, lo cual hace a Suaita una zona de humedad media.

2.3 Antecedentes y Marco Geológico

2.3.1 Antecedentes. La presa La Leona inició su construcción en el año 2007 (ver figura 3) sobre la quebrada La Vega, con el objetivo reforzar el sistema de abastecimiento de agua potable del Municipio de Suaita; Se pretendía almacenar aproximadamente 26.850 metros cúbicos, para posteriormente ser transportado a la planta de tratamiento del acueducto del casco urbano del Municipio para su posterior distribución, y dar solución a la problemática presentada para los habitantes en las épocas de sequía.

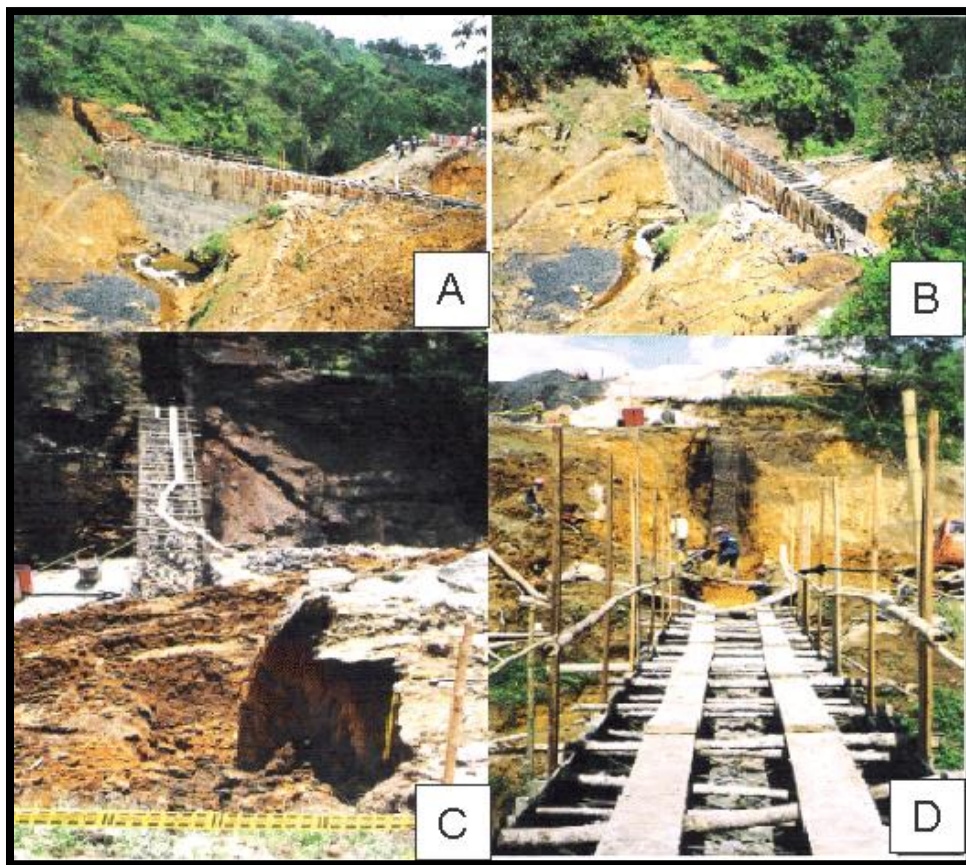


Figura 3. Inicios de obra presa la Leona año 2007 (A) y (B) se aprecia primeros metros de muro de presa fotografías tomadas aguas arriba; (C) y (D) localización inicial de la base del muro de presa. Fuente: Imágenes tomadas y modificadas de la recopilación fotográfica Contrato No. 1914-07 Presa Suaita.

La presa fue concebida inicialmente para trabajar estructuralmente como una presa de gravedad con un núcleo frontal en concreto ciclópeo en contacto con el agua y un terraplén compactado en su parte posterior, como soporte, modelo estructural que tuvo posteriores complicaciones debido a problemas relacionados directamente con la naturaleza de las litologías sobre las cuales se forja la obra (Ver figura 4 y 5), y que se evidencian en los daños desarrollados por procesos principalmente erosivos, a raíz de lo cual el sistema no ha podido ponerse en funcionamiento de forma regular; lo anteriormente planteado, se reflejó en el terraplén de soporte, núcleo frontal, canal de desagüe entre otras estructuras que conforman la presa.



Figura 4. Estado de la presa año 2007 (A) se evidencia el terraplén terminado con algunos daños hacia la parte inferior debido a la erosión; (B) y (C) principales indicios de daños sobre el

canal de desagüe inicialmente dispuesto sobre el terraplén en la parte central. Fuente: Imágenes tomadas y modificadas de la recopilación fotográfica Contrato No. 1914-07 Presa Suaita.



Figura 5. Estado de la presa año 2007-2008: (A) y (B) canal de excesos, relleno de terraplén y tubería para el manejo de aguas colapsada. Fuente: Imágenes tomadas y modificadas de la recopilación fotográfica Contrato No. 1914-07 Presa Suaita.

Tras los graves daños sufridos aguas debajo de la presa sobre el terraplén de soporte y el canal de excesos, hacia el año 2008 se pone en marcha la construcción de un nuevo canal hacia el margen derecho del muro de presa (ver figura 6), dándole a este una geometría y estructura más resistente y acorde a las características del entorno, buscando de esta forma dar solución a la problemática.



Figura 6. Estado de la presa año 2008. (A), (B) y (C), construcción del nuevo canal de excesos.

Fuente: Imágenes tomadas y modificadas de la recopilación fotográfica Contrato No. 1914-07 Presa Suaita.

Posteriormente y con el fin de poner en funcionamiento el sistema, se restableció el canal de manejo del rebose en forma lateral y se realiza la instalación de un Geotextil y una Geombrana, con el fin de dejar el embalse sin filtraciones(ver figura 7 y 8); sin embargo, durante el proceso de colocación, una creciente llevó al embalse a su nivel máximo, arrancó la geomembrana y generó un proceso de socavación bajo la presa, lo que ocasionó la pérdida de los trabajos y mayor socavación del terraplén del respaldo.



Figura 7. Estado de la presa año 2011. (A) inicios de la colocación de la Geo membrana y geotextil sobre el vaso de la presa; (B) finalización del proceso de impermeabilización sobre el vaso; (C) y (D) resultados tras el incidente en el cual la corriente arrastró con la geo membrana instalada sobre el vaso de la presa para posible impermeabilización. Fuente: Imágenes tomadas y modificadas de la recopilación fotográfica Contrato No. 1302- 10 Impermeabilización Leona.

Como consecuencia para finales del año 2012, apareció un hueco de socavación en el contacto entre la presa y el suelo de cimentación, de unos dos (2) metros de ancho por un (1) metro de altura, en la base de la presa.



Figura 8. Estado de la presa año 2011-2012; efectos de socavación bajo el muro de presa.

Fuente: Imágenes tomadas y modificadas de la recopilación fotográfica Contrato No. 1302- 10 Impermeabilización Leona.

Desde el último incidente presentado en el año 2011, la estructura dejó de cumplir su función de embalsar las aguas de la quebrada para los fines propuestos (Unión temporal Leona, 2014).

A finales del año 2015 e inicios del año 2016 se pone en marcha la construcción de un nuevo terraplén de soporte y también de una pantalla de refuerzo delante del muro de presa que estaría anclado a mayor profundidad hasta alcanzar roca fresca con el fin de evitar más procesos de tubificación en los depósitos sedimentarios e intentar solucionar el problema de filtraciones.

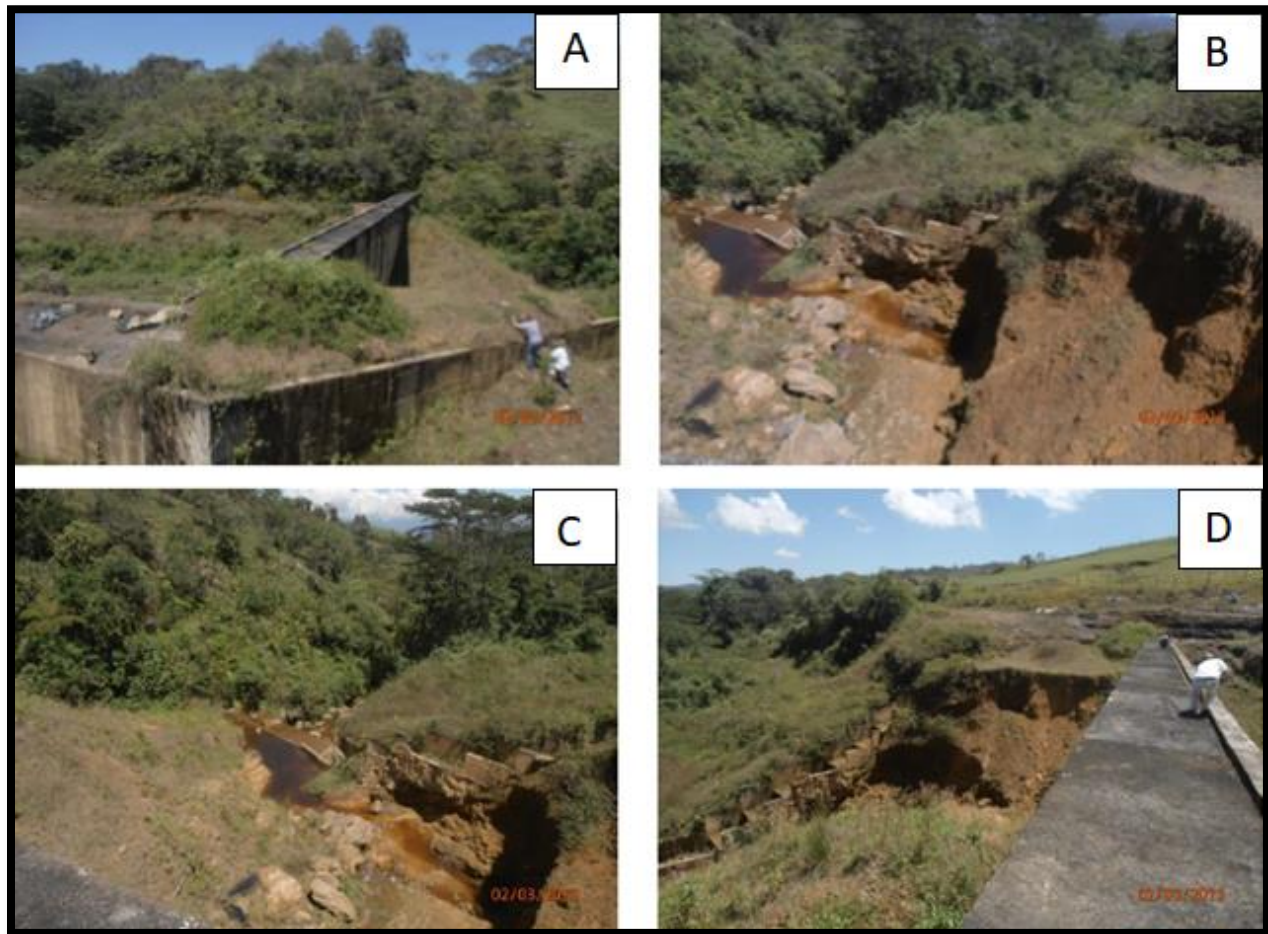


Figura 9. Estado de la presa año 2014; (A) y (D) muestran el estado del muro de presa; (B) y (C) canal de excesos en alto estado de deterioro debido a la alta erosión y erosión del material que soporta las estructuras, al igual que evidencia de fluidos con alto contenido de materiales ferruginosos. Fuente: Imágenes tomadas y modificadas de la recopilación fotográfica Contrato No. 1916-15.



Figura 10. Estado de la presa año 2015-2016; (A) muestra la construcción del nuevo terraplén de soporte; (B) y (C) construcción de pantalla de refuerzo delante del muro de presa. Fuente: Imágenes tomadas y modificadas de la recopilación fotográfica Contrato No. 1916-15.

Actualmente la presa no se ha puesto en funcionamiento, ya que los problemas de filtraciones son persistentes; lo que impide el adecuado llenado del embalse. A continuación una recopilación de imágenes del estado actual del área de embalse.





Figura 11. Estado de la presa año 2017-2018 ; A) terraplén de soporte; (B) vaso colmatado de sedimento; (C) y (D) vista del vaso aguas arriba del muro de presa; (E) y (F) estado actual canal de excesos; (G) estado actual tubería aguas abajo del muro de presa.

2.3.2 Marco Geológico

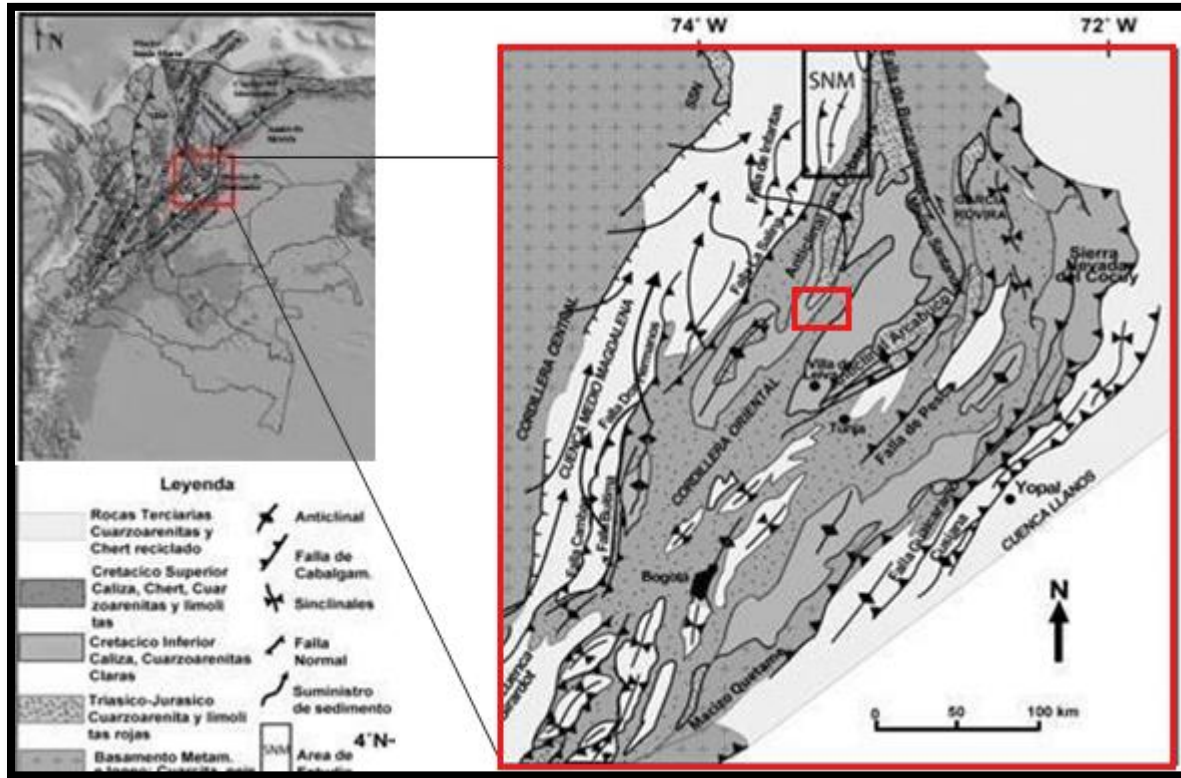


Figura 12. Provincias geológicas de basamento de Colombia. El cuadro rojo encierra la zona de principal interés y estudio en el presente trabajo (Modificado de Cooper et al., 1995. Por Caballero V. 2010).

El Municipio de Suaita de se ubica entre el valle medio del Río Magdalena y la provincia tectónica de la Cordillera Oriental, que se caracteriza por pliegues anticlinales y sinclinales amplios. Limitadas por fallas inversas y de cabalgamiento, de dirección NE y NW, con inclinación predominante hacía el oriente, conformada por rocas sedimentarias generalmente plegadas, Jurásicas y Cretácicos. La Cordillera Oriental en Santander está dividida en dos

bloques, uno central y otro Oriental, el Municipio se encuentra en el bloque central, el cual está limitado al Occidente por la falla del Suárez y el anticlinal de Virolín hacia el este. El área que comprende el Municipio de Suaita está constituida por una secuencia de rocas sedimentarias que han sufrido un ligero plegamiento conformando estructuras plegadas muy amplias que le imprimen al relieve de la región un aspecto escalonado. Las agrupaciones de rocas que han sido diferenciadas desde el punto de vista estratigráfico en la región, enunciadas desde las más antiguas, se identifican en la nomenclatura geológica como las formaciones Paja, Tablazo, Simití y Areniscas de Chiquinquirá (Ingeominas,2001).

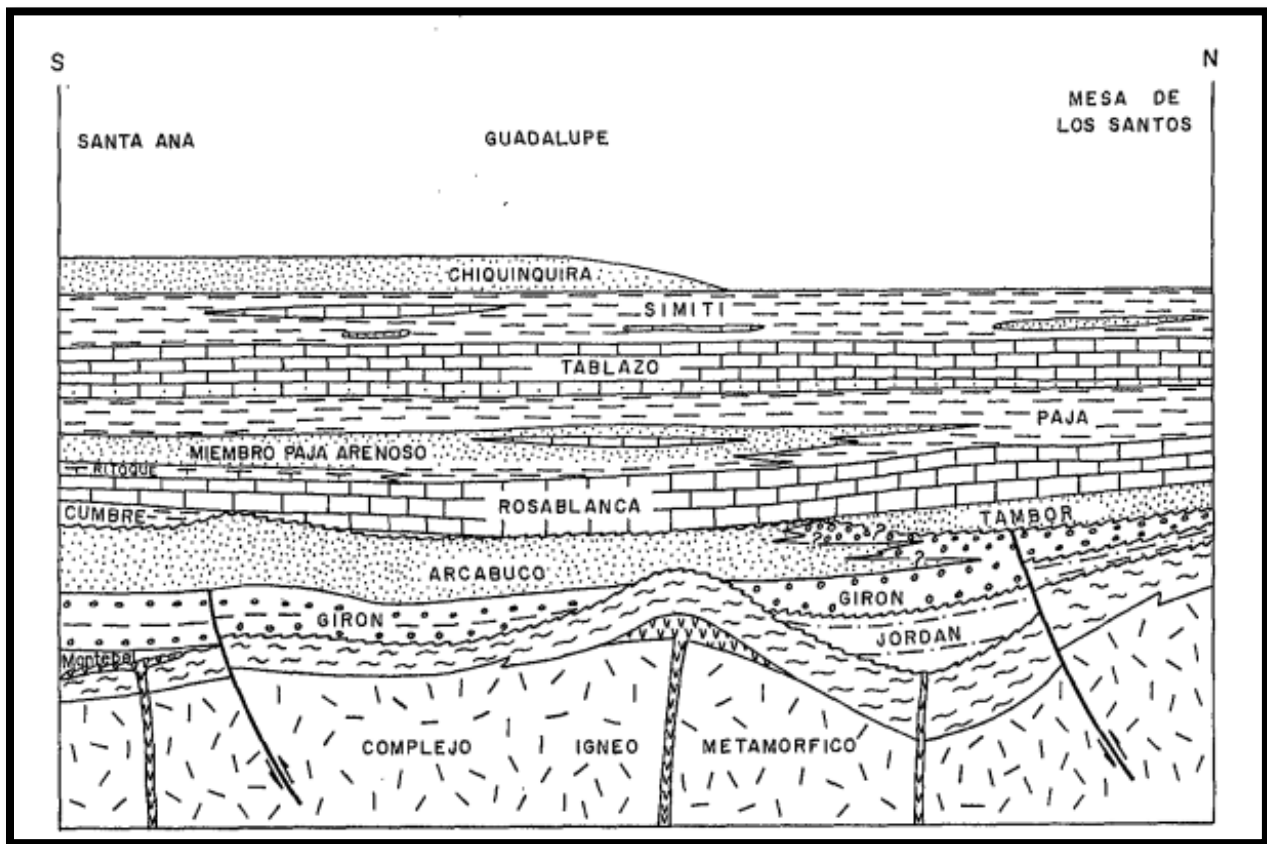


Figura 13. Esquema facial generalizado de algunas de las formaciones encontradas cerca al área de estudio Fuente: Pulido, (1979).

La presa la Leona está situada sobre la formación Tablazo; la formación Tablazo (Figura 14) en el área de Suaita presenta un espesor aproximado de 239m (Morales et al., 1958); el aumento progresivo de espesor que presenta la Formación Tablazo de N a S, aspecto que ya había sido manifestado por algunos autores (Ulloa & Rodríguez 1975; Pulido 1979). Respecto a la caracterización estratigráfica Descrita por Wheeler (Morales et al., 1958); la localidad tipo está en el sitio Tablazo, en el puente del cruce del Río Sogamoso de la vía Bucaramanga-San Vicente.

La secuencia de esta unidad consiste en calizas gris a negras, fosilíferas, localmente glauconíticas y arcillosas de color negro, con niveles intercalados de arcillolitas grises a gris azulado, calcáreas, fosilíferas, en capas medianas a gruesas, con intercalaciones de areniscas grises, grano fino a medio, arcillosas, levemente calcáreas, en capas delgadas.

El ambiente de depósito parece corresponder a condiciones neríticas, poco profundas; el espesor varía entre 150 y 325 m. La Formación Tablazo se encuentra en contactos concordantes con la infrayacente Formación Paja y la suprayacente Formación Simití, su edad es considerada del Aptiano superior- Albiano inferior; esta unidad en parte es cronoestratigráficamente correlacionable con las formaciones Tibú- Mercedes y Aguardiante (Ingeominas, 2001).

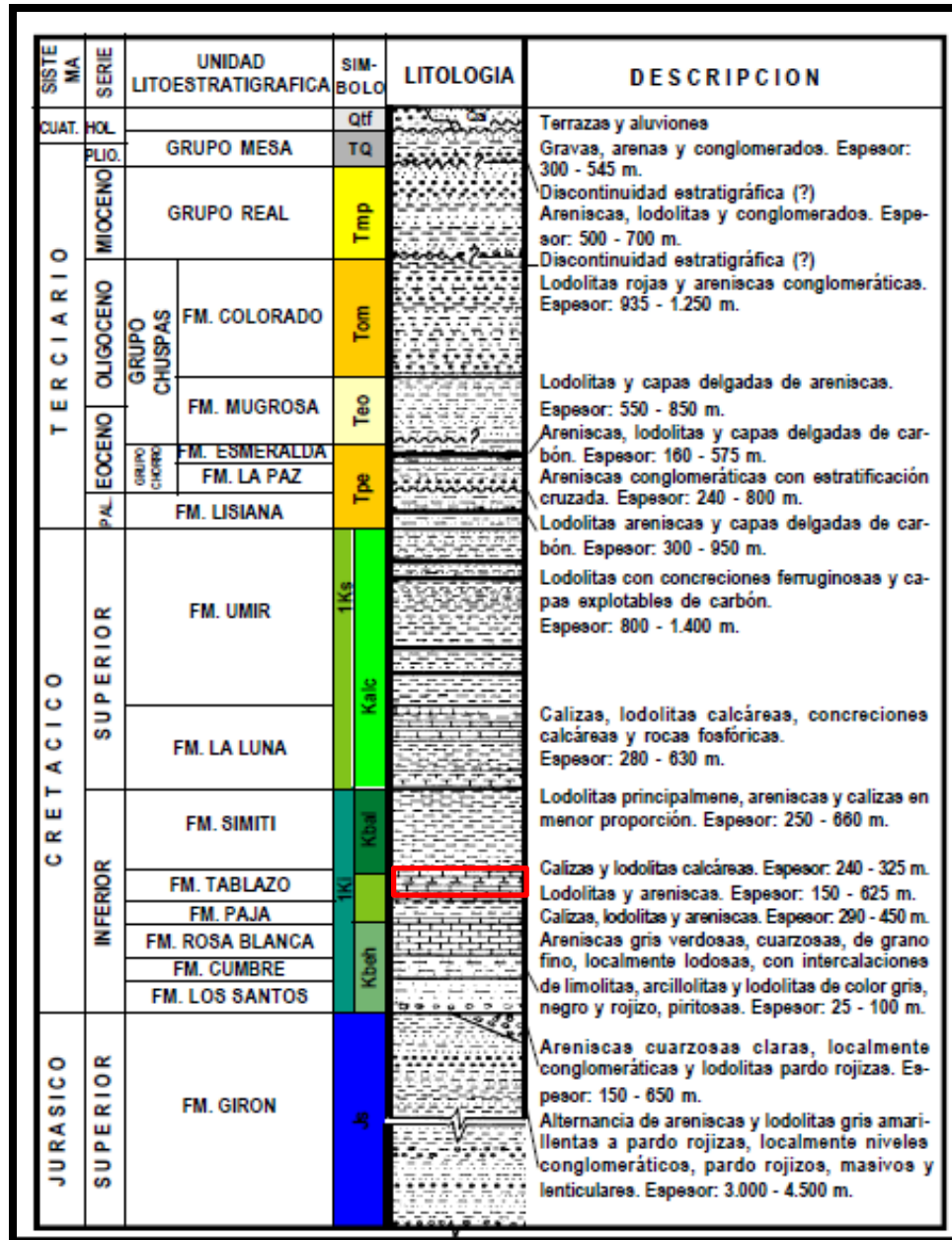


Figura 14. Columna estratigráfica generalizada de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena, el recuadro describe la localización temporal de la formación Tablazo. Fuente: Adaptado de Morales, et al. (1958).

3. Metodología

3.1 Plan de trabajo

El desarrollo metodológico se resume en el esquema aportado en la Figura 15 y que a continuación se presenta. El estudio se basó principalmente en: un trabajo de recopilación bibliográfica, reconocimiento de la zona de estudio mediante imágenes satelitales obtenidas por medio de google earth y visita de campo, búsqueda y descarga del DEM más apropiado para la zona por medio de la página web Alaska satellite facility, creación de mapa de sombras por medio del DEM a partir del software Qgis 2.18, posteriormente trabajo de campo; el cual consta de recorrer a pie la vía que conecta el municipio de Suaita con la presa la Leona para adquirir datos de planos estratigráficos y diaclasas para la realización del mapa geológico, posteriormente se inició el levantamiento de la sección estratigráfica en el sitio de presa, seguidamente se realizó la adquisición de datos del subsuelo por medio de GPR y Geoelectrónica, finalmente se realizó el análisis de la información obtenida a través del trabajo de campo y de los equipos utilizados para la realización de un informe final.

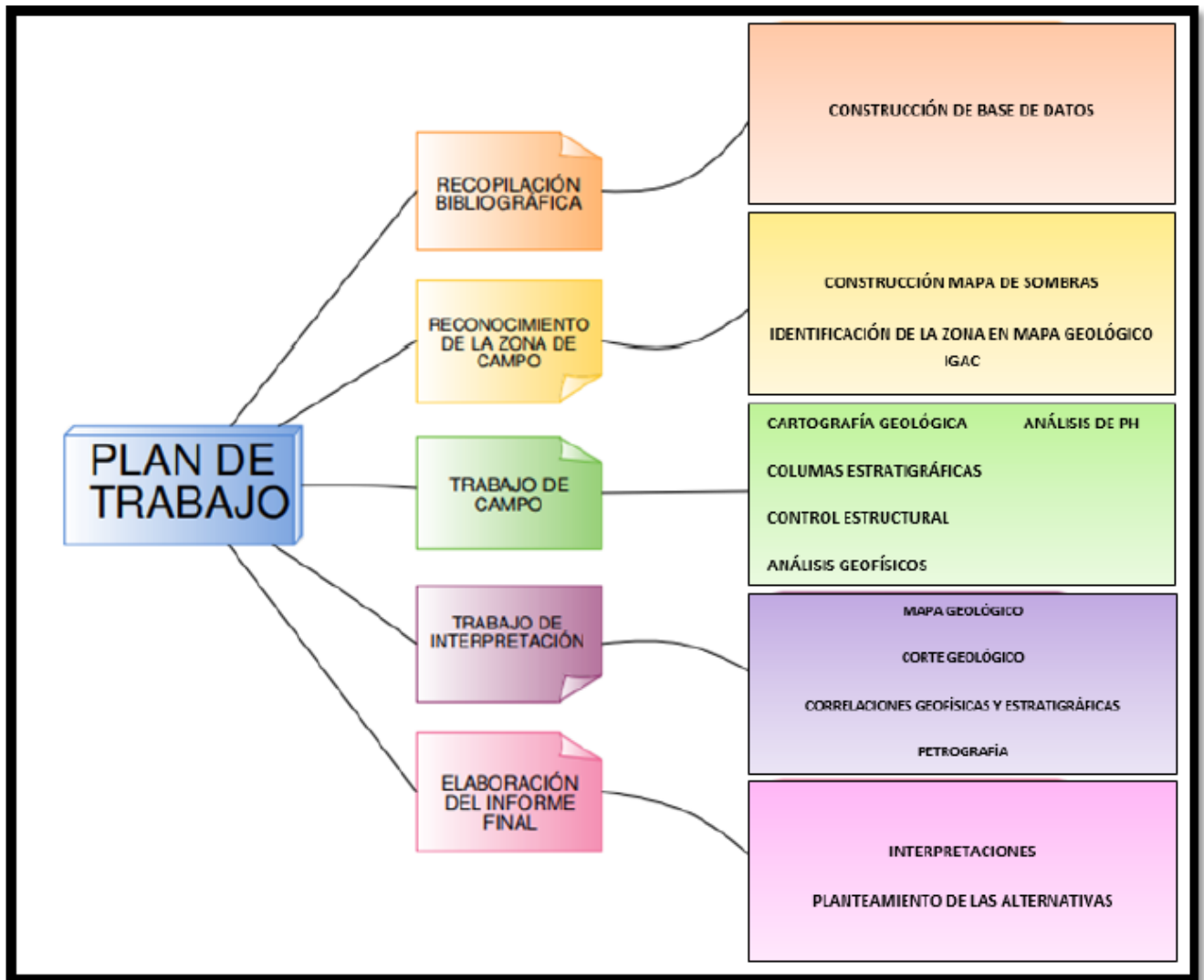


Figura 15. Diagrama resumen, Plan de trabajo.

3.1.1 Recopilación Bibliográfica

Construcción de base de datos. En esta etapa inicial del proyecto se procedió a seleccionar la principal información de interés relacionada principalmente al área de la geología de informes anteriores facilitados por la Gobernación de Santander, entidad encargada del proyecto, que habían sido realizados sobre el área de la presa desde el año 2007 hasta el estado actual de la obra, para este fin se incluyó entonces información estratigráfica, estructural y de estudios geotécnicos. También dentro de la base de datos se incluyó información primordial de mapas geológicos del área de estudio perteneciente a la base de datos del servicio geológico Colombiano. Otros de los temas incluidos dentro de la recopilación de información fueron los instructivos para el manejo adecuado de los equipos de exploración geofísica a utilizar durante el trabajo de campo. A partir de la construcción de la base de datos se pudo conocer: antecedentes de la presa la Leona, reconocer la zona de estudio por medio de los mapas obtenidos del IGAG e imágenes satelitales y se logró la capacitación adecuada para la correcta utilización de los equipos de exploración geofísica.

3.1.2 Reconocimiento de la Zona de Campo

Construcción de mapa de sombras. En primer lugar se realizó el reconocimiento de la zona de estudio mediante imágenes satelitales obtenidas por medio de google earth y visita de campo, posteriormente se inició la búsqueda y descarga del DEM más apropiado para la zona por medio de la página web Alaska satellite facility, finalmente se creó el mapa de sombras (ver figura 2) por medio del DEM a partir del software Qgis 2.18. Mediante la construcción del mismo se buscó distinguir los principales atributos estructurales y las principales redes de drenaje que hacen parte del área de estudio, de este modo y con ayuda de mapas topográficos se buscó reconocer zonas de fácil acceso para el reconocimiento de la geología presente y delimitación del área a recorrer en campo.

Identificación de la zona de estudio en mapa topográfico (igac). A partir de la plancha obtenida por medio del IGAC y con ayuda de puntos GPS obtenidos en visitas de campo anteriores, se dio la localización del sitio de presa sobre este mapa. Se obtuvo que la zona de estudio se encuentra localizada en la plancha 151-III-C (Charalá) del IGAC a escala 1:25000, entre coordenadas X: 1073000-1075000 y Y: 1167000-1168500.

3.1.3 Trabajo de Campo

Columnas Estratigráficas Las actividades que se realizarán en esta fase corresponden, descripción de cada uno de los afloramientos más representativos localizados aguas arriba y aguas abajo del sitio de presa para de este modo realizar la construcción de las secciones estratigráficas. El análisis sedimentológico y estratigráfico en el sitio de presa fue realizado a partir del levantamiento de dos secciones estratigráficas a escala detallada (1:50), utilizando el método del bastón de Jacob. Las secciones fueron levantadas sobre la quebrada La Bejuca. En cada sección se describió el color, textura, composición, estructuras sedimentarias, geometría de estratos, bioturbación, fósiles y contactos. También se encontraron afloramientos sobre la vía que conecta a Suaita con el corregimiento de la Leona Santander, aunque estos afloramientos se encontraban fuera del área de la presa, fue pertinente su análisis para la realización del mapa geológico de la zona.

Control Estructural. Las estructuras encontradas sobre el sitio de presa corresponden principalmente a fracturas y diaclasas orientadas, la toma de los datos se realizó directamente sobre los afloramientos que presentaban características estructurales relevantes.

Cartografía Geológica. Después de la toma de datos estructurales y pertinentes levantamientos estratigráficos realizados sobre el área de la presa y en la vía Suaita – La Leona. En el desarrollo de la cartografía se pretende ubicar sobre el mapa topográfico de la zona las

principales características geológicas para de este modo identificar los cuerpos litológicos más importantes y controles estructurales principales.

Análisis Geofísicos. Con el fin de identificar las principales zonas de infiltración y evidencias de karstificación dentro del embalse de la presa, se procede a realizar análisis con métodos de exploración geofísica por medio de GPR y SEV, para este fin se realizan diferentes secciones sobre varios puntos de interés en el área de presa.

Análisis de ph. Teniendo en cuenta las principales características de las litologías involucradas en el área de interés, se realizan diferentes controles de ph sobre la quebrada principal que abastece la presa y algunas acumulaciones cercanas, en busca de conocer si la acidez del agua es uno de los factores responsables de las diferentes disoluciones y alteraciones de la roca que soporta la presa.

3.1.4 Trabajo de Interpretación

Mapa Geológico. Mediante el reconocimiento de la estratigrafía y geología estructural se procede a la realización del mapa geológico escala 1:10000 identificando cinco principales secuencias sedimentarias, resaltando la secuencia sedimentaria de rocas calizas dentro de la cual se encuentra localizado el sitio de presa.

Corte Geológico. Teniendo en cuenta los principales rasgos estructurales obtenidos mediante el reconocimiento de campo se busca realizar un corte geológico para conocer como el sinclinal Suiata – Chima se encuentra basculando las rocas en este sector.

Correlaciones geofísicas y estratigráficas. Teniendo conocimiento de los resultados tras los análisis geofísicos realizados sobre el área de presa se procede a realizar las debidas correlaciones de tipo estratigráfico incluyendo las principales secciones estratigráficas levantadas aguas abajo y aguas arriba del sitio de presa y del mismo modo con los ensayos de perforaciones verticales realizados en estudios anteriores, en busca de conocer el comportamiento de las principales litologías.

3.1.5 Elaboración de Informe Final. Corresponde al análisis e interpretación de los datos recopilados, y el registro de estos resultados con sus respectivas conclusiones y recomendaciones en un informe técnico escrito.

4. Marco Estratigráfico

4.1 Estratigrafía Local

En el Departamento de Santander afloran rocas sedimentarias (areniscas, limolitas, calizas, lutitas, arcillolitas, conglomerados), se localizan en las regiones oriental, central y occidental y sus edades varían entre Paleozoico y Mesozoico, y depósitos superficiales débilmente consolidados (conglomerados, lutitas, areniscas, grava, arena, limo), localizados en la meseta de Bucaramanga y el extremo occidental del departamento, con edades entre Plioceno y Holoceno.

A partir del trabajo de campo realizado y con apoyo de imágenes satelitales se identificaron unidades o secuencias cartografiables. En el área de estudio afloran principalmente rocas sedimentarias perteneciente al Cretácico, como una franja alargada con dirección Noroeste, donde aflora principalmente la Formación Tablazo. Se encuentra dentro de una gran estructura denominada Sinclinal de Suaita- Chima, caracterizada por la presencia de pliegues suaves, con lineamientos paralelos y pocas fallas, las crestas de los anticlinales se encuentran erosionadas, y sus ejes presentan dirección NE (Clavijo y Royero, 2001) . Las capas presentan buzamiento predominante hacia el Noroeste y Sudeste.

El área cartografiada está conformada en su totalidad por la Formación Tablazo (Ver figura 16). Se identificaron y clasificaron 5 secuencias estratigráficas pertenecientes a esta formación, la subdivisión se realizó a partir de su carácter litológico. El sitio de presa se ubica sobre el miembro denominado Calizas al este del mapa.

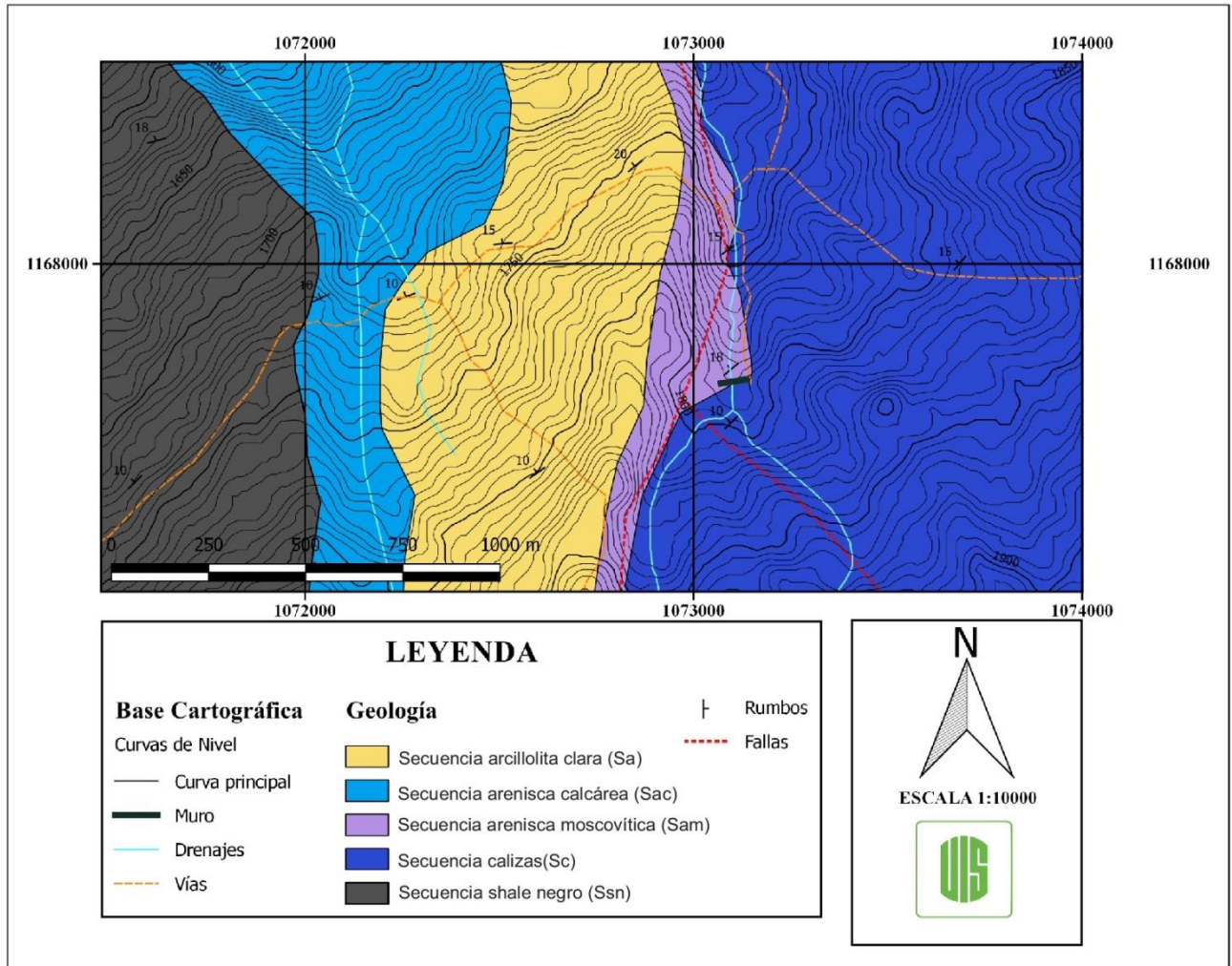


Figura 16. Mapa geológico general de la zona de estudio a escala 1:10000, con localización del muro de presa, vías, drenajes principales y datos estructurales.

4.1.1 Formación Tablazo. La Formación Tablazo fue nombrada y descrita por Wheeler en Morales, et al., (1958). La localidad tipo está en el sitio Tablazo, en el puente del cruce del Río Sogamoso de la vía Bucaramanga-San Vicente. La secuencia tipo de esta unidad consiste en calizas gris a negras, fosilíferas, localmente glauconíticas y arcillosas de color negro, con niveles intercalados de arcillolitas grises a gris azulado, calcáreas, fosilíferas, en capas medianas a gruesas, con intercalaciones de areniscas grises, grano fino a medio, arcillosas, levemente calcáreas, en capas delgadas.

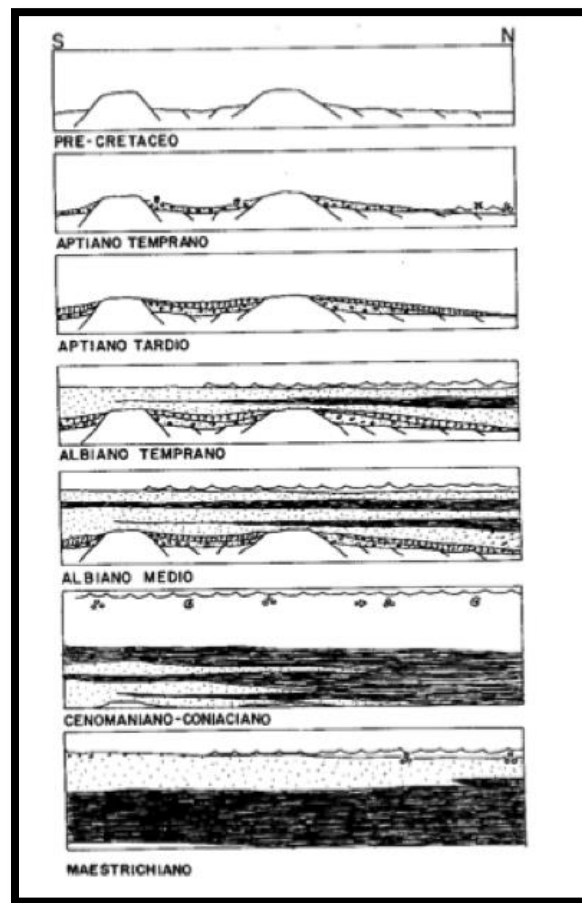


Figura 17. Corte S-N en el valle alto del río Magdalena mostrando la evolución de la depositación y de la tectónica durante el cretácico, Fuente: Vergara et al (1994).

El ambiente de depósito parece corresponder a condiciones neríticas, poco profundas. El espesor varía entre 150 y 325 m. Entre Vado Real y Suaita la secuencia presenta características similares aunque su espesor alcanza los 354m (Memoria explicativa plancha 151, Pulido, O. 1979). La formación infrayace conformemente al Simití y descansa concordantemente a los shales de la Formación Paja. Su edad es considerada por Morales, et.al. Como Aptiano Superior a Albiano Inferior, en base a su posición estratigráfica. Etayo (1968), según fauna colectada en la región entre Sáchica y Puente Samacá, la considera Aptiano Superior- Albiano Inferior.

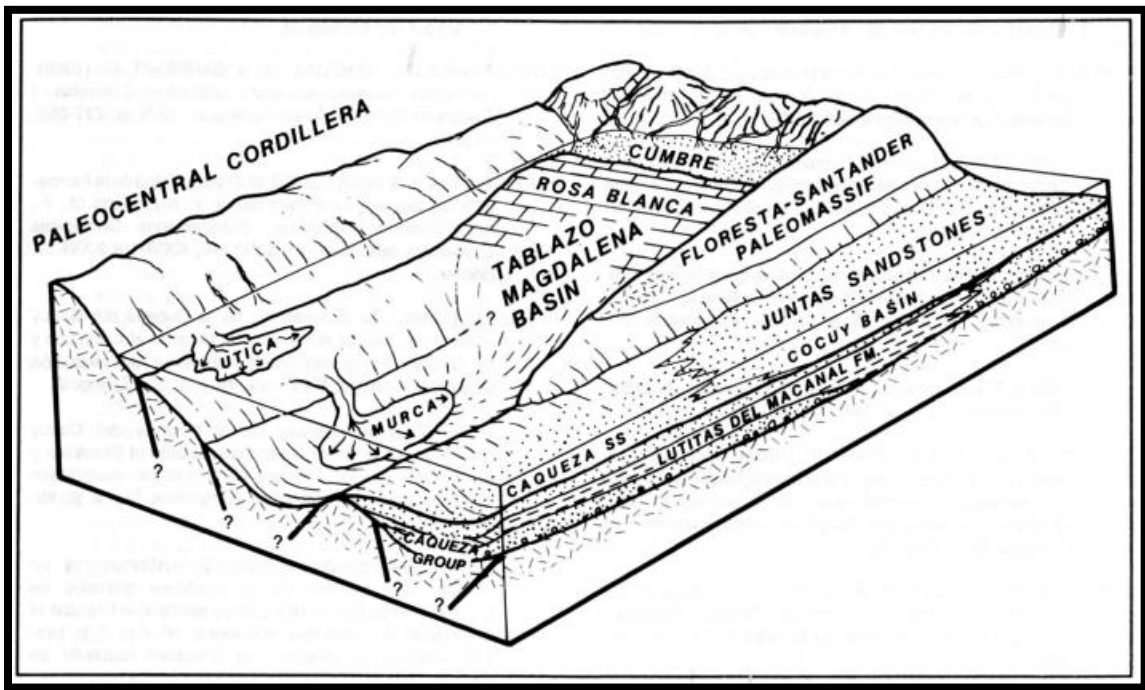


Figura 18. Modelo diagramático de la cuenca del Cretácico Inferior de la Cordillera Oriental Valle de Magdalena. Fuente: Vergara et al (1994).

4.2 Estratigrafía del Sitio de Presa

4.2.1 Metodología. El análisis sedimentológico y estratigráfico en el sitio de presa fue realizado con el levantamiento de dos secciones estratigráficas a escala detallada (1:50), a partir del método del bastón de Jacob. Se realizó el levantamiento de las secciones estratigráficas sobre la quebrada la Bejuca en puntos aguas abajo y arriba del sitio de presa. En primer lugar se tomó el dato de GPS en el inicio y final de las secciones. Para la sección aguas abajo el punto inicial corresponde al lugar más bajo que fue posible llegar por la quebrada y el punto final de GPS corresponde al choque de la quebrada con el muro de la presa.

Posteriormente se inició el levantamiento de la columna de forma continua por 30 metros longitudinales sobre la quebrada. Se realizó ubicando el bastón directamente sobre la capa expuesta en la quebrada y proyectando por medio de un láser el dato de rumbo y buzamiento obtenido.

Estas secciones están ubicadas al sur del departamento de Santander en el municipio de Suaita, en el corregimiento la Leona, aguas abajo y aguas arriba del sitio de presa. Como se utilizaron datos de al menos dos columnas estratigráficas para generar una columna generalizada, en este caso hablaríamos de una sección estratigráfica compuesta local según Juan Vera (1994).

Se recolectaron muestras significativas en diferentes segmentos de las secciones levantadas. Cinco de estas muestras fueron seleccionadas para la realización de secciones delgadas y un respectivo análisis petrográfico posterior. Con el fin de identificar las facies presentes y sus posibles ambientes de depositación.

4.2.2 Descripción Secciones Levantadas. Las secciones fueron levantadas sobre la quebrada La Bejuca. En cada sección se describió el color, textura, composición, estructuras sedimentarias, geometría de estratos, bioturbación, fósiles y contactos. También se encontraron afloramientos sobre la vía que conecta a Suaita con el corregimiento de la Leona Santander, aunque estos afloramientos se encontraban fuera del área de la presa, fue pertinente su análisis para la realización del mapa geológico de la zona.

Localmente en el área de estudio la Formación Tablazo está conformada de base a tope principalmente por una capa de arenisca calcárea con gravas de caliza, suprayaciendo esta capa se encuentra una capa denominada caliza fosilífera, el tope de la sección se hace mucho más silisiclástico, ya que se encuentra una capa compuesta de arcillolitas y limolitas fósiles con alto contenido de materia orgánica y finalmente una capa de arenisca fina lodosa de color lila con alto contenido de moscovita. A continuación se describirán las dos secciones levantadas con sus respectivos intervalos.

4.2.3 Sección Estratigráfica Aguas Abajo. Esta sección fue levantada sobre la quebrada la Bejuca, aguas abajo del sitio de presa. Se realizó la descripción de estas capas a escala 1:50 medidas por el método del bastón de Jacob. A lo largo de esta sección se recolectaron cinco (5) muestras de las cuales tres (3) se utilizaron para análisis petrográficos. La columna consta de base a tope de 3 capas que se describirán a continuación (Ver columna compuesta y detallada en Anexos).

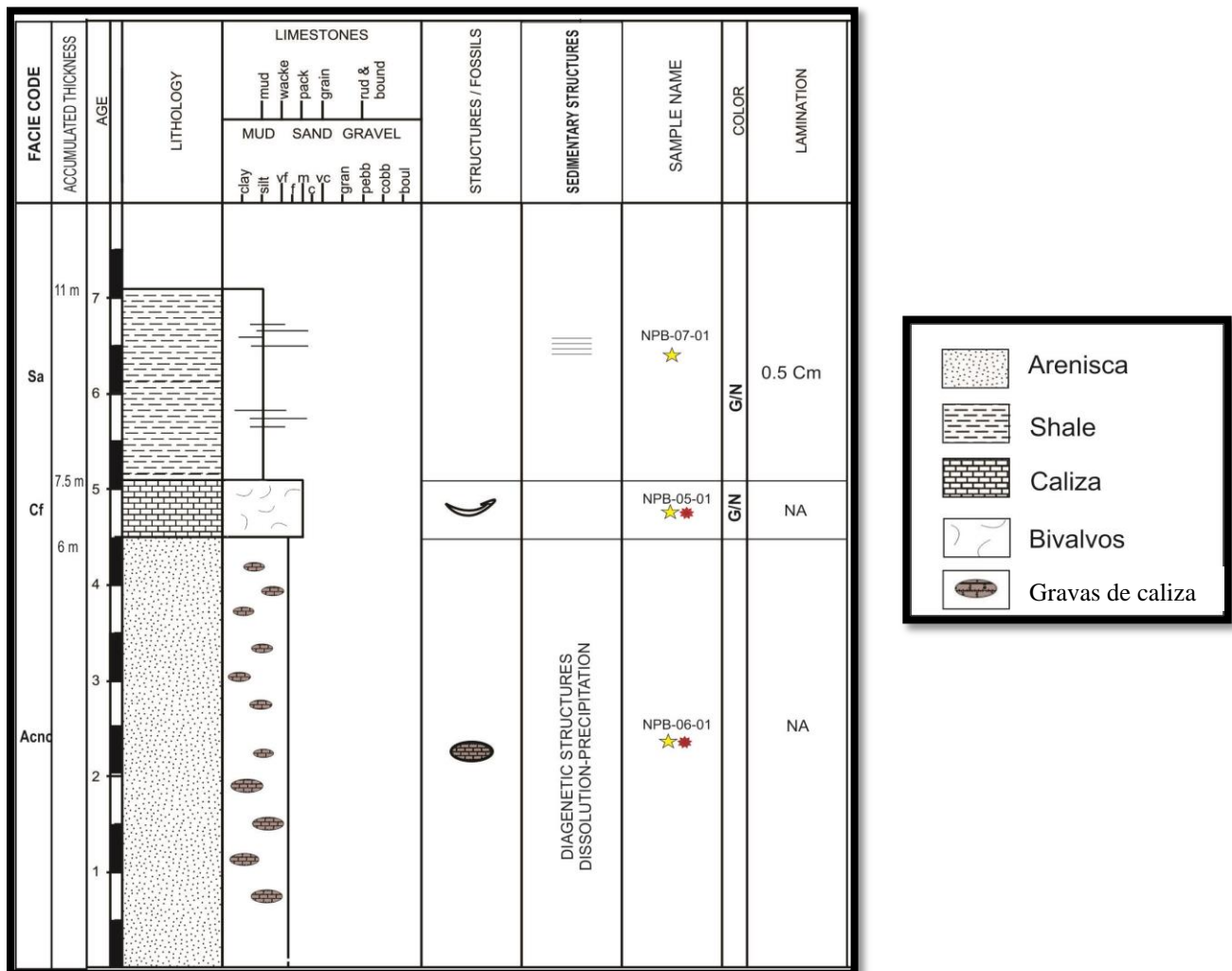


Figura 19. Sección estratigráfica levantada aguas abajo del sitio de presa, las estrellas amarillas indican recolección de muestras y las rojas indican realización de sección delgada.

Descripción de Facies

Se define el término facies como una unidad de roca con características internas propias como litología, textura, estructuras sedimentarias y fósiles. Lo que la diferencia de las rocas que la están suprayaciendo e infrayaciendo.

Según Reading (1986) las relaciones entre facies se deducen por el contacto entre ellas, que puede ser neto, gradacional y erosivo, y las asociaciones de facies son grupos de facies que se encuentran juntas y se considera que son genética o ambientalmente relacionadas de manera que proveen evidencias adicionales para la interpretación ambiental.

4.2.3.1 Facies Arenisca Calcárea con Gravas de Caliza (Acgc). Esta capa tiene un espesor de aproximadamente cuatro (4) metros; espesor medido a través de bastoneo a través de la quebrada. Está constituida de una matriz principalmente silisiclástica con un componente calcáreo, los constituyentes principales son cuarzo, moscovita y aloquímicos (fósiles de bivalvos principalmente). La matriz se encuentra bien cementada y se encuentra soportando clastos calizos semi-redondeados de tamaños que varían de guijas a guijarros, estos clastos calcáreos fueron caracterizados como caliza mudstone o caliza de tamaño de grano muy fino según la clasificación para rocas de naturaleza calcárea de Dunham 1962, donde se reconoce un cuerpo calcáreo esqueleto-matriz soportado con un porcentaje de granos recristalizados menor al 10 %. Es importante resaltar la evidencia de karstificación que presenta esta capa a lo largo de la quebrada, donde sus clastos han sido disueltos por completo en la mayoría de la sección, favoreciendo la formación de pequeñas cavidades y dolinas y sobre la superficie de la roca expuesta.

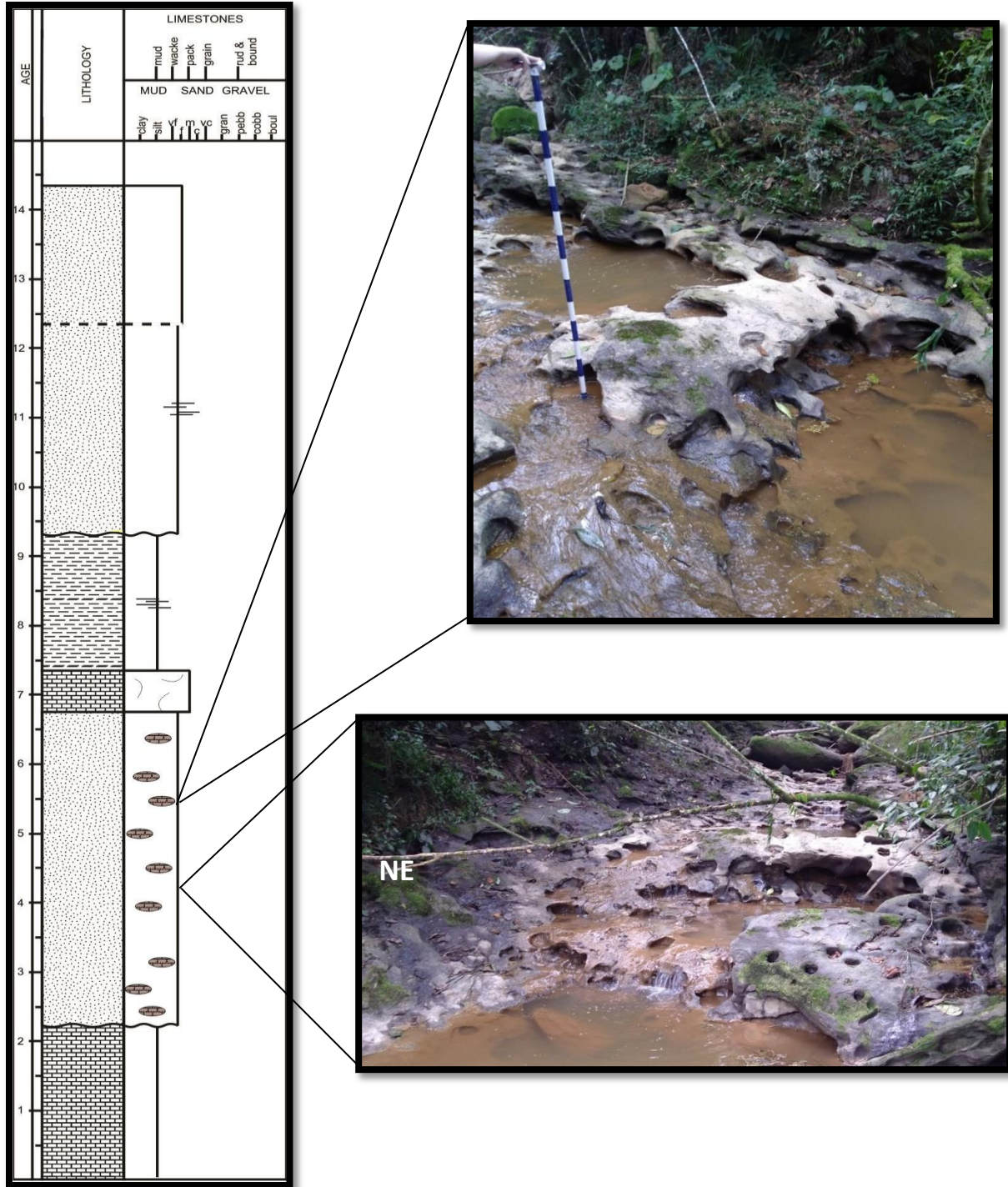


Figura 20. Afloramiento sobre la quebrada la Bejuca de la facies arenisca calcárea con gravas de caliza, se puede apreciar la disolución que presenta aguas abajo del embalse.

4.2.3.2 Facies Caliza Fosilífera (Cf). Esta pequeña capa es reconocible en contacto neto supra yaciendo al miembro de arenisca calcárea con gravas de caliza, tiene un espesor de aproximadamente 30 cm; espesor reconocido directamente sobre la capa de roca, se ha caracterizado según la clasificación de Dunham 1962 para rocas calcáreas como una caliza tipo Wackstone, que se define como una roca de esqueleto matriz-soportado con un porcentaje mayor al 10% de granos, en el cuál las conchas especialmente de bivalvos son reconocibles con tamaños que varían de los 3 a 5 cm; la capa de roca presenta un grado medio de karstificación in situ, evidenciado principalmente en las fracturas.

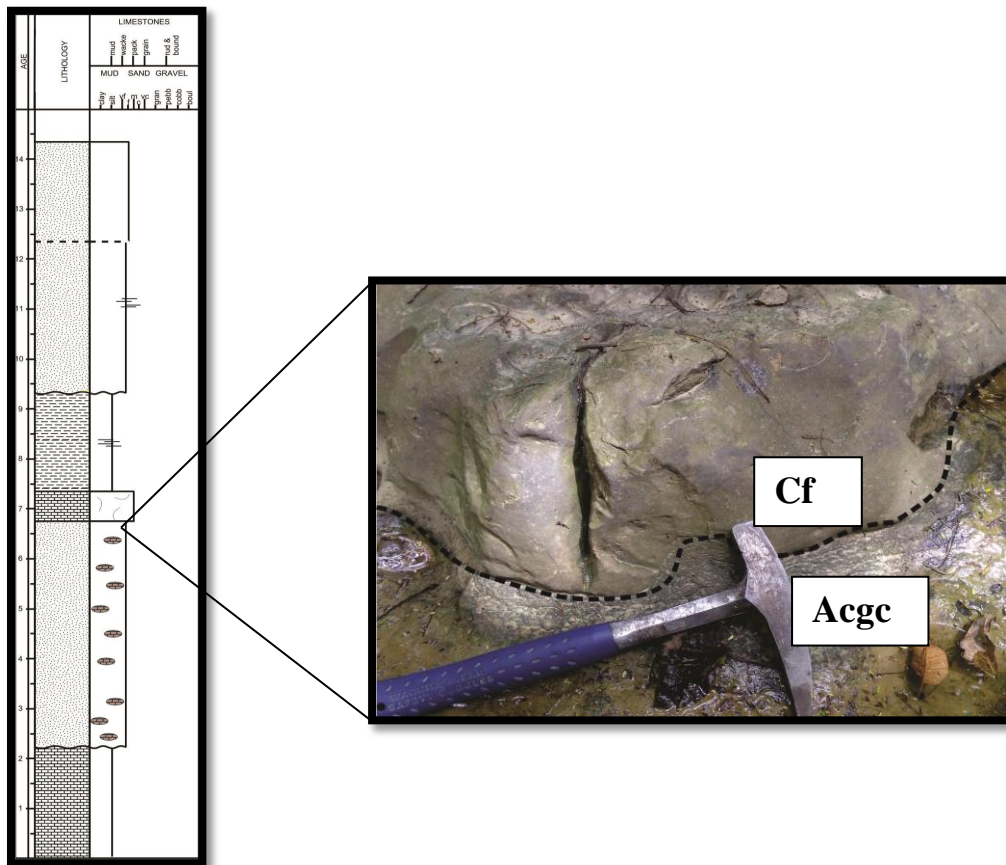


Figura 21. Caliza fosilífera en contacto neto con arenisca calcárea con gravas de caliza aguas abajo, imagen localizada en sección estratigráfica.



Figura 22. Detalle de las fracturas y fósiles presentes en la Caliza fosilífera, se aprecian principalmente conchas de bivalvos con su respectivo tamaño y se puede observar la disolución presente en las fracturas.

4.2.3.3 Facies Shale Arenoso (sha). Este cuerpo litológico que culmina con la sección levantada aguas abajo no se reconoce claramente en contacto con la litología infrayacente pero es visible in situ con un espesor de aproximadamente 250 cm; espesor medido directamente sobre el afloramiento, esta litología está altamente saturada y se asume que se podría reconocer como parte del nivel freático que controla la zona de interés. Se ha caracterizado como shale debido a la disposición y partición en capas físisles con un alto grado de alteración debido a la humedad que presenta; igualmente aunque el tamaño de grano se define como muy fino, se diferencian niveles arenosos finos.

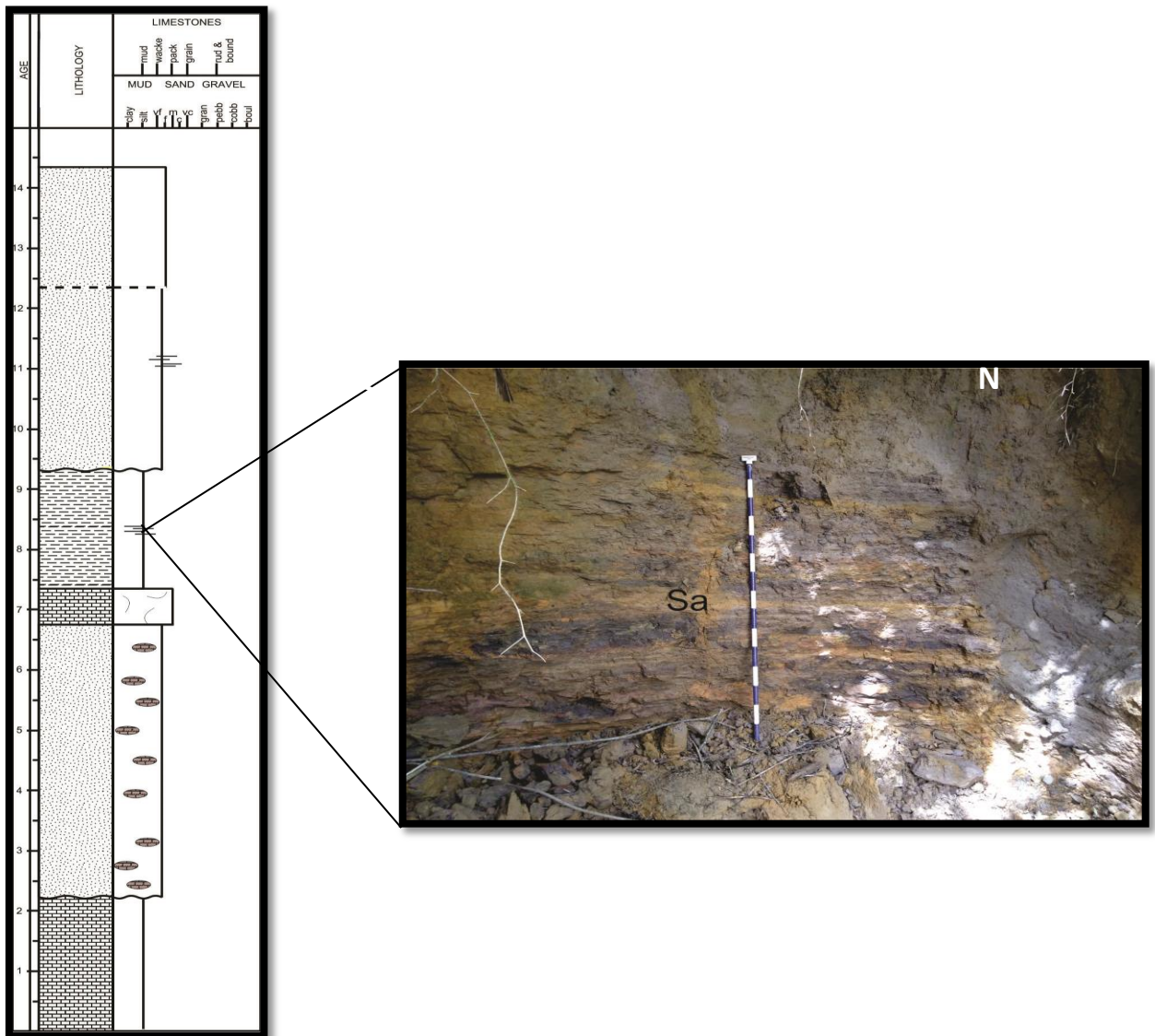


Figura 23. Afloramiento ubicado aguas abajo del sitio de presa, se presenta una litología predominante que corresponde a un Shale arenoso, se observa el alto grado de meteorización debido a la saturación de agua, localizado en sección estratigráfica generalizada.

4.2.4 Sección Estratigráfica Aguas Arriba. Esta sección fue levantada sobre la quebrada la Bejuca, aguas arriba del sitio de presa. Se realizó la descripción de estas capas a escala 1:50 medidas por el método del bastón de Jacob. A lo largo de esta sección se recolectaron 2 muestras donde 1 de estas se utilizaron para análisis petrográficos. La columna consta de base a tope de 3 capas que se describirán a continuación (Ver columna compuesta y detallada en Anexos).

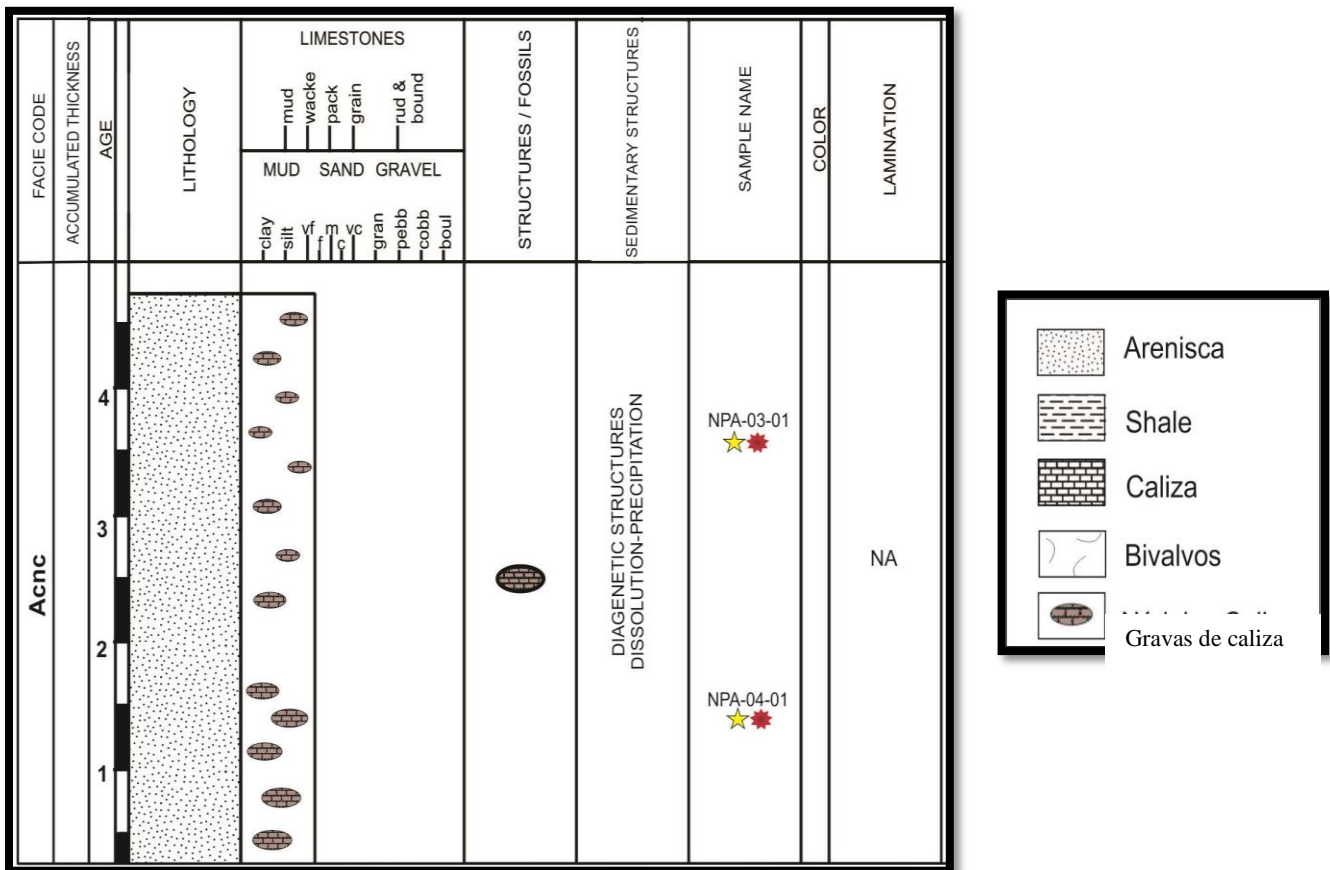


FIGURA 25. Afloramiento de *Caliza microcristalina en contacto con arenisca calcárea con gravas de caliza, localizada aguas arriba del área de embalse y sobre la sección estratigráfica.*

4.2.4.2 FACIES ARENISCA CALCÁREA CON GRAVAS DE CALIZA (Acgc)

Esta facies está presente en las dos secciones levantadas, con una diferencia de altura de 10 m aproximadamente entre un punto y otro. Esta capa presenta un espesor de 2 metros, Está constituido de una matriz principalmente silisiclástica con un aporte calcáreo, los constituyentes principales son cuarzo, moscovita y alquímicos (fósiles de bivalvos principalmente). La matriz se encuentra bien cementada y se encuentra soportando clastos calizos semi redondeados de tamaños que varían de guijas a guijarros, estos clastos calcáreos fueron caracterizados como caliza mudstone o caliza de tamaño de grano muy según la clasificación para rocas de naturaleza calcárea de Dunham 1962, donde se reconoce un cuerpo calcáreo esqueleto-matriz soportado con un porcentaje de granos recristalizados menor al 10 %.

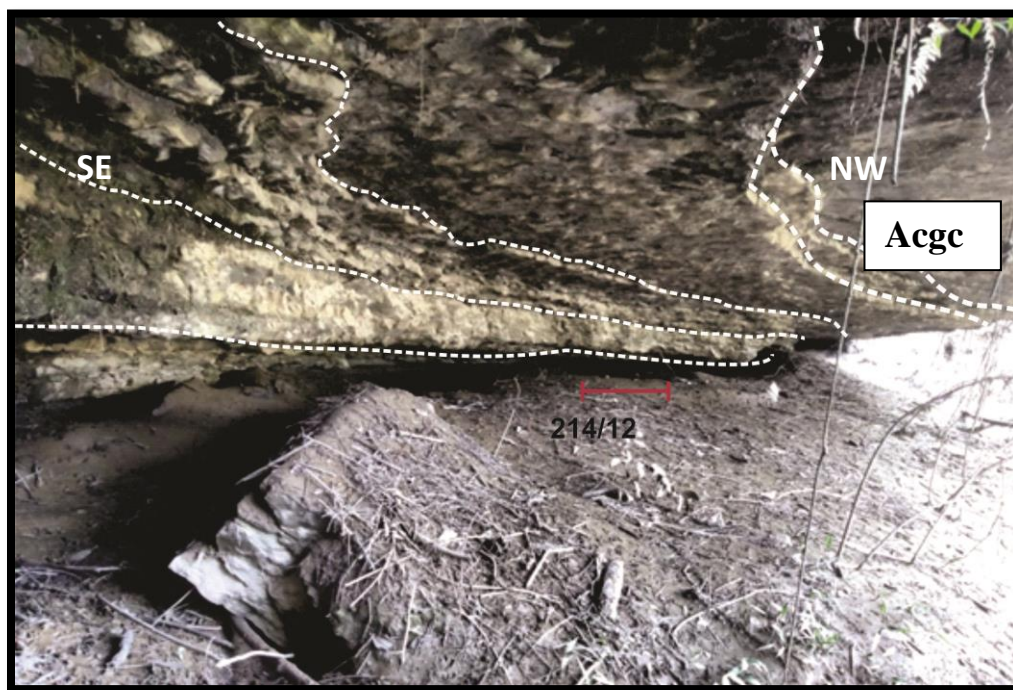


Figura 26. Planos de partición natural o fracturas sobre capa de arenisca calcárea con gravas de caliza, localizada aguas arriba del sitio de presa.

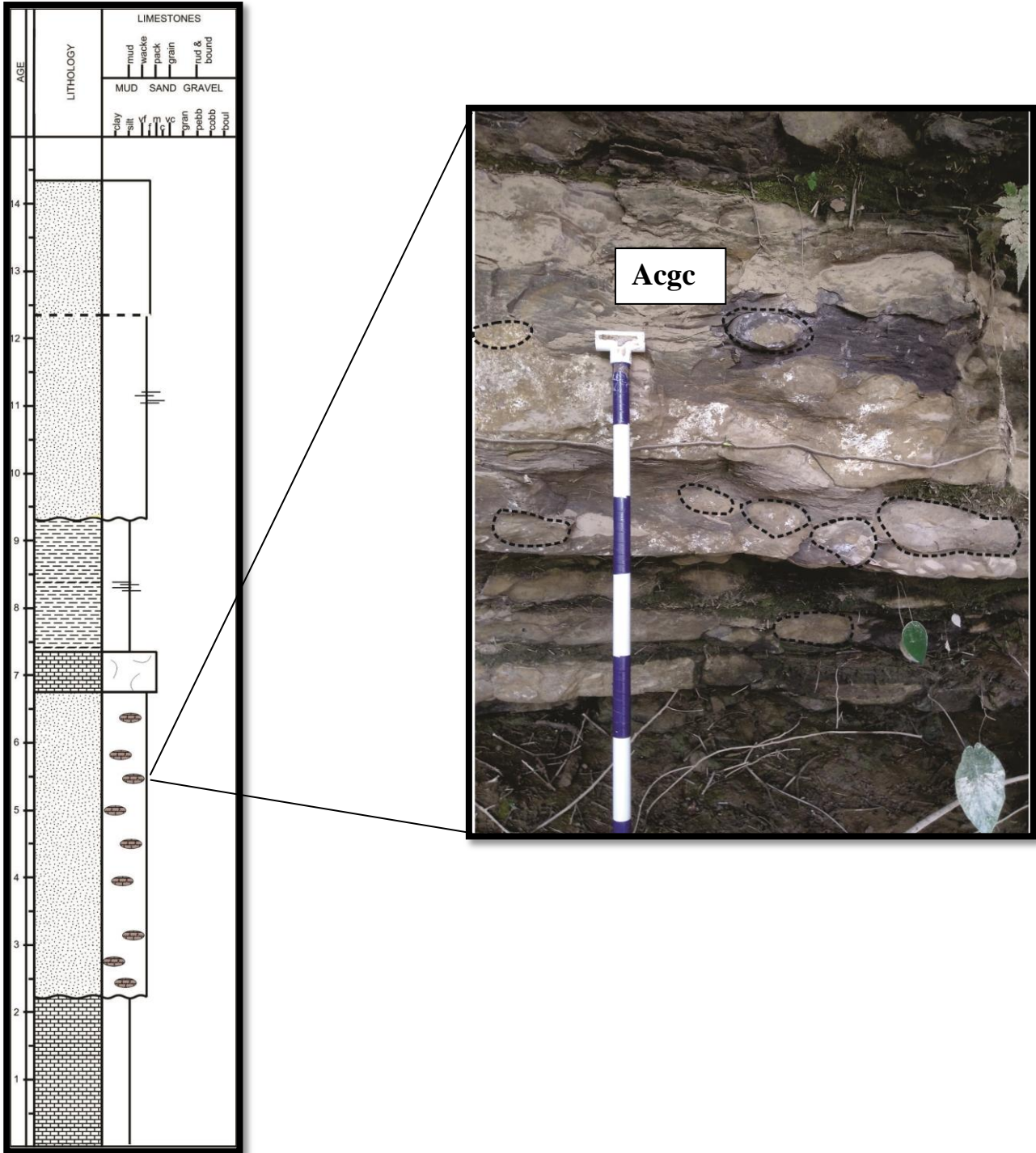


Figura 27. Afloramiento de arenisca calcárea con gravas de caliza, se observan los clastos semi-redondeados de caliza dentro de la matriz silisiclástica, localizada dentro de la sección estratigráfica generalizada.

4.2.5 Contribuciones Estratigráficas para el Desarrollo de la Presa. A partir de las secciones estratigráficas levantadas se identificaron distintas características relevantes para el desarrollo del proyecto” presa la Leona” las cuales se presentan a continuación:

- Se identificaron en general dos tipos de litologías involucradas en el área de almacenamiento de la presa, la primera se presenta en mayor cantidad y corresponde a litologías calcáreas que van desde calizas puras hasta areniscas calcáreas, la segunda corresponde a litologías mucho más silisiclásticas como; areniscas moscovíticas y shales.
- Se identificó la arenisca calcárea con gravas de caliza como la capa involucrada en el almacenamiento del agua sobre el vaso de la presa y sobre la cual actúan los principales procesos de erosión y disolución. De igual manera se obtuvo el espesor de manera aproximada de la capa, y a partir de este análisis se puede estimar la profundidad máxima hasta la cual podrían llegar las infiltraciones.
- A partir del análisis de la columna estratigráfica se logró identificar que aguas arriba del sitio de presa aumenta el aporte silisiclástico y los niveles más finos, esto da una idea de cómo los procesos de meteorización y erosión de estos niveles finos están actuando y son los responsables de la actual colmatación del vaso de la presa.

4.3 Interpretación Ambiental

El ambiente de depositación se deduce combinando las observaciones hechas para cada facies, existencia de asociaciones faciales, información de ambientes modernos y de unidades estratigráficas antiguas que han sido ya estudiadas (Blatt, et al., 1980). Estas condiciones y procedimientos son aplicados para el presente trabajo, donde se hará una breve interpretación ambiental de base a tope para cada facies a continuación.

La facies caliza microcristalina (Cm) no posee bioturbación, ni estructuras sedimentarias apreciables. Estos lodos se acumulan en zonas de aguas tranquilas que no se ven afectadas por las mareas y las fuertes corrientes oceánicas. Dichos hábitats se encuentran en áreas de plataformas de aguas profundas debajo de la base de erosión de las olas. Puede corresponder a depósitos formados en ambientes con bajo nivel de oxígeno o anóxicos, con un substrato pobre para el desarrollo de fauna.

La facies arenisca calcárea con gravas de caliza (Acgc) posee una matriz silisiclástica indicando una importante aporte terrígeno, los clastos son de carácter calcáreo y granodecreciente (Ver figura 28) indicando posiblemente una erosión de una capa infrayacente, para una incorporación posterior a la matriz silisiclástica la cual indica una mayor energía. La capa directamente infrayacente sí corresponde a una capa de lodo micrítico pero no se encuentran evidencias de erosión en el sitio de presa. Posiblemente un ambiente marino somero de alta energía.

Otra posible interpretación implica la formación de esta capa en medio de un ambiente de plataforma carbonatada de tipo Carbonate foreslope (Ver Figura 33), donde principalmente

actúan procesos como corrientes de turbidez, gravity flows y debris flows, provocando la erosión de este lodo micrítico por la alta energía y una posterior depositación junto a una matriz arenosa.

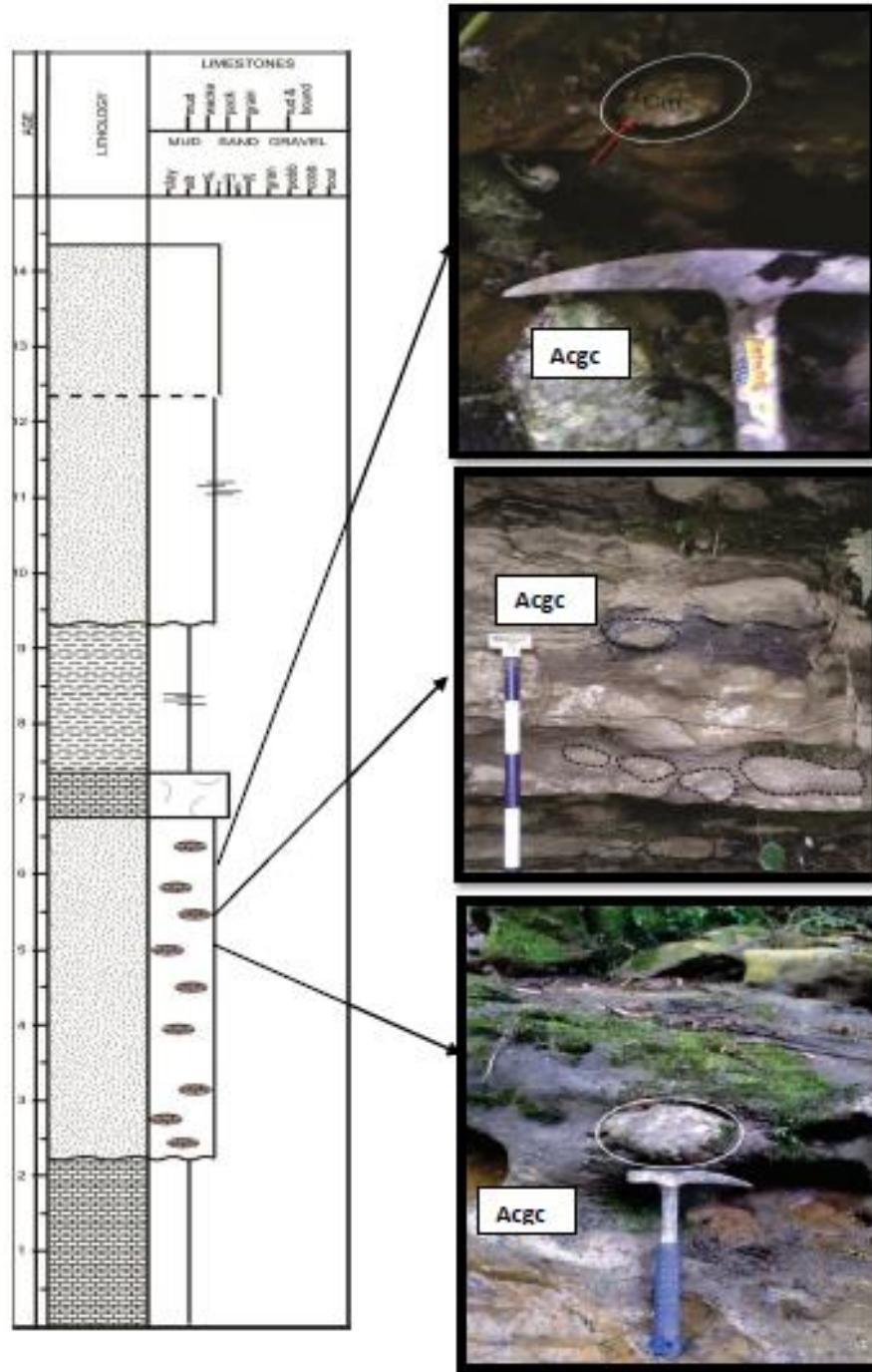


Figura 28. En la figura se pueden apreciar tres afloramientos pertenecientes a la litología de arenisca calcárea con gravas de caliza, se pueden apreciar cambios en los tamaños de las gravas calcáreas, las cuales tienen un patrón grano decreciente de base a tope en la secuencia.

La facies caliza fosilífera (Cf) se puede interpretar como depósitos de agua marinas someras (shoreface), con actividad biológica bastante importante. Dichos sedimentos generalmente se acumulan en plataformas de agua caliente donde la actividad actual ha sido insuficiente para eliminar el lodo en su totalidad.

La facies shale arenoso (Sha) debido a su alternancia de textura, se puede interpretar como un ambiente con fluctuaciones de energía, donde hay depositación de arcilla en ambiente de baja energía y depositación de limo o arena fina en ambiente de energía media. Posiblemente en zonas de inundación en un ambiente transicional o marino somero.

En el Aptiano-Albiano hay una disminución en el régimen de flujo o entendido en gran parte por disminución en la rata de sedimentación, debido a una estabilidad del área, permitiendo una tranquilidad en las condiciones de depósito. Posteriormente hay variación en las condiciones de tranquilidad y agitación, producido por un aumento en el régimen de flujo posiblemente acompañado de una disminución del nivel base donde ocurren ligeros aportes terrígenos, típicos de la parte superior de la Formación Tablazo.

Estas condiciones de agitación y tranquilidad cesan en el Albiano Superior, donde se producen levantamientos en las áreas de aporte y relleno de la cuenca, y reflejan una subsidencia con acumulación de arenas y arcillas representadas por las unidades de Símití y Areniscas de Chiquinquirá.

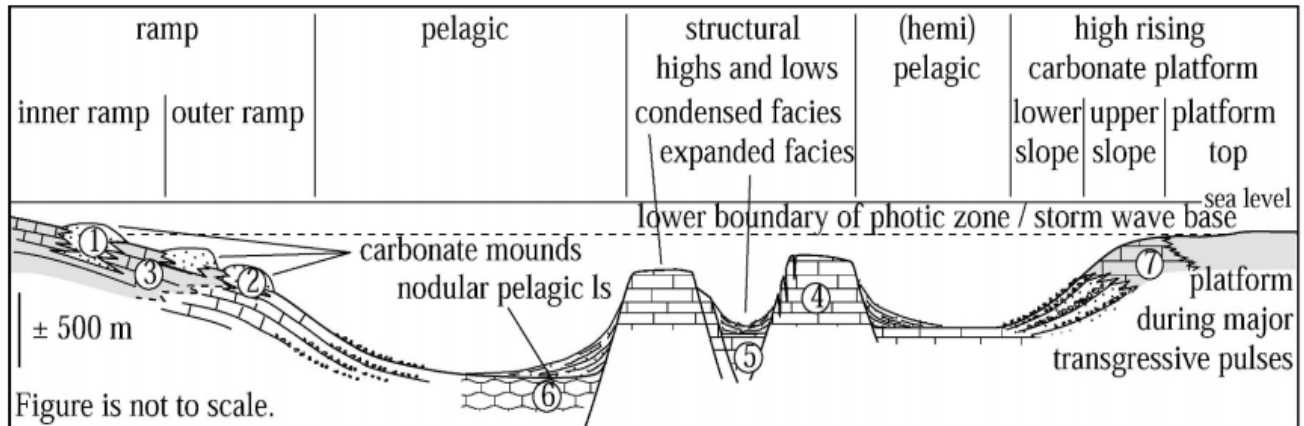


Figura 29. Descripción esquemática de entornos y facies depositadas en un ambiente de plataforma carbonatada. Fuente: Tomado de Bram van der kooij et al (2007).

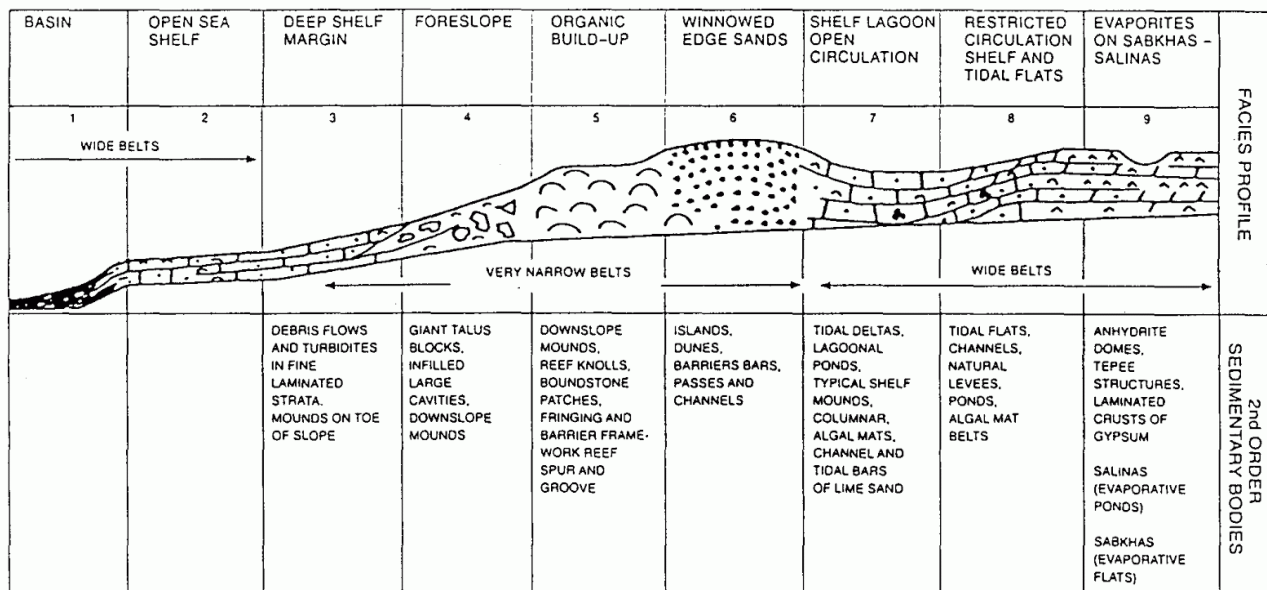


Figura 30. Esquema donde se pueden apreciar las facies de un ambiente típico de plataforma carbonatada, el posible ambiente de depositación pertenece a foreslope. Fuente: Carbonate Facies In Geological History, Wilson (1975).

4.3.1 Contribuciones a Partir de la Interpretación Ambiental para el Desarrollo de la Presa. A partir de las interpretaciones ambientales se identificaron distintas características relevantes para el desarrollo del proyecto” presa la Leona” las cuales se presentan a continuación:

- Se identificó el posible ambiente de la secuencia estratigráfica a partir de la asociación de facies, que para este caso hace parte de un ambiente marino somero de plataforma carbonatada de tipo Foreslope (ver figura 30) según Wilson (1975), Al restringir la interpretación ambiental a un ambiente particular más detallado como lo es el Foreslope, se puede inferir que los ambientes adyacentes presentan litologías calcáreas principalmente, lo que puede indicar la presencia de procesos de disolución y karstificación en un área de mayor extensión y zonas adyacentes, lo cual sería un problema si se optará por cambiar el sitio de presa.
- El ambiente foreslope se caracteriza por alta energía depositando los clastos de mayor tamaño hacia el continente y los de menor tamaño hacia la cuenca, esto se ve evidenciado en el carácter granodecreciente de los clastos perteneciente a la capa de arenisca calcárea. El aumento de tamaño en sus clastos hacía la base de la secuencia podría suponer problemas si se llegarán a disolver, ya que aumentaría en gran proporción la permeabilidad secundaria de la capa y por ende las infiltraciones.

4.4 Análisis Petrográfico

Metodología

Con el fin de realizar el análisis petrográfico, se analizaron 5 muestras las cuales se organizaron en una tabla con su correspondiente código de campo y ubicación geográfica (Ver anexos). Para la clasificación de las muestras se recurrió a las clasificaciones propuestas por los siguientes autores:

Para las rocas carbonatadas se utilizó la clasificación de Folk composicional (1972) y textural (1962), para las rocas silisiclásticas la clasificación de Folk (1974) y para las rocas intermedias que presentan material detrítico y carbonático la clasificación según Correns (1949). Las muestras seleccionadas para el análisis petrográfico corresponden a: Matriz silisiclástica recolectada aguas abajo y aguas arriba del sitio de presa: Nódulo calcáreo: arenisca fina lodosa y caliza fosilífera. Las cuales se describirán a continuación.

4.4.1 Matriz Silisiclástica (NPB-06-01). La muestra presenta material carbonático (60%) que contiene bioclastos (10%) como fósiles de bivalvos, micrita (40%) y esparita (10%); el material terrígeno (30%) que corresponde a cristales de cuarzo subangulares a subredondeados; minerales opacos (3%) y moscovitas (7%).

A partir del análisis realizado se clasificó la muestra como Caliza Arenosa (ver figura 32) según Correns(1979). El análisis petrográfico aportó un mayor detalle y corrigió la clasificación propuesta en campo, la cual correspondía a una arenisca calcárea de grano fino mal calibrada.

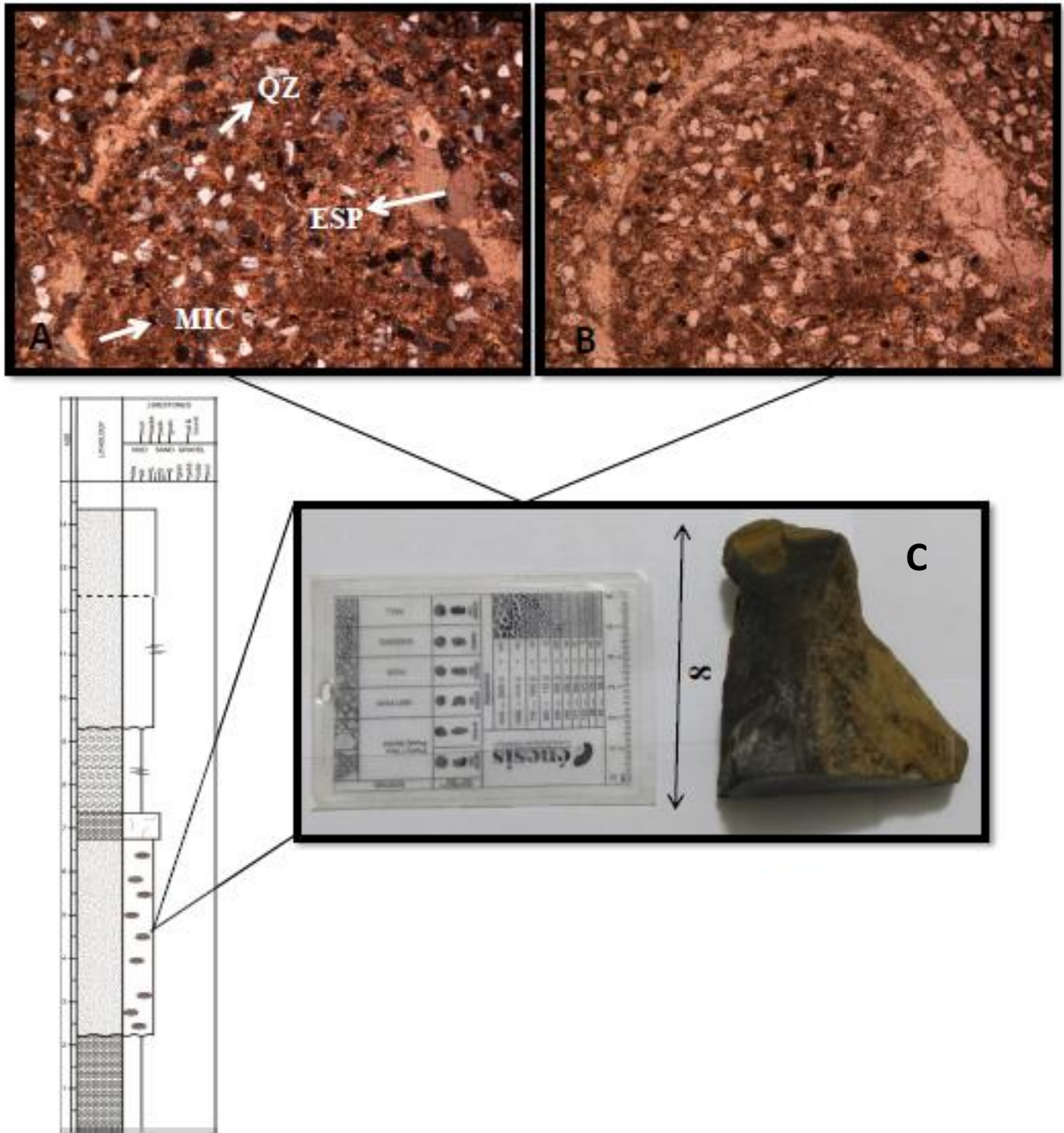


Figura 31. Figura con sección delgada y muestra NPB-06-01 ubicadas en la columna estratigráfica generalizada. La sección delgada presenta en su mayoría cristales de cuarzo, bioclastos y micrita (MIC), la figura A NX, figura B NI y figura C muestra de mano.

Corresponde a la muestra NPB-06-01 recolectada aguas abajo del sitio de presa, clasificada como caliza arenosa según Correns(1949).



Figura 32. Diagrama triangular para la clasificación de rocas intermedias según Correns(1949), el círculo rojo representa la clasificación que obtuvo la muestra.

4.4.2 Matriz Silisiclástica (npa-04-01). La muestra presenta material carbonático (60%) que contiene bioclastos (15%) como fósiles de bivalvos, micrita (35%) y esparita (10%); el material terrígeno (30%) que corresponde a cristales de cuarzo subangulares a subredondeados; minerales opacos (3%) y moscovitas (7%).

A partir del análisis realizado se clasificó la muestra como Caliza Arenosa (ver figura 32) según Correns(1979).

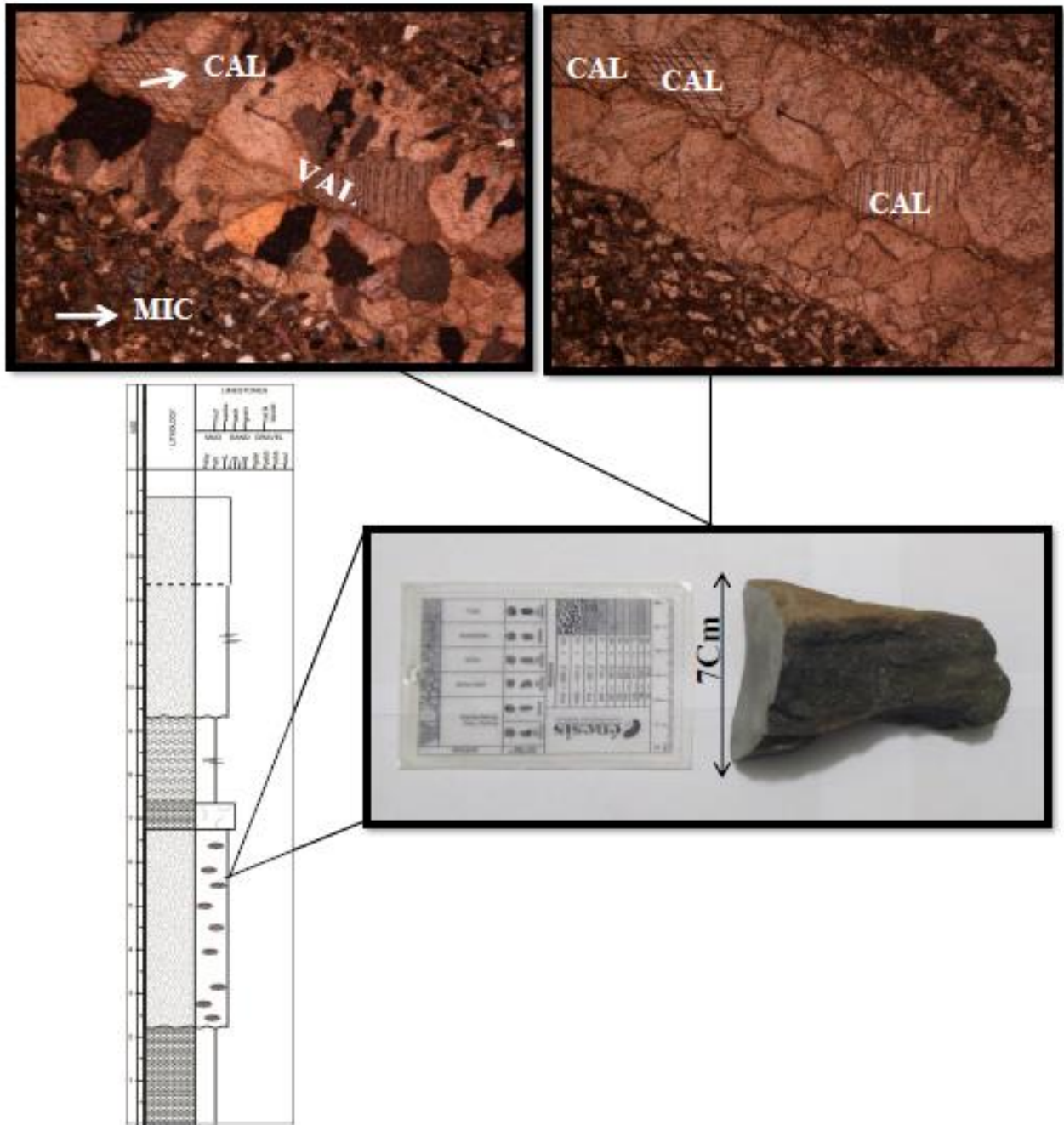


Figura 33. Muestra de arenisca calcárea compuesta principalmente de cristales de cuarzo, valvas (VAL) recrystalizadas de calcita (CAL) y micrita (MIC), figura A -B aumento de 5X en NX y NII, figura C muestra de mano.

4.4.3 Clasto Calcáreo (npa-03-01). La muestra presenta una fábrica lodosoportada, con un tamaño de grano de arcilla a limo y una selección moderada; los ortoquímicos están compuestos por micrita (70-80%) y esparita (13-20%); aloquímicos como bioclastos (7%); el material terrígeno está compuesto por cuarzo (10%) subangular; minerales opacos (3%). La sección corresponde a la muestra NPA-03-01 clasificada como Micrita según Folk (1972), la cual corresponde al campo de rocas microcristalinas.

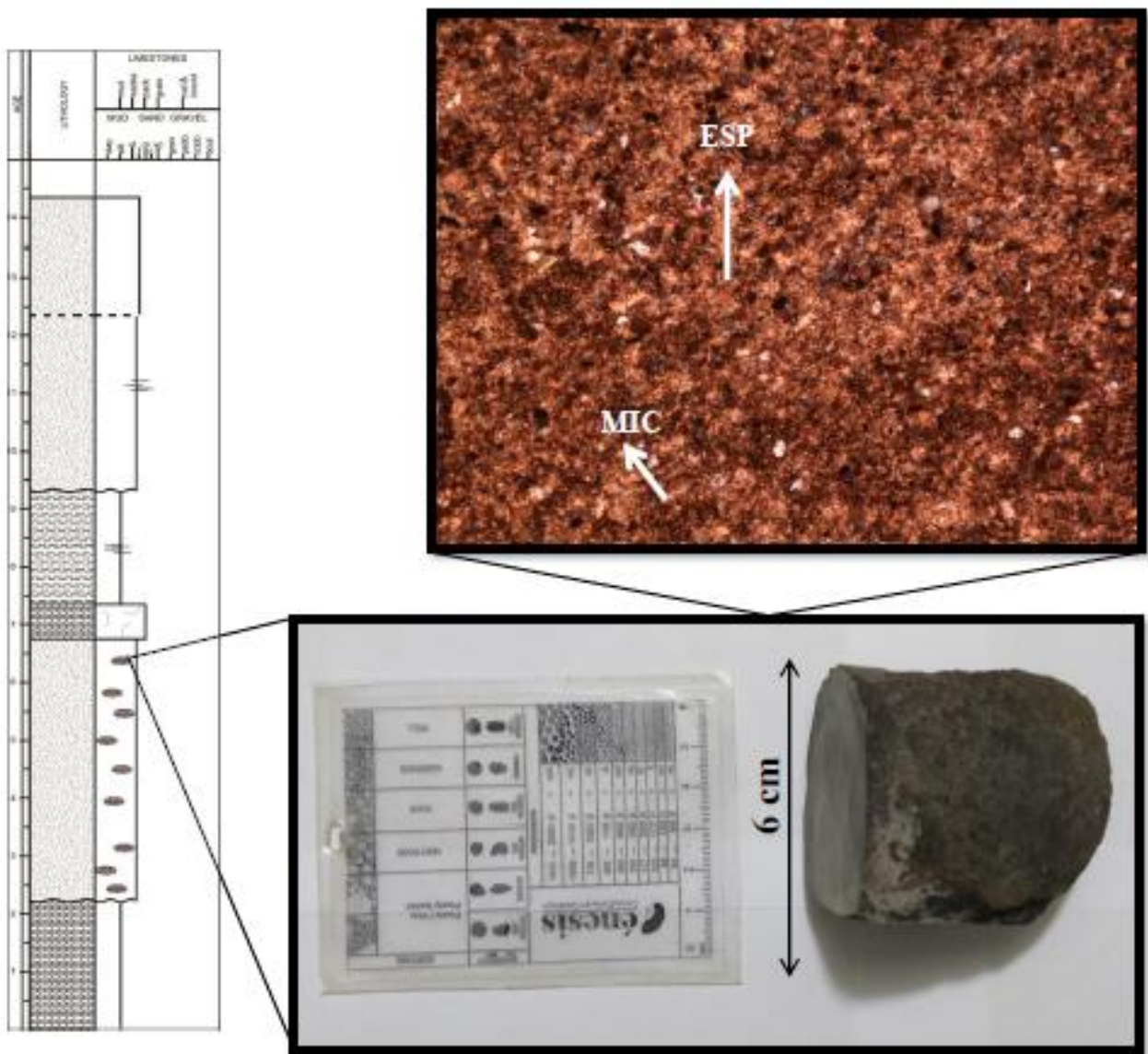


Figura 34. Figura con sección delgada y muestra NPA-03-01 ubicadas en la columna estratigráfica generalizada. La sección delgada se clasificó como micrita según Folk (1972), la cual presenta en su mayoría lodo micrítico, cristales de cuarzo y esparita (ESP) en menor cantidad, aumento 5X en NX.

4.4.4 ARENISCA FINA LODOSA (NPA-01-01). La muestra presenta una fábrica grano soportada, con una textura de arena fina a media, bien calibrada, con una matriz lodosa; presenta en su mayoría cristales de cuarzo(90%) subangulares a subredondeados; micas (5%); materia orgánica (3%); minerales opacos (2%). En la sección se puede apreciar que los cuarzos y los granos en general presentan suciedad la cual puede deberse a la meteorización y oxidación que presentaba la roca en el afloramiento.

La sección corresponde a la muestra a la muestra NPA-01-01 clasificada como cuarzoarenita de grano fino, bien calibrada, con presencia de micas, Mo y minerales opacos. según Folk (1974).

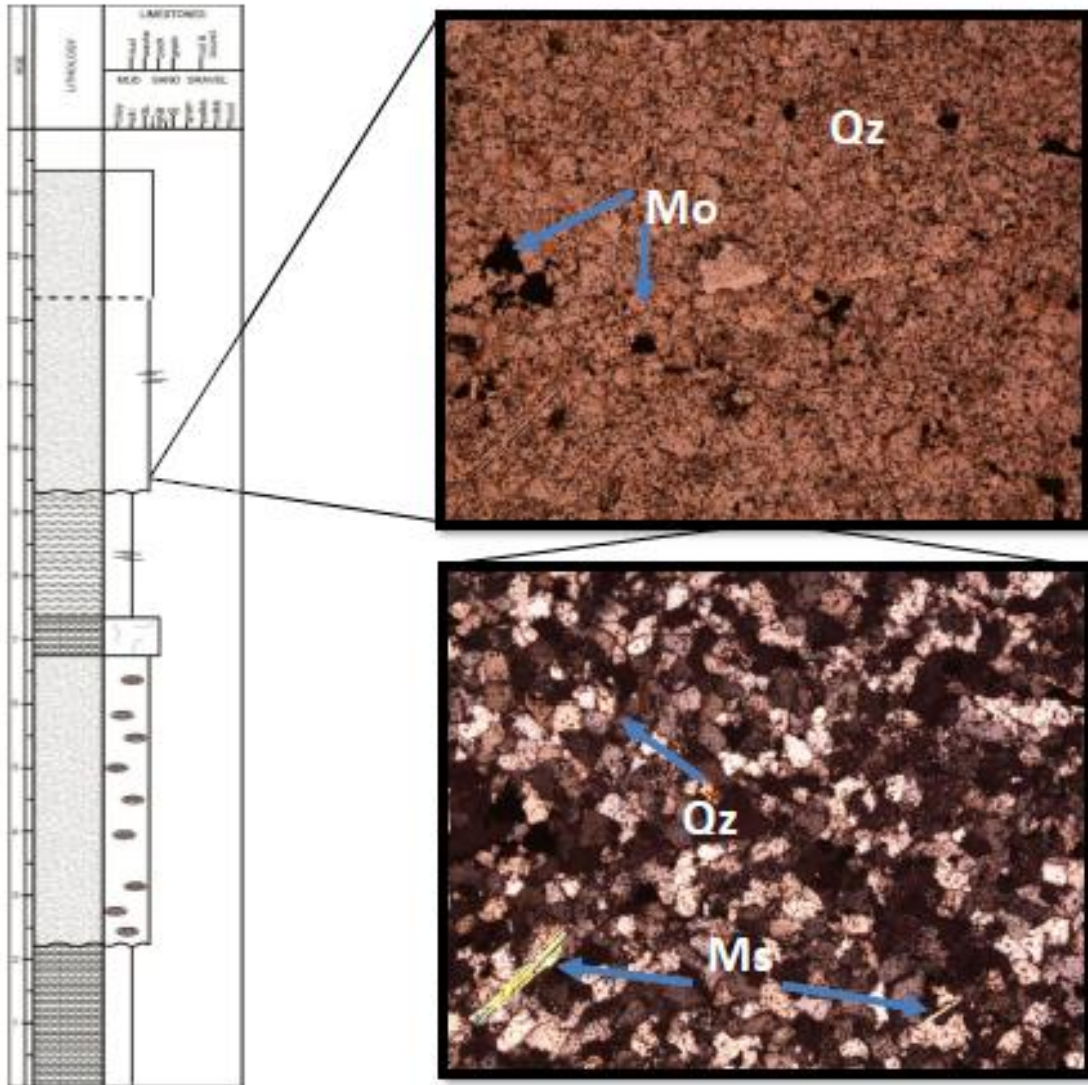


FIGURA 35. Sección delgada de la muestra denominada *cuarzoarenita con moscovita*, se pueden observar moscovitas, cuarzo y minerales opacos, aumento 5X en NX y NII.

4.4.5 Caliza Fosilífera (npb-06-01). Esta muestra presenta una fábrica lodosoportada compuesta de micrita en su mayoría, con un tamaño de grano de limo a grava y una mala selección; los aloquímicos representados por bioclastos(15%) valvas de bivalvos que van de 3cm-5cm pertenecientes a tamaño guijarro; ortoquímicos representados por micrita(70%) en su mayoría y esparita(15%), posiblemente presenta rasgos de bioerosión. La sección corresponde a la muestra NPB-06-01 clasificada como biomicrita según Folk (1972).

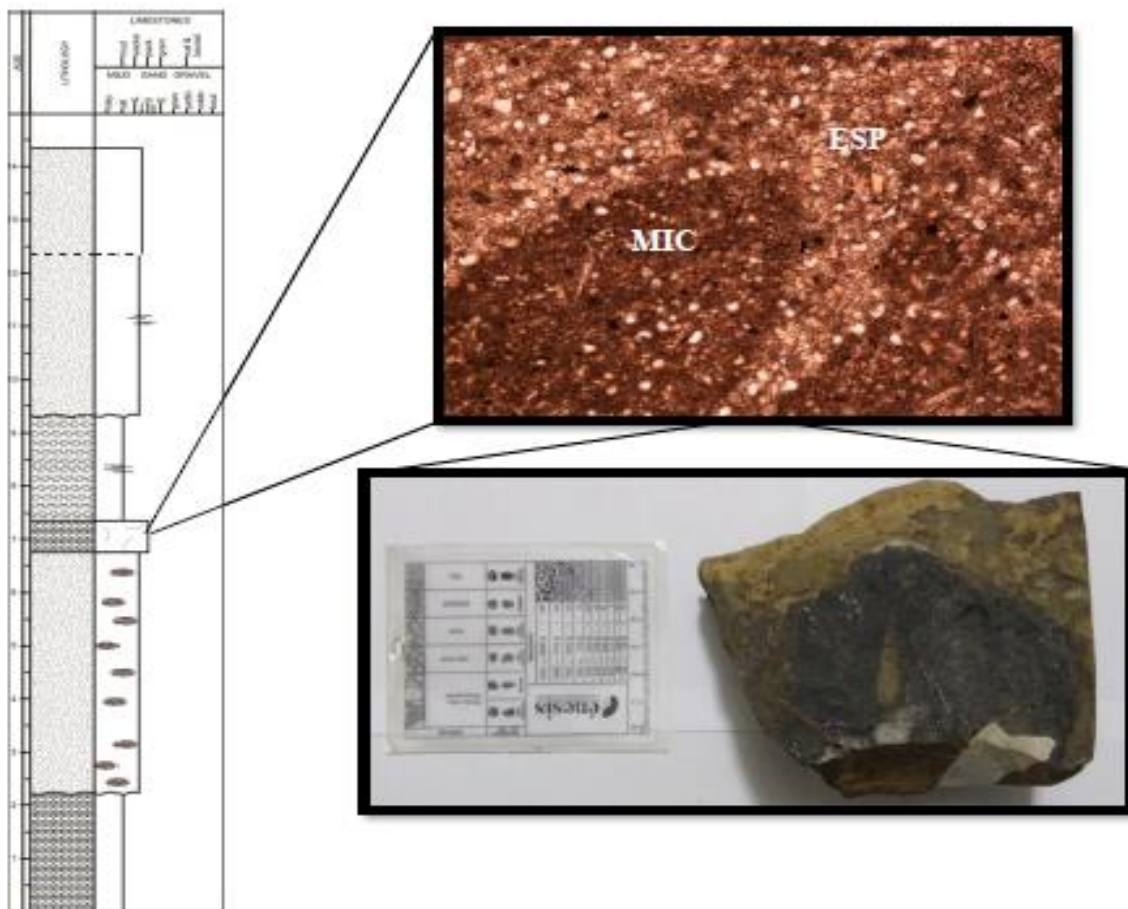


Figura 36. Figura con sección delgada y muestra NPA-06-01 ubicada en la columna estratigráfica generalizada. La sección fue clasificada como biomicrita según Folk (1972).

4.4.6 Contribuciones a Partir del Análisis Petrográfico Realizado para el Desarrollo de la Presa.

- A partir de este análisis se logró comprobar que el componente calcáreo si estaba presente en casi toda la secuencia como conchas recristalizadas o como lodo micrítico, y era el principal factor por el cual se estaban presentando disoluciones y karstificación en el área de embalse, debido a su facilidad para disolverse en condiciones normales.
- El análisis petrográfico tiene importancia al momento de la caracterización litología de las rocas involucradas, ya que permite dar una definición mucho más técnica y exacta a las muestras. A partir de esto se logró descartar el término nódulo el cual se adjudicaba a los clastos que presenta la capa de arenisca calcárea, ya que a partir del análisis de la sección perteneciente al clasto de caliza no se logró evidenciar un crecimiento concéntrico o una recristalización a partir de una partícula o fósil.

5. Geología Estructural

5.1 Marco Estructural Local

El territorio santandereano es geológicamente complejo y tectónicamente dinámico, relacionado con las placas tectónicas de Nazca, Caribe y Suramericana. Se caracteriza por presentar tres estilos estructurales: Uno de fallamiento en bloques en la región oriental, otro de fallamiento inverso y plegamiento en la región central y un tercero representado por el Graben del Magdalena en la región occidental; son regiones bien delimitadas por importantes rasgos tectónicos como los sistemas de fallas de Bucaramanga-Santa Marta y de La Salina (Memoria explicativa de Santander, Clavijo, J. Royero, J. 2001).

El área regionalmente está relacionada con la tectónica de la Cordillera Oriental de los Andes Colombianos, donde ocurre un plutonismo asociado al complejo Ígneo Metamórfico del Macizo de Santander, así como también fallas de tipo normal e inversas y plegamientos, productos de esfuerzos tensionales y compresionales. En esta parte de la cordillera, se han diferenciado cuatro regiones que modelan el marco estructural del área: a) área de Aratoca-Coromoro-Encino; b) área de Charalá-Oiba-Olival; c) región de Mesas y Cuestas y d) región de la Cordillera de Los Cobardes y de Lloriqués.

El área de estudio está comprendida por la región de Mesas y Cuestas la cual está caracterizada por formar una vasta región tabular que se extiende desde el norte del área hasta inmediaciones de Vélez, al suroeste de la zona. Chima y Guadalupe-Suaita, están cubiertas por sedimentos

jóvenes del Cretáceo. Su límite oriental está constituido por las rocas competentes de la Formación Tablazo y al occidente por la Falla del Suárez.

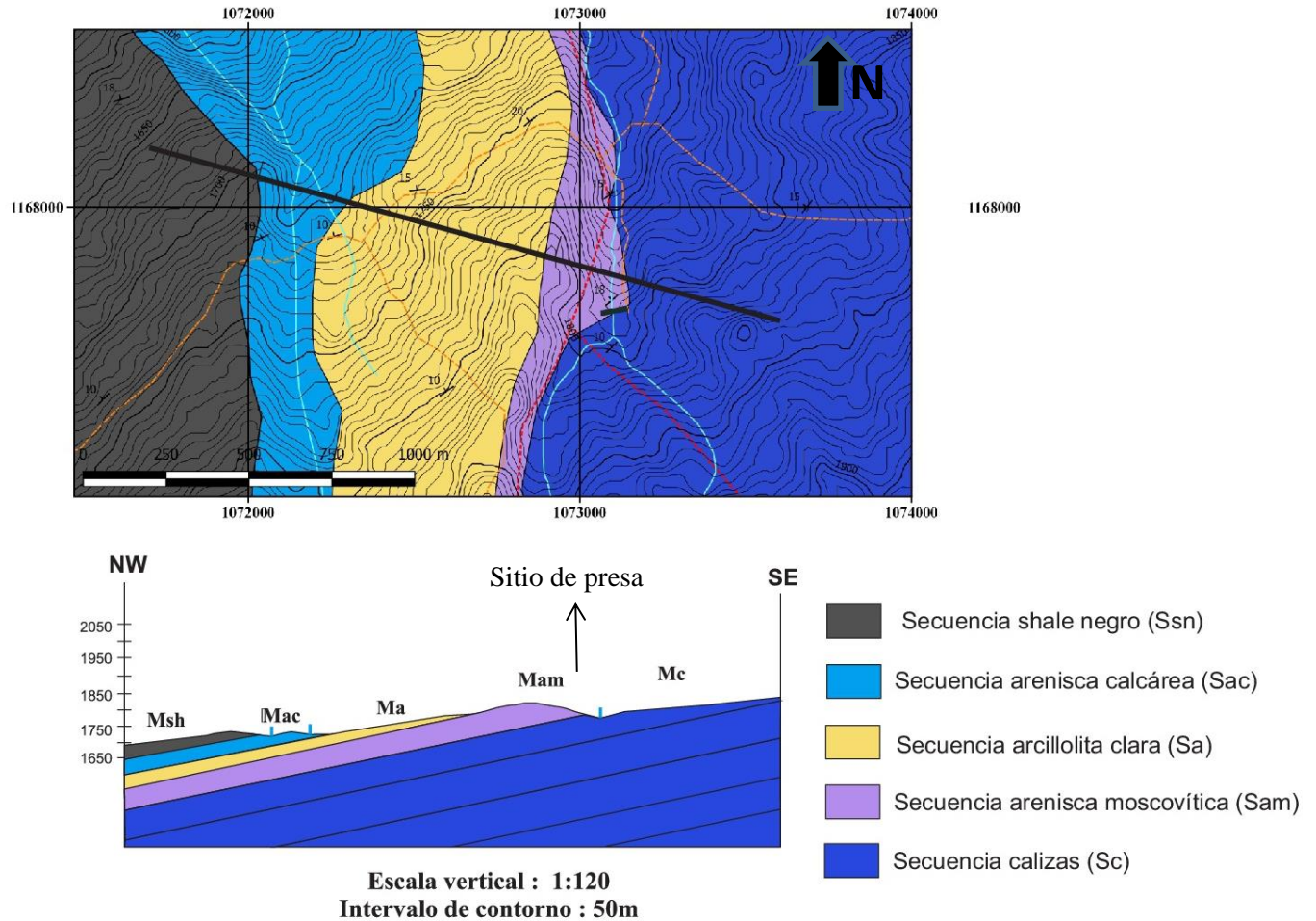


Figura 37. Corte esquemático sobre los 6km² cartografiados, se puede apreciar la inclinación de las capas producto del Sinclinal Suaita-Chima.

5.2 Marco Estructural en el Sitio De Presa

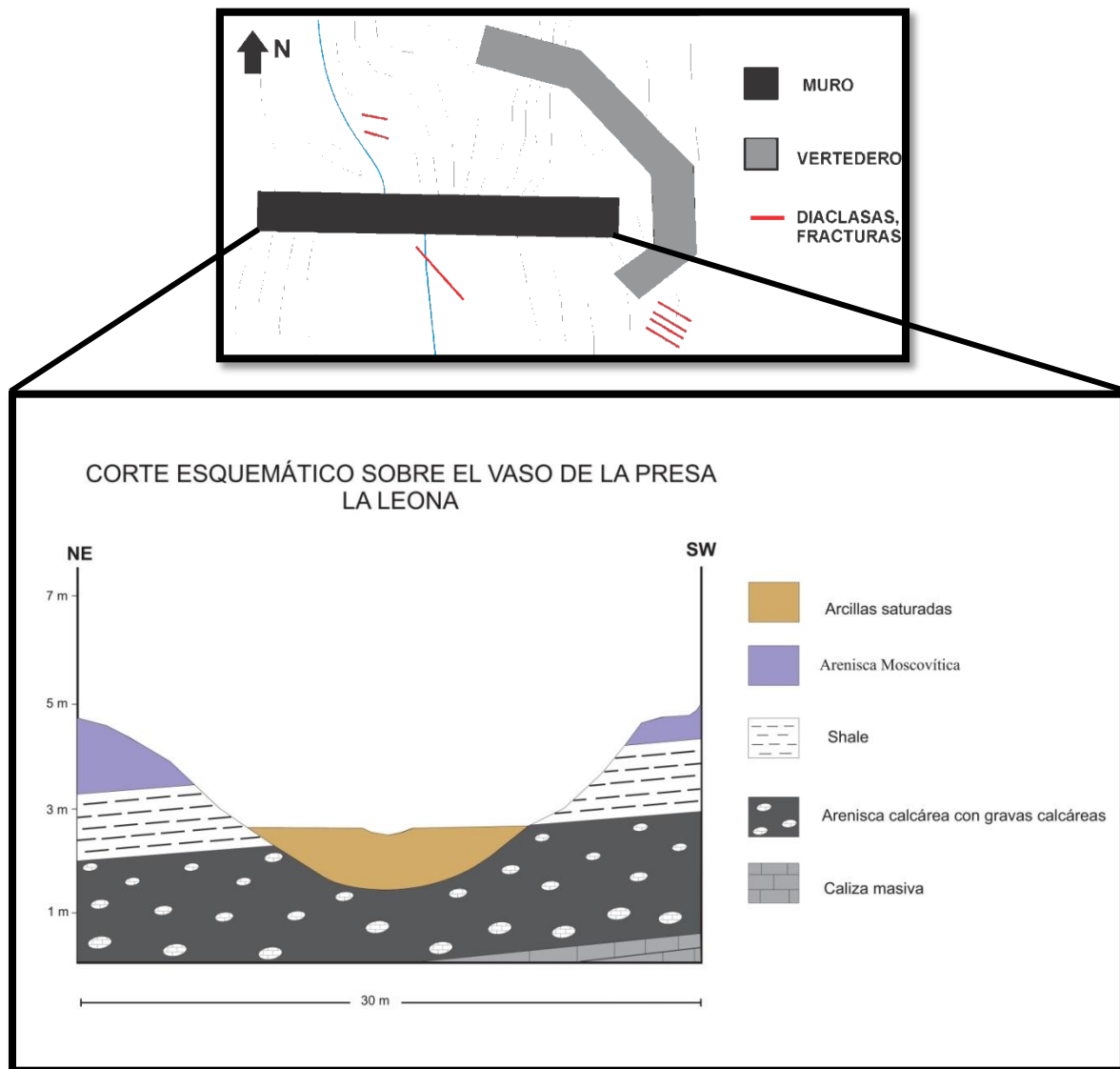


Figura 38. Corte esquemático en dirección NE-SW sobre el vaso de la presa la Leona, el corte presenta la dirección y ubicación del muro de presa.

Su principal rasgo tectónico es el Sinclinal de Suaita-Chima el cual es una estructura normal asimétrica, cuyo flanco occidental más inclinado que el oriental es cortado por la Falla de Suárez y se caracteriza por la presencia de pliegues suaves, con lineamientos paralelos y pocas fallas, las crestas de los anticlinales se encuentran erosionadas, y sus ejes presentan dirección N 30° E

en una extensión aproximada de 60Km prolongándose al sur. El área cartografiada se encuentra sobre el flanco este del sinclinal, en el sitio de presa las capas buzcan en dirección NE con una inclinación de 8-12°.

5.2.1 FRACTURAS Y DIACLASAS SOBRE EL SITIO DE PRESA. Las estructuras encontradas sobre el sitio de presa corresponden principalmente a fracturas y diaclasas orientadas. Las fracturas de mayor tamaño se encuentran sobre el vaso de la presa, son apreciables en fotografías de años anteriores donde el sitio de embalse no se encontraba colmatado de sedimento fino. Los datos de diaclasas se tomaron en lugares adyacentes al sitio de embalse los cuales son representados en la figura 40. Los datos estructurales presentan una preferente orientación y buzamiento de: 170-180°/85-90°. De igual manera se presenta un diagrama idealizado sobre el sitio de presa, donde se puede apreciar la ubicación y orientaciones de las principales estructuras.



Figura 39. Planos de estratificación y diaclasas presentes en la capa de arenisca calcárea sobre el sitio de presa.

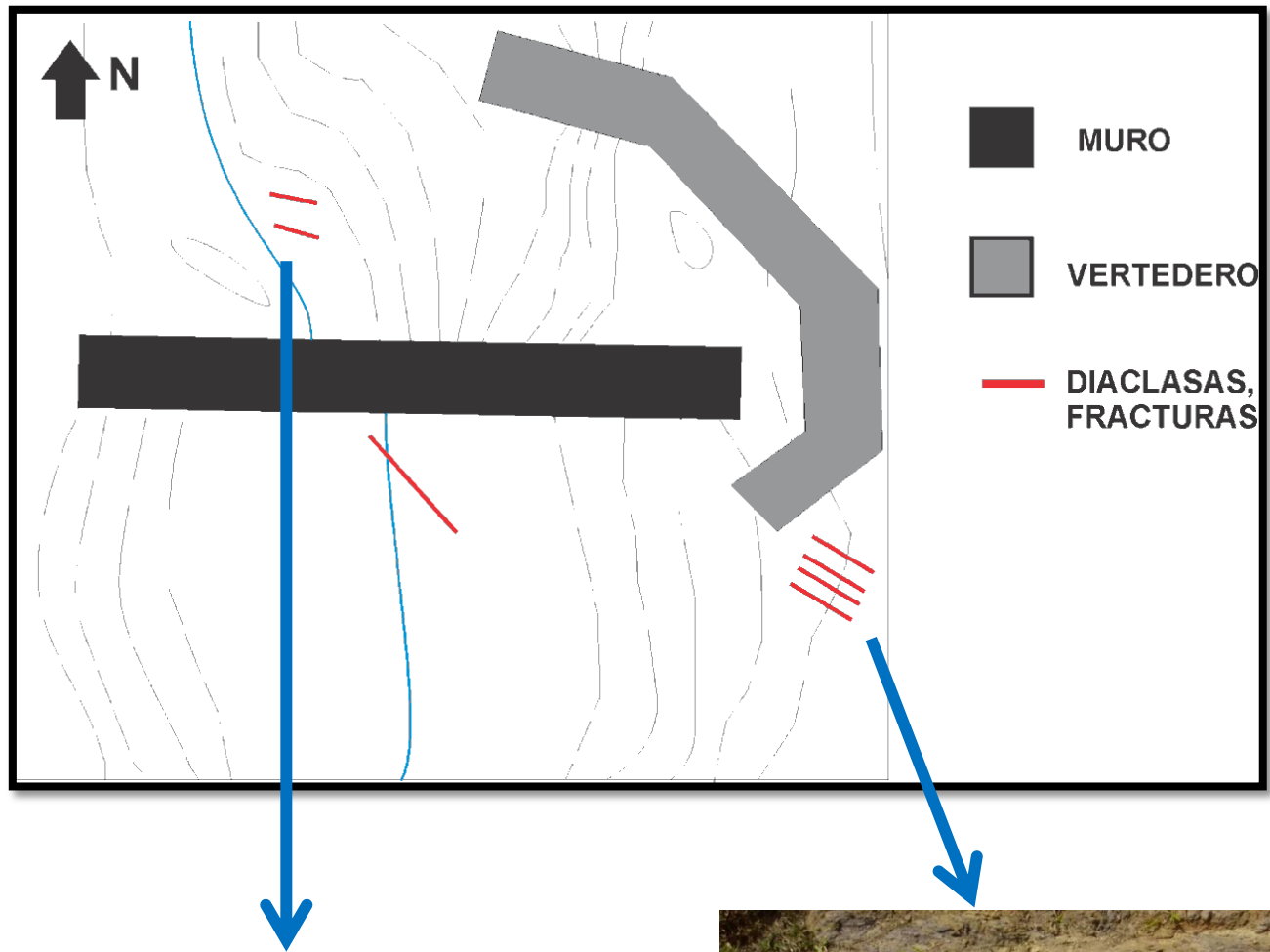


Figura 40. Esquema idealizado sobre el sitio de presa, donde se pueden apreciar la orientación de las estructuras presentes vistas en planta La foto de la izquierda hace parte de la caliza fosilífera y la derecha la arenisca moscovítica.

5.3 CONTRIBUCIONES ESTRUCTURALES PARA EL DESARROLLO DE LA PRESA

- Se identificaron fracturas aguas abajo del sitio de presa sobre la capa de caliza fosilífera y diaclasas en lugares cercanos al sitio de presa (ver figura 40), estos datos presentaban una misma dirección NE-SW y buzamiento 75-80°, al igual que la orientación que presentaban las fracturas expuestas en el vaso de la presa años anteriores (ve figura 43C). Esta similitud en los datos estructurales nos indica que un posible control estructural en el área de embalse es el causante de la gran cantidad de fracturas, las cuales con ayuda de procesos de disolución y karstificación están involucrada en las infiltraciones.

6. Concepto de Karst

6.1 Definición

Las cavernas no son elementos aislados, están situadas en un contexto más amplio como el macizo que las contiene y forman parte de un sistema en el que no sólo la roca, sino también el agua que circula a través de ella, pasan a ser constituyentes esenciales. Se puede definir una caverna como un agujero o vacío contenido por la roca que lo rodea. Llama la atención sobre este hecho, para destacar que el medio subterráneo sólo existe por la roca que lo rodea; en consecuencia, esta roca (el macizo que contiene las cavernas) pasa a ser un elemento esencial en su definición (Geze, 1974).

Los vacíos excavados en la masa rocosa son producto de la acción físico-química de las aguas circulantes. El agua es el sujeto activo y la roca el soporte pasivo de su acción. La circulación del agua es un proceso dinámico y la relación anterior implica una organización progresiva del drenaje subterráneo que tiene por consecuencia una jerarquización de los vacíos excavados (Galán, 1991).

Las cavernas son una parte de un sistema de drenaje subterráneo. La clave que permite comprender su génesis y desarrollo se encuentra en la estructura, funcionamiento y evolución que experimenta el sistema a nivel del conjunto. En este sistema intervienen procesos hidrogeológicos relacionados a su vez con condiciones morfo- genéticas regionales. En el interior del sistema existe una interacción entre la cinética de los equilibrios químicos responsables de la disolución y la velocidad y características de las circulaciones. Esta

interrelación permite explicar la génesis simultánea de una estructura subterránea y de una morfología de superficie asociada a ella (Galán, 1991)

Resumen características del karst

- La formación de cavidades en rocas solubles afecta básicamente a rocas carbonáticas y evaporitas, en las cuales las cuevas son formadas por la acción del agua circulante sobre rocas compactas fisuradas.
- Lo esencial de la karstificación reside que se logre una red de drenaje subterráneo, donde la acción físico-química del agua degrade la roca.
- La permeabilidad de las calizas depende de su litología, fisuras, discontinuidades y grado de karstificación.

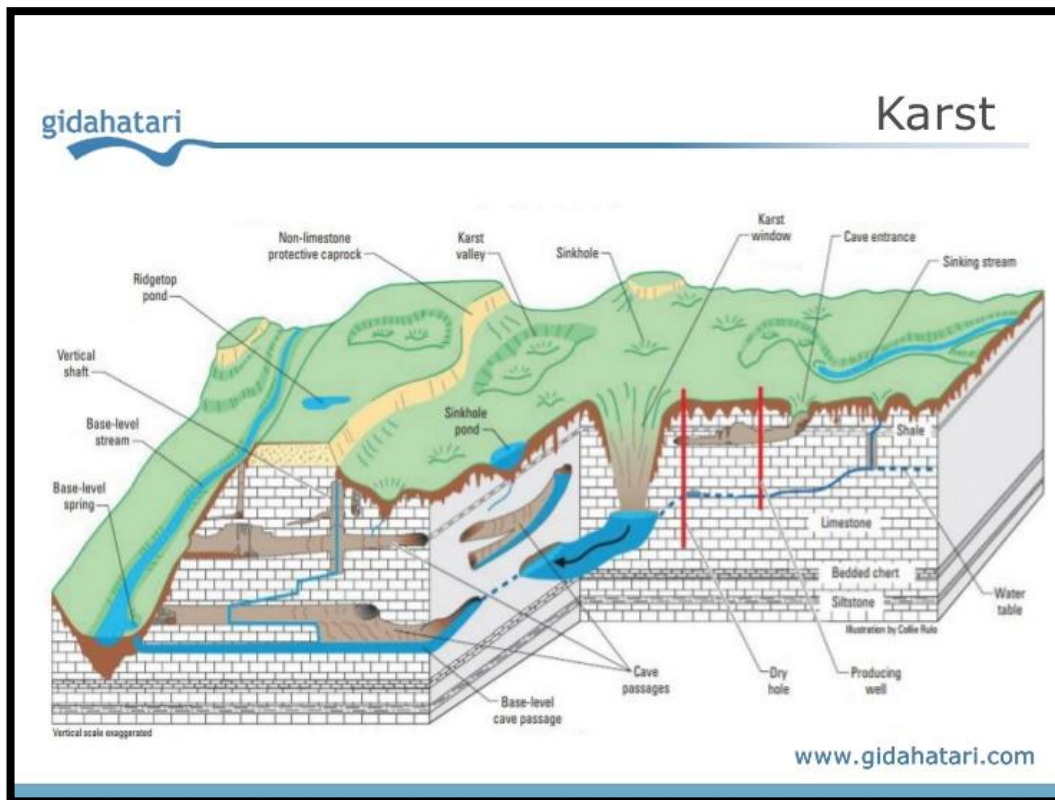


Figura 41. Esquema sobre la formación generalizada de ambientes kársticos.

6.2 Evidencias de Karstificación

El sitio de presa cumple con las características litológicas y estructurales para la formación de karst, además el agua posee un pH ácido principalmente en épocas secas, potencializando la karstificación. Las principales evidencias de karstificación encontradas a partir del trabajo de campo realizado se encuentran aguas abajo y arriba del sitio de presa, de igual manera en la vía que conduce el municipio de Suaita al sitio de presa.



Figura 42. Evidencias de karstificación sobre el área de embalse.



Figura 43. Evidencias de karstificación; A y B: Disolución en forma concéntrica sobre quebradas adyacentes, esto puede corresponder al principio de formación de dolinas; C y D: Fracturas sobre el vaso de la presa ensanchadas producto de la karstificación.

6.3 Análisis de Ph

6.3.1 Definición de Ph. Se trata de una unidad de medida de alcalinidad o acidez de una solución, más específicamente el pH mide la cantidad de iones de hidrógeno que contiene una solución determinada, el significado de sus sigla son, potencial de hidrogeniones, el pH se ha convertido en una forma práctica de manejar cifras de alcalinidad, en lugar de otros métodos un poca más complicados.

El potencial de hidrógeno (pH) influye la disolución y la precipitación de CaCO_3 . Un valor bajo de pH favorece la disolución de CaCO_3 , un valor alto de pH favorece la precipitación de CaCO_3 .

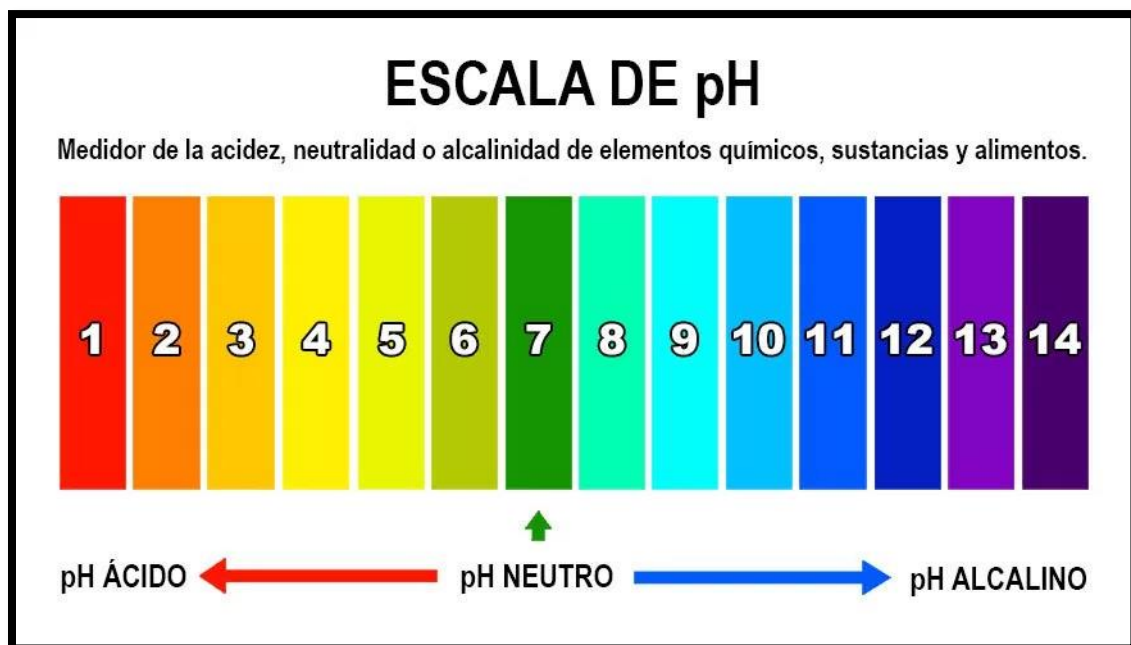


Figura 44. Escala de pH. Fuente: Farmacia Torrent, Organic Andorra.

6.3.2 RESULTADOS. En primer lugar se recolectaron dos muestras de agua sobre la quebrada la Bejuca en época de invierno. Las muestras se tomaran de agua en movimiento y estancada. Estas muestras se envasaron en botellas de plástico y se prosiguió a llevar las muestras obtenidas a la planta de tratamiento del municipio de Suaita.



Figura 45. Evidencias de oxidación del agua y karstificación en el sito de presa.

Resultados Planta de Tratamiento Municipio De Suaita:

- Primera prueba: ph 6.8
- Segunda prueba: ph 7.0

La primera prueba hace referencia a la muestra de agua estancada, como se puede observar presenta mayor grado de acidificación o acidulación, posiblemente por su bajo contenido de oxígeno y su alto contenido de material ferruginoso.

La segunda prueba corresponde a la muestra de agua en movimiento, presenta un pH normal para aguas naturales. Es importante señalar que el Carbonato de calcio es el constituyente principal de las calizas y es poco soluble en agua pura. No obstante el agua natural posee CO₂ en solución y de ácido carbónico (H₂CO₃). Es gracias al ácido que la caliza se disuelve.

7. Métodos Geofísicos

Para la toma de datos geofísicos llevada a cabo se utilizaron dos herramientas de exploración indirecta GPR (Ground-Penetrating Radar) en búsqueda de establecer las posibles profundidades hasta donde se estaban desarrollando las fracturas encontradas sobre el vaso de la presa y la magnitud y continuidad de los procesos de karstificación. Se utilizó el equipo de Geoelectrica para determinar el parámetro de resistividad a profundidad, mediante la inyección de corriente eléctrica en el subsuelo y la medición del potencial resultante a través de un arreglo tetraelectródico.

Los métodos de prospección geofísica permiten evaluar las características del terreno basándose en la medida de ciertas propiedades físicas de los materiales que constituyen el subsuelo, tomadas generalmente en superficie. Gracias a su rapidez y economía, los métodos geofísicos están especialmente indicados para investigar áreas extensas o como fases previas de la investigación, ya que permiten obtener gran cantidad de información (ya que se obtiene un registro continuo de datos del subsuelo a lo largo de todo el perfil analizado y no sólo datos puntuales, como ocurre con los ensayos mecánicos empleados tradicionalmente).

Los métodos geofísicos son métodos de investigación indirectos, por lo que deben ser considerados siempre como métodos complementarios de reconocimiento, debiendo estar acompañados por prospecciones directas (UCAM, sin fecha).

7.1 Georadar (Gpr)

El georadar o Ground Penetrating Radar (GPR) es una técnica no destructiva empleada en investigaciones poco profundas del subsuelo, obteniéndose resultados muy buenos en la localización de objetos enterrados y cartografía del subsuelo. Es un método de prospección geofísica que se basa en la emisión al terreno de pulsos electromagnéticos de escasa duración (1-20 μ s) mediante una antena emisora apantallada de frecuencia variable (entre 25 Mhz y 2 Ghz) en función de la profundidad de investigación. Existe una relación inversa entre la profundidad de investigación y la frecuencia de la antena, de manera que a mayor frecuencia de la antena se alcanzará una profundidad de investigación menor, aunque la resolución de la señal registrada será mayor. Así, la selección de la frecuencia de las antenas, para un estudio determinado, es función del compromiso entre la resolución y la penetración.

Cuando la onda radiada al subsuelo halla heterogeneidades en las características electromagnéticas del terreno, como contactos litológicos, fracturas, huecos, elementos metálicos, estructuras enterradas, etc., parte de la energía se refleja a la superficie y parte se refracta hacia profundidades mayores. La señal reflejada es recibida por una antena receptora, similar a la antena emisora, en superficie. La señal reflejada debe ser amplificada, transformada al espectro de la audiofrecuencia y registrada.

La propagación de las ondas en el subsuelo está determinada por las propiedades electromagnéticas características de los materiales: conductividad, permitividad dieléctrica y permeabilidad magnética; de manera que las reflexiones de las ondas se producen debido a los contrastes de dichas propiedades.

Básicamente transmite ondas electromagnéticas de banda ultra ancha en los materiales. Las ondas electromagnéticas van atravesando diferentes capas del subsuelo, provocando una reflexión de parte de esa energía. Una parte de la onda electromagnética se refleja cuando se alcanza un límite entre dos materiales con diferentes propiedades eléctricas. El receptor detecta entonces estas reflexiones, generando un registro en el dispositivo para realizar un análisis posterior (UCAM, sin fecha).

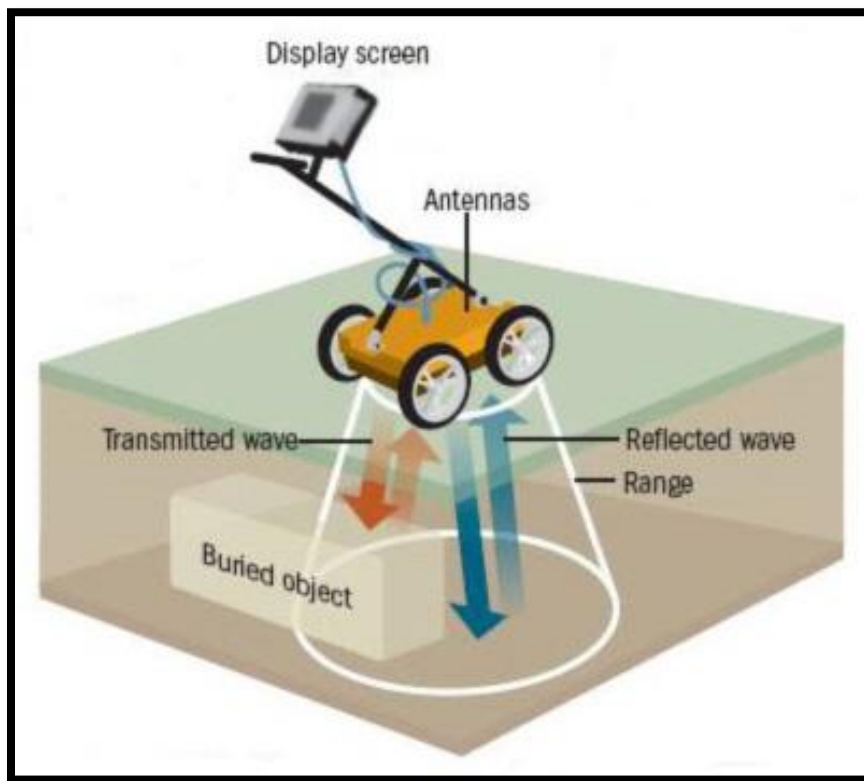


Figura 46. Esquema sobre el funcionamiento del GPR. Fuente: Imagen tomada de Hazardous Materials Specialists.

7.1.1 Equipo. El equipo de georadar está formado, fundamentalmente, por:

- **Unidad Central:** Controla los tiempos de envío de señales eléctricas que son convertidas en electromagnéticas por la antena emisora y recibe las señales reflejadas en forma de registros de radargramas.
- **Antena Emisora:** Transforma los impulsos eléctricos que recibe de la unidad central en ondas electromagnéticas de corta duración que se emiten hacia el medio que se quiere estudiar.
- **Antena Receptora:** Capta la energía reflejada y transformada en pulsos eléctricos que envía a la unidad central.
- **Odómetro:** Rueda conectada a la antena.



FIGURA 47. Antena de 100Mhz utilizada en la adquisición de datos.

7.1.2 Adquisición de Datos . La adquisición de datos se realizó a partir del equipo SIR-3000, se analizó el terreno, se eligió el lugar más favorable (ver figura 48) sobre el vaso de la presa para utilizar el equipo y realizar las transectas, se marcó el inicio y final de de cada una, se definió el tipo de suelo que presentaba el vaso para realizar la calibración del equipo; esto se hizo a partir del trabajo realizado el campo y la columna estratigráfica levantada en el sitio de presa y posteriormente se escogió la antena que presentará mayor efectividad para el estudio siendo la de 100 Mhz.

Se escogieron las transectas principales para la adquisición de datos siendo transversales al cauce y algunas paralelas. La toma de datos se inició con un barrido sistemático de la superficie a lo largo de una línea, durante el desplazamiento se emiten gran cantidad de pulsos por segundo (entre 1 y 100 pulsos), de manera que se obtiene un perfil, que se puede considerar continuo por la cantidad de trazas que se obtienen, en el que se indica el tiempo total de viaje de una señal al pasar a través del subsuelo, reflejarse en una heterogeneidad y volver a la superficie, medido en nanosegundos. Este gráfico distancia/tiempo se conoce como radargrama y es el que visualizamos en la pantalla.

7.1.3 Resultados. Los resultados obtenidos fueron calibrados mediante los apiques realizados en el 2014 por la Unión Temporal Presa la Leona (ver anexos). Para calibrar las señales recolectadas se escogió la sección No 5(figura 48) debido a que presentaba la misma dirección, longitud y la mayor cercanía a los apiques realizados. Una vez calibradas las señales obtenidas se pudo correlacionar los apiques, las señales y la columna estratigráfica (ver figuras 49, 50,51).

Se escogieron 5 secciones obtenidas por medio del equipo de georadar. Estas secciones fueron las que representaban las mejores señales captadas por el equipo, debido a la saturación presente en el vaso de la presa. De las 5 secciones se han escogido para correlación estratigráfica dos secciones transversales al vaso (sección 5 y 2) y una sección paralela al curso de la quebrada (sección 4).



SECCIÓN	TIPO	RUMBO
No 1	Transversal	210°N
No 2	Trasnaversal	350°N
No 3	Paralela	100° N
No 4	Paralea	110°
No 5	Transversal	200°N

Figura 48. Principales transectas obtenidas a partir de georadar.

7.1.3.1 Sección Transversal No 2.

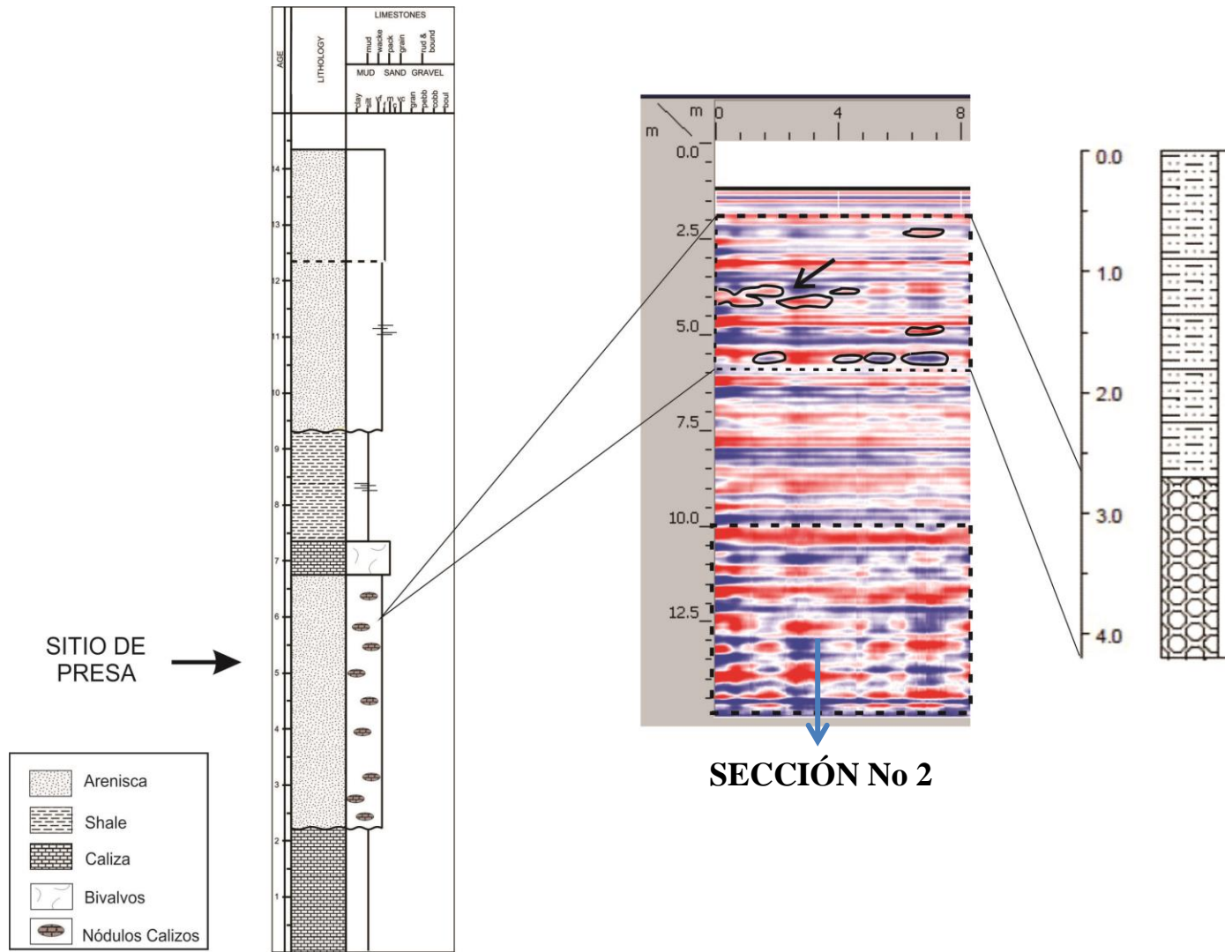


Figura 49. Sección No 2, se puede observar la correlación de la sección estratigráfica generalizada del área de presa con los ensayos de perforación y el resultado de GPR.

La sección No 2 representa un recorrido transversal al vaso de la presa (ver figura 48), la señal emitida por el GPR desde 0.0 m hasta aproximadamente 2.5m hace parte de una pila de sedimentos arcillosos depositados sobre la primera capa de roca firme los cuales son evidentes en el sitio de presa. Este sedimento que en la actualidad se encuentra colmatando la presa es el posible resultado de procesos erosivos de miembros litológicos que se encuentran en la parte superior de la columna estratigráfica (ver anexos) constituidos en su mayoría por minerales arcillosos.

Posteriormente entre los 2.5m hasta aproximadamente 6 metros, se pueden apreciar diferentes clases de interferencias primando las geometrías ovaladas e irregulares (ver figura 49). Por evidencias fotográficas tomadas anteriormente y el trabajo realizado en campo se sabe que la capa que soporta el área del almacenamiento del agua es la arenisca calcárea con gravas de caliza. Ahora remitiéndonos a la señal obtenida, este intervalo nos puede indicar un material o cuerpo rocoso heterogéneo el cual presenta distintas respuestas electromagnéticas evidenciadas en las señales obtenidas. Estos cambios de geometría y disposición en la señal pueden estar asociados a los clastos calcáreos presentes en la capa, los cuales podrían estar disueltos por procesos de karstificación como lo es evidente en la quebrada y así provocando una porosidad secundaria. Este intervalo caracterizado como heterogéneo podría alcanzar los 7 metros de profundidad.

Entre los 6 y 10 metros de profundidad se puede apreciar una señal mucho más homogénea, se correlaciona con la capa de arenisca calcárea pero en este intervalo el carácter homogéneo puede corresponder a que no presenta disolución de sus nódulos. Finalmente entre 10 y 12 metros se presenta de nuevo un intervalo heterogéneo pero en este caso a partir de los apiques realizados la capa que estaría presente sería la caliza microcristalina. Es importante señalar que en los apiques

estos niveles son nombrados como caliza pura y conglomerado con clastos calcáreos, pero a partir del trabajo realizado en campo, análisis textural y petrográfico el nombre más conveniente para esta capa es el de arenisca calcárea con gravas de caliza y caliza microcristalina.

7.1.3.2 Sección Transversal No 4

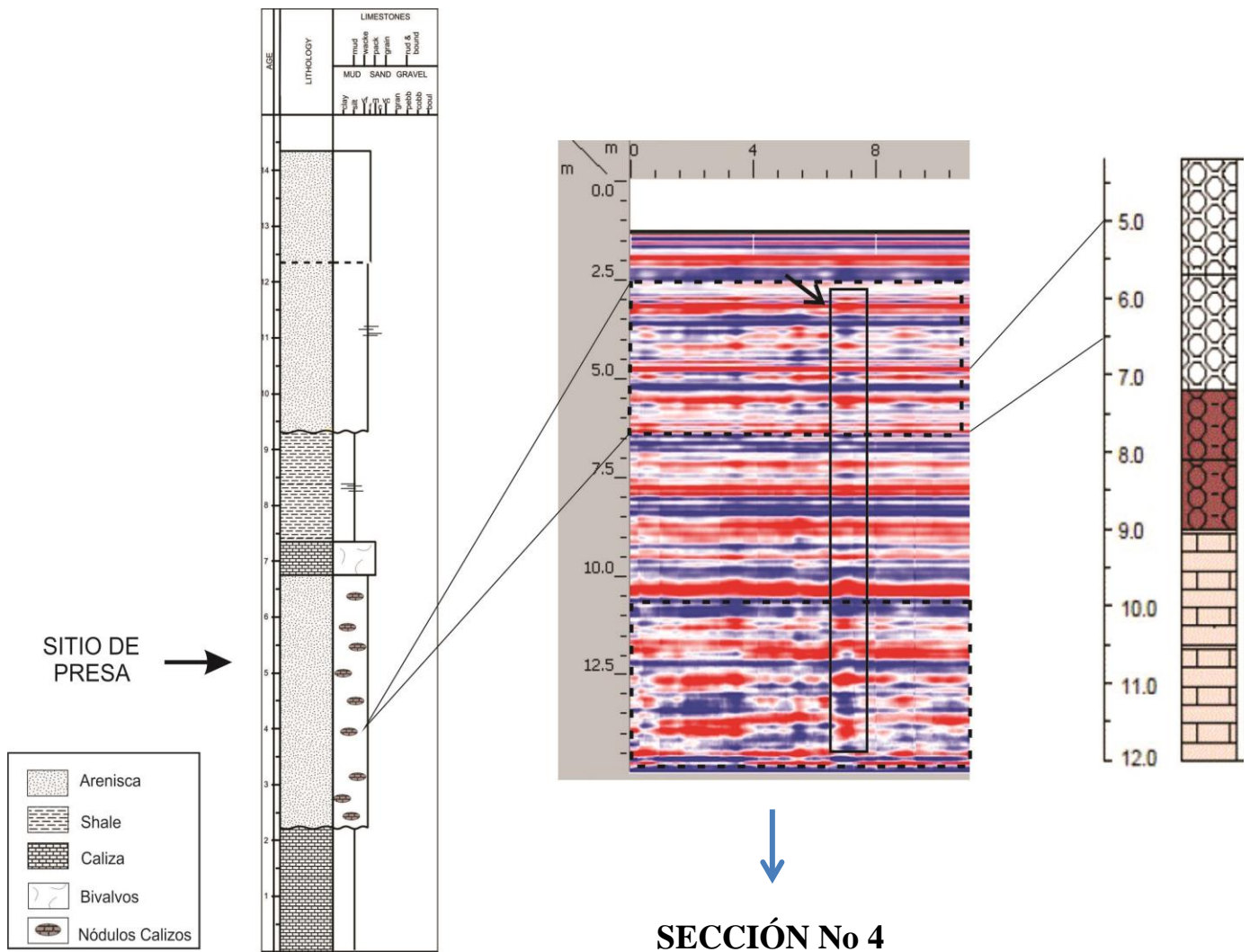


Figura 50. Sección No 4, se puede observar la correlación de la sección estratigráfica generalizada del área de presa con los ensayos de perforación y el resultado de GPR.

La sección No 4 representa un recorrido paralelo al vaso de la presa (ver figura 48), la señal emitida por el GPR desde 0.0 m hasta aproximadamente 2.5m hace parte de una pila de sedimentos arcillosos de igual forma que en la sección anteriormente descrita.

A partir de los 2.5m hasta un aproximado de 6.5 metros, se comienzan a presentar las diferentes interferencias respecto a la disposición y geometría de la señal emitida a través del GPR. Estas interferencias están asociadas al miembro de arenisca calcárea con gravas de caliza (Acgc) lo importante de esta sección radica en que se puede apreciar una posible alineación y continuidad en profundidad de estas anomalías magnéticas, posiblemente asociadas en gran parte a las diferentes fracturas ya documentadas que se encuentran presentes sobre el vaso de la presa que pueden llegar a alcanzar gran profundidad debido a los procesos de karstificación ya identificados sobre el miembro litológico. Esto nos indicaría que la karstificación no solo involucra la capa de arenisca calcárea como vemos en los afloramientos adyacentes al sitio de presa, sino también pueden ocurrir procesos de karstificación producto de la infiltración de agua a profundidad lo cual afectaría a la capa de caliza microcristalina la cual se encuentra en la base la columna estratigráfica generalizada.

7.1.3.3 Sección Transversal No 5

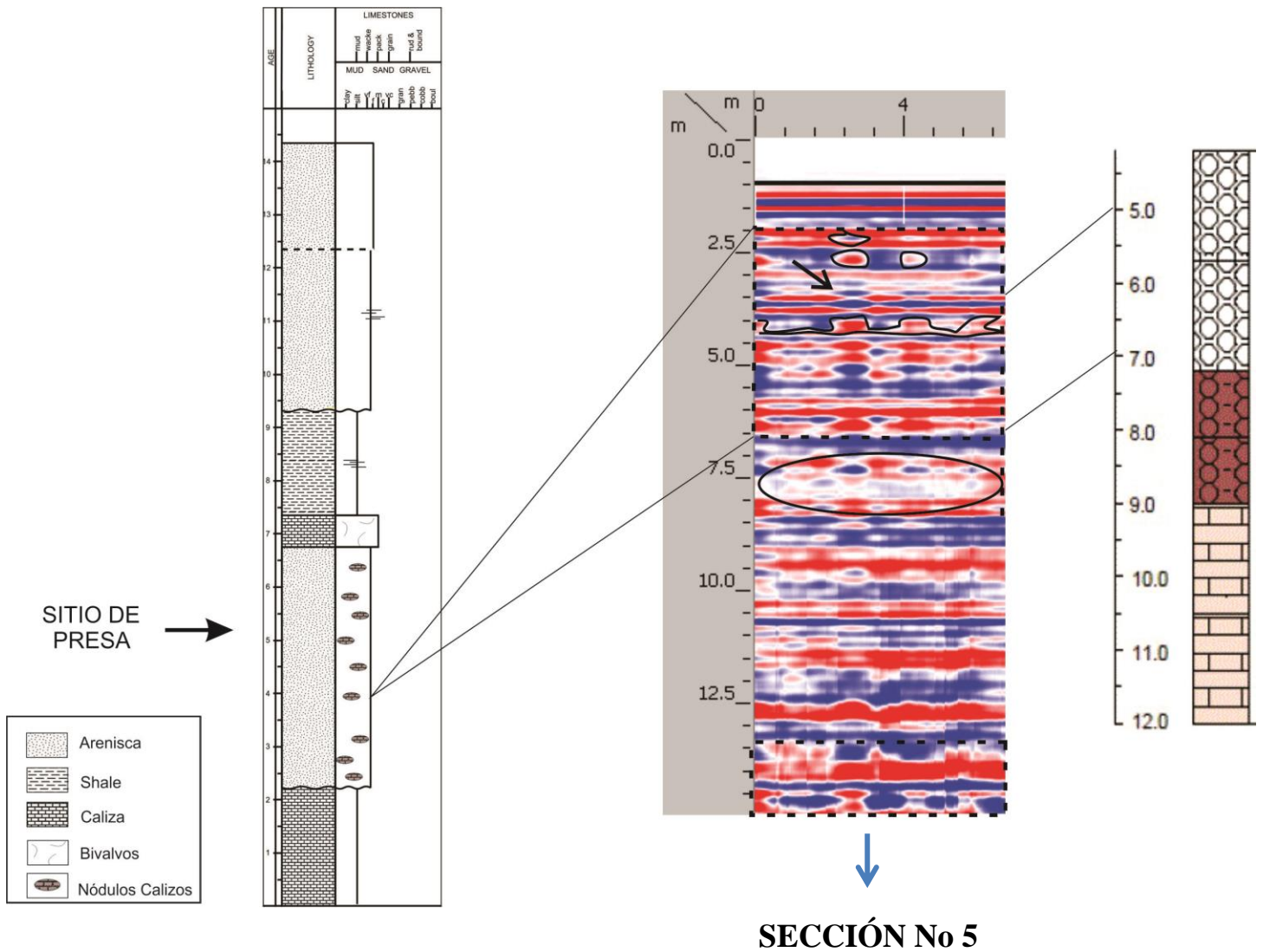


Figura 51. Sección No 5 se puede observar la correlación de la sección estratigráfica generalizada del área de presa con los ensayos de perforación y el resultado de GPR.

La sección No 5 representa un recorrido transversal al vaso de la presa (ver figura 48), esta sección fue utilizada principalmente para calibrar las demás señales emitidas, ya que presentaba la misma dirección y mayor cercanía al lugar donde se realizaron los apiques.

Esta sección presenta entre 5 y 6 metros de extensión lateral. De igual manera que la primera sección descrita presenta un intervalo con heterogeneidades en las señales recolectadas atribuidas a la capa de arenisca calcárea y para este caso se extienden desde los 2.5 metros hasta los 8 metros aproximadamente. Posteriormente entre los 8 y 12 metros disminuyen estas anomalías y de nuevo se intensifican a partir de los 12.5 metros, ya para esta profundidad hablaríamos de un cuerpo rocoso de naturaleza totalmente calcárea sin aporte terrígeno como la capa que la suprayace.

7.1.4 Contribuciones a Partir del Análisis de Resultados de Gpr para el Desarrollo De La Presa. A partir del análisis de las distintas transectas obtenidas a partir del equipo GPR se logró determinar las posibles profundidades hasta las cuales podrían estar actuando los procesos de disolución de clastos calcáreos y karstificación de la roca, los cuales están involucrados en la magnitud de las infiltraciones en el área de embalse.

7.2 Geoeléctrica

El método consiste en determinar el parámetro de resistividad a profundidad, mediante la inyección de corriente eléctrica en el subsuelo y la medición del potencial resultante a través de un arreglo tetraelectródico. El Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) como método geofísico de corriente directa (DC) es muy utilizado por su sencillez y la relativa economía instrumental apropiado para la adquisición en campo.

Los sondeos eléctricos se realizaron a partir de la configuración geométrica tipo Schlumberger en un área cercana a la presa la Leona. La toma de datos se realizó en un lugar adyacente a la presa a no más de 20m. Los datos obtenidos se utilizaron para calibrar las últimas dos capas de la columna estratigráfica.

Es importante señalar que el vaso de la presa se encontraba colmatado de sedimento arcilloso, debido a esto no fue conveniente la realización de la toma de datos de resistividad en este lugar, debido a que la corriente se quedaría en la capa que le ofrezca menor resistencia a fluir, como lo son las capas finas y con alto contenido de agua.

7.2.1 Equipo Utilizado. Para la adquisición de los datos se empleó el equipo Abem Terrameter SAS 1000, El sistema SAS 1000 consta de los siguientes componentes:

- Aparato SAS 1000 con un canal de entrada
- Adaptador para batería externa SAS EBA, con dos carretes para corriente.
- Cable de entrada de corriente continua para SAS EBA
- Cable RS 232 (con conector KPT al SAS 1000 y conector DSUB al PC).



Figura 52. Ubicación del equipo utilizado para el análisis de geoelectrica.

7.2.2 Procesamiento. Para analizar los datos de resistividad se utilizó el programa IPI2Win. Este software está diseñado para la interpretación automática de datos de sondeo eléctrico vertical. IPI2Win permite hacer la conversión de resistividades aparentes a resistividades reales y de igual forma obtener la gráfica de pseudosección de resistividad aparente.

A partir de los valores de resistividad aparente obtenida en campo se genera una curva teórica que representa el modelo de resistividad verdadera. En este modelo se puede apreciar las distintas capas, sus espesores, valores de resistividad y profundidades.

7.2.3 Resultados

Tabla 1. Tabla de resultados con datos utilizados y obtenidos a partir del método eléctrico.

MN	P1	P2	RESISTIVIDAD	S.DEV%	STACK	AB/2	I (Ma)
1	-0.5	5	431.99	0.03%	2	2	50
1	-0.5	0.5	479.58	0.08%	2	3	20
1	-0.5	0.5	514.31	0.05%	2	4	50
2	-1	1	463.86	0.05%	2	8	100
4	-2	2	446.71	0.10%	2	10	200
4	-2	2	418.26	0.03%	2	15	20

La figura 54 muestra el corte geológico asociado con un error de 2.74%, donde se pueden diferenciar tres a cuatro capas hasta una profundidad de 11 metros. No se observan cambios bruscos de resistividad, pero las variaciones se pueden interpretar como cambios menores en la litología o aumento en el contenido de agua dentro de la capa.

A partir de la pseudosección de resistividades (Ver figura 53) y con ayuda de los datos obtenidos en campo. Se calibro la parte final de la columna estratigráfica por medio de la comparación de las resistividades obtenidas con las resistividades establecidas para cada material. Es importante señalar que los sondeos eléctricos verticales no se realizaron en el lugar que se tenía previsto en los objetivos del proyecto, debido a que nos encontrábamos en época de invierno y esto provocó la saturación del nivel arcilloso que se encuentra depositado sobre el vaso de la presa.

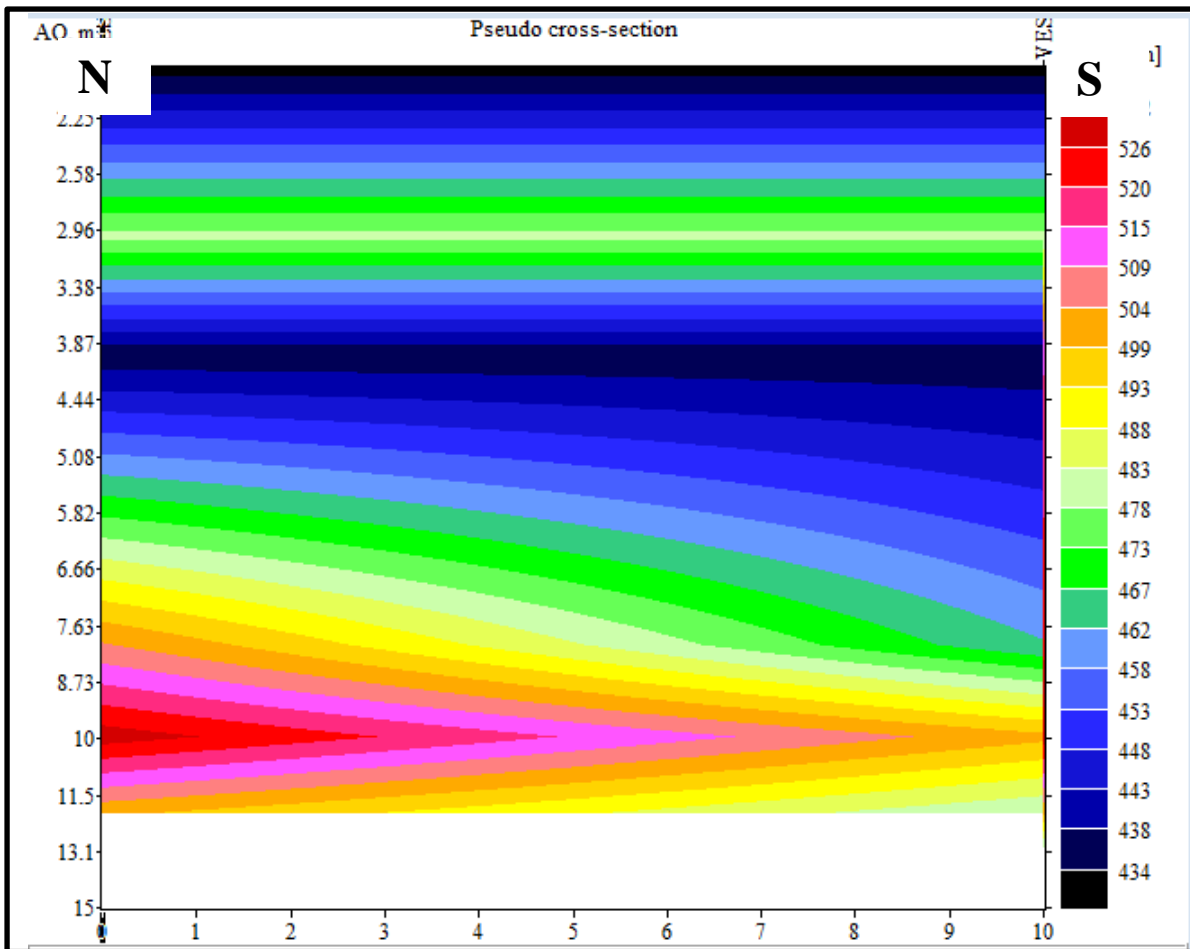


FIGURA 53. Pseudosección de resistividad obtenida a partir del software IPI2Win.

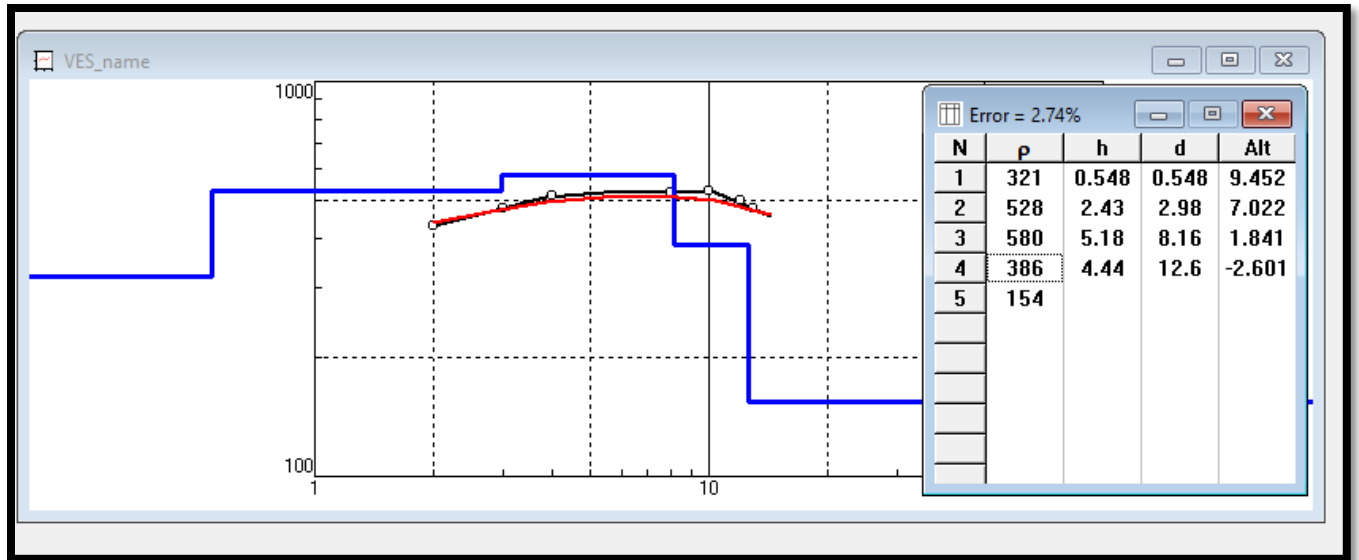


Figura 54. Curva teórica que muestra el modelo de resistividad verdadera, obtenido a partir del software IpiWin2, con error del 2.74%.

7.2.4 Contribuciones a Partir de Geoelectrica para El Desarrollo de la Presa. Debido a las limitaciones para la toma de datos sobre el vaso de la presa, no fue posible caracterizar a partir de parámetros de resistividad las litologías involucradas en las infiltraciones sobre el área de embalse. De igual manera se utilizó el método eléctrico en un lugar adyacente principalmente para correlacionar los resultados obtenidos y amarrarlos a las columnas levantadas en campo.

8. Discusión de Resultados

El proyecto presa la Leona desde sus inicios hasta la actualidad no ha tenido ningún tipo de uso eficiente respecto a los objetivos concretos del proyecto; a partir del estudio realizado se determinó que el desconocimiento geológico detallado de la zona es el principal factor que ha limitado la rehabilitación de la presa. A partir del análisis realizado se logró determinar las características litológicas y estructurales que están en relación directa con el área de embalse, para de esta forma brindar un soporte clave para intervenciones futuras. Teniendo en cuenta la naturaleza calcárea de las rocas que soportan la estructura es necesario hacer énfasis en como detener los procesos de karstificación y erosión que están afectando los diferentes miembros litológicos.

A partir de las secciones estratigráficas levantadas, el trabajo de campo realizado y los métodos geofísicos utilizados, se determinó la capa que está relacionada directamente con el sitio de presa y por lo tanto con el almacenamiento del agua. Esta capa es denominada arenisca calcárea con gravas de caliza, la cual debido a su carácter textural es propensa a presentar disolución, karstificación y permeabilidad secundaria. La capa presenta un fracturamiento en dirección SE-NW, evidenciado sobre el vaso de la presa y de igual manera es evidente aguas abajo del sitio de presa sobre la capa que la suprayace. El punto crítico de todo este proceso ocurre cuando las fisuras presentes se ensanchan y el flujo a través de ellas se hace turbulento, entonces las fisuras que tengan mayor anchura y estén sometidas a mayor gradiente hidráulico darán lugar a cavidades mayores, por tanto todo este proceso, visto a gran escala, es el responsable de la formación de cuevas y cavernas; y en pequeña escala como es el caso presente en superficie nos crea una serie de agujeros interconectados de manera aleatoria que permiten el paso del agua sin ofrecer ninguna resistencia.

Esta capa caracterizada texturalmente en campo como arenisca calcárea de grano fino con clastos calcáreos semiredondeados de tamaño guija a guijarro, presenta variación en el tamaño de sus nódulos con carácter granodecreciente, por esta razón hacia la base se habrán de distinguir nódulos de 12-15cm y en el tope nódulos de 6-8cm. Esto tiene importancia en todo el proceso de kárstificación y la presencia de fracturas, ya que entre más grandes sean los nódulos al disolverse generarán cavidades de mayor tamaño, aumentando la interconexión entre las mismas y facilitando aún más la entrada de agua por medio de las fracturas.

La conjugación de datos de campo, datos de laboratorio y métodos geofísicos nos han brindado un mejor panorama del problema que presenta el área de embalse, donde se identificó claramente la karstificación como el detonante principal de las filtraciones. Esta problemática de disolución junto a un control estructural local y un pH ácido son los principales factores que afectan la zona de presa.

Es importante señalar que no solo bastaría con resolver el problema de las infiltraciones, también es necesario un análisis hidráulico e hidrológico de la cuenca, ya que actualmente el área de embalse se encuentra colmatada de sedimento fino producto de la erosión de capas arcillosas ubicadas en la parte superior de la columna estratigráfica. De igual manera este sedimento fino que colmata la presa puede producir un cierto error en la adquisición de datos de georadar, siendo esta la principal limitación del estudio realizado. Por lo tanto se sugiere una limpieza del vaso de la presa hasta encontrar la roca que soporta el área de embalse y posteriormente realizar una nueva adquisición de georadar y geoeléctrica.

9. Conclusiones

La facies identificadas a partir de las secciones estratigráficas levantadas y que están relacionadas directamente con el sitio de presa de base a tope son; facies caliza microcristalina(Cm); facies arenisca calcárea con gravas calcáreas(Acgc); facies caliza fosilífera(Cf) y al tope facies shale arenoso(Sha).

Las filtraciones producidas sobre el área de embalse están relacionadas directamente con las características de la roca sobre la cual se encuentra cimentada la presa. La capa que está relacionada con el sitio de presa y el almacenamiento del agua es la arenisca calcárea con gravas calcáreas, la cual debido a su naturaleza calcárea es favorable a presentar disolución, karstificación y permeabilidad secundaria.

La arenisca calcárea con gravas calcáreas, la caliza fosilífera y la arenisca moscovítica presentan diaclasamiento en dirección SE-NW. Indicando un control estructural local evidenciado en las fracturas sobre toda el área de embalse.

El componente calcáreo, el fracturamiento y un pH ácido del agua probablemente producido como resultado de la oxidación química y biológica de sulfuros metálicos, especialmente pirita o pirrotita y demás óxidos de hierro presentes en los niveles arcillosos, estos son factores

importantes presentes sobre el sitio de presa que potencializan en gran manera los procesos de karstificación.

A partir de la columna levantada, se identificó niveles con mayor aporte terrígeno hacia el tope, predominando litologías arcillosas, las cuales se ven evidenciadas en la colmatación que presenta actualmente la presa. En épocas invernales los procesos de erosión son muy fuertes en la cuenca, llevando gran cantidad de sedimento fino principalmene, el cual es depositado en el vaso de la presa, llegando a alcanzar espesores hasta de 3m, identificados a partir del GPR.

Los resultados obtenidos a partir del GPR, nos indican que algunas respuestas electromagnéticas muestran heterogeneidades que se pueden asociar a la presencia de vacíos relacionados con la disolución de los nódulos presentes en la capa de arenisca calcárea con gravas calcáreas, la continuidad de esos vacíos en profundidad se puede estimar con cierto grado de error, el error es producido sedimento arcilloso saturado que se encuentra colmatando el área de embalse.

10. Recomendaciones

De manera general es importante resaltar que las presas construidas sobre rocas calizas son obras de tratamiento especial, y para este caso en el cual toda la estructura se está soportando sobre una secuencia calcárea, hay que centrar toda la atención en como detener los procesos de karstificación que afectan los cuerpos litológicos presentes.

Teniendo en cuenta que se pueden presentar infiltraciones en la totalidad del área de embalse y no se puede calcular con certeza la profundidad de las fracturas, se puede intentar una impermeabilización del vaso de la presa a partir de geotextiles y analizar el comportamiento del sistema.

Es recomendable realizar una limpieza del área de embalse donde se saque el sedimento arcilloso saturado en su totalidad, ya que este produce un error en la adquisición de datos. Posteriormente realizar una nueva toma de datos de GPR y Geoeléctrica, para dimensionar con un mayor grado de certeza la magnitud y profundidad de las fracturas y los procesos de karstificación.

11. Bibliografía

BLATT, H. 1982. Sedimentary Petrology, W. H. Freeman and Company. 564 p.

BRAM VAN DER KOOIJ. 2007. Marine red staining of a pennsylvanian carbonate slope: environmental and oceanographic significance. En: Journal of Sedimentary Research; p. 1026–1045.

CABALLERO O. VÍCTOR Y SIERRA R. HERNANDO. 1991. Estratigrafía del Cretácico en el área de San Andrés Santander. Tesis de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología.

CABALLERO, V. M. 2010. Evolución tectono-sedimentaria del Sinclinal de Nuevo Mundo, Cuenca Valle Medio del Magdalena Colombia, durante el Oligoceno Mioceno, MSc Tesis: Universidad Industrial de Santander, 148 p. Bucaramanga.

COOPER, M. A., et al. 1994. Basin development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia: American Association of Petroleum Geologists Bulletin; p. 1421-1443.

CORRENS, C.W. 1949. Einführung in die Mineralogie. Springer, Berlin.

DUNHAM, R.J. 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional tecture. Houston, Texas.

FOLK, R.L. 1980. Petrology of Sedimentary Rocks. Hemphill Publishing, Austin, TX.

GALÁN, C. 1991. Disolución y génesis del karst en rocas carbonáticas y rocas silíceas : un estudio comparado. MUNIBE, N°43; Pág 43-72.

GOBERNACIÓN DE SANTANDER. 2007. Recopilación fotográfica Contrato No. 1914-07 Presa Suaita.

GOBERNACIÓN DE SANTANDER. 2011. Recopilación fotográfica Contrato No. 1302- 10 Impermeabilización Leona.

INGEOMINAS. 1979. Geología de las planchas 135 (San Gil) y 151 (Charalá) cuadrángulo I-12. Memoria explicativa. Bogotá.

JULIVERT, M. 1958. Geología de la zona tabular entre San Gil y Chiquinquirá. mBoletín de geología. N. 2. pp. 33-47. Bucaramanga.

MORALES, L., et al., 1958. General geology and oil occurrence of the Middle Magdalena Valley, Colombia. In habitat of oil a Symposium American Association of Petroleum Geologists Bulletin: 641-695. Tulsa.

PULIDO, O. 1979. Geología de las planchas 135 (San Gil) y 151 (Charalá) cuadrángulo I-12. INGEOMINAS.

READING, H. G. 1986. Sedimentary environments and facies (2nd Ed): Oxford: Blackwell Scientific Publishing.

STEVEN G. 1989. Risk analysis for dam design in karst. J. Geotech. Engrg.,Pag; 819-835

UCAM (Universidad católica de Murcia). Sin fecha. Métodos de investigación geofísica. Georadar-ground penetrating radar. Disponible en cd anexo. 38 p.

VERGARA, L. 1994. Stratigraphic, micropaleontologic and organic geochemical relations in the Cretaceous of the Upper Magdalena Valley, Colombia.– Giessener Geologische Schriften vol. 50; p.1-179.

WALKER, R.G. 1992. Facies models response to sea level change. Geological Association of Canada.