

# CAPITULO I

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo especial de grado se enmarca en el estudio geológico-geotécnico de núcleos de limolita obtenidos en las perforaciones a lo largo de un transecto vial de 12 Km, el cual, se va a fundar el III Puente sobre el Río Orinoco; ubicado entre las poblaciones de Caicara del Orinoco y Cabruta. De igual manera se pretende de ahondar en las propiedades y composición mineralógica de estas rocas.

Esta investigación constituye una parte un complemento de un proyecto de mayor escala; iniciado por la Empresa GEOHIDRA CONSULTORES C.A., hace ya unos varios años.

La primera parte del trabajo aborda el origen, Formación, y composición de la limolita presente en la zona de estudio, con una detallada descripción de cada uno de los 33 núcleos disponibles para el proyecto. Aunado a ello, se presenta la Geología Regional y Local del sitio de investigación.

Así mismo, la segunda parte aborda a los aspectos físicos y geomecánicos de las limolitas en estudio, empleando para ello las pautas estipulados en las normas ASTM, ISRM y al mismo tiempo los Criterios de falla Mohr-Coulomb y Hoek-Brown. Aquí se profundizan y se valoran los parámetros de resistencia al corte y otros datos adicionales, las cuales están íntimamente ligadas sus propiedades mineralógicas.

Por último, en la tercera parte se analizan los resultados. Empleando para ello tablas, gráficos, ecuaciones empíricas, fotografías, cuadros comparativos y correlaciones de forma tal de analizar de la manera más didáctica posible todo el cúmulo de información obtenida en las etapas previas.

Ningún análisis tiene utilidad si no lleva consigo implícito una conclusión que permita reorientar la estrategia y buscar otras alternativas que aproximen a la solución del problema tratado. Esto es la última parte de la presente investigación en donde, aparte de concluir

como es lógico esperar, se sugieren algunas recomendaciones que en el futuro puedan complementar y ampliar el aporte que se presenta en este trabajo.

### **1.1 Planteamiento del Problema**

El presente trabajo especial de grado tiene por finalidad realizar un estudio geológico-geotécnico sobre 33 perforaciones distribuidas a lo largo de un transecto de 12 Km con el fin de determinar la naturaleza del subsuelo, constitución litológica y propiedades geotécnicas que servirán de fundación para la construcción del III puente sobre el río Orinoco ubicado entre las poblaciones de Caicara del Orinoco y Cabruta, edos. Guárico y Bolívar.

El estudio geológico-geotécnico de las limolitas y la determinación de sus propiedades será un elemento necesario para la construcción de las fundaciones del puente y además de futuras obras civiles a desarrollarse en esas zonas.

Al iniciar cualquier obra sin llevar a cabo primero un estudio detallado del subsuelo es imposible proyectar una cimentación adecuada para una obra de cierta importancia y sin conocer cada una de las características del terreno, es por ello que este trabajo permite además develar a detalle las propiedades antes mencionadas debido a que escala regional se tiene poca información en la zona.

### **1.2 Justificación del Problema**

Esta investigación nos ayudará a determinar las propiedades geológicas y el comportamiento geotécnico del material encontrado en las perforaciones, a fin de definir los valores de diseño y parámetros a utilizar en la construcción de las pilas del III puente sobre río Orinoco, así como también de servir como fuente de información geológica-geotécnica para futuras investigaciones u obras en la región.

Los estudios geológicos y geotécnicos a realizarse serán sobre muestras de núcleos donados por la empresa *GEOHIDRA CONSULTORES C.A*, con sede en Caracas-Venezuela, y que los diversos ensayos a realizarse a las muestras serán ejecutados mediante autofinanciamiento.

### **1.3 Objetivo General**

Realizar la caracterización geológica-geotécnica del sustrato encontrado en los núcleos de limolita a través de descripciones mineralógicas y geomecánicas provenientes de una serie de perforaciones realizadas a lo largo de un eje de 12 Km sobre el futuro III Puente sobre el río Orinoco, en el tramo Caicara-Cabruta, edos Guárico y Bolívar.

### **1.4 Objetivos Específicos**

- Integrar la información geológica y geotécnica procedente de investigaciones previas realizadas en la zona.
- Describir y caracterizar visualmente mediante parámetros texturales, mineralógicos los núcleos obtenidos de las perforaciones ejecutadas
- Analizar mediante la técnica de difracción de rayos X los núcleos de limolita obtenidos en el área de estudio con el fin de identificar los minerales presentes.
- Definir las propiedades geomecánicas de las muestras obtenidas en la zona de estudio por medio de diversos ensayos estipulados por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas.
- Generar un modelo geomecánico de la zona en estudio a partir de la construcción de un perfil geotécnico a escala 1:1000, basado en los datos de las perforaciones y los ensayos realizados sobre las muestras obtenidas
- Generar un mapa estructural del tope de la limolita y geomorfológico que comprende la zona de estudio a escala 1:25.000

### **1.5 Localización del Área de Estudio**

El área de estudio, se encuentra ubicada entre el norte de Caicara del Orinoco, Municipio Cedeño, estado Bolívar y la ribera sur del río Orinoco, enfrentando a la ciudad de Cabruta, Municipio Infante, estado Guárico; unida por carretera a Caracas. Puerto fluvial del sistema Apure-Orinoco y punto de encrucijada de carreteras a ciudad Bolívar, Puerto Páez, Puerto Ayacucho y San Juan de Manapiare. Esto puede ser apreciado en la siguiente figura N° 1.1.



**Figura N° 1.1 Mapa de localización del área de estudio**

En la tabla N° 1.1 se presenta la ubicación de los 33 puntos de muestreo indicando su profundidad y coordenadas geográficas.

**Tabla N° 1.1 Coordenadas y profundidad (m) de los puntos de muestreo**

Núcleos	Profundidad de la Perforación (m)	UTM-19,REGVEN	
		Este	Norte
P-2N'	101,00	814045,5589	849566,7897
P-7N	70,00	811106,2556	852500,1661
P-9N	61,00	811238,0819	852452,6057
P-27N	51,00	812424,3043	852024,7428
P-30N	50,00	812622,0396	851953,4973
P-35N	75,00	812943,1246	851816,0153
P-38N	85,00	813102,9538	851680,4629
P-39N	78,00	813147,6545	851626,5139
P-5NE	82,00	813854,3151	850004,1541
P-7NE	81,00	813763,8664	850226,7388
P-18NE	85,00	813266,3204	851450,4597
P-1NO'	75,00	813975,4167	849579,3375
P-2NO	109,00	813959,9031	849658,1545
P-6NO	80,00	813778,9976	850103,2339
P-3NOP	91,00	813914,6252	849769,4519
PC-9AS	106,60	814116,9546	849229,2791
P-6C	76,00	814272,9978	848913,4061
P-2SO	101,00	814185,9794	849101,8878
P-3SO	76,18	814230,4328	849114,6952
P-4S0	74,00	814276,4281	848879,3031
P-5SO	90,00	814321,706	848768,1057
P-14SO	60,00	814728,7786	847766,7495
P-7SC	111,00	814418,543	848559,6269
P-9SE	66,00	814532,7502	848335,3338
P-15SE	60,00	814804,0962	847667,7697
P-1S	41,00	816309,6142	843920,5124
P-2S'	66,00	816289,7387	843939,7195
P-3S	82,00	816256,915	844050,276
P-8S	66,00	816124,965	844374,78
P-12S	66,00	816019,4594	844634,4071
P-21S	74,00	815782,111	845218,5482
P-37S	60,00	815359,8908	846256,9468
P-49S	60,00	815043,3823	847035,8183

## 1.6 Trabajos Previos

Al realizar la consulta bibliográfica se pudo recopilar información de índole:

- **Geológica**

**Hedberg y Sass. (1936)** Introdujeron el término de Formación Las Piedras en 1936.

**Hedberg y Pire. (1944, p. 25)** Introducen el nombre de Formación Mesa para designar la Formación que cubre las extensas mesas fisiográficamente características en la parte oriental de la cuenca de Venezuela oriental. La Formación se extiende sobre los llanos orientales de los estados Guárico, Anzoátegui y Monagas

**González de Juana. (1946)** Realizo la primera referencia publicada de la Formación Las Piedras en 1946.

**Hedberg, H.D. (1950)** Explica en un boletín de la sociedad americana de geología información referente a la geología de la cuenca oriental de Venezuela.

**Salvador, A. (1961)** Presenta en un boletín informativo de la Asociación Venezolana de Geología, Minería y Petróleo un artículo referente a la nomenclatura de la Formación Las Piedras y de formaciones relacionadas a ella en el oriente de Venezuela.

**De Sisto, J. (1961)** Presenta en un boletín informativo de la Asociación Venezolana de Geología, Minería y Petróleo un artículo referente a los sedimentos de la Formación Mesa y el Grupo Sacacual en el oriente de Venezuela.

**Ríos, H. Juan. (1972)** Presenta en el IV Congreso Geológico Venezolano un trabajo referente a la Geología de la región de Caicara, Estado Bolívar.

**Romero, A. Heberto (1975)** Elabora un trabajo de investigación en el que presenta la distribución de elementos en sedimentos de fondo del río Orinoco, influencia de la granulometría y el transporte. Romero deja ver que en las muestras obtenidas se efectuaron análisis granulométricos para determinar los parámetros de medida, escogimiento y asimetría como también determinar las concentraciones de Si, Al, Fe, Ti, Ca, Mg, Mn, Zr, Cr, Sr, Zn y Rb por el método de fluorescencia de rayos X. Sucesivamente se calcularon los coeficientes de correlación lineal para determinar las relaciones entre los diferentes parámetros físicos y químicos de los sedimentos, y que el control granulométrico de los

sedimentos es debido a las varias formas de transporte (rodamiento, saltación y suspensión) y a las condiciones hidráulicas existentes.

**Cabrera. Jorge y García. R, Eduardo (2000)** Presentan un trabajo la cual estudian las posibilidades de recarga de los acuíferos profundos de la Formación Las Piedras en el área de Jusepín y Caicara del Orinoco por parte del frente de montañas área norte de Monagas. Además de elaborar un modelo hidrogeológico que interpreta las características fisiográficas y climáticas de la zona, el estado del macizo y las características físico-químicas del agua extraída de los acuíferos medios y profundos.

**Escamilla, H. Y Romero K. (2000)** Presentan un trabajo referente a distribución de las facies sedimentarias y características de los sedimentos en la parte superior del delta del Orinoco, aquí se indica que el delta del Orinoco es controlado y moldeado morfológicamente en cuanto a sus facies sedimentarias, por el sedimento de fondo y en suspensión acarreados por el río Orinoco, por la acción de las mareas, el oleaje y las corrientes de Guayana. Los autores además dejan expresado que el objetivo fundamental fue caracterizar los sedimentos recientes en la parte superior del delta del Orinoco, así como la distribución y características de las facies sedimentarias presentes; y como también que el aporte sedimentario es correspondiente a: el escudo de Guayana, la Formación Mesa, la Cordillera de la Costa, Los Andes, y otros sedimentos transportados por la corriente de Guayana.

**Fuentes, S. Edegma. (2006)** Realiza una investigación sobre el proceso de erosión severa de la Formación Mesa y su incidencia en obras civiles. Aquí se expresa la problemática de erosión intensa que ocurre en grandes extensiones de terrenos donde afloran sedimentos de la Formación Mesa, al sur de los estados Anzoátegui, Monagas y Guárico y al norte de Bolívar. El autor de este trabajo hace una recopilación de los casos más conocidos de estas incidencias en infraestructuras existentes, analiza las causas de tales procesos y los métodos aplicados a mitigación y/o control de riesgos.

## **1.7 Marco Metodológico**

A continuación se presenta la metodología que permitió que se cumplieran con los objetivos propuestos de la presente investigación. Dicho esquema metodológico se estableció de manera que se efectuaran todas las etapas correspondientes a la integración de la información geológica-geotécnica del presente trabajo y que a continuación se muestran de la siguiente manera:

### **1.7.1 Etapa 1**

#### **1.7.1.1 Recopilación Bibliográfica:**

Recopilación de información existente y pertinente a la geología regional y local de la zona donde se tiene previsto la edificación del futuro III Puente sobre el río Orinoco, comprendido entre las poblaciones de Caicara de Orinoco (edo, Bolívar) y Cabruta (edo, Guárico). Información recopilada en la Biblioteca Dr. Virgil Winkler de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Facultad de Ingeniería UCV, Código Geológico de Venezuela, Boletines Geológicos, trabajos especiales de grados previos, la Empresa Geohidra Consultores C.A. y el tutor de este trabajo.

#### **1.7.1.2 Búsqueda de materiales:**

Fotografías aéreas misión Bloque O a escala 1:50.000 número 807, 808, 809, 810, 886, 887, 888, del año 1948, material cartográfico: mapas topográficos de Caicara del Orinoco y Terecay a escala 1:100.000 correspondiente a la hojas N°6938 y N°6939, mapa geológico de superficie a escala 1:200.000 de la región de Caicara, Edo, Bolívar, presentado en el IV Congreso Geológico Venezolano, 1969.

Uso de *software* tales como: *ArcGis* N°9 versión 9.3 y *Roclab* versión 1.03

### **1.7.2 Etapa 2**

#### **1.7.2.1 Ensayos de Laboratorio**

Una vez culminada la primera etapa se procedió a los ensayos de laboratorio tanto mineralógicos como geomecánicos sobre las muestras extraídas, a fin de conocer sus propiedades. Los ensayos realizados fueron los siguientes:

- Descripción de núcleos
- Difracción de Rayos X
- Carga Puntual (Según Normas ASTM D 5731)
- Compresión en Roca (Según Normas ASTM D 2938)
- Corte Directo en Roca (Según Normas ASTM D 5607)

### **1.7.2.2 Digitalización, Georeferenciación y Vectorización de los Rasgos Topográficos - Geológicos de la Zona de Estudio**

Procesamiento de material cartográfico y fotogeológico para su posterior interpretación:

Digitalización de mapas topográficos y geológicos de la zona en estudio: En primer lugar se realizó la digitalización y georeferenciación, trabajando bajo el sistema de coordenadas UTM La Canoa, huso 20, en segundo lugar se realizó la interpretación sobre las hojas basándose en el estudio de la toponimia, vías, drenajes, entre otros, esta información es de gran ayuda para la planificación del trabajo y posterior análisis, con el fin de generar el mapa final. Por otra parte la interpretación en el mapa geológicos se enfocó en el estudio estructural de la zona, los rasgos analizados en este estudio fueron posteriormente vectorizados por medio del programa *ArcGis* N° 9 versión 9.3

Digitalización de fotografías aéreas: a partir de las fotografías aéreas se realiza la interpretación de los rasgos geológicos en la imágenes en crudo, el método clásico es el de dibujar los rasgos geológicos, litología, vías, sistemas de drenajes, afloramientos probables, trazas de capas, estructuras, entre otros, posteriormente se digitalizan las fotos y se georeferencian usando el programa *ArcGis* N°9 versión 9.3, esto se realiza dibujando una capa sobre la foto escaneada, posteriormente se trasladan los rasgos interpretados a los mapas base (topográfico y geológicos), con la finalidad de realizar su análisis y generar un mapa final.

### **1.7.3 Etapa 3**

#### **1.7.3.1 Elaboración de Mapas, Perfil Geotécnico e Integración de los Resultados de Laboratorio**

Esta etapa tiene como objetivo la integración de los resultados a partir de las herramientas anteriormente expuestas, con el fin de generar:

- Un mapa estructural del tope de la limolita y geomorfológico de la zona de estudio a escala 1:25.000 a través de un *SIG*.
- Interpretación de los parámetros geomecánicos obtenidos de los diversos ensayos estipulados por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (por sus siglas en Inglés ISRM) y compararlos con los valores obtenidos por medio del *Software Roclab*
- Generar un modelo geomecánico ilustrado a través de un perfil geotécnico de la zona de estudio a escala indicada

### **1.7.4 Etapa 4**

#### **1.7.4.1 Trabajo de oficina**

Durante esta etapa de la investigación se revisó, evaluó y seleccionó la documentación recopilada durante la revisión bibliográfica, la fase de laboratorio y la generación de los mapas, perfiles por medio de la herramienta informática *ArcGis* N°9 versión 9.3

En la fase del análisis geológico-geomecánico, se obtuvieron una serie de parámetros cuantitativos sobre las muestras como:

- Ciento doce (112) ensayos de compresión uniaxial en roca (ASTM D 2938).
- Setenta y siete (77) ensayos de carga puntual (ASTM D 5731).
- Dos (2) ensayos de corte directo sobre discontinuidades de roca (ASTM D 5607).
- Cinco (5) difracciones de Rayos – X
- Setenta y cinco (75) descripciones visuales de núcleos de roca.

Una vez obtenidos estos datos, se procedió a integrar toda la información con el fin de generar un modelo geomecánico, obteniendo como resultado un perfil geológico-geotécnico de las muestras de limolita, y así interpretar su comportamiento.

Usando Microsoft Excel ® y Roclab 1.03, se creó una base de datos para cotejar las propiedades geomecánicas, generando así diversas gráficas, correlaciones empíricas y comparaciones relacionadas con las propiedades de la misma roca.

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 GEOGRAFÍA FÍSICA**

Las grandes llanuras de Venezuela central, son conocidas como “Llanos”. Están limitados al norte por la cordillera de Los Andes, la Serranía del Interior, y al sur por el Escudo de Guayana. Se extiende por el oeste desde el piedemonte de los Andes venezolanos, para terminar en el este, en el delta del Orinoco. Su largo oeste-este es de unos 850 Km. Tiene un ancho variable, norte-sur, de unos 200 Km en la parte más oriental del estado Monagas, y de 400 Km en su parte más ancha, entre Puerto Páez y Barinas. Su superficie es de 237.280 Km<sup>2</sup>, es decir, corresponde a un cuarto de la superficie total del país (Freile, 1965)

Los Llanos están constituidos por sedimentos blandos del Terciario Superior y Cuaternario, depositados en una extensa cuenca de relleno progresivo y finalmente suavemente levantada, en la cual ha habido poca erosión (González de Juana, et al, 1980).

La región contiene los yacimientos petrolíferos del llano venezolano, en las cuencas sedimentarias de Barinas-Apure (113.810 Km<sup>2</sup>) y Venezuela oriental (117.900 Km<sup>2</sup>), subdividida ésta en las subcuencas del Golfo de Paria, Guárico y Maturín. Aproximadamente en la zona axial de la región, se levanta un pequeño complejo aislado, el Macizo de El Baúl, un afloramiento en el centro de los Llanos, del Escudo de Guayana, sostenido por rocas metamórficas e ígneas del Paleozoico y Mesozoico inferior. Este divide a la provincia en dos subprovincias, de Barinas-Apure al oeste, y de Venezuela Oriental al este, separación que no se produjo hasta el Terciario (III L.E.V, 1997).

Los llanos de Barinas-Apure forman una gran superficie plana cubierta en su casi totalidad por sedimentos blandos cuaternarios, y grandes extensiones de depósitos aluviales y coluviales recientes (González de Juana, et al, 1980).

Los llanos de Venezuela Oriental presentan mayor diversidad geomorfológica por la influencia de su geología. El manto Pleistoceno (Formación Mesa) ha sido removido por erosión en gran parte de Guárico y en Anzoátegui suroriental, y las formaciones arcillosas

del Mioceno, así expuestas, producen una topografía caracterizada por un drenaje más complejo, reticular y dendrítico y en consecuencia, más disectada que las monótonas mesetas del este-sureste de Anzoátegui y Monagas sur-central (III L.E.V, 1997)

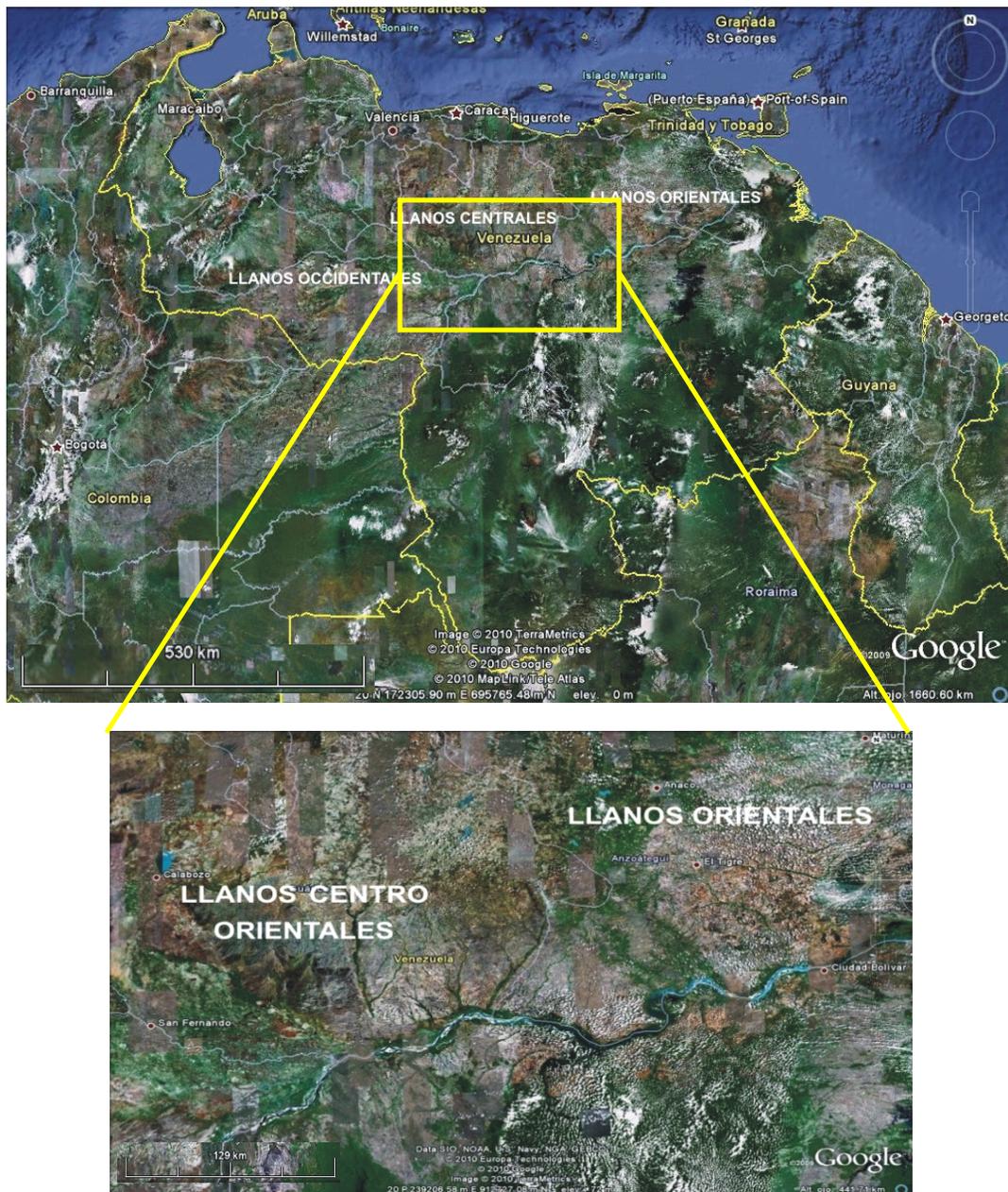
La zona erosionada termina hacia el este en una notable línea de farallones identados que se extiende de sur a norte, desde la región de San Diego de Cabruta hasta cerca de Santa Rosa, en el estado Anzoátegui. Esta línea forma, de modo general, la divisoria generalizada entre los llanos centrales (principalmente Guárico) y los orientales (principalmente Monagas y Anzoátegui sur-oriental). En Contraposición con los primeros, los llanos orientales se caracterizan por la presencia de mesetas extensas y planas (entre las cuales se destacan las de Guanipa, Morichal Largo y Tigre), de unos 280 metros de altura sobre el nivel del mar, y 120 metros sobre el nivel de la llanura circundante, siempre mal drenadas, frecuentemente con drenaje centrípeto hacia una depresión central o axial. Estas suelen estar bordeadas por los farallones abruptos que constituyen el cauce mayor de los morichales o de los grandes ríos, de curso generalmente oeste-este.

Los llanos de la Venezuela Oriental se dividen en: Llanos Centro Orientales y Llanos Orientales, y debido a que la Formación Las Piedras se extiende en parte sobre estos, los mismos serán descritos por separados con mayor detalle. (Ver Figura N° 2.1)

## **2.2 LLANOS CENTRO-ORIENTALES**

Tienen la forma de un trapecio cuya superficie aproximada es de 16.000 Km<sup>2</sup>. La cuenca del río Zuata es la más importante, mide unos 5.000 Km<sup>2</sup>. Sigue en importancia a la cuenca del río Pao con unos 3.850 Km<sup>2</sup> y la del río Iguana con aproximadamente 2.500 Km<sup>2</sup>. Los 5.250 km<sup>2</sup> restantes están distribuidos entre las hoyas de ríos menos importantes como los ríos Claro, San Bartolo, Mapire, Sariapo, Ature, Cabrutica y los morichales al oeste del río Zuata. Todos estos ríos son afluentes por la margen izquierda del río Orinoco (COPLANARH, Dic-1974). Constituye un área sin alturas importantes, en la cual reina un clima tropical seco, con dos estaciones bien marcadas. La vegetación está compuesta por una sabana arbolada o limpia, la cual está adaptada a grandes variaciones de humedad edáfica.

Desde el punto de vista geomorfológico, esta área es bastante compleja, ya que constituye una transición entre la planicie de la mesa de Anzoátegui, la depresión de Unare y los llanos centrales; de los cuales sus características morfológicas están esencialmente vinculadas a los movimientos tectónicos del principio del pleistoceno y a las características litológicas.



**Figura N° 2.1 Vista satelital de Venezuela con detalle de los Llanos Centro-Orientales y Orientales. Tomado de Google Earth, 2010.**

Los llanos centro orientales forman un área sin relieves importantes. Sus puntos más altos no alcanzan los 400 metros y están ubicados en la parte noroccidental. Su altura promedio oscila entre los 80 m y 150 m. La pendiente general del norte hacia el Orinoco, oscila entre 1% y 2% al este del río Iguana. Mientras que aumenta hasta alcanzar 4%, al oeste de este río, por efecto de la tectónica del principio del Cuaternario.

COPLANARH (dic-1974) divide estos llanos en 4 sectores, según las características topográficas (Ver Figura N° 2.2)

### **2.2.1. Sector Oriental**

Originalmente formaba un conjunto único con la altiplanicie de la mesa de los Llanos Orientales. Tiene una altura mayor de 20 a 40 metros con respecto al sector central. Sufrió basculamiento leve hacia el SE el cual se ve reflejado en la dirección de los principales cursos de agua Pao y Cabrutica, convergiendo hacia la zona deprimida entre Santa Cruz del Orinoco y el abrupto al este de Boca de Pao. Este bloque fue disectado, luego de ser basculado, por líneas de fallas. La altura absoluta varía, de unos 250 m en Pariaguán a 100 m al borde del Orinoco. En Santa Cruz y Mapire, la Mesa domina el lecho menor del río Orinoco en unos 20 m.

Se encuentran 3 tipos de paisajes morfogénéticos:

- Los restos de Mesa poco o no afectados por la erosión lineal, ubicados topográficamente altos.
- Los restos de Mesa moderadamente disectados, los cuales tienen un declive hacia los valles principales. Presentan pendientes suaves, raramente superiores a 4%. La topografía es plana a suavemente ondulada.
- Las partes disectadas, las cuales son muy frecuente modeladas en “badlands”, las pendientes son muy fuertes y la topografía muy accidentada, debido al vigor del entalle de los ríos principales, como ocurre en la parte septentrional de los llanos orientales.



Al sur, la disección es menos avanzada, ya que las desnivelaciones son mucho más débiles y la distancia de la divisoria de agua al valle principal es más larga que en el norte. Es por ello las diferencias entre las redes hidrográficas; en el norte el drenaje es denso y de tipo dendrítico, mientras que en el sur, son morichales aislados escurridos sobre el sustrato terciario, casi sin encajonarse.

En las llanuras se pueden apreciar varios tipos de paisajes: bloques deprimidos de Mesa como entre los ríos Iguana y Aracay; glacís de explayamiento que son formas muy extensas en el norte; depósitos eólicos con un micro-relieve ondulado con alternancia de dunas y cubetas o sustrato terciario.

### **2.2.3 Sector Central**

El sector central tiene una altura promedio menor que los dos sectores anteriormente descritos. La altura absoluta alcanza 160 m al norte de Zuata. Al norte de una línea este-oeste que pasa por la confluencia de los ríos Zuata-Chivatica, las pendientes son suaves y raramente superiores al 7%, excepto en las partes disectadas, poco extensas, ya que los desniveles no rebasan los 40 m, las redes hidrográficas son subparalelas, siendo los drenajes poco encajonados a excepción de las zonas muy disectadas. Al sur de la línea ya mencionada, las ondulaciones tienen pendientes más fuertes, parcialmente en el área comprendida entre los ríos Claro y San Bartolo, donde hay numerosos testigos de Mesa. A pesar de estas condiciones, las redes hidrográficas son poco marcadas ya que son parcialmente fosilizadas por coluviones.

Los valles más importantes tienen dos direcciones principales: norte-sur y NE-SO. Son valles poco encajados y llegan a tener de 2 a 3 Km de ancho en el curso inferior.

### **2.2.4 Sector Meridional**

Comprende las áreas que son anualmente inundadas por el río Orinoco, cuyo lecho menor lo constituye el nivel de base regional. Forma una franja amplia constituida por el complejo orillar del Orinoco, los explayamientos terminales de los ríos Chimire, Iguana, San Bartolo y Pao, y una zona transicional derivada parcialmente de la Mesa con pendiente muy suave hacia el Orinoco.

El límite septentrional del sector meridional está marcado por un acantilado, desgastado por el escurrimiento concentrado, originado por socavamiento del río Orinoco, o es transicional entre los bloques basculados de Mesa y la “Mesa inundable”.

### **2.3 LLANOS ORIENTALES**

Abarcan la casi totalidad del estado Monagas y la parte suroriental del estado Anzoátegui, con una superficie total de 3.395.000 hectáreas (COPLANARH, nov-1974).

Dentro de los llanos orientales se agrupan dos regiones distintas: las mesas, que corresponden a la parte más alta (superior a 150 m.s.n.m) de la extensa altiplanicie llamada Formación Mesa; y los llanos de Monagas, que representan la parte más baja de la Formación Mesa y la planicie aluvial de los ríos Guarapiche, Amana, Guanipa, Tigre y Morichal Largo. No existe discontinuidad entre estas regiones, sino un decrecimiento suave y gradual de las alturas relativas.

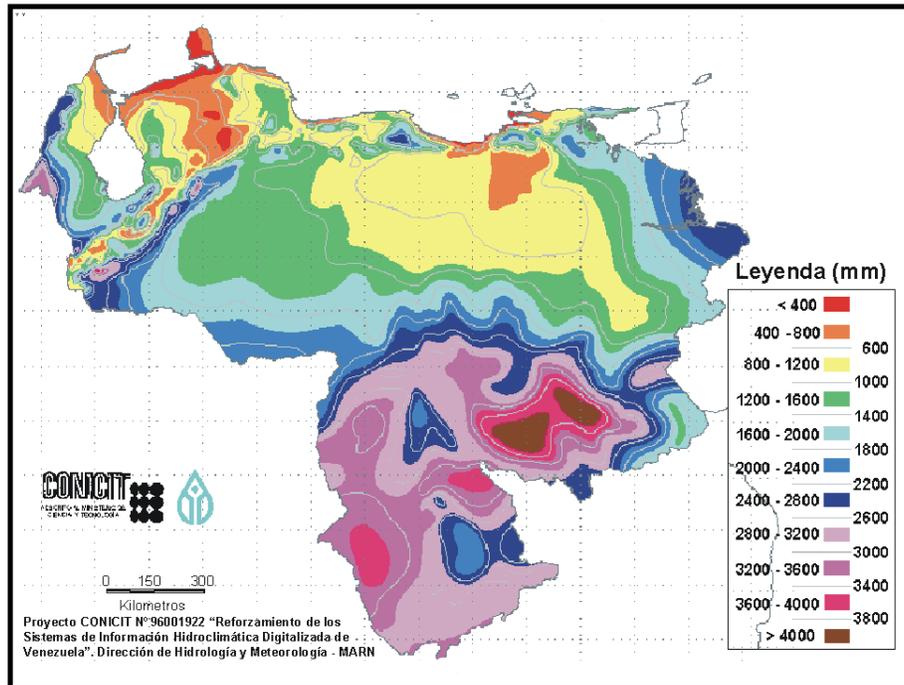
Los llanos orientales se encuentran limitados: al norte, el piedemonte de la Serranía del Interior; al sur, margen izquierda del río Orinoco; y al oeste, la línea divisoria de aguas con las cuencas de los ríos Unare y Pao. Constituyen una identidad particular dentro de los llanos venezolanos ya que se caracterizan por la presencia de mesas extensas, planas y cubiertas por una vegetación de sabana basta uniforme.

### **2.4 CLIMA**

Las características climáticas de la zona están influenciadas por la presencia del río, en el caso de la misma, según la clasificación climática de Koeppen (1948), el clima de la zona es tropical de sabana, donde se dan temperaturas altas todo el año, con una estación lluviosa desde abril hasta finales de octubre, y un período seco desde noviembre hasta marzo.

(Ríos, 1972), especifica que las temperaturas en la zona son altas todo el año, con un promedio anual de 40 - 42 ° C.

Además, la estación lluviosa es bien definida entre Junio y Septiembre con precipitación regular y abundante, lo que provoca la inundación de las zonas adyacentes a los caños y ríos principales.



**Figura N° 2.3 Mapa de las precipitaciones promedio anuales en Venezuela desde 1968 a 2000.  
Tomado de CONICIT, 2003.**

## 2.5 VIENTOS

Los vientos predominantes son alisios del noreste, con una dirección frecuente noreste; mientras que la estación de lluvia son predominantes los vientos de la masa continental del frente intertropical con una dirección sureste. La velocidad de los vientos es relativamente baja y oscila alrededor de 2.5 Km/h, siendo los meses de diciembre a abril cuando presentan mayor velocidad llegando a 5 Km/h. (Ríos, 1972)

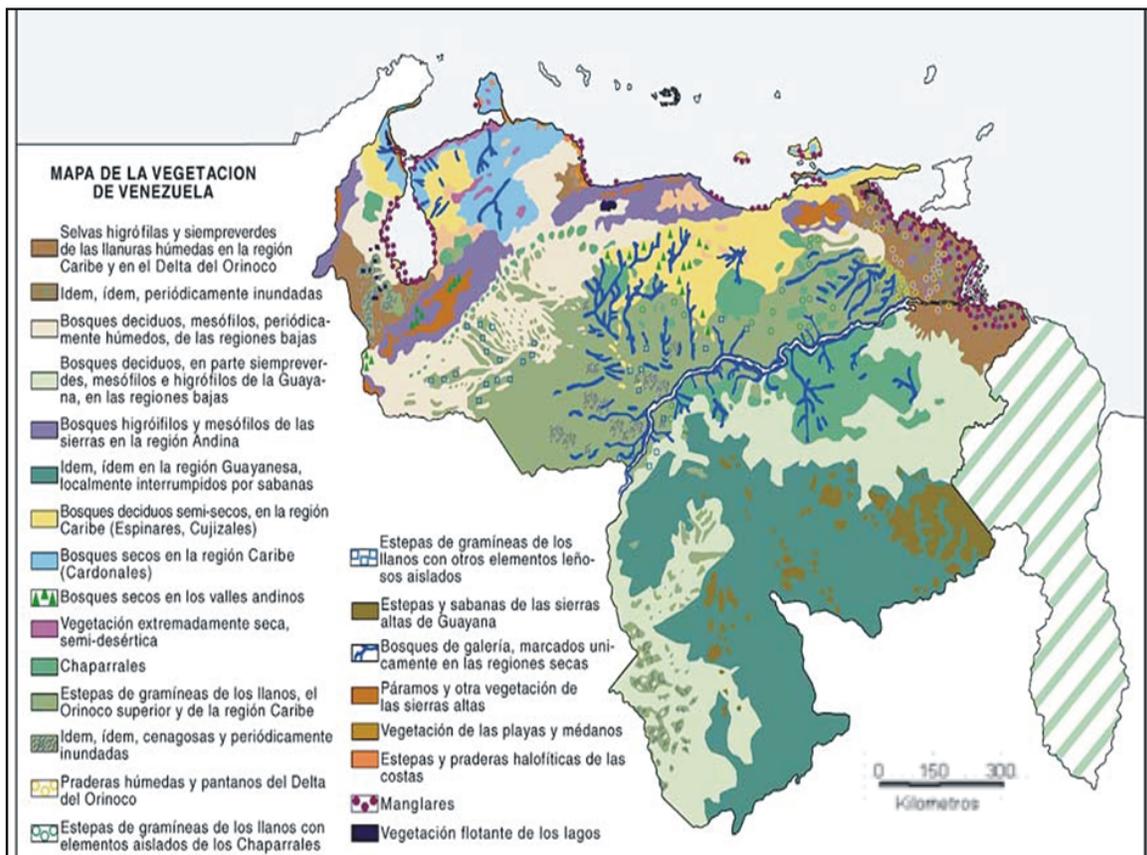
## 2.6 VEGETACIÓN

El manto vegetal, está representado por un bosque seco tropical, que se presenta como: bosque virgen, bosques secundarios o sabanas.

El bosque secundario y la sabana como característicos del sur de Caicara, no representan restricciones para el desarrollo urbano. Se puede observar con claridad que la vegetación en las zonas más bajas de estas tierras es más vigorosa aunque de relativa baja altura

(hasta 5 metros) y durante la época lluviosa tiene carácter exuberante. La sabana se localiza en los espacios de menor pendiente con vegetación dominante de gramíneas.

La vegetación característica es de árboles espaciados en grandes extensiones cubiertas de gramíneas con escasas zonas boscosas. Están dadas una serie de condiciones, humedad, nivel freático alto, altitud sobre el nivel del mar, que favorece cierto tipo de vegetación. Entre las especies recomendables están: bucare piñón, bucare anaucó, bucare peonía, bucare velludo, el matarratón, el roble, el drago, etc. (Ver figura 2.4)



**Figura N° 2.4 Mapa de la vegetación de Venezuela, donde se observa que la región de estudio corresponde a una zona de estepas de gramíneas del Orinoco. Tomado de MARN, 2005.**

## **2.7 DRENAJE**

Ríos (1972), define la red hidrográfica como un sistema formado por dos tipos de régimen: cursos permanentes y cursos intermitentes. En la zona de estudio, el único curso de agua de escorrentía permanente lo constituye el río Orinoco; los demás cursos de agua son intermitentes, aparecen en la época de lluvia y se generan en las colinas que los circundan cuando caen las precipitaciones. Sin embargo, debido a las deficiencias que presenta el drenaje superficial, a la poca profundidad de los cauces y a los caudales irregulares, las escorrentías intermitentes generan frecuentemente problemas de erosión laminar local e inundaciones estacionales.

La zona esta drenada por cuatro ríos principales: Cuchivero, Guaniamo, Guaniamito y Zariapo; afluente los tres últimos del primero, numerosos caños y pequeñas quebradas.

Los cuatro ríos mencionados son navegables durante todo el año (a excepción del río Guaniamito, que se corta en varios sitios a fines del verano)

Se presentan numerosas lagunas en la parte noroeste, este y suroeste, la mayoría producto de inundaciones estacionales, que como su nombre lo dice, se forman en la estación lluviosa alcanzando el máximo nivel de las aguas durante los meses de agosto, septiembre y octubre.

Los ascensos y descensos de las aguas están controlados por el régimen del río Orinoco. (Ver figura N° 2.5)

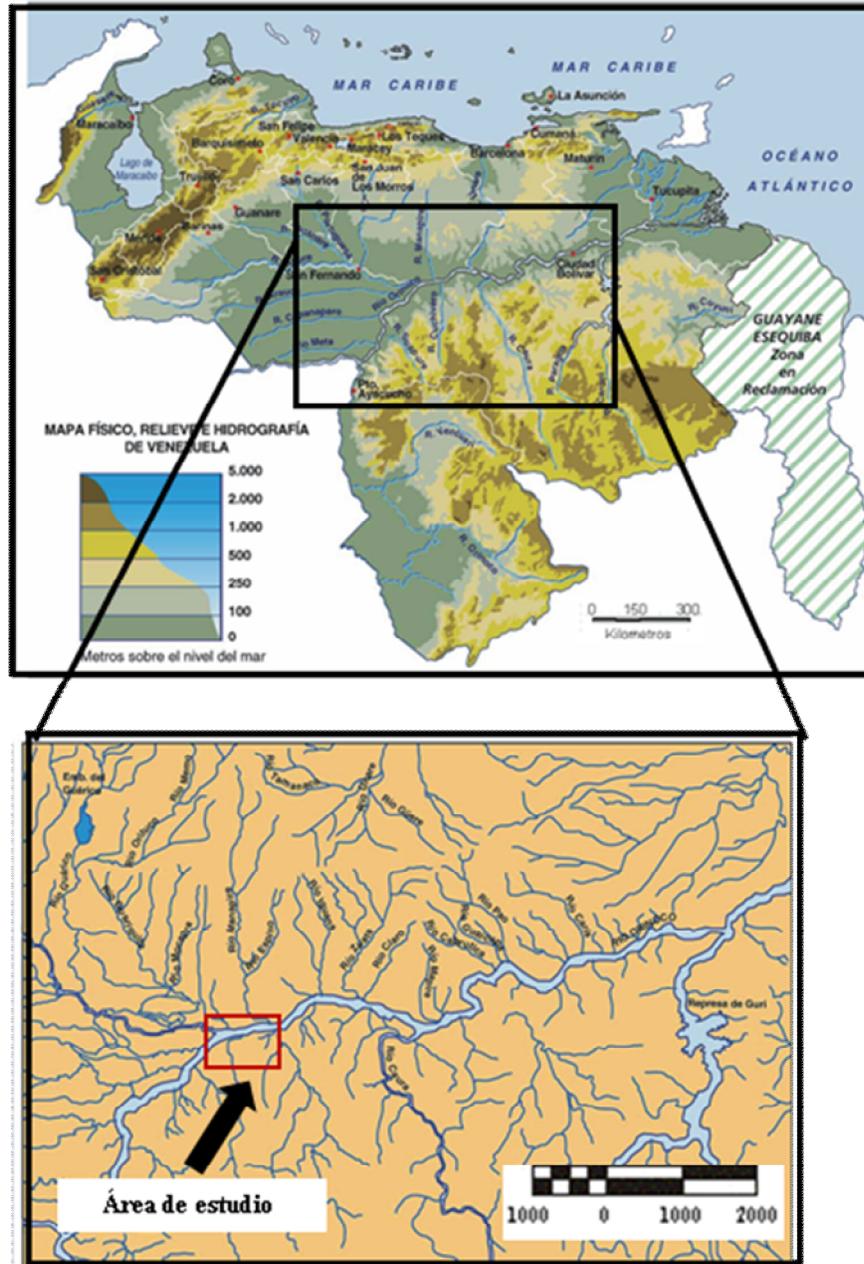


Figura N° 2.5 Mapa Hidrográfico de Venezuela, donde se resalta la cuenca media del río Orinoco. Tomado de CONICIT, 2002.

## CAPÍTULO III

### MARCO GEOLÓGICO

#### 3.1 GENERALIDADES

La región de estudio se ubica entre el borde septentrional del cratón de Guayana, perteneciente geológicamente a la provincia estructural de Cuchivero como también del borde meridional de la Cuenca Oriental de Venezuela y las formaciones sedimentarias de la región de los Llanos.

En el área, el río define dos zonas geográfica y geológicamente diferentes. La zona norte corresponde a la región de las Llanuras Centrales y la parte sur, al borde septentrional del Escudo Guayanés. Esta característica condiciona las formas de las márgenes de río, muy inestables en la margen norte donde se forman taludes cuya altura varía con el nivel del río y frecuentemente se derrumban al quedar expuesto durante la época de sequía.

Las rocas que afloran al sur de la zona de estudio, están representadas por rocas plutónicas pertenecientes al Granito de Santa Rosalía, que se encuentra en contacto intrusivo con las rocas volcánicas félsicas de la Formación Caicara aflorante en esa región. Dichas rocas se encuentran constituidas principalmente por riolitas y riolitas porfidíticas, formando una secuencia alineada con rumbo norte. Los afloramientos se encuentran representados por los cerros cercanos Coroba, Salao y San Mateo.

En contacto discordante con estas rocas precámbricas, se encuentran capas de rocas sedimentarias y sedimentos recientes depositados en una amplia depresión del basamento ígneo-metamórfico. Los sedimentos presentes son arenas finas, limpias, cuarcíticas, con cierta proporción de finos no plásticos, típicos de sedimentación reciente aluvional y capas de arcillas muy plásticas con algunas intercalaciones de material carbonáceo, limos y arcillas arenosas.

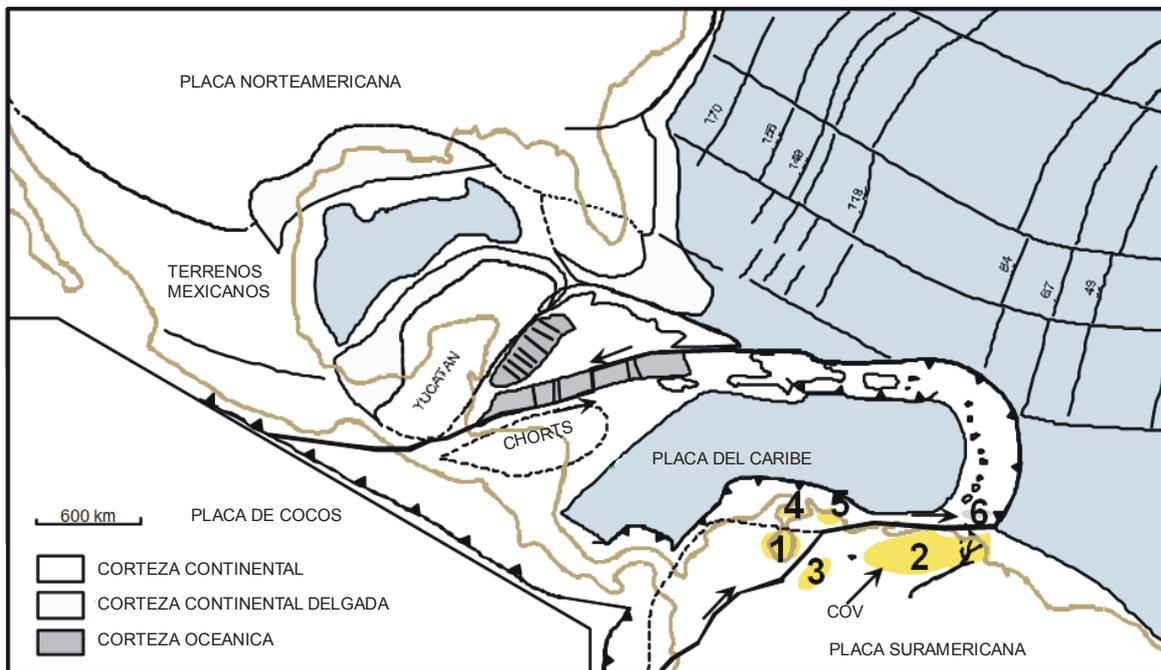
Las rocas sedimentarias parecen corresponder al tope de la Formación las Piedras conformada básicamente por sedimentos finos mal consolidados de areniscas y limolitas más o menos carbonáceas; arcillitas y limolitas de color gris verdoso y arcillas ligníticas.

Bajo Las Piedras (Plioceno) existe sedimentación paleozoica representada por rocas de las Formaciones Hato Viejo y Carrizal.

La Formación Hato Viejo está constituida principalmente por areniscas gruesas cuarcíferas, grises, en contacto discordante con las rocas precámbricas. La Formación Carrizal consiste en argilitas y limolitas verdosas duras, masivas y densas, con frecuentes intercalaciones limosas y ocasionales capas de areniscas y conglomerados con pocos horizontes carbonáceos. (L.E.V, Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1970).

### 3.1.1 HISTORIA GEOLÓGICA TERCIARIA DE LA REGIÓN

La Cuenca Oriental de Venezuela (C.O.V) es una cuenca formada por la flexión del margen pasivo de Sur América durante su colisión oblicua en el Cenozoico, con la placa Caribe (Figura N° 3.1) La C.O.V cubre un área aproximada de 165.000 km<sup>2</sup> y está limitada por la Cordillera de La Costa/Villa de Cura y la Serranía del Interior al norte, el Arco El Baúl al oeste, el Escudo de Guayana al sur, y la corteza oceánica del Atlántico ecuatorial, al este (Rodríguez, 1999).



**Figura N° 3.1 Escenario tectónico de la Cuenca Oriental de Venezuela, tipo ante - país, formada como el resultado de la colisión oblicua durante el Cenozoico entre las placas Caribe y norte de Sur América.**

**Detalle de la Cuenca Oriental de Venezuela señalada con número 2. Tomado y Modificado de Rodríguez (1999), mencionado por Fuentes (2006)**

La Cuenca Oriental de Venezuela está formada por dos sub-cuencas: las cuencas Guárico y Maturín, separadas por el Arco de Urica, el cual estuvo intermitentemente activo durante el Mioceno hasta el Holoceno. Según Rodríguez (1999), el tiempo e intensidad de la colisión entre las placas Caribe y Sur América fueron críticas en la evolución de ambas sub-cuencas y de los 5 – 14 km de relleno sedimentario acumulado dentro de éstas.

En la cuenca de Guárico, la sección sedimentaria total preservada es acerca de 5 km, mientras en la sub-cuenca de Maturín un espesor sedimentario total de 8,5 hasta 14 km ha sido estimado a partir de datos sísmicos, gravimétricos y magnéticos (Subieta et al., 1988; Talukdar et al., 1988; Aymard et al., 1990; Fernández y Passalacqua, 1990; Lander et al., 1990 [citado por Rodríguez, 1999]).

Según Erlich et al., (1992, citado por Rodríguez, 1999), el origen tectónico post-Paleozoico de la Cuenca Oriental de Venezuela (cuenca ante-país periférica) puede ser resumida en tres fases principales:

1. Apertura o “Rifting” en el Paleozoico Tardío.
2. Margen pasivo Cretáceo - Paleógeno.
3. Compresión - Transpresión y desarrollo de cuenca ante - país Paleógeno - Cuaternario.

La sección Terciaria de la parte central de la C.O.V está compuesta por depósitos del Mioceno Temprano - Medio por episodios deposicionales de Oficina, episodio deposicional de profundidad Mioceno Superior de Freites y, episodio deposicional Plioceno-Pleistoceno Las Piedras/Mesa). Todas estas unidades de tiempo fueron influenciadas por tectonismo local que afectaron esta región desde tiempos del Oligoceno (alrededor de 28-26 Ma), (Rodríguez, 1999).

#### **3.1.1.1 Límites de la C.O.V**

- **Norte:** Línea que demarca el piedemonte de la Serranía del Interior, los cinturones ígneo metamórficos de la Cordillera del Caribe hasta Araya-Paria.
- **Sur:** Con el curso del Río Orinoco desde la desembocadura del Río Arauca hasta el Delta.
- **Este:** Continúa por debajo del Golfo de Paria hacia el sur de Trinidad y se hunde en el Atlántico ecuatorial al Oeste de la Costa del Delta del Orinoco.

- **Oeste:** Con el Arco de El Baúl y su conexión estructural con el Cratón de Guayana. El Arco de El Baúl representa el límite entre la Cuenca de Barinas-Apure al Oeste y la C.O.V al Este.

Topográficamente la C.O.V se caracteriza por extensas llanuras y un área de mesas que comprende los estados Anzoátegui y Monagas.

La C.O.V es asimétrica con el flanco sur ligeramente inclinado hacia el Norte. Toda la cuenca se profundiza y buza hacia el Este, hacia el SE de Trinidad donde se estima pueda alcanzar hasta 14.000 m de espesor. (Ver figura N° 3.2)



### **3.1.2 EVOLUCIÓN DE LA CUENCA ORIENTAL DE VENEZUELA**

La evolución de esta cuenca es relativamente simple, por haber estado desde el Paleozoico apoyada sobre el borde estable del Cratón de Guayana. Suaves movimientos de levantamiento y hundimiento de este borde ocasionaron transgresiones y regresiones extensas, que fueron de gran importancia para el desarrollo final de la cuenca. Por consiguiente, aunque la cuenca de Venezuela Oriental no mostró una forma similar a la actual sino después del Eoceno superior ni alcanzó su forma definitiva hasta el Mioceno inferior ( $\pm 20$  m.a.), su prehistoria se sitúa en el Devono-Carbonífero, hace unos 350 millones de años. Durante este largo período de tiempo se reconocen tres ciclos sedimentarios separados: el primero corresponde al Paleozoico Medio-Superior y Superior, el segundo comienza durante el Cretácico Medio y se hace regresivo durante el Terciario Superior y el tercero se desarrolló durante el Terciario Superior y fue definitivo para la configuración de la Cuenca Oriental de Venezuela en su estado actual. (González de Juana, 1980).

#### **3.1.2.1 Resumen Esquemático del Proceso Evolutivo**

- **350-250 m.a. Devono-Carbonífero**

Sedimentación de las Formaciones Carrizal y Hato Viejo en una depresión pericratónica situada en el borde septentrional del Cratón de Guayana. Ambas formaciones se consideran transicionales.

- **250-200 m.a. Orogénesis Herciniana o Evento Tecto-Termal Permo-Triásico**

Levantamiento vertical del borde cratónico y retirada general de los mares hacia el norte. Comienzo de un largo período de erosión. No se conoce actividad tectónica compresiva en la Cuenca de Venezuela Oriental propiamente dicha.

- **220-160 m.a. Triásico-Jurásico**

Actividad volcánica en el Macizo de el Baúl, límite occidental de la cuenca. Período de erosión sobre la mayor parte de la cuenca.

- **120-115 m.a. Barremiense-Aptiense-Albiense**

Inicio de la transgresión cretácica dirigida de norte a sur y desarrollada sobre la penillanura precretácica. La transgresión es típicamente oscilante y las oscilaciones alcanzan gran amplitud, pero en todo caso se conservan ambientes más marinos hacia el norte y más continentales hacia el sur.

- **100-85 m.a Cenomaniense-Coniaciense**

Máxima cobertura marina y desarrollo de ambientes euxínicos en el norte. Hacia el sur se extienden ambientes marino-costeros, gradualmente más terrígenos hacia el extremo sur.

- **85-65 m.a Santoniense-Maestrichtiense**

Sedimentación de lutitas marinas, algunas arenas finas e intervalos de fñanitas silíceas al norte, Formación San Antonio. En la región sureste comienza la regresión marcada por las areniscas masivas de la Formación San Juan, básicamente Maestrichtiense, probablemente extendida al Paleoceno.

- **80-65 m.a Orogénesis del Final del Cretácico**

Probablemente durante el Campaniense, fenómenos tecto-termales de importancia afectaron rocas mesozoicas en alguna parte del actual mar Caribe al norte de las costas actuales de Venezuela central y oriental, produciendo metamorfismo regional acompañado de intrusiones ácidas. Hacia el final del Cretácico las masas metamórficas fueron levantadas, bien como arcos de islas, bien en forma de cordillera.

- **65-45 m.a Paleoceno-Eoceno medio**

El levantamiento de las masas metamórficas delimitó hacia el sur una extensa cuenca donde se depositaron sedimentos del Ciclo Terciario Inferior. Dicha cuenca se extendía de sur a norte desde una línea de playa situada aproximadamente al sur de los campos petrolíferos de Mulata-Santa Bárbara hasta no menos de 175 Km hacia el norte, en regiones del mar Caribe actual. La cuenca ancestral muestra durante el Paleoceno sedimentación de plataforma en el borde meridional, talud continental, que alcanzó más de 1000 m de paleopropfundidad cerca de Casanay (edo. Sucre), y un surco turbidítico profundo más al norte de la actual costa venezolana. Durante este período comienza el movimiento de las masas metamórficas hacia el sur, con el consiguiente empuje sobre la secuencia sedimentada en el borde cratónico. Gran parte de la sedimentación alóctona del surco de Guárico fue ocasionada por este movimiento.

- **45-25 m.a Eoceno superior-Oligoceno**

Hiatus post-Eoceno medio y levantamiento en la parte norte de la cuenca. Sedimentación transgresiva en Guárico de la Formación La Pascua, de aguas someras procedentes de la cuenca de Barinas, seguida de un cuerpo lutítico de aguas marinas someras y tranquilas, Formación Roblecito. La transgresión progresa hacia el este y en la

región de Barcelona, el hiatus y la transgresión mencionadas se encuentran sobre la Formación Caratas y por debajo de la Formación Los Jabillos del Oligoceno medio. Es probable que la Cuenca de Guárico y los mares existentes en el extremo oriental de Venezuela y en Trinidad estuvieran separados al comienzo de esta época por una extensión de tierras bajas y pantanosas, sugerido por la ausencia de sedimentación en el Eoceno Superior. Hacia el sur se extiende al oeste la sedimentación arenoso-parállica de La Pascua y al este de las Formaciones Los Jabillos, Areo y Naricual, reunidas en La Formación Merecure, por debajo de la cual desaparece por acuñamiento la lente lutítica de Roblecito. Hacia el este se produce la sedimentación profunda, de mar abierto, de Carapita.

- **20 m.a Mioceno**

Se producen cambios fundamentales en la forma de la cuenca y en la distribución de los sedimentos. En la parte norte de Guárico la sedimentación se hace predominantemente continental. Desde el flanco norte de la cuenca hacia el sur se observa gradación entre las Formaciones Capiricual-Quiamare al norte y la Formación Oficina al sur. Hacia el este la profundización de ambientes continúa determinando la sedimentación de Carapita. Durante este período el tectonismo adquiere especial importancia y se manifiesta con mayor intensidad en el flanco norte de la cuenca. Hacia la zona oeste la sedimentación original del surco paleoceno sufrió un desplazamiento tectónico hacia el sur de al menos 125 Km producido por empujes de fuerte componente norte-sur. La llamada Faja de Sobrecorrimiento llega hasta el Corrimiento Frontal de Guárico, donde a las cuñas falladas anteriores se incorporan elementos depositados en la neocuenca eo-oligomiocena.

- **± 15 m.a**

Continúa el levantamiento de la parte nor-oriental de la cuenca que sigue inclinándose hacia el este. En el flanco sur se sedimenta la Formación Freites de ambiente marino somero; en el borde norte los mares transgreden ligeramente sobre la superficie erosionada de Carapita depositándose la sedimentación marina marginal de la Pica.

- **± 5 m.a Plioceno**

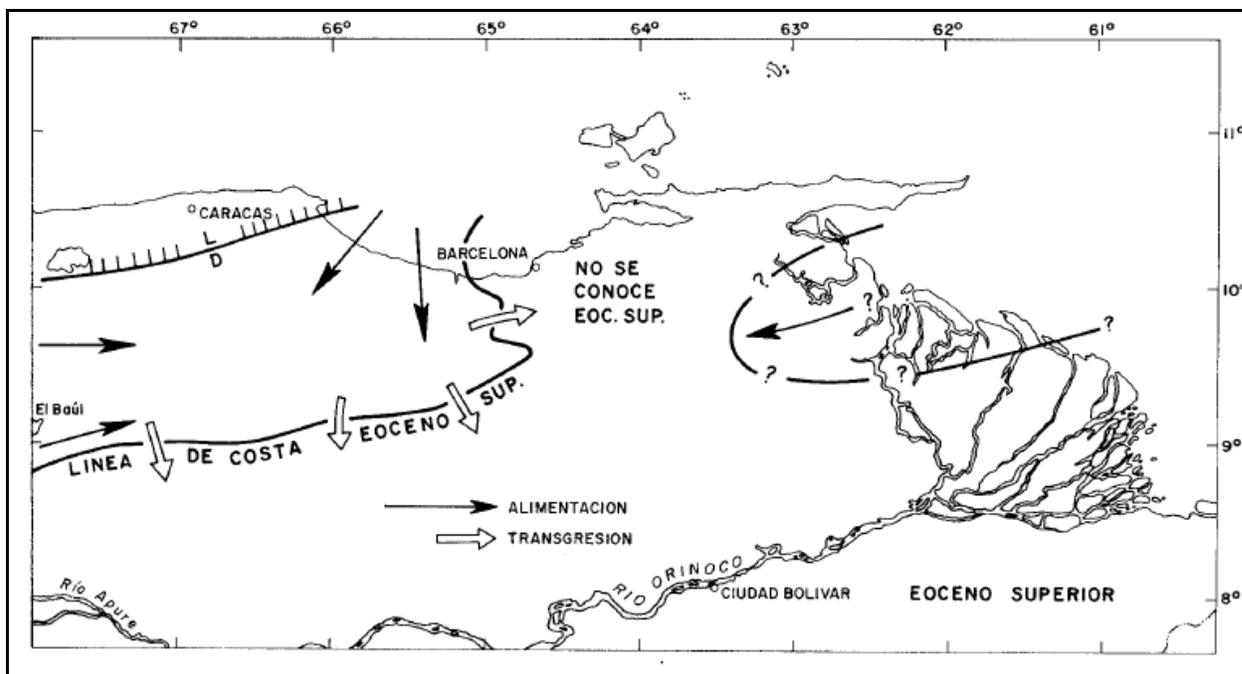
Mientras los ambientes marinos continuaron retrocediendo hacia el este, extensos ambientes fluvio-deltaicos se establecieron sobre una gran parte de la cuenca; en ellos se sedimentó la Formación Las Piedras. Hacia el oeste, en el estado Anzoátegui y en el sur, en el subsuelo de los campos del área de Oficina y Temblador esta sedimentación recubre la

sedimentación marina somera de la Formación Freites. Hacia el noreste se encuentra por encima de la Formación La Pica, sobrepasando la línea de playa de esta Formación y avanzando hasta el piedemonte de las montañas actuales, en forma discordante sobre la sedimentación del ciclo Terciario Superior e Inferior y localmente sobre el Cretácico erosionado. El episodio final de esta evolución está por la Formación Mesa, de ambiente continental.

### **3.1.2.2 Análisis del Proceso Sedimentario**

Los sedimentos más antiguos corresponden a la Formación La Pascua, eminentemente arenosa y sin faunas diagnosticas de edad, seguida rápidamente por la Formación Roblecito, predominantemente lutítica, en la cual Quarforth y Caudri (1961) encontraron buenos indicios de faunas del Eoceno superior adicionalmente a los indicios de edad Oligocena señalados con anterioridad por Patterson y Wilson (1953), todos estos autores citados por González de Juana (1980).

De acuerdo con ello la Formación La Pascua y consecuentemente el inicio de la transgresión marina en la Cuenca de Oriente de Venezuela puede fijarse en el Eoceno superior. Ello permite sugerir que la Cuenca de Venezuela Oriental fue parcialmente alimentada desde el oeste por elevación del fondo de la Cuenca de Barinas y que esta elevación ocasionó el desplazamiento hacia el este de los ambientes de la Formación Gobernador sobre el arco de El Baúl y su extensión en forma diacrónica a la propia Cuenca de Venezuela Oriental.



**Figura N° 3.3 Paleogeografía del Eoceno superior en Venezuela Oriental.**  
 (Tomado de González de Juana, 1980)

Durante el Oligoceno y Mioceno la invasión marina se extendió progresiva y diacrónicamente hacia el este y sureste por la parte centro-meridional en los estados Guárico, Anzoátegui y Monagas, y una pequeña parte de Sucre y prácticamente todo el territorio Delta Amacuro, con una extensión aproximada de 165.000 Km<sup>2</sup> en territorio Venezolano. La cuenca tenía forma de U abierta hacia el este; su flanco norte estuvo formado por una cordillera en proceso de levantamiento, mientras que el flanco sur se desarrolló sobre una plataforma de aguas someras apoyada sobre el borde estable del Cratón de Guayana, al cual se había incorporado la sedimentación peri-cratónica del Mesozoico. Como resultado de la presencia de estos dos elementos mayores la cuenca se inició asimétrica, con su zona axial situada hacia el norte, donde se acumuló el mayor volumen de sedimentos. Toda la cuenca presenta inclinación regional hacia el este, de forma que se considera que en la parte meridional de Trinidad la sedimentación excede 10 Km, depositados en su mayoría a profundidades batiales.

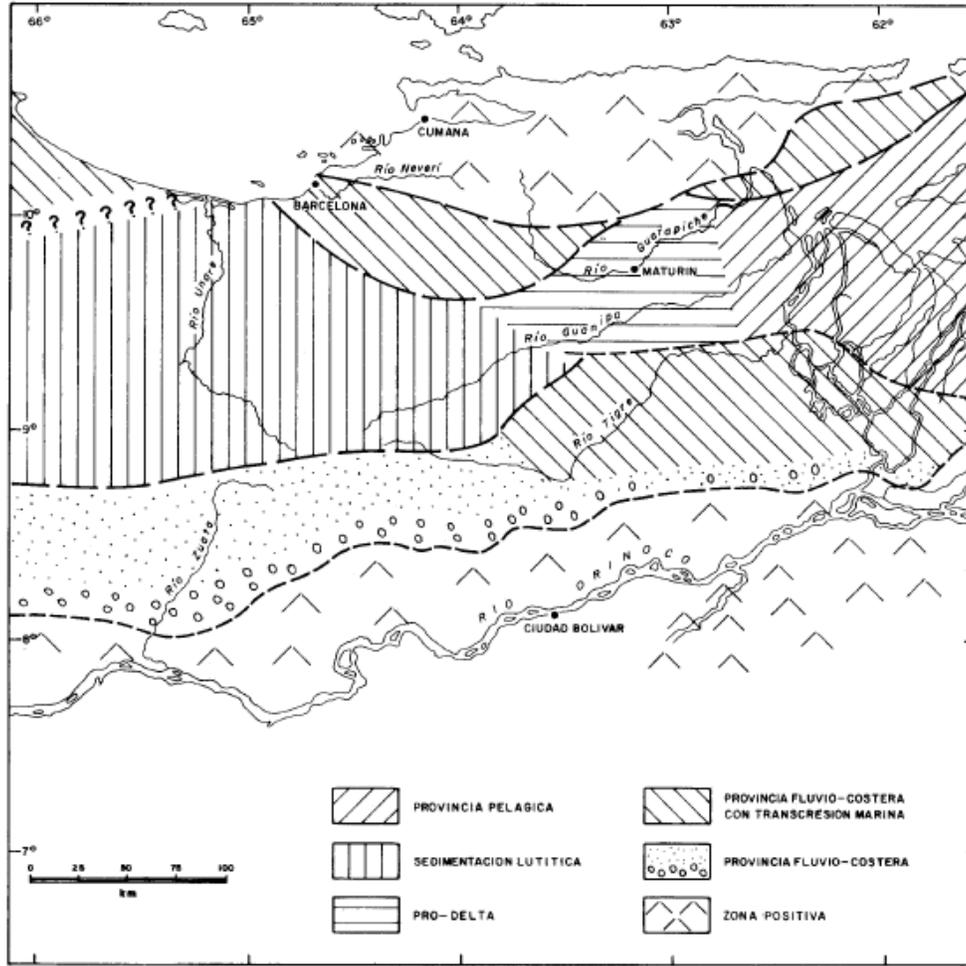


Figura N° 3.4 Paleogeografía del Oligoceno-Mioceno inferior de la Cuenca Oriental de Venezuela. (Tomado de González de Juana, 1980)

El esquema generalizado de la sedimentación durante el Ciclo Terciario Superior se ajusta bien a este modelo: ambientes predominantemente continentales a salobres, fluvio-deltaicos, con grandes extensiones pantanosas y recurrencia de cortas invasiones marinas someras hacia el oeste y sobre la plataforma, representados por las Formaciones La Pascua, Roblecito y Chaguaramas al oeste y la secuencia Merecure-Oficina-Freites sobre la plataforma; intervalos francamente marinos profundo en la zona axial: Formaciones Areo y Carapita y sedimentos marginales de aguas someras, localmente pantanos litorales, intervalos conglomeráticos y hacia su tope, ambientes continentales en el borde sur de la Cordillera: Formaciones Naricual, Capiricual, Quiamare, Capaya, Uchirito, etc.

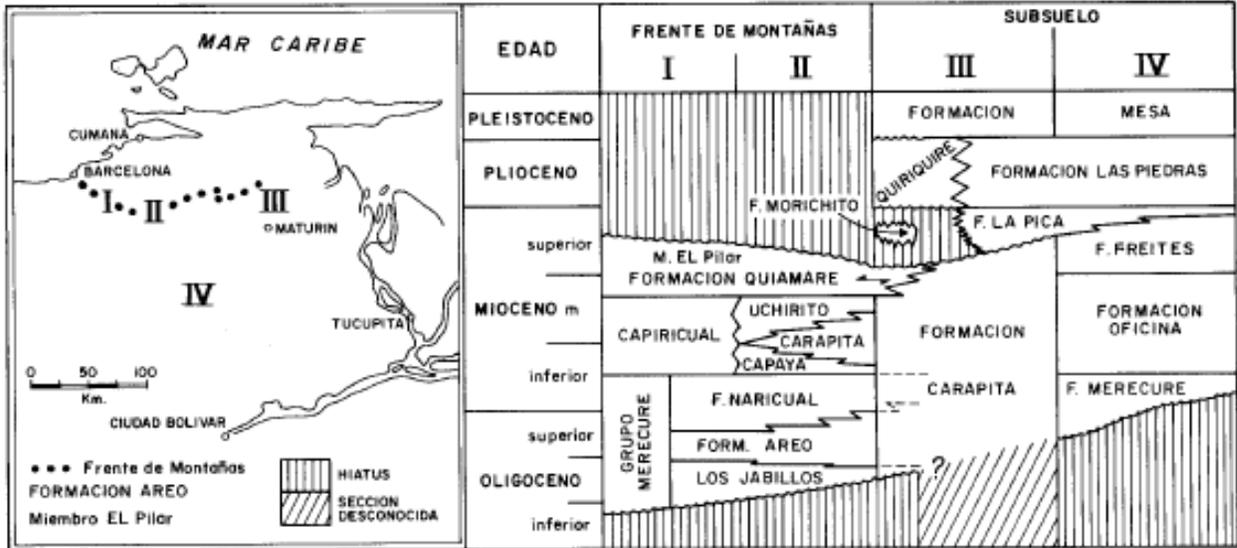


Figura N° 3.5 Cuadro de nombres litoestratigráficos de las unidades del Terciario Superior en la Cuenca Oriental de Venezuela. (Tomado de González de Juana, 1980)

### 3.1.2.3 Estructura de la Cuenca

Estructuralmente la Cuenca de Venezuela Oriental puede definirse como una gran depresión limitada al sur por el borde septentrional del Cratón de Guayana, al norte por el cinturón móvil de las Serranía del Interior Central y Oriental y al oeste por el levantamiento de El Baúl.

El borde meridional de la cuenca puede definirse siguiendo una línea aproximadamente paralela al curso actual del Orinoco y a una distancia variable, al norte del río, entre 5 Km y 20 km (Gutiérrez, 1976). El borde septentrional puede fijarse sobre la línea del corrimiento frontal de Guárico, desde el meridiano 67°45' hacia el este hasta el aluvión de la depresión de Barcelona, continuando por el piedemonte de Anzoátegui y Monagas según una línea al norte del Campo de Quiamare, al sur del Cerro Corazón y las poblaciones de Aragua de Maturín, Caripito, Guanoco y el delta del río San Juan. Su límite oeste podría ser fijado en el mencionado meridiano 67°45' sin mayor precisión, por desconocerse la extensión hacia el este del macizo de rocas paleozoicas de El Baúl y los detalles de la supuesta conexión de este macizo con el borde cratónico meridional. (González de Juana, 1980).

### **3.1.3 GEOLOGIA REGIONAL**

#### **3.1.3.1 Formación Las Piedras – Terciario (Mioceno Tardío-Plioceno)**

En la localidad tipo (Pozo Las Piedras N° 1), (Ver figura N° 3.6), la Formación Las Piedras consiste en areniscas y limolitas micáceas friables, de grano fino y colores gris claro a gris verdoso, interlaminados con lutitas, arcilitas sideríticas, lutitas ligníticas y lignitos (Hedberg, 1950).

También se encuentran algunas calizas arenosas duras y de color verde. Hacia el piedemonte se caracteriza litológicamente por lentes de peñones, peñas, gravas, arenas, limos, arcillas arenosas y arcilitas, mal consolidadas. La Formación aflora en la porción septentrional de los estados Anzoátegui y Monagas. Topográficamente se presenta en terrenos planos y de suaves ondulaciones. En el área norte del Alto de Pirital la Formación las Piedras suprayace discordantemente Formaciones del Cretácico y Terciario, mientras que al sur y en la mayor parte de la cuenca es concordante con las Formaciones La Pica y Freites. En la sección tipo, la Formación tiene 1005 m de espesor, el cual aumenta hacia el eje central de la cuenca alcanzando hasta 1370 m.

(González de Juana, 1980), le asigna a esta Formación la edad de Mioceno Tardío-Plioceno, fundamentalmente es una unidad depositada en medio salobres y compuesta de arcillas relativamente blandas, grises y gris-verdosa a causa de su contenido de clorita, intervalos finamente interlaminados de arena y lutitas.

La Formación aflora en la porción septentrional de los estados Anzoátegui y Monagas. En el subsuelo se extiende al este hasta Pedernales, Territorio Delta Amacuro y Golfo de Paria. Hacia el sur, llega a las cercanías del río Orinoco en la faja petrolífera.

La unidad consiste primordialmente en sedimentos finos, mal consolidados que incluyen areniscas y limolitas más o menos carbonáceas, arcilitas abigarradas y lignitos. Mineralógicamente esta Formación, en un punto determinado, es mucho más compleja que la Formación Mesa, incluyendo abundantemente andalucita, biotita, clorita y corindón, y menor cantidad de granates, glaucofano y epidoto.

Esta formación alcanza su espesor máximo a lo largo del eje de la Cuenca de Maturín y se adelgaza hacia los flancos, más rápidamente hacia el norte que hacia el sur. En gran parte

su extensión, Las Piedras infrayace a la Formación Mesa, con un contacto aparentemente concordante y transicional.

(COPLANARH, 1974), menciona que la Formación Las Piedras se depositó durante el Mioceno Superior y el Plioceno. Su espesor máximo es aproximadamente de 1300 m. Está constituido por sedimentos finos mal consolidados, areniscas y limolitas más o menos carbonáceas, lutitas arcillosas, arcilitas abigarradas y lignitos. Hay discordancias intraformacionales localizadas.

La Formación Las Piedras es un depósito fluvial en un ambiente litoral carece de fósiles representativos. Se han encontrado tortugas, cangrejos y peces.

A pesar de haber sido depositadas en medios distintos, las diferentes formaciones terciarias presentan más o menos las mismas características. Las rocas detríticas de grano fino, lutitas y limolitas, constituyen secuencias muy espesas. Sin embargo, frecuentemente las formaciones terciarias se confunden con la Formación Mesa suprayacente, bien sea, por efecto de las concreciones que pueden estar “in situ” o por proceder de la meteorización de la coraza ferruginosa cuaternaria o debido al material superficial que puede proceder de la mesa como de la alteración de estratos de areniscas mal consolidadas.

A continuación se presenta la tabla N° 3.1 donde se tiene el cuadro de resumen con las características más importantes de la Formación Las Piedras.

**Tabla N° 3.1 Cuadro Resumen de Características de la Formación Las Piedras. Tomado de Escamilla H. & Romero K. (2000)**

<b>Localidad Tipo</b>	Pozo Las Piedras N°1, de la antigua concesionaria California Petroleum Corp., entre 275 y 1280 m (González de Juana, y el intervalo 488-1372 m (aproximadamente 1600-4500) (Hedberg, op. cit.).
<b>Descripción Litológica</b>	Consiste en areniscas micáceas, friables, de grano fino y colores gris claro a gris verdoso, limolitas grises y arcilitas sideríticas, grises, lutitas ligníticas y lignitos y algunas calizas arenosas duras y de color verde.
<b>Espesor</b>	La Formación tiene 1005 m de espesor, el cual aumenta hacia el eje de la cuenca de Maturín, hasta un máximo probable de 1370 m (L.E.V., 1970). Barnola (1960) reportó un espesor que varía entre cero y 2400 m en el campo Pedernales.
<b>Extensión Geográfica</b>	Borde septentrional de los estados Anzoátegui y Monagas. En el subsuelo se extiende al este hasta Pedernales, Territorio Delta Amacuro y golfo de Paria. Hacia el sur, llega a las cercanías del río Orinoco en la faja petrolífera
<b>Contactos</b>	Concordante sobre la Formación La Pica (Cuenca de Maturín). Y yace con fuerte discordancia angular sobre unidades del Mioceno al Cretácico. En el flanco sur de la cuenca, yace concordantemente sobre la Formación Freites, cerca del río Orinoco yace sobre el basamento ígneo metamórfico. Hacia Delta Amacuro, la parte superior de Las Piedras se confunde sobre la parte inferior de la Formación Paria (Salvador, op. cit.).
<b>Fósiles</b>	En general no presenta. González de Juana (op. cit.) mencionó solo algunos foraminíferos arenáceos y algunos ejemplares del molusco Corbícula. Los fósiles se limitan a restos de peces y de plantas, algunos moluscos de agua dulce o salobre y algunos foraminíferos (Hedberg, op. cit., P.1207).
<b>Edad</b>	Mioceno tardío a Plioceno
<b>Correlación</b>	La parte superior es parcialmente equivalente a las formaciones Quiriquire y la parte inferior a la Formación La Pica
<b>Paleoambiente</b>	Aguas dulces a salobres según Hedberg (op. cit.). En el área del campo Pedernales, la Formación fue depositada en un ambiente deltaico a marino somero (Barnola, op. cit.).

### 3.1.3.2 Formación Mesa – Cuaternario (Pleistoceno)

La Formación Mesa representa sedimentos jóvenes del Cenozoico: Pleistoceno, que cubren las extensas mesetas fisiográficamente características en el sector oriental de la cuenca de Venezuela oriental (Hedberg y Pyre, 1944 [citado por González de Juana, 1980]).

Según el III Léxico Estratigráfico de Venezuela (2005), ésta se extiende geográficamente por los llanos centro-orientales y orientales (estados Guárico, Anzoátegui, Monagas). Además, se encuentran algunos afloramientos en los estados Sucre y Bolívar, inmediatamente al sur del río Orinoco.

No se le ha designado una sección tipo, debido a que la Formación aflora en casi todas las mesetas, con secciones representativas. Se hacen mención particular, de las mesetas de

Guanipa (Anzoátegui), Tonoro y Santa Bárbara (Monagas), y los escarpados al este y NE de Santa Rosa (Anzoátegui).

Según González de Juana (1946), litológicamente está constituida por sedimentos típicamente continentales, razón por la cual varía mucho de un sitio a otro. En algunos puntos su origen indica marcada sedimentación eólica; en otros se presenta bajo la forma de depósitos de tipo piedemonte. Frecuentemente pueden descubrirse en ella antiguos cauces de ríos y secuencias de grava, guijarros y peñas que representan conos de deyección originados por torrentes de gran poder erosivo, pero la mayor parte de la Formación Mesa es producto de una sedimentación deltoide y paludal, resultado de un extenso delta que avanzaba hacia el este.

A continuación se presenta la tabla N° 3.2 donde se tiene el cuadro de resumen con las características más importantes de la Formación Mesa.

**Tabla N° 3.2 Cuadro Resumen de Características de la Formación Mesa. Tomado de Escamilla H. & Romero K. (2000)**

<b>Localidad Tipo</b>	No se ha designado una sección tipo, debido a que la Formación aflora en casi todas las mesas, con secciones representativas, tales como las mesas de Guanipa (Anzoátegui), Tonoro y Santa Bárbara (Monagas), y los escarpados de Santa Rosa (Anzoátegui).
<b>Descripción Litológica</b>	La Formación Mesa consiste de arenas de grano grueso y gravas, con cemento ferruginoso cementado y muy duro; conglomerado rojo a casi negro, arenas blanco-amarillentas, rojo y púrpura, con estratificación cruzada; además contiene lentes discontinuos de arcilla fina arenosa y lentes de limolita.
<b>Espesor</b>	Variable, pero en términos generales disminuye de norte a sur, como consecuencia del cambio en la de sedimentación fluvio-deltaica y aumenta de oeste a este, por el avance de los sedimentos deltaicos (González de Juana, 1980). En la mesa de Maturín llega hasta los 272 m y en el estado Bolívar llega hasta los 20 m.
<b>Extensión Geográfica</b>	Se extiende por los llanos centro orientales y orientales (estados Guárico, Anzoátegui, Monagas) y algunos afloramientos en los estados Sucre y Bolívar, inmediatamente al sur del río Orinoco.
<b>Contactos</b>	Suprayace en contacto concordante y transicional, a la Formación Las Piedras (Plioceno). En la sección de río Cristalino, río La Palencia, río del Medio, Caripito y Las Parcelas se encuentra discordante sobre las formaciones Querecual, San Antonio y San Juan (Furrey y Casto, 1997, comentarios enviados al CIEN).
<b>Fósiles</b>	Fósiles de agua dulce, asociados con arcillas ligníticas y restos de madera silicificada (González de Juana, 1980).
<b>Edad</b>	Con base en la relación transicional con la Formación las Piedras (Plioceno), se ha postulado una edad Pleistoceno.

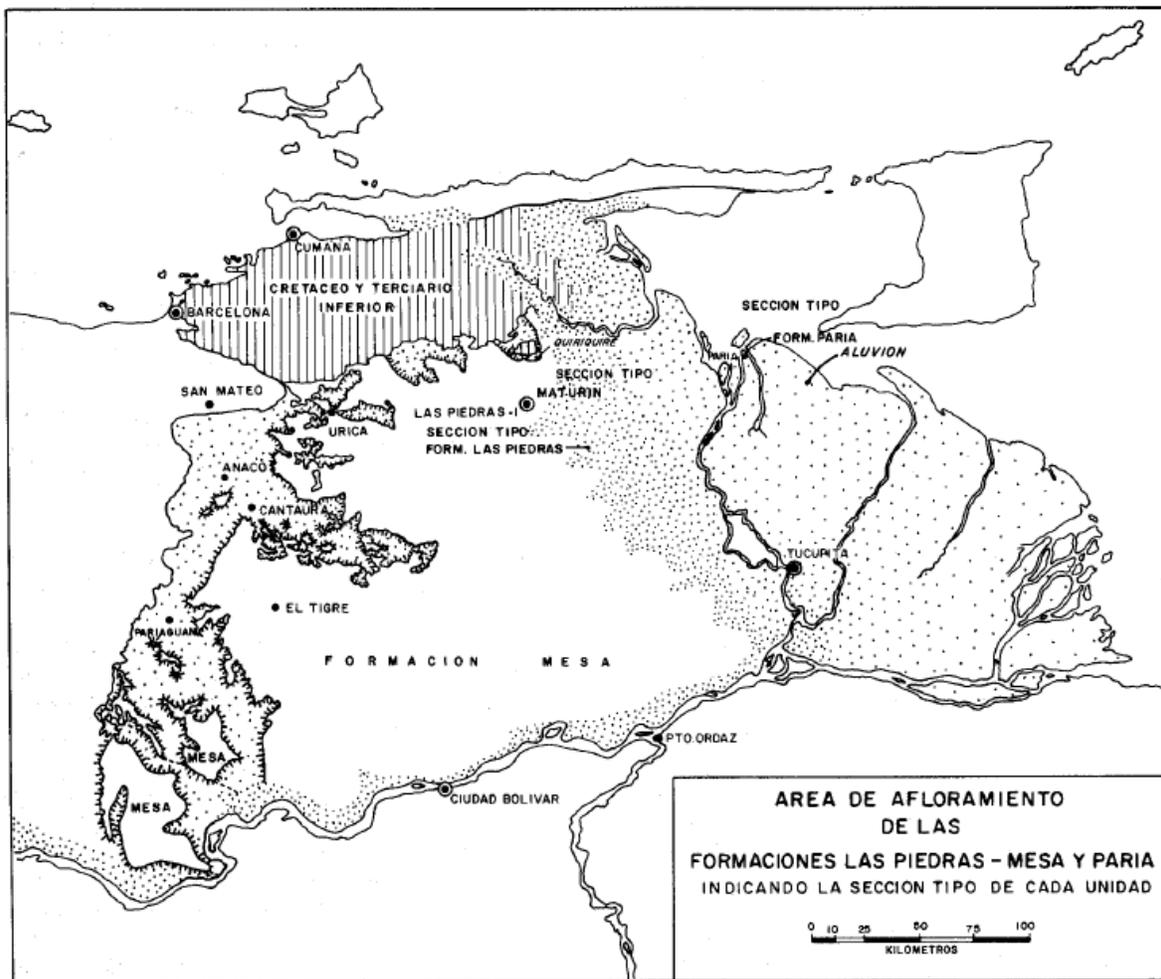


Figura N° 3.6 Áreas de afloramiento de las formaciones Las Piedras, Mesa y Paria.  
Tomado de González de Juana (1.980)

### 3.1.4 GEOLOGIA LOCAL

Debido a la baja topografía de la zona y a la inexistencia de afloramientos, la caracterización geológica se sustentó en base a la información obtenida a partir de los núcleos de limolita del área de estudio y a las planillas de perforación suministradas por la empresa GEOHIDRA CONSULTORES C.A.

La zona en estudio se encuentra ubicada entre las poblaciones de Caicara del Orinoco – estado Bolívar y Cabruta – estado Guárico. Esta se extiende entre las progresivas 14+720 (UTM REGVEN Este 814045,56 y Norte 849566,79) y 3+800 (UTM REGVEN Este 814045,56 y Norte 849566,79).

Se definieron tres tramos, denominados “Acceso norte”, “Eje del río” y “Acceso sur”, y desarrollados en función de la localidad donde fueron realizadas las perforaciones correspondientes al transecto de 12 Km en donde se va a construir el futuro III Puente sobre el río Orinoco.

Es importante destacar que la litología que se describe alrededor de los tres accesos mencionados son pertenecientes a las Formaciones Mesa y Las Piedras.

- **Tramo 1 “Acceso norte”. Perforaciones P-2N’, P-7N, P-9N, P-27N, P-30N, P-35N. Cabruta - estado Guárico. Progresivas 12+410 hasta 14+720.**

Es el tramo más septentrional de la zona de estudio. Inicialmente, las perforaciones **P-2N’** y **P-7N** se componen superficialmente de un manto de arcilla de alta plasticidad, color gris anaranjado. Alcanzando los 2 metros de profundidad; encontramos arenas finas arcillosas, color gris anaranjado. Ambas se encuentran separadas a una distancia de 348 metros.

En la perforación **P-2N’** se empezó a recuperar muestra a partir de los 55 metros de profundidad; tope de la limolita. Por lo tanto se asume la litología suprayacente al manto de roca correlacionando lateralmente con las litologías de los sondeos adyacentes.

A partir de los 5 metros se localiza otro manto de arcilla de baja plasticidad, gris marrón, con un espesor mucho mayor que el anterior. Después a los 10 metros encontramos arenas limpias, cuarcíticas, blanquecinas con grava.

La misma secuencia, a partir de los 25 metros de profundidad tenemos un suelo residual gris verdoso, conformado inicialmente por una arcilla de baja plasticidad, a los 38 metros una arena fina; ligeramente orgánica y a los 46 metros arcillas con grava.

En la perforación **P-2N'** a los 52 metros de profundidad; encontramos un lente de limo arenoso, gris verdoso, la cual está en contacto transicional con las arcillas gravosas mencionadas anteriormente. Ambas de origen residual.

Infrayacente a este estrato, encontramos limolitas arenosas con diversas tonalidades gris verdoso azulado. Las perforaciones en este tramo tienen un máximo de 101 metros; desconociendo su base.

Entre las perforaciones **P-7N** y **P-9N**; a partir de los primeros metros de profundidad (0,00 – 5,00), tenemos un contacto transicional entre arcillas arenosas, rojizas y grises con arenas limosas, marrón amarillento. Ambos sondeos se encuentran separados por una extensión de 140 metros de longitud.

De 5 a 6 metros de profundidad localizamos un estrato de arcilla arenosa, color marrón grisáceo, alcanzando un espesor promedio de 3 metros entre ambas perforaciones. Por debajo a este suelo se tiene un manto de arenas limpias, cuarzosas, con grava, color blanquecino; de grosor 28 metros, mucho mayor que los encontrados en los sondeos anteriores **P-2N'** y **P-7N**.

Infrayacente a este manto de sedimentos aluvionales; específicamente a los 30 metros de profundidad, encontramos un suelo residual que consiste en un gran lente de arcilla de baja plasticidad, arenosa y con material carbonáceo, la cual hace un contacto transicional con las arcillas ubicadas entre los 25 a 38 metros de la perforación **P-9N**.

Debajo de este suelo residual, limolitas arenosas, con diversas tonalidades gris verdoso e intercaladas con limos arcillosos. Las perforaciones en este tramo tienen un máximo de 61 metros.

El suelo aluvional sigue extendiéndose entre las perforaciones **P-9N** y **P-27N** ambas separadas por una distancia de 1244 metros, resaltando en ellas una litología compuestas por limos de baja plasticidad y arenas limpias finas, cuarcíticas, de color marrón claro, amarillento en las arenas y rojizo claro, grisáceo en las arcillas.

En forma de contacto transicional con el sondeo P-27N se tiene unos lentes de arena arcillosa y arcilla limosa. Aquí hay una disminución lateral del manto de arenas limpias cuarcíticas encontrada en las anteriores perforaciones; a casi 5 metros de espesor.

Este material aluvional mencionado anteriormente alcanza una profundidad máxima de 30 metros.

Debajo de este suelo, se encuentra un limo color gris verdoso en contacto transicional con una arcilla de baja plasticidad, arenosa y con trazas de turba, estas litologías corresponden al suelo residual producto de la descomposición de la limolita. En promedio esta capa posee un espesor de 10 metros.

Infrayacente a este suelo residual encontramos a una profundidad promedio de 40 a 55 metros el tope de limolita arenosa, color gris verdoso. La profundidad máxima alcanzada fue de 61 metros y se desconoce la base de este estrato.

Desplazándonos más hacia el sur y en las cercanías del río Orinoco, específicamente entre las perforaciones **P-27N** y **P-30N** tenemos la presencia del suelo aluvional compuesto básicamente por limos de baja plasticidad, arcillosos y arenosos en contacto lateral con lentes de arcillas de alta plasticidad y arenas de grano medio a fino, arcillosas, con grava, prácticamente este comportamiento se mantiene uniforme en los primeros 6 metros de profundidad. Ambas estas separadas a una distancia de 210 metros

Por debajo de este estrato (a partir de los 6 metros de profundidad), se presenta un lente de limo de baja plasticidad, arenoso, de 6 metros de espesor. A continuación se encuentra un manto de 15 metros de arena de grano medio y fino, limpia, cuarcítica y de color marrón claro, la cual es idéntica con la encontrada en la perforación P-27N.

A partir de los 27 metros de profundidad, encontramos una disminución del volumen del lente de arena arcillosa vista en el sondeo P-27N a casi 3 metros. Se observa que el manto de arena limpia con grava, color blanquecino, vista en los sondeos anteriores va disminuyendo su espesor a medida que nos desplazamos hacia el sur, acuniándose estratigráficamente.

En este orden de ideas, por debajo de estos sedimentos aluvionales mencionados, encontramos una capa de limo de baja plasticidad, color gris verdoso, idéntico al encontrado en la perforación P-27N a esa misma profundidad, la cual definimos como el suelo residual

producto de la descomposición de la limolita. En promedio este manto posee un espesor de 15 metros.

A los 45 metros de profundidad, el tope de la limolita arenosa, color verde grisáceo, igual que la encontrada en los sondeos anteriores.

Más hacia el sur, correspondiente a las perforaciones **P-30N** y **P-35N**, encontramos un manto de 5 metros de arcilla de baja plasticidad limosa, predominantemente de color marrón grisáceo y gris rojizo. Entre los 12 y 15 metros de profundidad se localiza un estrato de arena limosa, color marrón claro, seguido por un estrato de 3 metros conformado por areniscas de grano fino, la cual se acuña en sus extremos. El contacto lateral entre ambos sondeos en este intervalo es del tipo transicional.

Encontramos a partir de los 15 metros, un estrato uniformemente compuesto de arena media a fina, limpia, color marrón grisáceo claro; la cual correlaciona con la localizada en la perforación P-30N a esa misma profundidad, manteniendo una continuidad lateral, posee un espesor aproximado de 12 metros. A los 53 metros, una arena limosa, gris verdosa, la cual mantiene un contacto transicional con los suelos residuales del sondeo P-30N.

Infrayacente a estos sedimentos aluvionales, encontramos una capa limo de baja plasticidad, arenoso, con intercalaciones arcillosas, color gris verdoso claro, la cual denotamos como el suelo residual de la perforación P-35N. Posee un espesor de 16 metros en promedio, donde su estrato se mantiene lateralmente constante.

Por debajo del suelo residual, encontramos la misma limolita arenosa, color verde grisáceo, vista en las anteriores perforaciones, la cual su tope está localizado a una profundidad de 69 metros,

Este estrato de limolita arenosa es el correspondiente a la zona en estudio y se puede notar que su tope es fluctuante en comparación a su contraparte hallada en la P-30N (vista a 45 metros de profundidad), esto es debido a la influencia de los diversos procesos erosivos característicos de este tipo ambientes sedimentarios. De aquí en adelante se observa una continuidad litológica más hacia el sur.

- **Tramo 2 “Eje de río”. Perforaciones P-38N, P-39N, P-18NE, P-7NE, P-6NO, P-5NE, P-3NOP, P-2NO, P-1NO’, PC-9AS, P-2SO, P-3SO, P-6C, P-4SO, P-5SO, P-7SC, P-9SE. Eje del río Orinoco, estados Bolívar y Guárico. Progresivas 8+250 hasta 12+410.**

Este tramo del proyecto se sitúa en pleno curso del río Orinoco, es por ello que aquí encontramos una gran complejidad de procesos sedimentarios, influenciados principalmente por las diversas variaciones en los niveles de energía en el aporte de sedimentos. Además se denota la presencia de varios canales de erosión en los topes de las limolitas halladas en este sector; las cuales son consecuencia de los diversos procesos de meteorización.

Siguiendo la secuencia litológica descrita en la perforación P-35N, continuando por los sondeos **P-38N, P-39N y P-18NE**, observamos un comportamiento uniforme y similar en los sedimentos presentes. Este conjunto abarca una longitud total de 807 metros. Aquí se observa una arcilla de baja plasticidad limosa, color marrón grisáceo en sus primeros 5 metros; seguido por un manto de 7 metros de espesor en promedio de arena fina limosa, marrón claro. Seguidamente una capa de arenisca de grano fino, de 5 metros de espesor.

Posteriormente, entre los 15 y 18 metros de profundidad, encontramos un manto de 16 metros de espesor en promedio de arena media a fina limpia, cuarcítica, marrón grisácea. Aquí observamos una continuidad de esta litología desde la perforación P-27N.

En la perforación **P-18NE**, a los 24 metros de profundidad se encuentra un lente de limo de baja plasticidad, arenoso, marrón claro, con un espesor de 18 metros.

Desde la perforación **P-35N** hasta la **P-18NE**, se extiende un manto de arena fina limosa, gris verdoso, cuyos topes oscilan entre los 27 y 42 metros de profundidad; alcanzando un espesor promedio de 27 metros.

Por debajo de la arena fina limosa, el suelo residual derivado de la limolita, que se compone litológicamente de limo de baja plasticidad, arenoso, con intercalaciones arcillosas, color gris verdoso; la cual es el mismo que se viene extendiendo desde la perforación P-35N cuyo tope oscila entre los 53 y 73 metros de profundidad

Todas estas litologías mencionadas anteriormente en este subtramo, se van extendiendo y disminuyendo su espesor lateralmente a medida que avanzamos hacia la perforación **P-18NE**.

Infrayacente a este suelo residual, encontramos la misma limolita arenosa, de color verde grisáceo, la cual, sigue encontrándose unilateralmente a todo lo largo del eje del río manteniendo una variación en cuanto a su profundidad. Sus topes en este sector oscilan entre los 72 y 78 metros de profundidad. Se desconoce la base de este estrato.

Esta limolita arenosa entra en contacto transicional con la limolita carbonácea, la cual está ubicada a los 78 metros de profundidad de la perforación **P-18NE**.

El subtramo conformado por las perforaciones **P-18NE, P-7NE, P-6NO, P-5NE, P-3NOP, P-2NO** y **P-1NO'**, abarcan una distancia total de 2032 metros.

La perforación **P-7NE** inicialmente se compone de un gran estrato de arena de grano fino, cuarcítica, marrón, con un espesor de 44 metros. Este manto de suelo granular se extiende y va disminuyendo su grosor a medida que se acerca a la **P-1NO'**.

Por otro lado, se encuentra en contacto transicional con los sedimentos recientes que componen la perforación **P-18NE** a esa profundidad.

En la perforación **P-1NO'** encontramos superficialmente un lente de arena de grano medio y fino, poco limosa, marrón amarillento, de 4 metros de espesor; seguido por un lente de grava gruesa, marrón grisáceo, con un grosor de 1 metro, la cual se extiende hasta el sondeo **P-2NO**, esto es indicativo de fuertes variaciones de los niveles de energía en el aporte de sedimentos por parte del río Orinoco.

Entre las perforaciones **P-5NE** y la **P-1NO'** en dirección hacia el sur encontramos superficialmente una arena de grano medio y fino, poco limosa, color marrón amarillento, con espesor uniforme de 10 metros; en contacto transicional lateral con la arena limpia, cuarcítica, blanquecina, tope del sondeo **P-6NO**.

Infrayacente al estrato de arena limosa, encontramos una arcilla de alta plasticidad, la cual disminuye su espesor y se acuña a medida que avanza hacia la perforación **P-1NO'**.

Por debajo del manto de arena cuarcítica, marrón, cuyo espesor es de 44 metros y que se extiende por todo este subtramo y con topes variables entre los 36 y 45 metros de profundidad, encontramos el suelo residual derivado de la limolita con espesores comprendidos entre los 3 y 30 metros. Litológicamente es una arcilla limosa, de baja

plasticidad, gris verdoso. Se extiende desde la perforación **P-7NE** en contacto transicional con la arena fina, limosa, gris verdoso de la **P-18NE** a 42 metros de profundidad hasta la **P-3NOP**.

A partir de la perforación **P-3NOP**, el suelo residual entra en contacto transicional con un limo poco plástico, arenoso, gris verdoso y esta a su vez se extiende lateralmente hasta el sondeo **P-1NO'**.

Infrayacente al suelo residual encontramos limolita arenosa, con eventuales lentes arcillosos en la perforación **P-2NO**. Está en contacto transicional con la limolita carbonácea de la **P-7NE** y esta se extiende hasta el sondeo **P-1NO'**, cuyo tope de este manto varía irregularmente de cota con valores desde 57 hasta los 77 metros de profundidad.

Es importante destacar que en este subtramo del área de investigación, la morfología del tope de la limolita presenta variaciones importantes de cota, formándose una especie de “canales”, la cual se presume sea debido a los diversos procesos de meteorización características a este tipo de ambientes sedimentarios.

Se aclara que en las perforaciones **P-2NO**, **P3NOP** y **P-5NE** se empezó a recuperar muestra a partir de los 54, 65 y 28 metros de profundidad respectivamente (tope de la limolita). Por lo tanto se asume la litología suprayacente al manto de roca correlacionando lateralmente con las litologías de las perforaciones adyacentes.

En este orden de ideas, en la perforación **PC-9AS** encontramos superficialmente un manto de 10 metros de espesor de arena media a fina limpia, color marrón, seguido por 7 metros de arena gruesa a media limpia, con grava cuarcítica, gris claro. Se encuentra separado a 395,95 metros del sondeo **P-1NO'** y ambas mantienen un contacto transicional en sus litologías respectivamente.

Estos estratos de suelo granular se extiende también hasta la perforación **P-3SO**, conservando una uniformidad en sus espesores.

Por debajo de estos mantos de arenas mencionados anteriormente, se localizan una serie de lentes de sedimentos de litología variable; las cuales se asume son consecuencia de las variaciones en los niveles de energía en el aporte de sedimentos por parte del río Orinoco. Se encuentran a partir de los 17 metros de profundidad.

Litológicamente el primer lente consiste en 2 metros de arena fina a media, arcillosa; seguido por 4 metros de arena fina a media, limosa y 5 metros de arcillas de baja

plasticidad; todas de diversas tonalidades grises. La base de esta capa es el contacto con el tope de suelo residual.

Justo por debajo del estrato de suelo aluvional y a los 27 metros de profundidad encontramos el manto residual, la cual consiste también en lentes de diversa litología, empezando por 5 metros de arcilla de alta plasticidad, con arena fina y material carbonáceo; seguido por otros 5 metros de limo de baja plasticidad, arcilloso, con arena fina y continuado por 2 metros arena fina arcillosa; todas presentan diversas tonalidades gris verdoso.

A los 39 metros de profundidad, encontramos 3 metros de arcilla de baja plasticidad, gris azulado con vetas amarillentas; seguido por 10 metros de limo de baja plasticidad, arcilloso, con arena fina, marrón verdoso; 2 metros de arena fina, con presencia de material carbonáceo, color grisáceo y finalizando con 1 metro de arcilla de alta plasticidad, arenosa, también gris verdoso.

Este estrato de suelo residual alcanza una profundidad de 55 metros.

Infrayacente a esta manto de suelo residual, encontramos una capa de 5 metros de limolita blanda arcillosa, con intercalaciones de arena. Seguido por 1 metro de un lente de arenisca de grano fino, limosa, y por 13 metros de limolita arenosa, presentando diversas tonalidades marrón claro verdoso.

A partir de los 74 metros hallamos 2 metros de limolita arenosa con grava, un lente de arenisca de grano grueso con grava media, parcialmente litificado; con un espesor de 1 metro. A los 77 metros hasta los 107 metros de profundidad encontramos una limolita arenosa blanda. Todas estas litologías mencionadas anteriormente son de color gris con tonalidades verdosas.

La perforación **P-3SO** está a 160 metros del sondeo **PC-9AS**. Se compone litológicamente por suelos aluvionales; empezando por 21 metros de arena fina a media, cuarcítica, limpia, marrón claro; seguido por un lente de 3 metros de arcilla de baja plasticidad, color gris y finalizado por otro lente de 3 metros de espesor de arena media a gruesa, blanquecino, llegando a una cota de 27 metros de profundidad.

Debajo de los sedimentos aluvionales, justo a partir de los 40 metros de profundidad; encontramos el manto de suelo residual, la cual se compone de 13 metros arcilla de alta

plasticidad, limosa, color gris verdoso y finalizado por 35 metros de arena fina, limosa, marrón claro.

Estos mantos se encuentran en contacto transicional con los suelos residuales de la perforación **PC-9AS**.

Llegando a los 75 metros de profundidad e infrayacente al manto de suelo residual, encontramos una limolita, gris verdoso, con intercalaciones arcillosas. Se desconoce la base de este estrato de roca ya que solamente esta perforación llegó hasta los 76,18 metros.

Los sondeos **P-3SO** y **P-2SO** están separados por una distancia de 144 metros.

La perforación **P-2SO** se empezó a recuperar muestra a partir de los 55 metros de profundidad, tope de la limolita, por lo tanto se asume la litología suprayacente al manto de roca correlacionando lateralmente con las litologías de las perforaciones adyacentes.

El sondeo **P-2SO** se compone de un manto de 25 metros de arena de grano mediano a fino, poco limosa, con grava, marrón claro, la cual está en contacto transicional con la arena limpia cuarcítica y los lentes de arcilla de baja plasticidad y arena blanquecina presentes en la perforación **P-3SO** a ese intervalo de profundidad.

Por debajo de estas capas de material granular, encontramos un estrato de arcilla de alta plasticidad, limosa, gris verdosa claro, de un espesor estimado de 7 metros, la cual se extiende desde la perforación **P-6C** hasta la **P-3SO**; conservando sus dimensiones en profundidad.

Es importante destacar que por debajo de este manto de arcilla, encontramos 2 metros de limo de alta plasticidad, marrón grisáceo.

A partir de los 35 metros de profundidad el suelo residual derivado de la limolita la cual consiste en 5 metros de arcilla limosa, con arena; 4 metros de arena fina limosa; 9 metros de arcilla de baja plasticidad arenosa, con intercalaciones de limo y un delgado manto de arena fina, ligeramente arcillosa, de 1 metro de espesor. Este manto se encuentra en contacto transicional de forma lateral con los suelos residuales de la perforación **P-3SO**.

Infrayacente a este suelo residual, a los 55 metros; encontramos limolita arenosa, color gris verdoso. Se observan variaciones en el tope de esta roca en comparación a las perforaciones adyacentes; asumiendo que estas mismas son consecuencia de los diversos procesos erosivos característicos de esta zona. Se desconoce el espesor de este ya que la máxima profundidad de este sondeo fue de 101 metros.

Desde la perforación **P-2SO** y a 207 metros hacia el sur, encontramos el sondeo exploratorio **P-6C**. Litológicamente se caracteriza por un manto de 19 metros de arena de grano medio a fino, poco limosa, con grava, marrón claro, la cual viene reduciendo su espesor desde la **P-2SO**.

Se mantiene un contacto transicional con los sedimentos de la perforación **P-4SO** a esta misma profundidad.

A partir de los 19 metros encontramos una arcilla de alta plasticidad, limosa, gris verdosa claro, de un espesor de 7 metros, la cual tiene una continuidad lateral hasta la perforación **P-3SO**.

A los 26 metros de profundidad, encontramos una serie de lentes de diversa litología, empezando por 4 metros de arena limosa, cuarcítica, blanquecina; seguido por 3 metros de arcilla de alta plasticidad, limosa y por 2 metros de limo de alta plasticidad, ambos con tonalidades marrón grisáceo.

Todas estas litologías mencionadas en la perforación **P-6C**, mantienen un contacto transicional con los sedimentos presentes en el sondeo **P-4SO**.

A partir de los 35 metros de profundidad, se encuentra el suelo residual, la cual conserva el mismo espesor y litología descrita en la perforación **P-2SO** a este intervalo de profundidad.

El suelo residual a diferencia del hallado en la perforación **P-2SO**, poseen un mayor espesor y se compone de 10 metros de arena fina, ligeramente arcillosa; seguido por 2 metros de arena limpia; 2 metros de arcilla arenosa y 7 metros de arena limosa, estos tres últimos parcialmente litificados y con diversas tonalidades verde grisáceo, marrón y gris verdoso claro.

Infrayacente al manto de suelo residual, encontramos a 74 metros de profundidad la misma limolita arenosa color gris verdoso que viene extendiéndose desde las anteriores perforaciones.

Como se ha mencionado en anteriores oportunidades, se desconoce el espesor total de la limolita arenosa debido a que la perforación **P-6C** alcanzó una máxima profundidad de 76 metros.

La perforación **P-4SO** se encuentra a 33 metros de la **P-6C**, se observa un contacto transicional entre ambos mantos de sedimentos aluvionales y residuales.

No obstante se observa una uniformidad en espesor y en litología entre los sondeos **P-4SO** y **P-5SO**, ambas separadas por 119 metros. Superficialmente la perforación P-4SO posee 1 metro de arena limosa media a fina, marrón claro.

En la perforación **P-5SO** solo se empezó a recuperar muestra a partir de los 63 metros de profundidad, cota de la limolita. Por lo tanto se asume la litología suprayacente al manto de roca correlacionando lateralmente con las litologías de los sondeos adyacentes.

Entre las perforaciones P-4SO y P-5SO se observa una litología uniforme la cual se compone por 12 metros de arena media a fina, limpia, cuarcítica; seguido por 2 metros de arena muy limosa; 3 metros de arena fina, con presencia de material carbonáceo; 1 metro de arcilla de baja plasticidad, arenosa, gris claro y 5 metros arcilla de alta plasticidad, color gris, con arena.

A los 23 metros de profundidad se encuentra un manto de arena arcillosa de 1 metro de espesor; seguido por 3 metros de arena de grano fino a medio, limpia, cuarcítica; 4 metros de arcilla de alta plasticidad; 9 metros de arcilla de baja plasticidad, con intercalaciones de turba y arena. Estos suelos aluvionales presentan diversas tonalidades gris verdoso a claro.

El suelo residual se encuentra a partir de los 40 metros de profundidad y se compone de un limo de baja plasticidad, muy arenoso, con intercalaciones de arcilla, con un espesor de 10 metros; se observa la continuidad de esta capa hasta la perforación P-6C. Luego es seguido por un lente de 3 metros de arcilla limosa de baja plasticidad, arenosa y por 1 metro de arena fina arcillosa, con presencia de materia orgánica. Se distinguen tonalidades de marrón oscuro a gris verdoso.

El tope de la limolita arenosa oscila entre los 57 y 63 metros de profundidad, en la perforación P-5SO encontramos a los 75 metros de profundidad un lente de 3 metros de arena muy limosa, color verde.

Se desconoce el espesor del manto de limolita debido a que la profundidad máxima de perforación en la **P-4SO** fue de 74 metros y en el sondeo **P-5SO** fue de 90 metros.

En sentido sur, encontramos a 225 metros de distancia la perforación **P-7SC**. Aquí la toma es muestra a partir de los 55 metros de profundidad; en donde está el tope de la limolita arenosa, por lo cual, se desconoce la litología superior a este manto de roca.

Es por ello que basándose en el principio de la sucesión de estratos y comparando la litología presente en la perforación **P-9SE**, la cual está a 261 metros de separación al

sondeo **P-7SC**; asumimos que se compone de 10 metros de arena de grano fino, poco limoso; seguido por 6 metros de arenisca conglomerática. Se observan diversas tonalidades marrón claro.

A los 27 metros de profundidad localizamos el manto de suelo residual, la cual se compone de 32 metros de limo arcilloso, color gris verdoso.

La litología de este sondeo está en contacto transicional con la perforación P-5SO a esta profundidad.

Infrayacente al suelo residual, nos topamos con la limolita arenosa, gris verdoso, presentando a los 62 metros pequeñas intercalaciones de arcilla. Se observan variaciones en los topes presente entre este intervalo, con valores que van desde los 45 metros en la perforación P-9SE hasta 55 metros en la P-7SC. Se desconoce la base de este estrato, el sondeo P-7SC alcanzó una profundidad máxima de 111 metros y la P-9SE llegó apenas a 66 metros.

- **Tramo 3 “Acceso sur”. Perforaciones P-14SO, P-15SE, P-49S, P-37S, P-21S, P-12S, P-8S, P-3S, P-2S’, P-1S. Caicara del Orinoco, estado Bolívar. Progresivas 3+800 hasta 8+250.**

Es el sector más meridional del área de estudio localizado hacia Caicara del Orinoco y definido por la perforación **P-14SO**, compuesta básicamente de una delgada capa de arcilla limosa, arenosa de 1 m de espesor; seguida de un limo arenoso de 4 metros de espesor que va desapareciendo lateralmente debido a los procesos de meteorización existentes. Ambas presentan tonalidades de color marrón claro. Se encuentra a 592 metros del sondeo P-9SE.

Debajo de esta capa y extendiéndose desde la perforación P-9SE en dirección sur, a los 5 m aparece una arena limosa de 10 m de grosor, esta arena se extiende lateralmente, variando únicamente en espesor a medida que nos desplazamos al sur. A los 15 m aparece una secuencia de lentes las cuales comienza con una arcilla limosa de 3 m de espesor; seguido a por 8 metros de arena media a fina, limpia y finaliza con 1 metro de arenisca conglomerática. Se observa tonalidades de marrón claro.

Por debajo de este estrato de arenisca, encontramos 8 metros de arcilla de baja plasticidad, arenosa, color gris verdoso. Se presume que esta litología antes descrita sea el suelo residual.

Infrayacente al suelo residual, a los 35 m se tiene la limolita arenosa, con intercalaciones de roca desintegrada a arcilla limosa, de baja a media plasticidad; a los 51 metros de profundidad se observan intercalaciones de material carbonáceo en aproximadamente 1 m de espesor.

A los 52 metros de profundidad continua la limolita arenosa; manteniéndose constante esta litología hasta los 60 metros; desconociéndose su base.

El subtramo correspondiente a las perforaciones **P-15SE** y **P-49S** separados ambos por una distancia de 876 m, encontramos una litología compuesta básicamente en sus primeros metros de un limo arcilloso, marrón claro. Está en contacto lateral con una arcilla de baja plasticidad, rojo grisáceo del sondeo **P-49S** seguido por una arena de grano fino, poco limosa; la cual viene extendiéndose lateralmente desde P-7SC con espesor de 17 m.

Este gran manto de arena mencionado anteriormente, está en contacto transicional con la litología presente en la perforación **P-49S**, la cual se compone de 2 metros de arena, limosa seguido por otros 2 metros arcilla limosa, arenosa; ambas de color marrón amarillento, y finalizando por 20 metros de arena fina a media, cuarcítica, limosa, gris verdoso.

A los 21 m aparece un lente de limo de baja plasticidad, con arena, color gris verdoso; la cual se presume sea el suelo residual. Se observa un espesor de 14 metros. Este mantiene un contacto lateral con 8 metros de limo de alta plasticidad gris verdoso perteneciente a la perforación **P-49S**.

Infrayacente al lente descrito, a los 35 m encontramos el tope de la roca en estudio conformada por una limolita arcillosa, con intercalaciones de material residual limo-arcilloso, gris verdoso, manteniendo su espesor por unos 20 m hasta encontrar un lente de limolita con presencia de material carbonáceo de 5 metros de grosor.

Esta roca mantiene un contacto transicional con la limolita arenosa presente en la perforación **P-49S**.

Se desconoce su espesor debido a que la máxima profundidad registrada en ambas perforaciones fue de 60 metros.

Ya encontrándose más hacia la zona sur del transecto del puente tenemos las perforaciones **P-37S** y **P-21S** separadas ambas por una relevante distancia de 1120 metros de longitud, la cual encontramos litologías igualmente características que el resto de las sondeos ya definidos como suelos aluvionales en sus primeros metros.

En este tramo a los primeros 5 m tenemos una arcilla de alta plasticidad, amarillenta, la cual define la topografía de superficie conjuntamente con una arcilla de baja plasticidad, arenosa, con restos de materia orgánica, color gris amarillento. El tope del terreno en este segmento se ve modelado por los agentes erosivos actuantes en la zona.

Por debajo de los 5 m se tienen un lente arena fina a media, cuarcítica, limosa, con un espesor de 15 metros. Seguidamente encontramos otro lente de 15 metros de arena fina, ligeramente arcillosa, gris; 5 metros de arcilla de baja plasticidad, arenosa. Estos sedimentos los encontramos transicionalmente con los suelos aluvionales de la perforación **P-21S**. Se observa diversas tonalidades grises.

Por otra parte, en el sondeo **P-21S** se desconoce la litología presente en los 8 primeros metros de profundidad. Comparando la litología presente en las perforaciones adyacentes a esa misma cota se asume que se compone de 4 metros de arena fina, arcillosa, marrón claro, seguida de 4 metros de arena de grano grueso, limosa, blanquecina.

Después de estos suelos granulares mencionados anteriormente, a los 8 metros de profundidad, existe una alternancia de lentes comenzando por 7 metros de arcilla de baja plasticidad, con presencia de bolsones de arena; seguida por 23 metros de arena fina a media, arcillosa y 12 metros de arcilla de baja plasticidad, con bolsones de arena. Todas presentan restos de materia orgánica y diversas tonalidades marrón rojizo. Este material aluvional culmina a los 52 metros con 2 metros de arena muy limosa, gris verdosa.

A partir de los 40 metros de profundidad en la perforación **P-37S** observamos el suelo residual la cual consiste litológicamente de arcilla de baja plasticidad, arenosa, color rojizo. Por otra parte el sondeo **P-21S** lo encontramos a una cota 52 metros, compuesto por un lente de 21 metros de espesor de limo de baja plasticidad, con bolsones de arena, marrón verdoso.

Ambas perforaciones mantienen contacto transicionales entre sus sedimentos.

El estrato de roca de limolita se sigue encontrando en ambas perforaciones entre los 45 y 73 metros donde se ve claramente la Formación de antiguos canales seguramente

originados por las condiciones fluctuantes del propio río Orinoco. La base de este estrato en este sector se desconoce. Se alcanzó las profundidades máximas de 60 y 74 metros en ambos sondeos respectivamente.

Finalmente, el transecto conformado por los sondeos **P-12S, P-8S, P-3S, P-2S'** y **P-1S**, observamos una uniformidad en sus estratos.

Las perforaciones **P-2S, P-8S** y **P-12S** poseen recuperación a partir de los 35 metros; razón por la cual asumimos su litología en base a las mostradas en los sondeos adyacentes a esa misma cota.

Litológicamente se compone de un manto de 4 a 5 metros de espesor de arena fina, arcillosa, marrón claro; seguido por 6 metros de arena gruesa a fina, cuarcítica, muy limosa, orgánica y una grava arcillosa de 1 metro, rojo blanquecino.

Por debajo de estos suelos granulares encontramos a partir de los 10 – 11 metros de profundidad arcillas de baja plasticidad, arenosas, con diversas tonalidades marrón claro, rojizo y gris verdoso.

Es importante destacar que en comparación a las demás tramos del proyecto; el suelo residual posee un espesor reducido y aproximado de 5 metros. Se compone de un limo arcilloso-arenoso, color gris verdoso claro. Posee una cota estimada de 35 – 45 metros de profundidad.

Infrayacente al suelo residual encontramos a partir de los 35 – 40 metros de profundidad la limolita arenosa típica de esta área y con diversas tonalidades marrón claro, amarillento y gris verdoso.

En la perforación P-8S, se encuentra una limolita con trazas carbonáceas.

Se desconoce la base de este estrato de limolita, ya que la máxima cota de perforación en este subtramo alcanzó los 82 metros de profundidad.

## **CAPÍTULO IV**

### **ASPECTOS GEOLÓGICOS – GEOMECÁNICOS**

#### **4.1 GENERALIDADES**

En este capítulo enmarcado dentro del estudio geológico-geotécnico de los núcleos de limolita, se hizo énfasis en la caracterización mineralógica (difracción de rayos X) de las muestras pertenecientes a la zona de estudio con la finalidad de obtener datos o indicios que nos ayuden a entender el comportamiento geomecánico de las rocas presentes.

Aunado a ello, debido al tamaño de los granos presente en la limolita se hace muy complejo identificar los componentes mineralógicos mediante un estudio petrográfico; razón por la cual se acude a la técnica de difracción de rayos X (DRX) para un análisis en “muestra total” con el fin de identificar los componentes presentes.

El comportamiento geomecánico de las rocas y composición mineralógica están controlados por sus características físicas y mecánicas, que son el resultado de los diversos procesos tectónicos y geológicos que ha sufrido la roca desde su Formación hasta el momento en que es intervenida; Esto nos ayudara a generar un modelo y estados de esfuerzos a los que la roca está sometido en su medio natural.

##### **4.1.1 NATURALEZA DE LOS RAYOS X**

Los rayos X son radiaciones electromagnéticas de alta frecuencia y de muy corta longitud de onda, 10 nm hasta 0,0001 nm (1 nm o nanómetro equivale a  $10^{-9}$  m). Estos rayos se generan cuando un haz de electrones de alta energía o velocidad incide sobre la materia (Grande 1996)

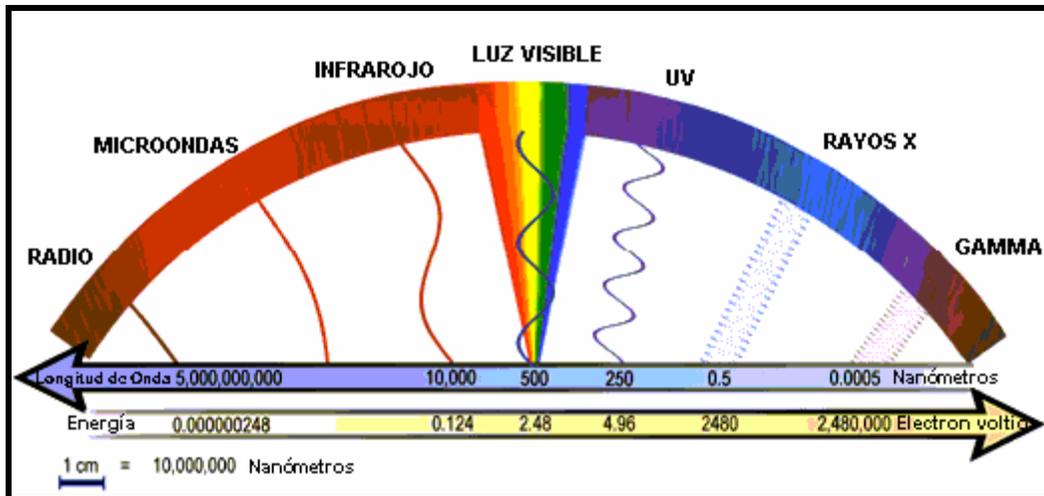


Figura N° 4.1 El espectro electromagnético, mostrando los distintos tipos de radiación y longitudes de onda. (Tomado y modificado de BARITTO 2003)

Los rayos X que más interesan en el campo de la difracción de rayos X son aquellos que disponen de una longitud de onda próxima a 1 Angstrom y corresponden a una frecuencia de aproximadamente 3 millones de Thz (tera-herzios) y a una energía de 12,4 keV (kilo-electrón-voltios) (Poppe et al. 2001) (Figura N° 4.1)

La aplicación fundamental de la difracción de rayos X es la identificación de la composición mineralógica de una muestra cristalina. La difracción está basada en las interferencias ópticas que se producen cuando una radiación monocromática atraviesa una rendija de espesor comparable a la longitud de onda de la radiación X (Figura N° 4.2) (Poppe et al. 2001)

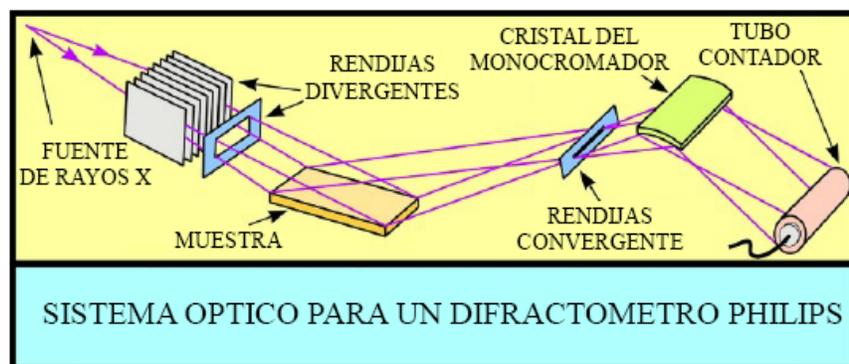


Figura N° 4.2 Esquema del sistema óptico de un difractómetro de rayos X Philips (Tomado y modificado de: POPPE et al. 2001)

## 4.1.2 INFLUENCIA DE LA MINERALOGÍA EN LAS PROPIEDADES GEOTÉCNICAS

### 4.1.2.1 Minerales de Arcilla

Los minerales de arcilla son silicatos hidratados de aluminio y se forman por meteorización o alteración hidrotermal de silicatos ricos en aluminio.

Se clasifican dentro del grupo de los filosilicatos, caracterizados por su estructura en capas. Existe una amplia gama de familias de minerales con propiedades físicas y químicas muy diversas, aunque la mayoría tienen en común hábitos con morfologías aplanadas y exfoliación perfecta entre láminas, como consecuencia de su estructura en capas.

El tamaño de los cristales es muy pequeño, inferior a  $2\mu\text{m}$ ; son minerales más abundantes en la superficie de la tierra, formando parte de los suelos y de las rocas sedimentarias de grano fino.

La estructura de estos minerales está constituida por dos tipos de capas unidas entre sí por oxígenos comunes, una formada por tetraedros que se enlazan con los tres oxígenos de los vértices basales, que tiene un espesor de  $3\text{Å}$ , y otra formada por octaedros unidos entre sí por aristas comunes, cuyo espesor es de  $4\text{Å}$ . El centro de los tetraedros está ocupado por  $\text{Si}^{4+}$  sustituidos fuertemente por  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Fe}^{2+}$ , a veces por  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Li}^{+}$  ocupa dos tercios de las posiciones octaédricas, mientras que el  $\text{Mg}^{2+}$  ocupa la totalidad, diferenciándose minerales dioctaédricos si contienen aluminio o trioctaédricos si contienen magnesio.

Los minerales de arcilla son susceptibles a diferentes factores que pueden controlar sus propiedades químicas, físicas y geomecánicas. Dependiendo del grado de influencia de estos factores, las propiedades y en general, el comportamiento de la arcilla, puede variar entre localidades lo que obliga a un estudio detallado de cada suelo y de los minerales que lo conforman.

Según Grim (1962), los principales factores que controlan las propiedades de los minerales de arcilla se pueden clasificar de la siguiente forma:

#### **4.2.2.2 Composición de la Fracción Arcillosa**

Referido a la identidad y la abundancia relativa de todos los minerales de arcilla presentes. Está demostrado que pequeñas cantidades de ciertos minerales de arcilla constituyentes pueden tener una gran influencia en las propiedades físicas. Igualmente, la perfección de la cristalinidad es importante. Así, dos arcillas compuestas mayormente por caolinita tendrán diferentes propiedades si la caolinita en una de ellas está bien organizada y en la otra esta pobremente ordenada.

#### **4.2.2.3 Composición de la Fracción no Arcillosa**

Referido a la identidad de los minerales no arcillosos, sus formas y abundancia relativa, y la distribución del tamaño de las partículas de las especies individuales. En general, los minerales no arcillosos deben estar presentes en más cantidades mayores a trazas antes que puedan influenciar las propiedades de las arcillas. Aunque esto no siempre es verdad, las trazas de componentes pueden influenciar significativamente las propiedades de las arcillas que se desarrollan a elevadas temperaturas. Las trazas de elementos y minerales presentes en muy pequeñas cantidades pueden tener gran importancia geológica en asuntos como correlación, determinación de condiciones de depositación y localización de la fuente de sedimentos.

#### **4.2.2.4 Material Orgánico**

Este factor está referido al tipo y cantidad de material orgánico contenido en el sedimento arcilloso. En general, el material orgánico ocurre en dos formas: puede estar presente como partículas discretas de madera, esporas, hojas, material leñoso, etc. O puede estar como moléculas orgánicas absorbidas en la superficie de las partículas de minerales de arcilla. En montmorillonitas, las propiedades de absorción de agua son disminuidas cuando hay presencia de iones orgánicos. En general, mientras más grande el ion orgánico, mayor es la reducción en la capacidad de absorber agua.

#### **4.2.2.5 Iones Intercambiables y Sales Solubles**

Algunos sedimentos arcillosos contienen sales solubles en agua las cuales pueden haber entrado a la arcilla en el momento de la acumulación o pueden haberse desarrollado como una consecuencia del movimiento del agua freática y el clima, o los procesos de alteración. Minerales de arcilla y algunos materiales orgánicos encontrados en arcillas pueden absorber

cationes y aniones los cuales pueden intercambiarse por otros iones por simple intercambio en el medio acuoso.

Las propiedades físicas de los minerales de arcilla dependen de la naturaleza de los iones intercambiados transportados por los componentes de la arcilla. Una arcilla sódica tiene diferentes propiedades plásticas que una cálcica. Esta diferencia puede ser grande o pequeña dependiendo de la capacidad de intercambio de cationes de los constituyentes de la arcilla. También la abundancia relativa de los iones absorbidos presentes en cualquier arcilla particular es importante en la determinación de sus propiedades.

#### **4.2.2.6 Textura**

El factor textural está referido a la distribución de los tamaños, la forma y la orientación de las partículas constituyentes con respecto a las otras y las fuerzas que tienden a unir las entre sí. El tamaño de los minerales de arcilla es importante para determinar propiedades pero solo las relacionadas a la facilidad de corte y dispersión de los minerales de arcilla. Así, el análisis del tamaño de partícula de un mineral de arcilla es mayormente usado solo como una medida del grado de disgregación o dispersión del mismo. En algunos materiales arcillosos, existe una orientación general preferencial de las partículas de mineral de arcilla como por ejemplo en muchas lutitas, en las cuales sus superficies de los planos basales tienen orientación paralela.

### **4.1.3 CLASIFICACIÓN DE LAS ARCILLAS**

Los minerales de arcilla se diferencian en varios tipos en función del número de capas fundamentales de su estructura, distinguiéndose a su vez varias especies en algunos grupos de acuerdo con el grado de ordenamiento y tipo de las sustituciones isomórficas.

#### **Tipo 1.1**

- **Grupo de la Caolínita.** Tienen una composición  $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$ , con una capa tetraédrica ocupada por  $Si^{4+}$  y una octaédrica ocupada por  $Al^{3+}$  con un espesor de  $7\text{\AA}$ ; se trata por lo tanto de minerales dioctaédricos que apenas presentan sustituciones isomórficas, aunque se diferencian varias especies en función del grado de desorden en el apilamiento de las capas (Figura N° 4.3 y Figura N° 4.4)

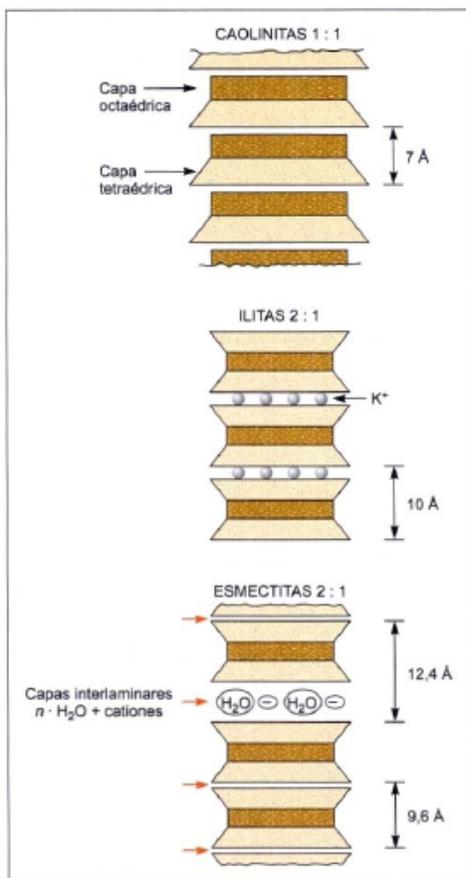


Figura N° 4.3 Estructura de las caolinitas, illitas y esmeclita. Tomado de: González de Vallejo (2000)

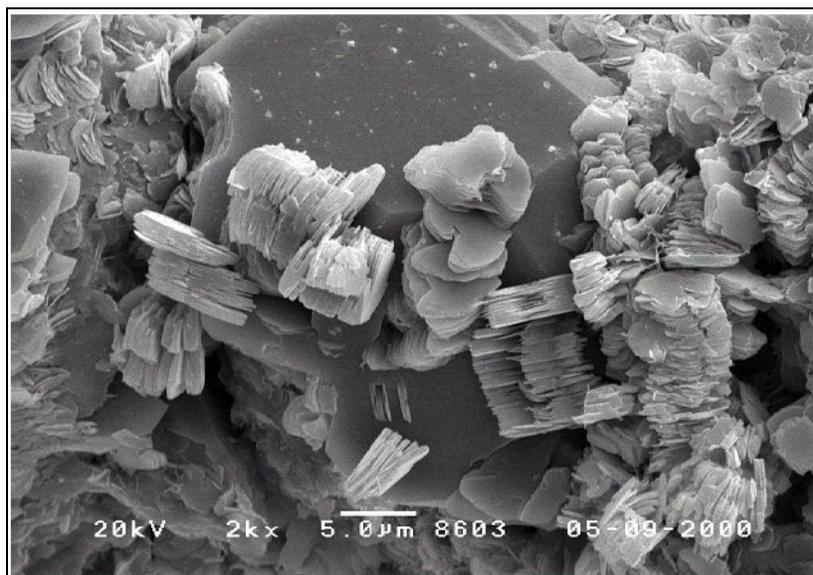


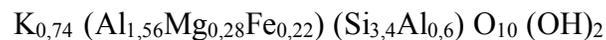
Figura N° 4.4 Microscopia electrónica de placas de caolinita autigénica cubriendo un grano de cuarzo sobrecrecido con cuarzo autigénicos. Imagen SEM de una muestra de núcleo. Escala: Tamaño de la foto 50 μ-m. Copyright © OMNI Laboratories, Inc

La **caolinita** cuando está bien ordenada aparece formando columnas pseudo hexagonales. La **haloysita** pertenece a este grupo; muestra un alto grado de desorden, encontrándose una variedad a 7Å y otra a 10Å. Esta última incorpora una capa de agua de 2.9Å entre dos capas tetraédricas-octaédricas de 7Å. La capa de agua se pierde irreversiblemente a 60°, reduciéndose el espaciado a 7Å. La haloysita presenta frecuentemente morfologías tubulares, y en otros casos formas irregulares o globulares.

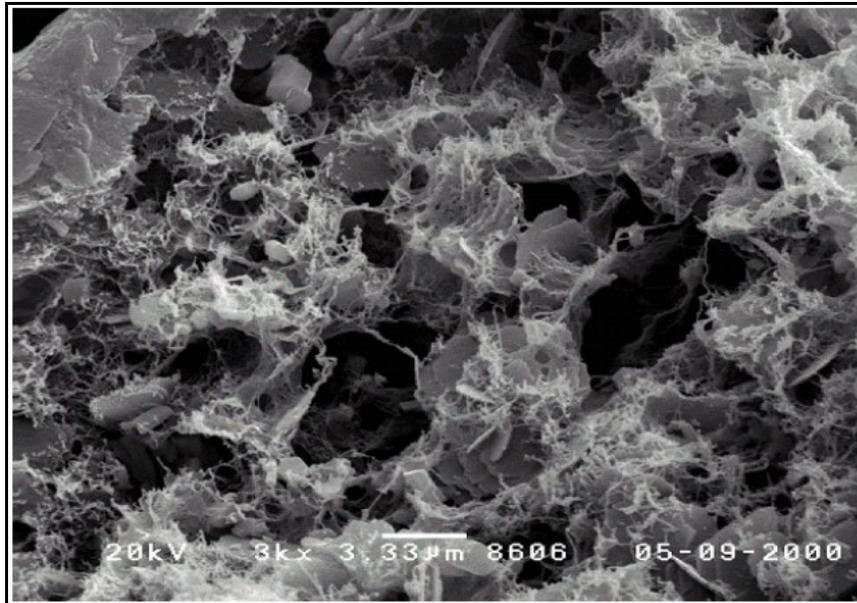
### Tipo 2.1

Tienen una estructura formada por dos capas tetraédricas y una capa octaédrica intercalada, formando un << *sándwich* >> con un espaciado basal de 9.5Å.

- **Grupo de la Illita.** Tienen un espaciado basal de 10Å (Figura N° 4.3 y Figura N° 4.5) con una carga laminar comprendida entre 0,9-0,7, mostrando muchas similitudes con las micas, especialmente con la moscovita. La composición es muy variada, hasta el punto de ponerse en duda su existencia como mineral en rocas sedimentarias, hablándose de minerales ilíticos. Sin embargo, se mantiene el nombre por sus implicaciones en los interestratificados con las esmécticas. Una fórmula media simplificada tendría la siguiente composición:



Las partículas detríticas tienen morfologías densas planares, aunque se han descrito illitas fibrosas de origen diagenético en areniscas.



**Figura N° 4.5** Microscopia electrónica del mineral de illita recubriendo espacios de poro en una arenisca. Imagen SEM de una muestra de núcleo. Escala: tamaño de la foto 33 µ-m.  
Copyright © OMNI Laboratories, Inc

- **Grupo de la Esmectita**  $(0,5Ca,Na)0,7(Al,Mg,Fe)_4[(Si,Al)_8O_{20}](OH)_4nH_2O$

Por mucho tiempo considerada el más interesante de los minerales de arcilla, y ahora curiosamente es el centro de investigación en atención a la transición esmectita a illita. Esmectita es realmente el nombre de un grupo de minerales, dioctaédricos y trioctaédricos, todos ellos con la propiedad de expandir o contraer su estructura manteniendo sus propiedades cristalográficas intactas. La expansión tiene lugar con moléculas de agua o algún compuesto orgánico, tal como ethylen glycol. (MOORE & REYNOLDS 1989).

- **Grupo de la Clorita**  $(Mg,Al,Fe)_{12}[(Si,Al)_8 O_{20}](OH)_{16}$

Los minerales del grupo de la clorita son constituyentes comunes de sedimentos arcillosos, en cuales ocurre como mineral detrítico y antigénico. Muchas veces se presenta interestratificada con otros minerales como la vermiculita (DEER *et al.* 1970). La clorita puede formarse como subproducto de la transformación de esmectita en illita (ORTEGA *et al.* 1991).

- **Grupo de las Micas**

Las micas, formadas por “sándwiches” *t-o-t* con cationes entre las capas y escasa o nula agua intercambiable, cristalizan en el sistema monoclinico, pero con un ángulo  $\beta$ , próximo a  $90^\circ$ , por lo que la simetría monoclinica no es claramente visible. Los cristales son generalmente tabulares con planos basales bien desarrollados y tienen forma de rombo o hexagonal, con ángulos de unos  $60^\circ$  y  $120^\circ$ . Los cristales, lo tanto parecen en general ortorrómbicos o hexagonales. Los minerales del grupo de las micas son constituyentes comunes de sedimentos arcillosos.

**Moscovita -  $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$**

**Cristalografía.** Monoclinico;  $2/m$ . Los buenos cristales son relativamente raros. Aparece en cristales tabulares con base dominante,  $\{001\}$ . La presencia de caras del prisma  $\{110\}$  con ángulos de cerca de  $60^\circ$  confiere a algunos cristales una forma de rombo, pareciendo así de simetría ortorrómbica.

**Propiedades Físicas.** Exfoliación extremadamente perfecta según la base  $\{001\}$ , lo que permite extraer del mineral hojas muy delgadas. Hojas flexibles y elásticas. **H**  $2-2\frac{1}{2}$ . **G** 2,76-2,88. Brillo de vítreo a sedoso o perlado. Transparente e incoloro en las hojas delgadas.

**Composición y Estructura.** Esencialmente  $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ . La solución sólida entre el grupo de las micas octaédricas o entre los miembros de los grupos dioctaédrico y trioctaédrico es escasa. La estructura de la moscovita consta de  $t$  hojas de composición  $(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_3$  enlazadas con hojas octaédricas del tipo gibbsita formando “sándwiches” *t-o-t*. Aunque la estructura de la moscovita muestra varias formas polimórficas según las distintas formas de apilamiento en que suceden las láminas de  $\text{Si}_2\text{O}_5$ , el polimorfo más comúnmente observado es  $2M_1$  con grupo espacial  $C2/c$ .

**Yacimiento.** La moscovita es un mineral petrográfico muy común y extendido. Es característico de los granitos y pegmatitas graníticas.

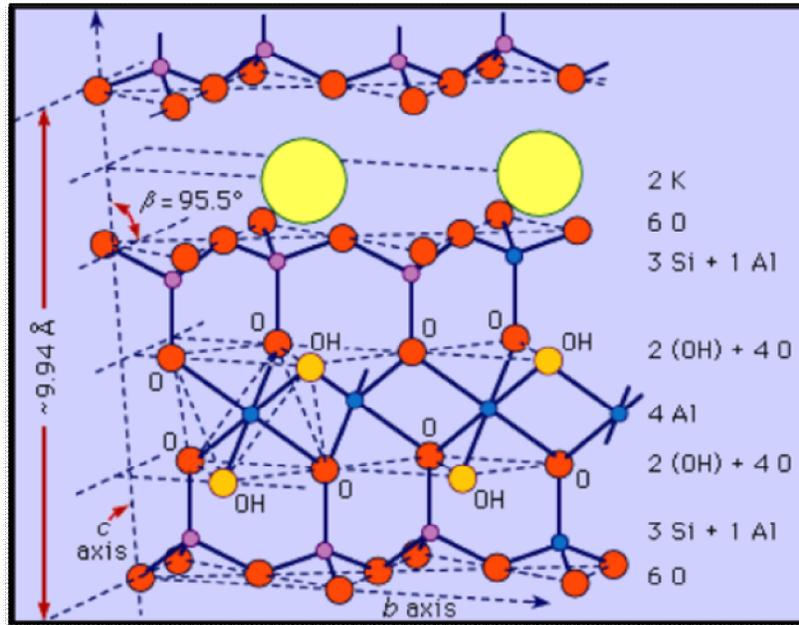


Figura N° 4.6 Forma en que se encuentra dispuesta la estructura de la moscovita  
 Tomado de Tomado de [www.webmineral.com](http://www.webmineral.com)

#### 4.1.4 GRUPO DEL CUARZO ( $\text{SiO}_2$ )

##### Cuarzo - $\text{SiO}_2$

Las principales variedades cristalinas de  $\text{SiO}_2$  son cuarzo, cristobalita y tridimita. Cristobalita y tridimita son polimorfos del cuarzo, formados en altas temperaturas, son metaestables y con el tiempo se transforman lentamente en cuarzo. Es raro encontrarlos en sedimentos detríticos, pero pueden estar presentes en areniscas volcanoclásticas. El cuarzo es el mineral más común y estable en las areniscas.

Muchas areniscas del Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico presentan granos de cuarzo que pertenecen a un segundo o tercer ciclo de sedimentación, indicando un grado muy alto de madurez. La mayoría de los granos de cuarzo se derivan de rocas granitoides, gneises ácidos y esquistos.

El cuarzo puede ser monocristalino (un solo cristal) o policristalino (dos o más cristales), los derivados de rocas ígneas volcánicas y plutónicas generalmente son monocristalinos, los de origen hidrotermal pueden ser monocristalinos o policristalinos de cristales grande y en ambos casos generalmente poseen vacuolas. He aquí un resumen con sus características más resaltantes:

**Cristalografía.** Cuarzo hexagonal: 32. Cuarzo alto, hexagonal; 622. Los cristales son comúnmente prismáticos, con las caras del prisma horizontalmente estriadas. Están terminados, generalmente, en una combinación de romboedros positivos y negativos que en muchas ocasiones tienen idéntico desarrollo y producen el efecto de una bipirámide hexagonal. En algunos cristales predomina un romboedro, o bien se presenta solo.

Los cristales son a menudo alargados en formas cortantes y puntiagudas y algunos aparecen retorcidos o doblados.

**Propiedades Físicas.** H 7. G 2,65 Fractura concoidea. Brillo vítreo, en algunas muestras graso, resplandeciente. Generalmente incoloro o blanco, pero frecuentemente coloreado por diversas impurezas pudiendo tomar cualquier color.

**Composición y Estructura.** Entre los minerales, el cuarzo es el más próximo a un compuesto químico puro y tiene propiedades físicas constantes. Si 46,7%, O 53,3%.

**Diagnostico.** Caracterizable por su brillo vítreo, fractura concoidea y forma de cristal.

**Yacimiento.** El cuarzo es un mineral común y abundante que se presenta en una gran variedad de condiciones geológicas. Aparece en muchas rocas ígneas y rocas metamórficas y es un constituyente principal de pegmatitas graníticas.

Al romperse las rocas cuarcíferas, el cuarzo, debido a su estabilidad mecánica y química, persiste en forma de granos detríticos acumulándose arena. La arena y su equivalente metamórfico, la cuarcita suelen estar compuestas principalmente de cuarzo.

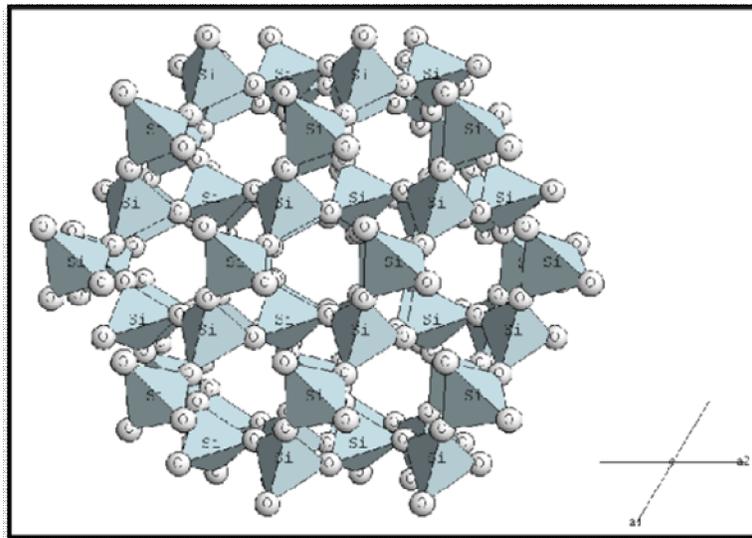


Figura N° 4.7 Forma en que se encuentra dispuesta la estructura del cuarzo

Tomado de [www.webmineral.com](http://www.webmineral.com)

#### **4.1.5 GRUPO DE LOS FELDESPATOS**

Los feldespatos son el grupo más abundante de minerales en rocas cristalinas, constituyendo un 60% en las rocas ígneas y probablemente una cantidad similar en rocas metamórficas. Los feldespatos son muy inestables en los ambientes sedimentarios con respecto al cuarzo, por lo cual a pesar de estar en una relación de 3:1 con respecto al cuarzo en las rocas cristalinas, esta relación baja 1:6 (con respecto al cuarzo) en las arenas y areniscas.

Los feldespatos forman los granos detríticos más importantes en las areniscas después del cuarzo. El contenido promedio de los feldespatos en areniscas es de 10 a 15%, pero en las arcosas puede superar el 50%. El porcentaje de feldespatos en las arenas y areniscas está relacionado con el origen de los sedimentos (rocas graníticas proveen mucho feldespato), la energía cinética del transporte, el ambiente deposicional y el ciclo de sedimentación.

Los feldespatos potásicos generalmente son más abundantes que las plagioclasas en las areniscas, sin embargo, en las areniscas derivadas de fuentes ricas en rocas volcánicas, las plagioclasas son más abundantes que los feldespatos potásicos. Entre las plagioclasas, las sódicas son más abundantes que las cálcicas.

Las categorías de feldespatos normalmente usados en petrología sedimentaria son las siguientes: Feldespatos potásicos (ortoclasa, microclino y sanidina); Plagioclasas (desde albita hasta anortita); Micropertita (es un intercrecimiento de feldespato sódico y feldespato potásico). La estabilidad de los feldespatos es menor que la del cuarzo, por su dureza menor y clivaje más fuerte. Esto implica una mayor desintegración de los feldespatos durante la erosión y el transporte, principalmente en ambientes sedimentarios con energías cinéticas altas.

De esta forma los sedimentos fluviales contienen mayor cantidad de granos de feldespatos que los sedimentos litorales, de plataforma marina y de origen eólico. La estabilidad química de los feldespatos es baja puesto que fácilmente son hidrolizados. La alteración química envuelve el reemplazamiento por minerales de arcilla como sericita (una variedad de moscovita), caolinita o illita. La meteorización química de los feldespatos es más importante que la meteorización física. La alteración de los feldespatos también es pronunciada durante la diagénesis, soterramiento y posterior levantamiento.

Los feldespatos se derivan de las mismas rocas cristalinas que el cuarzo, principalmente granitos y gneises donde los feldespatos potásicos dominan sobre las plagioclasas sódicas. Debido a su baja estabilidad, la mayor parte de los feldespatos son de un primer ciclo.

Además de la roca origen, el contenido de feldespato será controlado por el clima y la tasa de erosión. En un clima húmedo, la meteorización química destruye los feldespatos, mientras que en un clima árido los feldespatos son más resistentes a la meteorización física.

**Estructura.** La estructura de los feldespatos, se asemeja a la estructura de los distintos polimorfos de  $\text{SiO}_2$ , consta de una red infinita de  $\text{SiO}_4$ , así como de tetraedros de  $\text{AlO}_4$ . La estructura de los feldespatos puede considerarse como derivada de las estructuras de  $\text{SiO}_2$  por incorporación contaminante de  $\text{Na}^+$  (o  $\text{K}^+$  o  $\text{Ca}^{2+}$ ) en los huecos disponibles.

**Composición.** La serie de los feldespatos alcalinos  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$  a  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$  muestra una solución sólida completa sólo a altas temperaturas. Por ejemplo, los miembros de la serie anidina-albita alta son estables a temperaturas elevadas, pero a temperaturas más bajas se hacen estables dos fases separadas, la albita baja y la microclina.

#### 4.1.6 METEORIZACIÓN DE LA ROCA

La meteorización es un proceso que consiste en la desintegración y/o descomposición de los materiales geológicos. El término influye todas aquellas alteraciones de carácter físico o químico que modifican las características y propiedades de los materiales.

Los procesos de meteorización de las rocas dan lugar finalmente a los suelos, que pueden permanecer en su lugar de origen sobre la roca madre (suelos residuales) o pueden ser transportados como sedimentos; estos últimos pueden litificarse formando nuevamente rocas o permanecer como suelos (suelos transportados: aluviales, eólicos, glaciares, etc.) El contacto entre el suelo y la roca puede ser neto o gradual, este último característico de suelos residuales. El grado de meteorización del material rocoso juega un papel muy importante en sus propiedades físicas y mecánicas.

La región comprendida entre Caicara del Orinoco y Cabruta como se ha dicho anteriormente es una zona de ambientes tropicales, dominados por temperaturas variables y por lluvias abundantes, y por ende, la meteorización en esa zona es muy fuerte, caracterizándose por la descomposición rápida de feldespatos y minerales ferromagnesianos, la concentración de óxidos de hierro y aluminio y la remoción de Sílice

y de las bases  $\text{Na}_2\text{O}$  -  $\text{K}_2\text{O}$ -  $\text{CaO}$  y  $\text{MgO}$  (Díaz, 1998). Los feldespatos se meteorizan inicialmente a Caolinita, Óxidos de Hierro y de Aluminio y los compuestos más resistentes como las partículas de Mica y Cuarzo permanecen.

A medida que el proceso de meteorización continúa, los contenidos de Caolinita disminuyen y se alteran los demás compuestos a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Existen investigaciones que demuestran la disminución de los contenidos de Caolinita, con el aumento del promedio anual de lluvias (Lohnes y Demirel, 1973).

#### **4.1.6.1 Etapas del proceso de Meteorización**

Díaz (1998), explica que el proceso de meteorización involucra tres etapas definidas así:

- **Desintegración**

Se abren las discontinuidades y se desintegra la roca, formándose nuevas discontinuidades por fracturación y las partículas se parten, aumentando la relación de vacíos y la permeabilidad y disminuyendo la cohesión. En la meteorización la sal es generalmente un silicato y el producto de la reacción es una arcilla.

- **Descomposición**

Se incrementa el contenido de arcilla y de suelo en general y se disminuye la fricción. La descomposición puede ser ocasionada por procesos químicos o biológicos. Los procesos químicos incluyen la hidrólisis y el intercambio catiónico. Los procesos biológicos pueden incluir efectos de las raíces, oxidación bacteriológica y reducción de hierro y compuestos del azufre.

##### *Hidrólisis*

El proceso químico más importante en la meteorización química es la hidrólisis. Esta ocurre cuando una sal se combina con agua para formar un ácido o una base.

##### *Intercambio catiónico*

Es la descomposición de un mineral de arcilla para formar otro a través de la transferencia de iones entre soluciones percolantes y el mineral original. Los cationes tales como el sodio y el calcio son fácilmente intercambiables. El intercambio de cationes no altera la estructura básica del mineral de arcilla pero modifica el espaciamiento entre capas, convirtiendo por ejemplo una illita en una Montmorillonita.

- **Oxidación y Recementación**

Se aumenta el contenido de óxidos de hierro y aluminio, los cuales pueden cementar grupos de partículas aumentando la cohesión y el suelo tiende a estabilizarse.

En la mayoría de los procesos de meteorización en las rocas ígneas predominan los procesos químicos, mientras en las rocas sedimentarias predominan los procesos físicos, sin embargo estos procesos se interrelacionan.

La meteorización generalmente, avanza hacia abajo de la superficie y a través de las juntas y demás conductos de percolación, produciendo variaciones de intensidad, de meteorización y dejando bloques internos de material no descompuesto.

#### **4.1.6.2 Minerales Resultantes**

- **Caolinita**

Los suelos con caolinita como mineral de arcilla presentan un comportamiento normal en los ensayos, en términos de baja a media plasticidad y permeabilidad. El efecto del aumento de humedad sobre las propiedades del suelo generalmente, no es importante.

- **Montmorillonitas**

Los materiales con contenidos apreciables de Montmorillonita poseen muy alta plasticidad y baja permeabilidad. El efecto del aumento de humedad puede resultar en una disminución importante de la resistencia al cortante. La Montmorillonita tiene un alto nivel de reacción con el cemento y la cal.

- **Aloisita**

Al aumentar la humedad de una aloisita puede disminuir la resistencia al cortante en forma apreciable.

- **Sesquióxidos**

Los sesquióxidos generalmente, cementan las partículas y su presencia equivale a una reducción en la plasticidad. Los óxidos de hierro y aluminio se acumulan como consecuencia de una cadena de procesos químicos y de lavado interno.

La identificación del mineral de arcilla presente es muy importante para la valoración del comportamiento del suelo.

#### 4.1.7 GRADO DE METEORIZACIÓN

El grado de meteorización de la roca es una observación de campo muy importante, ya que de esto dependen las propiedades mecánicas. Este fenómeno afecta la porosidad, la permeabilidad y la resistencia de la roca.

La identificación del grado de meteorización de la matriz rocosa se puede realizar de manera sistemática a partir de descripciones hechas por González de Vallejo (2002), mostrado en la tabla N° 4.1

**Tabla N° 4.1 Evaluación del grado de meteorización de la matriz rocosa. Fuente: González de Vallejo (2000)**

<b>Término</b>	<b>Descripción</b>
Fresca	No se observan signos de meteorización en la matriz rocosa
Decolorada	Se observan cambios en el color original de la matriz rocosa. Es conveniente indicar el grado de cambio. Si se observa que el cambio de color se restringe a uno o algunos minerales, se debe mencionar.
Desintegrada	La roca se ha alterado al estado de un suelo, manteniéndose la fábrica original. La roca es friable, pero los granos minerales no están descompuestos
Descompuesta	La roca se ha alterado al estado de un suelo, alguno o todos los minerales están descompuestos

#### 4.1.8 ASPECTOS GEOMECÁNICOS

El comportamiento de los macizos rocosos frente a una intervención humana no responde a un patrón definido ni completamente predecible, esto se debe a su misma condición de ser un medio natural heterogéneo y anisótropo. La respuesta y el comportamiento de las rocas están controlados por sus características físicas y mecánicas, que son el resultado de los diversos procesos tectónicos y geológicos que ha sufrido la roca desde su Formación hasta el momento en que es intervenida.

Las características físicas principales que presentan las rocas son propias de su naturaleza geológica y se refieren principalmente a su mineralogía, tamaño de grano, densidad, dureza, porosidad, textura, arreglo cristalino, permeabilidad y grado de

meteorización, entre otros. Pero como las rocas en un macizo rocoso no se presentan de forma aislada, el comportamiento mecánico de éste se ve además afectado por los diferentes tipos de rocas que lo conforman, las estructuras presentes y los estados de esfuerzos a los que se vea sometido en su medio natural.

Todos estos factores que afectan al macizo rocoso, deben tomarse en cuenta al momento de diseñar una obra de ingeniería en donde éste deba ser intervenido; las características físicas, que se refieren básicamente a la geología y estructura del macizo.

Este ha sido por mucho tiempo uno de los principales problemas a los que se ha enfrentado la mecánica de rocas, ya que cada vez los proyectos de ingeniería son más ambiciosos y más exigentes en cuanto a calidad, seguridad y por supuesto en cuanto a menores costos. Se trata simplemente de poder aprovechar mejor las propiedades de las rocas o poder predecir con mayor exactitud el comportamiento que tendrá la roca de acuerdo a la forma en que sea afectada.

#### **4.1.8.1 Definición de Términos Básicos**

- **Fuerzas, P**

Es una magnitud física que caracteriza y cuantifica la interacción entre un cuerpo y su entorno. El efecto de una fuerza sobre un cuerpo es deformarlo (esto es cambiar su tamaño y su forma) o modificar su estado de movimiento. (Figuroa, 2007).

La unidad SI de fuerza es el newton (N).

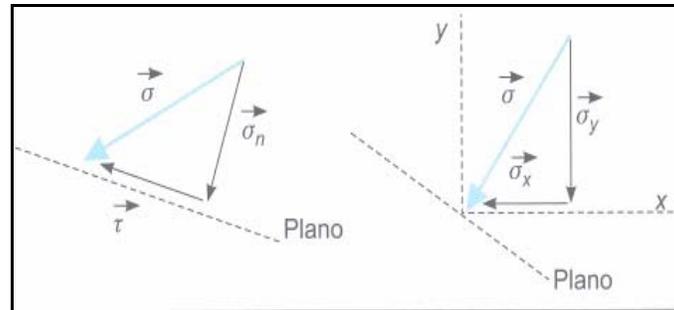
$$1 \text{ newton} = 1\text{N} = 1\text{Kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$$

Al hablar de fuerzas en un sistema rocoso, debe acotarse que éstas son las principales responsables del estado y comportamiento mecánico del sistema; las fuerzas que actúan sobre un medio rocoso son la fuerza gravitatoria y las fuerzas superficiales que ejercen sobre el cuerpo los materiales que lo rodean. Estas fuerzas superficiales actúan directamente sobre las superficies de contacto entre las partes adyacentes del sistema rocoso y se transmiten a cualquier punto del interior del mismo. Las fuerzas superficiales

pueden ser compresivas o extensivas, según actúen hacia dentro o hacia fuera del punto de aplicación.

- **Esfuerzo o Tensión,  $\sigma$**

Es la reacción interna de un cuerpo a la aplicación de una fuerza o conjunto de fuerzas; es una cantidad que no se puede medir directamente, ya que lo que se mide es la fuerza que se aplica, si la fuerza actúa uniformemente sobre una superficie o un plano, el esfuerzo o tensión indica la intensidad de las fuerzas que actúan sobre ese plano. Es importante señalar que el esfuerzo sobre un plano no varía si la fuerza es aplicada uniformemente sobre éste, pero si esto no sucede, es decir que la fuerza no se aplica de manera uniforme sobre todo el plano, el esfuerzo variará para las diferentes áreas del mismo. Al igual que las fuerzas, los esfuerzos compresivos son positivos, y los distensivos o traccionales, son negativos. El esfuerzo se puede representar como un vector  $\sigma$ , y como tal puede descomponerse en sus componentes normal  $\sigma_n$  y tangencial  $\tau$  o  $\sigma_t$ , tal como se aprecia en la figura N° 4.8 (González de Vallejo, 2002).



**Figura N° 4.8 Representación gráfica de los esfuerzos sobre un plano**

Tomado de: González de Vallejo. (2002)

- **Estado Tensional o de Esfuerzos**

Se refiere a la definición y cuantificación de todas las fuerzas por unidad de área que son aplicadas sobre un cuerpo en un momento determinado; generalmente se determina definiendo los esfuerzos que son aplicados sobre tres planos ortogonales a través de un punto. (González de Vallejo, 2002).

- **Resistencia**

Es el esfuerzo que la roca puede soportar para unas ciertas condiciones de deformación. Cuando una roca alcanza su resistencia máxima se habla de *resistencia pico* ( $\sigma_p$ ), y si la roca sobrepasa esta resistencia pico y cae a otro valor de resistencia para deformaciones elevadas sin que exista rotura de la misma, se llama *resistencia residual* ( $\sigma_r$ ). (González de Vallejo, 2002)

- **Rotura**

Según González de Vallejo (2000), la rotura es un fenómeno que se produce cuando la roca no puede soportar las fuerzas que se le aplican, y el esfuerzo alcanza un valor máximo que corresponde a la resistencia pico del material. Según la resistencia de la roca y las relaciones entre los esfuerzos aplicados y las deformaciones producidas, la rotura puede ser: rotura frágil, en la que la rotura de la roca se produce de forma instantánea y violenta; o rotura dúctil, donde la rotura de la roca se produce en forma progresiva.

En un medio rocoso existen diferentes mecanismos de rotura de las rocas, de los cuales se presentan los siguientes:

*Rotura por esfuerzo cortante*, se produce cuando una determinada superficie de la roca se somete a esfuerzos de corte suficientemente altos como para que una cara de la superficie se deslice con respecto a otra; ejemplo, la rotura a favor de discontinuidades.

*Rotura por compresión*, se produce cuando la roca está sometida a esfuerzos compresivos, y a nivel microscópico se producen en la roca grietas de tracción y planos de corte por donde se producirá la rotura.

*Rotura por tracción*, se produce cuando la forma o estructura del macizo rocoso hace que una sección de la roca se someta a una tracción pura o casi pura.

- **Fractura**

La fractura es la Formación de planos de separación en la roca, rompiéndose los enlaces de las partículas para crear nuevas superficies; se pierden las fuerzas cohesivas y permanecen únicamente las fricciónales. La dirección de estos nuevos planos de fractura depende de: la dirección de aplicación de las fuerzas y las anisotropías presentes en el material rocoso a nivel microscópico o macroscópico. (González de Vallejo, 2002).

- **Cohesión, C**

La cohesión es una medida de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo. Este parámetro de la mecánica de rocas es utilizado para representar la resistencia al esfuerzo cortante producida por la cementación, mientras que en la física este término se utiliza para representar la tensión (Díaz, 1998).

Goodman (1989) estipula que en materiales eminentemente granulares en los cuales no existe ningún tipo de cementante o material que pueda producir adherencia, la cohesión se supone igual a 0 y a estos suelos se les denomina como No Cohesivos.

Adicionalmente, en una roca, la cohesión es la fuerza que une las partículas minerales que la conforman (González de Vallejo, 2002).

- **Angulo de fricción interna,  $\phi$**

Díaz (1998), define el ángulo de fricción interna denominado con la letra griega phi ( $\phi$ ), es la representación matemática del coeficiente de rozamiento, el cual es un concepto básico de la física (Serway, 1996):

$$\text{Coeficiente de rozamiento} = \text{Tan } \phi$$

Este parámetro geotécnico depende de varios factores (Díaz, 1998) menciona entre ellos algunos de los más importantes:

- a. Tamaño de los granos
- b. Forma de los granos
- c. Distribución de los tamaños de granos

d. Densidad de la masa rocosa

A continuación, se presentan valores típicos de este parámetro geomecánico propuesto por varios autores en la tabla N° 4.2

**Tabla N° 4.2 Valores aproximados de ángulo de fricción interna para diversos tipos de roca. Datos seleccionados a partir de de Goodman (1989), González de Vallejo (2002), Hoek y Bray (1977), Díaz (1998) y Salcedo (1983).**

Roca	Ángulo de fricción interna ( $\phi$ )	Roca	Ángulo de fricción interna ( $\phi$ )
Anfibolita	32	Esquisto grafitoso	21-23
Basalto	48-55	Gabro	35
Carbón	11	Granito biotítico	47,7
Cuarcita	40-55	Grauvaca	45-50
Cuarcita micácea	38-40	Mármol	35-45
Conglomerado	35	Limolita	27-31
Diabasa	40-50	Lutita	40-60
Esquisto	25-30	Pizarra	40-55

- **Densidad o Peso Unitario**

Serway (1996) define densidad como la relación existente entre la masa de cuerpo por unidad de volumen. Esto es una sustancia de masa M y volumen V. Es un parámetro muy importante en la rama de la Mecánica de Rocas, es denotada con la letra griega  $\gamma$ .

$$\gamma = \frac{M}{V}$$

Donde:

$\gamma$  = Peso unitario seco o Densidad.

M = Masa del elemento.

V = Volumen del elemento.

Este parámetro depende de su composición mineralógica, origen geológico, etc. Se expresa en Kilonewton por metro cúbico ( $\text{KN/m}^3$ ). El Sistema Internacional S.I., se trabaja también con  $\text{T/m}^3$  y  $\text{Kg/m}^3$

- **Deformabilidad**

González de Vallejo (2002), la define como la propiedad que tiene la roca para alterar su forma como respuesta a la actuación de fuerzas. Según sea la intensidad de la fuerza ejercida, el modo en que se aplica y las características mecánicas de la roca, la deformación será permanente o elástico; este último caso el cuerpo recupera su forma original al cesar la actuación de la fuerza.

La deformabilidad de la roca se expresa por medio de las constantes elásticas  $E$  y  $\nu$ .

El modulo de Young,  $E$ , define la relación lineal elástica entre el esfuerzo aplicado y la deformación producida en la dirección de aplicación del esfuerzo. Esta expresión constituye la ley de Hooke: en la zona elástica de los materiales, las tensiones son proporcionales a los alargamientos unitarios. Este parámetro físico es expresado en unidades de presión.

En este orden de ideas, el Coeficiente de Poisson,  $\nu$ , define la relación entre la deformación transversal y axial, las unidades de este parámetros son adimensionales.

Ambas constantes mecánicas se obtienen mediante el ensayo de Compresión Simple en Roca (ASTM D-2938 y ASTM D-3148) y definen las características de la deformación elástica “estática de la roca”. Una roca dura con un comportamiento frágil presenta mayor módulo de Young y menor coeficiente de Poisson que una roca blanda con comportamiento dúctil.

En realidad, las rocas no presentan un comportamiento elástico lineal ideal, por lo que los valores de  $E$  y  $\nu$  sufren variaciones. Las rocas presentan valores típicos de  $E$  comprendidos entre los 0,15 y 0,33.

En la tabla número N° 4.3, se incluyen valores del módulo de Young para diferentes rocas. Se indican los rangos más frecuentes de variación de estos parámetros, que en ocasiones son muy amplios debido a la alta variabilidad de las diversas propiedades físicas (porosidad, estructura mineral, cementación, etc.) y al carácter anisotrópicos de algunas rocas (presencia de laminación, esquistosidad, etc.).

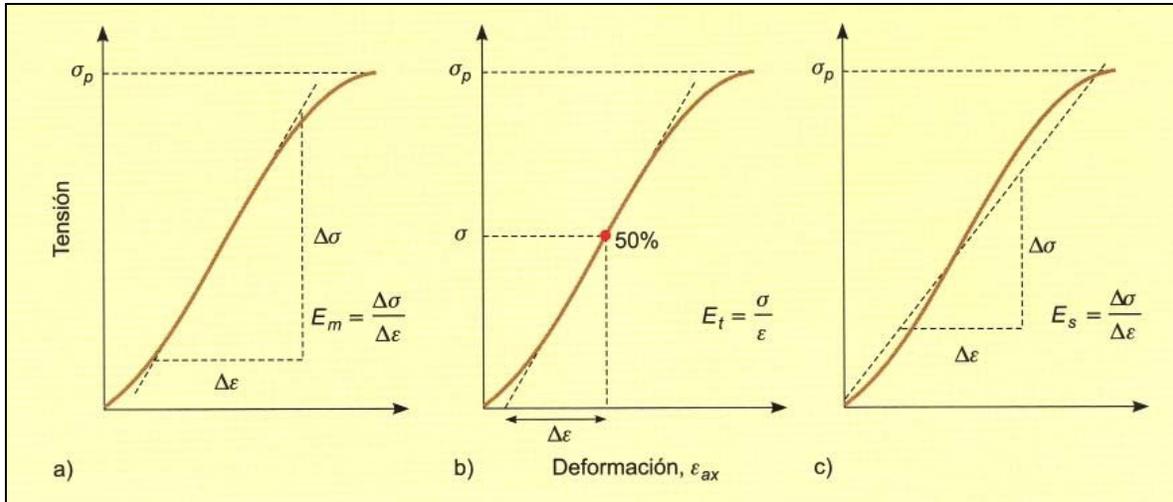
**Tabla N° 4.3 Valores aproximados de Modulo de Young para diversos tipos de roca. Tomado de: González de Vallejo (2002)**

Roca intacta	Módulo de Elasticidad, $E$ (KPa)	Roca intacta	Módulo de Elasticidad, $E$ (KPa)
Andesita	$4,27 \times 10^7$	Gabro	$9,8 \times 10^6 - 6,4 \times 10^7$
Caliza	$7,8 \times 10^6 - 9,7 \times 10^7$	Limolita	$6,9 \times 10^6 - 6,4 \times 10^7$
Cuarcita	$2,2 \times 10^7 - 9,8 \times 10^7$	Lutita	$9,8 \times 10^6 - 6,9 \times 10^7$
Diabasa	$5,9 \times 10^7 - 9,6 \times 10^7$	Marga	$9,8 \times 10^6 - 4,8 \times 10^7$
Yeso	$1,5 \times 10^7 - 3,5 \times 10^7$	Sal	$4,9 \times 10^6 - 2 \times 10^7$

Adicionalmente, el modulo de Young puede determinarse de la siguiente manera:

- a) Módulo medio  $E_m$ , o pendiente de la porción recta de la curva.
- b) Módulo tangente  $E_t$  o pendiente de la curva en un punto determinado de la misma (generalmente al 50% de la resistencia de pico)
- c) Módulo secante  $E_s$ , o pendiente de la línea recta que une el origen de la curva con la resistencia de pico.

Las dos primeras aportan valores más representativos, y además suelen coincidir comúnmente los resultados, (Ver figura N° 4.9)



**Figura N° 4.9 Métodos para calcular el modulo de Young a partir de las curvas esfuerzo-deformación proveniente de los ensayos de compresión uniaxial en núcleos de roca.**

Tomado de: González de V. (2002)

- **Modulo de Deformación ( $E/q_u$ )**

Deere (1968); mencionado por Goodman (1989) presentó una grafica para especímenes de roca intacta basado sobre la relación del módulo de elasticidad (E) y de la máxima resistencia a la compresión inconfiada ( $q_u$ ).

El mencionado autor comenta que para la mayoría de las rocas esta relación  $E/q_u$  abarca un rango comprendido entre 200 a 500; con valores extremos de 100 hasta 1200.

En general, la relación  $E/q_u$  es más alta para rocas cristalinas que para rocas clásticas (con areniscas mucho mayores que las lutitas).

Este valor con respecto al modulo de elasticidad indica que la propiedad deformable abarca ambas deformaciones recuperables (elástico) y no recuperables (plástico).

Siempre que el valor de módulo de elasticidad es calculado directamente de la pendiente de la recta de la grafica esfuerzo-deformación, (método A, ASTM D-3148), esta propiedad debe ser reportada como el “modulo de deformación”. Goodman (1989), menciona que este valor es muy poco conocido y no es de práctica universal.

Adicionalmente, Deer y Miller (1966); mencionado por González de Vallejo (2002), definen esta propiedad geomecánica como “Módulo Relativo”. Esta relación varía en función de la litología.

La Figura N° 4.10 muestra esta relación para los diferentes tipos de roca. Dichos autores establecen tres categorías en función del módulo de deformación: elevado (>500), medio (200 – 500) y bajo (<200).

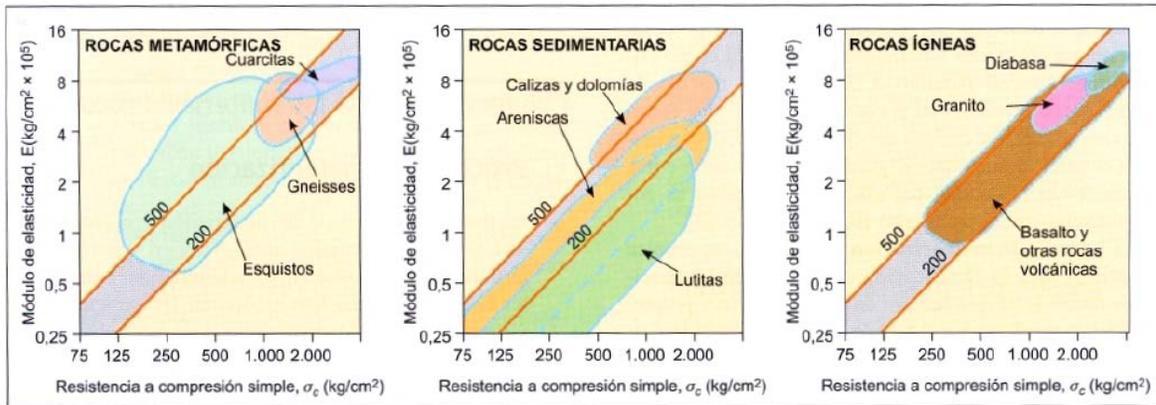
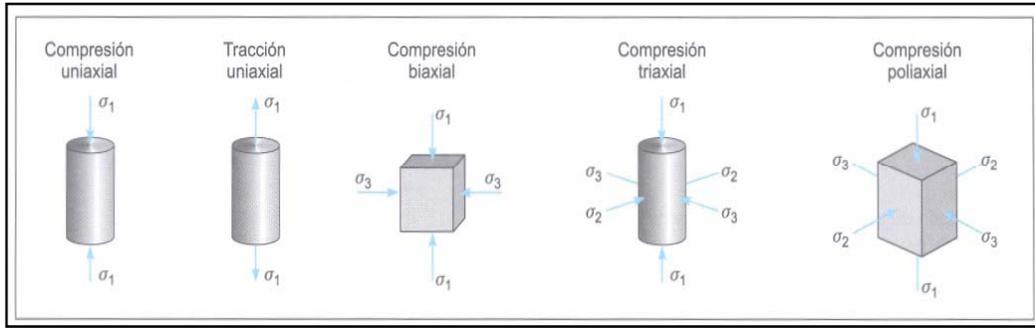


Figura N° 4.10 Clasificación de las rocas basada en el Módulo de Deformación o Relativo, propuesto por Deer y Miller (1966). Fuente: González de Vallejo (2002)

- **Esfuerzos y Tensiones en las Rocas**

Las rocas pueden estar sometidas a diversos esfuerzos y estados de tensiones, en condiciones naturales, un núcleo de roca intacta puede estar sometido a los esfuerzos como los mostrados en la figura N° 4.11 donde  $\sigma_1$  es el esfuerzo principal mayor y  $\sigma_3$  es el esfuerzo principal menor ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ). Adicionalmente, también se encuentran sometidas a esfuerzos tangenciales  $\tau$ , ocasionados por la tracción entre las partículas de rocas o en las discontinuidades. Debido a que estos esfuerzos a los que se ven sometidos las rocas le ocasionan ciertas deformaciones que influyen directamente sobre sus propiedades mecánicas, es importante conocer las relaciones entre los esfuerzos y las deformaciones para poder predecir la magnitud de éstas. Uno de los aspectos más importantes que se debe conocer de un material rocoso es su resistencia a los esfuerzos a los que se ve sometido y las leyes que rigen su rotura y deformación.



**Figura N° 4.11 Diferentes estados de tensiones aplicados a muestras de Laboratorio.**

**Fuente: González de Vallejo (2002)**

En este sentido, surgieron los llamados criterios de resistencia o rotura, los cuales no son más que expresiones matemáticas que buscan establecer una relación entre los esfuerzos aplicados, la resistencia del material y sus deformaciones, así como de otros parámetros representativos de las rocas. Estos criterios son empíricos, y están basados en una serie de experiencias en campo y en laboratorio. Existen criterios para la roca intacta, para las discontinuidades y para el macizo rocoso, entre los más utilizados en la mecánica de rocas se encuentran los de Hoek y Brown y los de Mohr-Coulomb.

Como lo indica González de Vallejo (2002), si se van registrando los esfuerzos y las deformaciones que se producen en la muestra de roca en diferentes intervalos del ensayo, se puede dibujar la curva esfuerzo-deformación. La rama ascendente de la curva, antes de que se alcance la resistencia pico, presenta un comportamiento lineal o elástico para la mayoría de las rocas. En este campo elástico, la deformación producida es proporcional al esfuerzo y se cumple la siguiente relación:

$$E = \sigma/\epsilon_{ax}$$

Donde  $E$  es la constante de proporcionalidad conocida como **Módulo de Young** ó módulo de elasticidad,  $\sigma$  es el esfuerzo generado y  $\epsilon_{ax}$  es la deformación axial de la muestra de roca.

En términos generales, el comportamiento de las rocas al ser sometidas a ensayos de carga se puede clasificar en tres tipos, estos son:

*Frágil*, las deformaciones que se presentan en la roca son elásticas y su resistencia disminuye de forma drástica y casi instantánea hasta alcanzar un valor cercano al cero, es

típico de rocas duras y resistentes. Generalmente la rotura se produce a través de los planos de debilidad.

*Frágil-Dúctil*, las deformaciones son elásticas y plásticas no recuperables, la resistencia de la roca disminuye hasta un cierto valor luego de haber alcanzado deformaciones importantes, este comportamiento lo presentan las discontinuidades rocosas o materiales arcillosos sobreconsolidados.

*Dúctil*, predominan las deformaciones plásticas y la resistencia no se pierde aún después de grandes deformaciones sino que se mantiene constante. La rotura se produce de forma progresiva y a través de numerosos planos que se van generando a medida que se aumenta la deformación; es un comportamiento típico de las sales y otros materiales blandos.

#### **4.1.9 ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA (GSI)**

En 1994, el Doctor Evert Hoek publicó sobre el noticiero oficial de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (Hoek, 1994) el artículo titulado "*Strength of Rock and Rock Masses*" en el cual introdujo, definiéndolo "Geological Strength Index" (GSI), un nuevo índice de calidad geomecánica para los macizos rocosos cuyo rango numérico, comprendido entre 0 y 100, se basa en la identificación y clasificación en campo de dos de las características físico-mecánicas de un macizo rocoso: la macroestructura y la condición de las superficies de las discontinuidades.

En la figura N° 4.12 se reporta la versión del GSI más recientemente publicada por el Autor (Hoek, 1998) y en la figura N° 4.13 se reporta la versión en castellano que ha sido elaborada por el geólogo Miguel Truzman, adaptando la clasificación original a los macizos rocosos constituyentes las formaciones metamórficas de la Cordillera de la Costa Venezolana.

Lo que más hace interesante el GSI, además de su sencillez y agudeza, es su carácter intrínseco a la geomecánica de los macizos rocosos, toda vez que el mismo no depende de factores extrínsecos cuales por ejemplo, la orientación, la pretensión, la humedad, etc., así como en cambio sucede para la mayor parte de los otros índices de calidad propuestos y

		SURFACE CONDITIONS				
		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90			N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80	70			
	VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		60	50		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40	30	
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				20	
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A			10

Figura N° 4.12 Índice de Resistencia Geológica

Fuente: (Perri, 1999)

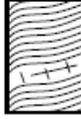
INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICA (GSI) PARA LAS ROCAS METAMORFICAS DE LA CORDILLERA DE LA COSTA DE VENEZUELA		CONDICION DE LA SUPERFICIE				
<p>A partir de la descripción de la estructura y las condiciones de la superficie de la masa rocosa, seleccionar el intervalo apropiado de esta gráfica. Estimar el valor promedio del Índice de Resistencia Geológica (GSI) de dicho intervalo. No intentar ser tan preciso. Escoger un rango de GSI de 36 a 42 es más aceptable que fijar un GSI = 38. También es importante reconocer que el criterio de Hoek-Brown debería ser aplicado solamente en macizos rocosos donde el tamaño de los bloques o fragmentos es pequeño comparado con el tamaño de la excavación a ser evaluada. Cuando el tamaño de los bloques individuales es aproximadamente mayor a un cuarto de la dimensión de la excavación, generalmente la falla estaría controlada por la estructura y el criterio de Hoek-Brown no debería ser utilizado.</p>		<b>MUY BUENA</b> Rugosa, superficies cerradas sin meteorización	<b>BUENA</b> Rugosa, ligeramente meteorizada, abertura < 1mm, rellenos duros	<b>MEDIA</b> Plana, moderadamente meteorizada, abertura 1-5 mm, rellenos duros y blandos	<b>MALA</b> Espejos de falla, superficies muy meteorizadas con abertura > 5 mm, predominan los rellenos blandos	<b>MUY MALA</b> Espejos de falla, superficies muy meteorizadas y abiertas con rellenos blandos
ESTRUCTURA		DISMINUCION EN CALIDAD DE SUPERFICIE →				
	INTACTA O MASIVA – macizo rocoso con pocas discontinuidades, carentes de planos de foliación <i>Ej: Cuarzitas, anfíbolitas o mármoles</i>	90	80	N/A	N/A	N/A
	POCO FOLIADA – macizo rocoso parcialmente fracturado con hasta tres sistemas de discontinuidades. Puede contener intercalaciones delgadas de rocas foliadas <i>Ej: Cuarzita fracturada intercalada ocasionalmente con esquistos y/o filitas</i>		70			
	MODERADAMENTE FOLIADA – macizo rocoso fracturado constituido por intercalaciones de rocas foliadas y no foliadas en proporciones semejantes <i>Ej: Intercalaciones de esquistos y/o filitas con mármoles fracturados en proporción similar</i>		60			
	FOLIADA – macizo rocoso plegado y/o fallado, muy fracturado, donde predominan las rocas foliadas, con ocasionales intercalaciones de rocas no foliadas <i>Ej: Esquistos y/o filitas muy fracturadas intercaladas ocasionalmente con mármoles lenticulares</i>		50	40		
	MUY FOLIADA – macizo rocoso plegado, altamente fracturado, constituido únicamente por rocas muy foliadas <i>Ej: Esquistos y/o filitas muy fracturadas sin la presencia de mármoles, gneises o cuarzitas</i>			30		
	BRECHADA/CIZALLADA – macizo rocoso muy plegado, alterado tectónicamente, con aspecto brechoide. <i>Ej: Brecha de falla o zona influenciada por fallas cercanas</i>	N/A	N/A		20	10
						5

Figura N° 4.13 Índice de Resistencia Geológica para las rocas metamórficas de la cordillera de la costa de Venezuela

Fuente: (Perri, 1999)

utilizados, como por ejemplo el RMR de Bieniawsky, el RSR de Wickham y el Q de Barton, ni se reduce a la caracterización casi únicamente geométrica del macizo, como por ejemplo ocurre para el RQD de Deere. Quizás el único índice de calidad que posee carácter igualmente intrínseco es el también interesante R<sub>Mi</sub> de Palmstrom (1996).

Es en efectos tal carácter intrínseco del GSI, que permitió a su Autor proponerlo para que fuera utilizado esencialmente para el importante objetivo de estimar y cuantificar numéricamente las principales características geomecánicas de los macizos rocosos, marcando de tal manera un paso gigantesco hacia la resolución de uno de los más álgidos problemas de la mecánica e ingeniería de rocas: el GSI provee un sistema para estimar la reducción de la resistencia y aumento de la deformabilidad de las rocas que se producen al pasar de los materiales a los macizos, al pasar o sea de la caracterización de laboratorio sobre muestras de dimensiones necesariamente muy limitadas a las formaciones naturales dentro de las cuales se realizan las obras de ingeniería que requieren ser numéricamente analizadas diseñadas o verificadas.

- **Criterio de Hoek-Brown**

En este mismo orden de ideas, la introducción del criterio de resistencia de Hoek y Brown (1980) para rocas y macizos rocosos fracturados, ya había producido un gran salto cualitativo en la mecánica de rocas, al permitir este desvincularse finalmente del uso (impuesto por la falta de alternativas prácticas valederas) del criterio de resistencia de Mohr-Coulomb el cual, habiendo sido rígidamente trasladado de la mecánica de suelos a la mecánica de rocas, obligaba a la adopción de parámetros de resistencia al corte ( $c$  y  $\phi$ ), supuestamente representativos también del nuevo medio: el macizo rocoso.

El criterio de Hoek-Brown en efectos, introdujo parámetros de resistencia al corte propios, sea del material rocoso como el nuevo parámetro para la roca intacta ( $m_i$ ) a lado de la tradicional resistencia a la compresión uniaxial ( $\sigma_1$ ), sea del macizo rocoso ( $m_b$ ) y ( $S$ ) con la formula:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + S \right)^a$$

Siendo ( $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ ) los esfuerzos principales máximos y mínimos respectivamente (eventualmente efectivos) al momento de la rotura.

Para el material rocoso: ( $m_b = m_i$ ), ( $S = 1$ ), ( $a = 0.5$ ) y el criterio se transforma en:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \sqrt{m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1}$$

Con la formulación original del criterio, se sugirieron valores numéricos para los parámetros ( $m$ ,  $s$ ) de los materiales y de los macizos rocosos en función de las características de estos y haciendo referencia para ello, entre otros, a las clasificaciones de Bieniawsky y Barton.

Sucesivamente Hoek (1988), propuso formulas empíricas para los parámetros ( $m$ ,  $s$ ) en función del índice RMR de Bieniawsky y finalmente (1994) en función del nuevo índice GSI.

Para el macizo rocoso (cuando  $GSI \geq 25$ ), los parámetros ( $m_b$ ,  $s$ ,  $a$ ), valen:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28}\right) \quad s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9}\right) \quad a = 0.5$$

Para el macizo rocoso (cuando  $GSI < 25$ ), los parámetros ( $m_b$ ,  $s$ ,  $a$ ), valen:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28}\right) \quad s = 0 \quad y \quad a = 0.65 - \frac{GSI}{200}$$

Además, ya que en muchas aplicaciones resulta importante considerar el comportamiento post-falla del macizo rocoso, los autores del criterio indicaron en cada nueva formulación, también valores numéricos (1980) y luego (1988) nuevas formulas en función del RMR y finalmente (1994) en función del GSI, para los valores residuales de los parámetros ( $m_r$ ,  $s_r$ ).

A este respecto se introdujo recientemente (Hoek y Brown, 1997) el concepto del GSI residual ( $GSI_{res}$ ) con el cual se sugirió, para el cálculo de los valores residuales de los

parámetros ( $m_r$ ,  $s_r$ ), hacer aún referencia a las mismas formulas arriba indicadas para los valores naturales en las cuales solamente se sustituyera el GSI con el  $GSI_{res}$ .

En cuanto a los valores numéricos del  $GSI_{res}$ , en el mismo trabajo de 1997 Hoek y Brown por intermedio de tres ejemplos relativos a macizos rocoso de optima, media y baja calidad, a los cuales asignan valores numéricos para los parámetros naturales y residuales, permiten deducir los valores del  $GSI_{res}$  en cada caso, resultando una relación no lineal entre  $GSI_{res}$  y GSI presentando, los valores residuales, una caída tanto más acentuada cuanto mejor es la calidad geomecánica del macizo rocoso natural: el  $GSI_{res}$  vale del orden de 2/3 del GSI para macizos rocosos de buena calidad ( $GSI > 75$ ), 4/5 para macizos de calidad intermedia y se mantiene en el mismo orden ( $GSI_{res} \approx GSI$ ) para macizos rocosos de baja calidad ( $GSI < 30$ ).

La explicación de este resultado, debe ser buscada en el comportamiento post-falla que presentan los macizos rocosos de diferente calidad: desde un comportamiento elasto-frágil para una calidad óptima, a un comportamiento elasto-plástico con ablandamiento para una calidad intermedia, hasta un comportamiento elasto-perfectamente plástico para una calidad pésima. Russo (1998) propone, para estimar el valor del  $GSI_{res}$ , la siguiente relación lineal con el GSI natural:  $GSI_{res} = 0.36GSI$ .

Claro está que no todos los problemas estarían resueltos con la sola adopción del criterio de Hoek-Brown. Queda el problema de la selección del más representativo valor de los parámetros del material ( $\sigma_{ci}$ ) y ( $m_i$ ) para macizos heterogéneos; el índice geomecánico (GSI) tiene mucho de cualitativo y por lo tanto de subjetivo; la determinación en laboratorio del parámetro ( $m_i$ ) es dificultosa: para cada material presente, según Hoek y Brown (1997), se deben realizar por lo menos 5 ensayos triaxiales sobre igual número de muestras del mismo material con presiones de celda entre 0 y el 50% del valor de ( $\sigma_{ci}$ ) y finalmente; es ciertamente todavía difundida, aunque no del todo justificada, la práctica de emplear el criterio de Mohr-Coulomb y sus parámetros ( $\sigma_{cm}$ ,  $c$ ,  $\phi$ ), supuestamente asociados al macizo rocoso, como consecuencia de la existencia de muchos programas informáticos especializados.

Y es probablemente por este último motivo, que Hoek y Brown en su trabajo de 1997 dedican muchos esfuerzos y mucho espacio para presentar los resultados de una amplia investigación conducida con el fin de estimar los valores numéricos aproximados de

tradicionales parámetros de resistencia, ( $c$ ) y ( $\phi$ ), para que puedan ser aplicados a los macizos rocosos. Esta estimación se lleva a cabo partiendo del conocimiento de las características básicas del material rocoso ( $\sigma_{ci}$ ) y ( $m_i$ ) y de la determinación del GSI del macizo. (Perri, 1999)

#### 4.1.10 CLASIFICACIÓN SEGÚN EL ESTADO FÍSICO DE UNA ROCA

Esta clasificación, antiguamente conocida como la “Clasificación de Flores Calcaño”, fue mejorada y propuesta por Salcedo (1969), la cual toma en cuenta para la clasificación del estado físico de la roca varios aspecto geológicos cualitativos y cuantitativos como:

##### 4.1.10.1 Estado de la meteorización:

- **Roca fresca:** Aquella roca que conserva sus características originarias y no muestra efectos de la meteorización.
- **Roca meteorizada:** Aquella cuya composición química, textura, estructura y color han sido levemente alterados y son próximos a los de la roca original.
- **Roca muy meteorizada:** Aquella cuyas propiedades mencionadas han sido muy alteradas, puede haber cambios en la composición química, el arreglo de sus componentes ha perdido la rigidez original, hay cambios notables en el color original de la roca y ha perdido mucho de su consistencia original.
- **Roca descompuesta:** Aquella que sólo conserva restos de su textura y estructura original.

##### 4.1.10.2 Consistencia

- **Roca dura:** Aquella roca para la cual es necesario el uso de explosivos para su remoción. En caso de estar muy fracturada, se pueden usar medios mecánicos de gran intensidad.
- Para la obtención de muestras mediante perforaciones es imprescindible la utilización de taladros con brocas de widia o diamante.
- **Roca blanda:** Aquella roca que se puede disgregar por medios mecánicos. Para la obtención de muestras de este tipo, basta el uso de métodos a percusión.

##### 4.1.10.3 Frecuencia de diaclasas

- **Roca sana:** Aquella que no presenta fracturas.

- **Roca fracturada:** La frecuencia de diaclasas varía entre 1 y 15 diaclasas por metro y se representa así:

1:1, 2:1, . . . . 15:1

- **Roca muy fracturada:** La roca presenta una frecuencia de más de 15 diaclasas por metro (>15:1)

A continuación se presenta la nomenclatura correspondiente según lo descrito por Salcedo (1969):

**RD:** Roca descompuesta

**RM:** Roca meteorizada

**RF:** Roca fresca

**b:** blanda

**d:** dura

**f:** fracturada

**s:** sana

**RD**b**:** Roca descompuesta, blanda\*

**RM**b**:** Roca meteorizada, blanda\*

**RM**d**:** Roca meteorizada, dura\*

**RM**b****f**:** Roca meteorizada, blanda fracturada\*

**RM**d****f**:** Roca meteorizada, dura fracturada\*

**RM**d****s**:** Roca meteorizada, dura sana

**RF**b**:** Roca fresca, blanda

**RF**d**:** Roca fresca, dura

**RF**b****f**:** Roca fresca, blanda fracturada

**RF**b****s**:** Roca fresca, blanda sana

**RF**d****f**:** Roca fresca, dura fracturada

**RF**d****s**:** Roca fresca, dura sana

(\* Casos más comunes)

De los símbolos anteriormente mencionados podemos resumir lo siguiente:

- La primera letra, o sea la R, se refiere siempre a la roca.
- La segunda letra, usada después de la R, indica grados de meteorización y la escala, en orden de menor a mayor meteorización será:

Fresca (F) → Meteorizada (M) → Descompuesta (D)

- La tercera letra indica la consistencia y la escala varia de:

Dura (d) → Blanda (b)

- La cuarta letra es indicadora del grado de fractura, el cual variará de:

Sana (s) → Fracturada (f)

## CAPITULO IV

### ENSAYOS DE LABORATORIO

#### 5.1 GENERALIDADES

Todas las muestras obtenidas de las perforaciones se identificaron y colocaron en envases y/o dispositivos diseñados para tal fin, tratando de preservar las condiciones originales de la muestra. Posteriormente, las muestras fueron trasladadas a los laboratorios de Geociencias de la Empresa GEOHIDRA CONSULTORES C.A, Mecánica de Rocas y de Difracción de Rayos X de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Universidad Central de Venezuela para su caracterización y clasificación, siguiendo las especificaciones de la ASTM (*American Society for Testing and Materials*).

##### 5.1.1 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Se realizó un análisis de 5 muestras pertenecientes a los núcleos de rocas de limolita con el fin de determinar mediante la técnica de difracción de rayos X su composición mineralógica.

El análisis en “muestra total”, consiste en identificar la composición mineralógica total de las 5 muestras, este análisis ha sido aplicado con éxito en los núcleos de limolita estudiados en este trabajo; Las muestras analizadas se indican en la tabla N° 5.1

**Tabla N° 5.1 Perforaciones para análisis de difracción de rayos X.**

Perforación	Muestra	Profundidad (m)
P-2S'	3	45,00-45,85
P-12S	29	64,50-65,00
PC-9AS	27	72,00
P-2N'	28	98,70
P-35N	18	65,00-68,00

### 5.1.1.1 Procedimiento del Ensayo

- **Disgregación-Pulverización y Tamizado**

Las muestras de núcleos previamente identificadas fueron colocadas individualmente en una mesa, de tal manera que se procedió a disgregarlas con un martillo en fragmentos más pequeños; individualmente cada una y por separado se fueron colocando en un mortero para su posterior pulverización.

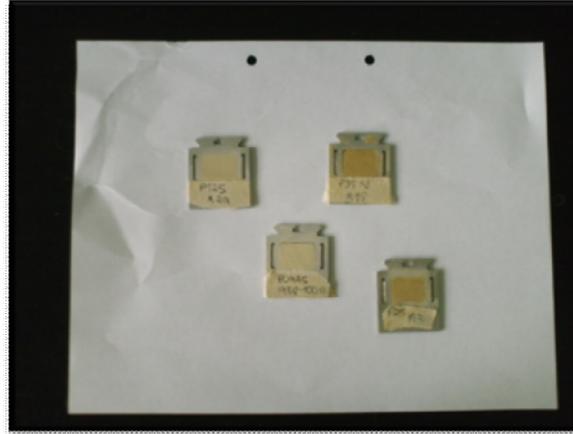
Después del disgregado y pulverizado la muestra (Figura N° 5.1) es pasada individualmente por un tamiz # 200 de tal manera que los finos que se depositan en la bandeja son los que se llevaran para su posterior análisis de difracción de rayos X.



Figura N° 5.1 Muestras pulverizadas para su posterior análisis

- **Análisis en Muestra Total**

Este análisis por DRX se realizara a todas las muestras recolectadas, en forma de montura desorientada, para así identificar la mineralogía total de la muestra y politipos de minerales de arcilla. En este proceso se siguen, colocando la muestra pulverizada y pasada por el tamiz # 200 en una plaquita de aluminio de tal manera que se llene toda la placa con la muestra tal como se aprecia en la figura N° 5.2



**Figura N° 5.2 Montaje de muestras para su análisis de DRX**

- **Equipo Analítico**

Difractómetro Philips  
 -Generador de rayos X: PW  
 3830 Goniómetro modelo  
 “step scanning”: PW 3020  
 -Detector de rayos X: PW  
 1711/90  
 -Monocromador Pw 1752/00  
 Tubo de cobre



**Figura N° 5.3 Equipo de difracción de rayos X, Laboratorio de difracción y fluorescencia de rayos X, Departamento de Geología, UCV**

- **Identificación de Minerales**

Usando la corrida de muestra total en difracción se utilizan las tablas del Joint Committee on Powder Diffraction Standards (JCPDS) para un reconocimiento de los minerales presentes en la roca. En la figura N° 5.4 se observa el espectro en difracción de rayos X de una mezcla de calcita y aragonito, mostrando sus picos principales para su identificación.

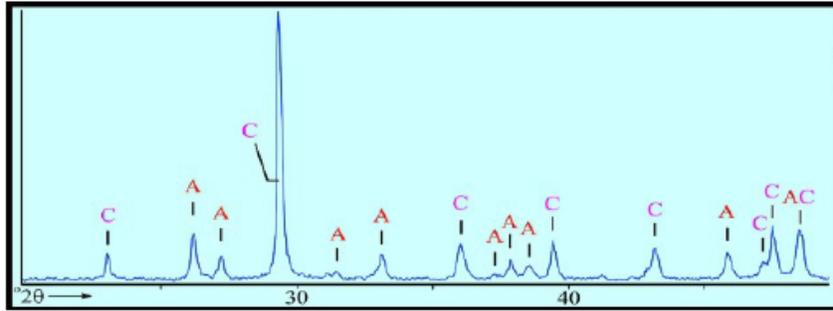


Figura N° 5.4 Espectro de difracción de rayos X de una mezcla de calcita y aragonito, indicando en rojo los picos principales de aragonito y en morado los de la calcita (modificado de POPPE *et al.* 2001)

### 5.1.2 ENSAYOS GEOMECÁNICOS

Los ensayos son realizados para determinar la resistencia a la compresión y la resistencia al corte de las muestras de roca seleccionadas. Para esto, se modela en laboratorio las condiciones de esfuerzo a las cuales está sometida la muestra in situ, para modelar el comportamiento esfuerzo-deformación de la muestra ante determinadas condiciones y se ejecutan los ensayos de prueba correspondientes.

Estos ensayos se componen siguiendo las especificaciones de la ASTM (*American Society for Testing and Materials*) y por la ISRM (*International Society of Rock Mechanics*), las cuales fueron adaptadas en el año de 1995 por el Ing. Pietro De Marco, según los equipos pertenecientes al Laboratorio de Mecánica de Rocas de la Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, de la Universidad Central de Venezuela.

Los principales ensayos para caracterizar geomecánicamente la roca son los siguientes:

- Ensayo Uniaxial o de Compresión Simple en Roca (ASTM D - 2938)
- Ensayo de Carga Puntual (ASTM D – 5731)
- Ensayo de Corte Directo en Discontinuidades (ASTM – D5607)

### 5.1.2.1 Ensayo Uniaxial o Compresión Simple en Roca (ASTM D-2938)

El ensayo de compresión uniaxial es uno de los ensayos más comunes y sencillos para determinar la resistencia de una muestra de roca.

Se realiza sometiendo una muestra cilíndrica de roca, con altura igual a dos veces su diámetro ( $H=2D$ ), a un incremento de carga vertical continuo, hasta que la muestra falle; registrándose una curva de esfuerzo-deformación y el tipo de falla observable.

La resistencia medida en el laboratorio es una medida de la resistencia de la roca intacta, más que la resistencia real de la masa de roca; ya que en la masa rocosa tienen mayor influencia el estado y orientación de las fracturas, su persistencia, las discontinuidades y planos de debilidad existentes en toda la masa, la orientación del esfuerzo actuante con respecto a los planos de debilidad de la roca, etc.

Dicho parámetro geomecánico se determina dividiendo la máxima carga soportada por la muestra de roca entre el área de su sección transversal inicial, obteniendo:

$$q_u = \frac{F}{A}$$

Donde:

$q_u$  = Resistencia a la compresión, expresado en Kilopascales (KPa)

$F$  = Máxima fuerza soportada por la muestra, expresado en Kilonewton (KN)

$A$  = Área inicial de la sección transversal de la muestra, expresado en  $m^2$

Los resultados son utilizados para la clasificación y caracterización geotécnica de la roca intacta. Si se miden las deformaciones, pueden calcularse el modulo de Young y la relación de Poisson

En la tabla N° 5.2, se muestra la clasificación de la calidad de la roca intacta en función de su resistencia a la compresión uniaxial, sugerida por Franklin J. (1989).

**Tabla N° 5.2 Clasificación de la roca en función de su resistencia a la compresión uniaxial.**  
**Fuente: González de Vallejo (2002)**

Clasificación de la roca	$C_o$ (Kg/cm <sup>2</sup> )
Extremadamente débil	< 20
Muy débil (Roca blanda)	20 - 60
Débil	60 - 200
Medianamente resistente	200 - 600
Muy resistente (Roca dura)	600 - 2000
Extremadamente resistente	> 2000

Ante todo ello, este valor de resistencia debe ser tomado como una aproximación favorable a la resistencia de la masa rocosa y debe ser empleado con apropiado criterio ingenieril.

#### **Aparatos y Equipos Necesarios**

- Prensa para la aplicación y medida de la carga axial sobre la probeta, a una velocidad controlada (Figura N° 5.5)
- Discos de acero para la transmisión de la carga, de diámetro igual o ligeramente superior al de la muestra ( $\approx + 2$  mm), de 15 mm de espesor mínimo y de superficie completamente plana (tolerancia 0.005 mm).
- Asiento esférico (ligeramente lubricado) para colocar en el extremo del disco superior.
- Vernier, cronometro, transportador.



**Figura N° 5.5 Equipo de Ensayo Uniaxial o de Compresión Simple en Roca, marca SUZPECAR, modelo MEM-100/3, con capacidad de 80.000 KN. Propiedad del Laboratorio de Geociencias de la Empresa Geohidra Consultores C.A**

#### **Preparación de las muestras.**

- La probeta de roca debe ser completamente cilíndrica, con una altura de 2,5 a 3,0 veces su diámetro, el cual no debe ser inferior a 54 mm. Generalmente se usan núcleos provenientes de perforaciones, de diámetro NX ó superior. El diámetro de la muestra debe ser por lo menos 10 veces el tamaño del mayor grano que constituye la roca. (Ver figura N° 5.6)



**Figura N° 5.6 Vista de un núcleo de perforación de tamaño NX**

- Los extremos del núcleo deben ser planos, lisos y perpendiculares a su eje, permitiéndose las siguientes tolerancias: cara/eje =  $0,06^\circ$  y cara/cara =  $0,25^\circ$ .
- Los lados de la muestra deben ser lisos y libres de irregularidades ó desviaciones sobre 0,3 mm. (Ver figura N° 5.7)

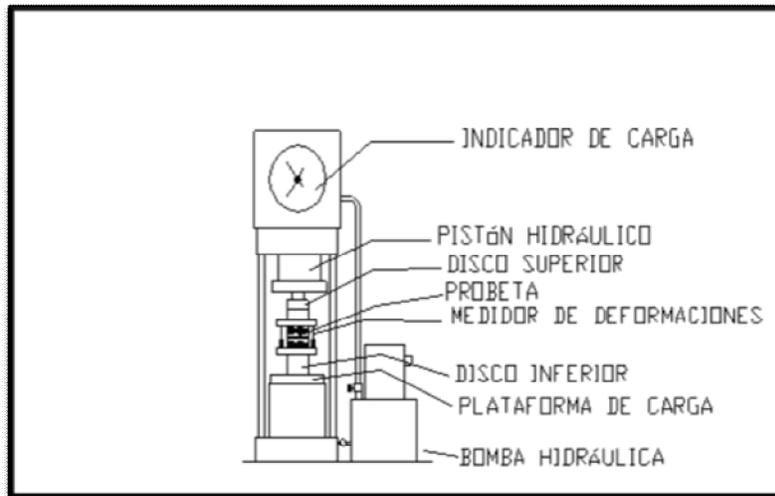


**Figura N° 5.7 Vista de núcleo donde se observa sus caras lisa libre de irregularidades**

- El tratamiento de los extremos de la probeta deben hacerse por medios mecánicos; no se permite el uso de “capping”.

### **Procedimiento del Ensayo**

- Determinar el diámetro de la muestra con una aproximación de 0,1 mm, promediando dos medidas perpendiculares entre sí, que se realizaran en la parte superior, media e inferior del espécimen. El área de la sección transversal ( $A_0$ ) se calculara con el promedio de estos resultados. Determinar la altura del núcleo con una aproximación de 1,0 mm.
- Se coloca la muestra centrada en los discos de carga, colocar el asiento esférico en la parte superior y alinear con el eje de carga la prensa. (Ver figura N° 5.8)



**Figura N° 5.8 Disposición de la muestra en el ensayo de compresión uniaxial. Tomado de De Marco (1995)**

- Aplicar carga vertical en forma continua con un incremento de esfuerzos constante entre 5,0 y 10,0 Kg/cm<sup>2</sup>/s, hasta producir la falla. (Ver figura N° 5.9)



**Figura N° 5.9 Aplicación de carga vertical y toma de lectura**

- Registrar la máxima carga (P max.) con error no superior al 1%.
- Se recomienda realizar por lo menos 5 ensayos por litología.



Figura N° 5.10 Vista donde se muestra la rotura de la muestra luego de ser sometida a un incremento de carga vertical.

- En la figura N° 5.11 se muestra la manera correcta en que las muestras deben fallar

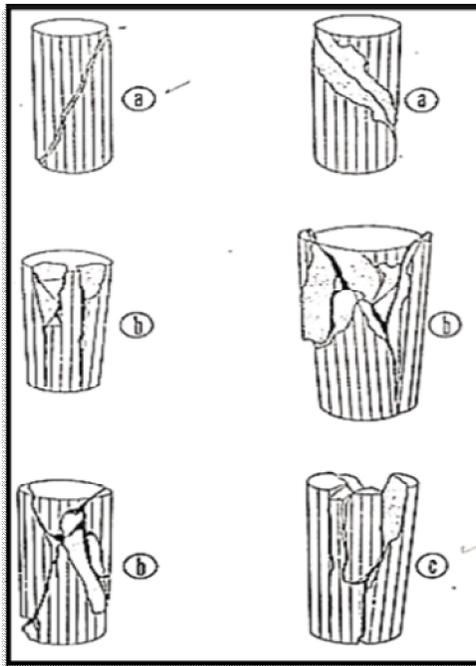


Figura N° 5.11 Ejemplos de fracturas en muestras de roca

Fuente: Castillejo, 1993

### 5.1.2.2 Ensayo de Carga Puntual (ASTM D-5731)

Determina un índice de resistencia en muestras de rocas de geometría irregular o cilíndrica (sin preparaciones especiales), las cuales son sometidas a carga entre dos piezas cónicas de punta redondeada.

Los resultados son utilizados para clasificación y caracterización geotécnica de la roca intacta. Igualmente, pueden establecerse correlaciones con la resistencia a la compresión y a la tensión uniaxial.

El ensayo mide el Índice de Resistencia a la Carga Puntual,  $Is_{(50)}$  y el Índice de Anisotropía,  $Ia_{(50)}$ . Como muestra en las figuras N° 5.12 y N° 5.13

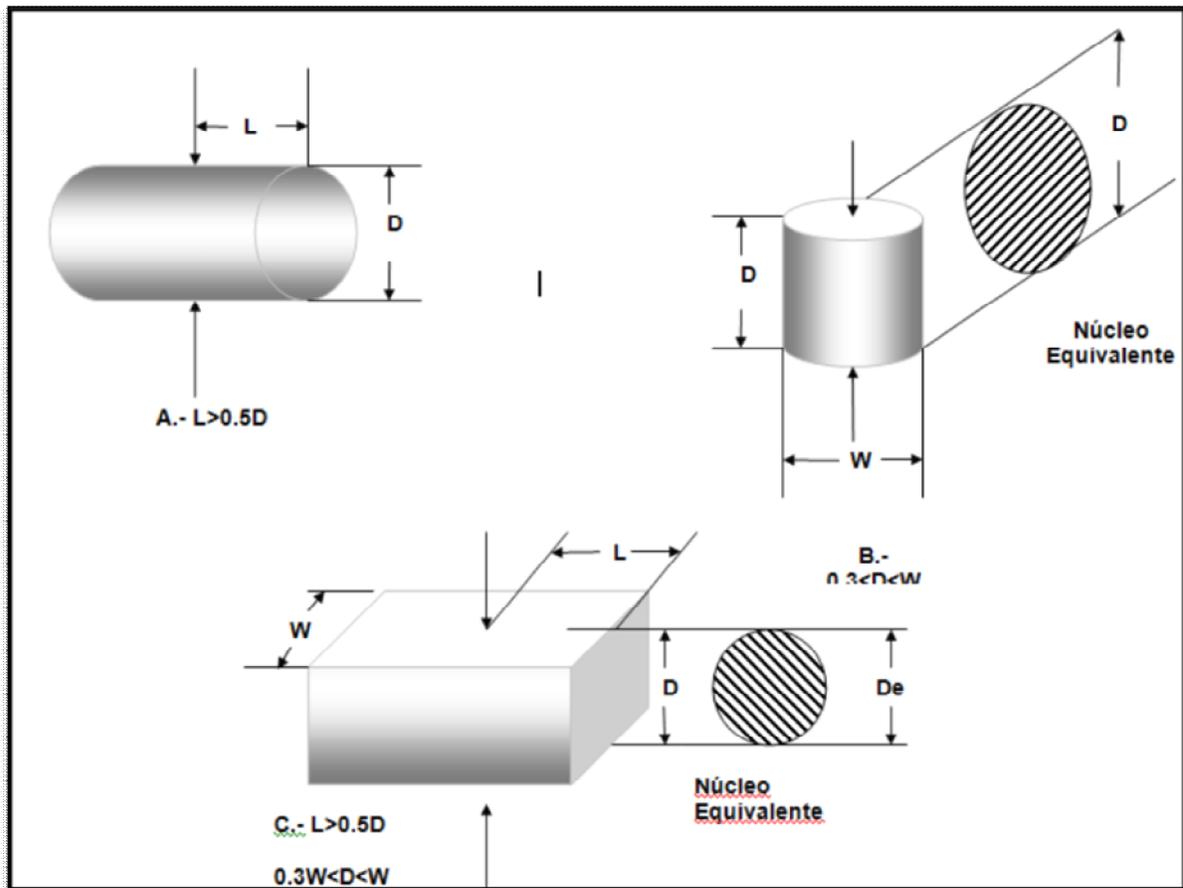


Figura N° 5.12 Requerimientos geométricos para el ensayo de Carga Puntual: A.-Diametral, B.- Axial, C.- Bloque. Fuente: De Marco (1995)

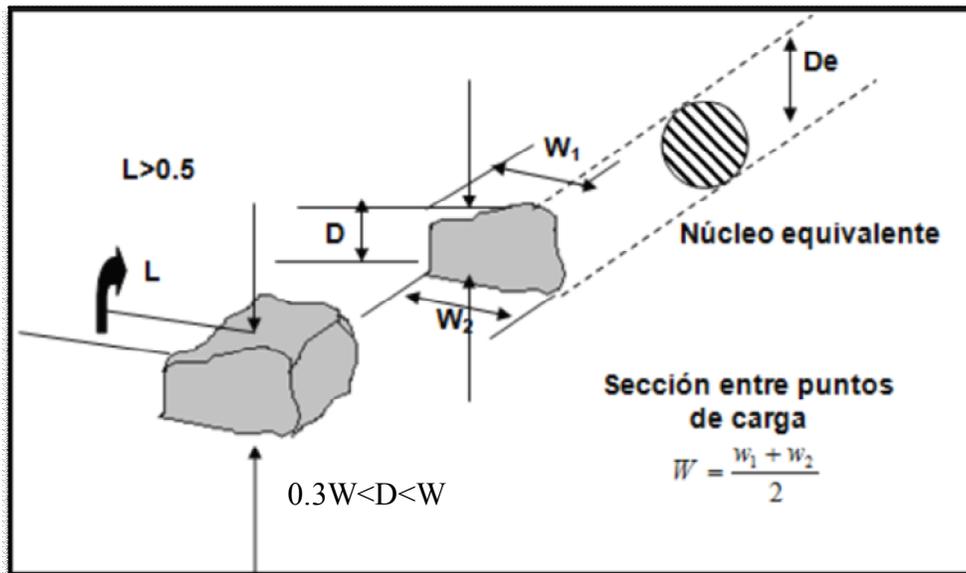


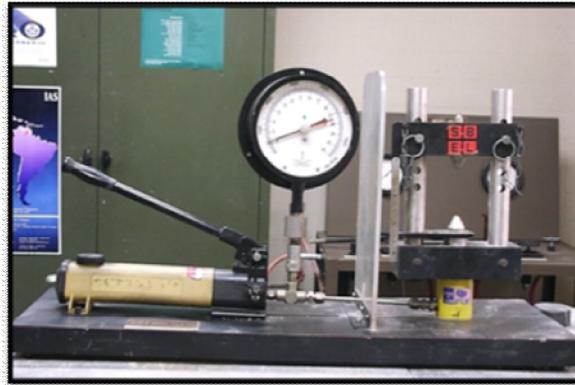
Figura N° 5.13 Requerimientos geométricos para el ensayo de Carga Puntual: Bloque Irregular

Fuente: De Marco (1995)

### Aparatos y Equipos Necesarios

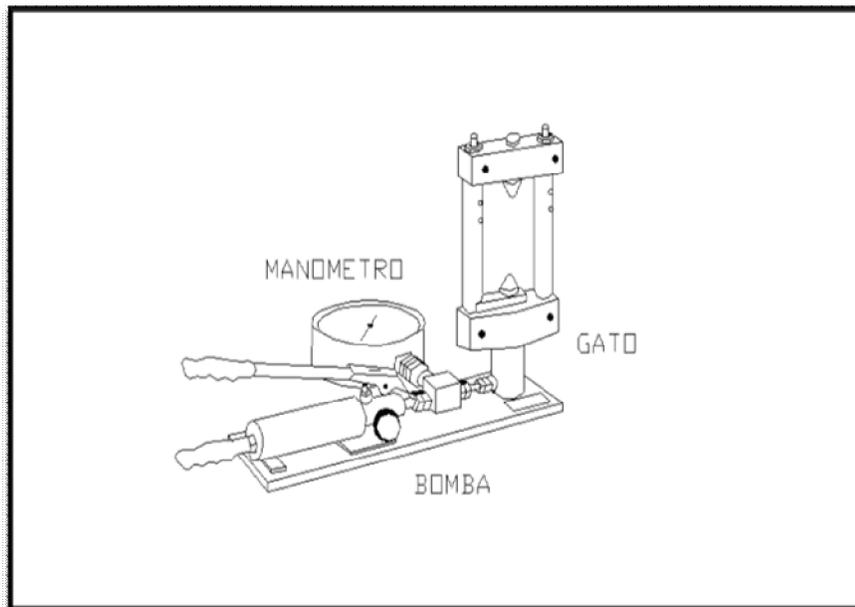
La máquina del ensayo (figura N° 5.14) consiste en un sistema de carga (placas de carga cónicas, bomba y gatos hidráulicos), un sistema para medir la carga ( $P$ ) necesaria para romper la muestra y un sistema para medir la distancia ( $D$ ) entre las puntas de carga, con las siguientes especificaciones:

- El sistema de carga debe poder ajustarse para ensayar muestras de roca con un tamaño entre 25 y 100 mm preferiblemente.



**Figura N° 5.14** Equipo para la realización del ensayo de Carga Puntual, marca SBEL, modelo PLT-10, propiedad del Laboratorio de Mecánica de Rocas UCV

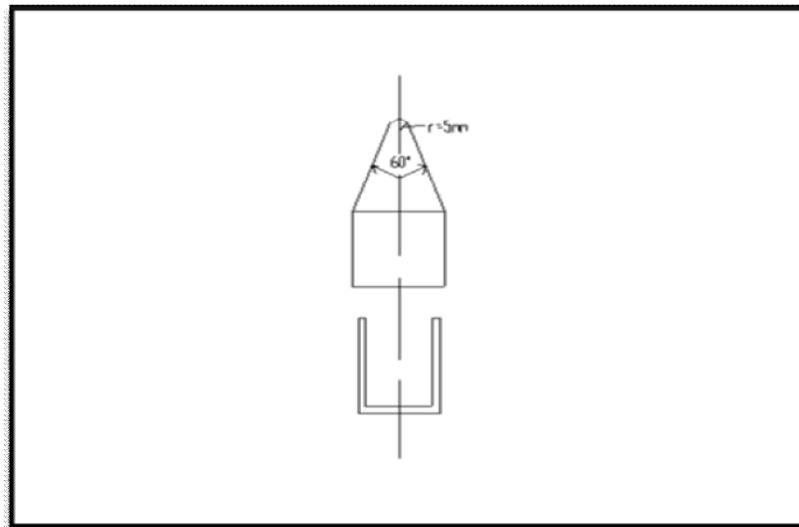
- La capacidad de carga debe ser suficiente para romper las muestras más grandes y resistente. Una capacidad de 5000 kg es suficiente para las dimensiones indicadas anteriormente; ver esquema de funcionamiento figura N° 5.15



**Figura N° 5.15** Esquema del equipo de Carga Puntual

**Fuente:** De Marco (1995)

- La máquina debe ser diseñada y construida de manera que no permita distorsiones durante la aplicación de cargas de fallas sucesivas y que las puntas cónicas se mantengan coaxiales en un rango de  $\pm 0.2$  mm durante el ensayo.
- Las placas de carga deben tener forma cónica ( $60^\circ$ ), truncada esféricamente ( $r=5\text{mm}$ ) según se ilustra en la figura N° 5.16. Deben estar construidas de material suficientemente duro (tungsteno o acero), que no se dañe durante el ensayo



**Figura N° 5.16 Equipo de Carga Puntual, detalle de las placas de carga cónicas.**

**Fuente: De Marco (1995)**

- El sistema de medida de carga (manómetro, celda de carga o transductor), debe permitir la determinación de la carga ( $P$ ) requerida para la rotura de la muestra con una precisión de  $\pm 2\%$   $P$ . Es esencial que posea un indicador de carga máxima, de manera que la carga de rotura quede registrada y pueda ser leída después de la falla.
- El sistema de medida debe resistir el ariete hidráulico y a las vibraciones, de forma que conserve la precisión de las lecturas durante ensayos sucesivos.
- La distancia ( $D$ ) entre los puntos de contacto roca-cono se medirá con una precisión de  $\pm 2\%$   $D$ . El sistema debe permitir verificar el “desplazamiento nulo” cuando las puntas están en contacto y preferiblemente incluir el ajuste a cero.

## Ensayo Diametral

- Insertar el espécimen en la máquina de carga (figura N° 5.17) y aproximar las puntas cónicas hasta hacer contacto en una línea diametral del núcleo de roca, asegurándose que la distancia (L) entre el punto de contacto y el extremo libre de la muestra, sea por lo menos 0.5 veces el diámetro (D) del núcleo.

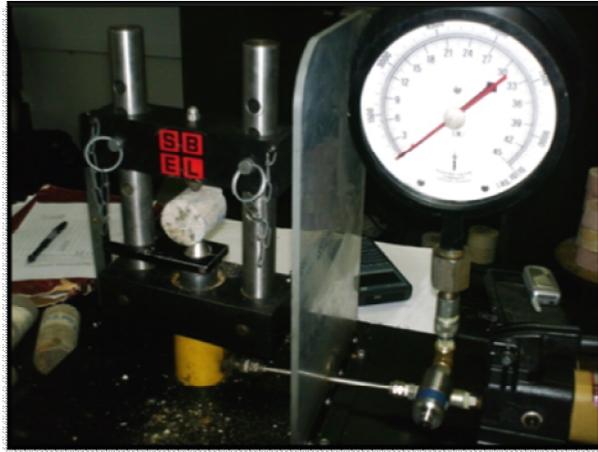


Figura N° 5.17 Ubicación de la muestra en equipo para ensayo de Carga Puntual Diametral

- Registrar la distancia  $D \pm 2\%$ , en mm, como se muestra en la figura N° 5.18
- Aplicar la carga en forma progresiva hasta que ocurra la falla (10 a 60 segundos) y registrar la carga (P), en KN.



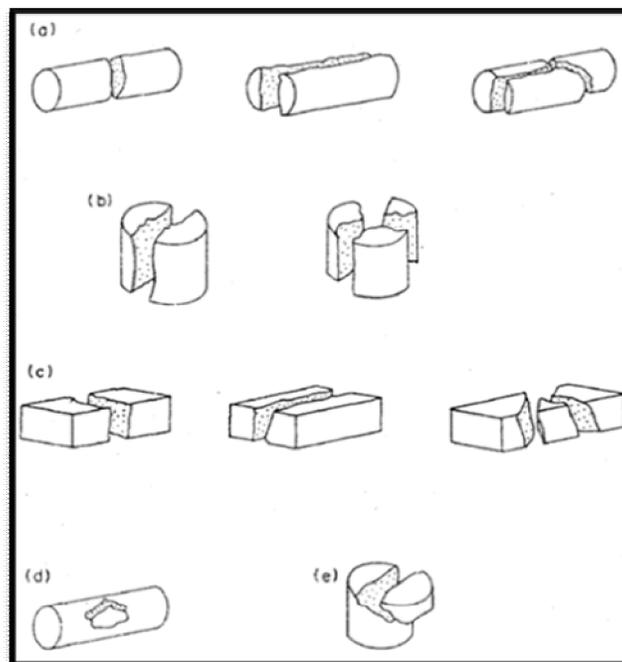
Figura N° 5.18 Registro de la distancia  $D \pm 2\%$ , en mm

- Aplicación de la carga progresiva a la muestra y forma en que debe fallar tal cual como se muestra en la figura N° 5.19



**Figura N° 5.19 Muestra ensayada bajo la técnica de Carga Puntual**

- El ensayo debe ser rechazado o invalidado si la fractura no se asemeja a los modelos de la figura N° 5.20



**Figura N° 5.20 Modos de falla típicos: a.- Ensayos diametrales, b.- Ensayos Axiales, c.- Ensayos en bloques, c.- Ensayo diametral inválido, e.- Ensayo axial invalido. Fuente: de Marco (1995)**

### 5.1.2.3 Ensayo de Corte Directo en Discontinuidades (ASTM-D5607)

Este ensayo se utiliza para determinar la resistencia al corte en discontinuidades (naturales y artificiales) en rocas homogéneas o que contengan planos de debilidad.

La resistencia al corte es determinada sobre varios esfuerzos normales aplicados al plano de falla y a varias tasas de desplazamiento (Ver figura N° 5.21). Obteniendo así:

$$\tau = \frac{\sigma}{A}$$

Donde:

$\tau$  = Esfuerzo de corte, expresado en Kilopascales (KPa)

$\sigma$  = Esfuerzo normal soportada por la muestra, expresado en Kilonewton (KN)

A = Área inicial de la sección transversal de la muestra, expresado en m<sup>2</sup>

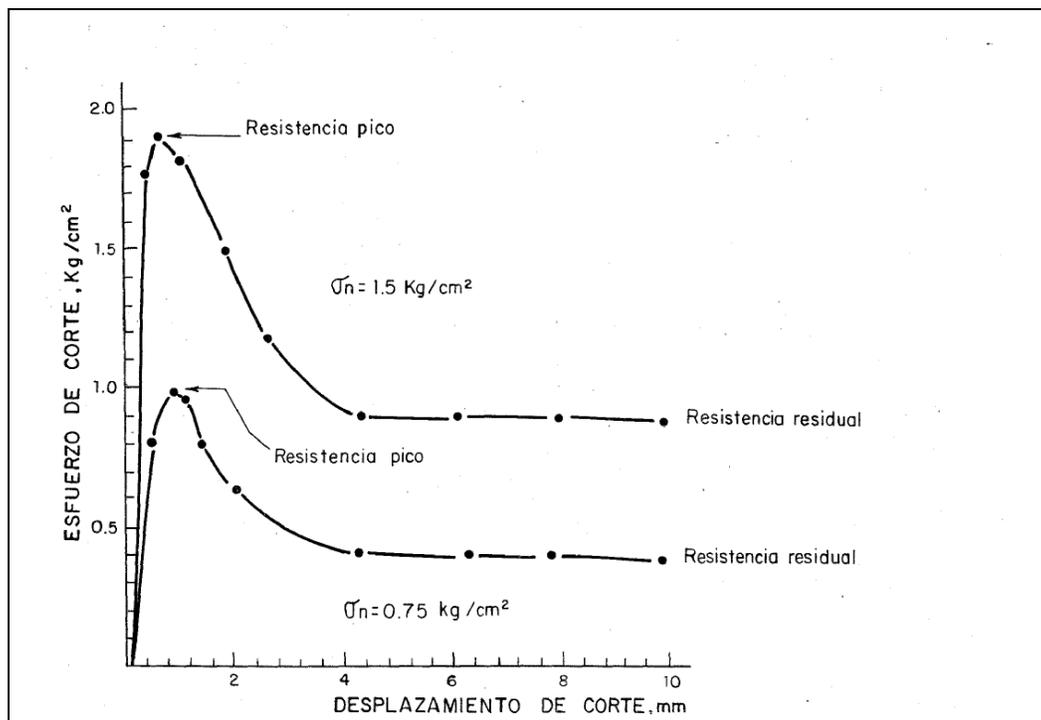


Figura N° 5.21 Curva típica esfuerzo de corte-desplazamiento de una muestra de roca

Fuente: De Marco (1995)

A medida que aumenta el esfuerzo aplicado sobre la muestra de roca ( $\sigma$ ), se va incrementando la resistencia al corte ( $\tau$ ). Luego, los resultados son graficados y mediante el uso de diversas herramientas matemáticas, obtenemos el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) y la cohesión (C). (Ver figura N° 5.22)

$$\phi = \text{Arctg} \frac{\tau}{\sigma}$$

Donde:

- $\phi$  = Área inicial de la sección transversal de la muestra, expresado en grados (°)
- $\tau$  = Esfuerzo de corte, expresado en Kilopascales (KPa)
- $\sigma$  = Esfuerzo normal, expresado en Kilopascales (KPa)

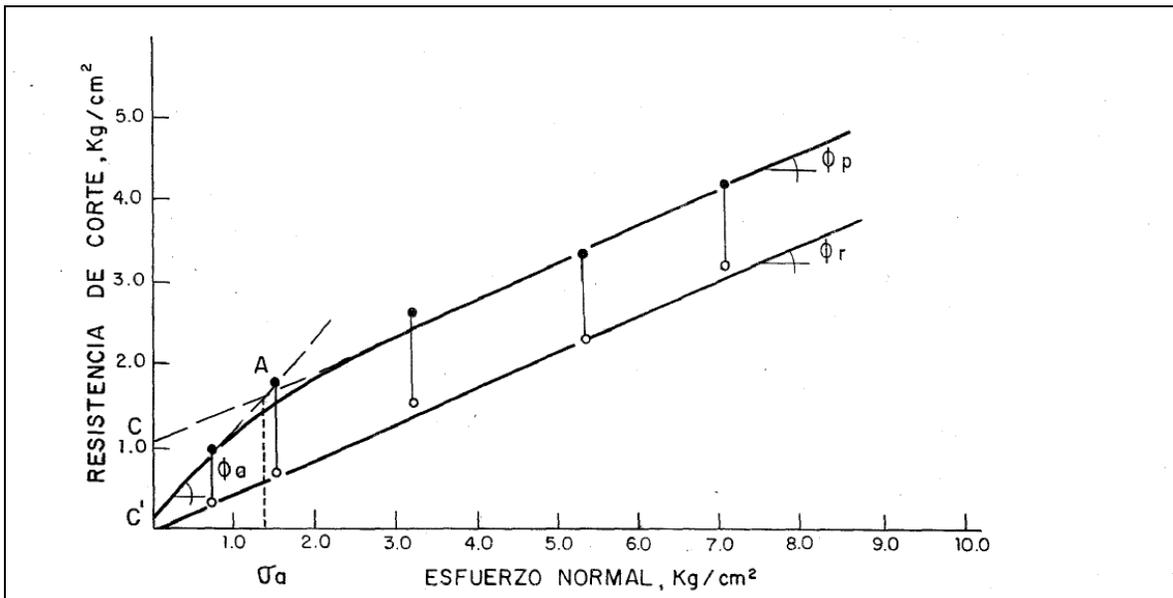


Figura N° 5.22 Representación del ensayo de corte directo, en donde se determina el ángulo de fricción de la roca ( $\phi$ ) y la cohesión (C) Fuente: De Marco (1995)

## Aparatos y Equipos Necesarios

- Sierra de diamante, cincel o cortador de núcleos.
- Alambre o cinta adhesiva para mantener los planos de la discontinuidad unidos durante el montaje de la muestra.
- Moldes desarmables para la montura del espécimen.
- Cemento, yeso dental, resina o similar, de resistencia suficiente para fijar cada mitad de la muestra.

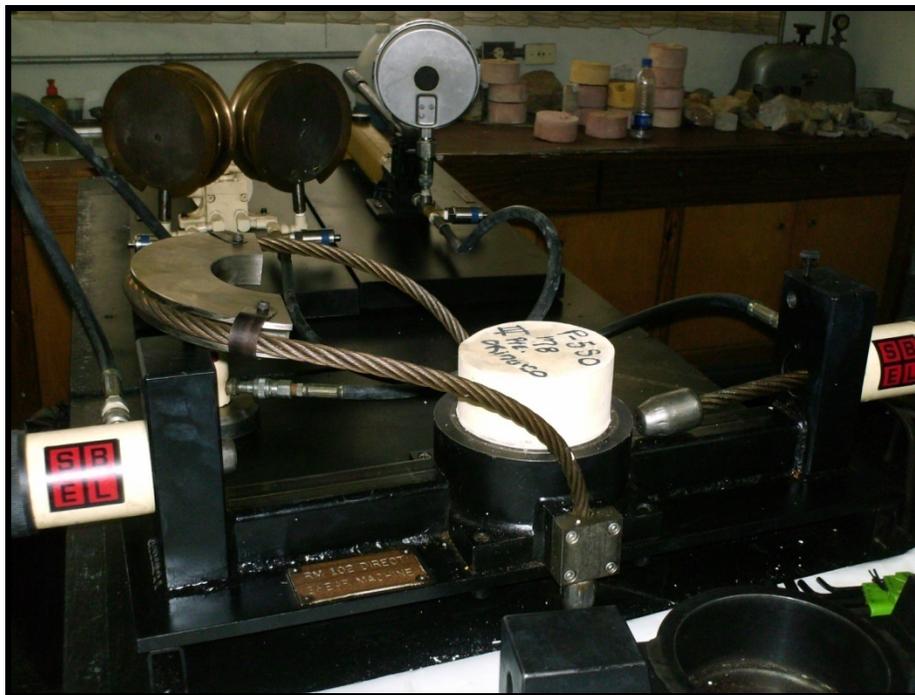
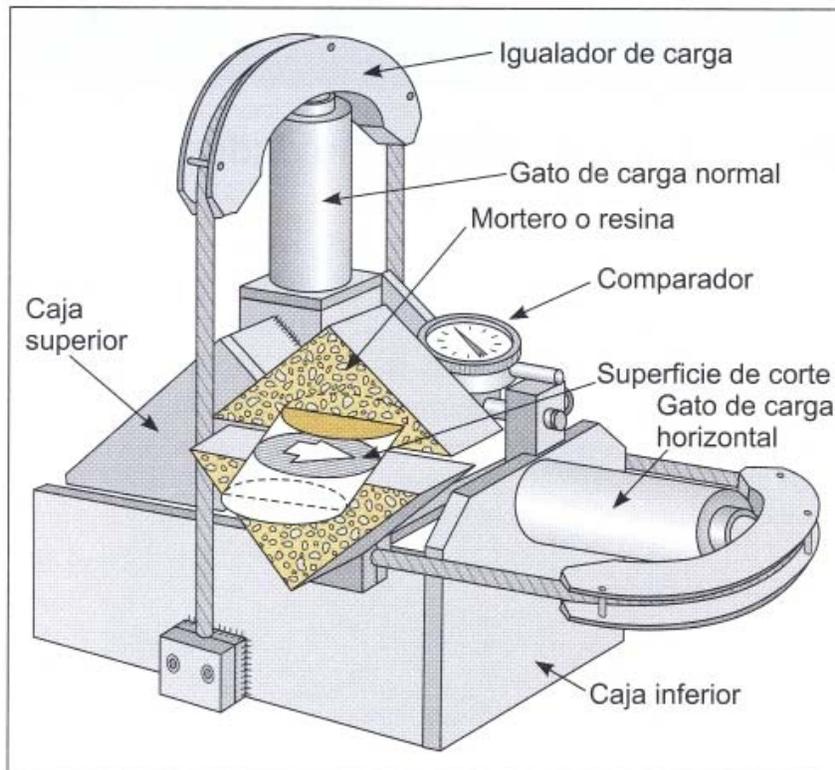


Figura N° 5.23 Equipo de Corte Directo, SBEL, RM-102. Propiedad del Laboratorio de Mecánica de Rocas, UCV

- Sistema para aplicación de carga normal, diseñada para asegurar que sea uniformemente distribuida sobre el plano a ensayar. La fuerza resultante debe actuar normal al plano de corte pasando a través del centro del área y mantenerse constante con una tolerancia del 2% del valor deseado.
- Sistema para aplicar fuerza de corte, preferiblemente en dos sentidos, diseñado de manera que la carga sea distribuida uniformemente a lo largo de la superficie de

discontinuidad y la fuerza de corte resultante actúe en el plano de corte. El equipo debe permitir un desplazamiento de corte de por lo menos el 10 % de la longitud del espécimen. Debe poseer un dispositivo de baja fricción (guayas o similares) para asegurar que la resistencia del mecanismo al desplazamiento de corte sea menor que el 1 % de la máxima fuerza de corte aplicada en el ensayo. (Figuras N° 5.23 y 5.24)

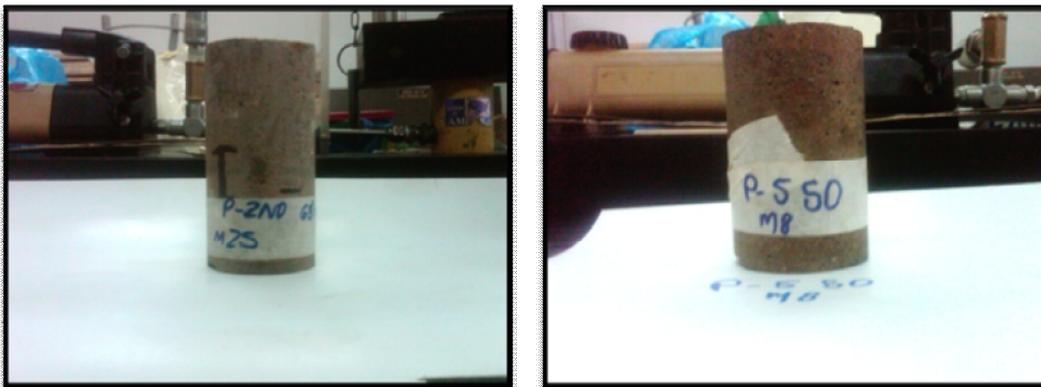
- Equipo (manómetros) para la medición independiente de las fuerzas normal y de corte con una precisión de  $\pm 2\%$  de la máxima fuerza normal alcanzada en el ensayo.
- Equipo (flexímetros) para la medición de los desplazamientos de corte, normal y lateral. En el primer caso el dispositivo debe permitir registrar un desplazamiento superior al 10 % de la longitud de la muestra, con una precisión de 0,1 mm. Para la medición de los desplazamientos normal y lateral, el equipo debe permitir un desplazamiento de 0,05 mm.
- Vernier, cronómetro, implementos para la preparación de muestras



**Figura N° 5.24 Esquema de Celda de Hoek para determinar la resistencia al corte en discontinuidades Tomado de: González de Vallejo (2002)**

### Preparación de la Muestras

- El bloque o núcleo de roca que contenga el plano de discontinuidad a ensayar, debe obtenerse por métodos que eviten en lo posible perturbación de la muestra. Las dimensiones del espécimen deben ser tales que permitan su acomodo en el molde de montaje y un encapsulamiento adecuado. Se recomienda el uso de muestras preferiblemente cuadradas con un área de corte mínima de 2500 mm<sup>2</sup> y una altura de 40 mm. Para el caso de núcleos, se sugiere utilizar los provenientes de perforaciones de diámetro NX ( $\approx 54$  mm). Con una longitud (medida en su centro) igual o superior que el diámetro. Las dimensiones máximas para el equipo SBEL-RM 102 son 80 x 80 x 80 mm. (Ver figura N° 5.25)



**Figura N° 5.25 Muestra 25 de la perforación P-2NO y muestra 8 de la perforación P-550 para ensayo de corte directo en discontinuidades.**

- Durante el montaje, la integración mecánica del espécimen debe asegurarse, manteniendo en posición y apretadas ambas caras de la discontinuidad con alambre o cinta adhesiva, que serán cortados justo antes de iniciar el ensayo.
- Colocar la muestra en el molde inferior de manera que la superficie de discontinuidad quede centrada, orientada horizontalmente y sobre salga unos 5 mm por encima del molde. El espesor de empotramiento de cada parte de muestra en el material de encapsulamiento será de por lo menos el 20% de la longitud del bloque ensayado y nunca menor de 10 mm.

- Verter en el molde el material de encapsulamiento, hasta alcanzar su tope, y esperar el fraguado. (Ver figura N° 5.26)



**Figura N° 5.26 Montaje de la muestra en el material encapsulante (Yeso dental)**

- Preparar el molde para la segunda mitad de la muestra, verter el material de encapsulado y colocar cuatro separadores de 1 cm de espesor, en el tope del molde.
- Colocar (en forma invertida) el molde con la primera parte de la muestra restante (ya fija), sobre el segundo molde de manera que la porción de la muestra restante quede embebida en el material de encapsulamiento según la mismas indicaciones que las especificadas para la primera porción.
- Esperar el fraguado, desmontar cuidadosamente el espécimen de los moldes, identificar la muestra e indicar la dirección de corte en el material de fijación. (Ver figura N° 5.27)



**Figura N° 5.27 Moldes donde se observa las muestras ya encapsuladas e identificadas para su posterior ensayo.**

## Procedimiento del Ensayo

- Colocar la muestra en la base inferior de la caja de corte, orientada según la indicación correspondiente y cubrir con la parte superior. Colocar los dispositivos para la aplicación de la carga (cables, mangueras hidráulicas). (Ver figura N° 5.28)



Figura N° 5.28 Aspectos donde se muestra el montaje del ensayo

- Cortar la cinta adhesiva y/o alambres colocados para sujetar las dos mitades de la muestra en posición.
- Colocar los flexímetros para la medición de las deformaciones normal, corte y lateral.
- Aplicar la carga normal hasta el valor especificado para el ensayo y registrar el desplazamiento normal. Las muestras húmedas o con rellenos en el plano de corte, deberán someterse a una etapa de consolidación la cual se considerará completa cuando la variación en el desplazamiento normal sea inferior de 0,05 mm en 10 min.
- Aplicar la carga de corte en forma continua, con un incremento de esfuerzo constante (del orden de 0,25 Kg/cm<sup>2</sup>) registrando los desplazamiento para cada incremento, hasta alcanzar la resistencia pico. (Deben tomarse por lo menos 10 lecturas antes de la rotura). La velocidad de aplicación de la carga debe ser tal que permita realizar las lecturas cómodamente y no debe ser superior 0,1 mm/min en esta etapa. Esta velocidad puede ser incrementada a unos de 0,5 mm/min entre lecturas, siempre que el valor de la resistencia pueda ser adecuadamente registrado.

- Luego de alcanzar la resistencia pico, las lecturas pueden ser tomadas en incrementos que pueden variar entre 0,5 y 5 mm de desplazamiento de corte, seleccionando el valor más conveniente para la definición adecuada de la curva esfuerzo-desplazamiento. La velocidad de los desplazamientos de corte, en esta fase del ensayo, será de 0,5 a 1 mm/min.
- Si se desea establecer la resistencia residual, se continuará con las lecturas hasta alcanzar por lo menos 1 cm de desplazamiento de corte. En este intervalo se registrarán cuatro mediciones, las cuales no deben mostrar una variación mayor a 5% en el valor de resistencia cortante, para satisfacer la condición residual.
- Habiendo establecido la resistencia residual, el esfuerzo normal puede ser incrementado o reducido y puede continuarse el corte para obtener los valores de resistencia residual para diferentes esfuerzos normales. Para alcanzar el desplazamiento necesario, pudiera ser necesario tener que invertir la dirección de corte o regresar la muestra a su posición inicial, sin embargo esta práctica no es conveniente. Es recomendable, el uso de muestras diferentes para la determinación del valor de resistencia pico y residual para cada esfuerzo normal aplicado.
- Una vez finalizado el ensayo, retirar los flexímetros, descargar los gatos y desmontar la caja de corte. (Ver figuras N° 5.29 y N° 5.30)

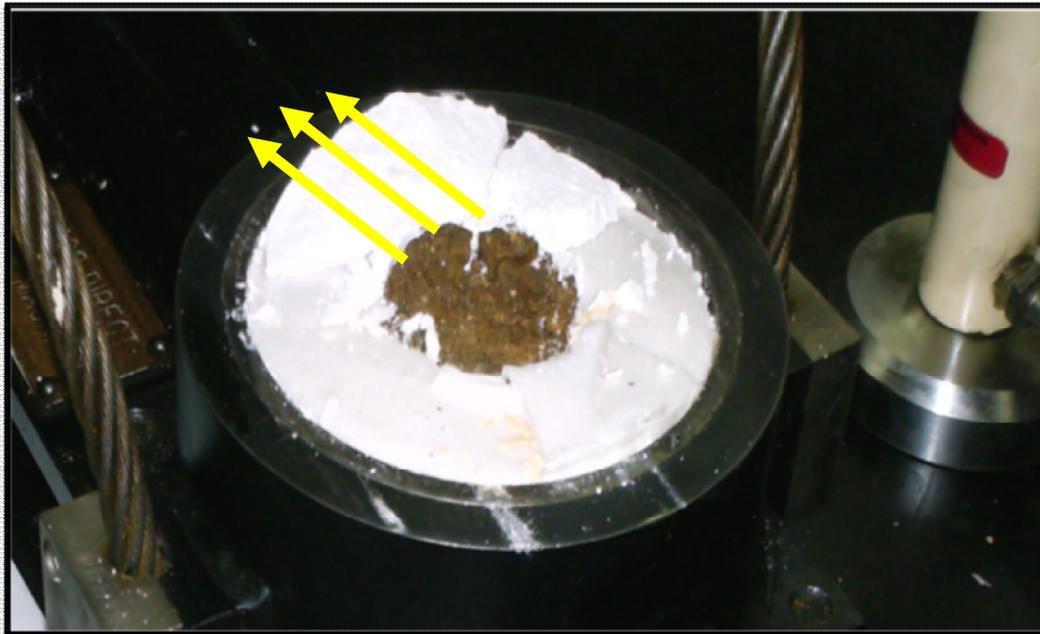


**Figura N° 5.29 Muestra 25 de la perforación P-2NO una vez de ser ensayada bajo diferentes esfuerzos normales**



**Figura N° 5.30 Muestra 8 de la perforación P-5SO una vez de ser ensayada bajo diferentes esfuerzos normales**

- Retira la muestra y verificar visualmente el planos de corte para cada ensayo. (Ver figura N° 5.31)



**Figura N° 5.31 Muestras ensayada de limolita donde se visualiza la dirección de los esfuerzo**

## **CAPITULO V**

### **PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

#### **6.1 ESTUDIO GEOLÓGICO DE LOS NÚCLEOS CORRESPONDIENTES AL TRAZADO DEL PUENTE**

Debido a las características geológicas encontradas a lo largo del eje en donde se construye el III Puente sobre el río Orinoco, se realizó un estudio más detallado del material encontrado en los núcleos provenientes de las perforaciones.

Particularmente, se deseaba conocer la génesis y las características geológicas - geotécnicas de la limolita localizada entre los 50 m y la máxima profundidad explorada (111 m).

##### **6.1.1 Descripción del Proceso de Análisis**

En primer lugar se hizo una evaluación general con lupa de aumento 10X a todas las muestras disponibles de las perforaciones para identificar su naturaleza.

Este indicó que las rocas provenientes de las perforaciones estudiadas poseen características de rocas sedimentarias detríticas. Esto fue soportado por otras evidencias tales como la presencia de materia orgánica en diferentes fases de litificación.

Una vez identificadas y clasificadas las muestras, se realizó una descripción en detalle de las propiedades más resaltantes con el fin de conocer sus características mineralógicas y texturales, tomando en cuenta:

- Aspecto de la muestra, es decir, masiva o granular.
- Tamaño de los granos, es decir, limolita, limolita-arcillas o si tiende a arcillas representando un valor aproximado en porcentaje visible con la lupa de aumento 10X.
- Ordenamiento interno, es decir, estructuras sedimentarias visibles.
- Identificación de los minerales presentes a simple vista con lupa de 10X como también de materia orgánica.

### **6.1.2 ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS DE LAS PERFORACIONES**

Las observaciones fueron realizadas con lupa de mano de 10X, apoyadas con algunos datos obtenidos de las planillas de perforación facilitadas por la empresa GEOHIDRA CONSULTORES C.A.

Se estudiaron en totalidad 33 perforaciones distribuidas a lo largo del eje del puente; estas fueron subdivididas en acceso norte, eje del río y acceso sur para su mejor comprensión e identificación.

Sobre estas divisiones mencionadas anteriormente, se seleccionaron muestras correspondientes a las perforaciones P-2N' y P-35N (Acceso Norte), PC-9AS (Eje del río), P-2S'y P-12S (Acceso Sor); con el fin de someterlas al análisis mediante la técnica de difracción de rayos X, para así conocer su composición mineralógica y por ende, hacer una comparación con los datos obtenidos en los ensayos geomecánicos.

En general, se aprecia uniformidad en las características de las muestras evaluadas, lo cual, conduce a pensar que las mismas son similares en mineralogía y génesis. Esto se tratará en mayor detalle más adelante, con los resultados de DRX a las 5 muestras analizadas.

Las características más resaltantes observadas en las muestras que se encuentran a lo largo del trayecto del eje del puente son las siguientes:

- Algunas muestras presentan un color gris-verdoso en la parte central de los núcleos, y color ocre hacia los bordes. En el intervalo comprendido entre los 50 y 70 metros de profundidad se ve una mayor tonalidad de color marrón claro, las cuales son visibles en la muestra P-30N (Ver figura N<sup>o</sup> 6.1)



**Figura N° 6.1 Muestra de limolita arenosa correspondiente a la perforación P-30N, en la cual, se observa las tonalidades gris-verdoso en la parte central y color ocre hacia los bordes.**

- Se nota también una proporción considerable de cristales de cuarzo, arena muy fina y limo, algunos teñidos por recubrimiento de oxi-hidroxidos de hierro (Ox-Fe). Esta tendencia se observa principalmente el sector denominado como “Eje del Río”, evidenciado en las muestras de la perforación PC – 9AS (Ver figura N° 6.2)



**Figura N° 6.2 Muestra de limolita arenosa correspondiente a la perforación PC – 9AS, en la cual, se pueden observar los cristales de cuarzo, arena muy fina y limo.**

- Los ejemplares de roca ubicados entre los 70 y 90 m de profundidad, poseen una mayor proporción de finos (arcillas y limos), aunque todavía son visibles los cristales de cuarzo y particularmente algunas micas, la cual, es ejemplificada en la muestra de la perforación P – 3SO (Ver figura N° 6.3)



**Figura N° 6.3 Muestra de limolita arcillosa correspondiente a la perforación P – 3SO, en la cual, se observa una mayor proporción de sedimentos finos (arcillas y limos), cristales de cuarzo y particularmente algunas micas.**

- Aunado a ello, en algunas muestras pertenecientes a las perforaciones P-27N, P-30N, P-12S, P-15SE, P-3NOP y principalmente en la P-18NE, se les observó restos de material orgánico y/o carbonáceas, las cuales son un gran indicativo de estas rocas son de origen sedimentario (Ver figura N° 6.4)



**Figura N° 6.4 Muestra de limolita carbonácea correspondiente a la perforación P – 18 NE**

- A mayor profundidad, podemos notar colores más oscuros (grisáceos) y material más fino, sin ningún indicio de laminación, presentando un aspecto masivo. (Ver figura N° 6.5)



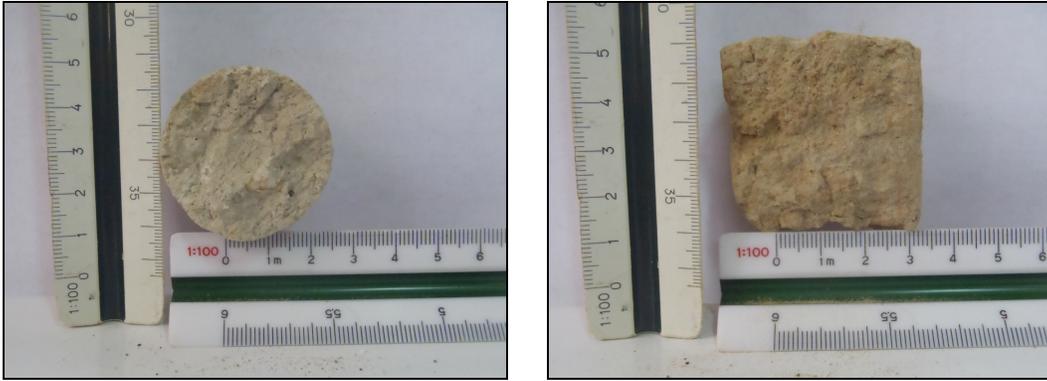
**Figura N° 6.5 Muestra de limolita arcillosa correspondiente a la perforación P-15SE en donde se observan tonos más oscuros (grisáceos) y material más fino, sin ningún indicio de laminación y presentando un aspecto masivo**

- A partir de los 100,00 m y hasta los 111 m de profundidad encontramos limos arenosos con colores más oscuros (gris azulado). Esto es evidenciado en la muestra correspondiente a la perforación P-7SC. (Ver figura N° 6.6)



**Figura N° 6.6 Muestras de limolita arenosa correspondientes a la perforación P – 7 SC, en donde pueden observar tonalidades más oscuras (gris azulado)**

- El grado de meteorización correspondiente a las muestras que están distribuidas a lo largo del trayecto de los 12 Km y entre el intervalo de 50-111 m de profundidad se definen principalmente como una roca fresca y decolorada. (Ver figura N° 6.7)



**Figura N<sup>o</sup> 6.7 Muestras de limolita arenosa correspondientes a la perforación P – 7N, en donde pueden observar tonalidades más mas claras, producto de la meteorización.**

A continuación se reseña en las tablas número 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 y 6.5 las descripciones realizadas sobre un conjunto de 75 muestras del sustrato que conforma el subsuelo comprendido entre los 50 y 111 m de profundidad.

**Tabla N° 6.1 Descripción Visual de las Muestras de Rocas Pertenecientes a las Perforaciones P-2N', P-7N, P-9N, P-27N, P-30N, P-35N, P-38N, P-39N**

<b>Perforación</b>	<b>Muestra</b>	<b>Color meteorizado</b>	<b>Color fresco</b>	<b>Aspecto de la muestra y grado de meteorización (Según González de V. 2002)</b>	<b>Tamaño de grano (%) aproximado</b>	<b>Ordenamiento interno</b>	<b>Minerales visibles y Materia orgánica</b>
P-2N'	28	Marrón claro	Marrón grisáceo (óxido)	Granular/Decolorada	Limo-arcilla (85-15)	No se observa ordenamiento interno	No se observan
P-7N	30	Marrón claro-ocre	Marrón oscuro	Granular y masiva/Fresca	Limo-arenoso (80-20)	No se observa ordenamiento interno	Se observan cristales de cuarzo
P-9N	25C	Marrón claro	Marrón grisáceo	Granular y masiva/Fresca	Limo-arena fina (75-25)	No se observa ordenamiento interno	Se observan cristales de cuarzo
P-27N	24C	Marrón claro-ocre	Marrón oscuro a azulado	Masiva y granular/Fresca	Limo arcilloso a arenoso (75-25)	No se observa ordenamiento interno	Se observan cristales de cuarzo y materia orgánica
P-30N	13	Marrón-ocre	Gris verdoso	Granular y masiva/Fresca	Limo arcilloso-arenoso fino (75-25)	No se observa ordenamiento interno	Se aprecian restos de material carbonáceos
P-35N	11C-1,8A-1, 8A-2, 8A-3, 8C-1,8C-2,9A, 11A,11C, 12A, 12C, 9B-1,9B-2, 9B-3	Marrón claro	Marrón rojizo (óxido)	Masiva y granular/Decolorada	Limo-arenoso (85-15)	No se observa ordenamiento interno	Se observan cristales de cuarzo
P-38N	57A	Marrón rojizo-ocre	Marrón rojizo-gris verdoso (óxido)	Masiva y granular/Decolorada	Limo-arenoso (80-20)	No se observa ordenamiento interno	No se observan
P-39N	56	Marrón oscuro	Marrón rojizo-azulado (presencia de óxido)	Masiva y granular/Decolorada	Limo-arenoso (80-20)	No se observa ordenamiento interno	No se observan

**Tabla N° 6.2 Descripción Visual de las Muestras de Rocas Pertenecientes a las Perforaciones P-5NE, P-7NE, P-18NE, P-1NO', P-2NO**

<b>Perforación</b>	<b>Muestra</b>	<b>Color meteorizado</b>	<b>Color fresco</b>	<b>Aspecto de la muestra y grado de meteorización (Según González de V. 2002)</b>	<b>Tamaño de grano (%) aproximado</b>	<b>Ordenamiento interno</b>	<b>Minerales visibles y Materia Orgánica</b>
P-5NE	15	Marrón mostaza	Marrón claro	Granular y masiva/Fresca	Limo -arcilloso (80-20)	No se observa ordenamiento interno	No se observan
P-7NE	28	Gris claro	Gris verdoso	Granular y masiva/Fresca	Limo-arenoso (80-20)	No se observa ordenamiento interno	Se observan cristales de cuarzo
P-18 NE	38	Gris claro	Verde grisáceo, presencia de óxido	Masiva y granular/Decolorada	Limo-arenoso (60-40)	No se observa ordenamiento interno	Se observan cristales de cuarzo y trazas carbonáceas
P-1NO'	12,13	marrón–naranja (presencia de óxido)	Gris claro	Granular y masiva/Decolorada	Limo-arcilloso (70-30)	No se observa ordenamiento interno	Presencia de cristales de cuarzo
P-2NO	25A, 26A, 26B,26C, 26D, 26E, 26F	Gris claro	Gris rojizo (óxido)	Masiva/Fresca	Limo-arenoso (70-30)	No se observa ordenamiento interno	Presencia de cristales de cuarzo
	13A,13B,20B	Gris claro	Gris oscuro	Masiva/Decolorada	Limo-arcilloso (80-20)	No se observa ordenamiento interno	Se observan cristales de cuarzo

**Tabla N° 6.3 Descripción Visual de las Muestras de Rocas Pertenecientes a las Perforaciones P-6NO, P-3NOP, PC-9AS, P-6C, P2SO**

<b>Perforación</b>	<b>Muestra</b>	<b>Color meteorizado</b>	<b>Color fresco</b>	<b>Aspecto de la muestra y grado de meteorización (Según González de V. 2002)</b>	<b>Tamaño de grano (%) aproximado</b>	<b>Ordenamiento interno</b>	<b>Minerales visibles y Materia orgánica</b>
P-6NO	28C2	Gris claro	Gris azulado	Masiva y granular/Fresca	Limo- arena fina (80-20)	No se observa ordenamiento interno	Láminas de mica y cristales de cuarzo
P-3NOP	12	Gris azulado claro	Gris verdoso	Masiva/Fresca	Limo-arena muy fina (90-10)	No se observa ordenamiento interno	Muy fracturada y restos de material carbonáceos
PC-9AS	70,71A-2, 71A-3	Gris claro	Gris medio a oscuro	Granular/Fresca	Arena media-arena gruesa (80-20)	No se observa ordenamiento interno	Son visibles cristales de cuarzo y micas
	27	Café claro	Café oscuro	Masiva/Fresca	Limo arcilloso (85-15)	No se observa ordenamiento interno	Presencia de cuarzo y mica
P-6C	75	Gris claro	Gris verdoso	Granular y masiva/Fresca	Limo-arena (90-10)	No se observa ordenamiento interno	Se observan cristales de cuarzo
P-2SO	11,12, 12-1,22,22A, 22B	Marrón-ocre	Marrón-Naranja (óxido).	Masiva/Decolorada	Limo-arena (70-30)	No se observa ordenamiento interno	Se observan cristales de cuarzo

**Tabla N° 6.4 Descripción Visual de las Muestras de Rocas Pertenecientes a las Perforaciones P-3SO, P-4SO, P-5SO, P-14SO, P-7SC, P-9SE, P-15SE**

<b>Perforación</b>	<b>Muestra</b>	<b>Color meteorizado</b>	<b>Color fresco</b>	<b>Aspecto de la muestra y grado de meteorización (Según González de V. 2002)</b>	<b>Tamaño de grano (%) aproximado</b>	<b>Ordenamiento interno</b>	<b>Minerales visibles y Materia orgánica</b>
P-3SO	30	Gris claro	Gris oscuro	Masiva/Fresca	Limo-arcilloso (85-15)	No se observa ordenamiento interno	Presencia de pequeños cristales de cuarzo y micas
P-4SO	75	Gris claro	Gris verdoso	Granular y masiva/Fresca	Limo-arenoso (70-30)	No se observa ordenamiento interno	No se observan
P-5SO	8A,8B, 8C,8D, 8E,8F, 8G,8H, 9	Gris rojizo	Gris azulado con tonos rojos (óxido).	Masiva/Decolorada	Limo-arcilloso (90-10)	No se observa ordenamiento interno	Se observan pequeñas láminas de micas
P-14SO	23A	Gris claro	Gris verdoso	Masiva/Fresca	Limo-arcilloso (80-20)	No se observa ordenamiento interno	Presencia de cuarzo
P-7SC	1	Marrón claro	Gris azulado	Masiva y granular/Decolorada	Limo-arenoso (80-20)	No se observa ordenamiento interno	No se observan
P-9SE	29	Marrón oscuro	Marrón oscuro azulado	Masiva/Fresca	Limo-arcilloso (90-10)	No se observa ordenamiento interno	Fracturada y restos de material carbonáceos
P-15SE	22C	Marrón oscuro	Gris azulado a gris verdoso	Masiva/Fresca	Limo-arcilloso (80-20)	No se observa ordenamiento interno	Se observa material carbonáceo

**Tabla N° 6.5 Descripción Visual de las Muestras de Rocas Pertenecientes a las Perforaciones P-1S, P-2S', P-3S, P-8S, P-12S, P-21S, P-37S, P-49S**

<b>Perforación</b>	<b>Muestra</b>	<b>Color meteorizado</b>	<b>Color fresco</b>	<b>Aspecto de la muestra y grado de meteorización (Según González de V. 2002)</b>	<b>Tamaño de grano (%) aproximado</b>	<b>Ordenamiento interno</b>	<b>Minerales visibles y Materia orgánica</b>
P-1S	1,1B,1C,1D,1E,1F	Marrón claro	Gris con manchas marrón oscuro	Masiva/Fresca	Limo-arenoso (85-15)	No se observa ordenamiento interno	Presencia cristales de cuarzo
P-2S'	3,3A,3B	Gris claro	Gris oscuro con tonos marrón amarillento	Masiva y granular/Fresca	Limo-arenoso (80-20)	No se observa ordenamiento interno	Presencia cristales de cuarzo
P-3S	5,5A,5B	Marrón	Gris con manchas marrón oscuro	Masiva/Fresca	Limo-arenoso (85-15)	No se observa ordenamiento interno	Presencia cristales de cuarzo
	6A,7A	Marrón claro	Gris con manchas marrón oscuro	Masiva/Fresca	Limo-arenoso (85-15)	No se observa ordenamiento interno	Presencia cristales de cuarzo
P-8S	3A,3B	Gris claro	Gris oscuro con tonos azulados	Masiva/Fresca	Limo-arenoso (70-30)	No se observa ordenamiento interno	No se observan
P-12S	29	Marrón claro-azulado tenue	Gris claro	Granular/Fresca	Limo-arenoso (80-20)	No se observa ordenamiento interno	Se observa trazas de material orgánico
P-21S	42	Marrón claro	Marrón oscuro azulado con zonas rojizas (Oxido)	Masiva/Fresca	Limo-arena muy fina (70-30)	No se observa ordenamiento interno	Presencia cristales de cuarzo
P-37S	26	Marrón claro	Marrón oscuro azulado con zonas rojizas (Oxido)	Masiva/Fresca	Limo-arena muy fina (75-25)	No se observa ordenamiento interno	Presencia cristales de cuarzo
P-49S	26	Marrón grisáceo	Marrón oscuro azulado con zonas rojizas (Oxido)	Masiva/Fresca	Limo-arena muy fina (80-20)	No se observa ordenamiento interno	Presencia cristales de cuarzo

### 6.1.3 RESULTADOS DEL CONTENIDO MINERALÓGICO DE LOS NÚCLEOS DE LIMOLITA MEDIANTE LA TÉCNICA DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)

Se analizaron por DRX 5 muestras pertenecientes a las perforaciones ejecutadas a lo largo de un trayecto de 12 Km correspondiente al trayecto donde se construye el III Puente Sobre el río Orinoco, ubicado entre las poblaciones de Caicara del Orinoco y Cabruta, edos. Guárico y Bolívar.

Las muestras se sometieron mediante el análisis de roca total, empleando un difractómetro marca Philips modelo “step scanning”: PW 3020 (Figura N° 5.3) para así identificar la mineralogía existente, la cual se realizó en el Laboratorio de Difracción y Fluorescencia de Rayos X de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, de la Universidad Central de Venezuela. Este análisis ha sido aplicado con éxito en los núcleos de limolita estudiados en este trabajo.

Las muestras analizadas mediante la técnica de difracción de rayos X se indican en la tabla N° 6.6

**Tabla N° 6.6 Muestras a analizadas mediante la técnica de DRX**

Perforación	Muestra	Profundidad (m)
P-2S'	3	45,00-45,85
P-12S	29	64,50-65,00
PC-9AS	27	72,00
P-2N'	28	98,70
P-35N	18	65,00-68,00

Los resultados de la mineralogía en muestra total, producto del análisis por DRX arrojaron un total de 5 componentes mineralógicos:

- 1.- Cuarzo
- 2.- Moscovita
- 3.- Plagioclasa
- 4.- Caolinita
- 5.- Illita

De manera general, la composición mineralógica de las rocas analizadas sigue una tendencia común en donde la totalidad de las muestras presentan minerales de arcilla (caolinita) y cuarzo en su composición.

A continuación se detalla en la tabla N° 6.7 los minerales presentes en cada muestra analizada:

**Tabla N° 6.7 Minerales encontrados en las muestras mediante la técnica de difracción de rayos X**

Perforación	Muestra	DRX
		Mineral-Formula
P-12S	29	Cuarzo. $\text{SiO}_2$ Caolinita. $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$
PC-9AS	27	Cuarzo. $\text{SiO}_2$ Caolinita. $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$ Illita. $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$
P-35N	18	Cuarzo. $\text{SiO}_2$ Caolinita. $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$ Moscovita. $\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ Plagioclasa. $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$
P-2S'	3	Cuarzo. $\text{SiO}_2$ Caolinita. $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$ Illita. $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$
P-2N'	28	Cuarzo. $\text{SiO}_2$ Caolinita. $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$ Illita. $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$

Cabe destacar que para una mayor comprensión se detalla a continuación los difractogramas de cada muestra donde se indica los resultados arrojados por el equipo de difracción de rayos X.

### 6.1.3.1 Perforación P-2N', Muestra 28

El anexo 3 contiene el perfil con la ubicación de la perforación P-2N' muestra 28, y en la figura N° 6.8 se encuentran los resultados arrojados por el difractómetro de los minerales encontrados.

El análisis de DRX de la muestra 28, denota la presencia de cuarzo, como el elemento más abundante en la muestra; así como también minerales de arcilla (caolinita e illita) que se ven claramente que estos forman parte de la matriz de la roca.

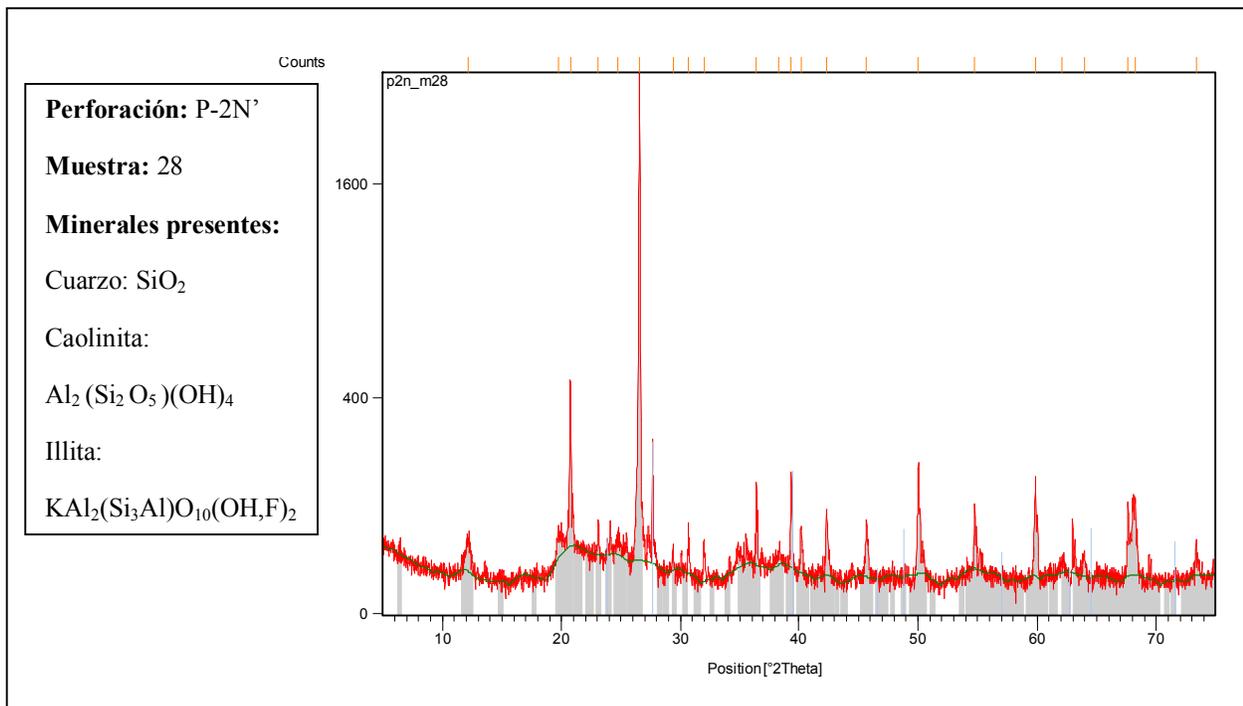


Figura N° 6.8 Difractograma correspondiente a la perforación P-2N', muestra 28

### 6.1.3.2 Perforación P-2S', Muestra 3

El anexo 3 contiene el perfil con la ubicación de la perforación P-2S' muestra 3 y en la figura N° 6.9 se encuentran los resultados arrojados por el difractómetro de los minerales encontrados.

El análisis de DRX de la muestra 3, denota la presencia de cuarzo, así como también minerales de arcilla (caolinita e illita) en la cual se ve claramente que estos se encuentran formando parte de la matriz de la roca.

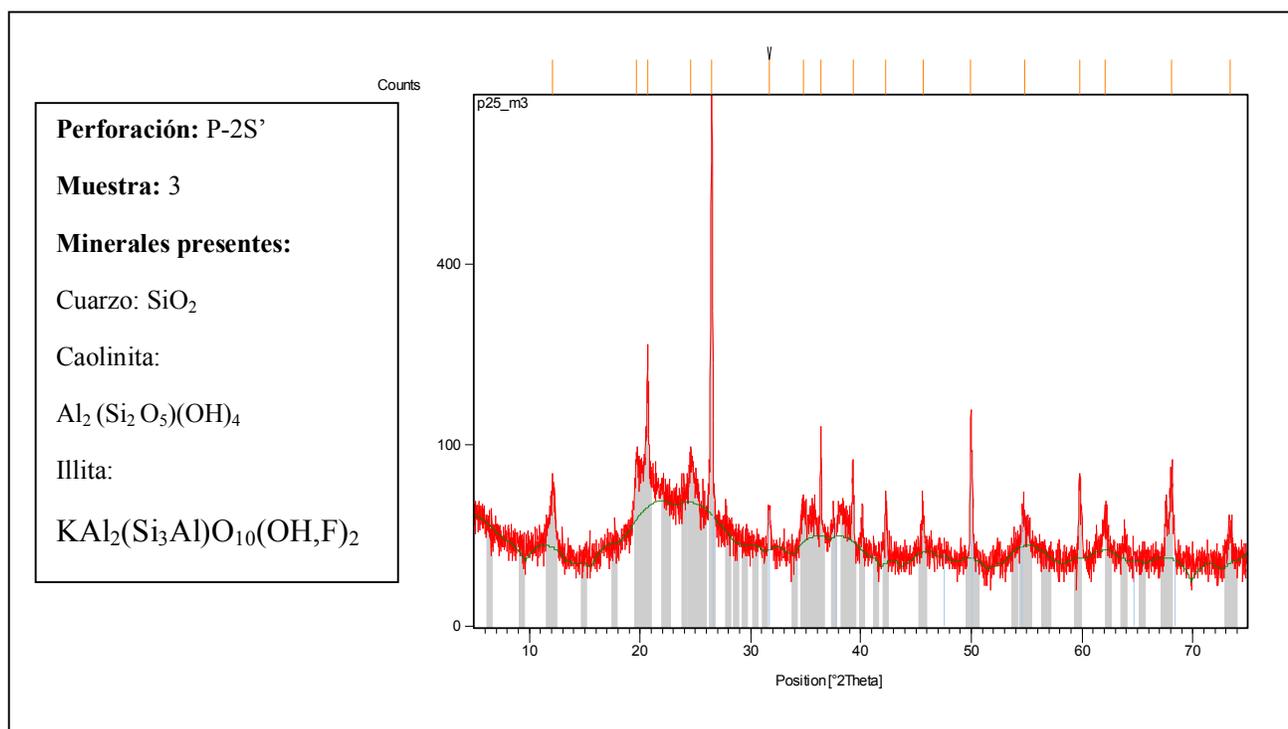


Figura N° 6.9 Difractograma correspondiente a la perforación P-2S', muestra 3

### 6.1.3.3 Perforación P-35N, Muestra 18

El anexo 3 contiene el perfil con la ubicación de la perforación P-35N muestra 18 y en la figura N° 6.10 se encuentran los resultados arrojados por el difractor de los minerales encontrados.

El análisis de DRX de la muestra 18, denota la presencia de los minerales cuarzo y plagioclasa como componentes principales de la matriz, además de caolinita como cemento de la roca y moscovita como accesorio.

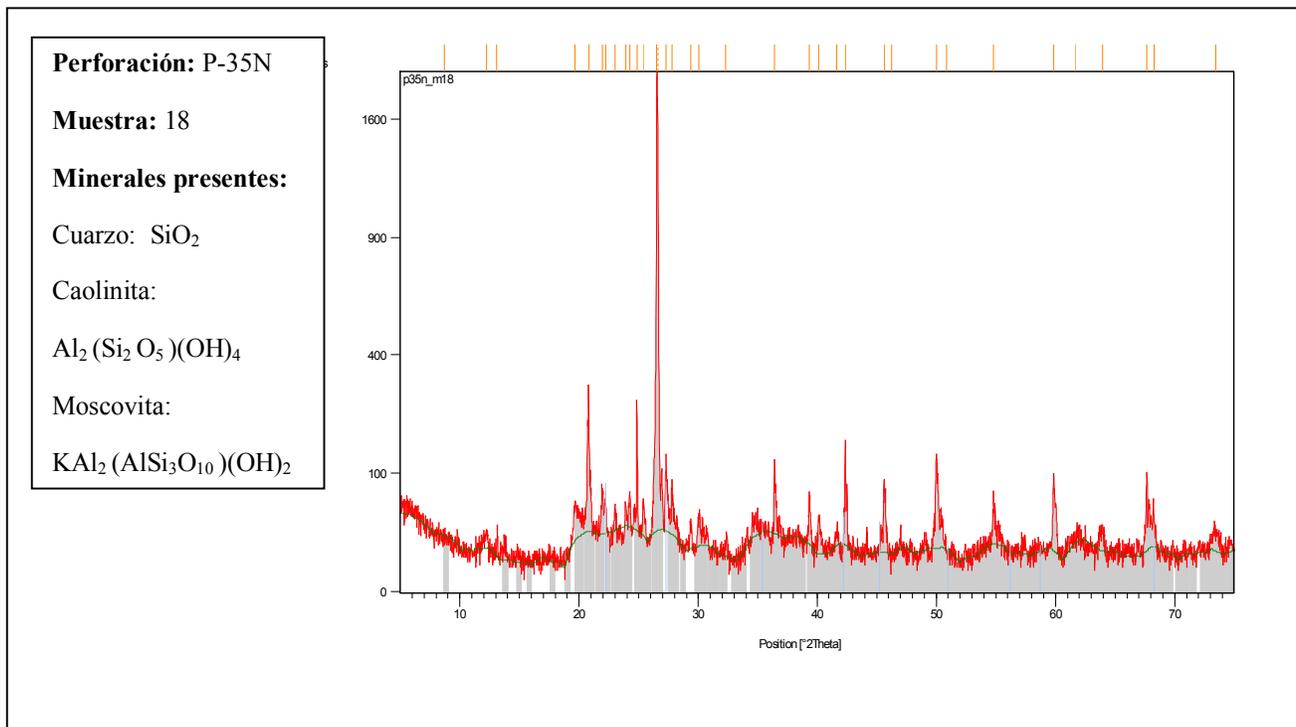


Figura N° 6.10 Difractograma correspondiente a la perforación P-35N, muestra 18

#### 6.1.3.4 Perforación PC-9AS, Muestra 27

El anexo 3 contiene el perfil con la ubicación de la perforación PC-9AS muestra 27 y en la figura N° 6.11 se encuentran los resultados arrojados por el difractómetro de los minerales encontrados.

El análisis de DRX de la muestra 27, denota la presencia de cuarzo, como además la presencia de minerales de arcilla (caolinita e illita) que se ven claramente que estos se encuentran formando parte de la matriz.

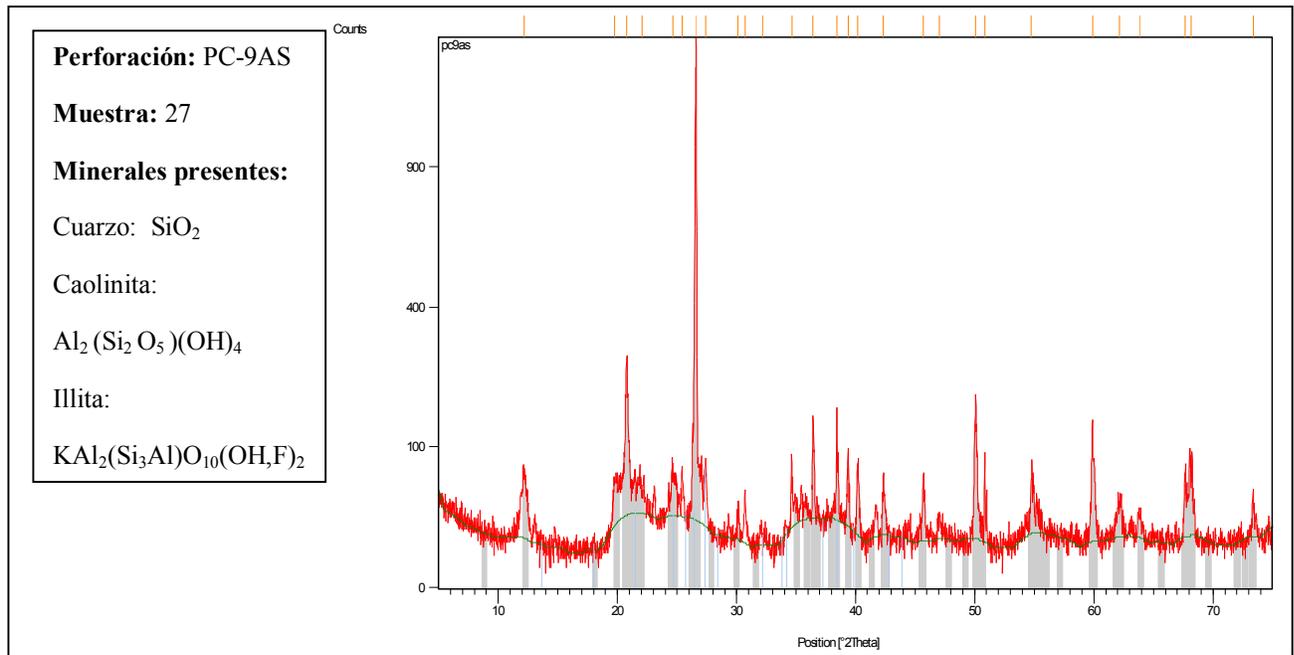


Figura N° 6.11 Difractograma correspondiente a la perforación PC-9AS, muestra 27

### 6.1.3.5 Perforación P-12S, Muestra 29

El anexo 3 contiene el perfil con la ubicación de la perforación P-12S muestra 29 y en la figura N° 6.12 se encuentran los resultados arrojados por el difractómetro de los minerales encontrados.

El análisis de DRX de la muestra 29, denota la presencia del mineral cuarzo, acompañado de caolinita.

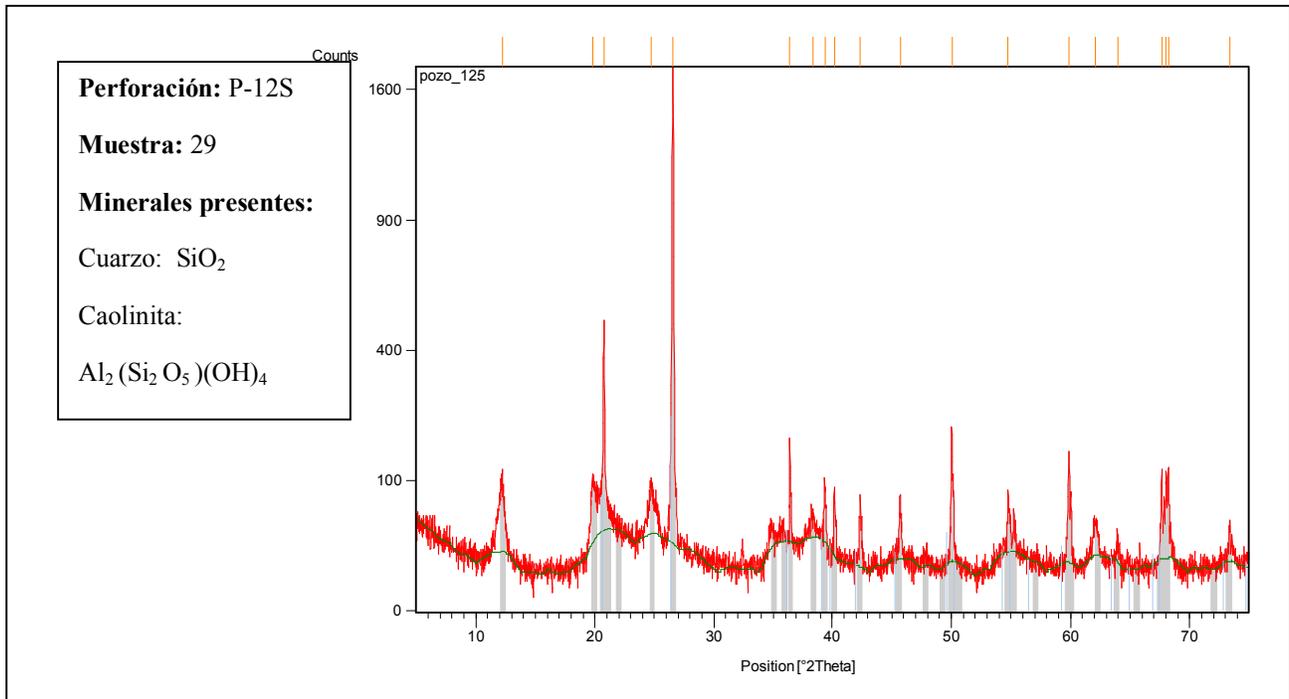


Figura N° 6.12 Difractograma correspondiente a la perforación P-12S, muestra 29

#### **6.1.4 ANÁLISIS DEL CONTENIDO MINERALÓGICO DE LOS NÚCLEOS DE LIMOLITA (DESCRIPCIÓN VISUAL Y DRX)**

La descripción visual, con base a los aspectos indicados en la sección 6.1.2 fue realizada utilizando los 33 núcleos disponibles a partir de las muestras recuperadas de las siguientes fuentes. (Ver figura N° 6.13)

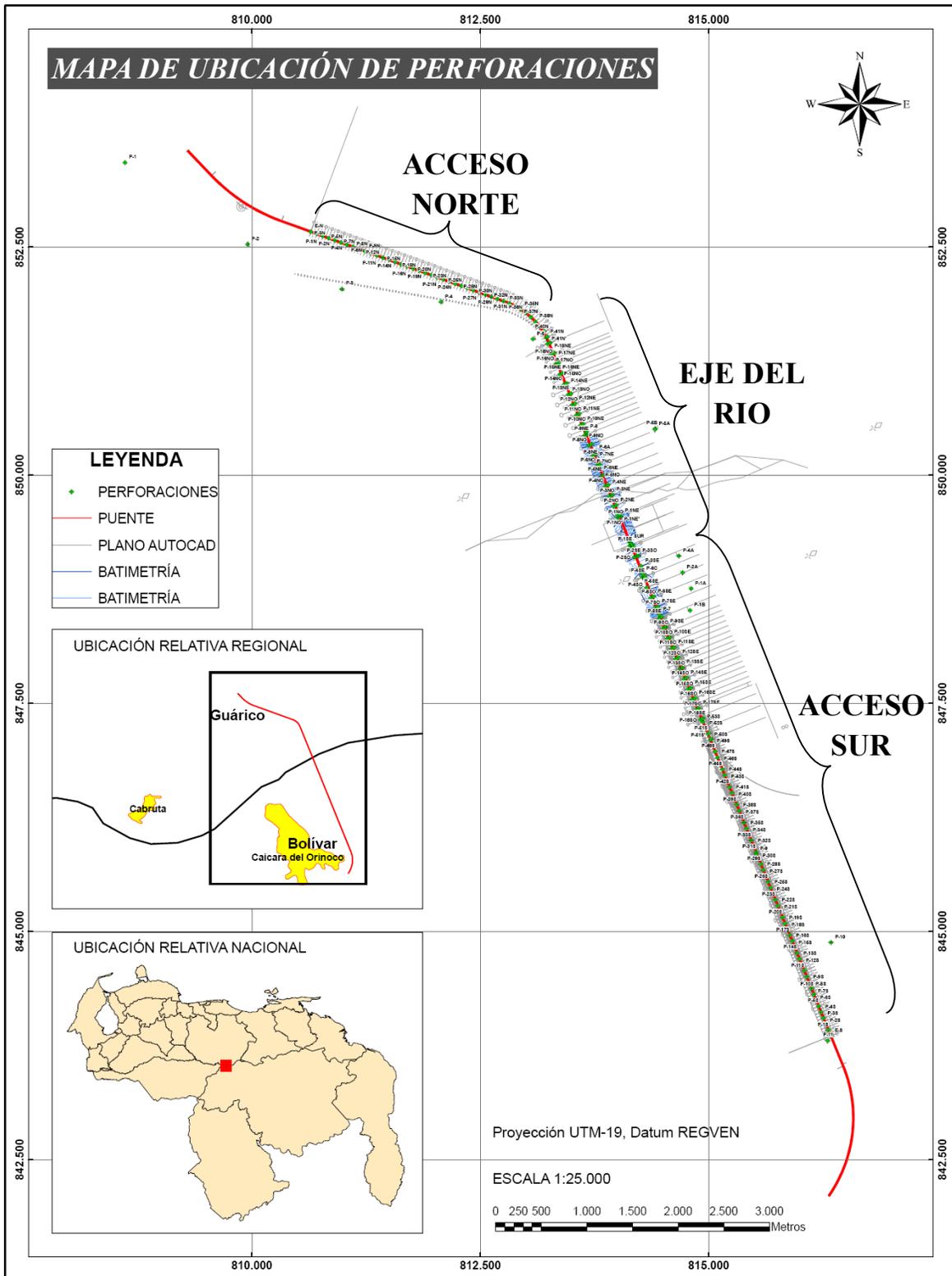
- Seis (6) perforaciones pertenecientes al Acceso Norte (P-2N', P-7N, P-9N, P-27N, P-30N, P-35N).
- Diecisiete (17) perforaciones correspondientes al Eje del Río (P-38N, P-39N, P-18NE, P-7NE, P-6NO, P-5NE, P-3NOP, P-2NO, P-1NO', PC-9AS, P-2S0, P-3SO, P-6C, P-4SO, P-5SO, P-7SC, P-9SE).
- Diez (10) perforaciones pertenecientes al Acceso Sur (P-14SO, P-15SE, P-49S, P-37S, P-21S, P-12S, P-8S, P-3S, P-2S', P-1S).

En rasgos generales, encontramos una proporción mayoritaria de granos de cuarzo, como el compuesto más abundante, feldespatos calco-sódicos (plagioclasas), minerales de arcilla (caolinita e illita), y accesorios como moscovita; detectados estos últimos por difracción de rayos X.

Los granos observados con lupa de campo de aumento 10X, presentan tamaños que están dentro del rango de arenas finas, siendo incluso muchos de ellos tamaño limo. Estas características nos hacen indicar poca madurez textural y que posiblemente estos minerales provenientes de la roca fuente estuvieron muy cercanos a la cuenca de depositación.

Todas las muestras pertenecientes a las 33 perforaciones no presentan ningún patrón de distribución o arreglo específico de sus componentes; más bien su aspecto es mayoritariamente masivo y algunas granular. Por otro lado, algunas presentan meteorización relacionando este aspecto a la existencia de minerales con una alta susceptibilidad (Ej. plagioclasas y moscovita), lo cual traduce que los sedimentos de estas rocas han sufrido poco transporte, lo que indica su cercanía a la roca fuente.

Los minerales de arcilla (caolinita e illita) mencionados anteriormente forman parte de la matriz de estas rocas sedimentarias; cabe destacar que estos minerales que están entre los 50 m y 70 m de profundidad son producto de la alteración de los feldespatos, bajo condiciones de meteorización intensa como la que caracteriza al Escudo de Guayana.



**Figura N° 6.13** Mapa de ubicación donde se muestra la sectorización de las perforaciones de la zona en estudio, definidas como acceso norte, eje del río y acceso sur

Toda la mineralogía presente en estas rocas así como las condiciones de poca madurez aunada a una distribución granulométrica heterogénea nos indican que encontramos limos arenosos hacia la Margen Sur (Caicara del Orinoco) y limos arcillosos hacia la Margen Norte (Cabruta) dejando claro además que estas rocas sedimentarias fueron depósitos fluviales en ambiente litoral y que los mismos varían de acuerdo a su profundidad.

La presencia de materia orgánica (carbón), en diferentes fases de litificación; encontradas en algunas muestras del trazado del puente debió estar influenciada por ambientes de aguas restringidas (poco oxígeno), los cuales favorecieron la acumulación de estos mismos

En general, se aprecia uniformidad en las muestras evaluadas, lo cual nos indica que las mismas son similares en mineralogía y génesis, todas estas características indican claramente su origen sedimentario y que la fuente de estos minerales son de origen ígneo, muy probablemente de las rocas aflorantes del basamento precámbrico del Escudo de Guayana.

## **6.2 CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DE LOS NÚCLEOS DE LIMOLITA**

Se realizaron ensayos especiales para determinar el comportamiento geomecánico de las muestra de roca pertenecientes al sector en estudio. Para esto se modeló en laboratorio las condiciones de esfuerzo a las cuales está sometida la muestra de roca en el sitio. Estos estudios se ejecutaron siguiendo las especificaciones de la ASTM (*American Society for Testing and Materials*).

La información que se deriva de los diversos ensayos geomecánicos realizados sobre las limolitas de la región comprendida entre Caicara del Orinoco y Cabruta, se presentan resumidas en el anexo N° 4 permitiendo así establecer algunas consideraciones generales sobre las propiedades de estas rocas analizadas.

### **6.2.1 Clasificación Según el Estado Físico de la Roca**

Como la clasificación de un determinado material rocoso depende principalmente de la apreciación visual, es indispensable tener bien claro los conceptos de textura, estructura y estado físico para así poder llegar a las definiciones correctas y lograr así mayor uniformidad en las diferentes clasificaciones. De este modo no se analizaría aisladamente, la muestra, sino que se interpretaría como representativa del sitio de estudio.

Con este sistema de clasificación, nos convencemos de la necesidad de evitar relacionar siempre el término “roca” con el adjetivo “duro”. Es importante destacar el grado que tiene el uso correcto de cada uno de los términos físicos propuestos por Flores Calcaño (1962).

Para una mayor comprensión del lector acerca de este tema, se hace un análisis de este parámetro desde dos puntos de vista:

- **Desde el punto de vista cuantitativo–cualitativo**

Debido a los rasgos observados en las descripciones visuales correspondientes a las 112 muestras totales provenientes de las perforaciones de la zona en estudio, se puede clasificar a un gran grupo de limolitas estudiadas como Roca meteorizada blanda (RMB) con 39 ejemplares (34.82% del total analizado)

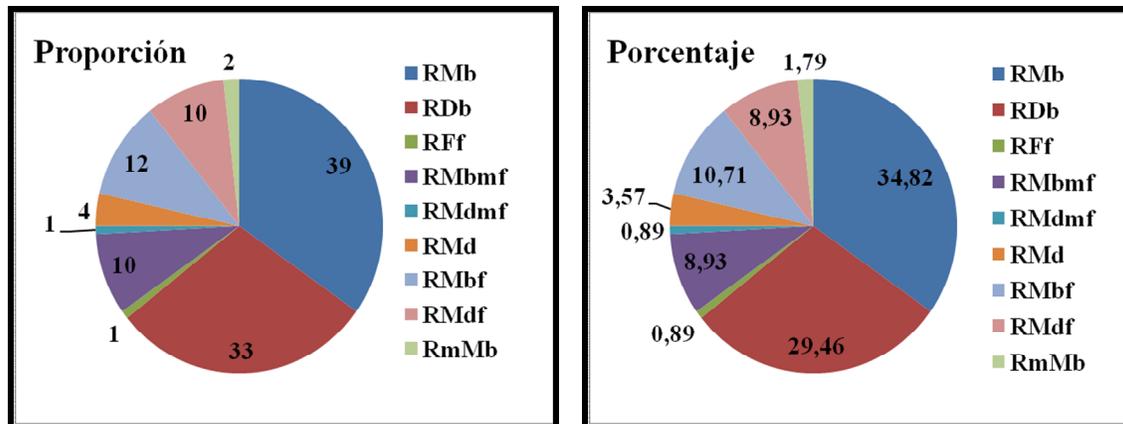
Por otro lado, 33 ejemplares de limolita analizados presentan características correspondientes a una Roca descompuesta blanda (RDB), la cual representa un 29.46% del total de material rocoso estudiado.

También se puede apreciar que 12 muestras de limolita del total analizado, se clasifican como una Roca meteorizada blanda fracturada (RMBf), representando un 10.71%.

Aunado a ello, podemos observar 10 muestras que fueron clasificadas como Roca meteorizada blanda muy fracturada (RMBmf) y otros 10 ejemplares de roca que se identificaron como Roca meteorizada dura fracturada (RMdf), ocupando cada uno una proporción de 8.93% respectivamente.

No obstante, dentro del total de muestras de roca analizadas podemos encontrar pequeñas cantidades de material rocoso que se caracterizan por ser poco comunes dentro de los rangos de clasificación estipulados por el mencionado autor. Tal es el caso de 4 muestras identificadas como Roca meteorizada dura (RMd), la cual representa un 3.57% del total estudiado.

De acuerdo a lo anterior, también fueron clasificados 2 muestras rocosas como Roca muy meteorizada blanda (RmMb), 1 ejemplar como Roca fracturada fresca (Rff) y otro ejemplar como Roca meteorizada dura muy fracturada (RMdmf); ocupando así los porcentajes totales de 1.79%, 0.89% y 0.89% respectivamente. (Ver figuras numero N° 6.14 y N° 6.15)



Figuras N° 6.14 y N° 6.15 Gráficos en donde muestran las proporciones y porcentajes de las muestras de limolitas analizadas desde el punto de vista cuantitativo-cualitativo

- **Desde el punto de vista de ubicación espacial**

Aquí, se toma en cuenta la ubicación de las perforaciones a lo largo del transecto de 12 Km que compone el área de construcción del futuro III puente. Este a su vez como se ha mencionado en anteriores oportunidades, se ha subdividido en tres (3) tramos: Acceso Norte, Eje del Río y Acceso Sur, las cuales están plasmadas sobre en el mapa y perfil geotécnico situado en la sección de anexos

En la zona del proyecto denominada como “Acceso Norte”, la cual está hacia la población de Cabruta – estado Guárico. En este sector se encuentran ubicadas las perforaciones P-2N’, P-7N, P-9N, P-27N, P-30N y P-35N; con intervalos de profundidad abarcados desde los 56,00 y 98,70 metros. Allí se encontraron muestras de limolita identificadas como:

- Roca descompuesta blanda (RDb) y
- Roca meteorizada blanda (RMb)

La zona identificada como “Eje del Río”, se encuentra ubicada en pleno afluente del Orinoco. En esta área se encuentran las perforaciones P-38N, P-39N, P-18NE, P-7NE, P-6NO, P-5NE, P-3NOP, P-7SC, P-2NO, P-1NO’, PC-9AS, P-2SO, P-3SO, P-6C, P-4SO, P-5SO, P-9SE; con intervalos de profundidad abarcados generalmente entre los 68,00 y 104,40 metros. Este intervalo presenta una gran complejidad y variedades de estados físicos de la roca, la cual se asume sea debido a las diversas condiciones sedimentarias fluctuantes. Allí se identificaron muestras de limolita como:

- Roca meteorizada blanda (RMb)
- Roca descompuesta blanda (RDb)
- Roca fracturada fresca (RFf)
- Roca meteorizada blanda muy fracturada (RMbmf)
- Roca muy meteorizada blanda (RmMb)
- Roca meteorizada blanda fracturada (RMbf) y
- Roca meteorizada dura (RMd)

Por último, el sector denominado como “Acceso Sur”, ubicado en sentido hacia Caicara del Orinoco – estado Bolívar. Allí se encuentran ubicadas las perforaciones P-14SO, P-15SE, P-49S, P-37S, P-21S, P-12S, P-8S, P-3S, P-2S’, P-1S; con intervalos de profundidad abarcados desde los 43,00 y 82,00 metros. Allí se encontraron muestras de limolita identificadas como:

- Roca descompuesta blanda (RDb) y
- Roca meteorizada blanda (RMb)

#### **6.2.2 Ensayo de Corte Directo en Discontinuidades (ASTM – D5607)**

Este ensayo consistió en colocar la muestra a ensayar en una caja de corte de forma cilíndrica (metálica), la cual, está cortada horizontalmente en dos partes iguales; donde se aplicaron dos fuerzas: una fuerza normal ( $\sigma$ ) sobre el espécimen desde la parte superior y otra fuerza horizontal de corte ( $\tau$ ) aplicada desplazando una mitad con respecto a otra. Con este ensayo se obtuvieron los parámetros de resistencia al corte en núcleos de limolita como Angulo de fricción ( $\phi$ ) y cohesión C. (Ver tabla N° 6.9)

No obstante, debido a la naturaleza geológica de las muestras encontradas en el subsuelo de esta zona en estudio y como se ha dicho anteriormente, son de aspecto masivo y por ende, no fueron detectadas fisuras naturales y/o diaclasas.

Es por ello que para fines de esta investigación, fueron inducidas artificialmente las diaclasas para así poder realizar este ensayo tal y como lo estipula la norma ASTM-D5607. Se realizó un total de dos (2) ensayos de corte directo en roca sobre las siguientes muestras indicadas en la tabla N° 6.8

**Tabla N° 6.8 Muestras sometidas a ensayos de corte directo en roca**

<b>Perforación</b>	<b>Muestra</b>	<b>Profundidad (m)</b>
P-2NO	25A	68,00-71,00
P-5SO	8A	83,00-85,00

El peso unitario de las muestras de roca corresponden a un valor promedio de 20,10 KN/m<sup>3</sup> (2,01 g/cm<sup>3</sup>).

La muestra 25A perteneciente a la perforación P-2NO, fue sometida a una serie de esfuerzos normales ( $\sigma$ ) de 1805,19 KPa, 3610,39 KPa, 7220,78 KPa, 14441,57 KPa y 18051,96 KPa. También, para la muestra 8A correspondiente a la P-5 SO se le aplicó 1721,86 KPa, 3443,73 KPa, 6887,45 KPa, 13774,89 KPa y 17218,62 KPa respectivamente.

Mientras tanto, las muestras proyectaron valores de ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) y cohesión (C) comprendidos entre los 14° y 38° y los 24 y 500 KPa (0,25 y 5,00 Kg/cm<sup>2</sup>) respectivamente.

En vista de lo expuesto anteriormente, podemos asumir que esta gran variación de resultados en los ensayos de corte directo en roca se debe al estado físico presente; tal y como lo estipula el criterio de Hoek y Brown (1980).

Aunado a ello, otro factor influyente en la disminución de los valores de ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) y cohesión (C) es la variación en cuanto a la mineralogía presente, donde la muestra que corresponde a la perforación P-5SO se le observan micas, una proporción limo-arcilloso (90% - 10%), un aspecto físico y grado de meteorización de Masivo-Decolorado, dejando claro que estas características influyen en los bajos resultados de esta perforación.

Caso contrario sucede en los resultados obtenidos de la perforación P-2NO donde se registra un aumento de los valores de ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) y cohesión (C) debido

a la presencia de cristales de cuarzo, una proporción limo-arenosa (70% - 30%), un aspecto físico y grado de meteorización de Masivo-Fresco.

Siguiendo con lo anterior, la muestra correspondiente a la P-2NO consistía en una Roca Fresca dura (RFd), caso contrario a su contraparte perteneciente a la P-5SO, la cual presentaba un mayor grado de meteorización, se clasifica como Roca Meteorizada blanda (RMb), con tonalidades de color muy diferentes a la P-2NO.

Estos resultados no concuerdan con los valores típicos de Angulo de Fricción ( $\phi$ ) y Cohesión (C) de muestras de limolita mostrados por Hoek y Brown (1980) y Goodman (1989), esto se presume a que dichos valores de esta roca corresponden a los obtenidos en otras partes del mundo y debido a que las muestras ensayadas en esta investigación están meteorizadas.

De los valores derivados de este ensayo, se procedió a ejecutar la simulación con el software *Roclab 1.03*; con el fin de compararlos con los resultados de laboratorio, arrojando de esa manera un ángulo de fricción ( $\phi$ ) y cohesión (C) de 37,84° y 522 KPa para la P-2NO y de 16,85° y 35 KPa para la P-5SO respectivamente, lo cual, fueron muy parecidos a los ejecutados en laboratorio. Los reportes arrojados se encuentran en la sección de anexos N°4.

En vista de lo anterior, se procedió obtener de esta manera los valores de un ángulo de fricción ( $\phi$ ) y cohesión (C) para cada una de las perforaciones que comprende la zona de estudio. Esto datos fueron plasmados en el perfil geomecánico ubicado en el anexo N° 3

**Tabla N° 6.9 Valores Resistencia Obtenidos por Medio del Ensayo de Corte Directo en Discontinuidades de Roca (ASTM-D5607)**

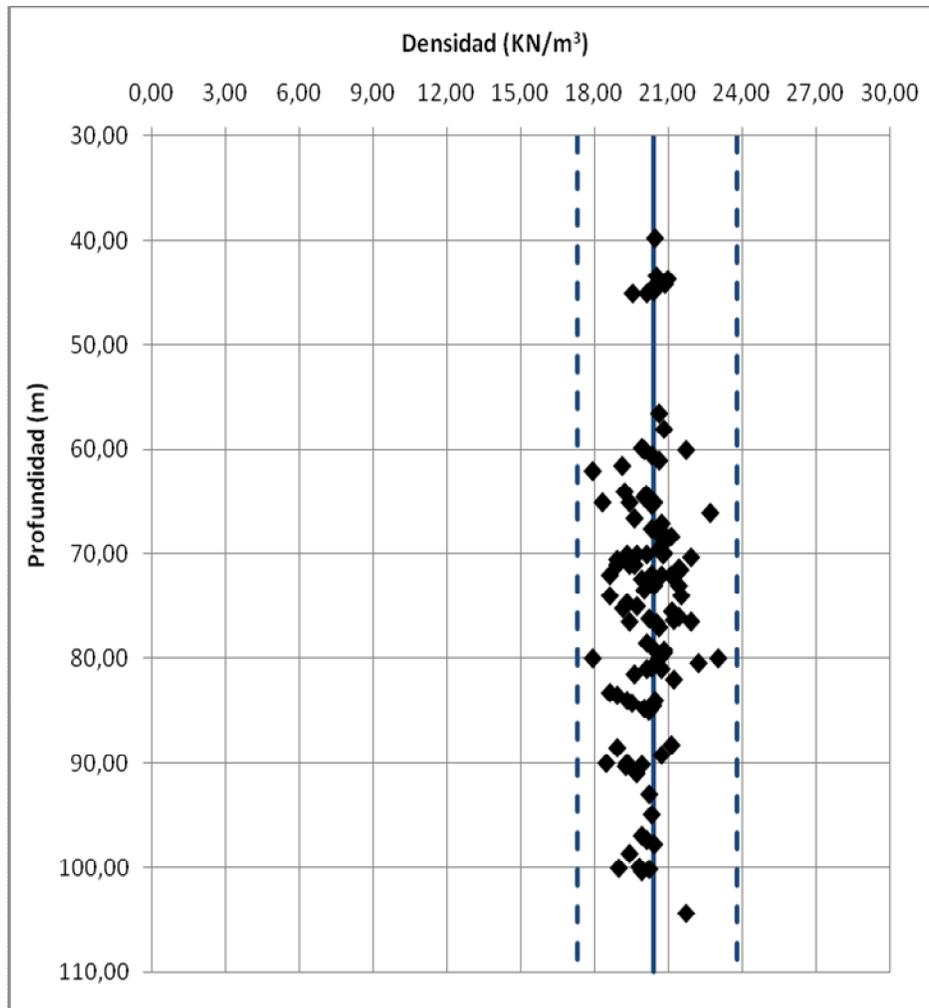
PERFORACIÓN	MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)	PESO UNITARIO (g/cm <sup>3</sup> )	ANGULO DE FRICCIÓN INTERNA $\phi$ (°)	COHESIÓN C (KPa)	COHESIÓN C (Kg/cm <sup>2</sup> )
P-2 NO	25	68,00 - 71,00	2,02	37,95	504,06	5,14
P-5 SO	8	83,00 - 85,00	2,00	14,04	24,52	0,25

### **6.2.3 Ensayo Uniaxial o Compresión Simple en Roca (ASTM D – 2938) y Módulo de Elasticidad (ASTM – D3148)**

El ensayo de compresión uniaxial en roca (ASTM D – 2938) se realiza sometiendo una muestra cilíndrica, con altura igual a dos veces su diámetro ( $H=2D$ ), a un incremento de carga vertical continuo, hasta que la muestra falle; registrándose una curva de esfuerzo-deformación y el tipo de falla observable.

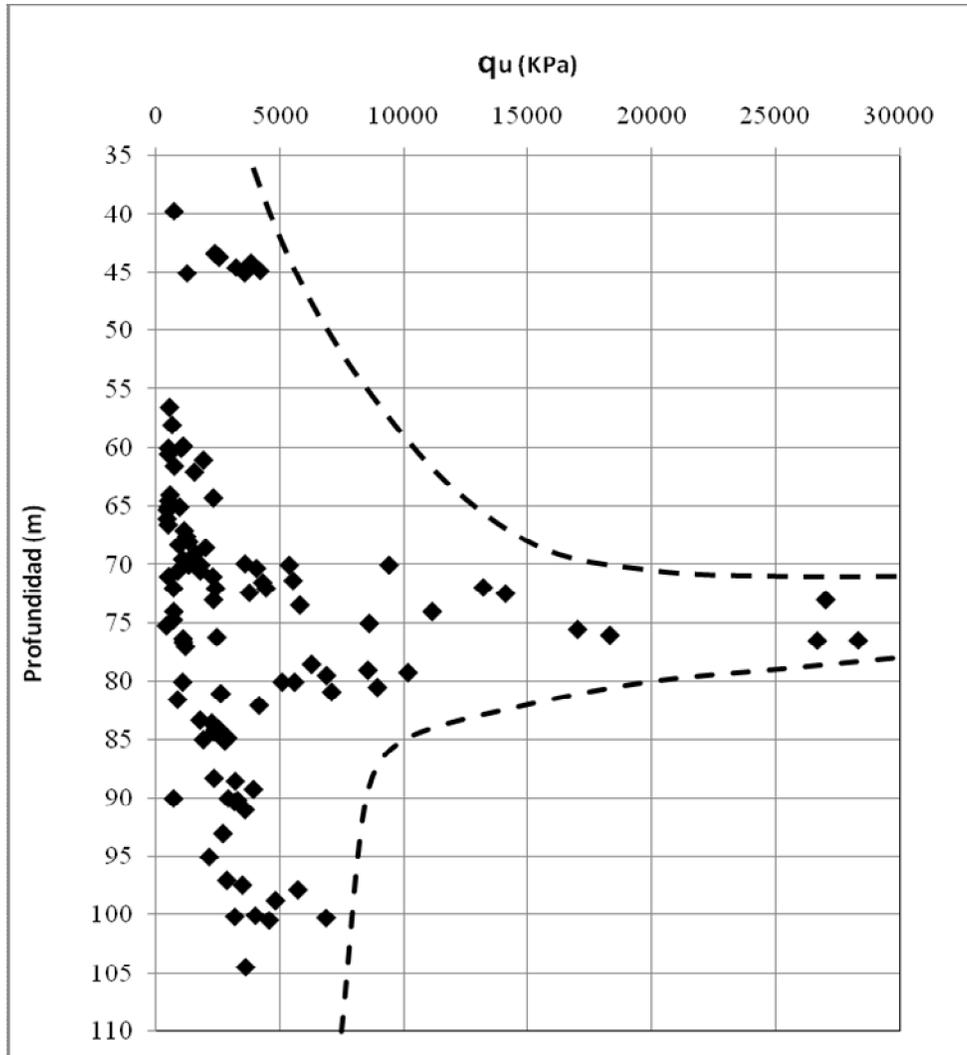
Este procedimiento fue ejecutado en parte en el Laboratorio de Geociencias adscrito a la empresa GEOHIDRA CONSULTORES C.A. y en el Laboratorio de Mecánica de Rocas de la Facultad de Ingeniería UCV. Se realizaron un total de ciento doce (112) ensayos de compresión uniaxial en roca los cuales se encuentran resumidos en el anexo N° 4

El peso unitario o densidad de la roca analizada arrojaron valores comprendidos entre los 18,00 y 23,00  $\text{KN/m}^3$  (1,80 y 2,30  $\text{g/cm}^3$  respectivamente), con 20,44  $\text{KN/m}^3$  (2,04  $\text{g/cm}^3$ ) en promedio (Ver figura N° 6.16).



**Figura N° 6.16 Gráfico Densidad vs Profundidad, en donde se observa la tendencia de los valores de peso unitario de las muestras de roca**

En cuanto a su máxima resistencia al corte ( $q_u$ ), nótese en la figura N° 6.17 que se obtuvieron valores comprendidos entre los 28.000 y 400 KPa (280,00 y 4,00 Kg/cm<sup>2</sup>) con un promedio de 4000 KPa (40 Kg/cm<sup>2</sup>) respectivamente; La cual se clasifica como una roca muy débil (blanda) siguiendo el criterio establecido por González de V. (2002)



**Figura N° 6.17 Gráfico Esfuerzo ( $Q_u$ ) vs Profundidad (m) de las muestras de limolita, donde se observa las variaciones en los valores de Resistencia.**

En este orden de ideas, el de Módulo de Elasticidad o Young ( $E$ ) se determinó tal y como lo estipula la norma ASTM – D3148, la cual consistió en trazar una línea recta sobre la curva esfuerzo-deformación de los ensayos de compresión uniaxial, procediendo así a calcular su pendiente. Los cálculos realizados sobre las muestras de limolita, arrojaron valores comprendidos entre los 4.500.000 y 33.000 KPa (45.000 y 344 Kg/cm<sup>2</sup>), con un promedio de 562003,96 KPa (5620,03 Kg/cm<sup>2</sup>) proporcionalmente. Nótese la tendencia de los resultados en la figura N° 6.18

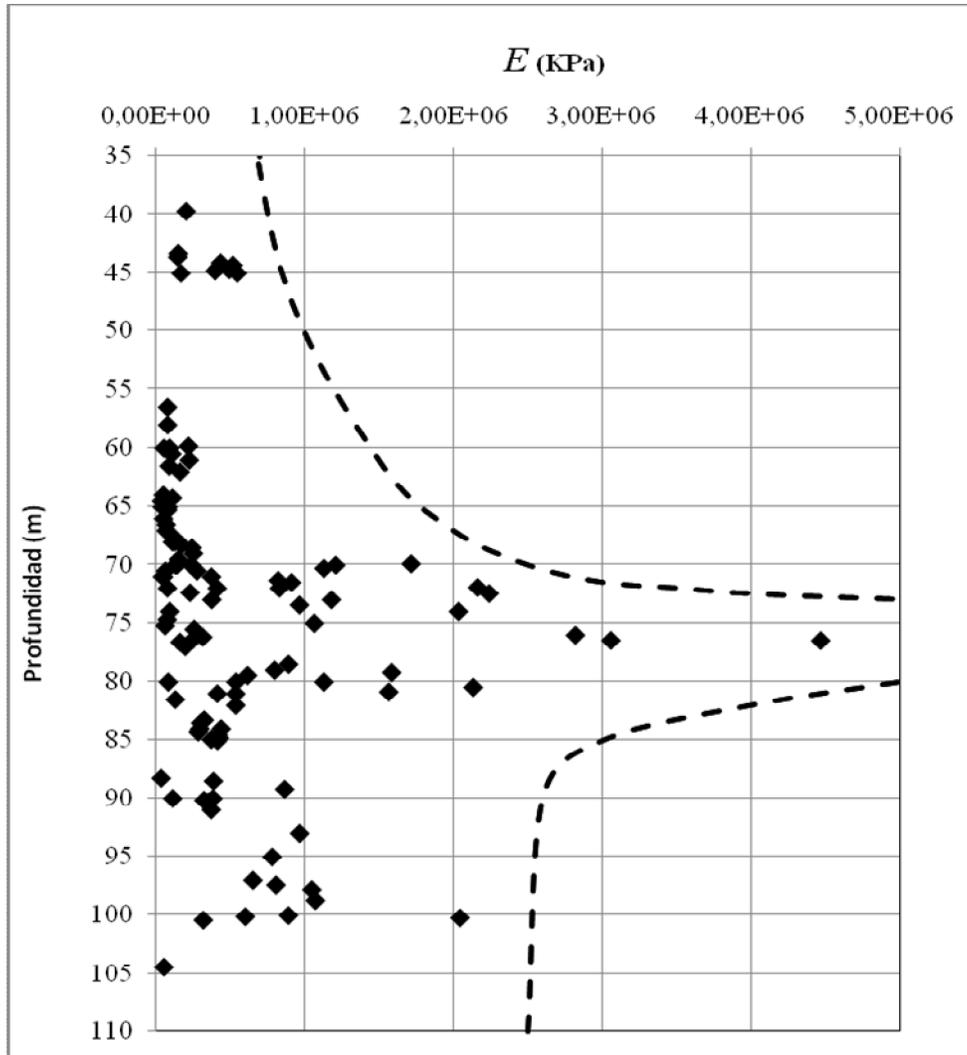


Figura N° 6.18 Gráfico Módulo de Young ( $E$ ) vs Profundidad (m) de las muestras de limolita, en donde se observa las variaciones en los valores de elasticidad

Es importante destacar que en los dos gráficos mostrados anteriormente, se ve un aumento drástico de los valores de resistencia y módulo de elasticidad; entre los 70,00 y 80,00 metros de profundidad específicamente (representada por la perforación PC-9AS), esto se presume sea influenciado por una serie de factores como la composición granulométrica, ordenamiento interno, baja porosidad de los granos presentes en ese sector; las cuales son casi en su totalidad limolitas arenosas, con un tamaño de grano equivalente de arena fina a limo arenoso.

Otro factor influyente en el aumento de los valores de resistencia presentes en el intervalo mencionado; es la composición mineralógica. Esto es debido a que se pudo

constatar cualitativamente; que las muestras correspondientes a la perforación PC-9AS presentaron una mayor concentración de cuarzo y poca presencia de minerales de menor dureza (Caolinita, Moscovita e Ilita) en comparación a las demás muestras sometidas a la difracción de rayos X (Ver figura N<sup>o</sup> 6.19)



**Figura N<sup>o</sup> 6.19 Ejemplar de limolita arenosa típica de la perforación PC-9AS ubicada a 76,45 metros de profundidad; en la cual se puede observar la presencia mayoritaria de cristales de cuarzo en comparación a otros minerales presentes en la roca.**

Tabla N<sup>o</sup> 6.10 Ejemplo de valores típicos de muestras representativas de la limolita presente en el área de estudio; obsérvese los diversos valores mecánicos y su comparación con el tamaño de grano, minerales visibles y contenido de mineral (DRX)

Perforación	Muestra	Profundidad (m)		q <sub>u</sub> (KPa)	E (KPa)	Tamaño de grano (%) aproximado	Minerales visibles (Lupa 10X)	Minerales presentes mediante la técnica de Difracción de Rayos X (DRX)
P - 6 NO	28C - 2	79,10	79,20	10186,11	1582691,33	Limo- arena fina (80-20)	Cuarzo y Mica	
P - 6C	75	74,00	75,50	17030,32	255093,86	Limo-arena (90-10)	Cuarzo	
P - 1 NO'	12	69,50	70,00	9418,91	1206510,51	Limo-arcilloso (70-30)	Cuarzo	
P - 21 S	42	73,55	74,00	11160,78	2032250,89	Limo-arena muy fina (70-30)	Cuarzo	
P - 3 SO	30	74,68	76,18	2470,53	312950,83	Limo-arcilloso (85-15)	Cuarzo y Mica	
P - 35 N	12C	71,00	74,00	732,7672	90890,2099	Limo-arenoso (85-15)	Cuarzo	Cuarzo, Caolinita, Moscovita, y Plagioclasa
P - 2 NO	26F	70,5	71	2308,00	371353,03	Limo-arenoso (70-30)	Cuarzo	
P - 12 S	29	64,5	65	515,23	77423,47	Limo-arenoso (80-20)	No se observan	Cuarzo, Caolinita
P - 2 S'	3A	65	65,5	4323,36	909270,22	Limo-arenoso (80-20)	Cuarzo	Cuarzo, Caolinita, Illita
P - 2 N'	28	98,5	98,7	4835,35	1069781,48	Limo-arcilla (85-15)	No se observan	Cuarzo, Caolinita, Illita
P - 2 SO	22A	76,30	76,60	1119,71	159477,55	Limo-arena (70-30)	Cuarzo	
PC - 9 A.S.	70	71,33	71,93	13222,52	2159939,13	Arena media-arena gruesa (80-20)	Cuarzo y Mica	Cuarzo, Caolinita, Illita
PC - 9 A.S.	71A-2	71,93	72,45	14120,67	2237588,12	Arena media-arena gruesa (80-20)	Cuarzo y Mica	Cuarzo, Caolinita, Illita
PC - 9 A.S.	71A-3	71,93	73,00	27043,70	1178326,33	Arena media-arena gruesa (80-20)	Cuarzo y Mica	Cuarzo, Caolinita, Illita
PC - 9 A.S.	72B - 1	73,45	76,45	28356,54	3056192,05	Arena media-arena gruesa (80-20)	Cuarzo y Mica	Cuarzo, Caolinita, Illita
PC - 9 A.S.	72B - 2	73,45	76,00	18335,67	2817644,76	Arena media-arena gruesa (80-20)	Cuarzo y Mica	Cuarzo, Caolinita, Illita
PC - 9 A.S.	72C	73,45	76,47	26703,49	4466065,48	Arena media-arena gruesa (80-20)	Cuarzo y Mica	Cuarzo, Caolinita, Illita

Los valores Módulo de Deformación o Relativo ( $E/q_u$ ) arrojaron resultados adimensionales que abarcan los 475 y 14 con un valor promedio de 142,83; aproximándose a los valores típicos en limolitas expuestos por Goodman (1989)

Los módulos de deformación de los ensayos realizados sobre la limolita, cuyos valores muestran que a mayor resistencia a la compresión uniaxial; este material se comporta de manera frágil.

Caso contrario sucede cuando se reportan bajos valores de resistencia a la compresión uniaxial, en donde se observa un comportamiento blando en las deformaciones de la roca (Ver figura N° 6.20)

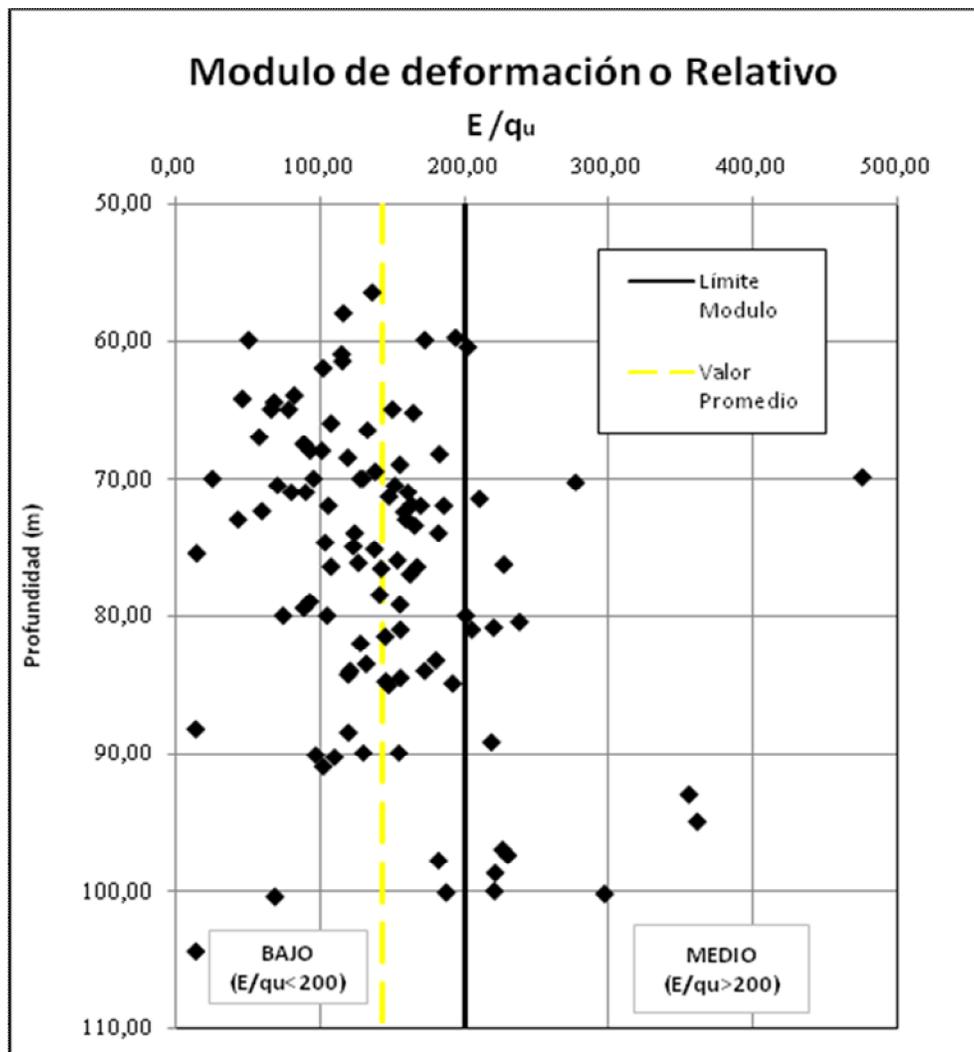


Figura N° 6.20 Gráfico Módulo de DeFormación o Relativo ( $E/q_u$ ) vs Profundidad (m) de las muestras de limolita ensayadas.

De acuerdo a los resultados obtenidos y según lo estipulado por Gonzales de Vallejo (2002), podemos afirmar que las muestras de limolita ensayadas en esta investigación; poseen un modulo de deformación bajo debido a que en promedio, las mayoría de las muestras arrojaron valores muy inferiores a 200; con extremos superiores a 400 y menores 15 en algunas excepciones.

Con esta afirmación, asumimos que las muestras de limolita se comportan de manera frágil, el cual es reflejado en los valores obtenidos de los ensayos de resistencia.

Para finalizar, se crea una correlación con los resultados arrojados por el ensayo Compresión Uniaxial en Roca ( $q_u$ ) y el Modulo de Young ( $E$ ), mostrado en la figura N° 6.21. Aquí se obtuvo que el valor del Módulo de Elasticidad ( $E$ ) es 124,35 veces mayor que la máxima resistencia a la compresión.

$$E = 124.35 q_u$$

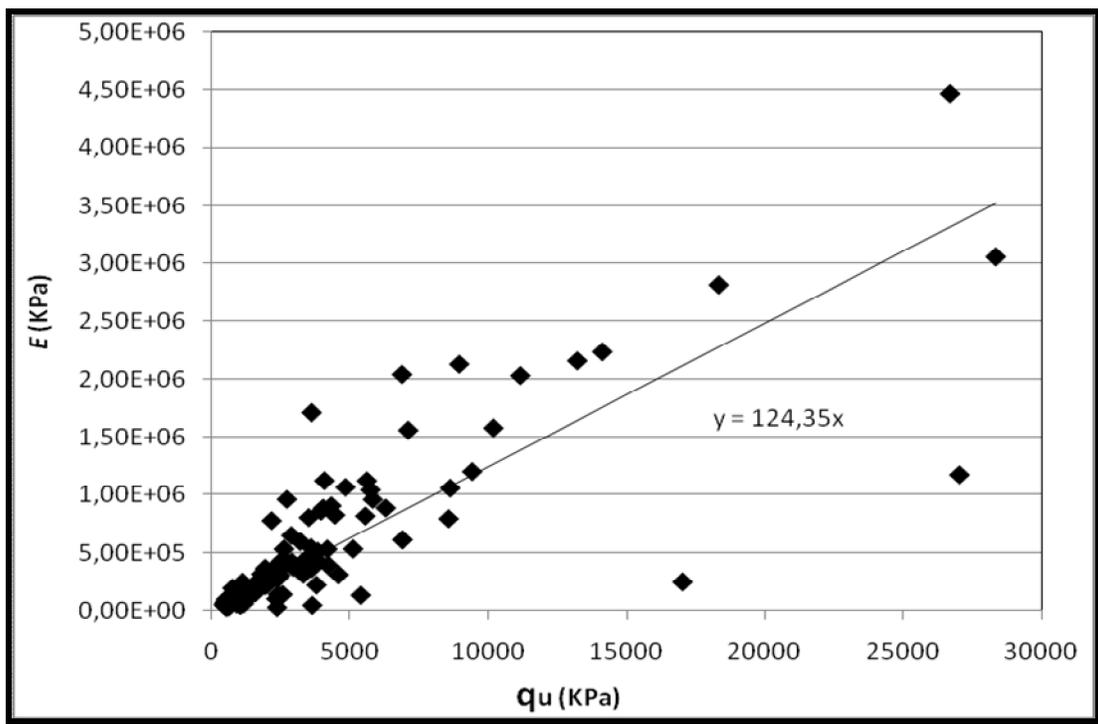


Figura N° 6.21 Gráfico Módulo de Young ( $E$ ) vs Maxima Resistencia a la Compresión ( $Q_u$ ), en la cual se observa la relación existente entre ambos parámetros de presión

Esta relación geomecánica es mucho menor en comparación a los valores típicos para este tipo de roca propuestos por Goodman (1989), la cual expone que el Modulo de Young para una limolita es 214 veces mayor que su máxima resistencia a la compresión:

$$E_{(\text{Limolitas})} = 214 q_u$$

#### 6.2.4 Ensayo de Carga Puntual (ASTM D – 5731)

Se realizó este ensayo sobre muestras de roca cilíndrica (núcleos), siempre y cuando tuvieran superficies paralelas, no hubo la necesidad de someterlas a preparaciones especiales.

Fueron ejecutadas 77 pruebas de este tipo, para así cumplir con unos de los requisitos estipulados por la norma ASTM D – 5731, la cual, exige que se realicen mínimo veinte (20) ensayos. En el anexo N° 4 se encuentra el resumen de ensayos de Carga Puntual.

Los resultados arrojados por este sobre las limolitas dan valores de Índice de Carga Puntual ( $I_s_{(50)}$ ) comprendidos entre los 6.900 y 275 KPa (70 y 2,80 Kg/cm<sup>2</sup>) con un valor promedio de 2.121,56 KPa (21,63 Kg/cm<sup>2</sup>) respectivamente.

Igualmente se establece una correlación con los resultados arrojados por el ensayo compresión uniaxial tal y como lo recomienda la norma ASTM D – 5731, mostrados en la figura N° 6.22. Se obtuvo que el valor de la máxima resistencia a la compresión ( $q_u$ ) es 1,4 veces mayor que los valores de carga puntual ( $I_s_{(50)}$ ):

$$q_u = 1,4 I_s_{(50)}$$

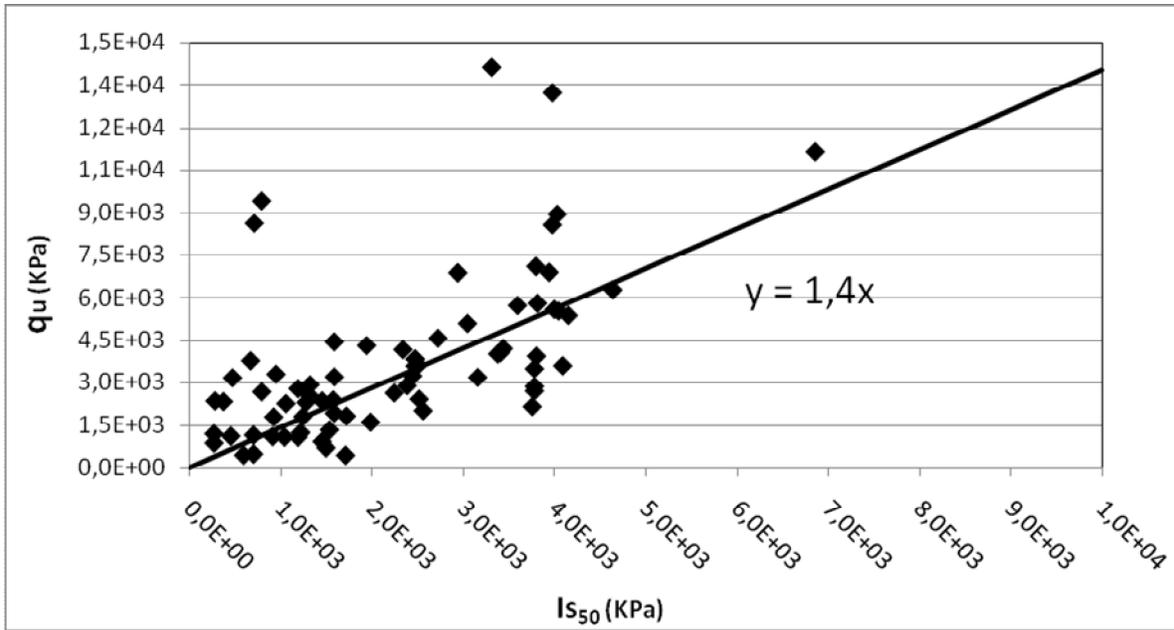


Figura N° 6.22 Gráfico en donde se muestra la relación existente entre el índice de Carga Puntual ( $I_{s50}$ ) y la Resistencia a la Compresión Uniaxial en Roca ( $Q_u$ ) de las limolitas

### 6.3 ANÁLISIS MINERALÓGICO Y GEOMECÁNICO DE LAS LIMOLITAS PRESENTES EN LA ZONA DE ESTUDIO

Las características mineralógicas tanto detectadas con lupa, como mediante la técnica de Difracción de Rayos X (DRX) de las muestras provenientes de las perforaciones P-2N', P-35N, P-2S', PC-9AS y P-12S; ubicadas entre las poblaciones de Caicara del Orinoco y Cabruta, indican que el subsuelo que se consigue a partir de los 50 metros de profundidad, corresponde a un material alterado en su mayoría, la cual pertenece a una roca sedimentaria de grano fino tipo limolita.

La información derivada de los diversos análisis mineralógico-geomecánicos, se presenta en las figura N° 6.23 y figura N° 6.24; permitiendo así establecer algunas consideraciones generales sobre las propiedades de estas rocas analizadas.

Se establecieron tres (3) intervalos de profundidad definidos desde el punto de vista geomecánico como “Franja 1”, “Franja 2” y “Franja 3”; cuyas variables son la máxima resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad.

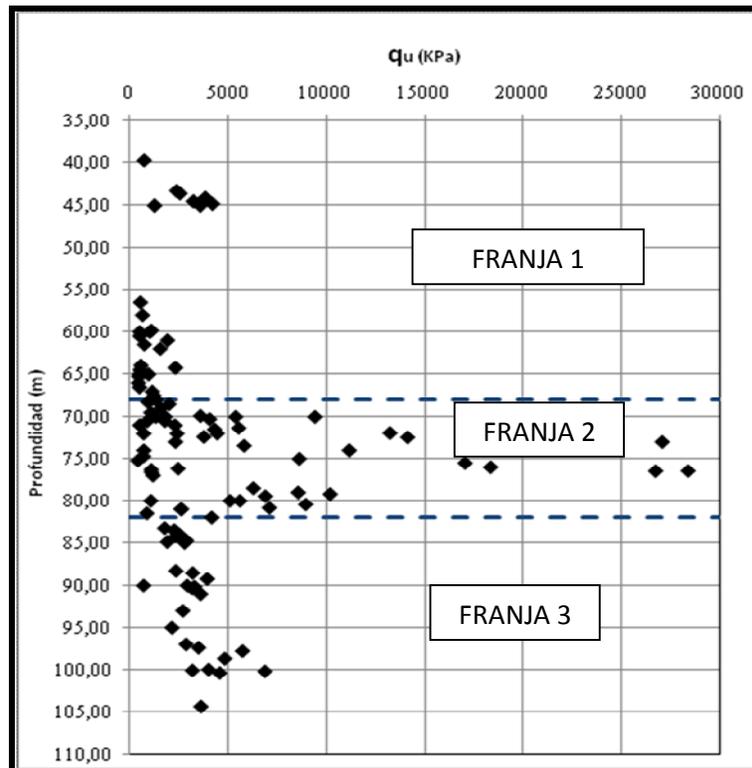


Figura N° 6.23 Gráfico Esfuerzo ( $Q_u$ ) vs Profundidad (m) de las muestras de limolita, en donde se observa las variaciones en los valores de Resistencia, sectorizados a su vez como “franjas”

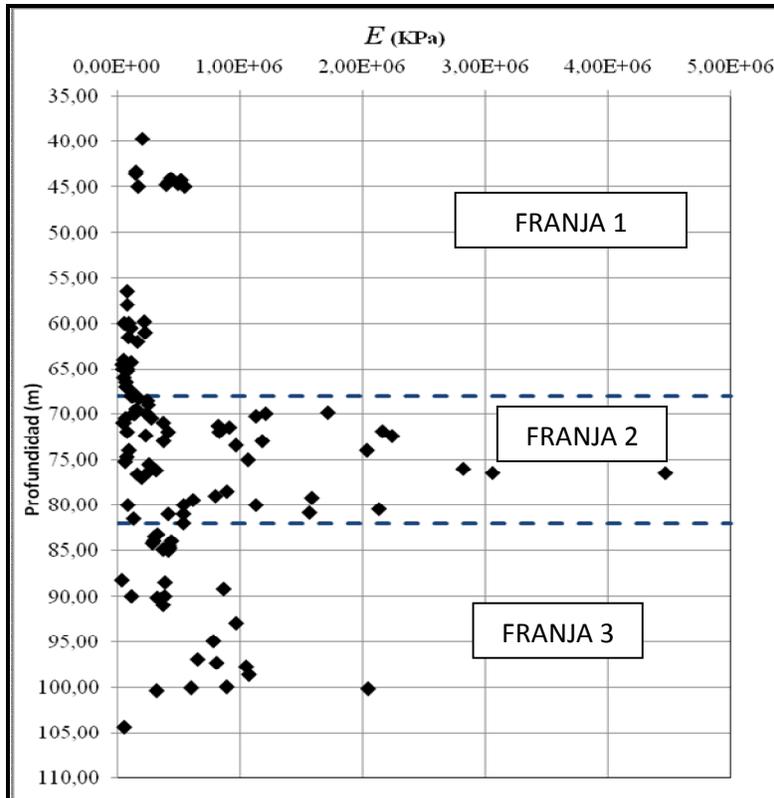


Figura N° 6.24 Gráfico Módulo de Young ( $E$ ) vs Profundidad (m) de las muestras de limolita, en donde se observa las variaciones en los valores de elasticidad, sectorizados a su vez como “franjas”

El primer intervalo corresponde a la franja de roca ubicado entre los 35,00 y 68,00 de profundidad. Aquí se observa una roca de muy poca calidad (meteorizada), con valores de resistencia (0,00 – 5.000,00 KPa) y elasticidad muy bajos (0,00 –  $1,00 \times 10^6$  KPa).

Las muestras analizadas correspondientes al segundo intervalo ubicado entre los 68,00 y 82,00 metros de profundidad, se nota un drástico aumento de la calidad, elasticidad (0,00 –  $5,00 \times 10^6$  KPa) y resistencia (0,00 – 30.000,00 KPa) de los ejemplares roca ubicadas dentro de este renglón.

Por último, la muestras pertenecientes al tercer intervalo ubicado entre los 82,00 y 105,00 metros de profundidad, se caracterizan por una abrupta disminución de los valores de resistencia (0,00 – 8.000,00 KPa) y elasticidad (0,00 -  $2,00 \times 10^6$  KPa)

Desde el punto de vista litológico de la limolita en específico; esta se subdivide en tres (3) facies sedimentarias: “Limolita arenosa”, “Limolita arcillosa” y “Limolita carbonácea”.

El comportamiento geomecánico generalizado de la limolita de acuerdo a su tipo de Facies, muestra sus valores promedios en la tabla N° 6.11

**Tabla N° 6.11 Parámetros geomecánicos promedios del comportamiento de las diversas facies sedimentarias de la limolita encontradas en el área de estudio.**

Facies Sedimentaria	PESO UNITARIO (KN/m <sup>3</sup> )	q <sub>u</sub> (KPa)	φ (°)	C (KPa)	Is(50) (KPa)	E (KPa)	E/q <sub>u</sub>
Limolita Arenosa	20,37	4176,42	26,51	219,30	2485,73	589137,77	142,26
Limolita Arcillosa	20,42	1936,86	32,30	106,67	560,85	228297,60	143,77
Limolita Carbonácea	20,44	2533,04	23,26	90,00	-	436872,76	172,47

## 6.4 CAPACIDAD DE CARGA POR PUNTA DE PILOTES SOBRE LAS LIMOLITAS

Vesic (1977), mencionado por Das (2006), comenta que los estribos y las pilas de puentes generalmente se deben construir sobre cimentaciones de pilotes para evitar la posible pérdida de capacidad de carga que una fundación superficial sufrirá por erosión del suelo en la superficie del terreno.

### 6.4.1 Capacidad de Carga por Punta de Pilotes sobre Rocas

En algunas ocasiones los pilotes se hincan hasta un estrato subyacente de roca. En tales casos, el ingeniero debe evaluar la capacidad de carga de la roca. La resistencia unitaria última de punta en roca (Goodman, 1980) es aproximadamente

$$q_p = q_{u(\text{Diseño})}(N\phi + 1)$$

Donde:  $N\phi = \tan^2(45 + \phi/2)$

q<sub>u</sub> = resistencia a la compresión no confinada en roca (obtenida en laboratorio)

φ = ángulo de fricción interna de la roca

Este criterio de capacidad de carga se ve influenciado por el tamaño de los especímenes de roca ensayados en el laboratorio. A medida que aumenta el tamaño; su máxima resistencia disminuye. (Das, 2006) nombra este fenómeno como “efecto de

escala”, el cual es causado por fracturas y rupturas progresivas de diverso tamaño distribuidas aleatoriamente a lo largo de los planos de deslizamiento. Es por ello que el mencionado autor sugiere:

$$q_{u(\text{Diseño})} = \frac{q_u(\text{Laboratorio})}{5}$$

El perfil de resistencia de la limolita ofrece una capacidad portante ( $q_p$ ) promedio de 3653,40 KPa, con extremos comprendidos entre los 30000 y 300 KPa respectivamente. Dicho resultado es bajo en comparación a los propuestos por Hoek y Bray (1977) para este tipo de roca, el cual es de 28000 KPa. Los resultados se encuentran ubicados el anexo N° 4.

Determinada la capacidad portante de los pilotes sobre las limolitas se permitió conocer mediante estos cálculos el valor promedio, máximo y mínimo con el fin de garantizar y recomendar que la roca (limolita) es totalmente apta para la fundación de las torres y pilas del futuro III Puente sobre el Río Orinoco, siempre y cuando no se excedan del valor máximo establecido.

## **CAPITULO VII**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **7.1 CONCLUSIONES**

El área donde se ubicará el 3er puente sobre el río Orinoco entre las poblaciones de Caicara del Orinoco y Cabruta se encuentra en la Cuenca Hidrográfica del Orinoco, vertiente Atlántica, y en la subcuenca del Orinoco Medio. La región se ubica en el borde septentrional del cratón de Guayana, perteneciente geológicamente a la provincia estructural de Cuchivero y las formaciones sedimentarias de la región de los llanos.

En el área, el río define dos zonas geográfica y geológicamente diferentes. La zona Norte corresponde a la región de las Llanuras Centrales y la parte Sur, al borde septentrional del Escudo Guayanés. Las rocas que afloran en las adyacencias de la zona del puente son plutónicas pertenecientes al Granito de Santa Rosalía, que se encuentra en contacto intrusivo con las rocas volcánicas félsicas de la Formación Caicara que aflora al sur de la región. Éstas son primordialmente riolitas y riolitas porfídicas, formando una secuencia alineada con rumbo Norte; los afloramientos se encuentran representados por los cerros cercanos Coroba y San Mateo.

En contacto discordante con estas rocas precámbricas, se encuentran capas de rocas sedimentarias y sedimentos recientes depositados en una amplia depresión del basamento. Los sedimentos presentes son arenas finas, limpias, cuarcíticas, con cierta proporción de finos no plásticos, típicos de sedimentación reciente aluvional y capas de arcillas muy plásticas con algunas intercalaciones de material carbonáceo, limos y arcillas arenosas, duras.

Las rocas sedimentarias corresponden al tope de la Formación las Piedras, conformada básicamente por sedimentos finos mal consolidados de areniscas y limolitas más o menos carbonáceas, arcillitas y limolitas de color gris verdoso y arcillas ligníticas.

La Planicie Aluvial de Desborde del Río Orinoco está conformada por depósitos recientes generados por exceso de carga, que se caracteriza por montículos que siguen la dirección del eje fluvial. Esta zona es inundada por desbordamiento del río con láminas de agua que pueden alcanzar hasta los 3 metros. Al finalizar las lluvias, algunas depresiones quedan ocupadas por lagunas. Los sedimentos presentes en la zona de estudio están

asociados a ambientes fluviales y paludales con variaciones importantes en los niveles de energía.

En las inmediaciones del río, en las zonas bajas, de inundación y de lagunas, existen ambientes de baja energía, los cuales se caracterizan por mayor presencia de suelos finos con arcillas blandas y presencia de materia orgánica.

La secuencia estratigráfica de la zona de estudio está definida en tres tramos, denominados “Acceso norte”, “Eje del río” y “Acceso sur”, y desarrollados en función de la localidad donde fueron realizadas las perforaciones correspondientes al transecto de 12 Km en donde se va a construir el futuro III Puente sobre el río Orinoco.

- Tramo 1 “Acceso norte”. Perforaciones P-2N’, P-7N, P-9N, P-27N, P-30N, P-35N. Cabruta - Estado Guárico. Progresivas 12+410 hasta 14+720.
- Tramo 2 “Eje de río”. Perforaciones P-38N, P-39N, P-18NE, P-7NE, P-6NO, P-5NE, P-3NOP, P-2NO, P-1NO’, PC-9AS, P-2S0, P-3SO, P-6C, P-4SO, P-5SO, P-7SC, P-9SE. Eje del río Orinoco, Estados Bolívar y Guárico. Progresivas 8+250 hasta 12+410.
- Tramo 3 “Acceso sur”. Perforaciones P-14SO, P-15SE, P-49S, P-37S, P-21S, P-12S, P-8S, P-3S, P-2S’, P-1S. Caicara del Orinoco, Estado Bolívar. Progresivas 3+800 hasta 8+250.

En general, en el área de estudio, los primeros metros se encuentran espesores importantes materiales aluvionales de arenas predominantemente limpias, limosas, con grava; arcillas y limos de plasticidad variable, aunada a la eventual aparición de fragmentos de areniscas de grano fino, conglomerados y trazas carbonáceas. La discontinuidad lateral de estos estratos es característica de ambientes fluviales-paludales, donde suelen existir variaciones en los niveles de energía. No se observaron estructuras sedimentarias. Presentan diversas tonalidades grises, marrones y blanquecinas.

Infrayacente al material aluvional se encontró un manto de casi 18,00 metros en promedio de suelos residuales de granos fino tipo arcillas y limos arenosos finos de diversas tonalidades grises; producto de la meteorización “in situ” de las limolitas.

Por debajo del suelo residual; encontramos limolitas en diversas facies arenosas, arcillosas y carbonáceas con eventuales intercalaciones de arenas y areniscas de grano fino, limos, arcillas, material carbonáceo con diversas tonalidades grises. Las perforaciones realizadas sobre este estrato alcanzaron hasta una máxima profundidad de hasta 111 metros. Estas rocas fueron el objetivo fundamental de esta investigación

Es posible considerar la presencia de otras fuentes de aporte en los núcleos más distales, sin embargo no son apreciables con las técnicas empleadas en este estudio.

Los resultados del análisis mineralógico visual y de difracción de rayos X realizado sobre las muestras de las perforaciones indicaron que los principales minerales son cuarzo y plagioclasas, las cuales corresponden a un limo arenoso a limo arcilloso, según el caso. Esta arcilla forma parte de la matriz, constituida principalmente por caolinita e illita, estos últimos son producto de la alteración de los feldespatos, bajo condiciones de meteorización intensa como la que caracteriza al Escudo de Guayana.

También se encontró material carbonáceo en varias de las muestras captadas en diferentes perforaciones en todo el trazado. La moscovita se presenta como un accesorio.

En fin, todas estas descripciones mineralógicas nos dan indicios que el material depositado (rocas sedimentarias) estuvo muy cercano a la roca fuente, es decir, provenientes del basamento precámbrico del Escudo de Guayana

La limolita detectada en sitio, producto de la litificación de sedimentos finos y arenas, se encuentra descompuesta y blanda (RDb) a meteorizada (RMb).

Desde el punto de vista geomecánico, el estrato de limolita fue subdividido en tres secciones definidas como “Franja 1” (35,00m – 68,00m); la cual, se encuentra muy descompuesta y débil ( $q_u < 5000$  KPa).

En la “Franja 2” la limolita es mucho más resistente, (ubicada alrededor de los 68,00m – 82,00 m de profundidad); con valores de  $q_u$  que pueden alcanzar hasta los 30000 KPa.

En la “Franja 3”, la roca disminuye su resistencia y calidad, con un  $q_u < 10000$  KPa.

Se obtuvo que el valor de la máxima resistencia a la compresión ( $q_u$ ) es 1,4 veces mayor que los valores de índice de carga puntual ( $I_s_{(50)}$ ) y 124,35 veces menor que su Módulo de Elasticidad, este ultimo valor es muy bajo en comparación a los propuestos por Goodman (1989)

Por último, encontramos que el perfil de resistencia del subsuelo ofrece una capacidad portante ( $q_p$ ) a partir de los 50 metros de profundidad, con un valor promedio de 3653,40 KPa, con extremos comprendidos entre los 30000 y 300 KPa respectivamente. Dicho resultado es bajo en comparación a los propuestos por Hoek y Bray (1977) para este tipo de roca, el cual es de 28000 KPa.

## 7.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda una análisis de facies sedimentarias que comprende un aporte geológico para la zona de estudio, el cual puede ser utilizado para desarrollar análisis más profundos y en un área más extensa de los paleoambientes sedimentarios que se presentaron en esta región durante el Mioceno Tardío y el Pleistoceno Medio.
- Correlacionar los datos de este estudio con informaciones obtenidas de pozos y posibles afloramientos de esta Formación en otras partes de la Cuenca Oriental de Venezuela (Estados Anzoátegui y Monagas) con el fin de afirmar que las rocas estudiadas en esta investigación corresponden a la litología tipo de la Formación Las Piedras.
- Realizar una mayor cantidad de ensayos geomecánicos adicionales, que puedan servir de complemento a los análisis presentados en esta investigación. A fin de tener una mejor caracterización de la limolita, se sugiere realizar ensayos de compresión triaxial, tracción directa e indirecta (brasileño) para así lograr una mayor definición de las propiedades de la roca en estudio.
- Analizar por medio de la microscopía electrónica diversas muestras de limolita a fin de servir como complemento a las muestras analizadas por medio de la difracción de rayos X.
- Se sugiere hacer una detallada revisión y actualización de mapas geológicos de Caicara-Cabruta con el fin de mejorar el entendimiento de la historia geológica de la región.

## BIBLIOGRAFÍA

American Standard Testing of Materials (ASTM). (2004). *Annual Book of ASTM (116<sup>a</sup> ed.)*. West Conshohocken, Estados Unidos de América: ASTM International.

Alfonsi, P. (1978). *Curso sobre Ambientes Sedimentarios* (1<sup>a</sup> ed.). Ciudad Bolívar, Venezuela: Departamento de Explotación de la filial Meneven S.A. – Distrito Oriental

Baamonde, J. (2007). *Petrología* (1<sup>a</sup> ed.). Caracas, Venezuela: Imprenta Universitaria de la Universidad Central de Venezuela.

Cabrera, J. y García, E. (2000). *Posibilidades de Recarga de los Acuíferos Profundos de la Formación Las Piedras en el Área de Jusepín y Caicara del Orinoco por parte del Frente de Montañas Área Norte de Monagas*. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.

Castillejo, M. (1993). *Análisis comparativo de los métodos de estabilidad de taludes y su control*. Trabajo de ascenso. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas

COPLANARH. (1974) Inventario Nacional de Tierras. Estudio Geomorfológico de los Llanos Centro Orientales. 129 p.

COPLANARH. (1974) Inventario Nacional de Tierras. Estudio Geomorfológico de los Llanos Centro Orientales. 164 p.

Das, B. (2001). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (3<sup>a</sup> ed.). Ciudad de México, México: Thomson Learning.

Deer, W., Zussman, J., y Howie, R. (2001). *Rock – Forming Minerals* (2<sup>a</sup> ed.). Londres, Reino Unido: The Geological Society Publishing House.

De Marco, P. (1995). *Determinación de la resistencia mecánica de las rocas mediante ensayos de laboratorio*. Trabajo de ascenso. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas

De Sisto, J. (1961). *La Mesa and Sacacual Sediments of Eastern Venezuela*. Boletín informativo de la Asociación. Geológica, Minera y Petrolera, Volumen 4(16): 171-198.

Díaz, J. (1998). *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales* (1<sup>a</sup> ed.). Bucaramanga, Colombia: Editorial Ingeniería de Suelos Limitada.

*Diccionario de Sinónimos y Antónimos*. (2001). Madrid: Editorial Espasa Calpe.

*Diccionario Enciclopédico de Mineralogía y Geología.* (1980). Valencia: Editorial Bibliograf.

Escamilla, H. y Romero K. (2000). *Distribución de las Facies Sedimentarias y Características de los Sedimentos en la parte Superior del Delta del Orinoco.* Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.

Figueroa, D. (2007). *Dinámica* (3ª ed.). Caracas, Venezuela: Talleres de Miguel Ángel García e Hijos S.R.L.

Freile., J. (1965) *Provincias Fisiográficas de Venezuela.* Publicaciones de la Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela

Fuentes, E. (2006). *Proceso de Erosión Severa de la Formación Mesa y su Incidencia en Obras Civiles.* Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.

González de Juana, C. (1980). *Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas* (1ª ed.). Caracas, Venezuela: Ediciones FONINVES.

González de Vallejo, L. (2002). *Ingeniería Geológica* (1ª ed.). Madrid, España: Pearson Education.

Goodman, R. (1989). *Introduction to Rock Mechanics* (2ª ed.). New York, Estados Unidos: Editorial Jhon Wiley & Sons.

Grande, S. (1996). *Cristalografía de rayos X.* Guías de estudio. UCV. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica: 2 – 10.

Grim, R. (1962). *Applied Clay Mineralogy* (1ª ed.). New York, Estados Unidos de América: Editorial Mc Graw Hill Book Company.

Hedberg, H. (1950) *Geology of the Eastern Venezuela Basin (Anzoátegui-Monagas-Sucre-Eastern Guárico)* Publicación de la Sociedad Americana de Geólogos. Boletín No. 61(11):1173-1216.

Hoek, E. (1964). *Fracture of Anisotropic Rock.* Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy Volumen 64, Paginas 501-518, No. 10.

Hoek, E. y Bieniawski, Z. (1965). *Brittle Rock Fracture Propagation in Rock Under Compression.* Publicación de la *International Journal of Fracture Mechanics Volumen 1*(3), Paginas 137-155.

Hoek, E. y Bray, J. (1977). *Rock Slope Engineering* (2ª ed.). Hertford, Reino Unido: Editorial Stephen Austin and Sons Limited.

Hoek, E. y Brown, T. (1980). *Empirical Strength Criterion for Rock Masses*. Journal of the Geotechnical Engineering Division. 1980. Volumen 106, páginas 1013 – 1035.

Hurlbut, C. (1976). *Manual de Mineralogía de Dana* (1ª ed.). Barcelona, España: Editorial Reverté.

Koepfen, W. (1948). *Climatología* (1ª ed.). Fondo de Cultura Económica. Ciudad de México – México.

Krumbein, W. y Sloss, LL. (1969). *Estratigrafía y Sedimentación*. (1ª ed.). Ciudad de México, México: Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana

Lajtai, E. (1969). Strength of Discontinuous Rocks in Direct Shear. *Geotechnique*, 19, 218 - 233.

Lambe, W. (2001). *Mecánica de Suelos* (2ª ed.). Ciudad de México, México: Editorial Limusa.

LÉXICO ESTRATIGRÁFICO DE VENEZUELA. (1997) Tomo I, Caracas, MEM, Venezuela

LÉXICO ESTRATIGRÁFICO DE VENEZUELA. (1970) Caracas, MEM, Venezuela

III LÉXICO ESTRATIGRÁFICO DE VENEZUELA. (Octubre, 2005) Código Estratigráfico de las Cuencas Petrolíferas de Venezuela: “Formación Mesa”. Disponible: <http://www.pdvsa.com/lexico/venezuela/llanos.htm> [Consulta: 2010, Marzo]

III LÉXICO ESTRATIGRÁFICO DE VENEZUELA. (Octubre, 2005) Código Estratigráfico de las Cuencas Petrolíferas de Venezuela: “Los Llanos”. Disponible: <http://www.pdvsa.com/lexico/venezuela/llanos.htm> [Consulta: 2010, Marzo]

Ortiz, L. (1998). *Elasticidad* (3ª ed.). Madrid, España: Editorial McGraw Hill.

Perri, G. (1999). *Contribución a la caracterización geomecánica de los macizos rocosos en base al GSI de Hoek*. Publicación de la Sociedad Venezolana de Geotecnia. Volumen 18, páginas 2 – 18

Pettijohn, F. (1970). *Rocas Sedimentarias*. (4ª ed.). Buenos Aires, Argentina: Editorial Universitaria de Buenos Aires C.A. EUDEBA

Poppe, L., Paskevich, V., Hathaway, J. y Blackwood, D. (2001). *A Laboratory Manual for X-Ray Powder Diffraction*. U. S. Geological Survey Open-File Report 01-041

Righi, D. y Elsass, F. (1996). *Characterization of soil clay minerals: Descomposition of X – Ray Diffraction Diagrams and High – Resolution Electron Microscopy*. Publicación de la American Society of Clay Minerals. 1996 Volumen 44, páginas 791 – 800.

Ríos, J. (1972) *Geología de la región de Caicara, Estado Bolívar*. Memorias del IV Congreso Geológico Venezolano, Caracas, 3(4): 1758-1780.

Romero, H. (1975) *Distribución de Elementos en Sedimentos de Fondo del Río Orinoco, Influencia de la Granulometría y el Transporte*. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.

Salcedo, D. (1969). *Hacia una definición geotécnica de suelo y roca*. Trabajo presentado en el IV Congreso Geológico Venezolano. Caracas.

Salcedo, D. (1983). *Macizos Rocosos: Caracterización, resistencia al corte y mecanismos de rotura*. Trabajo presentado la conferencia del 25 aniversario de la SVMSH. Caracas.

Salvador, A. (1961). *Nomenclature of the Las Piedras and related formations in Eastern Venezuela*. Boletín informativo de la Asociación. Geológica, Minera y Petrolera, Volumen 4(10): 297-327

Serway, R. (1996) *Física* (4ª ed.). Ciudad de México, México: Editorial McGraw Hill Latinoamericana.

Tarbutck, E. y Lutgens, F. (2005). *Ciencias de la Tierra: Una Introducción a la Geología Física* (8ª ed.). Madrid, España: Pearson Prentice Hall.

Ucar, Roberto (1988). Un nuevo método para determinar la Resistencia al Corte en Macizos Rocosos. *Geos*, 29: 350 – 363, Caracas

## Anexos

- Anexo 1 Mapa estructural del tope de la limolita de la zona en estudio, (Caicara del Orinoco-Cabruta) a escala 1:25.000
- Anexo 2 Mapa geomorfológico de la zona en estudio, (Caicara del Orinoco-Cabruta) a escala 1:25.000
- Anexo 3 Perfil geomecánico de la zona en estudio, (Caicara del Orinoco-Cabruta) a escala indicada
- Anexo 4 Tabla resumen de ensayos de caracterización geotécnica de la zona en estudio, (Caicara del Orinoco-Cabruta)
- Anexo 5 Registro litológico de las perforaciones