

**MINERALOGIA DE ARCILLAS Y ESTUDIO MICROESTRUCTURAL DE LA
FORMACIÓN LOS SANTOS EN LA MESA DE LOS SANTOS Y SECTOR
NORDESTE DE CURITI**

LUIS FRANCISCO MELO ROJAS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE GEOLOGIA
BUCARAMANGA
2008**

**MINERALOGIA DE ARCILLAS Y ESTUDIO MICROESTRUCTURAL DE LA
FORMACIÓN LOS SANTOS EN LA MESA DE LOS SANTOS Y SECTOR
NORDESTE DE CURITI**

LUIS FRANCISCO MELO ROJAS

**Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de
GEOLOGO**

**DIRECTOR:
JAIRO CLAVIJO TORRES
Msc. GEOLOGÍA APLICADA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE GEOLOGIA
BUCARAMANGA
2008**

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a INGEOMINAS por su apoyo económico y su asesoría técnica. Al profesor Jorge Eduardo Pinto por brindarme la oportunidad de realizar este trabajo de investigación. Al Dr. Rafael Enrique Duarte por su asesoría, al Geólogo David Gutiérrez por su valiosa colaboración en la realización de este proyecto, al profesor Jairo Clavijo Torres por su apoyo y a mis compañeras Sonia Cristina Aldana y Mayra Andreina Rincón por su ayuda incondicional en este trabajo.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	1
1. ANTECEDENTES	3
2. METODOLOGIA	4
3. RESULTADOS OBTENIDOS	8
3.1 MESA DE LOS SANTOS	8
3.2. SECTOR NORDESTE DE CURITI	12
4. DISCUSION DE RESULTADOS	16
4.1 MESA DE LOS SANTOS	17
4.2 SECTOR NORDESTE DE CURITI	18
CONCLUSIONES	20
BIBLIOGRAFIA	21

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Correlación columna - mineralogía de arcillas. Sección La Navarra	23
Figura 2. Correlación columna - mineralogía de arcillas. Sección Carrizal.	24
Figura 3. Correlación columna - mineralogía de arcillas. Sección La Punta.	25
Figura 4. Correlación columna - mineralogía de arcillas. Sección Calicho.	26
Figura 5. Correlación columna - mineralogía de arcillas. Sección La Cueva.	27
Figura 6. Difractogramas obtenidos de la rutina normal para la Formación Los Santos en la Mesa de Los Santos y sector nordeste de Curitiba.	28
Figura 7. Microfotografías de las cinco secciones estudiadas en el sector de la Mesa de Los Santos y sector Nordeste de Curitiba, mostrando los diferentes elementos estructurales.	29

RESUMEN

TITULO: MINERALOGIA DE ARCILLAS Y ESTUDIO MICROESTRUCTURAL DE LA FORMACIÓN LOS SANTOS EN LA MESA DE LOS SANTOS Y SECTOR NORDESTE DE CURITI*

AUTOR: LUIS FRANCISCO MELO ROJAS**

PALABRAS CLAVES: Mineralogía de arcillas, Los Santos, DRX, SEM, Illita.

La Formación Los Santos esta constituida por un conjunto de materiales sedimentarios divididos en tres miembros, miembro inferior constituido por conglomerados y areniscas conglomeráticas, miembro medio compuesto por arcillolitas, limolitas y areniscas lodosas de grano fino y el miembro superior conformado por areniscas finas y muy finas intercaladas con capas de arcillolitas. Se ha muestreado el miembro medio de la Formación a partir del levantamiento de cinco secciones estratigráficas y mediante DRX y SEM se determino la mineralogía de arcillas y sus elementos estructurales. La formación de los minerales de la arcilla obedece principalmente a un mecanismo, la diagénesis. El principal mineral arcilloso en la zona de estudio es la Illita la cual probablemente es producto de diagénesis y en menor proporción la Caolinita que se encuentra alterada producto de la meteorización, estos minerales arcillosos se comportan como capas impermeables y no permiten la circulación de agua en los miembros medio e inferior, creando posibles acuíferos en las capas de areniscas de estos miembros. La fracción arcilla además de la illita y la caolinita muestra clorita, esméctica, interestratificados (10-14C) y (10-14Sm). Los análisis de SEM evidencia una interacción entre los microagregados principalmente cara-cara y microestructura tipo laminar mostrando que el material fue afectado por procesos post-genéticos como compactación y diagénesis.

*Pasantía de Investigación

**Facultad De Fisicoquímica, Escuela de Geología, Director: Jairo Clavijo Torres.

ABSTRACT

TITLE: MINERALOGY OF CLAYS AND MICROSTRUCTURAL STUDY OF THE FORMATION THE SANTOS IN THE TABLE OF THE SANTOS AND SECOR NORTH-EAST OF CURITI*

AUTHOR: LUIS FRANCISCO MELO ROJAS**

KEY WORDS: Clay Mineralogy, Los Santos Formation, DRX, SEM, Illita.

'Los Santos' Formation is constituted by a set of sedimentary materials divided into three members, Lower member constituted by conglomerates and conglomeratic sands, Middle member constituted by claystones, siltstones and muddy fine-grained sandstones and the Upper member conformed by fine and very fine sandstones intercalated with claystones capes. The Middle member of the formation has been sampled from five stratigraphic sections and with DRX and SEM it could determine the mineralogy of the claystones and its structural elements. The formation of clay minerals obeys principally to a mechanism, diagenesis. The principal clayey mineral at the survey area is the Illite which is probably a product of diagenesis and in minor proportion the Kaolinite that is altered by the meteorization. These clay minerals behave like waterproof capes and they do not allow the circulation of water in the Middle and Lower members. It may create possible water-bearing in the sandstone beds of these members. The clay fraction in addition to the illite and the kaolinite shows chlorite, smectite, inter-stratified (10-14C) and (10-14Sm). SEM's analyses an interaction among principally microstructures evidences expansive face and laminar microstructure type showing that the material was affected by post-genetic processes like compression and diagenesis.

*Pasantía de Investigación

**Facultad De Fisicoquímica, Escuela de Geología, Director: Jairo Clavijo Torres.

INTRODUCCION

En el marco del proyecto “Investigación geológica e hidrogeología en La Mesa de Los Santos, sector Nordeste de Curiti y borde occidental del macizo de Santander” realizado en convenio INGEOMINAS-UIS se llevo a cabo el levantamiento de cinco secciones estratigráficas ubicadas de Noroeste a Sureste así: La Navarra, La Punta, El Calicho y Carrizal (UIS-INGEOMINAS, 2008) sobre la Formación Los Santos en La Mesa de Los Santos y en el sector Nordeste de Curiti, la columna llamada La Cueva (UIS-INGEOMINAS, 2008) y a partir de estas se realizó el estudio de la mineralogía de arcillas para identificar la composición del material fino y relacionar su comportamiento con propiedades hidrogeológicas encontradas en los niveles arcillosos de la Formación Los Santos y además ampliar el conocimiento estratigráfico y sedimentológico de la zona.

La formación Los Santos cubre la mayoría del área en la zona de la Mesa de Los Santos localizándose en la parte alta al NE y en las cotas de menor altura hacia el SW. En el sector nordeste de Curití la formación los Santos esta localizada al Este de la zona. Dicha formación se encuentra bien expuesta en diferentes localidades y se constituyo en la formación de interés para el trabajo de geología de arcillas por su exposición y cubrimiento así como para conocer las características texturales y composicionales de los niveles de interés.

Se presentan curvas mineralógicas realizadas a partir de las muestras colectadas en campo, para definir el comportamiento de los minerales arcillosos y su abundancia relativa en la Formación Los Santos. Estas curvas se hicieron con el propósito de saber la composición de la fracción arcilla y establecer los niveles de mayor y menor porosidad, asimismo conocer el

estado de diagénesis de la formación y así contribuir en el estudio estratigráfico desarrollado para la Formación Los Santos en la “Mesa de Los Santos” y el sector Nordeste de Curití.

1. ANTECEDENTES

En La Mesa de Los Santos existen diferentes estudios realizados sobre la sedimentología y estratigrafía de La formación Los Santos del Cretácico inferior. Sin embargo apenas existen referencias (Barrios y Ariza, 1969) en su estudio sobre la Formación Tambor en la cual describen la formación en tres niveles en el sector de La Mesa de Los Santos, el nivel inferior presenta conglomerados rojizos y areniscas, el nivel medio corresponde a lutitas rojas y capas delgadas de areniscas y el nivel superior esta constituido por areniscas blancas. En el área de Curiti sobre la Quebrada Curiti los niveles se reducen a uno inferior conformado por conglomerados rojizos y areniscas con estratificación cruzada y el superior con areniscas cuarcititas con intercalaciones delgadas de capas arcillosas rojizas y a veces oscuras, y hacia su base se presentan bancos de arcilla separados por bancos arenosos.

Existen secciones muy completas y potentes en el área de estudio cuyos espesores varían ampliamente y se encuentran hacia los bordes de la Mesa de Los Santos lo que hace idónea el área para el estudio de la diagénesis a partir de la mineralogía de arcillas.

Otro estudio en el cual describen la Formación Los Santos es el publicado por INGEOMINAS (1985) en el Proyecto Cretácico, el la que realizan estudios estratigráficos de la formación y determinan la secuencia facial y los ambientes de deposición de los sedimentos cretácicos. Además, el documento contiene un análisis sedimentológico y tectónico discutiendo las edades de las unidades cretácicas.

2. METODOLOGIA

Se realiza un control sistemático de arcillas en la zona de estudio, a partir del levantamiento de las columnas estratigráficas. Se recolectan muestras principalmente sobre capas o niveles limo arcillosos con mayor influencia sobre el desarrollo del sistema hidrogeológico en la zona. Posteriormente se describe la muestra macroscópicamente en el afloramiento con lupa de 20x en base a rasgos particulares del afloramiento, como son: textura, color, estructura y composición, para luego clasificarla según el grado de meteorización que presente. Como este muestreo fue realizado sobre las columnas estratigráficas, se pudo identificar la base y el techo de las capas, para así correlacionar otros niveles equivalentes entre cada una de las columnas. Después de realizada la descripción macroscópica se procedió a recolectar una muestra de 500 gr. aproximadamente, in situ, indicando su localización en cada columna estratigráfica y posteriormente se almacena en bolsas.

Se analizaron 91 muestras no alteradas y representativas de las diferentes unidades, 68 muestras para el análisis de DRX y 23 muestras para el análisis de microscopia óptica de barrido (SEM), Las diferentes etapas del tratamiento de las muestras se realizaron en las instalaciones del Laboratorio de arcillas de la escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander y en el instituto colombiano del petróleo, ICP. A las muestras escogidas para la difracción de rayos X se les aplicaron dos procedimientos que generan cuatro difractogramas. En total se hicieron 272 registros de difracción que tomaron aproximadamente 220 horas de equipo de laboratorio especializado. El procedimiento de manipulación y preparación de muestras tomó alrededor de 15 días.

Los análisis DRX se realizaron por el Grupo de Investigación en Química Estructural, Laboratorio de Difracción de Rayos X, adscrito a la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander, que cuenta con un equipo Rigaku modelo D – MAX – III/B, usando una radiación Cu K α y una velocidad de 1.2° por minuto, el cual genera una respuesta para cada muestra. En total se obtuvieron cuatro difractogramas por cada muestra procesada, tres de los cuales corresponden a la rutina normal de láminas orientadas y la última al análisis de polvos desorientados o bulk. Antes y después de cada tratamiento se realiza un análisis de la muestra y finalmente se superponen todos los difractogramas para definir la composición real, haciendo énfasis en los compuestos mayoritarios, es decir los que conforman alrededor del 95 % de la muestra arcillosa.

En conjunto los tres difractogramas se realizan sistemáticamente a cada muestra para poder realizar su identificación y semicuantificación, esto en general se conoce como la rutina normal para obtener la abundancia relativa de los minerales arcillosos simples. La identificación de los minerales se realiza con base a las reflexiones observadas en cada uno de los difractogramas, se inicia con la comparación de los difractogramas con una tabla de valores de reflexión de los principales minerales en cada uno de los tratamientos realizados.

Para medir el porcentaje de cada mineral en la muestra, se trabaja en el difractograma de etilenglicol, donde los minerales expansivos se han separado de las reflexiones de minerales no expansivos, en el cual se traza el background y se mide la distancia en línea recta entre el pico y el background. Después se suman los valores de todos los minerales encontrados y este valor se toma como 100% con el cual se determina el porcentaje de cada mineral, que es utilizado para graficar el perfil de variación porcentual del mineral a lo largo de la columna.

La medición de la esméctica o de los minerales expansivos, se realiza en el difractograma denominado 500°C, en el cual se observa la banda de refracción de 10°A y se mide en 2θ , consecutivamente se realiza el mismo procedimiento para la determinación de los porcentajes que se llevo a cabo en el difractograma de etilenglicol.

La rutina de polvos desorientados (bulk) consiste en la elaboración de una lamina a partir de la muestra de tamaño de 125 μm distribuida al azar que contiene la mineralogía total de la muestra que incluye tamaño arcilla, limo y arena fina, la cual se somete a irradiación de rayos X con un ángulo de incidencia entre $2\theta - 30\theta$, arrojando como resultado un difractograma denominado bulk, en el que se observan las mineralogías generales como: cuarzo, feldespato y arcillas que son relacionadas de forma semicuantitativa con el tamaño de grano presente en cada muestra.

Para el estudio de las microestructuras de las rocas sedimentarias presentes en la formación Los Santos, la cual representa la unidad con mayor interés hidrogeológico, se empleo un escaneo con el microscopio electrónico PHILIPS SEM 505. Equipado con un campo de emisión de disparo que tiene, además de una resolución de 6nm, una gran profundidad focal. Para obtener un máximo de resolución y la mejor calidad de las microfotografías, se utilizo una gran aceleración de voltaje (16Kv). Cada muestra ha sido cubierta con una película fina de grafito, y metalizada con una película de cadmio-oro.

Las muestras de roca para SEM fueron preparadas minuciosamente cortando cada una hasta un tamaño variable de 10 mm y adheridas sobre el porta muestras mediante la aplicación de una solución de grafito. La muestra fue después revestida con un metal conductor. Este revestimiento fue requerido para obtener una imagen clara mediante la interacción del haz de electrones con el material metalizado. Durante el análisis, la totalidad de las

muestras fueron escaneadas y fotografiadas en áreas de interés (especialmente de las ampliaciones en un rango que varía entre 300X y 5000X), las cuales definían las mejores características en cuanto a los detalles para el estudio microestructural, elementos estructurales, tamaño y forma de los poros, interacciones entre los elementos estructurales y los contactos entre los microagregados y otros elementos.

3. RESULTADOS OBTENIDOS

En las figuras 1 a 5, se muestran las cinco secciones estratigráficas cada una tiene seis curvas en las que se muestra la proporción relativa de los minerales arcillosos simples y algunos interestratificados (caolinita, illita, esméctica, clorita 10-14c y 10-14Sm) a lo largo de la columna; y una curva adicional que indica la presencia significativa de minerales amorfos. De igual manera se identifican las características estructurales para así conocer el grado de permeabilidad y porosidad en los diferentes niveles lodolíticos.

3.1 MESA DE LOS SANTOS

La zona de la Mesa de Los Santos es de interés en el estudio de la mineralogía de arcillas para la Formación Los Santos por presentar gran cantidad de material fino (limo y arcilla) en sus diferentes miembros; por esto se realizaron los distintos análisis en la geología de arcillas a cuatro secciones levantadas en esta zona.

En el miembro medio de las secciones levantadas en el área, se observa un predominio de niveles lodolíticos, la influencia de material arcilloso en el miembro superior arenoso, como intercalaciones de capas muy delgadas y material arcilloso en la matriz del miembro inferior conglomerático.

La semicuantificación realizada a partir de los difractogramas de los minerales arcillosos en esta sección (N-EG-500°C), muestran que la illita tipo (2:1) está presente en todas las muestras, seguido por caolinita (1:1) presente en la mayoría de muestras, posteriormente el interestratificado 10 – 14C, luego el interestratificado 10-14Sm (illita-Esmectita) en los miembros inferior y medio y en menor proporción la clorita en el miembro inferior y por

último esmética tipo 2:1 presente esporádicamente en el miembro inferior y superior de las columnas.

La abundancia relativa de los minerales arcillosos, indican que la mayor proporción corresponde a la illita con un valor promedio de 76%. La caolinita varía ampliamente desde un 5% en la base de las columnas y va incrementando su valor a medida que se sube estratigráficamente hasta un valor de 30%. El interestratificado 10 – 14C se presenta en la mayoría de las muestras escogidas con un valor promedio de 9%. El interestratificado 10-14Sm está presente en el miembro inferior y medio con un valor promedio de 7%. La clorita está presente principalmente en el miembro inferior con un valor promedio de 9%. y la esmética aparece en los miembros inferior y medio con un valor promedio de 13%. Ver Figura 6(A).

La illita se encuentra bien cristalizada en el miembro medio y superior de la sección, reflejada por la simetría de sus picos, donde el índice de cristalinidad (I_c) no presenta valores superiores a 4mm, dando como resultado una illita de pico largo de origen posiblemente diagénético y en el miembro inferior se encuentra mal cristalizada con picos asimétricos producto de la alteración dando como resultado una illita abierta de pico largo. El índice de Esquevin muestra que la illita presente en toda la sección es de tipo Biotítico-Moscovítico, mostrándose una illita pengítica en el miembro inferior. La caolinita presente se encuentra mal cristalizada en las reflexiones a $7A^\circ$ en los miembros inferior y medio mostrando morfologías abiertas indicando alta meteorización durante el depósito presentando en algunos casos hombros a 7.3 y $7.5A^\circ$ en la difracción que corroboran este aspecto; en el miembro superior la caolinita presenta una buena cristalinidad indicando un grado de meteorización menor. La esmética en general se encuentra moderadamente cristalizada según la relación $V/P > 0$, perteneciente a la clase C (Thorez, 1986). Los demás minerales y los interestratificados se

encuentran mal cristalizados en toda la sección reflejado por la morfología abierta de sus picos y los hombros en la difracción.

En el análisis de polvos desorientados, Bulk (Cook, 1977), se observa una tendencia granulométrica, donde la mayor proporción esta representada por la arcilla con un valor promedio de 66%, para arena muy fina (Cuarzo) con un valor promedio de 30% y la fracción limo (Feldespatos) presenta un valor promedio de 4%.

Las características microestructurales del análisis de las microfotografías indican una abundancia notable de microagregados, todos ellos aparecen como asociaciones de partículas arcillosas de illita de 8 a 10 micras de tamaño. Sus formas son irregulares con bordes angulosos y en algunos casos quebrados, que en la mayoría de los casos están orientados. Los microagregados se encuentran separados entre sí por algunas micras; además se presentan partículas tamaño limo que corresponden a partículas de cuarzo que no superan las 30 micras y que en algunas casos están en contacto con los microagregados. La abundancia relativa de microagregados por capa se observa en la Figura 7.

La porosidad ha sido evaluada de acuerdo a la forma y al tamaño de los poros. Se encuentran principalmente ultraporos ($<0.1\mu\text{m}$) entre las partículas primarias de arcilla que conforman los microagregados, microporos ($0.1\mu\text{m}$ - $10\mu\text{m}$) que se forman por los espacios que quedan entre los microagregados, los cuales alcanzan las 5 micras de longitud y 2 micras de ancho (Figura 7). Este tipo de complejo disminuye las posibilidades del desarrollo de una porosidad efectiva, debido a que restringen en gran medida el comportamiento de capilaridad de las rocas y por ende disminuyen la posibilidad de filtración de agua.

La interacción entre las partículas es de dos formas: principalmente cara-cara, donde los planos superficiales están dispuestos paralelamente, dispuestos uno contra otro (Figura 7) dando evidencia de un nivel medio de compactación. Y en segundo grado, en muy baja proporción, una interacción borde-borde debido a los procesos diagèneticos posteriores. Estos tipos de interacciones se dan entre partículas primarias de illita y algunos interestratificados presentes y son debidos principalmente a la laminación original (estratificación) presente en los sedimentos cretácicos y al origen del depósito. Los contactos entre los microagregados fueron evaluados según los parámetros descritos anteriormente (coagulación, transición, y fase). A lo largo del intervalo se observó que los contactos entre partículas son de tipo transición y fase.

De acuerdo al análisis de tamaño de grano (análisis por DRX de polvos desorientados), la mayoría de las capas sedimentarias del miembro inferior de la Formación Los Santos, tienen 50% de arcilla. Característica propia de un ambiente de depósito de baja energía, donde los microagregados con una interacción cara-cara son naturalmente comunes. En síntesis los poros de este intervalo son principalmente ultraporos de formas asimétricas, la interacción entre microagregados son cara-cara y la mayoría de los contactos son transición y fase.

Mediante la identificación de los elementos estructurales (porosidad interacción y contactos entre partículas) en cada estrato del intervalo estudiado, se ha reconocido y diferenciado microestructuras tipo laminar. La laminación es común en la mayoría de los estratos, debido a las condiciones del depósito. Sin embargo este tipo de microestructura se ve transformada a microestructura tipo matriz probablemente a los procesos diagenéticos posteriores.

3.2. SECTOR NORDESTE DE CURITI

La semicuantificación realizada a partir de los difractogramas de los minerales arcillosos en esta sección, muestran que la Illita tipo 2:1 y la caolinita tipo 1:1 están presentes en todas las muestras, seguido por esméctica pura tipo 2:1 posteriormente el interestratificado 10 – 14C, luego el interestratificado 10-14Sm en poca proporción en los miembros medio y superior. La clorita no se presenta en ninguna muestra de esta sección.

El mineral más abundante es la Illita con valores que varían entre 52%-85%, presentando los valores mas altos en el miembro medio. La caolinita varía ampliamente desde un 5% hasta un 26% en toda la sección. La abundancia de esméctica es bastante alta en la base del miembro inferior con un valor de 34% y disminuye notablemente en los demás miembros hasta llegar a no contener. El interestratificado 10 – 14C presenta un valor promedio de 8% y esta contenido en el miembro inferior presentando los valores mas altos hacia la base de este. El interestratificado 10-14Sm esta presente en el miembro medio y superior en pocas muestras con un valor de 3%

La Illita presente en cada una de las muestras analizadas se observa mal cristalizada en el miembro inferior reflejado por el índice de cristalinidad (Ic) mayor a 4 mm a media reflexión, con el índice de Esquiven dando como resultado illita de tipo moscovitico y pengitico y bien cristalizada en los miembros medio y superior reflejada por la simetría en sus picos, donde el índice de cristalinidad (Ic) no presenta valores superiores a 4 mm, dando

como resultado una illita cerrada, de pico largo de origen diagenetico y el índice de Esquevin muestra que la illita presente en estos miembros es de tipo Biotítico-Moscovítico. La caolinita presente esta mal cristalizada en el miembro inferior y bien cristalizada en los miembros medio y superior mostrando morfologías de pico cerrado indicando cambio en la meteorización por los procesos post-sedimentarios. La esméctica presente en el miembro inferior esta mal cristalizada reflejada en la morfología y la relación V/P de la reflexión a 17Å en el difractograma EG. Los demás minerales presentes, reflejan picos asimétricos y mostrando hombros en la difracción (ver Figura 6(B)). Según el análisis realizado anteriormente, se hace notar que la sección esta mal cristalizada en el miembro inferior posiblemente con una diagénesis baja y alta meteorización; y en los miembros medio y superior sucede lo contrario al miembro inferior, una alta cristalinidad presentando muy posiblemente una diagénesis alta.

En el análisis de polvos desorientados (Bulk), se observó una tendencia granulométrica, donde la mayor proporción está representada por la arcilla con un valor promedio de 68%, para arena muy fina (Cuarzo) con un valor promedio de 28% y la fracción limo (Feldespatos) presenta un valor promedio de 3%.

De acuerdo con la observación de las microfotografías a 605x y 1490x para esta sección, la abundancia de microagregados es claramente visible conformados principalmente por partículas primarias de arcilla que en este caso son laminas de illita, con formas irregulares, bordes angulosos y quebrados (Figura 7). Los microagregados se encuentran separados entre ellos por pocas micras.

La forma de los poros es asimétrica, principalmente ultraporos ($<0.1\mu\text{m}$) encontrados entre las laminas de illita las cuales forman los microagregados,

los microporos ($0.1\mu\text{m}$ - $10\mu\text{m}$) llegan a tener hasta 4 micras de longitud por 1 micra de espesor.

La interacción entre las partículas es de dos formas: principalmente cara-cara, donde los planos superficiales están dispuestos paralelamente, dispuestos uno contra otro dando evidencia de un nivel medio de compactación. Y en segundo grado, en muy baja proporción, una interacción cara-borde mostrando un grado bajo de compactación. Estos tipos de interacciones se dan entre partículas primarias de illita debidos principalmente a la laminación original (estratificación) presente en los sedimentos cretácicos y al origen del depósito.

Los contactos entre los microagregados son principalmente de tipo transición y fase por las condiciones de depósito y el grado de compactación de baja a media que presenta la unidad, además por la interacción que presentan las partículas.

De acuerdo al análisis de tamaño de grano (análisis por DRX de polvos desorientados), la mayoría de las capas sedimentarias del miembro medio de la formación Los Santos, tienen más de 50% de arcilla. Característica propia de un ambiente de depositación de baja energía, donde los microagregados con una interacción cara-cara son naturalmente comunes. En síntesis los poros de este intervalo son principalmente ultraporos, la interacción entre microagregados es de carácter fase y transición, y la mayoría de los contactos son cara-cara.

De acuerdo a la identificación de los elementos estructurales (porosidad, interacción y contacto entre partículas) en cada estrato del intervalo estudiado, se ha reconocido y diferenciado principalmente microestructura

tipo laminar. La laminación es común en la mayoría de los estratos, debido a las condiciones de depósito.

4. DISCUSION DE RESULTADOS

La formación de los minerales de la arcilla en la zona de la Mesa de Los Santos y Noreste de Curitiba obedece principalmente a un mecanismo, la diagénesis, la cual indica, que el material arcilloso es producto de la consolidación de sedimentos sueltos. Este argumento se basa en el conocimiento de las unidades aflorantes en el área de estudio y las características de los minerales arcillosos observados en la difracción y la microscopia electrónica de barrido (SEM).

El comportamiento geomecánico e hidrogeológico de la Formación Los Santos en la zona de estudio se analizó por medio de las curvas mineralógicas a lo largo de la secuencia litoestratigráfica de esta formación, con el fin de observar la variación de la fracción arcilla y los minerales arcillosos, lo cual genera cambios en el grado de permeabilidad del material. El principal mineral arcilloso en la zona de estudio es la Illita la cual probablemente es producto de diagénesis y en menor proporción la Caolinita que se encuentra alterada producto de la meteorización.

En el área de estudio, según los resultados obtenidos en los difractogramas y con base en las curvas mineralógicas de las cinco secciones estudiadas, se observó un contenido arcilloso alto en la matriz de estas muestras con un valor cercano al 70% de acuerdo con la comparación de los picos de arcilla, cuarzo y feldespato en la rutina de polvos desorientados. Esta proporción de arcillas se hace importante en el comportamiento geomecánico de los niveles arcillosos analizados, porque estos niveles se comportarán con un carácter impermeable. De acuerdo con la estratigrafía los niveles de arcillas presentes permiten separar los niveles de areniscas principalmente en el miembro medio y superior de la Formación Los Santos en las distintas secciones levantadas.

4.1 MESA DE LOS SANTOS

De acuerdo con la estratigrafía realizada las capas de arcillolita permiten separar, los niveles de areniscas que presentan una porosidad media en la Formación Los Santos. En el caso del miembro medio es mas continua, debido a que este miembro está constituido por niveles gruesos de arcillolitas, constituyéndose como un miembro impermeable. El miembro superior de la Formación de estudio presenta niveles de areniscas separados por capas delgadas y muy delgadas de arcillolitas por tal motivo este miembro pude contener pequeños acuíferos.

Los niveles arcillosos en el miembro medio presentan variaciones en su coloración en las diferentes secciones estudiadas debido al contenido de materia orgánica, mostrando así niveles arcillosos de color rojizo con manchas verdes en diferentes direcciones producto de la descomposición de materia orgánica y en el algunos casos llegando a formar grietas de desecación. En general, los niveles arcillosos presentan buzamientos variables desde 6° hasta los 30° con algunas áreas con pequeños pliegues, que hacen que la inclinación de las capas llegue hasta los 30°; por tanto la variable mineralógica es fundamental en el comportamiento hidráulico del material en la acumulación y circulación de agua, haciendo que estos niveles se constituyan como sellos o capas impermeables en el miembro medio, por su alto contenido arcilloso.

Las curvas mineralógicas, realizadas para graficar los porcentajes de minerales de arcilla de los niveles arcillosos de la Formación Los Santos ubicadas a lo largo de las cuatro columnas levantadas en la Mesa de Los Santos, indican una alta composición ilitica con una cristalización de moderada a buena, que hacen de estos niveles arcillosos, materiales plásticos y cerrados al ingreso de agua a nivel interfoliar. A lo largo de los

tres miembros reconocidos para esta formación en las diferentes columnas, la tendencia ilitica se mantiene con algunos pequeños contrastes con materiales esmectíticos (interestratificados 10-14Sm) que se presentan principalmente en el miembro inferior y en el caso de la sección La Despulpadora en el miembro inferior y medio pero que no afectan en conjunto la tendencia general. Además, minerales como la caolinita la cual no supera el 20% de abundancia y clorita en proporciones menores al 10%, los cuales pueden sumarse con la illita considerando su comportamiento estable frente al agua que a pesar de sus estructuras 1:1(te-oc) 2:1(te-Oc-Te) no permiten el ingreso de agua. Por lo anterior se pueden considerar los niveles de arcillolita y limolitas de la Formación Los Santos materiales poco deformables, muy impermeables con difícil circulación de agua, la cual estaría limitada al fracturamiento o la laminación de las capas que se observa en las rocas de esta formación.

Desde el punto de vista hidrogeológico, según la información obtenida del análisis de arcillas, la Formación Los Santos presenta porcentajes altos de illita, la cual suministra características impermeables a los niveles de limolitas y arcillolitas que se encuentran intercalados con capas de areniscas, aunque el grado de impermeabilidad se ve afectado por la disminución del porcentaje de la fracción arcilla, debido al aumento hasta de 50% de la fracción gruesa (arena fina y limo) en cada una de las capas de areniscas del Miembro Superior de esta formación, los cuales se consideran como capas menos impermeables.

4.2 SECTOR NORDESTE DE CURITI

Según la curva mineralógica realizada para esta zona a partir de una sección estratigráfica, indica alta composición ilitica haciendo entonces que estos niveles arcillosos se comporten muy similar a la zona de la Mesa de Los

Santos, como materiales plásticos y cerrados al ingreso de agua a nivel interfoliar. Los tres miembros de la formación de estudio presentan diferencias en cuanto a la cristalinidad de la illita, mostrando una mala cristalinidad en el miembro inferior y buena cristalinidad en el miembro medio y superior mostrando así en estos dos últimos miembros un origen diagenético. La tendencia illítica se mantiene pero hacia el miembro inferior se presenta esméctica en buena proporción haciendo que este miembro se comporte menos impermeable y permita la acumulación y circulación de agua a estos niveles.

Además, minerales como la caolinita la cual no supera el 25% de abundancia y el interestratificado 10-14C en muy baja proporción pueden sumarse con la illita considerando su comportamiento estable frente al agua los cuales no permiten el ingreso de agua. Por lo anterior se pueden considerar los niveles de arcillolita y limolitas de la Formación Los Santos en los miembros medio y superior de este sector materiales poco deformables, muy impermeables con difícil circulación de agua, la cual estaría limitada al fracturamiento o la laminación de las capas que se observa en las rocas de esta formación.

CONCLUSIONES

Los análisis de DRX aplicados al estudio de la geología de arcillas muestran que el material es ilítico, con la ocurrencia de caolinita y el interestratificado 10-14C comportándose como capas impermeables y que no permiten la circulación de agua en los miembros medio e inferior, creando posibles acuíferos en las capas de areniscas de estos miembros.

La interacción entre los microagregados y el tipo de microestructura obtenidos por los análisis de SEM concluyen que el material fue afectado por procesos post-genéticos como compactación y diagénesis.

Al comparar las dos zonas de estudio se concluye que la zona de Curití en su miembro inferior es menos impermeable por su alto contenido de esmectita dando lugar a posibles zonas de acumulación.

BIBLIOGRAFIA

- AROSTEGUI, J., VELASCO, F., ZULUAGA, M. (1993). Mineralogía de arcillas y grado de diagenesis del cretácico inferior en el flanco sur, del anticlinorio de Bilbao. Estudios geológicos, Universidad Pais Vasco. España.
- COLLO, G., DO CAMPO, M., ASTINI, R. (2005). Caracterización mineralógica, microestructural e historia posdeposicional de la Formación La Aguadita, La Rioja, Argentina. Revista Mexicana de ciencias Geológicas, vol. 22, num. 3, pag. 283-297.
- COOK, H.E., JOHNSON P.D., MATTI J.C. & ZEMMELS I., (1975). Methods of sample preparation and X-ray diffraction data analysis, x-ray mineralogy. In: Initial reports of the DSDP. Kaneps A.G., ed-, 28, Washington DC, 957-1007.
- DUARTE, R. 2007. Clay Geology, Geomechanical Aspects And Landscape Evolution Of Paleogene And Quaternary Sediments Of The Checua Area Nemocon Valley–Colombia.
- ESQUEVIN, J., 1969. Influence de la composition chimique des illites sur la cristallinité. Bull. Centre Rech. Pau-S.N.P.A., 3, 147-154.
- FOLK, R. 1974. Petrology of sedimentary rocks. University of Texas. Hamphill publishing company Austin.

- GRABOWSCA, B., OSIPOV V., SOKOLOV V., 1984. Atlas of the Microstructure of clay soils. Warszawa. 414.

- HEDBERG. H. 1931. Standard Stratigraphic Section of the Departament of Santander, Colombia. Venezuela Gulf Oil Company, Geological Department. Venezuela.

- Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC y Corporación Autónoma Regional de Santander –CAS. 2005. Estudio semidetallado de suelos y capacidad de uso de las tierras para la microcuenca de la quebrada Curiti. Informe XI. Colombia.

- THOREZ, J. 1986. Determination of Clay Minerals by X-Ray Diffraction and Applications in Clay Geology. Université de Liège. Belgique.

Figura 1. Correlación columna - mineralogía de arcillas. Sección La Navarra

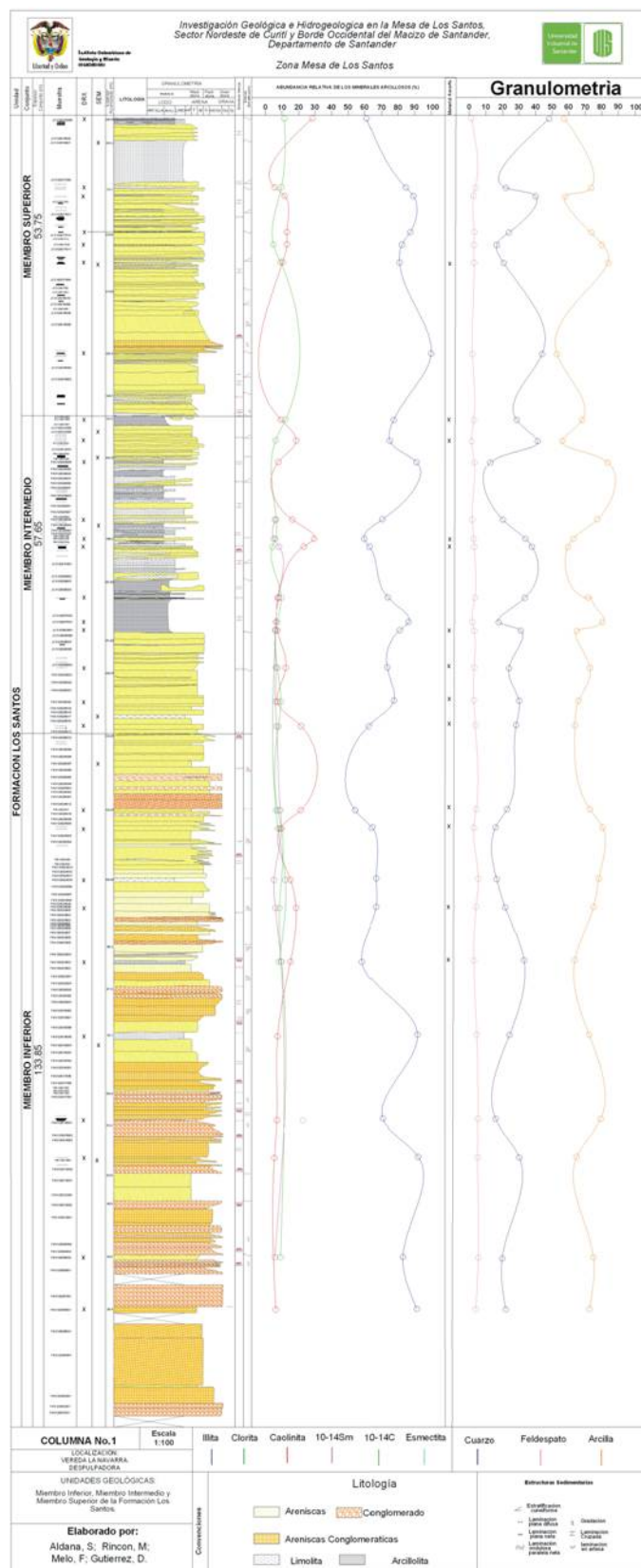


Figura 2. Correlación columna - mineralogía de arcillas. Sección Carrizal.

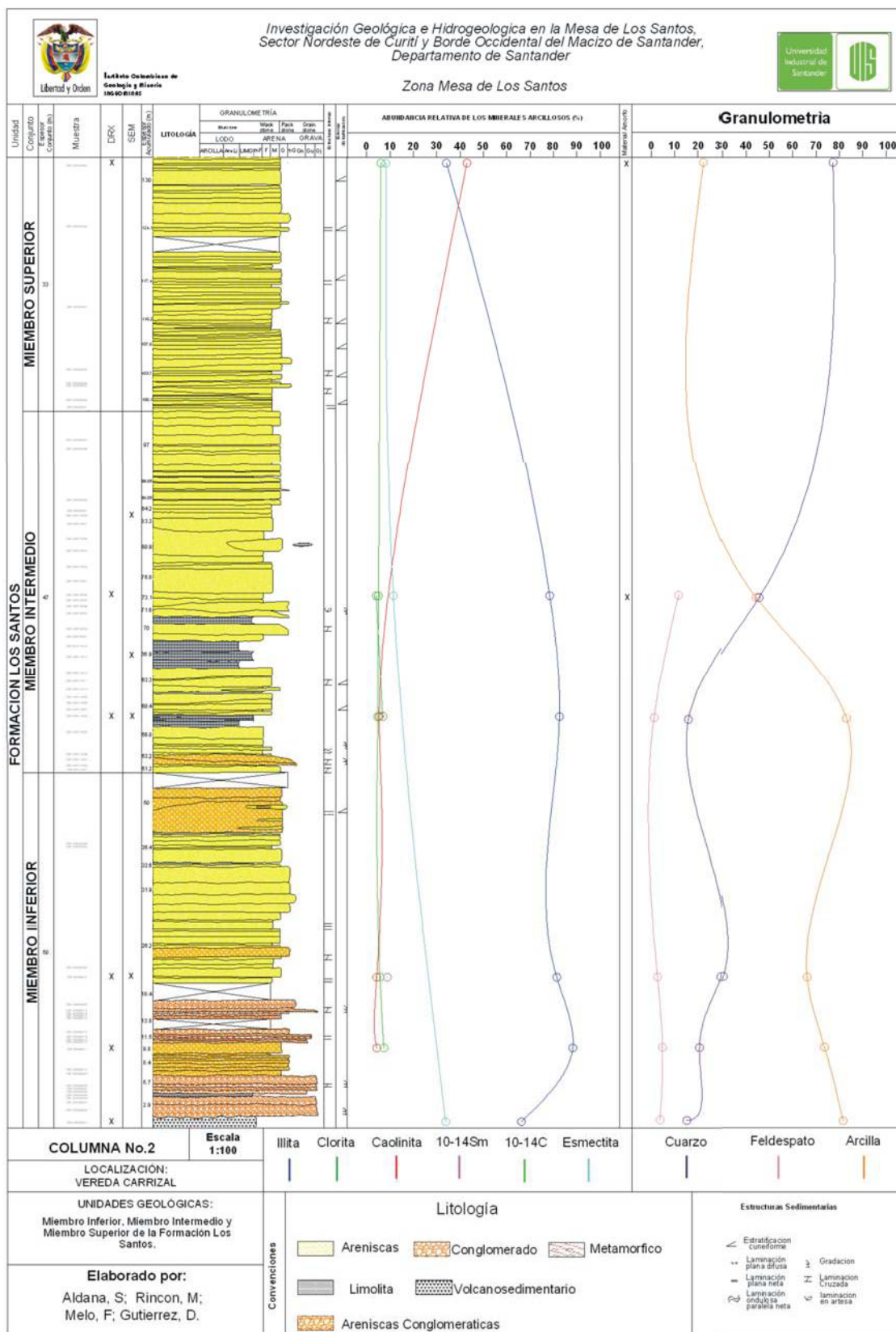


Figura 3. Correlación columna - mineralogía de arcillas. Sección La Punta.

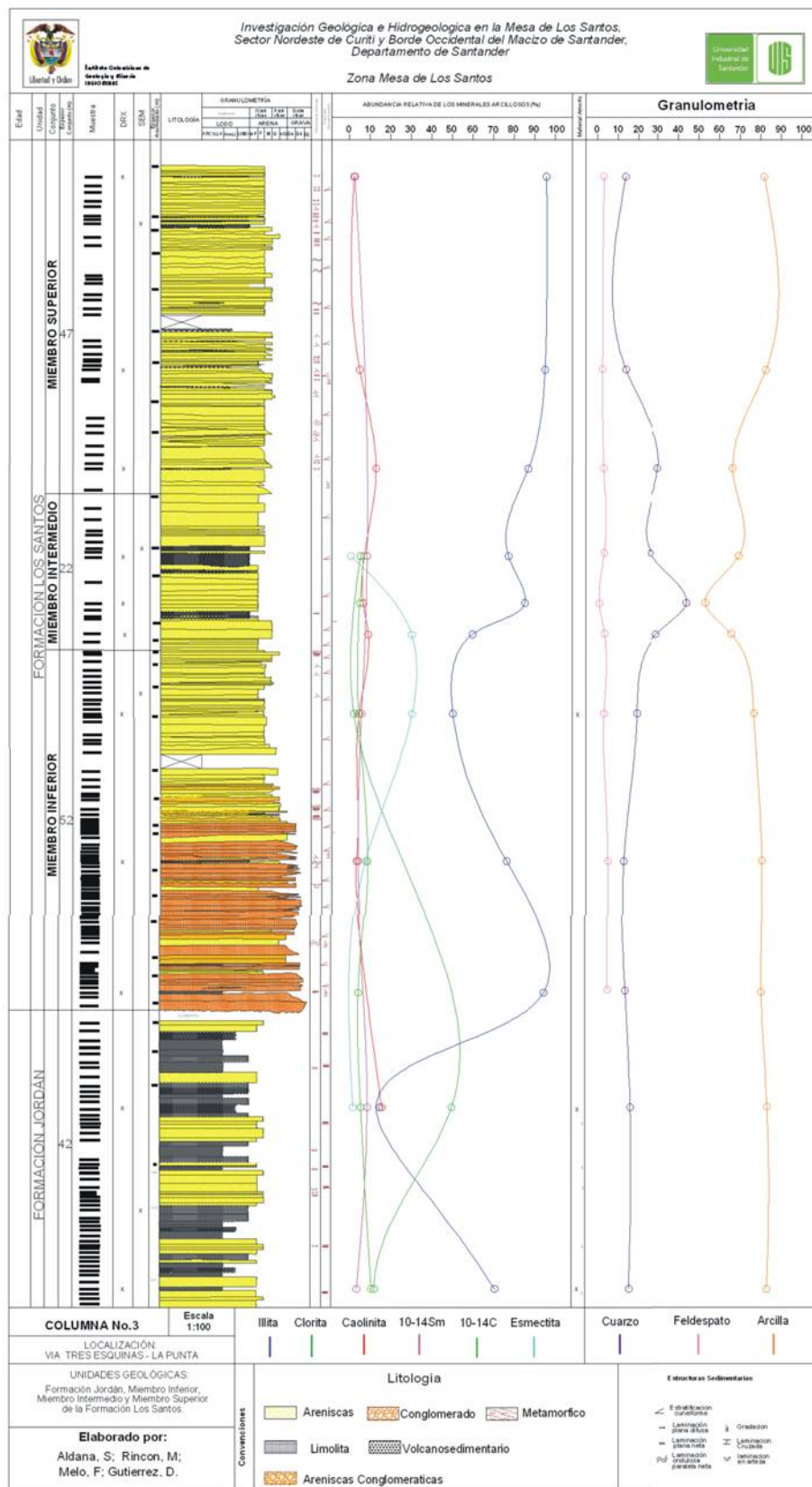


Figura 4. Correlación columna - mineralogía de arcillas. Sección Calicho.

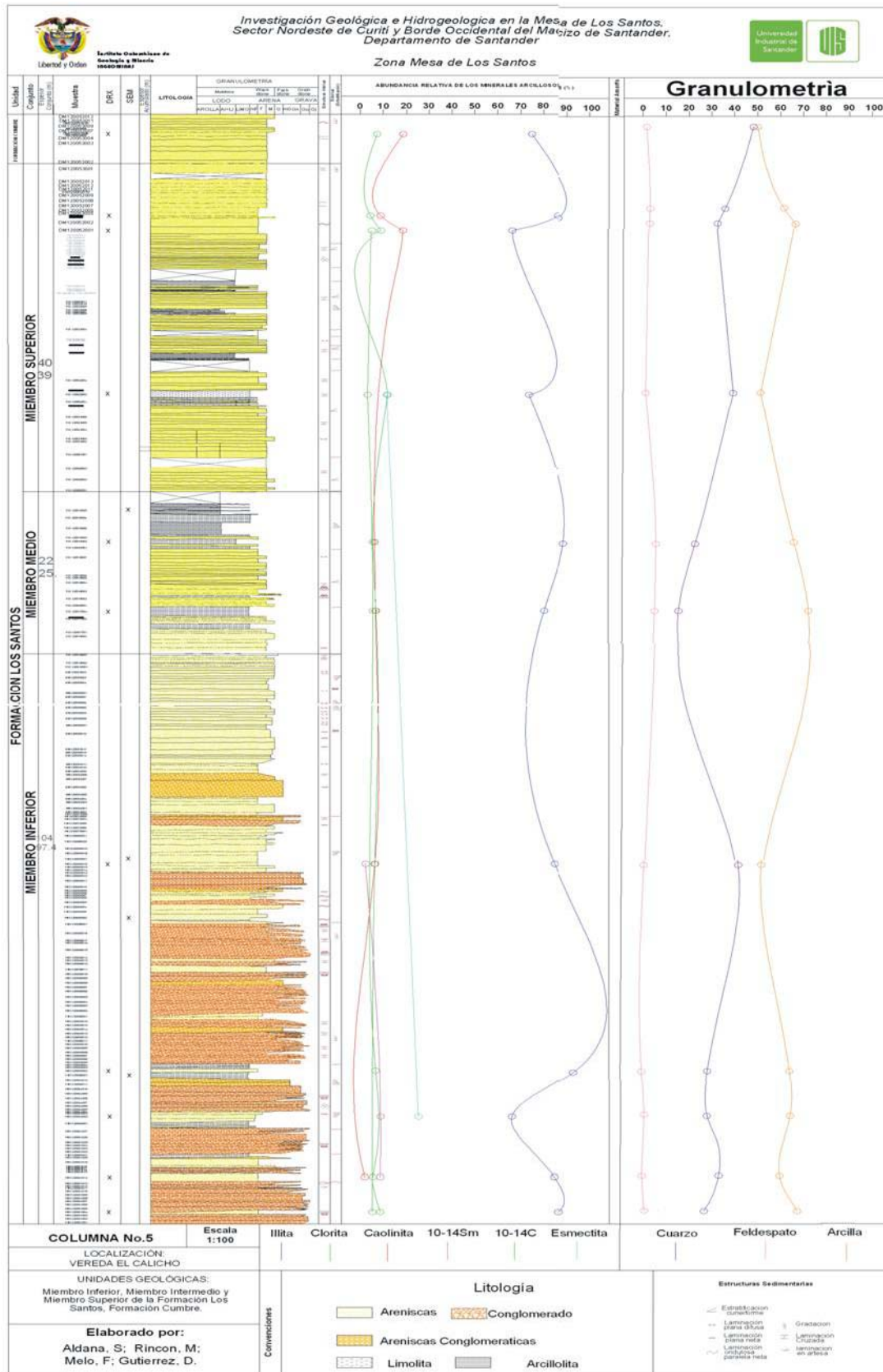


Figura 5. Correlación columna - mineralogía de arcillas. Sección La Cueva.

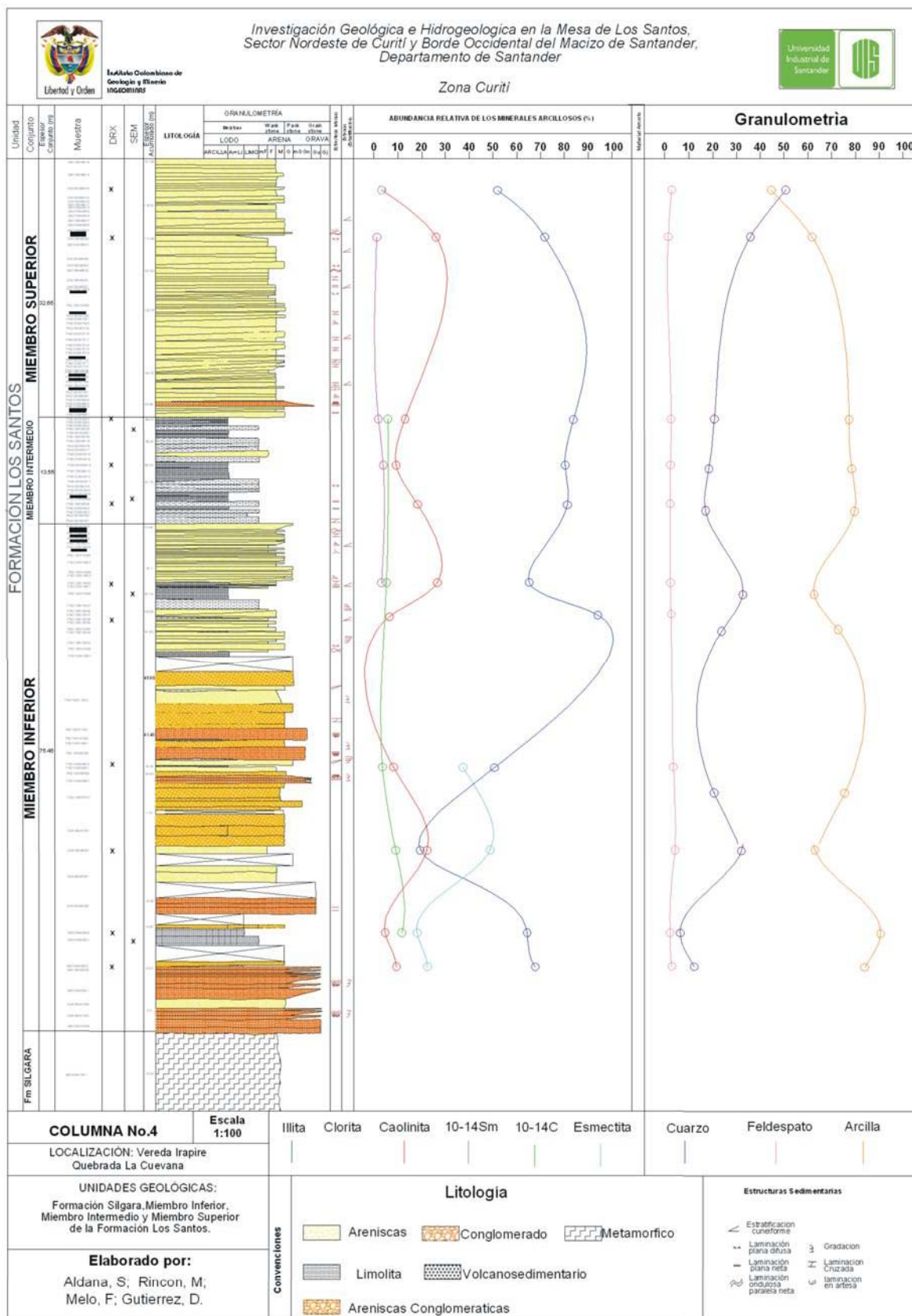


Figura 6. Difractogramas obtenidos de la rutina normal para la Formación Los Santos en la Mesa de Los b Santos y sector nordeste de Curitiba.

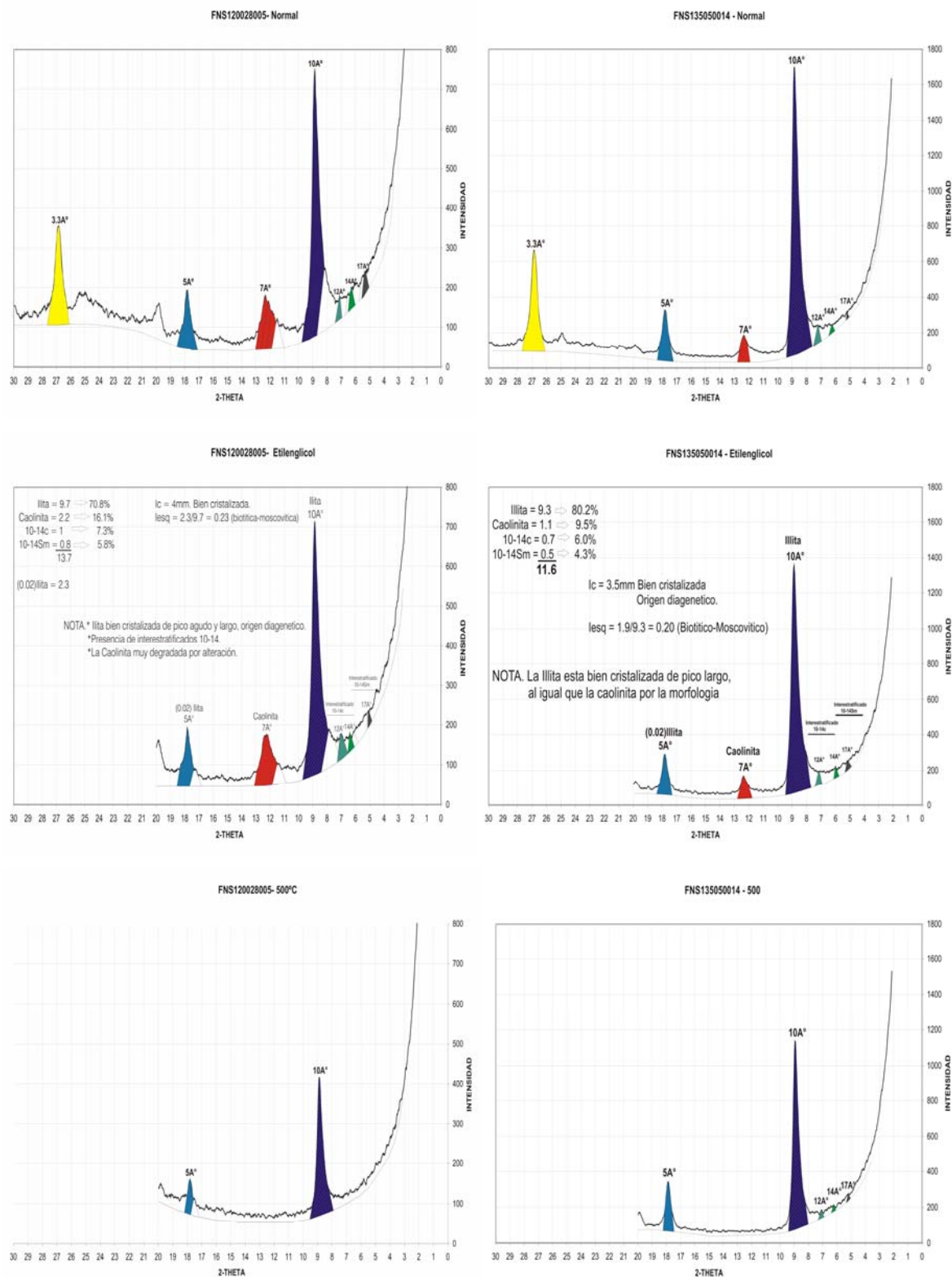
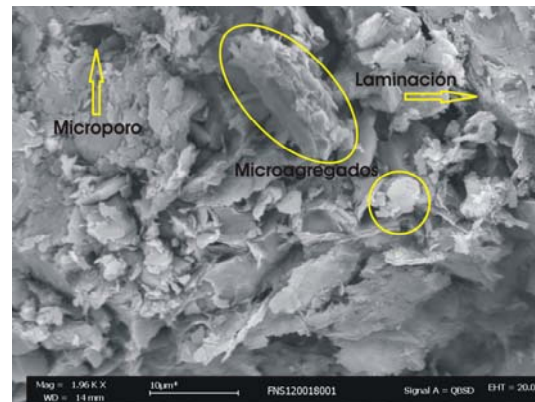
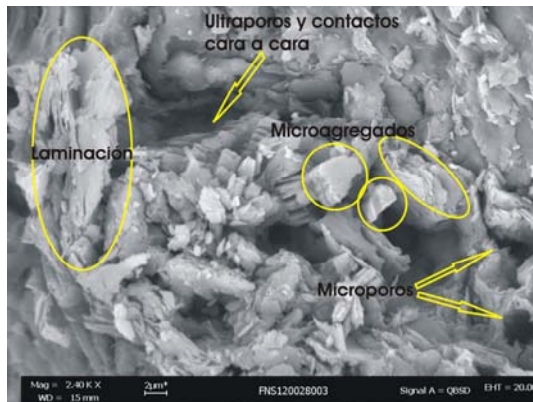
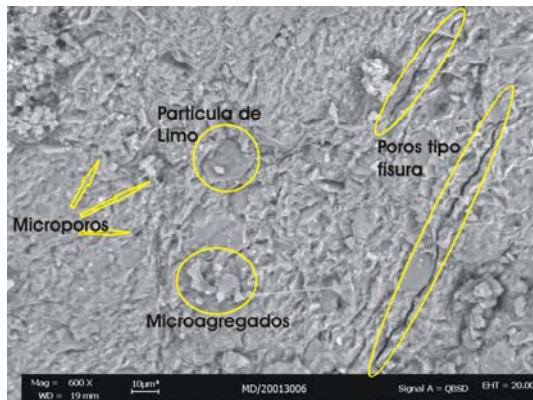


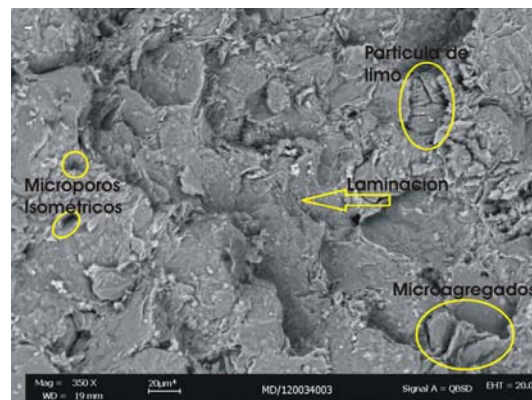
Figura 7. Microfotografías de las cinco secciones estudiadas en el sector de la Mesa de Los Santos y sector Nordeste de Curitiba, mostrando los diferentes elementos estructurales.



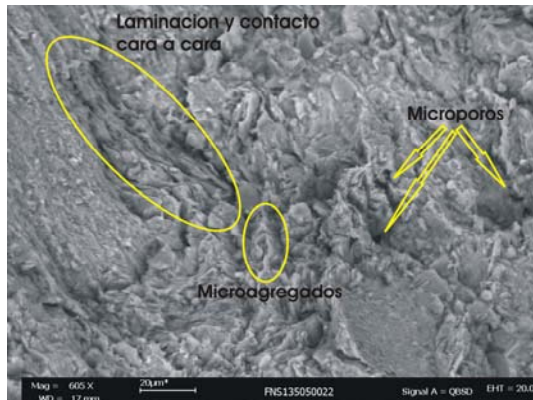
Navarra



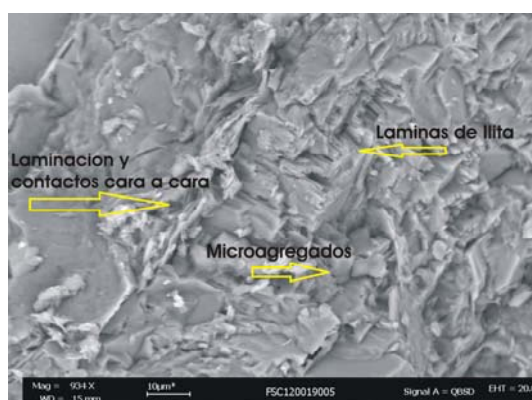
Navarra



Carrizal



La Punta



Cuevana

Calicho