

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y PARÁMETROS  
GEOTÉCNICOS DE ARCILLAS VENEZOLANAS COMO  
FUENTE DE LODO BENTONÍTICO**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el Ing. Scremin L. Luis D.  
Para optar al título de Magister en Ciencias Geológicas

Caracas, 14 de Febrero de 2019

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y PARÁMETROS  
GEOTÉCNICOS DE ARCILLAS VENEZOLANAS COMO  
FUENTE DE LODO BENTONÍTICO**

Tutor académico: Prof. Duilio Marcial

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el Ing. Scremin L. Luis D.  
Para optar al título de Magister en Ciencias Geológicas

© Luis Scremin, 2019

Hecho el Depósito de Ley

Depósito Legal DC2019000284



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
COMISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



Comisión de  
Estudios de  
Postgrado

VEREDICTO

Quienes suscriben, miembros del jurado designado por el Consejo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, para examinar el **Trabajo Especial de Grado** presentado por el **ING. LUIS SCREMIN**, portador de la Cédula de Identidad No **17.512.783**, bajo el título "**CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DE ARCILLAS VENEZOLANAS COMO FUENTE DE LODO BENTONÍTICO**", a fin de cumplir con el requisito legal para optar al grado académico de Magister en Ciencias Geológicas; dejan constancia de lo siguiente:

1.- Leído como fue dicho trabajo por cada uno de los miembros del jurado, se fijó el día 22 de febrero de 2019, a las 11:00 a.m., para que el autor lo defendiera en forma pública, lo que éste hizo en el salón 312 de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica mediante un resumen oral de su contenido, luego de lo cual respondió a las preguntas que le fueron formuladas por el jurado, todo ello conforme con lo dispuesto en el Reglamento de Estudios de Postgrado.

2.- Finalizada la defensa del trabajo, el jurado decidió aprobarlo, por considerar, sin hacerse solidario con la ideas expuestas por el autor, que se ajusta a lo dispuesto y exigido en el Reglamento de Estudios de Postgrado.

Para este veredicto, el Jurado, los profesores Dr. Duilio Marcial, MSc. Sebastián Grande y M.Sc. Víctor León estimaron que la obra examinada representa en su conjunto un aporte importante. Esta investigación presenta un enfoque novedoso dentro del área de la mineralogía aplicada y dentro de la Geotecnia y el jurado por unanimidad le asigna la calificación de "APROBADO".

En fe de lo cual se levanta la presente ACTA, a los VEINTIDÓS (22) días del mes de FEBRERO del año 2019, conforme a lo dispuesto en el Reglamento de Estudios de Postgrado, actuó como Coordinador del Jurado el Dr. Duilio Marcial.

*Sebastián Grande*

MSc. Sebastián Grande  
C.I. 3.803.151  
(JURADO)  
(FI-UCV)

*Victor León*

M.Sc. Víctor León  
C.I. 2.967.544  
(JURADO)  
(FI-UCV)

*Dr. Duilio Marcial*

Dr. Duilio Marcial  
C.I. V- 7.992.995  
(TUTOR)  
FI-UCV



*Signature*

## DEDICATORIA

*A mis padres Mireya y Oswaldo quienes además de darme la vida, han puesto su granito de arena en mi formación tanto profesional como personal y me prestaron todo el apoyo que he necesitado durante todo este tiempo.*

*A Karellys quien ha sido mi pareja, amiga y apoyo durante esta etapa y con quien deseo, si Dios lo permite, vivir muchos momentos más llenos de alegría y felicidad.*

*“Cuida tus pensamientos, porque se convertirán en tus palabras.  
Cuida tus palabras, porque se convertirán en tus actos.  
Cuida tus actos, porque se convertirán en tus hábitos.  
Cuida tus hábitos, porque se convertirán en tu destino”*

*Mahatma Gandhi*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Al doctor Duilio Marcial, quien en calidad de tutor, me mostró el camino a seguir y me prestó su apoyo incondicional durante toda la investigación.*

*A los profesores que han influido en mi formación y en especial a los Profesores Lenin González quien me ha prestado toda su colaboración y apoyo durante toda la carrera, William Meléndez y Marcial Pérez quienes me condujeron por el camino correcto en cuanto a la caracterización química del material utilizado en el presente trabajo. Al profesor Roberto Centeno quien de manera incondicional me ofreció no solo su valioso conocimiento en el área sino también puso a mi disposición todo el material bibliográfico y equipos necesarios para la concreción del trabajo propuesto. A la Ing. Gelin Mejías y a la profesora Anna Di Prinzi por su colaboración en la realización del análisis morfológico de las arcillas analizadas.*

*A los técnicos de los laboratorios utilizados Fernando (Laboratorio de Absorción Atómica del ICT), Ramiro (Laboratorio de Suelos Centeno-Rodríguez & Asociados) y Samuel García (Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido de la escuela de metalurgia) por su apoyo, tiempo y conocimientos a la hora de la ejecución de los ensayos realizados.*

*Finalmente, un especial agradecimiento a Oswaldo, Mireya y Andreina quienes me han dado su cariño y confianza durante toda mi vida; a ellos le debo todo lo que soy. A Karellys leal quien además de ofrecerme todo su cariño y apoyo, ha sido mi compañera incondicional.*

*A todos ellos, mil gracias!!*

SCREMIN, L. LUIS, D.

## **CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DE ARCILLAS VENEZOLANAS COMO FUENTE DE LODO BENTONÍTICO**

Tutor académico: Prof. Duilio Marcial. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Departamento de Geología. Año, 2019, 335 p.

**Palabras claves:** Arcillas expansivas, Bentonita, Potencial expansivo, Capacidad de Intercambio Catiónico, Límites de Atterberg, Rayos X, Microscopía Electrónica de Barrido, Espectrometría de Absorción Atómica y Termogravimetría Diferencial

**Resumen:** Desde los años 60, diversos trabajos realizados en distintas zonas del territorio venezolano, han determinado la presencia de arcillas cuyo potencial expansivo varía dependiendo de la mineralogía y las características físico-químicas de cada una de ellas, mostrando propiedades que evidencian suelos muy nocivos, con una alta actividad coloidal.

Mediante el presente trabajo de investigación se busca evaluar y caracterizar el comportamiento de las arcillas expansivas ubicadas en Ocumare del Tuy, estado Miranda, con la finalidad de identificar la presencia de montmorillonitas en la zona y valorar la posibilidad de tratar dichas arcillas para que puedan ser utilizadas en el campo de la ingeniería para sostenimiento de tierras, en forma de lodo bentonítico.

Una vez realizada la caracterización física del material *in situ* y demostrada la presencia de arcillas con alto potencial expansivo, se utilizó el material extraído de las calicatas para ser tratado a diferentes condiciones químicas, de temperatura y pH, a través del tratamiento con NaCl, NaHCO<sub>3</sub> y NaOH.

Finalmente, las muestras resultantes son evaluadas, física y químicamente, mediante ensayos de límites de consistencia, azul de metileno, ensayos de expansión, ensayos de rayos X, espectrometría de absorción atómica, termogravimetría diferencial y microscopía electrónica de barrido, para comparar su comportamiento luego del proceso ejecutado con las propiedades físicas de las bentonitas comerciales.

Así pues, la evaluación física indica cambios importantes en comparación con los sedimentos originales, aumentando en más del 80% los valores de límite líquido y superficie específica de los colides, mientras que el porcentaje de hinchamiento aumenta hasta en un 100%.

En cuanto a los análisis químicos, mediante la difracción de rayos X se identifican los minerales presentes, mientras la cuantificación de los mismos se realiza a través de la termogravimetría diferencial y tomando en consideración, en algunos casos, el porcentaje de óxidos presentes en cada uno de ellos y obtenidos a través de los análisis de fluorescencia de rayos X y espectrometría de absorción atómica. Así, los porcentajes de minerales presentes corresponden con la siguiente distribución: montmorillonita 34.5%, cuarzo 16.9%, caolinita 15%, albita 12.7%, nontronita 10%, goethita 7.3% y calcita 3.6%; tomando en consideración el promedio obtenido de las muestras analizadas.

En referencia al estudio del intercambio catiónico entre  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Na}^{+}$  en las muestras tratadas, los porcentajes de  $\text{CaO}$  y  $\text{Na}_2\text{O}$  evidencian cambios importantes principalmente en aquellas que se tratan con  $\text{NaCl}$  y/o  $\text{NaHCO}_3$  en combinación con  $\text{NaOH}$ , lo que responde a un aumento del pH por encima de 9.7, permitiendo que el ión bicarbonato se convierta en carbonato (cuando fuese necesario) y la posterior precipitación del  $\text{CaCO}_3$  al combinarse con el  $\text{Ca}^{+2}$  libre de la solución.

Al analizar los resultados obtenidos, mediante los ensayos físico-químicos, se puede inferir que a pesar de que existe una activación importante de la fracción coloidal, alcanzando valores similares a los obtenidos para las bentonitas analizadas, el sedimento total está compuesto por un porcentaje de material inerte (no expansivo), incapaz de absorber la cantidad de agua que se requiere para lograr un máximo nivel de expansión en las arcillas resultantes.

Adicionalmente, se genera una base de datos completa donde se indica información detallada como ubicación, % de expansión, presión de expansión, índice de nocividad, actividad coloidal y superficie específica de los suelos expansivos, estudiados hasta la fecha, a nivel nacional.

# ÍNDICE GENERAL

<b>CAPÍTULO I</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1.1. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO</b>	<b>2</b>
<b>1.2. OBJETIVOS</b>	<b>2</b>
<b>1.2.1. OBJETIVO GENERAL</b>	<b>2</b>
<b>1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>2</b>
<b>1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>4</b>
<b>1.4. JUSTIFICACIÓN O APORTE AL CONOCIMIENTO</b>	<b>6</b>
<b>1.5. TRABAJOS PREVIOS</b>	<b>6</b>
<b>1.5.1. ESTADO ANZOÁTEGUI</b>	<b>7</b>
<b>1.5.2. ESTADO ARAGUA</b>	<b>7</b>
<b>1.5.3. ESTADO FALCÓN</b>	<b>8</b>
<b>1.5.4. ESTADO GUÁRICO</b>	<b>9</b>
<b>1.5.5. ESTADO LARA</b>	<b>10</b>
<b>1.5.6. ESTADO TÁCHIRA</b>	<b>10</b>
<b>1.5.7. ESTADO MIRANDA</b>	<b>11</b>
<b>1.5.8. OTRAS ZONAS DEL PAÍS</b>	<b>12</b>
<b>CAPÍTULO II</b>	<b>17</b>
<b>METODOLOGÍA</b>	<b>17</b>
<b>2.1. RECOLECCIÓN DE DATOS</b>	<b>17</b>
<b>2.1.1. RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>17</b>
<b>2.1.2. REVISIÓN DE MAPAS TOPOGRÁFICOS Y     GEOLÓGICOS</b>	<b>17</b>
<b>2.1.3. TOMA DE MUESTRAS</b>	<b>17</b>
<b>2.2. PROCESAMIENTO DE DATOS</b>	<b>18</b>
<b>2.2.1. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL     IN SITU</b>	<b>18</b>
<b>2.2.1.1. CLASIFICACIÓN VISUAL DE LAS MUESTRAS</b>	<b>18</b>

2.2.1.2. PORCENTAJE DE HUMEDAD NATURAL	19
2.2.1.3. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO	21
2.2.1.4. DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA	23
2.2.1.5. MEDICIÓN DEL PESO UNITARIO	24
2.2.2. TRATAMIENTO DE LAS MUESTRAS	26
2.2.2.1. TRATAMIENTO CON NACL	26
2.2.2.2. TRATAMIENTO CON NACL, NAHCO <sub>3</sub> Y NAOH	30
2.2.3. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS	31
2.2.3.1. LÍMITES DE CONSISTENCIA DE ATTERBERG	31
2.2.3.2. AZUL DE METILENO O PRUEBA DE LA MANCHA	34
2.2.3.3. EXPANSIÓN LIBRE	35
2.2.4. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LAS MUESTRAS SELECCIONADAS	36
2.2.4.1. DIFRACCIÓN DE RAYOS X	37
2.2.4.2. FLUORESCENCIA DE RAYOS X	39
2.2.4.3. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB O SEM) Y ESPECTROMETRÍA DE DISPERSIÓN DE ENERGÍA DE RAYOS X (EDX)	40
2.2.4.4. ESPECTROMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA (AAS)	43
2.2.4.5. TERMOGRAVIMETRÍA DIFERENCIAL	47
2.3. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	50
2.3.1. PROCESAMIENTO DE LOS RESULTADOS FÍSICO- QUÍMICOS REALIZADOS	50
2.3.2. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LOS VALORES CARACTERÍSTICOS DE BENTONITAS COMERCIALES UTILIZADAS EN EL PAÍS	51
2.3.3. ELABORACIÓN DE CONCLUSIONES FINALES	51

<b>CAPÍTULO III</b>	<b>52</b>
<b>MARCO TEÓRICO</b>	<b>52</b>
<b>3.1. GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS</b>	<b>52</b>
<b>3.1.1. GRUPO DE LAS ESMECTITAS</b>	<b>55</b>
<b>3.2. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA EN EL ESTUDIO DE ARCILLAS</b>	<b>57</b>
<b>3.2.1. SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS USCS</b>	<b>58</b>
<b>3.2.2. ACTIVIDAD COLOIDAL</b>	<b>60</b>
<b>3.2.3. ÍNDICE DE NOCIDIDAD DE LOS COLOIDES</b>	<b>60</b>
<b>3.2.4. LÍMITES DE ATTERBERG</b>	<b>62</b>
<b>3.2.5. EXPANSIÓN POTENCIAL</b>	<b>64</b>
<b>3.2.6. SUPERFICIE ESPECÍFICA</b>	<b>64</b>
<b>3.2.7. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO</b>	<b>67</b>
<b>3.3. ANÁLISIS GEOQUÍMICOS: RAYOS-X</b>	<b>69</b>
<b>3.3.1. PRINCIPIOS DE RAYOS-X</b>	<b>69</b>
<b>3.3.2. DIFRACCIÓN DE RAYOS-X</b>	<b>70</b>
<b>3.3.3. FLUORESCENCIA DE RAYOS X</b>	<b>73</b>
<b>3.3.4. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB O SEM) Y ESPECTROMETRÍA DE DISPERSIÓN DE ENERGÍA DE RAYOS X (EDX)</b>	<b>76</b>
<b>3.3.5. ESPECTROMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA (AAS)</b>	<b>79</b>
<b>3.3.6. ANÁLISIS TÉRMICO</b>	<b>81</b>
<b>3.3.6.1. CARACTERÍSTICAS TERMOGRAVIMÉTRICAS DE ALGUNOS MINERALES DE ARCILLA</b>	<b>83</b>
<b>CAPÍTULO IV</b>	<b>87</b>
<b>GEOLOGÍA REGIONAL</b>	<b>87</b>
<b>4.1. ESTRATIGRAFÍA Y SEDIMENTACIÓN REGIONAL</b>	<b>87</b>
<b>4.2. ASPECTOS NEOTECTÓNICOS DE LA REGIÓN SEPTENTRIONAL DE VENEZUELA</b>	<b>89</b>

<b>CAPÍTULO V</b>	<b>92</b>
<b>GEOLOGÍA LOCAL</b>	<b>92</b>
<b>5.1. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUBSUELO EN LA ZONA</b>	<b>93</b>
<b>5.1.1. PERFIL GEOTÉCNICO GENERALIZADO</b>	<b>95</b>
<b>5.1.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS SEDIMENTOS ALUVIALES</b>	<b>96</b>
<b>5.1.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS DEPÓSITOS Terciarios</b>	<b>97</b>
<b>5.1.4. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL FINO DENTRO DE LA SECUENCIA</b>	<b>99</b>
<b>5.1.5. MODELO GEOTÉCNICO DEL SUBSUELO</b>	<b>100</b>
<b>CAPÍTULO VI</b>	<b>102</b>
<b>RESULTADOS EXPERIMENTALES</b>	<b>102</b>
<b>6.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA TOMA DE MUESTRAS</b>	<b>102</b>
<b>6.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL SEDIMENTO RECOLECTADO</b>	<b>103</b>
<b>6.3. TRATAMIENTO DE LAS MUESTRAS</b>	<b>106</b>
<b>6.4. ANÁLISIS FÍSICO DE LAS MUESTRAS TRATADAS</b>	<b>108</b>
<b>6.4.1. LÍMITES DE CONSISTENCIA</b>	<b>108</b>
<b>6.4.2. ENSAYO DE AZUL DE METILENO</b>	<b>110</b>
<b>6.4.3. ENSAYO DE EXPANSIÓN LIBRE</b>	<b>112</b>
<b>6.5. ANÁLISIS QUÍMICO DE LAS MUESTRAS TRATADAS</b>	<b>112</b>
<b>6.5.1. ANÁLISIS ELEMENTAL</b>	<b>113</b>
<b>6.5.2. ANÁLISIS MINERALÓGICO</b>	<b>114</b>
<b>CAPÍTULO VII</b>	<b>117</b>
<b>ANÁLISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS</b>	<b>117</b>
<b>7.1. REVISIÓN DE TRABAJOS PREVIOS</b>	<b>117</b>

<b>7.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DEL MATERIAL ANALIZADO</b>	<b>119</b>
<b>7.3. FACTIBILIDAD FISICO-QUIMICA EN EL USO DE LA ARCILLA TRATADA COMO SUSTITUTA DE LA BENTONITA SÓDICA COMERCIAL</b>	<b>143</b>
<b>CAPÍTULO VIII</b>	<b>150</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>150</b>
<b>CAPÍTULO IX</b>	<b>153</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>153</b>
<b>APÉNDICE A. ENSAYOS DE LABORATORIO PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL</b>	<b>162</b>
<b>A1. PLANILLAS DE CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL ANALIZADO</b>	<b>163</b>
<b>A2. DIFRACTOGRAMAS DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS</b>	<b>271</b>
<b>APÉNDICE B. ANÁLISIS MORFOLÓGICO DE LAS MUESTRAS</b>	<b>289</b>
<b>B1. IMÁGENES SEM PETROLOGY ATLAS (WELTON, 2003)</b>	<b>289</b>
<b>B2. IMAGENES SEM / EDX DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS</b>	<b>328</b>
<b>ANEXO 1. PERFILES GEOTECNICOS DE LA ZONA</b>	

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Ubicación general del área de estudio. Tomado de Google Maps (2017). La imagen inferior derecha pertenece a fotografías aéreas del Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar (IGVSB), correspondiente a la foto 040 de la misión 0303200 del año 1991 a escala 1:25.000.	3
<b>Figura 2.1.</b> Imágenes que muestran el proceso de clasificación visual del material extraído.	19
<b>Figura 2.2.</b> Horno utilizado para el cálculo del porcentaje de humedad.	20
<b>Figura 2.3.</b> Juego de tamices en orden de abertura decreciente utilizado para el análisis granulométrico.	21
<b>Figura 2.4.</b> Imágenes que muestran el proceso de pesaje del material y medición de lecturas con hidrómetro.	23
<b>Figura 2.5.</b> Imagen donde se observan las muestras dentro del balón aforado para su reposo, como parte del proceso utilizado para el cálculo de la gravedad específica.	24
<b>Figura 2.6.</b> Impermeabilización de la muestra con parafina.	25
<b>Figura 2.7.</b> Proceso de extracción del material fino.	27
<b>Figura 2.8.</b> Material fino extraído sumergido dentro de una solución acuosa de NaCl.	28
<b>Figura 2.9.</b> Proceso utilizado con la solución de NaCl a diferentes temperaturas y tiempo.	28
<b>Figura 2.10.</b> Lavado y empacado de las muestras tratadas.	29
<b>Figura 2.11.</b> Muestras tratadas con soluciones acuosas de NaCl, NaHCO <sub>3</sub> y NaOH.	30
<b>Figura 2.12.</b> Proceso utilizado para la medición del límite líquido.	33
<b>Figura 2.13.</b> Medición del límite plástico.	33
<b>Figura 2.14.</b> Ensayo de la mancha.	35
<b>Figura 2.15.</b> Ensayo de expansión libre en consolidómetro.	36

<b>Figura 2.16.</b> Procedimiento para la realización del ensayo de difracción de rayos X.	38
<b>Figura 2.17.</b> Preparación de muestras y cuantificación de elementos mayoritarios por fluorescencia de rayos-X.	39
<b>Figura 2.18.</b> Preparación de muestras para MEB/EDX.	41
<b>Figura 2.19.</b> Recubrimiento con capa conductora de plata y oro.	42
<b>Figura 2.20.</b> Análisis de las muestras en el microscopio electrónico de barrido.	43
<b>Figura 2.21.</b> Horno utilizado para el calentamiento de las muestras.	45
<b>Figura 2.22.</b> Proceso de disolución de las muestras.	46
<b>Figura 2.23.</b> Colocación de la solución en balones de 100 ml.	46
<b>Figura 2.24.</b> Equipo utilizado para la determinación de las concentraciones de Na y Ca en las muestras.	47
<b>Figura 2.25.</b> Balanza analítica sensible de 4 dígitos, indicando el peso obtenido para la muestra M-79.	49
<b>Figura 2.26.</b> Muestras en desecador para evitar que el material absorba humedad.	49
<b>Figura 2.27.</b> Mufla utilizada para el calentamiento de las muestras.	50
<b>Figura 3.1.</b> Representación esquemática de celdas unitarias de minerales de arcilla tipo 1:1 y 2:1. (BESOAIN, 1985). 2) Balance de cargas de las láminas por: a) cationes intercambiables; b) cationes interlaminares en coordinación con grupos OH, formando una capa octaédrica dentro del espacio interlaminar. (FRANCO & MASPOCH, 2009).	52
<b>Figura 3.2.</b> Sistema unificado de clasificación de suelos propuesto por CASAGRANDE (1942).	59
<b>Figura 3.3.</b> Diagnóstico sobre la nocividad de minerales de arcilla según su IN. (Tomado de Bulletin de Liassons des Laboratoires des Ponts et Chaussées en CENTENO, 2013 – Laboratorio de suelos ING-UCV).	61
<b>Figura 3.4.</b> Superficie específica teórica para distintas geometrías. (Tomado y modificado de SANTAMARINA <i>et al.</i> , 2002).	65

- Figura 3.5.** Estructura del catión de azul de metileno, correspondiente al Cloruro azul de metileno  $C_{16}H_{18}N_3S^+.Cl^-$ , de acuerdo a estándar DIN 58981. La máxima superficie cubierta por un catión es de  $130 \text{ \AA}^2$ . (Tomado y modificado de SANTAMARINA *et al.*, 2002). 66
- Figura 3.6.** Espectro electromagnético mostrando el espectro visible con las longitudes de onda en cm (Tomado y modificado de AGUILAR & CARABALLO, 2007). 69
- Figura 3.7.** Difracción de los rayos X a partir de una muestra de polvo plana. Los conos de revolución tienen por eje el rayo incidente y por ángulo de apertura  $4\theta$  (Tomado de BESOAIN, 1985). 72
- Figura 3.8.** Representación esquemática del principio en que se basa la técnica de la FRX (Tomado de AGUILAR & CARABALLO, 2007). (A) La radiación incidente expulsa un electrón de una capa interior del átomo. (B) Un electrón de una capa externa pasa a ocupar el lugar vacante y genera una radiación de FRX. 74
- Figura 3.9.** Diagrama esquemático del sistema microscopio electrónico de barrido/espectrometría de dispersión de energía de rayos X. (Tomado y modificado de WELTON, 2003). 77
- Figura 3.10.** Descripción de las transiciones electrónicas durante el proceso de formación de rayos X. (Tomado de GUZMÁN, 2008). 79
- Figura 3.11.** Diagrama de bloques de un equipo de absorción atómica. (Tomado y modificado de SKOOG & LEARY, 1994). 81
- Figura 3.12.** Diagrama de bloques de una termobalanza (Tomado y modificado de HAINES *et al.*, 1998). 83
- Figura 3.13.** Curvas de deshidratación de algunos minerales de arcilla comunes, estándares de Ward's Establishment, EUA (Tomado y modificado de BESOAIN, 1985). 85
- Figura 4.1.** Mapa Geológico de la región de Ocumare del Tuy. Hoja 6846-III-NE. Edición 1-UCV-2003. 88

<b>Figura 4.2.</b> Mapa de fallas cuaternarias de Venezuela. (Tomado de AUDEMARD, 2006).	90
<b>Figura 4.3.</b> Mapa geológico de Venezuela. Tomado y modificado de HACKLE <i>et al.</i> (2005).	91
<b>Figura 5.1.</b> Imagen satelital que muestra la ubicación de las perforaciones P-1, P-2, P-3, P-4, P-5 y P-6.	93
<b>Figura 5.2.</b> Zona de estudio y ubicación de las perforaciones.	93
<b>Figura 5.3.</b> Procedimiento utilizado para la obtención de las muestras.	94
<b>Figura 5.4.</b> Descripción visual de algunas de las muestras obtenidas y selección para ensayos especiales.	95
<b>Figura 5.5.</b> Perfil del subsuelo estudiado en dirección Oeste – Este.	96
<b>Figura 5.6.</b> Perfil del subsuelo estudiado en dirección Sur – Norte.	96
<b>Figura 5.7.</b> Ensayos granulométricos realizados en los sedimentos aluviales.	97
<b>Figura 5.8.</b> Ensayos hidrométricos realizados en los sedimentos aluviales.	97
<b>Figura 5.9.</b> Ensayos granulométricos realizados en los sedimentos terciarios.	98
<b>Figura 5.10.</b> Ensayos hidrométricos realizados en los sedimentos de granulometría fina de los sedimentos terciarios.	98
<b>Figura 6.1.</b> Imágenes que muestran la calicata utilizada para la recolección del material estudiado.	102
<b>Figura 6.2.</b> Localización de la calicata realizada.	103
<b>Figura 6.3.</b> Distribución granulométrica de las muestras extraídas in situ.	105
<b>Figura 6.4.</b> Imágenes SEM donde se puede observar la morfología de los granos y la textura microcristalina de los sedimentos presentes en las muestras estudiadas. Las imágenes completas se muestran en el anexo III.	115
<b>Figura 7.1.</b> Imágenes SEM características para los minerales presentes en los sedimentos analizados, obtenidas del SEM Petrology Atlas, elaborado por WELTON, (2003). Las imágenes superiores corresponden con la muestra analizada para ser comparadas con las especies mostradas de minerales constituyentes de las muestras extraídas.	121

<b>Figura 7.2.</b> Imágenes SEM características de minerales de arcilla, obtenidas del SEM Petrology Atlas, elaborado por WELTON, (2003). Las imágenes inferiores corresponden con la muestra de bentonita canadiense analizada.	122
<b>Figura 7.3.</b> Distribución geográfica de los suelos de Venezuela (escala 1:4.000.000). Los gelisoles y espodosoles no tiene expresión a esta escala (Tomado y modificado de MOGOLLON & COMERMA, 1994).	124
<b>Figura 7.4.</b> Comparación de la superficie específica de los coloides en las muestras estudiadas.	127
<b>Figura 7.5.</b> Distribución de los límites líquidos obtenidos de las muestras ensayadas.	128
<b>Figura 7.6.</b> Actividad coloidal para cada una de las muestras estudiadas.	129
<b>Figura 7.7.</b> Índice de nocividad de las muestras analizadas.	130
<b>Figura 7.8.</b> Comparación del potencial expansivo de las muestras analizadas.	130
<b>Figura 7.9.</b> Comparación del % de $Fe_2O_3$ y el % de goethita.	135
<b>Figura 7.10.</b> Comparación del % de $MgO$ tanto con el % de esmectitas como con el % de $Al_2O_3$ .	137
<b>Figura 7.11.</b> Comparación del % de $MgO$ obtenido por FRX con el % de $Al_2O_3$ sustituido.	139
<b>Figura 7.12.</b> Comparación del % de $CaO$ obtenido por FRX - AAS con el porcentaje de carbonato obtenido por ATGD.	140
<b>Figura 7.13.</b> Comparación de los % de $Na_2O$ y de $CaO$ en las esmectitas.	141
<b>Figura 7.14.</b> Correlación entre el % de $Na_2O$ y el % de albita en las muestras analizadas.	142
<b>Figura 7.15.</b> Distribución geográfica de los vertisoles en Venezuela.	148
<b>Figura 7.16.</b> Ubicación de trabajos previos reportados en la literatura.	149

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1.</b> Resumen de trabajos realizados desde 1974 a 2012 en diferentes localidades del país donde se muestra los ensayos realizados, la mineralogía descrita y el grado de expansividad propuesto para cada zona.	13
<b>Tabla 3.1.</b> Características químicas y estructurales de minerales de arcilla. (Tomado y modificado de MARTÍN <i>et al.</i> , 1991).	55
<b>Tabla 3.2.</b> Clasificación de suelos según su tamaño de grano. (Tomado y modificado de (BESOAIN, 1985).	57
<b>Tabla 3.3.</b> Clasificación de las arcillas de acuerdo a su actividad, según SKEMPTON (1953).	60
<b>Tabla 3.4.</b> Valores típicos de la actividad de acuerdo a los minerales de las arcillas (Tomado y modificado de SKEMPTON, 1953).	60
<b>Tabla 3.5.</b> Valores típicos de límites líquido y plástico para algunos materiales y suelos arcillosos (Tomado y modificado de DAS, 1999).	63
<b>Tabla 3.6.</b> Valores típicos de Límites de Atterberg para los principales tipos de minerales arcillosos. (Tomado y modificado de LAMBE, 2001).	63
<b>Tabla 3.7.</b> Valores típicos de superficie específica para los principales minerales. (Tomado y modificado de CHO & SANTAMARINA, 2004; DAS, 2008).	65
<b>Tabla 3.8.</b> Valores típicos de capacidad de intercambio catiónico para minerales puros. (Tomado y modificado de KAGAYA <i>et al.</i> , 2012).	68
<b>Tabla 3.9.</b> Reacciones químicas que se producen en las distintas fases del calentamiento. (Tomado y modificado de RAMÍREZ <i>et al.</i> , 2005; VILLANUEVA, 2009; LUNA, 2012; LOPEZ, 2014; ZEBALLOS <i>et al.</i> , 2014).	86
<b>Tabla 5.1.</b> Ubicación geográfica y cotas de terreno de las perforaciones realizadas en la zona de estudio.	94
<b>Tabla 5.2.</b> Distribución de partículas con tamaños menores que el tamiz No. 200, 3 $\mu$ m y 1 $\mu$ m.	99

<b>Tabla 5.3.</b> Parámetros geotécnicos obtenidos a través de los ensayos de límites de consistencia y límites de contracción, así como en los ensayos de expansión libre y expansión controlada.	100
<b>Tabla 5.4.</b> Modelo geotécnico propuesto para la zona de estudio.	101
<b>Tabla 6.1.</b> Descripción visual y ensayos de campo realizados al material extraído.	104
<b>Tabla 6.2.</b> Porcentaje de humedad natural en las muestras obtenidas in situ.	104
<b>Tabla 6.3.</b> Peso específico o gravedad específica y peso unitario o densidad de las muestras extraídas.	105
<b>Tabla 6.4.</b> Descripción de muestras obtenidas al someter el sedimento a diferentes condiciones físico-químicas.	106
<b>Tabla 6.5.</b> Valores de límites de Atterberg de las muestras extraídas in situ.	109
<b>Tabla 6.6.</b> Valores de límites de Atterberg de las muestras tratadas y de bentonitas comerciales.	109
<b>Tabla 6.7.</b> Resultados obtenidos del ensayo con azul de metileno en las muestras extraídas in situ.	110
<b>Tabla 6.8.</b> Resultados obtenidos del ensayo de la mancha en las muestras tratadas y bentonitas comerciales.	111
<b>Tabla 6.9.</b> Expansión potencial de las muestras ensayadas.	112
<b>Tabla 6.10.</b> Composición química elemental de las muestras tratadas.	113
<b>Tabla 6.11.</b> Composición química elemental de la arcilla in situ.	114
<b>Tabla 6.12.</b> Mineralogía identificada en las muestras analizadas.	114
<b>Tabla 6.13.</b> Composición química elemental en la muestra a través del análisis (EDX).	115
<b>Tabla 6.14.</b> Peso de las muestras luego de ser sometidas a diferentes temperaturas y las pérdidas de H <sub>2</sub> O y/0 CO <sub>2</sub> asociadas en términos de porcentajes.	116
<b>Tabla 7.1.</b> Propiedades expansivas de arcillas en diversas localidades venezolanas. Elaboración propia a partir de datos obtenidos de trabajos previos, complemento de STEFANO & SALMEN 1994.	118

<b>Tabla 7.2.</b> Propiedades del sedimento in situ, calculadas a partir de los datos obtenidos de los ensayos realizados.	120
<b>Tabla 7.3.</b> Propiedades coligativas de las arcillas tratadas, calculadas a partir de los datos obtenidos.	126
<b>Tabla 7.4.</b> Porcentaje de óxidos en la estructura química de los minerales analizados.	133
<b>Tabla 7.5.</b> Porcentaje en peso de los principales minerales en las muestras analizadas.	134
<b>Tabla 7.6.</b> Porcentaje en peso de $\text{Fe}_2\text{O}_3$ en la goethita y nontronita.	136
<b>Tabla 7.7.</b> Porcentaje en peso de $\text{Al}_2\text{O}_3$ en la caolinita, albita y esmectitas.	138
<b>Tabla 7.8.</b> Porcentaje en peso de $\text{CaO}$ en la calcita y esmectitas.	142
<b>Tabla 7.9.</b> Comparación de parámetros físico-químicos obtenidos de muestras tratadas y bentonitas comerciales.	145
<b>Tabla 7.10.</b> Áreas y localidades donde se reporta la presencia de suelos vertisoles.	147

## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

Se ha determinado que en Venezuela existen distintas localidades, distribuidas a lo largo de la franja norte del territorio nacional, cuyo subsuelo se encuentra constituido por arcillas potencialmente expansivas. Según VALLEJO (2002), se trata de granos tamaño gel y se necesita que haya habido transformaciones químicas para llegar a esas granulometrías, obteniendo filosilicatos, constituidos por capas de elementos tetraédricos y octaédricos, pudiendo entrar moléculas de aguas y cationes libres entre las hojas. Así, las láminas de las arcillas se originan por el apilamiento de planos alternos de iones (O y OH) y cationes ( $\text{Si}^{4+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Al}^{3+}$ ).

A través del estudio de diversos trabajos realizados en distintas zonas del territorio venezolano, se ha encontrado la presencia de arcillas cuyo potencial expansivo varía dependiendo de la mineralogía y las características físicas y químicas de cada una de ellas. En algunos estados como Aragua, Falcón, Guárico, Lara y Miranda, se determinó la presencia de arcillas expansivas, representadas principalmente por montmorillonita, la cual se encuentra combinada con illita y/o caolinita en distintas proporciones. CURATOLO *et al.* (1976) mediante su estudio experimental de arcillas artificiales preparadas en laboratorio con diferentes relaciones de Montmorillonita sódica y caolinita, identificó que a medida que se incrementaba la cantidad de montmorillonita en las proporciones estudiadas, aumentaba la actividad del material.

Debido a sus pequeños tamaños de partículas, las arcillas y los minerales arcillosos son analizados con técnicas especiales tales como la difracción de rayos X (DRX), la absorción infrarroja y la microscopía electrónica. La Capacidad de Intercambio Catiónico (CEC), la adsorción de agua y el área superficial son algunas de las propiedades de los minerales arcillosos que suelen ser determinadas para lograr una mejor caracterización de los minerales arcillosos. Desde los inicios de la utilización industrial de las bentonitas, tres

han sido los mercados que han absorbido la mayor parte de la producción: Lodos de perforación, arenas de moldeo y peletización de menas de hierro (VEGA *et al.*, 1993).

El presente trabajo de investigación trata de evaluar y caracterizar el comportamiento de las arcillas, potencialmente expansivas, ubicadas al Norte de Venezuela, con la finalidad de identificar la posible presencia de montmorillonitas en la zona y evaluar la posibilidad de tratar dichas arcillas para que puedan ser utilizadas en el campo de la ingeniería para sostenimiento de tierras, en forma de lodo bentonítico. De esta forma, dichas arcillas podrían servir como sustitutas de la bentonita canadiense o colombiana que actualmente dominan el mercado venezolano en esta materia.

## **1.1. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

La zona de estudio se encuentra ubicada entre las latitudes 1122600 m N y 1123000 m N y las longitudes 742100 m E y 743800 m E, sobre los 200 m.s.n.m adyacente al Urbanismo Lomas de La Guadalupe, Ocumare Del Tuy, Estado Miranda (Fig. 1.1).

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo General**

Evaluar y caracterizar el comportamiento de las arcillas expansivas en el Norte de Venezuela especialmente en Ocumare del tuy, Estado Miranda, con la finalidad de identificar la posible presencia de montmorillonitas en la zona.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Realizar una recopilación de la información disponible referente a las arcillas expansivas en Venezuela, detallando su ubicación parámetros geotécnicos, mineralogía y potencial expansivo.

- Caracterizar el material fino mediante ensayos de laboratorio tales como: humedad natural, granulometría por tamizado, hidrómetro, azul de metileno y límites de Atterberg.

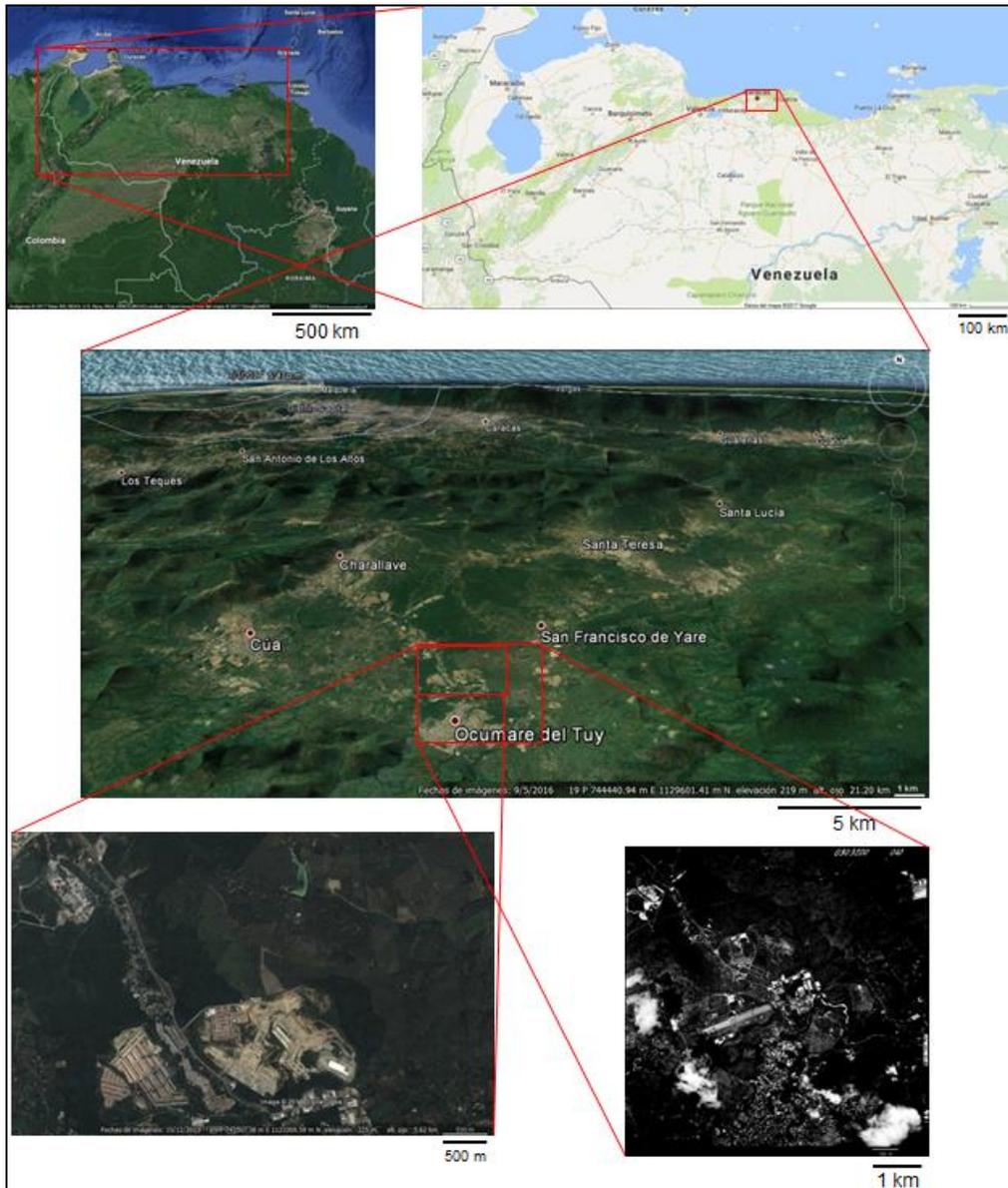


Figura 1.1. Ubicación general del área de estudio. Tomado de Google Maps (2017). La imagen inferior derecha pertenece a fotografías aéreas del Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar (IGVSB), correspondiente a la foto 040 de la misión 0303200 del año 1991 a escala 1:25.000.

- Identificar los tipos de arcillas presentes en la zona mediante ensayos de difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X y microscopía electrónica de barrido.
- Evaluar el potencial expansivo de las arcillas mediante ensayos de expansión libre.
- Seleccionar las muestras para ser activadas intercambiando el calcio, exponiéndolas a iones de sodio para enriquecerlas de este último catión.
- Caracterizar la arcilla sometida a diferentes condiciones físico-químicas, mediante ensayos de fluorescencia de rayos X, espectrometría de absorción atómica, termogravimetría, microscopía electrónica de barrido, azul de metileno y límites de Atterberg.
- Determinar la posibilidad de utilizar las arcillas estudiadas como sustitutas de la bentonita, utilizada en la actualidad en la industria de la construcción.

### 1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El término bentonita se usa para describir la montmorillonita sódica explotada comercialmente (la cual constituye una forma de esmectita) que se usa como aditivo para el lodo de perforación. Según BESOAIN (1985) la montmorillonita es un mineral abundante en los suelos proveniente de materiales parentales básicos, desarrollados en ambientes alcalinos, en condiciones semi-áridas, o en situaciones de drenaje restringido. Las cenizas volcánicas son materiales muy aptos para formar montmorillonita en asociación con nontronita, bajo condiciones de alteración in situ, siempre que se encuentre en los ambientes antes señalados.

CORNELIUS, (1974) menciona que las arcillas son, generalmente, del tipo de dos capas como la caolinita o del tipo de tres capas como la montmorillonita, la clorita o la illita. Cada partícula de arcilla laminar se compone de un apilamiento de capas unitarias paralelas. Cada capa unitaria consta de una combinación de hojas de sílice dispuestas tetraédricamente (en pirámide) y

hojas de alúmina o magnesia dispuestas octaédricamente (ocho caras). Las arcillas de tres capas se componen de capas unitarias, constituidas por dos capas tetraédricas de cada lado de una hoja octaédrica, en cierto modo como un emparedado. Las arcillas pueden ser eléctricamente neutras o estar cargadas negativamente.

Si se sustituye un átomo de aluminio ( $\text{Al}^{+3}$ ) por un solo átomo de magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ ) en la estructura reticular (disposición de los átomos), ésta tendrá un electrón excedente o una carga negativa. La carga negativa neta es compensada por la adsorción de cationes (iones positivos) en las superficies de la capa unitaria, tanto en las superficies interiores como en las superficies exteriores del apilamiento.

Los cationes que se adsorben en las superficies de las capas unitarias pueden ser cambiados por otros cationes y se llaman los cationes intercambiables de la arcilla. La cantidad de cationes por peso unitario de la arcilla se mide y se registra como capacidad de intercambio catiónico (CEC). El catión puede ser un ión de simple carga como el sodio ( $\text{Na}^+$ ) o un ión de doble carga como el calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ) o el magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ ). De este modo, tenemos montmorillonita sódica, montmorillonita cálcica y/o montmorillonita magnésica. Aunque la bentonita de Wyoming esté generalmente definida como montmorillonita sódica, el calcio y el magnesio intercambiables pueden constituir de 35 a 67% de la capacidad total de intercambio. No obstante, la montmorillonita más común es generalmente la montmorillonita cálcica, porque está en equilibrio con el agua de la formación, la cual es generalmente rica en calcio (KAGAYA *et al.*, 2012).

Según RODRIGUEZ (1986), en Venezuela existen arcillas bentónicas asociadas a los cuerpos ultrabásicos que afloran en zonas de Tinaquillo, las cuales se explotaban comercialmente, sin embargo, MENDOZA (2005) menciona que, en la actualidad, dichos depósitos poseen un bajo potencial geoeconómico.

De esta forma se trata de estudiar posibles opciones, dentro del país, que sirvan como alternativa de la bentonita comercial que actualmente domina el mercado venezolano en esta materia.

#### **1.4. JUSTIFICACIÓN O APOORTE AL CONOCIMIENTO**

En la industria de fluidos de perforación, ciertos minerales arcillosos tales como la esmectita, uno de los principales componentes de la bentonita, son usados para proporcionar viscosidad, estructura de gel y control de filtrado en el sostenimiento de tierras. Así mismo, la bentonita también puede ser utilizada como material de sellado en la industria de la construcción, en metalurgia como aglutinante de la arena de cuarzo para para la fabricación de moldes para fundición, para rellenar pozos de captación geotérmica o como aditivo para pinturas tixotrópicas o impermeables.

El presente trabajo de investigación serviría para evaluar y caracterizar el comportamiento de las arcillas expansivas ubicadas en localidades del Norte de Venezuela, con la finalidad de identificar la presencia de montmorillonitas en la zona y evaluar la posibilidad de tratar dichas arcillas para que puedan ser utilizadas en el campo de la ingeniería para sostenimiento de tierras, en forma de lodo bentonítico.

#### **1.5. TRABAJOS PREVIOS**

En Venezuela, como señala PEREZ GUERRA, G. en RIVAS, C. & MUÑOZ, (1974), los primeros estudios sobre suelos expansivos, se realizan a partir del año 1953. La ciudad de Coro es uno de los primeros centros de atención, por parte de los investigadores de suelos venezolanos. Luego se va teniendo conocimiento del fenómeno expansivo en otros lugares, los cuales serán descritos a continuación, con la finalidad de mostrar las características físicas y geoquímicas que permiten identificar la presencia de arcillas potencialmente expansivas en determinada zona. De esta forma, se realiza una revisión

selectiva de publicaciones que estudiaron distintos depósitos arcillosos a lo largo del territorio venezolano.

### **1.5.1. Estado Anzoátegui**

DOMINGUEZ, (1980) explora el subsuelo sobre la que reposa la planta de gas El Toco en Anaco, Estado Anzoátegui. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto la existencia de arcillas de alta plasticidad, con propiedades tales que la clasifican como un material con potencial expansivo muy alto.

Así mismo, PEREZ GUERRA, G. EN D'GREGORIO M. & ESTANGA, (1983), realiza un estudio al Oeste de Barcelona, donde analiza los datos obtenidos de los ensayos de laboratorio mediante la correlación de SEED *et al.* (1962) y concluye que las muestras tomadas de la zona, presentan una expansividad que varía de baja a media, con casos ocasionales de expansividad alta.

### **1.5.2. Estado Aragua**

BAZAN, A & VERA, (1999) realizó un estudio en distintas zonas del Estado Aragua, mencionando que los suelos que conforman la zona central y litoral costero del Estado Aragua (Tejerías, El Consejo, La Victoria, San Mateo, Turmero, Maracay, Santa Cruz, Cagua) son de baja plasticidad, a la vez que hacia Zuata, Pao Zarate, Cuyagua y Turiamo se encontraron depósitos de arcillas de media y alta plasticidad, sin presencia de cantidades importantes de esmectitas. No obstante, los resultados obtenidos en la zona Sur del Estado Aragua (Magdaleno, San Francisco de Asís, Villa de Cura, San Sebastián de Los Reyes, San Casimiro, Camatagua, Carmen de Cura, La Ceiba, Taguay, San Francisco de Cara, El Totumo, Las Peñitas, Barbacoa, El Pegón, Nare y Las Carillas) muestran suelos arcillosos altamente expansivos, especialmente en las zonas de Villa de Cura, Camatagua y el Municipio Urdaneta, donde las arcillas están conformadas aproximadamente por 30% de illita, 30% de esmectita y 40% de caolinita.

Más adelante, en 2006, HERNANDEZ, M. caracterizó las arcillas expansivas ubicadas al Sur de Maracay, Estado Aragua, donde concluyó que el 48% de dicho material lo representan minerales del grupo de las esmectitas, 30% de illita y 22% de caolinita. No obstante, el fenómeno de expansión o hinchamiento en los suelos de la zona es poco evidente.

### **1.5.3. Estado Falcón**

MORA, (1974) realiza una investigación en la ciudad de Coro, seleccionando como zona de estudio las urbanizaciones Cruz Verde II e Independencia. Concluye que el suelo de la zona de Coro, según ensayos realizados, está conformado por una arcilla expansiva con alto índice de plasticidad.

Por su parte, BARRIENTOS, C. & TOVAR, (1975) destacan las principales formaciones de arcilla en Venezuela y ubica los sitios donde están las arcillas expansivas. En el campo realizan un reconocimiento de la zona (Miri-Mire) describiendo las características geológicas tanto de la región, como del tramo de la carretera en investigación (Coro – Miri-Mire). Mediante la toma de muestras, ensayos de campo y de laboratorio, indican la presencia de arcillas muy expansivas.

ZAMBRANO, (1976) realizó un estudio de estabilización química de arcillas expansivas provenientes de la carretera Coro – Churuguara, donde por medio de ensayos como límites de consistencia y análisis granulométrico, determinó la actividad coloidal, según Skempton clasificando el material estudiado como inactivo.

BASTIDAS *et al.* (1987) analizaron la relación entre la presión de expansión de los suelos de Coro y la superficie específica de los coloides utilizando el ensayo de azul de metileno, concluyendo que el Valor Azul y la presión de expansión están directamente relacionados entre sí; esto debido a que el azul de metileno es absorbido por los coloides, los cuales se encuentran, en mayor proporción, en las muestras más expansivas. Adicionalmente, mencionan que la fracción arcillosa estudiada a través del ensayo de DRX presenta abundante

montmorillonita y en menor proporción illita, caolinita y clorita. Así mismo, arrojaron valores de superficie específica (Se) que variaban entre 208,8 y 303,8 m<sup>2</sup>/gr, siendo estos cónsonos con los resultados obtenidos en el ensayo de DRX.

Por otro lado, tanto DÍAZ, J. & RODRIGUEZ. (1987) como RODRÍGUEZ, (2003) realizaron trabajos en otra zona del estado. El primero concluye que de acuerdo a los ensayos realizados en arcillas ubicadas en el sector Mirimire resultaron ser muy expansivas, basados en el índice plástico, el índice de contracción y la actividad coloidal. El segundo autor, mediante una caracterización geotécnica de un área comprendida entre Morón y Mirimire, a través del análisis petrográfico y de difracción de rayos x de las muestras, menciona la presencia de arcillas de alta plasticidad (CH) desde Sanare hasta Mirimire.

#### **1.5.4. Estado Guárico**

En 1976, BRUZUAL, realiza en estudio para caracterizar las arcillas presentes en el subsuelo de una zona del Estado Guárico ubicado en los llanos centro-occidentales, donde concluye, tras realizar varios ensayos de laboratorio (humedad natural, peso específico, granulometría e hidrómetro, límites de Atterberg, hinchamiento libre, potencial expansivo, difracción de rayos x y ensayos de dispersión), que los suelos analizados resultaron en su mayoría arcillas de baja y mediana plasticidad y tienen como característica primordial la de ser suelos medianamente expansivos y altamente dispersivos. Los minerales de arcillas estaban conformados principalmente por illita y no se encontró la presencia de montmorillonita en las muestras estudiadas.

BAQUERO, P. (2010) realizó un trabajo en el municipio Pedro Zaraza, en un sector del eje ferroviario de los llanos en el estado Guárico, donde analizó muestras de arcillas para caracterizar los materiales presentes y valorar el potencial expansivo a fin de evaluar los posibles problemas de inestabilidad en la zona. Determinó la presencia de minerales de arcilla como montmorillonita e illita, las cuales le confieren un alto potencial de expansión al subsuelo

estudiado. Para estudiar el potencial expansivo de las muestras utilizó la correlación propuesta por SEED *et al.* (1962), la cual compara el % de la fracción arcillosa con su actividad coloidal (AC), dividiendo el índice de plasticidad (IP) entre el % de coloides; mientras que las presiones de expansión y la expansión libre las calculó mediante las correlaciones propuestas por VIJAYVERGIYA & GHAZZALY (1973) a través del índice de expansión (Is), dividiendo el %  $W_{natural}$  entre el Límite Líquido (LL). Los valores más altos encontrados para el LL, IP y % Coloides fueron de 69, 45 y 40% respectivamente.

### **1.5.5. Estado Lara**

ESCHEIK, C. & CONTRERAS, (2007) analizaron el subsuelo en la urbanización Villas Cantevista, Barquisimeto, Estado Lara mediante el ensayo de azul de metileno, obteniendo una superficie específica de coloides de 491 m<sup>2</sup>/gr y un índice de nocividad de 19,7%, concluyendo que se trata de un suelo muy nocivo con alto contenido de montmorillonita cálcica.

### **1.5.6. Estado Táchira**

RIVAS, C. & MUÑOZ, (1974) estudian la estabilización física de suelos expansivos. Los primeros analizaron el subsuelo en tres localidades de Venezuela, enfocados en Ureña principalmente, aunque también estudian el potencial expansivo de las arcillas de la carretera Morón-Coro con bentonita sódica y del Fuerte Guaicaipuro en Santa Teresa del Tuy (Miranda). Concluyen que las arcillas de Ureña, desde el punto de vista de potencial expansivo conforme a la clasificación P.V.C. (Lambe), son consideradas como no críticas. No obstante, mencionan que las muestras pertenecientes al Fuerte Guaicaipuro revelaron la presencia de montmorillonita con un alto potencial expansivo.

### 1.5.7. Estado Miranda

GINES *et al.* (1988), realizaron una investigación similar a la de BASTIDAS *et al.* (1987), en la que evaluaron la relación entre la presión de expansión de los suelos de Los Valles del Tuy en estado natural y el valor azul de Metileno. A pesar de no llegar a resultados concluyentes en cuanto a la relación presión de expansión y el valor azul, mencionan que el material ensayado proveniente del Distrito Paz Castillo, poseen un porcentaje de expansión que varía de 4 a 13%, lo que indica que el potencial expansivo de las arcillas es de medio a alto.

STEFANO, R. Y SALMEN, (1994) analizaron muestras de suelo en las cuencas Guarenas-Guatire y la del río Tuy, mediante una metodología de análisis para determinar las propiedades expansivas. Estos resultados los compararon con distintas muestras de suelos expansivos tomadas en diferentes partes de Venezuela, por lo que generaron mapas sobre la ubicación de las arcillas expansivas en Miranda, encontrando que desde Santa Lucía hasta Ocumare las arcillas son de alto potencial expansivo, alcanzando valores de  $S_e$  en el rango de 282,29  $m^2/gr$ , mientras que en Charallave y Cúa son de medio y bajo potencial expansivo respectivamente.

Para 1999, BARBIERO, estudió, mediante ensayos de laboratorio similares a los ya mencionados más el ensayo con azul de metileno, el subsuelo ubicado en el Túnel Pitahaya (Caracas - Cúa, Estado Miranda), concluyendo que el material estudiado, perteneciente a la Formación Tuy, presenta un moderado potencial expansivo sin la presencia de esmectitas.

Así mismo, SCREMIN, (2013, 2014) estudia el subsuelo del Urbanismo Lomas de La Guadalupe ubicada en Ocumare del Tuy y las carreteras nacionales La Raíza y Cúa-Charallave en el marco de los proyectos de agua potable del desarrollo habitacional Ciudad Zamora y Urbanismo Lomas de La Guadalupe y de agua servida del desarrollo habitacional Ciudad Bicentenario. Realizando varias perforaciones geotécnicas distribuidas a los largo de las zonas de estudio y seleccionando diversas muestras para ensayos de laboratorio como humedad natural, límites de consistencia y de contracción, hidrómetros,

gravedad específica, compresión sin confinar, presión de expansión, expansión potencial, cortes directos, índice de nocividad y actividad coloidal, caracterizó el material estudiado como secuencias principalmente arcillosas con intercalación de lentes de arenas y gravas. En cuanto al material arcilloso encontrado en las carreteras nacionales La Raíza y Cúa-Charallave determinó que dicho material tenía un potencial expansivo bajo; no obstante, las arcillas identificadas en el Urbanismo Lomas de La Guadalupe resultaron ser muy activas con coloides nocivos y un porcentaje de expansión superior a 7%.

#### **1.5.8. Otras zonas del país**

ACOSTA, A. & SALVATIERRA, (1976) y GUEVARA, E. & LÓPEZ, (2012) realizaron un estudio de arcillas expansivas a lo largo del Norte de Venezuela, enfocados en los estados Anzoátegui, Falcón y Miranda. Por su parte PADRÓN (2010) lo hizo en la zona central y occidental del país (Apure, Falcón y Distrito Capital). A nivel mineralógico GUEVARA, E. & LÓPEZ, (2012) concluyen que para los estados Anzoátegui y Falcón los valores de caolinita (55%), illita (30%) y esmectita (10%) son similares, mientras que en Miranda encontraron proporciones más altas de esmectitas (hasta 30%), illita (60%) y muy bajas de caolinita y clorita. En cuanto a la expansividad de las arcillas, identificaron zonas de alto potencial expansivo en Ocumare y al Noreste y Sur de las carreteras Morón-Mirimire y Barcelona-Cantaura respectivamente; zonas de potencial expansivo medio en la carretera Charallave-Santa Teresa y al Sureste de la carretera Morón-Mirimire y por último mencionan que las arcillas de bajo potencial expansivo dentro de la zona estudiada, se encuentran principalmente en Charallave, Yaracal y al Sur de Barcelona. En el caso de ACOSTA, A. & SALVATIERRA, (1976), realizaron estudios de expansión libre y expansión controlada para analizar el comportamiento expansivo de las muestras después de haber sido compactadas. Finalmente, PADRÓN, (2010) determina un potencial de expansividad de bajo a medio mediante el estudio de la superficie específica y la actividad coloidal del material ensayado.

Tomando en consideración todo lo antes descrito, se sabe que en Venezuela existen vastas regiones cuyo subsuelo se encuentra constituido por arcillas potencialmente expansivas, cuya ubicación se ha venido determinando en la medida que se han construido obras de ingeniería. La revisión bibliográfica realizada permite ubicar la existencia de arcillas con alto potencial expansivo en distintas zonas de Venezuela, especialmente en los estados Anzoátegui, Aragua, Falcón, Guárico, Lara y Miranda.

La tabla a continuación muestra un resumen de los trabajos realizados hasta la fecha en diferentes localidades del país, donde se indica los ensayos realizados, la mineralogía descrita y el grado de expansividad propuesto para cada zona.

Tabla 1.1. Resumen de trabajos realizados desde 1974 a 2012 en diferentes localidades del país donde se muestra los ensayos realizados, la mineralogía descrita y el grado de expansividad propuesto para cada zona.

CUADRO RESUMEN DE TRABAJOS PREVIOS					
ESTADO	AUTOR	LOCALIDAD	ENSAYOS	MINERALOGIA	GRADO DE EXPANSIVIDAD
Anzoátegui	DOMINGUEZ (1980)	Anaco	Humedad Límites de Consistencia Hidrómetro Gravedad Específica Presión de Expansión	-	Alto
	GUEVARA & LÓPEZ (2012)	Sur de carretera Barcelona - Cantaura	Humedad Límites de Consistencia Hidrómetro Gravedad Específica Presión de Expansión Expansión Potencial DRX Microscopía Electrónica	Caolinita 55% Illita 30% Esmectita 10%	Alto
		Barcelona	Humedad Límites de Consistencia Hidrómetro Expansión Potencial	-	Bajo
	PÉREZ GUERRA (1983)	Barcelona	Humedad Límites de Consistencia Hidrómetro Expansión Potencial	-	Bajo a Medio
Apure	PADRON (2010)	Santa Amelia Carretera Elorza - Guasualito	Humedad Gravedad Específica Límites de consistencia Hidrómetro	Illita Caolinita Montmorillonita	Medio

ARAGUA	BAZAN & VERA (1999)	Tejerías, El Consejo, La Victoria, San Mateo, Turmero, Maracay, Santa Cruz, Cagua	Hidrómetro Gravedad Específica Azul de Metileno DRX Presión de Expansión	-	Bajo
		Zuata, Pao Zarate, Cuyagua y Turiamo		-	Medio
		Villa de Cura, Camatagua y el Municipio Urdaneta		Illita 30% Esmectita 30% Caolinita 35%	Alto
	HERNANDEZ (2006)	Maracay	Humedad Límites de Consistencia Hidrómetro DRX	Illita 30% Esmectita 48% Caolinita 22%	Bajo
DISTRITO CAPITAL	PADRON (2010)	Ciudad Universitaria	Humedad Gravedad Específica Límites de consistencia Hidrómetro	Illita Caolinita	Bajo
FALCÓN	RIVAS & MUÑOZ (1974)	Carretera Morón Coro	Humedad Gravedad Específica Límites de Consistencia Granulometría DRX Presión de Expansión Expansión Potencial	Illita Caolinita	Medio
	ZAMBRANO (1976)	Carretera Coro - Churuguara	Humedad Límites de Consistencia Límite de Contracción Hidrómetro DRX Composición Química Determinación del pH	Caolinita Montmorillonita Clorita	Bajo
	MORA (1974)	Coro	Humedad Gravedad Específica Límites de Consistencia Hidrómetro Ensayos de campo	-	Alto
	BASTIDAS <i>et al.</i> (1987)		Humedad Gravedad Específica Límites de Consistencia Hidrómetro Presión de Expansión Expansión Potencial Azul de Metileno Doble Odómetro	Montmorillonita Illita Caolinita	Alto

	BARRIENTOS & TOVAR (1975)		Humedad Hidrómetro Gravedad Específica Límites de Consistencia Presión de Expansión	-	Alto
	DÍAZ & RODRIGUEZ (1987)	Mirimire	Humedad Hidrómetro Gravedad Específica Límites de Consistencia Límites de Contracción Azul de Metileno	-	Alto
	RODRÍGUEZ (2003)	Morón Mirimire	Humedad Límites de consistencia Granulometría DRX Expansión Potencial	Esmectita Illita Caolinita	Alto
	GUEVARA & LÓPEZ (2012)	Noreste Carretera Morón - Mirimire	Humedad Límites de Consistencia Hidrómetro Gravedad Específica Presión de Expansión Expansión Potencial DRX Microscopía Electrónica	Caolinita 55% Illita 30% Esmectita 10%	Alto
Sureste Carretera Morón - Mirimire		Medio			
Yaracal		Bajo			
	PADRON (2010)	Acantilado de Amuay Península de Paraguaná	Humedad Gravedad Específica Límites de consistencia Hidrómetro	Illita Caolinita Montmorillonita	Bajo a Medio
GUÁRICO	BRUZUAL (1976)	Llanos centro- occidentales	Humedad Límites de Consistencia Hidrómetro DRX Gravedad Específica Expansión Potencial Hinchamiento	Illita Caolinita	Medio
	BAQUERO (2010)	Municipio Pedro Zaraza	Humedad Límites de Consistencia Hidrómetro DRX Gravedad Específica Presión de Expansión Hinchamiento	Montmorillonita Illita	Alto
Lara	ESCHEIK & CONTRERAS (2007)	Barquisimeto	Humedad Límites de Consistencia Hidrómetro Gravedad Específica Presión de Expansión Expansión Potencial Hinchamiento Azul de Metileno	Montmorillonita	Alto

Miranda	RIVAS & MUÑOZ (1974)	Fuerte Guaicaipuro	Humedad Gravedad Específica Límites de consistencia Granulometría DRX Presión de Expansión Expansión Potencial	Montmorillonita Illita Caolinita Clorita	Alto
	GINES (1988)	Distrito Paz Castillo	Humedad Gravedad Específica Límites de consistencia Hidrómetro Azul de Metileno Presión de Expansión Expansión Potencial	-	Medio
	STEFANO & SALMEN (1994)	Santa Lucía Ocumare	Humedad Límites de Consistencia Hidrómetro Presión de Expansión Expansión Potencial Azul de Metileno	Vermiculita Illita	Alto
		Charallave			Medio
		Cúa			Bajo
	BARBIERO (1999)	Túnel Pitahaya	Humedad Límites de Consistencia Hidrómetro Azul de Metileno Expansión Potencial DRX	Illita Caolinita	Medio
	GUEVARA & LÓPEZ (2012)	Ocumare	Humedad Límites de Consistencia Hidrómetro Presión de Expansión Expansión Potencial DRX, MEB	Illita 60% Esmectita 30%	Alto
Carretera Charallave - Santa Teresa		Medio			
Charallave		Bajo			
Táchira	RIVAS & MUÑOZ (1974)	Ureña	Humedad Límites de consistencia Granulometría DRX Presión de Expansión Expansión Potencial	Illita Caolinita	Medio

De esta manera, la logística necesaria para la recolección de las muestras y los resultados obtenidos por los diferentes autores anteriormente citados, sirvieron de base para seleccionar la zona de muestreo del material que sería analizado para llevar a cabo el presente trabajo de investigación. No obstante, cabe destacar, por la similitud de resultados en trabajos previos en otros sectores del país, que los valores obtenidos aquí pudieran ser extrapolables a distintas localidades venezolanas que contengan depósitos arcillosos con parámetros similares.

## **CAPÍTULO II**

### **METODOLOGÍA**

La metodología utilizada para evaluar el comportamiento de las arcillas expansivas, así como caracterizar y determinar la posibilidad de utilizar arcillas venezolanas como sustituto de la bentonita comercial mediante su enriquecimiento en sodio, incluyó tres etapas fundamentalmente: recolección, procesamiento e interpretación de resultados.

#### **2.1. RECOLECCIÓN DE DATOS**

Esta primera etapa comprendió los siguientes aspectos:

##### **2.1.1. Recopilación bibliográfica**

Consistió en la búsqueda y recopilación de información relacionada con el tema de estudio, tomando en cuenta toda la documentación publicada que contenga datos geológicos, geotécnicos y/o químicos de interés para la investigación (trabajos especiales de grado, publicaciones, trabajos inéditos, entre otros), con la finalidad de generar una base de datos completa donde se indique información detallada (ubicación, parámetros geotécnicos, mineralogía, química, potencial expansivo, etc.) de los suelos expansivos a nivel nacional.

##### **2.1.2. Revisión de mapas topográficos y geológicos**

Para el presente trabajo se estudiaron mapas a escala 1:25000 pertenecientes a las zonas donde, según la literatura, se ha evidenciado la presencia de arcillas expansivas en el Norte de Venezuela, especialmente en distintas localidades de los estados Anzoátegui, Aragua, Falcón, Guárico, Lara y Miranda.

##### **2.1.3. Toma de muestras**

Esta etapa se realizó luego de la revisión bibliográfica, la cual sirvió como base para establecer la ubicación de la zona donde se llevaría a cabo la toma de

muestras. Luego, se estableció la logística necesaria para el traslado a los sitios donde finalmente se tomarían las muestras que, posteriormente, fueron ensayadas en el laboratorio para poder caracterizar el material estudiado, recolectar datos de afloramientos y tomar las imágenes necesarias que sirvieran como sustento fotográfico del trabajo realizado.

## **2.2. PROCESAMIENTO DE DATOS**

Esta etapa comprendió la descripción litológica del subsuelo y los diversos análisis de laboratorio realizados para la caracterización del material sedimentario tratado bajo diferentes condiciones físico-químicas. Para ello resultó necesario establecer una metodología de ensayos lo suficientemente completa y sencilla, que permitiera conocer con mayor certeza las causas que propician el proceso expansivo. De esta manera, resultó necesario conocer tanto la humedad natural, la granulometría, y los límites de consistencia, así como la mineralogía y química presente.

### **2.2.1. Ensayos de caracterización del material in situ**

Las propiedades geotécnicas del suelo, como la distribución del tamaño de grano, la plasticidad, la compresibilidad y la resistencia, pueden ser determinadas mediante técnicas apropiadas de laboratorio (DAS, B., 2006). No obstante, resulta necesario seguir una metodología definida y reconocida por los técnicos de diferentes especialidades y países. Así, las muestras seleccionadas fueron ensayadas bajo las normas de la American Society for Testing Material (ASTM), como sigue a continuación:

#### **2.2.1.1. Clasificación visual de las muestras**

La clasificación visual de las muestras representó el primer paso a seguir a la hora de realizar la caracterización de un material, describiendo rasgos tales como: Tipo de material (roca, suelo, material residual, etc.), color, olor, forma y disposición de las partículas, contenido carbonático (con ayuda de HCl),

presencia de material orgánico (con ayuda de  $H_2O_2$ ), etc. (Fig. 2.1). De esta manera, la norma ASTM D-2487 es utilizada para clasificar los materiales de una forma clara empleando la terminología apropiada.



Figura 2.1. Imágenes que muestran el proceso de clasificación visual del material extraído.

#### 2.2.1.2. Porcentaje de humedad natural

El contenido de humedad de un suelo es definido como la relación entre el peso húmedo de la muestra ( $W_{\omega}$ ) y el peso de la misma en su fase sólida secada al horno ( $W_s$ ). Este ensayo se fundamenta en determinar el porcentaje de agua contenido en la muestra en estado natural.

Según Ugas (1985) consiste en pesar la muestra y colocarla a secar en el horno a una temperatura constante de  $105 \pm 5$  °C durante 24 horas, luego volverla a pesar y el porcentaje de pérdida de peso corresponde al porcentaje de agua contenido en la muestra.

Según la norma ASTM D-2216, para determinar la humedad natural de cualquier suelo, primero se requiere el uso de una cápsula o patrón calibrado. A continuación se colocó la muestra en la cápsula y se calculó el peso de la cápsula junto con el suelo haciendo uso de la balanza ya calibrada.

Luego de pesar el suelo, se colocó el mismo en un horno y se calentó a 105°C, durante 16-24 horas aproximadamente para reducir la humedad a 0% (Fig. 2.2).



Figura 2.2. Horno utilizado para el cálculo del porcentaje de humedad.

Este suelo ya seco se volvió a pesar junto con la cápsula y este nuevo valor debía ser menor al obtenido con la muestra húmeda. La diferencia entre estos dos valores es el peso del agua en la muestra.

$$\omega = (W\omega / Ws) \times 100 \quad (1)$$

Donde:

$\omega$  = % de humedad;  $W\omega$  = peso húmedo;  $Ws$  = peso seco

### 2.2.1.3. Análisis granulométrico

El análisis granulométrico consiste en separar y cuantificar por tamaño las partículas que componen una muestra de suelo a fin de determinar, a manera de porcentajes los distintos tamaños de partículas que lo conforman. El tamaño de la partícula de suelo en mm se define como la abertura del tamiz más cerrado por el cual pasa esa partícula. De esta manera, se procede con la medición en porcentaje del peso total de cada uno de los tamaños de partículas correspondientes a la abertura de los tamices utilizados.

Según la norma ASTM D-422-63, se seca la muestra en el horno a 105°C y se toma una porción representativa de la misma (por lo menos 200g si en su mayoría está formado por arenas, limos o arcillas, o 1000g si está formado por gravas), esta se lava por el tamiz N° 200 para quedarse solo con las partículas granulares, se seca el sobrante en la estufa a una 105°C. Se arreglan los tamices en orden de abertura decreciente (3", 2", 1 ½", ¾", 3/8", N° 4, N° 10, N° 20, N° 40, N° 100 y N° 200), lo que permite obtener un espaciamiento uniforme en los puntos de la curva granulométrica (Fig. 2.3).



Figura 2.3. Juego de tamices en orden de abertura decreciente utilizado para el análisis granulométrico.

El procedimiento se llevó a cabo colocando la muestra seca en el tambor vibratorio, y se tamizó por un tiempo de 10 minutos aproximadamente. Se calculó el peso de las partículas retenidas en cada tamiz individualmente, y una vez obtenido éste se realizó una sumatoria de los mismos para obtener un peso final, el cual debe ser igual o representar menos del 0,3% de diferencia con respecto al pesaje inicial. En caso contrario, debido a que hay parte del material que se pierde durante el proceso de tamizado, los pesos retenidos hay que corregirlos mediante la ecuación:

$$\text{Peso corregido} = (\text{Peso retenido} / \text{Peso final}) \times \text{Peso inicial} \quad (2)$$

Finalmente, la ecuación a continuación permite calcular el porcentaje en peso de material retenido en cada tamiz.

$$\% \text{ Peso} = (\text{Peso corregido} / \text{Peso inicial}) \times 100 \quad (3)$$

Para conocer el porcentaje en peso de las partículas más finas (Tamiz N° 200 < 0,075 mm), se debió realizar el método del hidrómetro, una vez que se realizó el proceso de tamizado de la muestra a través del tamiz N° 40.

Se tomó una muestra de 50gr del material arcilloso (si hubiese contenido importantes cantidades de granos tamaño arena, se debía tomar 100gr); se le aplicó un defloculante (Hexametáfosfato de sodio) al 5%, se removió y se dejó actuar por 24 horas. Una vez transcurrido ese tiempo se vació el contenido en un cilindro de sedimentación evitando las pérdidas de muestra, y se completó con agua destilada hasta obtener un litro. Luego de agitar a mano durante un minuto, se introdujo el hidrómetro para empezar a tomar las lecturas a los 30 segundos, 1, 2, 5, 10, 20, 25, 30 minutos, 1, 2, 4 y 24 horas (Fig. 2.4).



Figura 2.4. Imágenes que muestran el proceso de pesaje del material y medición de lecturas con hidrómetro.

#### 2.2.1.4. Determinación de la gravedad específica

Representa la relación entre el peso unitario de las partículas sólidas del suelo y el peso unitario del agua destilada a una temperatura de referencia, generalmente a 4°C ( $\gamma_{w4^{\circ}\text{C}} = 1,000 \text{ g/cm}^3$ ). El peso específico es un factor auxiliar que se emplea para determinar otras propiedades como porosidad y relación de vacíos. También es usado en estudios de consolidación del suelo y del cálculo del grado de saturación del mismo.

Según la norma ASTM D854, se pesó una muestra de suelo seco, pasada por el tamiz N° 10 y a su vez se pesó el balón aforado lleno de agua (tomando en cuenta la temperatura a la cual se está trabajando para la calibración del balón, ya que a mayor temperatura este peso disminuye). Se agregó la muestra al balón aforado y se dejó reposar por 12 horas (Fig. 2.5). Se utilizó una bomba de vacío

para sacar el aire contenido en la muestra, a sabiendas de que éste puede afectar el valor de la densidad. Una vez liberada la muestra de sus partículas de aire, se llenó el balón aforado de agua hasta el tope y se pesó todo junto en la balanza.



Figura 2.5. Imagen donde se observan las muestras dentro del balón aforado para su reposo, como parte del proceso utilizado para el cálculo de la gravedad específica.

El peso específico se calculó a través de la siguiente ecuación para mediciones a 20°C.

$$G_s = M_o / (M_o + (M_a - M_b)) \quad (4)$$

Donde:

G<sub>s</sub>: Peso Específico a 20°C; M<sub>o</sub>: peso de la muestra; M<sub>a</sub>: peso del balón + agua  
M<sub>b</sub>: peso del balón + muestra + agua.

#### 2.2.1.5. Medición del peso unitario

El peso unitario no es más que la relación existente entre el peso de un material y su volumen.

El ensayo se realizó cumpliendo la norma ASTM D-1188 donde se tomó una muestra de suelo y se pesó con una balanza, luego a esta muestra se agregó un elemento impermeabilizador (Fig. 2.6), en este caso la parafina de densidad 0.88, y se volvió a pesar (en aire) la muestra junto con la parafina. Cumpliendo

con el principio de Arquímedes se pesó la muestra junto con la parafina, pero ahora debajo del agua y aplicando la siguiente fórmula se obtuvo el volumen de la muestra:

$$V_{mp} = P_{mpa} - P_{mph} \quad (5)$$

Donde:

$V_{mp}$  = volumen de la muestra más parafina;  $P_{mpa}$  = peso de la muestra más parafina en aire

$P_{mph}$  = peso de la muestra más parafina en agua



Figura 2.6 Impermeabilización de la muestra con parafina.

Teniendo el volumen de la muestra más la parafina se debe restar el volumen de la parafina utilizada. Al restar el peso de la muestra más parafina (en aire) menos el peso de la muestra de suelo, se obtiene el peso de la parafina y conociendo su densidad se utiliza la siguiente ecuación:

$$Volumen = Masa / Densidad \quad (6)$$

Como lo que se quería obtener era la densidad de la muestra sin la parafina, hubo que hallar el volumen de la misma, restando al volumen de la muestra con parafina el volumen de la parafina. De esta forma, conociendo el volumen de la muestra sin parafina y su peso, se obtuvo la densidad usando la siguiente fórmula:

$$\text{Densidad} = \text{Masa} / \text{Volumen} \quad (7)$$

### 2.2.2. Tratamiento de las muestras

El estudio experimental de los minerales de arcilla proporciona argumentos para inferir las condiciones de formación de los minerales en la naturaleza. Con los minerales de arcilla de suelos, cuya génesis implica la concomitancia de factores geológicos, petrográficos, químicos, físicos y aún biológicos, a menudo desconocidos o difícilmente evaluables, la reproducción experimental permite fijar la termodinámica de formación y discernir las causas de estos fenómenos, con base en factores simples, controlables y mensurables (BESOAIN, 1985).

Luego de la caracterización física previa del material *in situ* se utilizó el material extraído de las calicatas para ser tratado y colocado a diferentes condiciones físico-químicas mediante la saturación del material con NaCl, NaHCO<sub>3</sub> y NaOH.

#### 2.2.2.1. Tratamiento con NaCl

Inicialmente, se expusieron las muestras a diferentes concentraciones de NaCl y a variaciones de temperatura y tiempo para evaluar cómo afectan estos parámetros en la activación y la química de las arcillas originales.

El procedimiento se efectuó colocando en tres recipientes 100 g de arcilla con 50, 100 y 200g de NaCl diluidos en 50ml de H<sub>2</sub>O, cada una de estas muestras se colocaron a temperatura ambiente (30° aproximadamente), a 60° y a 90° durante 24, 48 y 168 horas. Posteriormente se añadieron 0,5 g de NaOH en 100 g de arcilla en determinadas muestras.

1. Se tomaron las muestras extraídas del suelo ensayadas previamente y se obtuvo la fracción más fina de las mismas, de la siguiente manera (Fig. 2.7).

✓ Se añadieron 5 kg de suelo a 15 litros de agua y se dejó reposar por 30 min aproximadamente en un tobo o cuñete.

- ✓ Por succión se extrajo el agua del tercio superior del cuñete, el cual contenía partículas de arcilla en suspensión.
- ✓ Este material se colocó en varias probetas de 1000 ml y se dejó reposar 12 horas para asegurar el asentamiento total de las muestras y extraer por succión el agua restante.
- ✓ El material obtenido se dejó reposar hasta obtener una pasta (fácilmente manejable con una espátula).



Figura 2.7. Proceso de extracción del material fino.

2. Las muestras obtenidas se mezclaron con una solución acuosa de NaCl según cada caso, y se dejaron reposar por 24 horas, removiendo la solución cada 1, 2, 3, 6, 12 y 24 horas para homogeneizar el sistema (Fig. 2.8).



Figura 2.8. Material fino extraído sumergido dentro de una solución acuosa de NaCl.

3. Concluidas las 24 horas se empezó a contabilizar el tiempo establecido para evaluar los cambios ocurridos en cada caso, removiendo las muestras cada 12 horas (Fig. 2.9).



Figura 2.9. Proceso utilizado con la solución de NaCl a diferentes temperaturas y tiempo.

4. Finalizado este tiempo se procedió con el lavado de la sal de las muestras. Este procedimiento se llevó a cabo succionando el agua con solución salina de las muestras y agregando agua durante 10 ciclos. En cada ciclo se succionó el agua con solución salina para ir eliminando la sal en las muestras paulatinamente. Para cada ciclo se añadieron 200 ml de H<sub>2</sub>O en cada muestra y se dejó reposar por 12 horas (Fig. 2.10).



Figura 2.10. Lavado y empacado de las muestras tratadas.

### 2.2.2.2. Tratamiento con NaCl, NaHCO<sub>3</sub> y NaOH

Luego de evaluar los resultados obtenidos en el procedimiento anterior, se realizó el procedimiento combinando NaCl, NaHCO<sub>3</sub> y NaOH en determinadas muestras manteniendo la temperatura y las concentraciones constantes, para evaluar cómo afecta la diferencia de pH en el intercambio catiónico (Fig. 2.11).



Figura 2.11. Muestras tratadas con soluciones acuosas de NaCl, NaHCO<sub>3</sub> y NaOH.

1. Se tomaron tres recipientes y se colocaron en cada uno 100 gr de la arcilla previamente tratada en 65 ml de H<sub>2</sub>O. Posteriormente, se dividieron los recipientes de la siguiente manera:
  - ✓ Se tomó uno de los recipientes y se le añadieron 6,3 g de NaHCO<sub>3</sub> y 0,5 g de NaOH.
  - ✓ En otro de los recipientes se añadieron 6,3 g de NaHCO<sub>3</sub>.
  - ✓ Al último recipiente se añadieron 0,5 g de NaOH.

2. Para el análisis de la fracción fina en las muestras originales se tomaron seis recipientes en los cuales se dispusieron 100 g de la arcilla original en 65 ml de H<sub>2</sub>O, en cada uno de ellos. Posteriormente, se dividieron los recipientes de la siguiente manera:

- ✓ Se tomó uno de los recipientes y se le añadieron 38 g de NaCl, 6,3 g de NaHCO<sub>3</sub> y 0,5 g de NaOH.
- ✓ En otro de los recipientes se agregaron 6,3 g de NaHCO<sub>3</sub> y 0,5 g de NaOH.
- ✓ Al siguiente recipiente se incorporaron 0,5 g de NaOH.
- ✓ Se colocó en otro de los recipientes 38 g de NaCl y 0,5 g de NaOH.
- ✓ Se utilizó otro recipiente con 38 g de NaCl y 6,3 g de NaHCO<sub>3</sub>.
- ✓ En el último de los recipientes se añadieron 6,3 g de NaHCO<sub>3</sub>.

3. Las muestras se dejaron a temperatura ambiente por 24 horas removiendo la solución cada 1, 2, 3, 6, 12 y 24 horas para homogeneizar el sistema y finalmente se repitió el paso 4 del tratamiento con NaCl.

### **2.2.3. Caracterización física de las muestras obtenidas**

Para evaluar los posibles cambios ocurridos, posterior al tratamiento de las muestras, se realizó la caracterización física de las arcillas originales y tratadas mediante ensayos de azul de metileno, límites de Atterberg, expansión libre.

#### **2.2.3.1. Límites de Consistencia de Atterberg**

CASAGRANDE (1932), determinó que el límite líquido es una medida de resistencia al corte del suelo a un determinado contenido de humedad y que cada golpe necesario para cerrar el surco, corresponde a un esfuerzo cortante cercano a 1 g/cm<sup>2</sup>. Por su parte, Atterberg definió tres límites: el de retracción o consistencia que separa el estado sólido seco y el semisólido, el límite plástico

que separa el estado semisólido del plástico y el límite líquido que separa el estado plástico del semilíquido.

La norma ASTM D-4318 indica que para determinar el límite líquido se utiliza la cuchara de Casagrande calibrada de tal forma que los saltos de la cuchara sean de 1cm de altura. Se preparó la muestra de suelo seca, pulverizándola y pasándola por el tamiz No. 10, para luego mezclarla con agua destilada para agregarle cierto porcentaje de humedad a la misma. Esta muestra se dejó hasta el día siguiente humedeciéndose para que de esta manera absorba la mayor cantidad de humedad posible; en la cuchara de Casagrande ya humedecida se colocó la muestra al ras evitando que queden burbujas de aire contenidas, y se realizó en el centro de ella una ranura utilizando el ranurador.

Cuando se obtuvo el surco, se giró la manivela del aparato con una frecuencia de 2 golpes por segundo, contando el número de golpes necesarios para que la ranura cierre en 10 mm de longitud en el fondo de ella. Finalmente, se tomaron aproximadamente 10gr para determinar la humedad. El material sobrante se trasladó al plato de evaporación para mezclarlo nuevamente con agua destilada y repetir el procedimiento por lo menos 2 veces más, de modo de obtener tres puntos que varíen en un rango de 15 a 35 golpes. Es importante señalar que el ensayo se realizó desde la condición más húmeda a la más seca (Fig. 2.12).

El límite plástico se ha definido, arbitrariamente, como el contenido de humedad del suelo al cual un cilindro de éste, se rompe o resquebraja al amasado, presentando un diámetro de aproximadamente 3mm. Para contenidos de humedad menores que el límite plástico se considera que el suelo no se comporta plásticamente.

Según la norma ASTM D-4318 el límite plástico se determinó amasando el suelo seco y formando elipsoides, hasta llegar a un diámetro de 3 mm y 25-30 mm de longitud (Fig. 2.13). Si en ese momento, los elipsoides se cuarteán en fracciones de unos 6 mm, su humedad es la del límite plástico, si no se

cuartean, se vuelven a formar los elipsoides para que pierdan humedad y lleguen a cuartearse.



Figura 2.12. Proceso utilizado para la medición del límite líquido.



Figura 2.13. Medición del límite plástico.

Determinados los límites líquido y plástico se puede obtener un punto representativo de cada muestra de suelo en la Carta de plasticidad de

Casagrande, representando la relación entre el límite líquido y el índice de plasticidad ( $I_p$ ), el cual se obtiene restando el límite líquido menos el límite plástico. Con ello se puede conocer que fracción fina predomina en la muestra. (VALLEJO, 2002).

#### 2.2.3.2. Azul de Metileno o Prueba de la Mancha

Una de las técnicas de laboratorio que pueden ser aplicadas para determinar la superficie específica de un suelo y el índice de nocividad de los coloides, parámetros que permiten identificar mineralógicamente el tipo de arcilla presente y la actividad de los coloides desde el punto de vista de su comportamiento ante la presencia del agua, es la de absorción del catión de Azul de Metileno. La misma se basa fundamentalmente en adicionarle a las partículas de suelo, una solución acuosa con cationes de azul de metileno que se fijan en la superficie de las partículas de arcilla, ocupando cada uno de ellos una superficie de  $130 \text{ \AA}^2$  (NARSILIO & SANTAMARINA, 2004).

El principio del ensayo, según la norma AFNOR P18-592, es medir mediante una bureta de precisión, el consumo de solución de azul de metileno (1g de cloruro de metiltionina / 100 ml de  $\text{H}_2\text{O}$ ) de una suspensión de suelo en agua destilada desmineralizada con una proporción aproximada de 10g de suelo seco en 100 ml de  $\text{H}_2\text{O}$ , que reposará durante un período no menor de 15 horas y no mayor de 24 horas y que posteriormente es sometida a continuo agitación.

De esta forma, la solución de azul de metileno se fue añadiendo a la suspensión en sucesivas dosis regulares de 5cc, hasta lograr que aparezca una mancha azul rodeada de un halo azul claro definido en el papel de filtro Whatman # 40 en el que se fue realizando el ensayo después de cada adición de solución. Una vez que apareció dicha mancha azul en el papel de filtro, ello significa que los coloides se saturaron. Seguidamente se comenzó el dosaje agregando 2cc de la solución de azul de metileno y se observó si después de un minuto el halo azul permanece alrededor de la mancha; al esto suceder se tomó

una nueva gota con la misma concentración de azul y se esperó un minuto adicional y se continuó esta operación hasta que el halo permaneció visible por un período de 5 min. Si dicho halo desaparece durante la realización del dosaje fino, se debe repetir el procedimiento hasta lograr la permanencia en el quinto minuto. Una vez que esto ocurrió, se anotó el consumo de solución de azul en cc (Fig. 2.14).



Figura 2.14. Ensayo de la mancha.

La cantidad de azul de metileno en polvo consumida por cada 100 gr de suelo seco (VA) se calculó con la siguiente ecuación.

$$VA = V / M \quad (8)$$

Donde:

VA = Valor azul en g/100g;

V = Volumen de solución de azul consumido en cc

M = Masa de muestra seca en gramos

### 2.2.3.3. Expansión Libre

El ensayo tiene como objetivo determinar el porcentaje de expansión libre que desarrolla una muestra de suelo, como consecuencia de su saturación con agua.

Siguiendo la norma ASTM D-4546, se colocó una muestra en un anillo de consolidación sobre una piedra porosa bajo una pequeña carga de 0,05 kg, se llevó a un consolidómetro y agregó agua, para finalmente medir el aumento de volumen de la muestra (es decir su altura, puesto que su sección transversal es constante) hasta que alcanzó el equilibrio (Fig. 2.15). La deformación máxima alcanzada, expresada en % de la altura inicial de la muestra, se reportó como “porcentaje de expansión libre” y se calculó de la siguiente manera:

$$Exp(\%) = \frac{(H_{inicial} - H_{final})}{H_{final}} \times 100 \quad (9)$$

Donde:

$H_{inicial}$  = altura de la muestra antes de iniciar el ensayo

$H_{final}$  = es la altura de la muestra una vez concluido el ensayo



Figura 2.15. Ensayo de expansión libre en consolidómetro.

#### 2.2.4. Caracterización química de las muestras seleccionadas

No existe una técnica de análisis universal, cualitativa o cuantitativa, que permita la caracterización de estos minerales. Los métodos son complementarios y sólo la combinación de diferentes métodos posibilita una identificación segura. En los últimos años, las técnicas de análisis fueron perfeccionadas y se abrieron nuevos campos (resonancia nuclear magnética, espectros de Mossbauer y otros), aunque la herramienta más poderosa sigue siendo el análisis con rayos X (BESOAIN, 1985).

En este orden de ideas, se continuó con una selección del material para identificar los tipos de arcillas mediante ensayos de difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X, espectrometría de absorción atómica, microscopía electrónica de barrido y termogravimetría.

#### 2.2.4.1. Difracción de Rayos X

Como resultado de las investigaciones de HENDRICKS & FRY (1930) y de KELLEY *et al.* (1931), quienes demostraron que la arcilla de los suelos estaba formada por minerales cristalinos capaces de dar diagramas de difracción de rayos X, se promovió una vasta investigación de las arcillas de suelos por este método, cuya aplicación persiste hasta hoy día. En pedología la difracción de rayos X se adentra en los campos de la génesis, química de la meteorización, cationes de intercambio, nutrimento de las plantas y otros; más que ningún otro método, entrega información sobre las propiedades y constitución de los coloides del suelo.

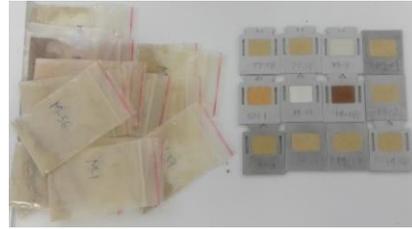
La arquitectura de las estructuras cristalinas se basa en la distribución periódica de los átomos, iones o moléculas, en una red tridimensional. Se trata de distribuciones regulares, separadas por distancias constantes y características. La difracción en los cristales es una consecuencia de la disposición periódica de los átomos en los mismos. En un diagrama de difracción estos espacios constantes se traducen en una distribución característica de máximos (picos) que permiten identificar cualitativamente el cristal. Además, puesto que la intensidad de estos picos es proporcional al número de planos que difractan, es decir a la concentración de una estructura específica, el método hace posible la evaluación cuantitativa (BESOAIN, 1985).

Bajo dicha premisa se efectuó el ensayo de DRX y para ello, se realizó la preparación de las muestras mediante el llamado Método del Polvo, el cual consistió en triturar y pulverizar la muestra seca en un mortero manual de ágata hasta obtener un material homogéneo con tamaños de granos entre 10 y 50  $\mu\text{m}$ ,

para luego ser colocadas en el portamuestras. Posteriormente, se introdujo la muestra en el difractómetro, a partir del cual se obtiene el difractograma, para luego ser dilucidado y determinar la mineralogía constituyente (Fig. 2.16).



*Pulverizado de las muestras*



*Vaciado en el portamuestras*



*Muestra en el difractómetro*

Figura 2.16. Procedimiento para la realización del ensayo de difracción de rayos X.

Los resultados entregados por los difractogramas no revelan de inmediato la naturaleza de la muestra en estudio. Tratándose de muestras de policomponentes, como ocurre frecuentemente con el suelo o sus fracciones, los diagramas proporcionan información del conjunto de redes cristalinas. Implícitamente toda la información se encuentra en el diagrama de difracción, pero ella debe ser "traducida" al lenguaje común. Según BESOAIN (1985), esta "traducción" consiste esencialmente en la conversión de los valores angulares de  $\theta$  o  $2\theta$  (grados) a valores de distancia interplanar ( $d$ ) en unidades angstrom ( $\text{\AA}$ ), para lo cual debe resolverse la ecuación de Bragg  $d = n\lambda/2\text{sen}\theta$ , lo que usualmente se hace mediante el uso de tablas especiales. Obtenidas las distancias interplanares, deben asignarse las intensidades relativas. Puesto que a cada substancia corresponde un conjunto específico de valores  $d$  con sus intensidades correspondientes, los diagramas permiten la identificación.

#### 2.2.4.2. Fluorescencia de Rayos X

Una de las mayores aplicaciones del análisis de rayos X ocurre en el campo geológico, que requiere para sus estudios la información química cualitativa y cuantitativa. En el campo edafológico este método comenzó a utilizarse con éxito, en análisis elemental de los principales cationes de suelos y arcillas (Si, Al, Fe, Ti, Ca, Mg, K, Na, Mn), elementos trazas (Co, Cu, Mo, Zn, Ga y Cs), capacidad de intercambio catiónico, entre otros.

El estudio tuvo como objetivo el análisis químico cuantitativo de los óxidos presentes en las muestras sólidas.

Para dicho análisis mediante la técnica de fluorescencia de rayos-X, primero se pulverizó la muestra, de forma manual utilizando un mortero de ágata, hasta su paso por el tamiz # 120. Posteriormente se montó la muestra en el porta-muestras para luego introducirla en el equipo (Fig. 2.17). La metodología detallada de éste análisis se encuentra en el apéndice A.



*Pulverizado de la muestra Tamizado de la muestra Colocación en el porta-muestras*



*Colocación de las muestras en el equipo de edición*

Figura 2.17. Preparación de muestras y cuantificación de elementos mayoritarios por fluorescencia de rayos-X.

### 2.2.4.3. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB o SEM) y espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDX)

CAHN (2001) y GOLDSTEIN *et al.* (2003) definen la microscopía electrónica de barrido como un ensayo que consiste en estudiar la morfología de un cristal, compuesto o sustancia al colocar la muestra en un microscopio electrónico, el cual utiliza electrones en lugar de fotones o luz visible para formar imágenes de objetos diminutos. Así mismo, tiene una gran profundidad de campo, la cual permite que se enfoque a la vez una gran parte de la muestra. Los microscopios electrónicos permiten alcanzar una capacidad de aumento muy superior a los microscopios convencionales debido a que la longitud de onda de los electrones es mucho menor que la de los fotones "visibles".

El ensayo de microscopía electrónica de barrido permitió evaluar los aspectos morfológicos de zonas microscópicas, como observación y caracterización superficial de materiales inorgánicos y orgánicos, mediante distintos tipos de señales que se generan desde la muestra y se utilizan para examinar sus características. De esta forma, la MEB ha demostrado ser muy útil para estudiar los minerales de arcilla. Su velocidad y facilidad de operación, gran aumento y profundidad de enfoque lo hacen especialmente adecuado para el estudio de materiales y superficies de grano muy fino (BOHOR & HUGHES, 1970).

El análisis elemental de una muestra se obtiene al recoger los rayos X característicos generados cuando el haz de electrones escanea la muestra. El detector de rayos X se monta adyacente al detector de electrones secundario. Cada elemento de la muestra produce rayos X con energías y longitudes de onda características. Estos rayos X pueden analizarse usando un detector de energía sensitiva en un sistema de energía dispersiva (EDX) o dispersando los rayos X, de acuerdo con la longitud de onda empleando el detector de cristal de un sistema dispersivo de longitud de onda (WDX). En general, el sistema EDX se usa para obtener un análisis rápido de los elementos superiores al número

atómico  $Z=11$ , mientras que el sistema WDX proporciona análisis cuantitativos precisos, que incluyen elementos ligeros o traza (WELTON, 2003).

La mayoría de los picos encontrados en minerales formadores de rocas serán elementos comunes como Si, Al, Mg, Fe, Na, K, Ca, Ti y S. Los picos que representan Au, Cu, Pd y/o Ag, generalmente indican radiación de los recubrimientos metálicos de la muestra, por lo que se debe ignorar. Solo se muestran las concentraciones elementales por encima de aproximadamente el 1% (WELTON, 2003).

Siguiendo la metodología de ABALLE (1996), DÍAZ (2002), GOLDSTEIN (2003) y WELTON (2003), se usaron unos soportes especiales de superficie circular donde se colocaron las muestras. Éstas deben estar convenientemente adheridas a dicho soporte, para ello se empleó una cinta de grafito (para hacerla conductora) con doble cara adhesiva (Fig. 2.18).



Figura 2.18. Preparación de muestras para MEB/EDX.

Una vez colocada la muestra, si no es conductora será necesario recubrirla con una capa conductora de unos 1-100 nm de espesor de elementos como: C, Al, Au, Au-Pd, Ag y/o Cu. Esto suele ser suficiente para asegurar una buena observación. En este caso se utilizó unos puntos de plata en los extremos de la cinta adhesiva y recubrimiento en oro (Fig. 2.19).



Figura 2.19. Recubrimiento con capa conductora de plata y oro.

Finalmente, se colocaron los soportes dentro de un microscopio electrónico de barrido para examinar una sección transversal bidimensional a través de la muestra y con ello estimar la composición química elemental del mineral y realizar observaciones importantes con respecto a la textura y morfología del grano (Fig. 2.20).

Después de identificar todos los picos en el espectro EDX, las concentraciones relativas de los elementos se compararon con la morfología cristalina y la fórmula química del mineral sospechoso. La correlación de las alturas de los picos de los elementos analizados con la fórmula química fue posible, ya que las alturas de los picos son aproximadamente proporcionales a su concentración. Sin embargo, según WELTON, 2003, se presentan problemas

con la comparación de las alturas de los picos y la concentración, tanto en los extremos numéricos bajos como en los altos. Por ejemplo, las alturas de los picos de Na y Mg siempre se reducen en relación con su concentración, debido a la absorción de estos rayos X de baja energía en la ventana de berilio del detector. No obstante, el establecimiento de al menos la presencia de estos elementos ayudó en la identificación del mineral.



Figura 2.20. Análisis de las muestras en el microscopio electrónico de barrido.

#### 2.2.4.4. Espectrometría de absorción atómica (AAS)

En 1952, un físico británico/australiano llamado Alan Walsh realizó sus primeros experimentos de AAS utilizando una lámpara de descarga de sodio como fuente de luz y una llama de gas para atomizar una solución que contenía sodio, obteniendo los resultados esperados (L'VOV, 2005).

Posteriormente, Walsh y sus colegas no solo fueron capaces de desarrollar lámparas confiables de cátodo hueco selladas JONES & WALSH (1960), sino también de organizar la producción de instrumentos simples en un número de pequeñas empresas en Australia. Entre 1958 y 1962, aproximadamente 30 laboratorios en Australia fueron equipados con instrumentos AAS. Sin embargo, como método instrumental de análisis, la AAS fue universal y aceptado (principalmente en los Estados Unidos y Europa), cuando Perkin-Elmer fabricó el primer espectrofotómetro especializado de absorción atómica de llama (modelo 303), diseñado por KAHN & SLAVIN (1963). No obstante, la propuesta de AMOS & WILLIS (1965) de usar una llama de acetileno-óxido nitroso a alta temperatura por favoreció la expansión adicional de los espectrómetros AA. Posteriormente, los sistemas ópticos y electrónicos de los espectrómetros AA se mejoraron significativamente, y el procedimiento analítico se automatizó.

La técnica utilizada para la AAS precisa de una disgregación ácida o alcalina, para la mayoría de las rocas, utilizando metaborato de litio, ya que pueden determinarse gran parte de elementos mayoritarios con una sola fusión. En efecto, el producto disgregado es un vidrio no higroscópico, que se puede conservar indefinidamente, soluble en ácido y otras sustancias. Esta técnica se efectúa en crisoles de platino o grafito y el producto fundido se disuelve en ácido clorhídrico o nítrico diluido (mientras no ocurra la precipitación de ningún compuesto) para determinar elementos como Fe, Si, P y Ti espectrofotométricamente, Na y K por fotometría de llama, Ca, Mg y Mn por espectrofotometría de absorción atómica o por fotometría de llama utilizando acetileno/óxido nitroso como gas oxidante/combustible, y finalmente Al por complexometría (SAAVEDRA 1970).

Según Gebhardt *et al.*, 1969 el procedimiento de AAS por dilución-fusión es el más adecuado para la determinación de elementos en mezclas de policomponentes, particularmente en la determinación de elementos ligeros en suelos.

A continuación, se detalla el procedimiento realizado para la medición de Na y Ca, según (MEDLIN *et al.*, 1969; NUHFER *et al.*, 1979; SAAVEDRA 1970).

1. Se pulverizó la muestra seca en un mortero de ágata hasta lograr que las partículas pasaran por el tamiz # 120, para luego colocar la muestra en una estufa por 15 min para evitar que la misma absorbiera humedad.
2. Se calentó en un horno, en crisol de grafito una mezcla de 0,1 gr de muestra y 0,6 gr de  $\text{LiBO}_2$ , elevando la temperatura hasta  $1000^\circ\text{C}$  durante 15 min (Fig. 2.21).



Figura 2.21. Horno utilizado para el calentamiento de las muestras.

3. Posteriormente, se disolvió la perla en una solución de 25 ml de  $\text{HNO}_3$  al 4%, con ayuda de un agitador magnético (Fig. 2.22). Se debió esperar el tiempo necesario para que la reacción ocurriera. La disolución obtenida debía rechazarse si no era perfectamente clara.



Figura 2.22. Proceso de disolución de las muestras.

4. Una vez completada la disolución, se debió aforar a 100 ml y proceder al análisis en cuanto fue posible (Fig. 2.23).



Figura 2.23. Colocación de la solución en balones de 100 ml.

5. Para la determinación del sodio y calcio, se tomó, aproximadamente, 25 ml de disolución de la muestra y se midió en el fotómetro de llama (Fig. 2.24) frente a patrones que contenían la misma cantidad

de  $\text{LiBO}_2$ , los cuales se prepararon a partir de una disolución matriz de cloruro sódico y cloruro cálcico de 0 a 40 p.p.m en  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{CaO}$ .



Figura 2.24. Equipo utilizado para la determinación de las concentraciones de Na y Ca en las muestras.

#### 2.2.4.5. Termogravimetría diferencial

En los minerales de arcilla y en los óxidos hidratados o hidróxidos existe agua adsorbida en las superficies externas o internas y grupos OH estructurales. Estos últimos provienen principalmente de la hidroxilación que experimentan los materiales parentales durante los procesos de hidrólisis. La suma total de la pérdida de peso de una arcilla o un suelo por calentamiento, en equilibrio frente a una temperatura dada, es una medida analítica útil por cuanto los minerales tienen temperaturas de deshidratación o deshidroxilación diferentes. En una forma simple, el contenido de humedad que se extrae del suelo a una temperatura entre  $100^\circ\text{C}$  -  $150^\circ\text{C}$  se conoce como agua absorbida, aunque alguna cantidad de agua se retiene aún a mayores temperaturas.

El análisis térmico diferencial puede expresarse como  $\Delta W = f(T)$ , en la cual T es la temperatura y W es el peso de la muestra que puede variar en el curso de

la reacción. Las variaciones de peso causadas por la temperatura pueden evaluarse con un sistema dinámico o estático.

De esta forma, la termogravimetría (TG), representa una técnica en la cual la masa de la muestra es monitorizada frente al tiempo o a la temperatura, mientras esta última es aumentada normalmente de forma lineal en el tiempo y en una atmósfera controlada. Mediante esta técnica se observa la evolución del peso de una muestra frente al tiempo o frente a la temperatura y permite evaluar las posibles ganancias o pérdidas de peso que sufre la muestra, causadas por ejemplo por una deshidratación, descomposición, absorción, etc. Los procesos químicos como la cristalización y la transición vítrea, no llevan consigo una variación en la masa de la muestra, en cambio, los procesos como la descomposición, sublimación, reducción, desorción, absorción y vaporización, van acompañados de cambios en la masa, que pueden ser medidos mediante el ATG (LASANTA, 2013).

Tomando en consideración que el propósito de la realización de medidas de análisis térmico consiste en estudiar los cambios físicos y químicos que ocurren en una muestra o sistema sujeta a un ciclo de temperatura, se requiere que el operador interprete los resultados observados en el termograma en términos de posibles procesos reactivos (KLANČNIK *et al.*, 2010).

Los instrumentos comerciales modernos empleados en termogravimetría constan principalmente de una balanza analítica sensible, un horno, un sistema de gas de purga o de experimentación para proporcionar una atmósfera inerte o de reacción, según el caso y un microprocesador u ordenador para el control, adquisición y visualizador de los datos. (ROBINSON, 1974; SKOOG, 2000).

A continuación, se describe el procedimiento utilizado con las herramientas disponibles en el laboratorio de absorción atómica del ICT, Facultad de Ciencias, UCV.

1. Se tomó un crisol de porcelana y se pesaron aproximadamente 2 gr de muestra (Fig. 2.25).



Figura 2.25. Balanza analítica sensible de 4 dígitos, indicando el peso obtenido para la muestra M-79.

2. Se colocó el crisol en una estufa a  $150^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas para eliminar la totalidad del agua higroscópica de la muestra, al sacarla se mantuvo en un desecador (Fig. 2.26) para asegurar que el material se mantuviera seco y se volvió a pesar.



Figura 2.26. Muestras en desecador para evitar que el material absorba humedad.

3. Posteriormente, se colocó el crisol con la muestra en una mufla a  $200^{\circ}\text{C}$  con temperatura constante durante 2 horas (Fig. 2.27).

Finalizado el tiempo, se sacó la muestra y se dejó reposar hasta que el crisol se enfriara (de 15 a 30 min aproximadamente), para posteriormente volver a pesar la muestra y tener la diferencia de peso antes y después del calentamiento.



Figura 2.27. Mufla utilizada para el calentamiento de las muestras.

4. Los pasos 3 y 4 se repitieron colocando la mufla a temperaturas de 250°C, 450°C, 550°C y 900°C, respetando el orden ascendente del proceso.

### **2.3. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

Esta etapa se llevó a cabo una vez realizada la etapa de laboratorio, y comprende:

#### **2.3.1. Procesamiento de los resultados físico-químicos realizados**

Una vez obtenidos los resultados de los ensayos físico-químicos, se procedió al procesamiento de los datos con el fin de interpretar los cambios o no ocurridos en las diferentes muestras analizadas.

### **2.3.2. Comparación de los resultados obtenidos con los valores característicos de Bentonitas comerciales utilizadas en el país**

En esta fase se compararon los resultados de los ensayos físico-químicos de las muestras estudiadas con los resultados obtenidos en muestras de Bentonitas comerciales como la Bentonita canadiense explotada en Wyoming o la Bentonita Laviosa de origen italiano (Cerdeña) y griego (Milos), con la finalidad de encontrar diferencias y/o similitudes que ayuden a concluir si las arcillas tratadas pueden o no ser utilizadas en la industria como sustitutas de las bentonitas antes mencionadas.

### **2.3.3. Elaboración de conclusiones finales**

En este punto se realizaron las conclusiones concernientes al trabajo realizado y las recomendaciones necesarias para lograr el entendimiento total y el alcance final de los objetivos propuestos.

## CAPÍTULO III

### MARCO TEÓRICO

#### 3.1. GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS

Según VALLEJO (2002), para estudiar un material complejo como el suelo es necesario seguir una metodología con definiciones y sistemas de evaluación de propiedades, de forma que se constituya un lenguaje fácilmente comprensible por los técnicos de diferentes especialidades y países. De esta forma se han clasificado los suelos en cuatro grandes grupos en función de su granulometría (Normas D.I.N., A.S.T.M., A.E.N.O.R., etc.): gravas, arenas, limos y arcillas.

Cuando se habla de arcillas, se trata de granos tamaño gel, requiriéndose de transformaciones químicas previas para llegar a esas granulometrías. Están formadas por minerales silicatados, constituidos por hojas de elementos tetraédricos y octaédricos (Fig. 3.1), unidos por enlaces covalentes débiles, pudiendo entrar moléculas de aguas y cationes libres, intercambiables, entre las capas (VALLEJO 2002).

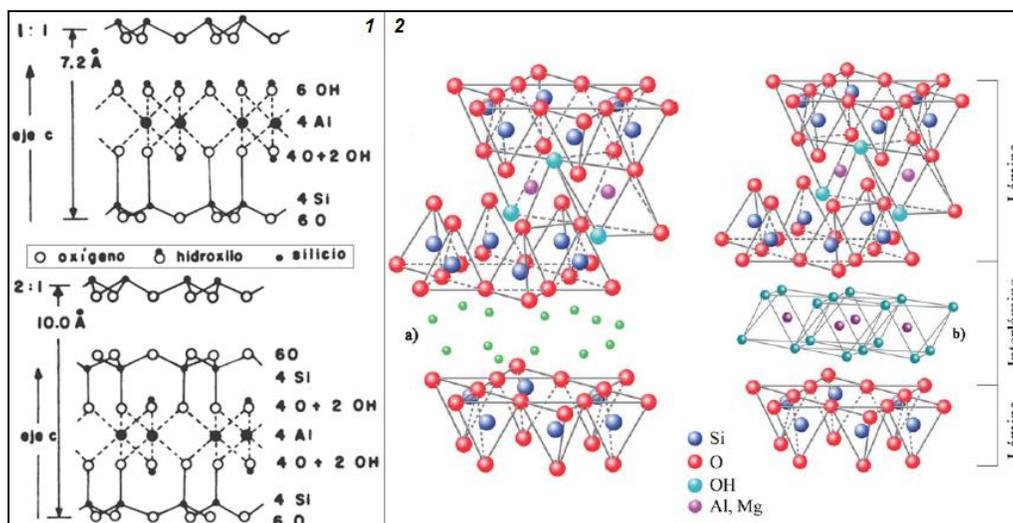


Figura 3.1. 1) Representación esquemática de celdas unitarias de minerales de arcilla tipo 1:1 y 2:1. (BESOAIN, 1985). 2) Balance de cargas de las láminas por: a) cationes intercambiables; b) cationes interlaminares en coordinación con grupos OH, formando una capa octaédrica dentro del espacio interlaminar. (FRANCO & MASPOCH, 2009).

Uno de los parámetros característicos que rigen el comportamiento de las arcillas es el potencial de expansividad, el cual se define como la capacidad del suelo fino para cambiar de volumen cuando se produce una variación en su contenido de humedad (JEFFERSON Y JONES, 2012). Así mismo, los factores que influyen en el potencial expansivo de suelos, incluyen, no solo, algunas propiedades como la granulometría del material, la mineralogía, la plasticidad, la densidad y la relación de vacíos; sino también los factores ambientales (clima, agua subterránea, vegetación y drenaje) y estados de esfuerzos presentes en el subsuelo (NELSON & MILLER, 1992).

Por otro lado, para KAGAYA *et al.* (2012), la capacidad de adsorber agua, la cantidad de cationes intercambiables (CIC) y el área superficial o superficie específica son fenómenos muy relacionados entre sí que a veces, son llamados propiedades coligativas de la arcilla. Estas propiedades coligativas son básicamente medidas de la reactividad de la arcilla.

Según CADENA (2013) cualquier estructura cristalina puede soportar un limitado desequilibrio eléctrico, pero, sobrepasado un cierto umbral, la estructura deja de ser viable y colapsa. Para compensar ese desequilibrio de cargas, las arcillas incorporan cationes a su estructura en los orificios dejados entre los apilamientos de capas TO o TOT. A veces esos cationes pueden ser fácilmente movilizados o intercambiados por otros presentes en una solución acuosa. No todos los cationes quedan igualmente retenidos, dado que es función de la energía de enlace que se establece entre el catión y la estructura, lo que a la vez está relacionado con el lugar donde se produce la sustitución isomórfica (hoja tetraédrica u octaédrica).

Los cationes en cualquier solución acuosa tienden a estar solvatados (rodeados de un determinado número de moléculas de agua), por lo que al incorporarse a la arcilla también se incorpora una cierta cantidad de agua a su estructura. Así mismo, la propia molécula de agua posee una estructura polar y dado que las partículas de arcillas actúan como condensadores planos cargados negativamente, tienden a atraer las moléculas de agua que son dispuestas de

manera ordenada en la superficie de las partículas. Los iones en la proximidad de las partículas de arcilla también poseen una disposición condicionada por la presencia de fuerzas electrostáticas operando en sus inmediaciones. Este modelo no refleja otra cosa que el efecto de dos fuerzas actuando en sentido contrario: por un lado, la atracción electrostática y por otro, la tendencia de los cationes a difundirse para tener así concentraciones iguales en toda la solución (CADENA, 2013).

Para MARTÍN *et al.* (1991), las arcillas comúnmente contienen una fracción considerable de capas de minerales de silicio que ejercen una fuerte influencia en la naturaleza de todo el material. La estructura y las características químicas de los componentes de las capas de silicatos determinan en parte, el alcance de esta influencia. Ellas son fundamentales para explicar las variaciones en las propiedades de las arcillas.

Estos mismos autores realizan una clasificación de las arcillas tomando en cuenta las características estructurales y químicas del mineral (Tabla 3.1), y a su vez mencionan que ambas están relacionadas entre sí.

El término bentonita se usa para describir la montmorillonita sódica explotada comercialmente (la cual constituye una forma de esmectita) que se utiliza como aditivo para el lodo de perforación. Uno de los más grandes depósitos, compuestos por la alteración de ceniza volcánica (la cual constituye una de las formas como se puede encontrar este mineral), se produjo hace más de 60 millones de años en ciertas regiones de Norteamérica, conocidas hoy como las Black Hills de Wyoming y Dakota del Sur, y las Big Horn Mountains de Wyoming. La arcilla bentonítica explotada en Wyoming proviene precisamente de esta capa de bentonita depositada volcánicamente y transformada por la meteorización de tobas ricas en vídrio. La arcilla bentonítica obtenida en otras partes del mundo pueden provenir de otros tipos de depósitos geológicos (KAGAYA *et al.*, 2012).

Tabla 3.1. Características químicas y estructurales de minerales de arcilla. (Tomado y modificado de MARTÍN *et al.*, 1991).

Tipo de capa	Material entre capas	Grupo	Carácter octaédrico	Minerales
1:1	Ninguno o solamente agua (x ~ 0)	Serpentina-caolín	Trioctaédrico	Lizardita, bertierina, amesita, cronstedtita, nepoulita, kellyita, fraipontita, brindeyita.
			Diocetaédrico	Caolinita, dickita, nacrita, halloysita (planar).
			Di-trioctaédrico	Odinita.
2:1	Ninguno (x ~ 0)	Talco-pirofilita	Triocetaédrico	Talco, willemseita, kerolita, pimelita
			Diocetaédrico	Pirofilita, ferripirofilita
	Cationes intercambiables hidratados (x ~ 0.2-0.6)	Esmectita	Triocetaédrico	Saponita, hectorita, sauconita, estevensita, eswinefordita
			Diocetaédrico	Montmorillonita, beidelita, nontronita, volkonskoita
	Cationes intercambiables hidratados (x ~ 0.6-0.9)	Vermiculita	Triocetaédrico	Vermiculita trioctaédrica
			Diocetaédrico	Vermiculita dioctaédrica
	Cationes monovalentes no hidratados (x ~ 0.6-1.0)	Mica genuina (flexible)	Triocetaédrico	Biotita, flogopita, lepidolita.
			Diocetaédrico	Moscovita, illita, glauconita, celadonita, paragonita.
	Cationes divalentes no hidratados (x ~ 1.8-2.0)	Mica frágil	Triocetaédrico	Clintonita, kinoshitalita, bityita, anandita
			Diocetaédrico	Margarita
	Láminas de hidróxidos (x= variable)	Clorita	Triocetaédrico	Clinocloro, chamosita, penantita, nimita, baileyclorita
			Diocetaédrico	Donbasita
Di-trioctaédrico			Cookeita, sudoita	
2:1	Regularmente interstratificado (x= variable)	Variable	Triocetaédrico	Corrensita, alietita, hidrobiotita, kulkeita
			Diocetaédrico	Rectorita, tosudita

### 3.1.1. Grupo de las Esmectitas

Las esmectitas son un grupo de minerales con estructura cristalina dioctaédrica y trioctaédrica de tipo (2:1), ellas tienen 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 (ARIAS, 1999). Dentro de este grupo se encuentra la bentonita, la cual es definida por GRIM (1968) como una arcilla compuesta esencialmente por minerales del grupo de las esmectitas, con independencia de su génesis y modo de ocurrencia.

Por lo general, la montmorillonita son partículas extremadamente pequeñas con dimensiones del orden de unas pocas decenas de unidades Angstrom, muy expansiva, de alta plasticidad y muy baja permeabilidad. Según GRIM (1962) y SNETCHEN (1975) la montmorillonita es un filosilicato del grupo de las esmectitas, aunque es dioctaédrico este puede contener hierro, magnesio o zinc sustituyendo al aluminio en la capa octaédrica, esta sustitución resulta en una deficiencia de carga, la cual es neutralizada por la presencia de cationes como  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  o  $\text{K}^+$  en posiciones entre las capas, aunque estos iones poseen un radio iónico que puede permitir la ocupación de estos espacios en las capas tetraédricas, son hidratados y como resultado del incremento del radio iónico ocupan espacios en y por encima de las capas tetraédricas, esta posición adyacente, permite el acceso de partículas de agua entre las capas, como hay un balance de cargas deficiente entre las capas octaédricas, los iones son débilmente sostenidos y por lo tanto pueden removerse mediante intercambio iónico.

El cristal de bentonita se compone de tres capas: una capa de alúmina con una capa de sílice encima y otra debajo. La laminilla de arcilla está cargada negativamente y una nube de cationes está relacionada con ésta. Si un gran número de estos cationes son sodio, la arcilla será frecuentemente llamada montmorillonita sódica. Si los cationes son principalmente calcio, la arcilla será llamada montmorillonita cálcica. Según el número de cationes presentes, el espacio entre capas de la montmorillonita estará comprendido entre 9,8Å (sodio) y 12,1Å (calcio) y lleno de agua fuertemente ligada. Cuando la arcilla seca entra en contacto con agua dulce, el espacio entre capas se expande y la arcilla adsorbe una gran “envoltura” de agua. Estos dos fenómenos permiten que la arcilla genere viscosidad; así, la montmorillonita cálcica se expande hasta 17Å, mientras que la sódica se expande hasta 40Å (KAGAYA *et al.*, 2012).

El espesor de la película de agua adsorbida es controlado por el tipo y la cantidad de cationes asociados con la arcilla. El agua que se adsorbe en las grandes superficies planares constituye la mayor parte del agua total retenida

por las arcillas hidratables. Los cationes divalentes como  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  aumentan la fuerza de atracción entre las laminillas, reduciendo así la cantidad de agua que se puede adsorber. Los cationes monovalentes como  $\text{Na}^+$  producen una fuerza de atracción más débil, permitiendo que más agua penetre entre las laminillas (KAGAYA *et al.*, 2012).

### 3.2. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA EN EL ESTUDIO DE ARCILLAS

En la mayoría de los trabajos de investigación son señaladas las dificultades de identificación que presentan los minerales de arcilla como consecuencia de su tamaño (Tabla 3.2) y de su imperfecta cristalización. Esto explica el por qué los métodos ópticos, de uso en mineralogía y petrografía, tienen una aplicación limitada en la identificación de los minerales de arcilla. No obstante, además de existir la circunstancia limitante de que numerosas características físicas y químicas son semejantes entre los minerales de un grupo determinado, la combinación de varias técnicas, permite en muchos casos, la identificación de dichos materiales (BESOAIN, 1985).

Tabla 3.2. Clasificación de suelos según su tamaño de grano. (Tomado y modificado de (BESOAIN, 1985).

FRACCIÓN	TAMAÑO DE PARTÍCULAS (mm)				
	USCS	AASHTO	ASTM	USDA	MIT
BLOQUES	> 300	> 75	> 300	-	-
GUIJARROS	75 - 300	-	75 - 300	-	-
GRAVA	4.75 - 75	2.00 - 75	4.75 - 75	> 2.00	> 2.00
ARENA	0.075 - 4.75	0.075 - 2.00	0.075 - 4.75	0.006 - 2.00	0.05 - 2.00
LIMO	0.002 - 0.075	0.002 - 0.075	0.002 - 0.075	0.002 - 0.006	0.002 - 0.05
ARCILLA	< 0.002	0.001 - 0.002	0.001 - 0.002	< 0.002	< 0.002
COLOIDES	-	< 0.001	< 0.001	-	-

### 3.2.1. Sistema de clasificación de los suelos USCS

La clasificación de suelos consiste en incluir un suelo en un grupo que presenta un comportamiento semejante. La correlación de ciertas propiedades en un grupo de un sistema de clasificación, suele ser un proceso empírico puesto a punto a través de una experiencia considerable (LAMBE & WHITMAN, 2004).

La mayoría de las clasificaciones de suelos utilizan pruebas de tipo indicativo, para obtener las características del suelo necesarias para asignarlo a un determinado grupo.

Una clasificación de suelos pierde su valor si las pruebas de partida resultan más complicadas que las necesarias para medir directamente la propiedad fundamental que se desea conocer. Las características utilizadas más corrientemente son la granulometría y la plasticidad (LAMBE & WHITMAN, 2004).

El Sistema Unificado de Clasificación de suelos (USCS) fue propuesto por Casagrande en 1942 (Fig. 3.2) y posteriormente avalado por la norma ASTM D-2487-11 para ser utilizado por el cuerpo de ingenieros, especialmente en el área de la geotecnia (DAS, 2006).

Los diversos grupos de este sistema de clasificación se han ideado para correlacionar de manera general el comportamiento de ingeniería de los suelos.

Esta clasificación divide los suelos en:

- ✓ Suelos de grano grueso.
- ✓ Suelos de grano fino.
- ✓ Suelos orgánicos.

SUELOS DE PARTICULAS FINAS		SUELOS DE PARTICULAS GRUESAS		Símbolo	NOMBRES TÍPICOS	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO
Más de la mitad del material pasa por la malla número 200. Las partículas de 0.075 mm de diámetro (la malla #200) son, aproximadamente, las más pequeñas visibles a simple vista.	Más de la mitad del material es retenido en la malla número 200.	Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla #4. (PARA CLASIFICACION VISUAL PUEDE USARSE 1/2 CM. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LAMALLA #4)	Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla #4.			
LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido menor de 50	LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido mayor de 50	ARENAS A LA ABERTURA DE LAMALLA #4	GRAVAS LIMPAS	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos.	COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD $C_u = D_{60} / D_{10}$ ; $C_c = D_{30} / (D_{60} \times D_{10})$ NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADUACIÓN PARA GW.
			GRAVAS CON FINOS (Poco o nada de partículas finas).	GP	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos.	
LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido menor de 50	LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido mayor de 50	ARENAS LIMPAS	ARENAS CON FINOS (Cantidad apreciable de partículas finas).	GM	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limos.	Límites de Atterberg debajo de la "línea A" o I.P. menor que 4. Límites de Atterberg arriba de la "línea A" con I.P. mayor que 7.
			ARENAS CON FINOS (Cantidad apreciable de partículas finas).	GC	Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla.	
LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido mayor de 50	LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido mayor de 50	ARENAS LIMPAS	ARENAS CON FINOS (Cantidad apreciable de partículas finas).	SM	Arenas bien graduadas, arenas con gravas, con poco o nada de finos.	Límites de Atterberg debajo de la "línea A" con I.P. menor que 4. Límites de Atterberg arriba de la "línea A" con I.P. mayor que 7.
			ARENAS CON FINOS (Cantidad apreciable de partículas finas).	SP	Arenas mal graduadas, arenas con gravas, con poco o nada de finos.	
LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido mayor de 50	LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido mayor de 50	ARENAS LIMPAS	ARENAS CON FINOS (Cantidad apreciable de partículas finas).	SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.	Límites de Atterberg debajo de la "línea A" con I.P. menor que 4. Límites de Atterberg arriba de la "línea A" con I.P. mayor que 7.
			ARENAS CON FINOS (Cantidad apreciable de partículas finas).	SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla.	
SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS					Limos inorgánicos, polvos de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos. Arcillas inorgánicas de baja a mediana plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres. Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad. Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, limos alabólicos. Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas. Arcillas orgánicas de media a alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad. Turbas y otros suelos altamente orgánicos.	

**DETERMINAR LOS PORCENTAJES DE GRAVA Y ARENA DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA DEPENDIENDO DEL PORCENTAJE DE FINOS (fracción que pasa por la malla #200)**

**LOS SUELOS GRUESOS SE CLASIFICAN COMO SIGUE:**  
 Menos del 5 %: GW, GP, SM, SP, Más de 12 %: GM, GC, SM, SC, 6 % al 12 %: Casos de frontera que requieren el uso del símbolo dobles \*\*

**EQUIVALENCIA DE SÍMBOLOS**  
 G = gravas; M = limo; O = suelos orgánicos; W = bien graduados  
 S = arenas; C = arcilla; P.L. = turba; F = mal graduados;  
 L = baja compresibilidad; H = alta compresibilidad.

**CARTA DE PLASTICIDAD**

Para clasificación de suelos finos y la fracción fina de suelos gruesos:  
 Ecuación de la línea "A": Horizontal en  $IP = 4 + w_p \times 25.5$ , luego  $IP = 0.73(w_L - 20)$   
 Ecuación de la línea "U": Vertical en  $w_p = 16$  a  $IP = 7$ , luego  $IP = 0.9(w_L - 8)$

\*\* Clasificación de frontera: Los suelos que posean las características de dos grupos se designan con la combinación de los símbolos, por ejemplo GW-GC, mezcla de arena y grava bien graduada con contenido arcilloso.  
 \* Todos los tamaños de las mallas en esta carta son los U.S. Standard.  
 \* La división de los grupos GM y SM en subdivisiones d, y u, son para caminos y aeropuertos únicamente, la subdivisión está basada en los límites de Atterberg. El subíndice d se usa cuando L.L. es de 20 o menos y el I.P. es de 8 o menos. El subíndice u es usado cuando el L.L. es mayor que 20

Figura 3.2. Sistema unificado de clasificación de suelos propuesto por CASAGRANDE (1942).

### 3.2.2. Actividad coloidal

La actividad de las arcillas es un concepto introducido en el área de la geotecnia por SKEMPTON (1953) para evaluar el comportamiento de los coloides ante la presencia de agua (Tablas. 3.3 y 3.4), relacionando los límites de Atterberg y el contenido de coloides presentes en el suelo.

De esta forma, la actividad coloidal de Skempton se obtiene dividiendo el índice de plasticidad de la fracción arcillosa del suelo entre el porcentaje coloidal (partículas menores a 0.002 mm de acuerdo a la clasificación MIT y menor a 0.001 mm de acuerdo a la clasificación ASTM).

$$\text{Actividad (Ac)} = \frac{\text{Índice de plasticidad}}{\% \text{ de coloides}} \quad (10)$$

Tabla 3.3. Clasificación de las arcillas de acuerdo a su actividad, según SKEMPTON (1953).

Arcilla	Rango (Ac)
Inactiva	< 0.75
Normal	0.75 - 1.25
Activa	> 1.25

Tabla 3.4. Valores típicos de la actividad de acuerdo a los minerales de las arcillas (Tomado y modificado de SKEMPTON, 1953).

Mineral	Actividad
Caolinita	0.33 - 0.46
Illita	≈ 0.9
Montmorillonita (Ca)	≈ 1.5
Montmorillonita (Na)	≈ 7.2

### 3.2.3. Índice de nocividad de los coloides

El comportamiento de los coloides de un suelo arcilloso ante la presencia de agua, también puede ser determinado mediante un parámetro llamado Índice de Nocividad coloidal (Fig. 3.3), el cual se obtiene a través del ensayo de la mancha y relaciona el valor azul con el porcentaje de coloides mediante la expresión:

$$\text{Índice de Nocividad (IN)} = \frac{\text{Valor Azul}}{\% \text{ de coloides}} \quad (11)$$

Donde el % de coloides se expresa en forma decimal.

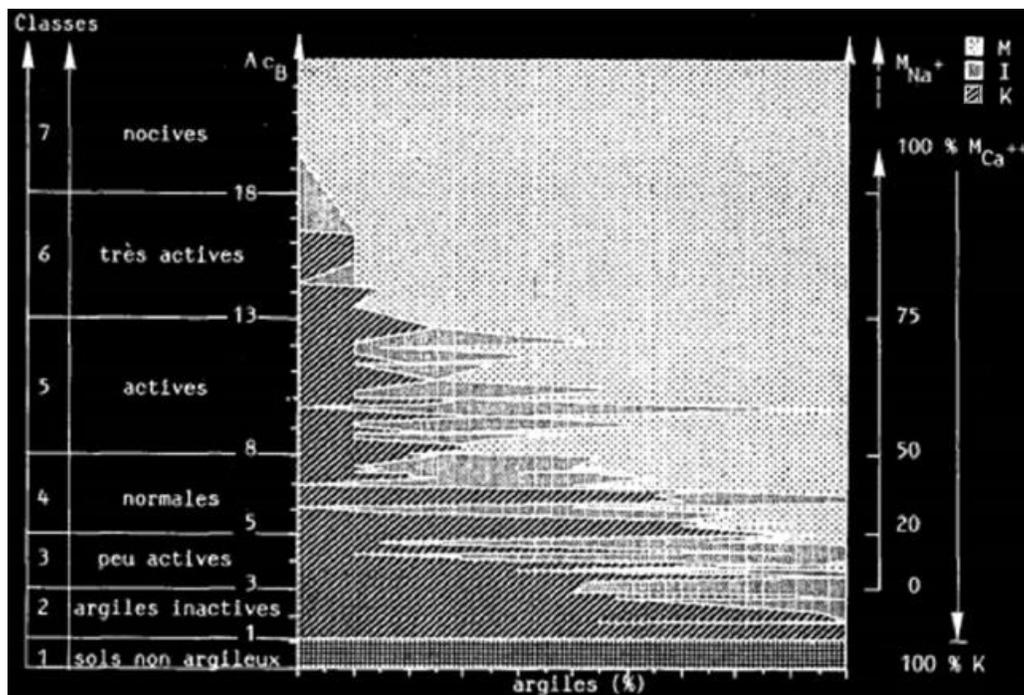


Figura 3.3. Diagnóstico sobre la nocividad de minerales de arcilla según su IN. (Tomado de Bulletin de Liassons des Laboratoires des Ponts et Chaussées en CENTENO, 2013 – Laboratorio de suelos ING-UCV).

El Azul de Metileno o ensayo de la mancha constituye uno de los procedimientos de laboratorio más confiables para la clasificación de las arcillas, pues se trata de un ensayo de tipo cuantitativo en el que la mano del operador no tiene tanta significación como en el caso de los Límites de consistencia (BARBIERO, 1999).

El principio del ensayo es medir mediante una bureta de precisión, el consumo de solución de azul de metileno de una suspensión de suelo en agua destilada desmineralizada que es sometida a continuo agitación. La solución de azul se va añadiendo a la suspensión en sucesivas dosis regulares de 5 cc, hasta lograr que aparezca una mancha azul rodeada de un halo azul claro definido en el papel de filtro en el que se va realizando el ensayo después de cada adición de solución. Una vez que aparezca dicha mancha azul en el papel, ello significa que los coloides se han saturado, y que el suelo no absorbe más azul de metileno (BARBIERO, 1999).

Debe entenderse que el consumo de solución de azul de metileno será mayor a medida que sea mayor el contenido de coloides activos y que la montmorillonita consume más solución que la illita y esta última más que la caolinita. Como se conoce la concentración de azul de metileno, es posible determinar cuánto es el consumo de azul en polvo, es decir, de azul de metileno por cada 100 gramos de suelo. Así mismo, es posible calcular con gran precisión la superficie específica de los coloides, pues el azul es un compuesto químico sumamente estable en cuanto a peso molecular se refiere (BARBIERO, 1999).

#### **3.2.4. Límites de Atterberg**

Mediante el trabajo de ATTERBERG & CASAGRANDE (1948), los límites de Atterberg y los índices con ellos relacionados han constituido unos valores muy útiles para caracterizar los conjuntos de partículas de suelos. Los límites se basan en el concepto de que un suelo de grano fino solamente puede existir en cuatro estados de consistencia según su humedad (sólido, semisólido, plástico y líquido). Los contenidos de humedad y los puntos de transición de unos estados a otros se denominan límites de retracción o contracción, límite plástico y límite líquido (LAMBE & WHITMAN, 2004).

DAS (1999) y LAMBE (2001), muestra valores representativos de los límites de consistencia para algunos suelos arcillosos (Tabla 3.5), así como para los principales minerales de arcilla respectivamente (Tabla 3.6). Sin embargo, los límites de Atterberg para varios suelos varían considerablemente, dependiendo del origen del suelo y de la naturaleza y cantidad de minerales arcillosos.

El límite líquido se determina midiendo la humedad y el número de golpes necesarios para cerrar en una determinada longitud una ranura de un determinado ancho mediante un aparato normalizado; por lo que se puede decir que el límite líquido es el contenido de humedad de un suelo, por el cual, dos secciones de una muestra moldeada del mismo, separadas por una ranura de dimensiones estándar, alcanzan apenas a tocarse, sin unirse, al someterlas al

impacto de 25 golpes bien definidos en la cuchara Casagrande. El límite plástico se obtiene midiendo el contenido de humedad del suelo cuando comienzan a desmoronarse pequeños cilindros de suelo de 3 mm de diámetro. El límite de contracción se define como la humedad presente al haber añadido agua suficiente para llenar todos los huecos de una pastilla de suelo seca (LAMBE & WHITMAN, 2004).

Tabla 3.5. Valores típicos de límites líquido y plástico para algunos materiales y suelos arcillosos (Tomado y modificado de DAS, 1999).

DESCRIPCIÓN	LÍMITE LÍQUIDO (LL)	LÍMITE PLÁSTICO (LP)
CAOLINITA	35 - 100	25 - 35
ILITA	50 - 100	30 - 60
MONTMORILLONITA	100 - 800	50 - 100
ARCILLA AZUL BOSTON	40	20
ARCILLA CHICAGO	60	20
ARCILLA LOUISIANA	75	25
ARCILLA LONDRES	66	27
ARCILLA CAMBRIDGE	39	21
ARCILLA MONTANA	52	18
LODO MISSISSIPPI	25	32
SUELOS LOESIANOS DEL NORTE Y NOROESTE DE CHINA	25 - 35	15 - 20

Tabla 3.6. Valores típicos de Límites de Atterberg para los principales tipos de minerales arcillosos. (Tomado y modificado de LAMBE, 2001).

Mineral	Cambio de Cation	Límite Líquido (LL) (%)	Límite Plástico (LP) (%)	Índice de Plasticidad (IP) (%)	Límite de Contracción (SL) (%)
Montmorillonita	Na	710	54	656	9,9
	K	660	98	562	9,3
	Ca	510	81	429	10,5
	Mg	410	60	350	14,7
	Fe	290	75	215	10,3
Ilita	Na	120	53	67	15,4
	K	120	60	60	17,5
	Ca	100	45	55	16,8
	Mg	95	46	49	14,7
	Fe	110	49	61	15,3
Caolinita	Na	53	32	21	26,8
	K	49	29	20	-
	Ca	38	27	11	24,5
	Mg	54	31	23	28,7
	Fe	59	37	22	29,2
Atapulgita	H	270	150	120	7,6

### 3.2.5. Expansión potencial

La expansión que puede sufrir un suelo, especialmente aquellos que contienen gran cantidad de minerales de arcilla, está íntimamente relacionada con las condiciones iniciales de humedad y densidad en que se encuentren, así, como de muchos otros factores que inciden en el desarrollo del potencial expansivo de estos suelos como su composición química, mineralogía, estructura y fábrica del suelo, presión de confinamiento, permeabilidad, temperatura y tiempo. De esta forma, en los suelos con alto contenido arcilloso activo, los cambios de humedad originan alteraciones volumétricas, a veces bastantes severas. La pérdida de humedad del suelo produce contracciones críticas, y el humedecimiento, expansión o hinchamiento (ARANCIBIA, 2003).

La medida más usual, para predecir en parte el comportamiento expansivo de los suelos, se designa con el nombre de Índice de Expansión y representa la presión alcanzada por el suelo, al variar principalmente sus condiciones de humedad. Este también puede estar representado como porcentaje, indicando la expansión experimentada por el suelo con respecto a un espesor inicial del mismo, antes de que ocurra una variación en su condición normal o estado original (PATRONE & PREFUMO, 2002; ARANCIBIA, 2003).

### 3.2.6. Superficie específica

La superficie específica ( $Se$ ) es definida por SANTAMARINA *et al.* (2002) y DAS (2008) como la relación entre la superficie de una partícula ( $A_p$ ) y su masa ( $m$ ). SANTAMARINA *et al.* (2001) menciona que su valor determina el balance entre fuerzas capilares, eléctricas y gravimétricas actuantes sobre las partículas, afecta la fábrica, la permeabilidad, y controla la adsorción y retardación durante la difusión química.

La figura 3.4 muestra la superficie específica teórica para diferentes geometrías. Las ecuaciones confirman que la  $Se$  está controlada por la menor dimensión de las partículas.

Forma o Geometría	Dimensiones	Ejemplos	Superficie específica
Esferas y cubos 	Diámetro (o lado) $D$	Alofanas	$S_e = \frac{6}{D \cdot \rho_w \cdot G_z}$
Cilindros y prismas 	Diámetro (o lado) $D$ , largo $L$ (con $L \gg D$ )	Haloisita, Imogolita	$S_e = \frac{4}{D \cdot \rho_w \cdot G_z}$
Formas aplanadas 	Espesor $t$ , ancho $D$ , y largo $L$ (con $t \gg L > D$ )	Montmorillonita, Caolinita, Mica	$S_e = \frac{2}{t \cdot \rho_w \cdot G_z}$

$\rho_w$  = densidad del agua,  $G_z$  = gravedad específica,  $S_e$  = superficie específica

Figura 3.4. Superficie específica teórica para distintas geometrías. (Tomado y modificado de SANTAMARINA *et al.*, 2002).

Algunos autores como SANTAMARINA *et al.* (2002), CHO & SANTAMARINA (2004) y DAS (2008) muestran tablas con valores típicos de superficie específica para diversos minerales, principalmente arcillosos (Tabla 3.7).

Tabla 3.7. Valores típicos de superficie específica para los principales minerales. (Tomado y modificado de CHO & SANTAMARINA, 2004; DAS, 2008).

ARCILLA MINERAL	SUPERFICIE ESPECÍFICA (m <sup>2</sup> /g)
Limos y Arenas	< 0,1
Caolinita	10 – 30
Clorita	5 – 50
Haloisita	30 – 50
Illita	80 – 100
Atapulgita	140 – 170
Paligorskita	100 – 200
Sepiolita	100 – 240
Vermiculita	200 – 400
Montmorillonita cálcica	300 – 350
Montmorillonita ferrosa	400 – 450
Montmorillonita sódica	700 – 900

Según NARSILIO & SANTAMARINA (2004), existen diferentes técnicas para la determinación de la  $S_e$ :

- Absorción de moléculas de una solución - método aconsejado en suelos expansivos.
- Absorción de moléculas en estado gaseoso, como por ejemplo nitrógeno, vapor de agua o CO<sub>2</sub>.
- Otras técnicas basadas en propiedades termodinámicas, en difusividad de los patrones de difracción de rayos X, o en propiedades eléctricas.

La técnica de consumo de azul de metileno corresponde al grupo de absorción de moléculas de una solución. El catión de Azul de Metileno (AM), tiene forma prismática de dimensiones  $17\text{Å} \times 7,6\text{Å} \times 3,25\text{Å}$  y la superficie máxima cubierta por un catión de AM es  $\sim 130 \text{Å}^2$ , aunque puede ser menor, dependiendo de la orientación del catión con respecto a la superficie de la arcilla que lo absorbe. Los cationes de una solución acuosa de cloruro azul de metileno (peso molecular  $319,87 \text{ g/mol}$ , (Fig. 3.5) son absorbidos por las cargas negativas de la superficie de las arcillas. La Se es computada con la cantidad del AM absorbido. Los pasos a seguir en la técnica de absorción de AM utiliza capilaridad en papel de filtro para detectar exceso de catión AM (NARSILIO & SANTAMARINA, 2004).

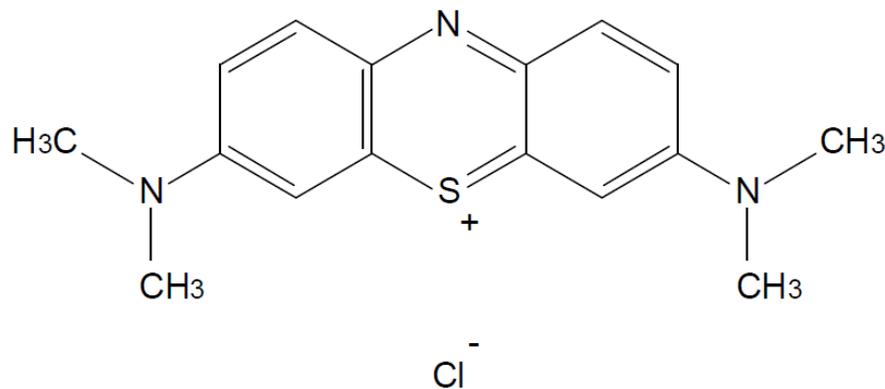


Figura 3.5. Estructura del catión de azul de metileno, correspondiente al Cloruro azul de metileno  $\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{N}_3\text{S}^+\cdot\text{Cl}^-$ , de acuerdo a estándar DIN 58981. La máxima superficie cubierta por un catión es de  $130 \text{Å}^2$ . (Tomado y modificado de SANTAMARINA *et al.*, 2002).

Por otro lado, NARSILIO & SANTAMARINA (2004) también mencionan que los límites de Atterberg, son una expresión de la superficie específica de los suelos. Efectivamente, para una capa de agua absorbida de espesor  $h$ , el contenido de humedad  $w$  para partículas aplanadas es:

$$w = h \times S_e \times \rho_w \quad (12) \quad \text{Siendo } \rho_w \text{ la densidad del agua}$$

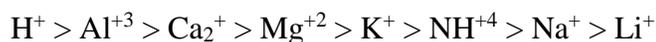
Por otro lado, evidencias experimentales, en 19 arcillas británicas, confirma que el límite líquido se relaciona con la  $S_e$  (FARRAR Y COLEMAN 1967):

$$S_e \text{ (m}^2\text{/gr)} = 1,8 \times \%LL - 34 \quad (13)$$

### 3.2.7. Capacidad de Intercambio catiónico

Los cationes compensadores que se adsorben en la superficie de la capa unitaria pueden ser cambiados por otros cationes y se llaman los cationes intercambiables de la arcilla. La cantidad de cationes por peso unitario de la arcilla es medida y registrada como la CIC (capacidad de intercambio catiónico). La CIC está expresada en miliequivalentes por 100 g de arcilla seca (meq/100 g). La CIC de la montmorillonita está comprendida dentro del rango de 80 a 150 meq/100 g de arcilla seca. La CIC de las illitas y cloritas es de aproximadamente 10 a 40 meq/100 g, y la CIC de las caolinitas es de aproximadamente 3 a 10 meq/100 g de arcilla (KAGAYA *et al.*, 2012).

Según CADENA (2013), es una de las propiedades más destacables, derivada a partir del diferente grado de sustitución, debido a que las arcillas suelen presentar un grado variable de isomorfismo el cual puede afectar tanto a la hoja tetraédrica como a la octaédrica. Las sustituciones suelen implicar cambios de Si por otros cationes de menor valencia (Al) o del Al de la hoja octaédrica por cationes divalentes. Ello conduce a la circunstancia de que casi todas las arcillas poseen un déficit estructural de carga positiva que es compensado con otros cationes como Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> y Ca<sup>+2</sup>. En este orden de ideas, de los cationes que reemplazarán a otros cationes en las posiciones de intercambio, se acepta generalmente la siguiente secuencia, disponiéndola en orden de preferencia decreciente (cualquier catión a la izquierda reemplazará a cualquier catión ubicado a su derecha):



No obstante, la concentración relativa de cada catión también afecta esta preferencia de intercambio catiónico. Aunque resulte más difícil reemplazar el calcio que el sodio, si la concentración iónica de Na<sup>+</sup> es considerablemente más alta que la concentración de Ca<sub>2</sub><sup>+</sup>, el sodio desplazará al calcio. El intercambio catiónico puede resultar de un cambio de temperatura, visto que muchos compuestos tienen diferentes relaciones de solubilidad a alta temperatura. La

solubilidad de algunas de las sales cálcicas comunes, tales como  $\text{CaSO}_4$ , disminuye a grandes temperaturas, mientras que la solubilidad de la mayoría de los compuestos de sodios aumenta. A medida que la concentración de  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{+2}$  aumenta, los cationes  $\text{Ca}^{+2}$  de la arcilla tienden a ser reemplazados por los cationes  $\text{Na}^+$  de la solución.

KAGAYA *et al.* (2012) mencionan que la Prueba de Azul de Metileno es un indicador de la CIC aparente de una arcilla. Cuando se realiza esta prueba sobre determinado material, se mide la capacidad total de intercambio de azul de metileno de todos los minerales arcillosos presentes. Normalmente se registra la Capacidad de Azul de Metileno como la cantidad equivalente de bentonita de Wyoming requerida para obtener esta misma capacidad. Sin embargo, es importante notar que la prueba no indica directamente la cantidad de bentonita presente. De esta forma, se trata de un método práctico para evaluar la reactividad de la arcilla mediante una solución de azul de metileno 0,01 N, de manera que el número de milímetros de solución de azul de metileno requeridos para llegar al punto final sea igual a meq/100g. El rango de CIC para materiales minerales arcillosos puros está indicado en la siguiente tabla:

Tabla 3.8. Valores típicos de capacidad de intercambio catiónico para minerales puros. (Tomado y modificado de KAGAYA *et al.*, 2012).

Mineral	CIC (meq/100g)
Esmectita	80-150
Illita	10-40
Clorita	10-40
Caolinita	3-10

Muchas veces, la CIC constituye una mejor medida de la reactividad de la arcilla que el análisis mineralógico deducido del análisis de difracción de rayos X (KAGAYA *et al.*, 2012).

### 3.3. ANÁLISIS GEOQUÍMICOS: RAYOS-X

Para el análisis geoquímico de los sedimentos arcillosos se utilizan tanto métodos físicos, los cuales incluyen principalmente análisis térmico diferencial, análisis termogravimétrico y termogravimetría diferencial, así como los métodos electrónicos, incluyendo la microscopía y difracción de electrones, la difracción de rayos X, espectrometría (fluorescencia) de rayos X, espectrometría infrarroja, los cuales se emplean con frecuencia (BESOAIN, 1985).

#### 3.3.1. Principios de Rayos-X

Los rayos X fueron descubiertos en 1895 por Wilhelm Conrad Röntgen en la Universidad de Würzburg, Bavaria. Él observó que ciertos cristales de Ba, estando completamente sellados con papel negro, eran luminiscentes cuando cerca de ellos se producía una descarga generada por un tubo de rayos catódicos. Gracias a este trabajo, Röntgen recibió en 1901 el primer premio Nobel de Física. (VALENTINUZZI, 2008).

BERTIN (1975) menciona que los rayos-X forman parte del espectro electromagnético y por lo tanto, tienen propiedades de partículas y ondas, con longitudes  $\lambda$  de aproximadamente  $1\text{Å}$  y frecuencias  $\nu$  de aproximadamente  $3 \times 10^{13}$  ciclos ( $\nu$ )/segundo. Es decir, Los rayos X son radiaciones electromagnéticas de la misma naturaleza que la luz, pero con una longitud de onda ( $\lambda$ ) mucho menor (Fig. 3.6) y por ende son mucho más energéticas.

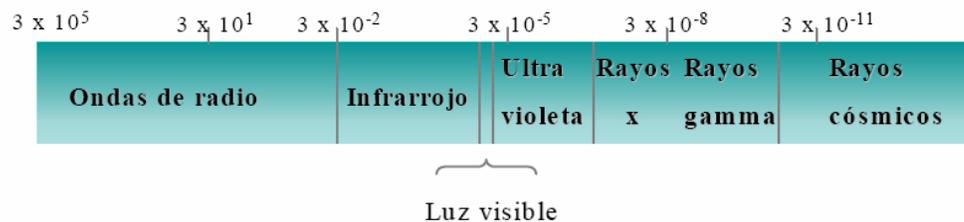


Figura 3.6. Espectro electromagnético mostrando el espectro visible con las longitudes de onda en cm (Tomado y modificado de AGUILAR & CARABALLO, 2007).

La unidad de medida utilizada para la región de los rayos-X es el Angstrom (Å) y los mismos se producen cuando una partícula eléctricamente cargada y con suficiente energía cinética asociada, es desacelerada de manera brusca y/o por transiciones electrónicas en las órbitas internas de los átomos (BERTIN, 1975). Para ello se utiliza un tubo de rayos-X (Coolidge), el cual posee electrodos, uno es la fuente de electrones (cátodo) y el otro es el acelerador de dichas partículas (ánodo o anticátodo). El alto voltaje que se aplica entre estos, acelera los electrones hacia el ánodo o blanco, los rayos-X se producen en el punto de impacto y su radiación ocurre en todas direcciones. La energía de un rayo electromagnético interactuando con un medio es parcialmente transmitida, refractada y disipada, y parcialmente absorbida. El paquete de energías, o fotones, pueden “rebotar” y transferirse momentáneamente, lo cual es una propiedad de las partículas discretas (MOORE & REYNOLDS, 1989).

### 3.3.2. Difracción de Rayos-X

En 1912 Max von Laue concibió la hipótesis de que si un cristal está constituido por átomos espaciados regularmente, estos pueden actuar como centros de difusión de rayos X. Si estos rayos son radiaciones electromagnéticas, cuya longitud de onda corresponde aproximadamente a las distancias interatómicas del cristal, entonces es posible difractar los rayos X con ese cristal. Según Sir W.H. Bragg y su hijo Sir W.L. Bragglos, los rayos X pueden considerarse reflejados por muchos planos atómicos paralelos del cristal. Así, las ondas que penetran las capas exteriores del cristal, son reflejadas parcialmente por el primer plano de átomos, en parte por el segundo plano y así sucesivamente. Es la periodicidad de la distribución atómica la que posibilita la difracción (BESOAIN, 1985).

De esta forma, la difracción es un fenómeno que se produce cuando una onda al propagarse, encuentra un obstáculo o una abertura de tamaño comparable a su longitud de onda. Este fenómeno es característico de todo tipo

de ondas y genera una propagación no rectilínea de la onda, tal como lo indica el principio de Huygens.

Según BESOAIN (1985), cuando el haz de rayos-X pasa por un átomo, su campo eléctrico acelera los electrones y les confiere un modo vibracional. Una carga eléctrica en oscilación, induce una serie de ondas electromagnéticas. Las ondas que irradia cada electrón, tiene la misma frecuencia ( $\nu$ ) y longitud de onda ( $\lambda$ ) que el haz de rayos-X que la origina. El ángulo en el cual los rayos X son difractados por la superficie de un cristal es deducido por medio del uso de la Ley de Bragg, definida de la siguiente forma:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (14)$$

De esta manera, el análisis del patrón de difracción, permite conociendo  $\lambda$  y el ángulo de incidencia ( $\theta$ ), determinar el espaciado ( $d$ ) entre los planos que forman el cristal, lo que corresponde a las distancias y geometría de la celda unidad (Tomado de LEAL & SCREMIN 2011).

Para satisfacer la ley de Bragg y que se produzcan fenómenos de difracción, deben variarse sea la longitud de onda ( $\lambda$ ) o el ángulo ( $\theta$ ). La manera como se hacen variar estas magnitudes posibilita los tres métodos de difracción principales, dentro de los cuales se encuentra el método del polvo cristalino, con  $\lambda$  fija y  $\theta$  variable. Los otros dos métodos corresponden al cristal rotatorio, con  $\lambda$  fija y  $\theta$  en parte variable y al de Laue, con  $\lambda$  variable y  $\theta$  fijo.

El método del polvo cristalino, de Debye-Scherrer-Hull, reduce el cristal a un polvo fino, constituido por infinita cantidad de cristalitos con todas las orientaciones posibles. De este modo, siempre habrá un cierto número de cristales orientados de forma tal que una familia de planos reticulares caracterizados por una distancia  $d_1$ , satisfagan la ley de Bragg; otro grupo satisfará esta condición para una distancia  $d_2$  y así sucesivamente, debiendo cumplirse siempre que  $d = \lambda / 2$ .

La característica más conspicua de la técnica del polvo cristalino incluye un estrecho haz de rayos X monocromáticos que inciden sobre la superficie de una muestra de polvo cristalino, constituido por miríadas de cristallitos orientados al azar. En tales condiciones, y como puede verse en la figura 3.7, los rayos difractados por un conjunto de planos de espaciado  $d_1$ , generan un cono con un ángulo de semiapertura  $2\theta_1$ ; los planos de espaciado  $d_2$  generan un cono de ángulo  $2\theta_2$ , y así sucesivamente. Si se interpone una película plana frente al rayo AB, en el punto P se produce un diagrama de anillos concéntricos por los conos de los rayos difractados.

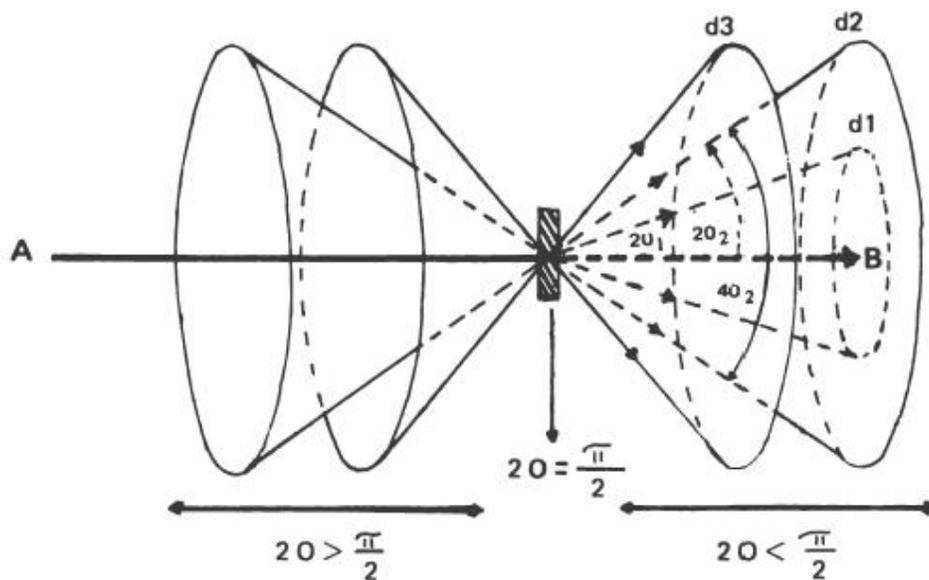


Figura 3.7. Difracción de los rayos X a partir de una muestra de polvo plana. Los conos de revolución tienen por eje el rayo incidente y por ángulo de apertura  $4\theta$  (Tomado de BESOAIN, 1985).

Así, la aplicación fundamental de la difracción de rayos X (DRX) es la identificación de la composición mineralógica de una muestra cristalina y se basa 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.

### 3.3.3. Fluorescencia de Rayos X

La espectrografía de rayos X, llamada también método de análisis espectral de fluorescencia de rayos X (FRX), constituye un método moderno, rápido y no destructivo que permite determinar cualitativa y cuantitativamente los elementos que constituyen una sustancia. De esta forma, La FRX constituye la técnica analítica más ampliamente usada en la determinación de elementos químicos mayoritarios y traza en muestras de rocas. Es una técnica versátil en la cual se pueden analizar más de 80 elementos sobre un amplio rango de sensibilidades, detectando concentraciones de 100%, hasta unos pocas partes por millón (ROLLINSON, 1993).

Cuando una muestra sólida o líquida se bombardea con rayos X de energía apropiada, los átomos de los elementos constitutivos emiten un espectro de rayos X heterogéneo; se dice que la muestra fluoresce. Esta radiación secundaria contiene varias longitudes de onda, cada una de las cuales es característica y representativa de cada uno de los elementos componentes de la muestra. Las radiaciones componentes del espectro, de longitudes de onda diferente, se separan mediante un cristal analizador cuyo espaciado “d” es conocido. La energía de los rayos X fluorescentes dispersados por el cristal analizador, cada una a un ángulo diferente, se mide con un detector de radiaciones y se registra automáticamente. Del análisis de estos valores (posición angular, energía) se puede obtener información cualitativa y cuantitativa de los elementos presentes en un compuesto (BESOAIN, 1985).

La espectrometría de fluorescencia de rayos X está basada en la excitación de una muestra. La intensidad producida por los rayos-X secundarios es usada para determinar las concentraciones de los elementos presentes en la muestra, ya que estos presentan longitudes de onda característicos de cada elemento químico (ROLLINSON, 1993).

Según NITON CORPORATION (1998) al irradiar una muestra, los rayos-X fuente pueden sufrir dispersión o absorción de los átomos. Este proceso posterior es conocido como *efecto fotoeléctrico*. Cuando un átomo absorbe los

rayos-X de la fuente, la radiación incidente desaloja electrones de las capas más internas del átomo, creando vacantes. Los electrones vacantes son rellenados por electrones provenientes de las conchas electrónicas externas en forma de cascada (Fig. 3.8). Los electrones en las capas externas tienen mayores estados energéticos que los electrones de las conchas internas, y los electrones de las capas externas emiten energías hacia las capas internas vacantes. Este reajuste de electrones es lo que resulta en la emisión de los rayos X característico de un átomo dado, como se mencionó anteriormente (Tomado de LEAL & SCREMIN 2011).

No obstante, con el desarrollo de la tecnología de aceleradores que, al ser fuentes de radiación intensa y colimada, permiten llevar a cabo estudios de procesos resonantes, tal como el efecto Raman. De esta forma, con un espectro suave y de alta intensidad como el generado por la radiación de sincrotrón, no sólo es posible excitar un determinado nivel mediante un haz monocromático, sino también lograr haces de fotones con amplitud menor que el tiempo de vida del nivel resonante (VALENTINUZZI, 2008).

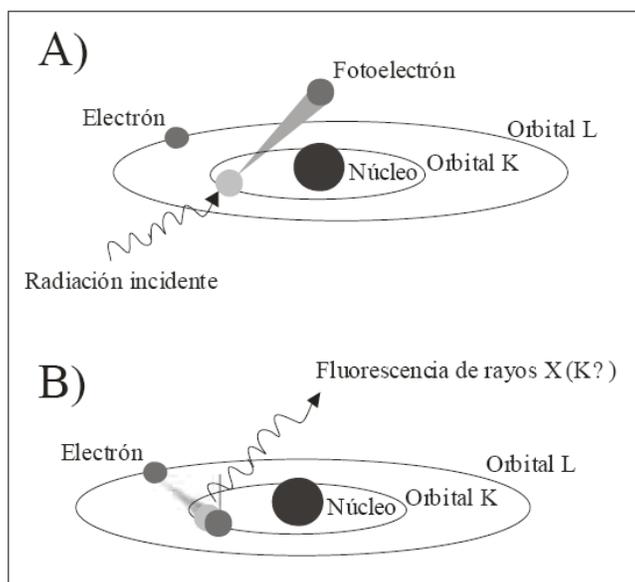


Figura 3.8. Representación esquemática del principio en que se basa la técnica de la FRX (Tomado de AGUILAR & CARABALLO, 2007). (A) La radiación incidente expulsa un electrón de una capa interior del átomo. (B) Un electrón de una capa externa pasa a ocupar el lugar vacante y genera una radiación de FRX.

El efecto Raman es un proceso de dispersión inelástica cuya principal característica es un comportamiento altamente resonante a medida que la energía de la radiación incidente se aproxima por debajo a la energía del borde de absorción. En los espectros fluorescentes pueden observarse comportamientos singulares debidos a este proceso de dispersión que contribuyen al fondo de radiación y por lo tanto afectan a la cuantificación. Este efecto debe ser tenido en cuenta, sobre todo al analizar muestras compuestas por elementos de número atómico próximo. Es fundamental estudiarlo, ya que limita la aplicación de la técnica de reflexión total de rayos X como método para medir concentraciones bajas de elementos livianos en substratos de Si, ya que si se incrementa el fondo y el límite de detección de elementos livianos, se ve afectada por la presencia de picos Raman en el espectro fluorescente (CAHN, 2001; VALENTINUZZI, 2008; VILLALOBOS, 2013).

Por esta y otras razones, la determinación del contenido de un elemento en una mezcla de varios elementos, mediante la fluorescencia de rayos X, no es tan simple, por cuanto la intensidad de la fluorescencia de un elemento no es estrictamente proporcional a su concentración. En efecto, los elementos asociados ejercen acciones de absorción y ello es crítico cuando estos elementos varían su concentración. No sólo la radiación secundaria sino también la primaria, pueden ser absorbidas, por lo que la intensidad de la radiación fluorescente depende de la concentración del elemento y del coeficiente de absorción de masa de los elementos acompañantes. Además, la fluorescencia de un elemento puede aumentar a consecuencia de la radiación fluorescente de los elementos acompañantes si esta radiación es de longitud de onda más corta (y más energética) que el canto de absorción de los elementos. Por otra parte, la intensidad de la fluorescencia de un elemento dependerá del tamaño de las partículas y de la disposición de la superficie (BESOAIN, 1985).

Así, el análisis por fluorescencia de rayos X implica la medición de intensidades de líneas características específicas de un elemento y la reducción de estas intensidades a concentraciones de masa. Al igual que en las técnicas de

fotometría de llama o espectroscopia visible, el método espectrométrico de rayos X es casi siempre comparativo, basado en el uso de curvas analíticas preparadas con estándares adecuados. La evaluación de las intensidades de la radiación fluorescente en mezclas de componentes múltiples, sin el concurso de curvas estándar, es compleja aun recurriendo a programación con computadores (BESOAIN, 1985).

#### **3.3.4. Microscopía electrónica de barrido (MEB o SEM) y espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDX)**

Al igual que los microscopios ópticos, el propósito del microscopio electrónico es aumentar la capacidad de visión del ojo humano para ver objetos pequeños. Esto se logra mediante el uso de electrones en lugar de luz y de lentes eléctricas o magnéticas en reemplazo de las lentes de vidrio. Con ello se logra observar la imagen de partículas o registrarlas en fotografías. Así, el microscopio electrónico aventaja el microscopio óptico común en su mayor resolución y aumento. El poder de resolución de los microscopios está limitado por los fenómenos de difracción, hecho que determina que cada punto del objeto no se reproduzca en la imagen como un punto sino como un disco (llamado disco de Airy) rodeado de anillos concéntricos. El diámetro de este disco es directamente proporcional a la longitud de onda, e inversamente proporcional al ángulo de apertura de la lente vista desde el objeto. Se define el límite de resolución como la distancia entre dos puntos del objeto, cuyos discos, correspondientes a la imagen, están separados de modo que el borde de uno coincida con el centro del otro (BESOAIN, 1985).

El hecho de que produzca imágenes de alta resolución, significa que características espacialmente cercanas en la muestra pueden ser examinadas a una alta magnificación. El aumento de la imagen producida por el MEB resulta de la relación entre las dimensiones de la imagen final y el área de la muestra que ha sido barrida. Así, por ejemplo, si la sonda barre un área de 1 mm<sup>2</sup> de la muestra y la imagen en la pantalla es de 100 mm<sup>2</sup>, ésta ha sido ampliada 100

veces (ABALLE *et al.*, 1996). En la Figura 3.9 se muestra el esquema básico de un MEB.

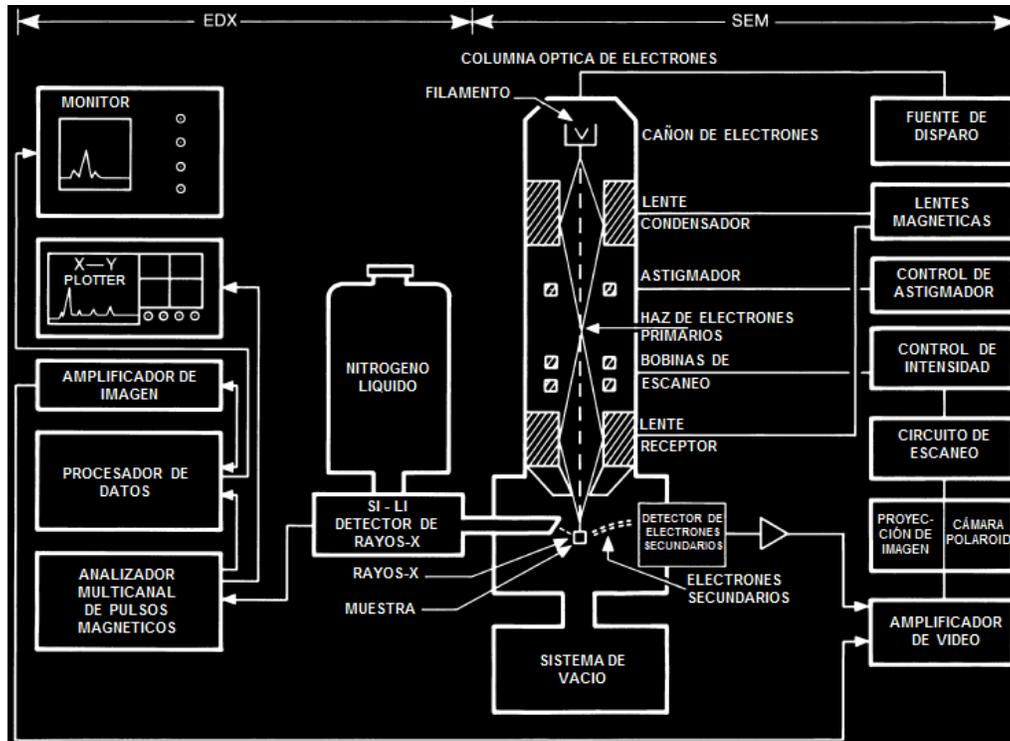


Figura 3.9. Diagrama esquemático del sistema microscopio electrónico de barrido/espectrometría de dispersión de energía de rayos X. (Tomado y modificado de WELTON, 2003).

El microscopio electrónico funciona con un haz de electrones generados por un cañón de electrones, acelerados por un alto voltaje y focalizados por medio de lentes magnéticas que dirigen y enfocan a los electrones por medio de campos electromagnéticos. Esto es realizado en un sistema de vacío para evitar al máximo la presencia de moléculas de aire que no sólo desviarían los electrones que viajan hacia la muestra, sino que también oxidarían de forma inmediata el filamento incandescente. Los electrones atraviesan la muestra (debidamente deshidratada) y la amplificación se produce por un conjunto de lentes magnéticas que forman una imagen sobre una placa fotográfica o sobre una pantalla sensible al impacto de los electrones que transfiere la imagen formada a la pantalla de un ordenador. Este sistema que graba o despliega las

imágenes producidas por la interacción de los electrones con la muestra, es conocido como tubo de rayos catódicos (CRT) (WELLS, 1974; GUZMÁN, 2008).

En el análisis EDX, el haz primario de electrones en el SEM ioniza los átomos del mineral que se está analizando al excitar y expulsar electrones en las capas internas de los átomos. Cuando un electrón es removido de una capa electrónica interna del átomo, por efecto de la interacción de un haz de electrones de alta energía, el resultado es un átomo en estado excitado (Fig. 3.10). Estas transiciones de la capa externa a la interna liberan cantidades específicas de energía, en forma de rayos X, cuya magnitud indica inequívocamente el elemento químico del que proviene (de aquí el nombre de emisión característica de rayos X), ya que cada uno tiene un espectro de energías característico. La energía de cada rayo X está determinada por la diferencia de energía entre las capas de electrones involucradas, las diferencias en el giro del electrón y la cantidad de protones en el núcleo. Solo la más fuerte de estas transiciones es detectada por el sistema EDX (WELTON, 2003). De esta forma, se adquiere información química elemental de la zona de la que proceden los rayos X, lo que permite obtener análisis químicos cualitativos y cuantitativos de la composición de una determinada muestra, con un límite de detección porcentual del orden de 1%. (CAHN, 2001; GOLDSTEIN, 2003).

La radiación característica proviene de la redistribución de los electrones orbitales del elemento usado como anticátodo y la localización final de los electrones transferidos determina el tipo de radiación. Si la órbita vacante es la más interna (K), los rayos X que se producen tienen una longitud de onda muy corta y se designan como líneas K. Existen dos líneas K estrechamente separadas, las líneas  $K_{\alpha}$  y  $K_{\beta}$ , según el electrón que llega a la órbita K provenga de la capa L o M. La línea  $K_{\beta}$  tiene una longitud más corta que la  $K_{\alpha}$ , ya que se requiere una mayor cantidad de energía si un electrón salta desde la capa M a la K que desde la L a la K. Ambas líneas ( $K_{\alpha}$  y  $K_{\beta}$ ) constituyen un doblete ( $K_{\alpha 1}$   $K_{\alpha 2}$ ;  $K_{\beta 1}$ ,  $K_{\beta 2}$ ). Si la órbita vacante es la L resultará una serie de líneas L. En la figura 3.10 pueden verse algunos ejemplos de estas transiciones. Mientras más

cerca del núcleo se encuentra un electrón, mayor energía se requerirá para sacarlo de su órbita (BESOAIN, 1985).

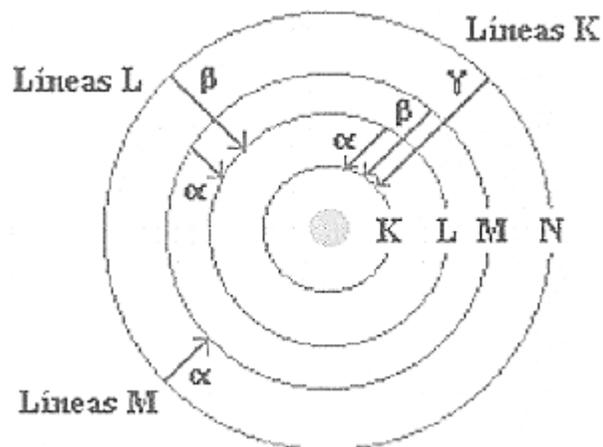


Figura 3.10. Descripción de las transiciones electrónicas durante el proceso de formación de rayos X. (Tomado de GUZMÁN, 2008).

Los rayos X “K” representan las emisiones más fuertes y se usan principalmente para identificar elementos hasta el número atómico 30; las líneas “L” y “M” se usan para elementos mayores que el número atómico 30 (WELTON, 2003).

### 3.3.5. Espectrometría de absorción atómica (AAS)

Hace cincuenta años, en 1955, WALSH publicó su artículo " The application of atomic absorption spectra to chemical analysis". Este documento marcó el nacimiento oficial de un nuevo método de análisis instrumental: la espectrometría de absorción atómica (AAS) (L'VOV, 2005).

SAAVEDRA (1970), define la espectrometría de absorción atómica como un método instrumental de la química analítica que permite medir las concentraciones específicas de un material en una mezcla y determinar una gran variedad de elementos comunes en minerales y rocas (Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na, K, Ba, Cu, Ni, Pb, Zn, Cr, As, Cd y Ag).

La AAS se usa para determinar la concentración desconocida de un elemento individual (analito) midiendo la cantidad de luz que este absorbe. De esta forma, el sistema requiere de una fuente de luz primaria, una fuente de átomo y un detector (Fig. 3.11). La fuente de luz consta de una lámpara de cátodo hueco (HCL) o una lámpara de descarga de electrodo (EDL), que emite un espectro específico para cada elemento. El haz de luz pasa a través de una llama creada por un gas oxidante (acetileno, hidrógeno o GLP) al mezclarse con un combustible (aire, óxido nitroso u oxígeno), con una alta temperatura y un caudal específico. La temperatura de la llama es lo bastante alta como para que no mueran los átomos de la muestra de su estado fundamental. El nebulizador y la llama se usan para desolvatar y atomizar la muestra, pero la excitación de los átomos del analito se consigue con el uso de las lámparas que brillan a través de la llama, a diversas longitudes de onda para cada tipo de analito. La fuente del átomo introduce la muestra en la llama como un aerosol y el calor produce átomos de analito libres. Los átomos del analito, en la llama que corresponden a la lámpara particular para el elemento que se está utilizando, absorben la energía de la fuente de luz. Un detector, generalmente un tubo fotomultiplicador, mide la intensidad de la luz que sale de la llama. Los componentes electrónicos convierten la cantidad de luz absorbida a la concentración de la muestra real (WALSH, 1999; KAHN & SLAVIN 1963; AMOS, 1966; BRUCE & HANNAFORD, 1971; SKOOG & LEARY, 1994).

La AAS permite la detección y determinación de metales en cualquier tipo de muestra industrial, siempre y cuando pueda ser solubilizada (WALSH, 1946). Así mismo, esta técnica, está especialmente indicada para determinar elementos alcalinos, alcalinotérreos y metales pesados presentes en cualquier tipo de muestra susceptible de ser disuelta. Los niveles de concentración que se pueden analizar van desde % hasta ppb (partes por billón ó 1 mg/Tm) y las lecturas del instrumento, por lo general, están calibradas para mostrar la concentración directamente (AMOS, 1966).

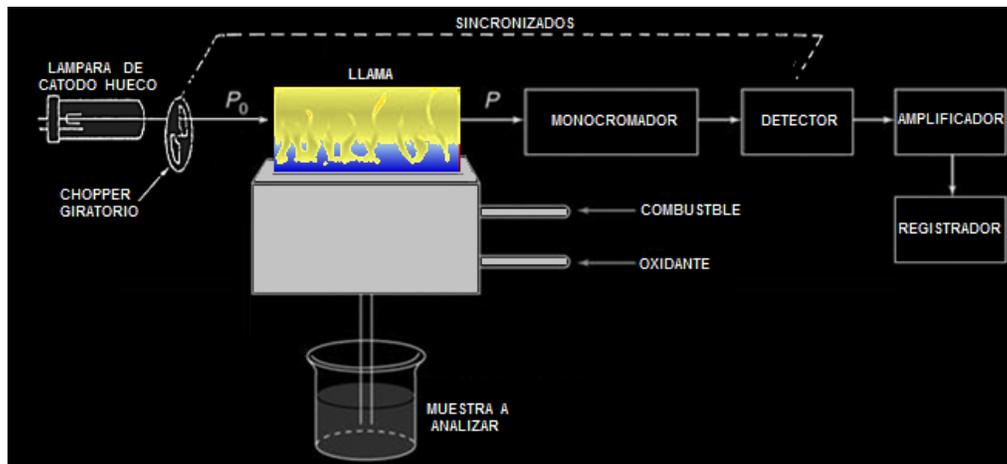


Figura 3.11. Diagrama de bloques de un equipo de absorción atómica. (Tomado y modificado de SKOOG & LEARY, 1994).

### 3.3.6. Análisis térmico

Los minerales de arcilla contienen hidroxilos y moléculas de agua, unidos a la red cristalina con diferente energía. La temperatura necesaria para eliminar estos iones o moléculas, la pérdida de peso que experimenta la sustancia o la energía requerida, son características y se usan con propósitos diagnósticos. Estos fenómenos de deshidratación implican cambios en la estructura de los minerales de arcilla, cambios que deben considerarse simultáneamente a la pérdida de agua. Sin embargo, algunas transformaciones que se producen a alta temperatura, como la formación de nuevas fases minerales, no están asociados a fenómenos de deshidratación (BESOAIN, 1985).

La definición generalmente aceptada de análisis térmico hace referencia a un grupo de técnicas en las que se mide una propiedad física de una sustancia y/o de sus productos de reacción, en función de la temperatura, mientras la sustancia se somete a un programa de temperatura controlado. (WEBER-ANNELER & ARNDT, 1985).

La dependencia de ciertas reacciones con la temperatura, posibilita una caracterización cualitativa y aún cuantitativa de los minerales. Los métodos de análisis térmico pueden dividirse en dos grupos: los que miden cambios de peso debidos a la pérdida o ganancia de sustancias gaseosas y aquellos que miden

cambios de energía en una fase sólida. Las variaciones de peso provocadas por la pérdida de agua, en sus diferentes formas (incluyendo los grupos OH), anhídrido carbónico o por ganancia de oxígeno, se miden mediante el análisis termogravimétrico (ATG) o por termogravimetría diferencial (ATGD). Los cambios de energía asociados a las reacciones térmicas que experimenta una sustancia en calentamiento, se determinan mediante el análisis térmico diferencial (ATD) (BESOAIN, 1985).

**Análisis termogravimétrico diferencial (ATGD)** Este método consiste en determinar la pérdida de peso diferencial a medida que una muestra se calienta. Se le conoce también como calorimetría diferencial dinámica (COO) y permite determinar pérdidas de peso asociadas con los cambios de energía. Este método se originó a partir de los trabajos de Oekeyser, en 1953, aunque otros investigadores como ERDEY & PAULIK, (1954) desarrollaron, en forma independiente, un sistema de registro directo de la derivada de la curva termogravimétrica, basado en elementos muy simples (balanzas, magnetos y solenoides) y de gran eficiencia. Se considera que los límites de la iniciación y término de las reacciones son determinados con mayor exactitud mediante el ATGD que el ATD. Sin embargo, el ATGD es menos sensible que el ATD en la detección de las pequeñas reacciones, así como la delimitación exacta de la temperatura a la cual se producen.

El ATGD produce picos térmicos en tanto haya pérdidas o ganancias de peso (pérdidas de agua, hidroxilos, reacciones de oxidación con el oxígeno del aire y otros), pero las reacciones de cambio de fases o reacciones de fase sólida, que no implican ningún cambio de peso, no son registradas por este método. Esto constituye una limitación frente al ATD. Sin embargo, en los últimos años se construyeron aparatos comerciales que registran simultáneamente, en una misma muestra, los tres análisis térmicos: ATG, ATGD y ATD. MACKENZIE (1964) considera que ambos métodos ATD y ATGD son cuantitativos, pero los resultados obtenidos con el último son absolutos, mientras que los resultados obtenidos con el primero están condicionados por la seguridad de control en las

condiciones experimentales. Por eso los picos obtenidos por descomposición en ATGO son más adecuados para uso cuantitativo.

Ahora bien, el equipo utilizado para la realización del ensayo se llama Termobalanza o Analizador termogravimétrico, y las curvas que se obtienen con la técnica se llaman curvas termogravimétricas o curvas TG. La figura 3.12 muestra un esquema de los elementos que componen una termobalanza. (HAINES *et al.*, 1998).

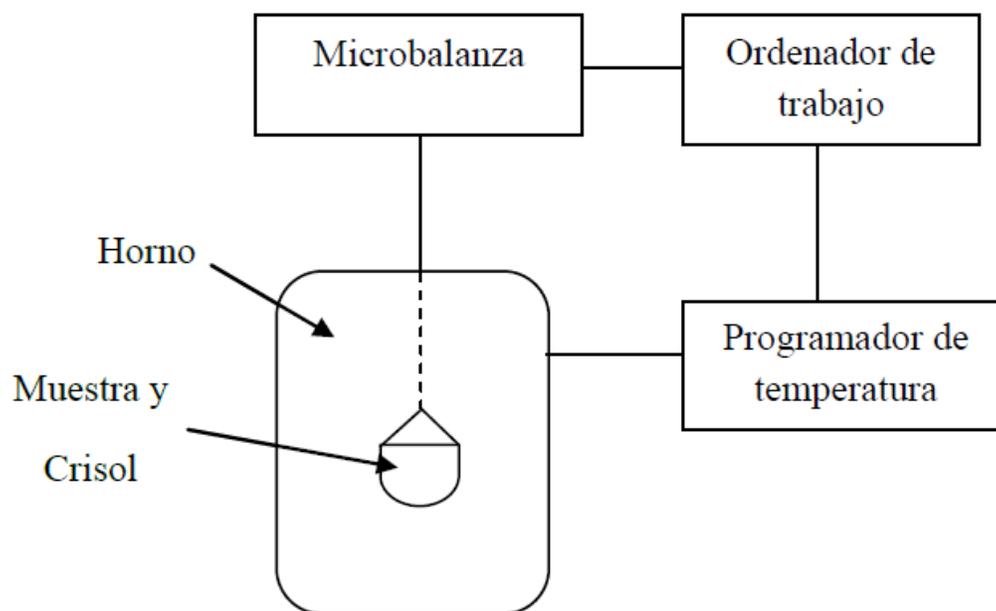


Figura 3.12. Diagrama de bloques de una termobalanza (Tomado y modificado de HAINES *et al.*, 1998).

### 3.3.6.1. Características termogravimétricas de algunos minerales de arcilla

Siendo este un proceso que consta de varias etapas para poder evaluar las posibles ganancias o pérdidas de masa que sufre el material al ser colocado bajo diferentes fases de calentamiento, resulta necesario conocer la temperatura a la cual ocurren las diferentes reacciones químicas (Tabla 3.6).

**Caolines:** este grupo se caracteriza por presentar un salto brusco alrededor de 450 a 500°C. A temperaturas superiores las pérdidas son de poca consideración (Fig. 3.11). La caolinita, pierde muy poca agua a temperaturas

inferiores a 400°C, y la que pierde es agua adsorbida ya que la curva termogravimétrica, en el tramo correspondiente a dicho intervalo de temperatura, tiene la forma de una isobara de absorción. La Haloisita pierde, a temperaturas inferiores a 50 °C, un 12% de peso que corresponde a la pérdida de dos moléculas de agua de hidratación. A partir de esta temperatura, la curva es semejante a la de la caolinita, aunque el salto brusco, se produce a una temperatura inferior a la de ésta (Fig. 3.11). Si la pérdida de agua bajo 100°C es inferior a la pérdida teórica, significa que la haloisita está parcialmente deshidratada (BESOAIN, 1985).

**Esmectitas:** estos minerales poseen una considerable cantidad de agua que puede tomarse o cederse reversiblemente según la temperatura y humedad relativa. La curva de deshidratación de la montmorillonita se caracteriza porque hasta 400°C hay cesión continua de agua; la mayor parte de esta pérdida se produce bajo 200°C, siendo la merma mucho más moderada entre 200 y 400°C. Un salto brusco, pero muy inferior al de los caolines, se produce entre 400-600°C. Sobre 600°C, la disminución de peso es lenta (Fig. 3.11). Las curvas de otras esmectitas, como nontronita y beidellita, tienen un régimen de pérdidas de peso comparables a la montmorillonita (BESOAIN, 1985).

**Micas hidratadas e illitas:** pierden peso hasta 400°C en forma continua, pero en menor proporción que las esmectitas. Entre 400 y 500°C se presenta un pequeño salto, y encima de 500°C la curva adopta una forma semejante a la de la montmorillonita (Fig. 3.13) (BESOAIN, 1985).

Las pérdidas de peso en ATG se interpretan considerando que el agua, en los filosilicatos, se desprende continuamente bajo 400°C, y es agua retenida por adsorción, mientras que la que se pierde bruscamente, a cierto intervalo de temperatura, como un salto, es agua reticular que se encuentra formando parte de la red cristalina en forma de grupos OH. Al aumentar la temperatura aumenta también el movimiento térmico de los hidroxilos, los que a cierta temperatura se desprenden de la red en forma de moléculas de agua, con el desmoronamiento de la estructura del cristal. Se puede comprobar que al

aumentar la fragmentación de los cristales el salto se desplaza hacia las bajas temperaturas, hecho que es una consecuencia del incremento de la superficie específica. En tal caso los grupos OH quedan más expuestos al efecto térmico que si estuviesen resguardados en el interior de la red.

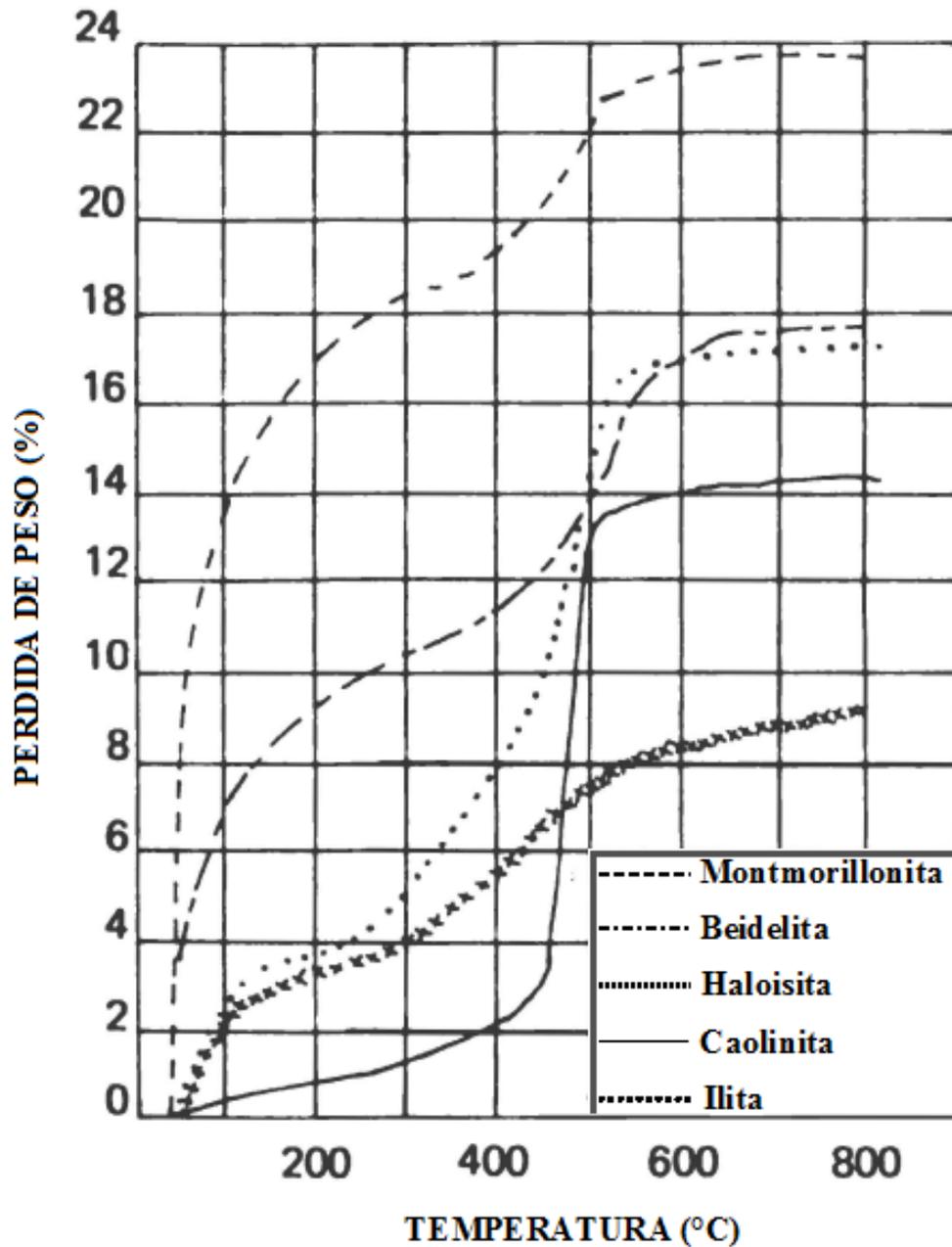


Figura 3.13. Curvas de deshidratación de algunos minerales de arcilla comunes, estándares de Ward's Establishment, EUA (Tomado y modificado de BESOAIN, 1985).

A continuación, se presenta una tabla resumen con las reacciones químicas que se producen en las distintas fases del calentamiento (Tabla 3.9).

Tabla 3.9. Reacciones químicas que se producen en las distintas fases del calentamiento. (Tomado y modificado de RAMÍREZ *et al.*, 2005; VILLANUEVA, 2009; LUNA, 2012; LOPEZ, 2014; ZEBALLOS *et al.*, 2014).

TEMPERATURA	REACCIONES QUÍMICAS
30°-130°C	Eliminación del agua higroscópica.
120°-350°C	Pérdida del agua intersticial, la que está en las distintas capas de los silicatos.
180-200°C	Colapso de la estructura de las esmectitas
250°-300°C	Deshidratación total y deshidroxilación de la goethita
250°-375°C	Goethita se transforma en la fase maghemita
250°-400°C	Inicio de la oxidación de la materia orgánica.
450°C	Eliminación de la materia orgánica y eliminación de CO <sub>2</sub> .
450°-700°C	Formación de metacaolín, o caolín deshidratado.
450°-600°C	Eliminación del agua estructural, deshidratación y deshidroxilación.
500°C	Oxidación de la materia orgánica. Pérdida del agua estructural de la caolinita y transformación en metacaolinita.
500°-550°C	Destrucción de la caolinita.
500°-800°C	Situación irreversible para las arcillas.
600°C	Comienzo de la disolución de la calcita (de los granos finos).
700°C	Desaparición del grafito (carbono cristalizado), ya no se ve la decoración
700°C - 800°C	CaO+CO <sub>2</sub> . El CO <sub>2</sub> se volatiliza y la CaO reacciona con el vapor de agua aumentando su volumen.
800°C	Comienzo de la formación de gehlenita consecuencia de la reacción de los filosilicatos con calcita y/o dolomita.
830/900-1000°C	Desaparición del carbono.
850°C	La calcita reacciona y comienza a formar dióxido.
860°C	Cristalización de la wollastonita, dióxido y anortita.
870°C	Disociación CaCO <sub>3</sub> ; Dilatación 2% del cuarzo.
897°C	El cuarzo β se convierte en tridimita.
950°C	Descomposición del carbonato cálcico, desde los 600°C. Formación de la mullita (silicato de aluminio).
1050-1200°C	Fusión de los feldespatos. A 1118°C los sódicos y a 1150°C los potásicos.
1200°-1250°C	El cuarzo, convertido en tridimita, cambia a cristobalita.
1470°C	Estabilización de la cristobalita.

## CAPÍTULO IV

### GEOLOGÍA REGIONAL

#### 4.1. ESTRATIGRAFÍA Y SEDIMENTACIÓN REGIONAL

La zona de estudio se encuentra conformada por sedimentos aluviales cuaternarios que descansan sobre rocas sedimentarias pertenecientes a la Formación Tuy, depositados durante el Plioceno tardío – Pleistoceno (Fig. 4.1).

PICARD & PIMENTEL (1968), establecen que la Formación Tuy representa una sedimentación fluvio-lacustre con tres facies: una facies terrestre, con ambientes de abanicos aluviales piemontinos, cerca de una fuente de levantamiento, formada por conglomerados de peña y cantos que caracteriza al Miembro Pichao. Las facies distales de los abanicos aluviales se interdigitan con una facies lacustre, que abarca el 50% de la formación, la cual se caracteriza por la intercalación de gravas y arcillas en capas gruesas; y una facies fluvial, expuesta en el borde sur de la cuenca con gravas y arcillas guijarrosas, con estratificación cruzada y huellas de erosión y relleno. Indican, los autores, que el ambiente en general, corresponde al de un lago cuyo borde norte se levantaba más rápidamente que el borde sur, con aportes de material grueso de ambas direcciones y acumulación de sedimentos lacustres hacia el centro, caracterizados por arcillas y capas delgadas y laminadas, intercaladas con las acumulaciones de gravas, que provenían principalmente del norte.

BERMÚDEZ (1966) de acuerdo a los fósiles descritos, asignó una edad de Mioceno Superior a la Formación Tuy, mientras que MACSOTAY (1968) y PICARD & PIMENTEL (1968), la ubican en una edad de Mioceno tardío-Plioceno. GONZÁLEZ DE JUANA *et al.* (1980), indican que los sedimentos de la Formación Tuy sugieren un desarrollo coeval, con cambios climáticos drásticos durante el Plioceno tardío-Pleistoceno. BECK (1985) con base en la identificación de ostrácodos de la Formación Squire, infrayacente a la cual asignó una edad

Mioceno tardío - Plioceno, sugirió que la Formación Tuy es de edad Plioceno-Pleistoceno.

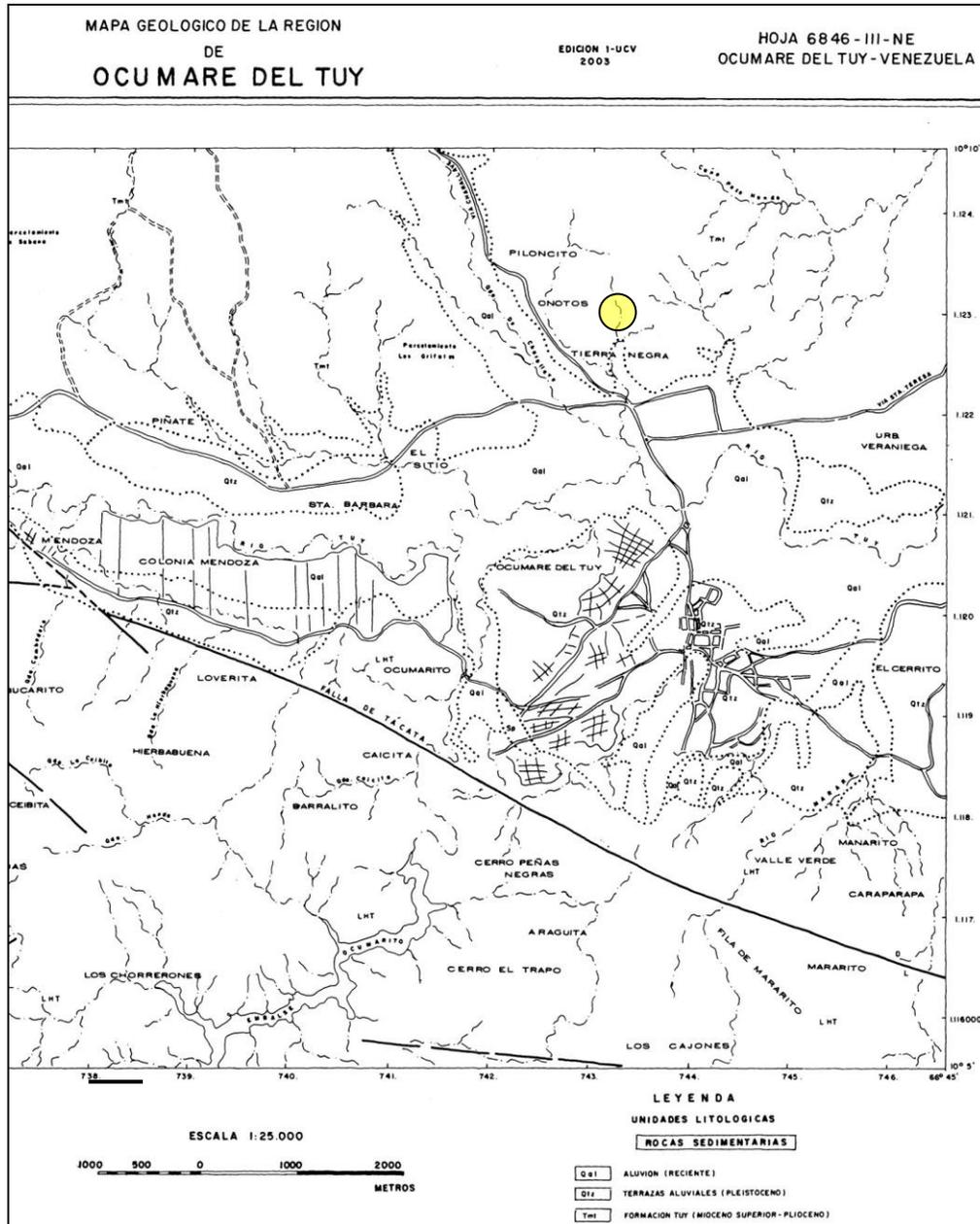


Figura 4.1. Mapa Geológico de la región de Ocumare del Tuy. Hoja 6846-III-NE. Edición 1-UCV-2003.

La Formación Tuy suprayace discordantemente, en forma angular y paralela, a las rocas metamórficas de la región y a la Formación Siquire (PICARD & PIMENTEL, 1968). Beck (1985), considera que parcialmente el contacto con la Formación Siquire es progresivamente transicional, y que la diferencia entre las dos formaciones, se debe a un cambio en los procesos de sedimentación. Este aspecto, en el caso de las discordancias paralelas, puede ser considerado, no así con las discordancias angulares. La Formación Tuy está cubierta discordantemente por terrazas aluvionales levantadas del reciente.

La Formación Tuy cubre aproximadamente el 70% de la cuenca Santa Lucía-Ocumare del Tuy, en una poligonal con vértices en Santa Lucía, Santa Teresa, Ocumare del Tuy, Cua, Charallave y Suapire, y en parte al noreste de Santa Teresa (distritos Páz Castillo, Lander y Urdaneta del estado Miranda). PICARD & PIMENTEL (1968), en base a estudios geofísicos, sugieren un espesor del orden de 400 m.

#### **4.2. ASPECTOS NEOTECTÓNICOS DE LA REGIÓN SEPTENTRIONAL DE VENEZUELA**

La configuración espacial de los rasgos tectónicos activos cuaternarios en el Caribe meridional, sugiere que esta región está sujeta a un régimen tectónico transcurrente compresivo. La aplicación de métodos de inversión a datos microtectónicos, determinados sobre planos de fallas afectando rocas sedimentarias esencialmente de edad plio-cuaternarias confirma este régimen tectónico. Consecuentemente, este régimen es responsable por la cinemática y actividad cuaternaria de seis familias de estructuras tectónicas frágiles a lo largo del norte de Venezuela, desde Colombia en el oeste hasta Trinidad en el este (AUDEMARD, 2006).

El contexto geológico regional de la zona Nor-central del país implica una génesis muy complicada estructuralmente, por ello no es de extrañar la cantidad de fallas en la región, correspondientes a sistemas de fracturas con desplazamientos asociadas a fallas principales, entre las que se encuentran (Fig.

4.2): Valera, La Victoria, Tacagua – El Ávila y Urica (SCHUBERT, 1984; GRASES, 1994; (Barreto, 2010).

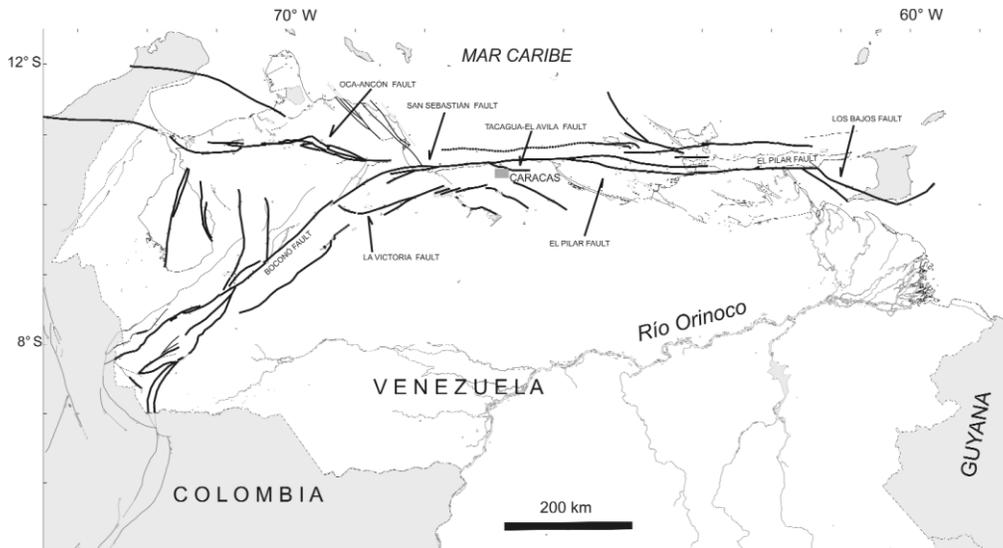


Figura 4.2. Mapa de fallas cuaternarias de Venezuela. (Tomado de AUDEMARD, 2006).

El sistema de fallas de La Victoria corresponde con un accidente activo con componente transcurrente dextral que se extiende según rumbo N60E a N90E, desde Tinaquillo al Oeste hasta unos pocos kilómetros al Este de Cabo Codera, donde se conectaría en el mar con el sistema de San Sebastián-El Pilar (SCHUBERT & Laredo, 1979; AUDEMARD, 1985, 2006).

ORTA (2003), menciona que una de las trazas del sistema de falla de La Victoria, correspondiente a la zona entre el Aeropuerto Caracas y El Placer de Siquire, yuxtapone unidades de rocas metamórficas Mesozoicas y rocas sedimentarias Plio-Pleistocenas correspondientes a la cuenca del Tuy medio. Este sistema ejerce control estructural en la geometría actual y en la generación de dicha cuenca controlando todo el borde norte de la misma (Fig. 4.3).

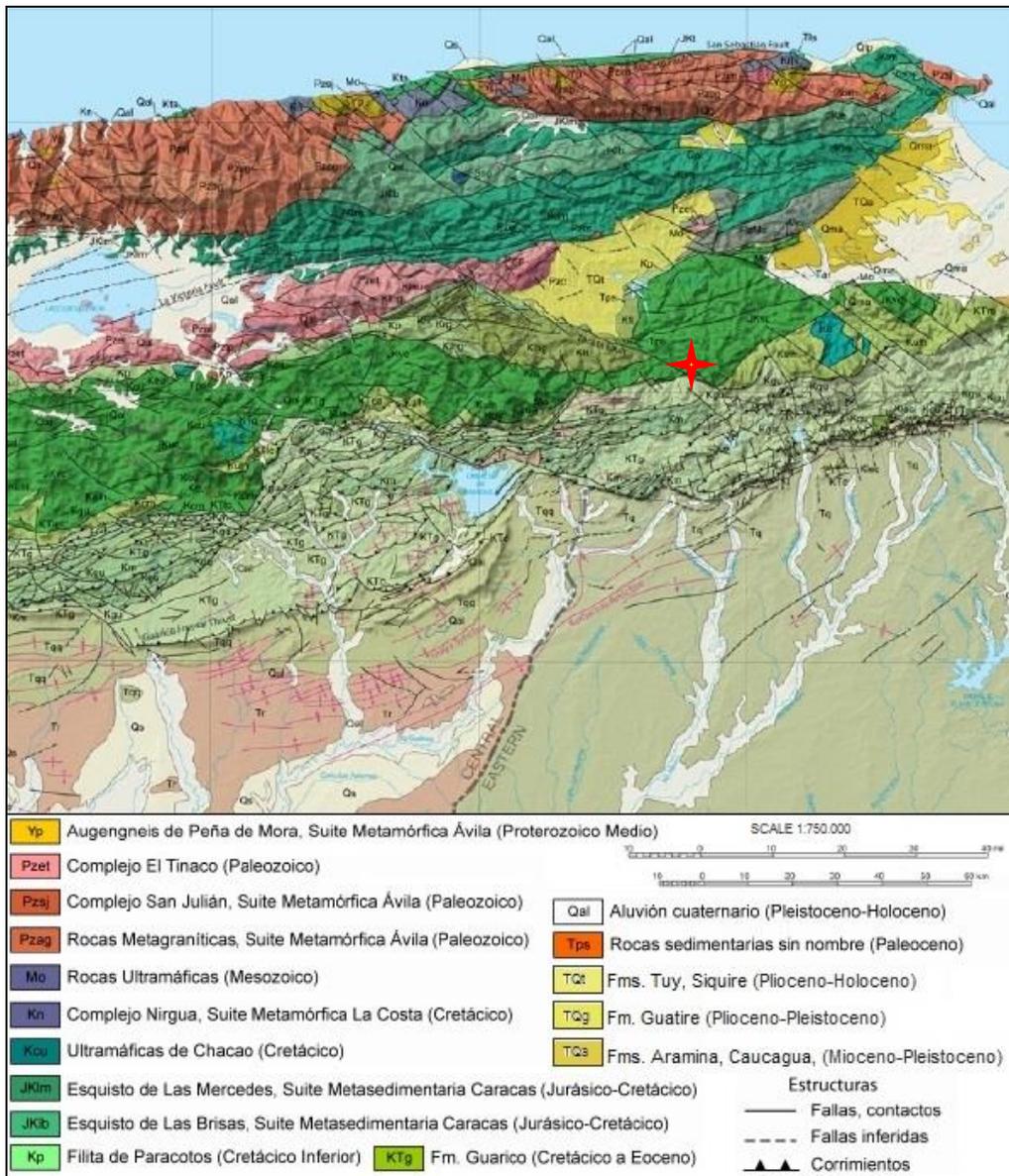


Figura 4.3. Mapa geológico de Venezuela. Tomado y modificado de HACKLE *et al.* (2005).

---

## CAPÍTULO V

### GEOLOGÍA LOCAL

Según PICARD & PIMENTEL (1968) la Formación Tuy aflorante en la zona, se caracteriza por una intercalación constante y monótona de capas gruesas, generalmente de 1 a 3 metros de espesor de gravas heterogéneas y conglomerados líticos mal consolidados, con matriz limo arcillosa abundante y a veces con cemento calcáreo, intercaladas con arcillas, lutitas y cantidades menores de margas y areniscas. El tamaño de los guijarros es variable entre 1 a 50 cm, según la proximidad de la fuente de sedimentos. El escogimiento es de moderado a malo. Los cantos son redondeados y sub-redondeados de rocas metamórficas, algunos granos subangulares de rocas de color verde, más duras y menos esquistosas, y cantos grandes de cuarzo angular. Los cantos provienen de las formaciones Las Mercedes, Chuspita y Las Brisas hacia el norte de Suapire y Santa Lucía; Rocas de Conoropa, Formación Urape, conglomerado de Charallave, Formación Paracotos y Grupo Villa de Cura en el resto de la cuenca.

Localmente se observan arcillas que se presentan en capas menores de 1 m de color crema a rosado y ocasionalmente verdosas, rojo-violeta y abigarradas, frecuentemente calcáreas hasta margosas y contienen escasos fósiles de agua dulce. En general, la estratificación está mal desarrollada, señalada por cambios litológicos y a veces por la alineación de guijarros imbricados; en algunas capas la estratificación está definida por la laminación de los limos y la intercalación de arenas arcillas y limos de poco espesor.

GONZÁLEZ DE JUANA *et al.* (1980), indican un ambiente sedimentario fluvio-lacustre, con un desarrollo sedimentario coeval con los cambios climáticos drásticos que se originaron durante el Plioceno tardío-Pleistoceno.

## 5.1. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUBSUELO EN LA ZONA

La caracterización geotécnica del subsuelo en la zona de estudio se basa en la información obtenida de 6 perforaciones (Figs. 5.1 a 5.3 y Tabla 5.1), realizadas con anterioridad en el marco del “proyecto de agua potable del urbanismo Lomas de La Guadalupe, ubicado en Ocumare del Tuy, Estado Miranda” a cargo de la empresa FIENCA, la cual serviría como base para un estudio geotécnico que tendría como finalidad analizar las condiciones del subsuelo en un área de 9000 m<sup>2</sup> aproximadamente, tomar muestras para ensayos de laboratorio y con ello definir el modelo geotécnico del terreno existente.



Figura 5.1. Imagen satelital que muestra la ubicación de las perforaciones P-1, P-2, P-3, P-4, P-5 y P-6.



Figura 5.2. Zona de estudio y ubicación de las perforaciones.

Mediante las perforaciones realizadas fueron determinados los valores de “N” número de golpes (SPT, por sus siglas en inglés) durante el ensayo a percusión y el porcentaje de recuperación (%R) durante la perforación por rotación (Fig. 5.3).



Figura 5.3. Procedimiento utilizado para la obtención de las muestras.

Tabla 5.1. Ubicación geográfica y cotas de terreno de las perforaciones realizadas en la zona de estudio.

Sondeo	Profundidad (metros)	Coordenadas UTM (REGVEN)		
		N	E	Cota (m)
P-1	15	1.123.000	743.245	244
P-2	15	1.122.958	743.245	242
P-3	15	1.122.989	743.202	248
P-4	15	1.122.959	743.188	246
P-5	15	1.122.960	743.128	249
P-6	15	1.122.928	743.180	244

Las muestras seleccionadas (Fig. 5.4), se analizaron siguiendo las normas ASTM (American Society for Testing and Materials), mediante ensayos de laboratorio, tales como:

- ✓ Clasificación visual (ASTM D-2488)
- ✓ Contenido de humedad natural (ASTM D-2216)
- ✓ Análisis de distribución granulométrica (ASTM D-422)
- ✓ Límites de consistencia (ASTM D-4318)
- ✓ Límites de contracción (ASTM D427-04)
- ✓ Expansión libre y controlada (ASTM D-4546) y (ASTM D-4829)
- ✓ Consolidación (ASTM D 2435-80)
- ✓ Gravedad específica (ASTM D-854)
- ✓ Peso unitario (ASTM D-1188)
- ✓ Compresión sin confinar (ASTM D-2166-91)
- ✓ Corte directo (ASTM D-3080-72)

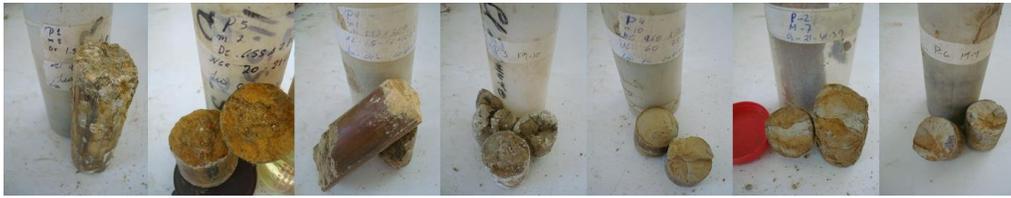


Figura 5.4. Descripción visual de algunas de las muestras obtenidas y selección para ensayos especiales.

Los resultados obtenidos en los trabajos de exploración de campo y ensayos de laboratorio, permitieron determinar espesores y consistencia de los diferentes estratos de suelos, así como la dureza, fracturamiento y grado de meteorización del material en sitio.

### 5.1.1. Perfil Geotécnico Generalizado

El subsuelo se encuentra constituido por depósitos de suelos sedimentarios de origen fluvio-lacustre principalmente. En los primeros metros, se tiene un sedimento compuesto por limo arenoso y arena muy fina limosa, calcárea y algo friable. Presenta un color marrón con tonalidades blanquecinas y un espesor variable entre 2 y 4 metros.

Subyacentemente, se tiene una secuencia sedimentaria in situ que intercala arcillas de alta plasticidad, con limos areno-arcillosos y arenas finas calcáreas con lentes de arenas de grano medio a grueso. Esta secuencia alcanza entre 8 y 12 metros de profundidad.

Hacia la base del subsuelo, se muestra una intercalación de arcillas calcáreas litificadas de color gris verdoso con intervalos blanquecinos y limos arcillosos color marrón grisáceo. Eventualmente, se presentan lentes de arena calcáreas que indican la existencia de paleo-canales fluviales.

Las figuras 5.5 y 5.6 muestran un perfil del subsuelo estudiado en dirección Oeste – Este y Sur – Norte respectivamente.

En general, a partir de los 9 metros de profundidad se muestra valores de resistencia a la penetración (SPT) de 80 golpes, evidenciando una secuencia muy rígida o muy compacta. Así mismo, se pudo observar cierta laminación

aparente, marcada por los cambios granulométricos dentro de la secuencia, lo cual concuerda con la descripción propuesta para la Formación Tuy de edad Plioceno tardío-Pleistoceno.

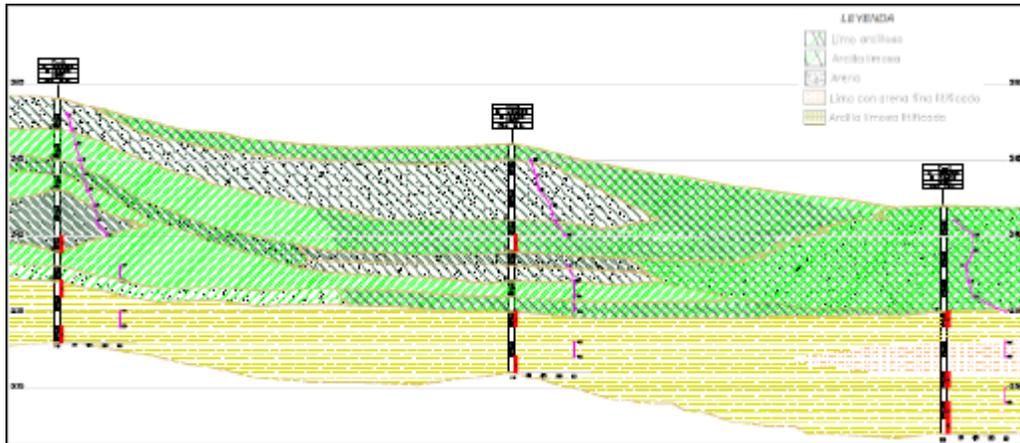


Figura 5.5. Perfil del subsuelo estudiado en dirección Oeste – Este. Para mayor detalle ver anexo I.

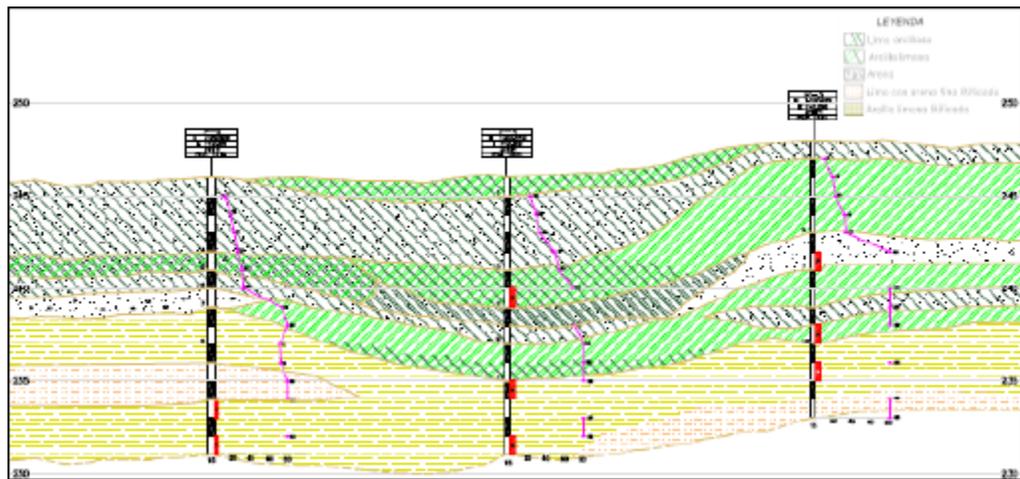


Figura 5.6. Perfil del subsuelo estudiado en dirección Sur – Norte. Para mayor detalle ver anexo I.

### 5.1.2. Características de los sedimentos aluviales

Los sedimentos aluviales se encuentran en las 6 perforaciones realizadas con una profundidad variable entre 7 y 12 metros. El espesor de sedimentos muestra valores promedio de índice de penetración  $N_{spt}$  de  $41,92 \pm 23,82$  golpes/pié con valores máximos y mínimos de 80 y 9 respectivamente, revelando una

consistencia media a compacta. Estos suelos se caracterizan por una granulometría variada, pudiéndose encontrar desde sedimentos tamaño arcilla, hasta fragmentos de grava en niveles localizados.

Los ensayos granulométricos e hidrométricos realizados en este material revelaron los siguientes resultados, representados gráficamente en las figuras 5.7 y 5.8.

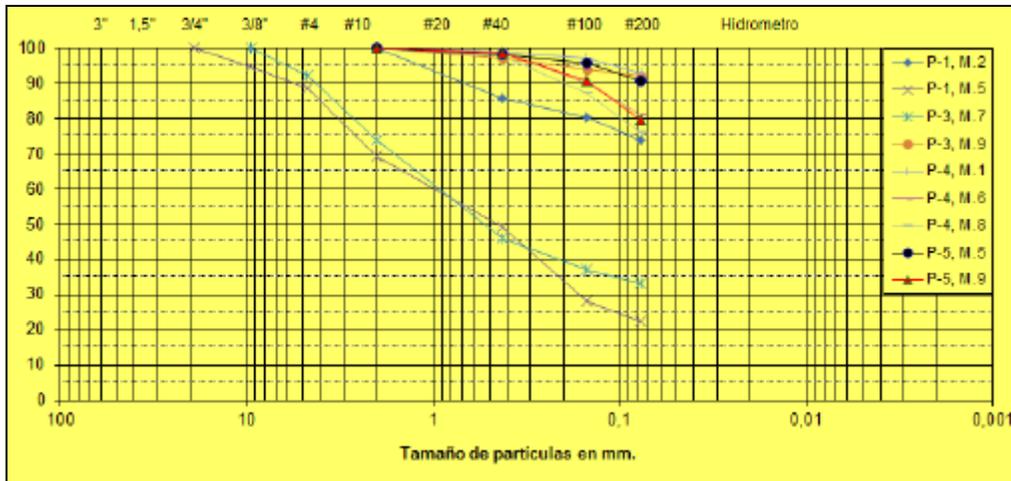


Figura 5.7. Ensayos granulométricos realizados en los sedimentos aluviales.

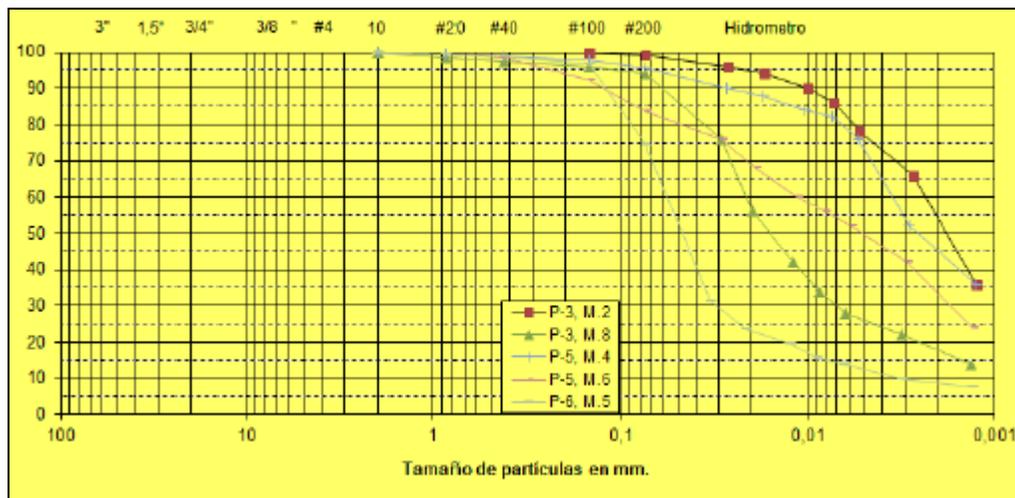


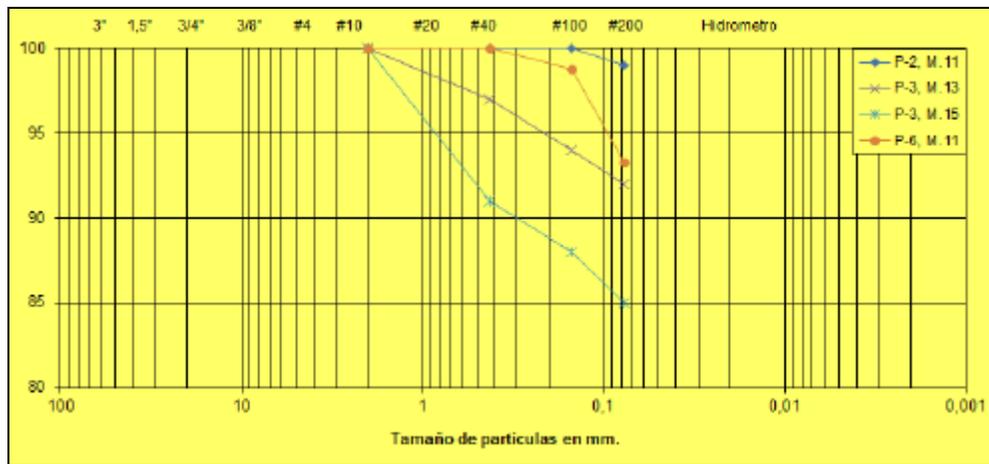
Figura 5.8. Ensayos hidrométricos realizados en los sedimentos aluviales.

### 5.1.3. Características de los depósitos terciarios

Depósitos sedimentarios in situ que están constituidos principalmente por arcillas limosas litificadas. Dentro de esta secuencia, se encuentran niveles

arenosos que indican un mayor nivel de energía en el medio de transporte, pudiendo estos representar depósitos de paleo-canales fluviales.

La granulometría estudiada mostró mayormente granos tamaño arcilla con algunos intervalos limosos y/o arenosos a diferentes niveles. Los resultados obtenidos en estos ensayos se resumen en la figura 5.9. Así mismo, los ensayos hidrométricos para determinar las características de los sedimentos más finos, muestran una combinación de sedimentos tamaño arcilla en algunos casos y sedimentos tamaño limo en los casos restantes. Estos resultados se observan en la figura 5.10.



Por otro lado, los resultados obtenidos mediante el ensayo SPT durante las perforaciones por el método de percusión, muestran un índice de penetración standard promedio de  $78,38 \pm 3,84$ , evidenciando una secuencia muy compacta o muy rígida.

#### 5.1.4. Caracterización del material fino dentro de la secuencia

Mediante la caracterización del material más fino presente en la zona, se puede determinar el potencial expansivo de las arcillas, el índice de nocividad de los coloides y la actividad coloidal, con la finalidad de analizar la susceptibilidad y el comportamiento de las arcillas ante la presencia de agua.

La tabla 5.2 muestra la distribución granulométrica del material más fino, mientras que en la tabla N° 3 se indican los resultados obtenidos en cuanto a parámetros geotécnicos como límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, límite de contracción, actividad, Hinchamiento libre, expansión libre y expansión controlada.

Tabla 5.2. Distribución de partículas con tamaños menores que el tamiz No. 200,  $3\mu\text{m}$  y  $1\mu\text{m}$ .

Muestra	% < tamiz No 200	% < 0.003 mm	% < 0.001 mm
P1/8	93,8	42,8	22,4
P1/10	76,0	29,7	5,9
P2/14	91,8	28,3	2,0
P3/2	99,2	66,0	36,0
P3/8	94,2	22,0	14,0
P3/10	97,2	62,6	30,3
P4/11	83,8	30,3	8,1
P5/4	95,4	52,0	36,0
P5/6	83,6	42,0	24,0
P6/5	74,4	9,8	7,8

Una evaluación global de los resultados de ensayos orientados a estimar el potencial expansivo (Tabla 5.3), según correlaciones publicadas en la literatura

por SKEMPTON (1953), HOLTZ & GIBBS (1956), SEED *et al.* (1962), SNETHEN (1977), permiten concluir que los porcentajes menores de 3 micrones y de coloides (menores de 0.002 mm), así como otras propiedades tales como la actividad coloidal, el límite líquido y el índice de plasticidad, conducen a clasificar los suelos arcillosos como de potencial expansivo alto (SCREMIN, 2014). Adicionalmente, con el fin de determinar la nocividad de los coloides presentes en el suelo arcilloso, mediante la realización de una prueba conocida como “ensayo de la mancha” en papel filtro Wathmann # 40, empleando solución de “azul de metileno” al 1 %, y obteniendo valores de consumo de azul de metileno de más de 7 gramos por 100 gramos de suelo seco, y un índice de nocividad (IN) mayor de 10, se puede determinar que el material estudiado contiene coloides muy activos y se considera que el suelo es potencialmente expansivo.

Tabla 5.3. Parámetros geotécnicos obtenidos a través de los ensayos de límites de consistencia y límites de contracción, así como en los ensayos de expansión libre y expansión controlada.

Muestra	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad	Límite de contracción	Actividad Ac	% Exp libre	% Exp Controlada
P1/8	60	28	32	17,2	1,43	-	-
P1/10	43	22	21	21,5	1,18	7,8	-
P2/2	-	-	-	15,9	-	-	3,0
P3/2	77	33	44	11,7	1,22	-	-
P3/8	42	25	17	19,3	1,21	-	0,5
P3/10	71	31	40	28,6	1,32	-	-
P4/11	47	25	22	20,7	1,15	-	2,5
P5/4	76	31	45	11,8	1,25	-	-
P5/6	51	24	27	18,2	1,13	7,3	-
P6/5	29	21	8	30,1	1,02	-	-

### 5.1.5. Modelo geotécnico del subsuelo

En base en estos resultados y con el resto de la información proveniente de las calicatas y perforaciones, se estableció un modelo geotécnico que permitió

identificar las características geomecánicas de los diferentes materiales presentes en el subsuelo.

La tabla N° 4 muestra el modelo geotécnico generalizado para el material presente en el subsuelo estudiado, tomando en cuenta los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio realizados con el material extraído de las perforaciones geotécnicas, ejecutadas bajo el proyecto a cargo de la empresa “FIENCA”.

Tabla 5.4. Modelo geotécnico propuesto para la zona de estudio.

<b>MODELO GEOTECNICO PROPUESTO</b>									
Prof. (m)	Litología	NSPT	% W	IP	$q_u$ kg/cm <sub>3</sub>	$\gamma_h$ ton/m <sub>3</sub>	Límite de cont. (SL)	$\phi'$ grados	C kg/cm <sub>2</sub>
0-9	Sedimentos aluviales: Arenas muy finas limosas, calcáreas y algo friables intercaladas con arcillas de alta plasticidad y limos areno-arcillosos, así como arenas finas calcáreas con lentes de arenas de grano medio a grueso	41,92 ± 23,82	12,88 ± 6,48	29,88	6,6	2,12 ± 0,12	15,40	26,5	1,71
9-15	Depósitos terciarios: Intercalación de arcillas calcáreas litificadas de color gris verdoso con intervalos blanquecinos y limos arcillosos color marrón grisáceo con ocasionales lentes de arena calcáreas	78,38 ± 3,84	15,33 ± 3,30	26,5	15,2	2,11 ± 0,16	19,80	24,0	3,75

## CAPÍTULO VI

### RESULTADOS EXPERIMENTALES

Una vez evaluado el subsuelo existente y determinada la presencia de arcillas con alto potencial expansivo, se tomaron muestras del sedimento arcilloso mediante una calicata de 2,5 metros de profundidad (Fig. 6.1) con la finalidad de analizar con mayor detalle la naturaleza física y composición química de dicho material.



Figura 6.1. Imágenes que muestran la calicata utilizada para la recolección del material estudiado.

#### 6.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA TOMA DE MUESTRAS

Las muestras fueron tomadas sobre una loma ubicada dentro del Urbanismo Lomas de La Guadalupe en Ocumare del Tuy, hacia el norte de las estructuras

construidas dentro de dicho urbanismo. La calicata realizada (Fig. 6.2) para la toma de muestras corresponde a las siguientes coordenadas geográficas:

✓ C-1: latitud 1122977 y longitud 19743188

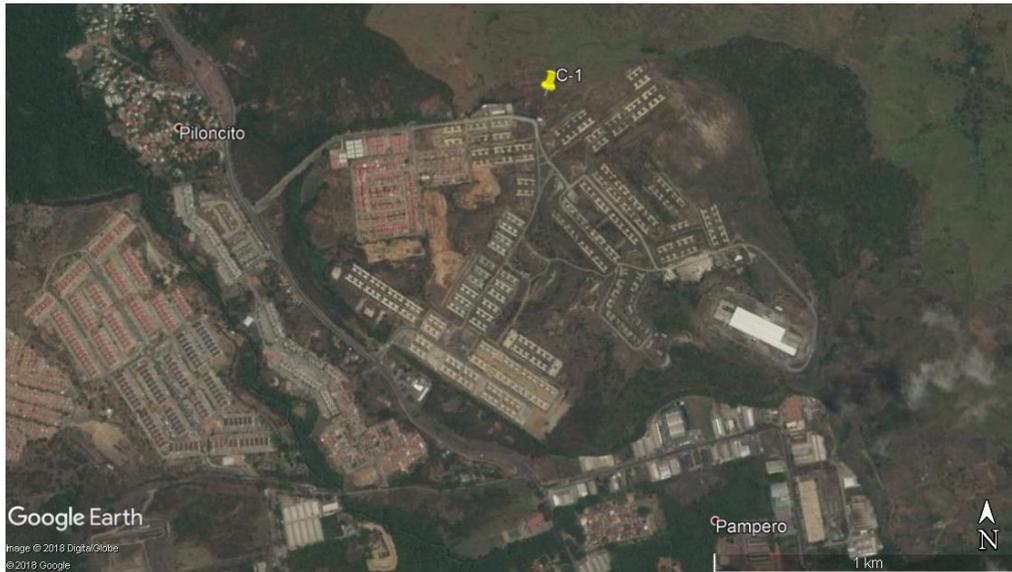


Figura 6.2. Localización de la calicata realizada.

## 6.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL SEDIMENTO RECOLECTADO

Con la finalidad de caracterizar las propiedades físicas del material en sitio, se realizaron ensayos de laboratorio a 4 muestras extraídas cada 0,5 metros, sin tomar en cuenta los primeros 50 cm de suelo. Esta etapa se llevó a cabo en el laboratorio de suelos del IMME, dentro de la Facultad de ingeniería de la Universidad Central de Venezuela.

De esta forma, la caracterización del material obtenido se inició con la clasificación visual de las muestras, la cual permitió identificar el tipo de material (roca, suelo, material residual), color, olor, contenido carbonático (con ayuda de HCl) y presencia de material orgánico (con ayuda de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Los resultados se muestran en la tabla 6.1.

Tabla 6.1. Descripción visual y ensayos de campo realizados al material extraído.

Muestra / Profundidad (m)	Descripción visual	Reacción al HCl	Reacción al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
M-A / (0,5-1,0)	Arcilla de alta plasticidad y consistencia media, color marrón ocre, olor natural y presencia de raíces en posición	Positiva	Positiva
M-B / (1,0-1,5)	Arcilla de alta plasticidad y consistencia media, color marrón ocre, olor natural y presencia de raíces en posición	Positiva	Positiva
M-C / (1,5-2,0)	Arcilla de alta plasticidad y consistencia dura, color marrón claro con tonalidades gris verdoso y olor natural	Positiva	Positiva
M-D / (2,0-2,5)	Arcilla de alta plasticidad y consistencia dura, color marrón claro con tonalidades gris verdoso y olor natural	Positiva	Positiva

Posteriormente, se calculó el porcentaje de agua contenida en las muestras mediante el ensayo de porcentaje de humedad natural, permitiendo conocer la capacidad de absorción general del suelo, así como la cantidad de agua que el mismo retiene. Los resultados obtenidos del ensayo se muestran en la tabla 6.2.

Tabla 6.2. Porcentaje de humedad natural en las muestras obtenidas in situ.

Muestra	% de humedad natural ( $\omega$ )
M-A	24,9
M-B	22,7
M-C	18,7
M-D	10,9

Siguiendo con los ensayos de caracterización física se deben conocer, tanto el peso unitario ( $\gamma$ ) del material, así como la gravedad específica (Gs) del sedimento (Tabla 6.3), ya que dichos valores resultan necesarios para el cálculo de otras propiedades del suelo que deben ser analizadas (% de coloides, % de expansión, índice de nocividad y superficie específica), según sea el caso.

Adicionalmente, el peso unitario permite obtener el peso por unidad de volumen de una determinada muestra, incluyendo los vacíos que este puede presentar. De esta forma, existe una relación directamente proporcional entre la

densidad del suelo y su grado de compactación, donde, para un mismo material, los rangos menores señalan que el suelo está sujeto a un estado menos compactado que los valores más altos.

Tabla 6.3. Peso específico o gravedad específica y peso unitario o densidad de las muestras extraídas.

Muestra	Peso Específico (Gs)	Pesos unitarios (g/cm <sup>3</sup> )	
		( $\gamma_w$ )	( $\gamma_s$ )
M-A	2,56	1,78	1,42
M-B	2,63	2,14	1,74
M-C	2,58	1,97	1,66
M-D	2,59	2,18	1,96
M-0	2,72	1,51	1,40
M-0/2	2,69	1,41	1,33
M-1	2,69	2,05	1,79
M-2	2,70	2,06	1,86

En cuanto al análisis granulométrico realizado (Fig. 6.3), el mismo permitió separar, clasificar y determinar el porcentaje en peso de las partículas que componen las muestras seleccionadas.

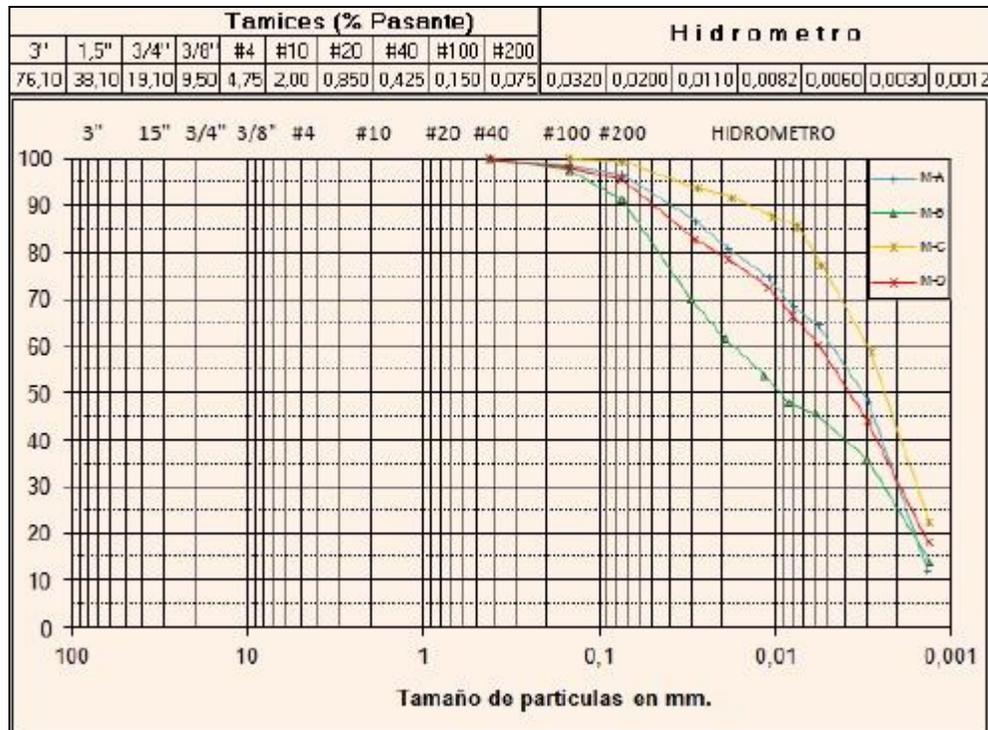


Figura 6.3. Distribución granulométrica de las muestras extraídas in situ.

### 6.3. TRATAMIENTO DE LAS MUESTRAS

Una vez realizada la caracterización física del material *in situ* y demostrada la presencia de arcillas potencialmente expansivas, se utilizó el material extraído de las calcatas para ser tratado y colocado a diferentes condiciones químicas, de temperatura y pH para evaluar su comportamiento luego del proceso ejecutado.

Tomando en consideración la gran cantidad de muestras que se generarían al exponer el material estudiado a las diferentes condiciones físico-químicas, se decidió trabajar con dos horizontes del subsuelo. De esta forma, los sedimentos pertenecientes a las muestras A y B pasarían a formar un solo material compuesto por arcillas de alta plasticidad y consistencia media, color marrón ocre y presencia de raíces en posición, con una profundidad *in situ* que varía entre los 0,5 y 1,5 metros. Así mismo, los sedimentos correspondientes a las muestras C y D, formarían el segundo material compuesto por arcillas de alta plasticidad y consistencia dura, color marrón claro con tonalidades gris verdoso.

Posteriormente, se tomó el material resultante y se realizó el tratamiento con NaCl, NaHCO<sub>3</sub> y NaOH según la metodología mencionada en dicho capítulo, con la finalidad de estudiar los posibles cambios ocurridos en la fracción fina, analizada bajo los diferentes escenarios antes mencionados (Tabla 6.4).

Tabla 6.4. Descripción de muestras obtenidas al someter el sedimento a diferentes condiciones físico-químicas.

# M	CARACTERISTICA DEL MATERIAL	pH	# M	CARACTERISTICA DEL MATERIAL	pH
M-0	Bentonita	-	M-37	Muestra tratada con 100g NaCl /100g de arcilla, durante 168 horas a temperatura (60°)	7,70
M0/2	Bentonita	-	M-38	Muestra tratada con 200g NaCl /100g de arcilla, durante 168 horas a temperatura (60°)	7,70
M-1	Arcilla original	-	M-39	Muestra tratada con 50g NaCl /100g de arcilla, durante 24 horas a temperatura (90°)	7,61
M-2	Arcilla original	-	M-40	Muestra tratada con 100g NaCl /100g de arcilla, durante 24 horas a temperatura (90°)	7,61
M-3	Muestra tratada con 50g NaCl /100g de arcilla, durante 24 horas a temperatura (30°)	7,61	M-41	Muestra tratada con 200g NaCl /100g de arcilla, durante 24 horas a temperatura (90°)	7,65
M-4	Muestra tratada con 100g NaCl /100g de arcilla, durante 24 horas a temperatura (30°)	7,61	M-42	Muestra tratada con 50g NaCl /100g de arcilla, durante 24 horas a temperatura (90°)	7,65
M-5	Muestra tratada con 200g NaCl /100g de arcilla, durante 24 horas a temperatura (30°)	7,65	M-43	Muestra tratada con 100g NaCl /100g de arcilla, durante 24 horas a temperatura (90°)	7,70
M-6	Muestra tratada con 50g NaCl /100g de arcilla, durante 24 horas a temperatura (30°)	7,65	M-44	Muestra tratada con 200g NaCl /100g de arcilla, durante 24 horas a temperatura (90°)	7,70

# M	CARACTERISTICA DEL MATERIAL	pH	# M	CARACTERISTICA DEL MATERIAL	pH
M-7	Muestra tratada con 100g NaCl/100g de arcilla, durante 24 horas a temperatura (30°)	7,70	M-45	Muestra tratada con 50g NaCl/100g de arcilla, durante 72 horas a temperatura (90°)	7,61
M-8	Muestra tratada con 200g NaCl/100g de arcilla, durante 24 horas a temperatura (30°)	7,70	M-46	Muestra tratada con 100g NaCl/100g de arcilla, durante 72 horas a temperatura (90°)	7,61
M-9	Muestra tratada con 50g NaCl/100g de arcilla, durante 72 horas a temperatura (30°)	7,61	M-47	Muestra tratada con 200g NaCl/100g de arcilla, durante 72 horas a temperatura (90°)	7,65
M-10	Muestra tratada con 100g NaCl/100g de arcilla, durante 72 horas a temperatura (30°)	7,61	M-48	Muestra tratada con 50g NaCl/100g de arcilla, durante 72 horas a temperatura (90°)	7,65
M-11	Muestra tratada con 200g NaCl/100g de arcilla, durante 72 horas a temperatura (30°)	7,65	M-49	Muestra tratada con 100g NaCl/100g de arcilla, durante 72 horas a temperatura (90°)	7,70
M-12	Muestra tratada con 50g NaCl/100g de arcilla, durante 72 horas a temperatura (30°)	7,65	M-50	Muestra tratada con 200g NaCl/100g de arcilla, durante 72 horas a temperatura (90°)	7,70
M-13	Muestra tratada con 100g NaCl/100g de arcilla, durante 72 horas a temperatura (30°)	7,70	M-51	Muestra tratada con 50g NaCl/100g de arcilla, durante 168 horas a temperatura (90°)	7,61
M-14	Muestra tratada con 200g NaCl/100g de arcilla, durante 72 horas a temperatura (30°)	7,70	M-52	Muestra tratada con 100g NaCl/100g de arcilla, durante 168 horas a temperatura (90°)	7,61
M-15	Muestra tratada con 50g NaCl/100g de arcilla, durante 168 horas a temperatura (30°)	7,61	M-53	Muestra tratada con 200g NaCl/100g de arcilla, durante 168 horas a temperatura (90°)	7,65
M-16	Muestra tratada con 100g NaCl/100g de arcilla, durante 168 horas a temperatura (30°)	7,61	M-54	Muestra tratada con 50g NaCl/100g de arcilla, durante 168 horas a temperatura (90°)	7,65
M-17	Muestra tratada con 200g NaCl/100g de arcilla, durante 168 horas a temperatura (30°)	7,65	M-55	Muestra tratada con 100g NaCl/100g de arcilla, durante 168 horas a temperatura (90°)	7,70
M-18	Muestra tratada con 50g NaCl/100g de arcilla, durante 168 horas a temperatura (30°)	7,65	M-56	Muestra tratada con 200g NaCl/100g de arcilla, durante 168 horas a temperatura (90°)	7,70
M-19	Muestra tratada con 100g NaCl/100g de arcilla, durante 168 horas a temperatura (30°)	7,70	M-62	Muestra tratada con 38g NaCl - 6,3g NaHCO <sub>3</sub> - 0,5g NaOH /100g de arcilla, durante 48 horas	8,69
M-20	Muestra tratada con 200g NaCl/100g de arcilla, durante 168 horas a temperatura (30°)	7,70	M-63	Muestra tratada con 38g NaCl - 6,3g NaHCO <sub>3</sub> - 0,5g NaOH /100g de arcilla, durante 48 horas	8,69
M-21	Muestra tratada con 50g NaCl/100g de arcilla, durante 24 horas a temperatura (60°)	7,61	M-64	Muestra tratada con 38g NaCl - 0,5g NaOH /100g de arcilla, durante 48 horas	10,63
M-22	Muestra tratada con 100g NaCl/100g de arcilla, durante 24 horas a temperatura (60°)	7,61	M-65	Muestra tratada con 38g NaCl - 0,5g NaOH /100g de arcilla, durante 48 horas	10,63
M-23	Muestra tratada con 200g NaCl/100g de arcilla, durante 24 horas a temperatura (60°)	7,65	M-66	Muestra tratada con 38g NaCl - 6,3g NaHCO <sub>3</sub> /100g de arcilla, durante 48 horas	8,02
M-24	Muestra tratada con 50g NaCl/100g de arcilla, durante 24 horas a temperatura (60°)	7,65	M-67	Muestra tratada con 38g NaCl - 6,3g NaHCO <sub>3</sub> /100g de arcilla, durante 48 horas	8,02
M-25	Muestra tratada con 100g NaCl/100g de arcilla, durante 24 horas a temperatura (60°)	7,70	M-68	Muestra tratada con 50g NaCl (previamente) - 6,3g NaHCO <sub>3</sub> - 1,0g NaOH /100g de arcilla, durante 48 horas	9,70
M-26	Muestra tratada con 200g NaCl/100g de arcilla, durante 24 horas a temperatura (60°)	7,70	M-69	Muestra tratada con 50g NaCl (previamente) - 6,3g NaHCO <sub>3</sub> - 1,0g NaOH /100g de arcilla, durante 48 horas	9,70
M-27	Muestra tratada con 50g NaCl/100g de arcilla, durante 72 horas a temperatura (60°)	7,61	M-70	Muestra tratada con 50g NaCl (previamente) - 6,3g NaHCO <sub>3</sub> /100g de arcilla durante 48 horas	7,80
M-28	Muestra tratada con 100g NaCl/100g de arcilla, durante 72 horas a temperatura (60°)	7,61	M-71	Muestra tratada con 50g NaCl (previamente) - 6,3g NaHCO <sub>3</sub> /100g de arcilla durante 48 horas	7,80
M-29	Muestra tratada con 200g NaCl/100g de arcilla, durante 72 horas a temperatura (60°)	7,65	M-72	Muestra tratada con 50g NaCl (previamente) - 1,0g NaOH /100g de arcilla, durante 48 horas	10,93
M-30	Muestra tratada con 50g NaCl/100g de arcilla, durante 72 horas a temperatura (60°)	7,65	M-73	Muestra tratada con 50g NaCl (previamente) - 1,0g NaOH /100g de arcilla, durante 48 horas	10,93
M-31	Muestra tratada con 100g NaCl/100g de arcilla, durante 72 horas a temperatura (60°)	7,70	M-74	Muestra tratada con 6,3g NaHCO <sub>3</sub> - 1,0g NaOH /100g de arcilla, durante 48 horas	9,96
M-32	Muestra tratada con 200g NaCl/100g de arcilla, durante 72 horas a temperatura (60°)	7,70	M-75	Muestra tratada con 6,3g NaHCO <sub>3</sub> - 1,0g NaOH /100g de arcilla, durante 48 horas	9,96
M-33	Muestra tratada con 50g NaCl/100g de arcilla, durante 168 horas a temperatura (60°)	7,61	M-76	Muestra tratada con 6,3g NaHCO <sub>3</sub> / 100g de arcilla, durante 48 horas	8,22
M-34	Muestra tratada con 100g NaCl/100g de arcilla, durante 168 horas a temperatura (60°)	7,61	M-77	Muestra tratada con 6,3g NaHCO <sub>3</sub> / 100g de arcilla, durante 48 horas	8,22
M-35	Muestra tratada con 200g NaCl/100g de arcilla, durante 168 horas a temperatura (60°)	7,65	M-78	Muestra tratada con 0,75g NaOH /100g de arcilla, durante 48 horas	11,83
M-36	Muestra tratada con 50g NaCl/100g de arcilla, durante 168 horas a temperatura (60°)	7,65	M-79	Muestra tratada con 0,75g NaOH /100g de arcilla, durante 48 horas	11,83

Finalmente, las muestras resultantes fueron evaluadas, física y químicamente, mediante ensayos de límites de consistencia, azul de metileno, ensayos de expansión, ensayos de rayos X, espectrometría de absorción atómica, termogravimetría diferencial y microscopía electrónica de barrido.

#### **6.4. ANÁLISIS FÍSICO DE LAS MUESTRAS TRATADAS**

Asumiendo la disponibilidad de equipos y de materiales para realizar las pruebas de caracterización física, todas las muestras tratadas fueron analizadas mediante ensayos de límites de consistencia y azul de metileno. Posteriormente, y tomando en consideración la disponibilidad de edómetros (equipo utilizado para el ensayo de expansión libre) y el tiempo (t) necesario ( $t > 5$  días) para la ejecución de cada ensayo, se realizó una selección de las muestras para evaluar la expansión potencial del material tratado.

##### **6.4.1. Límites de consistencia**

Como se mencionó anteriormente, los límites de consistencia permiten reconocer el contenido de agua que los sedimentos finos admiten antes de cambiar de estado de consistencia (de estado plástico a líquido para el caso del límite líquido y de estado semisólido a plástico en el caso del límite plástico). Así mismo, los valores de Límite Líquido (LL) y el índice de Plasticidad (IP) son útiles indicadores de las características expansivas de la mayoría de las arcillas y pueden ser usados como marcadores de hinchamiento en suelos cohesivos.

A partir de estos ensayos se pueden obtener datos de suma importancia a la hora de analizar el comportamiento del material estudiado, tomando en consideración que el objetivo principal del presente trabajo de investigación es la evaluación y caracterización del comportamiento de las arcillas muestreadas, con la finalidad de identificar la posible presencia de montmorillonitas que puedan ser tratadas y utilizadas como sustitutas de la bentonita comercial.

Las tablas 6.5 y 6.6, permiten observar los resultados obtenidos tanto en las muestras ensayadas en condición natural, como en el material tratado.

Tabla 6.5. Valores de límites de Atterberg de las muestras extraídas in situ.

MUESTRA	LL (%)	LP (%)	IP (%)
M-A	72	38	34
M-B	80	37	43
M-C	96	43	53
M-D	68	39	29

Tabla 6.6. Valores de límites de Atterberg de las muestras tratadas y de bentonitas comerciales.

MUESTRA	LL (%)	LP (%)	IP (%)	MUESTRA	LL (%)	LP (%)	IP (%)
M-0	608	51	557	M-37	166	34	132
M-0/2	504	50	454	M-38	168	33	135
M-1	81	31	50	M-39	176	39	137
M-2	76	29	47	M-40	171	37	134
M-3	154	26	127	M-41	192	45	147
M-4	166	32	134	M-42	161	31	130
M-5	200	49	151	M-43	165	32	133
M-6	166	33	132	M-44	189	45	144
M-7	170	34	136	M-45	143	21	121
M-8	182	40	142	M-46	162	30	131
M-9	147	24	123	M-47	160	30	130
M-10	153	27	126	M-48	133	17	116
M-11	161	31	130	M-49	154	27	127
M-12	179	39	139	M-50	165	33	132
M-13	169	34	135	M-51	156	29	127
M-14	161	30	131	M-52	157	29	129
M-15	142	20	122	M-53	180	40	139
M-16	153	25	127	M-54	158	30	128
M-17	166	34	132	M-55	169	35	134
M-18	151	25	127	M-56	187	44	143
M-19	142	21	120	M-62	131	26	106
M-20	163	32	131	M-63	147	32	115
M-21	176	38	138	M-64	148	33	115
M-22	177	38	139	M-65	146	30	116
M-23	180	41	139	M-66	136	25	111
M-24	168	34	134	M-67	140	25	115
M-25	187	43	144	M-68	154	24	130
M-26	217	58	159	M-69	153	23	131
M-27	164	31	133	M-70	194	37	157
M-28	173	36	137	M-71	203	38	165
M-29	182	42	140	M-72	179	47	132
M-30	143	22	120	M-73	195	50	145
M-31	162	31	131	M-74	179	31	147
M-32	166	32	134	M-75	204	45	159
M-33	144	21	123	M-76	185	38	147
M-34	164	32	132	M-77	247	38	209
M-35	168	35	133	M-78	202	42	160
M-36	154	27	128	M-79	237	43	194

### 6.4.2. Ensayo de azul de metileno

El Azul de Metileno o ensayo de la mancha fue utilizado antiguamente por ceramistas y fabricantes de porcelana de Asia y Europa para determinar la calidad de las arcillas que debían ser empleadas en la fabricación de la porcelana. También es utilizado para determinar la calidad del lodo bentonítico, empleado para sostener las paredes de los taladros exploratorios, permitiendo diferenciar la montmorillonita (Bentonita) sódica de la cálcica, pues si no se utiliza Montmorillonita sódica, se corre el riesgo de que las paredes colapsen.

Así mismo, es uno de los procedimientos de laboratorio más confiables para la clasificación de las arcillas, pues se trata de un proceso de titulación química, de tipo cuantitativo en el que la mano del operador no tiene tanta significancia, como en el caso de los Límites de Atterberg.

Este ensayo se realizó en todas las muestras obtenidas in situ y tratadas bajo diferentes condiciones físico-químicas, tomando en cuenta que a través del mismo se pueden obtener datos útiles para calcular las propiedades coligativas del material estudiado y de esta forma poder identificar, cuantitativamente, el tipo mineral de arcilla que constituye la fracción coloidal.

A continuación, las tablas 6.7 y 6.8 muestra los datos necesarios para la realización del ensayo de la mancha y el volumen de azul de metileno consumido por cada 100gr de muestra.

Tabla 6.7. Resultados obtenidos del ensayo con azul de metileno en las muestras extraídas in situ.

MUESTRA	SUELO SECO $W_s$ (g)	% COLOIDES <0.002mm	VOLUMEN AZUL V (c.c)	VALOR AZUL VA (g/100g)
M-A	9,80	24	39	3,98
M-B	9,93	30	44	4,43
M-C	10,50	41	87	8,29
M-D	10,45	31	61	5,84

Tabla 6.8. Resultados obtenidos del ensayo de la mancha en las muestras tratadas y bentonitas comerciales.

# M	SUELO SECO Ws (g)	% COLOIDES <0.002mm	VOLUMEN AZUL V (c.c)	VALOR AZUL VA (g/100g)	# M	SUELO SECO Ws (g)	% COLOIDES <0.002mm	VOLUMEN AZUL V (c.c)	VALOR AZUL VA (gr/100g)
M-0	10,00	53	240	24,00	M-37	10,00	44	120	12,00
M-0/2	10,00	81	330	33,00	M-38	10,20	44	125	12,25
M-1	10,00	42	70	7,00	M-39	10,10	42	135	13,37
M-2	10,00	44	75	7,89	M-40	10,00	42	155	15,50
M-3	9,91	42	160	16,15	M-41	10,20	42	130	12,75
M-4	9,80	42	125	12,76	M-42	10,05	44	135	13,43
M-5	9,83	42	120	12,21	M-43	9,60	44	125	13,02
M-6	9,76	44	120	12,30	M-44	10,20	44	125	12,25
M-7	9,68	44	120	12,40	M-45	10,10	42	125	12,38
M-8	9,57	44	142	14,84	M-46	10,25	42	125	12,20
M-9	9,58	42	121	12,63	M-47	9,75	42	126	12,92
M-10	10,40	42	130	12,50	M-48	10,14	44	135	13,31
M-11	9,52	42	120	12,61	M-49	10,15	44	130	12,81
M-12	9,51	44	124	13,04	M-50	9,65	44	125	12,95
M-13	10,15	44	130	12,81	M-51	9,50	42	120	12,63
M-14	9,54	44	115	12,05	M-52	9,50	42	120	12,63
M-15	10,21	42	115	11,26	M-53	9,50	42	123	12,95
M-16	10,04	42	130	12,95	M-54	9,50	44	116	12,21
M-17	10,05	42	140	13,93	M-55	9,55	44	117	12,25
M-18	9,56	44	117	12,24	M-56	9,60	44	125	13,02
M-19	10,10	44	119	11,78	M-62	10,00	42	115	11,50
M-20	9,60	44	119	12,40	M-63	10,00	44	120	12,00
M-21	9,75	42	130	13,33	M-64	10,00	42	135	13,50
M-22	10,15	42	139	13,69	M-65	10,00	44	130	13,00
M-23	10,10	42	138	13,66	M-66	10,00	42	115	11,50
M-24	9,55	44	125	13,09	M-67	10,00	44	110	11,00
M-25	9,55	44	120	12,57	M-68	10,00	42	135	13,50
M-26	9,85	44	120	12,18	M-69	10,00	44	130	13,00
M-27	9,90	42	110	11,11	M-70	10,00	42	125	12,50
M-28	9,70	42	125	12,89	M-71	10,00	44	125	12,50
M-29	9,68	42	153	15,81	M-72	10,00	42	155	15,50
M-30	9,52	44	140	14,71	M-73	10,00	44	155	15,50
M-31	9,60	44	135	14,06	M-74	10,00	42	152	15,20
M-32	9,59	44	130	13,56	M-75	10,00	44	155	15,50
M-33	9,70	42	130	13,40	M-76	10,00	42	115	11,50
M-34	9,75	42	125	12,82	M-77	10,00	44	120	12,00
M-35	9,55	42	115	12,04	M-78	10,00	42	145	14,50
M-36	10,10	44	115	11,39	M-79	10,00	44	140	14,00

### 6.4.3. Ensayo de expansión libre

Las arcillas están compuestas por hojas planas dispuestas en capas triples de moléculas que se mantiene unidas por sí misma, aunque existen cationes enlazados débilmente entre dichas capas. La fuerza de enlace entre las capas de sílice es tan débil que las moléculas de agua penetran entre estos planos, disgregándolos. Este proceso es el responsable de la hidratación y expansión de dichas arcillas.

En el caso del  $\text{Na}^+$ , el cual es un catión monovalente y de enlace muy débil, las superficies adyacentes permiten la entrada de mayor cantidad de agua que en los enlaces fuertes divalentes del  $\text{Ca}^{+2}$ . Esto significa que, para una arcilla de concentración dada en agua fresca, una montmorillonita sódica aportará mayor viscosidad que la montmorillonita cálcica.

Tomando en consideración que el ensayo de expansión libre permite evaluar el cambio de volumen de las muestras al ser saturadas con agua, resulta interesante conocer el % de hinchamiento de las muestras obtenidas y compararlas con el porcentaje de hinchamiento de la bentonita comercial (Tabla 6.9).

Tabla 6.9. Expansión potencial de las muestras ensayadas.

MUESTRA	% EXPANSION	MUESTRA	% EXPANSION
M-A	15,3	M-29	56,6
M-B	16,4	M-37	51,1
M-C	26,6	M-46	53,9
M-D	22,1	M-56	65,7
M-0	212,1	M-64	62,0
M-0/2	187,7	M-69	68,2
M-1	35,9	M-73	106,6
M-2	38,5	M-75	101,2
M-3	65,1	M-76	85,8
M-17	58,2	M-79	115,1

## 6.5. ANÁLISIS QUÍMICO DE LAS MUESTRAS TRATADAS

Teniendo en cuenta la disponibilidad de equipos y reactivos necesarios para la realización de los ensayos de caracterización química de las arcillas obtenidas, se realizó una selección del material tratado para la ejecución de los

análisis antes descritos. De esta forma, se utilizaron las mismas muestras seleccionadas para la ejecución del ensayo de expansión potencial.

### 6.5.1. Análisis elemental

Para evaluar la composición química elemental de las muestras se realizaron ensayos de fluorescencia de rayos X y así poder obtener el % en óxidos de elementos mayoritarios; sin embargo, tomando en consideración que uno de los objetivos principales del presente trabajo de investigación es el de evaluar el posible intercambio catiónico dentro de la estructura de la arcilla, el Na<sup>+</sup> y Ca<sup>+2</sup> fueron analizados a través de la espectrometría de absorción atómica, con la finalidad de tener mayor precisión en la determinación del % de estos dos cationes. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 6.10 y 6.11.

Tabla 6.10. Composición química elemental de las muestras tratadas.

# M	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	CaO (**)	Na <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O (**)	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<b>M-0</b>	50,942	14,092	2,927	0,009	3,170	4,289	4,001	0,414	3,299	0,301	0,223	0,219
<b>M-0/2</b>	43,141	11,826	17,069	0,182	5,315	1,990	2,336	0,434	3,169	0,003	1,416	0,447
<b>M-1</b>	51,852	16,954	9,547	0,086	5,114	2,740	1,640	0,431	2,048	0,847	1,086	0,429
<b>M-2</b>	52,155	16,612	9,006	0,083	5,643	2,969	1,777 (*)	0,422	2,006 (*)	0,826	1,054	0,442
<b>M-3</b>	49,673	16,028	9,434	0,085	4,704	3,044	2,899 (*)	0,421	3,083 (*)	0,835	1,055	0,372
<b>M-8</b>	52,882	15,929	9,235	0,082	5,972	2,922	2,783 (*)	0,429	3,142 (*)	0,825	1,033	0,202
<b>M-17</b>	51,346	16,093	9,600	0,080	4,259	2,942	2,802 (*)	0,431	3,156 (*)	0,833	1,082	0,503
<b>M-29</b>	52,452	16,274	9,213	0,077	4,742	3,025	2,319	0,418	3,061	0,850	1,027	0,224
<b>M-40</b>	52,093	16,678	8,572	0,078	4,940	2,900	2,762 (*)	0,419	3,068 (*)	0,864	1,060	0,461
<b>M-56</b>	54,276	17,559	9,544	0,077	5,427	2,847	2,711 (*)	0,427	3,127 (*)	0,830	1,068	0,505
<b>M-57</b>	54,793	18,394	9,468	0,077	5,241	2,728	2,598 (*)	0,427	3,240 (*)	0,868	1,075	0,505
<b>M-58</b>	52,243	16,980	9,068	0,087	5,757	2,951	2,178	0,421	3,195	0,801	1,051	0,378
<b>M-64</b>	50,239	16,116	8,866	0,083	5,185	3,839	3,656	0,415	3,900	0,847	1,076	0,372
<b>M-69</b>	52,341	17,579	9,570	0,084	5,054	3,776	3,462	0,435	3,945	0,832	1,080	0,477
<b>M-73</b>	50,050	15,810	8,271	0,084	5,135	2,612	2,183	0,424	5,214	0,819	1,060	0,486
<b>M-75</b>	51,202	15,884	8,255	0,075	5,424	2,896	2,328	0,431	6,151	0,852	1,028	0,295
<b>M-76</b>	52,003	16,314	8,558	0,088	3,888	3,862	3,424	0,418	3,506	0,868	1,076	0,499
<b>M-79</b>	49,621	15,679	8,763	0,078	3,254	2,875	2,270	0,401	2,688	0,962	1,058	0,285
<b>M-59</b>	11,746	7,279	0,030	0,034	14,808	0,038	-	56,250	-	0,392	0,010	2,789
<b>M-60</b>	11,672	5,246	0,029	0,032	12,876	0,071	-	62,400	-	0,319	0,013	2,492
<b>M-61</b>	12,023	7,743	0,031	0,033	12,678	0,035	-	58,950	-	0,353	0,012	2,871

Las muestras M-59 a M-61 corresponden con una fracción de NaCl precipitada mediante la evaporación de la solución salina extraída del material tratado. \* Datos obtenidos por correlación entre las muestras tratadas y analizadas por AAS y los valores de FRX. \*\* Datos obtenidos por AAS.

Tabla 6.11. Composición química elemental de la arcilla in situ.

Muestra	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
M-A	58,3	18,1	12	0,01	5,2	2,8	0,5	1,1	1,3	0,5
M-B	58,1	18	11,6	0,069	5,3	3,8	0,5	0,9	1,2	0,3
M-C	55,3	19,5	11,1	0,175	8,6	2,4	0,5	0,9	1,2	0,3
M-D	62,5	17,4	10,8	0,096	2,7	3,2	0,5	1,1	1,3	0,3

### 6.5.2. Análisis mineralógico

Para la evaluación de la composición mineralógica del material estudiado se realizó, en primera instancia, el ensayo de difracción de rayos X, con la finalidad de identificar los minerales existentes en las muestras analizadas (Tabla 6.12). Posteriormente, ya conociendo la mineralogía presente, se realizó un análisis morfológico (Fig. 6.4) de los granos que componen el sedimento tratado, con la finalidad de identificar los minerales más pequeños, analizar la textura microcristalina y evaluar la relación tridimensional entre los granos. Esto permitió estimar, a grandes rasgos, la composición mineral a través de la morfología de las partículas (MEB) y la composición química elemental (EDX) (Tabla 6.13). Finalmente, se realizó un análisis termogravimétrico para cuantificar, en términos de porcentaje, los tipos de minerales de arcilla y el material carbonático presente (Tabla 6.14).

Tabla 6.12. Mineralogía identificada en las muestras analizadas.

MINERAL	FÓRMULA QUÍMICA	MUESTRAS
CUARZO	SiO <sub>2</sub>	M-0;M-0/2;M-1;M-2;M-3;M-17;M-29;M-46;M-56; M-58;M-64;M-69;M-73;M-75;M-76;M-79
ALBITA	Na(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	M-0;M-0/2;M-1;M-2;M-3;M-17;M-29;M-46;M-56; M-58;M-64;M-69;M-73;M-75;M-76;M-79
MONTMORILLONITA SÓDICA	Na <sub>0,3</sub> (Al,Mg) <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	M-0;M-0/2;M-1;M-2;M-3;M-17;M-29;M-46;M-56; M-58;M-64;M-69;M-73;M-75;M-76;M-79
MONTMORILLONITA SÓDICA-CÁLCICA	(Na,Ca) <sub>0,3</sub> (Al,Mg) <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ·nH <sub>2</sub> O	M-0;M-0/2;M-1;M-2;M-3;M-17;M-29;M-46;M-56; M-58;M-64;M-69;M-73;M-75;M-76;M-79
BEIDELITA	Na <sub>0,3</sub> Al <sub>2</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	M-0;M-0/2
NONTRONITA	Na <sub>0,3</sub> (Fe <sup>+3</sup> ) <sub>2</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ·nH <sub>2</sub> O	M-1;M-2;M-3;M-17;M-29;M-46;M-56;M-58;M-64; M-69;M-73;M-75;M-76;M-79
CAOLINITA	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	M-0;M-0/2;M-1;M-2;M-3;M-17;M-29;M-46;M-56; M-58;M-64;M-69;M-73;M-75;M-76;M-79
GOETHITA	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·H <sub>2</sub> O	M-0/2;M-1;M-2;M-3;M-17;M-29;M-46;M-56;M-58; M-64;M-69;M-73;M-75;M-76;M-79
CALCITA	CaCO <sub>3</sub>	M-0;M-0/2;M-1;M-2;M-3;M-17;M-29;M-46;M-56; M-58;M-64;M-69;M-73;M-75;M-76;M-79

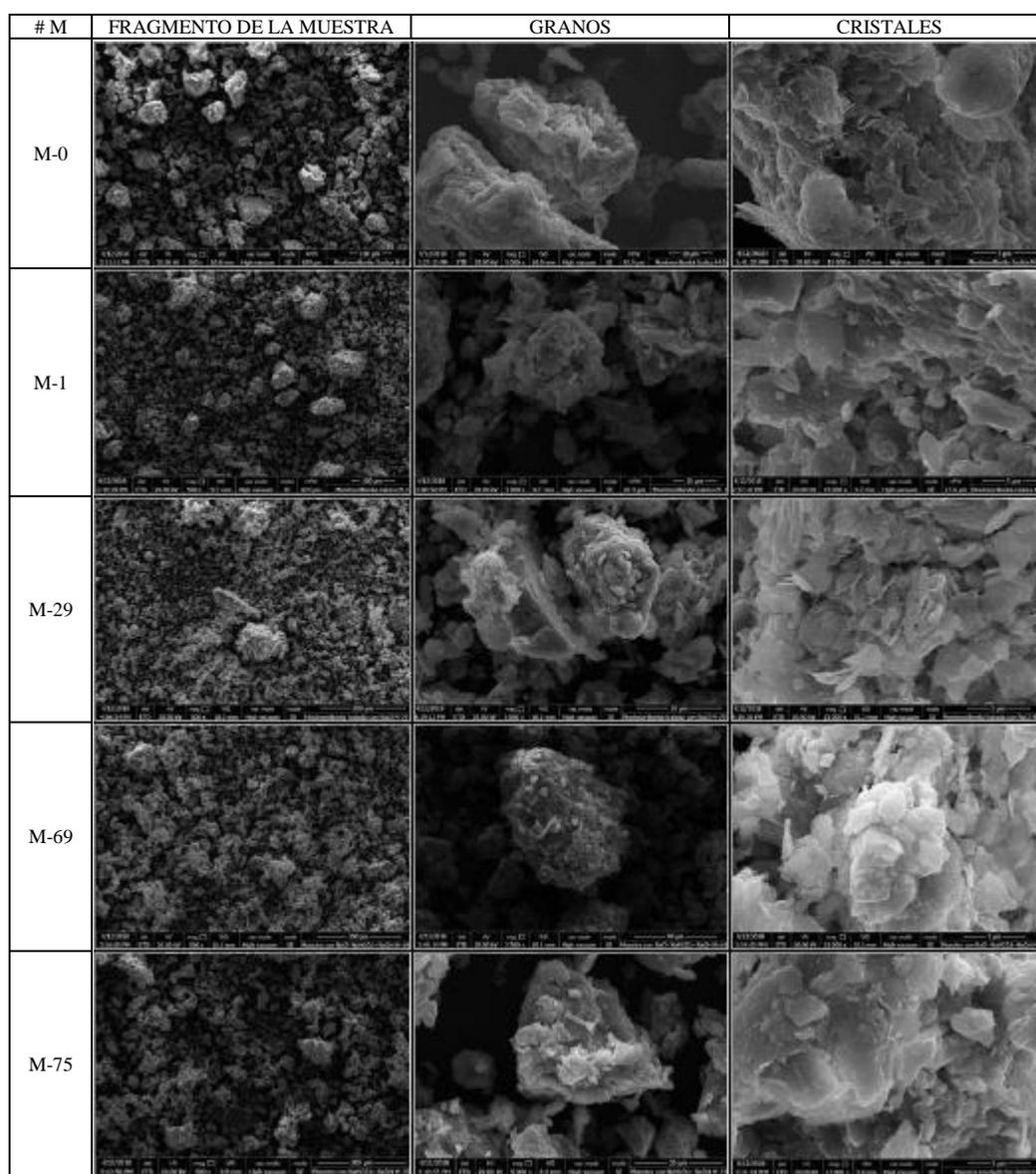


Figura 6.4. Imágenes SEM donde se puede observar la morfología de los granos y la textura microcristalina de los sedimentos presentes en las muestras estudiadas. Las imágenes completas se muestran en el anexo III.

Tabla 6.13. Composición química elemental en la muestra a través del análisis (EDX)

MUESTRA	% EN PESO DE ELEMENTOS MAYORITARIOS									
	Na-K	Mg-K	Al-K	Si-K	Cl-K	K-K	Ca-K	Ti-K	Fe-K	Ni-K
M-0	4,20	4,07	16,62	48,61	1,67	2,58	4,04	1,47	15,83	0,91
M-1	2,20	4,28	18,53	51,34	-	2,18	4,27	1,35	14,73	1,11
M-29	4,30	4,05	17,82	50,13	1,30	2,21	4,49	1,22	13,61	0,88
M-69	3,26	3,89	18,37	52,37	-	2,56	3,61	1,29	13,62	1,03
M-75	3,33	3,92	16,70	53,02	1,81	2,32	2,62	0,83	14,80	0,65

Tabla 6.14. Peso de las muestras luego de ser sometidas a diferentes temperaturas y las pérdidas de H<sub>2</sub>O y/O CO<sub>2</sub> asociadas en términos de porcentajes.

# M	Tara (T)	Ww Inicial	T + W(150°)	Ww-W(150°)	Ws	T + W(200°)	% H <sub>2</sub> O	T + W(250°)	% H <sub>2</sub> O	T + W(450°)	% CO <sub>2</sub>	T + W(550°)	% H <sub>2</sub> O	T + W(900°)	% CO <sub>2</sub>
M-0	23,83	2,0067	25,6471	0,1875	1,82	25,5970	2,75	25,5967	0,02	25,5960	0,04	25,5953	0,04	25,5241	3,91
M-0/2	16,07	2,0055	17,8527	0,2255	1,78	17,8093	2,44	17,7851	1,36	17,7829	0,12	17,7737	0,52	17,7282	2,56
M-1	24,73	2,0055	26,6775	0,0580	1,95	26,6440	1,72	26,6280	0,82	26,6122	0,81	26,5590	2,73	26,5320	1,39
M-2	20,82	2,0013	22,7643	0,0520	1,95	22,7291	1,81	22,7145	0,75	22,7104	0,21	22,6673	2,21	22,6363	1,59
M-3	23,82	2,0054	25,7839	0,0396	1,97	25,7483	1,81	25,7311	0,87	25,7185	0,64	25,6733	2,30	25,6462	1,38
M-8	23,60	2,0054	25,5508	0,0501	1,96	25,5154	1,81	25,4990	0,84	25,4967	0,12	25,4612	1,82	25,4278	1,71
M-17	22,49	2,0048	24,4429	0,0560	1,95	24,4063	1,88	24,3871	0,99	24,3765	0,54	24,3313	2,32	24,3042	1,39
M-29	21,24	2,0064	23,2030	0,0437	1,96	23,1706	1,65	23,1575	0,67	23,1556	0,10	23,1231	1,66	23,0830	2,04
M-40	18,76	2,0040	20,7061	0,0551	1,95	20,6725	1,72	20,6575	0,77	20,6547	0,14	20,6075	2,42	20,5961	0,58
M-56	31,99	2,0052	33,9395	0,0574	1,95	33,9053	1,76	33,8922	0,67	33,8901	0,11	33,8472	2,20	33,8196	1,42
M-57	23,82	2,0044	25,7839	0,0386	1,97	25,7569	1,37	25,7448	0,62	25,7409	0,20	25,6951	2,33	25,6757	0,99
M-58	30,38	2,0032	32,3270	0,0583	1,94	32,2999	1,39	32,2893	0,55	32,2829	0,33	32,2420	2,10	32,2182	1,22
M-64	22,02	2,0011	23,9881	0,0362	1,96	23,9547	1,70	23,9411	0,69	23,9387	0,12	23,8992	2,01	23,8620	1,89
M-69	26,48	2,0066	28,4349	0,0482	1,96	28,4005	1,76	28,3850	0,79	28,3814	0,18	28,3342	2,41	28,2831	2,61
M-73	21,85	2,0057	23,7799	0,0733	1,93	23,7448	1,82	23,7333	0,60	23,7311	0,11	23,7026	1,47	23,6631	2,04
M-75	21,26	2,0028	23,2261	0,0317	1,97	23,1912	1,77	23,1820	0,47	23,1790	0,15	23,1543	1,25	23,1096	2,27
M-76	18,69	2,0012	20,6651	0,0261	1,98	20,6305	1,75	20,6131	0,88	20,6091	0,20	20,5585	2,56	20,5371	1,08
M-79	19,34	2,0069	21,3025	0,0479	1,96	21,2683	1,75	21,2525	0,81	21,2496	0,15	21,2176	1,63	21,1818	1,83

150°C → Corresponde a la temperatura utilizada para secar las muestras;

200°C → Temperatura a la cual la montmorillonita pierde el agua estructural;

250°C → Temperatura a la cual ocurre la deshidratación total y deshidroxilación de la goethita;

450°C → Destrucción de la materia orgánica y eliminación del CO<sub>2</sub>;

550°C → Destruye la estructura de la caolinita, pérdida del agua estructural;

900°C → Descomposición del carbonato cálcico y eliminación del CO<sub>2</sub>.

## **CAPÍTULO VII**

### **ANALISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS**

Una vez obtenidos los resultados de los ensayos físico-químicos realizados tanto en el sedimento in situ como en el material tratado con NaCl, NaHCO<sub>3</sub> y NaOH, se procedió al procesamiento de los datos con el fin de interpretar si hubo cambios o no en las diferentes muestras analizadas. En esta fase se compararon los resultados conseguidos de la arcilla estudiada con los datos conseguidos en muestras de Bentonitas comerciales como la Bentonita canadiense explotada en Wyoming o la Bentonita Laviosa de origen Italiano (Cerdeña) y Griego (Milos). A partir de esta información se podrá concluir si las arcillas tratadas pueden o no ser utilizadas en la industria como sustitutas de las bentonitas antes mencionadas.

#### **7.1. REVISIÓN DE TRABAJOS PREVIOS**

Considerando que el objetivo principal de este trabajo fue evaluar los parámetros geotécnicos y mineralógicos de arcillas venezolanas como fuente de lodo bentonítico, resultó necesaria una amplia y exhaustiva búsqueda y recopilación de la información disponible sobre arcillas expansivas a lo largo y ancho del territorio nacional, que manejara datos geológicos, geotécnicos y/o químicos de interés para la investigación.

En este orden de ideas, en el capítulo 1 sección 1.5, se menciona una gran cantidad de autores que realizaron investigaciones dirigidas a la caracterización de montmorillonitas en diversas localidades del país. La tabla 7.1 muestra ciertas propiedades que aumentan o disminuyen el potencial expansivo de una arcilla, las cuales fueron calculadas a partir de datos tomados de los trabajos antes mencionados. Esto con la finalidad de generar una base de datos completa donde se indique información detallada como ubicación, % de expansión, presión de expansión, índice de nocividad, actividad coloidal y superficie específica de los suelos expansivos a nivel nacional.

Tabla 7.1. Propiedades expansivas de arcillas en diversas localidades venezolanas. Elaboración propia a partir de datos obtenidos de trabajos previos, complemento STEFANO &amp; SALMEN 1994.

Estado	Localidad	Presión de expansión (Kg/cm <sup>2</sup> )	% Expansión	IN	AC	Se (m <sup>2</sup> /g)
Anzoátegui	Barcelona	1,0 - 9,6	25		0,60	11
	Puerto La Cruz	1,0 - 2,7	5,5	-	-	-
	Anaco	3	10,5	-	-	-
	Barcelona - Cantaura	1,0 - 2,5	11	-	0,80	81,2
	Autopista Barcelona - El Tigre	-	25	-	-	-
Apure	San Fernando	0,2 - 5,0	-	-	-	-
Aragua	Maracay	0,6 - 1,1	-	5	0,94	57,8
	Villa de Cura	1,7 - 12	10	22,8	1,60	550
	Camatagua	2,8 - 17,8	6,4	16,7	1,32	460
	Municipio Urdaneta	2,4 - 8,1	6,5	14,6	1,34	280
	Magdaleno	-	0,4	4	0,61	59,6
Carabobo	Valencia	2,0 - 6,0	-	-	-	-
	Morón	-	5	-	-	-
	Carretera Panamericana	-	3	-	-	-
Delta Amacuro	Tucupita	0,7	3,3	-	-	-
Falcón	Mirimire	3,3 - 5,4	25	12	1,43	108,2
	Coro	0,5 - 10	21	8,8	1,25	365
	Paraguaná	7	-	-	-	-
	Carretera Morón-Mirimire	4,5	6	-	1,36	106,4
	La Velita	-	2	-	-	-
Guárico	El Saco - Tucupido	3,8 - 5,6	3,5	-	-	-
	Zaraza	0,5 - 8,7	-	-	-	-
	Valle de la Pascua	6,0 - 14,0	-	-	-	-
	Calabozo	4,0 - 8,0	-	-	-	-
	Municipio Pedro Zaraza	2,5 - 3,5	-	-	-	90,2
	Ilanos centro - occidentales		10	-	0,70	86,6
Lara	Altagracia de Orituco	1,3 - 6,0	5	21,5	1,30	295
	Carora	6,0 - 12,0	-	-	-	-
Miranda	Barquisimeto	4,0 - 12,0	-	19,7	0,52	491
	Ocumare - Santa Teresa del Tuy	1,0 - 12,0	8,5	-	1,39	282
	Guatire	0,5 - 2,25	6	7	0,8	143
	Guarenas	0 - 2,5	7	6	0,75	90
	El Rosario - Sta Lucía	-	5	-	-	-
	Santa Teresa	6	8	-	1,27	191
	Charallave	1,75	1,8	-	0,60	18,2
	Capaya	13	16	-	-	-
	Sta. Lucia	-	6,3	-	-	-
	Paracotos	-	30	-	-	-
	Fuerte Guaicaipuro	6	7	-	-	-
Pitahaya		5,5	12,8	1,29	3,13	
Nueva Esparta	Porlamar	6,0 - 10,0	-	-	-	-
Portuguesa	Píritu	6	10,8	-	-	-
Táchira	Perecal	1,0 - 15,0	-	-	-	-
	San Cristobal	6,0 - 15,0	-	-	-	-
	Táriba	0,7 - 2,0	-	-	-	-
	Las Margaritas - Táriba	2	-	-	-	-
Zulia	Cabimas	0,4 - 0,5	-	-	-	-
	Puerto Altagracia	0 - 8,0	-	-	-	-
	Maracaibo	1,9 - 17,0	-	-	-	-
	Casigua - El Cubo	3,0 - 7,0	-	-	-	-

## **7.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DEL MATERIAL ANALIZADO**

Con la finalidad de evaluar y caracterizar el material obtenido, se realizaron una serie de ensayos físicos y análisis químicos que permitieran conocer la proporción mineral, la composición química elemental y las propiedades expansivas del sedimento.

De esta forma, se empezó evaluando el comportamiento físico del material in situ mediante ensayos básicos (clasificación visual, % de humedad, distribución granulométrica, límites de consistencia) que permiten clasificar el sedimento según la USCS.

Así, de acuerdo a lo indicado, las muestras extraídas indican que se trata de arcillas inorgánicas (CH), color marrón claro amarillento a gris verdoso, de alta plasticidad y compresibilidad, con cantidades menores de materia orgánica representada por raíces en posición, que van disminuyendo con la profundidad. Por otra parte, la distribución granulométrica por tamizado mostró que más del 90% de los granos pasaron el tamiz # 200, correspondiendo con sedimentos finos entre limos y arcillas, mientras que en el ensayo con hidrómetro, se evidenció que más del 25% del material extraído corresponden a partículas muy finas (coloides) con una relación área/masa extremadamente grande, lo que hace que los mismos sean catalogados como excelentes materiales adsorbentes. En cuanto a los límites de consistencia, las arcillas mostraron un alto límite líquido que varió entre 68 y 96 %, obteniéndose los mayores valores en el material más profundo.

Adicionalmente, los ensayos de expansión y azul de metileno indicaron que las arcillas estudiadas presentan un alto potencial expansivo. Donde el porcentaje de expansión varió entre 15,3 y 26,6 %, y el valor azul osciló en el rango 3,98 - 8,29 gr/100gr. Así también, se calcularon las propiedades coligativas de los coloides (Tabla 7.2) como la superficie específica y el consumo total de azul de metileno, el índice de nocividad y la actividad coloidal. En el mismo orden de ideas, la superficie específica puede ser

utilizada para determinar el tipo de mineral que domina en la muestra. Es sabido que los valores superiores a 300 m<sup>2</sup>/gr corresponden a vermiculitas y montmorillonitas, donde las montmorillonitas cálcicas-ferrosas varían de 300 a 450 m<sup>2</sup>/gr, mientras las montmorillonitas sódicas superan los 700 m<sup>2</sup>/gr. Esto puede indicar que las muestras ensayadas mantienen una dominancia de montmorillonitas principalmente cálcicas-ferrosas, pudiendo contener cantidades menores de montmorillonitas sódicas.

Tabla 7.2. Propiedades del sedimento in situ, calculadas a partir de los datos obtenidos de los ensayos realizados.

MUESTRA	ACTIVIDAD COLOIDAL (AC)	VALOR AZUL (VA) (gr/100g)	INDICE NOCIVIDAD (IN)	PROPIEDADES COLIGATIVAS	
				AZUL MET. CONSUMIDO (meq/100g)	SUPERFICIE ESPECIFICA (SE) - (m <sup>2</sup> /g)
M-A	1,43	3,98	16,58	40	405,59
M-B	0,98	4,43	14,77	44	361,28
M-C	1,30	8,29	20,21	83	494,31
M-D	1,39	5,84	18,83	58	460,58

Respecto a la caracterización química del material, los análisis de rayos X permitieron identificar la mineralogía presente y determinar la composición química elemental de las muestras extraídas. De esta forma, se confirmó la presencia de montmorillonita (Tabla 6.12) en condición sódico-cálcica, la cual se observa en combinación con otras especies minerales como cuarzo, albita, nontronita, caolinita, goethita y calcita. En el caso de la montmorillonita y la nontronita, ambas pertenecen al grupo de las esmectitas, con carácter dioctaédrico y cationes hidratados intercambiables.

Por otro lado, el análisis morfológico de los granos mediante la microscopía electrónica de barrido también mostró, aunque visiblemente alteradas, la presencia de montmorillonitas en las muestras extraídas. Esto se evidenció mediante el estudio de imágenes de alta resolución, que permitieron examinar con detalle la forma y disposición de los cristales y compararlos con las imágenes características para cada uno de los posibles minerales que pudieran encontrarse en los sedimentos analizados (Figs. 7.1 y 7.2).

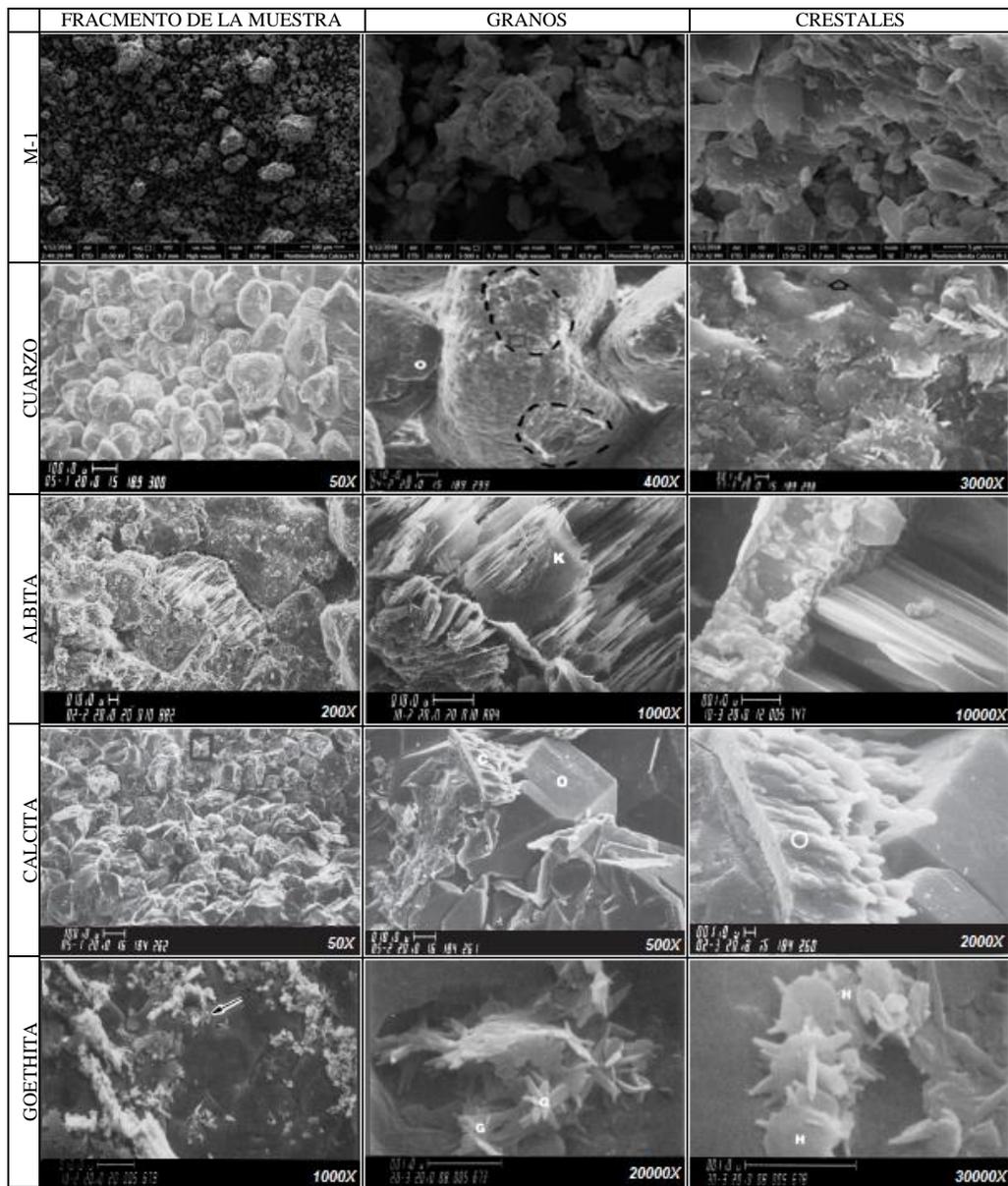


Figura 7.1. Imágenes SEM características para los minerales presentes en los sedimentos analizados, obtenidas del SEM Petrology Atlas, elaborado por WELTON, (2003). Las imágenes superiores corresponden con la muestra analizada para ser comparadas con las especies mostradas de minerales constituyentes de las muestras extraídas.

Según BEUTELSPACHER & VAN DER MAREL (1968), la montmorillonita presenta, en general, forma de láminas muy finas e irregulares, parcialmente dobladas, con tendencia a exhibir asociaciones borde a borde. Las partes curvadas o dobladas de las partículas se revelan como zonas más oscuras. La

extrema finura y flexibilidad de éstas es el origen de las excelentes cualidades plásticas de la montmorillonita. Las especies de suelos no tienen una morfología característica y están mezcladas, a menudo, con cierta proporción de componentes amorfos, los cuales en las microfotografías electrónicas se ven como agregados de gránulos muy pequeños con apariencia suelta.

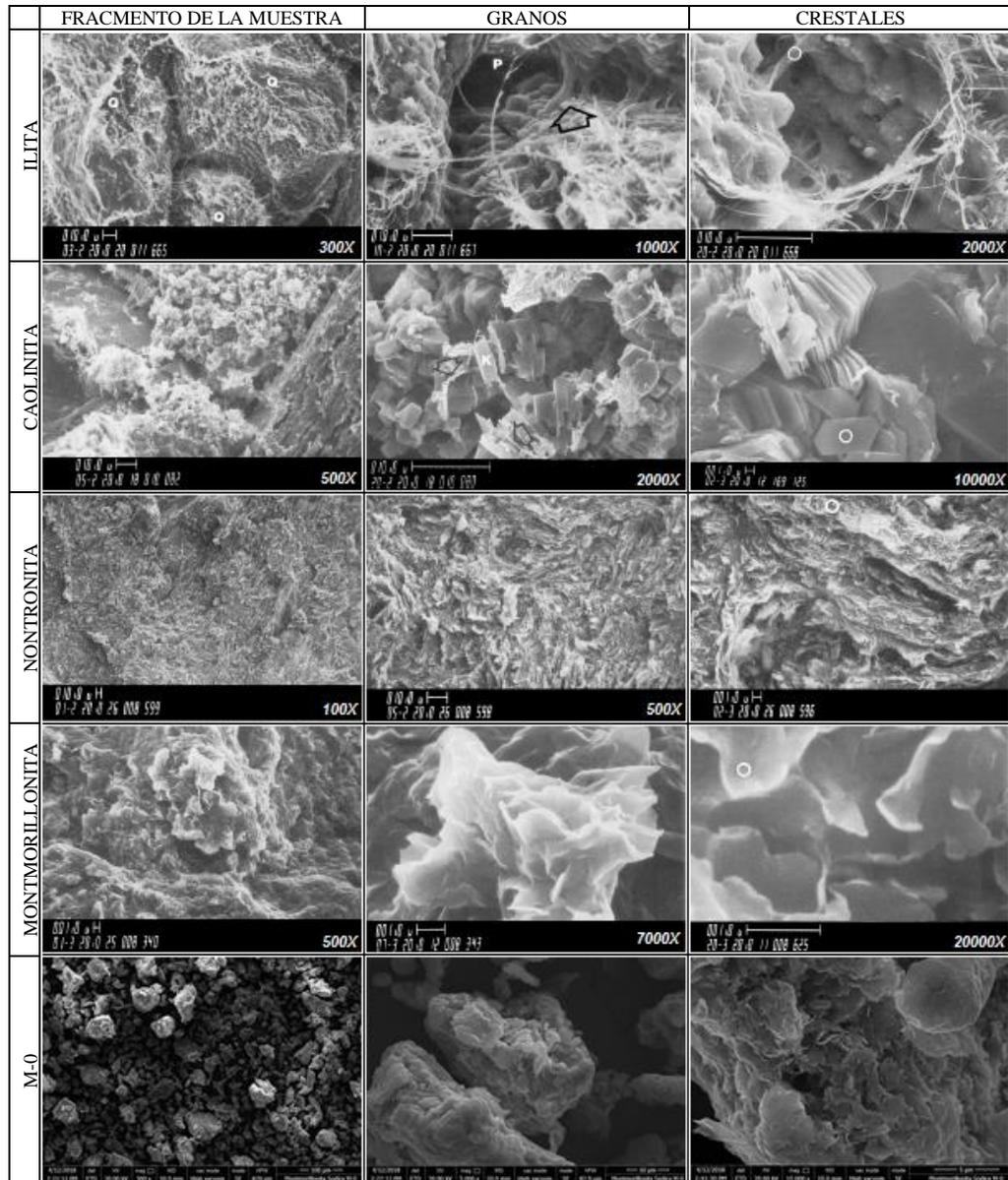


Figura 7.2. Imágenes SEM características de minerales de arcilla, obtenidas del SEM Petrology Atlas, elaborado por WELTON, (2003). Las imágenes inferiores corresponden con la muestra de bentonita canadiense analizada.

Tomando en consideración que el objetivo principal en la realización de la MEB, se basó en la determinación de los tipos de minerales de arcillas presentes en las muestras, el análisis se concentró en la evaluación morfológica de los cristales que indicaban la presencia de estos minerales. De esta manera, no se evidencia la existencia de illitas, caracterizadas por una forma de hilos entrelazados; mientras que la presencia de nontronita, montmorillonita o caolinita se observa, aunque un poco difusa. Esto se debe a que dichos minerales resultan de la transformación de materiales primarios, en este caso albita, los cuales van alterando su composición química de acuerdo con la secuencia de meteorización.

Según las condiciones de meteorización, la evolución de los feldespatos tomará un curso diferente. En condiciones de alteración intensa y buen drenaje, se formará preferentemente minerales kandíticos; si las condiciones son moderadas y el drenaje tolera cierta acumulación de bases, habrá tendencia a que se formen esmectitas y/o illita; mientras que si las condiciones imperantes son muy severas (condiciones de meteorización tropical), estos minerales pueden originar bauxitas o lateritas, por desilicización y desbasificación intensa. No obstante, en la formación de illita y/o esmectitas (beidelita, nontronita, montmorillonita) a partir de feldespatos potásicos o plagioclasas respectivamente, los cationes liberados por meteorización juegan un papel muy especial por su significación como cationes de cambio o de entrecapas.

Así mismo, Pedro *et al.* (1969), estudiaron las interacciones mineralógicas y sus transformaciones con relación a la pedogénesis cuaternaria. Según el autor, la estabilidad de los constituyentes distingue dos categorías: minerales estables, arcillas 1:1, (tipo caolinita) y minerales 2:1 (tipo esmectitas), menos estables y transformables en períodos de tiempo relativamente breves. De esta forma, la morfología analizada, muestra cristales principalmente alterados que evidencian la inestabilidad estructural de los minerales presentes, bajo las condiciones de meteorización físico-químicas predominantes en el ambiente de formación.

En cuanto a la clasificación USDA, tomando en consideración la ubicación y características del terreno in situ, el suelo estudiado correspondería a un inceptisol, lo que concuerda con la distribución de tipos de suelos realizada por MOGOLLÓN & COMERMA, 1994 (Fig. 7.3). Según PEREZ *et al.* (1976), en medio ácido, como es característico de este tipo de suelos, se puede presentar un tipo de hidrólisis ácida, en la que, dependiendo de las características de la materia orgánica, la fracción arcilla puede evolucionar en el sentido: mica-illita-vermiculita - vermiculitas, o darse fenómenos de destrucción o de formación de montmorillonitas.

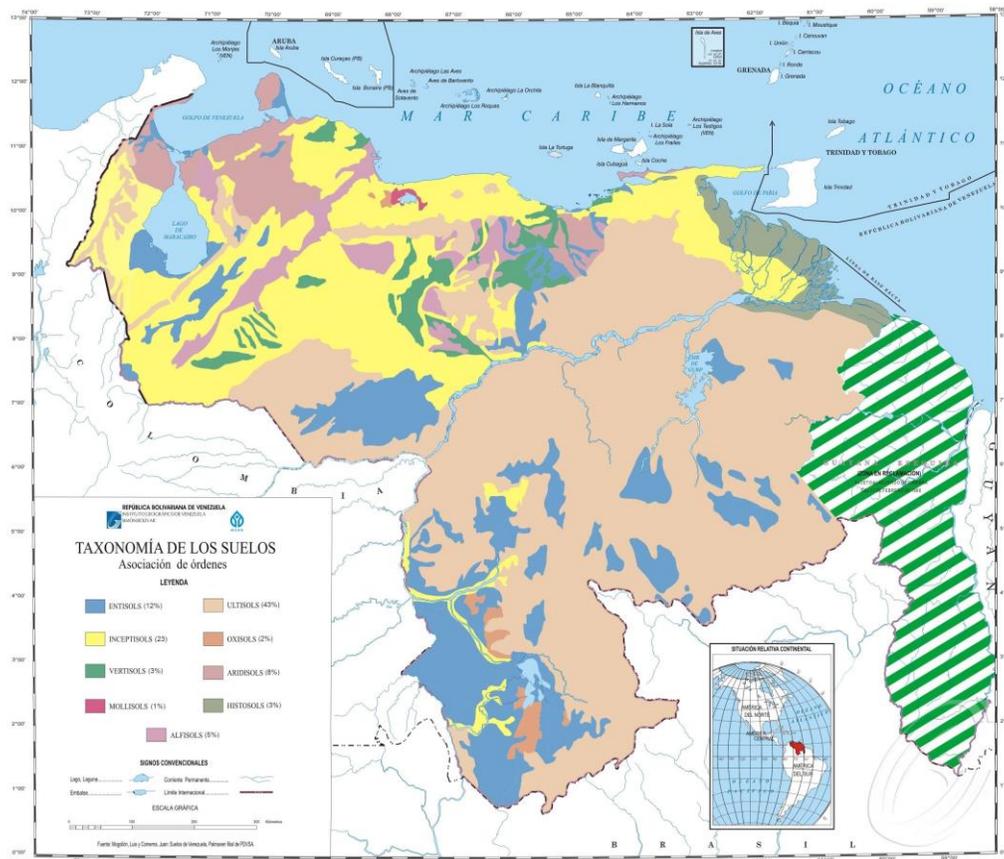


Figura 7.3. Distribución geográfica de los suelos de Venezuela (escala 1:4.000.000). Los gelisoles y espodosoles no tiene expresión a esta escala (Tomado y modificado de MOGOLLÓN & COMERMA, 1994).

Una vez establecida la presencia de arcillas expansivas en las muestras extraídas, se procedió a tratar el material, con la finalidad de evaluar su

comportamiento al ser sometido a diferentes condiciones físico-químicas, dirigidas hacia la obtención de montmorillonitas ricas en sodio, que muestren propiedades similares a las bentonitas comerciales.

De esta forma, se obtuvieron diversas muestras expuestas a diferentes condiciones de temperatura, pH y concentración de NaCl, NaHCO<sub>3</sub> y/o NaOH (Tabla 6.4). Dichas arcillas fueron analizadas física y químicamente para evaluar su comportamiento luego del tratamiento realizado.

Los datos obtenidos de los ensayos con azul de metileno y los límites de consistencia, permitieron calcular las propiedades coligativas de los coloides (Tabla 7.3), como la superficie específica (SE) y el consumo total de azul de metileno (VA), así como en índice de nocividad (IN) y la actividad coloidal (AC).

Los resultados mostrados en la tabla 7.3, permitieron analizar de forma detallada los cambios o transformaciones físicas que pudieron haber experimentado las arcillas luego del tratamiento realizado.

La figura 7.4 muestra como las arcillas tratadas experimentaron un aumento significativo en cuanto a la superficie específica de los coloides, alcanzando valores de hasta 940 m<sup>2</sup>/g, con un promedio de 740 m<sup>2</sup>/g, un mínimo de 610 m<sup>2</sup>/g y una desviación estándar de 70 m<sup>2</sup>/g. Si se toma en consideración que la montmorillonita sódica tiene una superficie específica superior a 700 m<sup>2</sup>/g, entonces más del 68% de las muestras corresponderían con este tipo de arcilla. En cuanto al 32 % restante, dichas arcillas corresponderían con una arcilla sódico-cálcica con predominancia del primer catión.

El límite líquido también representa un parámetro importante a la hora de evaluar el comportamiento de una arcilla, pues no solo representa el contenido de humedad límite para que el material pase de estado plástico a semilíquido, sino que también constituye la medida de resistencia al corte del suelo a un determinado contenido de humedad.

Tabla 7.3. Propiedades coligativas de las arcillas tratadas, calculadas a partir de los datos obtenidos.

# M	AC	IN	PROPIEDADES COLIGATIVAS		# M	AC	IN	PROPIEDADES COLIGATIVAS	
			VA (meq/100g)	SE (m <sup>2</sup> /g)				VA (meq/100g)	SE (m <sup>2</sup> /g)
M-0	10,51	45,28	240	1107,62	M-37	3,18	28,67	120	701,30
M-0/2	5,61	40,74	330	996,52	M-38	2,90	25,88	114	632,97
M-1	1,19	16,67	70	407,67	M-39	3,00	27,27	120	667,09
M-2	1,07	17,94	79	438,88	M-40	3,07	27,85	123	681,26
M-3	3,03	38,44	161	940,27	M-41	3,26	31,82	134	778,43
M-4	3,20	30,37	128	742,83	M-42	3,20	36,90	155	902,69
M-5	3,59	29,07	122	710,94	M-43	3,50	30,35	127	742,25
M-6	3,01	27,94	123	683,49	M-44	2,96	30,53	134	746,74
M-7	3,10	28,17	124	689,14	M-45	3,03	29,59	130	723,84
M-8	3,23	33,72	148	824,86	M-46	3,26	27,85	123	681,26
M-9	2,92	30,07	126	735,58	M-47	2,89	29,47	124	720,77
M-10	3,00	29,76	125	727,98	M-48	3,13	29,04	122	710,22
M-11	3,09	30,01	126	734,09	M-49	3,10	30,77	129	752,62
M-12	3,16	29,63	130	724,84	M-50	2,63	30,26	133	740,12
M-13	3,07	29,11	128	712,00	M-51	2,89	29,11	128	712,00
M-14	2,97	27,40	121	670,12	M-52	3,00	29,44	130	720,09
M-15	2,90	26,82	113	655,96	M-53	3,02	30,08	126	735,64
M-16	3,03	30,83	129	754,08	M-54	3,06	30,08	126	735,64
M-17	3,15	33,17	139	811,28	M-55	3,32	30,83	129	754,03
M-18	2,88	27,81	122	680,35	M-56	2,91	27,75	122	678,79
M-19	2,73	26,78	118	654,98	M-62	3,04	27,84	123	681,06
M-20	2,98	28,17	124	689,10	M-63	3,24	29,59	130	723,84
M-21	3,28	31,75	133	776,51	M-64	2,51	27,38	115	669,74
M-22	3,30	32,61	137	797,55	M-65	2,62	27,27	120	667,09
M-23	3,31	32,53	137	795,73	M-66	2,75	32,14	135	786,21
M-24	3,05	29,75	131	727,63	M-67	2,63	29,55	130	722,68
M-25	3,27	28,56	126	698,52	M-68	2,63	27,38	115	669,74
M-26	3,62	27,69	122	677,25	M-69	2,62	25,00	110	611,50
M-27	3,17	26,46	111	647,09	M-70	3,09	30,71	129	751,27
M-28	3,26	30,68	129	750,49	M-71	2,97	29,55	130	722,68
M-29	3,33	37,63	158	920,50	M-72	3,74	29,76	125	727,98
M-30	2,74	33,42	147	817,51	M-73	3,76	28,41	125	694,89
M-31	2,98	31,96	141	781,75	M-74	3,15	36,90	155	902,69
M-32	3,05	30,81	136	753,58	M-75	3,29	35,23	155	861,66
M-33	2,93	31,91	134	780,51	M-76	3,51	36,19	152	885,22
M-34	3,15	30,53	128	746,64	M-77	3,62	35,23	155	861,66
M-35	3,18	28,67	120	701,30	M-78	3,51	27,38	115	669,74
M-36	2,90	25,88	114	632,97	M-79	4,75	27,27	120	667,09

Superficie específica (*Se*) (m<sup>2</sup>/gr) = (24.46 \* Vol. Azul consumido (V)) / (Ws \* % de coloides (Forma decimal))

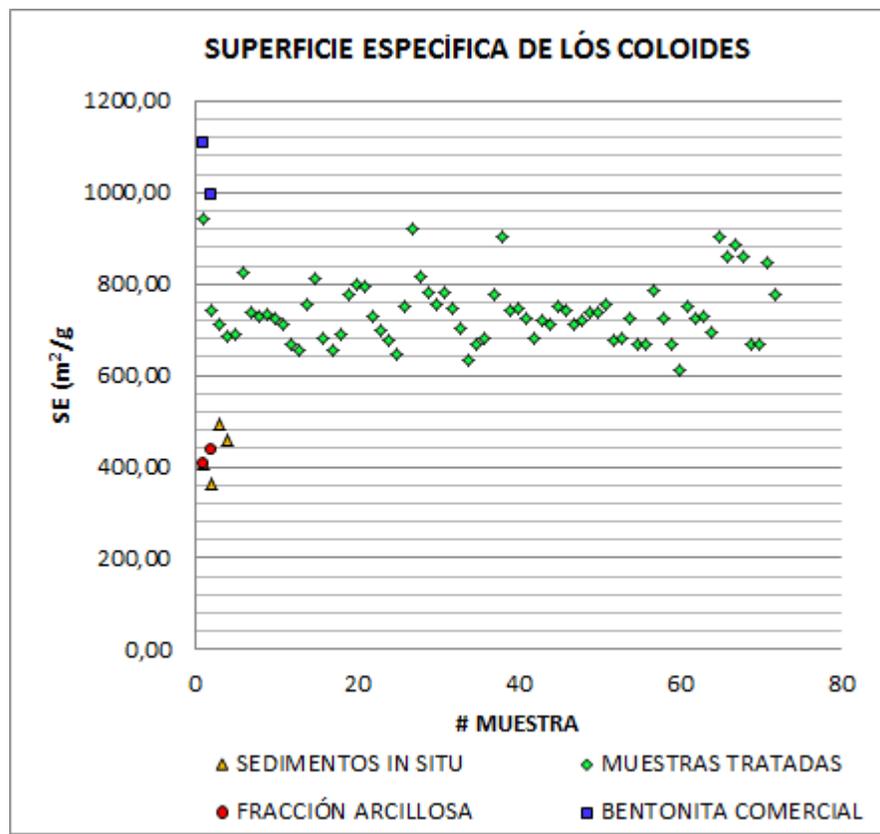


Figura 7.4. Comparación de la superficie específica de los coloides en las muestras estudiadas.

La figura 7.5 permite comparar los datos obtenidos en el sedimento in situ con los valores expuestos por las muestras tratadas y de bentonitas comerciales.

A pesar que las muestras tratadas aumentaron el porcentaje de límite líquido en más del 100%, en comparación con los resultados obtenidos de los sedimentos in situ (79% en promedio), todavía distan sustancialmente de los resultados mostrados por las bentonitas comerciales. Así, las arcillas tratadas mostraron un LL promedio de 168,6% con valores máximos y mínimos de 247 y 131,5% respectivamente y una desviación estándar de 22,1%.

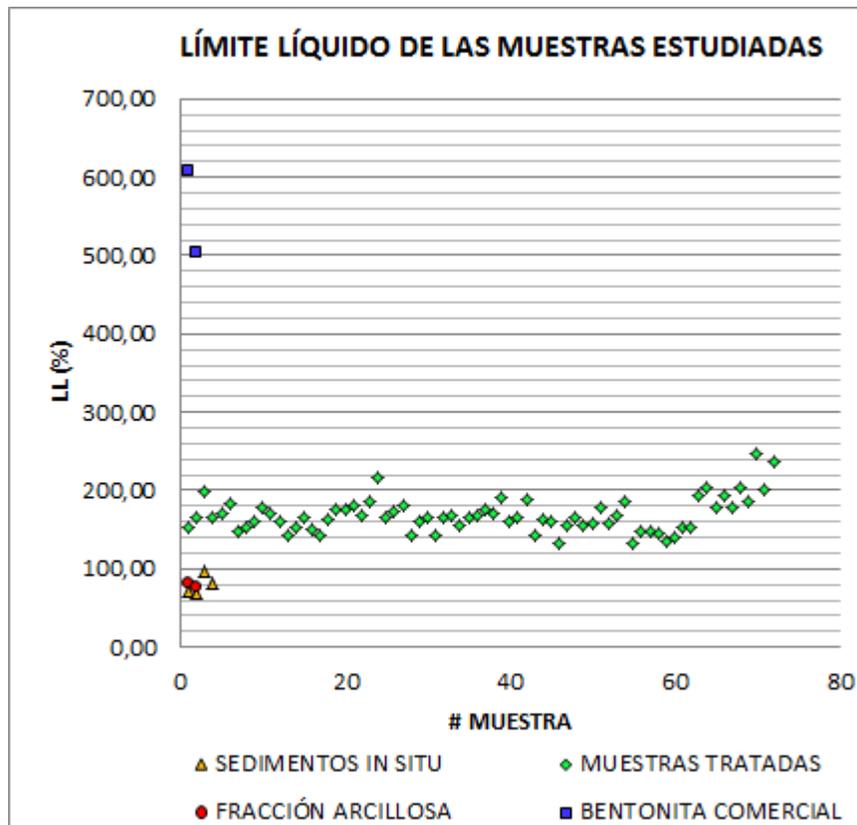


Figura 7.5. Distribución de los límites líquidos obtenidos de las muestras ensayadas.

En el mismo orden de ideas, para evaluar el carácter expansivo de las arcillas, se utilizaron los parámetros conocidos como actividad coloidal e índice de nocividad (Figs. 7.6 y 7.7). Ambos son utilizados para evaluar el comportamiento de los coloides ante la presencia de agua, sin embargo, el primero utiliza los límites de consistencia y el segundo utiliza el volumen de azul de metileno consumido por cada 100gr de muestra.

El gráfico de la figura 7.6 evidencia que los coloides de las muestras tratadas mostraron una mayor actividad en comparación con el material original, obteniéndose los mayores valores en las muestras tratadas con  $\text{NaHCO}_3$  y  $\text{NaOH}$ , siendo el promedio de 3,15, los valores máximo y mínimo igual a 4,75 y 2,51 respectivamente, con una desviación estándar de 0,37. Dichos resultados evidencian un aumento de casi 300% con respecto al sedimento original, sin

embargo, el promedio obtenido resultó en aprox. 50% del valor indicado para las bentonitas comerciales.

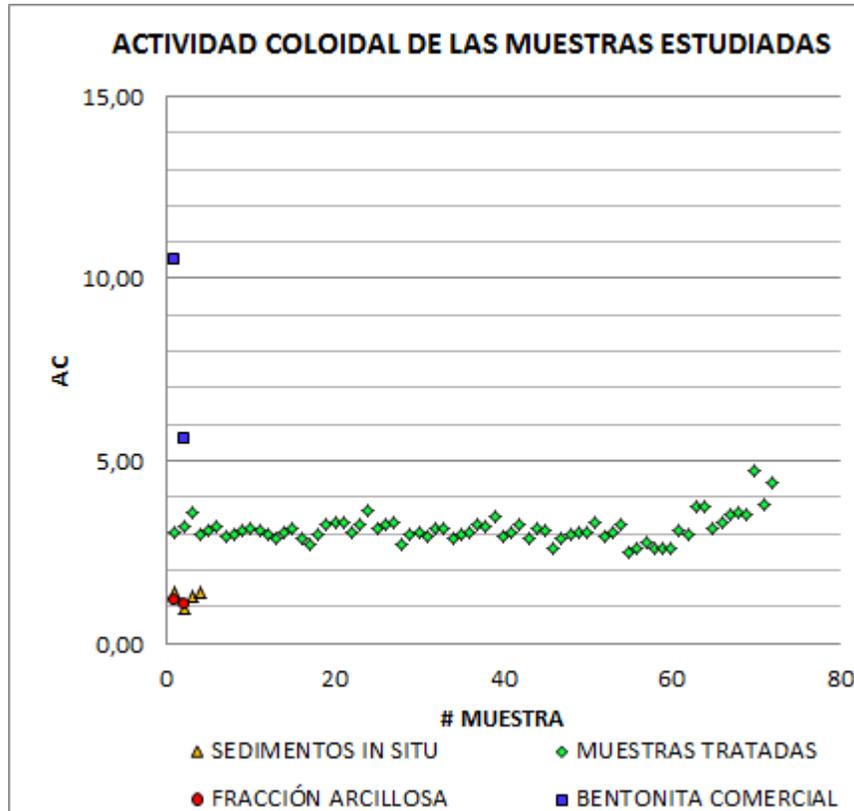


Figura 7.6. Actividad coloidal para cada una de las muestras estudiadas.

En cuanto a la figura 7.7, el gráfico demuestra un aumento similar al de la actividad coloidal de Skempton, con valores máximo y mínimo de 38,44 y 25,00 respectivamente, estando el promedio en 30,23 y la desviación estándar en 2,87. A diferencia del caso anterior, a pesar de que el promedio obtenido representa el 172% del valor mostrado por la arcilla in situ, los resultados más altos son similares a los obtenidos por la bentonita considerada.

Por otro lado, el ensayo de expansión libre permitió medir el comportamiento expansivo de las arcillas analizadas (Fig. 7.8), obteniendo valores promedio de 74,1%, con un máximo y un mínimo de 115,1 y 51,1% respectivamente y una desviación estándar de 22,2.

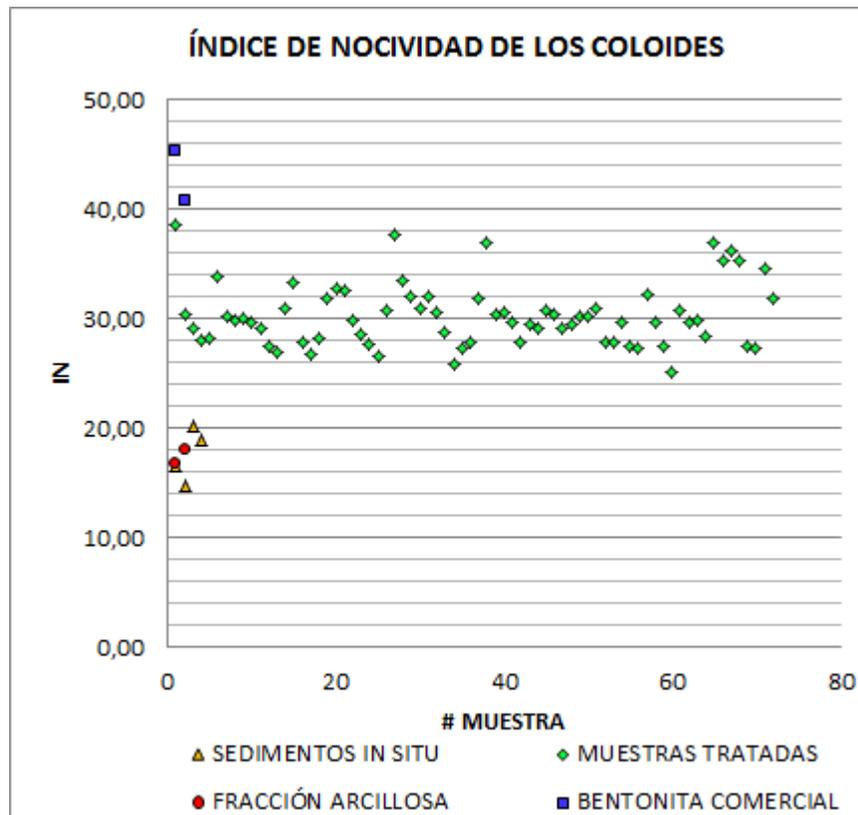


Figura 7.7. Índice de nocividad de las muestras analizadas.

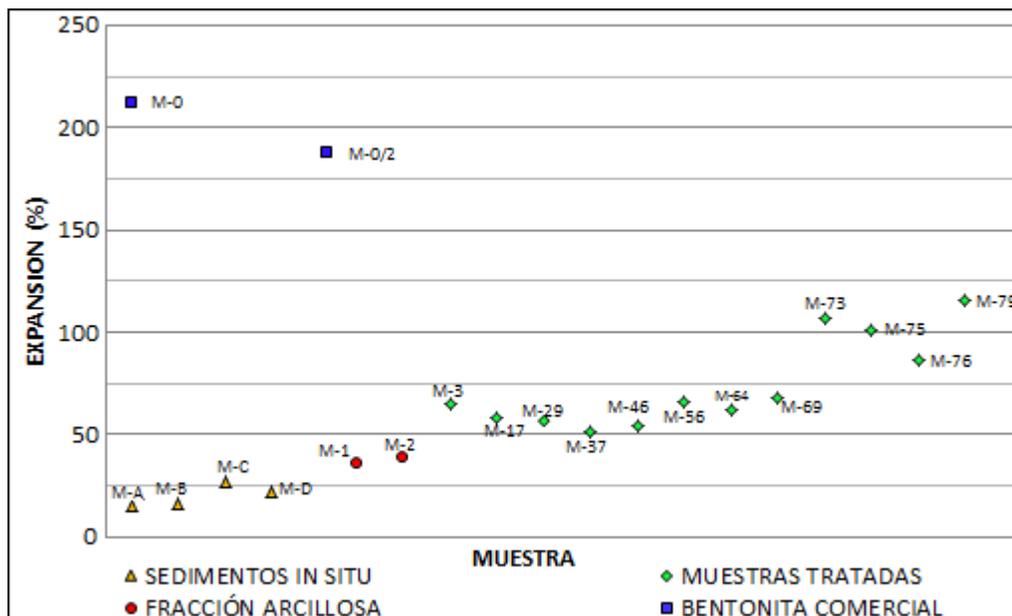


Figura 7.8. Comparación del potencial expansivo de las muestras analizadas.

Al comparar los datos antes mencionados, con los resultados mostrados por las arcillas in situ, se observa un aumento del 100% en el potencial expansivo de las muestras tratadas, quedando un 40% por debajo del porcentaje de expansión mostrado con las bentonitas comerciales.

De los resultados conseguidos durante la caracterización física de las arcillas tratadas, se evidencia que en los casos donde se analizaron las muestras mediante el ensayo con azul de metileno, se logró alcanzar un comportamiento similar al de las montmorillonitas sódicas comerciales. Sin embargo, cuando se utilizaron los datos provenientes de los límites de Atterberg, los resultados obtenidos estuvieron, en su mayoría, por debajo del 50% del valor indicado por las bentonitas analizadas.

Esto se debe a que cuando se utiliza el método de la mancha, los cálculos realizados van en función de conseguir el número de moléculas de azul de metileno que son finalmente absorbidas por los coloides del sedimento, es decir que se mide el comportamiento de las partículas más finas. Sin embargo, los límites de Atterberg evalúan el comportamiento completo de la fracción que pasa el tamiz #10 (2 mm), por consiguiente, si la muestra analizada contiene un porcentaje de partículas superiores a 0.002 mm, el comportamiento de dicha fracción granulométrica incidirá en mayor medida, en el ensayo de los límites de consistencia en comparación con el ensayo de la mancha.

En cuanto a la evaluación de los cambios químicos, ocurridos o no, dentro de la estructura de la arcilla, realizada mediante ensayos de difracción y fluorescencia de rayos X, microscopía electrónica de barrido y espectrometría de absorción atómica, este último con la finalidad de evaluar las concentraciones de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Ca}^{+2}$  con mayor precisión, permitió comparar la mineralogía y la composición química elemental de las diferentes muestras y analizar la relación existente entre cada uno de ellos.

De esta forma, la difracción de rayos X facilitó la identificación de los distintos minerales presentes en las muestras seleccionadas, mientras que el ensayo de fluorescencia de Rayos X fue realizado para cuantificar, en término

de porcentaje, los elementos químicos mayoritarios ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$  y  $\text{P}_2\text{O}_3$ ) que están presentes en las muestras estudiadas. No obstante, tomando en consideración que la dispersión Raman limita la aplicación de la técnica de reflexión total para medir concentraciones bajas de elementos livianos, se decidió realizar el ensayo de espectrometría de absorción atómica para la medición de las concentraciones de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Ca}^{+2}$ , ya que dichos cationes tienen gran influencia en el comportamiento de la montmorillonita.

Una vez determinada la composición mineralógica del material estudiado, se realizó una cuantificación de los minerales presentes (esmectita, goethita, caolinita y calcita), a excepción del cuarzo y la albita, mediante un análisis termogravimétrico diferencial (ATGD) llevando las muestras escaladamente hasta una temperatura de  $900^\circ\text{C}$ . Así, midiendo el peso inicial de las muestras secas y los pesos de las muestras luego de ser colocadas en el horno a diferentes temperaturas ( $200^\circ\text{C}$ ,  $250^\circ\text{C}$ ,  $450^\circ\text{C}$ ,  $550^\circ\text{C}$  y  $900^\circ\text{C}$ ), al restar el peso anterior al peso medido para cada temperatura mencionada, se obtiene una diferencia de peso que corresponde al agua estructural eliminada de las esmectitas, la goethita y la caolinita al ser colocadas a  $200^\circ\text{C}$ ,  $250^\circ\text{C}$ , y  $550^\circ\text{C}$  respectivamente. Así mismo, para el cálculo del contenido carbonático, se utilizó el diferencial de peso obtenido a  $450^\circ\text{C}$  y  $900^\circ\text{C}$ , los cuales corresponden al contenido de  $\text{CO}_2$  eliminado de la materia orgánica y la calcita, al someter el material a las temperaturas mencionadas. El cálculo se realizó de la siguiente forma:

$$W_m = W_{ti} - W_{ts} \quad (15) \quad ; \quad P_p = W_m \times 100 / W_s \quad (16) \quad ; \quad \% M = P_p \times 100 / C \quad (17)$$

Donde:

$W_m$  = diferencial de peso;  $W_{ti}$  = peso temperatura inicial;  $W_{ts}$  = peso temperatura siguiente;  $P_p$  = pérdida de peso de  $\text{H}_2\text{O}$  o  $\text{CO}_2$  al someter la muestra a la temperatura correspondiente;  $W_s$  = peso de muestra seca;  $\% M$  = % de mineral en la muestra;  $C$  = % de (OH) o ( $\text{CO}_2$ ) en la estructura química del mineral analizado (Tabla 7.4)

Tabla 7.4. Porcentaje de óxidos en la estructura química de los minerales analizados.

MINERAL	FÓRMULA QUÍMICA	% DE ÓXIDOS							
		OH	Na <sub>2</sub> O	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>
M	(Na,Ca) <sub>0,3</sub> (Al,Mg) <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> nH <sub>2</sub> O	3,86	1,99	3,60	21,83	17,26	51,46		
K	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	13,96			39,49		46,55		
G	FeO (OH)	10,14						89,86	
C	CaCO <sub>3</sub>			56,03					43,97
A	Na(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )		11,82		19,44		68,74		
N	Na <sub>0,3</sub> (Fe <sup>+3</sup> ) <sub>2</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> nH <sub>2</sub> O	2,85	1,48		32,30		38,07	25,30	
B	Na <sub>0,3</sub> Al <sub>2</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> 2H <sub>2</sub> O	3,14	1,62		53,33		41,91		

M = Montmorillonita; K = Caolinita; G = Goethita; A = Albita; N = Nontronita; B = Beidelita; C = Calcita

Posteriormente, los % de cuarzo y de Albita fueron calculados mediante una semi-cuantificación obtenida del análisis de DRX, tomando en consideración tanto la intensidad de los picos correspondientes a 3,34 Å (cuarzo) y 3,20 Å (albita), como el poder reflectante de 6 (cuarzo) y 2 (albita), definido por MARTÍN *et al.* (1971).

Finalmente, la relación porcentual entre estos minerales se calcula según las siguientes ecuaciones:

$$M = I / PR \quad (18) \quad ; \quad \% M = M \times 100 / \sum M \quad (19)$$

Donde:

M = mineral; I = intensidad del pico; PR = poder reflectante

Luego del cálculo mineralógico realizado por ATGD, el porcentaje restante se distribuye entre el cuarzo y la albita en la proporción obtenida por las ecuaciones 18 y 19. Los resultados alcanzados se muestran en la tabla 7.5.

Tabla 7.5. Porcentaje en peso de los principales minerales en las muestras analizadas.

MUESTRA	COMPOSICIÓN MINERALÓGICA (SEMI-CUANTIFICACIÓN) (%)					
	Cuarzo*	Albita*	Esmectitas	Caolinita	Goethita	Calcita
M-0	15,17	4,10	71,4	0,3	0,2	8,9
M-0/2	10,92	2,95	63,2	3,7	13,4	5,8
M-1	15,10	9,48	44,6	19,6	8,1	3,2
M-2	15,67	10,67	46,8	15,8	7,4	3,6
M-3	14,66	10,15	46,9	16,5	8,6	3,1
M-8	16,48 (**)	11,41 (**)	46,9	13,0	8,3	3,9
M-17	11,61	10,20	48,7	16,6	9,7	3,2
M-29	19,69	14,42	42,8	11,9	6,6	4,6
M-40	15,93	13,10	44,7	17,4	7,6	1,3
M-56	15,74	13,10	45,5	15,8	6,6	3,2
M-57	22,00 (**)	17,38 (**)	35,6	16,7	6,1	2,2
M-58	22,71	17,94	36,1	15,1	5,4	2,8
M-64	17,11	13,29	44,1	14,4	6,8	4,3
M-69	14,22	9,24	45,5	17,3	7,8	5,9
M-73	17,85	13,98	47,1	10,6	5,9	4,6
M-75	20,28	15,08	45,9	9,0	4,6	5,2
M-76	13,55	11,53	45,4	18,4	8,7	2,5
M-79	17,67	13,26	45,3	11,7	8,0	4,2

\* Resultados obtenidos a partir de cálculos realizados mediante datos de DRX.

\*\* Resultados obtenidos a partir de correlaciones con muestras similares (no se realizó DRX).

Tomando en consideración que uno de los principales objetivos del presente trabajo de investigación, comprende el estudio del intercambio catiónico dentro de las arcillas expansivas sometidas a diferentes condiciones físico-químicas, una vez realizada la cuantificación tanto elemental como mineralógica, se correlacionó la mineralogía identificada con los elementos químicos de mayor interés contenidos en ella. De esta forma, se puede obtener una relación entre los minerales de arcilla y los cationes intercambiables asociados a cada uno de ellos.

En este orden de ideas, la figura 7.9 muestra la correlación obtenida entre el  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y la goethita, evidenciándose una relación directamente proporcional entre ellos, indicando que la mayor parte del  $\text{Fe}^{+3}$  se encuentra contenido en dicho óxido hidratado. No obstante, considerando que la nontronita contiene

cantidades de  $\text{Fe}^{+3}$  en su estructura cristalina, cierto porcentaje de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  debe estar contenido en este mineral.

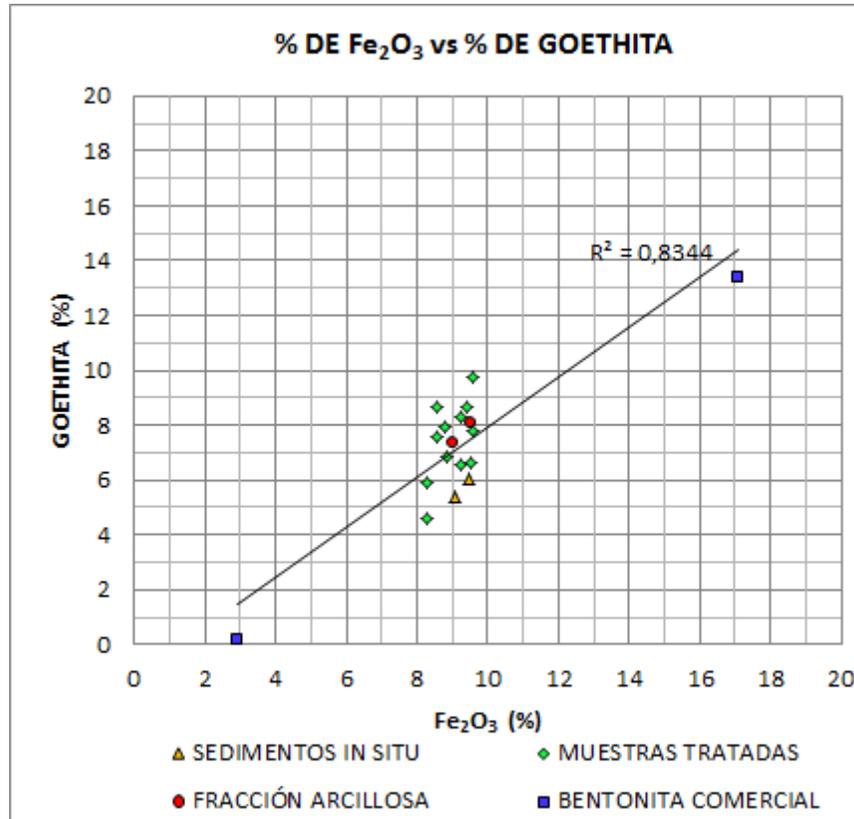


Figura 7.9. Comparación del % de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y el % de goethita.

Con la finalidad de conocer el porcentaje de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  que se encuentra en la goethita, y de esta forma asociar el contenido restante como parte de la nontronita, se realizó el cálculo correspondiente mediante las siguientes ecuaciones:

$$\% P_m = M \times C / 100 \quad (18) \quad ; \quad \% M = P_o \times 100 / C \quad (19)$$

Donde:

$P_m$  % de óxido como parte del mineral;  $M$  = % de mineral en la muestra

$P_o$  = % de óxido medido por FRX;  $C$  = % de óxido en la estructura química del mineral analizado

En este caso, al  $P_0$  se le restó el % de  $Fe_2O_3$  requerido para formar el % de goethita obtenido. Los resultados se muestran en la tabla 7.6.

Tabla 7.6. Porcentaje en peso de  $Fe_2O_3$  en la goethita y nontronita.

MUESTRA	% $Fe_2O_3$		% $Fe_2O_3$ en Nontronita	% de Nontronita *	% de Montmorillonita **
	Goethita	FRX			
M-0	0,15	2,927	-	-	-
M-0/2	12,05	17,069	-	-	-
M-1	7,28	9,547	2,265	8,95	35,6
M-2	6,64	9,006	2,367	9,36	37,5
M-3	7,76	9,434	1,678	6,63	40,3
M-8	7,43	9,235	1,800	7,12	39,8
M-17	8,73	9,600	0,867	3,43	45,3
M-29	5,92	9,213	3,297	13,03	29,8
M-40	6,82	8,572	1,750	6,92	37,8
M-56	5,96	9,544	3,582	14,16	31,4
M-57	5,46	9,468	4,012	15,86	19,7
M-58	4,83	9,068	4,237	16,75	19,4
M-64	6,14	8,866	2,731	10,79	33,3
M-69	7,02	9,570	2,554	10,10	35,4
M-73	5,28	8,271	2,996	11,84	35,2
M-75	4,14	8,255	4,118	16,28	29,6
M-76	7,81	8,558	0,749	2,96	42,5
M-79	7,15	8,763	1,614	6,38	38,9

\* % en peso de nontronita calculada a partir del % de  $Fe_2O_3$  no contenido en la goethita.

\*\* Resultado calculado a partir de la diferencia entre el % de esmectitas obtenido por ATGD y el % de nontronita.

De esta forma, obteniendo el porcentaje de nontronita a través del porcentaje de  $Fe_2O_3$ , se puede cuantificar también la cantidad de montmorillonita que contienen las muestras analizadas, restándole al % de esmectitas obtenido del ATGD el porcentaje de nontronita mostrado en la tabla 7.9.

En cuanto a la relación de los demás elementos con las especies mineralógicas, la identificación resulta ciertamente compleja, pues ninguno muestra una relación directamente proporcional con algún mineral en específico.

En el caso del MgO, tomando en consideración los minerales identificados, el mismo sólo se encuentra dentro de la composición química de las arcillas expansivas. La figura 7.10 muestra la relación existente entre el porcentaje de

óxido de magnesio y el porcentaje de esmectitas, donde se evidencia que no existe una correlación clara entre ellos, lo que pudiera indicar que este elemento se encuentra en mayor proporción como catión de cambio dentro de las arcillas. No obstante, sabiendo que en la formación de la montmorillonita, el  $Mg^{+2}$  puede sustituir hasta una sexta parte del  $Al^{+3}$  en la capa octaédrica, se analizó la relación existente entre estos dos elementos, sin encontrar una relación directa entre el  $Al_2O_3$  y el  $MgO$ .

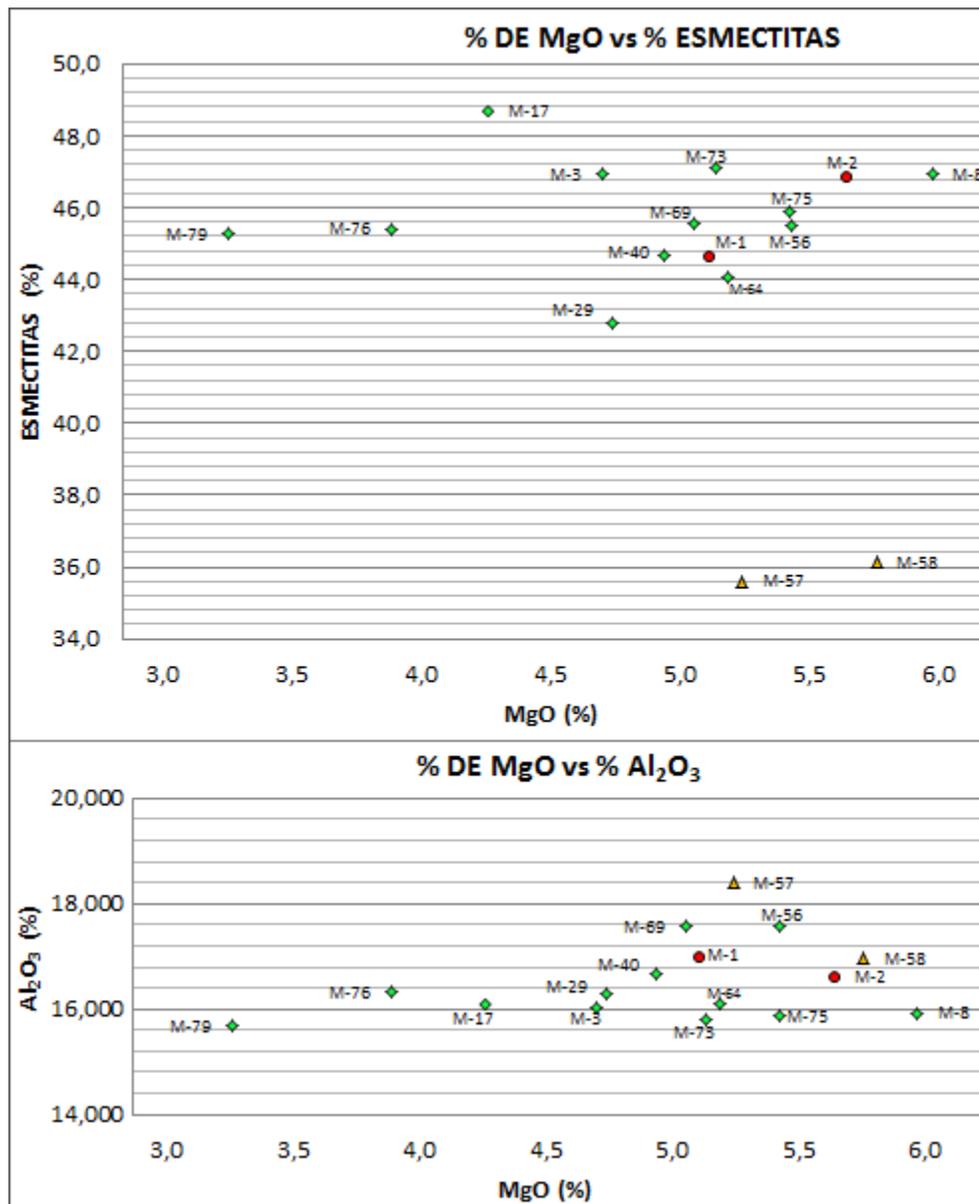


Figura 7.10. Comparación del % de MgO con el % de esmectitas y el % de  $Al_2O_3$ .

En otro orden de ideas, analizando las concentraciones minerales y los porcentajes en peso de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  que se requerirían para obtener el porcentaje albita, caolinita y esmectitas existente, resulta necesaria la sustitución de una parte del  $\text{Al}^{+3}$  por  $\text{Mg}^{+2}$  (Tabla 7.7). Es importante aclarar que para dicho cálculo se requeriría conocer el porcentaje de montmorillonita y nontronita que está presente en la muestra. El problema se presenta porque el ATGD y la semi-cuantificación por DRX no permiten hacerlo, ya que en ambos minerales la estructura colapsa a  $200^\circ\text{C}$  y por ser materiales del mismo grupo con composición química similar y misma estructura cristalina dioctaédrica, poseen picos de intensidades muy cercanos que en muchos casos se solapan entre sí. Es por ello que el porcentaje en peso de estos dos minerales fue calculado a partir del porcentaje de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en la nontronita, tal como se muestra en la tabla 7.6.

Tabla 7.7. Porcentaje en peso de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en la caolinita, albita y esmectitas.

# M	% $\text{Al}_2\text{O}_3$						% MgO	
	Caolinita	Albita	Montmorillonita	Nontronita	Total ( $T_{\text{Al}}$ )	FRX ( $F_{\text{Al}}$ )	$T_{\text{Al}}-F_{\text{Al}}$ *	FRX
M-0	0,11	0,80	15,59	-	16,49	14,09	2,40	3,17
M-0/2	1,46	0,57	13,80	-	15,84	11,83	4,01	5,32
M-1	7,73	1,84	7,78	4,77	22,13	16,95	5,18	5,11
M-2	6,26	2,07	8,18	4,99	21,50	16,61	4,89	5,64
M-3	6,51	1,97	8,80	3,54	20,82	16,03	4,79	4,70
M-8	5,14	2,22	8,69	3,80	19,85	15,93	3,92	5,97
M-17	6,56	1,98	9,88	1,83	20,26	16,09	4,16	4,26
M-29	4,69	2,80	6,50	6,95	20,94	16,27	4,66	4,74
M-40	6,85	2,55	8,25	3,69	21,34	16,68	4,66	4,94
M-56	6,23	2,55	6,85	7,55	23,18	17,56	5,62	5,43
M-57	6,59	3,38	4,31	8,46	22,74	18,39	4,35	5,24
M-58	5,95	3,49	4,23	8,93	22,60	16,98	5,62	5,76
M-64	5,69	2,58	7,26	5,76	21,29	16,12	5,18	5,19
M-69	6,82	1,80	7,74	5,39	21,74	17,58	4,16	5,05
M-73	4,17	2,72	7,69	6,32	20,90	15,81	5,09	5,14
M-75	3,55	2,93	6,47	8,68	21,63	15,88	5,74	5,42
M-76	7,25	2,24	9,27	1,58	20,34	16,31	4,02	3,89
M-79	4,62	2,58	8,49	3,40	19,09	15,68	3,41	3,25

\* % en peso de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  que tendría que ser sustituido por MgO para mantener el equilibrio químico.

De esta forma, se puede observar como existe un déficit en el porcentaje de  $\text{Al}^{+3}$  en la estructura cristalina de las esmectitas, incluso sin tomar en consideración que en la formación de estos minerales puede existir reemplazo

del  $\text{Si}^{+4}$  por  $\text{Al}^{+3}$ . De esta manera, el  $\text{Al}^{+3}$  debe ser reemplazado por  $\text{Mg}^{+2}$  principalmente generando una carga negativa que es neutralizada por la entrada de cationes libres como  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{K}^+$  o incluso  $\text{Mg}^{+2}$ , en posiciones entre las capas para mantener el equilibrio en la estructura química de las arcillas expansivas.

Así mismo, al correlacionar el porcentaje de óxido de aluminio necesario para obtener los porcentajes de caolinita, albita, montmorillonita y nontronita reflejados en la tabla 7.7, con el porcentaje de óxido de magnesio resultante de la FRX, se observa una correlación entre ellos, indicando que la presencia de  $\text{Mg}^{+2}$  en las muestras está controlada por el proceso de intercambio catiónico con el  $\text{Al}^{+3}$  dentro de la estructura de las arcillas expansivas (Fig. 7.11).

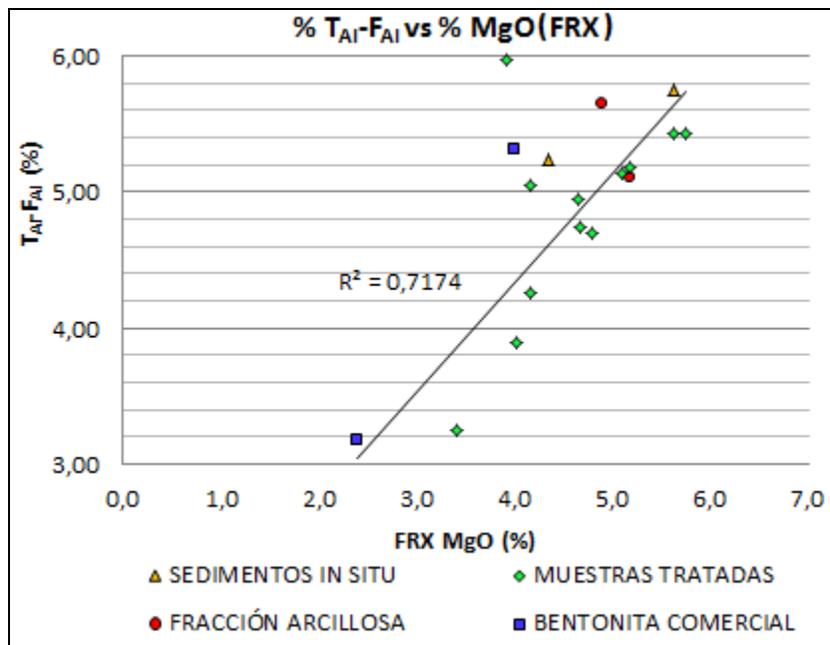


Figura 7.11. Comparación del % de MgO obtenido por FRX con el % de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sustituido.

En cuanto al  $\text{Ca}^{+2}$ , el mismo se encuentra presente principalmente en el carbonato (calcita) y como catión intercapa dentro de la montmorillonita. La figura 7.12 permite interpretar que a pesar de que porcentaje de  $\text{CaO}$  muestra cierta correlación con el porcentaje de calcita, no se evidencia una relación

directamente proporcional entre ellos, por lo que el  $\text{Ca}^{+2}$  también debe estar presente en las esmectitas como catión de cambio.

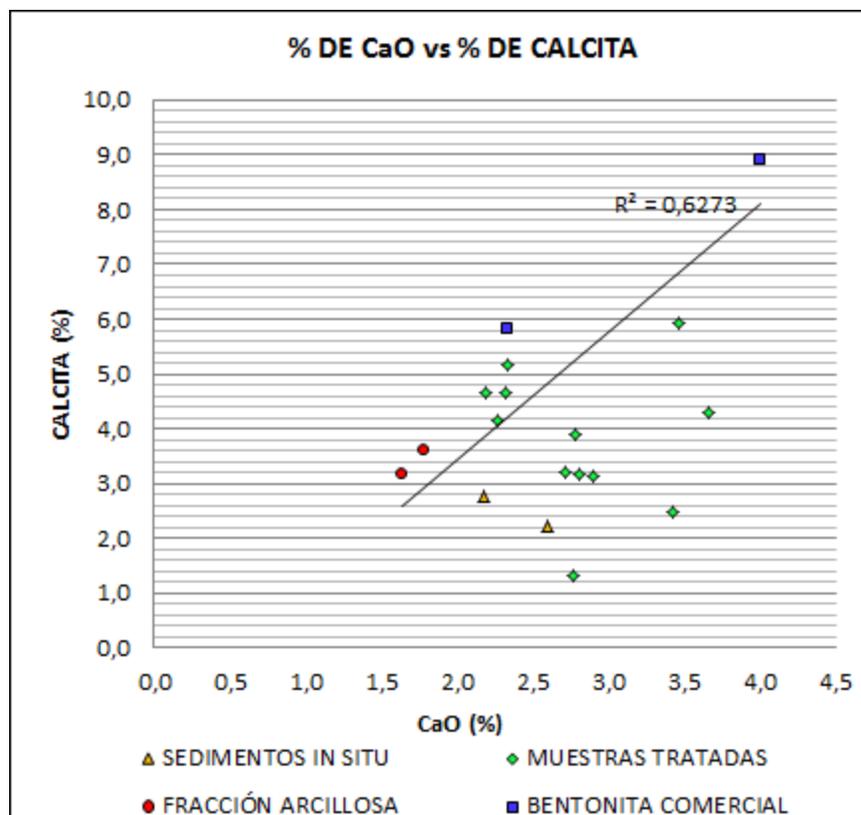


Figura 7.12. Comparación del % de CaO obtenido por FRX - AAS con el porcentaje de carbonato obtenido por ATGD.

En la tabla 7.8 se muestra el % de CaO que se encuentra en la estructura de la calcita, lo cual indica que la diferencia existente con respecto al porcentaje de CaO obtenido de los ensayos de FRX y AAS debe estar presente como catión intercapa dentro de la estructura de las esmectitas, principalmente en la montmorillonita.

Así mismo, en la figura 7.13 se evidencia como varían los porcentajes de CaO y  $\text{Na}_2\text{O}$  en las muestras tratadas, lo que responde al intercambio catiónico entre  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Na}^+$ , principalmente en las muestras que fueron tratadas con NaCl y/o  $\text{NaHCO}_3$  en combinación con NaOH.

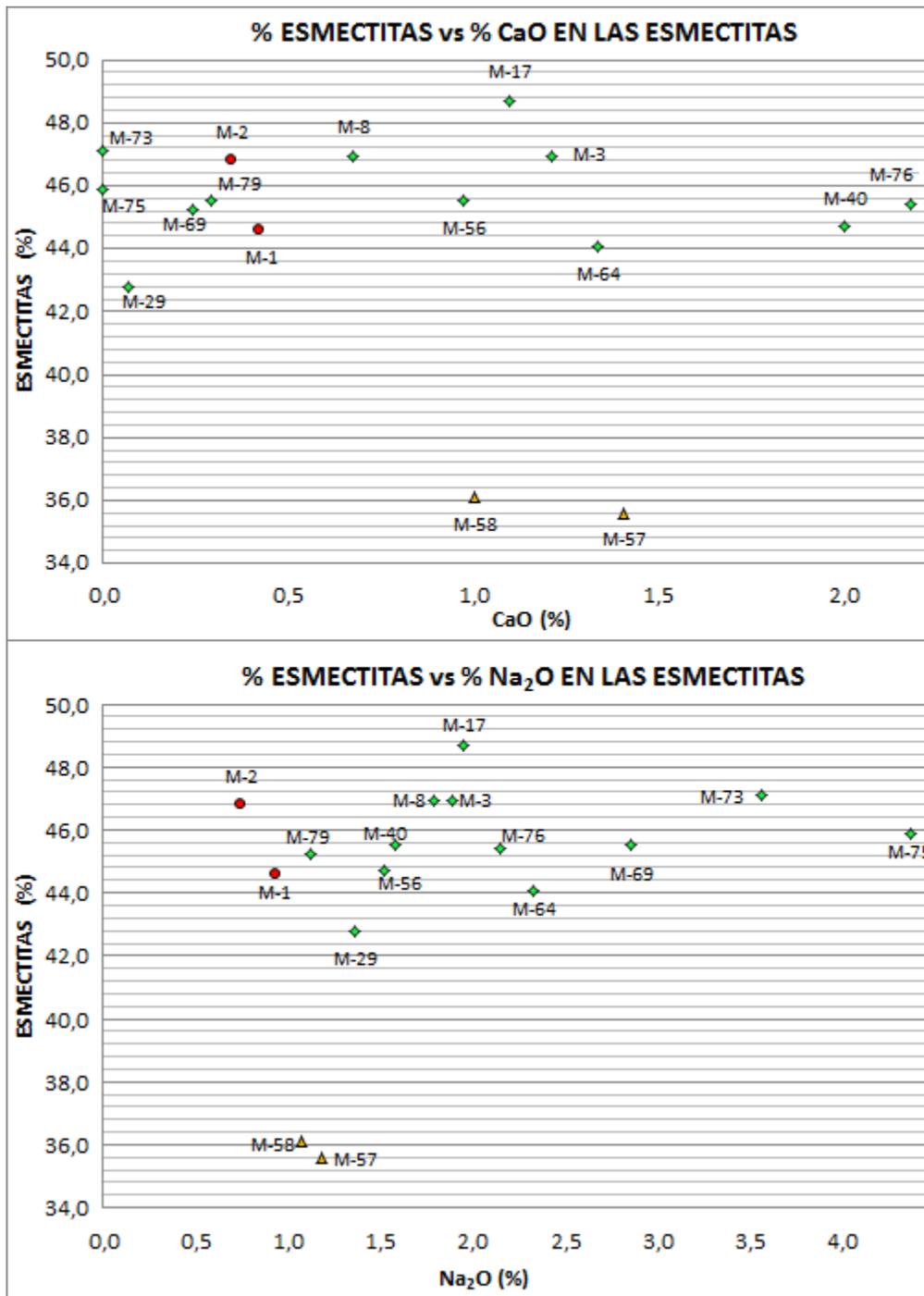


Figura 7.13. Comparación de los % de Na<sub>2</sub>O y de CaO en las esmeectitas.

En cuanto al Na<sub>2</sub>O, la figura 7.14 muestra que no existe una relación proporcional con la albita, lo cual responde no solo a la presencia del Na<sup>+</sup> como catión de cambio dentro de las esmeectitas, sino también al poco porcentaje de

Na<sub>2</sub>O asociado con la albita en relación al porcentaje de Na<sub>2</sub>O medido por AAS.

Tabla 7.8. Porcentaje en peso de CaO en la calcita y esmectitas.

Muestra	% CaO				% de CaO en esmectitas
	Calcita	FRX	AAS	Promedio	
M-0	3,91	4,289	4,001	4,145	0,23
M-0/2	-	1,990	2,336	2,163	-
M-1	1,39	2,740	1,640	2,190	0,80
M-2	1,59	2,969	1,777	2,373	0,78
M-3	1,38	3,044	2,899	2,972	1,59
M-8	1,71	2,922	2,783	2,852	1,14
M-17	1,39	2,942	2,802	2,872	1,48
M-29	2,04	3,025	2,319	2,672	0,63
M-40	0,58	2,900	2,762	2,831	2,25
M-56	1,42	2,847	2,711	2,779	1,36
M-57	0,99	2,728	2,598	2,663	1,68
M-58	1,22	2,951	2,178	2,564	1,34
M-64	1,89	3,839	3,656	3,748	1,85
M-69	2,61	3,776	3,462	3,619	1,01
M-73	2,10	2,612	2,183	2,398	0,30
M-75	2,67	2,896	2,328	2,612	-0,06
M-76	1,08	3,862	3,424	3,643	2,56
M-79	1,83	2,875	2,270	2,572	0,74

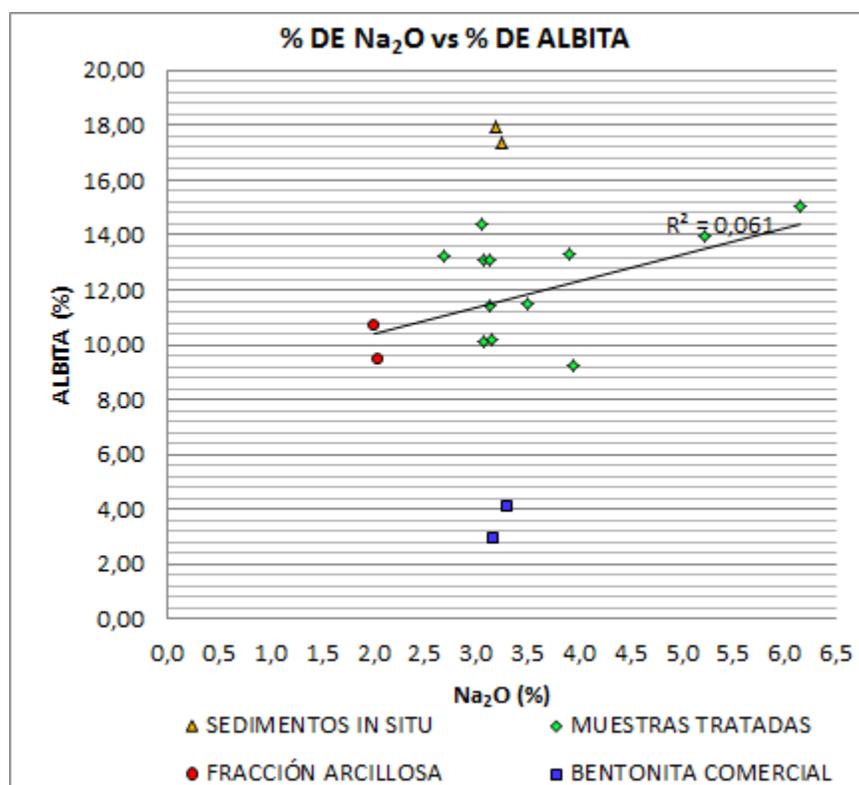


Figura 7.14. Correlación entre el % de Na<sub>2</sub>O y el % de albita en las muestras analizadas.

### **7.3. FACTIBILIDAD FISICO-QUIMICA EN EL USO DE LA ARCILLA TRATADA COMO SUSTITUTA DE LA BENTONITA SÓDICA COMERCIAL**

Desde hace varios años la arcilla ha servido como materia prima en múltiples actividades económicas, al punto que no existen, prácticamente, actividades donde no se le considere o no se le utilice; así por ejemplo en las industrias farmacéuticas, cerámicas, cemento, papel, aceites, plásticos, electrónica, ingeniería etc.

En el campo de la ingeniería las bentonitas se utilizan frecuentemente para cementar fisuras y grietas de rocas, impidiendo que se produzcan derrumbamiento de túneles, excavaciones o pozos petroleros, como un lubricante para el hinchamiento del molde, perforación de pilotes y fundaciones similares. También son usadas en una gran variedad de materiales de construcción incluyendo ladrillos, cemento portland, productos de yeso, caños para cloacas y azulejos.

Dependiendo del uso que se le quiera dar, es precisa la utilización de un tipo específico de arcilla, principalmente en el caso de la caolinita o de las esmectitas. En ciertos casos, resulta necesario, incluso, diferenciar entre las montmorillonitas (bentonita) cálcicas y las sódicas, pues las primeras tienen propiedades absorbentes, pero en el área de sostenimiento de tierras, éstas no exhiben la capacidad de hinchamiento de la bentonita sódica. Así, la diferencia de expansión entre las montmorillonitas saturadas con iones Ca, Mg o Na radica en el grado de hidratación del complejo de adsorción que conforma la combinación de las arcillas con estos iones, donde los fenómenos de doble capa son más fuertes cuando predomina el ion Na que en presencia de iones de mayor valencia como el Ca o Mg.

En Venezuela existen arcillas expansivas compuestas principalmente por montmorillonitas cálcicas o cálcico-sódicas, como producto de la meteorización de los feldespatos, específicamente de las plagioclasas como lo indica YAALON (1959), el cual sugiere que si se representa la montmorillonita por

$Al_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot xH_2O$ , sin considerar la substitución isomórfica y cationes de intercambio, se podría escribir una reacción de meteorización en la siguiente forma:



Donde:

(\*) designa las etapas intermedias, que implican descomposición continua seguidas por la reconstitución de las nuevas estructuras minerales.

No obstante, como la montmorillonita y otros minerales 2:1 requieren la presencia de Mg o Fe, por substitución parcial de Si y Al en su red estructural, no pueden formarse a partir de feldespatos puros. En todas las reacciones formuladas, el concepto implícito es que el mineral primario (en este caso feldespato) se descompone íntegramente, y los elementos se reorganizan, en un orden tal que se forma una estructura neogénica de filosilicato (BESOAIN, 1985). De aquí, que la composición química depende tanto del material parental como del ambiente de formación, entre otros factores.

Tomando en consideración la importancia que conlleva el catión de cambio entre las capas T-O-T de las arcillas en el comportamiento expansivo de las mismas, se realiza una comparación físico-química del material estudiado, luego del tratamiento realizado versus el comportamiento y composición de las bentonitas analizadas (Tabla 7.9).

De esta forma, los resultados obtenidos de los ensayos realizados en las muestras tratadas, evidencian una activación importante de la fracción coloidal presente en el sedimento extraído. No obstante, existen ciertas propiedades que siguen estando sustancialmente inferiores a los valores arrojados por las bentonitas comerciales.

Así, al evaluar la fracción coloidal de las arcillas tratadas a través de parámetros como la superficie específica o el índice de nocividad, se nota una importante activación de los coloides presentes, alcanzando valores similares a los obtenidos para las bentonitas analizadas. No obstante, una evaluación del límite líquido muestra que, gran parte del sedimento tratado no está

absorbiendo la cantidad de agua que se requiere para alcanzar los valores mínimos necesarios y lograr un máximo nivel de expansión en las arcillas resultantes.

Tabla 7.9. Comparación de parámetros físico-químicos obtenidos de muestras tratadas y bentonitas comerciales.

DESCRIP.	% LL	% LP	% IP	% C	VA (g/100g)	IN	AC	% EXP	SE (m <sup>2</sup> /g)	% EN PESO DE MINERALES					
										ESM	KAO	QZ	ALB	CAL	GOE
BENTON. CANAD.	608	51	557	53	24,00	45	10,5	212	1108	71,4	0,3	15,2	4,1	8,9	0,2
BENTON. ITALIANA	504	50	454	81	33,00	41	5,6	188	997	63,2	3,7	10,9	2,6	5,8	13,8
ARCILLA TRATADA VALOR MÁXIMO	247	58	209	44	16,15	38	4,8	115	940	48,7	18,4	20,3	15,1	5,9	9,7
ARCILLA TRATADA VALOR PROM.	169	33	135	43	12,99	30	3,2	74	739	45,7	14,4	16,2	12,4	3,8	7,4
ARCILLA TRATADA VALOR MÍNIMO	132	17	106	42	11,00	25	2,5	51	612	42,8	9,0	11,6	9,2	1,3	4,6

C = Coloide; ESM = Esmeclita; KAO = Caolinita; QZ = Cuarzo; ALB = Albita; CAL = Calcita; GOE = Goethita

Esto se corrobora mediante el ensayo de expansión libre realizado, donde se evidencia que, a pesar de lograr valores que superan altamente el porcentaje de expansión original para al sedimento in situ, los mismos alcanzan apenas un 60% del hinchamiento resultante en las bentonitas comerciales.

Analizando los resultados en conjunto se puede inferir que a pesar de que existe una activación importante de la fracción coloidal potencialmente expansiva, el sedimento total está compuesto por un porcentaje de material inerte (no expansivo) que no puede ser activado a través del tratamiento realizado. Esto se corrobora al comparar los porcentajes de esmeclitas vs minerales no expansivos dentro de los que se encuentra la caolinita (Tabla 7.10), la cual a pesar de pertenecer a la clase de los filosilicatos, específicamente al grupo de las arcillas, son, en esencia, silicatos aluminicos hidratados que se hacen plásticos al ser mezclados con algo de agua, dicho

mineral no comparte las propiedades expansivas de las montmorillonitas debido a su baja capacidad de intercambio catiónico.

Tomando en consideración lo antes mencionado, resultaría interesante ejecutar el tratamiento propuesto en arcillas que contengan un mayor porcentaje de montmorillonitas ( $> 60\%$ ) y un menor % de caolinita ( $< 5\%$ ) en comparación con los sedimentos analizados en el presente trabajo.

De esta manera, al estudiar la composición mineralógica promedio para los distintos tipos de suelos ubicados en el territorio nacional, dentro de los que se encuentran, según la clasificación USDA, los ultisoles, inceptisoles, entisoles, aridisoles, alfisoles, vertisoles, histosoles, oxisoles y molisoles, nombrados en orden de abundancia (Fig. 7.1). Por otra parte, según BESOAIN (1985) se pueden encontrar arcillas expansivas en varios de ellos. No obstante, el tipo de suelo que por excelencia contiene la mayor cantidad de arcillas expansivas son los vertisoles, lo cual representa una característica importante de estos materiales, donde el porcentaje de montmorillonita se encuentra comúnmente entre 40 y 60%, pero en casos particulares puede llegar a un 80% (Dudal 1965), esto les permite tener una alta capacidad de retención de humedad.

Así mismo, Butler y Hubble (1977) mencionan que este contenido de arcilla aumenta conforme aumenta la profundidad hacia el subsuelo y BESOAIN (1985), por su parte menciona que las montmorillonitas son minerales comunes en sedimentos, especialmente jóvenes situados cerca de la superficie. Además opina este último en sedimentos muy profundos la estabilidad del mineral es afectada por el gradiente geotérmico y se transforma en otras especies.

La figura 7.15 permite ubicar las zonas donde se ha descrito este tipo de suelo en el país, mientras que la tabla 7.10 detalla las localidades y área que estas abarcan.

Tabla 7.10. Áreas y localidades donde se reporta la presencia de suelos vertisoles.

ZONA	ESTADO	ÁREA (Km <sup>2</sup> )	LOCALIDADES
Socopó - Barinas-Río Apure	Barinas	1800	Yaure abajo, La Esmeralda, El Paso, Almorzadero, Mata Azul, Paiva, Boca de Anaro, Paletones, Los Mangos
Santa Bárbara-Boca de Anaro		1750	Buena Vista, Santa Fe, Corozal, Santa Cruz, Mata de Palma, El Paraíso, La Unión, El Cerrito, Roblecito, La Morita, Ojo de Agua, Santa Juana
Guanare	Portuguesa	800	La Aduana, El Guamito, Guache, San Lorenzo, Los Bancos, Maceo, Guayabal, Papelón, Gallardero, Sombrereta
Píritu - Capadare	Falcón	1850	Capadare, San Juan de Los Cayos, San Miguel, El Salto, El Cerrito, Los Boquerones, Casa Ventura, La Vigía, Inglaterra, La Guadalupe, El Arco, La Montaña, El Congal, La Puerta, Píritu, El Vizcaino, Loma Grande, Campechano, Mariscare
Calabozo - San Fernando de Apure-Río Apurito	Guárico	4000	Calabozo, Caujarito, Las Garzas, El Samán; Carutico, Guayoyo, Paso Caimán, Curombo
		4600	Camaguán, La Estación, Santa Bárbara, Altagracia, Jabillal, Tres Esquinas, Cazorla, Guadarrama, Boca del Prado, Santa Rosalía, El Socorro
4750		La Ceiba, Murianga, La Unión, Corozalito, El Caribe, Villa Real, Potrerito, El Socorro, Jácome, El Samán, Buena Vista, Valle de la Pascua, Las Lomas, Agua Blanca, Chaconero, Palma Sola, Las Pitahayas	
2300		Uveral, Taparito, La Aguadita, San Rafael de Laya, Caruto, Buenos Aires, El Guatacaro, Las Palmas, Chupadero	
Camatagua - Altagracia de Orituco - Memo	Aragua Guárico	600	Piloncito, Carrizal, El Médano, Buena Vista, Dos Caminos, Las Peñitas, Memo, El Materal
Boca de Uchire-Clarines-Onoto	Anzoátegui Miranda	2300	Boca de Uchire, Panapo, Agua Caliente, Maracual, Caño Negro, San Miguel, Onoto, El Potrero, San Felipe, Mamonal, San José de Onova, Chaguaramos, Sabana de Uchire, Santa Bárbara, Cambural, El Paradero
Barcelona-Barbacoas	Anzoátegui-Sucre	375	Barcelona, Caicara, Lechería, Pto. Las Cruz, Guanta, Conoma, San Pedro, Santa Fe, El Naranjo, Mochima



Figura 7.15. Distribución geográfica de los Vertisoles en Venezuela.

Así mismo, la figura 7.16 muestra la ubicación de los trabajos previos realizados referentes al estudio de arcillas expansivas en el país y su relación con los distintos tipos de suelos.

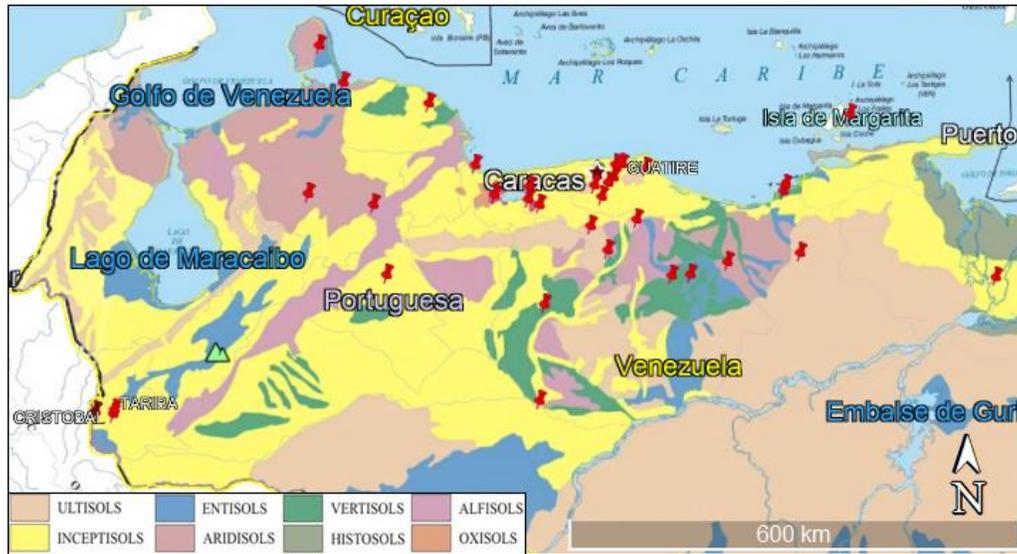


Figura 7.16. Ubicación de trabajos previos reportados en la literatura.

Como se puede apreciar en la figura 7.16, el 67% de los trabajos previos se han realizado en suelos inceptisoles, mientras que en menos del 10% de la información disponible sobre montmorillonitas en Venezuela analizan dichas arcillas expansivas en vertisoles, en los cuales no se detalla la relación mineralógica existente, sin embargo mencionan presiones de expansión y porcentaje de hinchamiento que alcanzan los 14 Kg/cm<sup>2</sup> y 25% respectivamente, lo cual se encuentra entre los valores más altos reportados para arcillas venezolanas.

## **CAPÍTULO VIII**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

En Venezuela existen diversas zonas con arcillas expansivas, las cuales han sido analizadas por diversos autores desde los años 60, mostrando propiedades y características mineralógicas que evidencian suelos muy nocivos, con una alta actividad coloidal y un importante potencial expansivo.

A pesar del estudio realizado, basado en una detallada evaluación de los trabajos previos a nivel nacional, con la finalidad de generar una base de datos actualizada y dirigida a la determinación de las propiedades expansivas de montmorillonitas en diversas localidades del país, la investigación realizada se concentró en la caracterización físico-química de arcillas expansivas ubicadas en Ocumare del Tuy, estado Miranda.

La caracterización física del material fino indica la presencia de arcillas potencialmente expansivas con un porcentaje de coloides que varió entre 24 y 41%, los cuales mostraron un índice de nocividad y una actividad de skempton superiores a 14,5 y 1,0 respectivamente; por lo que el material analizado resultó ser altamente activo y nocivo, proporcionándole al suelo in situ un alto potencial expansivo. Así mismo, la superficie específica, el porcentaje de expansión y los límites de consistencia evidenciaron el predominio de montmorillonitas con un alto grado de plasticidad y una importante capacidad de absorción de agua que permiten el aumento de su volumen hasta en un 26%.

Luego del tratamiento ejecutado, la evaluación física arrojó cambios importantes en comparación con los sedimentos originales, aumentando en más del 80% los valores de límite líquido y superficie específica de los colides. Así mismo, el porcentaje de hinchamiento aumentó hasta en un 100%.

En cuanto a los análisis químicos realizados, a través de la DRX se identificaron los minerales presentes, mientras que el ATGD permitió cuantificarlos en términos de porcentaje, tomando en consideración, en algunos casos, el porcentaje de óxidos presentes en cada uno de ellos y obtenidos a

través de los análisis de FRX y AAS. Así, los porcentajes de minerales presentes corresponden con la siguiente distribución: montmorillonita 34.5%, cuarzo 16.9%, caolinita 15%, albita 12.7%, nontronita 10%, goethita 7.3% y calcita 3.6%; tomando en consideración el promedio obtenido de las muestras analizadas.

En referencia al estudio del intercambio catiónico entre  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Na}^{+}$  en las muestras tratadas, los porcentajes de  $\text{CaO}$  y  $\text{Na}_2\text{O}$  evidenciaron cambios importantes principalmente en aquellas que fueron tratadas con  $\text{NaCl}$  y/o  $\text{NaHCO}_3$  en combinación con  $\text{NaOH}$ , lo que responde a un aumento del pH por encima de 9.7, permitiendo que el ión bicarbonato se convierta en carbonato (cuando fuese necesario) y la precipitación del mismo como  $\text{CaCO}_3$  al combinarse con el  $\text{Ca}^{+2}$  libre.

En cuanto al análisis SEM, la morfología de los granos observados permite sugerir la presencia de nontronita, montmorillonita y caolinita, aunque la forma y disposición de los cristales se ven afectadas por cambios físico-químicos, como resultado de la transformación de plagioclasas en dichos minerales, los cuales van alterando su composición química de acuerdo con la secuencia de meteorización.

Por otro lado, analizando los resultados obtenidos, mediante los ensayos físico-químicos, se puede inferir que a pesar de que existe una activación importante de la fracción coloidal, el material tratado no logra alcanzar los valores obtenidos para las bentonitas comerciales; debido a que el sedimento total está compuesto por un porcentaje de material inerte (no expansivo), incapaz de absorber la cantidad de agua que se requiere para lograr un máximo nivel de expansión en las arcillas resultantes, por lo que no puede ser activado a través del tratamiento realizado.

Esto se debe a la relación entre los porcentajes de esmectitas y minerales no expansivos como el cuarzo, la albita, la calcita, la goethita y la caolinita, siendo esta última un silicato aluminico hidratado que no comparte las propiedades

expansivas de las montmorillonitas debido a su baja capacidad de intercambio catiónico.

De esta manera, se recomienda analizar los cambios que pudiesen ocurrir al aplicar los tratamientos físico-químicos aquí propuestos en arcillas expansivas con un porcentaje de esmectitas dioctaédricas (montmorillonita, beidelita, nontronita) que supere el 60% de porcentaje en peso, en comparación con los minerales no expansivos.

Así mismo, existe una extensa literatura sobre los yacimientos y condiciones de edafogénesis de esmectitas a nivel mundial, haciendo especial énfasis en que estos minerales, en particular la montmorillonita, la beidelita y la nontronita, son muy comunes en los suelos de zonas templadas y semiáridas, principalmente en los vertisoles. Si se considera la extensión que los vertisoles y mollisoles tienen en el mundo, podrá comprenderse la importancia que estos tienen para la explotación de este tipo de arcilla.

Tomando en consideración que en Venezuela el 67% de los trabajos previos, a cerca de arcillas expansivas, se han realizado en suelos inceptisoles, mientras que las pocas investigaciones realizadas sobre suelos vertisoles (Calabozo y Valle de la Pascua) mencionan presiones de expansión y porcentajes de hinchamiento que alcanzan los 14 Kg/cm<sup>2</sup> y 25% respectivamente, resulta recomendable ampliar los estudios en este tipo de suelos y analizar el comportamiento expansivo de los coloides activados en arcillas expansivas provenientes de vertisoles.

No obstante, tomando en consideración la importante activación de los coloides lograda con el método propuesto, se recomienda realizar pruebas piloto para evaluar y/o validar la utilidad de las arcillas químicamente tratadas para ser aplicadas como una alternativa de la bentonita comercial en el campo de la ingeniería.

## CAPÍTULO IX

### BIBLIOGRAFÍA

- ABALLE, M., LÓPEZ RUIZ, J., BADÍA, J. M. Y ADEVA P. 1996. Microscopía Electrónica de Barido y Microanálisis por Rayos X. *Primera edición. Editorial Rueda, S. L. Madrid, España.* 476 p.
- ACOSTA, A. & SALVATIERRA, J., 1976. Influencia del método de compactación sobre suelos arcillosos. *Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela.* 92 p.
- AGUILAR, I. & CARABALLO, E., 2007. Caracterización geoquímica de los abanicos aluviales del Valle de Caracas a partir de los pozos Sebucán, los Chorros y Parque del este. *Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela.* 138- 139 p.
- AMOS, M. & WILLIS, J., 1966. Use of high-temperature pre-mixed flames in atomic absorption spectroscopy. *Spectrochimica, Acta, Volume 22, Issue 7,* pp 1325-1343.
- ARANCIBIA, C., 2003. Arcillas expansivas: Comportamiento, identificación y su correlación mediante ensayos de fácil ejecución. Tesis para optar al título de consultor civil. *Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Escuela de Construcción Civil, Universidad Austral de Chile. Cap. IV.* p 1-22.
- ARIAS, I. 1999. Estudio de minerales de arcilla presentes en muestras de sedimentos superficiales y núcleos de la fachada atlántica venezolana. *Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela.*
- AUDEMARD, F., SINGER, A. & SOULAS, J., 2006. Quaternary faults and stress regime of Venezuela. *Revista de la Asociación Geológica Argentina 61 (4),* p 480-491.
- BAQUERO, P., 2010. Estudio geológico-geotécnico del subsuelo de una zona ubicada entre las poblaciones de Tucupido, Municipio José Felix Rivas, y Tacalito, Municipio Pedro Zaraza, correspondiente a un sector del eje ferroviario de los llanos, Edo. Guárico. Venezuela. *Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela,* p 164.
- BARBIERO, J., 1999. Análisis de cargas y deformaciones en la construcción del túnel Pitahaya del ferrocarril Caracas-Cúa en arcillas expansivas. *Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela.*
- BARITTO, I., 2003. Caracterización química de muestras de sedimentos superficiales y de núcleos de la fachada Atlántica Venezolana. *Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero, inédito.* 773 p.
- BARRETO, J., 2010. Caracterización geológica de la cantera Mume ubicada en el municipio Cristobal Rojas de los Valles del Tuy estado Miranda. *Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela,* p 24.

- BARRIENTOS, C. & TOVAR, L., 1975. Los suelos expansivos como soporte de pavimentos. *Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela*. 95 p.
- BASTIDAS, J., RANGEL, J. & ZAMBRANO, J., 1987. Relación entre la presión de expansión de los suelos de Coro y la superficie específica de los coloides. Método Azul de Metileno. *Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela*. 142 p.
- BAZAN, A. & VERA, J., 1999. Estudio de las arcillas expansivas en el Estado Aragua. *Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela*, p 266.
- BECK, C., 1985. La chaîne Caraïbe au merideien de Caracas: geologie, tectogenese, place dans l'evolution geodynamique Mesozoique-Cenozoique des Caraïbes Meridionales. *L'Universite des Sciences et Techniques de Lille, Tesis de doctorado de estado*, 462 p.
- BERMÚDEZ, P. J., 1966. Consideraciones sobre los sedimentos del Mioceno Medio al Reciente de las costas central y oriental de Venezuela. Primera Parte: *Bol. Geol.*, 7(14): 333-412.
- BERTIN, E., 1975. *Principles and practice of x-ray spectrometric analysis*. 2da. Edición. Plenum Press Eds., New York-London, 1079 p.
- BESOAIN, E., 1985. *Mineralogía de arcillas de suelos*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, IICA. Serie de libros y materiales educativos, No. 60. ISBN 92-9039-067-0. San José, Costa Rica, 1205 p.
- BEUTELSPACHER, H. & VAN DER MAREL, H., 1968. *Atlas of electron microscopy of clay minerals and their admixtures*. Amsterdam, Elsevier, 333 p.
- BOHOR, B. & HUGUES, R., 1971. Scanning electron microscopy of clays and clay minerals. *Clays and Clay Minerals, Vol. 19. Pergamon Press. Printed in Great Britain*, pp. 49-54.
- BRUCE, C. & HANNAFORD, P., 1971. On the widths of atomic resonance lines from hollow-cathode lamps. *Spectrochimica, acta Part B: Atomic Spectroscopy, Volume 26, Issue 4*, pp 207-235.
- BRUZUAL, J., 1976. Estudio geológico-geotécnico sobre arcillas dispersivas en la zona del canal B4-D del sistema de riego del Río Guárico. *Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela*, p 58.
- BUTLER, B. & HUBBLE, G., 1977. In Soil factors in crop production in a semi-arid environments. eds. *J.S. Russell and E.L. Greacen, Univ. Queensland Press, St. Lucia, Qd.*, Australia, pp. 9-32.
- CADENA, A., 2013. Estudio químico de la presencia de montmorillonita en arcillas de la cuenca sedimentaria miocénica de Loja mediante técnicas de espectroscopia molecular. *Trabajo Especial de Grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador*, p 123.
- CAHN, R., 2001. The Coming of Materials Science. *Pergamon materials series, volume 5 Elsevier Science Ltd, Oxford, UK*, pp 213-249.
- CAMPANAC, R., 1981. La nocivité des fines argileuses au regard des performances d'un enrobé à chaud. *Bulletin de Liaison des Laboratoires de Ponts et Chaussées, 111*, pp 53-60.

- CAMPOSANO, L. & MARTÍNEZ, N., 2000. Caracterización química y radiométrica de secciones estratigráficas de las formaciones Barco y Mirador, San Pedro del Río, estado Táchira. *Geos (Caracas)* 36:70.
- CARRILLO, C., RODRÍGUEZ, M., DELGADO, R., RIVERO, C. & CASANOVA, E., 2007. Revista de la Sociedad Venezolana de la Ciencia del Suelo y del Instituto de Edafología de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela, *Venesuelos, Volumen 15 ISSN: 1315-0359*.
- CASAGRANDE, A. (1932). Research of Atterberg limits of soils. *Public Roads, Vol. 1, No. 8*, pp. 121–136.
- CHO, G. & SANTAMARINA, C. (2004). Soil behaviour: The role of particle shape. *Ponencia presentada en la Conferencia Skempton. Londres, Reino Unido*.
- CORNELIUS, S. HURLBUT, JR., 1974. *Manual de Mineralogía de Dana*. Editorial Reverté, S. A. Barcelona, España. 653 p.
- CURATOLO, M. LÓPEZ, C. & PÉREZ, R., 1976. Arcillas expansivas. *Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela*, 90 p.
- DAS, B., 2001. Principios de Ingeniería de Cimentaciones. *Editorial Thomson Learning, 4ta Edición, México*, 880 p.
- DAS, B., 2008. *Advanced Soil Mechanics, 4ta Edición. Taylor & Francis Group Publishing, Londres, Reino Unido*.
- D'GREGORIO M. & ESTANGA, S., 1983. Recopilación y actualización de la información básica existente sobre suelos expansivos. *Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela*. 156 p.
- DÍAZ, C., OIGUÍN, M., SOLACHE, M., ALARCÓN, T. & AGUILAR, A., 2002. Caracterización de minerales arcillosos. *XII Congreso Técnico Científico ININ-SUTIN, México*. pp 55-58.
- DÍAZ, J. & RODRIGUEZ, J., 1987. Estimación en el laboratorio de la fricción lateral y rugosidad en pilotes de concreto vaciados en sitio en arcillas expansivas de Mirimire, Estado Falcón. *Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela*. 114 p.
- DOMINGUEZ, C. (1980). Exploración en la planta de gas El Toco en Anaco, Estado Anzoátegui. *Ingeniería de suelos S.A. S. A. MENEVEN*. 16 p.
- DUDAL, R., 1965. Dark Clay Soils of Tropical and Subtropical Regions. *Agric. Dev. Paper 83, FAO, Rome, Italy*. 161 p.
- ERDEY, L., PAULIK, F., & PAULIK, J., 1954. Differential thermogravimetry. *Lond. Nature. Vol. 174, pp 885-886*.
- ESCHEIK, C. & CONTRERAS, D., 2007. Análisis de la influencia de los suelos expansivos sobre el pavimento en la Urbanización Villas Cantevista, Barquisimeto, Edo. Lara. *Trabajo Especial de Grado, Universidad Rafael Urdaneta, p 109*.
- FARRAR, D. & COLEMAN, J., 1967. The correlation of surface area with other properties of nineteen British clays. *Journal of Soil Science, Vol. 18*, pp 118-124.
- FRANCO, E. & MASPOCH, M., 2009. Estructura general de las arcillas utilizadas en la preparación de nanocompuestos poliméricos. *Universidad Politécnica de Catalunya, Ingenierías, Vol. XII, No. 44*, pp 35-41.

- GEBHARDT, H., KING, M. & MEYER, B., 1969. Zur methode der Röntgenfluoreszenzspektral analyse von Böden, pedo-und lithogenen Tonen und Gesteine. *Göttinger Bodenkundliche Berichte, Vol. 8*, pp 63-159.
- GINES, C., GUTIERREZ, R. & RODRIGUEZ, H., 1988. Relación entre la presión de expansión de los suelos de Los Valles del Tuy en estado natural y el valor azul de metileno. Método azul de metileno. *Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela*. 100 p.
- GOLDSTEIN, J., NEWBURY, D., JOY, D., LYMAN, C., ECHLIN, P., LIFSHIN, E., LINDA SAWYER, L. & MICHAEL, J. 2003. Scanning Electrón Microscopy and X-Ray Microanálisis. *Tercera edición. Kluwer Academic/Plenum Publishers ISBN: 0-306-47292-9. New York E.E.U.U.* pp 21-60.
- GONZÁLEZ DE JUANA, C.; ITURRALDE DE AROZENA J. & PICARD X., 1980. *Grupo Guayuta. Código Geológico de Venezuela.* [http:// www. Pdvs.com/léxico/b31w.htm](http://www.Pdvs.com/léxico/b31w.htm). Consulta 20 de febrero de 2010.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L., 2002. Ingeniería Geológica. *Editorial Prentice-Hall, México*, pp. 18-22.
- GONZÁLEZ, L., 2001. Caracterización geoquímica y radiométrica de dos secciones estratigráficas de la Formación La Luna, en el estado Táchira. *Geos (Caracas)* 36:72.
- GRASES, J., (1994). Venezuela, amenazas naturales: terremotos, maremotos, huracanes, Caracas: *Gráficas Monfort*, 162 p.
- GRIM, R. E., 1968. Clay Mineralogy. *Editorial McGraw Hill, México*, p 68.
- GUEVARA, E. & LÓPEZ, C., 2012. Determinación y evaluación de las arcillas expansivas y dispersivas en tres localidades al Norte de Venezuela, Estados Anzoátegui, Falcón y Miranda. *Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela*, 516 p.
- GUZMÁN, J., 2008. Obtención y caracterización de la capa de óxido crecida sobre la aleación Fe22%wtCr5%wtAl. *Tesis de grado para obtener el título de maestro en ciencias, Instituto politécnico Nacional, México*, pp. 20-34.
- HACKLEY P., URBANI, F., KARLSEN, A. & GARRITY, C., 2005. Geologic Shaded Relief Map of Venezuela. *U.S. Geological Survey, Open File Report 2005-1038*.
- HAINES, P., READING, M. & WILBUM, F., 1998. Differential Thermal Analysis and Differential Scanning Calorimetry, in Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry, principles and practice, *Ed. Elsevier Science B.V. Vol 1, Chapter 5.* Amsterdam, The Netherlands, pp 279-361.
- HENDRICKS, S. & FRY, W., 1930. X-ray and microscopic exarnination of soil colloids. *Soil Sci. Vol. 29, pp457-478*.
- HERNÁNDEZ, M., 2006. Estudio geológico y reconocimiento de arcillas expansivas en suelos de una zona al sur de Maracay, estado Aragua. *Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela*, pp. 28-30.

- HOLTZ, W. & GIBBS, H., 1956. "Engineering Properties of Expansive Soils," *Transactions of ASCE, Vol. 121*, pp. 641-679.
- JEFFERSON, I. Y JONES, L., 2012. *Expansive Soils*. ICE Manual of Geotechnical Engineering. Londres: ICE Publishing.
- JONES, W. & WALSH, A., 1960. Hollow-cathode discharges-the construction and characteristics of sealed-off tubes for use as spectroscopic light sources. *Spectrochimica Acta, Volume 16, Issue 3*, pp 249-254.
- KAGAYA, M., IKEYA, T., TANIGAWA, T. & OSAGA, H., 2012. *SmartPlant P&ID Setup Procedure (CONFEEED)*. RPLC Deep Conversion Project. Cap. 4.
- KAHN, H. & SLAVIN, W., 1963. An Atomic Absorption Spectrophotometer. *Applied Optics*, vol. 2, Issue 9, pp. 931-936.
- KELLEY, W., DORE, W. & BROWN, S., 1931. The nature of base-exchange materials of bentonites, soils and zeolites as revealed by chemical and X-ray analysis. *Soil Sci. Vol. 31*, pp 25-45.
- KLANČNIK, G., MEDVED, J. & MRVAR, P., 2010. Differential thermal analysis (DTA) and differential scanning calorimetry (DSC) as a method of material investigation. *RMZ - Materials and Geoenvironment, Vol. 57, No. 1*, pp. 127-142.
- LASANTA, M., 2013. Estudio de adiciones de bismuto en aleaciones zinc-aluminio. *Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid*, pp 9-20.
- LAMBE, T. W., & WHITMAN, R. V., 2004. *Mecánica de suelos*. Instituto tecnológico de Massachusetts, Ed. Limusa S.A. México, D.F.: 582 p.
- LEAL, K. & SCREMIN, L., 2011. Paleotsunamis en el registro geológico de Cumaná, Estado Sucre, Venezuela Oriental. *Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela*, p 204.
- LUNA, S., 2012. Evaluación de la efectividad de agentes quelantes en tratamientos de acidificación en areniscas. *Tesis para optar al Grado Académico de Magister Scientiarum, Universidad del Zulia*, 193 p.
- L'VOV, B., 2005., Fifty Years of Atomic Absorption Spectrometry. *Journal of Analytical Chemistry, Vol. 60, No. 4, 2005*, pp. 382-392
- MACSOTAY, O., 1968-b. Edad y paleoecología de las formaciones Tuy y Siquire a base de su fauna de moluscos fósiles. *Bol. Geol., 10(19)*, pp 297-308.
- MACKENZIE, R., 1964 The thermal investigation of soil clays. VII. In: *Soil Clay Mineralogy. Symposium. Edited by: C.I. Rich and G.W. Kunze. Univ. Of North Carolina Press Chapel Hill*. 330 p.
- MARTÍN, J. M., GALÁN, E. & MARTÍN, J. L., 1971. Il Giacimento di caolino di Jove Lugo – Spagna. *A.I.P.E.A. It., I Congreso nazionale, Italia*, pp 89-100.
- MARTIN, R., BAILEY, S., EBERL, D., FANNING, D., GUGGENHEIM, S., KODAMA, H., PEVEAR, D., ŚRODON, J. & WICKS, F., 1991. Report of the Clay Minerals Society Nomenclature Committee: Revised Classification of Clay Materials. *Clays and Clay Minerals vol. 39; No. 3*, pp 333-335.
- MEDLIN, J., SUHR, N. & BODKIN, J., 1999. Atomic absorption analysis of silicates employing LiBO<sub>2</sub> fusion. *Atomic absorption newsletter, Vol 8, No. 2, USA*, pp 25-35.

- MENDOZA, V., 2005. *Geología de Venezuela: Guayana, Los Andes y Sistema Montañoso del Caribe*. Universidad de Oriente, Tomo 1, Ciudad Bolívar. p 365.
- MOGOLLÓN, L. Y J. COMERMA. 1994. Suelos de Venezuela. *Editorial Exlibris. Caracas, Venezuela*. 313 p.
- MOORE, D. & REYNOLDS, R., 1989. *X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals*. Oxford University Press, 332 p.
- MORA, B., 1974. Fundaciones sobre arcillas expansivas. *Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela*. 98 p.
- NELSON, J.D. & MILLER, D.J., 1992. Expansive soils problems and practice in foundation and pavement engineering, *John Wiley and Sons, NY*.
- NARSILIO, G. & SANTAMARINA, J., 2004. Clasificación de suelos: fundamento físico, prácticas actuales y recomendaciones. *Georgia Institute of Technology. 790 Atlantic Dr., Atlanta, GA. 30332. USA*, 18 p.
- NITON CORPORATION, 1998. *Field Portable X-ray Fluorescence Spectrometry for the Determinations in Soil and Sediment*. USA, 25 p.
- NUHFER, E. & ROMANOSKY, R., 1979. Chemical analysis of fine-grained clastics using LiBO<sub>2</sub>-HCl-HF dissolutions. *Prepared for the United States Department of Energy Morgantown Energy Technology Center Morgantown, West Virginia, by West Virginia Geological and Economic Survey Morgantown, West Virginia under Contract EY-76-C-05-5199METC/CR-79/26, Distribution Category UC-92*. USA, pp 30-39.
- ORTA, M., 2003. Integración geológica de la región Caracas – Charallave – Santa Teresa del Tuy. Distrito Capital y estado Miranda. *Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela*, pp 182-185.
- PADRÓN, A. 2010. Caracterización mineralógica de suelos arcillosos en tres localidades: tramo Elorza-Guasualito, carretera Falcón-Zulia y la Ciudad Universitaria de Caracas, y determinación de sus propiedades de expansión medidas con un dispositivo experimental. *Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela*, p 454.
- PATRONE, J. & PREFUMO, J., 2002. La acción de los suelos expansivos sobre las cimentaciones. Método de prevención y control. Primeras jornadas de ingeniería de cimentaciones. Facultad de Ingeniería de la Universidad de Montevideo, 23 p.
- PEDRO, G., JAMAGNE, M. & BEGON, J., 1969. Mineral interaction and transformation in relation to pedogenesis during the Quaternary. *Soil Sci. 107(6)*, pp 462-469.
- PÉREZ, J., RODRÍGUEZ, P., MAQUEDA, C., VALERO, A., MUDARRA, J. & JIMÉNEZ, R., 1986. Mineralogía de la fracción arcilla de algunos inceptisoles y alfisoles de la provincia de Huelva. *Boletín Sociedad Española de Mineralogía Vol. 9*, pp 89-96.
- PÉREZ, O. & MENDOZA, J., 1998. Sismicidad y tectónica en Venezuela y áreas vecinas. *Física de la Tierra 10*: 87- 110. ISSN: 0214-4547.
- PICARD, X. & PIMENTEL, N., 1968. Geología de la cuenca de Santa Lucía-Ocumare del Tuy. *Bol. Geol., 10(19)*, pp 263-296

- RAMIREZ, E., 2008. Micromecanismos asociados con partículas de segunda fase en el proceso de incubación e iniciación de la corrosión por picadura en la aleación comercial de aluminio CVG-ALCASA 3003. *Trabajo Especial de Grado, Universidad de Oriente*, pp 29-32.
- RAMÍREZ, M., PONS, J. & ALGUACIL, F., 2005. Estudio de la descomposición térmica de los escombros lateríticos de Moa. *Revista Cubana de Química, Vol. XVII, No. 2*, pp. 104-110.
- RIVAS, C. & MUÑOZ, A., 1974. Estabilización física de suelos expansivos. *Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela*. 109 p.
- ROBINSON, J., 1974. Principios de análisis instrumental. *Edit. Acriba, USA*, pp 265-275.
- RODRÍGUEZ, M., 2003. Proyecto de evaluación geológica y geotécnica de la zona Morón-Mirimire, Estado Falcón. *Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela*, p 110.
- RODRÍGUEZ, S., 1986. Recursos minerales de Venezuela. *Bol. Geol., Caracas, 15(27): 1-228*.
- ROLLINSON H., 1993. *Using Geochemical Data: Evaluation, presentation, interpretation*. New York: Longman Scientific & Technical. 352 p.
- SAAVEDRA, J., 1970. Determinación rápida de elementos mayoritarios en rocas silicatadas. *Studia Geológica, I, Universidad de Salamanca, España*, pp 59-71.
- SANTAMARINA, J. C.; KLEIN, K.; WANG, Y. H.; Y PRENCKE, E., 2002, *Specific Surface: Determination and Relevance*. Canadian Geotechnical Journal, vol. 39, No.1, 233-241.
- SCHUBERT, C. & LAREDO, M., 1979. Late Pleistocene and Holocene faulting in Lake Valencia basin, north-central Venezuela. *Geology* 7, p 289-292.
- SCHUBERT, C., (1984). Los terremotos en Venezuela y su origen, *Editorial Cuadernos Lagoven*, 72 p.
- SCREMIN, L., 2013. Elaboración del proyecto de aguas servidas del Desarrollo Habitacional Ciudad Bicentenario, ubicado en la Carretera Nacional La Raíza, Sector El Triplex, Municipio Independencia del Estado Miranda. *Fienca-2013-MINVIH-CB-AS. Venezuela*. 57 p.
- SCREMIN, L., 2013. Proyecto de agua potable (etapas 3, 4 y 5) del Desarrollo Habitacional Ciudad Zamora, ubicado en la Carretera Nacional Cua-Charallave, Municipio Urdaneta del Estado Miranda. *Fienca-2013-MINVIH-CZ-AP. Venezuela*. 63 p.
- SCREMIN, L., 2014. Proyecto de agua potable del Urbanismo Lomas de La Guadalupe, ubicado en Ocumare del Tuy, Estado Miranda. *Fienca-2014-MINVIH-LG-AP. Venezuela*. 73 p.
- SEED, WOODWARD & LUNDGREN, 1962. Prediction of swelling potential for compacted clays. *Journal, Soil Mechanics and Foundations Divison, American Society of Civil Engineers, Vol 88, SM3*, pp. 53-87.
- SKEMPTON, A. W., 1953, The colloidal activity of clays; in, Proceedings of the Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering: Zurich, Switzerland, *ICOSOMEF*, p. 57-61.

- SKOOG, D. & LEARY, J., 1994. Espectrometría atómica basada en la atomización con llama y electrotérmica. *Análisis instrumental, 4<sup>ta</sup> Ed., McGraw-Hill*. pp 227-271.
- SKOOG, D., HOLLER, J. & NIEMAN, T., 2000. Principios de análisis instrumental. *Análisis instrumental, 5<sup>ta</sup> Ed., McGraw-Hill*. pp 864-870.
- SNETCHEN, D., TOWNSEND, F., JOHNSON, L., PATRICK, D. & VEDROS, P., 1975. A review of engineering experiences with expansive soils in highway subgrades". *Federal Highway Administration, Offices of Research and Development, Estados Unidos*, pp 27- 30.
- STEFANO, R. & SALMEN, B., 1994. Estado actual del conocimiento acerca de arcillas expansivas en Venezuela, estudio particular del Edo. Miranda. *Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela*, p 200.
- UGAS, C., 1985. Ensayos de Laboratorio en Mecánica de Suelo. Discusión-Evaluación y Procedimiento. *Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, IMME, 3ra edición, Caracas*.
- VALENTINUZZI, M., 2008. Análisis por fluorescencia de rayos X: Implementación de guías de haces en reflexión total. *Tesis doctoral, Facultad de Matemática, Astronomía y Física., Universidad Nacional de Córdoba, Argentina*, 111 p.
- VEGA, F. J., VERDEJA, G. L., SANCHO, M. J., GARCÍA, I. J., 1993. Caracterización y propiedades de las bentonitas de Amotape (Región Grau-Perú). *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr.* 32, 6, pp 377-383.
- VIJAYVERGIYA, V. & GHAZZALY, O., 1973. Prediction of swelling potential for natural clays. *Proc. 3rd Int. Conf. on expansive soils, Haifa, Israel, Vol.1*, pp 227- 236.
- VILLALOBOS, M., 2013. Aplicaciones y optimizaciones para el análisis y cuantificación de técnicas de espectroscopia de rayos X & nucleares. *Tesis doctoral, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Concepción, Chile*, 117 p.
- VILLANUEVA, M., 2009. Materiales nanocompuestos basados en polietileno y filosilicatos laminares obtenidos por mezclado en fundido. Estructura y propiedades. *Tesis doctoral, Universidad Jaime I, España*, pp 308-339.
- WALSH, A., 1946. A general-purpose source unit for the spectrographic analysis of metals and alloys, *Bulletin of the British Non-Ferrous Metals Society No. 201*, 60 p.
- WALSH, A., 1955. The application of atomic absorption spectra to chemical analysis, *Spectrochimica, acta, Volumen 7*, pp 108-117.
- WALSH, A., 1999. The development of the atomic absorption spectrophotometer, *Spectrochimica, acta Part B: Atomic Spectroscopy, Volume 54, Issue 14*, pp 1943-1952.
- WEBER-ANNELER, H. AND ARNDT, R., 1985. Thermal methods of analysis/differential scanning calorimetry in theory and application. *Thermochimica Acta*, 85(0), pp 271-274.

- 
- WELTON, J., 2003. *SEM Petrology Atlas. AAPG Methods in Exploration Series, 4*. The American Association of Petroleum Geologists Tulsa, Oklahoma 74101, U.S.A. 247 p.
- YAALON, D. H., 1959. Weathering reactions. *Jour. Chemical Education, Vol 36*, pp 73-76.
- ZAMBRANO, F., 1976. Estabilización química de arcillas expansivas provenientes de la carretera Coro - Churuguara. *Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela*, 92 p.
- ZEBALLOS, E., MELERO, P., TRUJILLO, A., MEJÍAS, M. & CERONI, M., 2014. Estudio estructural de arcillas de Chulucanas por difracción de rayos-X y método de Rietveld. *Revista Materia, Vol.19, No.2*, pp 159-170.

## **APÉNDICE A. ENSAYOS DE LABORATORIO PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL**

Desde un punto de vista genético e industrial, las propiedades físico-químicas de una arcilla pueden ser un antecedente de importancia, y establecer el uso o no de dicho material en determinada actividad. En consecuencia, hay dos condiciones indispensables que deben considerarse para caracterizar la arcilla: la segregación no debe ser destructiva y el análisis debe ser completo.

Ensayos como los límites de consistencia, azul de metileno, expansión libre y/o controlada, entre otros, ayudan a definir las propiedades físicas y mecánicas de una arcilla, permitiendo diferenciar arcillas inertes de aquellas potencialmente expansivas.

Así mismo, una adecuada combinación de métodos, como son rayos X, análisis térmico diferencial y fotometría infrarroja con el complemento de análisis elemental, suele ser suficiente para determinar la composición geoquímica del sedimento. De esta manera, si el material arcilloso es de composición simple, incluyendo una o dos especies bien diferenciadas, por lo general no existen problemas de caracterización. No obstante, si la arcilla contiene varios componentes, incluyendo minerales amorfos o interestratificados la interpretación se hace difícil y debe complementarse con otros análisis como microscopía electrónica, difracción de electrones, disolución selectiva u otros.

A continuación, se presentan las planillas de los ensayos realizados para la caracterización completa del material extraído, así como de las muestras tratadas bajo diferentes condiciones físico-químicas, a fin de evaluar los posibles cambios ocurridos o no en el proceso de activación de los coloides presentes.

**A1. PLANILLAS DE CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL ANALIZADO**

ENSAYO DE CARACTERIZACION FISICA												
MUESTRA: M-A PROF (m): 0,5-1,0 OBSERVACIONES: Muestra obtenida de la arcilla in situ												
Distribución granulométrica						Peso específico						
Datos de la muestra			Tamices (mm)	Peso Retenido	% Pasante	Datos de la muestra			Factor corrección por temperatura			
Peso (Ws)	50,00	gr	100	0,00	100	Ws	32,00	gr	Temp	F.K		
Hidrómetro Nº: 152H			76,1	0,00	100	Temperatura			27	°C	22	0,9998
Agua/S. seco	0		38,1	0,00	100	Picómetro (P)Nº			8		23	0,9993
Correc. Defloc	4		19,1	0,00	100	Cap. Picómetro			100	cm <sup>3</sup>	24	0,9991
K	0,0134		9,50	0,00	100	Wp			64,5	gr	25	0,9989
a	1,01		4,75	0,00	100	P + Ws + Agua			183,6	gr	26	0,9986
Distribución granulométrica (%)			2,00	0,00	100	Pa cap. total			164,1	gr	27	0,9983
Grava	Arena	Finos	0,85	0,00	100	P + Ws			96,45	gr	28	0,998
0	3	97	0,425	0,00	100	Gs a 27 °C			2,564		29	0,9977
			0,150	0,70	98,6	Gs a 20 °C			2,56		30	0,9974
			0,075	0,90	96,8	% de Humedad y Peso unitario						
HIDROMETRO						Datos de la muestra			ω	24,9	%	
Tiempo (mm)	Temp	Lectura Hidrom.	Lectura Hidrom. Corregida	Diametro (mm)	L	% Pasante	Wω	71,22	gr	γ <sub>ω</sub>	1,78	gr/cm <sup>3</sup>
2	27	47,0	43	0,0287	9,243	86,86	Ws	57,02	gr	γ <sub>s</sub>	1,42	gr/cm <sup>3</sup>
5	27	44,0	40	0,0186	9,735	80,8	Ws + Parafina			74,78	gr	
15	27	41,0	37	0,0110	10,227	74,74	W en agua + Parafina			30,63	gr	
30	27	38,0	34	0,0080	10,719	68,68	Wparafina			3,56	gr	
60	27	36,0	32	0,0057	11,047	64,64	Volumen Parafina			4,09	cm <sup>3</sup>	
250	27	26,0	22	0,0030	12,687	44,44	Volumen Total			44,15	cm <sup>3</sup>	
1440	27	10,0	6	0,0014	15,311	12,12	Volumen Muestra			40,06	cm <sup>3</sup>	
<b>Clasificación visual:</b> Arcilla de alta plasticidad y consistencia media, color marrón ocre, olor natural y presencia de raíces en posición. Reacción al HCl y al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>												

ENSAYO DE CARACTERIZACION FISICA											
MUESTRA: M-B			OBSERVACIONES: Muestra obtenida de la arcilla in situ								
PROF (m): 1,0-1,5											
Distribución granulométrica						Peso específico					
Datos de la muestra			Tamices (mm)	Peso Retenido	% Pasante	Datos de la muestra			Factor corrección por temperatura		
Peso (Ws)	50,00	gr	100	0,00	100	Ws	31,19	gr	Temp	F.K	
Hidrómetro Nº: 152H			76,1	0,00	100				21	0,9998	
Agua/S. seco	0		38,1	0,00	100	Temperatura	27	°C	22	0,9996	
Correc. Defloc	4		19,1	0,00	100	Picómetro (P)N°	7		23	0,9993	
K	0,0131		9,50	0,00	100	Cap. Picómetro	100	cm <sup>3</sup>	24	0,9991	
a	1,01		4,75	0,00	100	Wp	68,3	gr	25	0,9989	
Distribución granulométrica (%)			2,00	0,00	100	P + Ws + Agua	187,3	gr	26	0,9986	
Grava	Arena	Finos	0,85	0,00	100	P a cap. total	168,0	gr	27	0,9983	
0	9	91	0,425	0,00	100	P + Ws	99,49	gr	28	0,998	
			0,150	1,20	97,6	Gs a 27 °C	2,632		29	0,9977	
			0,075	3,10	91,4	Gs a 20 °C	2,63		30	0,9974	
HIDROMETRO						% de Humedad y Peso unitario					
Tiempo (mm)	Temp	Lectura Hidrom.	Lectura Hidrom. Corregida	Diametro (mm)	L	% Pasante	Datos de la muestra		ω	22,7	%
2	27	39,0	35	0,0301	10,555	70,7	Wω	51,91	gr	γ <sub>ω</sub>	2,14
5	27	35,0	31	0,0196	11,211	62,62	Ws	42,31	gr	γ <sub>s</sub>	1,74
15	27	31,0	27	0,0116	11,867	54,54	Ws + Parafina		53,99	gr	
30	27	28,0	24	0,0084	12,359	48,48	W en agua + Parafina		27,31	gr	
60	27	27,0	23	0,0060	12,523	46,46	Wparafina		2,08	gr	
250	27	23,0	19	0,0030	13,179	38,38	Volumen Parafina		2,39	cm <sup>3</sup>	
1440	27	17,0	13	0,0013	14,163	26,26	Volumen Total		26,68	cm <sup>3</sup>	
								Volumen Muestra		24,29	cm <sup>3</sup>
<b>Clasificación visual:</b> Arcilla de alta plasticidad y consistencia media, color marrón ocre, olor natural y presencia de raíces en posición. Reacción al HCl y al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>											

ENSAYO DE CARACTERIZACION FISICA											
MUESTRA: M-C			OBSERVACIONES: Muestra obtenida de la arcilla in situ								
PROF (m): 1,5-2,0											
Distribución granulométrica						Peso específico					
Datos de la muestra			Tamices (mm)	Peso Retenido	% Pasante	Datos de la muestra			Factor corrección por temperatura		
Peso (Ws)	50,00	gr	100	0,00	100	Ws	33,65	gr	Temp	F.K	
Hidrómetro Nº: 152H			76,1	0,00	100				21	0,9998	
Agua/S. seco	0		38,1	0,00	100	Temperatura	27	°C	22	0,9996	
Correc. Defloc	4		19,1	0,00	100	Picómetro (P)Nº	9		23	0,9993	
K	0,0133		9,50	0,00	100	Cap. Picómetro	100	cm <sup>3</sup>	24	0,9991	
a	1,01		4,75	0,00	100	Wp	67,6	gr	25	0,9989	
Distribución granulométrica (%)			2,00	0,00	100	P + Ws + Agua	187,9	gr	26	0,9986	
Grava	Arena	Finos	0,85	0,00	100	P a cap. total	167,2	gr	27	0,9983	
0	1	99	0,425	0,00	100	P + Ws	101,2	gr	28	0,998	
			0,150	0,00	100	Gs a 27 °C	2,584		29	0,9977	
			0,075	0,30	99,4	Gs a 20 °C	2,58		30	0,9974	
HIDROMETRO						% de Humedad y Peso unitario					
Tiempo (mm)	Temp	Lectura Hidrom.	Lectura Hidrom. Corregida	Diametro (mm)	L	% Pasante	Datos de la muestra		ω	18,7	%
2	27	50,0	46	0,0278	8,751	92,92	Wω	73,01	gr	γ <sub>ω</sub>	1,97
5	27	49,0	45	0,0177	8,915	90,9	Ws	61,51	gr	γ <sub>s</sub>	1,66
15	27	47,0	43	0,0104	9,243	86,86	Ws + Parafina		77,39	gr	
30	27	46,0	42	0,0074	9,407	84,84	W en agua + Parafina		35,31	gr	
60	27	44,0	40	0,0053	9,735	80,8	Wparafina		4,38	gr	
250	27	33,0	29	0,0029	11,539	58,58	Volumen Parafina		5,03	cm <sup>3</sup>	
1440	27	16,0	12	0,0013	14,327	24,24	Volumen Total		42,08	cm <sup>3</sup>	
							Volumen Muestra		37,05	cm <sup>3</sup>	
<b>Clasificación visual:</b> Arcilla de alta plasticidad y consistencia dura, color marrón claro con tonalidades gris verdoso y olor natural. Reacción al HCl y al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>											

ENSAYO DE CARACTERIZACION FISICA													
MUESTRA: M-D			OBSERVACIONES: Muestra obtenida de la arcilla in situ										
PROF (m): 2,0-2,5													
Distribución granulométrica					Peso específico								
Datos de la muestra			Tamices (mm)	Peso Retenido	% Pasante	Datos de la muestra			Factor corrección por temperatura				
Peso (Ws)	50,00	gr	100	0,00	100	Ws	40,94	gr	Temp	F.K			
Hidrómetro Nº: 152H			76,1	0,00	100	Temperatura			27	°C	22	0,9998	
Agua/S. seco	0		38,1	0,00	100	Picómetro (P)N°			11		23	0,9996	
Correc. Defloc	4		19,1	0,00	100	Cap. Picómetro			100	cm <sup>3</sup>	24	0,9993	
K	0,0132		9,50	0,00	100	Wp			48,7	gr	25	0,9991	
a	1,01		4,75	0,00	100	P + Ws + Agua			173,5	gr	26	0,9989	
Distribución granulométrica (%)			2,00	0,00	100	P a cap. total			148,3	gr	27	0,9986	
			0,85	0,00	100	P + Ws			89,63	gr	28	0,9983	
Grava	Arena	Finos	Coloides	0,425	0,00	100	Gs a 27 °C			2,598		29	0,998
0	4	96	31	0,150	1,00	98	Gs a 20 °C			2,59		30	0,9977
				0,075	1,20	95,6	% de Humedad y Peso unitario						
HIDROMETRO						Datos de la muestra		ω	10,9	%			
Tiempo (mm)	Temp	Lectura Hidrom.	Lectura Hidrom. Corregida	Diametro (mm)	L	% Pasante	Wω	53,06	gr	γ <sub>ω</sub>	2,18	gr/cm <sup>3</sup>	
2	27	45,0	41	0,0289	9,571	82,82	Ws	47,84	gr	γ <sub>s</sub>	1,96	gr/cm <sup>3</sup>	
5	27	43,0	39	0,0186	9,899	78,78	Ws + Parafina		56,77	gr			
15	27	40,0	36	0,0110	10,391	72,72	W en agua + Parafina		28,13	gr			
30	27	37,0	33	0,0080	10,883	66,66	Wparafina		3,71	gr			
60	27	34,0	30	0,0058	11,375	60,6	Volumen Parafina		4,26	cm <sup>3</sup>			
250	27	26,0	22	0,0030	12,687	44,44	Volumen Total		28,64	cm <sup>3</sup>			
1440	27	15,0	11	0,0013	14,491	22,22	Volumen Muestra		24,38	cm <sup>3</sup>			
<b>Clasificación visual:</b> Arcilla de alta plasticidad y consistencia media, color marrón ocre, olor natural y presencia de raíces en posición. Reacción al HCl y al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>													

ENSAYO DE CARACTERIZACION FISICA												
MUESTRA: M-O			OBSERVACIONES: Muestra de bentonita comercial de Big Horn Mountains de Wyoming, Canadá									
PROF (m): -												
Distribución granulométrica						Peso específico						
Datos de la muestra			Tamices (mm)	Peso Retenido	% Pasante	Datos de la muestra			Factor corrección por temperatura			
Peso (Ws)	16,00	gr	100	0,00	100	Ws	16,01	gr	Temp	F.K		
Hidrómetro Nº: 152H			76,1	0,00	100				21	0,9998		
Agua/S. seco	0		38,1	0,00	100	Temperatura	27	°C	22	0,9996		
Correc. Defloc	4		19,1	0,00	100	Picómetro (P)N°	31		23	0,9993		
K	0,0127		9,50	0,00	100	Cap. Picómetro	250	cm <sup>3</sup>	24	0,9991		
a	0,99		4,75	0,00	100	Wp	83,5	gr	25	0,9989		
Distribución granulométrica (%)			2,00	0,00	100	P + Ws + Agua	733,2	gr	26	0,9986		
Grava	Arena	Finos	0,85	0,00	100	P a cap. total	723,1	gr	27	0,9983		
0	1	99	0,425	0,00	100	P + Ws	99,49	gr	28	0,998		
			0,150	0,00	100	Gs a 27 °C	2,723		29	0,9977		
			0,075	0,20	98,75	Gs a 20 °C	2,72		30	0,9974		
HIDROMETRO							% de Humedad y Peso unitario					
Tiempo (mm)	Temp	Lectura Hidrom.	Lectura Hidrom. Corregida	Diametro (mm)	L	% Pasante	Datos de la muestra		ω	7,60	%	
2	27	20	16	0,0333	13,671	99	Wω	69,88	gr	γ <sub>ω</sub>	1,51	gr/cm <sup>3</sup>
5	27	20	16	0,0211	13,671	99	Ws	64,94	gr	γ <sub>s</sub>	1,4	gr/cm <sup>3</sup>
15	27	20	16	0,0122	13,671	99	Ws + Parafina		72,00	gr		
30	27	20	16	0,0086	13,671	99	W en agua + Parafina		23,14	gr		
60	27	19	15	0,0061	13,835	92,813	Wparafina		2,12	gr		
250	27	16	12	0,0030	14,327	74,25	Volumen Parafina		2,44	cm <sup>3</sup>		
1440	27	10	6,4	0,0013	15,245	39,6	Volumen Total		48,86	cm <sup>3</sup>		
							Volumen Muestra		46,42	cm <sup>3</sup>		
<b>Clasificación visual:</b> Arcilla de alta plasticidad, color blanco a gris claro, inolora. Reacción fuerte al HCl y reacción leve al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>												

ENSAYO DE CARACTERIZACION FISICA												
MUESTRA: M-0/2			OBSERVACIONES: Muestra comercial de bentonita									
PROF (m): -			Laviosa de origen Italiano (Cerdeña) / Griego (Milos)									
Distribución granulométrica					Peso específico							
Datos de la muestra			Tamices (mm)	Peso Retenido	% Pasante	Datos de la muestra			Factor corrección por temperatura			
Peso (Ws)	50,00	gr	100	0,00	100	Ws	38,82	gr	Temp	F.K		
Hidrómetro Nº: 152H			76,1	0,00	100				21	0,9998		
Agua/S. seco	0		38,1	0,00	100	Temperatura	27	°C	22	0,9996		
Correc. Defloc	4		19,1	0,00	100	Picómetro (P)Nº	42		23	0,9993		
K	0,0129		9,50	0,00	100	Cap. Picómetro	250	cm <sup>3</sup>	24	0,9991		
a	1,01		4,75	0,00	100	Wp	85,5	gr	25	0,9989		
Distribución granulométrica (%)			2,00	0,00	100	P + Ws + Agua	193,2	gr	26	0,9986		
Grava	Arena	Finos	0,85	0,00	100	P a cap. total	168,9	gr	27	0,9983		
0	2	98	0,425	0,00	100	P + Ws	124,3	gr	28	0,998		
			0,150	0,30	99,4	Gs a 27 °C	2,69		29	0,9977		
			0,075	0,90	97,6	Gs a 20 °C	2,69		30	0,9974		
HIDROMETRO						% de Humedad y Peso unitario						
Tiempo (mm)	Temp	Lectura Hidrom.	Lectura Hidrom. Corregida	Diametro (mm)	L	% Pasante	Datos de la muestra		ω	6,30	%	
2	27	53,0	49	0,0261	8,259	98,98	Wω	56,86	gr	γ <sub>ω</sub>	1,4	gr/cm <sup>3</sup>
5	27	53,0	49	0,0165	8,259	98,98	Ws	53,49	gr	γ <sub>s</sub>	1,32	gr/cm <sup>3</sup>
15	27	52,0	48	0,0096	8,423	96,96	Ws + Parafina		59,00	gr		
30	27	50,0	46	0,0069	8,751	92,92	W en agua + Parafina		16,03	gr		
60	27	48,0	44	0,0050	9,079	88,88	Wparafina		2,14	gr		
250	27	46,0	42	0,0025	9,407	84,84	Volumen Parafina		2,46	cm <sup>3</sup>		
1440	27	43,0	39	0,0011	9,899	78,78	Volumen Total		42,97	cm <sup>3</sup>		
							Volumen Muestra		40,51	cm <sup>3</sup>		
<b>Clasificación visual:</b> Arcilla de alta plasticidad, color marrón chocolate y olor natural. Reacción al HCl y reacción leve al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>												

ENSAYO DE CARACTERIZACION FISICA											
MUESTRA: M-1			OBSERVACIONES: Muestra de la arcilla in situ con								
PROF (m): 0,5-1,5			separación de los limos y las arcillas por sedimentación								
Distribución granulométrica						Peso específico					
Datos de la muestra			Tamices (mm)	Peso Retenido	% Pasante	Datos de la muestra			Factor corrección por temperatura		
Peso (Ws)	50,00	gr	100	0,00	100	Ws	50,13	gr	Temp	F.K	
Hidrómetro Nº: 152H			76,1	0,00	100				21	0,9998	
Agua/S. seco	0		38,1	0,00	100	Temperatura	27	°C	22	0,9996	
Correc. Defloc	4		19,1	0,00	100	Picómetro (P)Nº	16		23	0,9993	
K	0,0128		9,50	0,00	100	Cap. Picómetro	250	cm <sup>3</sup>	24	0,9991	
a	0,99		4,75	0,00	100	Wp	89,8	gr	25	0,9989	
Distribución granulométrica (%)			2,00	0,00	100	P + Ws + Agua	370,5	gr	26	0,9986	
			0,85	0,00	100	P a cap. total	338,9	gr	27	0,9983	
Grava	Arena	Finos	Coloides	0,425	0,00	100	P + Ws	139,9	gr	28	0,998
0	1	99	42	0,150	0,20	99,6	Gs a 27 °C	2,7	29	0,9977	
			0,075	0,40	98,8	Gs a 20 °C	2,69		30	0,9974	
HIDROMETRO						% de Humedad y Peso unitario					
Tiempo (mm)	Temp	Lectura Hidrom.	Lectura Hidrom. Corregida	Diametro (mm)	L	% Pasante	Datos de la muestra		ω	14,6	%
2	27	52,0	48	0,0263	8,423	95,04	Wω	65,69	gr	γ <sub>ω</sub>	2,05
5	27	51,0	47	0,0168	8,587	93,06	Ws	57,32	gr	γ <sub>s</sub>	1,79
15	27	50,0	46	0,0098	8,751	91,08	Ws + Parafina		68,90	gr	
30	27	48,0	44	0,0071	9,079	87,12	W en agua + Parafina		33,11	gr	
60	27	44,0	40	0,0052	9,735	79,2	Wparafina		3,21	gr	
250	27	33,0	29	0,0028	11,539	57,42	Volumen Parafina		3,69	cm <sup>3</sup>	
1440	27	18,0	14	0,0013	13,999	27,72	Volumen Total		35,79	cm <sup>3</sup>	
						Volumen Muestra		32,10	cm <sup>3</sup>		
<p>3" 1.5" 3/4" 3/8" #4 #10 #20 #40 #100 #200   Hidrómetro  </p> <p>Tamaño de partículas en mm.</p>											
<p><b>Clasificación visual:</b> Arcilla de alta plasticidad, color marrón ocre y olor natural.</p> <p>Reacción leve al HCl y al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></p>											

ENSAYO DE CARACTERIZACION FISICA												
MUESTRA: M-2			OBSERVACIONES: Muestra de la arcilla in situ con									
PROF (m): 1,5-2,5			separación de los limos y las arcillas por sedimentación									
Distribución granulométrica						Peso específico						
Datos de la muestra			Tamices (mm)	Peso Retenido	% Pasante	Datos de la muestra			Factor corrección por temperatura			
Peso (Ws)	50,00	gr	100	0,00	100	Ws	50,12	gr	Temp	F.K		
Hidrómetro Nº: 152H			76,1	0,00	100				21	0,9998		
Agua/S. seco	0		38,1	0,00	100	Temperatura	27	°C	22	0,9996		
Correc. Defloc	4		19,1	0,00	100	Picómetro (P)Nº	12		23	0,9993		
K	0,0128		9,50	0,00	100	Cap. Picómetro	250	cm <sup>3</sup>	24	0,9991		
a	0,99		4,75	0,00	100	Wp	86,4	gr	25	0,9989		
Distribución granulométrica (%)			2,00	0,00	100	P + Ws + Agua	367,2	gr	26	0,9986		
Grava	Arena	Finos	0,85	0,00	100	P a cap. total	335,5	gr	27	0,9983		
0	1	99	0,425	0,00	100	P + Ws	136,5	gr	28	0,998		
			0,150	0,10	99,8	Gs a 27 °C	2,709		29	0,9977		
			0,075	0,30	99,2	Gs a 20 °C	2,70		30	0,9974		
HIDROMETRO						% de Humedad y Peso unitario						
Tiempo (mm)	Temp	Lectura Hidrom.	Lectura Hidrom. Corregida	Diametro (mm)	L	% Pasante	Datos de la muestra		ω	10,3	%	
2	27	53,0	49	0,0260	8,259	97,02	Wω	74,94	gr	γ <sub>ω</sub>	2,06	gr/cm <sup>3</sup>
5	27	52,0	48	0,0166	8,423	95,04	Ws	67,96	gr	γ <sub>s</sub>	1,86	gr/cm <sup>3</sup>
15	27	51,0	47	0,0097	8,587	93,06	Ws + Parafina		78,14	gr		
30	27	49,0	45	0,0070	8,915	89,1	W en agua + Parafina		38,02	gr		
60	27	46,0	42	0,0051	9,407	83,16	Wparafina		3,20	gr		
250	27	35,0	31	0,0027	11,211	61,38	Volumen Parafina		3,68	cm <sup>3</sup>		
1440	27	17,0	13	0,0013	14,163	25,74	Volumen Total		40,12	cm <sup>3</sup>		
							Volumen Muestra		36,44	cm <sup>3</sup>		
<b>Clasificación visual:</b> Arcilla de alta plasticidad, color marrón marrón claro con tonalidades gris verdoso y olor natural. Reacción al HCl y al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>												

MUESTRA: <u>M-A</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra obtenida de la arcilla in situ</u>								
PROF (m): <u>0,5-1,0</u>									
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	9,8	gr	<p style="font-size: small; text-align: center;">H-A 0.50 A 1.00</p> <p style="font-size: x-small; text-align: center;">5cc 10cc 15cc 20cc</p> <p style="font-size: x-small; text-align: center;">25cc 30cc 35cc 4MIN 2HIN</p> <p style="font-size: x-small; text-align: center;">37cc 1MIN 2MIN 3MIN 4MIN 5MIN</p> <p style="font-size: x-small; text-align: center;">39cc 1HIN 2HIN 3HIN</p> <p style="font-size: x-small; text-align: center;">4MIN 5MIN</p>						
Coloides	24	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R	D	R	D	R				
5	-	4M	+						
10	-	5M	-						
15	-	39	+						
20	-	1M	+						
25	-	2M	+						
30	-	3M	+						
35	+	4M	+						
1M	+	5M	+						
2M	-								
37	+								
1M	+								
2M	+								
3M	+								
V	39	C.C.	V= Volumen consumido de azul de metileno			D	Dosis (cc)		
VA	3,98	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco			R	Reacción		
Mo	0,05	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide			-	Negativo		
IN	16,58		IN= Índice de nocividad de los coloides			+	Positivo		
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+W <sub>s</sub>	Agua	Suelo Seco (W <sub>s</sub> )			
23	97	10,67	21,87	17,09	4,78	6,42	74,51	73,76	71,94
25	66	10,43	21,38	16,79	4,59	6,36	72,19	72,19	
27	54	11,09	22,73	17,97	4,76	6,88	69,25	69,87	
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>								<b>IP</b>	
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ W <sub>s</sub>	Agua	Suelo Seco (W <sub>s</sub> )				
100	34,43	45,71	42,31	3,40	7,88	43,15	43,15	37,59	34,35
24	120,73	129,5	127,1	2,41	6,36	37,89	37,89		
13	120,37	129,46	127,3	2,19	6,90	31,74	31,74		

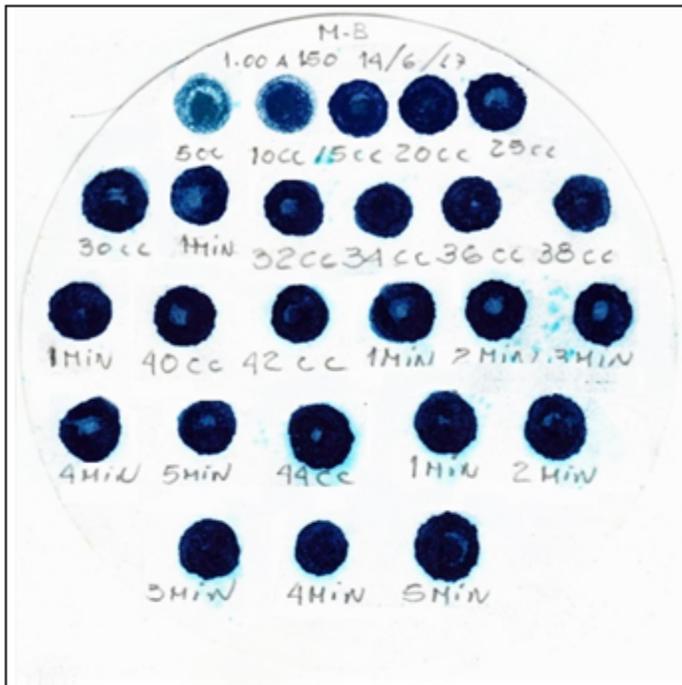
MUESTRA: <u>M-B</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra obtenida de la arcilla in situ</u>
PROF (m): <u>1,0-1,5</u>	

**PRUEBA DE AZUL DE METILENO**

Ws	9,93	gr
Coloides	30	%

**PRUEBA DE LA MANCHA**

D	R	D	R	D	R
5	-	42	+		
10	-	1M	+		
15	-	2M	+		
20	-	3M	+		
25	-	4M	+		
30	+	5M	-		
1M	-	44	+		
32	-	1M	+		
34	-	2M	+		
36	-	3M	+		
38	+	4M	+		
1M	-	5M	+		
40	-				



V	44	C.C.
VA	4,43	gr/100gr
Mo	0,05	moles
IN	14,77	

V= Volumen consumido de azul de metileno  
 VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco  
 Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide  
 IN= Indice de nocividad de los coloides

D	Dosis (cc)
R	Reacción
-	Negativo
+	Positivo

**ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA**

**Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido**

#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Límite Líquido	Promedio
		(T) Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
22	66	10,43	21,38	16,39	4,99	5,96	83,75	82,49	
25	25	14,60	24,82	20,29	4,53	5,69	79,61	79,61	
28	97	10,67	21,87	16,99	4,88	6,32	77,27	78,35	

**Ensayo para el cálculo del límite plástico**

Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Límite Plástico	Promedio	IP Índice de plasticidad
	(T) Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
197	75,52	86,02	82,96	3,06	7,44	41,13	41,13	36,68	43,48
88	75,35	83,41	81,22	2,19	5,87	37,31	37,31		
79	75,93	81,22	79,95	1,27	4,02	31,59	31,59		

MUESTRA: <u>M-C</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra obtenida de la arcilla in situ</u>								
PROF (m): <u>1,5-2,0</u>									
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	10,5	gr							
Coloides	41	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R	D	R	D	R				
5	-	70	-	4M	+				
10	-	75	-	5M	+				
15	-	80	-						
20	-	85	+						
25	-	1M	+						
30	-	2M	+						
35	-	3M	+						
40	-	4M	+						
45	-	5M	-						
50	-	87	+						
55	-	1M	+						
60	-	2M	+						
65	-	3M	+						
V	87	C.C.	V= Volumen consumido de azul de metileno			D	Dosis (cc)		
VA	8,29	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco			R	Reacción		
Mo	0,06	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide			-	Negativo		
IN	20,21		IN= Indice de nocividad de los coloides			+	Positivo		
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Límite Líquido	Promedio
		(T) Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
21	69	10,34	21,20	15,79	5,41	5,45	99,21	97,13	95,90
25	30	10,10	20,71	15,49	5,22	5,39	96,75	96,75	
29	92	10,23	20,97	15,82	5,15	5,59	92,16	93,81	
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>								<b>IP</b>	
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T) Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
44	76,69	83,39	81,20	2,19	4,51	48,56	48,56	43,23	52,67
42	75,93	84,32	81,77	2,55	5,84	43,66	43,66		
29	78,05	86,49	84,19	2,30	6,14	37,46	37,46		

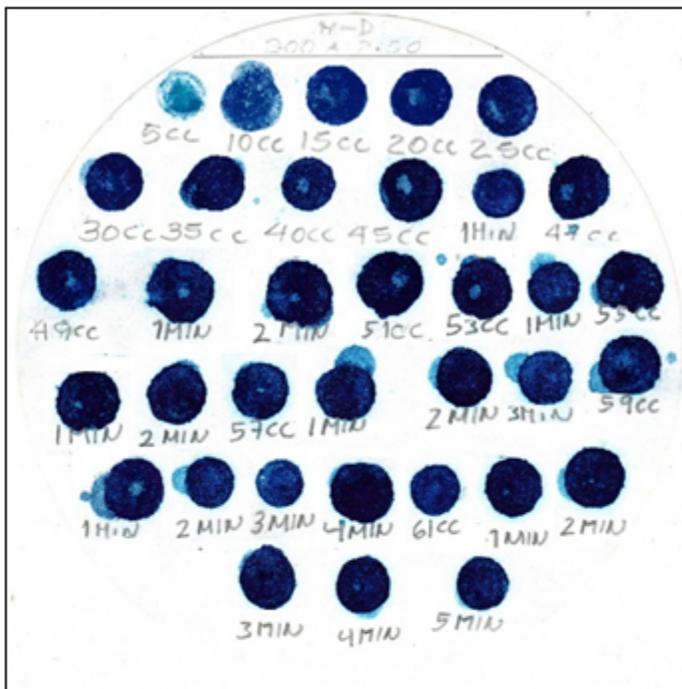
MUESTRA: <u>M-D</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra obtenida de la arcilla in situ</u>
PROF (m): <u>2,0-2,5</u>	

**PRUEBA DE AZUL DE METILENO**

Ws	10,45	gr
Coloides	31	%

**PRUEBA DE LA MANCHA**

D	R	D	R	D	R
5	-	2M	-	1M	+
10	-	51	-	2M	+
15	-	53	+	3M	+
20	-	1M	-	4M	-
25	-	55	+	61	+
30	-	1M	+	1M	+
35	-	2M	+	2M	+
40	-	3M	-	3M	+
45	+	57	+	4M	+
1M	-	1M	+	5M	+
47	-	2M	+		
49	+	3M	-		
1M	+	59	+		



V	61	c.c.
VA	5,84	gr/100gr
Mo	0,06	moles
IN	18,83	

V= Volumen consumido de azul de metileno  
 VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco  
 Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide  
 IN= Indice de nocividad de los coloides

D	Dosis (cc)
R	Reacción
-	Negativo
+	Positivo

**ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA**

**Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido**

#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
23	31	120,77	131,6	127,14	4,50	6,37	70,63	69,93	68,11
25	16	120,74	131,8	127,32	4,51	6,58	68,54	68,54	
27	4	120,65	131,5	127,22	4,29	6,57	65,27	65,86	

**Ensayo para el cálculo del límite plástico**

Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio	IP Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
4	121,65	127,3	125,6	1,74	3,91	44,50	44,50	39,37	28,74
16	121,74	129,69	127,5	2,24	5,71	39,23	39,23		
31	121,77	128,96	127,1	1,84	5,35	34,39	34,39		

MUESTRA: <u>M-0</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra de bentonita comercial de Big Horn Mountains de Wyoming, Canadá</u>								
PROF (m): <u>-</u>									
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	10	gr							
Coloides	53	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R	D R D R							
100	-	165 - 230 -							
105	-	170 - 235 -							
110	-	175 - 240 +							
115	-	180 - 1M +							
120	-	185 - 2M +							
125	-	190 - 3M +							
130	-	195 - 4M +							
135	-	200 - 5M +							
140	-	205 -							
145	-	210 -							
150	-	215 -							
155	-	220 -							
160	-	225 -							
V	240	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)				
VA	24,00	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción				
Mo	0,14	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo				
IN	45,28		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo				
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Límite Líquido	Promedio
		(T) Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
20	97	10,67	19,58	11,85	7,73	1,18	655,08	638,05	608,22
25	66	10,43	20,40	11,87	8,53	1,44	592,36	592,36	
30	25	14,60	23,05	15,84	7,21	1,24	581,45	594,24	
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>						<b>IP</b>			
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T) Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
100	34,43	41,73	38,96	2,77	4,53	61,15	61,15	51,11	557,11
24	120,73	128,9	126,3	2,62	5,55	47,21	47,21		
13	120,37	127,3	125,2	2,15	4,78	44,98	44,98		

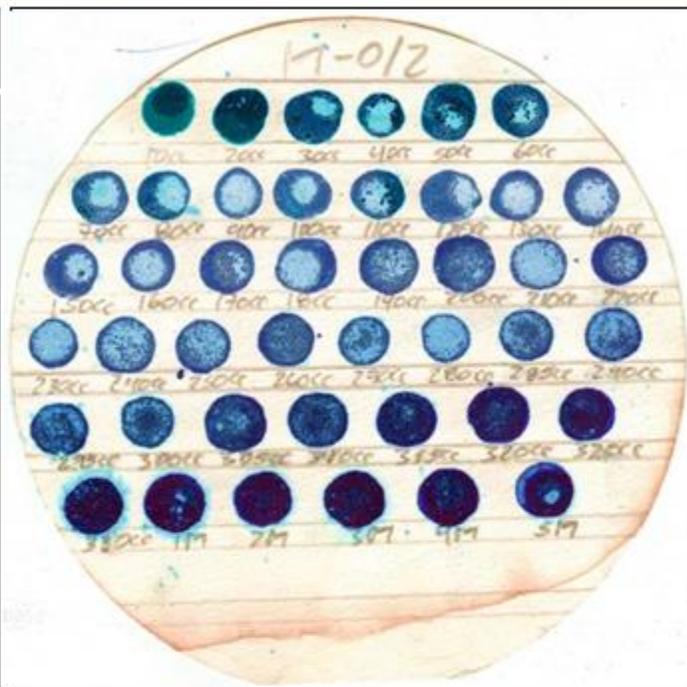
MUESTRA: <u>M-0/2</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra comercial de bentonita Laviosa de origen Italiano (Cerdeña) / Griego (Milos)</u>
PROF (m): <u>-</u>	

**PRUEBA DE AZUL DE METILENO**

Ws	10	gr
Coloides	81	%

**PRUEBA DE LA MANCHA**

D	R	D	R	D	R
170	-	235	-	300	-
175	-	240	-	305	-
180	-	245	-	310	-
185	-	250	-	315	-
190	-	255	-	320	-
195	-	260	-	325	-
200	-	265	-	330	+
205	-	270	-	1M	+
210	-	275	-	2M	+
215	-	280	-	3M	+
220	-	285	-	4M	+
225	-	290	-	5M	+
230	-	295	-		



V	330	c.c.
VA	33,00	gr/100gr
Mo	0,13	moles
IN	40,74	

V= Volumen consumido de azul de metileno  
 VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco  
 Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide  
 IN= Indice de nocividad de los coloides

D	Dosis (cc)
R	Reacción
-	Negativo
+	Positivo

**ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA**

**Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido**

#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
21	69	10,34	20,47	11,85	8,62	1,51	570,86	558,87	504,16
25	54	11,09	21,56	12,82	8,74	1,73	505,20	505,20	
29	92	10,23	23,85	12,75	11,10	2,52	440,48	448,40	

**Ensayo para el cálculo del límite plástico**

Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio	IP Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
113	31,24	41,23	39,05	2,18	7,81	27,91	27,91	50,06	454,10
16	121,74	129,3	126,0	3,34	4,22	79,15	79,15		
31	121,77	126,98	125,4	1,57	3,64	43,13	43,13		

MUESTRA: <u>M-1</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra de la arcilla in situ con</u>								
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>	<u>separación de los limos y las arcillas por sedimentación</u>								
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	10	gr							
Coloides	42	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R	D	R	D	R				
5	-	70	-						
10	-	72	+						
15	-	1M	+						
20	-	2M	+						
25	-	3M	+						
30	-	4M	+						
35	-	5M	+						
40	-								
45	-								
50	-								
55	-								
60	-								
65	-								
V	72	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno			D	Dosis (cc)		
VA	7,20	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco			R	Reacción		
Mo	0,05	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide			-	Negativo		
IN	17,14		IN= Indice de nocividad de los coloides			+	Positivo		
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Límite Líquido	Promedio
		(T) Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
22	12	14,32	22,42	18,78	3,64	4,46	81,61	80,39	80,50
26	54	11,09	22,23	17,23	5,00	6,14	81,43	81,84	
30	14	14,43	23,13	19,33	3,80	4,90	77,55	79,26	
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>									<b>IP</b>
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T) Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
197	75,52	82,16	80,56	1,60	5,04	31,75	31,75	30,67	49,83
88	75,35	84,48	82,29	2,19	6,94	31,56	31,56		
79	75,93	83,06	81,47	1,59	5,54	28,70	28,70		

MUESTRA: <u>M-2</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra de la arcilla in situ con</u>								
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>	<u>separación de los limos y las arcillas por sedimentación</u>								
PRUEBA DE AZUL DE METILENO									
Ws	9,5 gr								
Coloides	44 %								
PRUEBA DE LA MANCHA									
D	R	D	R	D	R				
5	-	70	-						
10	-	75	+						
15	-	1M	+						
20	-	2M	+						
25	-	3M	+						
30	-	4M	+						
35	-	5M	+						
40	-								
45	-								
50	-								
55	-								
60	-								
65	-								
V	75	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)				
VA	7,89	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción				
Mo	0,06	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo				
IN	17,94		IN= Índice de nocividad de los coloides	+	Positivo				
ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA									
Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Límite Líquido	Promedio
		(T) Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
25	69	10,34	21,81	16,84	4,97	6,50	76,46	76,42	
28	92	10,23	21,20	16,48	4,72	6,25	75,52		
30	30	10,10	19,51	15,49	4,02	5,39	74,58		
Ensayo para el cálculo del límite plástico						IP			
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T) Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
44	76,69	86,25	84,04	2,21	7,35	30,07	30,07	29,42	47,00
42	75,93	85,07	82,99	2,08	7,06	29,46	29,46		
29	78,05	85,89	84,14	1,75	6,09	28,74	28,74		

MUESTRA: <u>M-3</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 50g NaCl /100g de arcilla, durante 24 horas a temperatura ambiente (30°)</u>								
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>									
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	9,91	gr							
Coloides	42	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R	D		R					
5	-	70		-					
10	-	75		-					
15	-	80		-					
20	-	85		-					
25	-	90		-					
30	-	95		-					
35	-	100	-						
40	-	105	-						
45	-	110	-						
50	-	115	-						
55	-	120	-						
60	-	125	-						
65	-	130	-						
V	160	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)				
VA	16,15	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción				
Mo	0,12	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo				
IN	38,44		IN= Índice de nocividad de los coloides	+	Positivo				
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
22	13	119,17	129,8	123,34	6,42	4,17	153,96	151,65	153,77
27	24	119,73	130,2	123,85	6,32	4,12	153,40	154,78	
29	31	120,77	130,2	124,49	5,66	3,72	152,15	154,89	
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>						<b>IP</b>			
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
4	121,65	129,55	127,9	1,67	6,23	26,81	26,81	26,31	127,46
16	121,74	129,53	127,9	1,63	6,16	26,46	26,46		
31	121,77	128,77	127,3	1,43	5,57	25,67	25,67		

<b>MUESTRA:</b> <u>M-4</u>	<b>OBSERVACIONES:</b> <u>Muestra tratada con 100g NaCl /100g de arcilla, durante 24 horas a temperatura ambiente (30°)</u>								
<b>PROF (m):</b> <u>0,5 - 1,5</u>									
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	9,8	gr							
Coloides	42	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R	D		R					
5	-	70		-	2M	+			
10	-	75		-	3M	+			
15	-	80		-	4M	+			
20	-	85		-	5M	+			
25	-	90		-					
30	-	95		-					
35	-	100	-						
40	-	105	-						
45	-	110	-						
50	-	115	-						
55	-	120	-						
60	-	125	+						
65	-	1M	+						
V	125	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)				
VA	12,76	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción				
Mo	0,09	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo				
IN	30,37		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo				
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
25	16	120,74	132,5	125,16	7,29	4,42	164,93	166,25	
29	4	120,65	131,7	124,83	6,86	4,18	164,11		
30	56	163,88	172,7	167,22	5,45	3,34	163,17		
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>						IP			
Envase N°	Peso en gramos						W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
25	14,60	23,34	21,20	2,14	6,60	32,42	32,42	31,82	134,43
14	14,43	22,67	20,68	1,99	6,25	31,84	31,84		
12	14,62	21,18	19,62	1,56	5,00	31,20	31,20		

MUESTRA: <u>M-5</u>		OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 200g NaCl /100g de arcilla, durante 24 horas a temperatura ambiente (30°)</u>	
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>			
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>			
Ws	9,83	gr	
Coloides	42	%	
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>			
D	R	D	R
5	-	70	-
10	-	75	-
15	-	80	-
20	-	85	-
25	-	90	-
30	-	95	-
35	-	100	-
40	-	105	-
45	-	110	-
50	-	115	-
55	-	120	+
60	-	1M	+
65	-	2M	+

V	120	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)
VA	12,21	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción
Mo	0,09	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo
IN	29,07		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo

| **ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA** | | | | | |
| **Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido** | | | | | |

#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
25	203	29,06	37,88	32,01	5,87	2,95	198,98	199,63	
27	216	28,49	37,35	31,46	5,89	2,97	198,32		
30	14	28,12	37,34	31,24	6,10	3,12	195,51		

| **Ensayo para el cálculo del límite plástico** | | | | | | **IP** |

Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
92	10,23	16,81	14,63	2,18	4,40	49,55	49,55	48,69	150,95
30	10,10	16,71	14,54	2,17	4,44	48,87	48,87		
69	10,34	17,22	15,00	2,22	4,66	47,64	47,64		

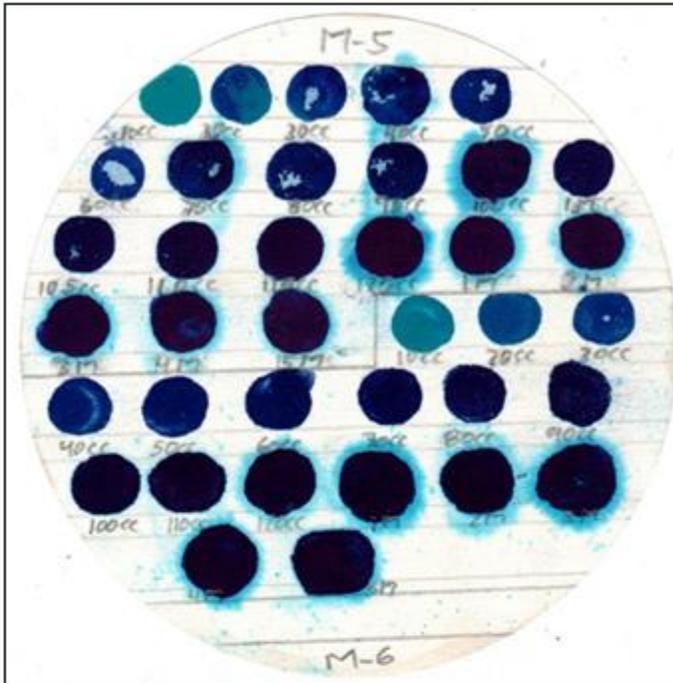
MUESTRA: <u>M-6</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 50g NaCl /100g de arcilla, durante 24 horas a temperatura ambiente (30°)</u>
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>	

**PRUEBA DE AZUL DE METILENO**

Ws	9,76	gr
Coloides	44	%

**PRUEBA DE LA MANCHA**

D	R	D	R	D	R
5	-	70	-	3M	+
10	-	75	-	4M	+
15	-	80	-	5M	+
20	-	85	-		
25	-	90	-		
30	-	95	-		
35	-	100	-		
40	-	105	-		
45	-	110	-		
50	-	115	-		
55	-	120	+		
60	-	1M	+		
65	-	2M	+		



V	120	c.c.
VA	12,30	gr/100gr
Mo	0,09	moles
IN	27,94	

V= Volumen consumido de azul de metileno  
 VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco  
 Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide  
 IN= Indice de nocividad de los coloides

D	Dosis (cc)
R	Reacción
-	Negativo
+	Positivo

**ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA**

**Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido**

#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
20	14	14,43	25,61	18,60	7,01	4,17	168,11	163,73	165,63
23	69	10,34	21,41	14,49	6,92	4,15	166,75	165,08	
27	54	11,09	21,54	15,01	6,53	3,92	166,58	168,08	

**Ensayo para el cálculo del límite plástico**

Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Límite Plástico	Promedio	IP Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
54	11,09	19,43	17,32	2,11	6,23	33,87	33,87	33,33	132,30
66	10,93	19,19	17,14	2,05	6,21	33,01	33,01		
97	10,67	18,47	16,53	1,94	5,86	33,11	33,11		

MUESTRA: <u>M-7</u>		OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 100g NaCl /100g de arcilla, durante 24 horas a temperatura ambiente (30°)</u>	
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>			
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>			
Ws	9,68	gr	
Coloides	44	%	
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>			
D	R	D	R
5	-	70	-
10	-	75	-
15	-	80	-
20	-	85	-
25	-	90	-
30	-	95	-
35	-	100	-
40	-	105	-
45	-	110	-
50	-	115	-
55	-	120	+
60	-	1M	+
65	-	2M	+

V	120	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)
VA	12,40	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción
Mo	0,09	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo
IN	28,17		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo

| **ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA** | | | | | |
| **Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido** | | | | | |

#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
25	97	10,67	21,79	14,78	7,01	4,11	170,56	170,40	
27	66	10,43	21,12	14,41	6,71	3,98	168,59		
30	54	11,09	20,99	14,8	6,19	3,71	166,85		

| **Ensayo para el cálculo del límite plástico** | | | | | | **IP** |

Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
100	34,43	42,73	40,58	2,15	6,15	34,96	34,96	34,08	136,32
24	120,73	128,71	126,7	2,03	5,95	34,12	34,12		
13	120,37	127,76	125,9	1,84	5,55	33,15	33,15		

MUESTRA: <u>M-8</u>		OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 200g NaCl /100g de arcilla, durante 24 horas a temperatura ambiente (30°)</u>	
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>			
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>			
Ws	9,57	gr	
Coloides	44	%	
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>			
D	R	D	R
5	-	70	-
10	-	75	-
15	-	80	-
20	-	85	-
25	-	90	-
30	-	95	-
35	-	100	-
40	-	105	-
45	-	110	-
50	-	115	-
55	-	120	-
60	-	125	-
65	-	130	-

V	142	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)
VA	14,84	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción
Mo	0,11	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo
IN	33,72		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo

| **ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA** | | | | | |
| Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido | | | | | |

#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
25	66	10,43	21,59	14,33	7,26	3,90	186,15	182,28	
27	25	14,6	23,79	17,9	5,89	3,30	178,48		
30	97	10,67	20,41	14,19	6,22	3,52	176,70		

| Ensayo para el cálculo del límite plástico | | | | | | IP |

Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
197	75,52	83,85	81,36	2,49	5,84	42,64	42,64	40,09	142,19
88	75,35	82,21	80,28	1,93	4,93	39,15	39,15		
79	75,93	83,2	81,18	2,02	5,25	38,48	38,48		

MUESTRA: <u>M-9</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 50g NaCl /100g de arcilla, durante 72 horas a temperatura ambiente (30°)</u>								
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>									
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	9,58	gr							
Coloides	42	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R	D R D R							
5	-	70 - 1M +							
10	-	75 - 2M +							
15	-	80 - 3M +							
20	-	85 - 4M +							
25	-	90 - 5M +							
30	-	95 -							
35	-	100 -							
40	-	105 -							
45	-	110 -							
50	-	115 +							
55	-	117 +							
60	-	119 +							
65	-	121 +							
V	121	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)				
VA	12,63	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción				
Mo	0,09	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo				
IN	30,07		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo				
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Límite Líquido	Promedio
		(T) Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
21	69	10,34	20,62	14,43	6,19	4,09	151,34	148,17	146,66
23	30	10,10	19,73	13,94	5,79	3,84	150,78	149,27	
25	92	10,23	19,81	14,18	5,63	3,95	142,53	142,53	
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>						<b>IP</b>			
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T) Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
44	76,69	84,36	82,80	1,56	6,11	25,53	25,53	23,92	122,73
42	75,93	83,12	81,67	1,45	5,74	25,26	25,26		
29	78,05	85,2	83,96	1,24	5,91	20,98	20,98		

MUESTRA: <u>M-10</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 100g NaCl /100g de arcilla, durante 72 horas a temperatura ambiente (30°)</u>								
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>									
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	10,4	gr							
Coloides	42	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R	D R D R							
5	-	70 - 1M +							
10	-	75 - 2M +							
15	-	80 - 3M +							
20	-	85 - 4M +							
25	-	90 - 5M +							
30	-	95 -							
35	-	100 -							
40	-	105 -							
45	-	110 -							
50	-	115 -							
55	-	120 -							
60	-	125 -							
65	-	130 +							
V	130	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)				
VA	12,50	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción				
Mo	0,09	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo				
IN	29,76		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo				
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
20	31	120,77	129,7	124,18	5,54	3,41	162,46	158,24	153,45
23	16	120,74	130,0	124,36	5,67	3,62	156,63	155,06	
25	4	120,65	130,3	124,54	5,72	3,89	147,04	147,04	
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>						<b>IP</b>			
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
4	121,65	128,33	126,8	1,58	5,10	30,98	30,98	27,49	125,95
16	121,74	128,67	127,2	1,52	5,41	28,10	28,10		
31	121,77	128,94	127,6	1,36	5,81	23,41	23,41		

MUESTRA: <u>M-11</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 200g NaCl /100g de arcilla, durante 72 horas a temperatura ambiente (30°)</u>								
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>									
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	9,52	gr							
Coloides	42	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R	D R D R							
5	-	70 - 3M +							
10	-	75 - 4M +							
15	-	80 - 5M +							
20	-	85 -							
25	-	90 -							
30	-	95 -							
35	-	100 -							
40	-	105 -							
45	-	110 -							
50	-	115 -							
55	-	120 +							
60	-	1M +							
65	-	2M +							
V	120	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)				
VA	12,61	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción				
Mo	0,09	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo				
IN	30,01		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo				
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
20	12	14,32	24,44	17,94	6,50	3,62	179,56	174,89	160,92
22	14	14,43	24,09	18,18	5,91	3,75	157,60	155,24	
26	25	14,60	24,07	18,36	5,71	3,76	151,86	152,62	
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>						<b>IP</b>			
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
25	14,6	22,15	20,01	2,14	5,41	39,56	39,56	31,29	129,62
14	14,43	21,64	20,04	1,60	5,61	28,52	28,52		
12	14,62	21,69	20,24	1,45	5,62	25,80	25,80		

MUESTRA: <u>M-12</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 50g NaCl /100g de arcilla, durante 72 horas a temperatura ambiente (30°)</u>								
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>									
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	9,51	gr							
Coloides	44	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R	D R D R							
5	-	70 - 116 -							
10	-	75 - 118 -							
15	-	80 - 120 -							
20	-	85 - 122 -							
25	-	90 - 124 +							
30	-	95 - 1M +							
35	-	100 - 2M +							
40	-	105 - 3M +							
45	-	110 + 4M +							
50	-	2M + 5M +							
55	-	3M -							
60	-	112 -							
65	-	114 -							
V	124	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)				
VA	13,04	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción				
Mo	0,09	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo				
IN	29,63		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo				
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
22	29	78,05	88,18	81,53	6,65	3,48	191,09	188,23	178,62
25	42	75,93	87,24	80,00	7,24	4,07	177,89	177,89	
27	44	76,79	87,09	80,63	6,46	3,84	168,23	169,74	
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>						<b>IP</b>			
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
92	10,23	17,79	15,43	2,36	5,20	45,38	45,38	39,39	139,23
30	10,1	18,54	16,18	2,36	6,08	38,82	38,82		
69	10,34	18,03	16,08	1,95	5,74	33,97	33,97		

MUESTRA: <u>M-13</u>		OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 100g NaCl /100g de arcilla, durante 72 horas a temperatura ambiente (30°)</u>	
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>			
PRUEBA DE AZUL DE METILENO			
Ws	10,15	gr	
Coloides	44	%	
PRUEBA DE LA MANCHA			
D	R	D	R
5	-	70	-
10	-	75	-
15	-	80	-
20	-	85	-
25	-	90	-
30	-	95	-
35	-	100	-
40	-	105	-
45	-	110	-
50	-	115	-
55	-	120	-
60	-	125	-
65	-	130	+

V	130	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)
VA	12,81	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción
Mo	0,09	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo
IN	29,11		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo

| ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA | | | | | |
| Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido | | | | | | | | | |

#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
23	79	75,53	85,92	79,36	6,56	3,83	171,28	169,57	169,39
26	88	75,35	85,91	79,28	6,63	3,93	168,70	169,55	
30	97	75,52	85,34	79,22	6,12	3,70	165,41	169,04	

| Ensayo para el cálculo del límite plástico | | | | | | | | | IP |

Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
54	11,09	18,84	16,81	2,03	5,72	35,49	35,49	34,10	135,29
66	10,93	18,81	16,81	2,00	5,88	34,01	34,01		
97	10,67	18	16,19	1,81	5,52	32,79	32,79		

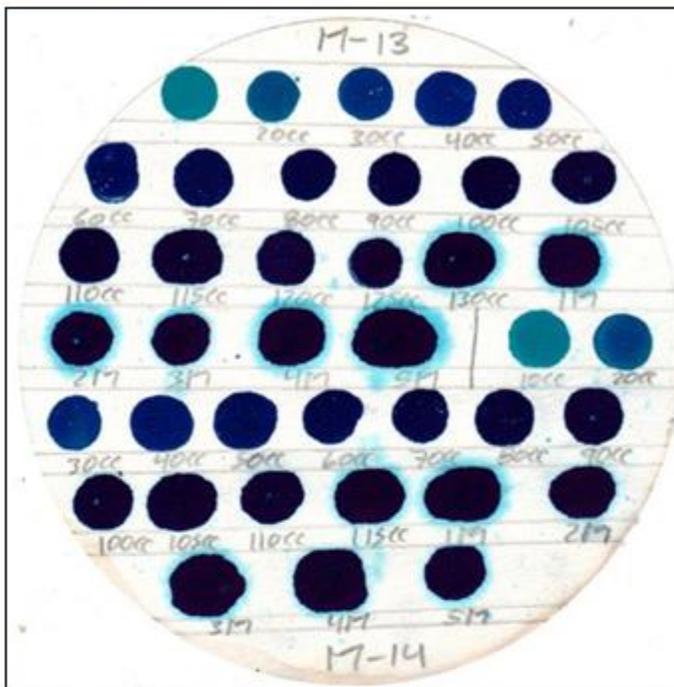
MUESTRA: <u>M-14</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 200g NaCl /100g de arcilla, durante 72 horas a temperatura ambiente (30°)</u>
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>	

**PRUEBA DE AZUL DE METILENO**

Ws	9,54	gr
Coloides	44	%

**PRUEBA DE LA MANCHA**

D	R	D	R	D	R
5	-	70	-	4M	+
10	-	75	-	5M	+
15	-	80	-		
20	-	85	-		
25	-	90	-		
30	-	95	-		
35	-	100	-		
40	-	105	-		
45	-	110	-		
50	-	115	+		
55	-	1M	+		
60	-	2M	+		
65	-	3M	+		



V	115	c.c.
VA	12,05	gr/100gr
Mo	0,09	moles
IN	27,40	

V= Volumen consumido de azul de metileno  
 VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco  
 Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide  
 IN= Indice de nocividad de los coloides

D	Dosis (cc)
R	Reacción
-	Negativo
+	Positivo

**ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA**

**Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido**

#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
20	13	119,17	130,5	123,46	7,05	4,29	164,34	160,06	160,79
27	24	119,73	130,0	123,68	6,29	3,95	159,24	160,67	
30	100	33,68	43,49	37,48	6,01	3,80	158,16	161,64	

**Ensayo para el cálculo del límite plástico**

Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Límite Plástico	Promedio	IP Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
100	34,43	42,89	40,85	2,04	6,42	31,78	31,78	29,97	130,82
24	120,73	128,37	126,6	1,73	5,91	29,27	29,27		
13	120,37	127,69	126,1	1,64	5,68	28,87	28,87		

MUESTRA: <u>M-15</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 50g NaCl /100g de arcilla, durante 168 horas a temperatura ambiente (30°)</u>		
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>			
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>			
Ws	10,21	gr	
Coloides	42	%	
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>			
D	R	D R D R	
5	-	70 - 4M +	
10	-	75 - 5M +	
15	-	80 -	
20	-	85 -	
25	-	90 -	
30	-	95 -	
35	-	100 -	
40	-	105 -	
45	-	110 -	
50	-	115 +	
55	-	1M +	
60	-	2M +	
65	-	3M +	

V	115	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)
VA	11,26	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción
Mo	0,08	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo
IN	26,82		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo

ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA									
Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
25	97	10,67	21,86	15,30	6,56	4,63	141,68	141,80	
27	66	10,43	20,99	14,82	6,17	4,39	140,55		
30	54	11,09	21,48	15,44	6,04	4,35	138,85		
Ensayo para el cálculo del límite plástico									IP
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
197	75,52	83,87	82,44	1,43	6,92	20,66	20,66	20,01	121,79
88	75,35	83,23	81,91	1,32	6,56	20,12	20,12		
79	75,93	83,68	82,43	1,25	6,50	19,23	19,23		

MUESTRA: <u>M-16</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 100g NaCl /100g de arcilla, durante 168 horas a temperatura ambiente (30°)</u>								
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>									
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	10,04	gr							
Coloides	42	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R	D	R						
5	-	70	+ 1M +						
10	-	75	+ 2M +						
15	-	80	+ 3M +						
20	-	85	+ 4M +						
25	-	90	+ 5M +						
30	-	95	+						
35	-	100	+						
40	-	105	+						
45	-	110	+						
50	-	115	+						
55	-	120	+						
60	-	125	+						
65	-	130	+						
V	130	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno						
VA	12,95	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco						
Mo	0,10	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide						
IN	30,83		IN= Indice de nocividad de los coloides						
D			D Dosis (cc)						
R			R Reacción						
-			- Negativo						
+			+ Positivo						
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Límite Líquido	Promedio
		(T) Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
25	69	10,34	22,13	15,03	7,10	4,69	151,39	151,39	
28	30	10,10	20,10	14,08	6,02	3,98	151,26	153,37	
30	92	10,23	19,82	14,06	5,76	3,83	150,39	153,70	
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>									<b>IP</b>
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T) Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
44	76,69	85,49	83,70	1,79	7,01	25,53	25,53	25,36	127,46
42	75,93	83,39	81,88	1,51	5,95	25,38	25,38		
29	78,05	85,21	83,77	1,44	5,72	25,17	25,17		

<b>MUESTRA:</b> <u>M-17</u>	<b>OBSERVACIONES:</b> <u>Muestra tratada con 200g NaCl /100g de arcilla, durante 168 horas a temperatura ambiente (30°)</u>		
<b>PROF (m):</b> <u>0,5 - 1,5</u>			
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>			
Ws	10,05	gr	
Coloides	42	%	
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>			
D	R	D	
5	-	70	
10	-	75	
15	-	80	
20	-	85	
25	-	90	
30	-	95	
35	-	100	
40	-	105	
45	-	110	
50	-	115	
55	-	120	
60	-	125	
65	-	130	

V	140	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)
VA	13,93	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción
Mo	0,10	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo
IN	33,17		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo

ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA									
Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
20	12	14,32	25,76	18,52	7,24	4,20	172,38	167,90	166,29
22	14	14,43	24,52	18,20	6,32	3,77	167,64	165,12	
25	25	14,60	24,49	18,32	6,17	3,72	165,86	165,86	
Ensayo para el cálculo del límite plástico									IP
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
4	121,65	130,19	127,9	2,26	6,28	35,99	35,99	34,00	132,30
16	121,74	129,27	127,4	1,89	5,64	33,51	33,51		
31	121,77	129,15	127,3	1,81	5,57	32,50	32,50		

MUESTRA: <u>M-18</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 50g NaCl /100g de arcilla, durante 168 horas a temperatura ambiente (30°)</u>		
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>			
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>			
Ws	9,56	gr	
Coloides	44	%	
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>			
D	R	D R	
5	-	70 - 113 -	
10	-	75 - 115 -	
15	-	80 - 117 +	
20	-	85 - 1M +	
25	-	90 - 2M +	
30	-	95 - 3M +	
35	-	100 + 4M +	
40	-	1M + 5M +	
45	-	2M -	
50	-	102 -	
55	-	104 -	
60	-	106 -	
65	-	108 -	

V	117	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)
VA	12,24	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción
Mo	0,09	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo
IN	27,81		IN= Índice de nocividad de los coloides	+	Positivo

ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA									
Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
25	31	120,77	131,8	125,19	6,61	4,42	149,55	149,55	151,28
28	16	120,74	131,1	124,90	6,23	4,16	149,76	151,86	
30	4	120,65	131,1	124,86	6,28	4,21	149,17	152,45	
Ensayo para el cálculo del límite plástico									IP
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
25	14,6	22,83	21,20	1,63	6,60	24,70	24,70	24,59	126,69
14	14,43	22,18	20,65	1,53	6,22	24,60	24,60		
12	14,62	22,45	20,91	1,54	6,29	24,48	24,48		

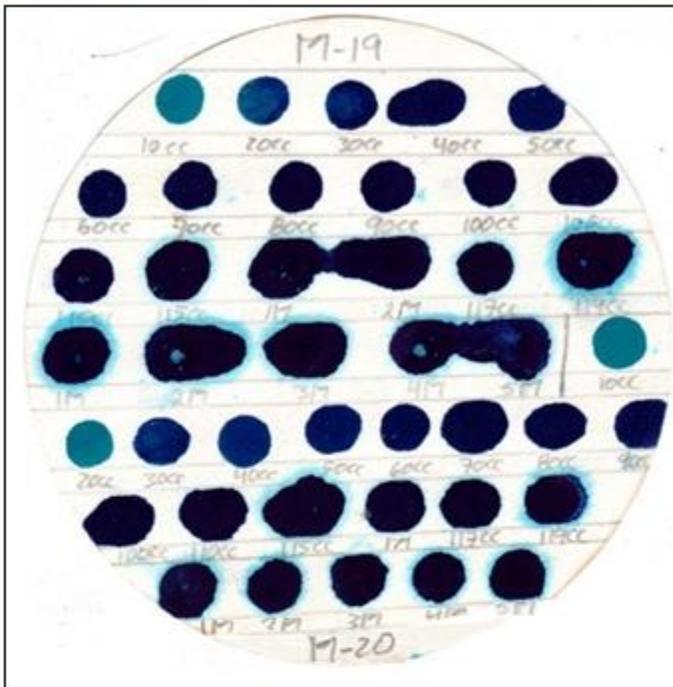
MUESTRA: <u>M-19</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 100g NaCl /100g de arcilla, durante 168 horas a temperatura ambiente (30°)</u>
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>	

**PRUEBA DE AZUL DE METILENO**

Ws	10,1	gr
Coloides	44	%

**PRUEBA DE LA MANCHA**

D	R	D	R	D	R
5	-	70	-	119	+
10	-	75	-	1M	+
15	-	80	-	2M	+
20	-	85	-	3M	+
25	-	90	-	4M	+
30	-	95	-	5M	+
35	-	100	-		
40	-	105	-		
45	-	110	-		
50	-	115	+		
55	-	1M	+		
60	-	2M	-		
65	-	117	-		



V	119	c.c.
VA	11,78	gr/100gr
Mo	0,08	moles
IN	26,78	

V= Volumen consumido de azul de metileno  
 VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco  
 Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide  
 IN= Indice de nocividad de los coloides

D	Dosis (cc)
R	Reacción
-	Negativo
+	Positivo

**ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA**

**Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido**

#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
20	29	78,05	90,38	83,09	7,29	5,04	144,64	140,88	141,72
23	42	75,93	85,85	80,01	5,84	4,08	143,14	141,71	
25	44	76,79	86,25	80,69	5,56	3,90	142,56	142,56	

**Ensayo para el cálculo del límite plástico**

Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio	IP Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
92	10,23	19,43	17,77	1,66	7,54	22,02	22,02	21,47	120,25
30	10,1	17,5	16,19	1,31	6,09	21,51	21,51		
69	10,34	17,4	16,18	1,22	5,84	20,89	20,89		

MUESTRA: <u>M-20</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 200g NaCl /100g de arcilla, durante 168 horas a temperatura ambiente (30°)</u>								
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>									
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	9,6	gr							
Coloides	44	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R	D	R	D	R				
5	-	70	-	1M	+				
10	-	75	-	2M	+				
15	-	80	-	3M	+				
20	-	85	-	4M	+				
25	-	90	-	5M	+				
30	-	95	-						
35	-	100	-						
40	-	105	-						
45	-	110	-						
50	-	115	+						
55	-	1M	-						
60	-	117	-						
65	-	119	+						
V	119	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno			D	Dosis (cc)		
VA	12,40	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco			R	Reacción		
Mo	0,09	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide			-	Negativo		
IN	28,17		IN= Indice de nocividad de los coloides			+	Positivo		
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
20	79	75,53	84,72	78,92	5,80	3,39	171,09	166,64	162,89
25	88	75,35	84,82	78,95	5,87	3,60	163,06	163,06	
27	197	75,52	84,74	79,10	5,64	3,58	157,54	158,96	
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>								<b>IP</b>	
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
54	11,09	17,95	16,16	1,79	5,07	35,31	35,31	31,77	131,11
66	10,93	18	16,31	1,69	5,38	31,41	31,41		
97	10,67	17,55	16,02	1,53	5,35	28,60	28,60		

MUESTRA: <u>M-21</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 50g NaCl /100g de arcilla, durante 24 horas a 60° de temperatura</u>								
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>									
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	9,75	gr							
Coloides	42	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R	D	R	D	R				
5	-	70	-	1M	+				
10	-	75	-	2M	+				
15	-	80	-	3M	+				
20	-	85	-	4M	+				
25	-	90	-	5M	+				
30	-	95	-						
35	-	100	-						
40	-	105	-						
45	-	110	-						
50	-	115	-						
55	-	120	-						
60	-	125	-						
65	-	130	+						
V	130	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)				
VA	13,33	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción				
Mo	0,10	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo				
IN	31,75		IN= Índice de nocividad de los coloides	+	Positivo				
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
20	13	119,17	132,3	123,89	8,44	4,72	178,81	174,16	175,89
25	24	119,73	130,6	123,66	6,96	3,93	177,10	177,10	
28	100	33,68	42,94	37,06	5,88	3,38	173,96	176,40	
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>								<b>IP</b>	
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
100	34,43	44,25	41,49	2,76	7,06	39,09	39,09	37,97	137,91
24	120,73	128,86	126,6	2,25	5,88	38,27	38,27		
13	120,37	127,28	125,4	1,85	5,06	36,56	36,56		

MUESTRA: <u>M-22</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 100g NaCl /100g de arcilla, durante 24 horas a 60° de temperatura</u>								
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>									
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	10,15	gr							
Coloides	42	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R	D		R					
5	-	70		-					
10	-	75		-					
15	-	80		-					
20	-	85		-					
25	-	90		-					
30	-	95		-					
35	-	100	-						
40	-	105	-						
45	-	110	-						
50	-	115	-						
55	-	120	-						
60	-	125	-						
65	-	130	-						
V	139	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno						
VA	13,69	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco						
Mo	0,10	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide						
IN	32,61		IN= Indice de nocividad de los coloides						
D			D Dosis (cc)						
R			R Reacción						
-			- Negativo						
+			+ Positivo						
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
23	97	10,67	23,88	15,44	8,44	4,77	176,94	175,17	176,52
25	66	10,43	24,02	15,36	8,66	4,93	175,66	175,66	
30	54	11,09	22,80	15,35	7,45	4,26	174,88	178,73	
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>									<b>IP</b>
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
197	75,52	85,38	82,65	2,73	7,13	38,29	38,29	37,77	138,75
88	75,35	85,49	82,72	2,77	7,37	37,58	37,58		
79	75,93	84,67	82,29	2,38	6,36	37,42	37,42		

MUESTRA: <u>M-23</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 200g NaCl /100g de arcilla, durante 24 horas a 60° de temperatura</u>								
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>									
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	10,1	gr							
Coloides	42	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R								
5	-	70							
10	-	75							
15	-	80							
20	-	85							
25	-	90							
30	-	95							
35	-	100							
40	-	105							
45	-	110							
50	-	115							
55	-	120							
60	-	125							
65	-	130							
V	138	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)				
VA	13,66	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción				
Mo	0,10	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo				
IN	32,53		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo				
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
20	69	10,34	20,90	14,03	6,87	3,69	186,18	181,34	180,44
22	30	10,10	19,52	13,43	6,09	3,33	182,88	180,14	
25	92	10,23	20,08	13,75	6,33	3,52	179,83	179,83	
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>						<b>IP</b>			
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
44	76,69	84,57	82,20	2,37	5,51	43,01	43,01	41,22	139,22
42	75,93	82,96	80,91	2,05	4,98	41,16	41,16		
29	78,05	85,4	83,32	2,08	5,27	39,47	39,47		

MUESTRA: <u>M-24</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 50g NaCl /100g de arcilla, durante 24 horas a 60° de temperatura</u>								
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>									
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	9,55	gr							
Coloides	44	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R	D		R					
5	-	70		-	2M	+			
10	-	75		-	3M	+			
15	-	80		-	4M	+			
20	-	85		-	5M	+			
25	-	90		-					
30	-	95		-					
35	-	100	-						
40	-	105	-						
45	-	110	-						
50	-	115	-						
55	-	120	-						
60	-	125	+						
65	-	1M	+						
V	125	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)				
VA	13,09	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción				
Mo	0,09	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo				
IN	29,75		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo				
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
20	12	14,32	26,47	18,82	7,65	4,50	170,00	165,58	168,33
25	14	14,43	26,65	18,98	7,67	4,55	168,57	168,57	
30	25	14,60	27,29	19,35	7,94	4,75	167,16	170,84	
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>								<b>IP</b>	
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
4	121,65	130,72	128,4	2,34	6,73	34,77	34,77	34,09	134,24
16	121,74	130,86	128,5	2,32	6,80	34,12	34,12		
31	121,77	131,24	128,9	2,37	7,10	33,38	33,38		

MUESTRA: <u>M-25</u>		OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 100g NaCl /100g</u>							
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>		<u>de arcilla, durante 24 horas a 60° de temperatura</u>							
PRUEBA DE AZUL DE METILENO									
Ws	9,55	gr							
Coloides	44	%							
PRUEBA DE LA MANCHA									
D	R	D	R						
5	-	70	-						
10	-	75	-						
15	-	80	-						
20	-	85	-						
25	-	90	-						
30	-	95	-						
35	-	100	-						
40	-	105	-						
45	-	110	-						
50	-	115	-						
55	-	120	+						
60	-	1M	+						
65	-	2M	+						
V	120	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno						
VA	12,57	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco						
Mo	0,09	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide						
IN	28,56		IN= Indice de nocividad de los coloides						
D	Dosis (cc)								
R	Reacción								
-	Negativo								
+	Positivo								
ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA									
Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
22	31	120,77	134,4	125,53	8,91	4,76	187,18	184,38	187,10
26	16	120,74	133,9	125,34	8,56	4,60	186,09	187,02	
30	4	120,65	133,9	125,30	8,64	4,65	185,81	189,89	
Ensayo para el cálculo del límite plástico									IP
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
25	14,6	24,8	21,71	3,09	7,11	43,46	43,46	43,11	143,98
14	14,43	24,25	21,30	2,95	6,87	42,94	42,94		
12	14,62	24,54	21,56	2,98	6,94	42,94	42,94		

MUESTRA: <u>M-26</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 200g NaCl /100g de arcilla, durante 24 horas a 60° de temperatura</u>								
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>									
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	9,85	gr							
Coloides	44	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R	D R D R							
5	-	70 - 3M +							
10	-	75 - 4M +							
15	-	80 - 5M +							
20	-	85 -							
25	-	90 -							
30	-	95 -							
35	-	100 -							
40	-	105 -							
45	-	110 -							
50	-	115 -							
55	-	120 +							
60	-	1M +							
65	-	2M +							
V	120	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)				
VA	12,18	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción				
Mo	0,09	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo				
IN	27,69		IN= Índice de nocividad de los coloides	+	Positivo				
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
21	29	78,05	93,11	82,71	10,40	4,66	223,18	218,49	217,49
27	42	75,93	90,43	80,55	9,88	4,62	213,85	215,78	
30	44	76,79	87,70	80,27	7,43	3,48	213,51	218,20	
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>								<b>IP</b>	
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
92	10,23	21,47	17,20	4,27	6,97	61,26	61,26	58,20	159,29
30	10,1	20,92	17,00	3,92	6,90	56,81	56,81		
69	10,34	18,48	15,54	2,94	5,20	56,54	56,54		

MUESTRA: <u>M-27</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 50g NaCl /100g de arcilla, durante 72 horas a 60° de temperatura</u>																																																																																										
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>																																																																																											
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>																																																																																											
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width:15%;">Ws</td> <td style="width:15%;">9,9</td> <td style="width:10%;">gr</td> </tr> <tr> <td>Coloides</td> <td>42</td> <td>%</td> </tr> </table>	Ws	9,9	gr	Coloides	42	%																																																																																					
Ws	9,9	gr																																																																																									
Coloides	42	%																																																																																									
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th colspan="6">PRUEBA DE LA MANCHA</th> </tr> <tr> <th>D</th> <th>R</th> <th>D</th> <th>R</th> <th>D</th> <th>R</th> </tr> <tr> <td>5</td> <td>-</td> <td>70</td> <td>-</td> <td>5M</td> <td>+</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>-</td> <td>75</td> <td>-</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>15</td> <td>-</td> <td>80</td> <td>-</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>20</td> <td>-</td> <td>85</td> <td>-</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>25</td> <td>-</td> <td>90</td> <td>-</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>30</td> <td>-</td> <td>95</td> <td>-</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>35</td> <td>-</td> <td>100</td> <td>-</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>40</td> <td>-</td> <td>105</td> <td>-</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>45</td> <td>-</td> <td>110</td> <td>+</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>50</td> <td>-</td> <td>1M</td> <td>+</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>55</td> <td>-</td> <td>2M</td> <td>+</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>60</td> <td>-</td> <td>3M</td> <td>+</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>65</td> <td>-</td> <td>4M</td> <td>+</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	PRUEBA DE LA MANCHA						D	R	D	R	D	R	5	-	70	-	5M	+	10	-	75	-			15	-	80	-			20	-	85	-			25	-	90	-			30	-	95	-			35	-	100	-			40	-	105	-			45	-	110	+			50	-	1M	+			55	-	2M	+			60	-	3M	+			65	-	4M	+			
PRUEBA DE LA MANCHA																																																																																											
D	R	D	R	D	R																																																																																						
5	-	70	-	5M	+																																																																																						
10	-	75	-																																																																																								
15	-	80	-																																																																																								
20	-	85	-																																																																																								
25	-	90	-																																																																																								
30	-	95	-																																																																																								
35	-	100	-																																																																																								
40	-	105	-																																																																																								
45	-	110	+																																																																																								
50	-	1M	+																																																																																								
55	-	2M	+																																																																																								
60	-	3M	+																																																																																								
65	-	4M	+																																																																																								
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>V</td> <td>110</td> <td>c.c.</td> <td>V= Volumen consumido de azul de metileno</td> </tr> <tr> <td>VA</td> <td>11,11</td> <td>gr/100gr</td> <td>VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco</td> </tr> <tr> <td>Mo</td> <td>0,08</td> <td>moles</td> <td>Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide</td> </tr> <tr> <td>IN</td> <td>26,46</td> <td></td> <td>IN= Indice de nocividad de los coloides</td> </tr> </table>	V	110	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	VA	11,11	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	Mo	0,08	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	IN	26,46		IN= Indice de nocividad de los coloides	<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>D</td> <td>Dosis (cc)</td> </tr> <tr> <td>R</td> <td>Reacción</td> </tr> <tr> <td>-</td> <td>Negativo</td> </tr> <tr> <td>+</td> <td>Positivo</td> </tr> </table>	D	Dosis (cc)	R	Reacción	-	Negativo	+	Positivo																																																																		
V	110	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno																																																																																								
VA	11,11	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco																																																																																								
Mo	0,08	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide																																																																																								
IN	26,46		IN= Indice de nocividad de los coloides																																																																																								
D	Dosis (cc)																																																																																										
R	Reacción																																																																																										
-	Negativo																																																																																										
+	Positivo																																																																																										
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>																																																																																											
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>																																																																																											
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Límite Líquido	Promedio																																																																																		
		(T) Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)																																																																																					
23	79	75,53	88,09	80,27	7,82	4,74	164,98	163,33	164,47																																																																																		
27	88	75,35	87,89	80,11	7,78	4,76	163,45	164,92																																																																																			
30	197	75,52	88,13	80,34	7,79	4,82	161,62	165,17																																																																																			
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>									<b>IP</b>																																																																																		
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad																																																																																		
	(T) Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)																																																																																						
54	11,09	20,46	18,18	2,28	7,09	32,16	32,16	31,50	132,97																																																																																		
66	10,93	20,29	18,04	2,25	7,11	31,65	31,65																																																																																				
97	10,67	20,08	17,87	2,21	7,20	30,69	30,69																																																																																				

MUESTRA: <u>M-28</u>		OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 100g NaCl /100g de arcilla, durante 72 horas a 60° de temperatura</u>	
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>			
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>			
Ws	9,7	gr	
Coloides	42	%	
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>			
D	R	D	R
5	-	70	-
10	-	75	-
15	-	80	-
20	-	85	-
25	-	90	-
30	-	95	-
35	-	100	-
40	-	105	-
45	-	110	-
50	-	115	-
55	-	120	-
60	-	125	+
65	-	1M	+

V	125	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)
VA	12,89	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción
Mo	0,10	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo
IN	30,68		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo

| **ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA** | | | | | |
| **Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido** | | | | | |

#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
22	13	119,17	134,8	124,85	9,92	5,68	174,65	172,03	172,74
26	24	119,73	132,5	124,45	8,09	4,72	171,40	172,26	
30	100	33,68	44,92	37,84	7,08	4,16	170,19	173,94	

| **Ensayo para el cálculo del límite plástico** | | | | | | **IP** |

Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
100	34,43	46,07	42,92	3,15	8,49	37,10	37,10	35,80	136,94
24	120,73	130,29	127,8	2,50	7,06	35,41	35,41		
13	120,37	128,76	126,6	2,17	6,22	34,89	34,89		

MUESTRA: <u>M-29</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 200g NaCl /100g de arcilla, durante 72 horas a 60° de temperatura</u>								
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>									
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	9,68	gr							
Coloides	42	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R	D	R	D	R				
5	-	70	-	135	-				
10	-	75	-	140	-				
15	-	80	-	145	+				
20	-	85	-	1M	+				
25	-	90	-	2M	-				
30	-	95	-	149	-				
35	-	100	-	151	-				
40	-	105	-	153	+				
45	-	110	-	1M	+				
50	-	115	-	2M	+				
55	-	120	-	3M	+				
60	-	125	-	4M	+				
65	-	130	-	5M	+				
V	153	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno			D	Dosis (cc)		
VA	15,81	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco			R	Reacción		
Mo	0,12	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide			-	Negativo		
IN	37,63		IN= Indice de nocividad de los coloides			+	Positivo		
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
21	97	10,87	25,74	16,04	9,70	5,17	187,62	183,68	
23	66	10,43	23,09	14,90	8,19	4,47	183,22	181,39	
25	54	11,09	23,00	15,34	7,66	4,25	180,24	180,24	
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>								<b>IP</b>	
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
197	75,52	86,62	83,24	3,38	7,72	43,78	43,78	41,82	139,95
88	75,35	84,8	82,02	2,78	6,67	41,68	41,68		
79	75,93	84,82	82,28	2,54	6,35	40,00	40,00		

MUESTRA: <u>M-30</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 50g NaCl /100g de arcilla, durante 72 horas a 60° de temperatura</u>								
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>									
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	9,52	gr							
Coloides	44	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R	D		R					
5	-	70		-					
10	-	75		-					
15	-	80		-					
20	-	85		-					
25	-	90		-					
30	-	95		-					
35	-	100	-						
40	-	105	-						
45	-	110	-						
50	-	115	-						
55	-	120	-						
60	-	125	-						
65	-	130	-						
V	140	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)				
VA	14,71	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción				
Mo	0,10	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo				
IN	33,42		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo				
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
20	69	10,34	23,15	15,53	7,62	5,19	146,82	143,00	142,56
22	30	10,10	23,57	15,62	7,95	5,52	144,02	141,86	
25	92	10,23	21,23	14,76	6,47	4,53	142,83	142,83	
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>								<b>IP</b>	
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
44	76,69	86,25	84,44	1,81	7,75	23,35	23,35	22,15	120,42
42	75,93	85,98	84,18	1,80	8,25	21,82	21,82		
29	78,05	86,26	84,82	1,44	6,77	21,27	21,27		

MUESTRA: <u>M-31</u>		OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 100g NaCl /100g de arcilla, durante 72 horas a 60° de temperatura</u>	
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>			
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>			
Ws	9,6	gr	
Coloides	44	%	
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>			
D	R	D	R
5	-	70	-
10	-	75	-
15	-	80	-
20	-	85	-
25	-	90	-
30	-	95	-
35	-	100	-
40	-	105	-
45	-	110	-
50	-	115	-
55	-	120	-
60	-	125	-
65	-	130	-

V	135	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)
VA	14,06	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción
Mo	0,10	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo
IN	31,96		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo

| **ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA** | | | | | |
| **Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido** | | | | | |

#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
22	12	14,32	27,77	19,37	8,40	5,05	166,34	163,84	161,74
25	14	14,43	25,36	18,63	6,73	4,20	160,24	160,24	
30	25	14,60	26,04	19,04	7,00	4,44	157,66	161,13	

| **Ensayo para el cálculo del límite plástico** | | | | | |

Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio	IP Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
4	121,65	131,69	129,2	2,49	7,55	32,98	32,98	30,57	131,16
16	121,74	129,9	128,0	1,88	6,28	29,94	29,94		
31	121,77	130,31	128,4	1,91	6,63	28,81	28,81		

MUESTRA: <u>M-32</u>		OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 200g NaCl /100g de arcilla, durante 72 horas a 60° de temperatura</u>	
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>			
PRUEBA DE AZUL DE METILENO			
Ws	9,59	gr	
Coloides	44	%	
PRUEBA DE LA MANCHA			
D	R	D	R
5	-	70	- 1M +
10	-	75	- 2M +
15	-	80	- 3M +
20	-	85	- 4M +
25	-	90	- 5M +
30	-	95	-
35	-	100	-
40	-	105	-
45	-	110	-
50	-	115	-
55	-	120	-
60	-	125	-
65	-	130	+

V	130	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)
VA	13,56	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción
Mo	0,10	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo
IN	30,81		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo

| ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA | | | | | | | | | |
| Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido | | | | | | | | | |

#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
25	31	120,77	131,0	124,60	6,37	3,83	166,32	166,40	
27	16	120,74	133,1	125,43	7,71	4,69	164,39		
30	4	120,65	133,0	125,35	7,68	4,70	163,40		

| Ensayo para el cálculo del límite plástico | | | | | | | | | IP |

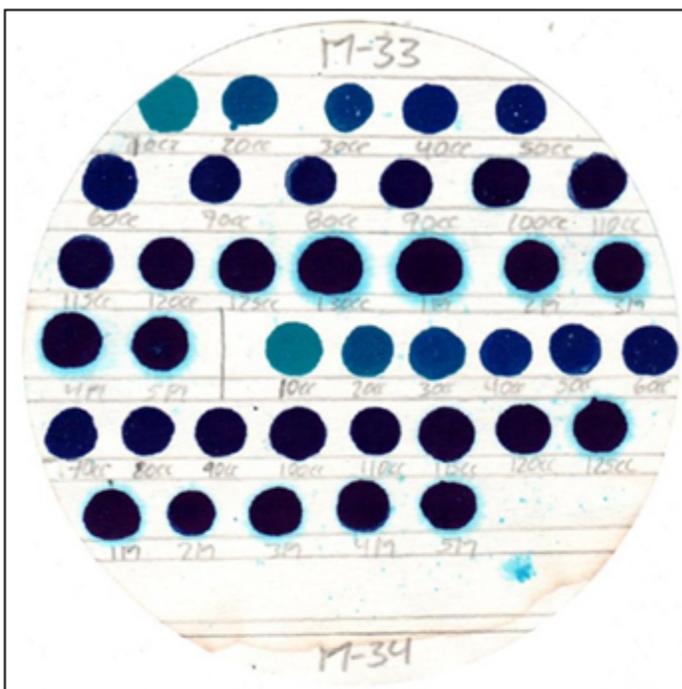
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
25	14,6	22,21	20,32	1,89	5,72	33,04	33,04	32,14	134,25
14	14,43	23,68	21,44	2,24	7,01	31,95	31,95		
12	14,62	23,86	21,65	2,21	7,03	31,44	31,44		

MUESTRA: <u>M-33</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 50g NaCl /100g de arcilla, durante 168 horas a 60° de temperatura</u>
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>	

**PRUEBA DE AZUL DE METILENO**

Ws	9,7	gr
Coloides	42	%

PRUEBA DE LA MANCHA					
D	R	D	R	D	R
5	-	70	-	1M	+
10	-	75	-	2M	+
15	-	80	-	3M	+
20	-	85	-	4M	+
25	-	90	-	5M	+
30	-	95	-		
35	-	100	-		
40	-	105	-		
45	-	110	-		
50	-	115	-		
55	-	120	-		
60	-	125	-		
65	-	130	+		



V	130	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)
VA	13,40	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción
Mo	0,10	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo
IN	31,91		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo

**ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA**

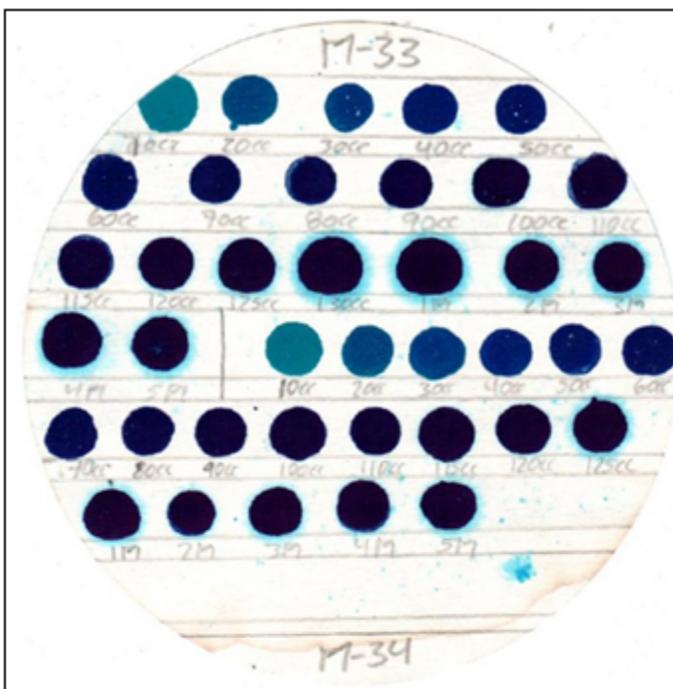
Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
25	29	78,05	89,43	82,71	6,72	4,66	144,21	144,21	143,77
28	42	75,98	89,26	81,49	7,77	5,51	141,02	142,99	
30	44	76,79	85,90	80,57	5,33	3,78	141,01	144,11	

Ensayo para el cálculo del límite plástico									IP
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
92	10,23	18,72	17,20	1,52	6,97	21,81	21,81	20,81	122,96
30	10,1	20,01	18,34	1,67	8,24	20,27	20,27		
69	10,34	17,14	15,99	1,15	5,65	20,35	20,35		

MUESTRA: <u>M-34</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 100g NaCl /100g de arcilla, durante 168 horas a 60° de temperatura</u>
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>	

**PRUEBA DE AZUL DE METILENO**

Ws	9,75	gr
Coloides	42	%



PRUEBA DE LA MANCHA					
D	R	D	R	D	R
5	-	70	-	2M	+
10	-	75	-	3M	+
15	-	80	-	4M	+
20	-	85	-	5M	+
25	-	90	-		
30	-	95	-		
35	-	100	-		
40	-	105	-		
45	-	110	-		
50	-	115	-		
55	-	120	-		
60	-	125	+		
65	-	1M	+		

V	125	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)
VA	12,82	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción
Mo	0,10	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo
IN	30,53		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo

**ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA**

**Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido**

#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
20	79	75,53	88,01	80,20	7,81	4,67	167,24	162,89	164,40
25	88	75,35	85,78	79,30	6,48	3,95	164,05	164,05	
30	197	75,52	86,71	79,78	6,93	4,26	162,68	166,25	

**Ensayo para el cálculo del límite plástico**

Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Límite Plástico	Promedio	IP Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
54	11,09	20,4	18,08	2,32	6,99	33,19	33,19	32,04	132,36
66	10,93	18,71	16,84	1,87	5,91	31,64	31,64		
97	10,67	19,02	17,03	1,99	6,36	31,29	31,29		

MUESTRA: <u>M-35</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 200g NaCl /100g de arcilla, durante 168 horas a 60° de temperatura</u>								
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>									
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	9,55	gr							
Coloides	42	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R	D	R	D	R				
5	-	70	-	4M	+				
10	-	75	-	5M	+				
15	-	80	-						
20	-	85	-						
25	-	90	-						
30	-	95	-						
35	-	100	-						
40	-	105	-						
45	-	110	-						
50	-	115	+						
55	-	1M	+						
60	-	2M	+						
65	-	3M	+						
V	115	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno			D	Dosis (cc)		
VA	12,04	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco			R	Reacción		
Mo	0,09	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide			-	Negativo		
IN	28,67		IN= Indice de nocividad de los coloides			+	Positivo		
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
20	13	119,17	131,1	123,57	7,53	4,40	171,14	166,69	168,15
23	24	119,73	132,8	124,57	8,21	4,84	169,63	167,93	
27	100	33,68	45,11	37,94	7,17	4,26	168,31	169,82	
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>								<b>IP</b>	
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
100	34,43	43,33	41,00	2,33	6,57	35,46	35,46	34,77	133,38
24	120,73	130,47	128,0	2,51	7,23	34,72	34,72		
13	120,37	128,9	126,7	2,17	6,36	34,12	34,12		

MUESTRA: <u>M-36</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 50g NaCl /100g de arcilla, durante 168 horas a 60° de temperatura</u>								
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>									
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	10,1	gr							
Coloides	44	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R	D	R	D	R				
5	-	70	-	4M	+				
10	-	75	-	5M	+				
15	-	80	-						
20	-	85	-						
25	-	90	-						
30	-	95	-						
35	-	100	-						
40	-	105	-						
45	-	110	-						
50	-	115	+						
55	-	1M	+						
60	-	2M	+						
65	-	3M	+						
V	115	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno			D	Dosis (cc)		
VA	11,39	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco			R	Reacción		
Mo	0,08	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide			-	Negativo		
IN	25,88		IN= Índice de nocividad de los coloides			+	Positivo		
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
20	97	10,67	21,47	14,91	6,56	4,24	154,72	150,69	154,47
27	66	10,43	21,55	14,81	6,74	4,38	153,88	155,27	
30	54	11,01	22,90	15,69	7,21	4,68	154,06	157,45	
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>								<b>IP</b>	
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
197	75,52	83,58	81,85	1,73	6,33	27,33	27,33	26,92	127,55
88	75,35	83,65	81,90	1,75	6,55	26,72	26,72		
79	75,93	84,8	82,93	1,87	7,00	26,71	26,71		

MUESTRA: <u>M-37</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 100g NaCl /100g de arcilla, durante 168 horas a 60° de temperatura</u>								
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>									
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	10	gr							
Coloides	44	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R	D		R					
5	-	70		-					
10	-	75		-					
15	-	80		-					
20	-	85		-					
25	-	90		-					
30	-	95		-					
35	-	100	-						
40	-	105	-						
45	-	110	-						
50	-	115	-						
55	-	120	+						
60	-	1M	+						
65	-	2M	+						
V	120	C.C.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)				
VA	12,00	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción				
Mo	0,09	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo				
IN	27,27		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo				
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
20	69	10,34	23,89	15,35	8,54	5,01	170,46	166,03	165,53
22	30	10,10	21,61	14,40	7,21	4,30	167,67	165,16	
27	92	10,23	21,42	14,47	6,95	4,24	163,92	165,39	
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>						<b>IP</b>			
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
44	76,69	86,8	84,17	2,63	7,48	35,16	35,16	33,55	131,97
42	75,93	84,52	82,36	2,16	6,43	33,59	33,59		
29	78,05	86,4	84,38	2,02	6,33	31,91	31,91		

MUESTRA: <u>M-38</u>		OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 200g NaCl /100g de arcilla, durante 168 horas a 60° de temperatura</u>	
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>			
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>			
Ws	10,2	gr	
Coloides	44	%	
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>			
D	R	D	R
5	-	70	-
10	-	75	-
15	-	80	-
20	-	85	-
25	-	90	-
30	-	95	-
35	-	100	-
40	-	105	-
45	-	110	-
50	-	115	-
55	-	120	-
60	-	125	+
65	-	1M	+

V	125	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)
VA	12,25	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción
Mo	0,09	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo
IN	27,85		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo

| **ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA** | | | | | |
| **Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido** | | | | | |

#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Límite Líquido	Promedio
		(T) Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
24	12	14,59	26,80	19,16	7,64	4,57	167,18	166,34	
28	14	14,45	26,32	18,92	7,40	4,47	165,55	167,87	
30	25	14,60	26,03	18,91	7,12	4,31	165,20	168,83	

| **Ensayo para el cálculo del límite plástico** | | | | | | **IP** |

Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T) Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
4	121,65	130,76	128,5	2,28	6,83	33,38	33,38	32,69	134,99
16	121,74	130,6	128,4	2,17	6,69	32,44	32,44		
31	121,77	130,3	128,2	2,08	6,45	32,25	32,25		

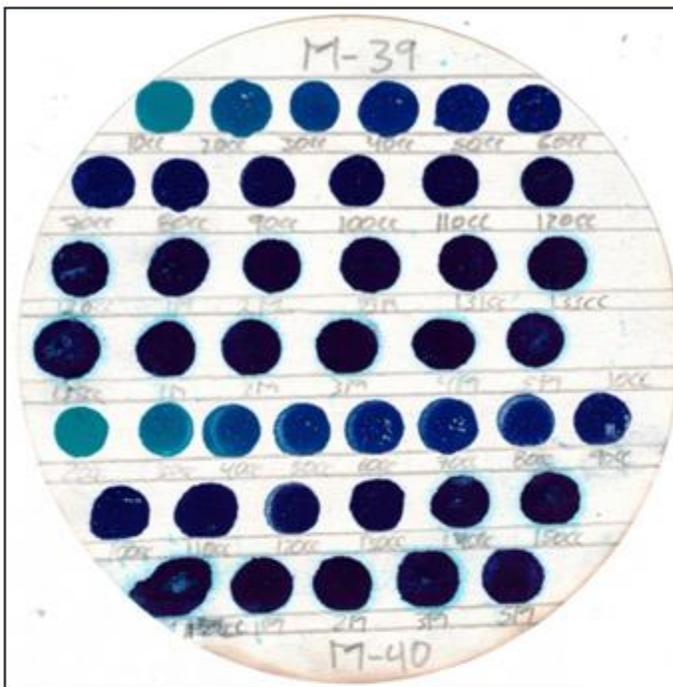
MUESTRA: <u>M-39</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 50g NaCl /100g de arcilla, durante 24 horas a 90° de temperatura</u>
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>	

**PRUEBA DE AZUL DE METILENO**

Ws	10,1	gr
Coloides	42	%

**PRUEBA DE LA MANCHA**

D	R	D	R	D	R
5	-	70	-	1M	+
10	-	75	-	2M	+
15	-	80	-	3M	-
20	-	85	-	131	-
25	-	90	-	133	-
30	-	95	-	135	+
35	-	100	-	1M	+
40	-	105	-	2M	+
45	-	110	-	3M	+
50	-	115	-	4M	+
55	-	120	-	5M	+
60	-	125	-		
65	-	130	+		



V	135	c.c.
VA	13,37	gr/100gr
Mo	0,10	moles
IN	31,82	

V= Volumen consumido de azul de metileno  
 VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco  
 Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide  
 IN= Indice de nocividad de los coloides

D	Dosis (cc)
R	Reacción
-	Negativo
+	Positivo

**ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA**

**Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido**

#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
20	31	120,77	132,1	124,81	7,26	4,04	179,70	175,03	176,05
22	16	120,74	133,1	125,17	7,92	4,43	178,78	176,10	
25	4	120,48	131,1	124,31	6,78	3,83	177,02	177,02	

**Ensayo para el cálculo del límite plástico**

Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio	IP Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
25	14,6	23,03	20,64	2,39	6,04	39,57	39,57	39,10	136,95
14	14,43	23,65	21,05	2,60	6,62	39,27	39,27		
12	14,62	22,54	20,34	2,20	5,72	38,46	38,46		

MUESTRA: <u>M-40</u>		OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 100g NaCl /100g</u>	
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>		<u>de arcilla, durante 24 horas a 90° de temperatura</u>	
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>			
Ws	10	gr	
Coloides	42	%	
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>			
D	R	D	R
5	-	70	-
10	-	75	-
15	-	80	-
20	-	85	-
25	-	90	-
30	-	95	-
35	-	100	-
40	-	105	-
45	-	110	-
50	-	115	-
55	-	120	-
60	-	125	-
65	-	130	-

V	155	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)
VA	15,50	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción
Mo	0,12	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo
IN	36,90		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo

| **ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA** | | | | | |
| **Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido** | | | | | |

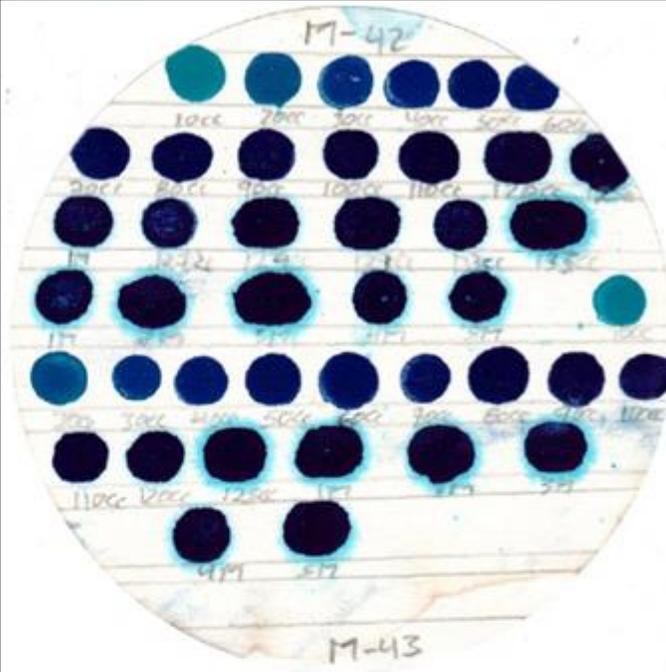
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
20	29	78,35	88,96	82,16	6,80	3,81	178,48	173,84	171,09
22	42	75,93	88,79	80,64	8,15	4,71	173,04	170,44	
24	44	76,79	87,26	80,67	6,59	3,88	169,85	169,00	

| **Ensayo para el cálculo del límite plástico** | | | | | | **IP** |

Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
92	10,23	18,15	15,92	2,23	5,69	39,19	39,19	36,81	134,28
30	10,1	19,7	17,14	2,56	7,04	36,36	36,36		
69	10,34	18,15	16,13	2,02	5,79	34,89	34,89		

MUESTRA: <u>M-41</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 200g NaCl de arcilla, durante 24 horas a 90° de temperatura</u>								
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>									
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	10,2	gr							
Coloides	42	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R	D R D R							
5	-	70 - 1M +							
10	-	75 - 2M +							
15	-	80 - 3M +							
20	-	85 - 4M +							
25	-	90 - 5M +							
30	-	95 -							
35	-	100 -							
40	-	105 -							
45	-	110 -							
50	-	115 -							
55	-	120 -							
60	-	125 -							
65	-	130 +							
V	130	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)				
VA	12,75	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción				
Mo	0,09	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo				
IN	30,35		IN= Índice de nocividad de los coloides	+	Positivo				
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Límite Líquido	Promedio
		(T) Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
25	79	76,78	88,83	80,89	7,94	4,11	193,19	192,07	
27	88	76,35	86,91	79,98	6,93	3,63	190,91		
29	197	76,48	88,42	80,64	7,78	4,16	187,02		
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>						<b>IP</b>			
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T) Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
54	11,09	20,08	17,24	2,84	6,15	46,18	46,18	44,94	147,13
66	10,93	18,81	16,35	2,46	5,42	45,39	45,39		
97	10,67	19,58	16,89	2,69	6,22	43,25	43,25		

MUESTRA: <u>M-42</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 50g NaCl /100g de arcilla, durante 24 horas a 90° de temperatura</u>								
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>									
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	10,5	gr							
Coloides	44	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R	D R D R							
5	-	70 - 135		+					
10	-	75 - 1M		+					
15	-	80 - 2M		+					
20	-	85 - 3M		+					
25	-	90 - 4M		+					
30	-	95 - 5M		+					
35	-	100							
40	-	105							
45	-	110							
50	-	115							
55	-	120							
60	-	125							
65	-	130							
V	135	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)				
VA	12,86	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción				
Mo	0,09	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo				
IN	29,22		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo				
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Límite Líquido	Promedio
		(T) Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
20	13	119,57	132,1	124,31	7,83	4,74	165,19	160,89	160,67
25	24	119,73	132,6	124,60	7,98	4,87	163,86	163,86	
27	100	33,68	45,50	38,30	7,20	4,62	155,84	157,25	
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>						<b>IP</b>			
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T) Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
100	34,43	43,81	41,52	2,29	7,09	32,30	32,30	30,62	130,05
24	120,73	130,32	128,0	2,31	7,28	31,73	31,73		
13	120,37	129,19	127,3	1,92	6,90	27,83	27,83		

MUESTRA: <u>M-43</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 100g NaCl /100g de arcilla, durante 24 horas a 90° de temperatura</u>								
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>									
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	9,6	gr							
Coloides	44	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R	D	R						
5	-	70	- 2M +						
10	-	75	- 3M +						
15	-	80	- 4M +						
20	-	85	- 5M +						
25	-	90	-						
30	-	95	-						
35	-	100	-						
40	-	105	-						
45	-	110	-						
50	-	115	-						
55	-	120	-						
60	-	125	+						
65	-	1M	+						
V	125	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno						
VA	13,02	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco						
Mo	0,09	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide						
IN	29,59		IN= Indice de nocividad de los coloides						
D	Dosis (cc)								
R	Reacción								
-	Negativo								
+	Positivo								
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
23	97	11,22	22,37	15,36	7,01	4,14	169,32	167,63	165,06
28	66	10,43	21,14	14,51	6,63	4,08	162,50	164,78	
30	54	11,09	21,85	15,24	6,61	4,15	159,28	162,78	
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>									<b>IP</b>
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
197	75,52	83,84	81,71	2,13	6,19	34,41	34,41	31,64	133,42
88	75,35	83,34	81,44	1,90	6,09	31,20	31,20		
79	75,93	83,96	82,14	1,82	6,21	29,31	29,31		

MUESTRA: <u>M-44</u>		OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 200g NaCl /100g de arcilla, durante 24 horas a 90° de temperatura</u>	
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>			
PRUEBA DE AZUL DE METILENO			
Ws	10,2	gr	
Coloides	44	%	
PRUEBA DE LA MANCHA			
D	R	D	R
5	-	70	-
10	-	75	-
15	-	80	-
20	-	85	-
25	-	90	-
30	-	95	-
35	-	100	-
40	-	105	-
45	-	110	-
50	-	115	-
55	-	120	-
60	-	125	+
65	-	1M	+

V	125	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)
VA	12,25	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción
Mo	0,09	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo
IN	27,85		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo

| ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA | | | | | |
| Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido | | | | | |

#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
20	69	11,34	21,74	14,90	6,84	3,56	192,13	187,14	
22	30	11,25	22,95	15,28	7,67	4,03	190,32	187,47	
27	92	11,23	20,99	14,60	6,39	3,37	189,61	191,32	

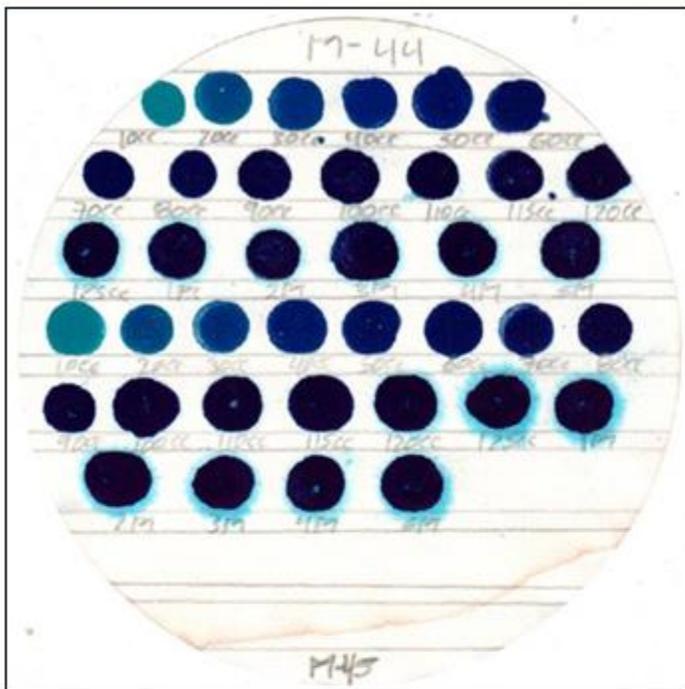
| Ensayo para el cálculo del límite plástico | | | | | | | | IP |

Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
44	76,69	84,45	82,02	2,43	5,33	45,59	45,59	45,02	143,63
42	75,93	84,66	81,95	2,71	6,02	45,02	45,02		
29	78,05	85,33	83,09	2,24	5,04	44,44	44,44		

MUESTRA: <u>M-45</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 50g NaCl /100g de arcilla, durante 72 horas a 90° de temperatura</u>
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>	

**PRUEBA DE AZUL DE METILENO**

Ws	10,1	gr
Coloides	42	%



PRUEBA DE LA MANCHA					
D	R	D	R	D	R
5	-	70	-	2M	+
10	-	75	-	3M	+
15	-	80	-	4M	+
20	-	85	-	5M	+
25	-	90	-		
30	-	95	-		
35	-	100	-		
40	-	105	-		
45	-	110	-		
50	-	115	-		
55	-	120	-		
60	-	125	+		
65	-	1M	+		

V	125	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)
VA	12,38	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción
Mo	0,09	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo
IN	29,47		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo

**ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA**

**Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido**

#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Límite Líquido	Promedio
		(T) Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
20	12	14,32	27,91	19,90	8,01	5,58	143,55	139,82	
25	14	14,43	26,38	19,34	7,04	4,91	143,38	143,38	
30	25	14,60	24,77	18,80	5,97	4,20	142,14	145,27	

**Ensayo para el cálculo del límite plástico**

Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Límite Plástico	Promedio	IP Índice de plasticidad
	(T) Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
4	121,65	131,79	130,0	1,80	8,34	21,58	21,58	21,32	121,50
16	121,74	130,66	129,1	1,58	7,34	21,53	21,53		
31	121,77	129,36	128,1	1,31	6,28	20,86	20,86		

MUESTRA: <u>M-46</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 100g NaCl /100g de arcilla, durante 72 horas a 90° de temperatura</u>								
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>									
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	10,25	gr							
Coloides	42	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R	D R D R							
5	-	70 - 2M +							
10	-	75 - 3M +							
15	-	80 - 4M +							
20	-	85 - 5M +							
25	-	90 -							
30	-	95 -							
35	-	100 -							
40	-	105 -							
45	-	110 -							
50	-	115 -							
55	-	120 -							
60	-	125 +							
65	-	1M +							
V	125	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)				
VA	12,20	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción				
Mo	0,09	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo				
IN	29,04		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo				
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
22	31	121,97	133,7	126,45	7,27	4,48	162,28	159,84	161,88
25	16	121,83	132,7	125,98	6,72	4,15	161,93	161,93	
30	4	121,45	130,5	124,93	5,58	3,48	160,34	163,87	
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>						<b>IP</b>			
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
25	14,6	23,37	21,30	2,07	6,70	30,90	30,90	30,50	131,38
14	14,43	22,54	20,64	1,90	6,21	30,60	30,60		
12	14,62	21,38	19,82	1,56	5,20	30,00	30,00		

MUESTRA: <u>M-47</u>		OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 200g NaCl /100g</u>							
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>		<u>de arcilla, durante 72 horas a 90° de temperatura</u>							
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	9,75	gr							
Coloides	42	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R	D	R						
5	-	70	-						
10	-	75	-						
15	-	80	-						
20	-	85	-						
25	-	90	-						
30	-	95	-						
35	-	100	-						
40	-	105	-						
45	-	110	-						
50	-	115	-						
55	-	120	+						
60	-	1M	+						
65	-	2M	+						
V	126	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno						
VA	12,92	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco						
Mo	0,10	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide						
IN	30,77		IN= Indice de nocividad de los coloides						
D			D Dosis (cc)						
R			R Reacción						
-			- Negativo						
+			+ Positivo						
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
20	29	78,15	90,60	82,92	7,68	4,77	161,01	156,82	160,32
25	42	75,93	87,94	80,54	7,40	4,61	160,52	160,52	
30	44	76,79	87,48	80,90	6,58	4,11	160,10	163,62	
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>									<b>IP</b>
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
92	10,23	19,52	17,36	2,16	7,13	30,29	30,29	30,03	130,29
30	10,1	19,06	16,99	2,07	6,89	30,04	30,04		
69	10,34	18,32	16,49	1,83	6,15	29,76	29,76		

MUESTRA: <u>M-48</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 50g NaCl /100g de arcilla, durante 72 horas a 90° de temperatura</u>								
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>									
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	10,14	gr							
Coloides	44	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R	D	R	D	R				
5	-	70	-	135	+				
10	-	75	-	1M	+				
15	-	80	-	2M	+				
20	-	85	-	3M	+				
25	-	90	-	4M	+				
30	-	95	-	5M	+				
35	-	100	-						
40	-	105	-						
45	-	110	-						
50	-	115	-						
55	-	120	-						
60	-	125	-						
65	-	130	-						
V	135	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno			D	Dosis (cc)		
VA	13,31	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco			R	Reacción		
Mo	0,09	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide			-	Negativo		
IN	30,26		IN= Índice de nocividad de los coloides			+	Positivo		
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
20	79	75,93	89,87	81,84	8,03	5,91	135,87	132,34	132,88
23	88	75,55	86,61	80,27	6,34	4,72	134,32	132,98	
26	197	75,32	87,86	80,71	7,15	5,39	132,65	133,32	
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>								<b>IP</b>	
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
54	11,09	21,49	19,92	1,57	8,83	17,78	17,78	16,97	115,91
66	10,93	19,18	17,99	1,19	7,06	16,86	16,86		
97	10,67	20,03	18,72	1,31	8,05	16,27	16,27		

MUESTRA: <u>M-49</u>		OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 100g NaCl /100g</u>							
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>		<u>de arcilla, durante 72 horas a 90° de temperatura</u>							
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	10,15	gr							
Coloides	44	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R	D	R						
5	-	70	-						
10	-	75	-						
15	-	80	-						
20	-	85	-						
25	-	90	-						
30	-	95	-						
35	-	100	-						
40	-	105	-						
45	-	110	-						
50	-	115	-						
55	-	120	+						
60	-	1M	-						
65	-	122	-						
V	130	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno						
VA	12,81	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco						
Mo	0,09	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide						
IN	29,11		IN= Índice de nocividad de los coloides						
D	Dosis (cc)								
R	Reacción								
-	Negativo								
+	Positivo								
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
22	13	119,57	132,3	124,53	7,73	4,96	155,85	153,51	154,15
25	24	119,99	130,3	124,06	6,27	4,07	154,05	154,05	
28	100	33,68	43,31	37,49	5,82	3,81	152,76	154,89	
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>									<b>IP</b>
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
100	34,43	43,9	41,84	2,06	7,41	27,80	27,80	27,05	127,11
24	120,73	128,45	126,8	1,64	6,08	26,97	26,97		
13	120,37	127,56	126,1	1,50	5,69	26,36	26,36		

MUESTRA: <u>M-50</u>		OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 200g NaCl /100g</u>							
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>		<u>de arcilla, durante 72 horas a 90° de temperatura</u>							
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	9,65	gr							
Coloides	44	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R	D	R						
5	-	70	- 2M +						
10	-	75	- 3M +						
15	-	80	- 4M +						
20	-	85	- 5M +						
25	-	90	-						
30	-	95	-						
35	-	100	-						
40	-	105	-						
45	-	110	-						
50	-	115	-						
55	-	120	-						
60	-	125	+						
65	-	1M	+						
V	125	C.C.	V= Volumen consumido de azul de metileno						
VA	12,95	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco						
Mo	0,09	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide						
IN	29,44		IN= Indice de nocividad de los coloides						
D	Dosis (cc)								
R	Reacción								
-	Negativo								
+	Positivo								
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
20	97	10,67	23,27	14,94	8,33	4,27	195,08	190,01	165,17
24	66	10,93	22,98	15,67	7,31	4,74	154,22	153,45	
27	54	11,09	23,85	16,18	7,67	5,09	150,69	152,04	
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>									<b>IP</b>
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
197	75,52	84,92	81,90	3,02	6,38	47,34	47,34	33,08	132,09
88	75,35	84,34	82,44	1,90	7,09	26,80	26,80		
79	75,93	85,45	83,54	1,91	7,61	25,10	25,10		

MUESTRA: <u>M-51</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 50g NaCl /100g de arcilla, durante 168 horas a 90° de temperatura</u>								
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>									
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	9,5	gr							
Coloides	42	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R	D	R	D	R				
5	-	70	-	3M	+				
10	-	75	-	4M	+				
15	-	80	-	5M	+				
20	-	85	-						
25	-	90	-						
30	-	95	-						
35	-	100	-						
40	-	105	-						
45	-	110	-						
50	-	115	-						
55	-	120	+						
60	-	1M	+						
65	-	2M	+						
V	120	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno			D	Dosis (cc)		
VA	12,63	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco			R	Reacción		
Mo	0,09	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide			-	Negativo		
IN	30,08		IN= Índice de nocividad de los coloides			+	Positivo		
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
20	69	10,34	23,30	15,33	7,97	4,99	159,72	155,57	
22	30	10,10	22,44	14,89	7,55	4,79	157,62	155,26	
25	92	10,23	22,12	14,87	7,25	4,64	156,25	156,25	
155,69									
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>								<b>IP</b>	
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
44	76,69	86,36	84,15	2,21	7,46	29,62	29,62	28,75	126,94
42	75,93	85,14	83,09	2,05	7,16	28,63	28,63		
29	78,05	86,92	84,98	1,94	6,93	27,99	27,99		

MUESTRA: <u>M-52</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 100g NaCl /100g de arcilla, durante 168 horas a 90° de temperatura</u>								
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>									
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	9,5	gr							
Coloides	42	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R	D		R					
5	-	70		-	3M	+			
10	-	75		-	4M	+			
15	-	80		-	5M	+			
20	-	85		-					
25	-	90		-					
30	-	95		-					
35	-	100	-						
40	-	105	-						
45	-	110	-						
50	-	115	-						
55	-	120	+						
60	-	1M	+						
65	-	2M	+						
V	120	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)				
VA	12,63	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción				
Mo	0,09	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo				
IN	30,08		IN= Índice de nocividad de los coloides	+	Positivo				
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+W <sub>s</sub>	Agua	Suelo Seco (W <sub>s</sub> )			
22	12	14,62	28,09	19,84	8,25	5,22	158,05	155,68	157,35
25	14	14,43	25,94	18,90	7,04	4,47	157,49	157,49	
27	25	14,60	25,31	18,76	6,55	4,16	157,45	158,87	
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>						<b>IP</b>			
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ W <sub>s</sub>	Agua	Suelo Seco (W <sub>s</sub> )				
4	121,65	131,7	129,5	2,25	7,80	28,85	28,85	28,70	128,65
16	121,74	130,33	128,4	1,92	6,67	28,79	28,79		
31	121,77	129,76	128,0	1,77	6,22	28,46	28,46		

MUESTRA: <u>M-53</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 200g NaCl /100g de arcilla, durante 168 horas a 90° de temperatura</u>								
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>									
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	9,5	gr							
Coloides	42	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R	D R D R							
5	-	70 - 4M -							
10	-	75 - 117 -							
15	-	80 - 119 -							
20	-	85 - 121 -							
25	-	90 - 123 +							
30	-	95 - 1M +							
35	-	100 - 2M +							
40	-	105 - 3M +							
45	-	110 - 4M +							
50	-	115 + 5M +							
55	-	1M +							
60	-	2M +							
65	-	3M +							
V	123	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)				
VA	12,95	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción				
Mo	0,10	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo				
IN	30,83		IN= Índice de nocividad de los coloides	+	Positivo				
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
20	31	121,77	132,5	125,54	6,92	3,77	183,55	178,78	179,54
23	16	121,74	132,1	125,45	6,69	3,71	180,32	178,52	
27	4	121,65	130,6	124,85	5,75	3,20	179,69	181,30	
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>						<b>IP</b>			
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
25	14,6	22,58	20,24	2,34	5,64	41,49	41,49	40,26	139,28
14	14,43	22,19	19,98	2,21	5,55	39,82	39,82		
12	14,62	21,3	19,41	1,89	4,79	39,46	39,46		



MUESTRA: <u>M-55</u>		OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 100g NaCl /100g de arcilla, durante 168 horas a 90° de temperatura</u>	
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>			
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>			
Ws	9,55	gr	
Coloides	44	%	
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>			
D	R	D	R
5	-	70	-
10	-	75	-
15	-	80	-
20	-	85	-
25	-	90	-
30	-	95	-
35	-	100	-
40	-	105	-
45	-	110	-
50	-	115	+
55	-	117	+
60	-	1M	+
65	-	2M	+

V	117	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)
VA	12,25	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción
Mo	0,09	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo
IN	27,84		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo

| **ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA** | | | | | |
| **Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido** | | | | | |

#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
22	79	75,93	89,92	81,07	8,85	5,14	172,18	169,60	
23	88	75,35	88,23	80,11	8,12	4,76	170,59	168,88	
25	197	75,52	87,75	80,07	7,68	4,55	168,79	168,79	

| **Ensayo para el cálculo del límite plástico** | | | | | | **IP** |

Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
54	11,09	21,53	18,77	2,76	7,68	35,94	35,94	35,12	133,97
66	10,93	20,54	18,04	2,50	7,11	35,16	35,16		
97	10,67	19,8	17,47	2,33	6,80	34,26	34,26		

MUESTRA: <u>M-56</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 200g NaCl /100g de arcilla, durante 168 horas a 90° de temperatura</u>								
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>									
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	9,6	gr							
Coloides	44	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R	D	R	D	R				
5	-	70	-	2M	+				
10	-	75	-	3M	+				
15	-	80	-	4M	+				
20	-	85	-	5M	+				
25	-	90	-						
30	-	95	-						
35	-	100	-						
40	-	105	-						
45	-	110	-						
50	-	115	-						
55	-	120	-						
60	-	125	+						
65	-	1M	+						
V	125	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno			D	Dosis (cc)		
VA	13,02	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco			R	Reacción		
Mo	0,09	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide			-	Negativo		
IN	29,59		IN= Índice de nocividad de los coloides			+	Positivo		
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
21	13	120,37	133,0	124,71	8,30	4,34	191,24	187,23	186,54
23	24	120,73	131,5	124,47	7,03	3,74	187,97	186,09	
25	100	34,43	44,05	37,79	6,26	3,36	186,31	186,31	
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>								<b>IP</b>	
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
44	76,69	86,12	83,18	2,94	6,49	45,30	45,30	43,96	142,58
42	75,93	83,97	81,52	2,45	5,59	43,83	43,83		
29	78,05	85,23	83,08	2,15	5,03	42,74	42,74		

MUESTRA: <u>M-62</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 38g NaCl - 6,3g NaHCO<sub>3</sub> - 0,5g NaOH /100g de arcilla, durante 48 horas</u>								
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>									
PRUEBA DE AZUL DE METILENO									
Ws	10,00 gr								
Coloides	42 %								
PRUEBA DE LA MANCHA									
D	R	D	R	D	R				
5	-	70	-	4M	+				
10	-	75	-	5M	+				
15	-	80	-						
20	-	85	-						
25	-	90	-						
30	-	95	-						
35	-	100	-						
40	-	105	-						
45	-	110	-						
50	-	115	+						
55	-	1M	+						
60	-	2M	+						
65	-	3M	+						
V	115	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)				
VA	11,50	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción				
Mo	0,09	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo				
IN	27,38		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo				
ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA									
Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
21	66	7,60	19,69	12,90	6,78	5,30	127,88	125,20	131,45
24	40	7,68	19,50	12,86	6,64	5,18	128,32	127,67	
28	93	7,50	22,67	13,83	8,84	6,33	139,54	141,49	
Ensayo para el cálculo del límite plástico						IP			
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
37	5,98	14,7651	13,03	1,73	7,05	24,56	24,56	25,84	105,61
12	7,41	14,6241	12,99	1,64	5,58	29,40	29,40		
92	7,64	17,0016	15,22	1,79	7,58	23,57	23,57		

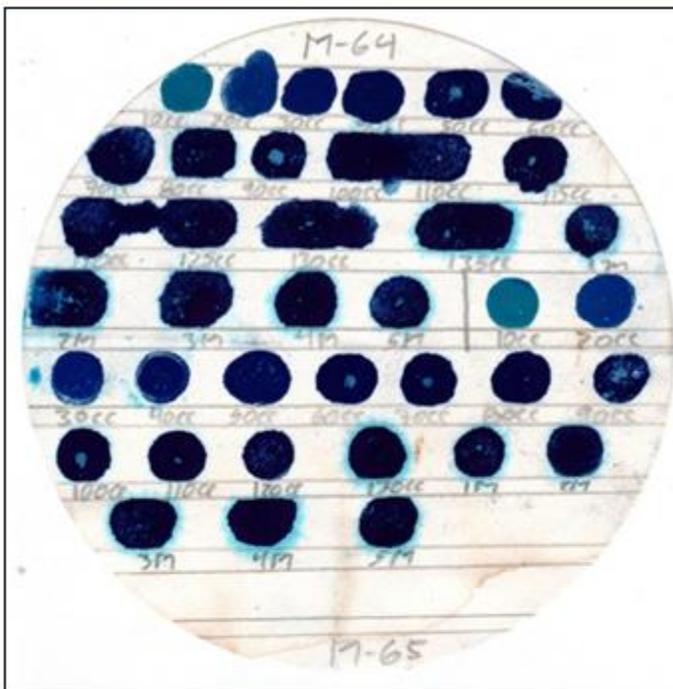
MUESTRA: <u>M-63</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 38g NaCl - 6,3g NaHCO<sub>3</sub> - 0,5g NaOH /100g de arcilla, durante 48 horas</u>								
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>									
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	10,00	gr							
Coloides	44	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R	D	R	D	R				
5	-	70	-	3M	+				
10	-	75	-	4M	+				
15	-	80	-	5M	+				
20	-	85	-						
25	-	90	-						
30	-	95	-						
35	-	100	-						
40	-	105	-						
45	-	110	-						
50	-	115	-						
55	-	120	+						
60	-	1M	+						
65	-	2M	+						
V	120	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno			D	Dosis (cc)		
VA	12,00	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco			R	Reacción		
Mo	0,09	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide			-	Negativo		
IN	27,27		IN= Indice de nocividad de los coloides			+	Positivo		
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
23	39	7,62	16,60	11,27	5,33	3,65	146,21	144,75	146,97
25	20	8,50	18,04	12,37	5,67	3,87	146,69	146,69	
27	62	6,04	15,45	9,83	5,62	3,79	148,14	149,47	
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>								<b>IP</b>	
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
9	8,6	15,7681	14,08	1,68	5,48	30,73	30,73	31,73	115,24
19	9,66	17,1388	15,34	1,80	5,68	31,77	31,77		
45	6,19	14,6745	12,58	2,09	6,39	32,70	32,70		

MUESTRA: <u>M-64</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 38g NaCl - 0,5g NaOH /100g de arcilla, durante 48 horas</u>								
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>									
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	10,00	gr							
Coloides	42	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R	D		R					
5	-	70		-	135	+			
10	-	75		-	1M	+			
15	-	80		-	2M	+			
20	-	85		-	3M	+			
25	-	90		-	4M	+			
30	-	95		-	5M	+			
35	-	100	-						
40	-	105	-						
45	-	110	-						
50	-	115	-						
55	-	120	-						
60	-	125	-						
65	-	130	-						
V	135	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)				
VA	13,50	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción				
Mo	0,10	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo				
IN	32,14		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo				
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Limite Líquido	Promedio
		(T) Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
21	17	8,41	18,69	12,66	6,03	4,25	141,83	138,85	148,27
25	45	6,19	17,20	10,62	6,59	4,43	148,73	148,73	
29	68	6,36	18,02	10,94	7,08	4,58	154,46	157,24	
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>						<b>IP</b>			
Envase N°	(T) Tara envase	Peso en gramos				W Humedad (%)	(%) LP Limite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
		T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
68	6,36	17,7534	15,19	2,56	8,83	29,00	29,00	32,93	115,34
20	8,5	16,3446	14,33	2,01	5,83	34,44	34,44		
62	6,04	17,1171	14,22	2,89	8,18	35,35	35,35		

MUESTRA: <u>M-65</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 38g NaCl - 0,5g NaOH /100g de arcilla, durante 48 horas</u>
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>	

**PRUEBA DE AZUL DE METILENO**

Ws	10,00	gr
Coloides	44	%



**PRUEBA DE LA MANCHA**

D	R	D	R	D	R
5	-	70	-	1M	+
10	-	75	-	2M	+
15	-	80	-	3M	+
20	-	85	-	4M	+
25	-	90	-	5M	+
30	-	95	-		
35	-	100	-		
40	-	105	-		
45	-	110	-		
50	-	115	-		
55	-	120	-		
60	-	125	-		
65	-	130	+		

V	130	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)
VA	13,00	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción
Mo	0,09	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo
IN	29,55		IN= Índice de nocividad de los coloides	+	Positivo

**ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA**

**Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido**

#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Limite Líquido	Promedio
		(T) Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
22	92	7,64	17,58	11,80	5,79	4,16	139,21	137,12	146,00
25	57	6,00	16,68	10,33	6,35	4,33	146,85	146,85	
28	104	10,14	22,28	14,96	7,32	4,82	151,90	154,03	

**Ensayo para el cálculo del límite plástico**

Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Limite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T) Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
17	8,41	16,7037	14,75	1,96	6,34	30,91	30,91	30,08	115,92
39	7,62	15,8458	13,94	1,91	6,32	30,14	30,14		
92	7,64	16,7103	14,66	2,05	7,02	29,20	29,20		

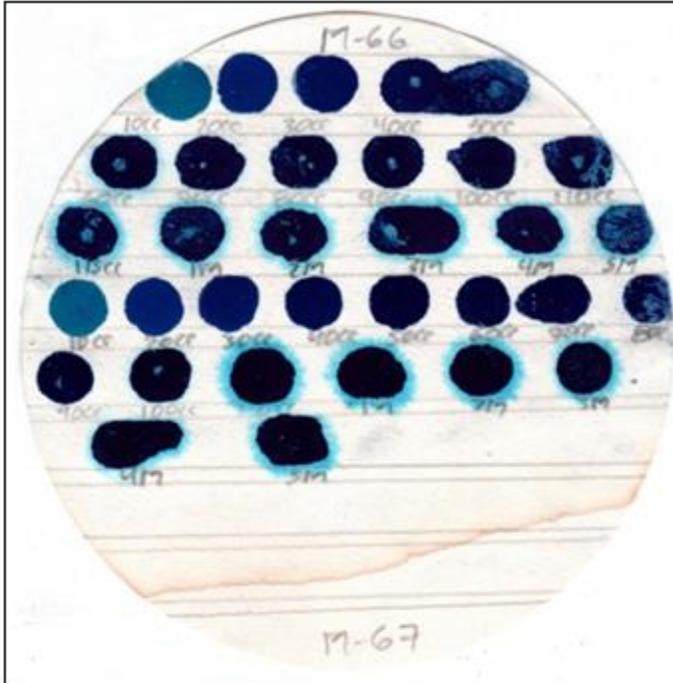
MUESTRA: <u>M-66</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 38g NaCl - 6,3g NaHCO<sub>3</sub>/100g de arcilla, durante 48 horas</u>
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>	

**PRUEBA DE AZUL DE METILENO**

Ws	10,00	gr
Coloides	42	%

**PRUEBA DE LA MANCHA**

D	R	D	R	D	R
5	-	70	-	4M	+
10	-	75	-	5M	+
15	-	80	-		
20	-	85	-		
25	-	90	-		
30	-	95	-		
35	-	100	-		
40	-	105	-		
45	-	110	-		
50	-	115	+		
55	-	1M	+		
60	-	2M	+		
65	-	3M	+		



V	115	c.c.
VA	11,50	gr/100gr
Mo	0,09	moles
IN	27,38	

V= Volumen consumido de azul de metileno  
 VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco  
 Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide  
 IN= Indice de nocividad de los coloides

D	Dosis (cc)
R	Reacción
-	Negativo
+	Positivo

**ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA**

**Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido**

#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Limite Líquido	Promedio
		(T) Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
21	86	3,87	18,25	10,13	8,12	6,26	129,83	127,10	135,87
25	9	8,60	20,54	13,72	6,82	5,12	133,33	133,33	
29	19	9,66	24,40	15,69	8,71	6,03	144,59	147,19	

**Ensayo para el cálculo del límite plástico**

Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Limite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T) Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
20	8,5	17,3358	15,70	1,64	7,20	22,80	22,80	25,32	110,56
45	6,19	15,4046	13,58	1,82	7,39	24,69	24,69		
68	6,36	18,3	15,66	2,64	9,30	28,45	28,45		

MUESTRA: <u>M-67</u>		OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 38g NaCl - 6,3g NaHCO<sub>3</sub>/100g de arcilla, durante 48 horas</u>	
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>			
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>			
Ws	10,00	gr	
Coloides	44	%	
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>			
D	R	D	R
5	-	70	-
10	-	75	-
15	-	80	-
20	-	85	-
25	-	90	-
30	-	95	-
35	-	100	-
40	-	105	-
45	-	110	+
50	-	1M	+
55	-	2M	+
60	-	3M	+
65	-	4M	+

V	110	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)
VA	11,00	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción
Mo	0,08	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo
IN	25,00		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo

| **ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA** | | | | | |
| Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido | | | | | |

#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Limite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
23	35	7,46	23,90	14,42	9,48	6,96	136,18	134,82	139,98
25	66	7,60	23,57	14,27	9,30	6,67	139,38	139,38	
27	40	7,68	24,14	14,41	9,72	6,73	144,43	145,73	

| Ensayo para el cálculo del límite plástico | | | | | | IP |

Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Limite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
93	7,5	17,9264	15,72	2,21	8,22	26,85	26,85	24,83	115,15
9	8,6	17,6796	15,99	1,69	7,39	22,94	22,94		
19	9,66	18,1014	16,43	1,67	6,77	24,69	24,69		

MUESTRA: <u>M-68</u>		OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 50g NaCl (previamente) -</u>							
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>		<u>6,3g NaHCO<sub>3</sub> - 1,0g NaOH /100g de arcilla, durante 48 horas</u>							
<b>PRUEBA DE AZUL DE METILENO</b>									
Ws	10,00	gr							
Coloides	42	%							
<b>PRUEBA DE LA MANCHA</b>									
D	R	D	R						
5	-	70	- 2M -						
10	-	75	- 127 -						
15	-	80	- 129 +						
20	-	85	- 1M +						
25	-	90	- 2M +						
30	-	95	- 3M +						
35	-	100	- 4M +						
40	-	105	- 5M +						
45	-	110	-						
50	-	115	-						
55	-	120	-						
60	-	125	+						
65	-	1M	+						
V	129	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno						
VA	12,90	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco						
Mo	0,10	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide						
IN	30,71		IN= Indice de nocividad de los coloides						
D	Dosis (cc)								
R	Reacción								
-	Negativo								
+	Positivo								
<b>ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA</b>									
<b>Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido</b>									
#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Limite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
22	93	7,50	21,41	13,12	8,29	5,62	147,67	145,46	154,05
25	37	5,98	19,89	11,47	8,42	5,49	153,45	153,45	
28	39	7,62	21,61	12,98	8,63	5,36	161,00	163,25	
<b>Ensayo para el cálculo del límite plástico</b>									<b>IP</b>
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Limite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
66	7,6	16,0569	14,43	1,63	6,83	23,86	23,86	24,22	129,83
62	6,04	14,9169	13,19	1,73	7,15	24,18	24,18		
17	8,41	16,2072	14,67	1,54	6,26	24,61	24,61		

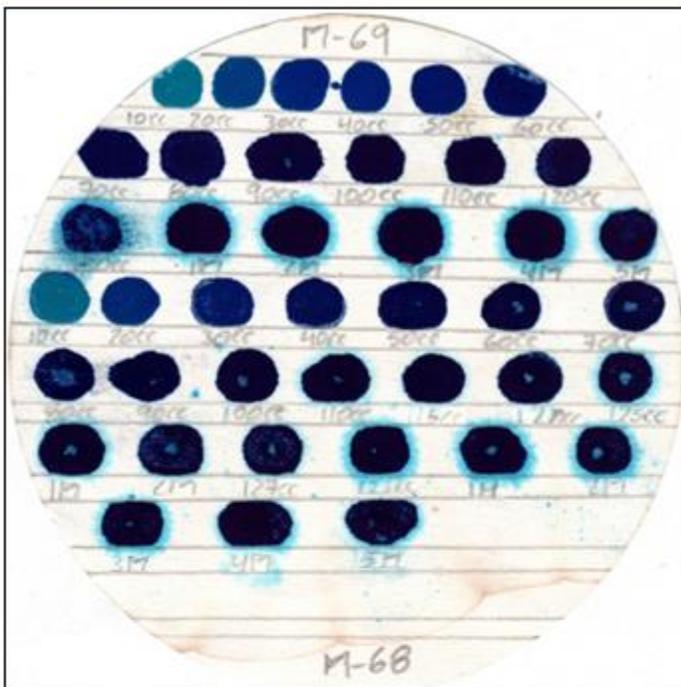
MUESTRA: <u>M-69</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 50g NaCl (previamente) -</u>
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>	<u>6,3g NaHCO<sub>3</sub> - 1,0g NaOH /100g de arcilla, durante 48 horas</u>

**PRUEBA DE AZUL DE METILENO**

Ws	10,00	gr
Coloides	44	%

**PRUEBA DE LA MANCHA**

D	R	D	R	D	R
5	-	70	-	1M	+
10	-	75	-	2M	+
15	-	80	-	3M	+
20	-	85	-	4M	+
25	-	90	-	5M	+
30	-	95	-		
35	-	100	-		
40	-	105	-		
45	-	110	-		
50	-	115	-		
55	-	120	-		
60	-	125	-		
65	-	130	+		



V	130	c.c.
VA	13,00	gr/100gr
Mo	0,09	moles
IN	29,55	

V= Volumen consumido de azul de metileno  
 VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco  
 Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide  
 IN= Indice de nocividad de los coloides

D	Dosis (cc)
R	Reacción
-	Negativo
+	Positivo

**ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA**

**Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido**

#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Limite Líquido	Promedio
		(T) Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
21	12	7,41	20,61	12,84	7,77	5,43	143,01	140,01	153,45
24	20	8,50	20,09	13,06	7,03	4,56	153,94	153,17	
27	62	6,04	18,96	10,90	8,06	4,86	165,68	167,18	

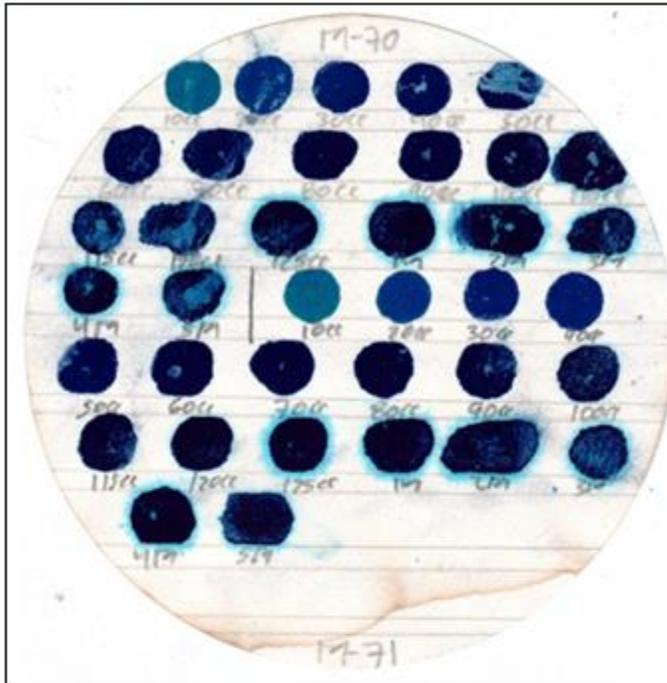
**Ensayo para el cálculo del límite plástico**

Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Limite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T) Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
37	5,98	15,4568	13,48	1,97	7,50	26,30	26,30	22,86	130,59
12	7,41	15,0683	13,72	1,35	6,31	21,41	21,41		
92	7,64	14,2182	13,08	1,14	5,44	20,87	20,87		

MUESTRA:	<u>M-70</u>	OBSERVACIONES:	Muestra tratada con 50g NaCl (previamente) -
PROF (m):	<u>0,5 - 1,5</u>		6,3g NaHCO <sub>3</sub> /100g de arcilla, durante 48 horas

**PRUEBA DE AZUL DE METILENO**

Ws	10,00	gr
Coloides	42	%



PRUEBA DE LA MANCHA					
D	R	D	R	D	R
5	-	70	-	2M	+
10	-	75	-	3M	+
15	-	80	-	4M	+
20	-	85	-	5M	+
25	-	90	-		
30	-	95	-		
35	-	100	-		
40	-	105	-		
45	-	110	-		
50	-	115	-		
55	-	120	-		
60	-	125	+		
65	-	1M	+		

V	125	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)
VA	12,50	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción
Mo	0,09	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo
IN	29,76		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo

**ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA**

Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido

#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Limite Líquido	Promedio
		(T) Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
22	92	7,64	20,49	12,07	8,42	4,43	190,18	187,33	193,77
24	57	6,00	19,11	10,44	8,67	4,44	195,36	194,38	
27	9	8,60	21,84	13,05	8,79	4,45	197,81	199,59	

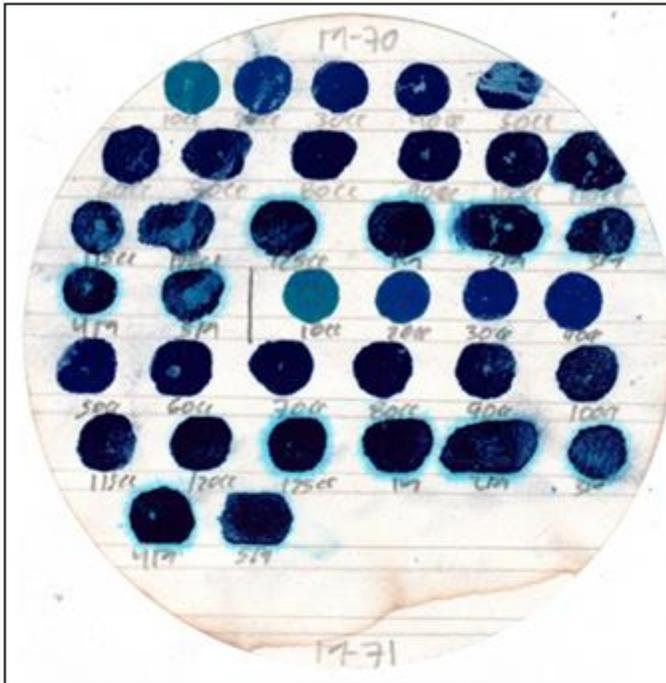
Ensayo para el cálculo del límite plástico

Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Limite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T) Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
39	7,62	15,368	13,28	2,09	5,66	37,00	37,00	36,57	157,20
20	8,5	14,3289	12,73	1,60	4,23	37,70	37,70		
62	6,04	16,3794	13,70	2,68	7,66	35,02	35,02		

MUESTRA: <u>M-71</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 50g NaCl (previamente) -</u>
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>	<u>6,3g NaHCO<sub>3</sub> /100g de arcilla, durante 48 horas</u>

**PRUEBA DE AZUL DE METILENO**

Ws	10,00	gr
Coloides	44	%



**PRUEBA DE LA MANCHA**

D	R	D	R	D	R
5	-	70	-	2M	+
10	-	75	-	3M	+
15	-	80	-	4M	+
20	-	85	-	5M	+
25	-	90	-		
30	-	95	-		
35	-	100	-		
40	-	105	-		
45	-	110	-		
50	-	115	-		
55	-	120	-		
60	-	125	+		
65	-	1M	+		

V	125	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)
VA	12,50	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción
Mo	0,09	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo
IN	28,41		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo

**ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA**

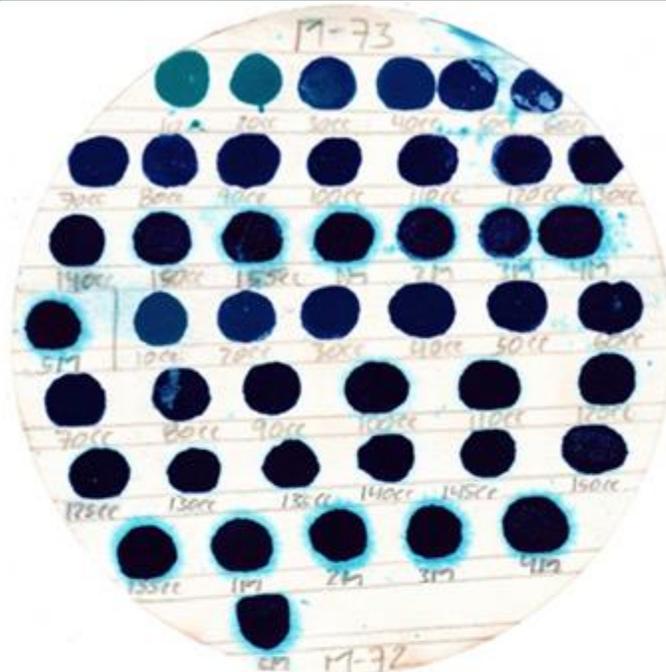
**Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido**

#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Limite Líquido	Promedio
		(T) Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
22	19	9,66	21,24	13,53	7,71	3,87	199,36	196,37	
26	17	8,41	21,42	12,74	8,68	4,33	200,74	201,74	
29	45	6,19	21,91	11,31	10,60	5,12	207,18	210,91	

**Ensayo para el cálculo del límite plástico**

Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Limite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T) Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
17	8,41	15,9282	13,93	1,99	5,52	36,12	36,12	37,77	165,23
45	6,19	16,0661	13,37	2,69	7,18	37,49	37,49		
68	6,36	16,4312	13,57	2,86	7,21	39,71	39,71		

MUESTRA: <u>M-72</u>		OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 50g NaCl (previamente) -</u>	
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>		<u>1,0g NaOH /100g de arcilla, durante 48 horas</u>	
PRUEBA DE AZUL DE METILENO			
Ws	10,00	gr	
Coloides	42	%	
PRUEBA DE LA MANCHA			
D	R	D	R
5	-	70	-
10	-	75	-
15	-	80	-
20	-	85	-
25	-	90	-
30	-	95	-
35	-	100	-
40	-	105	-
45	-	110	-
50	-	115	-
55	-	120	-
60	-	125	-
65	-	130	-



V	155	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)
VA	15,50	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción
Mo	0,12	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo
IN	36,90		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo

**ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA**

Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido

#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Limite Líquido	Promedio
		(T) Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
21	68	6,36	19,64	11,20	8,44	4,84	174,57	170,90	179,27
25	35	7,46	20,31	12,07	8,24	4,61	178,94	178,94	
29	104	10,14	22,33	14,42	7,91	4,28	184,64	187,96	

Ensayo para el cálculo del límite plástico

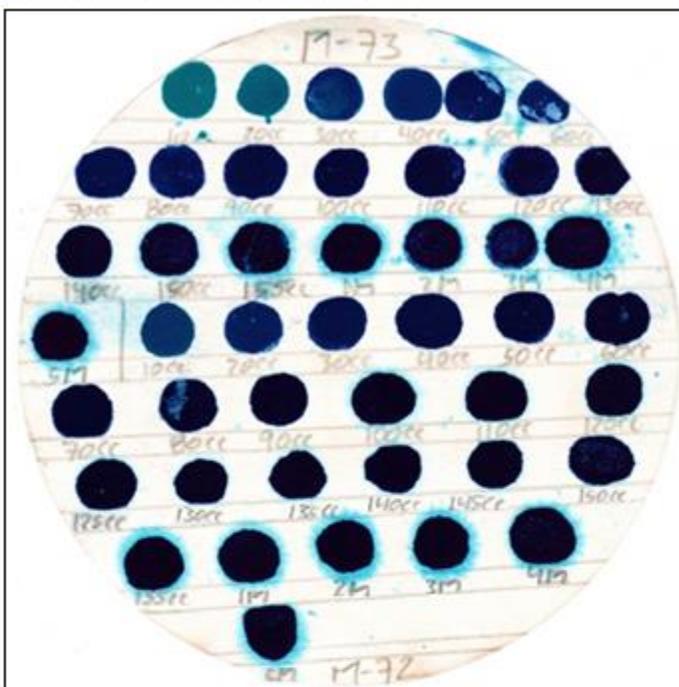
Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Limite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T) Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
92	7,64	14,7296	12,32	2,41	4,68	51,61	51,61	46,89	132,38
57	6	15,233	12,67	2,56	6,67	38,42	38,42		
104	10,14	18,9839	16,01	2,97	5,87	50,65	50,65		

MUESTRA: <u>M-73</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 50g NaCl (previamente) -</u>
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>	<u>1,0g NaOH /100g de arcilla, durante 48 horas</u>

**PRUEBA DE AZUL DE METILENO**

Ws	10,00	gr
Coloides	44	%

PRUEBA DE LA MANCHA					
D	R	D	R	D	R
5	-	70	-	135	-
10	-	75	-	140	-
15	-	80	-	145	-
20	-	85	-	150	-
25	-	90	-	155	+
30	-	95	-	1M	+
35	-	100	-	2M	+
40	-	105	-	3M	+
45	-	110	-	4M	+
50	-	115	-	5M	+
55	-	120	-		
60	-	125	-		
65	-	130	-		



V	155	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)
VA	15,50	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción
Mo	0,11	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo
IN	35,23		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo

**ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA**

Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido

#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Limite Líquido	Promedio
		(T) Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
22	37	5,98	18,46	10,32	8,14	4,34	187,78	184,97	
26	12	7,41	20,10	11,74	8,36	4,33	193,30	194,27	
29	92	7,64	19,24	11,50	7,75	3,86	200,71	204,32	

Ensayo para el cálculo del límite plástico

Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Limite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T) Tara envase	T+Ws	T+ suelo	Agua	Suelo Seco (Ws)				
86	3,87	13,8416	10,83	3,01	6,96	43,25	43,25	49,69	144,83
9	8,6	15,0749	13,03	2,05	4,43	46,24	46,24		
19	9,66	18,2822	15,06	3,22	5,40	59,56	59,56		

MUESTRA: <u>M-74</u>		OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 6,3g NaHCO<sub>3</sub> -</u>	
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>		<u>1,0g NaOH /100g de arcilla, durante 48 horas</u>	
PRUEBA DE AZUL DE METILENO			
Ws	10,00	gr	
Coloides	42	%	
PRUEBA DE LA MANCHA			
D	R	D	R
5	-	70	-
10	-	75	-
15	-	80	-
20	-	85	-
25	-	90	-
30	-	95	-
35	-	100	-
40	-	105	-
45	-	110	-
50	-	115	-
55	-	120	-
60	-	125	-
65	-	130	-

V	152	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	
VA	15,20	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	D Dosis (cc)
Mo	0,11	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	R Reacción
IN	36,19		IN= Índice de nocividad de los coloides	- Negativo
				+ Positivo

| ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA | | | | |
| Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido | | | | | | | | | |

#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Límite Líquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
22	9	8,60	18,85	12,30	6,55	3,70	177,24	174,58	178,90
25	19	9,66	21,93	14,06	7,87	4,40	178,77	178,77	
28	45	6,19	17,43	10,19	7,24	4,00	180,82	183,35	

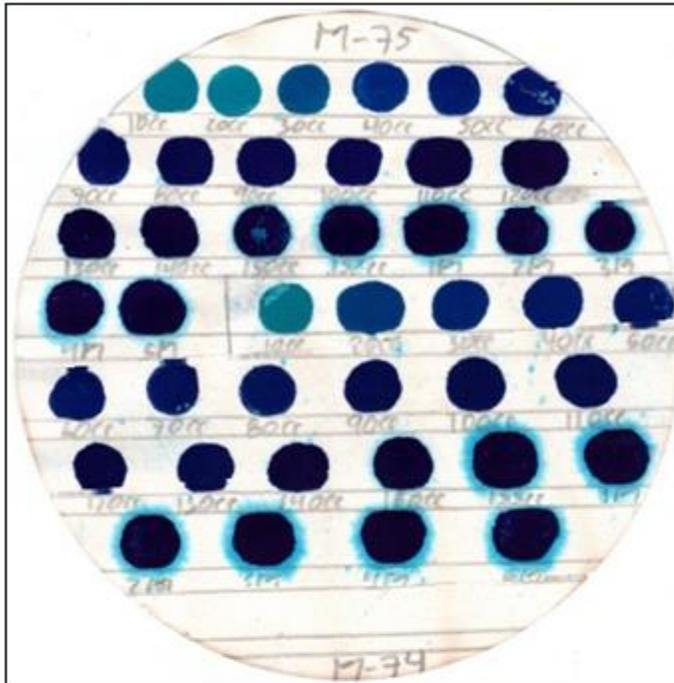
| Ensayo para el cálculo del límite plástico | | | | | | | | | IP |

Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
35	7,46	14,1383	12,67	1,47	5,21	28,27	28,27	31,42	147,49
66	7,6	16,4508	14,34	2,11	6,74	31,23	31,23		
40	7,68	16,561	14,27	2,29	6,59	34,75	34,75		

MUESTRA: <u>M-75</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 6,3g NaHCO<sub>3</sub> - 1,0g NaOH /100g de arcilla, durante 48 horas</u>
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>	

**PRUEBA DE AZUL DE METILENO**

Ws	10,00	gr
Coloides	44	%



**PRUEBA DE LA MANCHA**

D	R	D	R	D	R
5	-	70	-	135	-
10	-	75	-	140	-
15	-	80	-	145	-
20	-	85	-	150	-
25	-	90	-	155	+
30	-	95	-	1M	+
35	-	100	-	2M	+
40	-	105	-	3M	+
45	-	110	-	4M	+
50	-	115	-	5M	+
55	-	120	-		
60	-	125	-		
65	-	130	-		

V	155	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)
VA	15,50	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción
Mo	0,11	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo
IN	35,23		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo

**ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA**

**Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido**

#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Limite Líquido	Promedio
		(T) Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
21	68	6,36	19,47	10,79	8,68	4,43	195,93	191,81	203,96
25	20	8,50	21,20	12,67	8,54	4,17	205,00	205,00	
29	62	6,04	19,45	10,35	9,10	4,31	211,25	215,05	

**Ensayo para el cálculo del límite plástico**

Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Limite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T) Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
93	7,5	18,4919	15,10	3,39	7,60	44,56	44,56	44,87	159,09
37	5,98	15,9024	12,92	2,98	6,94	43,01	43,01		
39	7,62	18,4807	15,01	3,47	7,39	47,03	47,03		

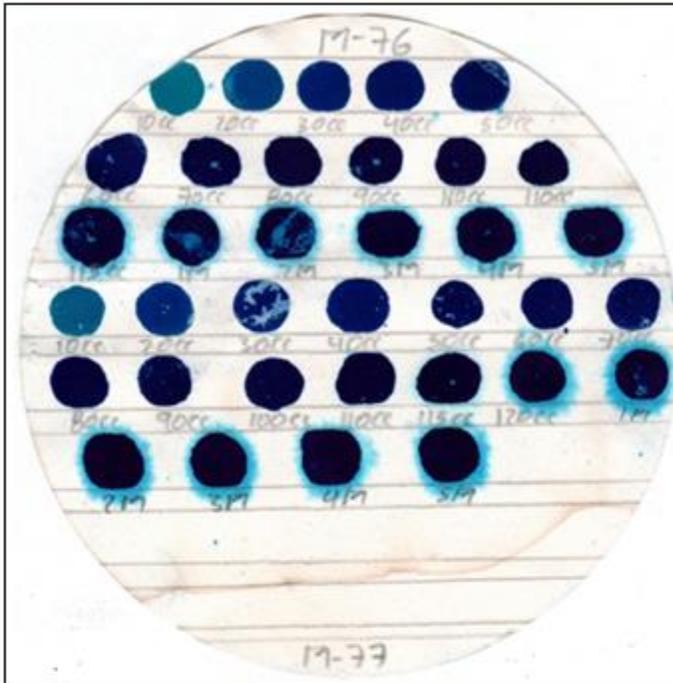
MUESTRA: <u>M-76</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 6,3g NaHCO<sub>3</sub> / 100g de arcilla, durante 48 horas</u>
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>	

**PRUEBA DE AZUL DE METILENO**

Ws	10,00	gr
Coloides	42	%

**PRUEBA DE LA MANCHA**

D	R	D	R	D	R
5	-	70	-	4M	+
10	-	75	-	5M	+
15	-	80	-		
20	-	85	-		
25	-	90	-		
30	-	95	-		
35	-	100	-		
40	-	105	-		
45	-	110	-		
50	-	115	+		
55	-	1M	+		
60	-	2M	+		
65	-	3M	+		



V	115	c.c.
VA	11,50	gr/100gr
Mo	0,09	moles
IN	27,38	

V= Volumen consumido de azul de metileno  
 VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco  
 Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide  
 IN= Indice de nocividad de los coloides

D	Dosis (cc)
R	Reacción
-	Negativo
+	Positivo

**ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA**

**Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido**

#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Limite Líquido	Promedio
		(T) Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
22	17	8,41	21,13	12,97	8,16	4,56	179,12	176,43	185,21
25	39	7,62	19,99	11,96	8,03	4,34	185,31	185,31	
28	92	7,64	20,93	12,20	8,73	4,56	191,22	193,90	

**Ensayo para el cálculo del límite plástico**

Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Limite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T) Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
12	7,41	15,845	13,61	2,23	6,20	35,95	35,95	37,72	147,49
20	8,5	14,9912	13,15	1,84	4,65	39,58	39,58		
62	6,04	15,6996	13,06	2,64	7,02	37,62	37,62		

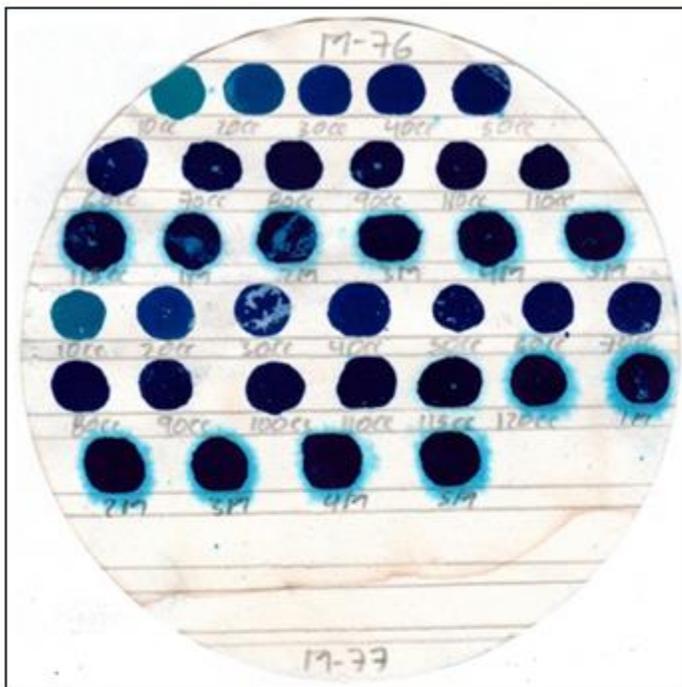
MUESTRA: <u>M-77</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 6,3g NaHCO<sub>3</sub> / 100g de arcilla, durante 48 horas</u>
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>	

**PRUEBA DE AZUL DE METILENO**

Ws	10,00	gr
Coloides	44	%

**PRUEBA DE LA MANCHA**

D	R	D	R	D	R
5	-	70	-	3M	+
10	-	75	-	4M	+
15	-	80	-	5M	+
20	-	85	-		
25	-	90	-		
30	-	95	-		
35	-	100	-		
40	-	105	-		
45	-	110	-		
50	-	115	-		
55	-	120	+		
60	-	1M	+		
65	-	3M	+		



V	120	c.c.	V= Volumen consumido de azul de metileno	D	Dosis (cc)
VA	12,00	gr/100gr	VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco	R	Reacción
Mo	0,09	moles	Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide	-	Negativo
IN	27,27		IN= Indice de nocividad de los coloides	+	Positivo

**ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA**

**Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido**

#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LL Limite Líquido	Promedio
		(T) Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
21	20	8,50	20,45	12,02	8,43	3,52	239,66	234,63	246,98
25	45	6,19	20,68	10,36	10,32	4,17	247,79	247,79	
29	68	6,36	20,47	10,35	10,12	3,99	253,95	258,52	

**Ensayo para el cálculo del límite plástico**

Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%) LP Limite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T) Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
92	7,64	15,3396	13,22	2,12	5,58	37,96	37,96	38,03	208,95
57	6	15,5066	12,94	2,56	6,94	36,91	36,91		
9	8,6	15,3527	13,45	1,90	4,85	39,22	39,22		

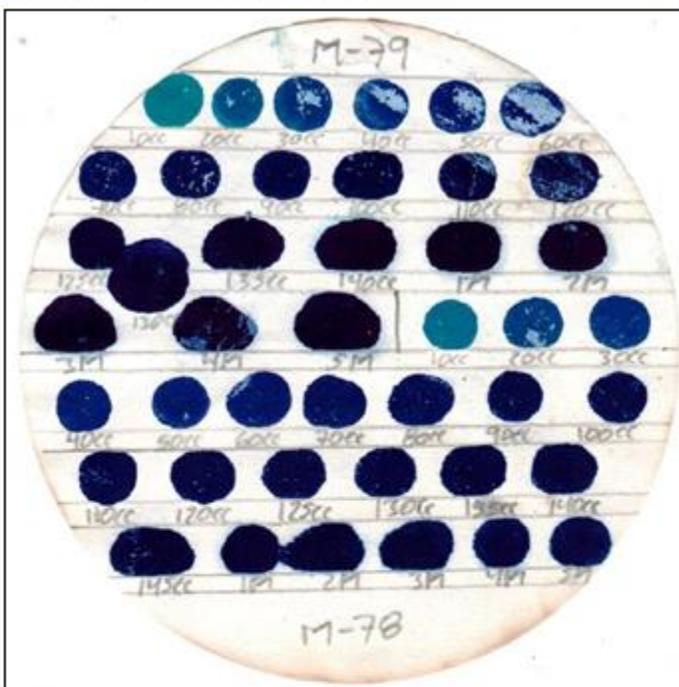
MUESTRA: <u>M-78</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 0,75g NaOH /100g de arcilla, durante 48 horas</u>
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>	

**PRUEBA DE AZUL DE METILENO**

Ws	10,00	gr
Coloides	42	%

**PRUEBA DE LA MANCHA**

D	R	D	R	D	R
5	-	70	-	135	-
10	-	75	-	140	-
15	-	80	-	145	+
20	-	85	-	1M	+
25	-	90	-	2M	+
30	-	95	-	3M	+
35	-	100	-	4M	+
40	-	105	-	5M	+
45	-	110	-		
50	-	115	-		
55	-	120	-		
60	-	125	-		
65	-	130	-		



V	145	c.c.
VA	14,50	gr/100gr
Mo	0,11	moles
IN	34,52	

V= Volumen consumido de azul de metileno  
 VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco  
 Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide  
 IN= Indice de nocividad de los coloides

D	Dosis (cc)
R	Reacción
-	Negativo
+	Positivo

**ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA**

**Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido**

#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LL Limite Liquido	Promedio
		(T)Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
22	93	7,50	19,64	11,58	8,06	4,08	197,56	194,60	
25	9	8,60	21,54	12,89	8,65	4,29	201,56	201,56	
27	19	9,66	22,86	13,95	8,91	4,29	207,49	209,36	

**Ensayo para el cálculo del límite plástico**

Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(% )LP Limite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T)Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
19	9,66	18,6584	15,98	2,68	6,32	42,37	42,37	41,63	160,21
17	8,41	16,1583	13,79	2,36	5,38	43,89	43,89		
45	6,19	17,1443	14,09	3,05	7,90	38,63	38,63		

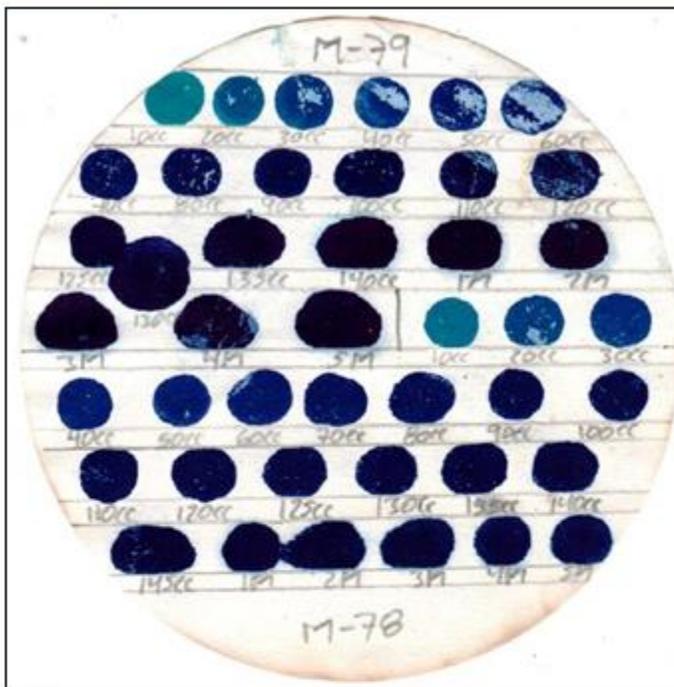
MUESTRA: M-79 OBSERVACIONES: Muestra tratada con 0,75g NaOH /100g  
 PROF (m): 1,5 - 2,5 de arcilla, durante 48 horas

**PRUEBA DE AZUL DE METILENO**

Ws	10,00	gr
Coloides	44	%

**PRUEBA DE LA MANCHA**

D	R	D	R	D	R
5	-	70	-	135	-
10	-	75	-	140	+
15	-	80	-	1M	+
20	-	85	-	2M	+
25	-	90	-	3M	+
30	-	95	-	4M	+
35	-	100	-	5M	+
40	-	105	-		
45	-	110	-		
50	-	115	-		
55	-	120	-		
60	-	125	-		
65	-	130	-		



V	140	c.c.
VA	14,00	gr/100gr
Mo	0,10	moles
IN	31,82	

V= Volumen consumido de azul de metileno  
 VA= Azul de metileno en polvo por 100 gr. de suelo seco  
 Mo= # Moles de azul de metileno por gramo de coloide  
 IN= Indice de nocividad de los coloides

D	Dosis (cc)
R	Reacción
-	Negativo
+	Positivo

**ENSAYOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA**

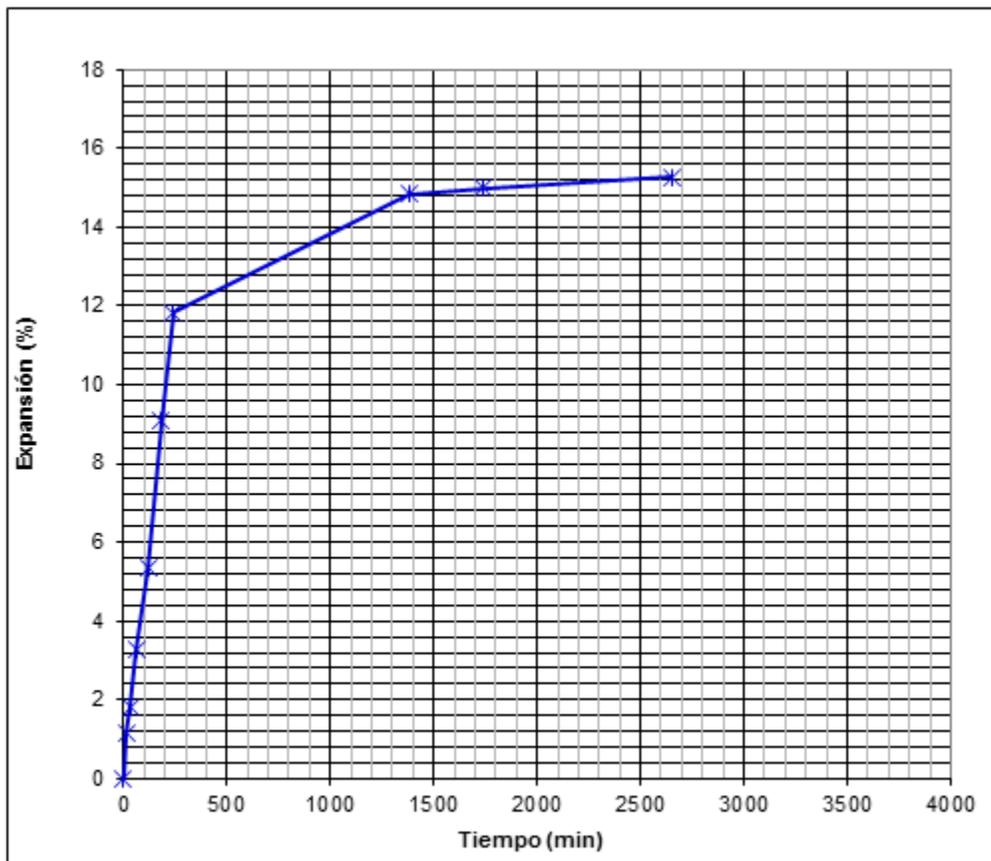
**Ensayo de casagrande para el cálculo del límite líquido**

#Golpes (N)	Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%LL) Límite Líquido	Promedio
		(T) Tara envase	T+ Ww	T+Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)			
23	66	7,60	18,74	10,96	7,78	3,36	231,66	229,34	
25	62	6,04	18,39	9,70	8,69	3,66	237,24	237,24	
27	17	8,41	20,87	12,04	8,83	3,63	243,35	245,54	

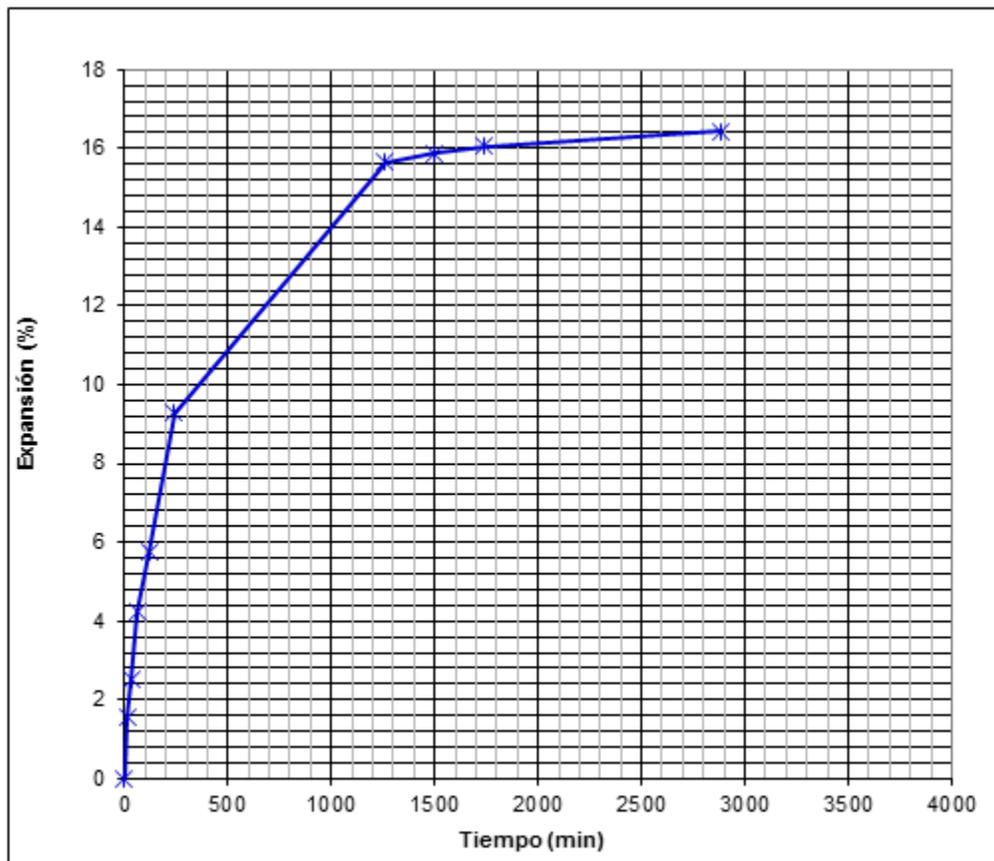
**Ensayo para el cálculo del límite plástico**

Envase N°	Peso en gramos					W Humedad (%)	(%LP) Límite Plástico	Promedio	Índice de plasticidad
	(T) Tara envase	T+suelo húmedo	T+ Ws	Agua	Suelo Seco (Ws)				
68	6,36	14,0516	11,72	2,33	5,36	43,38	43,38	42,93	194,44
35	7,46	17,4751	14,56	2,92	7,10	41,15	41,15		
104	10,14	19,8284	16,86	2,97	6,72	44,27	44,27		

MUESTRA: <u>M-A</u>		OBSERVACIONES: <u>Muestra obtenida de la arcilla in situ</u>	
PROF (m): <u>0,5 - 1,0</u>			
Expansión Libre			
Tiempo (min)	Expansión (%)	Lectura	Datos de la muestra
0	0,00	0	Altura Inicial 2,000 cm
15	1,15	230	Altura Final 2,300 cm
30	1,82	363	Área 20,03 cm <sup>2</sup>
60	3,28	655	Vol. Inicial 40,06 cm <sup>3</sup>
120	5,33	1066	Vol. Final 46,06 cm <sup>3</sup>
180	9,07	1814	ω Inicial 9,3 %
240	11,84	2367	ω Final 29,6 %
1380	14,84	2967	(γ <sub>s</sub> ) Inicial 1,700 gr/cm <sup>3</sup>
1740	14,99	2997	(γ <sub>s</sub> ) Final 1,478 gr/cm <sup>3</sup>
2650	15,28	3056	
			Lectura 0,001 mm
			Carga de asiento 0,05 Kg/cm <sup>2</sup>
			<b>Expansión 15,3 %</b>
Observaciones: Muestra compactada, material pasante tamiz "10"			

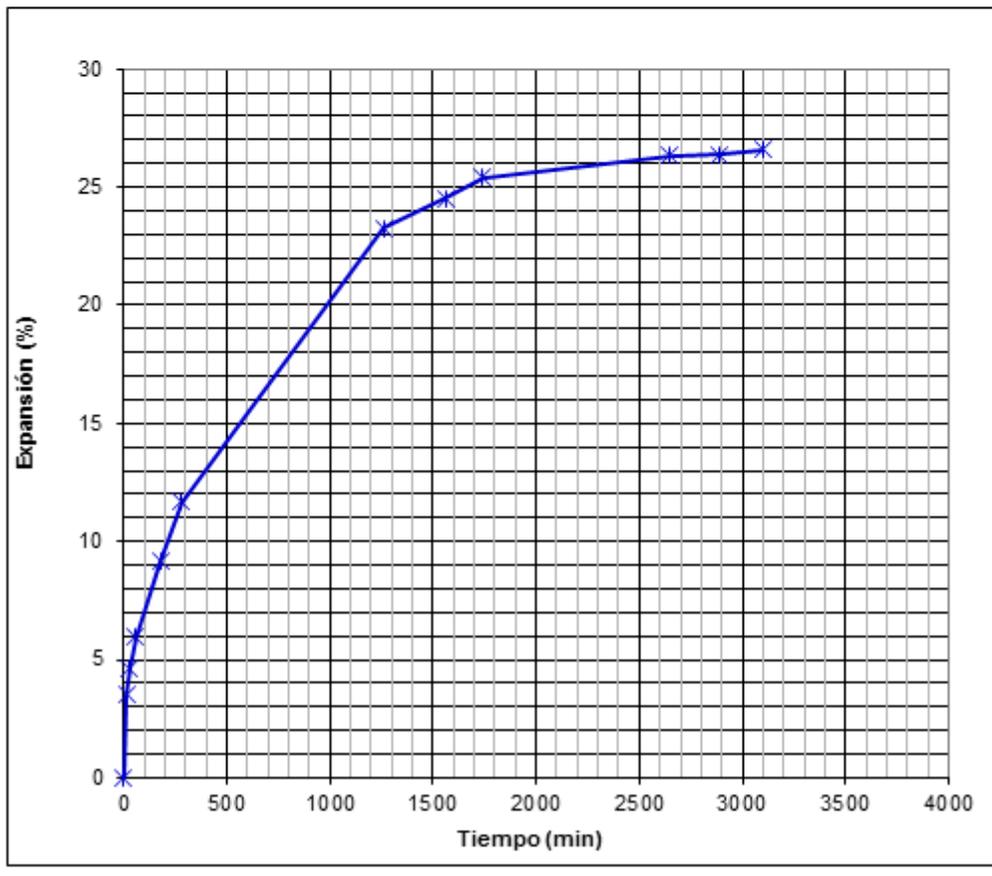


MUESTRA: <u>M-B</u>			OBSERVACIONES: <u>Muestra obtenida de la arcilla in situ</u>		
PROF (m): <u>1,0 - 1,5</u>					
Expansión Libre					
Tiempo (min)	Expansión (%)	Lectura	Datos de la muestra		
0	0,00	0	Altura Inicial	1,850	cm
15	1,54	285	Altura Final	2,154	cm
30	2,51	465	Área	20,03	cm <sup>2</sup>
60	4,22	780	Vol. Inicial	37,05	cm <sup>3</sup>
120	5,74	1062	Vol. Final	43,14	cm <sup>3</sup>
240	9,28	1716	ω Inicial	11,4	%
1260	15,65	2895	ω Final	28,3	%
1500	15,88	2937	(γ <sub>s</sub> ) Inicial	1,768	gr/cm <sup>3</sup>
1740	16,05	2970	(γ <sub>s</sub> ) Final	1,519	gr/cm <sup>3</sup>
2880	16,43	3039			
			Lectura 0,001 mm		
			Carga de asiento 0,05 Kg/cm <sup>2</sup>		
			<b>Expansión 16,4 %</b>		
Observaciones: Muestra compactada, material pasante tamiz "10"					



MUESTRA: <u>M-C</u>		OBSERVACIONES: <u>Muestra obtenida de la arcilla in situ</u>	
PROF (m): <u>1,5 - 2,0</u>			
Expansión Libre			
Tiempo (min)	Expansión (%)	Lectura	Datos de la muestra
0	0,00	0	Altura Inicial 2,450 cm
15	3,51	430	Altura Final 3,101 cm
30	4,65	570	Área 9,95 cm <sup>2</sup>
60	5,96	730	Vol. Inicial 24,39 cm <sup>3</sup>
180	9,17	1123	Vol. Final 30,87 cm <sup>3</sup>
280	11,69	1432	ω Inicial 16,4 %
1260	23,25	2848	ω Final 29,7 %
1560	24,50	3002	(γs) Inicial 1,799 gr/cm <sup>3</sup>
1740	25,40	3111	(γs) Final 1,421 gr/cm <sup>3</sup>
2650	26,32	3224	
2890	26,37	3230	Observaciones: Muestra compactada, material pasante
3100	26,59	3257	tamiz "10"

Lectura	0,002	mm
Carga de asiento 0,05 Kg/cm <sup>2</sup>		
Expansión	26,6	%



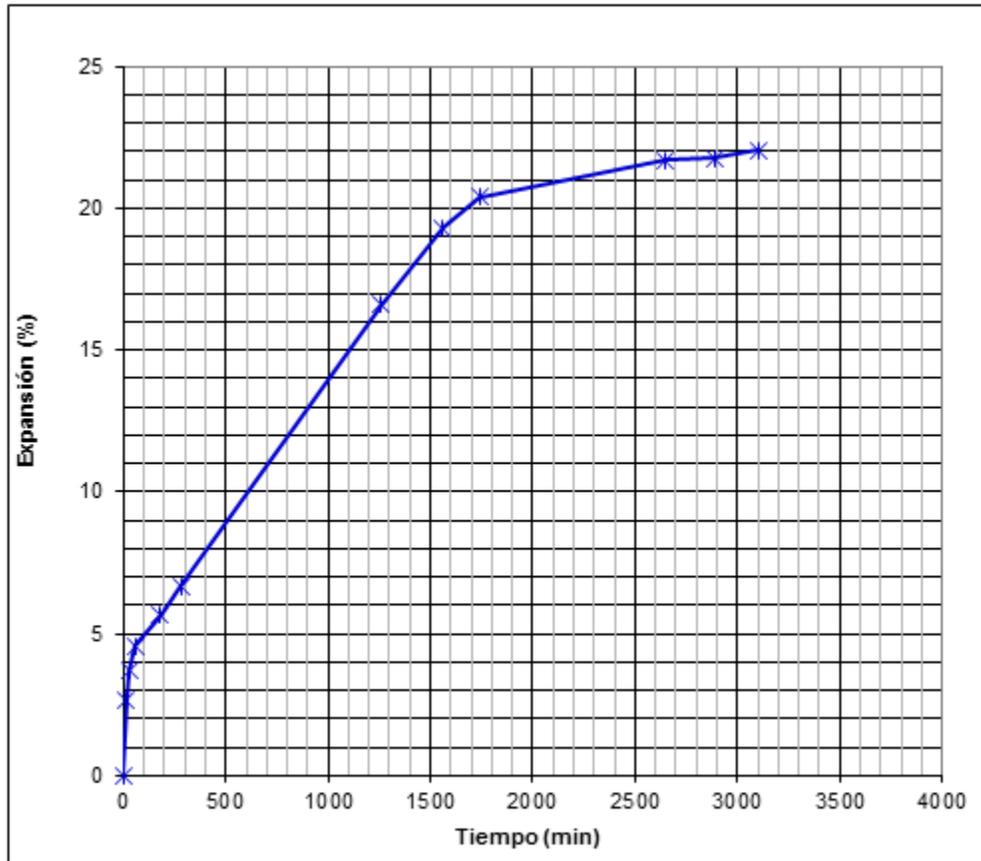
MUESTRA: <u>  M-D  </u>		OBSERVACIONES: <u>  Muestra obtenida de la arcilla in situ  </u>	
PROF (m): <u>  2,0 - 2,5  </u>			
Expansión Libre			
Tiempo (min)	Expansión (%)	Lectura	Datos de la muestra
0	0,00	0	Altura Inicial 2,440 cm
15	2,69	328	Altura Final 2,978 cm
30	3,69	450	Área 9,95 cm <sup>2</sup>
60	4,56	556	Vol. Inicial 24,29 cm <sup>3</sup>
180	5,67	692	Vol. Final 29,64 cm <sup>3</sup>
280	6,69	816	ω Inicial 11,2 %
1260	16,60	2025	ω Final 29,7 %
1560	19,30	2355	(γ <sub>s</sub> ) Inicial 1,775 gr/cm <sup>3</sup>
1740	20,41	2490	(γ <sub>s</sub> ) Final 1,455 gr/cm <sup>3</sup>
2650	21,69	2646	
2890	21,76	2655	Observaciones: Muestra compactada, material pasante
3100	22,06	2691	tamiz "10"

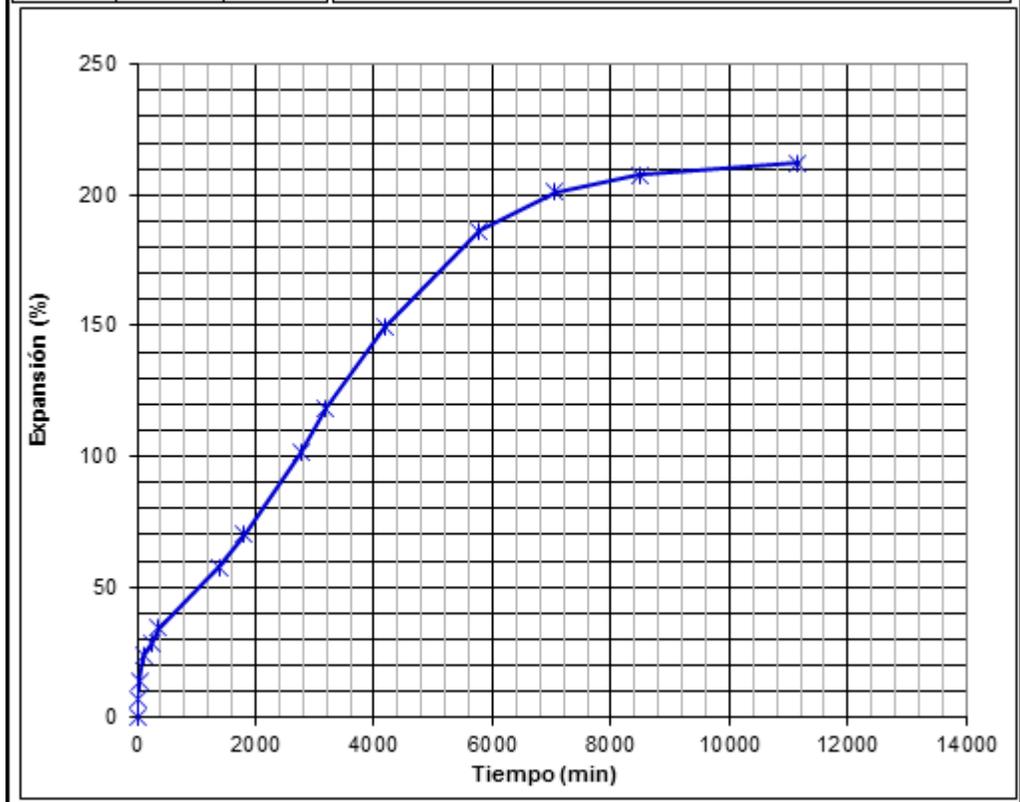
Lectura	0,002	mm
Carga de asiento 0,05 Kg/cm <sup>2</sup>		

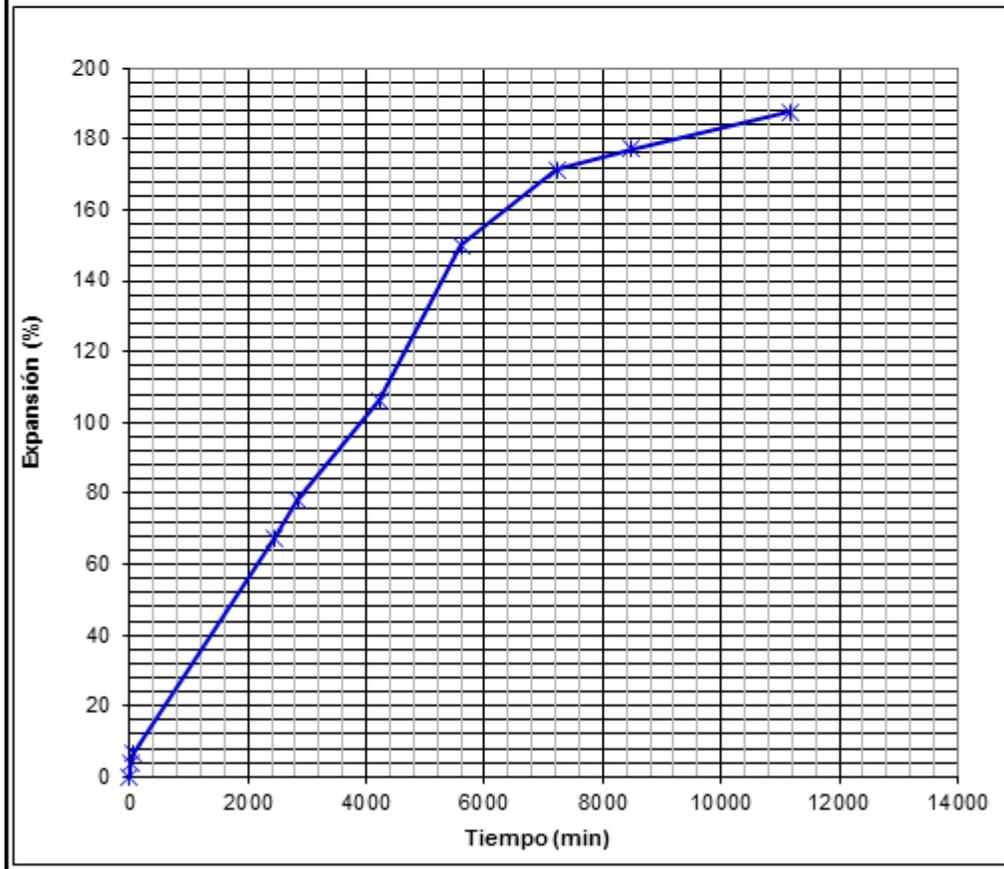
<b>Expansión</b>	<b>22,1</b>	<b>%</b>
------------------	-------------	----------



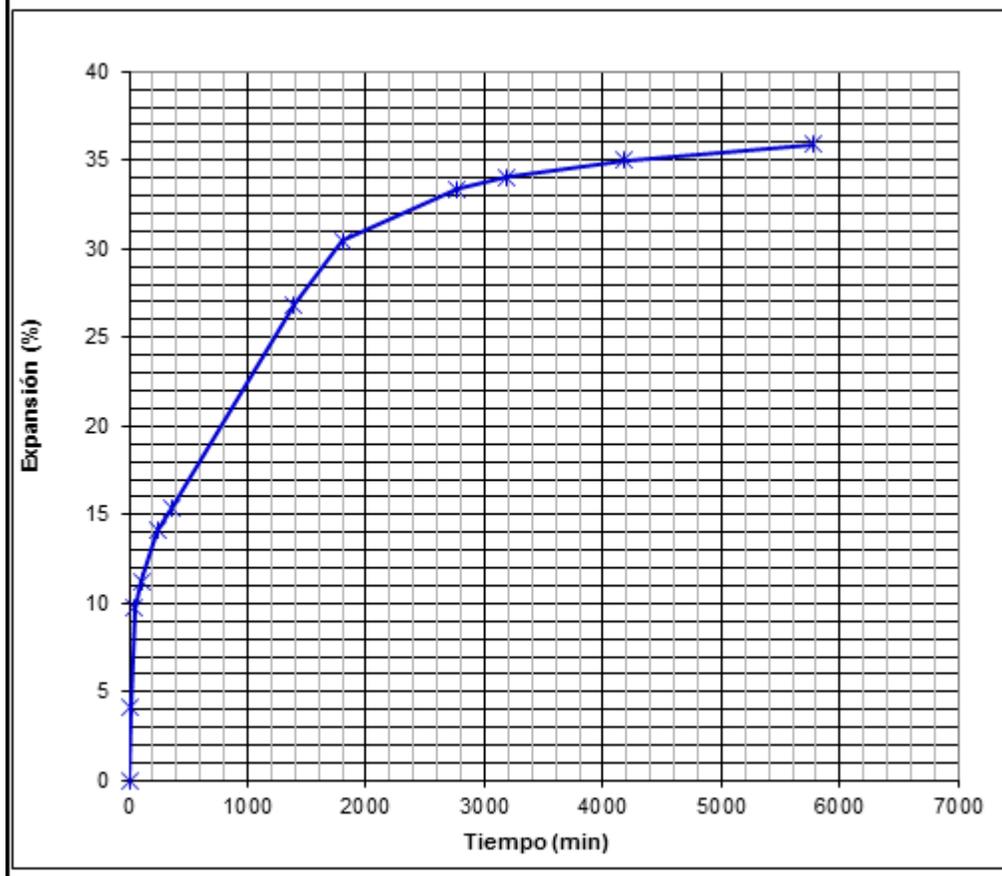
MUESTRA: <u>M-0</u>			OBSERVACIONES: <u>Muestra de bentonita comercial de Big Horn Mountains de Wyoming, Canadá</u>		
PROF (m): <u>-</u>					
Expansión Libre					
Tiempo (min)	Expansión (%)	Lectura	Datos de la muestra		
0	0,00	0	Altura Inicial	1,500	cm
15	7,39	111	Altura Final	4,430	cm
45	13,96	209	Área	9,95	cm <sup>2</sup>
105	23,84	358	Vol. Inicial	14,93	cm <sup>3</sup>
240	28,37	426	Vol. Final	44,10	cm <sup>3</sup>
360	34,43	516	ω Inicial	9,7	%
1395	57,45	862	ω Final	56,6	%
1800	70,09	1051	(γ <sub>s</sub> ) Inicial	1,701	gr/cm <sup>3</sup>
2770	101,58	1524	(γ <sub>s</sub> ) Final	0,576	gr/cm <sup>3</sup>
3190	118,54	1778			
4185	149,35	2240	Observaciones: Muestra compactada, material pasante		
5775	186,35	2795	tamiz "10"		
7060	201,06	3016			
8490	207,73	3116			
11160	212,14	3182			



MUESTRA: <u>M-0/2</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra comercial de bentonita</u>							
PROF (m): <u>-</u>	<u>Laviosa de origen Italiano (Cerdeña) / Griego (Milos)</u>							
Expansión Libre								
Tiempo (min)	Expansión (%)	Lectura	Datos de la muestra					
0	0,00	0	Altura Inicial	1,540	cm	Lectura	0,01	mm
15	3,64	56	Altura Final	4,430	cm	Carga de asiento 0,05 Kg/cm <sup>2</sup>		
60	6,88	106	Área	20,03	cm <sup>2</sup>			
2430	67,08	1033	Vol. Inicial	30,85	cm <sup>3</sup>			
2850	78,05	1202	Vol. Final	88,73	cm <sup>3</sup>			
4230	106,17	1635	ω Inicial	4,9	%	Expansión <b>187,7</b> %		
5600	150,00	2310	ω Final	58,2	%			
7230	171,43	2640	(γ <sub>s</sub> ) Inicial	1,756	gr/cm <sup>3</sup>			
8490	177,27	2730	(γ <sub>s</sub> ) Final	0,610	gr/cm <sup>3</sup>			
11160	187,66	2890						
			Observaciones: Muestra compactada, material pasante tamiz "10"					

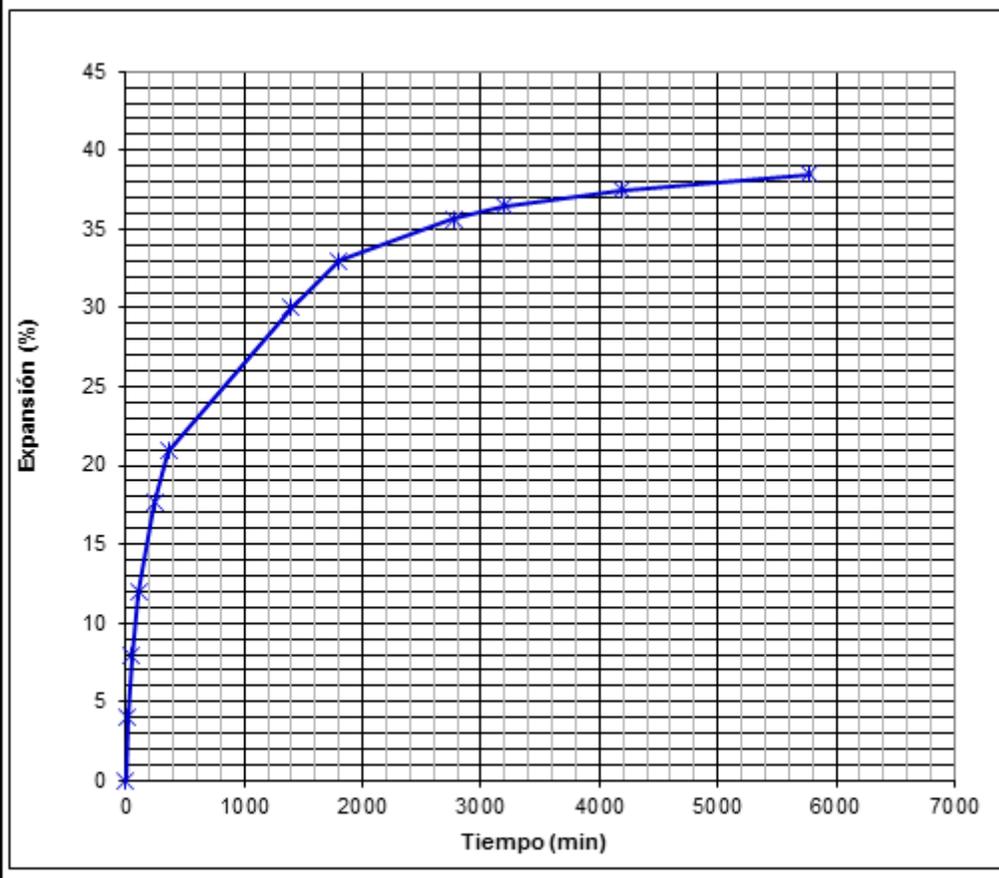


MUESTRA: <u>M-1</u>		OBSERVACIONES: <u>Muestra de la arcilla in situ con</u>	
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>		<u>separación de los limos y las arcillas por sedimentación</u>	
Expansión Libre			
Tiempo (min)	Expansión (%)	Lectura	Datos de la muestra
0	0,00	0	Altura Inicial 1,950 cm
15	4,18	41	Altura Final 2,650 cm
45	9,72	95	Área 20,03 cm <sup>2</sup>
105	11,22	109	Vol. Inicial 39,06 cm <sup>3</sup>
240	14,12	138	Vol. Final 53,09 cm <sup>3</sup>
360	15,34	150	ω Inicial 14,4 %
1395	26,88	262	ω Final 33,2 %
1800	30,46	297	(γ <sub>s</sub> ) Inicial 1,794 gr/cm <sup>3</sup>
2770	33,35	325	(γ <sub>s</sub> ) Final 1,320 gr/cm <sup>3</sup>
3190	34,02	332	Observaciones: Muestra compactada, material pasante tamiz "10"
4185	34,99	341	
5775	35,92	350	
		Lectura 0,02 mm	
		Carga de asiento 0,05 Kg/cm <sup>2</sup>	
		<b>Expansión 35,9 %</b>	

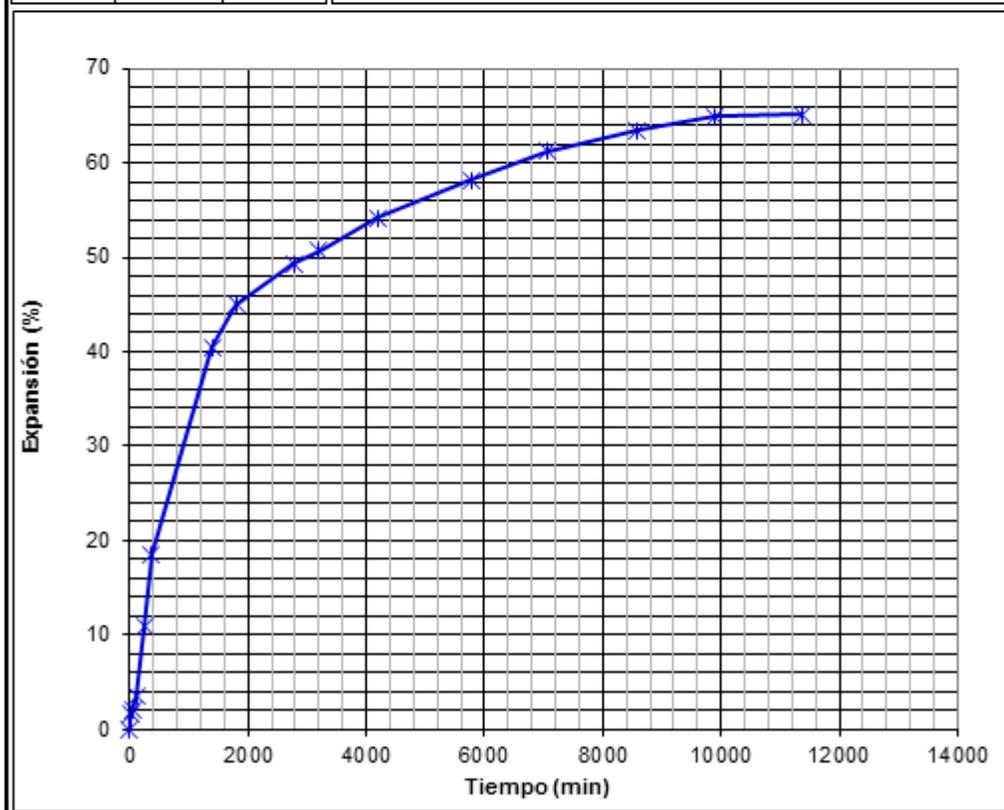


MUESTRA: <u>M-2</u>		OBSERVACIONES: <u>Muestra de la arcilla in situ con</u>	
PROF (m): <u>1,5-2,5</u>		<u>separación de los limos y las arcillas por sedimentación</u>	
Expansión Libre			
Tiempo (min)	Expansión (%)	Lectura	Datos de la muestra
0	0,00	0	Altura Inicial 2,345 cm
15	4,03	47	Altura Final 3,248 cm
45	7,91	93	Área 9,95 cm <sup>2</sup>
105	11,97	140	Vol. Inicial 23,34 cm <sup>3</sup>
240	17,66	207	Vol. Final 32,33 cm <sup>3</sup>
360	20,93	245	ω Inicial 16,3 %
1395	30,03	352	ω Final 38,3 %
1800	33,00	387	(γ <sub>s</sub> ) Inicial 1,770 gr/cm <sup>3</sup>
2770	35,66	418	(γ <sub>s</sub> ) Final 1,278 gr/cm <sup>3</sup>
3190	36,44	427	
4185	37,47	439	Observaciones: Muestra compactada, material pasante
5775	38,50	451	tamiz "10"

Lectura	0,02	mm
Carga de asiento 0,05 Kg/cm <sup>2</sup>		
<b>Expansión</b>	<b>38,5</b>	<b>%</b>



<b>MUESTRA:</b> M-3			<b>OBSERVACIONES:</b> Muestra tratada con 50g NaCl /100g de arcilla, durante 24 horas a temperatura ambiente (30°)			
<b>PROF (m):</b> 0,5 - 1,5						
Expansión Libre						
Tiempo (min)	Expansión (%)	Lectura	Datos de la muestra			
0	0,00	0	Altura Inicial	2,000	cm	Lectura 0,01 mm
15	1,71	34	Altura Final	3,303	cm	Carga de asiento 0,05 Kg/cm <sup>2</sup>
45	2,07	41	Área	20,03	cm <sup>2</sup>	
105	3,45	69	Vol. Inicial	40,06	cm <sup>3</sup>	
240	10,85	217	Vol. Final	66,15	cm <sup>3</sup>	
360	18,61	372	ω Inicial	4,7	%	<b>Expansión 65,1 %</b>
1395	40,49	810	ω Final	48,9	%	
1800	45,02	900	(γ <sub>s</sub> ) Inicial	1,750	gr/cm <sup>3</sup>	
2770	49,33	987	(γ <sub>s</sub> ) Final	1,060	gr/cm <sup>3</sup>	
3190	50,70	1014				
4185	54,13	1083	Observaciones: Muestra compactada, material pasante tamiz "10"			
5775	58,15	1163				
7060	61,20	1224				
8580	63,40	1268				
9900	64,88	1298				
11360	65,13	1303				



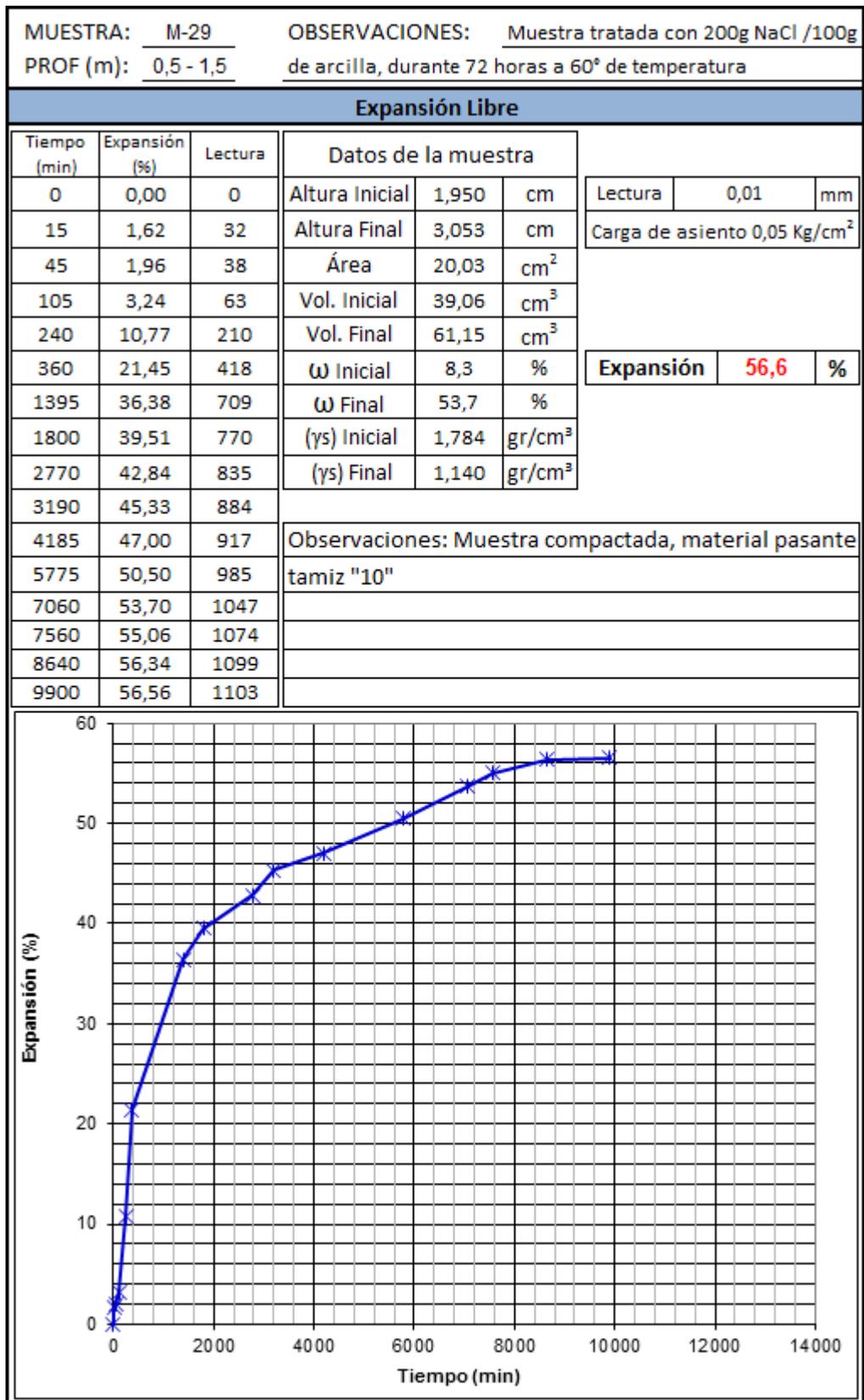
MUESTRA: <u>M-17</u>			OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 200g NaCl /100g de arcilla, durante 168 horas a temperatura ambiente (30°)</u>		
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>					
Expansión Libre					
Tiempo (min)	Expansión (%)	Lectura	Datos de la muestra		
0	0,00	0	Altura Inicial	2,340	cm
15	1,63	19	Altura Final	3,702	cm
45	1,98	23	Área	9,95	cm <sup>2</sup>
105	3,31	39	Vol. Inicial	23,29	cm <sup>3</sup>
240	7,42	87	Vol. Final	36,84	cm <sup>3</sup>
360	11,82	138	ω Inicial	11,5	%
1395	31,18	365	ω Final	37,1	%
1800	37,36	437	(γ <sub>s</sub> ) Inicial	1,774	gr/cm <sup>3</sup>
2770	44,07	516	(γ <sub>s</sub> ) Final	1,121	gr/cm <sup>3</sup>
3190	45,30	530	Observaciones: Muestra compactada, material pasante tamiz "10"		
4185	48,36	566			
5775	51,95	608			
7060	54,68	640			
7560	56,64	663			
8640	57,79	676			
9900	58,19	681			

Lectura	0,02	mm
Carga de asiento 0,05 Kg/cm <sup>2</sup>		
Expansión	<b>58,2</b>	%

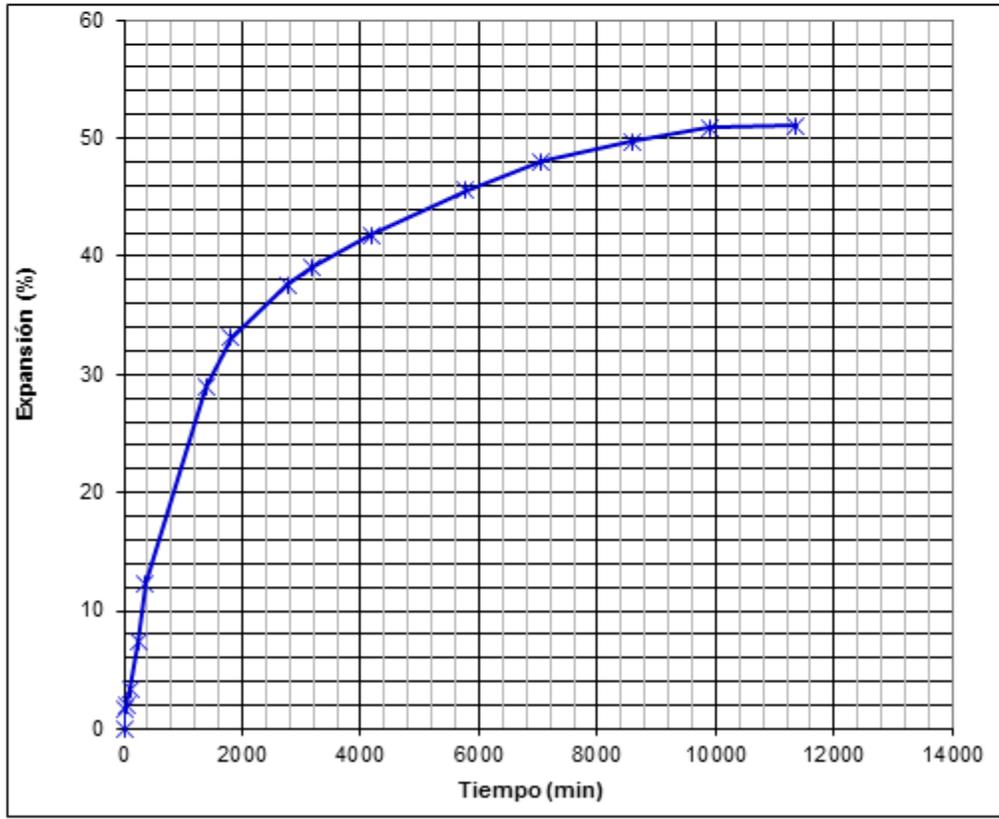
  

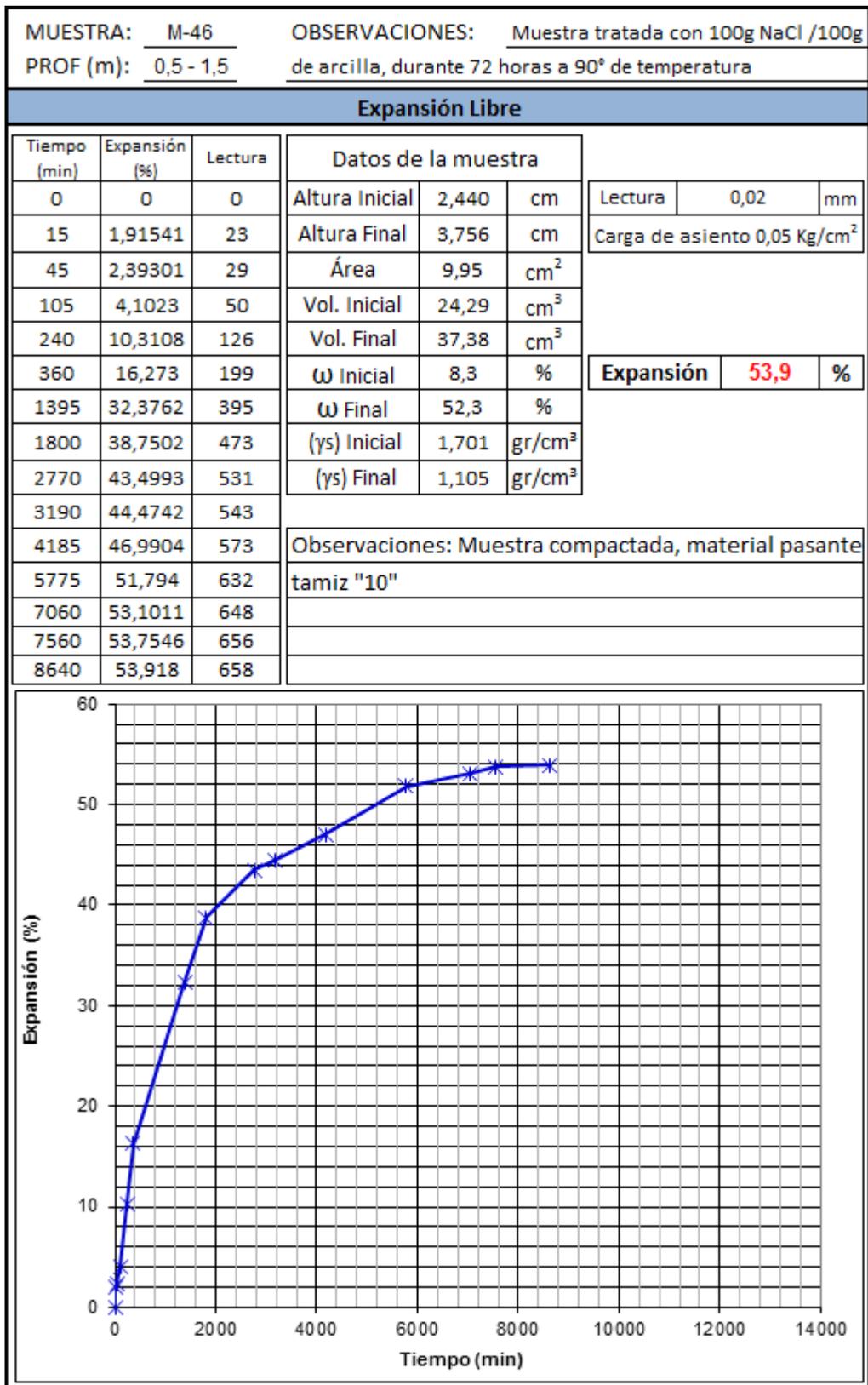
The graph plots Expansion (%) on the y-axis (0 to 70) against Time (min) on the x-axis (0 to 14000). The data points from the table are plotted and connected by a smooth blue curve. The expansion increases rapidly from 0% at 0 minutes to about 45% at 3190 minutes, then continues to rise more gradually, reaching a final value of 58.2% at 9900 minutes.



MUESTRA: <u>M-37</u>		OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 100g NaCl /100g</u>	
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>		<u>de arcilla, durante 168 horas a 60° de temperatura</u>	
Expansión Libre			
Tiempo (min)	Expansión (%)	Lectura	Datos de la muestra
0	0,00	0	Altura Inicial 2,440 cm
15	1,67	20	Altura Final 3,686 cm
45	2,03	25	Área 9,95 cm <sup>2</sup>
105	3,38	41	Vol. Inicial 24,29 cm <sup>3</sup>
240	7,33	89	Vol. Final 36,69 cm <sup>3</sup>
360	12,35	151	ω Inicial 7,4 %
1395	28,90	353	ω Final 46,1 %
1800	33,08	404	(γs) Inicial 1,735 gr/cm <sup>3</sup>
2770	37,60	459	(γs) Final 1,148 gr/cm <sup>3</sup>
3190	39,08	477	
4185	41,80	510	Observaciones: Muestra compactada, material pasante tamiz "10"
5775	45,61	556	
7060	48,03	586	
8580	49,74	607	
9900	50,89	621	
11360	51,08	623	

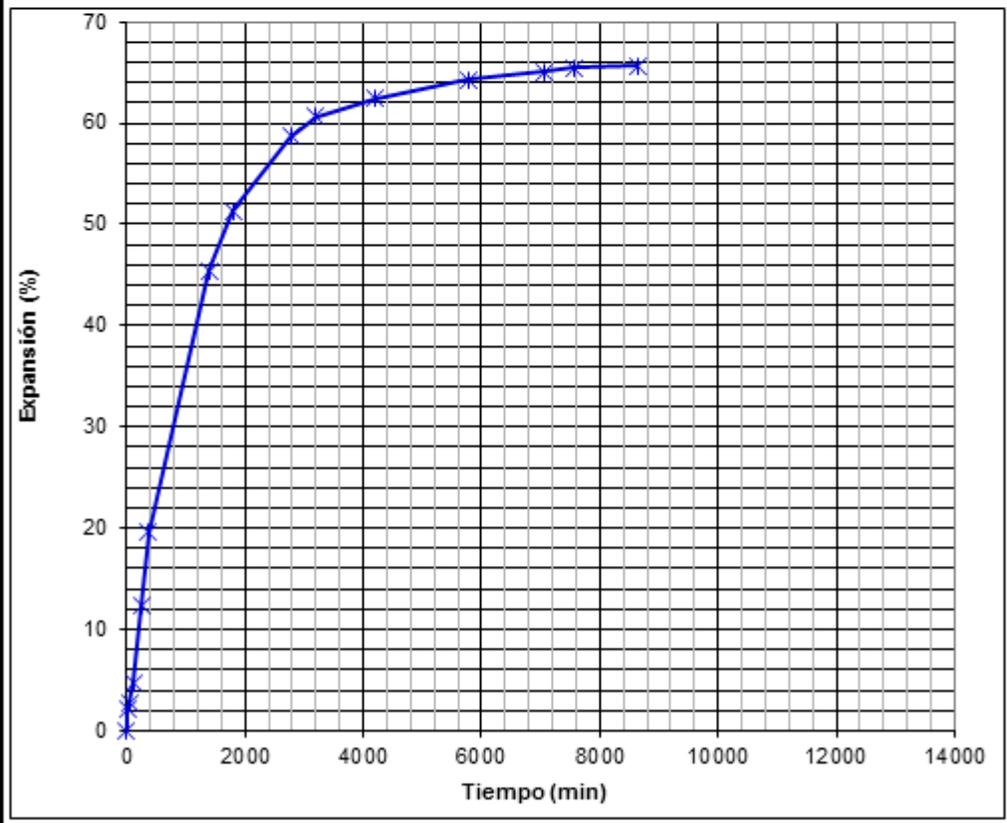
Lectura	0,02	mm
Carga de asiento	0,05	Kg/cm <sup>2</sup>
Expansión	51,1	%





MUESTRA: <u>M-56</u>		OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 200g NaCl /100g de arcilla, durante 168 horas a 90° de temperatura</u>	
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>			
Expansión Libre			
Tiempo (min)	Expansión (%)	Lectura	Datos de la muestra
0	0	0	Altura Inicial 2,000 cm
15	2,18941	44	Altura Final 3,313 cm
45	2,7585	55	Área 20,03 cm <sup>2</sup>
105	4,73054	95	Vol. Inicial 40,06 cm <sup>3</sup>
240	12,3002	246	Vol. Final 66,36 cm <sup>3</sup>
360	19,5459	391	ω Inicial 8,6 %
1395	45,4108	908	ω Final 53,4 %
1800	51,2932	1026	(γs) Inicial 1,746 gr/cm <sup>3</sup>
2770	58,6427	1173	(γs) Final 1,054 gr/cm <sup>3</sup>
3190	60,6286	1213	
4185	62,4218	1248	Observaciones: Muestra compactada, material pasante tamiz "10"
5775	64,3188	1286	
7060	65,0746	1301	
7560	65,5044	1310	
8640	65,6526	1313	

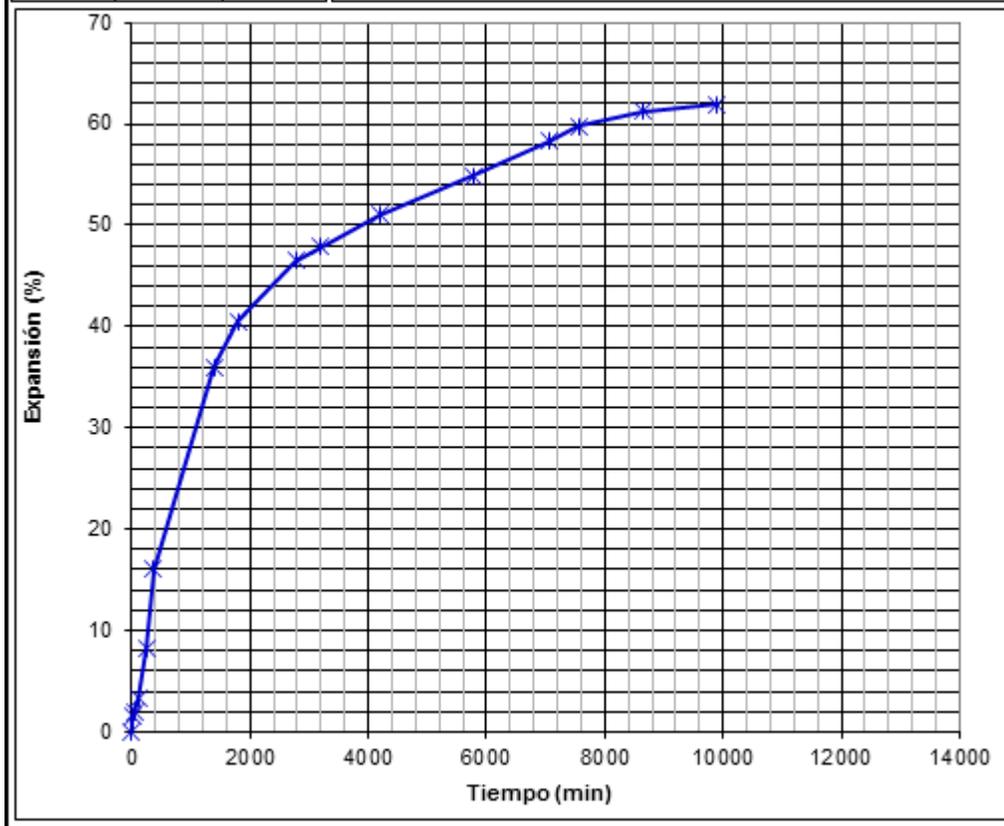
Lectura	0,01	mm
Carga de asiento 0,05 Kg/cm <sup>2</sup>		
<b>Expansión</b>	<b>65,7</b>	<b>%</b>



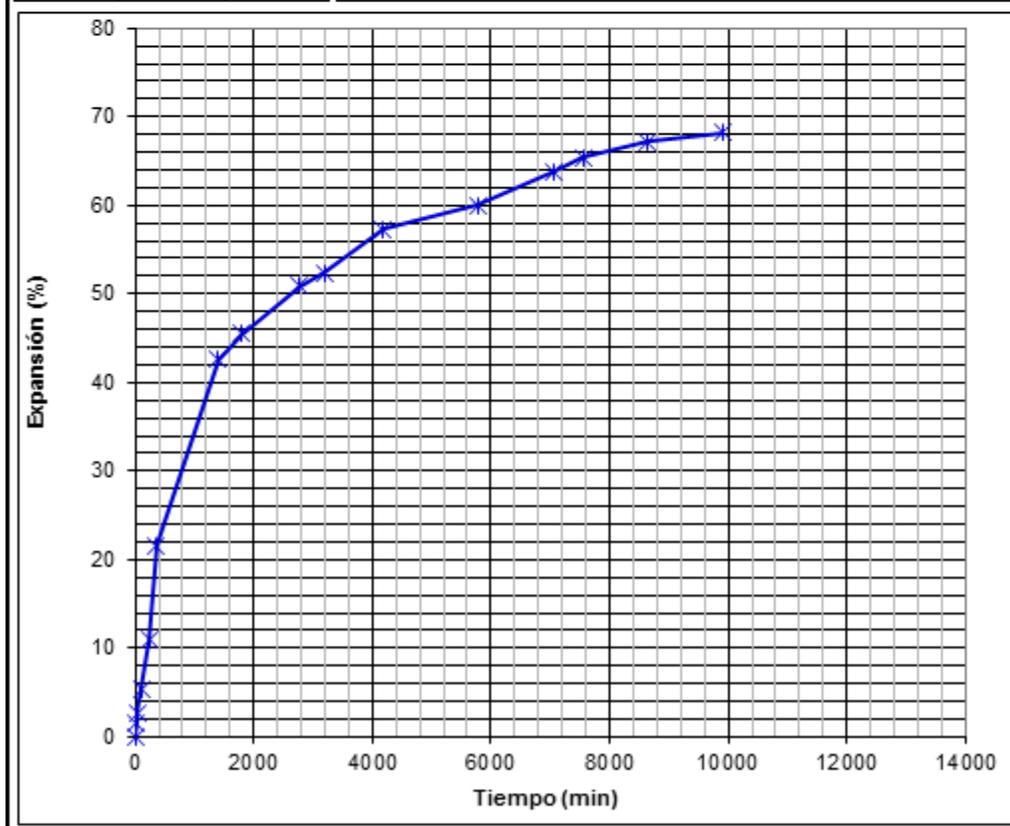
MUESTRA: <u>M-64</u>	OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 38g NaCl - 0,5g</u>
PROF (m): <u>0,5 - 1,5</u>	<u>38g NaCl - 0,5g NaOH /100g de arcilla, durante 48 horas</u>

**Expansión Libre**

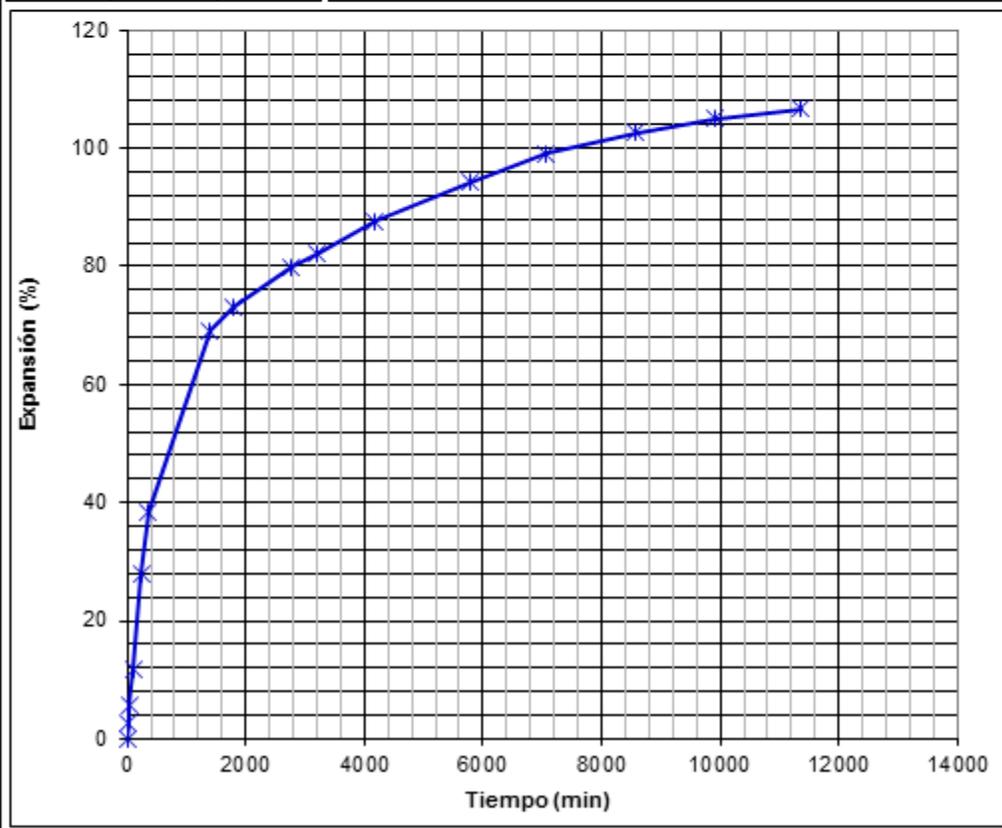
Tiempo (min)	Expansión (%)	Lectura	Datos de la muestra					
0	0	0	Altura Inicial	2,500	cm	Lectura	0,02	mm
15	1,61022	20	Altura Final	4,049	cm	Carga de asiento 0,05 Kg/cm <sup>2</sup>		
45	1,94988	24	Área	9,95	cm <sup>2</sup>			
105	3,25818	41	Vol. Inicial	24,88	cm <sup>3</sup>			
240	8,21045	103	Vol. Final	40,31	cm <sup>3</sup>			
360	16,0797	201	ω Inicial	6,0	%	<b>Expansión 62,0 %</b>		
1395	36,015	450	ω Final	51,7	%			
1800	40,5307	507	(γ <sub>s</sub> ) Inicial	1,736	gr/cm <sup>3</sup>			
2770	46,5375	582	(γ <sub>s</sub> ) Final	1,072	gr/cm <sup>3</sup>			
3190	47,8348	598	Observaciones: Muestra compactada, material pasante tamiz "10"					
4185	51,0663	638						
5775	54,8638	686						
7060	58,344	729						
7560	59,8171	748						
8640	61,2088	765						
9900	61,978	775						



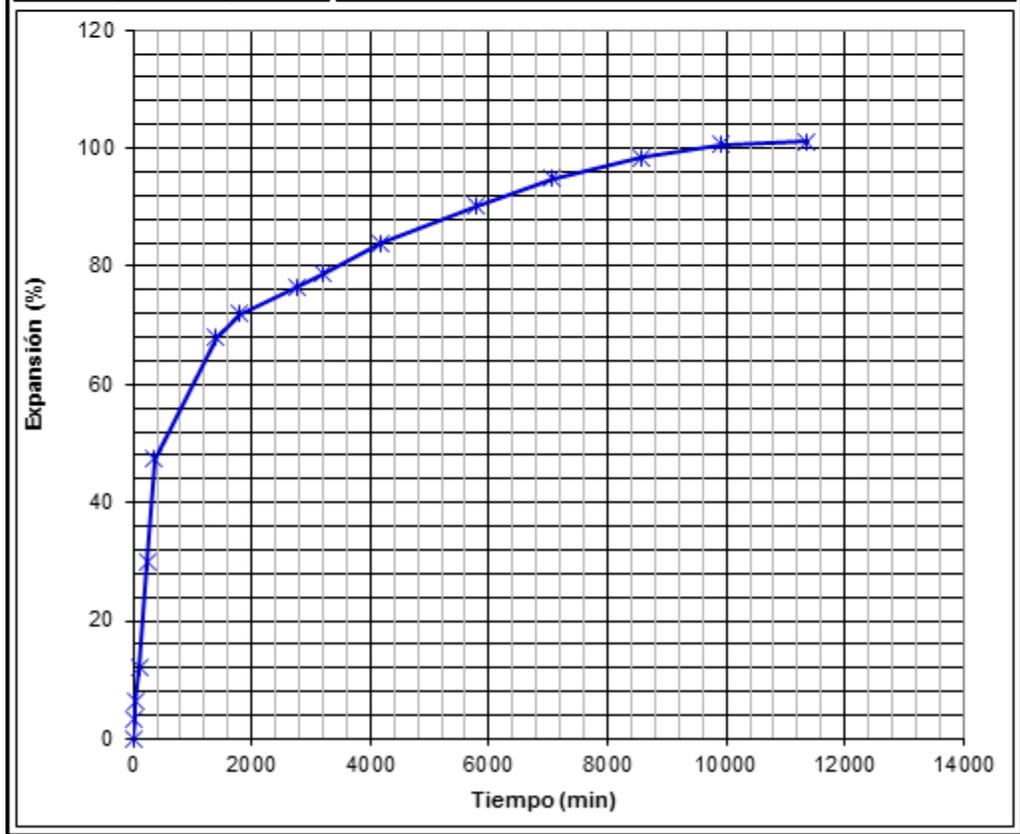
MUESTRA: <u>M-69</u>		OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 50g NaCl (previamente) -</u>																																																																																										
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>		<u>6,3g NaHCO<sub>3</sub> - 1,0g NaOH /100g de arcilla, durante 48 horas</u>																																																																																										
Expansión Libre																																																																																												
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Tiempo (min)</th> <th>Expansión (%)</th> <th>Lectura</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>15</td><td>1,65151</td><td>32</td></tr> <tr><td>45</td><td>2,68363</td><td>52</td></tr> <tr><td>105</td><td>5,393</td><td>105</td></tr> <tr><td>240</td><td>10,8825</td><td>212</td></tr> <tr><td>360</td><td>21,5518</td><td>420</td></tr> <tr><td>1395</td><td>42,612</td><td>831</td></tr> <tr><td>1800</td><td>45,5111</td><td>887</td></tr> <tr><td>2770</td><td>50,9129</td><td>993</td></tr> <tr><td>3190</td><td>52,3321</td><td>1020</td></tr> <tr><td>4185</td><td>57,2718</td><td>1117</td></tr> <tr><td>5775</td><td>60,022</td><td>1170</td></tr> <tr><td>7060</td><td>63,8293</td><td>1245</td></tr> <tr><td>7560</td><td>65,441</td><td>1276</td></tr> <tr><td>8640</td><td>67,2274</td><td>1311</td></tr> <tr><td>9900</td><td>68,1846</td><td>1330</td></tr> </tbody> </table>	Tiempo (min)	Expansión (%)	Lectura	0	0	0	15	1,65151	32	45	2,68363	52	105	5,393	105	240	10,8825	212	360	21,5518	420	1395	42,612	831	1800	45,5111	887	2770	50,9129	993	3190	52,3321	1020	4185	57,2718	1117	5775	60,022	1170	7060	63,8293	1245	7560	65,441	1276	8640	67,2274	1311	9900	68,1846	1330	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Datos de la muestra</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Altura Inicial</td> <td>1,950</td> <td>cm</td> </tr> <tr> <td>Altura Final</td> <td>3,280</td> <td>cm</td> </tr> <tr> <td>Área</td> <td>20,03</td> <td>cm<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td>Vol. Inicial</td> <td>39,06</td> <td>cm<sup>3</sup></td> </tr> <tr> <td>Vol. Final</td> <td>65,69</td> <td>cm<sup>3</sup></td> </tr> <tr> <td>ω Inicial</td> <td>7,5</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td>ω Final</td> <td>49,2</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td>(γ<sub>s</sub>) Inicial</td> <td>1,705</td> <td>gr/cm<sup>3</sup></td> </tr> <tr> <td>(γ<sub>s</sub>) Final</td> <td>1,014</td> <td>gr/cm<sup>3</sup></td> </tr> </tbody> </table>	Datos de la muestra			Altura Inicial	1,950	cm	Altura Final	3,280	cm	Área	20,03	cm <sup>2</sup>	Vol. Inicial	39,06	cm <sup>3</sup>	Vol. Final	65,69	cm <sup>3</sup>	ω Inicial	7,5	%	ω Final	49,2	%	(γ <sub>s</sub> ) Inicial	1,705	gr/cm <sup>3</sup>	(γ <sub>s</sub> ) Final	1,014	gr/cm <sup>3</sup>	<table border="1"> <tr> <td>Lectura</td> <td>0,01</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Carga de asiento 0,05 Kg/cm<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td><b>Expansión</b></td> <td><b>68,2</b></td> <td><b>%</b></td> </tr> </table>	Lectura	0,01	mm	Carga de asiento 0,05 Kg/cm <sup>2</sup>			<b>Expansión</b>	<b>68,2</b>	<b>%</b>
Tiempo (min)	Expansión (%)	Lectura																																																																																										
0	0	0																																																																																										
15	1,65151	32																																																																																										
45	2,68363	52																																																																																										
105	5,393	105																																																																																										
240	10,8825	212																																																																																										
360	21,5518	420																																																																																										
1395	42,612	831																																																																																										
1800	45,5111	887																																																																																										
2770	50,9129	993																																																																																										
3190	52,3321	1020																																																																																										
4185	57,2718	1117																																																																																										
5775	60,022	1170																																																																																										
7060	63,8293	1245																																																																																										
7560	65,441	1276																																																																																										
8640	67,2274	1311																																																																																										
9900	68,1846	1330																																																																																										
Datos de la muestra																																																																																												
Altura Inicial	1,950	cm																																																																																										
Altura Final	3,280	cm																																																																																										
Área	20,03	cm <sup>2</sup>																																																																																										
Vol. Inicial	39,06	cm <sup>3</sup>																																																																																										
Vol. Final	65,69	cm <sup>3</sup>																																																																																										
ω Inicial	7,5	%																																																																																										
ω Final	49,2	%																																																																																										
(γ <sub>s</sub> ) Inicial	1,705	gr/cm <sup>3</sup>																																																																																										
(γ <sub>s</sub> ) Final	1,014	gr/cm <sup>3</sup>																																																																																										
Lectura	0,01	mm																																																																																										
Carga de asiento 0,05 Kg/cm <sup>2</sup>																																																																																												
<b>Expansión</b>	<b>68,2</b>	<b>%</b>																																																																																										
Observaciones: Muestra compactada, material pasante tamiz "10"																																																																																												

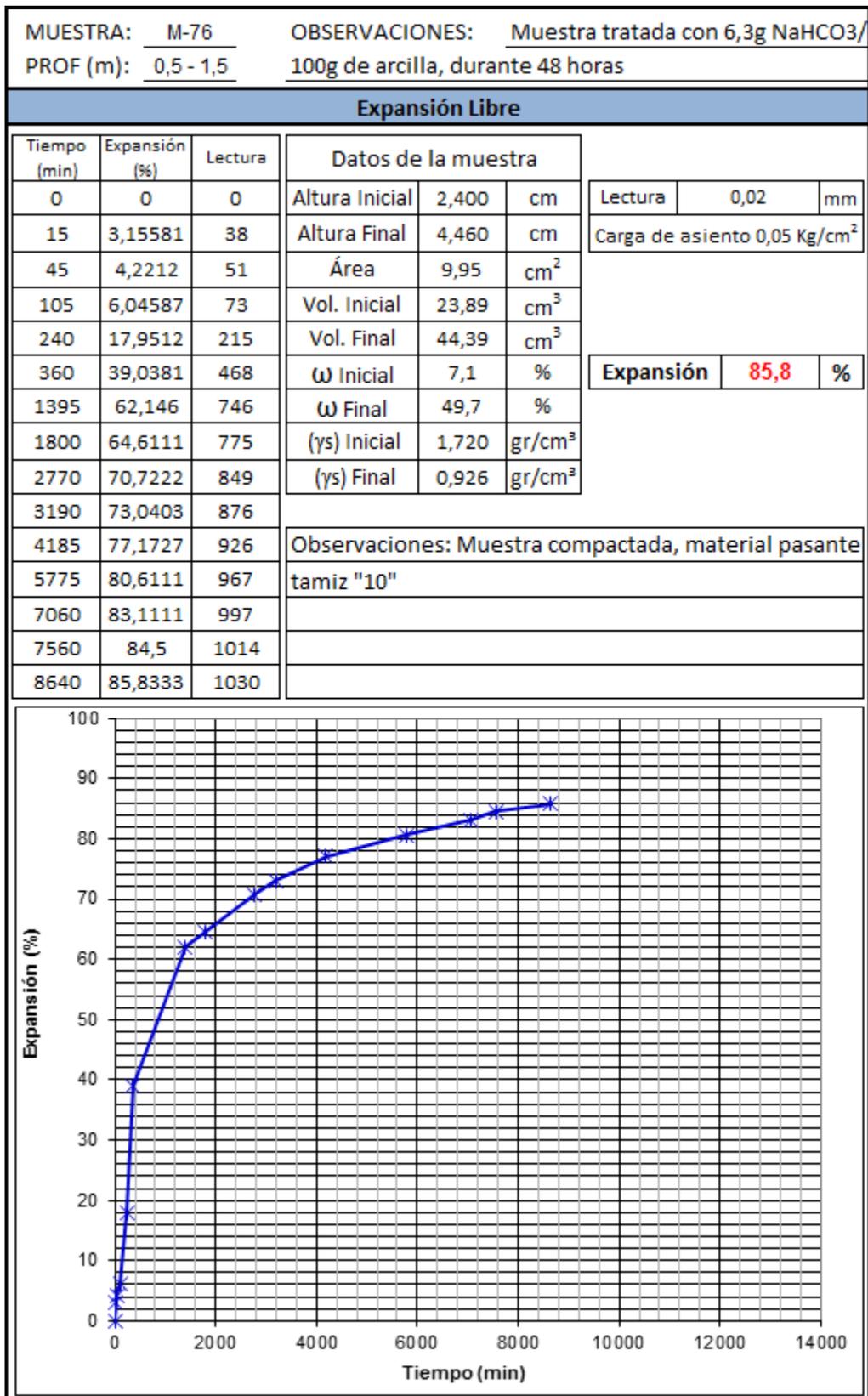


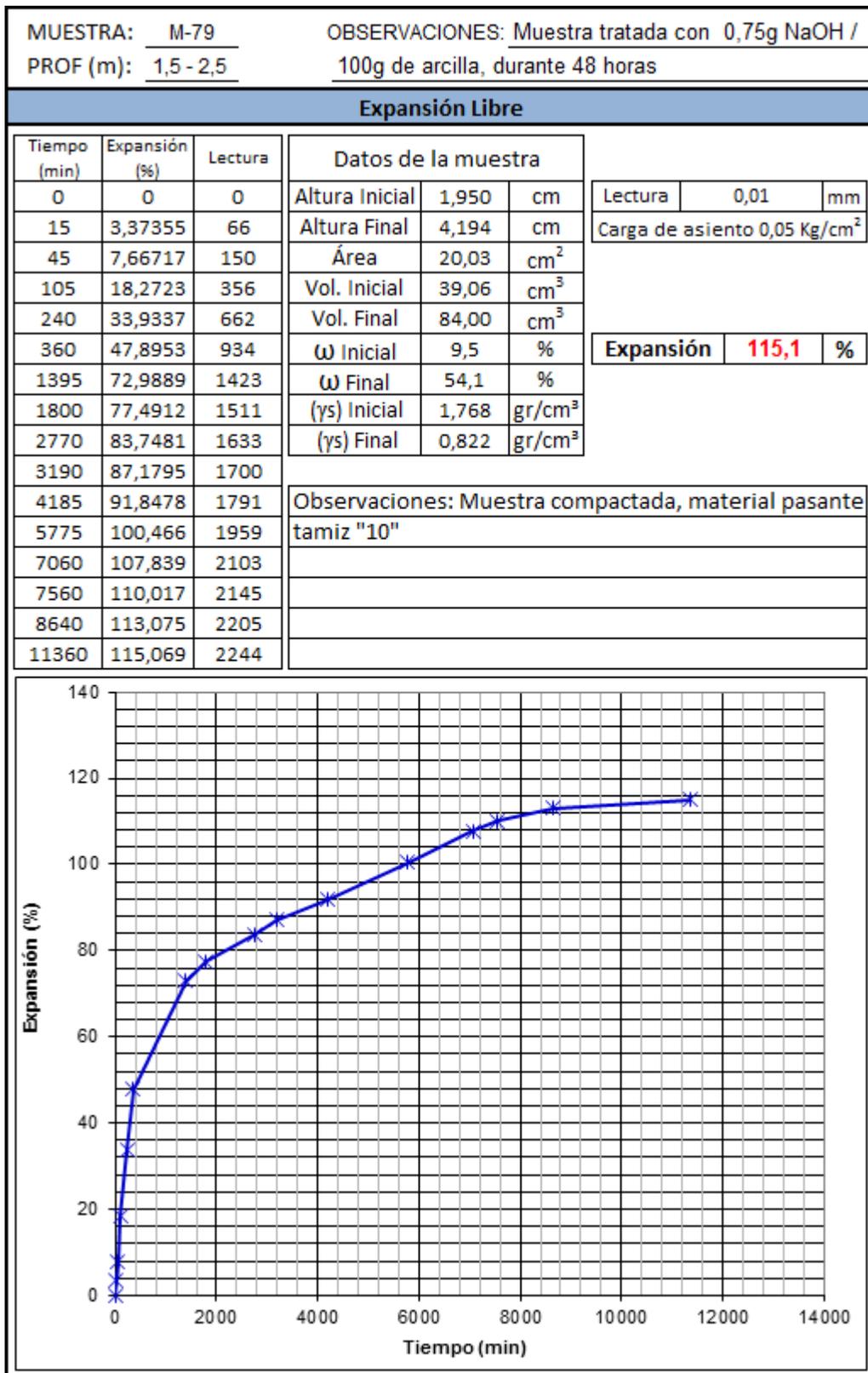
MUESTRA: <u>M-73</u>			OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 50g NaCl (previamente) -</u>																																																																																									
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>			<u>1,0g NaOH /100g de arcilla, durante 48 horas</u>																																																																																									
Expansión Libre																																																																																												
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Tiempo (min)</th> <th>Expansión (%)</th> <th>Lectura</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>15</td><td>2,61867</td><td>52</td></tr> <tr><td>45</td><td>5,71444</td><td>114</td></tr> <tr><td>105</td><td>11,8333</td><td>237</td></tr> <tr><td>240</td><td>27,9936</td><td>560</td></tr> <tr><td>360</td><td>38,4424</td><td>769</td></tr> <tr><td>1395</td><td>69,0556</td><td>1381</td></tr> <tr><td>1800</td><td>73,1424</td><td>1463</td></tr> <tr><td>2770</td><td>79,8791</td><td>1598</td></tr> <tr><td>3190</td><td>82,1058</td><td>1642</td></tr> <tr><td>4185</td><td>87,6524</td><td>1753</td></tr> <tr><td>5775</td><td>94,1707</td><td>1883</td></tr> <tr><td>7060</td><td>99,11</td><td>1982</td></tr> <tr><td>8580</td><td>102,673</td><td>2053</td></tr> <tr><td>9900</td><td>105,061</td><td>2101</td></tr> <tr><td>11360</td><td>106,612</td><td>2132</td></tr> </tbody> </table>	Tiempo (min)	Expansión (%)	Lectura	0	0	0	15	2,61867	52	45	5,71444	114	105	11,8333	237	240	27,9936	560	360	38,4424	769	1395	69,0556	1381	1800	73,1424	1463	2770	79,8791	1598	3190	82,1058	1642	4185	87,6524	1753	5775	94,1707	1883	7060	99,11	1982	8580	102,673	2053	9900	105,061	2101	11360	106,612	2132	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Datos de la muestra</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Altura Inicial</td> <td>2,000</td> <td>cm</td> </tr> <tr> <td>Altura Final</td> <td>4,132</td> <td>cm</td> </tr> <tr> <td>Área</td> <td>20,03</td> <td>cm<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td>Vol. Inicial</td> <td>40,06</td> <td>cm<sup>3</sup></td> </tr> <tr> <td>Vol. Final</td> <td>82,77</td> <td>cm<sup>3</sup></td> </tr> <tr> <td>ω Inicial</td> <td>5,5</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td>ω Final</td> <td>54,5</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td>(γ<sub>s</sub>) Inicial</td> <td>1,721</td> <td>gr/cm<sup>3</sup></td> </tr> <tr> <td>(γ<sub>s</sub>) Final</td> <td>0,833</td> <td>gr/cm<sup>3</sup></td> </tr> </tbody> </table>	Datos de la muestra			Altura Inicial	2,000	cm	Altura Final	4,132	cm	Área	20,03	cm <sup>2</sup>	Vol. Inicial	40,06	cm <sup>3</sup>	Vol. Final	82,77	cm <sup>3</sup>	ω Inicial	5,5	%	ω Final	54,5	%	(γ <sub>s</sub> ) Inicial	1,721	gr/cm <sup>3</sup>	(γ <sub>s</sub> ) Final	0,833	gr/cm <sup>3</sup>	<table border="1"> <tr> <td>Lectura</td> <td>0,01</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Carga de asiento 0,05 Kg/cm<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td><b>Expansión</b></td> <td><b>106,6</b></td> <td><b>%</b></td> </tr> </table>	Lectura	0,01	mm	Carga de asiento 0,05 Kg/cm <sup>2</sup>			<b>Expansión</b>	<b>106,6</b>	<b>%</b>
Tiempo (min)	Expansión (%)	Lectura																																																																																										
0	0	0																																																																																										
15	2,61867	52																																																																																										
45	5,71444	114																																																																																										
105	11,8333	237																																																																																										
240	27,9936	560																																																																																										
360	38,4424	769																																																																																										
1395	69,0556	1381																																																																																										
1800	73,1424	1463																																																																																										
2770	79,8791	1598																																																																																										
3190	82,1058	1642																																																																																										
4185	87,6524	1753																																																																																										
5775	94,1707	1883																																																																																										
7060	99,11	1982																																																																																										
8580	102,673	2053																																																																																										
9900	105,061	2101																																																																																										
11360	106,612	2132																																																																																										
Datos de la muestra																																																																																												
Altura Inicial	2,000	cm																																																																																										
Altura Final	4,132	cm																																																																																										
Área	20,03	cm <sup>2</sup>																																																																																										
Vol. Inicial	40,06	cm <sup>3</sup>																																																																																										
Vol. Final	82,77	cm <sup>3</sup>																																																																																										
ω Inicial	5,5	%																																																																																										
ω Final	54,5	%																																																																																										
(γ <sub>s</sub> ) Inicial	1,721	gr/cm <sup>3</sup>																																																																																										
(γ <sub>s</sub> ) Final	0,833	gr/cm <sup>3</sup>																																																																																										
Lectura	0,01	mm																																																																																										
Carga de asiento 0,05 Kg/cm <sup>2</sup>																																																																																												
<b>Expansión</b>	<b>106,6</b>	<b>%</b>																																																																																										
Observaciones: Muestra compactada, material pasante tamiz "10"																																																																																												



MUESTRA: <u>M-75</u>		OBSERVACIONES: <u>Muestra tratada con 6,3g NaHCO<sub>3</sub>-</u>																																																																																										
PROF (m): <u>1,5 - 2,5</u>		<u>1,0g NaOH /100g de arcilla, durante 48 horas</u>																																																																																										
Expansión Libre																																																																																												
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Tiempo (min)</th> <th>Expansión (%)</th> <th>Lectura</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>15</td><td>3,34791</td><td>42</td></tr> <tr><td>45</td><td>6,34578</td><td>79</td></tr> <tr><td>105</td><td>12,066</td><td>151</td></tr> <tr><td>240</td><td>29,978</td><td>375</td></tr> <tr><td>360</td><td>47,2961</td><td>591</td></tr> <tr><td>1395</td><td>68,0047</td><td>850</td></tr> <tr><td>1800</td><td>71,9228</td><td>899</td></tr> <tr><td>2770</td><td>76,5392</td><td>957</td></tr> <tr><td>3190</td><td>78,6729</td><td>983</td></tr> <tr><td>4185</td><td>83,9876</td><td>1050</td></tr> <tr><td>5775</td><td>90,2333</td><td>1128</td></tr> <tr><td>7060</td><td>94,9661</td><td>1187</td></tr> <tr><td>8580</td><td>98,3799</td><td>1230</td></tr> <tr><td>9900</td><td>100,669</td><td>1258</td></tr> <tr><td>11360</td><td>101,193</td><td>1265</td></tr> </tbody> </table>	Tiempo (min)	Expansión (%)	Lectura	0	0	0	15	3,34791	42	45	6,34578	79	105	12,066	151	240	29,978	375	360	47,2961	591	1395	68,0047	850	1800	71,9228	899	2770	76,5392	957	3190	78,6729	983	4185	83,9876	1050	5775	90,2333	1128	7060	94,9661	1187	8580	98,3799	1230	9900	100,669	1258	11360	101,193	1265	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Datos de la muestra</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Altura Inicial</td><td>2,500</td><td>cm</td></tr> <tr><td>Altura Final</td><td>5,030</td><td>cm</td></tr> <tr><td>Área</td><td>9,95</td><td>cm<sup>2</sup></td></tr> <tr><td>Vol. Inicial</td><td>24,88</td><td>cm<sup>3</sup></td></tr> <tr><td>Vol. Final</td><td>50,07</td><td>cm<sup>3</sup></td></tr> <tr><td>ω Inicial</td><td>6,1</td><td>%</td></tr> <tr><td>ω Final</td><td>51,0</td><td>%</td></tr> <tr><td>(γ<sub>s</sub>) Inicial</td><td>1,701</td><td>gr/cm<sup>3</sup></td></tr> <tr><td>(γ<sub>s</sub>) Final</td><td>0,845</td><td>gr/cm<sup>3</sup></td></tr> </tbody> </table>	Datos de la muestra			Altura Inicial	2,500	cm	Altura Final	5,030	cm	Área	9,95	cm <sup>2</sup>	Vol. Inicial	24,88	cm <sup>3</sup>	Vol. Final	50,07	cm <sup>3</sup>	ω Inicial	6,1	%	ω Final	51,0	%	(γ <sub>s</sub> ) Inicial	1,701	gr/cm <sup>3</sup>	(γ <sub>s</sub> ) Final	0,845	gr/cm <sup>3</sup>	<table border="1"> <tr><td>Lectura</td><td>0,02</td><td>mm</td></tr> <tr><td colspan="3">Carga de asiento 0,05 Kg/cm<sup>2</sup></td></tr> <tr><td>Expansión</td><td>101,2</td><td>%</td></tr> </table>	Lectura	0,02	mm	Carga de asiento 0,05 Kg/cm <sup>2</sup>			Expansión	101,2	%
Tiempo (min)	Expansión (%)	Lectura																																																																																										
0	0	0																																																																																										
15	3,34791	42																																																																																										
45	6,34578	79																																																																																										
105	12,066	151																																																																																										
240	29,978	375																																																																																										
360	47,2961	591																																																																																										
1395	68,0047	850																																																																																										
1800	71,9228	899																																																																																										
2770	76,5392	957																																																																																										
3190	78,6729	983																																																																																										
4185	83,9876	1050																																																																																										
5775	90,2333	1128																																																																																										
7060	94,9661	1187																																																																																										
8580	98,3799	1230																																																																																										
9900	100,669	1258																																																																																										
11360	101,193	1265																																																																																										
Datos de la muestra																																																																																												
Altura Inicial	2,500	cm																																																																																										
Altura Final	5,030	cm																																																																																										
Área	9,95	cm <sup>2</sup>																																																																																										
Vol. Inicial	24,88	cm <sup>3</sup>																																																																																										
Vol. Final	50,07	cm <sup>3</sup>																																																																																										
ω Inicial	6,1	%																																																																																										
ω Final	51,0	%																																																																																										
(γ <sub>s</sub> ) Inicial	1,701	gr/cm <sup>3</sup>																																																																																										
(γ <sub>s</sub> ) Final	0,845	gr/cm <sup>3</sup>																																																																																										
Lectura	0,02	mm																																																																																										
Carga de asiento 0,05 Kg/cm <sup>2</sup>																																																																																												
Expansión	101,2	%																																																																																										
Observaciones: Muestra compactada, material pasante tamiz "10"																																																																																												







**A2. DIFRACTOGRAMAS DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS****Condiciones de medición:**

Sample: Exported by X'Pert SW, Generated by Laboratorio in project Proj

Measurement Date / Time: 18/07/2018 12:41:00 p.m.

Raw Data Origin: PHILIPS-binary (scan) (.RD)

Scan Axis: Gonio

Start Position [ $^{\circ}2\text{Th.}$ ]: 5,0100

End Position [ $^{\circ}2\text{Th.}$ ]: 74,9900

Step Size [ $^{\circ}2\text{Th.}$ ]: 0,0200

Scan Step Time [s]: 0,5000

Scan Type: Continuous

Offset [ $^{\circ}2\text{Th.}$ ]: 0,0000

Divergence Slit Type: Fixed

Divergence Slit Size [ $^{\circ}$ ]: 1,0000

Specimen Length [mm]: 10,00

Receiving Slit Size [mm]: 0,1000

Measurement Temperature [ $^{\circ}\text{C}$ ]: 0,00

Anode Material: Cu

K-Alpha1 [ $\text{\AA}$ ]: 1,54060

K-Alpha2 [ $\text{\AA}$ ]: 1,54443

K-Beta [ $\text{\AA}$ ]: 1,39225

K-A2 / K-A1 Ratio: 0,50000

Generator Settings: 10 mA, 10 kV

Diffractionmeter Type: PW3710

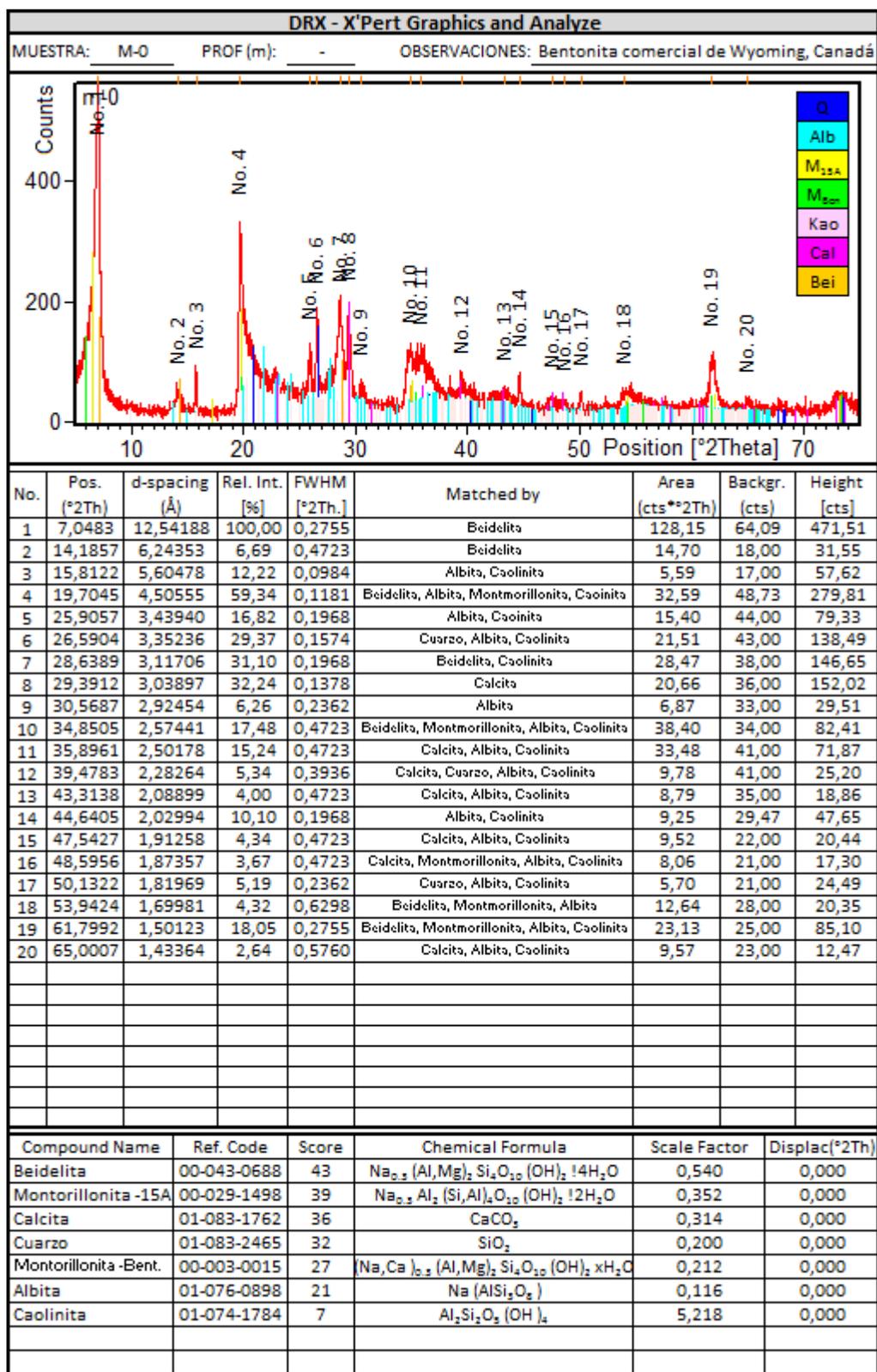
Diffractionmeter Number: 1

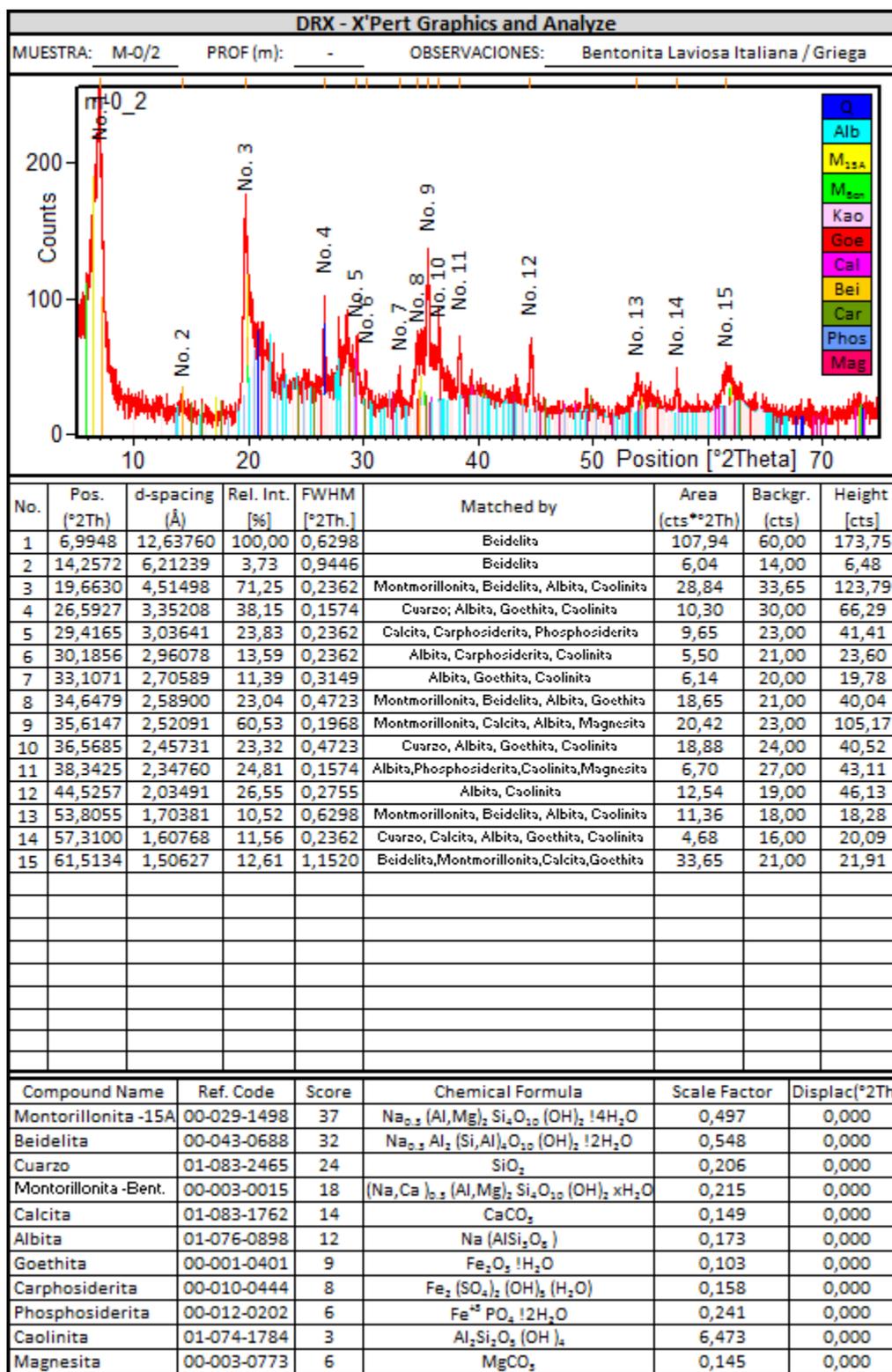
Goniometer Radius [mm]: 173,00

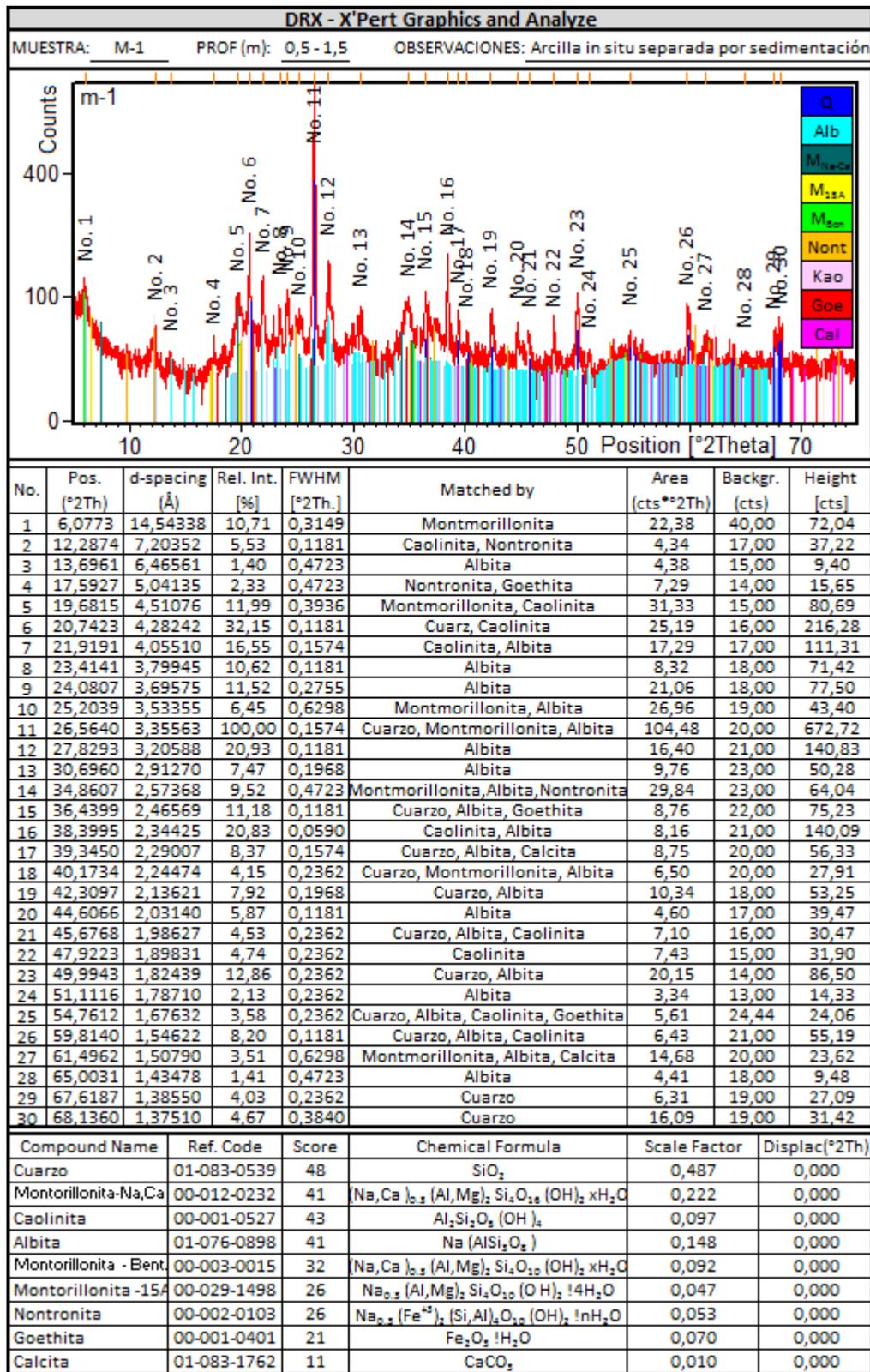
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm]: 91,00

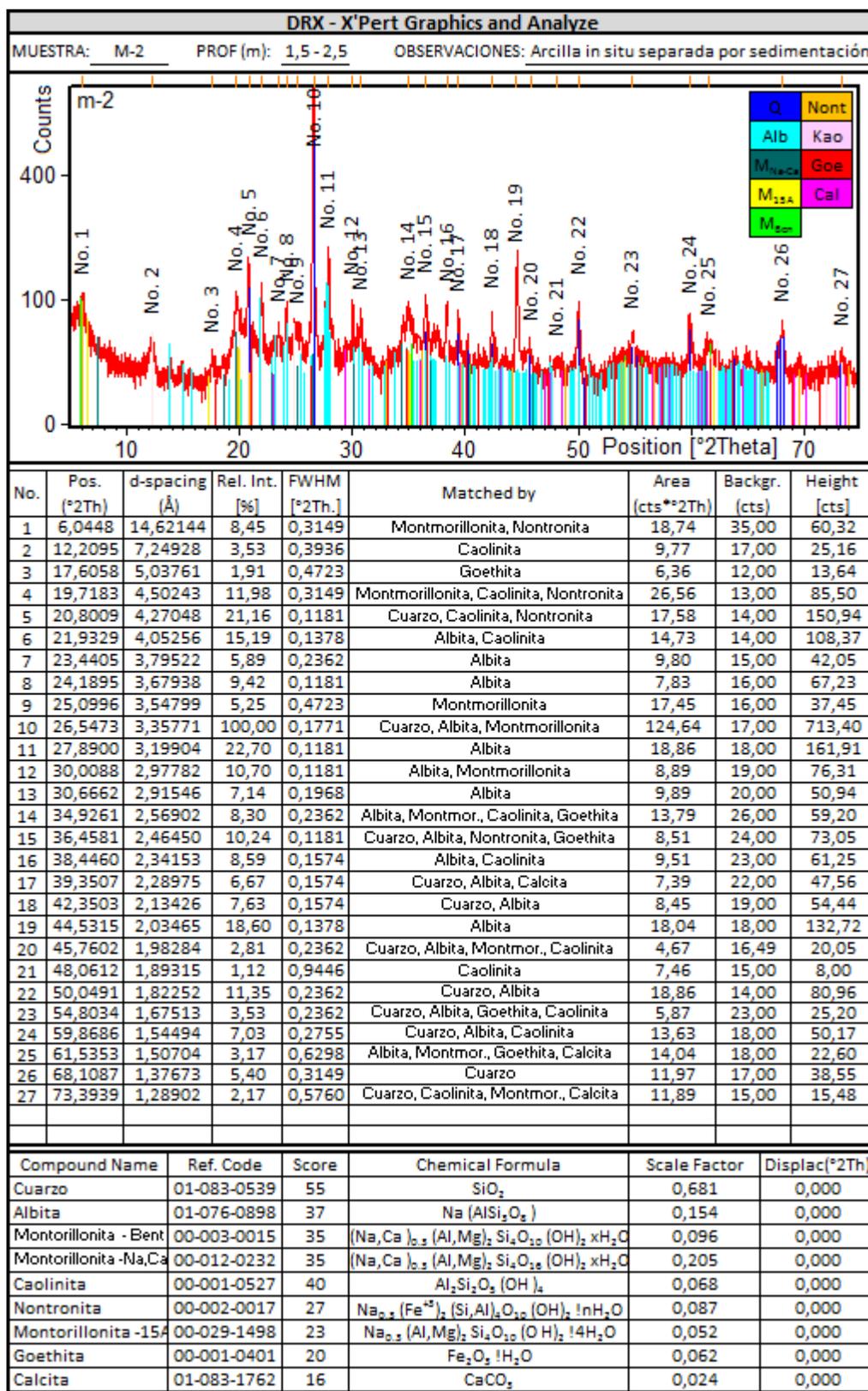
Incident Beam Monochromator: No

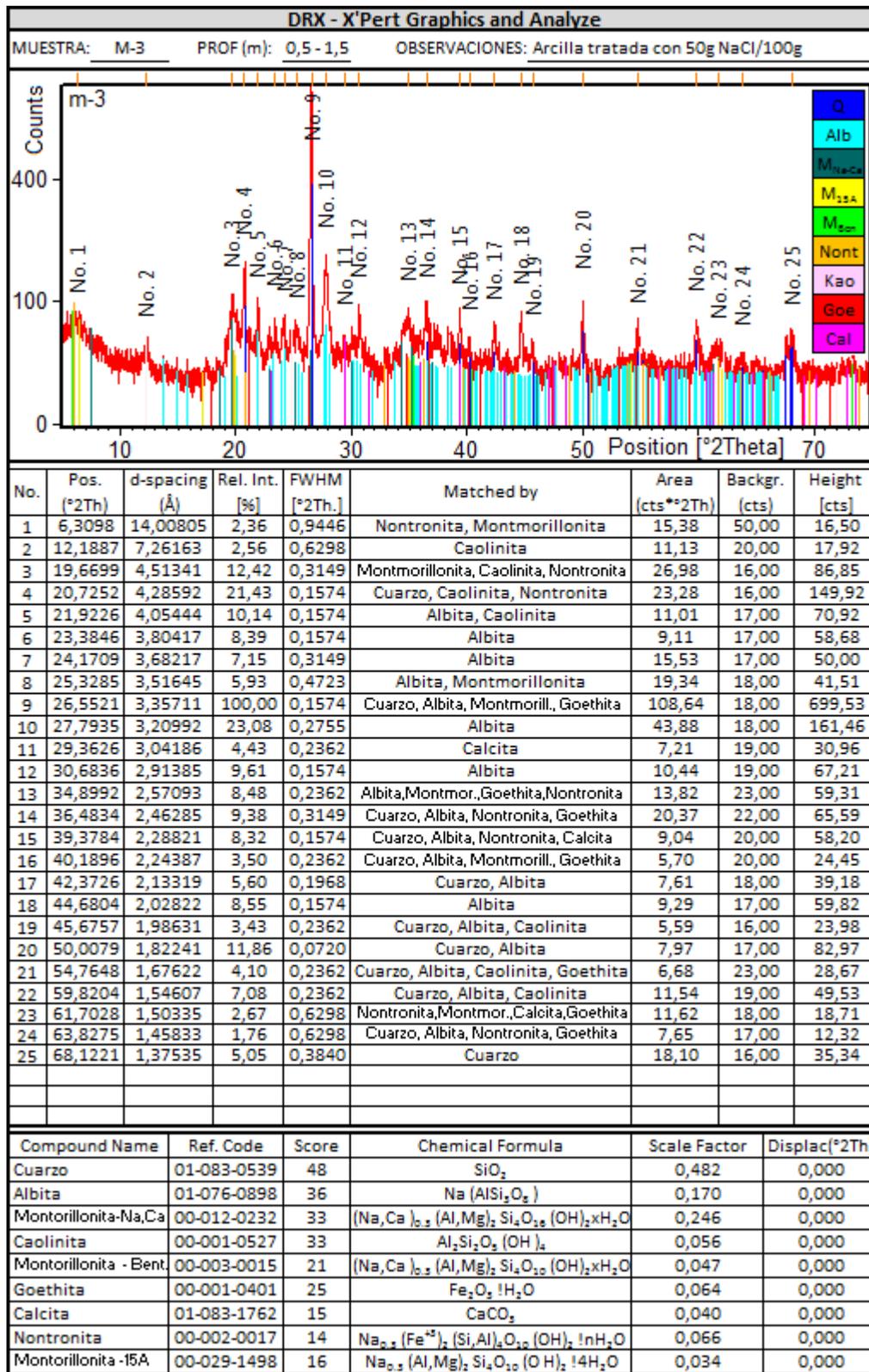
Spinning: No

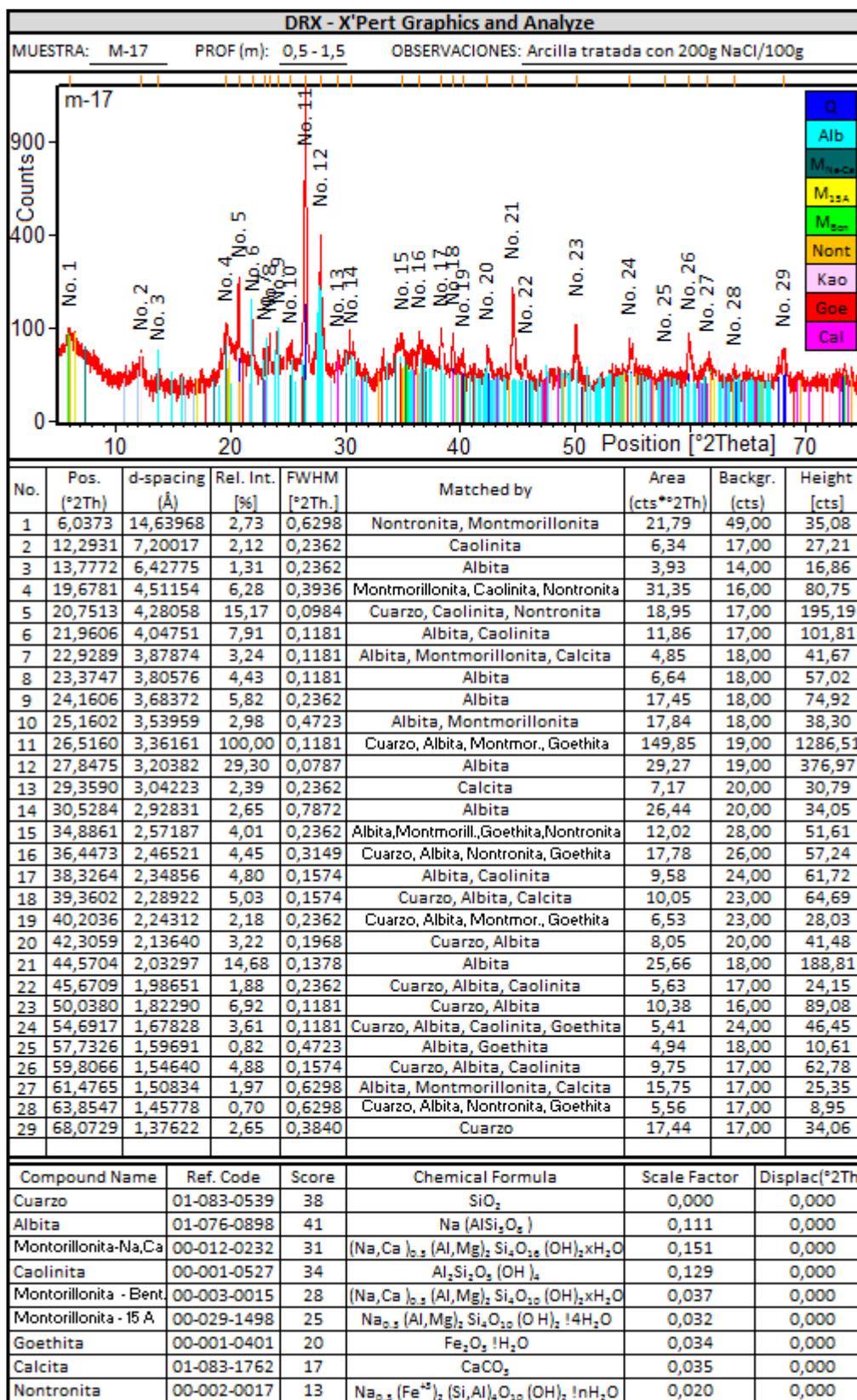


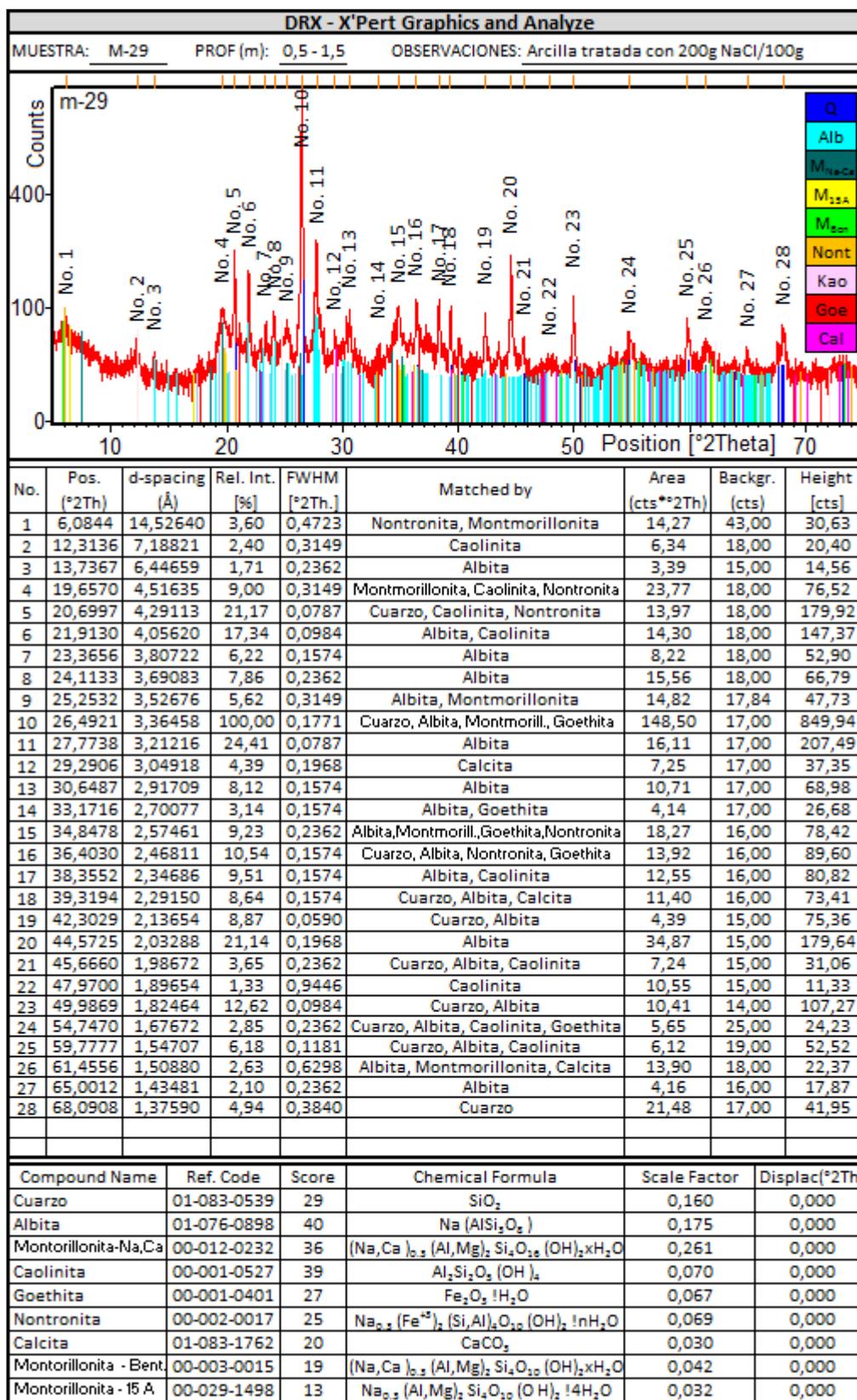


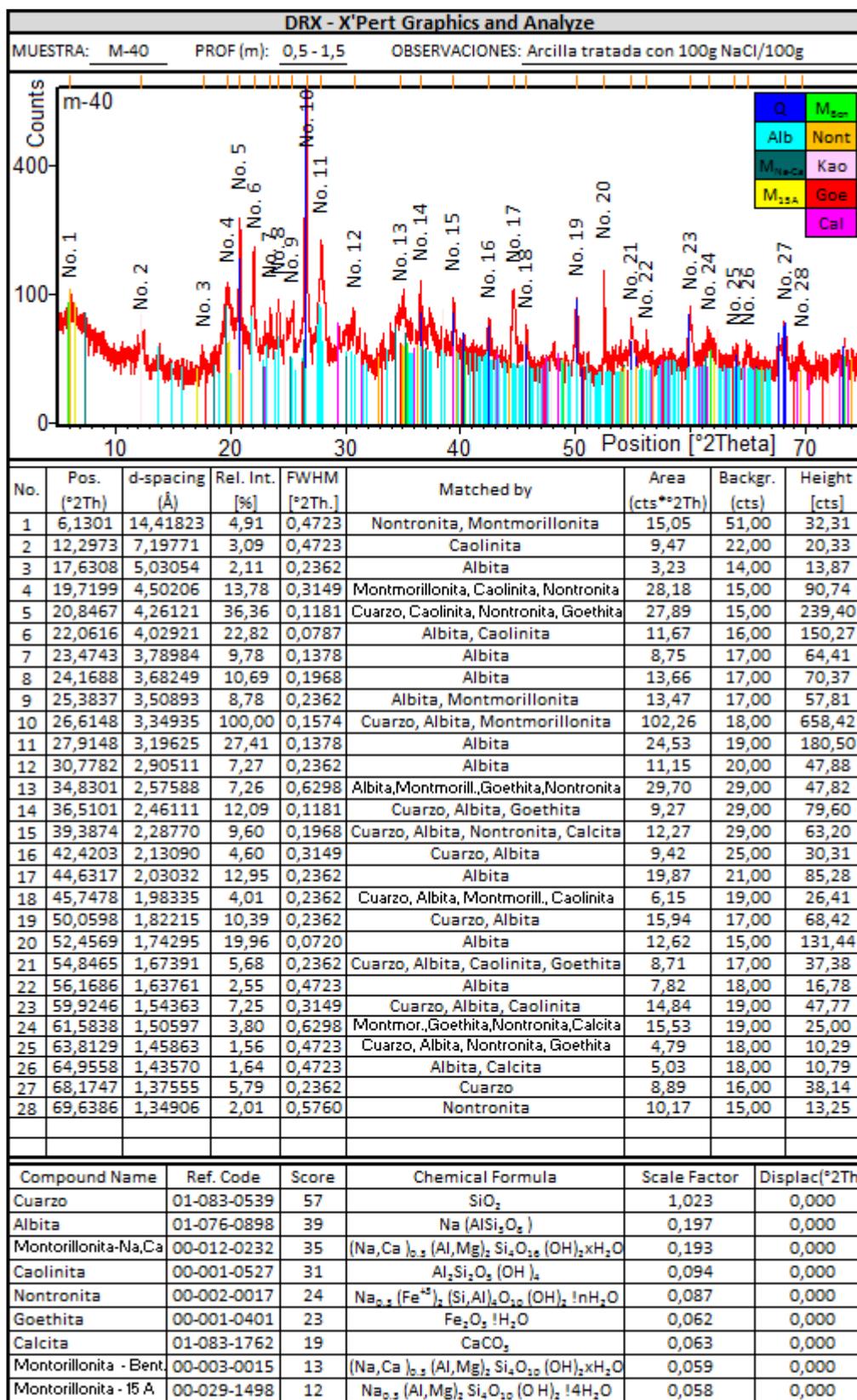


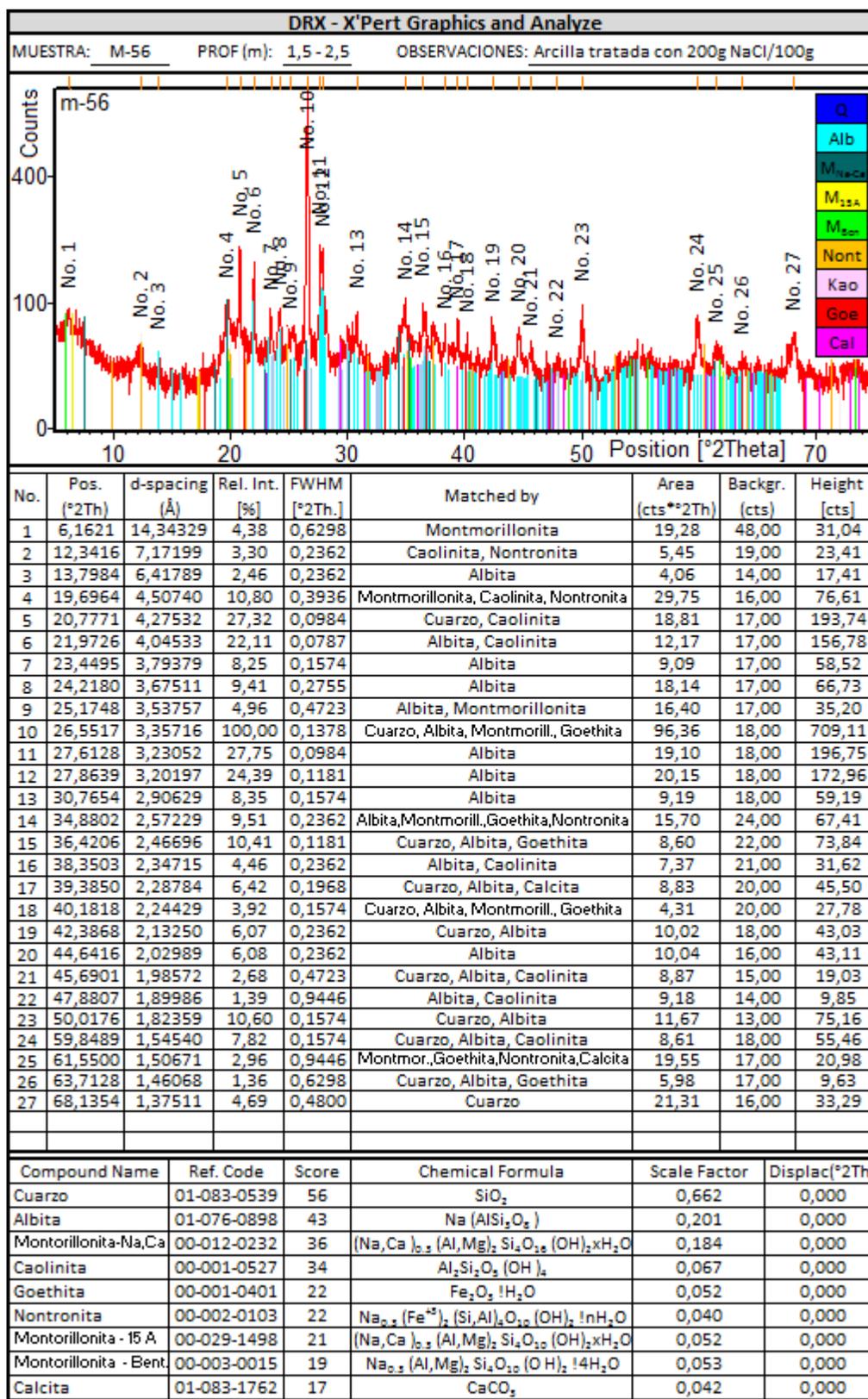


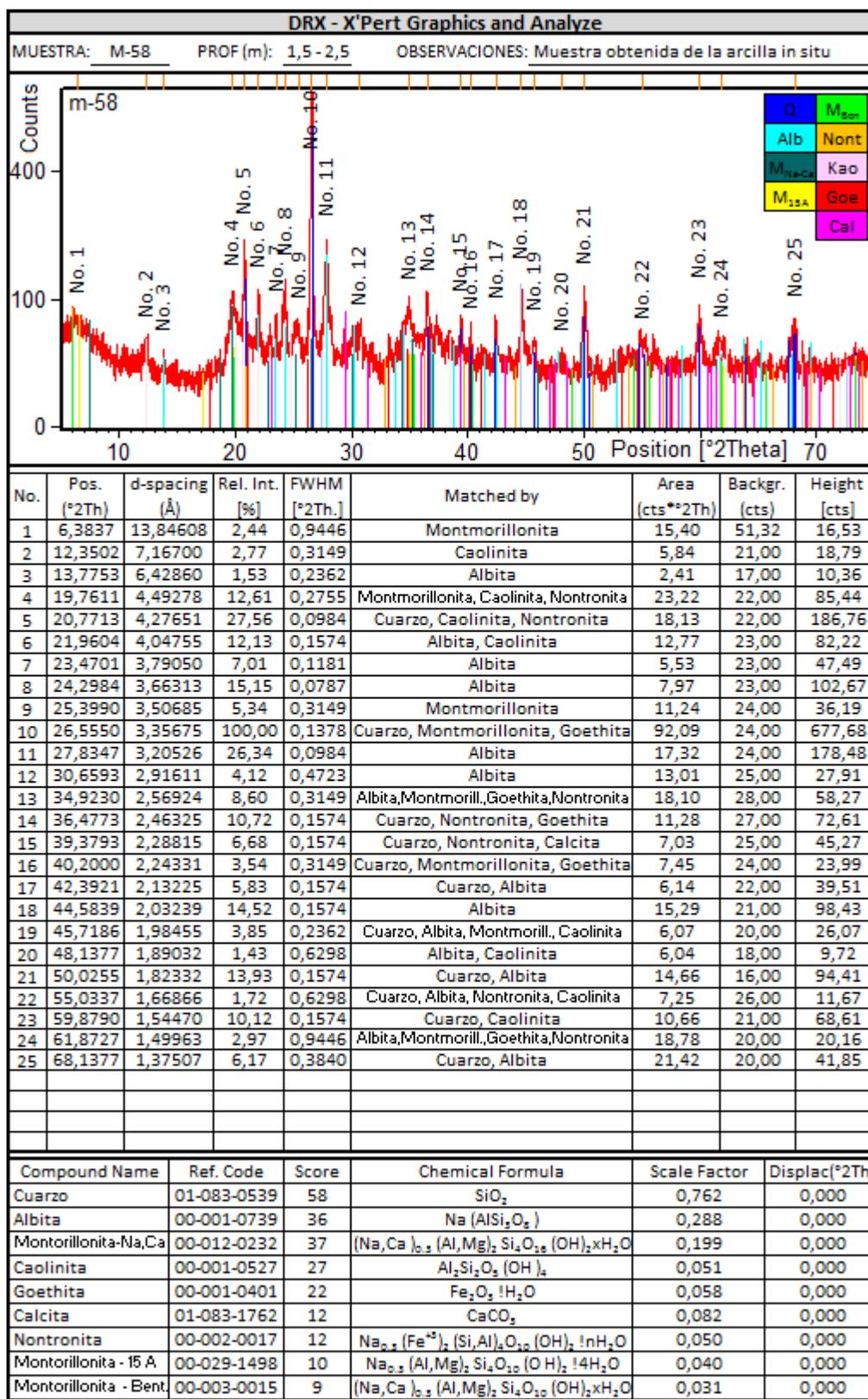


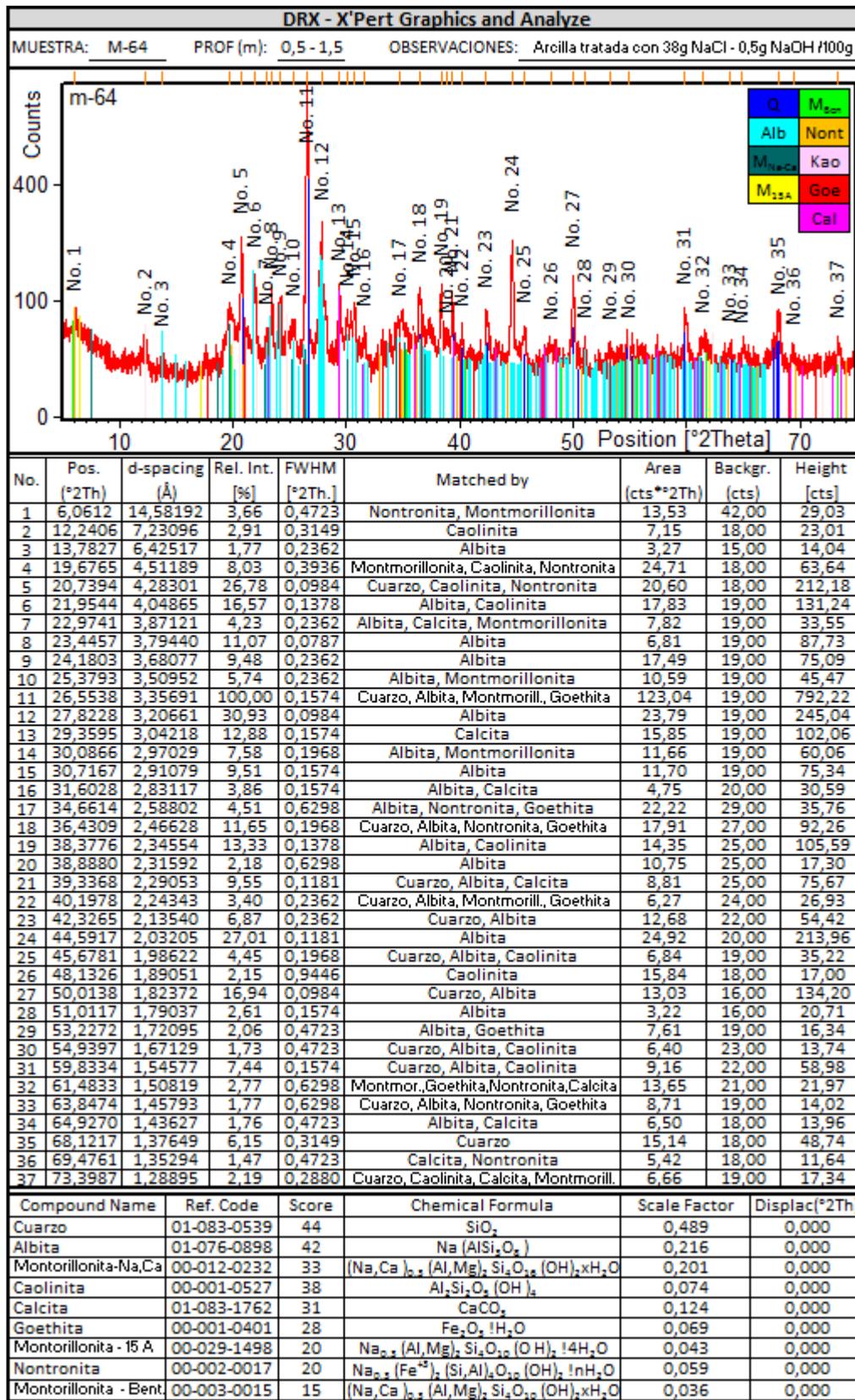


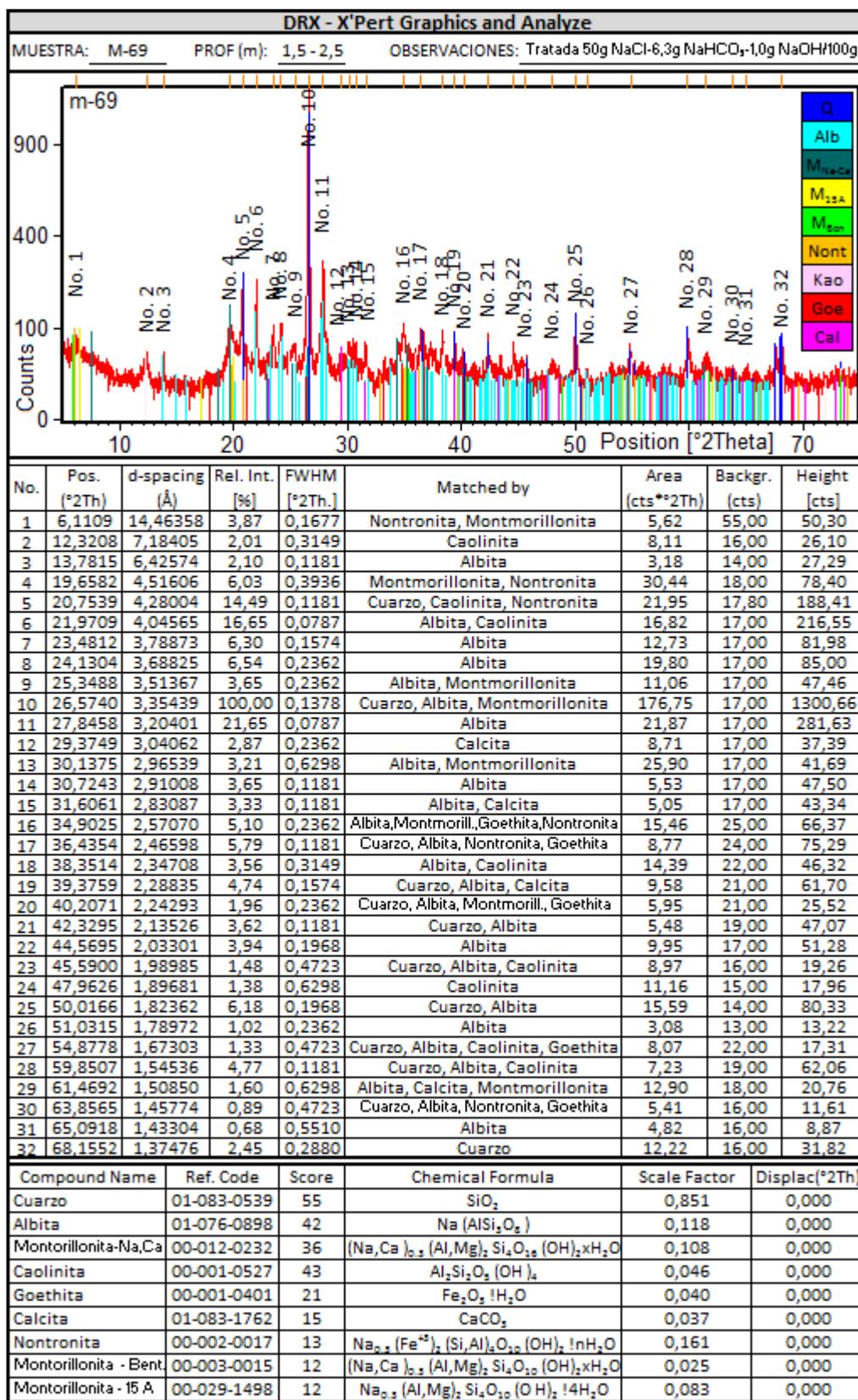


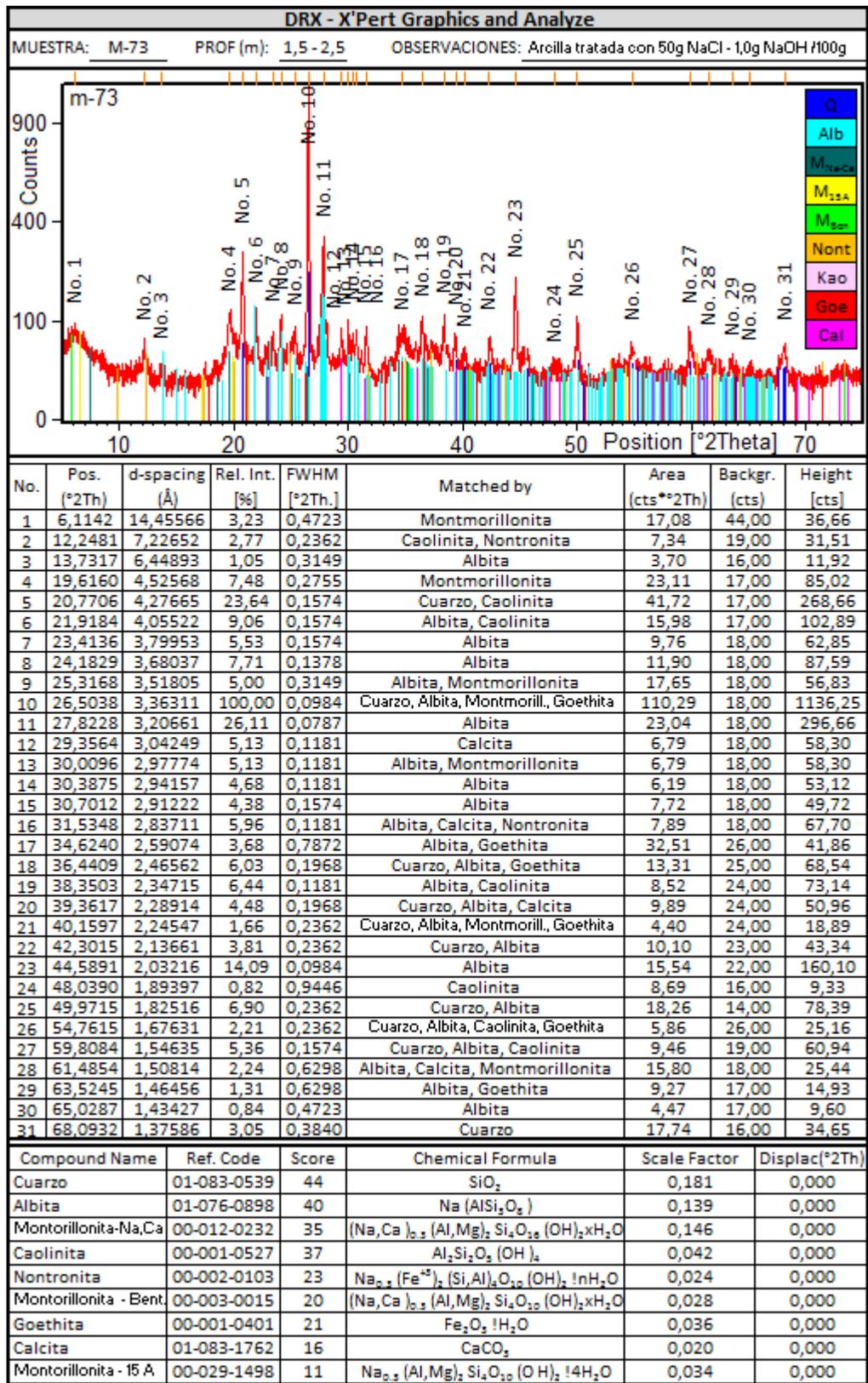


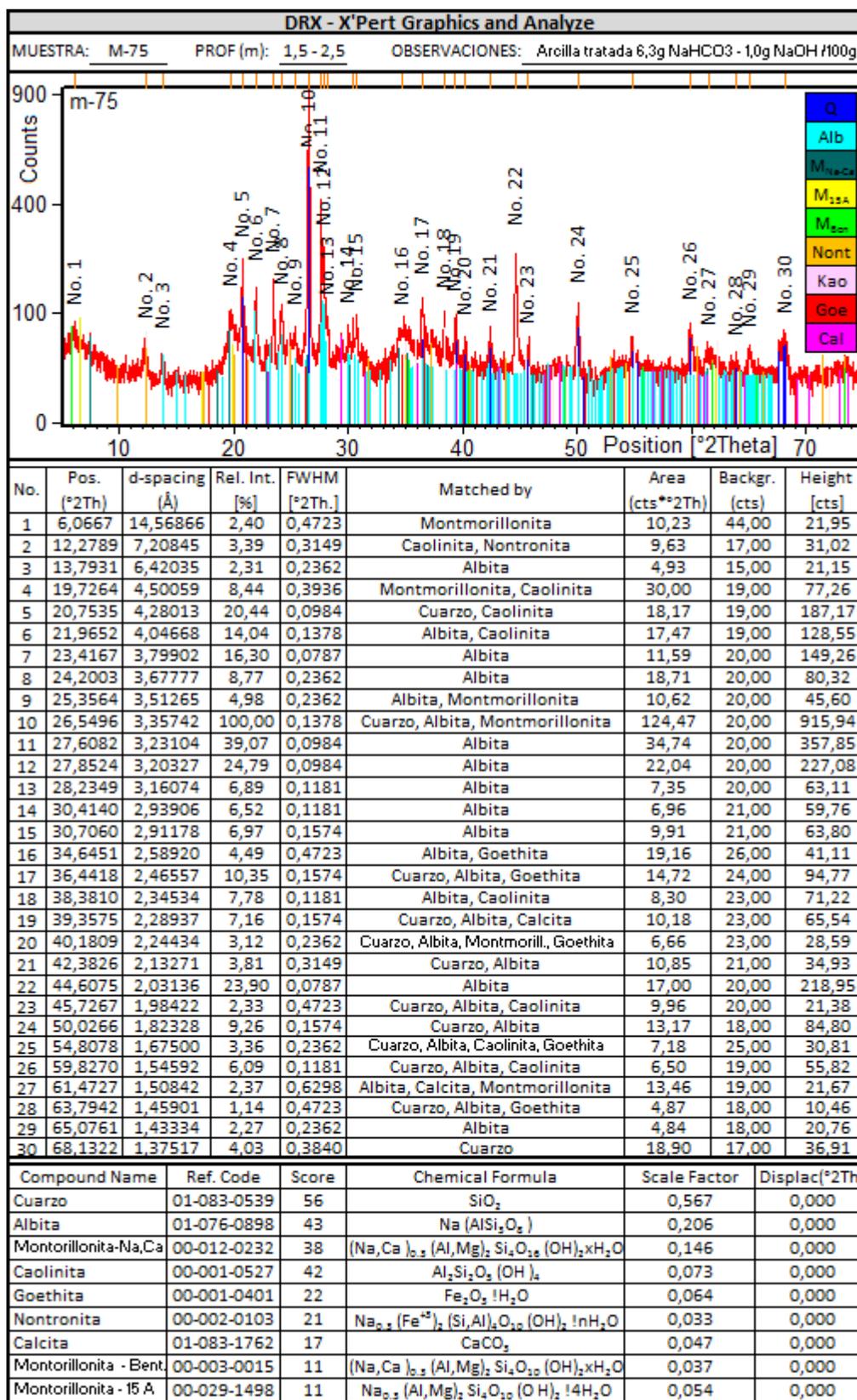


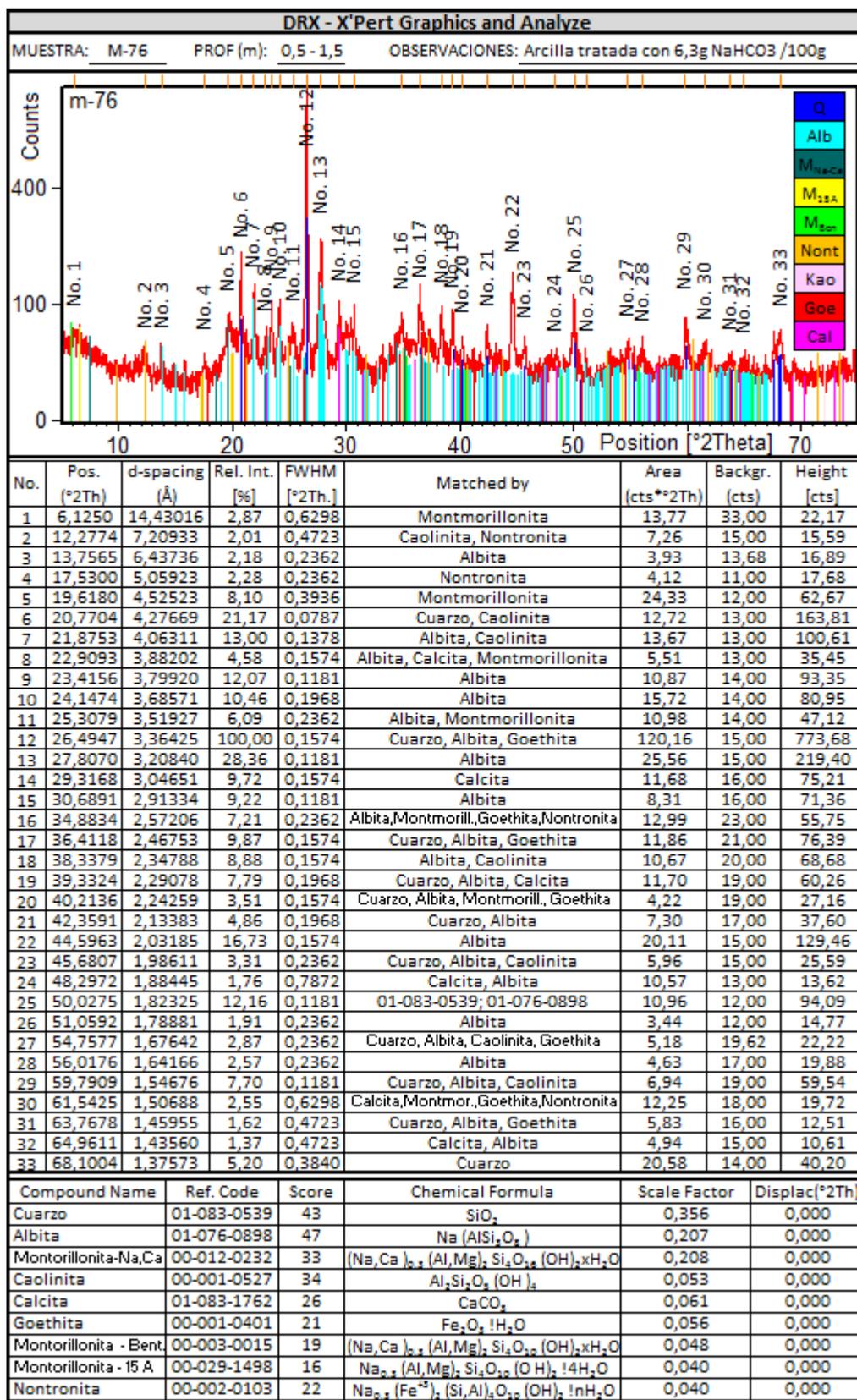


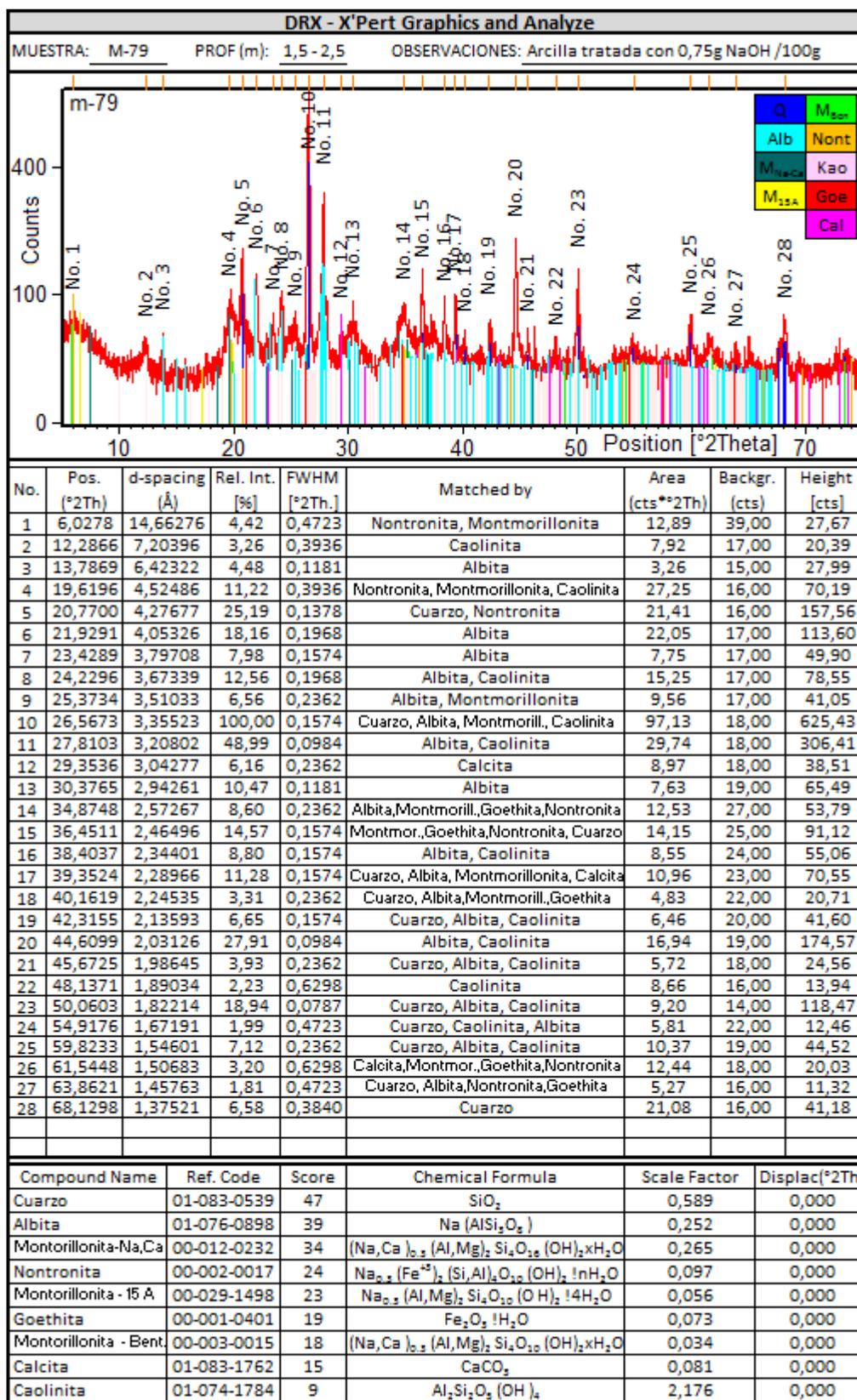


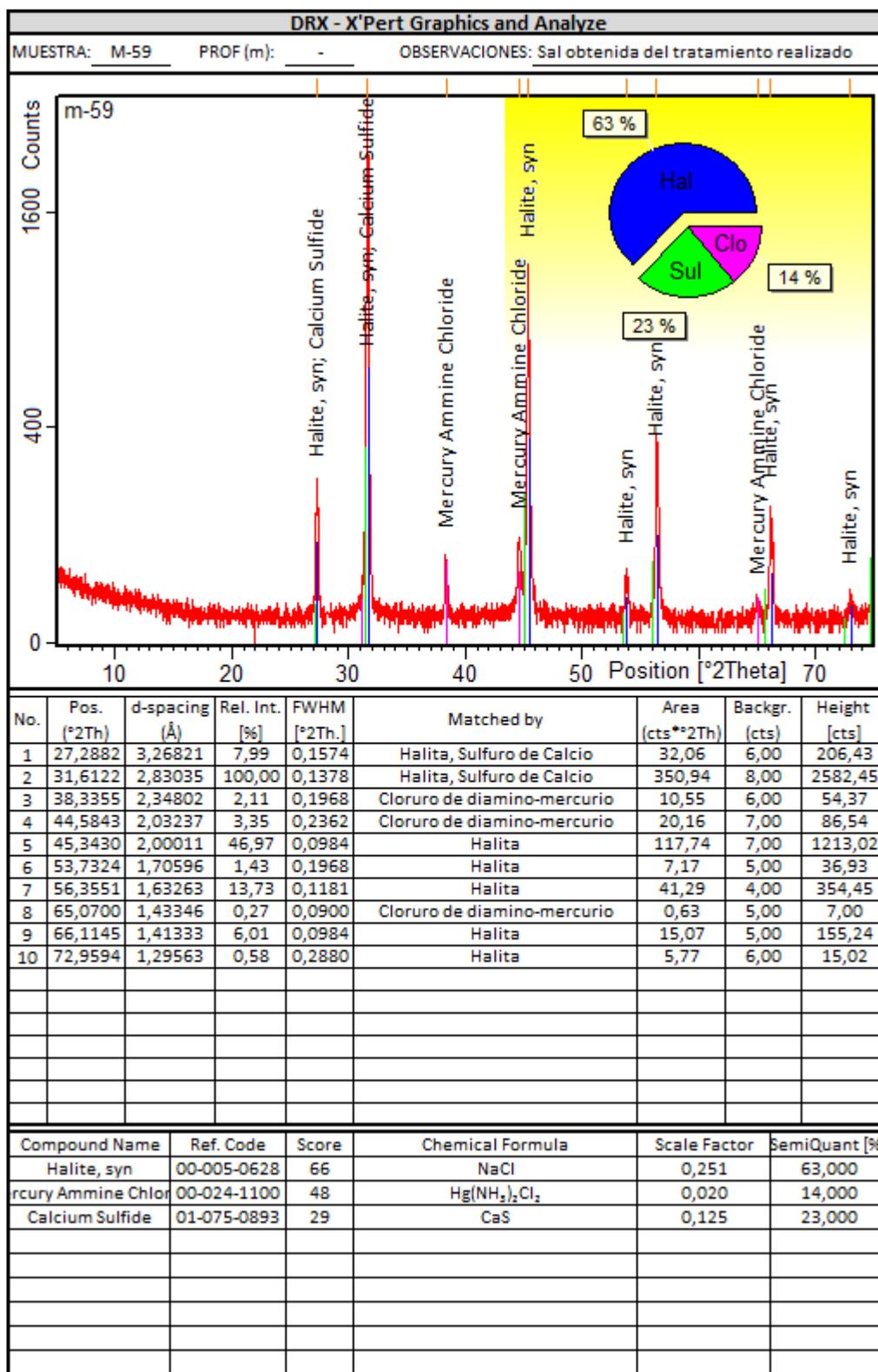












## **APÉNDICE B. ANÁLISIS MORFOLÓGICO DE LAS MUESTRAS**

Los minerales de arcilla y, en general los silicatos, están constituidos por unidades características, las cuales pueden disponerse en forma regular como en un cristal, o en forma desordenada como en los vidrios que son sólidos amorfos. Si se observa una roca al microscopio pueden verse pequeñas unidades que son definibles como minerales y que exhiben cierta regularidad óptica, no apreciable a simple vista. Si se trata de adentrarse en la estructura del cristal, a simple vista, existen ciertas limitantes para observar como se distribuyen y enlazan sus elementos constitutivos, átomos, iones y moléculas. De esta forma, sólo métodos de análisis ultra refinados (microdifracción, fotometría infrarroja, microscopía electrónica, entre otros) posibilitan la realización de mediciones indirectas, las cuales permiten esbozar un modelo del edificio cristalino BESOAIN (1985).

### **B1. IMÁGENES SEM PETROLOGY ATLAS (WELTON, 2003)**

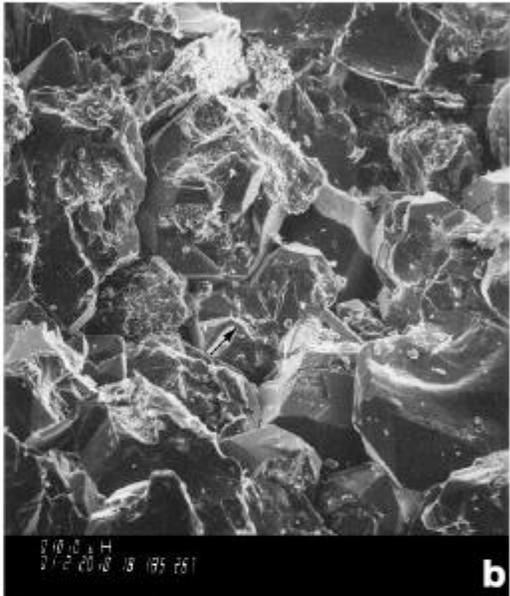
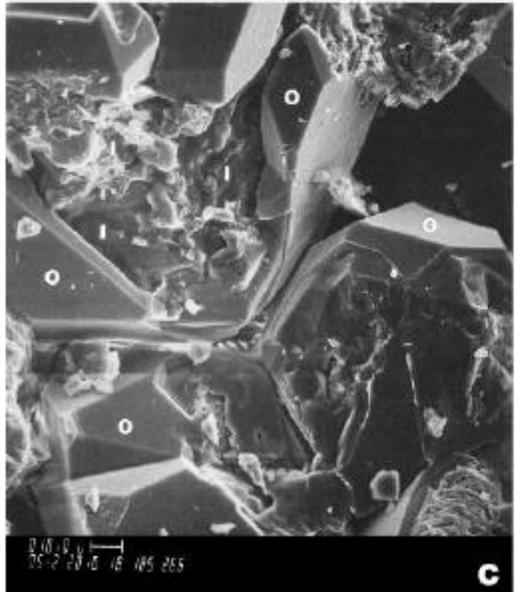
A continuación se presenta información acerca de imágenes SEM que se consideran constituyen un complemento de los aspectos relacionados con el desarrollo de este trabajo.

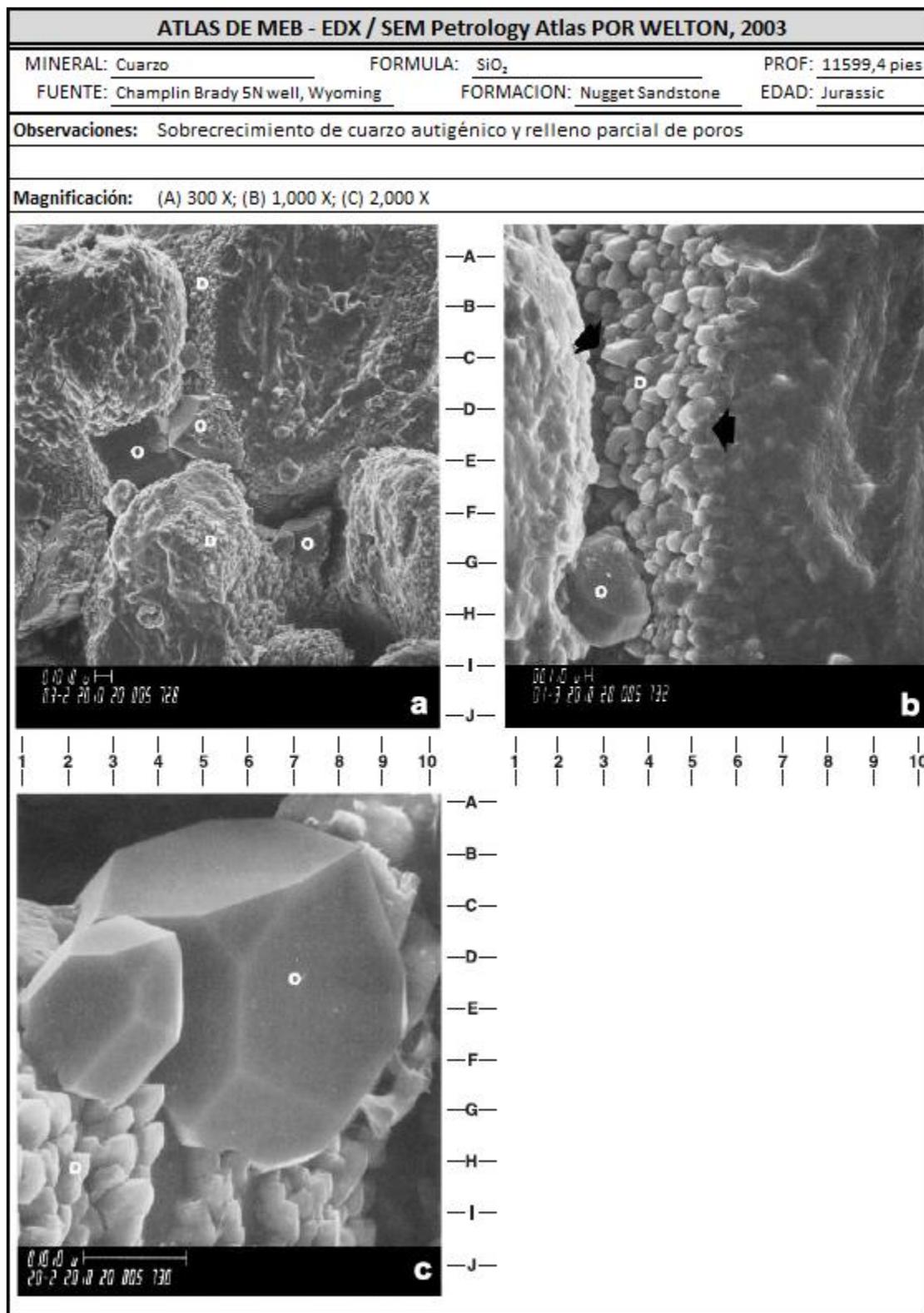
El objetivo del atlas es proporcionar a los usuarios de MEB (geólogos, ingenieros, geoquímicos y técnicos) una guía inicial para la identificación e interpretación de minerales. No obstante, de ninguna manera contiene una representación completa de todas las especies mineralógicas comunes, sino que incluye una amplia variedad de minerales que se encuentran comúnmente en las rocas reservorio clásticas.

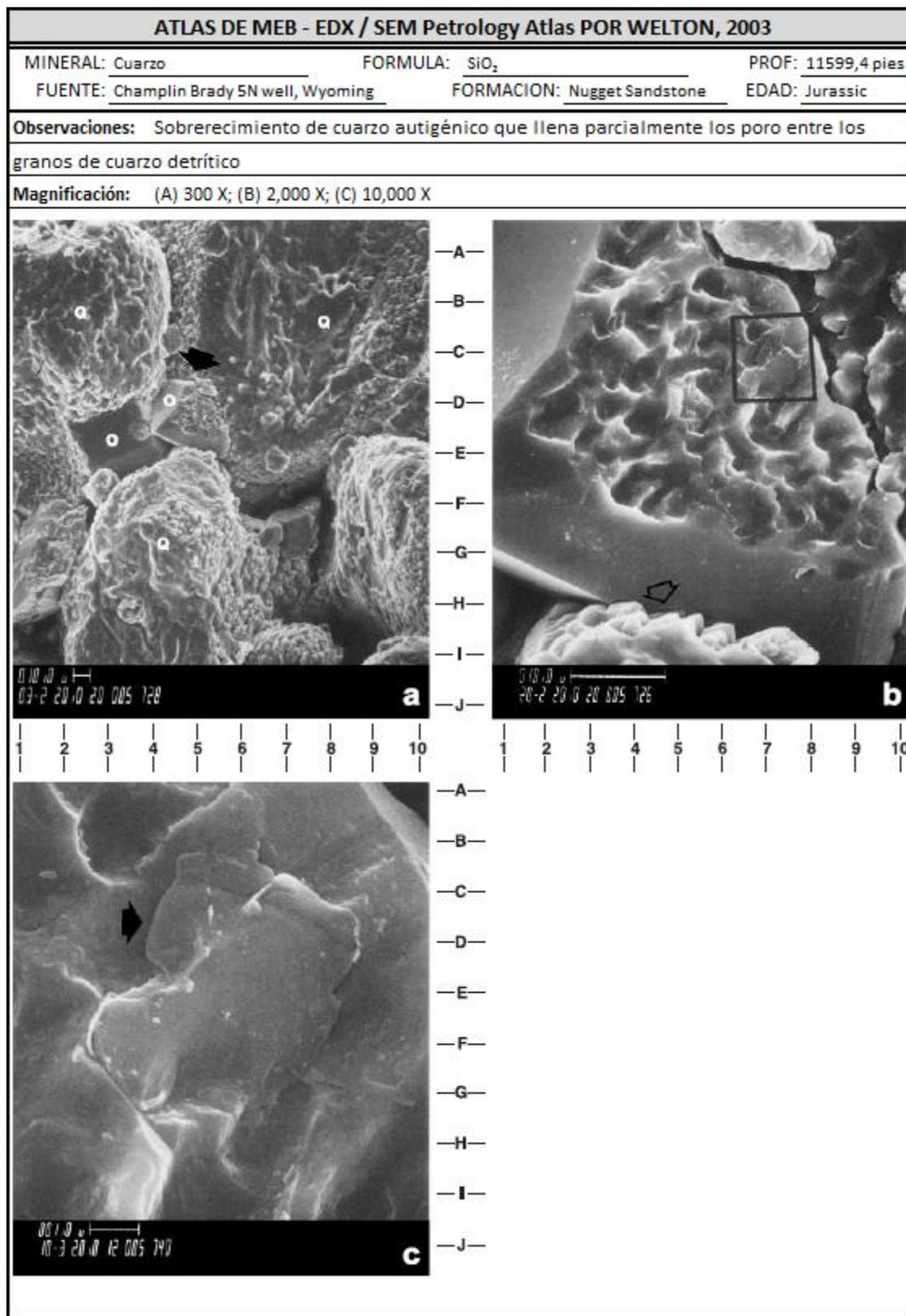
En este caso, se utilizaron las imágenes correspondientes a la mineralogía obtenida de la DRX y sus posibles asociaciones, con la finalidad de poder identificar y describir el estado de los cristales que conforman las partículas más pequeñas, imperceptibles a simple vista.

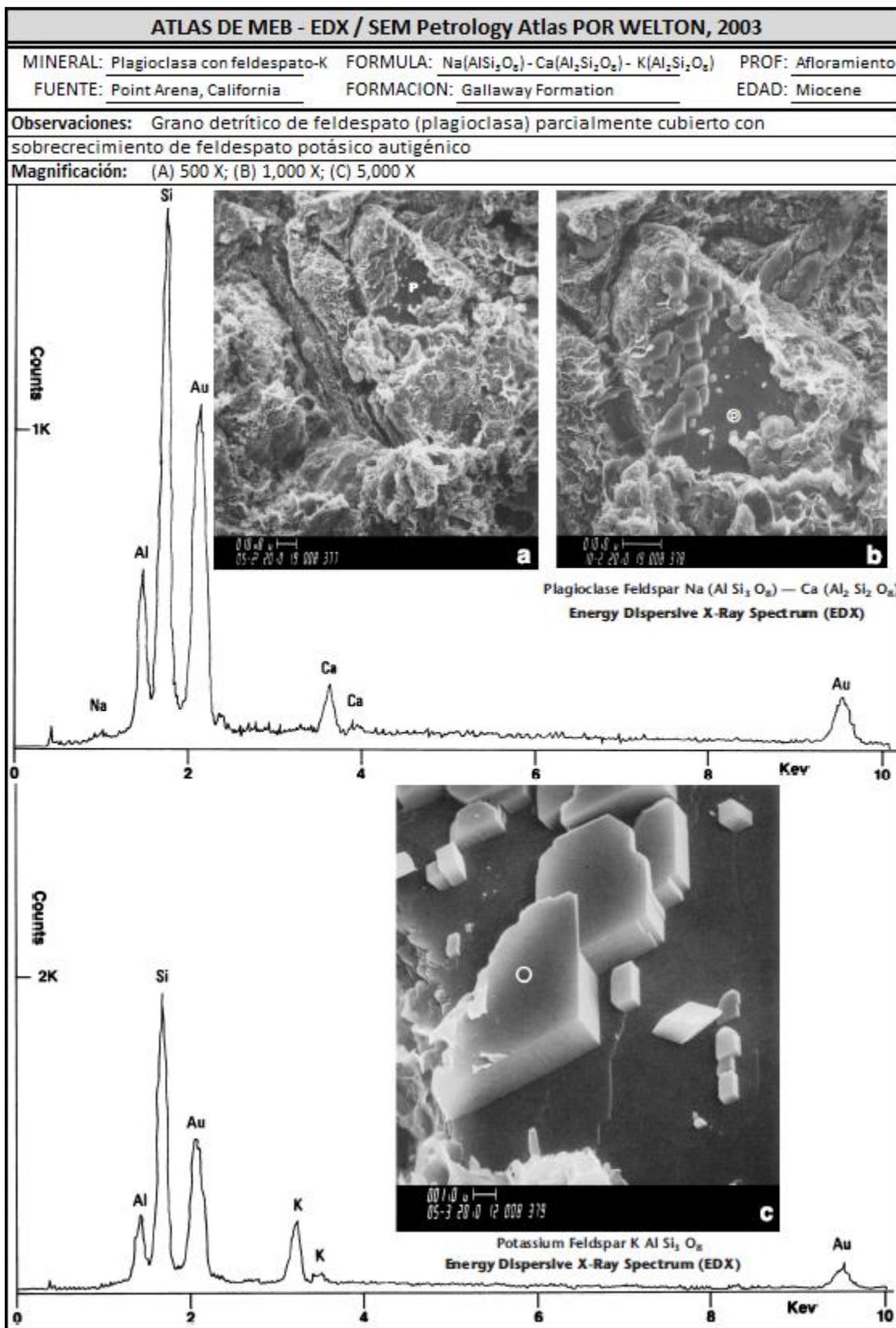
ATLAS DE MEB - EDX / SEM Petrology Atlas POR WELTON, 2003		
MINERAL: Cuarzo	FORMULA: $SiO_2$	PROF: Afloramiento
FUENTE: COFRC Reference Suite	FORMACION: St. Peter Sandstone	EDAD: Ordovician
Observaciones: Arena cuarzosa con porosidad y granos bien redondeados con crecimientos menores de cuarzo autigénico y arcilla como relleno de poros		
Magnificación: (A) 50 X; (B) 400 X; (C) 3,000 X		
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
A B C D E F G H I J	A B C D E F G H I J	A B C D E F G H I J

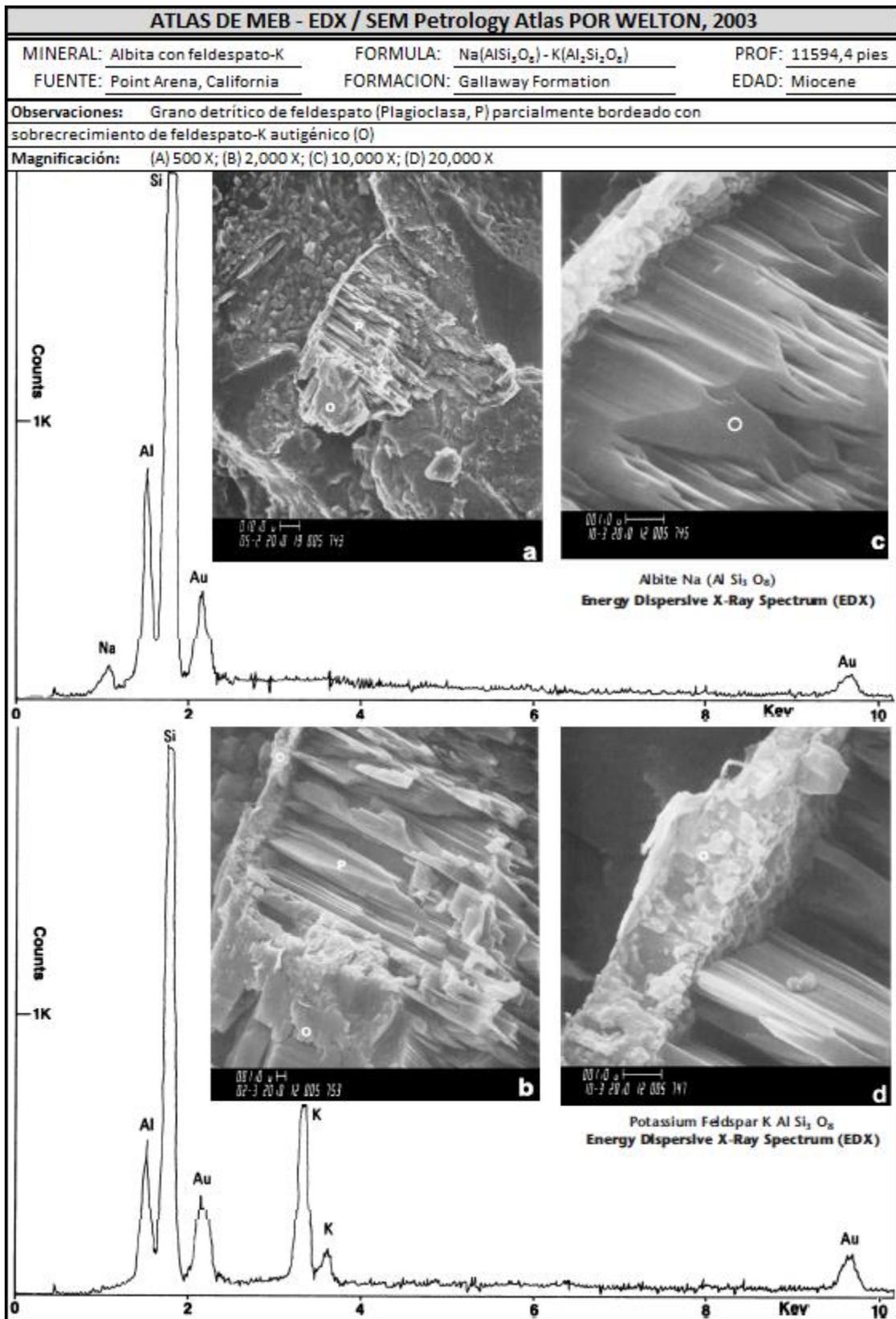
ATLAS DE MEB - EDX / SEM Petrology Atlas POR WELTON, 2003		
MINERAL: Cuarzo	FORMULA: SiO <sub>2</sub>	PROF: 8951 pies
FUENTE: Amoco Red Canyon #1 well, Wyoming	FORMACION: Nugget Sandstone	EDAD: Jurassic
Observaciones: Grano de cuarzo detritico con áreas de contacto ligeramente cóncavas formadas por procesos de presión-solución durante la compactación		
Magnificación: (A) 300 X; (B) 2,000 X; (C) 30,000 X		

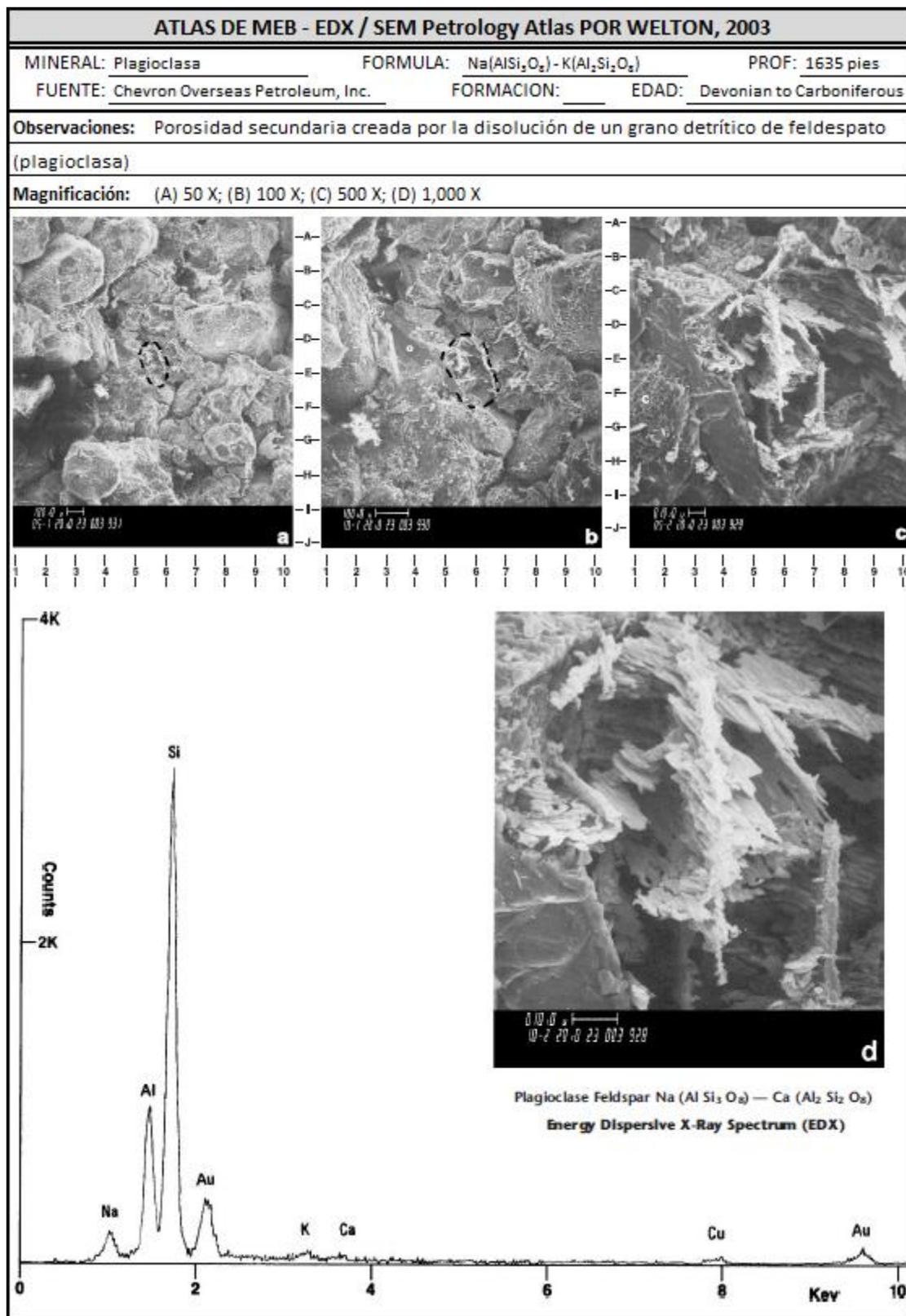
ATLAS DE MEB - EDX / SEM Petrology Atlas POR WELTON, 2003		
MINERAL: <u>Cuarzo</u>	FORMULA: <u>SiO<sub>2</sub></u>	PROF: <u>Afloramiento</u>
FUENTE: <u>COFRC Reference Suite</u>	FORMACION: <u>Navajo Sandstone</u>	EDAD: <u>Jurassic-Triassic</u>
<b>Observaciones:</b> Sobrecrecimiento de cuarzo autigénico que rodea parcialmente los granos de cuarzo detrítico		
<b>Magnificación:</b> (A) Sección delgada, nícoles cruzados, 25 X; (B) 100 X; (C) 500 X		
		
		

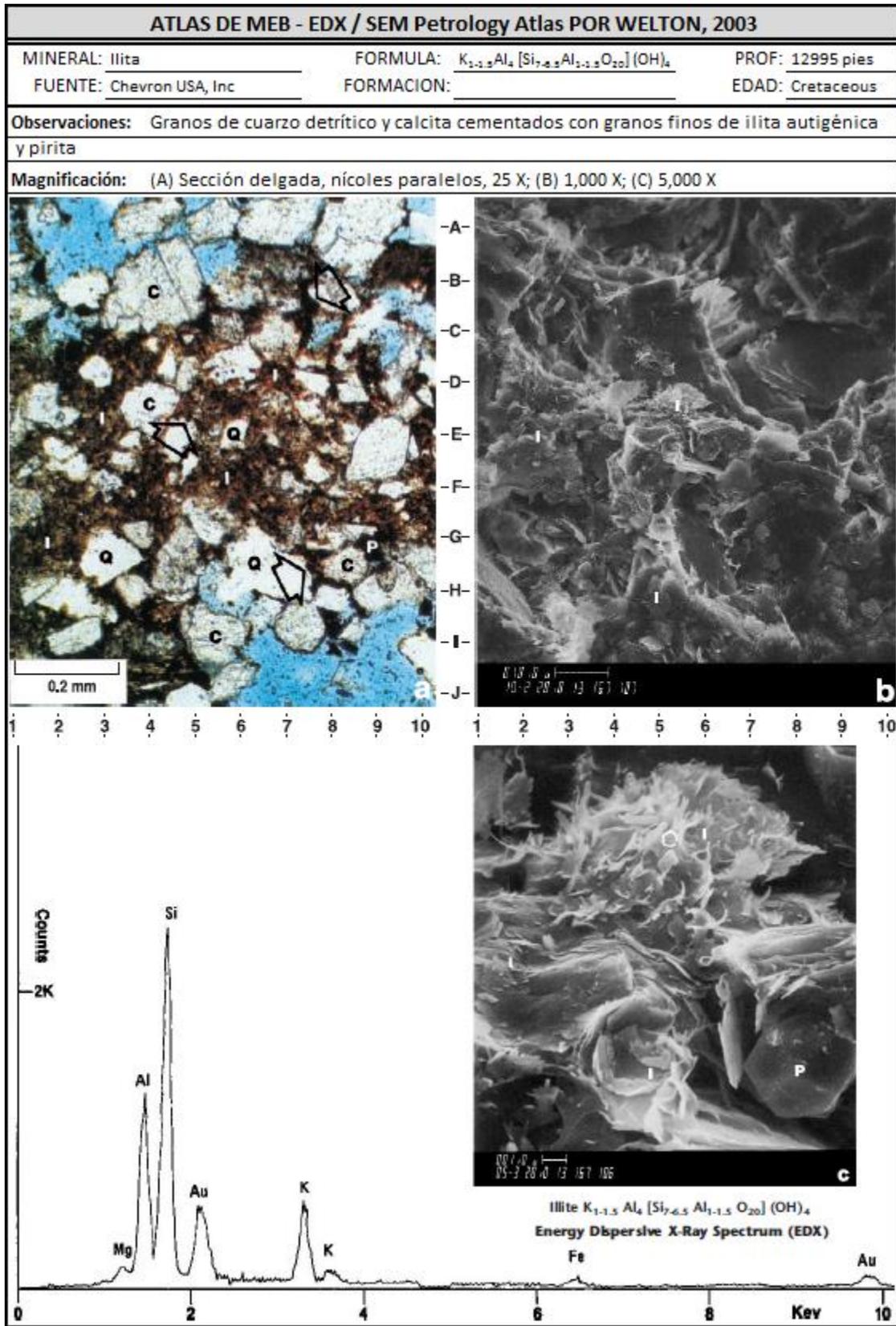


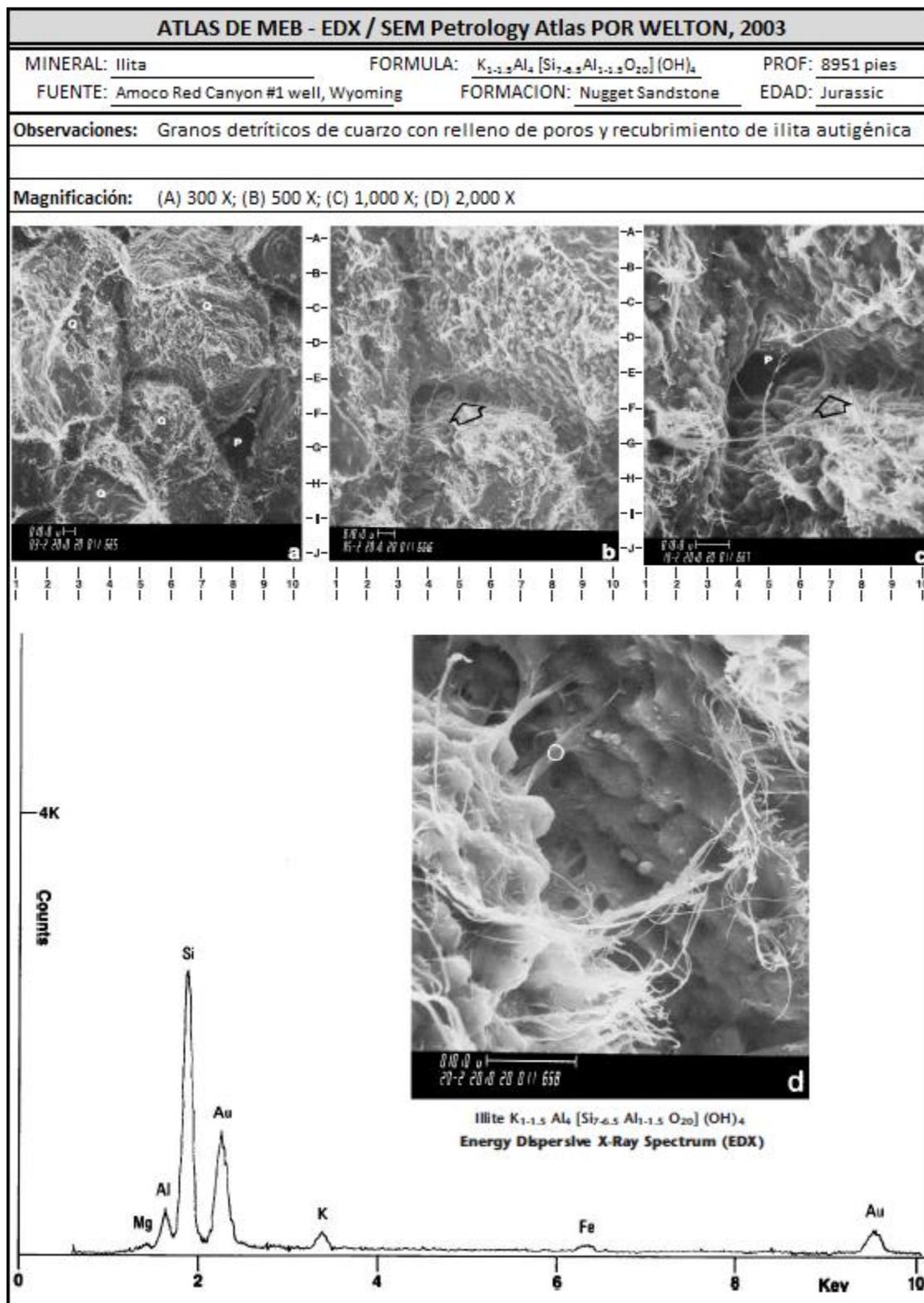


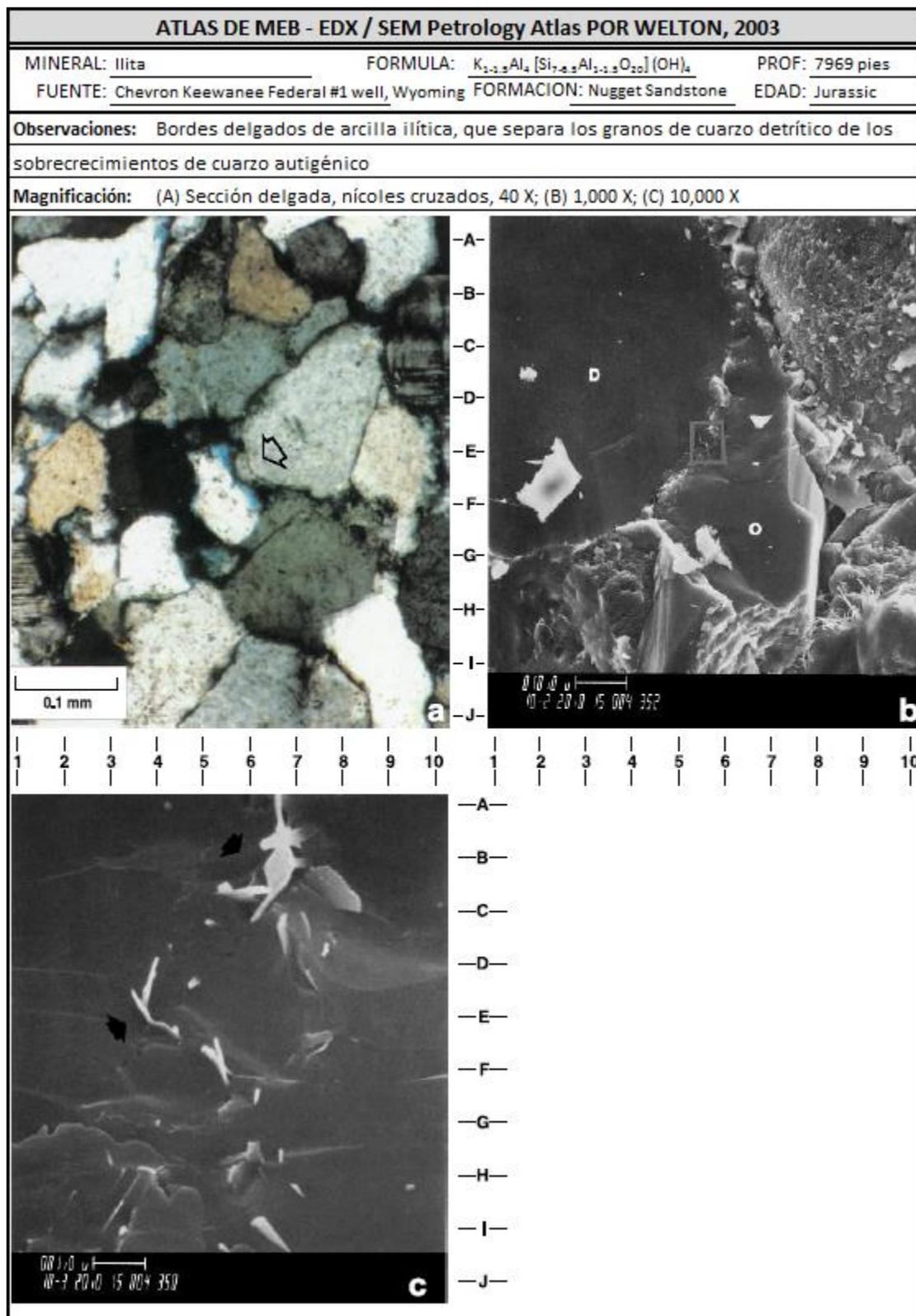


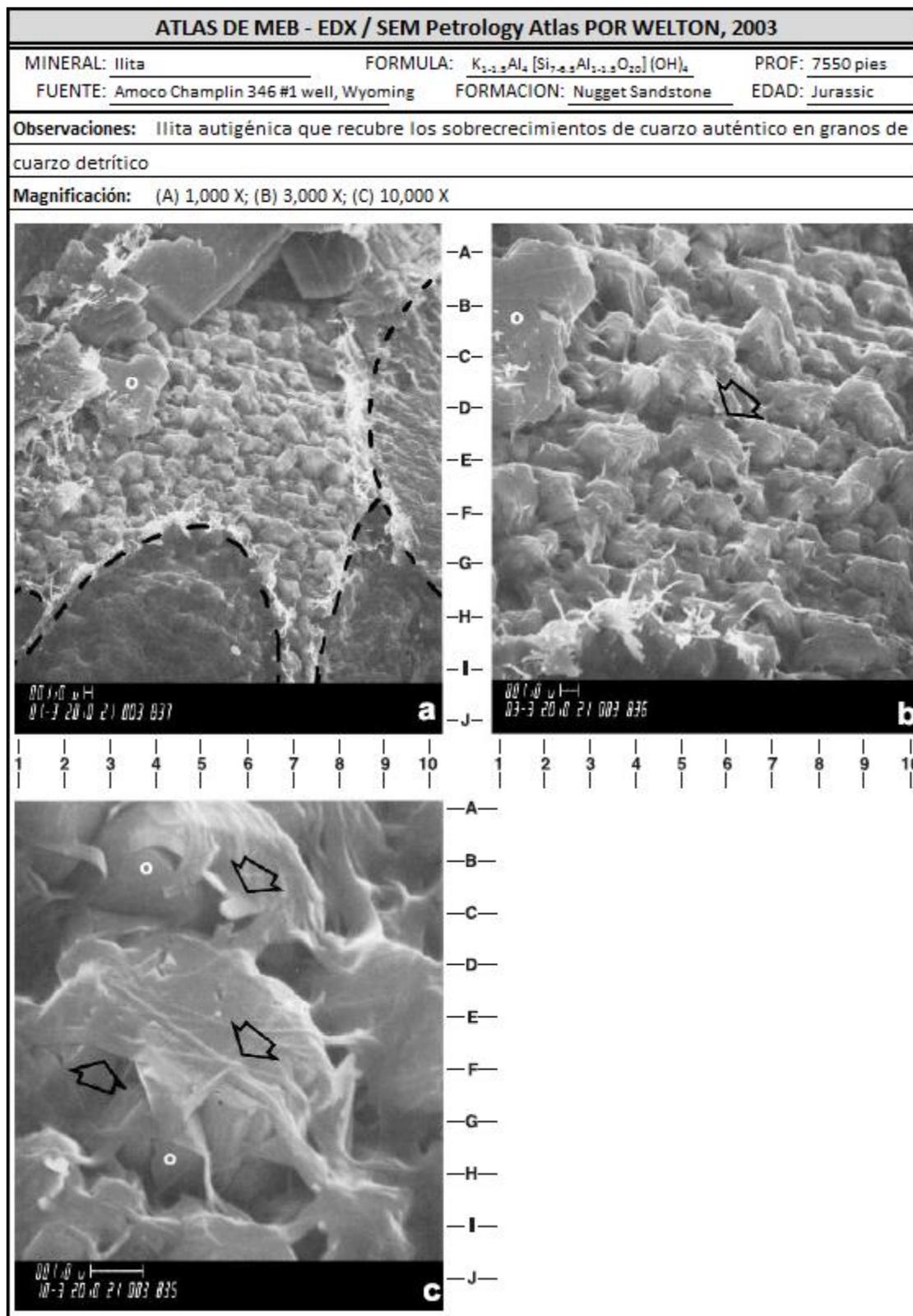


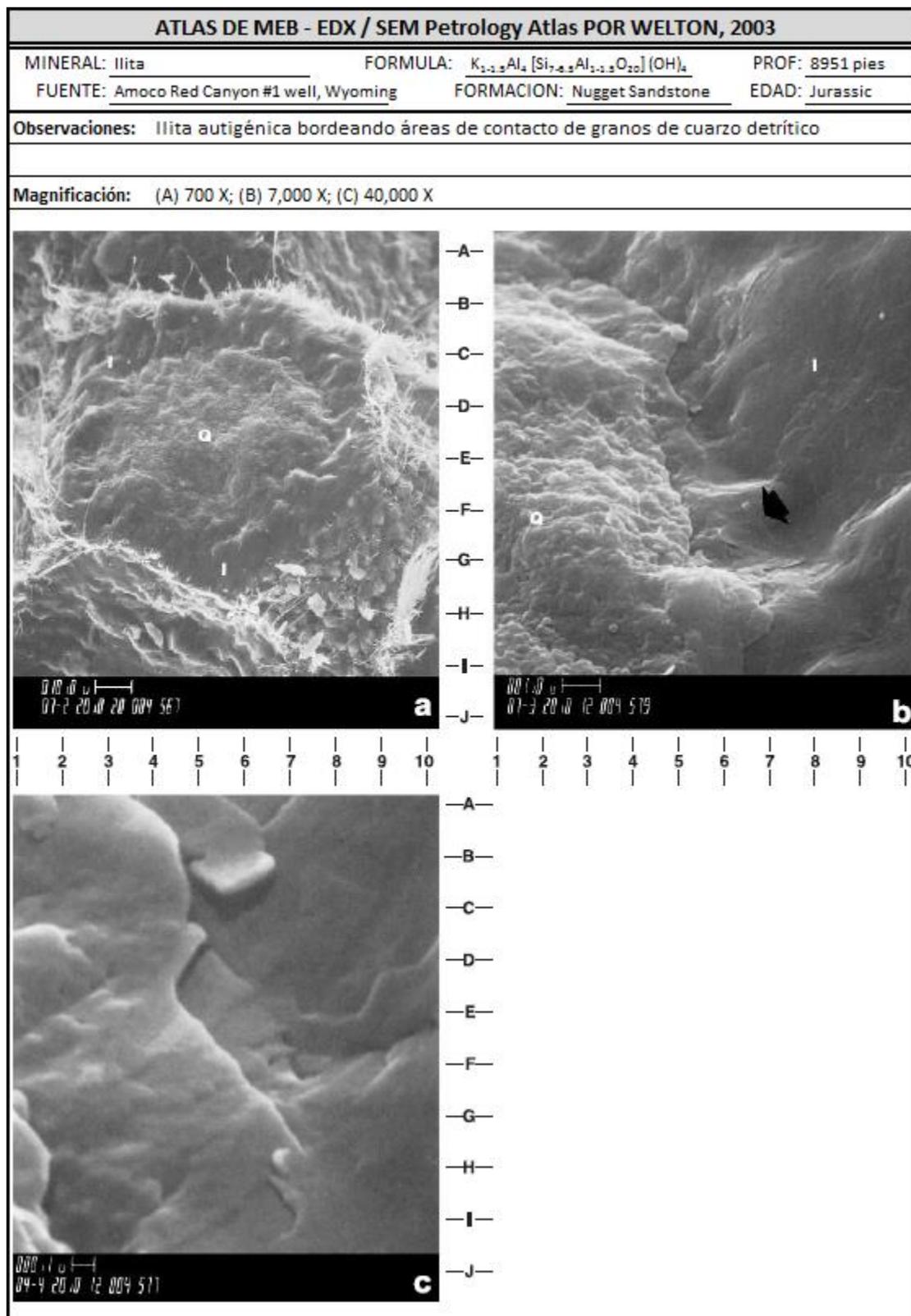


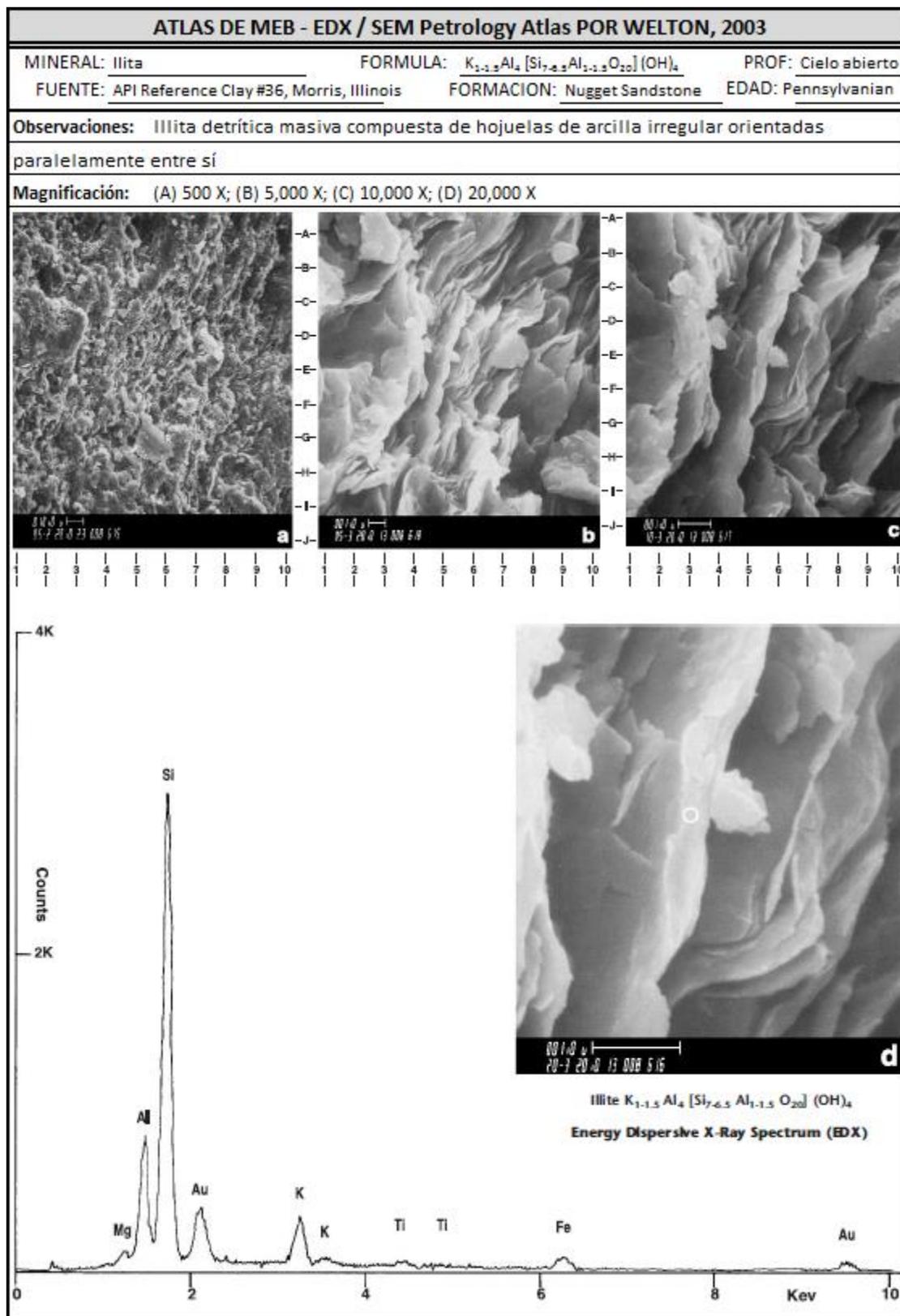


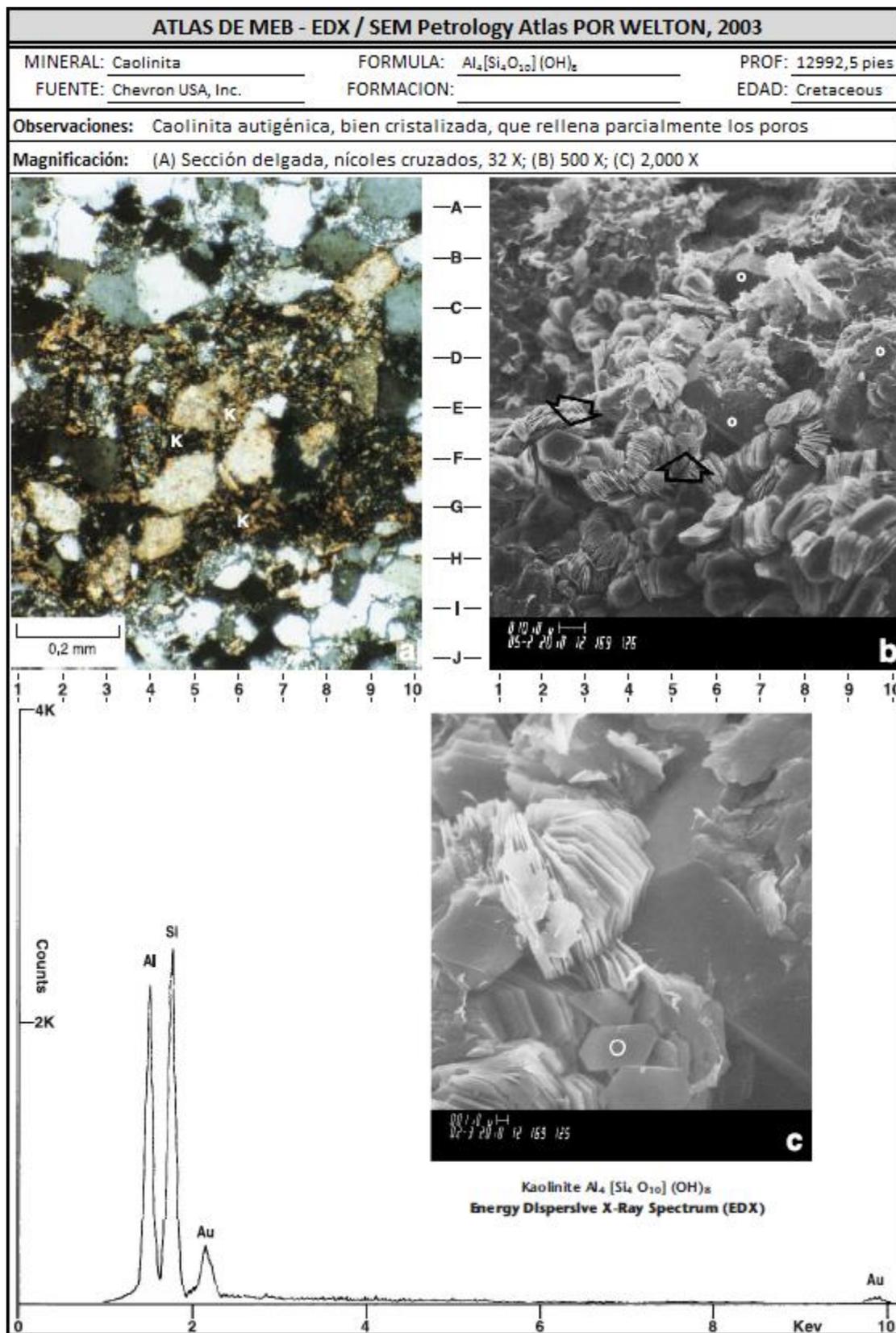


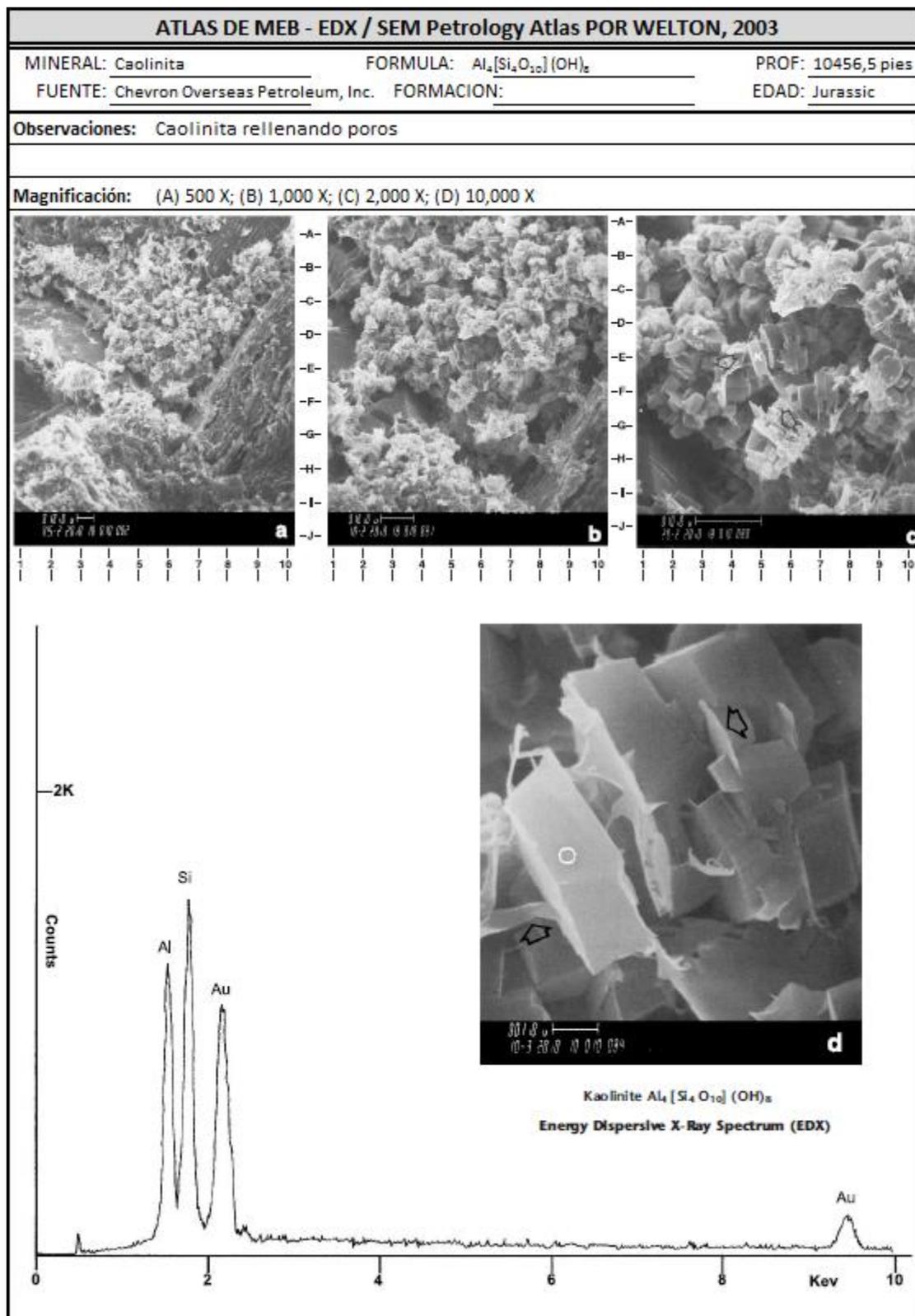


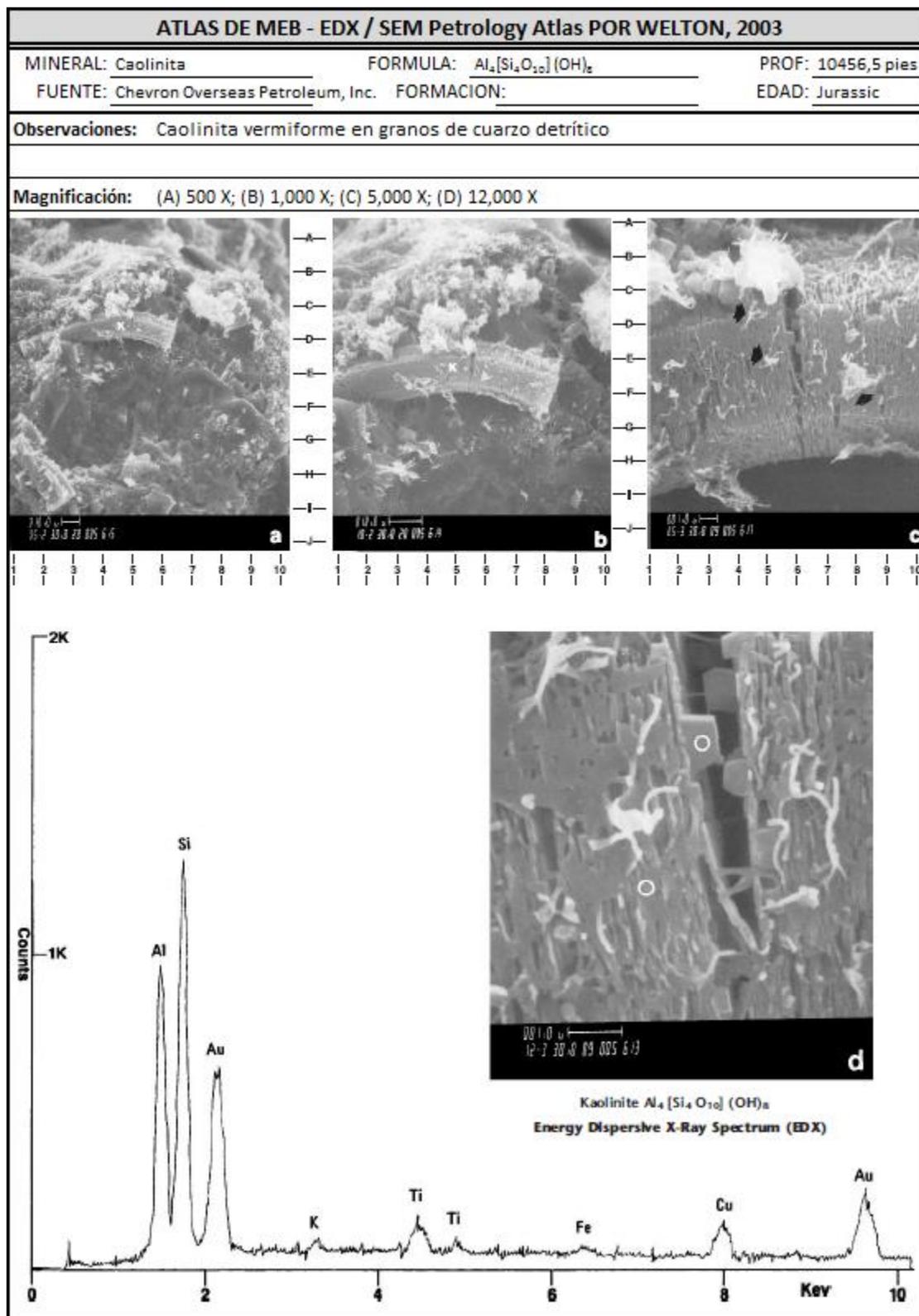


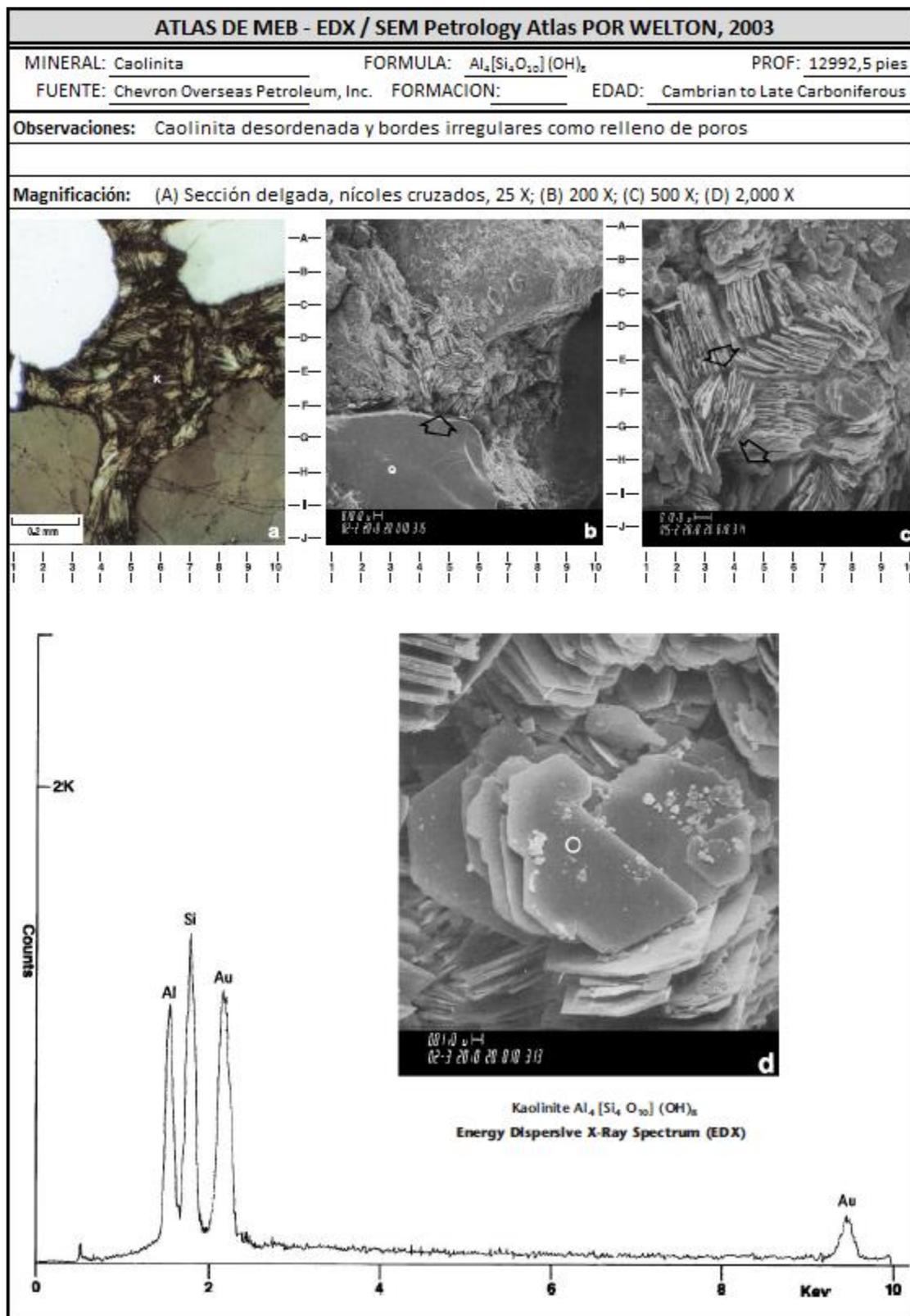


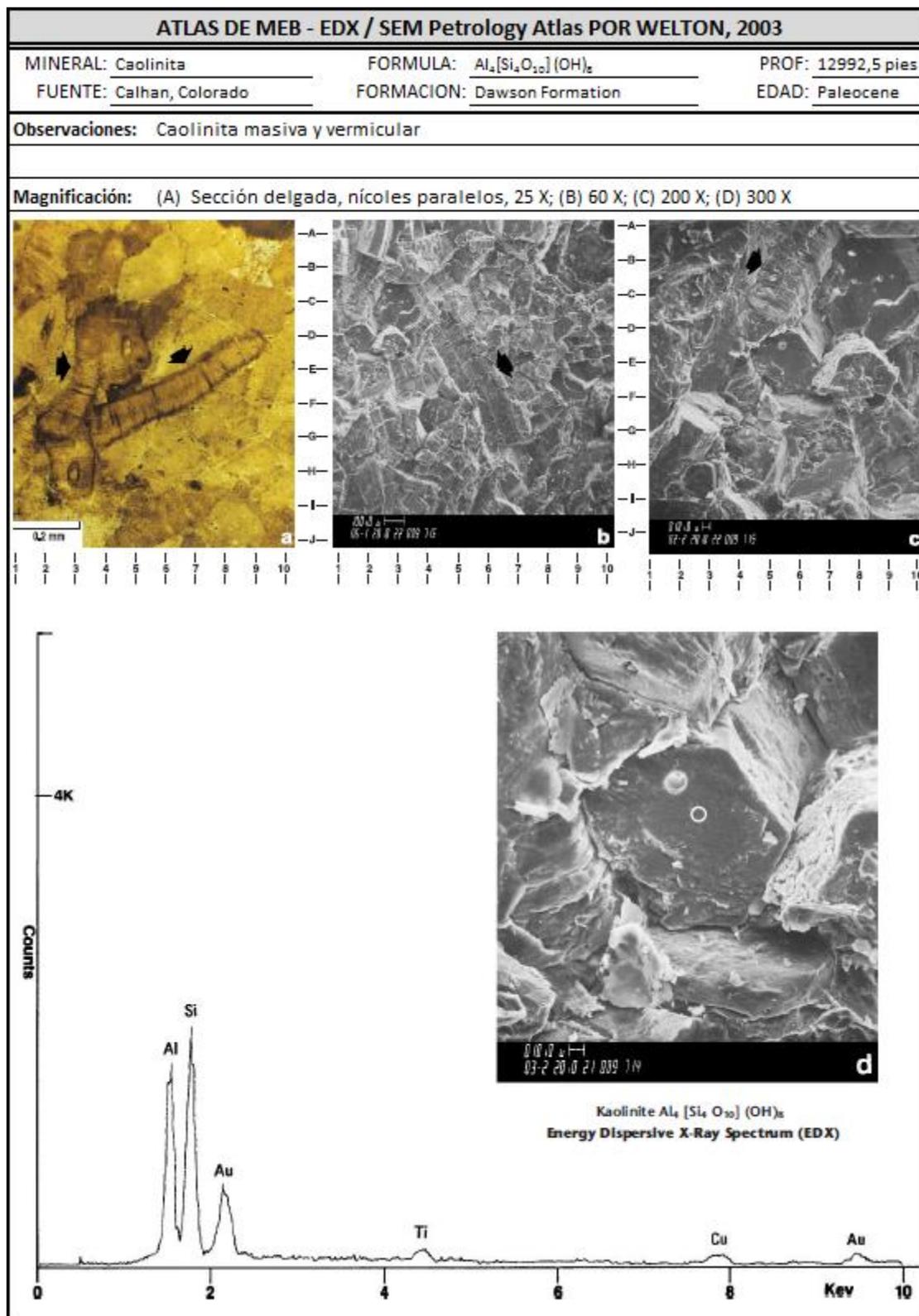


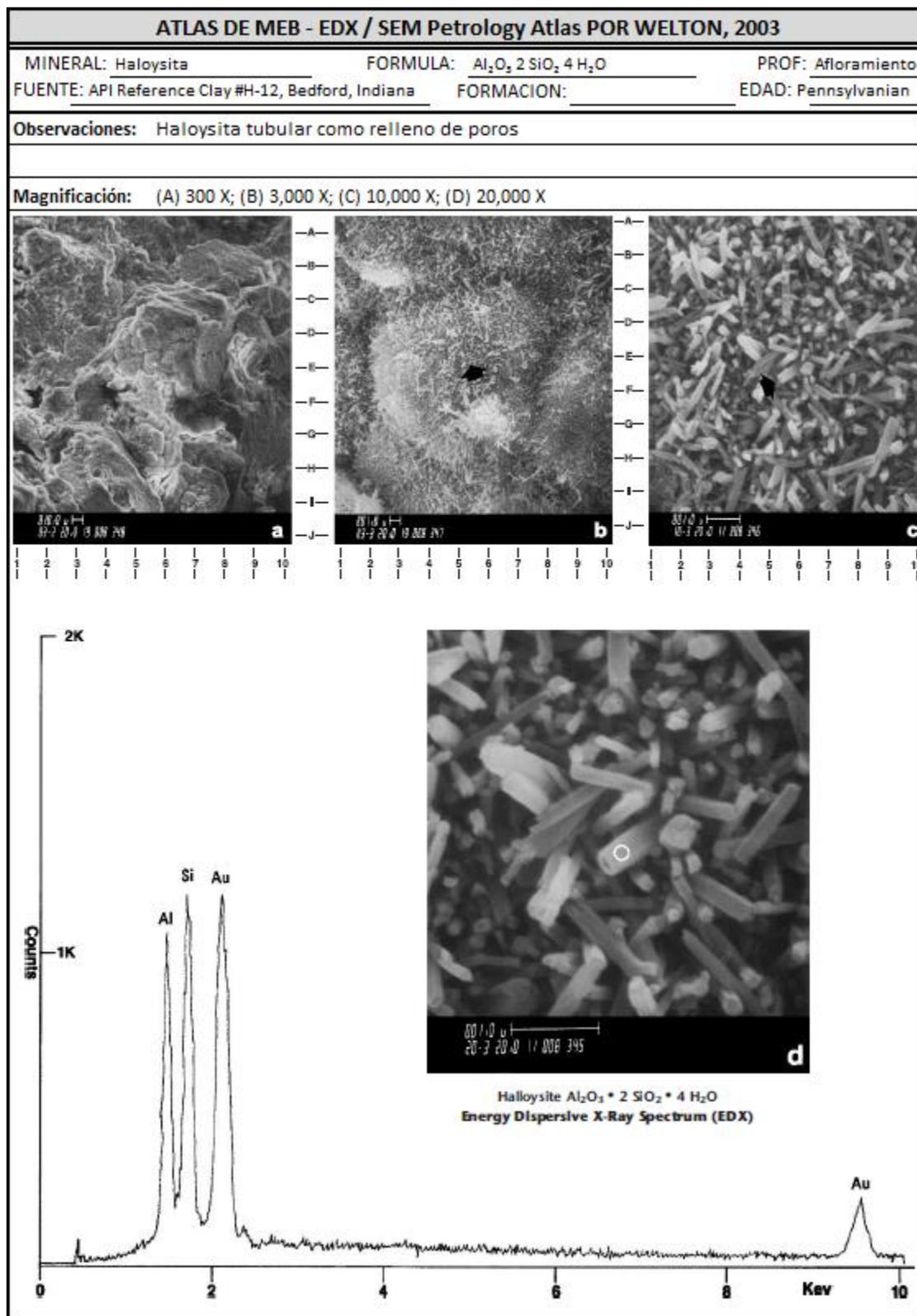


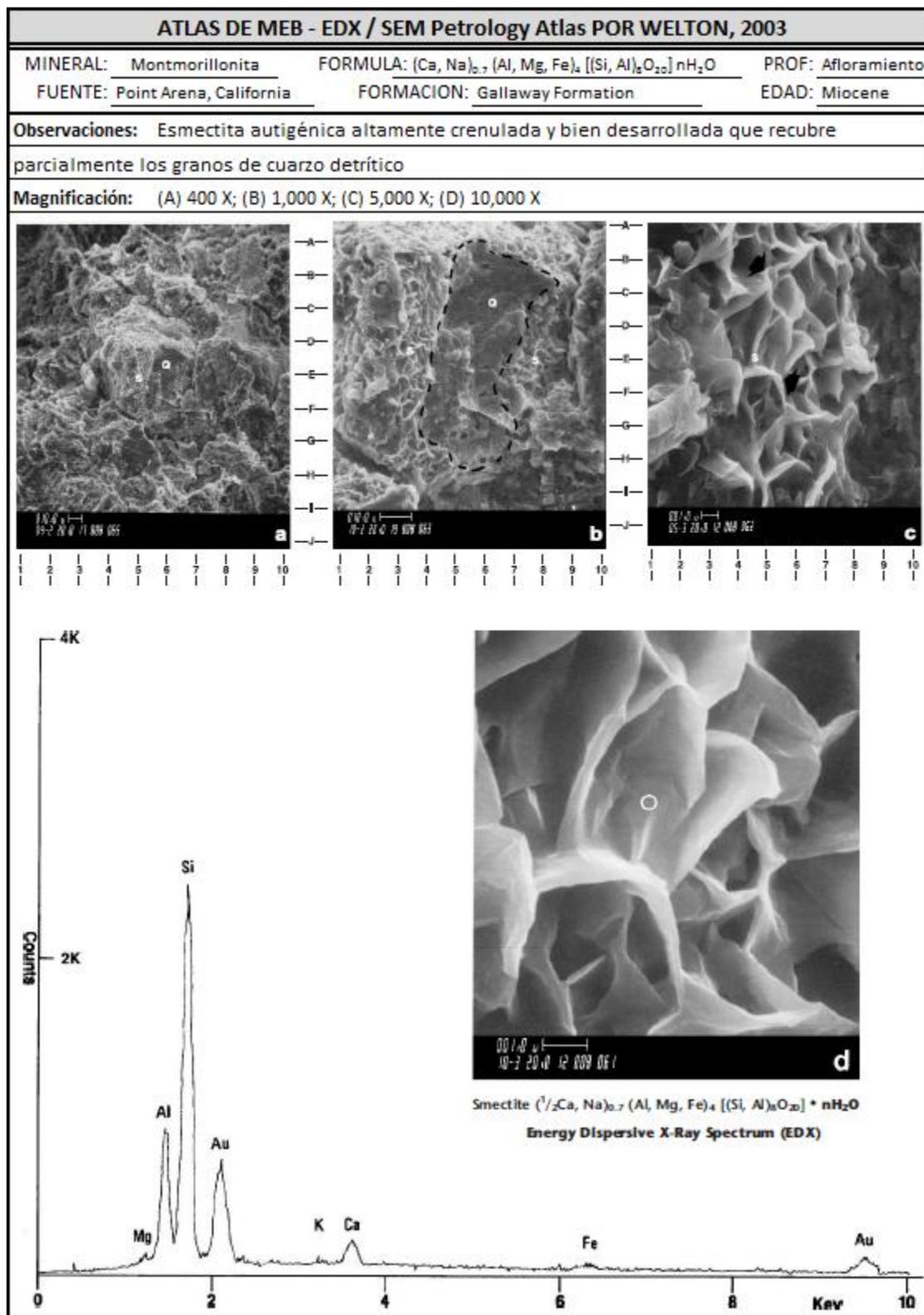


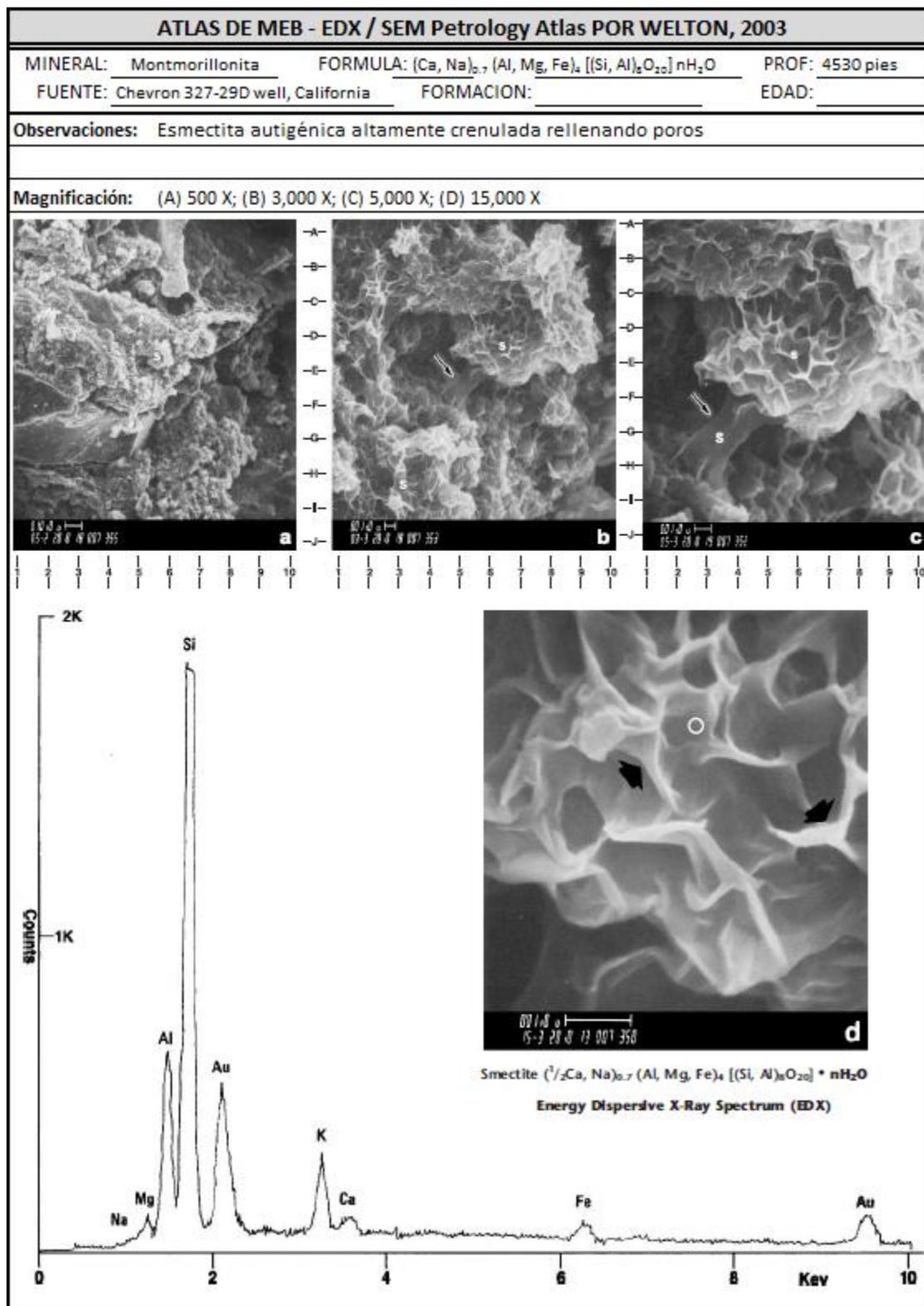


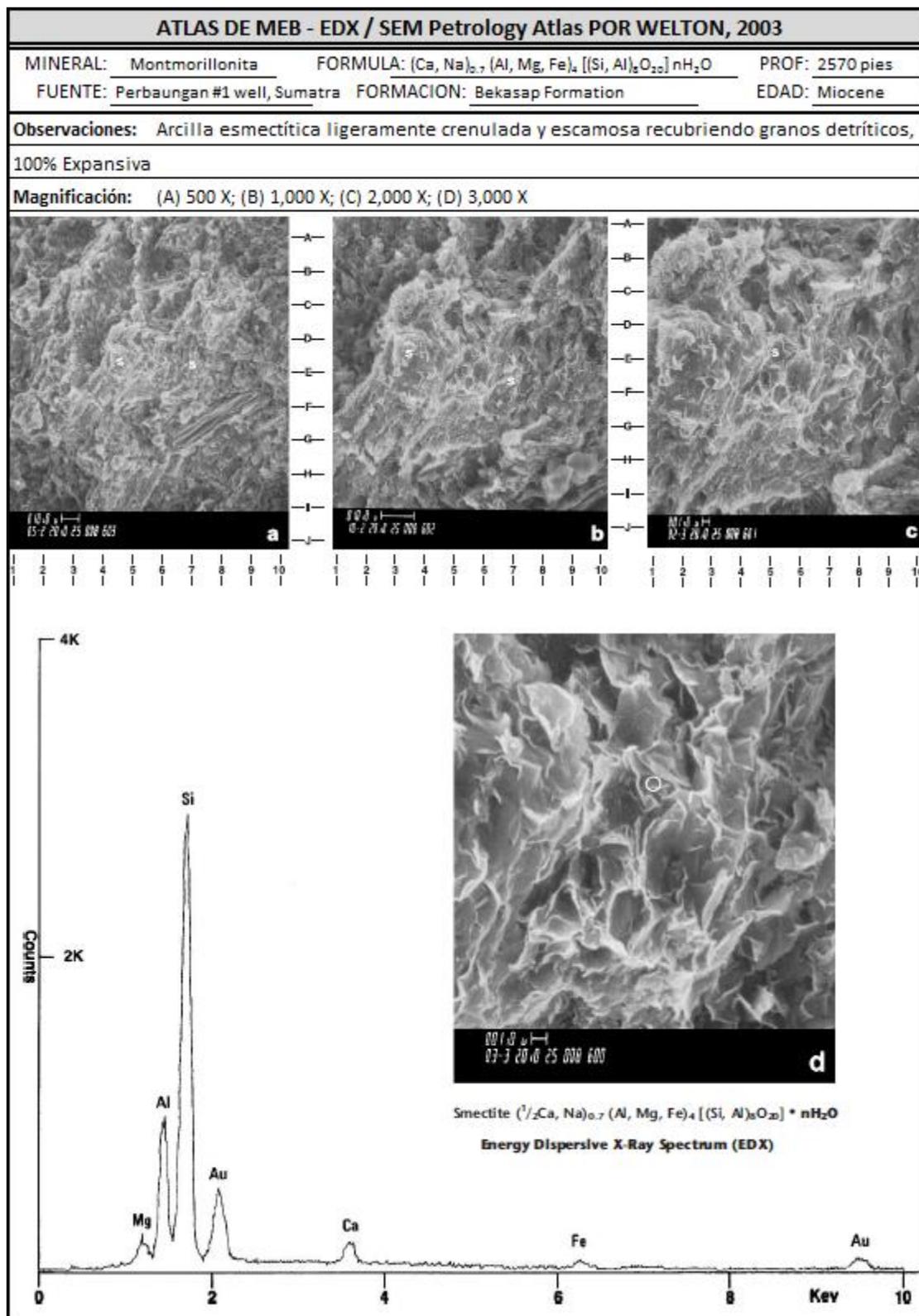


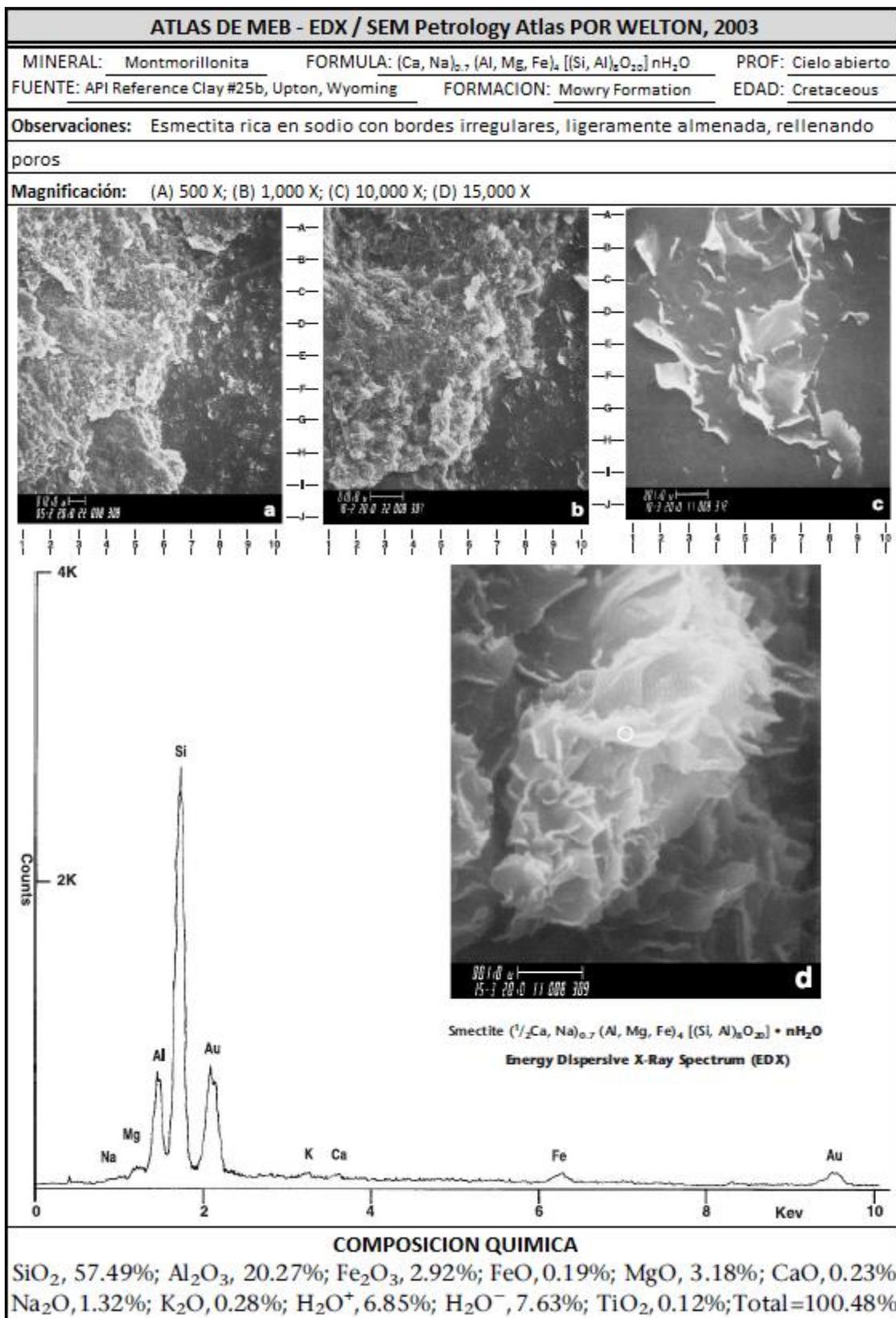


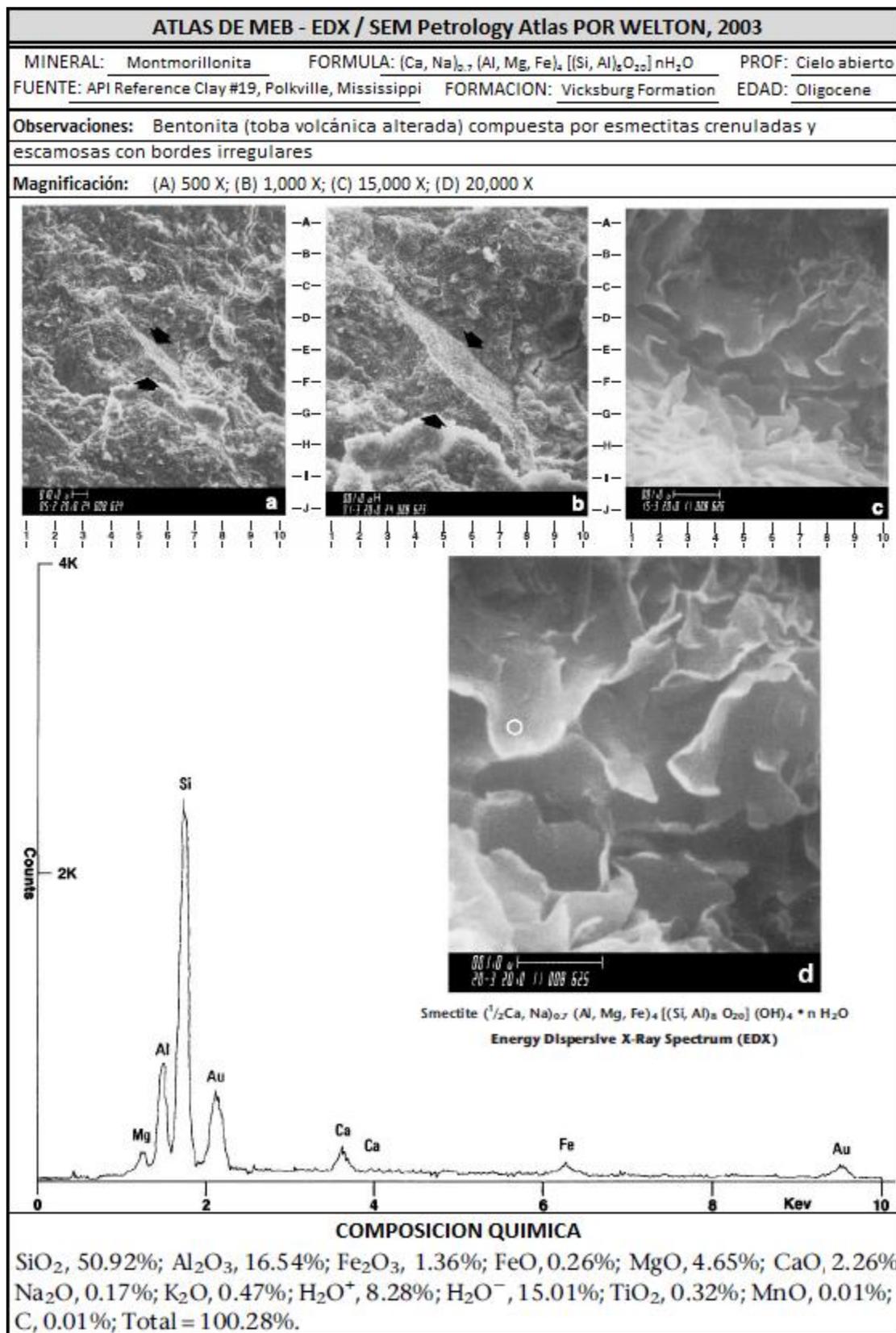


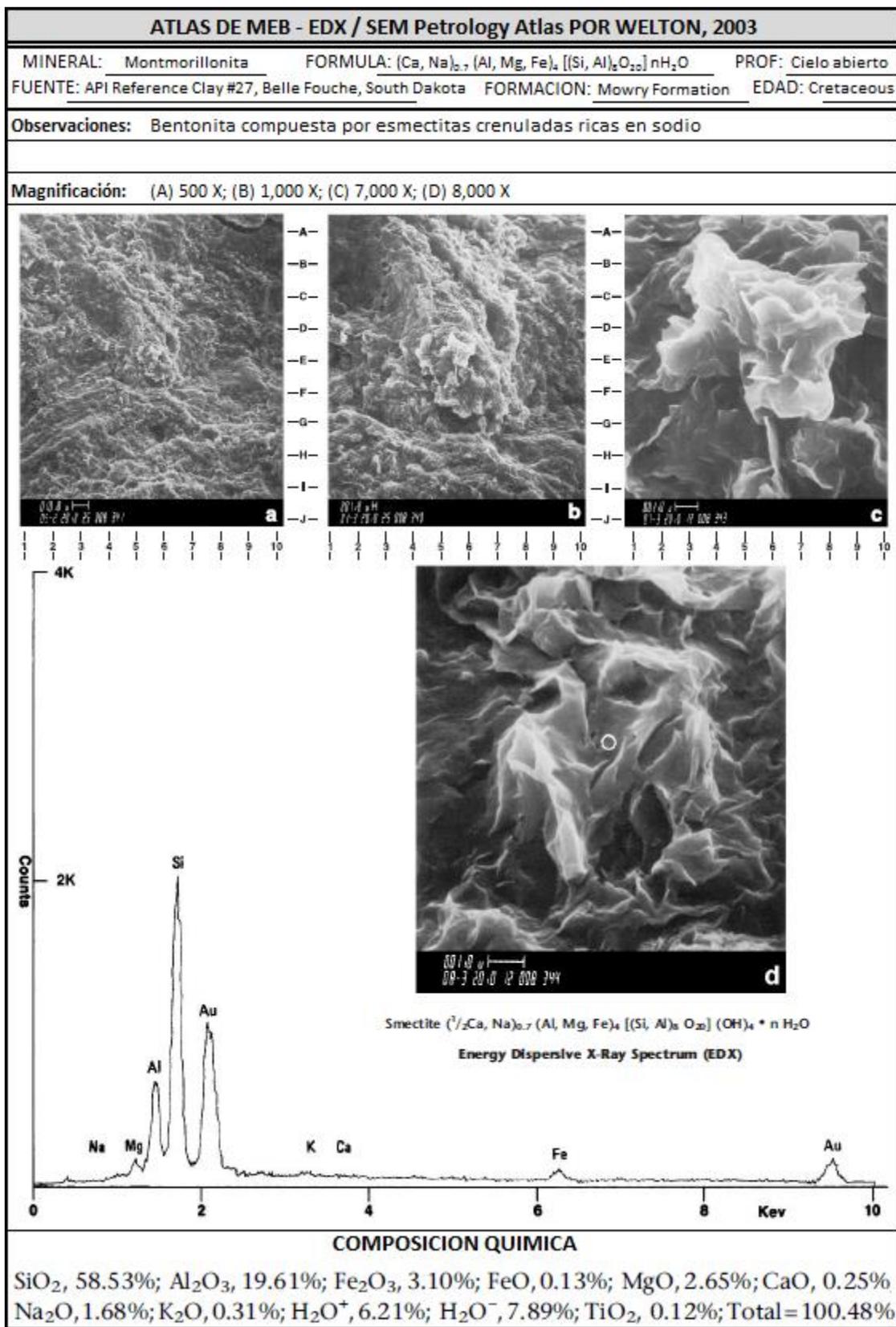


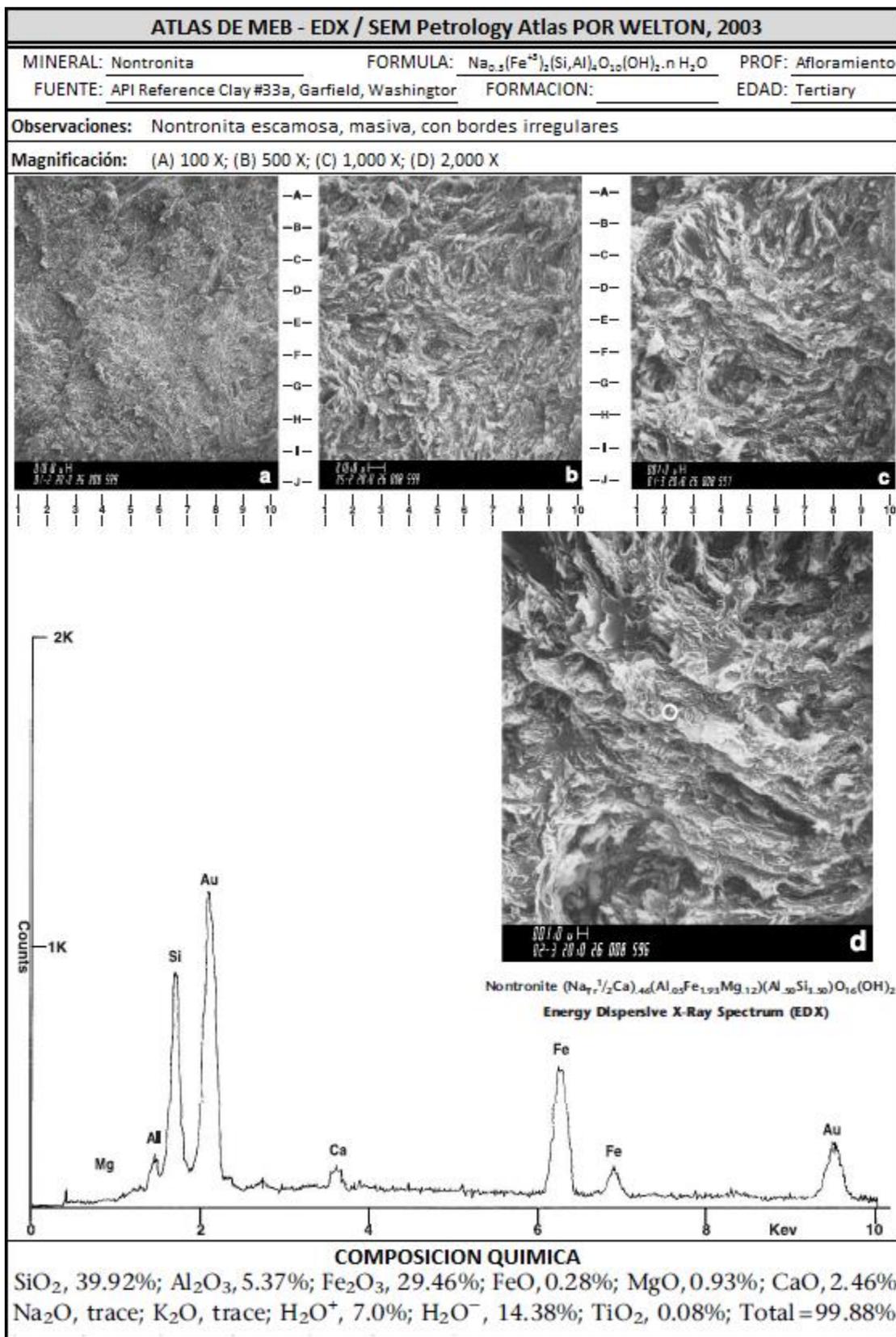


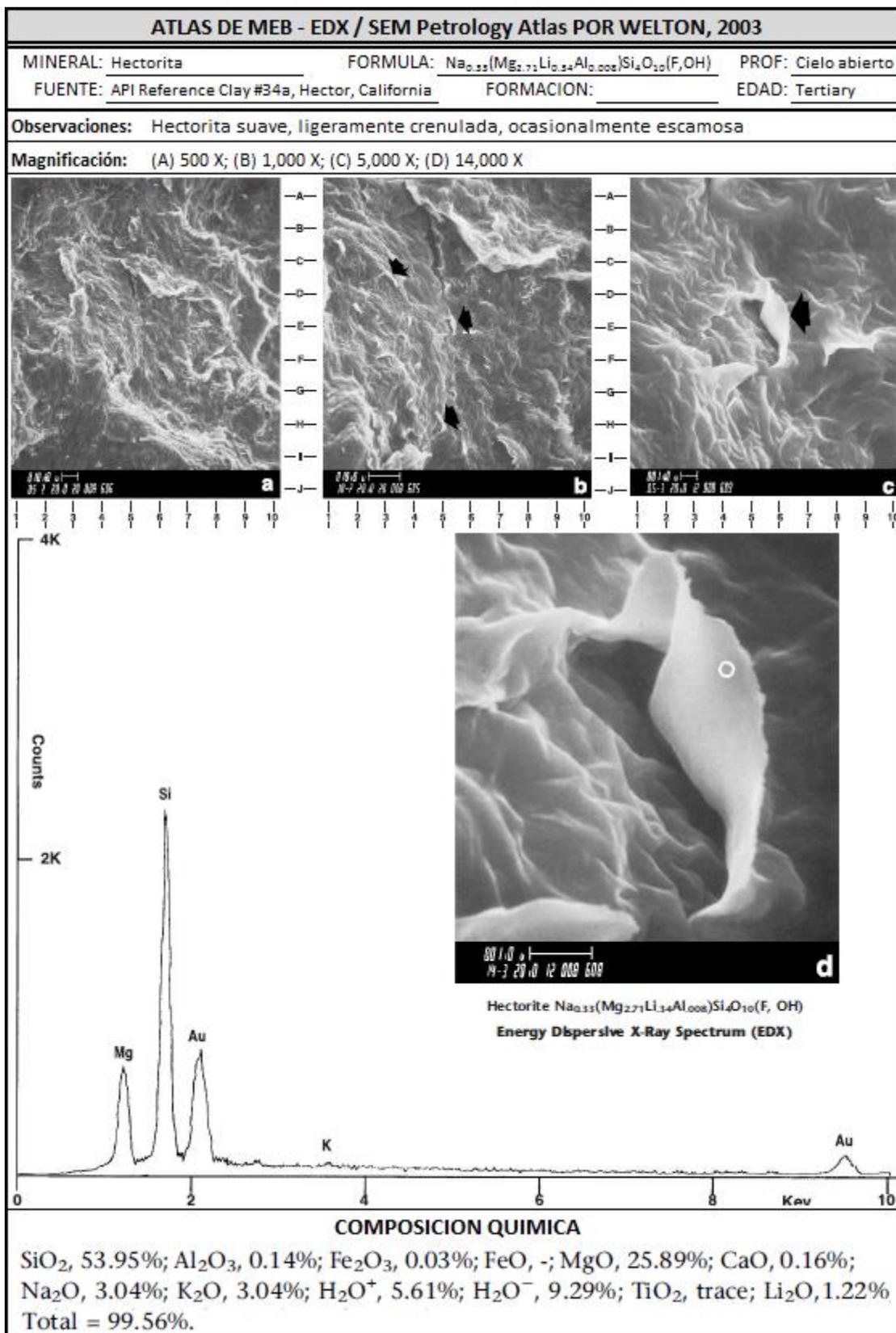


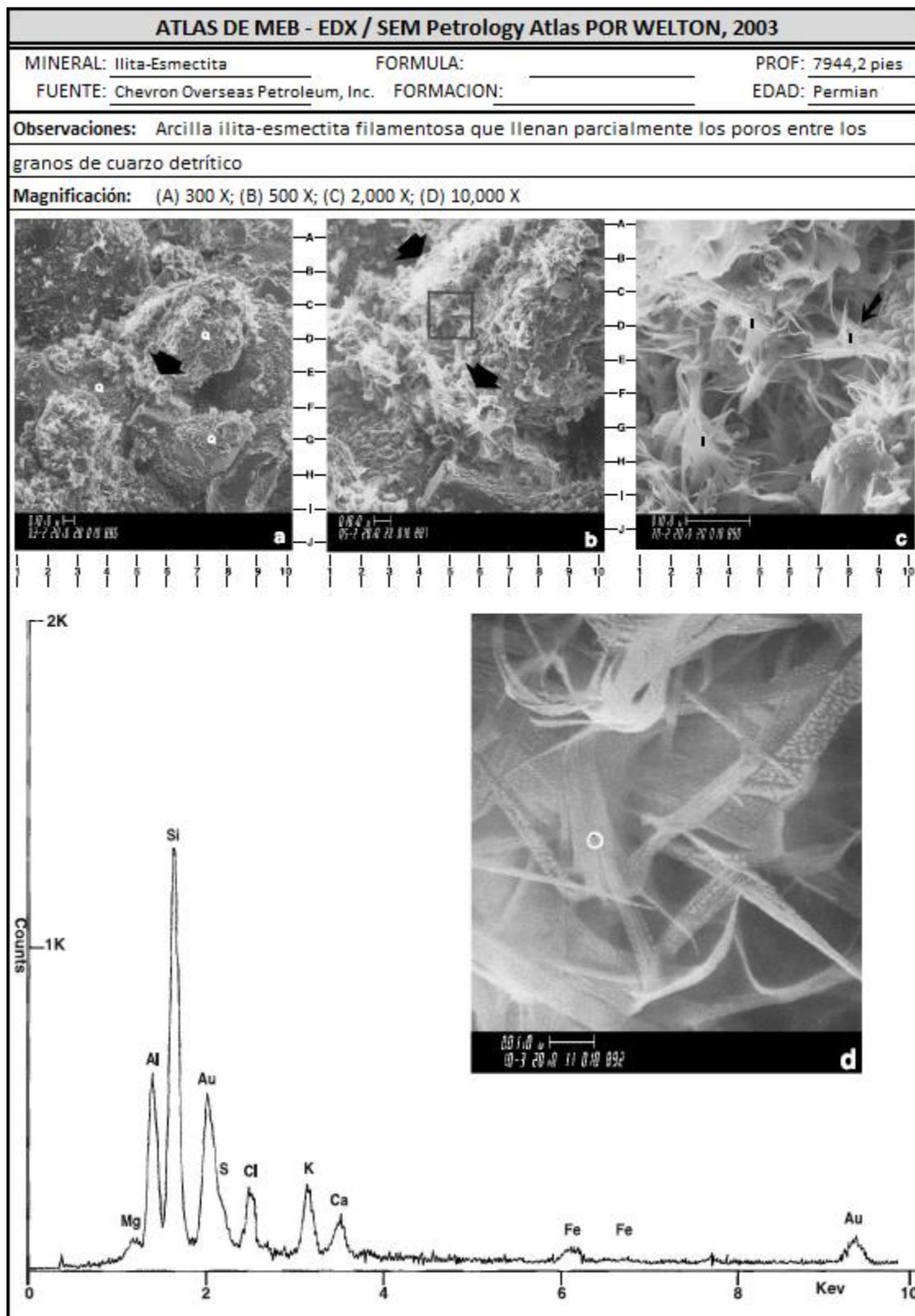


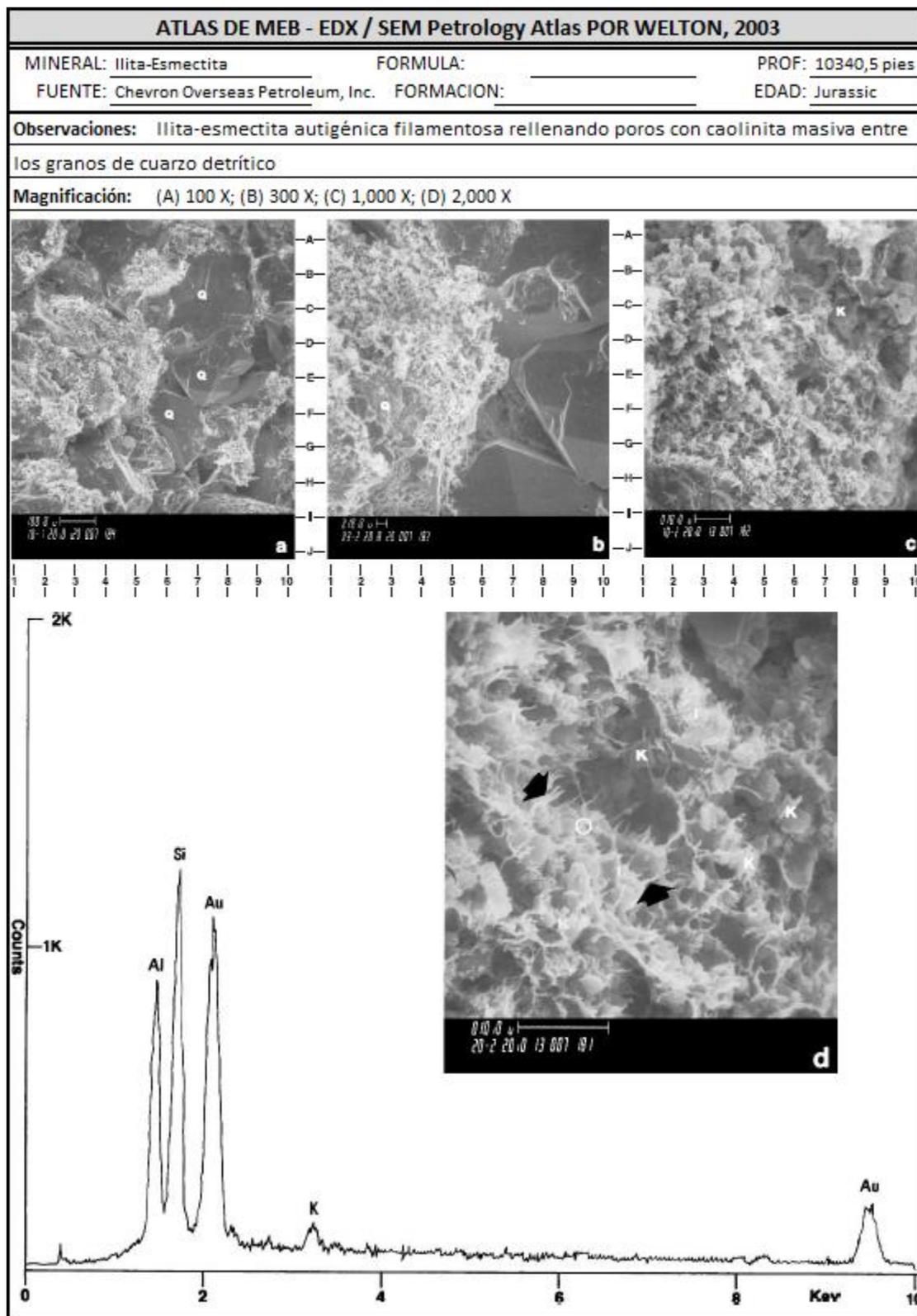


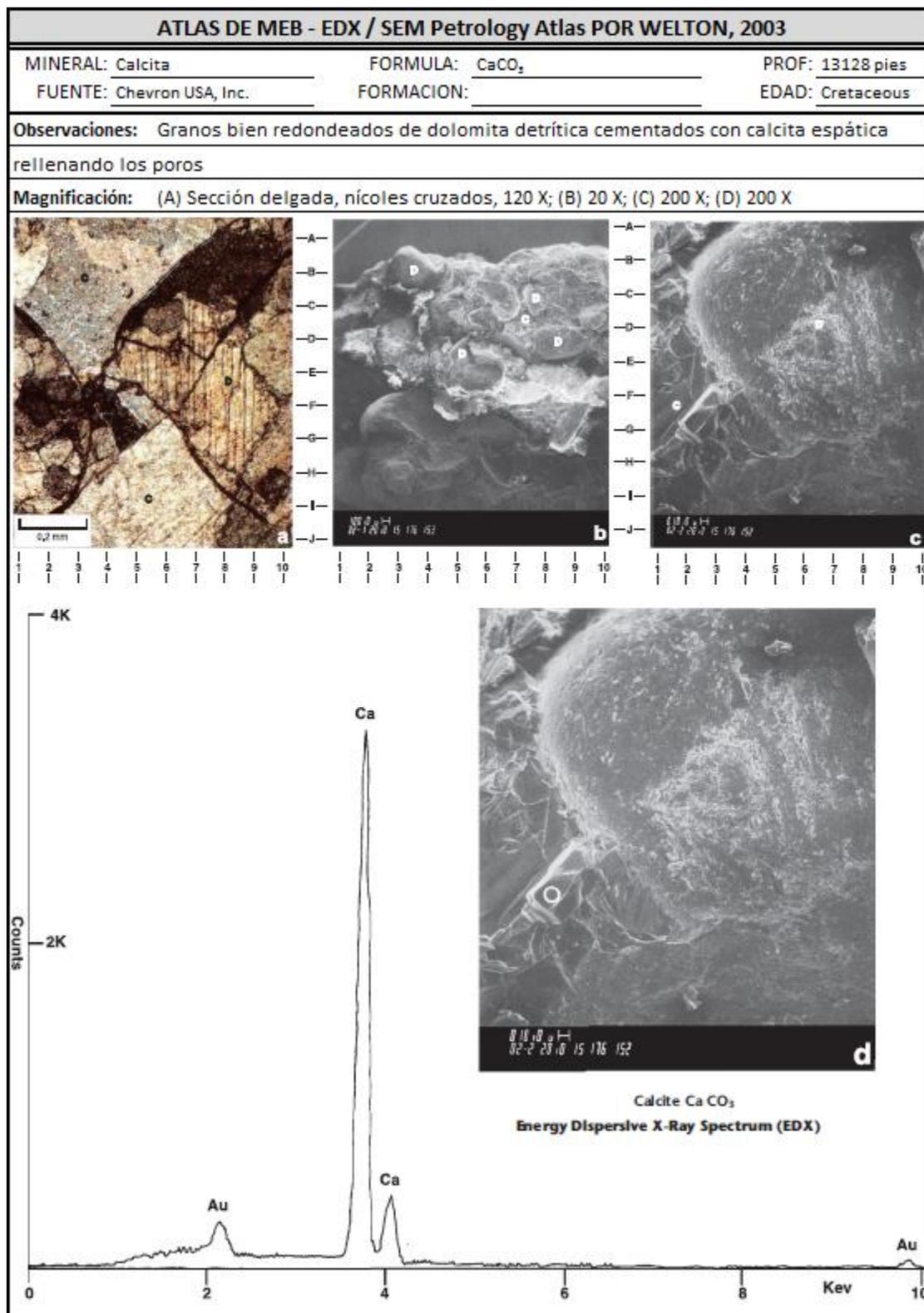


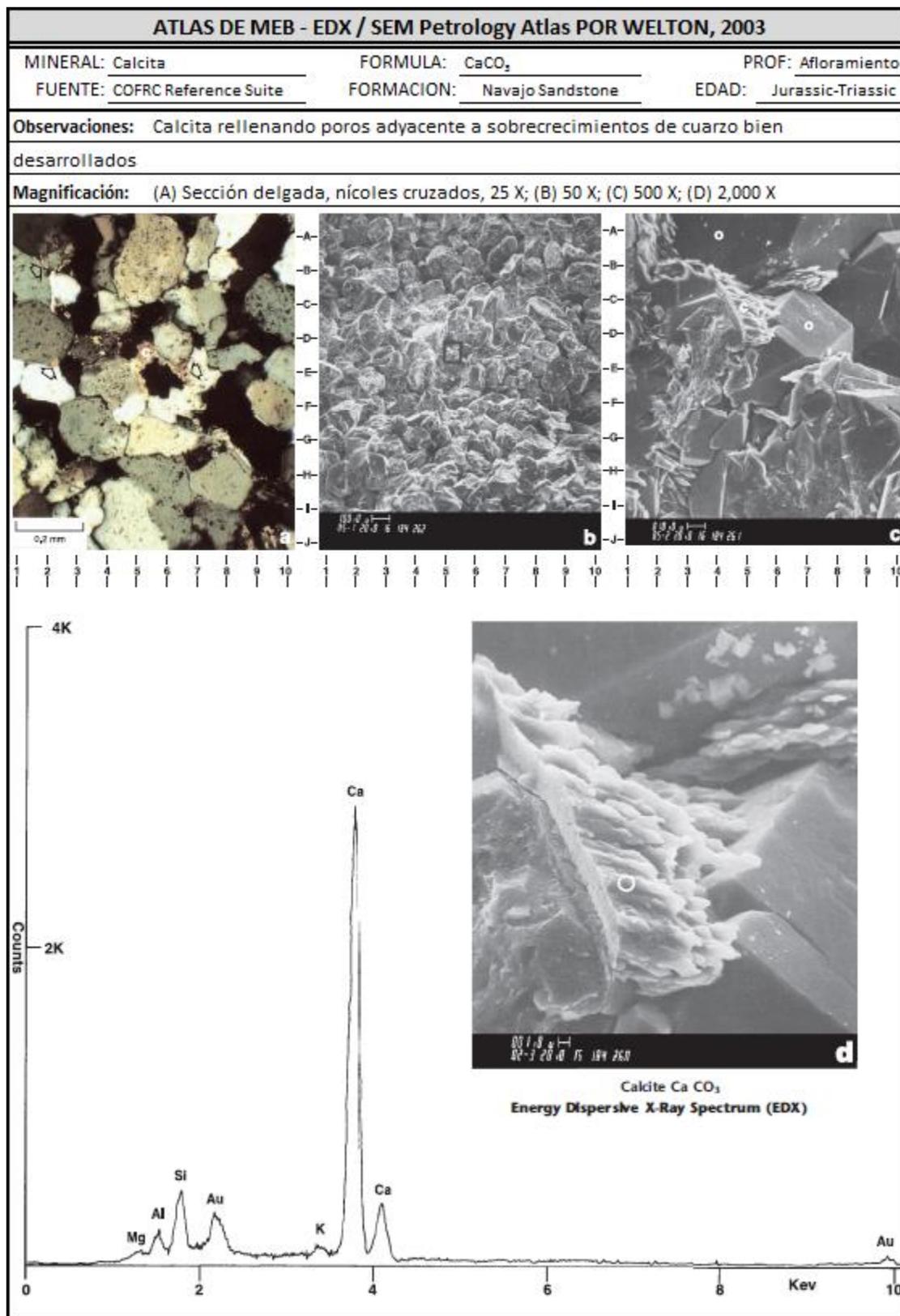


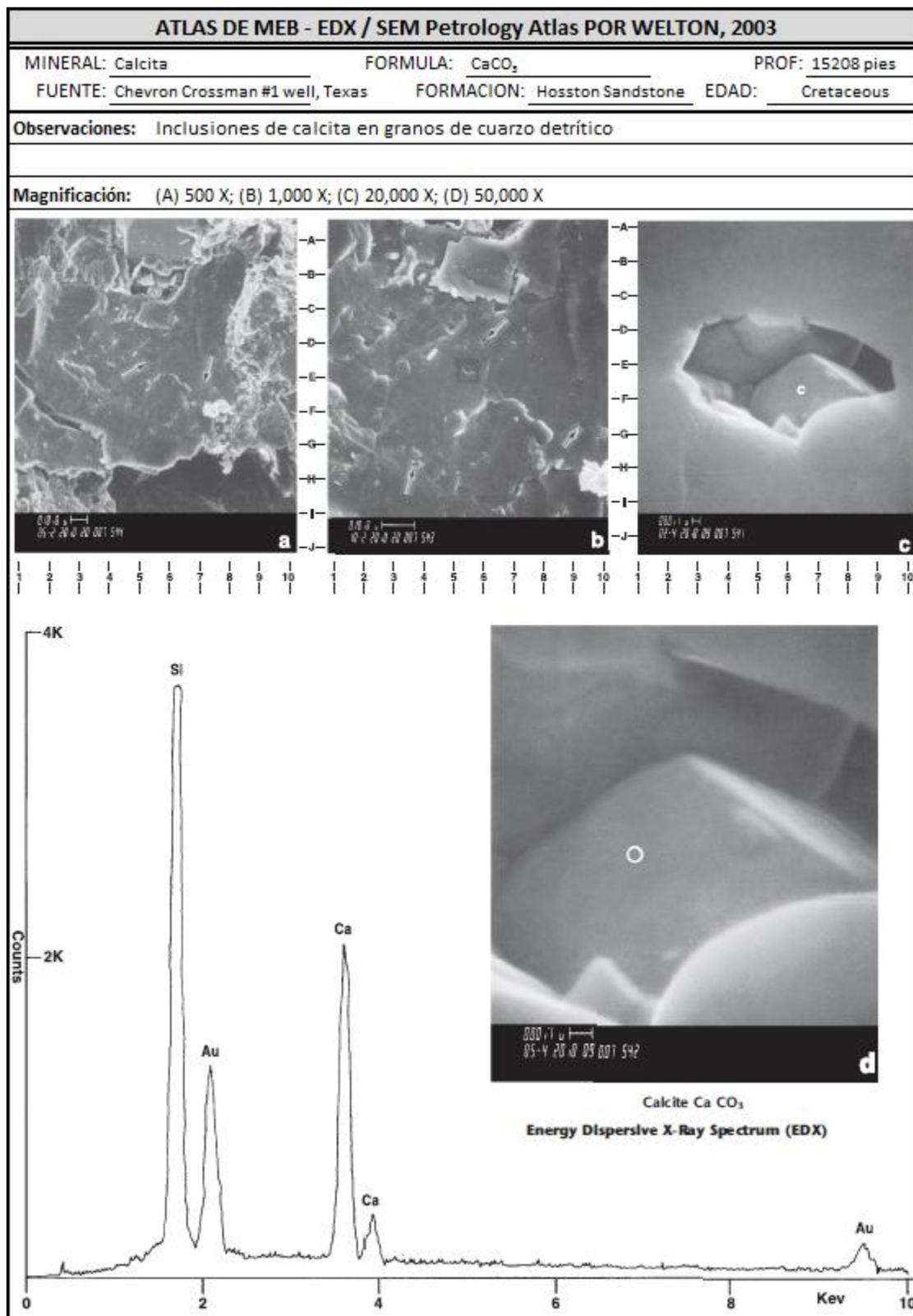


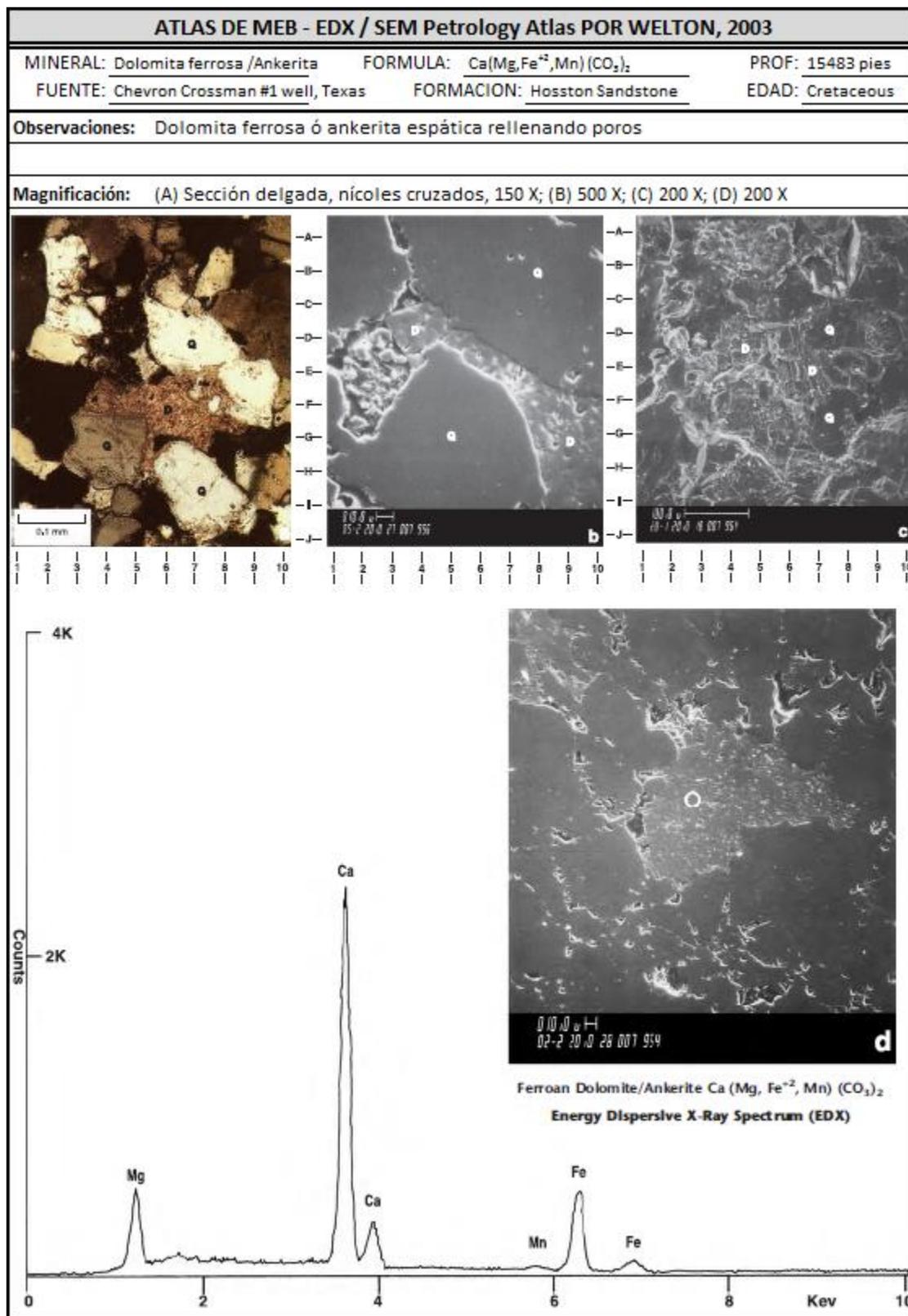


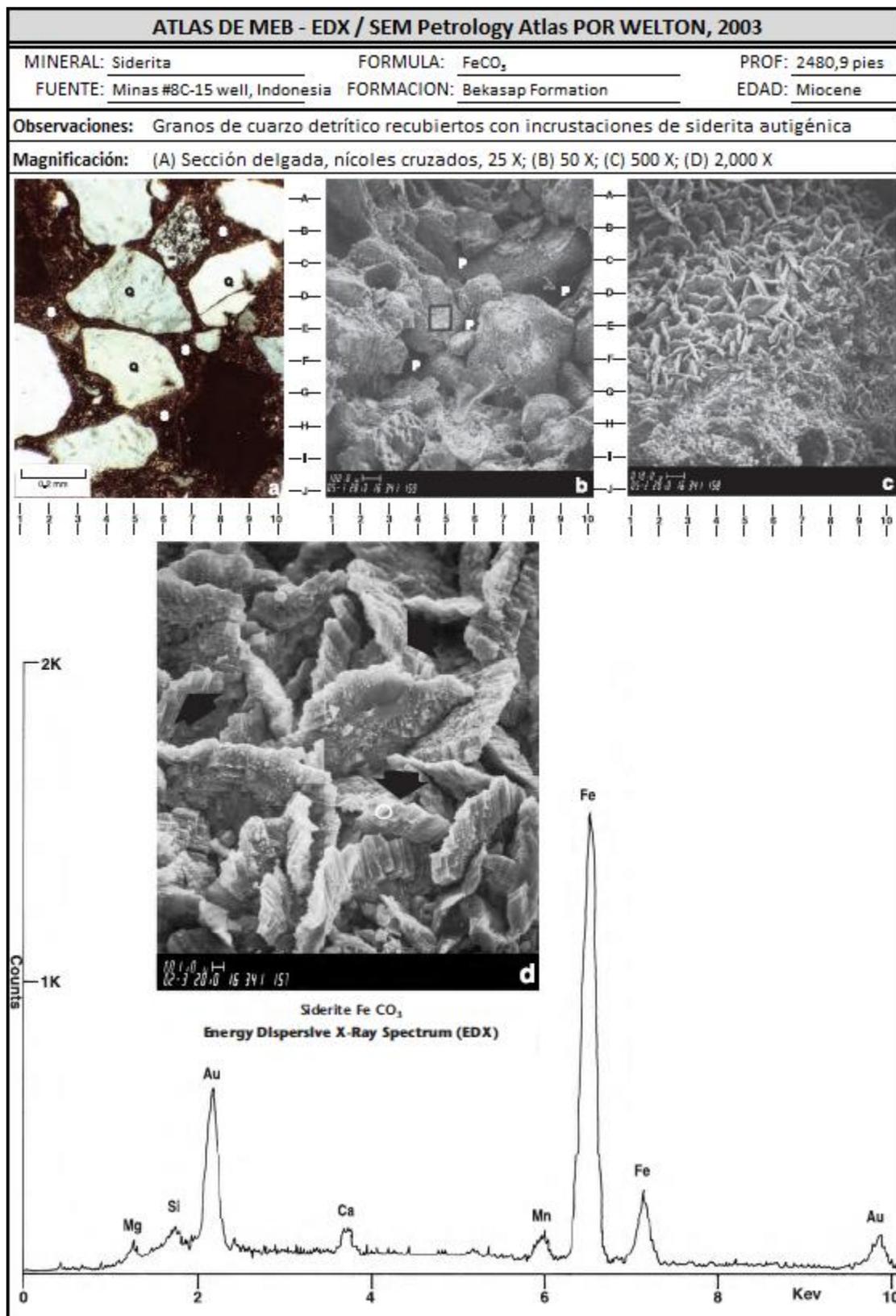


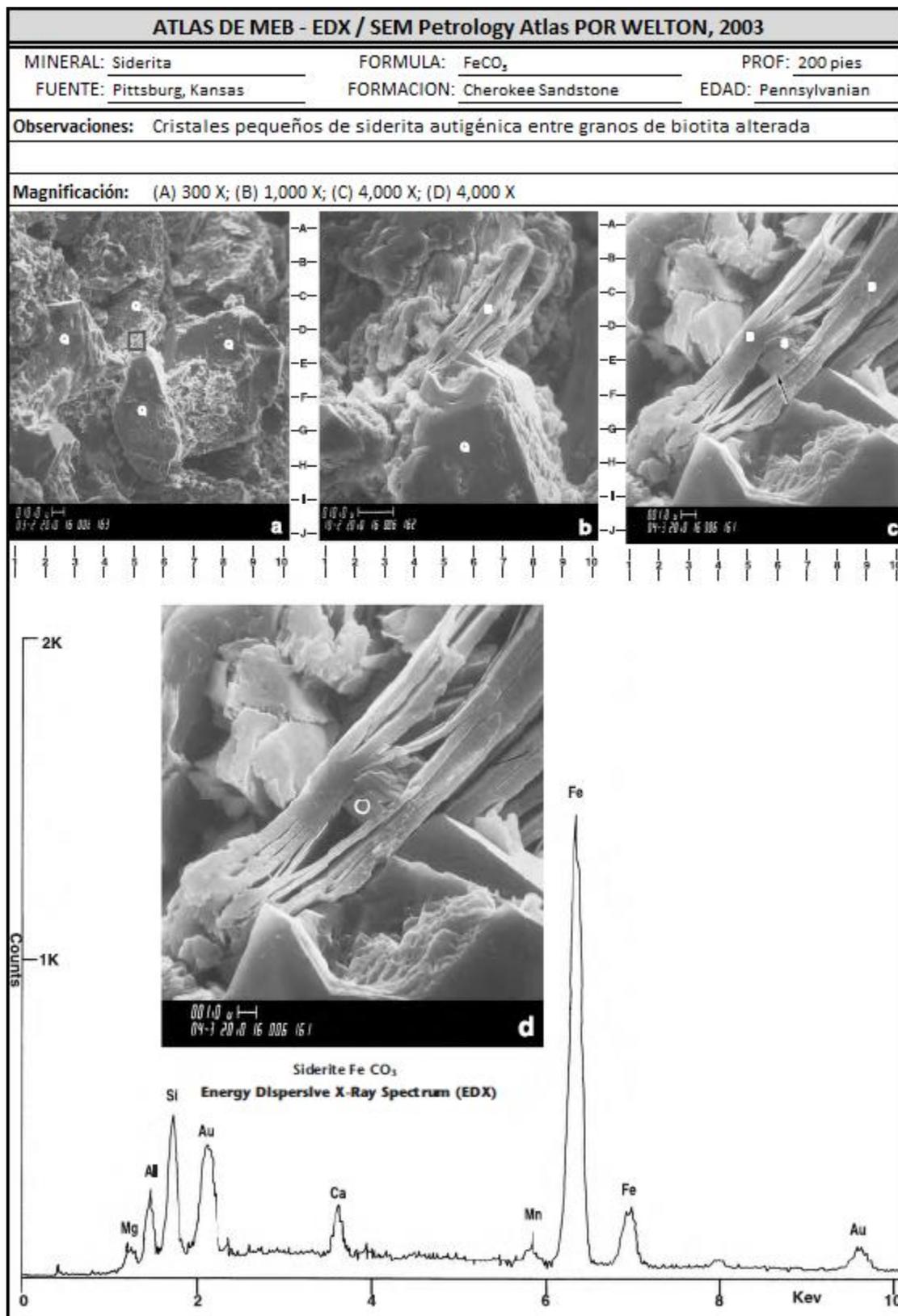


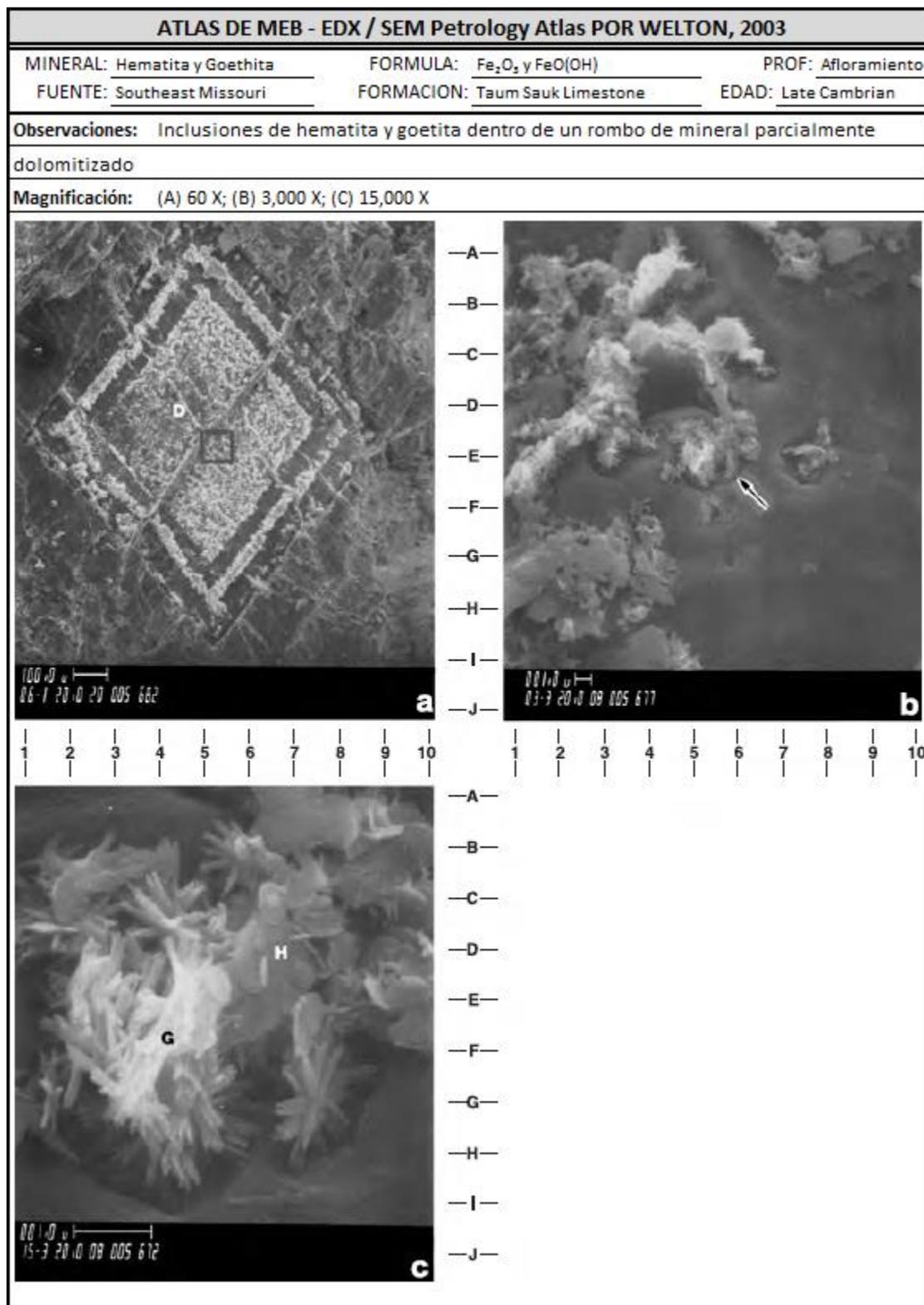


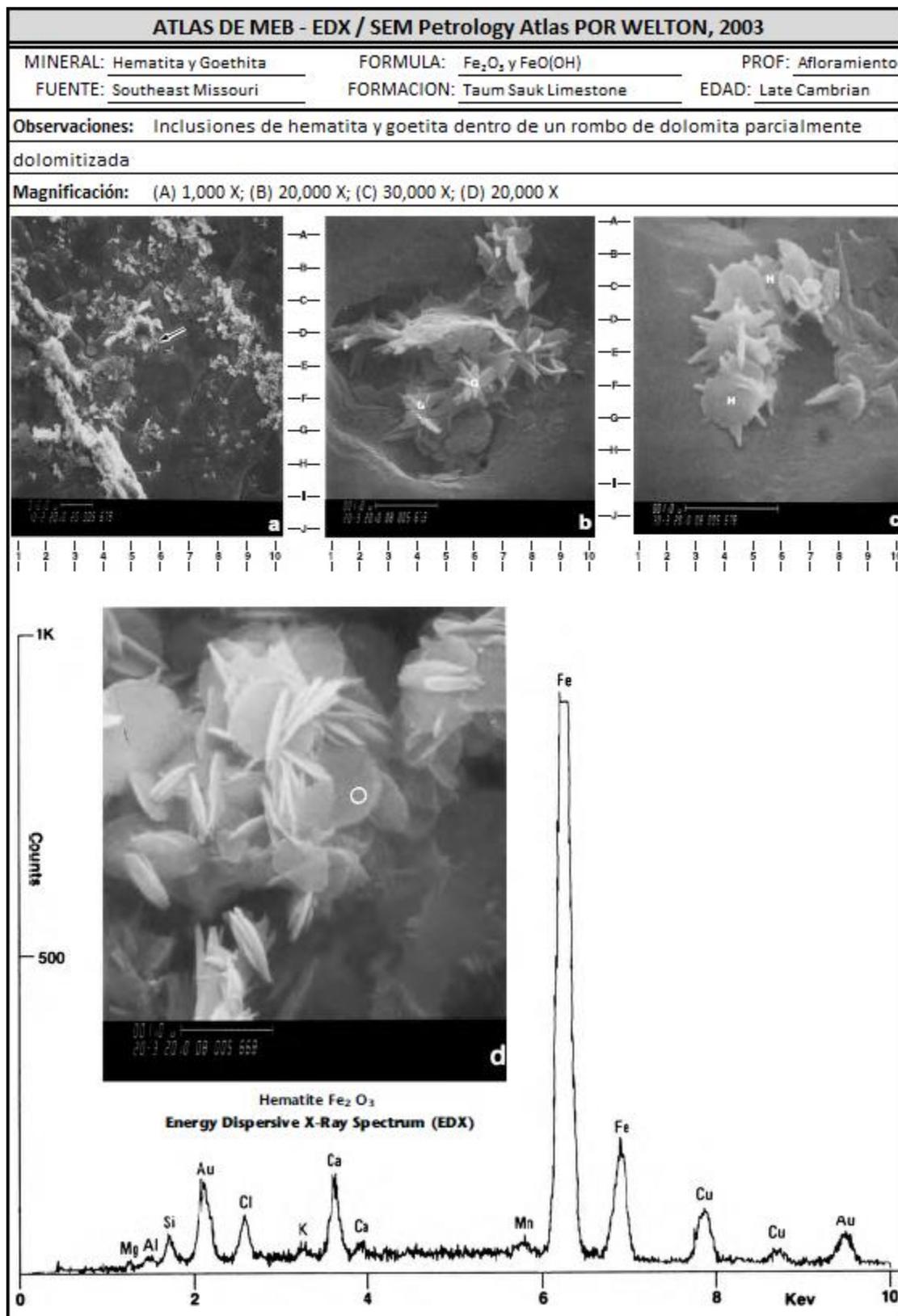




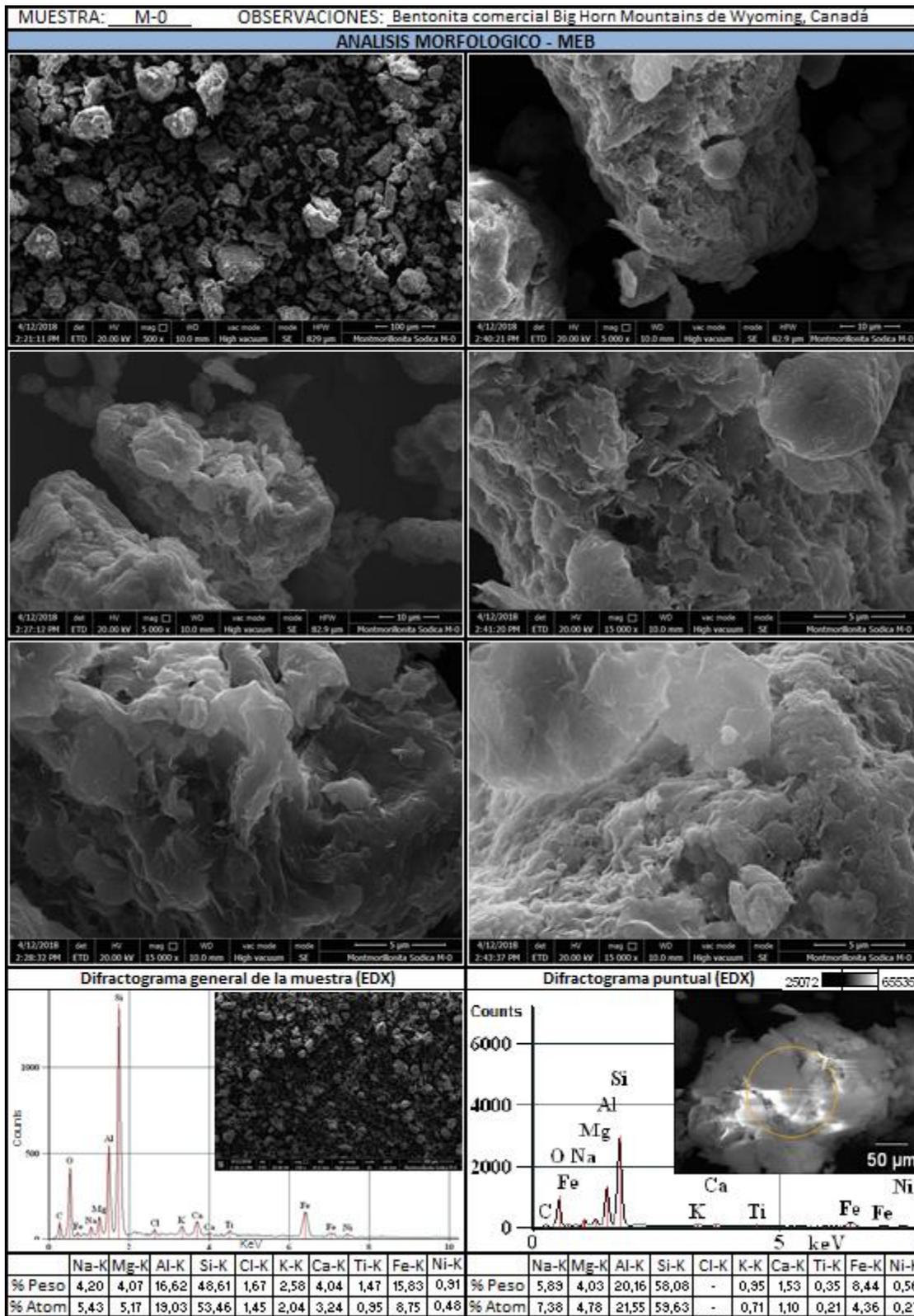


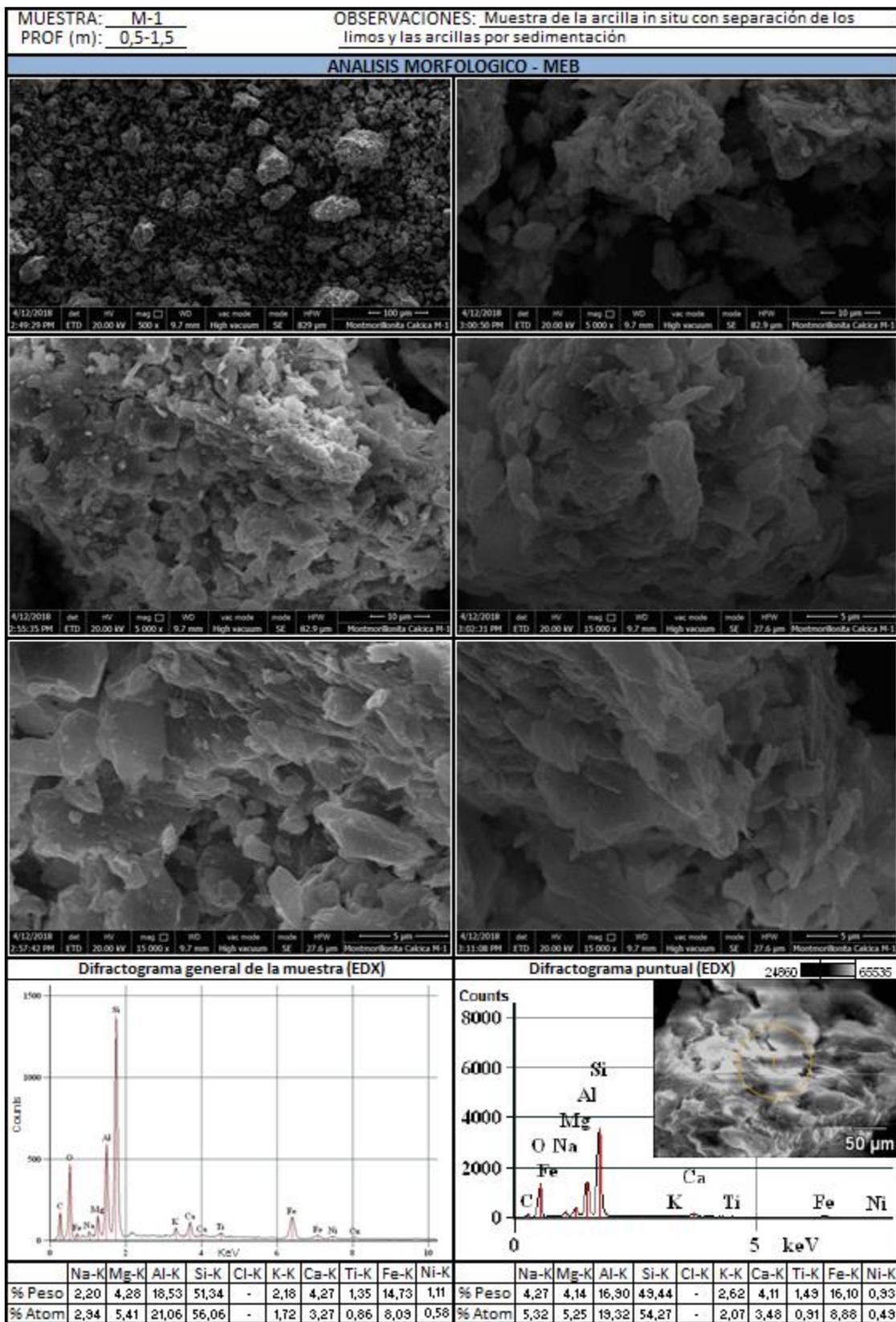


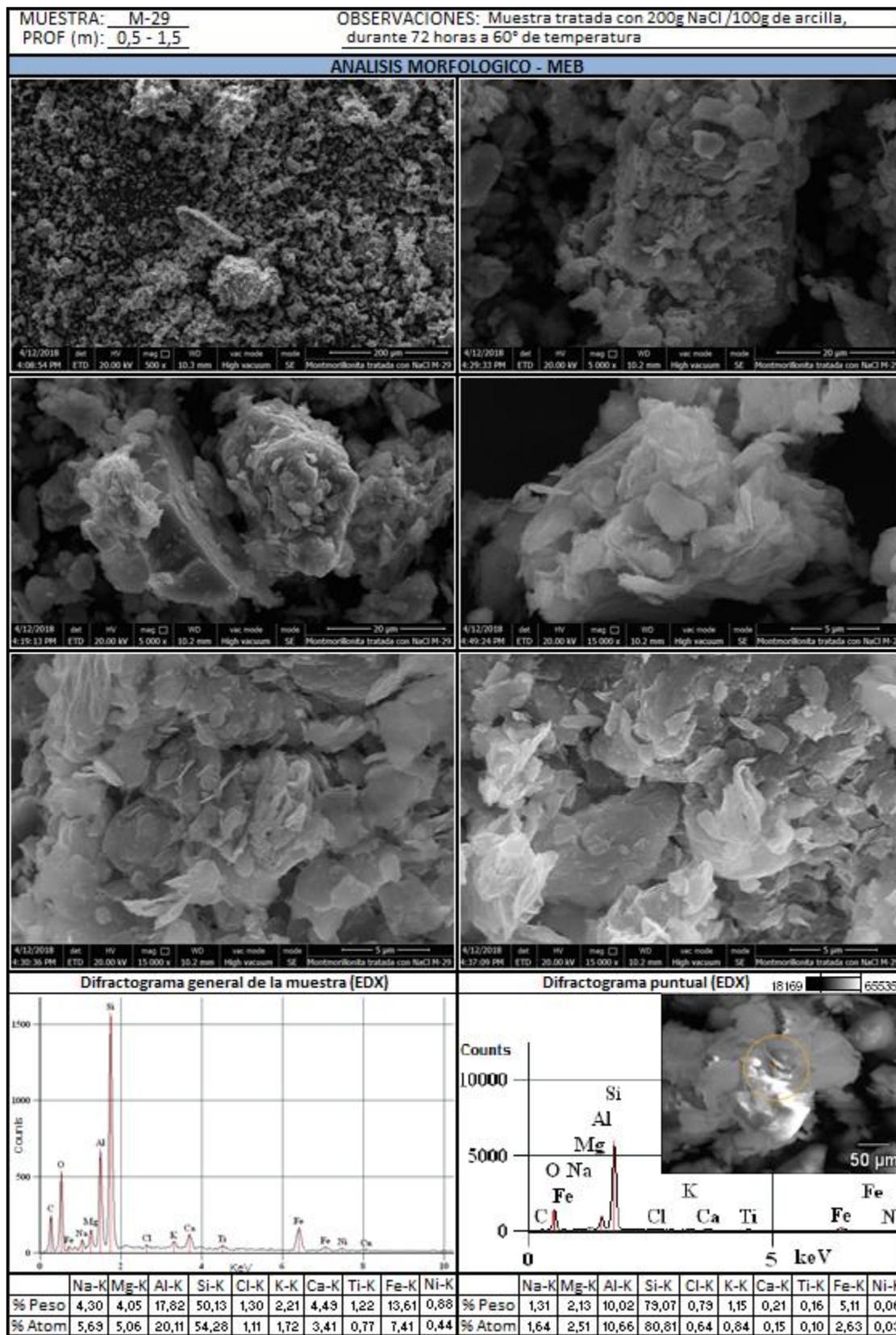


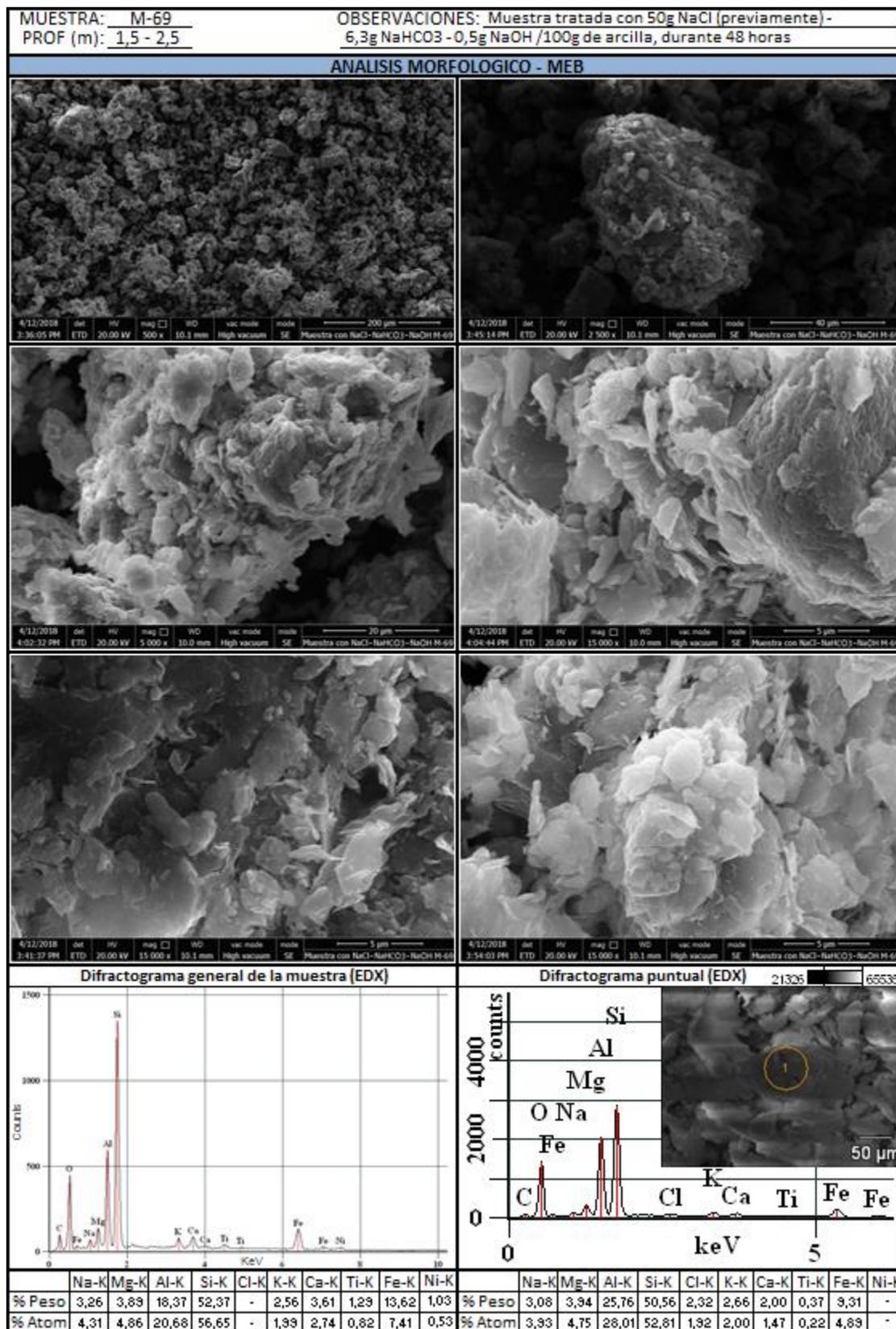


**B2. IMAGENES SEM / EDX DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS**





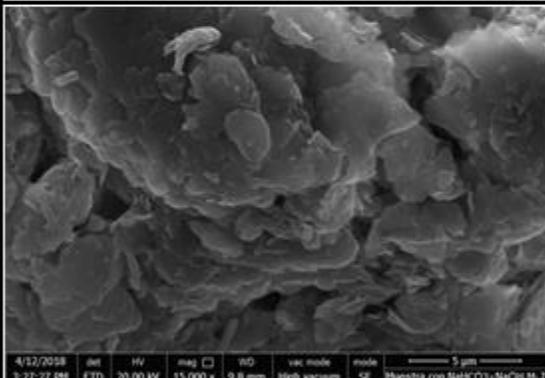
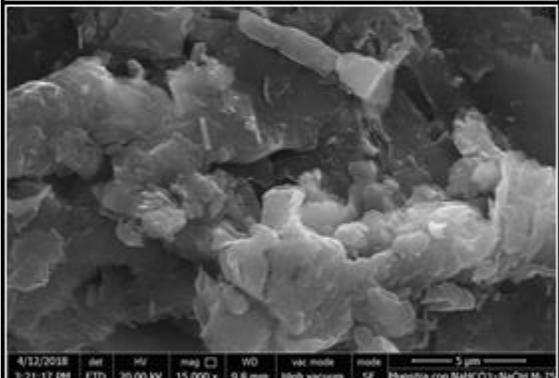
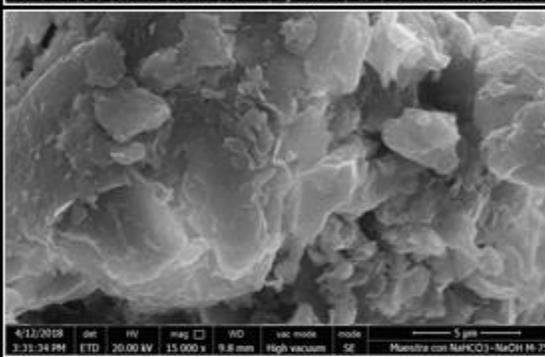
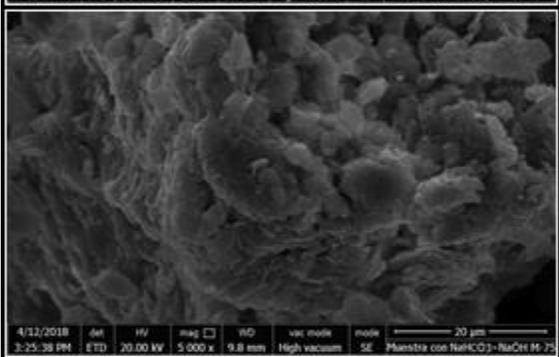
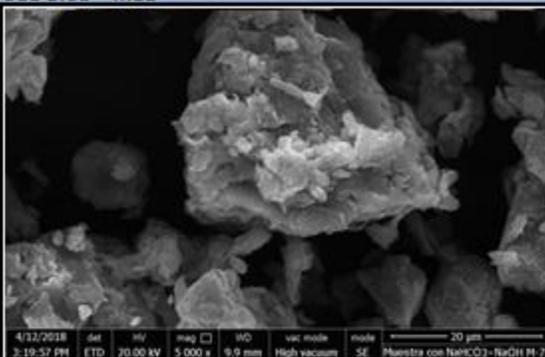
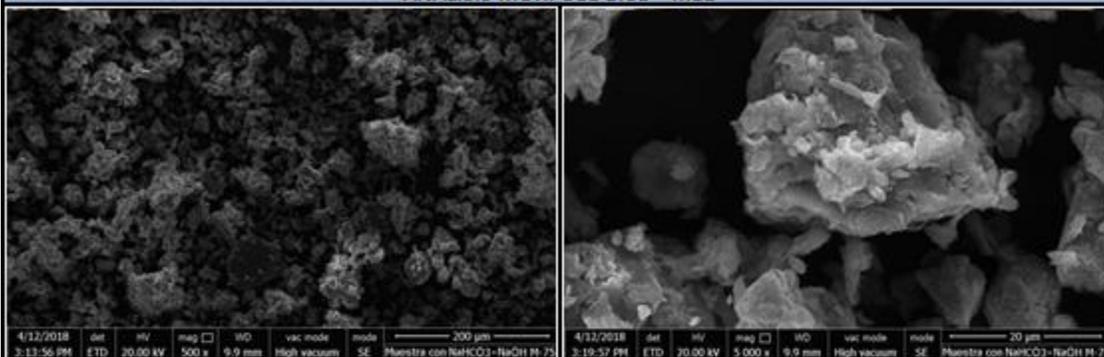




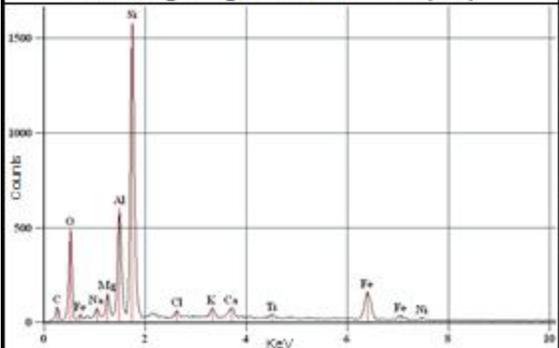
MUESTRA: M-75 OBSERVACIONES: Muestra tratada con 6,3g NaHCO<sub>3</sub> - 0,5g NaOH /100g de arcilla, durante 48 horas

PROF (m): 1,5 - 2,5

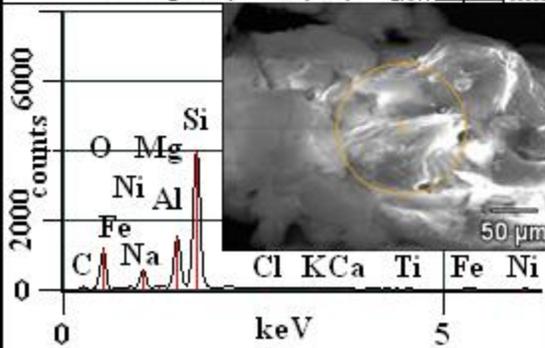
ANALISIS MORFOLOGICO - MEB



Difractograma general de la muestra (EDX)



Difractograma puntual (EDX)



	Na-K	Mg-K	Al-K	Si-K	Cl-K	K-K	Ca-K	Ti-K	Fe-K	Ni-K		Na-K	Mg-K	Al-K	Si-K	Cl-K	K-K	Ca-K	Ti-K	Fe-K	Ni-K
% Peso	3,33	3,92	16,70	53,02	1,81	2,32	2,62	0,83	14,80	0,65	% Peso	11,04	1,12	18,45	66,10	0,52	0,28	0,39	0,03	1,65	0,42
% Atom	4,41	4,92	18,86	57,52	1,55	1,81	1,93	0,53	8,08	0,34	% Atom	13,22	1,27	18,82	64,79	0,40	0,20	0,27	0,02	0,81	0,20