



Laboratorio de Investigación y Análisis

ST-18-23

INF-23-INPC-18

29-03-2019

INFORME DE INVETIGACIÓN
<Muestras geológicas y arqueológicas
– Convenio IKIAM>

Este reporte contiene (65) páginas y corresponden al original

EQUIPO DE INVESTIGACIÓN

ST-18-23

INF-23-INPC-18

29-03-2019

Coordinación:

Dra. Martha Romero-Bastidas.

Responsable del Laboratorio de Investigación y Análisis del INPC.

Investigadores:

Quím. Carlos Vásquez-Mora

Investigador Químico del Laboratorio de Investigación y Análisis del INPC.

Q.A. Michelle Mármol-Villarroel

Investigador Químico del Laboratorio de Investigación y Análisis del INPC.

Colaboradores:

Johanna Ramírez

Gabriela Haro

Practicantes de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Central

Carlos Rosero

Practicantes del Colegio Politécnico de la Universidad San Francisco

Ing. Francisco Viteri

Profesor de la Facultad de Geología, Minas, Petróleos y Ambiental de la Universidad Central

Mauricio Quishpe

Estudiante de la Facultad de Geología, Minas, Petróleos y Ambiental de la Universidad Central

Contenido

1. ANTECEDENTES.....	6
2. DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	6
2.1. Ubicación Geográfica	6
2.2. Hidrografía	7
2.3. Geomorfología	8
3. CONTEXTO GEOLÓGICO	10
3.1. Contexto Geológico Regional de la Cuenca Oriente	10
3.2. Marco estructural regional cuenca oriente.....	11
3.3. Contexto Geológico Local.	12
4. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA.....	14
3.1. Sedimentos arcillosos.....	14
3.2. Cerámica arqueológica	19
4. METODOLOGÍA	21
4.1. Muestreo.....	21
4.2. Caracterización química, mineralógica y de textura.....	21
4.3. Selección de arcillas de uso potencial.....	23
5. RESULTADOS Y DISCUSION	23
5.1. Análisis de la Composición Mineralógica y Química.....	23
5.2. Análisis de propiedades físicas.....	48
5.2.1. Distribución granulométrica.....	48
5.2.2. Plasticidad.....	56
5.2.3. Contracción.....	59
5.3 Cerámica	60
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	62
Bibiografía.....	64

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación del área de estudio. El área se encuentra en la provincia de Napo (Límite provincial color negro), en los cantones Tena y Archidona (Límite cantona Azul). (IGM, 2000)	7
Figura 2. Cuenca del Río Napo (MAGAP, 2004). Se muestran las subcuencas que abarcan la zona de estudio dentro de la Cuenca del Río Napo.....	8
Figura 3. Mapa Geomorfológico de la zona de estudio hoja 1: 50 000 de Tena (MAGAP-SIGTIERRAS, 2015).....	10
Figura 4. Mapa tectónico de la cuenca Oriente tomado de (Baby, 2004)	12
Figura 5. Unidades geológicas en la zona de estudio (INIGEMM, 1986) (Báez, 2009) (Werner, 2004).....	14
Figura 6. Localización de los sitios de muestreo	15
Figura 7. Diagrama de la metodología del estudio	21
Figura 8. Espectros de difracción de Rayos X de las muestras de arcilla.....	36
Figura 9. Estructura cristalina de filisilicatos tipo 1:1	37
Figura 10. Estructura cristalina de los filosilicatos tipo 2:1	37
Figura 11. Espectros DRX: Abajo muestra sin tratamiento, Arriba muestra purificada	40
Figura 12. Espectro Infrarrojo de la muestra D1M4 tratada a 2 y 5 minutos.....	41
Figura 13. Espectro Infrarrojo de la muestra D3M3 tratada.....	42
Figura 14. Imagen de MEB de agregados pseudo hexagonales de las muestras: A) Muestra D1M4, B) Muestra D2M1, C) Muestra D3M3 y D) Muestra D5M1	43
Figura 15. Espectros de las muestras D6M1 Y D7M1 con tratamiento de glicólisis	44
Figura 16. Imagen MEB de la muscovita de las muestras: A) D6M1 y B) D7M1	45
Figura 17. Distribución de tamaño de partícula de la muestra D1M4	50
Figura 18. Distribución de tamaño de partícula de la muestra D2M1	50
Figura 19. Distribución de tamaño de partícula de la muestra D3M3	51
Figura 20. Distribución de tamaño de partícula de la muestra D4M2	51
Figura 21. Distribución de tamaño de partícula de la muestra D5M1	52
Figura 22. Distribución de tamaño de partícula de la muestra D6M1	52
Figura 23. Distribución de tamaño de partícula de la muestra D7M1	53
Figura 24. Distribución de tamaño de partícula de la muestra 001Tena.....	53
Figura 25. Distribución de tamaño de partícula de la muestra 002Venecia	54
Figura 26. Distribución de tamaño de partícula de la muestra 003.....	55
Figura 27. Distribución de tamaño de partícula de la muestra 004.....	55
Figura 28. Resultados del análisis de la plasticidad de las muestras en el diagrama de Holtz y Kovacs.....	57
Figura 29. Diagrama Winkler	58

Índice de tablas

Tabla 1. Descripción de las muestras tomadas de las zonas de interés	16
Tabla 2. Composición mineralógica de las muestras de arcillas	38
Tabla 3. Composición mineralógica de las muestras purificadas	46
Tabla 4. Composición química de las muestras arcillosas	47
Tabla 5. Caracterización de granulometría por tamizado de las arcillas.....	48
Tabla 6. Resumen de caracterización de granulometría por tamizado de las arcillas..	48
Tabla 7. Resultados de granulometría de las muestras arcillosas.....	56
Tabla 8. Resultados de la clasificación de suelos (SUCS	57
Tabla 9. Comportamiento al secado y a la cocción	59
Tabla 11. Resultados de composición química de las muestras cerámicas	60
Tabla 12. Resultados de análisis mineralógico de las muestras cerámicas	61

1. ANTECEDENTES

En mayo de 2017 la Universidad Regional Amazónica Ikiam con el apoyo de la Agencia Internacional Española para el Desarrollo (AECID) realizó la convocatoria I+V (Investigación + Vinculación). Como resultado de esta convocatoria, Artesanías de producción milenaria, puesta en valor del patrimonio cultural material e inmaterial a partir de la cerámica, fue uno de los tres proyectos que obtuvo el financiamiento para su ejecución.

El objetivo principal la investigación es fortalecer los conocimientos ancestrales sobre procesos de producción de artesanías de origen milenario que se mantienen vigentes en la actualidad, puntualmente de la cerámica.

En el marco de este proyecto, la Universidad Regional IKIAM y el Instituto Nacional de Patrimonio Cultural, formalizaron un convenio de cooperación institucional para trabajar en la caracterización y clasificación de las arcillas de la provincia del Napo y su aplicación en la elaboración de objetos cerámicos con técnicas ancestrales. Contempla impactar en los siguientes aspectos: a) disponibilidad de materias primas de calidad y b) mejoramiento de la calidad de los productos terminados.

2. DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1. Ubicación Geográfica

La zona de estudio se halla en la República del Ecuador al Este de la Cordillera Real en la zona Oriental del país en la provincia del Napo, ubicada en parte de los cantones de Tena y Archidona. (Fig.1)

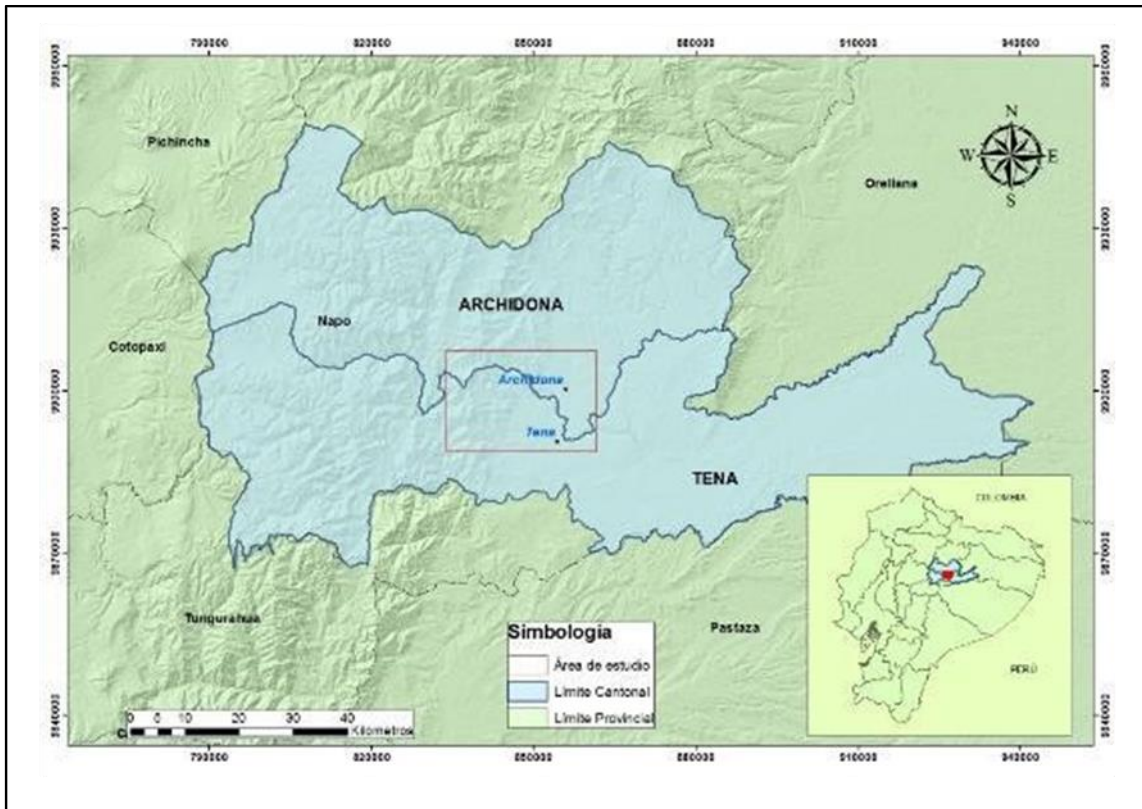


Figura 1. Ubicación del área de estudio. El área se encuentra en la provincia de Napo (Límite provincial color negro), en los cantones Tena y Archidona (Límite cantonal Azul). (IGM, 2000)

2.2. Hidrografía

El drenaje del territorio ecuatoriano desemboca en dos vertientes: Océano Pacífico y la del Río Amazonas que a su vez desemboca en el océano Atlántico. En la zona de estudio se desarrolla un sistema hídrico que tiene como principal sistema fluvial el Río Napo su vertiente es el río Amazonas y cuyos tributarios tienen origen en la Cordillera Real ubicada al oeste de la Cuenca Oriente. (MAGAP, 2004)

La zona de Estudio se sitúa en el sistema hidrográfico de la cuenca del Río Napo, específicamente en las zonas de la subcuenca del Río Jatunyacu al oeste y la subcuenca del Río Misahuallí al este (fig.2). El Río Napo nace en la cordillera Real recoge las aguas de los deshielos del Antisana, Sincholagua, Cotopaxi y Llaganates que al unirse forman el Jatunyacu, éste se junta con el

Anzu, desde donde toma el nombre de Napo (Armijos, 2002). La subcuenca del Río Jatunyacu nace en las estribaciones de nororientales de la Cordillera Real. Posee una extensión de 3223 Km². La subcuenca del Río Misahuallí es la principal eje hídrico de la zona de estudio posee una extensión de 1662 km².

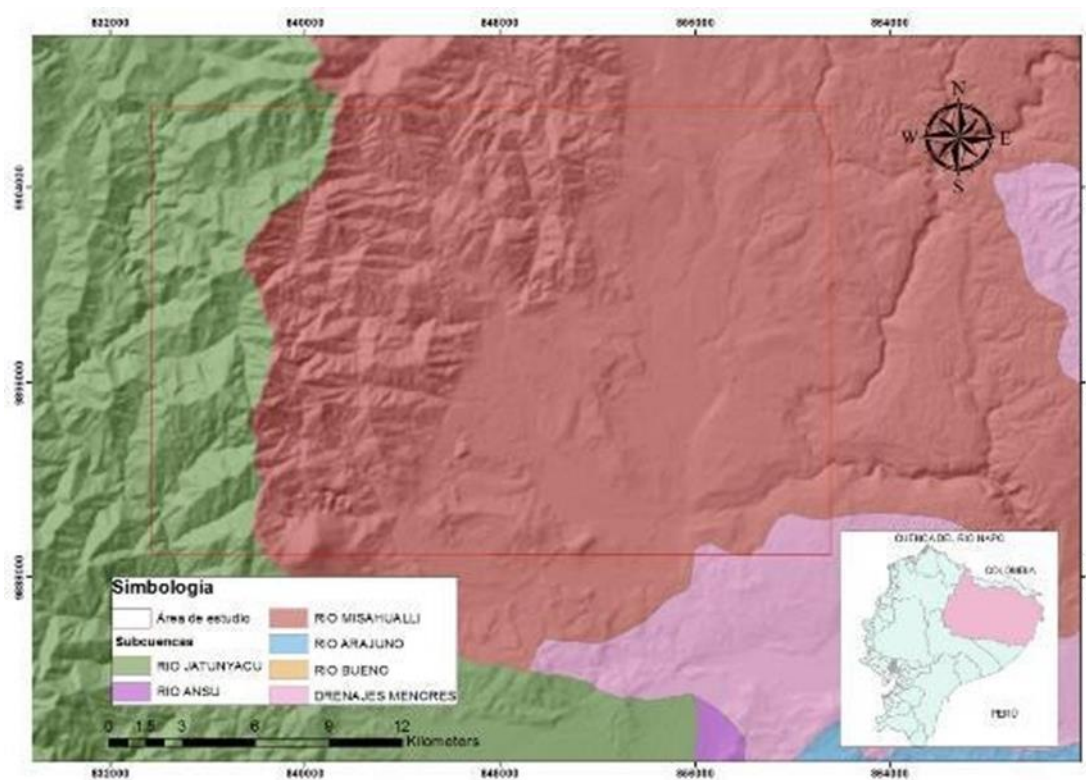


Figura 2. Cuenca del Río Napo (MAGAP, 2004). Se muestran las subcuencas que abarcan la zona de estudio dentro de la Cuenca del Río Napo.

2.3. Geomorfología

La zona de estudio se encuentran 3 dominios fisiográficos: Zona Subandina, Amazonía periandina y el medio aluvial amazónico. (MAGAP-SIGTIERRAS, 2015)

- Zona Subandina. Presenta relieves montañosos o submontañosos con alturas máximas de 2500m estos se presentan en forma escalonada.

- Amazonía periandina. Presenta piedemontes y colinas periandinas, con alturas entre los 300 y 600 m. Los piedemontes se ubican bajo los relieves Subandinos orientales, mientras las colinas periandinas los conforman macizos colinados recubiertos de sedimentos tanto de los piedemontes como de los complejos fluviales.
- Medio aluvial amazónico. Caracterizado por los depósitos asociados a la erosión y sedimentación de los ríos: Tena, Pano, Misahuallí y Jatunyacu; los cuales dan origen a la presencia de valles fluviales y terrazas.

El sector presenta 4 contextos morfológicos asociados unidades geomorfológicas (fig.4) estos son:

- Vertientes homogéneas poco colinadas sobre rocas intrusivas como el caso del granito de Abitagua. Con geoformas de vertientes con relieves montañosos de pendiente moderada en casos asociados a depósitos coluviales de ladera.
- Paisajes estructurales calcáreos y relevos periclinales. Con geoformas identificadas de mesas, cuevas y chevrones; con relieves colinados bajos a altos y zonas de erosión karstica.
- Estribaciones orientales subandinas. Relieves formados en arcillas y areniscas con geoformas de piedemonte.
- Medio fluvial dominado por geoformas de valles subhorizontales, valles en V, gargantas en zonas de pendiente, encañonamientos, conos de deyección y terrazas fluviales.

Geomorfológicamente las zonas de interés se ubicaron principalmente en zonas de pie de monte y terrazas fluviales en los principales ríos del área de estudio (Figura 3).

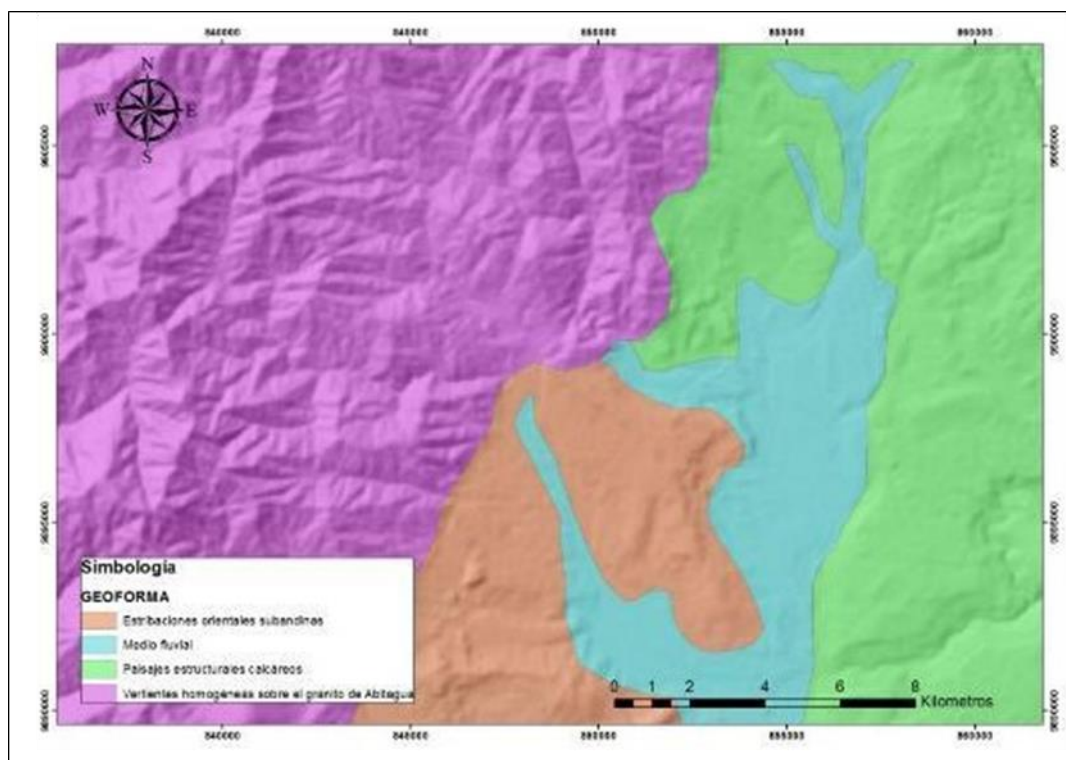


Figura 3. Mapa Geomorfológico de la zona de estudio hoja 1: 50 000 de Tena (MAGAP-SIGTIERRAS, 2015).

3. CONTEXTO GEOLÓGICO

3.1. Contexto Geológico Regional de la Cuenca Oriente

La Cuenca Oriente se caracteriza por presentar un dominio de rocas sedimentarias de origen marino y continental depositadas en un basamento de rocas volcánicas de edad pre-cretácica. En el Jurásico medio a superior se desarrolló un arco volcánico calco alcalino lo cual dando origen a grandes cuerpos intrusivos plutónicos (Barragán, 1998). En el cretácico se desarrollaron lo ambientes de plataforma marina somera depositando secuencias sedimentarias marinas y continentales (Jailard, 1997), Durante el cenozoico esta cuenca fue rellenada por grandes abanicos que provienen de la erosión de los Andes (Hall, 2008), mientras la zona Subandina se encuentro formada por terrenos levantados tectónicamente mediante el sistema de fallas transpresivas dextrales (Baby, 2004).

La actividad magmática actual de la zona Subandina se radica en la presencia de volcanes como el Reventador y Sumaco. El Sumaco localizado en el sur del levantamiento Napo caracterizado por un volcanismo alcalino, saturado en sílice y enriquecido en elementos de K_2O , P_2O_5 y Na_2O . Estas secuencias litológicas volcánicas recientes son de importancia en las posibles orígenes de las fuentes de arcillas.

3.2. Marco estructural regional cuenca oriente

En la Cuenca Oriente se evidencia tres dominios tectónicos (fig. 4):

El Dominio Occidental o Sistema Subandino este va de Norte a Sur exponiendo 3 zonas morfo-estructurales: el Levantamiento Napo que es un inmenso domo alargado con orientación NNE-SSO y limitado al Este y al Oeste por fallas transpresivas; la Depresión Pastaza con fallas cabalgantes al contacto Zona Subandina-Cordillera Oriental; al sur la Cordillera de Cutucú caracterizada por un cambio de orientación de las estructuras, de N- S a NNO-SSE, y por la presencia formaciones litológicas (Formaciones Santiago y Chapiza) de edad triásicas y jurásicas. (Baby, 1999)

El Dominio Central o Corredor Sacha-Shushufindi. Se encuentra deformado por mega-fallas en transpresión, con dirección NNE-SSO, las cuales se verticalizan en profundidad (Baby, 1999)

El Dominio Oriental o Sistema Capirón - Tiputini. Este es una cuenca extensiva, estructurada por fallas listricas que se conectan sobre un nivel de despegue horizontal (Baby, 2004).

Con esto se concluye que la cuenca oriente y zona subandina tiene una complejidad litológica y tectónica, por lo que definir con precisión el origen de

las arcillas motivo del presente estudio deberá realizarse utilizando varios tipos de análisis.

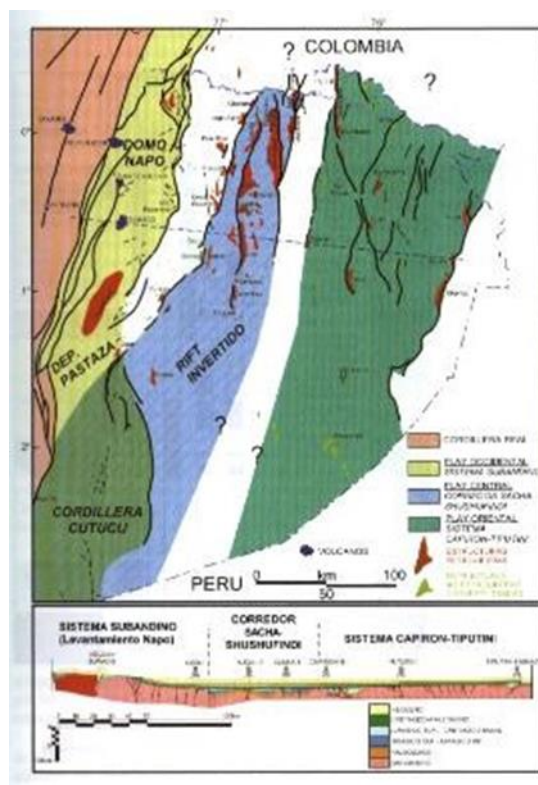


Figura 4. Mapa tectónico de la cuenca Oriente tomado de (Baby, 2004)

3.3. Contexto Geológico Local.

Analizando los datos geológicos existentes (Carta geológica Tena - 1:100000 - INIGEMM, 1986) la zona de estudio se encuentra caracterizada por unidades/formaciones geológicas de diferente litología y edad (Figura 5).

Formación Misahualli (Jurásico superior- cretácico inferior): Constituido por rocas volcánicas que forman parte del arco magmático desarrollado en el jurásico y caracterizado principalmente por basaltos y aglomerados, junto con tobos en la parte superior de la formación, está relacionado a una fase efusiva del intrusivo de Abitagua. (Duque, 2000)

Formación Napo (Cretácico). Ampliamente difundida sobre el levanta-miento Napo, su origen es en gran parte marino, las lutitas y calizas de esta formación contienen una abundante fósiles y micro fósiles, lo que ha permitido obtener una datación segura sobre la formación. (Baby, 1999)

Formación Tena (Maestrichtiense- Paleoceno). Según (Jailard, 1997) yace en discordancia sobre la formación Napo. Litológicamente presenta arcillas y areniscas de origen marino - continental principalmente en su base, la sedimentación de estas arcillas y areniscas, continúa hasta el Paleoceno pero cambia su ambiente de depositación a un ambiente de sedimentación continental volviéndose de coloración de color rojiza (Baby 2004).

Grupo Margagitas (Jurásico superior – Paleoceno). Según (Duque, 2000) son pizarras y areniscas semi metamorfizadas, secuencias meta-mórficas de las rocas Mesozoicas.

Formación Tiyuyacu (Paleoceno superior – Eoceno). Potente conglomerado basal que descansa sobre la Formación Tena, con areniscas gruesas finas arcillas rojas. (Jailard, 1997) Comprende una serie de 250 m de conglomerado con guijarros y detritos de cuarzo, lutita y cherts redondeados hasta angulares en una matriz arenosa limosa; y areniscas de grano variable con intercalaciones de lutitas rojas, grises y verdes. (Baby, 2004)

Batolito de Abitagua (Jurásico). Plutón elongado que es parte integrante de la Unidad Granitoides Zamora y está dominado por un monzogranito de biotita, de grano grueso y color rosado. (Aspden, 1991).

Depósitos superficiales (Holoceno).- Se componen de tres tipos de depósitos:

- Aluviales (Holoceno).- Conformado por material arenoso formando terrazas temporales y bancos de arena.
- Terrazas. Constituidos por depósitos fluviales a lo largo del Río Misahualli presenta gravas, arenas, limos y arcillas polimícticos.

- Lahares.- Material heterogéneo en composición depositados en las riberas de los ríos Tena y Misahuallí, disposición caótica y cantos de rocas volcánicas y sedimentarios envueltos en una matriz fino-granular.

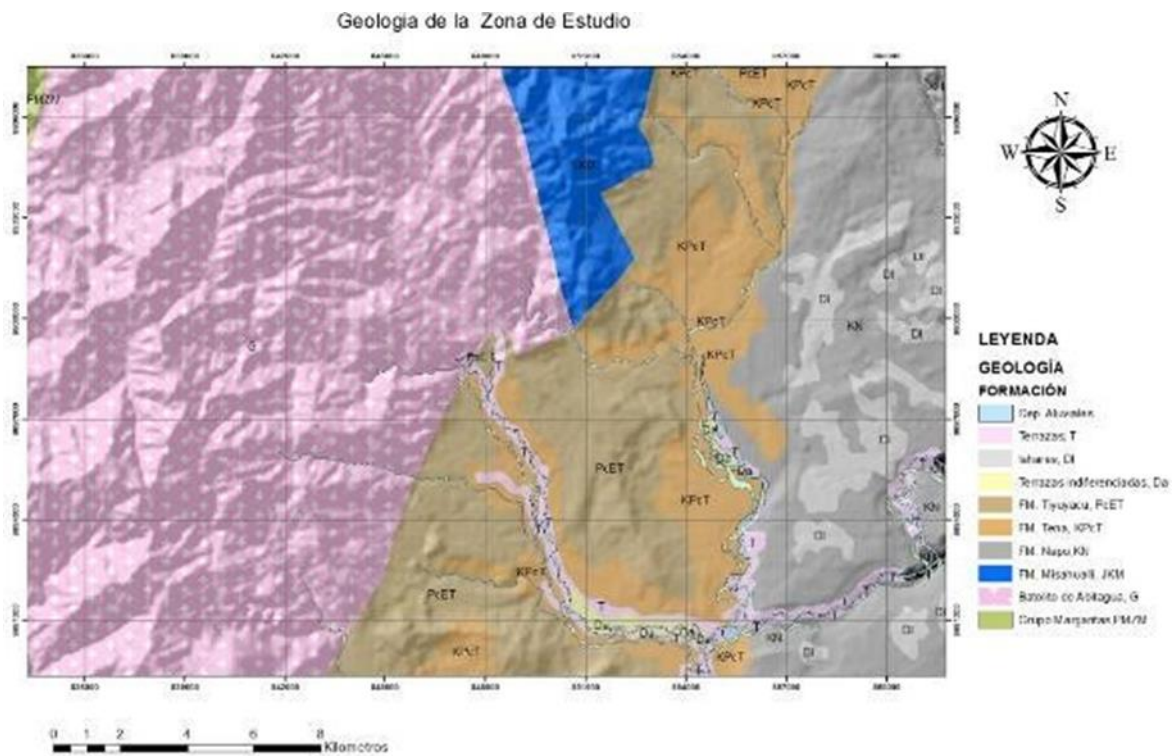


Figura 5. Unidades geológicas en la zona de estudio (INIGEMM, 1986) (Báez, 2009) (Werner, 2004)

4. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA

3.1. Sedimentos arcillosos

Las muestras de sedimentos arcillosos provienen principalmente de las zonas de pie de monte y terrazas fluviales de los principales ríos de la provincia de Napo (Tena, Napo, Misahuallí y Jatunyacu), dado que estas éstas son las geoformas donde se puede localizar las fuentes de arcilla, debido a los procesos geológicos involucrados en su formación. Se tomaron un total de veintidós (22) muestras de sedimentos. A este grupo se sumaron cuatro muestras de mezclas que usan las ceramistas de la zona.

En la figura 6 se muestra la localización geográfica de las zonas de interés donde se realizó el muestreo.

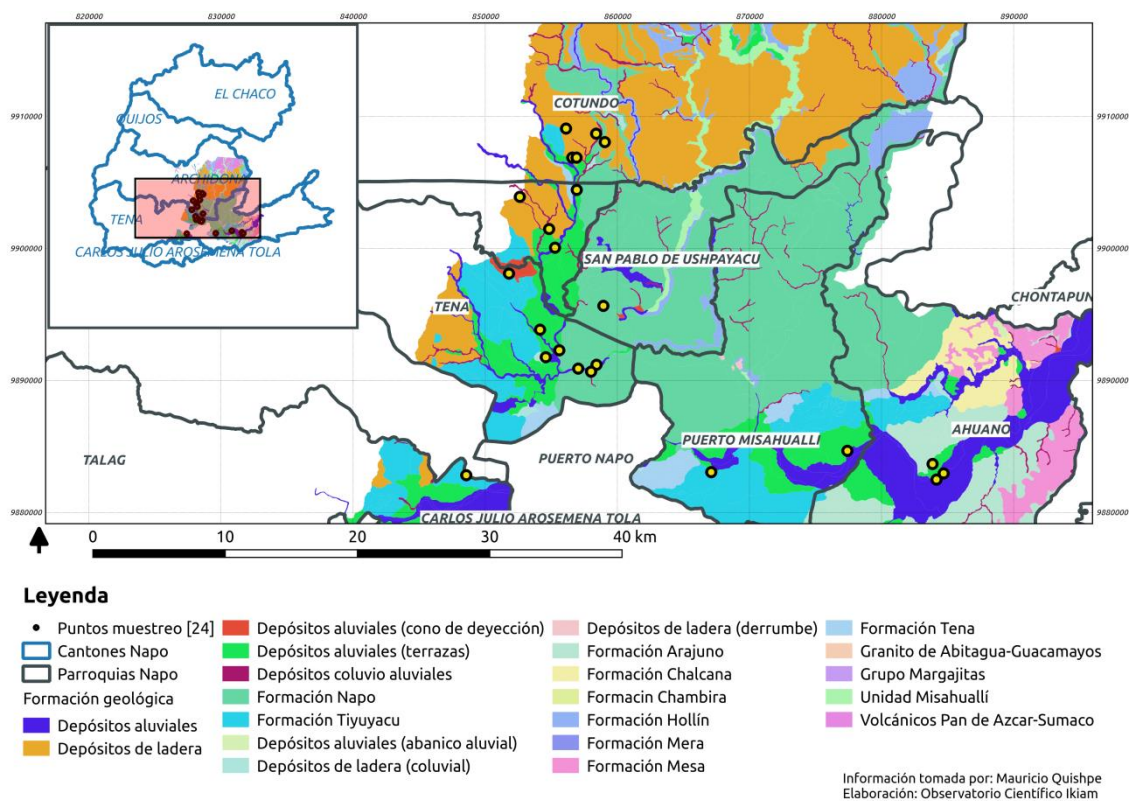


Figura 6. Localización de los sitios de muestreo

En la Tabla 1 se muestra el detalle de los sitios de muestreo, las coordenadas geográficas y una descripción resumida.



Tabla 1. Descripción de las muestras tomadas de las zonas de interés

Código muestra	Sitio de muestreo	Coordenadas		Descripción	Geomorforma
		X	Y		
D1M1	Cotundo/Tandayacu	191160	9908089	Suelo meteorizado y lixiviado, producto de alteración de depósitos sedimentarios.	Depósitos de ladera
D1M2	Cotundo/Reten Policial	188701	9906910	Material arcilloso cuyo límite no es apreciable probablemente producto de alteración de rocas volcánicas	Depósitos de ladera
D1M3	Cotuno/Cueva del Lagarto	190504	9908724	Afloramiento conformado por lentes de material arcilloso cuyo límite no es apreciable, probablemente producto de alteración de rocas volcánicas	Depósitos de ladera
D1M4	San Pedro entrada a Cotundo	189027	9906910	Capa de material arcilloso cuyo límite no es apreciable probablemente producto de la alteración de rocas volcánicas antiguas.	Depósitos de ladera
D2M1	Cotundo/Reserva Huasquilla	188225	9909108	Afloramiento conformado por lentes de material arcilloso limoso cuyo límite no es apreciable probablemente producto de la alteración de rocas volcánicas antiguas.	Depósitos de ladera
D2M2	Retén/Río Misahualli	189043	9904468	Capas de material arcilloso probablemente producto de la alteración de rocas volcánicas y sedimentarias.	Depósitos aluviales (Terrazas)
D3M1	Reserva Chalupas- Santa Rita	184736	9903936	Afloramiento conformado por estratos de material arcilloso, probablemente producto de la alteración de secuencias volcánicas andesíticas.	Depósitos de ladera
D3M2	Entrada a Shicama	186958	9901504	Afloramiento está conformado por capas de material arcilloso probablemente producto de la alteración de rocas sedimentarias.	Depósitos de ladera

D3M3	Entrada a Archidona	187405	9900091	Capa de material arcilloso probablemente producto de los depósitos alterados de material volcánico piroclástico.	Depósitos aluviales (Terrazas)
D4M1	Agua Pungo	187745	9892326	Depósito fluvial del río con presencia de zonas de arcillas en el lecho del río.	Depósitos aluviales (cono de deyección)
D4M2	Jumandy	186720	9891803	Capas de material arcilloso probablemente producto de la alteración de rocas sedimentarias.	Depósitos aluviales (Terrazas)
D4M4	Inchillaqui	183926	9898125	Capas de material arcilloso probablemente producto de la alteración de rocas sedimentarias.	Depósitos aluviales
D5M1	Alto Ongota	190560	9891234	Afloramiento conformado por capas de material arcilloso probablemente producto de la alteración de rocas volcánicas.	Depósitos aluviales
D5M2	San Tomás	190560	9891234	Afloramiento conformado por capas de material arcilloso probablemente producto de la alteración de depósitos volcánicos de composición riolítica.	Depósitos aluviales
D5M3	San José	191072	9895695	Capas de material limo arcilloso probablemente producto de la alteración rocas volcánicas antiguas.	Depósitos aluviales
D5M4	Quebrada Ongota	190151	9890714	Lentes de material arcilloso probablemente producto depositación y alteración de material volcánico.	Depósitos aluviales
D6M1	Kachiwañusca – Puerto Napo	209550	9884761	Capas de material arcilloso probablemente producto de la alteración de secuencias volcánicas.	Depósitos aluviales (Terrazas)
D6M2	Yusupuno	180722	9882861	Capas de material arcilloso probablemente producto de la alteración de secuencias volcánicas indiferenciadas.	Formación Tinyuyacu
D7M1	Ahuano	215994	9883778	Afloramiento conformado por capas de material arcilloso probablemente asociado a la formación Arajuno la cual se extiende a lo largo de la zona.	Depósitos aluviales (Terrazas)








D7M2	Ahuano escuela	216292	9882599	Afloramiento conformado por capa de material arcilloso probablemente asociado a la formación Arajuno la cual se extiende a lo largo de la zona.	Depósitos aluviales
D7M3	Ahuano centro	216834	9883068	Afloramiento conformado por capas de material arcilloso probablemente asociado a la formación Arajuno la cual se extiende a lo largo de la zona.	Depósitos aluviales
D7M4	Venecia	199256	9883129	Afloramiento conformado por capas de material arcilloso probablemente asociado a la formación Chalcana la cual se extiende a lo largo de la zona.	Depósitos aluviales (Terrazas)
001Tena	Colegio Tena				
002	Desconocido				
003Ahuano	Ahuano				
004Venecia	Venecia				





Laboratorio de Investigación y Análisis

3.2. Cerámica arqueológica

Las muestras de fragmentos cerámicos fueron seleccionadas de dos repositorios:

- **Reserva del INPC:** Las muestras provienen del Proyecto de desarrollo del Campo Villano-prospección sistemática y rescate arqueológico tramo Puerto Napo-Baeza.

Cod Lab	FICHA _CERO	Sitio	Unidad	Depósito	Procedencia	Imagen
23-1	20	Guatusa	Remoción	Remoción	2915	
23-2	05	Avispal	1	4	2296	
23-3	24	Cascada	TN8C3	3	19	
23-4	30	Pangayacu	Remoción	Remoción	1100	
23-5	19	Guatusa	1	Nci	2296	
23-6	21	Mirador	8	3	625	
23-7	28	Baliza140	Remoción	Remoción	Remoción	

23-8	51	58+877	Remoción	Remoción	4380 HE 263	
23-9	32	132+685	Remoción	Remoción	4752	
23-10	40	84+941	Remoción	Remoción	4267	
23-11	11	La Esperanza	C8	3	2205 AI-18	

- Aeropuerto Jumandy: El material cultural recuperado durante el rescate fue encontrado en este lugar. Se recuperaron cinco (5) muestras, correspondientes a ollas globulares y elípticas, reconstruidas.

Cod Lab	Sitio	Unidad	Depósito	Nivel	Procedencia
23-12	13	8	5	superior	1854
23-13	15	9	3	4	1855
23-14		34		Rasgo 11	944
23-15	15	61		20-40	2784
23-16		9			1850

4. METODOLOGÍA

La metodología que se desarrolló en el proyecto se muestra en la figura 7.

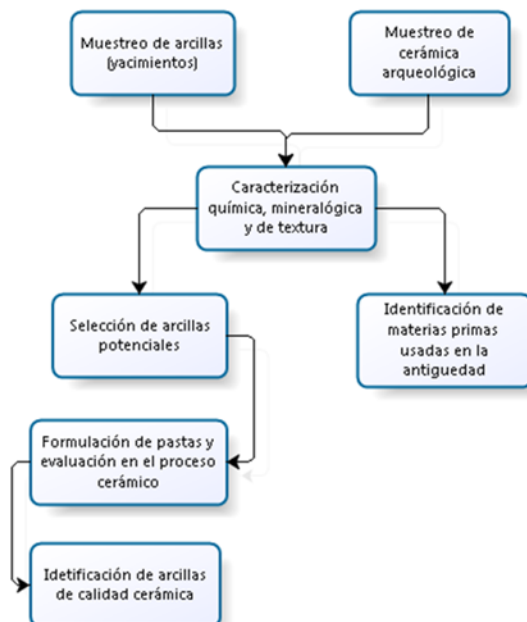


Figura 7. Diagrama de la metodología del estudio

4.1. Muestreo

Para el muestreo de los depósitos de arcillas se establecieron las zonas de muestreo bajo criterios de orden geológico, con base a la cartografía geológica. Esta fase del proyecto lo realizó Mauricio Quishpe de la Facultad de Geología, Minas, Petróleos y Ambiental de la Universidad Central (FIGEMPA).

4.2. Caracterización química, mineralógica y de textura

Inicia con la preparación de las muestras de sedimentos, consistió en cuarteo, trituración y molienda (NORMA ASTM NTC 4017), seguido de la eliminación de carbonatos y materia orgánica a través del uso de reactivos químicos. Finalmente, se somete a un secado y selección de tamaño de partícula menor de malla 200 (0.076mm). Las muestras de cerámica por su parte, requiere hacer la eliminación del engobe y la molienda hasta tamaño menor a 200 mallas.

Para la caracterización físico-química y mineralógica, las muestras fueron analizadas por las siguientes técnicas:

Para determinar las propiedades físicas se siguió las Normas ASTM 325 para la granulometría por tamizado, ISO 13320 para el análisis de tamaño de partícula por métodos de difracción láser y ASTM D 4318 para determinar la plasticidad del material arcilloso. Estos parámetros nos proporcionan información sobre la calidad de la arcilla.

Mediante espectroscopía de Dispersión de rayos X se determinó la composición química de las muestras. Para ello se empleó un microscopio electrónico de barrido marca JEOL modelo IT300 con una sonda de rayos X marca Oxford. Para la cuantificación fue necesario elaborar pastillas con celulosa pura.

También se realizó el análisis por difracción de rayos X, que es una técnica que permite determinar los minerales presentes en las muestras, tienen estrecha relación con el origen geológico de las cuales provienen las muestras. Los difractogramas se obtuvieron con el equipo BRUKER Advance D8. Para asegurar la orientación totalmente al azar con respecto al haz incidente, la muestra se hace girar dentro del haz de rayos X durante la exposición. El software de identificación de las fases cristalinas es el Diffraction Suite EVA y de cuantificación es el TOPAS.

Para la identificación precisa de las arcillas de las muestras geológicas, fue necesario, hacer una selección de las muestras con mayor proporción de material arcilloso, con la finalidad de continuar con el proceso de purificación. En estas muestras se hace una dispersión y segregación por sucesivas decantaciones y centrifugaciones para separar el limo grueso (50-20 micras) de las arcillas hasta diámetros de 2 a 0,2 micras, empleando mediante el tiempo de centrifugación, mediante sedimentación se separa la arena; el limo y la sílice

se separan a 1000 rpm durante 1 minuto. La porción arcillosa obtenida se sometió nuevamente a análisis por difracción de rayos X.

Para conocer la morfología de las partículas del material arcillosos se utilizó el microscopio electrónico de barrido JEOL IT 300. Fue necesario secar la muestra y obtener los polvos para depositarlos sobre cintas de grafito. Las imágenes electrónicas se obtuvieron bajo las siguientes condiciones de análisis: aceleración de voltaje de 15 KV, una presión de 30Pa y el detector de electrones secundarios.

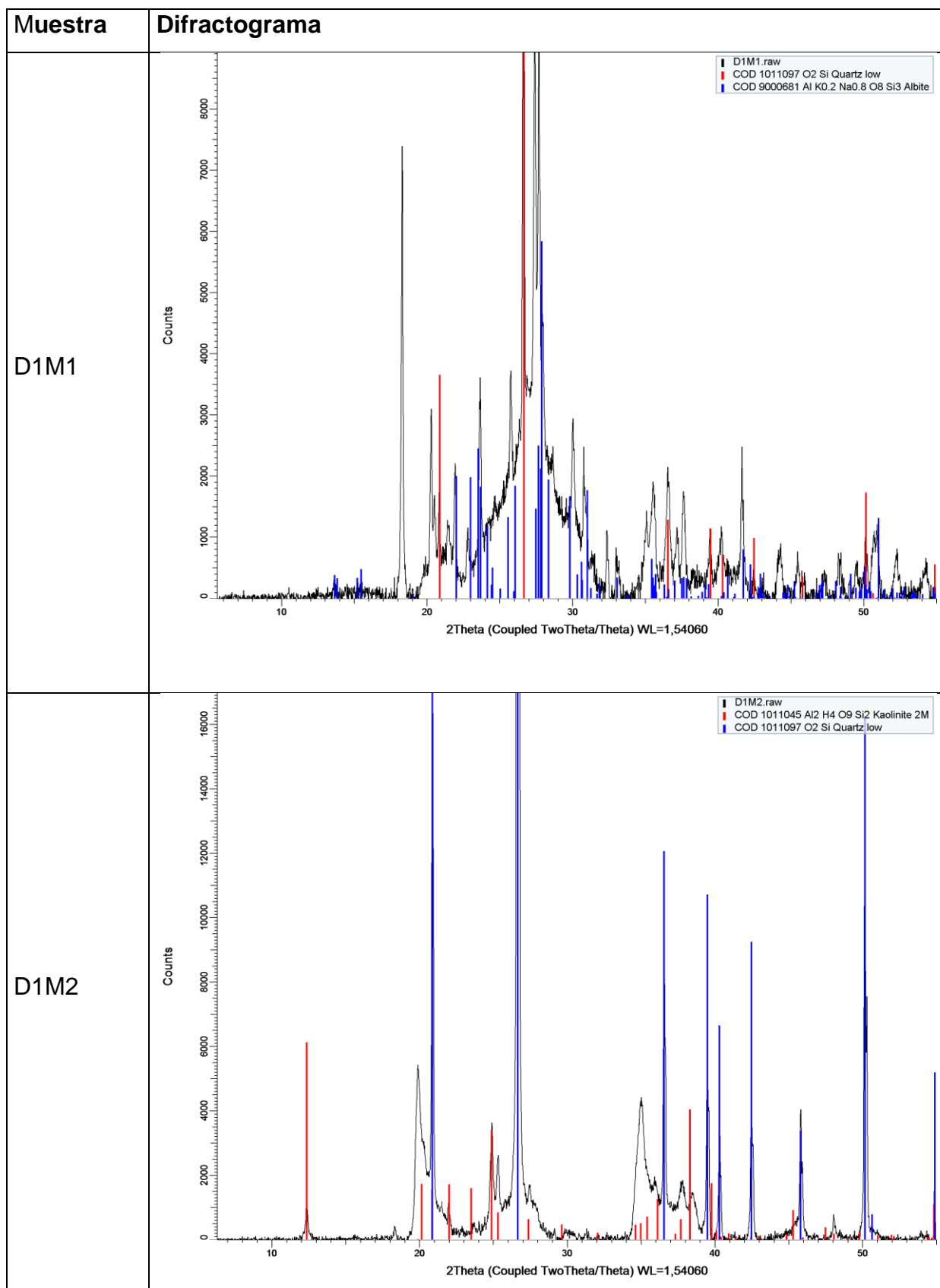
4.3. Selección de arcillas de uso potencial

A partir de los datos obtenidos en la caracterización de las muestras geológicas se procedió a hacer una selección de las arcillas con uso potencial en la elaboración de objetos cerámicos. Para el caso de las muestras de cerámica arqueológica, se procedió a realizar la evaluación de los resultados para definir posibles fuentes de materia prima, local o foránea.

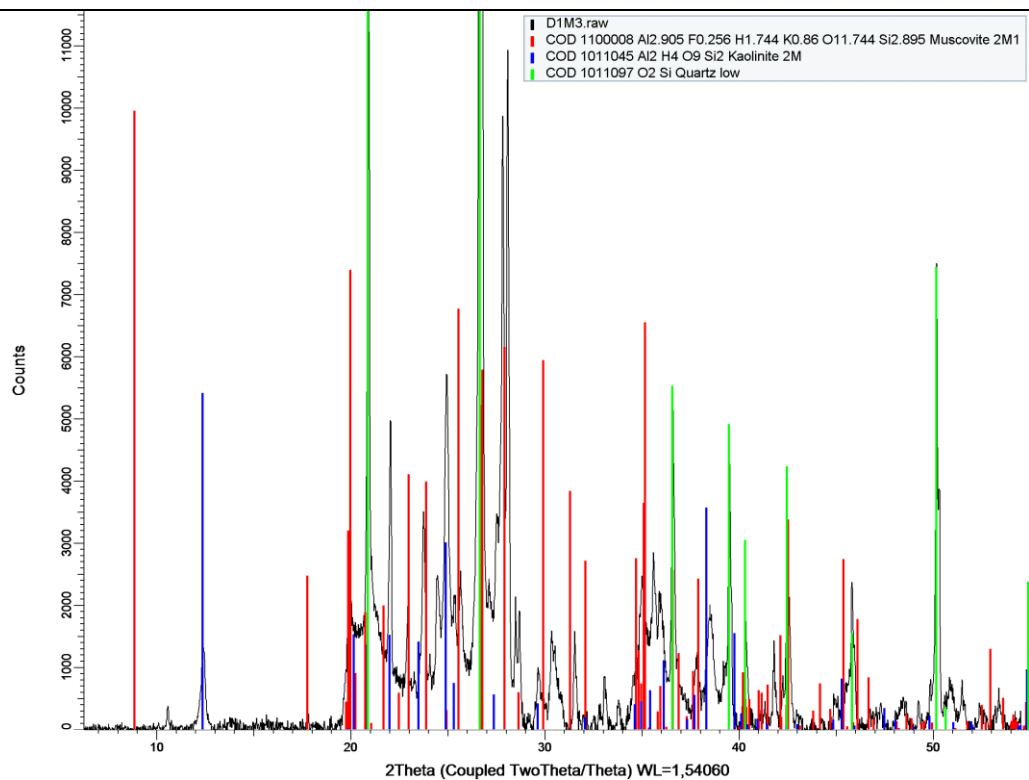
5. RESULTADOS Y DISCUSION

5.1. Análisis de la Composición Mineralógica y Química

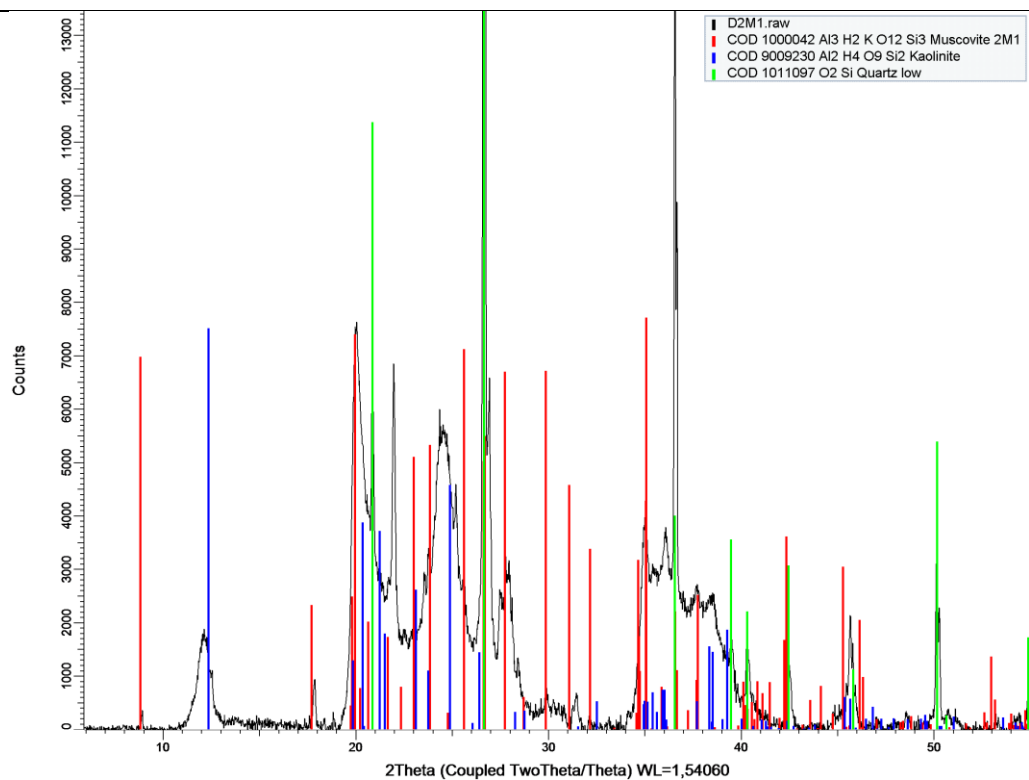
El objetivo de este análisis es identificar las muestras de sedimento con mayor contenido de arcillas, para continuar con el proceso de caracterización. Los espectros de DRX se muestran en a figura 8.



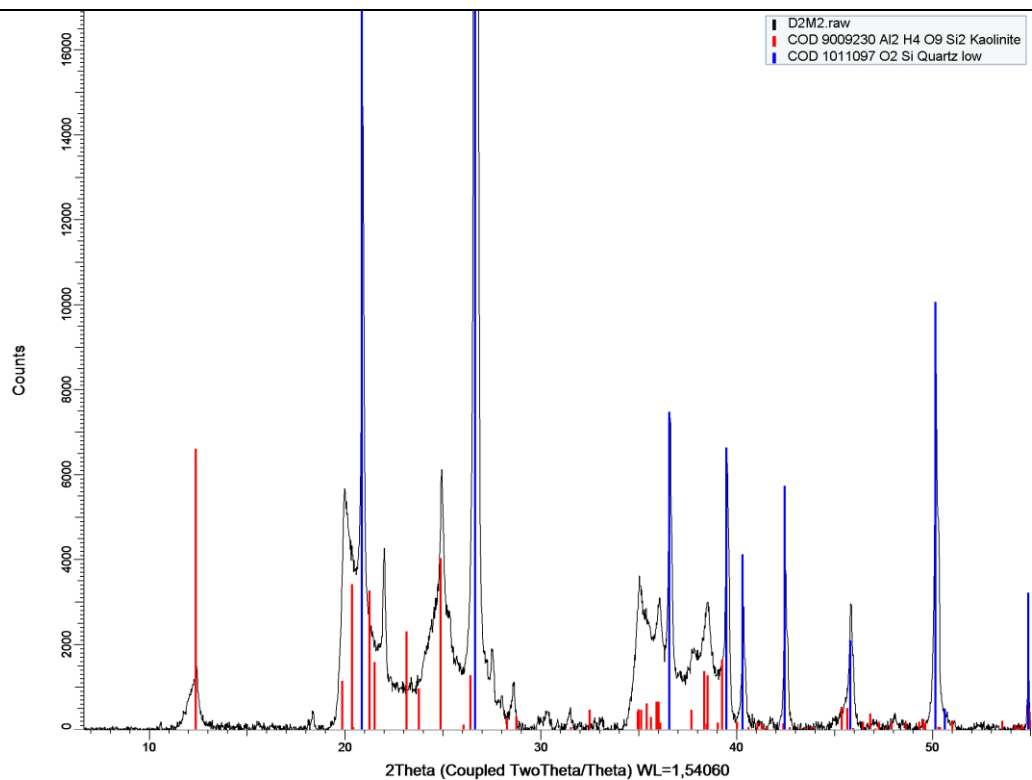
D1M3



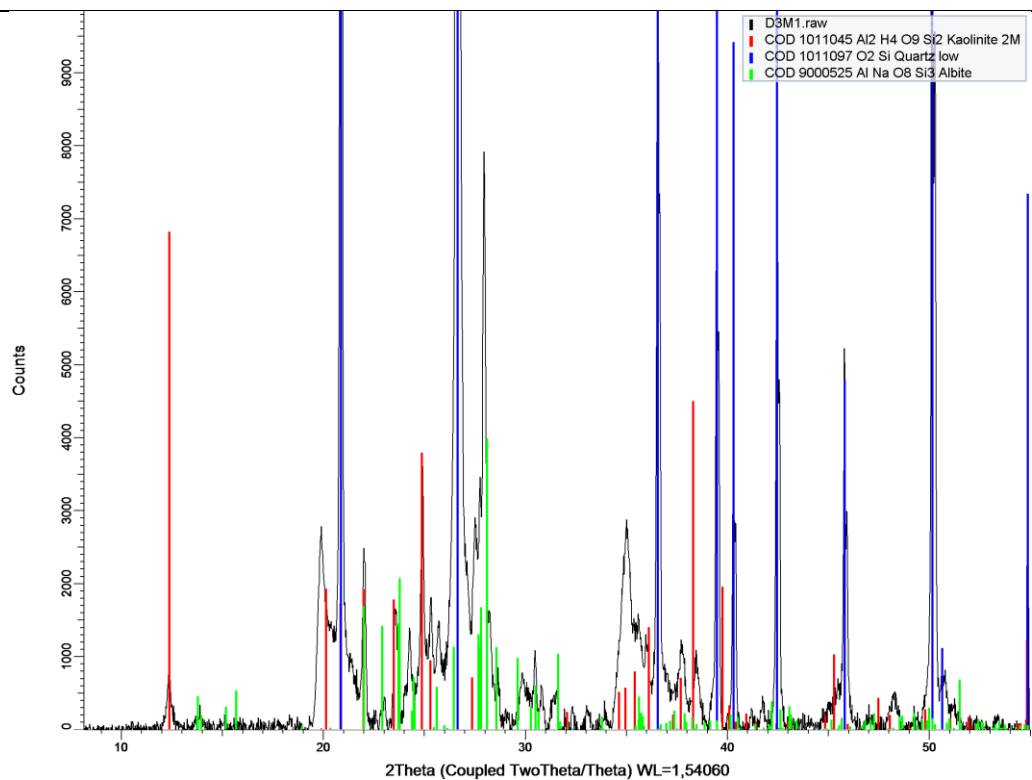
D2M1



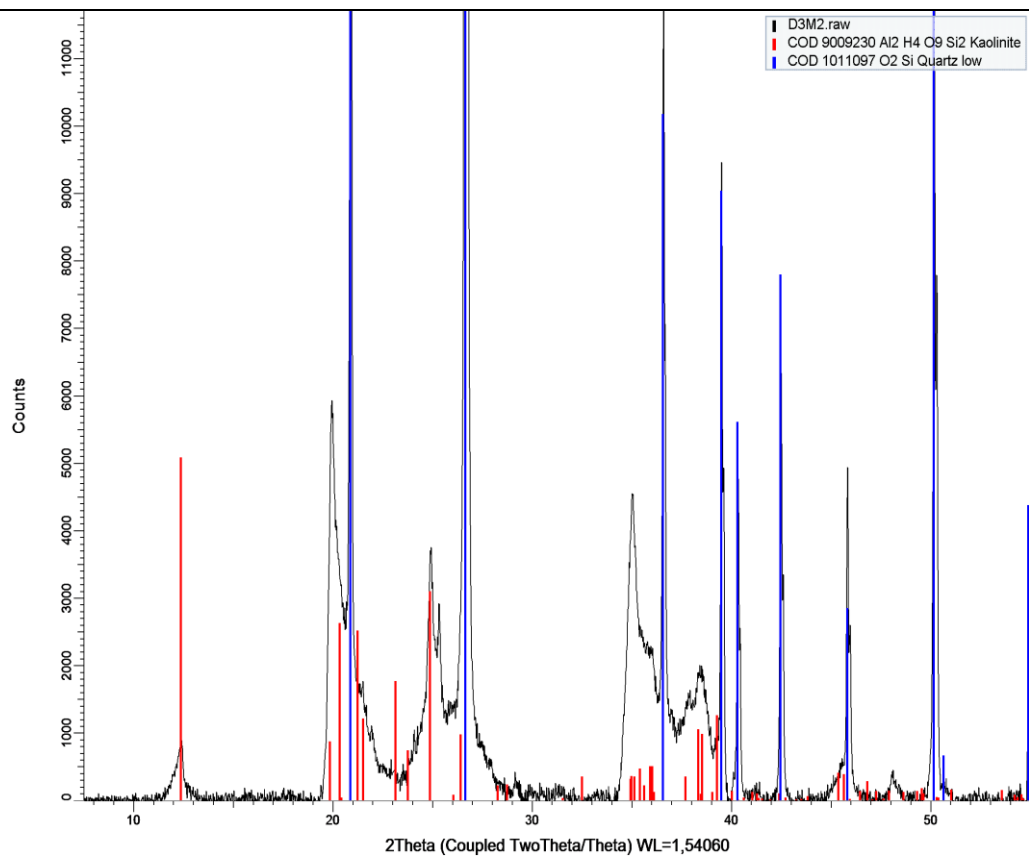
D2M2



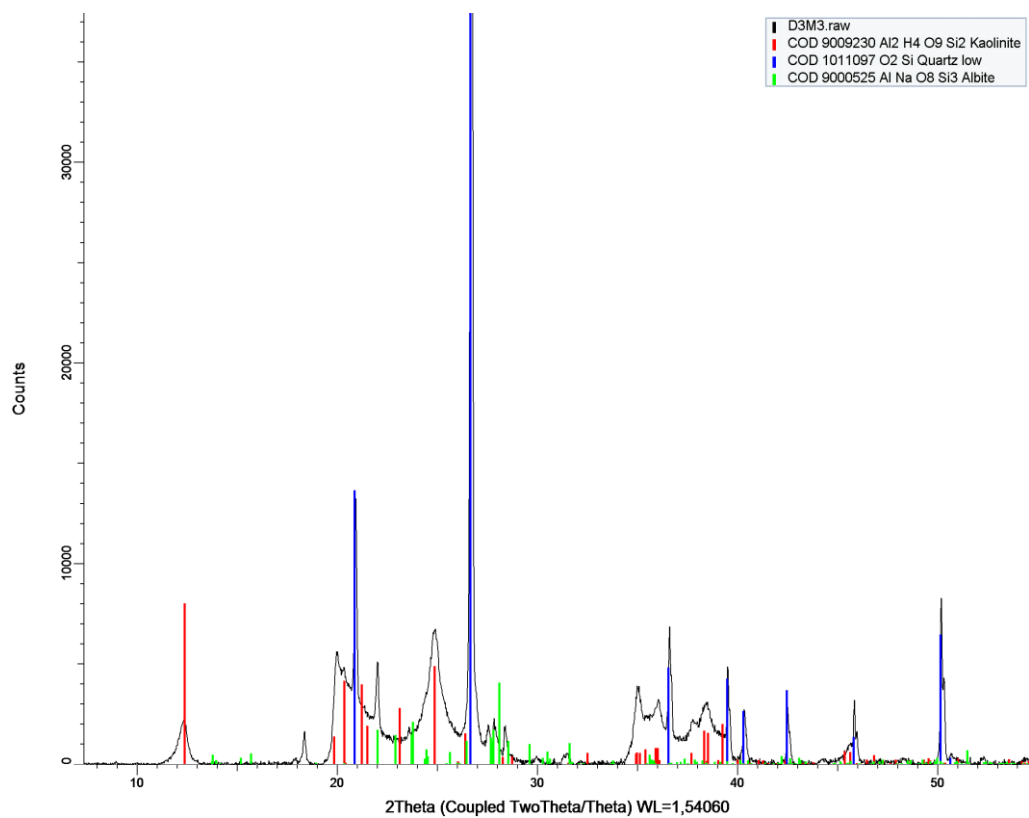
D3M1



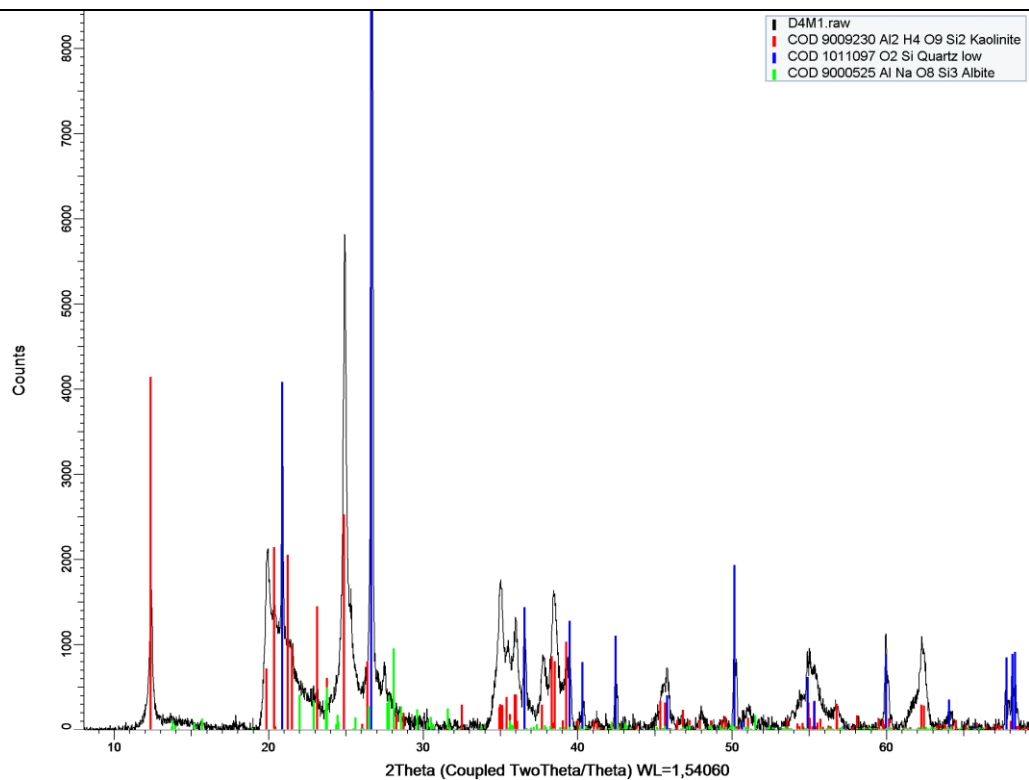
D3M2



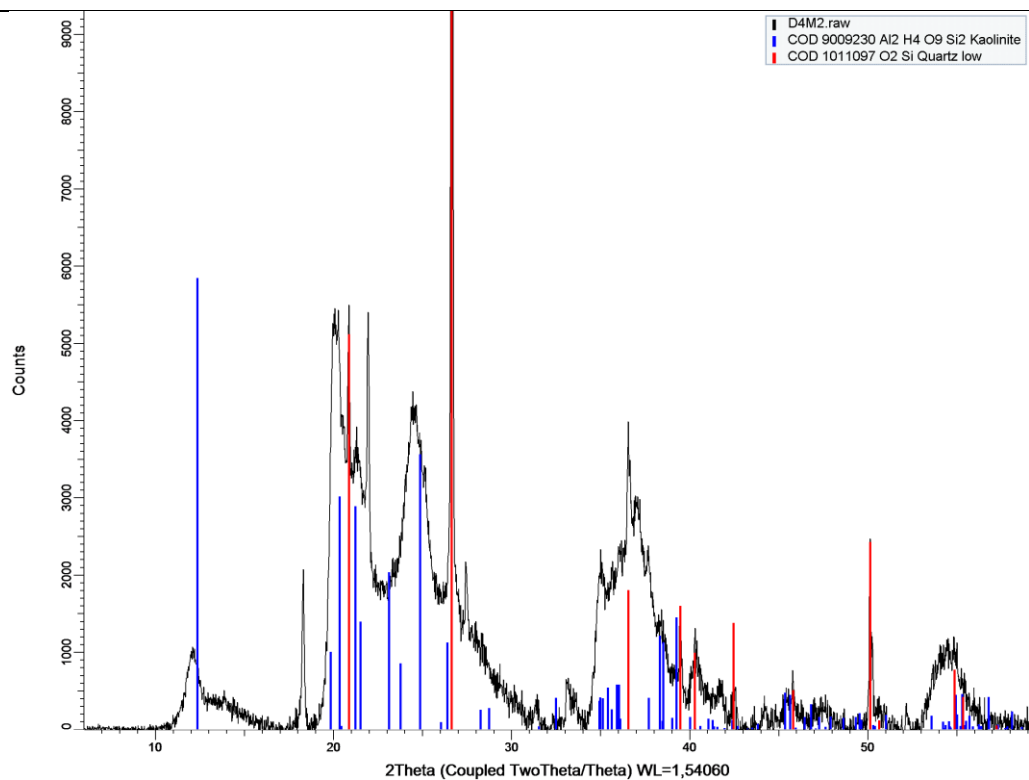
D3M3



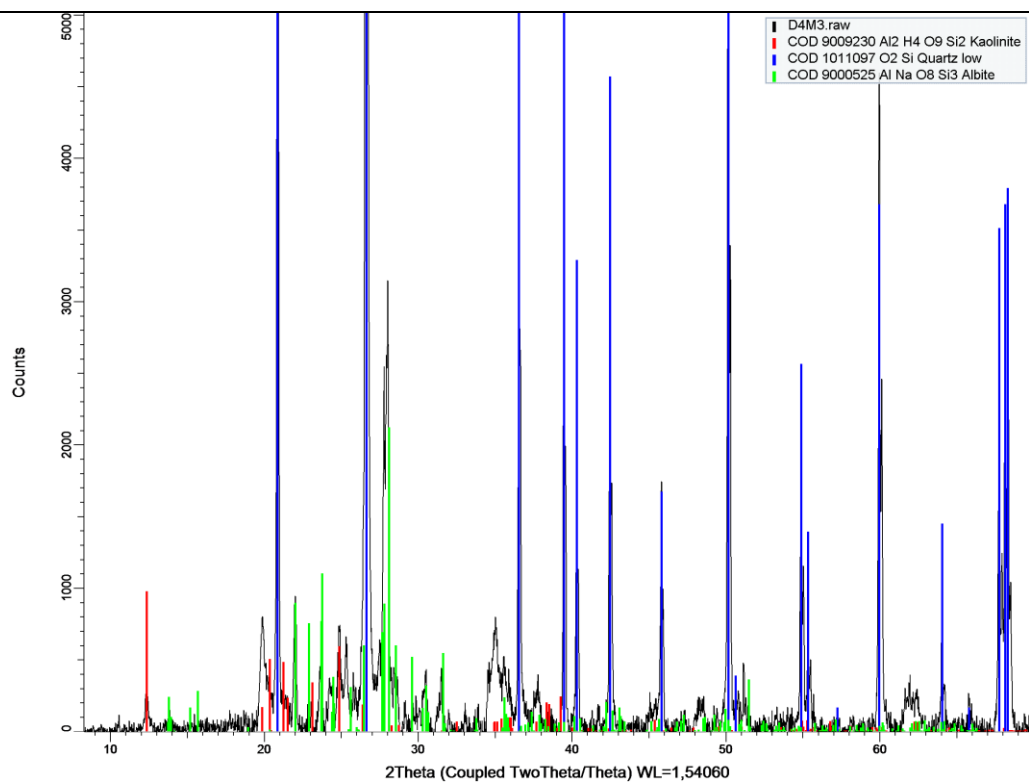
D4M1



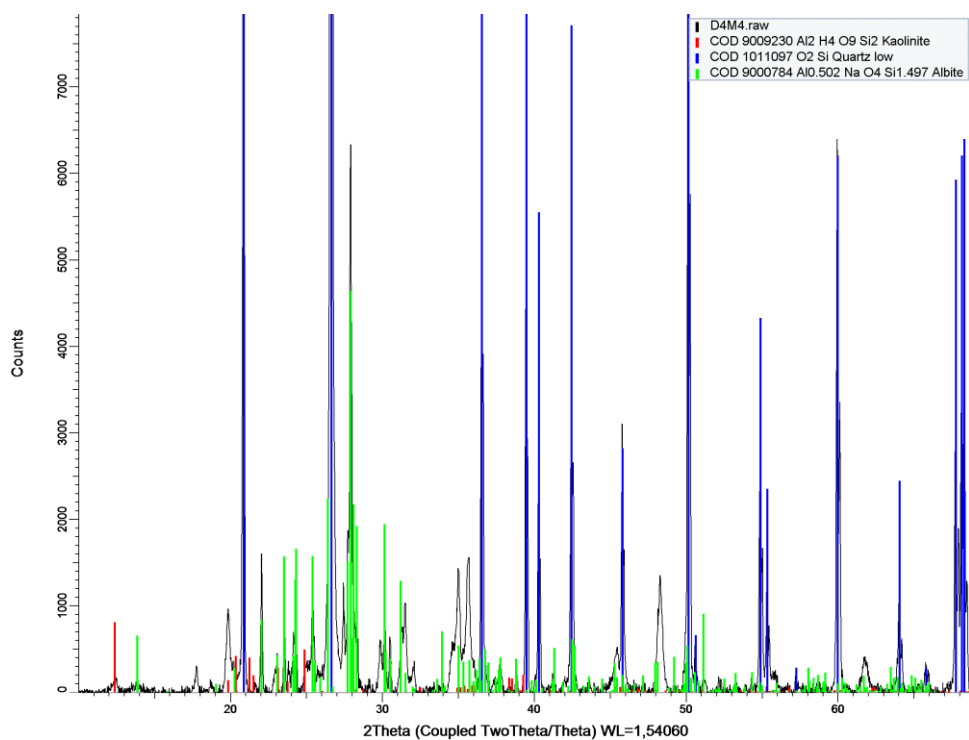
D4M2



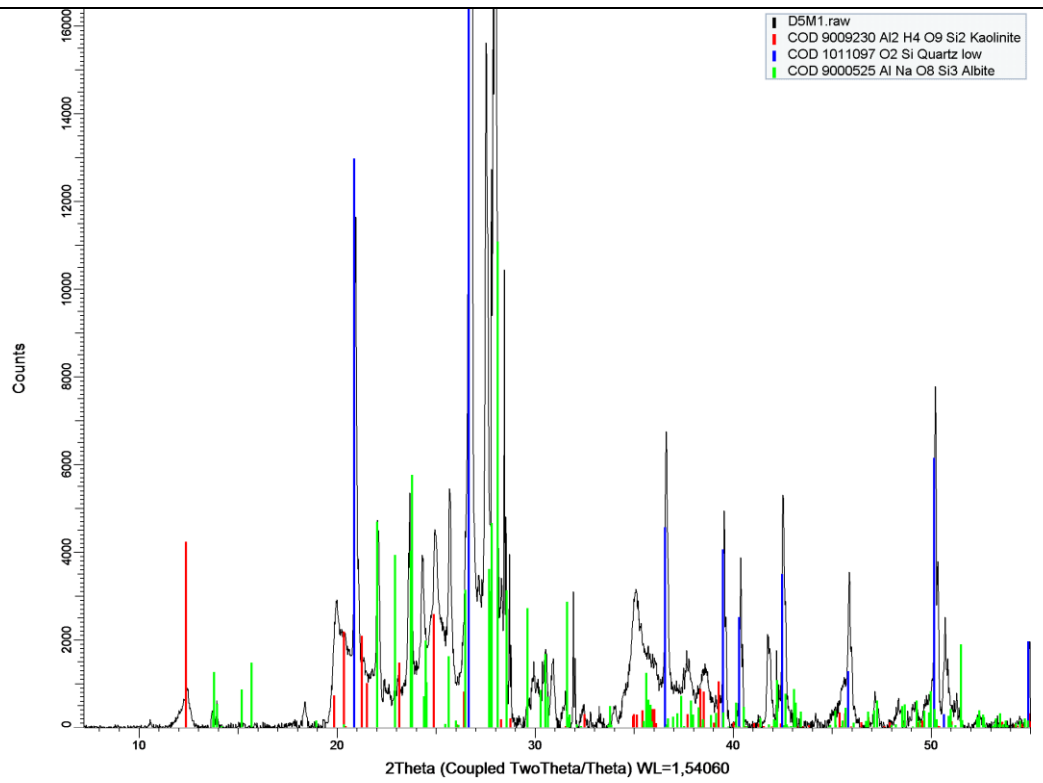
D4M3



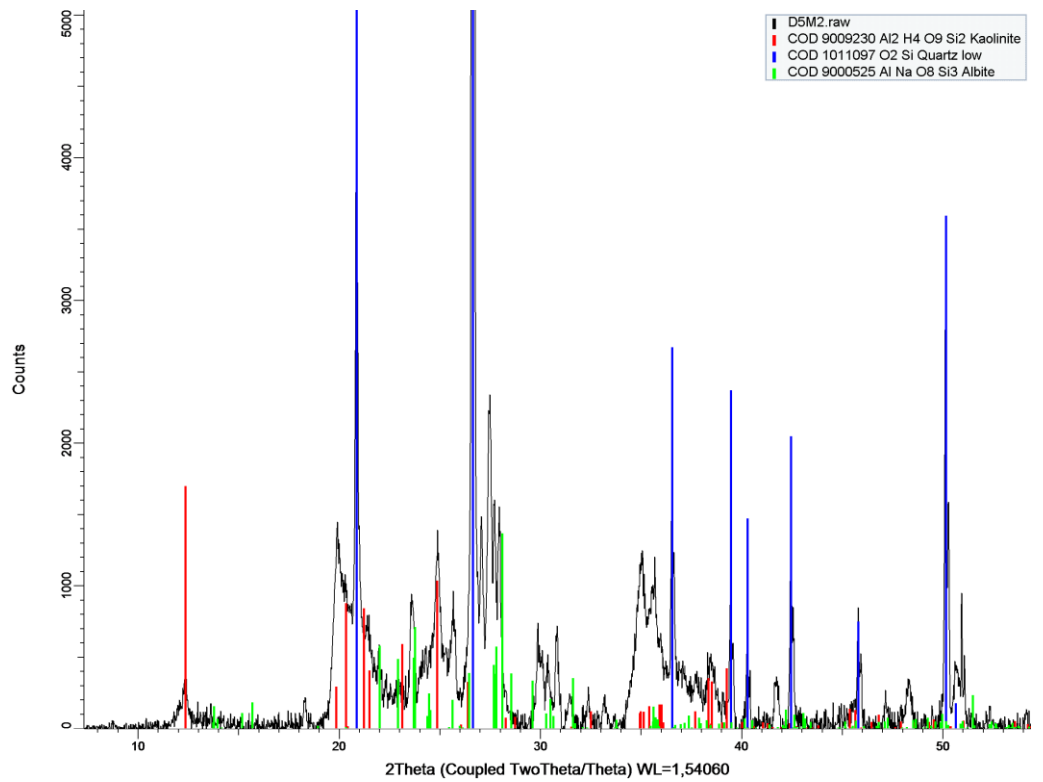
D4M4



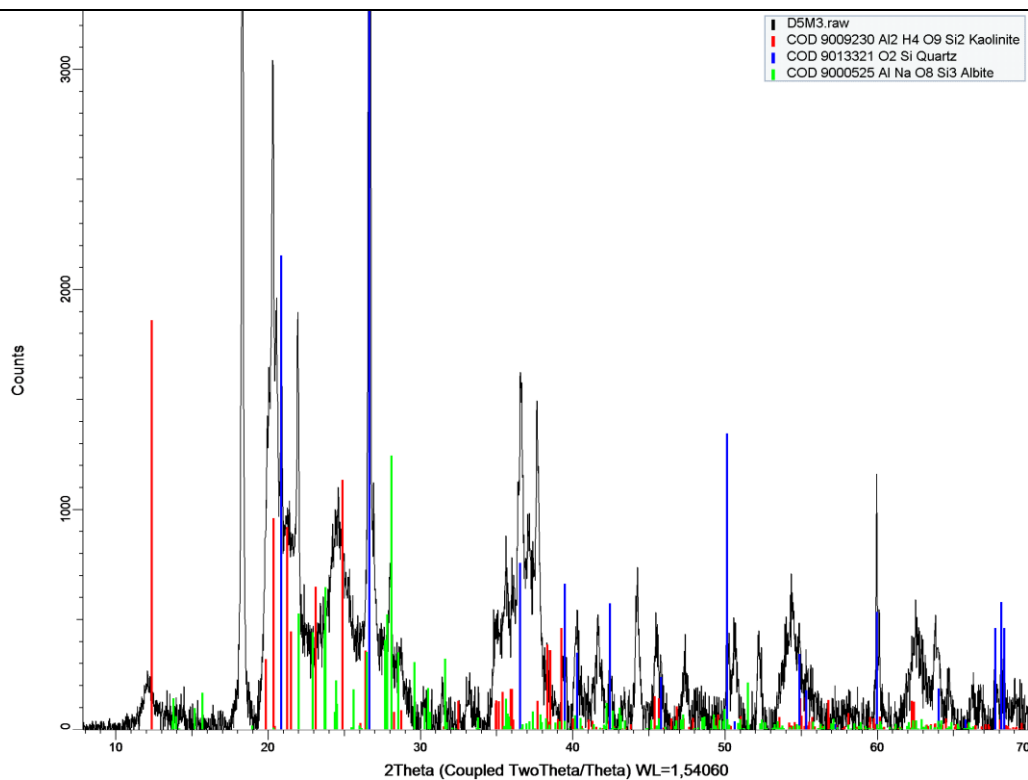
D5M1



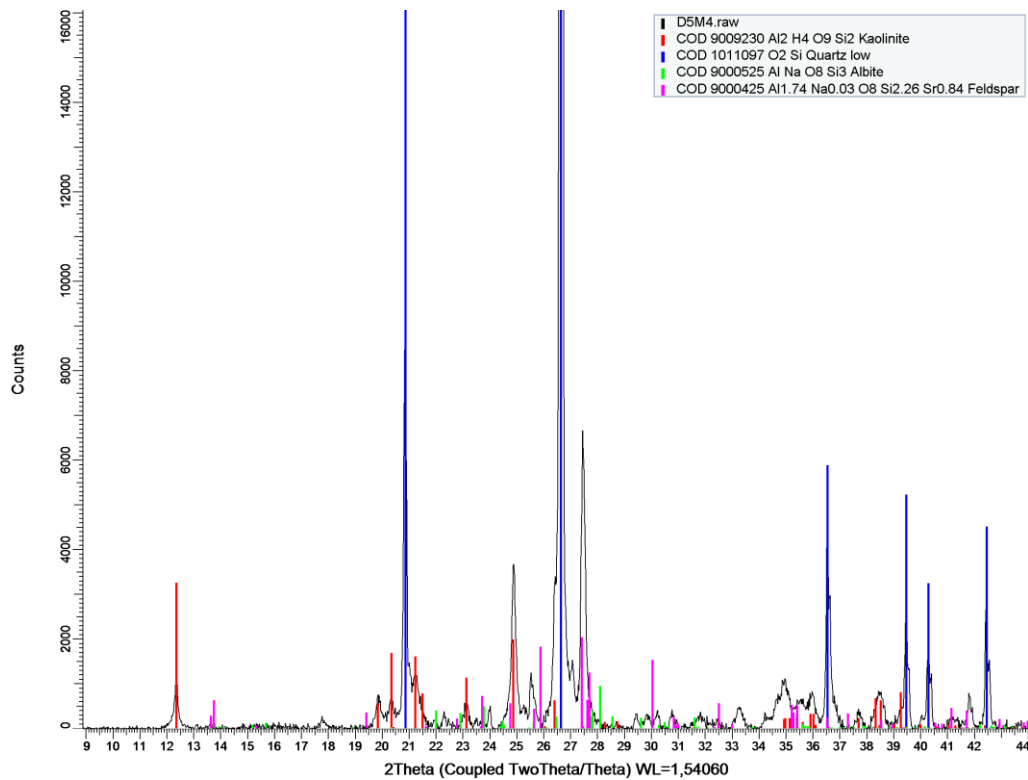
D5M2



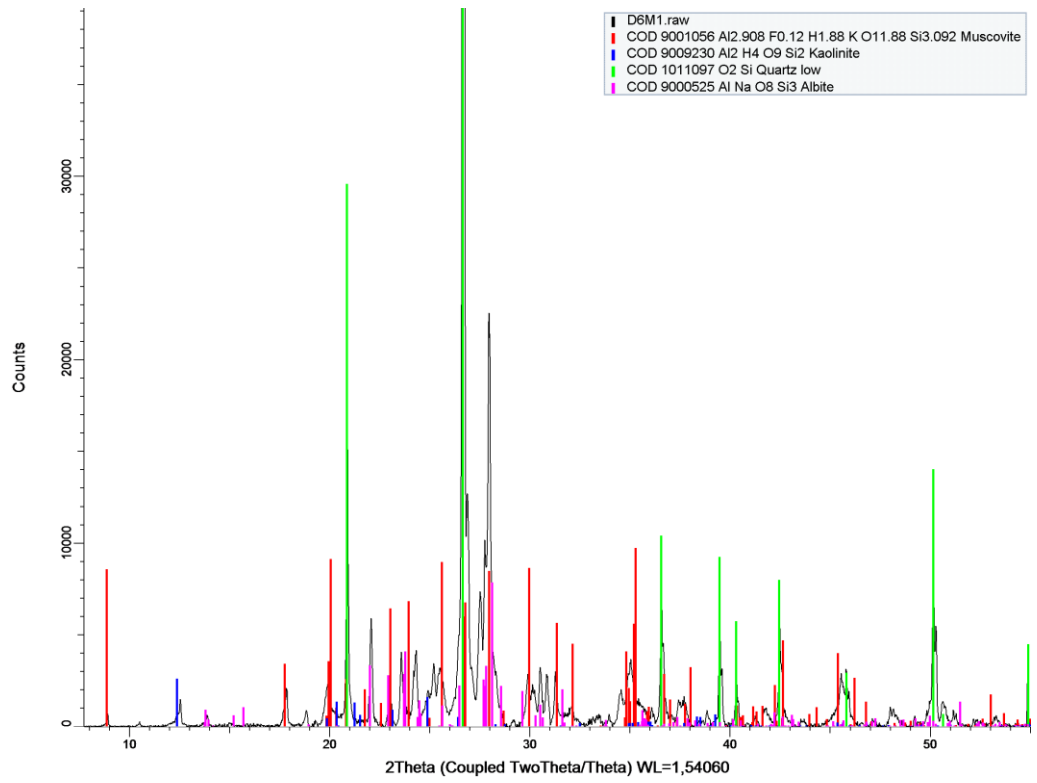
D5M3



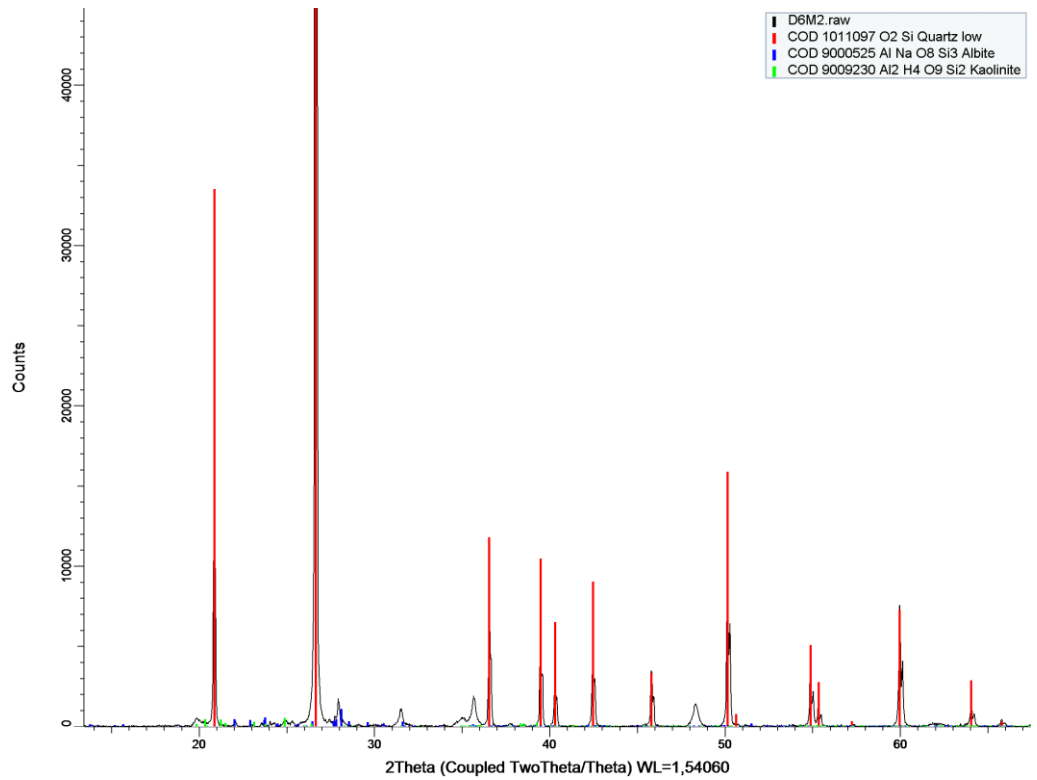
D5M4



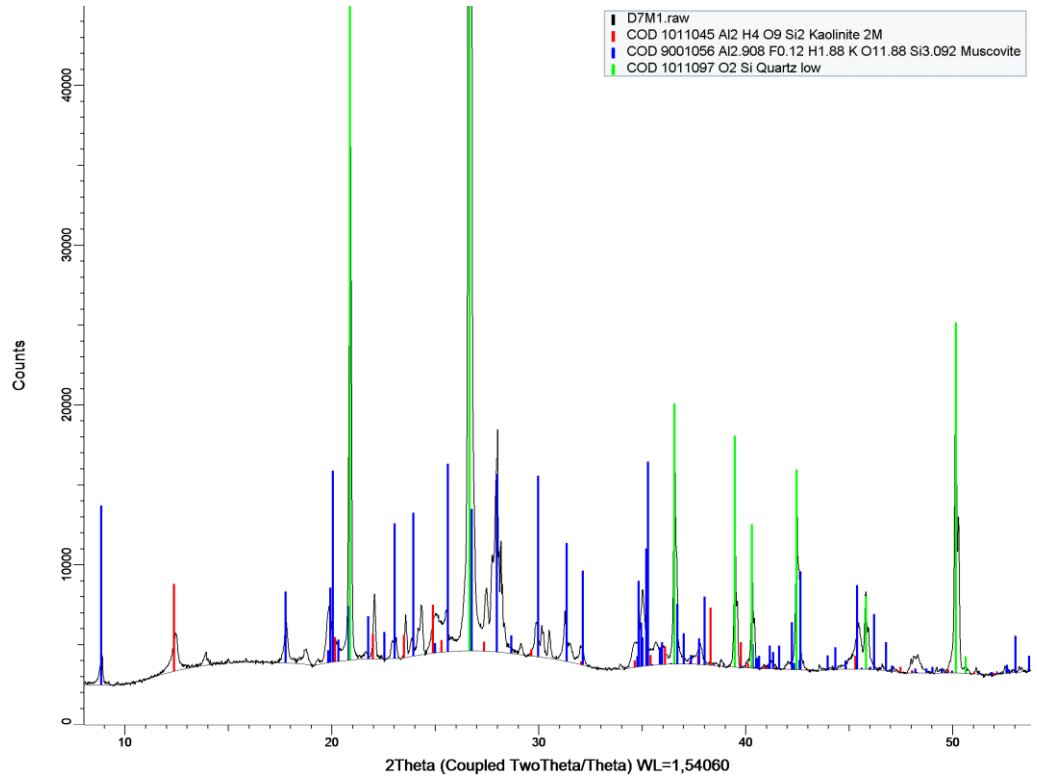
D6M1



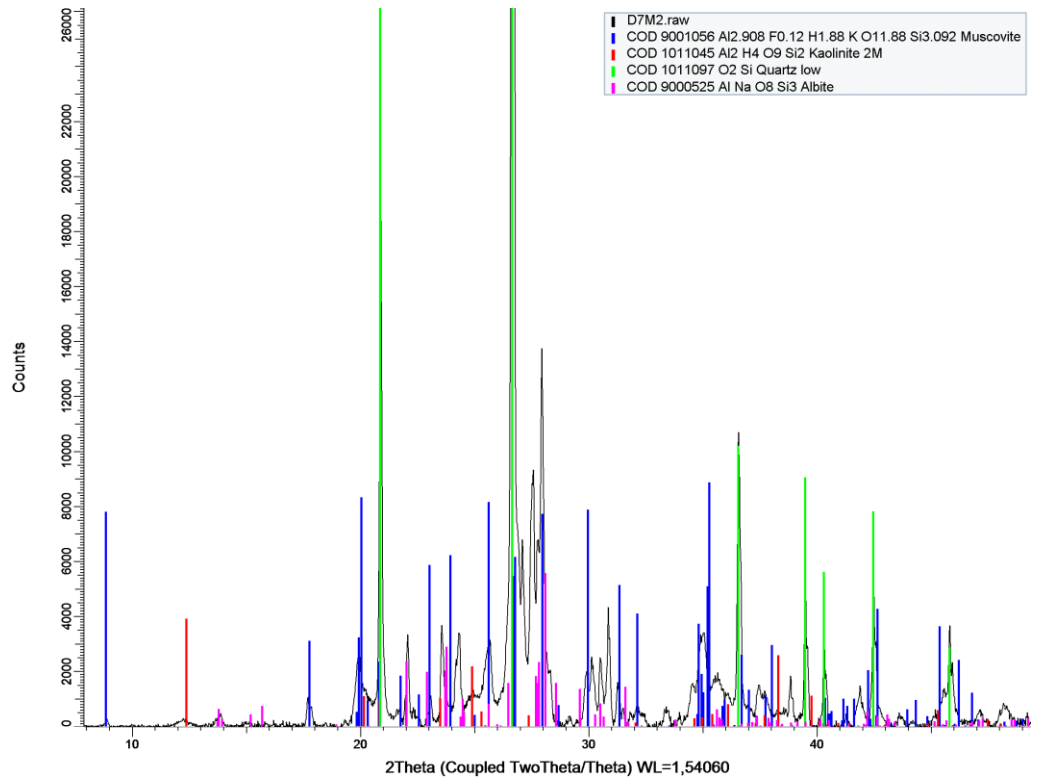
D6M2



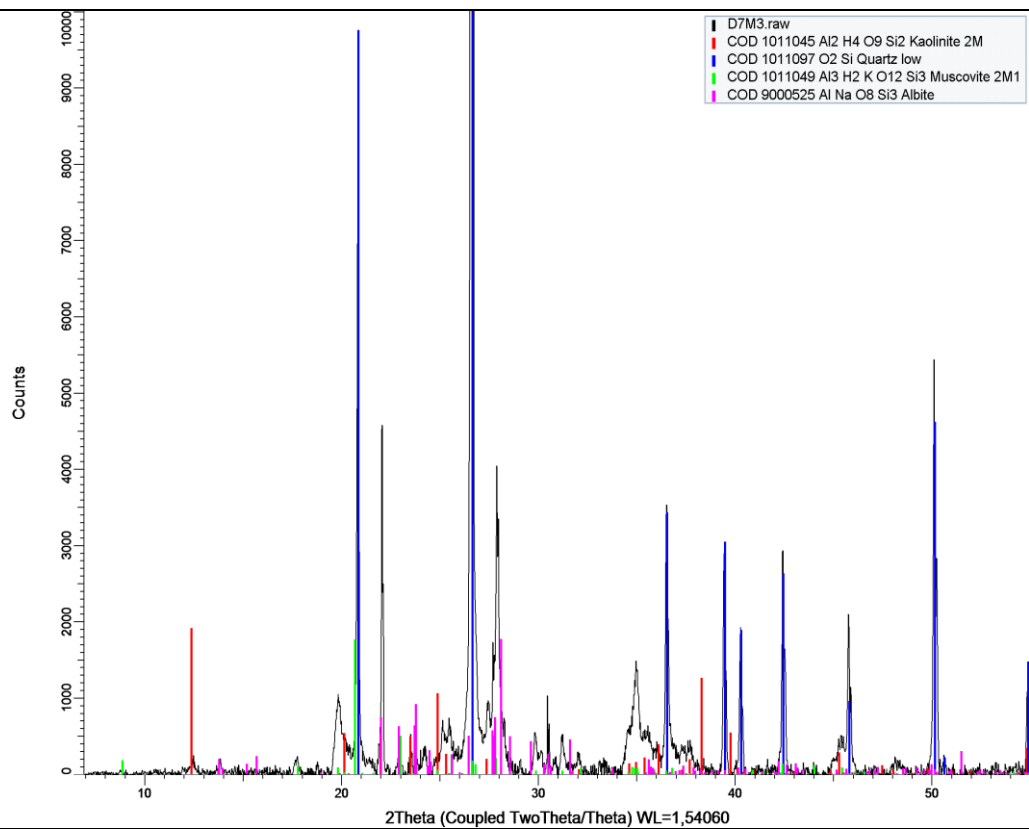
D7M1



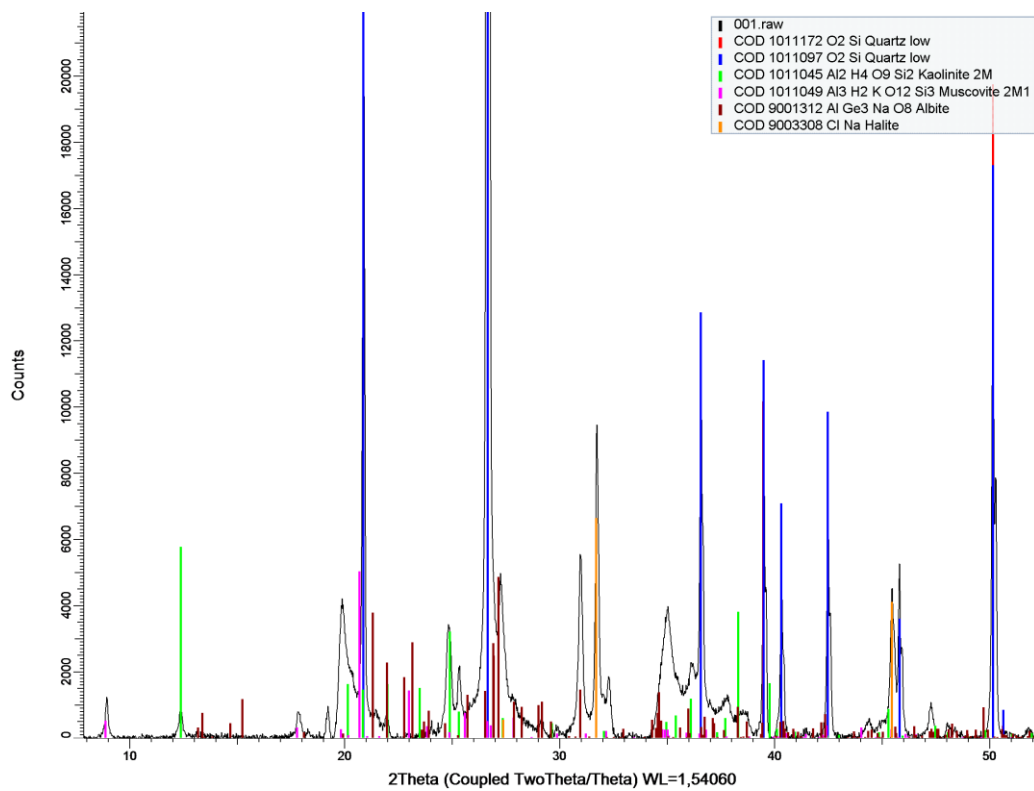
D7M2



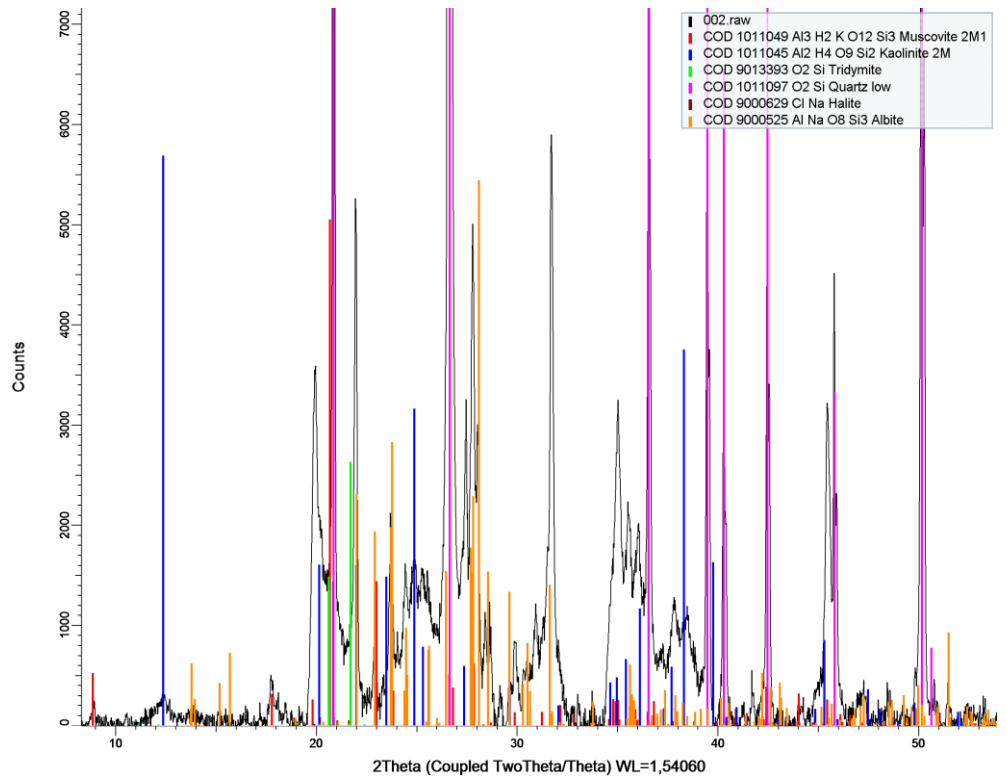
D7M3



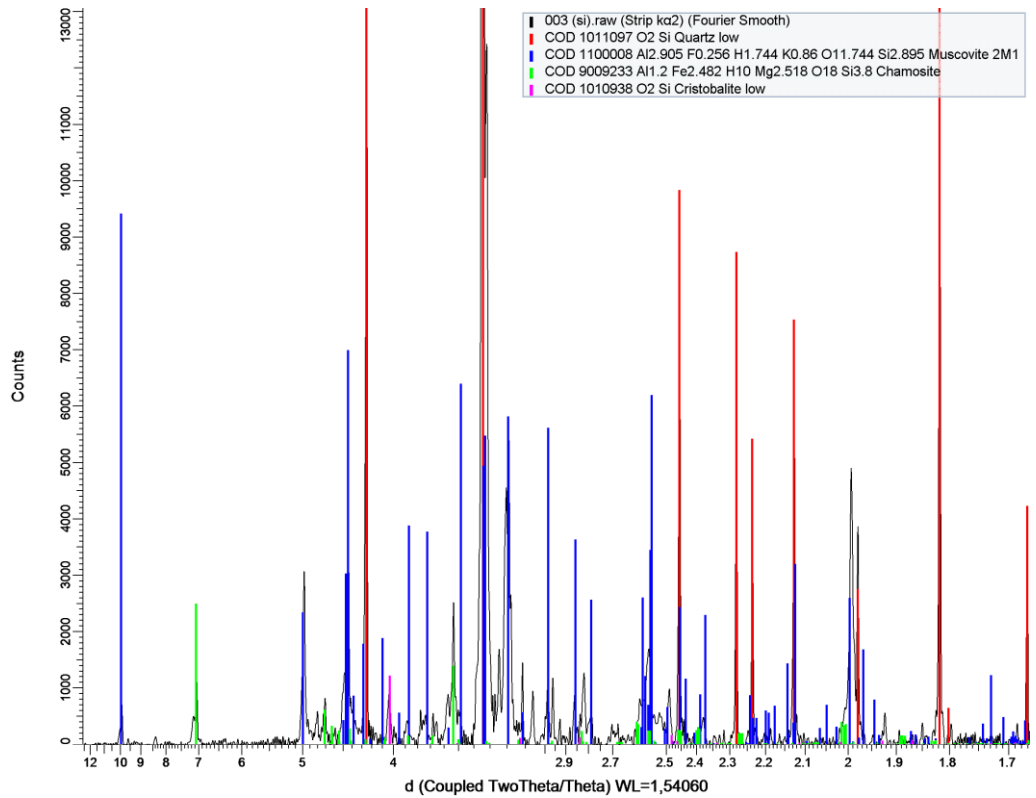
001Tena



002



003Ahuano



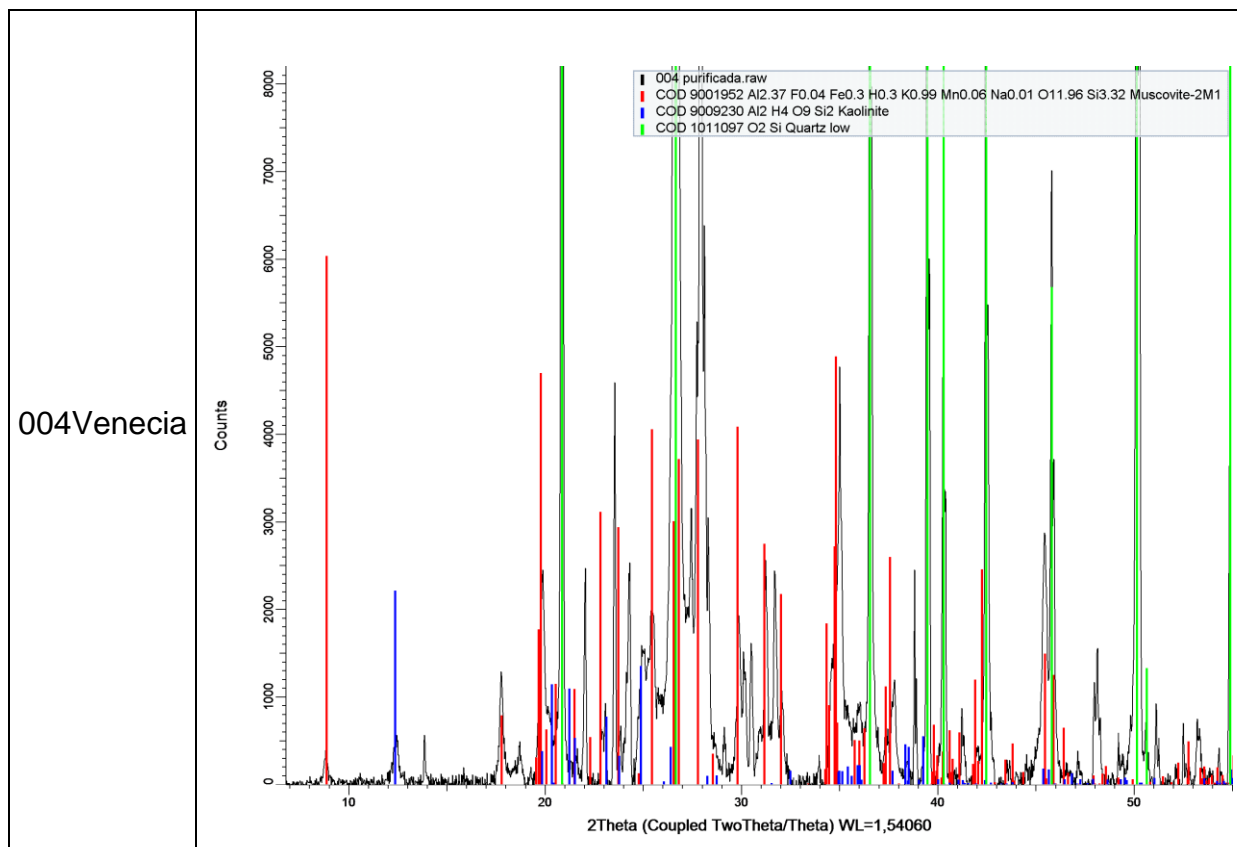


Figura 8. Espectros de difracción de Rayos X de las muestras de arcilla

En la tabla 2 se muestran las fases cristalinas presentes las muestras de arcilla mediante el análisis por difracción de rayos X. De los primeros resultados se puede evidenciar la presencia de arcillas de dos tipos:

Tipo 7°A (Te-Oc): Son filosilicatos tipo 1:1. Se trata de un grupo de arcillas formadas por tres capas, una hexagonal de O y dos compactas, una de O y otra de (OH) (Millot, 1970). Su estructura se puede observar en la figura 9. A este tipo pertenecen el grupo de los Caolines $\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{Al}_4(\text{OH})_8$ y las Serpentinias $\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{Mg}_6(\text{OH})_8$.

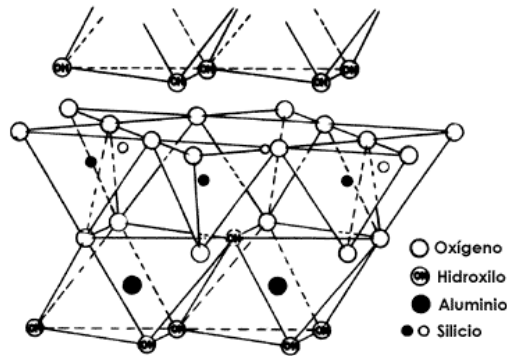


Figura 9. Estructura cristalina de filisilicatos tipo 1:1

Tipo 10°A (Te-Oc-Te): Son filisilicatos tipo 2:1. Son arcillas formadas por cuatro capas compactas de O y (OH) encerradas, a modo de bocadillo, entre dos capas hexagonales de O, su estructura se puede observar en la figura 10 (Millot, 1970). A este tipo pertenecen las arcillas de la familia de las Micas.

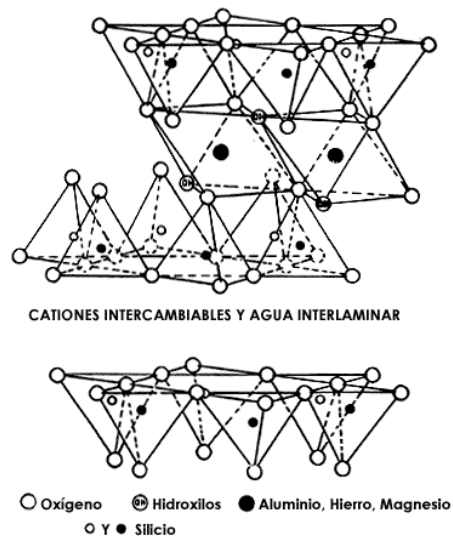


Figura 10. Estructura cristalina de los filisilicatos tipo 2:1

También están presentes las fases policristalinas de la sílice: cuarzo, cristobalita y tridimita. En algunas muestras se evidencias también la presencia de plagioclasas $((Na,Ca)(Si,Al)_3O_8)$.

Tabla 2. Composición mineralógica de las muestras de arcillas

Muestra	Caolines/ Serpentinas	Micas	Cuarzo	Feldespatos	Cristobalita	Otros
D1M1			X	X	X	
D1M2	X		X		X	
D1M3	X	X	X		X	
D1M4			X		X	tridimite
D2M1	X	X	X		X	tridimite
D2M2	X		X		X	
D3M1	X		X	X	X	
D3M2	X		X		X	
D3M3	X		X	X	X	
D4M1	X		X	X	X	
D4M2	X		X		X	tridimite
D4M3	X		X	X	X	
D4M4	X		X	X	X	
D5M1	X		X	X	X	
D5M2	X		X	X	X	
D5M3	X		X	X	X	
D5M4	X		X	X	X	
D6M1	X	X	X	X	X	
D6M2	X		X	X	X	
D7M1	X	X	X		X	
D7M2	X	X	X	X	X	
D7M3	X	X	X	X	X	
001	X	X	X	X	X	halita
002	X	X	X	X		tridimite
003		X	X		X	
004	X	XX	X			

A partir de estos resultados se realizó a una selección de las muestras con mayor contenido arcilloso de cada zona de interés para seguir con el proceso de caracterización. Las muestras seleccionadas fueron D1M4, D2M1, D3M3, D4M2, D5M1, D6M1, D7M1, 001Tena, 002, 003Ahuano y 004Venecia. Con la

finalidad de conocer las proporciones de las fases cristalinas presentes en las muestras, se realizó el análisis samu cuantitativo de las mismas.

Tabla 3. Composición mineralógica de las muestras de arcillas sin tratamiento

	Caolinitas	Muscovita	Cuarzo	Cristobalita	Tridimite	Feldespatos	Gibbsita
D1M4	7.51	16.46	15.28	1.33	35.10	7.71	12.50
D2M1	13.20	15.71	52.08	-	13.37	1.97	3.67
D3M3	23.46	17.61	39.24	-	12.93	2.90	3.86
D4M2	17.78	16.58	14.09	-	37.82	3.00	10.73
D5M1	5.12	0.70	27.66	-	7.03	56.03	1.28
D6M1	2.66	3.59	34.07	-	5.00	48.51	3.65
D7M1	5.67	7.27	49.07	-	4.60	27.32	4.00
001Tena	5.36	15.31	52.82	0.23	8.00	7.88	3.25
002	4.86	9.55	49.32	0.42	10.12	14.47	4.21
003Ahuano	5.66	11.23	47.19	0.003	2.98	20.81	7.28

En primer lugar se realizó la identificación más precisa de las fases cristalinas para lo cual, fue necesario trabajar con las muestras purificadas. Se sometieron nuevamente al análisis por DRX, obteniendo espectros con picos de mayor intensidad para las fases cristalinas que corresponden a las arcillas, lo que facilita la identificación más precisa de cada una de ellas, como se puede apreciar en la figura 11.

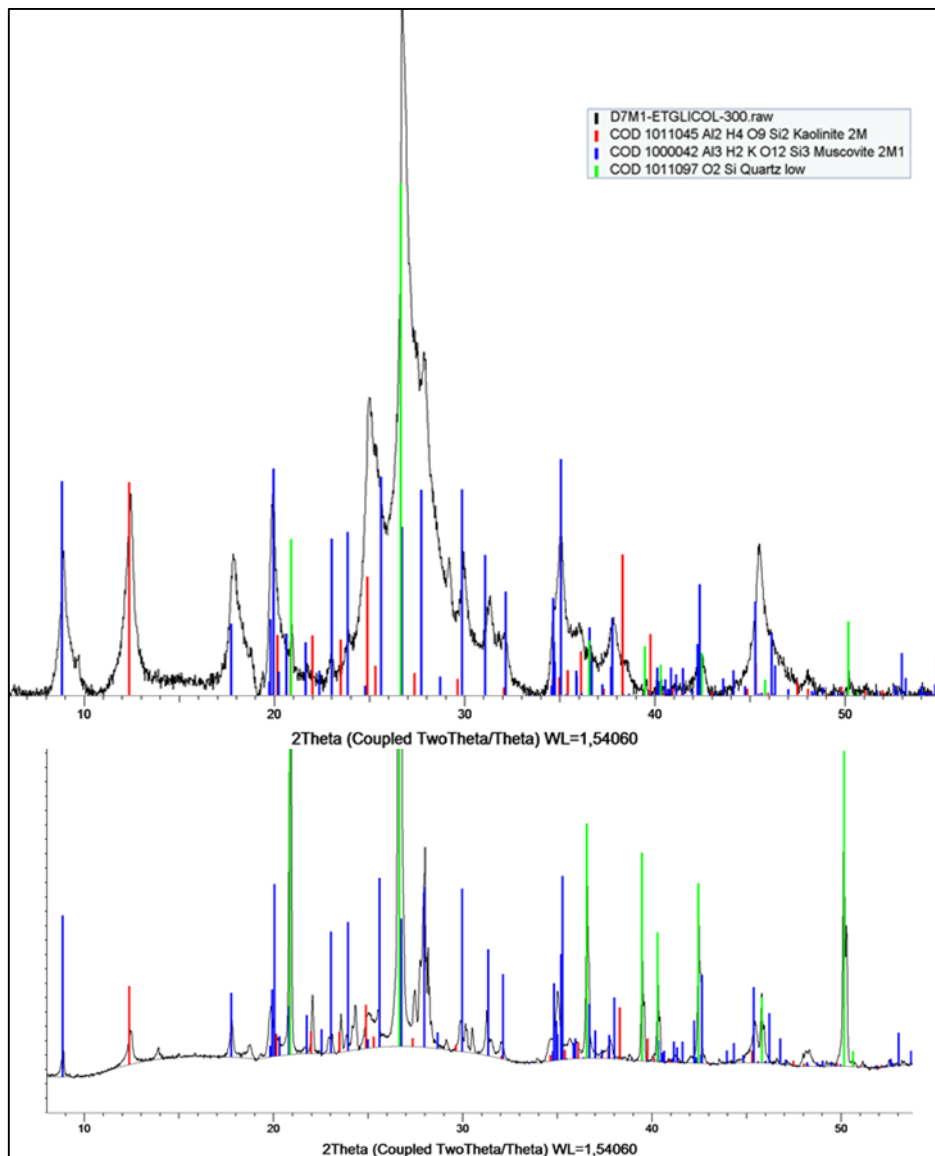


Figura 11. Espectros DRX: Abajo muestra sin tratamiento, Arriba muestra purificada

El análisis de los espectros DRX obtenidos permitieron corroborar la presencia de arcillas Tipo 7°A y 10 °A. Dentro de las arcillas del Tipo 7°A, se tiene a las caolinitas y la serpentina. El bajo contenido de magnesio (0,07 – 0,81%) (Tabla 4) en las muestras analizadas sugiere que se trata de caolinita $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ y no serpentina $\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8\text{Mg}_6$.

Dentro de la familia de las caolinitas se tiene al caolín o caolinita propiamente dicho, la nacrita y diquita. Para discriminar si se trata de caolinita y nacrita, se procedió a realizar un tratamiento con ácido fluorhídrico (HF) al 24% durante 2 y 5 min para un posterior análisis con Espectroscopia Infrarroja con transformadas de Fourier. Según investigaciones realizadas por Fraser (2002) en este método la caolinita se disuelve completamente, mientras que la nacrita no en su totalidad (Fraser, 2002).

En la figura 12 se presenta el espectro infrarrojo de la muestra D1M4 donde se observa que la caolinita se disuelve al hacer el tratamiento con HF en los picos 3690 y 3620 cm^{-1} . Estos picos corresponden a las vibraciones del estiramiento del enlace OH, los picos en 910 cm^{-1} y 796 cm^{-1} son característicos de las vibraciones en los filosilicatos (Ostrooumov, 2007).

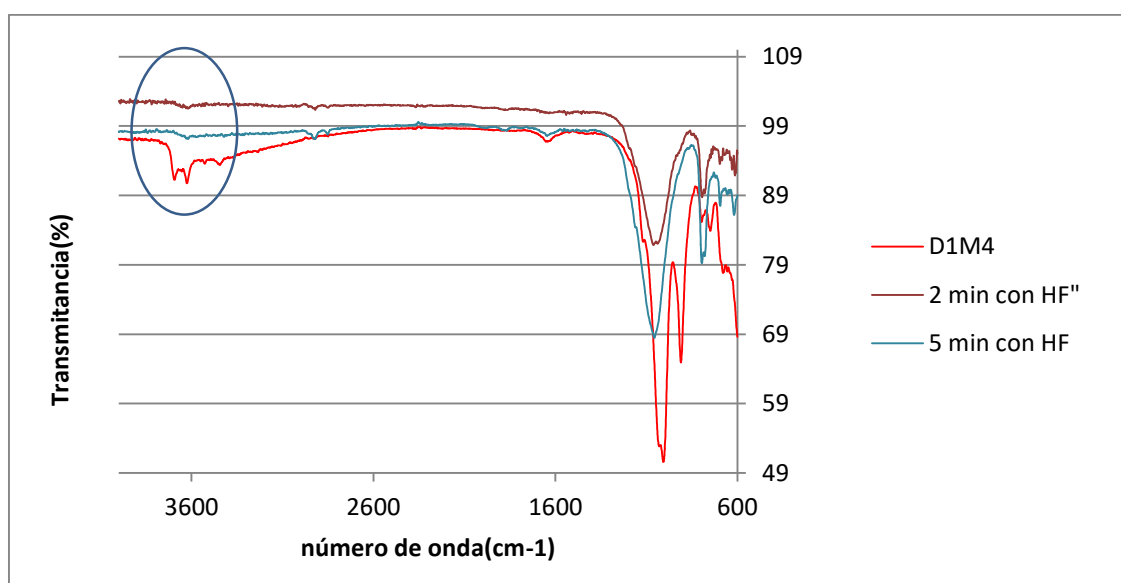


Figura 12. Espectro Infrarrojo de la muestra D1M4 tratada a 2 y 5 minutos

En tanto que en la figura 13, se tiene el espectro de la muestra D3M3 donde se observa que los picos en 3620 y 3690 cm^{-1} , si bien disminuyeron de tamaño no desaparecieron, lo que sugiere que se trata de nacrita, la cual no se disuelve al realizar el tratamiento con HF a diferentes tiempos de reacción (Fraser, 2002).

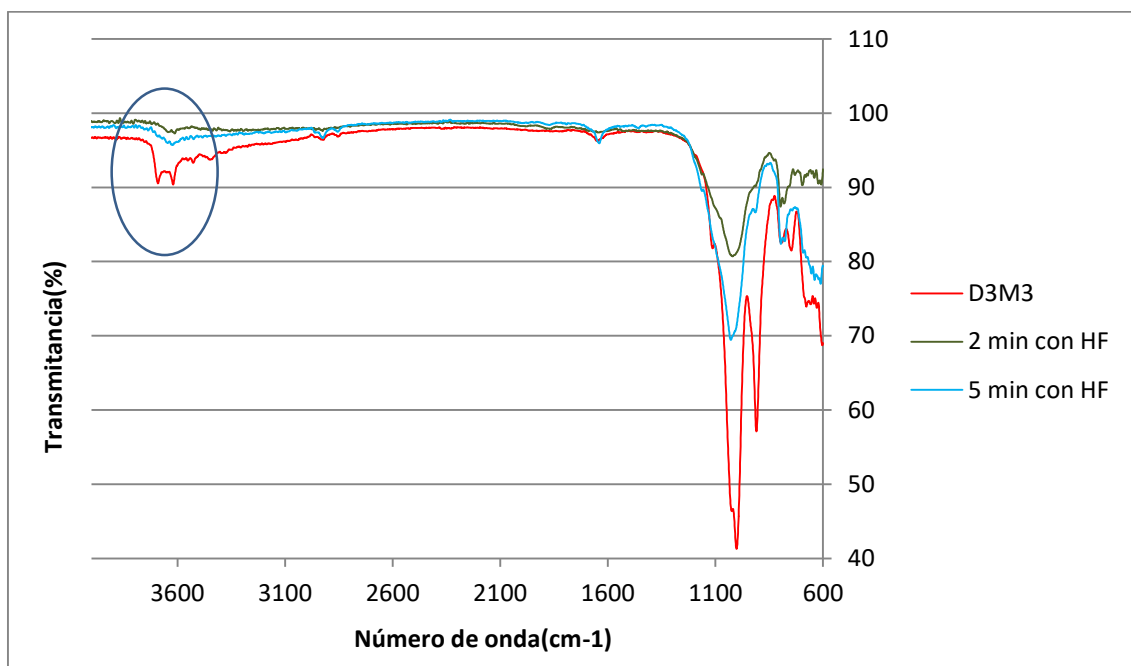


Figura 13. Espectro Infrarrojo de la muestra D3M3 tratada

Varias muestras fueron analizadas su morfología en el microscopio electrónico de barrido marca JEOL IT300. Las imágenes MEB (Fig. 14) son consistentes con los resultados anteriores, muestran el típico ordenamiento de las arcillas caolínicas, a manera de plaquetas de forma pseudo hexagonal apiladas, con espesor de 30 – 10 nm. El apilamiento de las plaquetas produjo “hojuelas” de varias decenas de micrones que son especialmente evidentes en todas las muestras. Estas estructuras han sido reportadas por varios investigadores (Ivanuc, 2105).

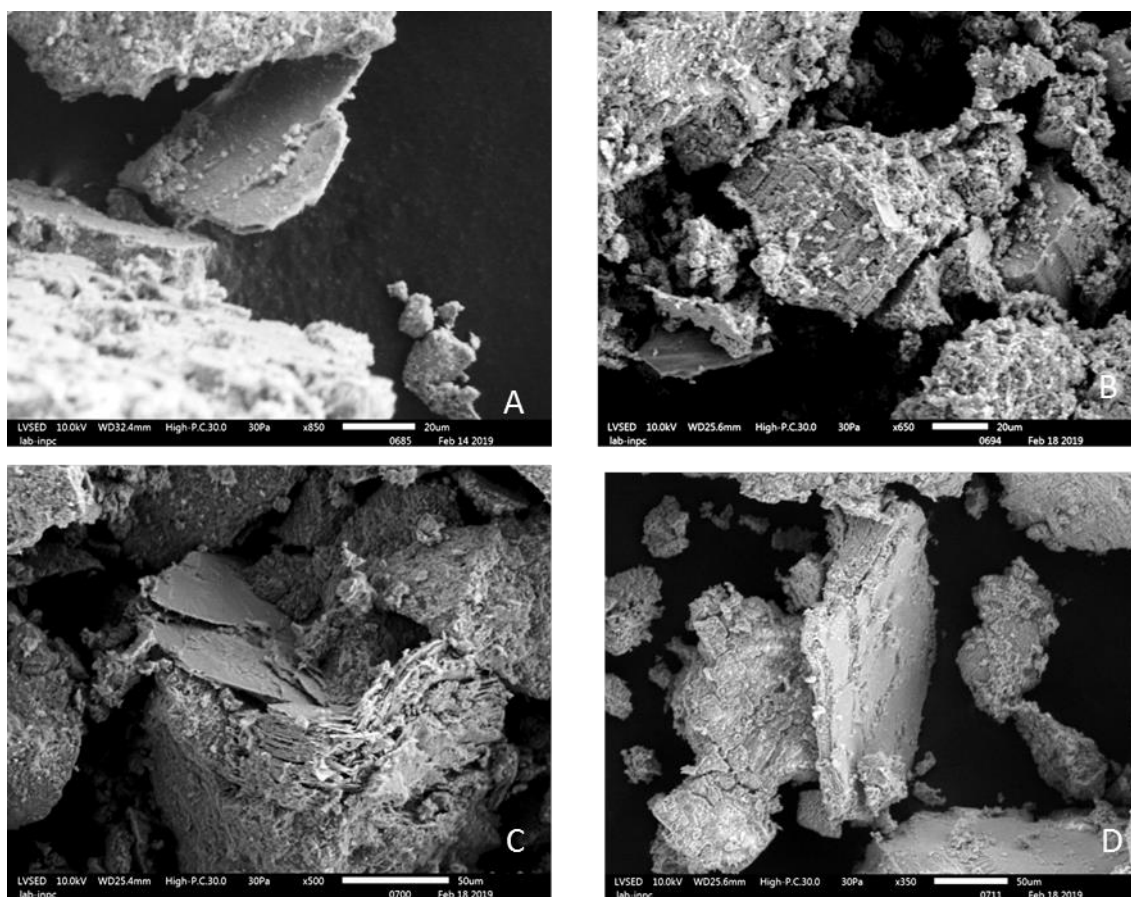


Figura 14. Imagen de MEB de agregados pseudo hexagonales de las muestras: A) Muestra D1M4, B) Muestra D2M1, C) Muestra D3M3 y D) Muestra D5M1

Los caolines son arcillas que cuecen de color blanco o crema con bajo contenido de óxidos de hierro (< 3%), que contiene por lo general más del 15% (P/P) de caolinita que proviene de la alteración de los feldespatos. Otros minerales como la nacrita, dickita y halloysita también pueden estar presentes. Para las muestras en estudio, se ha identificado la presencia de caolinita y nacrita, en porcentajes que varía entre 5 y 23% (Tabla 3). Los caolines tienen dos propiedades fundamentales que condicionan su uso en la producción de objetos cerámicos: su blancura al cocido y refractariedad. Tiene aplicaciones en la industria cerámica para la fabricación de cerámica decorativa, cerámica técnica y sanitaria, porcelana sanitaria, producción de baldosas, entre otros.

Para las arcillas Tipo 10°A, se tiene las arcillas que conforman la familia de las Micas. Para el caso de estudio pueden ser la muscovita o la illita. Las dos

arcillas presentan espectros muy similares, por lo que se realiza su identificación con tratamiento con etilenglicol y calentamiento a 300°C y posterior análisis por DRX. Ese tratamiento provoca un desplazamiento en el pico de 4,4 Å ya que la estructura se deforma al realizar una solvatación en la illita (Cando, 2010). Como resultado de la glicólisis se pudo observar en los espectros (Fig. 15) que el pico de 10°A y de 4.4° no presenta ningún corrimiento, por lo que se descarta la presencia de illita y por consiguiente la fase cristalina se identifica como muscovita (Cando, 2010).

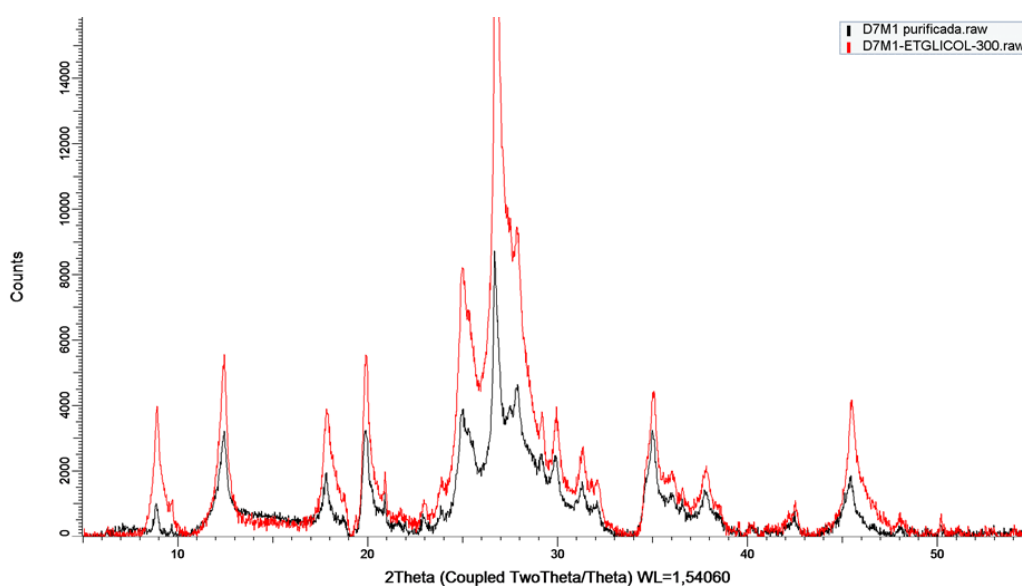


Figura 15. Espectros de las muestras D6M1 Y D7M1 con tratamiento de glicólisis

La muscovita junto con el cuarzo, fedespatos y óxidos de hierro son minerales que se encuentran asociados al caolín. La muscovita incrementa el contenido de óxidos alcalinos y óxidos de hierro. En las muestras analizadas el contenido de la muscovita varía entre 3-18 micras.

Así mismo, se analizaron en el microscopio electrónico de barrido marca JEOL IT3002 dos muestras que tenían un contenido importante de muscovita para observar su morfología. Las imágenes MEB (Fig. 146) son consistentes con los resultados anteriores, muestran la típica superposición de un conjunto de

placas paralelas (lamelar). Esta estructura también fue observada por otros autores (Kalenda, 2004) (Moate, 2012).

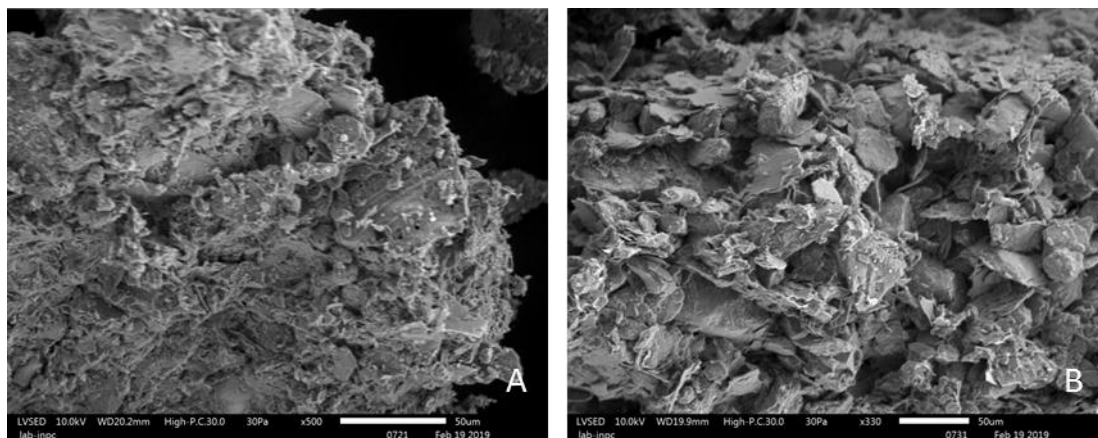


Figura 16. Imagen MEB de la muscovita de las muestras: A) D6M1 y B) D7M1

En la tabla 3 se muestra los resultados del análisis cuantitativo por Difracción de Rayos X realizado a cada una de las muestras seleccionadas y purificadas. De los resultados se puede observar que las muestras tiene proporción variable de una mezcla de caolinitas y muscovita, que sumadas están entre 50 y 80%, acompañados de las fases policristalinas del óxido de silicio SiO_2 (cuarzo, cristobalita y tridimita) y gibsita. En las muestras D5M1, D7M1, 002 y 004 hay presencia de feldespatos.

Las caolinitas y muscovita son minerales arcillosos como se había definido anteriormente. Los óxidos de silicio policristalinos se encuentran asociados a la mayoría de arcillas en estado libre y son producto de los procesos de diagénesis o formación de las mismas. Los feldespatos son principalmente alcalinos y alcalinotérreos y provienen de matrices rocosas. Finalmente la gibsita es un polimorfo del $\text{Al}(\text{OH})_3$, producto final del procesos de meteorización, por tanto se encuentra asociada a las arcillas al igual que la sílice.

Tabla 3. Composición mineralógica de las muestras purificadas

Muestra	Caolinitas	Muscovita	Cuarzo	Cristobalita	Tridimite	Feldespatos	Gibbsita
D1M4	34.93	15.82	6.05	3.61	29.87	-	9.72
D2M1	42.32	22.32	0.75	6.80	23.29	-	4.51
D3M3	67.68	12.13	3.70	3.33	9.50	-	3.66
D4M2	56.27	11.86	3.11	4.39	17.55	-	6.38
D5M1	50.66	14.60	10.12	3.01	9.70	6.58	5.33
D6M1	18.04	33.00	18.36	3.33	1.88	-	6.89
D7M1	53.88	24.76	3.72	1.81	2.36	11.23	
001Tena	52.35	3.09	35.71	3.17	7.22	-	2.83
002	60.37	1.61	26.82	1.52	4.96	5.73	2.72
003Ahuano	76.26	1.01	16.86	1.43	1.01	-	3.83
004Venecia	3.47	30.86	30.92	7.80	3.79	10.82	6.80

En la tabla 4 se muestra los resultados del análisis químico de las muestras por espectroscopía de dispersión de rayos X. Se puede observar que los componente mayoritarios son silíceos (SiO_2 : 61-68 %) y aluminicas (Al_2O_3 : 23-41 %), con una relación de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ en peso de 1.1 a 2.8.

El contenido de óxido de silicio (SiO_2) reportado en la tabla 4 corresponde a la sílice libre, así como también proviene de los minerales arcillosos y los feldespatos. Para la alúmina (Al_2O_3), por su parte, su contenido está íntimamente relacionado con los minerales arcillosos, los feldespatos y la alúmina libre (gibbsita). El porcentaje de óxido de calcio (CaO) y el óxido de sodio (Na_2O), en cambio, provienen de las plagioclasas. El contenido de óxido de potasio (K_2O) tiene que ver con la presencia de feldespatos de potasio y la

muscovita. Finalmente los porcentajes de hierro (Fe_2O_3) y titanio (TiO_2) están relacionados con los óxidos de hierro y titanio que normalmente se encuentran presentes en los suelos.

Tabla 4. Composición química de las muestras arcillosas

Muestra	SiO₂ %	Al₂O₃ %	Fe₂O₃ %	TiO₂ %	K₂O %	CaO %	MgO %	Na₂O %
D1M4	55.54	41.37	0.83	1.14	0.27	0.05	0.15	0.45
D2M1	54.33	41.51	1.61	1.15	0.31	0.02	0.30	0.65
D3M3	54.45	40.48	2.15	1.51	0.49	0.03	0.23	0.62
D4M2	46.25	41.44	9.75	1.71	0.17	0.03	0.07	0.43
D5M1	59.63	29.28	4.71	1.27	1.95	0.23	0.81	1.93
D6M1	56.77	25.29	9.02	1.26	3.27	0.68	1.77	1.74
D7M1	54.43	30.01	5.29	0.97	3.42	0.13	2.14	3.29
1Tena	67,97	25,54	2,62	0,94	1,84	0,54	0,84	0,25
2	63,6	28,52	3,21	1,45	1,47	0,51	0,57	0,68
3Ahuano	65,03	23,03	6,86	0,85	1,96	0,43	1,33	0,51
4Venecia	61,6	25,47	4,85	1,39	3,08	0,51	2,11	0,99

Laboratorio de Investigación y Análisis

5.2. Análisis de propiedades físicas

5.2.1. Distribución granulométrica

En las tablas 5 y 6 se muestran los resultados obtenidos de la granulometría por tamiz. El material retenido sobre el tamiz de malla 200, permite identificar el contenido de arena en el material arcilloso, dato indispensable para el correcto secado de los objetos cerámicos.

Tabla 5. Caracterización de granulometría por tamizado de las arcillas

Muestra	Diámetro de partícula				
	0,4 mm	0,25 mm	0,149 mm	0,074mm	<0,074
D1M4	6,675	6,937	4,543	6,914	74,930
D2M1	29,841	3,401	2,881	21,542	42,336
D3M3	8,374	8,115	6,263	6,174	71,075
D4M2	16,161	5,338	4,855	19,200	54,447
D5M1	7,863	10,098	8,417	15,212	41,589
D6M1	3,561	3,949	3,426	9,320	79,744
D7M1	2,298	6,096	7,090	17,585	66,932
001Tena	2,249	6,855	14,389	13,203	63,304
002	0,866	4,681	4,631	7,167	82,655
003Ahuano	1,968	3,968	4,118	11,733	78,213
004Venecia	3,058	5,900	4,176	11,162	75,704

Tabla 6. Resumen de caracterización de granulometría por tamizado de las arcillas

Muestra	ARENA	LIMO + ARCILLA
	0,4 - 0,07mm	< 0,074
D1M4	25,070	74,930
D2M1	57,664	42,336
D3M3	28,925	71,075
D4M2	45,553	54,447
D5M1	58,411	41,589
D6M1	20,256	79,744
D7M1	33,068	66,932
001Tena	36,696	63,304
002	17,345	82,655
003Ahuano	21,787	78,213
004Venecia	24,296	75,704

De los primeros resultados de granulometría se puede apreciar que las muestras geológicas D1M4, D3M3, D6M1y D7M1 tienen un contenido importante de material fina ($< 0,074$) que resulta de la suma de las fracciones arcillosa ($< 2 \mu\text{m}$) y limosa ($2 - 20 \mu\text{m}$).

Es importante determinar la fracción de partículas de tamaño menor a 2 micras porque únicamente estas se comportan como micelas capaces de formar coloides electronegativos, que tiene la aptitud de fijar el agua. Esta rodea las micelas y penetra entre las laminillas que se apartan más o menos de acuerdo al tipo de arcilla. La aptitud de hidratarse trae como consecuencia tres propiedades importantes: la plasticidad, la adhesividad y la capacidad de ser dispersada o floculada, todas de gran importancia para evaluar la calidad de las arcillas para su uso industrial (Castellón, 1997).

Para la medición de la distribución del diámetro de las partículas de tamaño menor a $0,074 \text{ mm}$ se utiliza el método de la difracción laser. Esto con la finalidad de determinar el contenido de limos y arcillas. Los resultados se muestran a continuación.

En la figura 17 se muestra la distribución del diámetro de las partículas de tamaño menor a $74 \mu\text{m}$ de la muestra D1M4. Se puede observar que la fracción corresponde a una mezcla de arcilla y limo, ya que su el tamaño del diámetro de las partículas está entre 0.1 y $13 \mu\text{m}$, con un tamaño mediano (tamaño al 50%) es de $2.55 \mu\text{m}$. Así mismo se calculó el área de superficie total de las partículas que es de $31.883 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$.

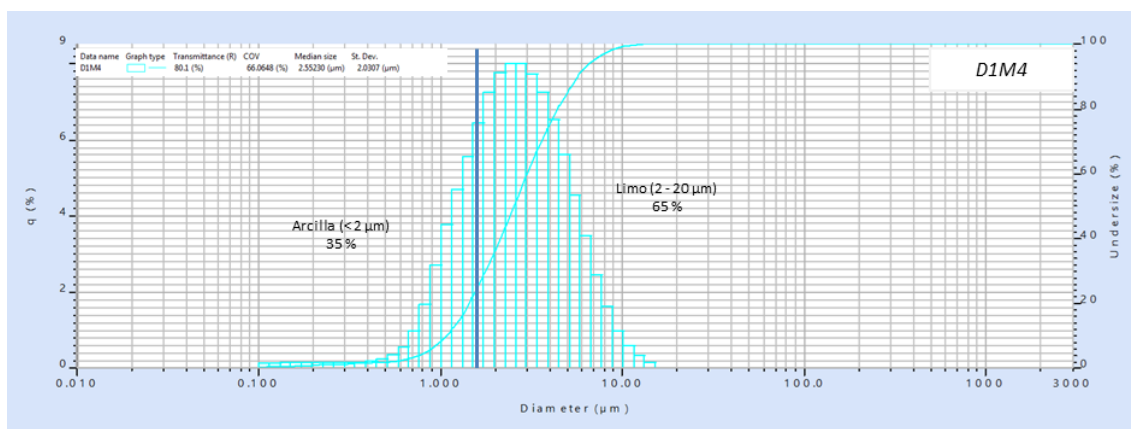


Figura 17. Distribución de tamaño de partícula de la muestra D1M4

En la figura 18 se muestra la distribución del diámetro de las partículas de tamaño menor a 74 µm de la muestra D2M1. Se puede observar que toda la fracción corresponde a una mezcla de arcilla (< 2 µm) y limo (2 – 20 µm), ya que su el tamaño de las partículas está entre 0.1 y 17 µm, con un tamaño mediano es de 2.78 µm. Se calculó el área de superficie total de las partículas que es de 69.520 cm²/cm³.

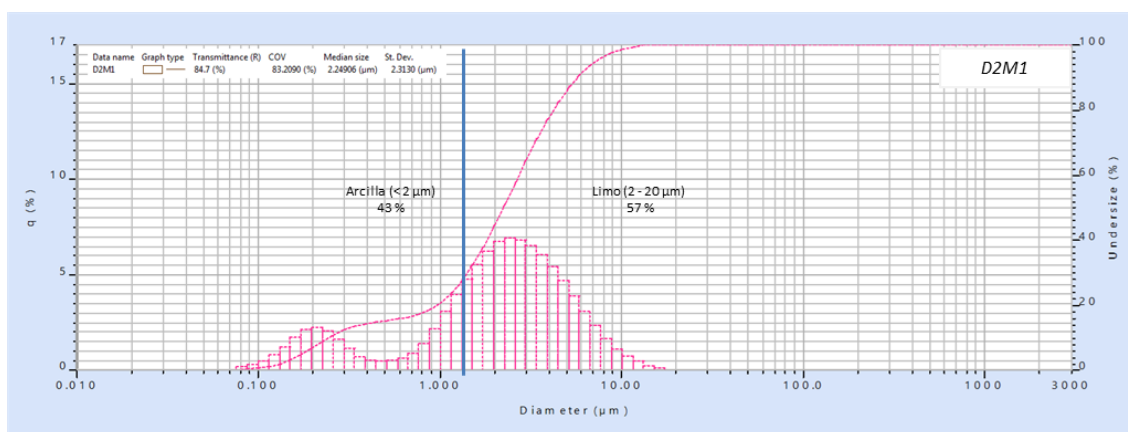


Figura 18. Distribución de tamaño de partícula de la muestra D2M1

En la figura 19 se muestra la distribución del diámetro de las partículas de tamaño menor a 0,074 mm de la muestra D3M3. Se puede observar que la fracción corresponde a arcilla (< 2 µm) y limo (2 – 20 µm), ya que su el tamaño del diámetro de las partículas está entre 0.8 y 19.90 µm, con un tamaño al 50%

(mediana) es de 5.86 μm . Se calculó el área de superficie total de las partículas que es de 12.358 cm^2/cm^3 .

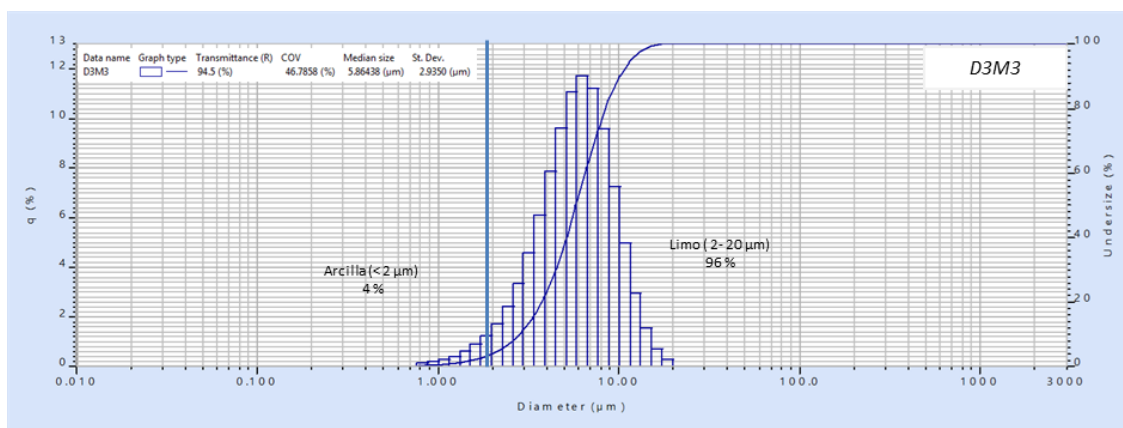


Figura 19. Distribución de tamaño de partícula de la muestra D3M3

En la figura 20 se muestra la distribución del diámetro de las partículas de tamaño menor a 0,074 mm de la muestra D4M2. Se puede observar que la fracción corresponde a arcilla (< 2 μm) y limo (2 – 20 μm), ya que su el tamaño del diámetro de las partículas está entre 0.9 y 19.9 μm , con una mediana de 5,70 μm . Se calculó el área de superficie total de las partículas que es de 12.420 cm^2/cm^3 .

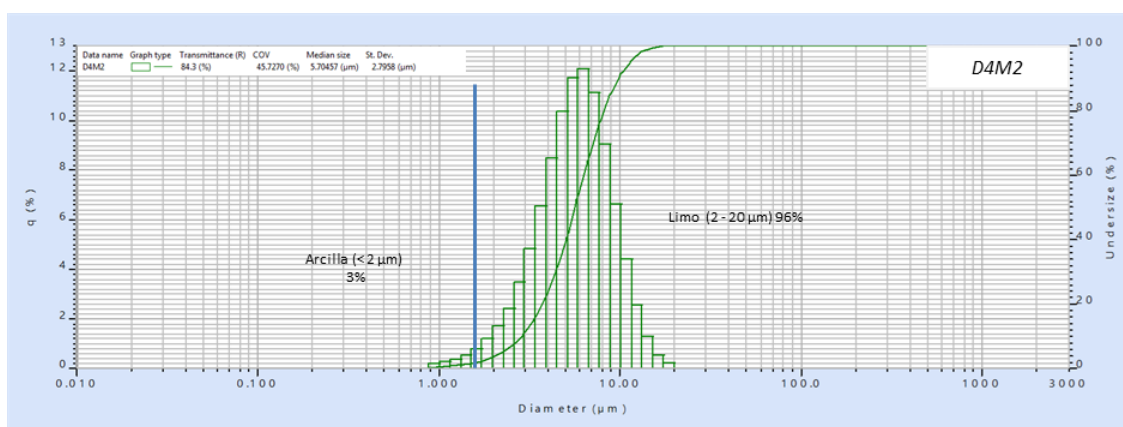


Figura 20. Distribución de tamaño de partícula de la muestra D4M2

En la figura 21 se muestra la distribución del diámetro de las partículas de tamaño menor a 0,074 mm de la muestra D5M1. Se puede observar que la fracción corresponde a arcilla (< 2 μm) y limo (2 – 20 μm), ya que su el tamaño

del diámetro de las partículas está entre 1,7 y 17 μm , con un tamaño mediano (al 50%) es de 6.62 μm . Se calculó el área de superficie total de las partículas que es de 9.824.2 cm^2/cm^3 .

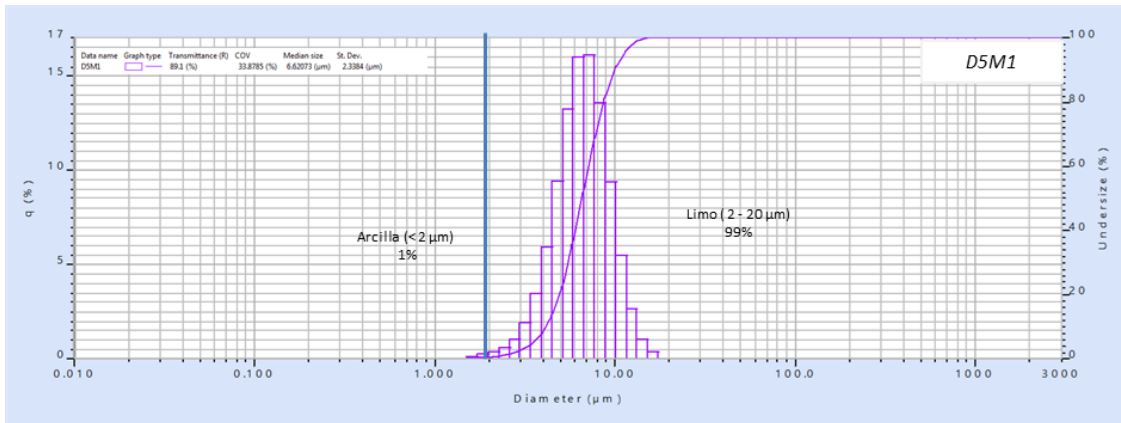


Figura 21. Distribución de tamaño de partícula de la muestra D5M1

En la figura 22 se muestra la distribución del diámetro de las partículas de tamaño menor a 0,074 mm de la muestra D6M1. Se puede observar que la fracción corresponde a limo (2 – 20 μm), ya que su el tamaño del diámetro de las partículas está entre 2 y 19.9 μm , con un tamaño mediano es de 6.63 μm . Se calculó el área de superficie total de las partículas que es de 9.796.2 cm^2/cm^3 .

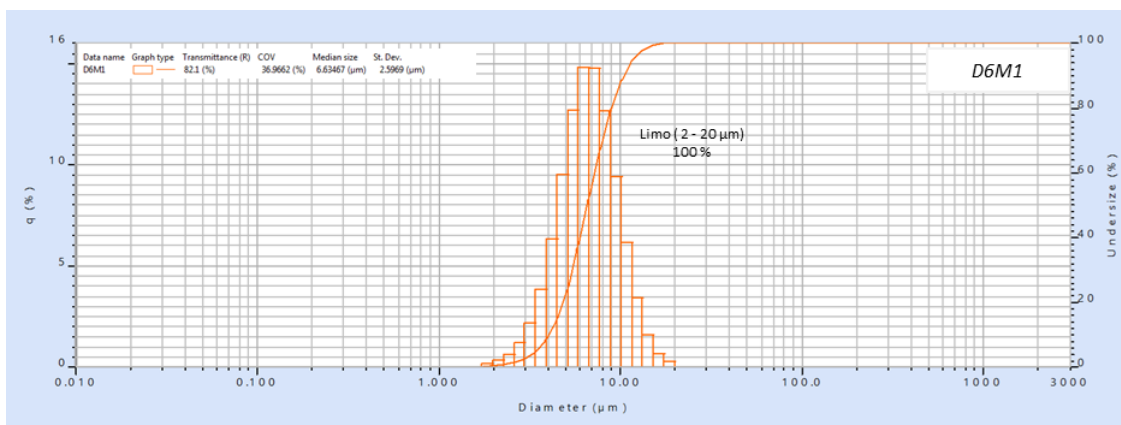


Figura 22. Distribución de tamaño de partícula de la muestra D6M1

En la figura 22 se muestra la distribución del diámetro de las partículas de tamaño menor a 0,074 mm de la muestra D7M1. Se puede observar que la fracción corresponde a limo (2 – 20 μm), ya que su el tamaño del diámetro de las partículas está entre 2,3 y 20 μm , con un tamaño mediano es de 7.46 μm . Se calculó el área de superficie total de las partículas que es de 8.715.3 cm^2/cm^3 .

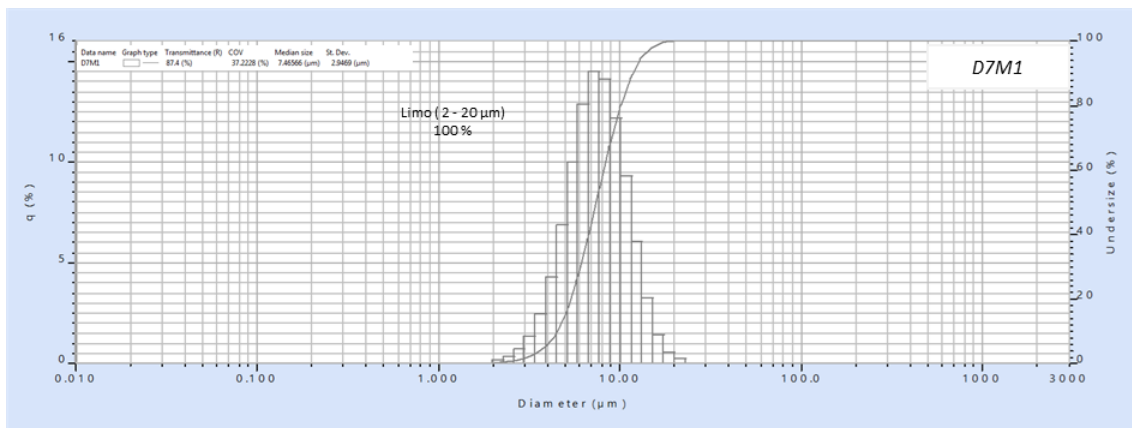


Figura 23. Distribución de tamaño de partícula de la muestra D7M1

En la figura 23 se muestra la distribución del diámetro de las partículas de tamaño menor a 0,074 mm de la muestra 001Tena. Se puede observar que la fracción corresponde a limo (2 – 20 μm), ya que su el tamaño del diámetro de las partículas está entre 5,9 y 11,6 μm , con un tamaño promedio es de 7.72 μm . Se calculó el área de superficie total de las partículas que es de 7.725.2 cm^2/cm^3 .

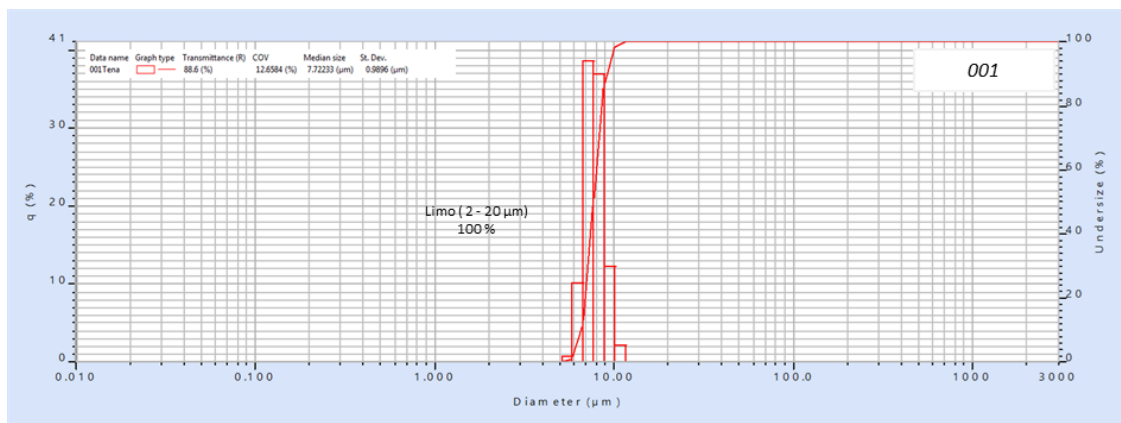


Figura 24. Distribución de tamaño de partícula de la muestra 001Tena

En la figura 25 se muestra la distribución del diámetro de las partículas de tamaño menor a 0,074 mm de la muestra 002. Se puede observar que la fracción corresponde a arcilla (< 2 μm) y limo (2 – 20 μm), ya que su el tamaño del diámetro de las partículas está entre 1.5 y 15,17 μm, con un tamaño promedio es de 5.30 μm. Se calculó el área de superficie total de las partículas que es de 12.563 cm²/cm³.

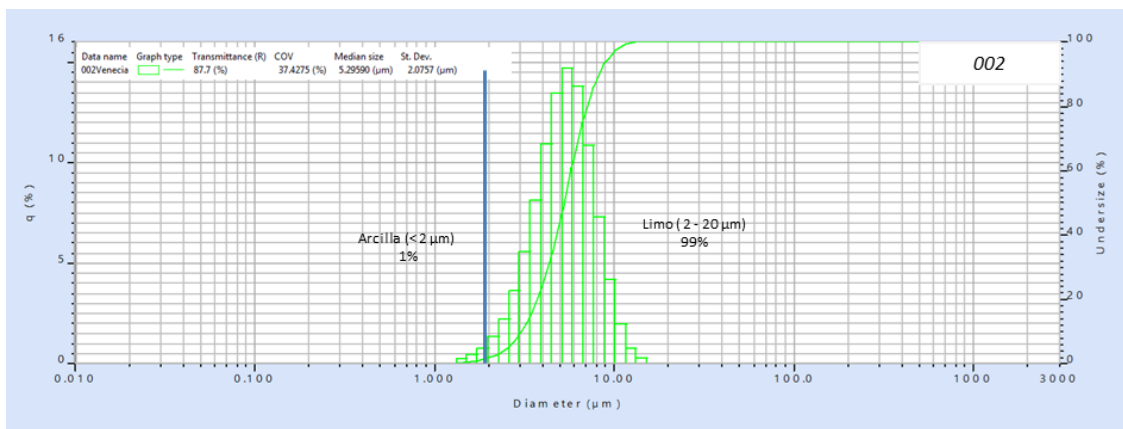


Figura 25. Distribución de tamaño de partícula de la muestra 002

En la figura 26 se muestra la distribución del diámetro de las partículas de tamaño menor a 0,074 mm de la muestra 003Ahuano. Se puede observar que la fracción corresponde a limo (2 – 20 μm), ya que su el tamaño del diámetro de las partículas está entre 5.1 y 10,1 μm, con un tamaño promedio es de 6.71 μm. Se calculó el área de superficie total de las partículas que es de 8.891.2 cm²/cm³.

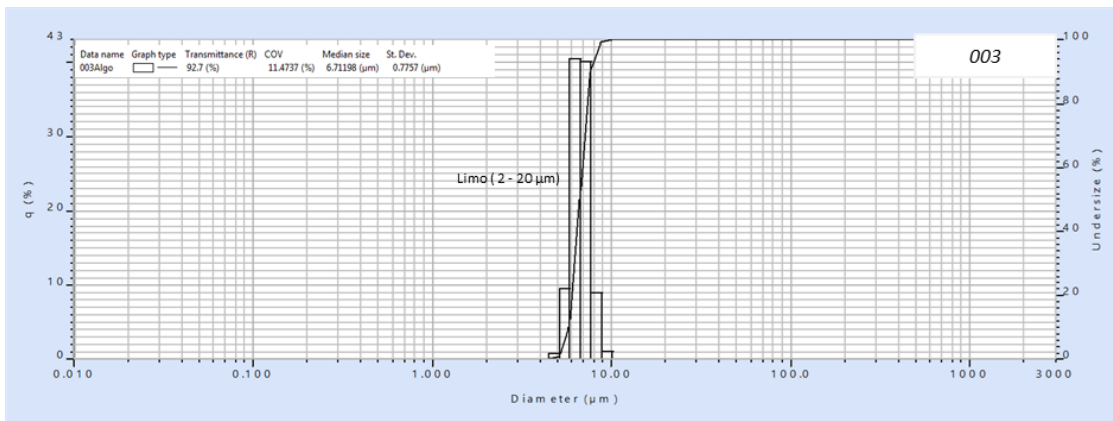


Figura 26. Distribución de tamaño de partícula de la muestra 003

En la figura 27 se muestra la distribución del diámetro de las partículas de tamaño menor a 0,074 mm de la muestra 004Venecia. Se puede observar que la fracción corresponde a limo (2 – 20 µm), ya que su el tamaño del diámetro de las partículas está entre 2,27 y 15,17 µm, con un tamaño promedio es de 6.81 µm. Se calculó el área de superficie total de las partículas que es de 9.940 cm²/cm³.

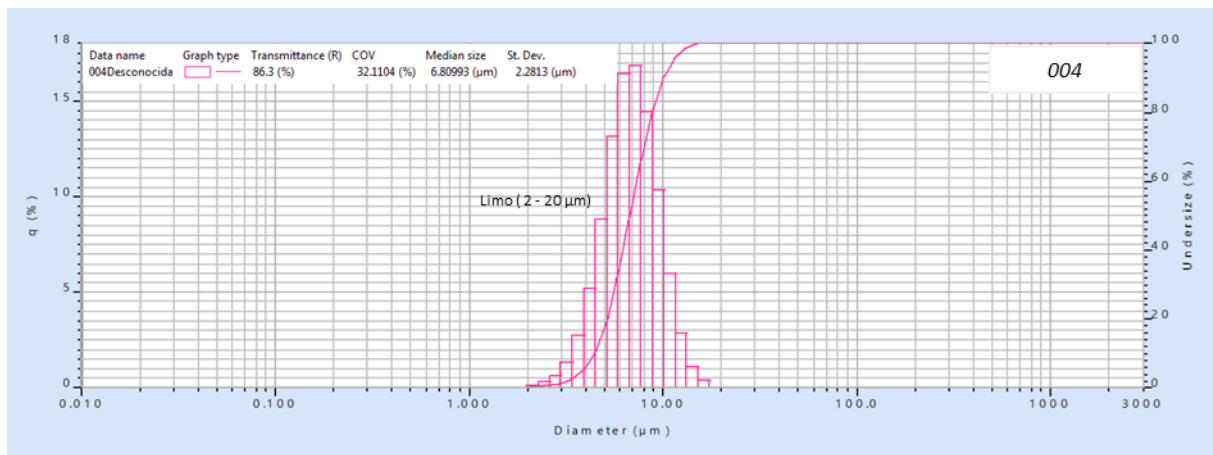


Figura 27. Distribución de tamaño de partícula de la muestra 004

En la tabla 7 se expone la composición de las fracciones arena, limo y arcilla de las muestras analizadas. Se puede hacer algunas puntualizaciones importantes:

- Las muestras D1M4 y D2M1 son las muestras que mayor contenido de material arcilloso.

- El resto de muestras tienen una fracción de material limoso de tamaño inferior a 10 μm , lo que aporta plasticidad.
- Las muestras D1M4, D3M3, D6M1 y D7M1 tienen una composición granulométrica interesante para ser usada en producción de objetos cerámicos.
- La muestra D2M1 presenta arcilla en su composición, sin embargo el contenido de áridos es mayor al 50%, lo que sugiere que hubo una mezcla con material arenoso al momento del muestreo. Por lo que se sugiere volver a hacer el muestreo para corroborar los resultados.

Tabla 7. Resultados de granulometría de las muestras arcillosas

Muestra	% Retenido sobre tamiz ASTM 230 %Arena	% Limo	% Arcilla	Diámetro al 50% (μm)	Área de superficie cm^2/cm^3
D1M4	25.07	47.74	28.15	2.55	31.883
D2M1	57.66	23.62	18.38	2.78	69.520
D3M3	28.93	68.51	2.49	5.86	12.358
D4M2	45.55	53.27	1.73	5.70	12.420
D5M1	58,41	50.82	-	6.62	9.824
D6M1	20.26	79.12	-	6.63	9.796
D7M1	33.07	66.97	-	7.46	8.715
001Tena	36.70	63.30	-	7.72	7.725
002	17.35	81.83	1.62	5.30	12.563
003Ahuano	21.79	78.21	-	6.71	8.891
004Venecia	24.30	82.66	-	6.81	9.940

5.2.2. Plasticidad

La plasticidad es uno de los parámetros más importantes de caracterización el comportamiento de los suelos finos. Para su determinación se requiere primero calcular el límite líquido que es (cuando el suelo pasa de un estado plástico a un estado líquido) y el límite plástico (cuando el suelo pasa de un estado semi sólido a un estado plástico). (ASTM D4318-05) (Mendoza, 2000).

Los resultados se muestran en la tabla 8 y en la figura 28. De acuerdo al sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) y al diagrama de Casa Grande, toda las muestras, se clasifican como arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media (CL) que corresponde a Limos Arcillosos con límite líquido LL menor a 50. Es importante mencionar que de todas las muestras la D1M4 es la muestra con mejores propiedades plásticas. Estos resultados son consistentes con los datos de tamaño de partícula.

Tabla 8. Resultados de la clasificación de suelos (SUCS)

Muestras	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad	Clasificación S.U.C.S.
D1M4	38.2	9.6	28.6	CL
D2M1	27.5	9.8	17.7	CL
D3M3	23.3	11.5	11.8	CL
D4M2	26.8	9.8	17.0	CL
D5M1	19.3	7.8	11.5	CL
D6M1	22.3	8.2	14.1	CL
D7M1	28.0	10.3	17.7	CL

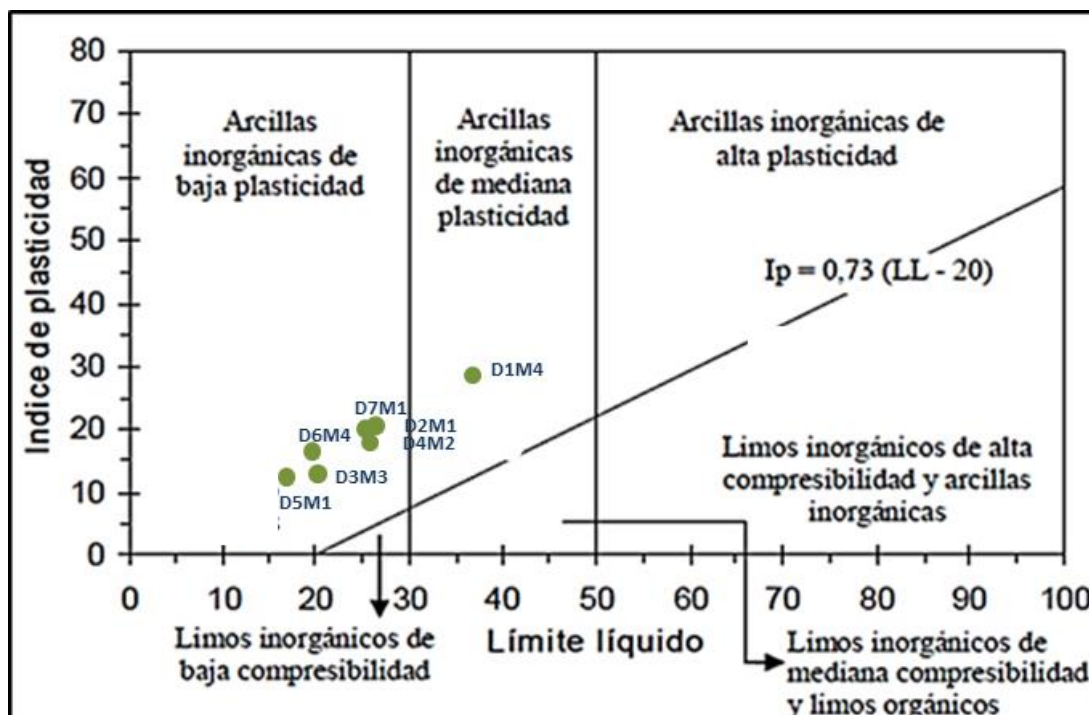


Figura 28. Resultados del análisis de la plasticidad de las muestras en el diagrama de Holtz y Kovacs

Para evaluar la calidad de las arcillas y su granulometría para su aplicación a fin de obtener una plasticidad suficiente y un producto bastante compacto después de la cocción (ARJONA, 1982). Winkler propuso un diagrama triangular en el que se representa la aplicabilidad de la materia prima, en función de los porcentajes de las distintas fracciones granulométricas (PARRAS, 1988), El diagrama contiene cuatro regiones que corresponden cada una a un rango de composiciones granulométricas: A) Materiales de buena calidad con dificultad de producción. B) Tejas u cubiertas, C) Ladrillos perforados y D) Ladrillos macizos.

En la figura 29 del diagrama de Winkler se puede observar que la muestra D1M4 se sitúa en la región C y la muestra D2M1 en la región D. Es decir, estas muestras presentan una aplicación potencial determinada.

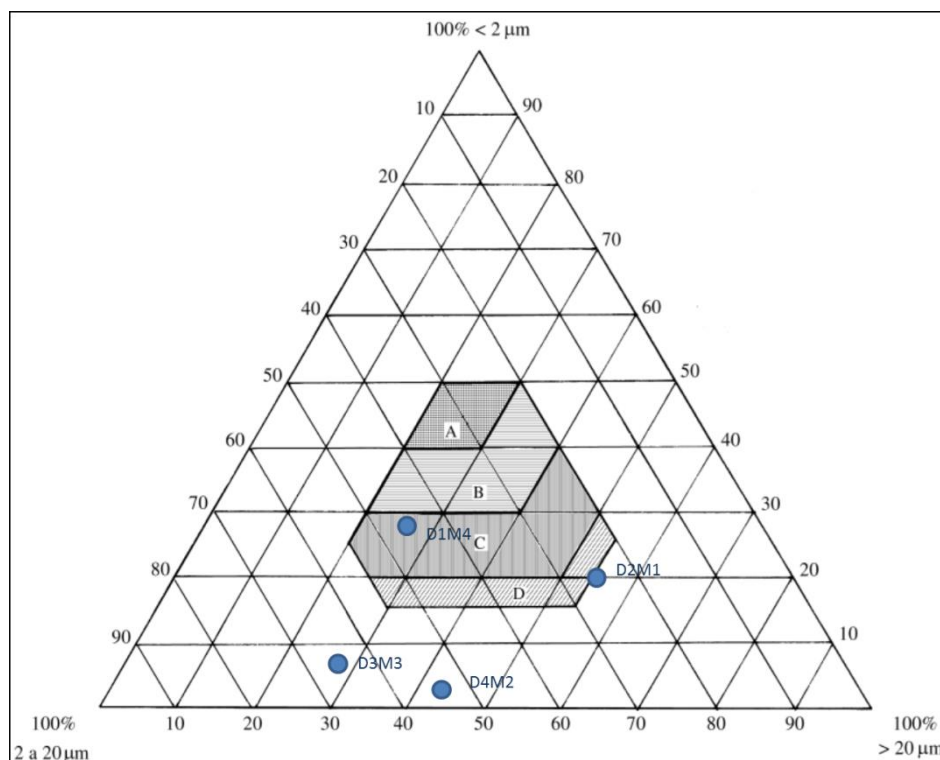


Figura 29. Diagrama Winkler

5.2.3. Contracción

Finalmente se realizó la experimentación para determinar el comportamiento al secado y al cocido. En la tabla 9 se muestra los resultados los cuales son consistentes con los resultados anteriores. La muestra D1M4 al tener mayor proporción de arcilla, está en capacidad de absorber mayor cantidad de agua, por lo que, tiene el mayor porcentaje de contracción al secado. Al contrario la muestra D2M1 que tiene una proporción alta de áridos, absorbe poca cantidad de agua y por tanto su contracción al secado es menor.

Llama la atención que las muestras D1M4 y D3M3 presentan color claro al quemado, lo que confirma que se trata de caolín con bajo contenido de óxidos de hierro. Esto es muy importante, ya que puede ser usado para elaborar objetos con quema de color claro. Este material tiene varias aplicaciones industriales.

Tabla 9. Comportamiento al secado y a la cocción

Muestra	% Contracción al secado	% Contracción al cocido	% Contracción total	Pérdida por calcinación %	Color a la quema	
D1M4	8.03	3.26	11.29	16.38	7.5YR-9.5/2	Pale yellowish pink
D2M1	5.07	2.10	7.17	10.25	5YR-8/3	Pink
D3M3	7.00	2.15	9.15	12.11	10YR-8.5/2	Very Palebrow
D4M2	7.05	2.14	9.19	14.74	2.5YR-5/8	Red
D5M1	7.08	1.07	8.15	9.19	5YR-7/8	Reddish Yellow
D6M1	6.02	0	6.02	5.46	5YR-6/6	Reddish Yellow
D7M1	6.05	0	6.05	8.63	5YR-8/4	Pink

Laboratorio de Investigación y Análisis

5.3 Cerámica

El análisis químico indica un alto grado de similitud entre los materiales usados en su manufactura (Tabla 11). Estos datos sugieren que el ambiente geológico regional de donde provienen las materias primas es tan homogéneo que no permite discriminar entre las fuentes locales de materia prima.

Tabla 10. Resultados de composición química de las muestras cerámicas

Muestras	Na ₂ O (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	TiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)
23-01	0,76	2,54	23,11	59,93	2,31	1,41	1,15	8,79
23-02	0,54	1,69	19,13	69,23	1,94	0,49	0,90	6,09
23-03	1,33	1,56	29,37	58,48	1,53	1,69	1,69	3,84
23-04	0,45	1,52	20,20	68,94	1,61	0,39	1,21	5,67
23-05	0,59	1,96	22,96	65,23	1,56	0,87	1,01	5,23
23-06	1,09	1,84	18,66	67,02	2,18	1,13	0,92	7,17
23-07	1,14	1,75	18,69	66,76	2,27	1,14	0,95	7,31
23-08	0,89	1,58	19,63	65,78	1,96	1,01	0,98	6,05
23-09	1,25	1,69	18,90	66,37	2,31	1,12	1,01	7,34
23-10	1,08	1,71	18,50	66,90	2,31	1,17	0,91	7,42
23-11	0,55	1,50	20,01	69,22	1,52	0,39	1,22	5,61
23-12	0,51	1,79	20,15	67,74	2,06	0,56	0,91	6,29
23-13	0,49	1,50	20,23	69,10	1,55	0,41	1,14	5,58
23-14	1,24	0,78	29,20	57,62	1,59	1,85	1,69	4,59
23-15	0,50	1,78	20,03	67,65	2,07	0,57	0,94	6,45
23-16	0,99	1,65	21,96	59,32	2,02	1,85	1,01	7,01

En la composición mineralógica (Tabla 12) se puede observar que existe concordancia entre la composición mineralógica de las muestras cerámicas y las materias primas muestreadas en la zona. De igual forma que para el análisis químico, la composición mineralógica no permite discriminar entre las fuentes de materias prima analizadas.

Tabla 11. Resultados de análisis mineralógico de las muestras cerámicas

Muestras	Cuarzo	Muscovita	Gipsita	Feldespatos	Tridimita	Anatasa	Otros
23-01	48.67	5.94	4.38	39.30	1.17	0.53	-
23-02	46.44	4.73	-	46.77	0.32	1.73	-
23-03	44.81	2.04	-	49.55	1.78	1.83	-
23-04	46.23	1.78	-	49.64	0.52	1.95	-
23-05	51.20	0.24	3.09	38.75	4.80	1.90	-
23-07	53.96	11.82	3.02	28.14	1.18	1.87	-
23-08	50.85	2.23	-	41.86	2.57	2.49	-
23-09	49.05	5.37	-	39.28	3.68	2.63	-
23-10	43.58	4.86	-	45.34	4.99	1.24	-
23-11	65.21	2.37	-	27.19	1.48	1.85	-
23-12	54.72	0.92	0.38	17.13	8.87	1.45	16.53 (Caolinita)
23-13	69.15	1.03	0.38	16.91	11.21	1.33	-
23-14	25.94	1.37	0.88	56.75	7.29	2.11	5.66 (Caolinita)
23-15	45.82	3.60	1.71	38.44	6.46	1.71	0.15 (Vermiculita)
23-16	37.37	3.46	1.95	46.98	6.25	1.69	2.28 (Horblende)
23-17	50.36	1.70	1.12	35.64	8.43	1.75	1.00 (Horblende)

En general, la composición mineralógica de las muestras cerámica se caracteriza por la presencia de sílice libre cristalina en sus diferentes formas cristalinas (cuarzo, cristobalita, tridimita) como los minerales más abundantes y muscovita, acompañados de feldespatos, gipsita y anatasa. Esta composición mineralógica es similar a la encontrada en las materias primas estudiadas a excepción de las muestras 23-16 y 23-17 que tienen hornblenda en su composición, lo que sugiere que si bien su origen está relacionado con la

Amazonía ecuatoriana, sin embargo, se trata de una fuente distinta a las estudiadas en esta ocasión.

Al microscopio se puede observar minerales de origen volcánico y más importante la presencia de componentes metamórficos, como los esquistos micáceos y la muscovita, comunes en rocas metamórficas como las existentes en la zona de estudio, lo que sugiere que las cerámicas fueron elaboradas con materia de la zona o de un origen geológico similar.

La presencia de caolinita en las muestras 23-12 y 13-14 sugiere que la temperatura de cocción del horno a la que se sometieron las piezas cerámicas fue menor a 500°C (alrededor de 400°C), ya que a esta temperatura la caolinita pierde su agua estructural, transformándose en metacaolinita y ya no es posible identificarla por DRX. Al contrario, todas las muestras que provienen del Proyecto de desarrollo del Campo Villano-prospección sistemática y rescate arqueológico tramo Puerto Napo-Baeza fueron quemadas a temperaturas superiores a 500°C, que por la completa ausencia podría estar entre 600-800°C dependiendo del grado de vitrificación, la cual es mayor para las muestras antes mencionadas.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Todas las muestras analizadas presentan una mezcla de fases cristalinas de caolinita y muscovita que mineralógicamente se las clasifica como arcillas, así como también de las fases policristalinas de la sílice, feldespatos y gibsita.

Las muestras que presentan mejores características para la elaboración de objetos cerámicos, son D1M4, D2M1, D3M3 y D4M2, debido a su composición química, donde el contenido de alúmina es el mayor entre las arcillas, ya que aporta a la resistencia de las fases cristalinas que se forman al quemar las

piezas. Las cuatro muestras provienen del sector de Cotundo y se trata de depósitos de ladera.

La muestra que presenta mejores características para la elaboración de objetos cerámicos, es la arcilla D1M4. Las muestras D4M2, D3M3 y D7M1 también presentan buenas propiedades plásticas y granulométricas, pero en menor grado. Y finalmente la arcilla D2M1 por su contenido de micelas arcillosas.

De acuerdo al sistema unificado de clasificación de suelos y al diagrama de Holtz y Kovacs, todas las muestras son arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, que corresponde a limos y arcillas, siendo la mejor la muestra D1M4 seguida de D2M1, D4M2, D7M1.

Las muestras D1M4, D2M1 y D3M3 cuando se queman presentan una coloración blanquecina, lo que sugiere que son caolines, las cuales pueden ser empleadas para elaborar piezas de pasta de color claro semejante a la porcelana.

En cuanto a los fragmentos de piezas cerámicas estudiados, con base a la composición mineralógica, se concluye que se fueron elaboradas con material prima de la zona de estudio o muy similar. Principalmente, por la presencia de minerales provenientes de roca metamórficas, como los esquistos micáceos y la muscovita.

Las muestras de fragmento cerámicos provenientes de Proyecto de desarrollo del Campo Villano-prospección sistemática y rescate arqueológico tramo Puerto Napo-Baeza, por la ausencia de los picos característicos de la caolinita, se estima que fueron quemadas a temperaturas superiores a 500°C, entre 600 °C y 800°C dependiendo del grado de vitrificación. Mientras que los fragmentos provenientes del aeropuerto de Jumandy, se tiene las muestras 23-12 y 23-14 tuvieron una temperatura de cocción menor a 500°C (alrededor de 400°C) y

otras con temperaturas cocción en el mismo rango que las cerámicas antes mencionadas.

Una vez finalizado la primera fase de la investigación, que implicó la caracterización física, química y mineralógica de las materias primas locales, se recomienda, continuar con el desarrollo de una pasta con mejores características para el uso de las ceramistas de la región.

Bibliografía

- ARJONA, Mata. Jornadas científicas sobre cerámica y vidrio, Oviedo: servicio de publicaciones de la universidad de Oviedo, 1981.
- ARMIJOS, E. (2002). Estudio hidrofísico de las cuencas de los ríos Napo, Pastaza y Santiago dentro del proyecto Hybam. These d' ingénieur civil de l'UC E (Universidad Central de Ecuador), 126 p. + anexos.
- ASPDEN, J., RUNDLE, C. C. & BERMUDEZ, R. (1991). Nueva información de la edad del batolito de Abitagua en el Oriente Ecuatoriano.
- ASTM D4318-05 *Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index of soils.*
- BABY, P. (1999). Style and timing of deformation in the Oriente Basin of Ecuador.
- BABY, P. (2004). La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo.
- BÁEZ, N. (2009). Manual de rocas y minerales industriales en el Ecuador.
- BARRAGÁN, R. (1998). Ecuadorian Oreinte Basin During.
- BALAN, E., Lazzeri, M., Saitta, M., Allard, T., & Fuchs, Y. (2005). First-principles study of OH-stretching modes in kaolinite, dickite, and nacrite. *American Mineralogist*, 50-60.
- BENTABOL MANZANARES, J. (2003). Transformaciones hidrotermales de la caolinita. Málaga: Uiversidad de Málaga, Facultad de Ciencias.
- CANDO, M. F. (2010). Desarrollo y caracterización de arcillas modificadas para aplicaciones industriales. Quito: Escuela Politécnica Nacional.

- FRASER, A., Wilson, M., Roe, M., & Shen, Z. (2002). Use of hydrofluoric acid dissolution for the concentration of dickite and nacrite from kaoli deposits: an FTIR study. *The mineralogical society*, 559-570.
- HALL, M. (2008). Ecuadorian Andes volcanism: A review of Late Pliocene to Present activity. *176(1):1-6*. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2008.06.012.
- INIGEMM. (1986). Cartografía Geológica a ESC: 1000000 de la Hoja De TENA.
- JAILLARD, E., 1997 – Síntesis Estratigráfica y Sedimentológica del Cretáceo y Paleógeno de la Cuenca oriental del Ecuador: Petroproduccion-orstom, 163 p. MAGAP. (2004). Mapa de Subcuencas Hidrográficas del Territorio Ecuatoriano, Escala 1:50.000.
- KALENDA, P., Kalendová, A., Stengl, V., Antos, P., Subrt, J., Kvaca, Z., & Bakardjieva, S. (2004). Properties of surface-treated mica in anticorrosive coatings. *Progress in Organic Coatings*, 49(2), 137-145. <http://dx.doi.org/10.1016/j.porgcoat.2003.09.003>.
- MAGAP-SIGTIERRAS. (2015). Mapa geomorfológico ESC: 1.25000 del Cantón Tena.
- MENDOZA, Manuel; OROSCO, Marcos: Técnicas Alternativas para la determinación del Límite Líquido de Suelos, año=2000. Series del Instituto de Ingeniería de la UNAM
- MILLOT, Georges. (1972). *Geology of Clays. Weathering, Sedimentology and Geochemistry*. Springer-Verlag Wiet GmbH.
- MOATE, B. D., & Thorne, P. D. (2012). Interpreting acoustic backscatter from suspended sediments of different and mixed mineralogical composition. *Continental Shelf Research*, 46, 67-82. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2011.10.007>.
- NORMA NTC 4017, Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla, Normas técnicas colombianas (ICONTEC), Bogotá D.C, 2005.
- OSTROUMOV, M. (2007). Espectroscopia Infrarroja de reflexión en mineralogía avanzada, gemología y arqueometría. México: Geofísica UNAM.
- SHAPKIN, N., RASOV, V., MAYOROV, V., SHKURATOV, A., & KOROSHENSEV, V. (2016). Studies of Natural Kaolinite and Its Modified Forms. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 1463-1471.
- VELDE, B., & Meunier, A. (2008). *The origin of clays Minerals in soils and weathered rocks*. Berlin: Springer.