

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**  
**FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**



**TESIS:**

“PROPUESTA METODOLÓGICA DE CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE PUZOLANAS DE ORIGEN VOLCÁNICO Y DERIVADOS DEL PROCESO DE LA CALCINACIÓN DE LADRILLO DE BARRO EN LA CAPACIDAD REACTIVA DE FORMACIÓN DE COMPUESTOS CEMENTICIOS”

**PRESENTA:**

LARIOS ARANA ALBERTO JOSÉ  
NIETO GÓMEZ NELSON ANTONIO  
SOSA SAGASTIZADO CLAUDIO ORESTES

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE:**

INGENIERO CIVIL

**DOCENTE ASESOR:**

ING. GUILLERMO MOYA TURCIOS

**JUNIO DE 2019**

**SAN MIGUEL, EL SALVADOR, CENTROAMÉRICA.**

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**AUTORIDADES**

MAESTRO ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

**RECTOR**

ING. NELSON BERNABÉ GRANADOS

**VICE-RECTOR ACADÉMICO**

M.S.C. CRISTÓBAL HERNÁN RÍOS BENÍTEZ

**SECRETARIO GENERAL**

LIC. RAFAEL HUMBERTO PEÑA MARÍN

**FISCAL GENERAL INTERINO**

**FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL**

**AUTORIDADES**

ING. JOAQUÍN ORLANDO MACHUCA GÓMEZ

**DECANO**

LIC. CARLOS ALEXANDER DÍAZ

**VICE-DECANO**

LIC. JORGE ALBERTO ORTEZ HERNÁNDEZ

**SECRETARIO**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

ING. JUAN ANTONIO GRANILLO COREAS  
**JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA.**

ING. MILAGRO DE MARÍA ROMERO DE GARCÍA  
**COORDINADORA DE PROCESOS DE GRADUACIÓN DEL  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

ING. GILLERMO MOYA TURCIOS  
**DOCENTE DIRECTOR**

JOSÉ LUIS CASTRO CORDERO  
**TRIBUNAL CALIFICADOR**

LUIS CLAYTON MARTÍNEZ  
**TRIBUNAL CALIFICADOR**



**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**  
**FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**PROYECTO DE GRADUACIÓN PREVIO A LA OPCIÓN AL GRADO DE:**  
**INGENIERO CIVIL**

**TITULO:**

**“PROPUESTA METODOLÓGICA DE CARACTERIZACIÓN Y  
EVALUACIÓN DE PUZOLANAS DE ORIGEN VOLCÁNICO Y  
DERIVADOS DEL PROCESO DE LA CALCINACIÓN DE LADRILLO  
DE BARRO EN LA CAPACIDAD REACTIVA DE FORMACIÓN DE  
COMPUESTOS CEMENTICIOS”**

**PRESENTADO POR:**

**NIETO GÓMEZ NELSON ANTONIO**

**LARIOS ARANA ALBERTO JOSÉ**

**SOSA SAGASTIZADO CLAUDIO ORESTES**

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE:**

**INGENIERO CIVIL**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN APROVADO POR:**

**ING. GUILLERMO MOYA TURCIOS**

**DOCENTE DIRECTOR**

**CIUDAD UNIVERSITARIA DE ORIENTE**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN APROVADOR POR:**

---

**ING. MILAGRO DE MARÍA ROMERO DE GARCÍA**

**COORDINADORA DE PROCESOS DE GRADUACIÓN DEL  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

---

**ING. GUILLERMO MOYA TURCIOS**

**DOCENTE DIRECTOR**

# ÍNDICE

## **CAPITULO I: GENERALIDADES**

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
JUSTIFICACION.....	3
OBJETIVOS.....	6
ALCANCES.....	7
LIMITACIONES.....	8

## **CAPITULO II: MARCO TEÓRICO**

2.1 Antecedentes.....	10
2.2 Puzolana.....	11
2.2.1 Definición.....	11
2.2.2 Origen e historia del término puzolana.....	11
2.2.3 Tipos de materiales puzolánicos.....	13
2.2.3.1 Puzolanas Naturales.....	13
2.2.3.2 Puzolanas Artificiales.....	18
2.2.3.3 Otras clasificaciones.....	26
2.2.4 Actividad Puzolánica.....	26
2.2.5 Causas de la actividad puzolánica.....	28
2.2.6 Aplicación de las puzolanas.....	29
2.3 Aditivos para la elaboración de concreto.....	30
2.3.1 Definición.....	30
2.3.2 Clasificación de aditivos.....	31
2.4 Adiciones minerales activas.....	32

2.4.1 Definición de adición mineral activa .....	33
2.4.2 Condiciones de empleo .....	34
2.4.3 Proporcionamiento .....	35
2.4.4 Diferencias entre aditivo y adición mineral .....	36
2.4.5 Efecto de la utilización de puzolanas sobre las propiedades del concreto fresco .....	37
2.4.6 Efecto de la utilización de puzolanas sobre las propiedades del concreto endurecido .....	38
2.4.7 Aspectos económicos .....	41
2.5 Caracterización de materiales .....	42
2.5.1 ¿Qué es la caracterización de materiales? .....	42
2.5.2 Términos asociados a la caracterización .....	43
2.6 Métodos y ensayos para la evaluación de puzolanas .....	45
2.6.1 Ensayo de Fluorescencia de Rayos X .....	45
2.6.2 Método de Difracción con Rayos X .....	46
2.6.3 Método de Luxan's.....	48
2.6.4 Ensayo de Microscopio de Campo Claro .....	49
2.6.5 Ensayo de Resistencia Mecánica.....	50
2.6.6 Método de Frattini .....	51
2.6.7 Ensayos establecidos en la Norma ASTM C-114 .....	52
2.6.8 Ensayo por Difracción Láser .....	55
2.6.9 Método Blaine.....	55
2.6.10 Método Termogravimétrico.....	57
2.6.11 Método de Pérdida por Ignición .....	58
2.7 Variables sobresalientes en la caracterización de puzolanas.....	60
2.7.1 Composición Química.....	60
2.7.2 Composición Mineralógica.....	61

2.7.3 Finura de Partículas .....	66
2.7.4 Reactividad Puzolánica .....	66

### **CAPITULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

3.1 Unidades de análisis .....	68
3.1.1 Tobas Volcánicas o Ingimbritas .....	68
3.1.2 Piedra pómez o pumita .....	71
3.1.3 Arcila Termo-Activada .....	73
3.2 Criterios de selección para las unidades de análisis .....	78
3.3 Delimitación de áreas en estudio .....	81
3.4 Consideraciones previas a la recolección .....	84
3.5 Recolección y preparación de las muestras en estudio .....	88
3.6 Análisis y evaluación de métodos .....	92
3.6.1 Métodos y ensayos químicos .....	94
3.6.2 Métodos y ensayos físicos .....	97
3.6.3 Métodos y ensayos mineralógicos .....	99
3.7 Comparación de métodos .....	100
3.8 Propuesta Metodológica .....	103
3.9 Aplicación de la propuesta metodológica .....	105
3.9.1 Aplicación para Fluorescencia de Rayos X .....	105
3.9.2 Aplicación para Difracción de Rayos X .....	111
3.9.3 Aplicación para Método de Luxan's .....	113
3.9.4 Aplicación para Microscopio de Campo Claro .....	120
3.9.5 Aplicación para Índice de actividad de resistencia .....	133

## **CAPITULO IV: ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE RESULTADOS**

4.1 Análisis y procesamiento de Fluorescencia de Rayos X .....	147
4.2 Análisis y procesamiento de Difracción de Rayos X .....	151
4.3 Análisis y procesamiento de Método De Luxan's .....	156
4.4 Análisis y procesamiento de Microscopio de Campo Claro.....	159
4.5 Análisis y procesamiento de Ensayo de Resistencia a la compresión .....	162

## **CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

CONCLUSIONES.....	167
RECOMENDACIONES.....	174
FUENTES BIBLIOGRAFICAS.....	177
ANEXOS .....	167
ANEXO A. Descripción técnica Cantera el Delirio, Municipio de San Miguel .....	181
ANEXO B. Descripción técnica Piscinas de Moncagua, Municipio de Moncagua .....	182
ANEXO C. Descripción técnica Ladrillera La Isla, Municipio de Moncagua .....	183
ANEXO D. Cuadro resumen de variables en estudio.....	184
ANEXO E. Esquema metodológico de la Investigación .....	185
ANEXO F. Formación Geológica de El Salvador .....	186
ANEXO G. Difractograma de rayos X – Toba volcánica .....	187
ANEXO H. Difractograma de rayos X – Piedra pómez.....	188
ANEXO I. Difractograma de rayos X – Arcilla termo-activada .....	189
ANEXO J. Vista microscópica de partículas (MCC) – Toba volcanica .....	190
ANEXO K. Vista microscópica de partículas (MCC) – Piedra pómez .....	191
ANEXO L. Vista microscópica de partículas (MCC) – Arcilla termo-activada.....	192

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. Dique Romano sumergido en el mar Mediterráneo, realizado con cenizas volcánicas de Nápoles-----	12
FIGURA 2. Cantera de tierra diatomea -----	14
FIGURA 3. Cantera de Basalto en San Diego, La Libertad -----	15
FIGURA 4. Extracción de Basalto en San Diego, La Libertad-----	16
FIGURA 5. Escoria común en Volcán Chaparrastique -----	17
FIGURA 6. Ceniza volante-----	19
FIGURA 7. Escorias de alto horno -----	20
FIGURA 8. Humos de Sílice -----	21
FIGURA 9. Sílice condensada-----	23
FIGURA 10. Sílice geotérmica -----	23
FIGURA 11. Cenizas de cáscaras de arroz -----	24
FIGURA 12. Cenizas de caña de azúcar -----	25
FIGURA 13. Ladrillos siendo incinerados para producir cenizas de carácter puzolánico -----	26
FIGURA 14. Aditivo siendo agregado al concreto-----	31
FIGURA 15. Diferentes tipos de adiciones minerales -----	34
FIGURA 16. Efecto de Puzolána sobre la elevación de temperatura del concreto. -----	40
FIGURA 17. Cubos con adiciones puzolánicas sometido esfuerzos unidireccionales -----	43
FIGURA 18. Análisis de espectroscopia infrarroja-----	44
FIGURA 19. Equipo de Fluorescencia de Rayos X -----	45
FIGURA 20. Difractómetro de Rayos X-----	47
FIGURA 21. Difractograma de minerales-----	47

FIGURA 22. Sonda HACH	48
FIGURA 23. Partes de un Microscopio de Campo Claro	49
FIGURA 24. Prueba de resistencia en cubos	50
FIGURA 25. Curva de solubilidad del Hidróxido de calcio	51
FIGURA 26. Balanza analítica	53
FIGURA 27. Procedimiento químico	54
FIGURA 28. Equipo de Difracción laser	55
FIGURA 29. Aparato de Blaine	56
FIGURA 30. Curva termo gravimétrica de dos muestras puzolánicas	57
FIGURA 31. Equipo de termogravimetría	58
FIGURA 32. Mufla para ensayo de pérdida por ignición	59
FIGURA 33. Diferencia entre minerales cristalinos y amorfos	62
FIGURA 34. Estructura cristalina y amorfa	63
FIGURA 35. Estrato de toba volcánica de cinco metros de altura (El Delirio San Miguel)	68
FIGURA 36. Visita a cantera el Delirio (Toba volcánica joven)	69
FIGURA 37. Verificación de consistencia de toba volcánica	69
FIGURA 38. Toba volcánica consolidada	70
FIGURA 39. Estratos de material pómez (Moncagua-Piscinas)	71
FIGURA 40. Roca pómez extraída de cueva en Moncagua	72
FIGURA 41. Ladrillera la Isla	73
FIGURA 42. Insumos para la elaboración de ladrillos de barro	74
FIGURA 43. Ladrillo fresco antes de ser llevado al horno	74
FIGURA 44. Empaquetado de ladrillo para posterior quema	75



FIGURA 45. Madera colocada para encender horno	75
FIGURA 46. Ladrillos cocidos	76
FIGURA 47. Toma de muestras para posteriores análisis	77
FIGURA 48. Ladrillo de barro cocido a diferentes temperaturas	77
FIGURA 49. Mapa Geológico de El Salvador, Cantera El Delirio - N247,013.22; E591,982.97	82
FIGURA 50. Mapa Geológico de El Salvador, Balneario el Capulín Moncagua - N268,204.18; E581,387.63	83
FIGURA 51. Puntos de extracción para toba volcánica según método compuesto	86
FIGURA 52. Puntos de extracción para piedra pómez según Método Chip Sampling.	87
FIGURA 53. Toba volcánica consolidada y parte explotada	88
FIGURA 54. Manipulación para toma de muestras	89
FIGURA 55. Vista a ladrillera	89
FIGURA 56. Ejemplos de ladrillos calcinados y fundidos, sometidos a temperaturas mayores de 1150 °C	90
FIGURA 57. Pulverización por medio de mortero de ágata y/o almádana	90
FIGURA 58. Arcilla pulverizada para posterior tratamiento de tamizado	91
FIGURA 59. Muestras al horno.	91
FIGURA 60. Análisis para la comparación de métodos en la caracterización de puzolanas	93
FIGURA 61. Preparación de papel para pesar muestras a analizar	105
FIGURA 62. Peso de papel sobre balanza digital	106
FIGURA 63. Peso de muestras	106
FIGURA 64. Muestras colocadas en viales plásticos	107
FIGURA 65. Preparación para la solución a analizar	107

FIGURA 66. Pipeta para extraer solución de galio -----	108
FIGURA 67. Agitador electrónico para homogenizar conglomerados de soluciones-----	108
FIGURA 68. Extracción de solución para colocación sobre porta muestra -----	109
FIGURA 69. Materiales sobre porta muestras e identificados -----	109
FIGURA 70. Equipo de Fluorescencia de Rayos X analizando muestras -----	110
FIGURA 71. Difractómetro de rayos-X PANalytical, modelo: Empryan-----	111
FIGURA 72. Porta muestras para posterior análisis -----	112
FIGURA 73. Montaje de la probeta dentro de Cuna reflexión-transmisión -----	112
FIGURA 74. Agua desionizada junto con vaso de precipitados -----	114
FIGURA 75. Hidróxido de sodio en perlas-----	114
FIGURA 76. Hidróxido de sodio siendo pesado en balanza analítica-----	115
FIGURA 77. Disolviendo hidróxido de sodio-----	115
FIGURA 78. Vaso de precipitados siendo calentado a una temperatura de 40°C-----	116
FIGURA 79. Toma de primera lectura utilizando Sonda Hach-----	117
FIGURA 80. Pesando el material puzolánico -----	117
FIGURA 81. Tres diferentes puzolanas disueltas en hidróxido de sodio al 0.5% -----	118
FIGURA 82. Diferentes medios acuosos siendo calentados a una temperatura de 40°C -----	118
FIGURA 83. Toma de segunda lectura utilizando Sonda Hach -----	119
FIGURA 84. Limpieza de electrodo de Sonda Hach -----	119
FIGURA 85. Pesando material puzolánico -----	120
FIGURA 86. Beakers esterilizados -----	121
FIGURA 87. Mezclando el material puzolánico con palillo agitador -----	122
FIGURA 88. Haciendo uso de una pipeta de plástico para extraer solución-----	122

FIGURA 89. Colocando una gota de solución en porta muestras -----	123
FIGURA 90. Porta-muestras colocadas dentro del horno -----	123
FIGURA 91. Abriendo software AmScope-----	124
FIGURA 92. Encendido del Microscopio de campo claro-----	124
FIGURA 93. Ventana de trabajo del programa AmScope -----	125
FIGURA 94. Procedimiento para activar cámara -----	126
FIGURA 95. Opciones activadas en ventana de trabajo -----	127
FIGURA 96. Opciones del panel lateral -----	128
FIGURA 97. Pinzas sujetadoras (Izquierda) y platina (Derecha) -----	129
FIGURA 98. Tornillos para movimientos verticales de la platina -----	129
FIGURA 99. Tornillos para movimientos de las pinzas sujetadoras-----	130
FIGURA 100. Oculares del microscopio-----	131
FIGURA 101. Medición de tamaños de partículas -----	131
FIGURA 102. Captura de imagen con partículas medidas-----	132
FIGURA 103. Guardando captura -----	132
FIGURA 104. Arena de Ottawa -----	133
FIGURA 105. Tipo de cemento portland necesario para el ensayo-----	133
FIGURA 106. Toba volcánica (puzolana)-----	134
FIGURA 107. Moldes para la realización de cubos de mortero-----	136
FIGURA 108. Aplicación de agente desmoldante en interior de moldes-----	137
FIGURA 109. Prueba de la huella dactilar -----	137
FIGURA 110. Pesando materiales en diferentes balanzas para su verificación -----	138
FIGURA 111. Probeta con agua-----	138

FIGURA 112. Materiales dentro del recipiente de mezclado-----	139
FIGURA 113. Materiales mezclados en seco -----	139
FIGURA 114. Llenando moldes con mortero -----	140
FIGURA 115. Orden en que se deben apisonar las capas -----	141
FIGURA 116. Apisonamiento de mortero -----	141
FIGURA 117. Compactación de segunda capa -----	142
FIGURA 118. Uso del palustre -----	142
FIGURA 119. Formaletas en ambiente apropiado para reposar-----	143
FIGURA 120. Formaletas desarmadas -----	143
FIGURA 121. Cubos secos y libres de incrustaciones-----	144
FIGURA 122. Pie de Rey y su uso-----	145
FIGURA 123. Ensayo de resistencia a la compresión de los especímenes -----	145

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. Composición química de las tierras diatomeas -----	14
TABLA 2. Composición química de rocas y materiales volcánicos -----	17
TABLA 3. Método de Luxan´s-----	48
TABLA 4. Requerimiento químico (pérdida por ignición) para puzolanas-----	59
TABLA 5. Resultados de partes por millón de muestras en análisis(FRX)-----	147
TABLA 6. Resumen de compuestos presentes en la muestra por medio de FRX-----	150
TABLA 7. Resultados de composición mineralógica de Difracción de rayos X -----	151

TABLA 8. Peso molecular de compuestos de interés en Kaersutita.-----	152
TABLA 9. Peso molecular de compuestos de interés en Anortita. -----	152
TABLA 10. Peso molecular de compuestos de interés en Clinocloro. -----	152
TABLA 11. Peso molecular de compuestos de interés en Diopside. -----	153
TABLA 12. Peso molecular de compuestos de interés en Gehlenita.-----	153
TABLA 13. Peso molecular de compuestos de interés en Kaolinite.-----	153
TABLA 14. Pesos moleculares totales de compuestos de interés en minerales. -----	154
TABLA 15. Suma de compuestos de interés en Toba volcánica.-----	154
TABLA 16. Suma de compuestos de interés en Piedra pómez. -----	154
TABLA 17. Suma de compuestos de interés en Arcilla termo-activada.-----	155
TABLA 18. Lecturas de conductividad para toba volcánica -----	156
TABLA 19. Lecturas de conductividad para piedra pómez -----	156
TABLA 20. Lecturas de conductividad para arcilla termo-activada -----	156
TABLA 21. Lecturas de conductividad agregando toba volcánica -----	157
TABLA 22. Lecturas de conductividad agregando piedra pómez -----	157
TABLA 23. Lecturas de conductividad agregando arcilla termo-activada -----	157
TABLA 24. Diferencias de conductividades entre soluciones iniciales y finales-----	158
TABLA 25. Tabla método de Luxan's -----	158
TABLA 26. Categorías de puzolanicidad de las tres puzolanas en estudio -----	158
TABLA 27. Distribución de tamaño de partículas para toba volcánica -----	159
TABLA 28. Distribución de tamaño de partículas para piedra pómez -----	160
TABLA 29. Distribución de tamaño de partículas para arcilla termo-activada -----	161
TABLA 30. Resumen de tamaño de distribución de partículas por medio de MCC -----	161

TABLA 31. Muestras Patrón compuestas por cemento y arena (MP) -----	162
TABLA 32. Piedra pómez compuesta por cemento arena y puzolana (PP)-----	162
TABLA 33. Arcilla termo-activada compuesta por cemento arena y puzolana (AT) -----	162
TABLA 34. Toba volcánica compuesta por cemento arena y puzolana (TV) -----	163
TABLA 35. Muestras Patrón compuestas por cemento y arena (MP) -----	164
TABLA 36. Piedra pómez compuesta por cemento arena y puzolana (PP)-----	164
TABLA 37. Arcilla termo-activada compuesta por cemento arena y puzolana (AT) -----	164
TABLA 38. Toba volcánica compuesta por cemento arena y puzolana (TV) -----	165

## RESUMEN

A nivel internacional se utilizan una amplia variedad de insumos para la fabricación de cementos mejorados, algunos de estos insumos tanto naturales como artificiales tienen presencia en el territorio salvadoreño, a pesar de esto, se cuenta con pocas investigaciones dirigidas al análisis de estos materiales, provocando de esta manera un desconocimiento de los métodos y técnicas utilizadas.

Existen muchos métodos para evaluar estos materiales, cada uno de ellos con sus limitaciones, lo cual fue compensado con la realización de una metodología que agrupó varios métodos comparables o complementarios entre sí, por tanto, fue necesario un estudio y selección de los diferentes métodos más utilizados para proponer una metodología eficaz según las posibilidades existentes la cual se propone en esta investigación.

A fin de aplicar la metodología propuesta se analizaron tres muestras de materiales puzolánicos de la zona oriental del país, siendo estos, piedra pómez y toba volcánica como materiales naturales, y arcilla termo-activada como material artificial, estos fueron sometidos a un tratamiento previo a los análisis, que consistió en una trituración, secado y tamizado. Posteriormente se sometieron a ensayos de Difracción de rayos X para su análisis químico-mineralógico, Fluorescencia de rayos X para el estudio de su composición química, Conductividad eléctrica para cualificar la reactividad puzolánica, Microscopio de campo claro para conocer su finura, y ensayos de Resistencia mecánica para determinar el índice de actividad de resistencia.

Para finalizar se obtuvo una serie de resultados los cuales fueron procesados, obteniendo así, propiedades físicas, químicas y mineralógicas que a su vez fueron analizadas en base a los métodos y ensayos propuestos en esta metodología, y así se determinó que la tierra blanca tiene una alta reactividad puzolánica, seguida de la piedra pómez con una moderada reactividad puzolánica, y por último la arcilla termo-activada con una baja reactividad puzolánica.

## INTRODUCCIÓN

La actividad volcánica prolongada y asentamiento de los materiales expulsados han sido fundamentales en la formación de El Salvador, algunos de estos materiales por sus características como estructura física de las partículas, composición química y mineralógica poseen idoneidad para la formación de compuestos cementicios en presencia del hidróxido de calcio, el potencial de mayor o menor grado de creación de compuestos de esta naturaleza (silicatos y aluminatos cálcicos hidratados, fases estables hidráulicas e insolubles) se conoce como reactividad puzolánica. No obstante, debido a esto, materiales de la misma naturaleza con composición química similar en locaciones diferentes no reaccionaran necesariamente de la misma manera, por lo que es fundamental el estudio y caracterización de estos, a fin de conocer la reactividad puzolánica de los materiales en cuestión.

Esta investigación tiene por objeto realizar una metodología de evaluación y caracterización aplicándola a tres materiales de la zona oriental, dos de estos materiales son de origen volcánico, y uno producto de un proceso artesanal, con el objetivo de identificar características físicas, químicas y mineralógicas a fin de que estos puedan ser catalogados como puzolana, debido a su capacidad reactiva de formar compuestos cementicios.

Para esta metodología se realizó un análisis y evaluación de métodos existentes que pueden ser utilizados para el estudio de las puzolanas, seleccionando los que presentaron mayor eficiencia en cuanto a resultados obtenidos y según disponibilidades, produciendo así una metodología con la que se generen resultados que expresen las características antes mencionadas para obtener un estudio más amplio. Solamente si se dan los resultados favorables de composición química, mineralógica y estructura física se darán las condiciones para la reactividad puzolánica, en resumen, podría simplificarse en cuanto a composición química a una alta presencia de dióxido de silicio, en cuanto a composición mineralógica una baja presencia de cuarzo y en cuanto a estructura física alta finura.



---

## CAPITULO I

---

### “GENERALIDADES”

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **SITUACIÓN PROBLEMÁTICA**

En el país se generan cenizas de procesos artesanales y residuos producto de procesos industriales, para los primeros materiales no se cuenta con ninguna investigación que analice sus características internas, en cuanto los segundos, estos han sido objeto de estudio en pocas investigaciones orientadas al área de ingeniería, lo que motiva a conocer las características internas presentes en estos.

Actualmente existen algunas investigaciones en cuanto a la caracterización de los materiales provenientes de erupciones volcánicas llevados a cabo en ciertos puntos del territorio nacional con el fin de explotación para su uso como aditivo mineral en la elaboración de cementos resistentes a los sulfatos, pero siendo estas de carácter privado, provocando así un desconocimiento de las técnicas utilizadas. Además de esta situación antes mencionada las instituciones públicas relacionadas con este tipo de investigaciones tienen la limitante de no contar con el equipo necesario, y de esta manera poder difundir así las técnicas utilizadas en ellas. Viéndose también involucradas en esta condición las instituciones académicas públicas y privadas por lo que existe una notable desventaja para realizar estudios en comparación de otros países.

Además de lo anterior es necesario que exista un procedimiento viable para estudiar las puzolanas que nos permita conocer con mayor profundidad las características de los materiales, dado que antes de pretender utilizar un material puzolánico como sustituto parcial del cemento es necesario el análisis previo de las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de las cuales depende el desempeño de estos materiales, por tal razón debe realizarse la caracterización de los materiales como medio para catalogarlos como puzolanas y determinar el potencial reactivo de formar compuestos en fases estables, hidráulicas e insolubles.

## **ENUNCIADO DEL PROBLEMA**

A pesar de las grandes cantidades de materiales puzolánicos existentes en el país y de las limitantes que se presentan al momento de estudiarlos ¿En qué medida se pueden conocer las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de puzolanas para evaluar la capacidad reactiva de formación de compuestos cementicios?

## JUSTIFICACION

Los volcanes de El Salvador han estado por siglos en nuestra tierra, algunos han tenido más actividad que otros, al pasar de los siglos han emitido gases y cenizas, también han lanzado piroclásticos (piedras ardientes) con fuerza hacia el exterior, habiendo así presencia de estos materiales en gran parte del territorio nacional.

A pesar de la existencia de grandes cantidades de materiales puzolánicos dispersos en el territorio nacional resultantes de actividades volcánicas, estos materiales solo han sido utilizados mayormente para elementos estructurales, filtros de sedimentación, estabilización de suelos y otros, pero se ha indagado poco sobre las características físicas, químicas y mineralógicas que estos pueden presentar.

Por otra parte, son muy comunes las fábricas ladrilleras artesanales, donde se lleva a cabo el proceso de cocción del ladrillo de barro, mismo que genera arcillas termo-activadas en el rango de temperaturas (de 600° a 1000° grados centígrados).

En el país no se utiliza ninguna puzolana artificial para la elaboración de materiales en la construcción, dado que existen algunas de estas puzolanas resultantes de actividades industriales como las cenizas de caña de azúcar, arcillas termo-activadas, etc. Por lo que resulta necesario un estudio que permita valorar la utilización de estos residuos de la actividad humana a fin de concluir si poseen la reactividad puzolánica suficiente para ello.

El estudio de las propiedades internas de las puzolanas es necesario, ya que permite identificar a ciencia cierta cualquier aspecto que genere resultados desfavorables, por ejemplo si se estabiliza un suelo arcilloso de manera empírica con el uso de cal esto se debe a una reacción puzolánica de los minerales arcillosos que contienen dióxido de silicio y reactividad puzolánica en cierta medida, no obstante, debido a esto no supondrá la misma eficacia usar igual dosificación en otro suelo arcilloso porque lo que determinará los resultados será su estructura mineralógica, por tanto, no

sabríamos por que funciona en uno y en otro no, ya que si pensamos en la estabilización sin tomar en cuenta su estructura química y mineralógica estaríamos cayendo en un error de fundamento que nos podría llevar a conclusiones erróneas como la de pensar que si se estabilizo un suelo arcilloso con esa dosificación podríamos estabilizar mejores suelos ya que funcionó con los aparentemente más desfavorables, lo que no necesariamente es así ya que un suelo arcilloso con alto contenido de minerales puzolánicos poseerá buena capacidad reactiva y tendera a un mayor mejoramiento que suelos aparentemente mejores que posean menor reactividad.

Por tanto, un estudio de esta índole es insuficiente si se desea saber por qué funciona en una arcilla y en otra no, lo que podría hacer variar los resultados incluso en un mismo banco ya que no siempre se presenta homogeneidad en su composición mineralógica, por tanto, también sería un error promediar resultados de diferentes puntos de un banco sin saber el grado de discrepancia entre su composiciones, como se puede observar en el trabajo de grado (Diaz, 2007) las diferentes distribuciones de los minerales en las zonas de estudio mediante el método de difracción de rayos X, lo que indica por ende diferente reactividad en la mismas zona.

Incluso cuando los materiales puzolánicos han sido utilizados desde hace miles de años esto se dio de manera empírica y no se sabía por qué unos materiales funcionaran y otros no, aunque aparentemente fueran el mismo material, para definir porqué un material funciona o no, aun siendo de la misma región es sumamente necesaria la caracterización de los materiales en base a una metodología que permita el estudio de las características de los mismos.

Existen tres ejes fundamentales en la caracterización de puzolanas que son sus características físicas, químicas y mineralógicas, por ejemplo, materiales con composición química similar pueden presentar diferentes comportamientos dado que el compuesto que hace posible la reactividad puzolánica en su mayoría es el dióxido

de silicio, el cual si se presenta como mineral (cuarzo) aporta una condición desfavorable al material no siendo así en su forma amorfa, por tanto, debe de cumplirse la condición de una composición química con alta presencia y equilibrio de sus proporciones de los compuestos que favorezcan la reactividad puzolánica, como también baja presencia de cuarzo.

Aun cumpliéndose lo anterior podría un material no poseer la reactividad esperada en presencia de hidróxido de calcio dado que también su estructura física es uno de los factores determinantes de su comportamiento, este debe de poseer una óptima adsorción del reactivo dada por la superficie específica directamente ligada al tamaño de las partículas del material, por tanto, además de verificar las condiciones físico-químico-mineralógicas de los materiales, se deben comprobar directamente los resultados teóricos mediante ensayos establecidos que miden la reactividad puzolánica a fin de determinar el comportamiento esperado.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

- Proponer y aplicar una metodología para la caracterización y evaluación de puzolanas de origen volcánico y derivados del proceso de calcinación de ladrillo de barro y así evaluar la capacidad reactiva de formación de compuestos cementicios.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- Acopiar información referente a puzolanas y analizar métodos físicos, químicos y mineralógicos que evalúen la capacidad reactiva de formación de compuestos cementicios.
- Emplear la metodología propuesta a tres materiales; Toba Volcánica, Piedra pómez y Arcilla Termo-Activada, y así conocer la eficacia de la misma.
- Aplicar la metodología propuesta para conocer la composición química, composición mineralógica, finura de partícula y reactividad puzolánica de las unidades en análisis a fin de que el lector comprenda los procedimientos empleados y pueda aplicarlos para futuras investigaciones.
- Elaborar conclusiones y recomendaciones en base a los resultados obtenidos según normas y métodos, a fin de determinar si los materiales propuestos poseen una óptima capacidad de formar de compuestos cementicios.

## ALCANCES

- Se obtuvo el conocimiento teórico necesario para comprender aspectos fundamentales referentes a las puzolanas, incluyendo los principales métodos establecidos que las evalúan.
- En el momento de aplicar la metodología propuesta se obtuvieron conocimientos referentes a preparación previa y manejo de equipos tales como Microscopio de campo claro, Fluorescencia de rayos X, Prensa hidráulica y Sonda Hach utilizados en el análisis de puzolanas.
- Se adquirieron conocimientos sobre procedimientos previos a la aplicación de la metodología propuesta como lo son: delimitación, recolección y preparación de puzolanas.
- Al llevar a cabo los ensayos planteados en esta investigación se generó una base de datos, obteniendo así los indicadores necesarios para la interpretación de resultados.
- Al implementar la metodología propuesta se identificó los diversos inconvenientes que pueden presentarse al momento de ejecutarla.
- Finalizada la interpretación de resultados se conoció el o los posibles materiales que pueden ser utilizados como adición mineral en cemento.



## LIMITACIONES

- La aplicación de la metodología se enfocó estrictamente a materiales de la zona oriental de El Salvador, siendo estos de origen natural y artificial.
- No se cuenta con una amplia variedad de materiales naturales disponibles para ser analizados debido a su dureza, ya que la trituración a realizar es de manera manual, de modo que se excluyó la escoria volcánica y lapilli.
- No se cuenta con una amplia variedad de materiales artificiales disponibles para ser analizados debido a que la zona oriental no es lo suficientemente desarrollada, ya que la mayoría de puzolanas artificiales son productos de procesos industriales.
- Las muestras analizadas no representaron en su totalidad las canteras o asentamientos de extracción, dado que el objetivo de la investigación consistió en definir una metodología para el análisis de los materiales y no así una caracterización de los lugares como tal.
- Dada las normas o reglamentos de algunos laboratorios es restringido el acceso de particulares a las instalaciones, por tanto, no se contó con el procedimiento detallado del análisis de Difracción de Rayos X.

---

## CAPITULO II

---

“MARCO TEÓRICO”

## **2.1 Antecedentes**

En años recientes las investigaciones en el área de las puzolanas se han enfocado principalmente en el estudio de los subproductos industriales, debido a que los países desarrollados y con mayores recursos para la investigación están generando en cantidades importantes estos materiales, sin embargo, existen investigadores que han mantenido sus líneas de investigación en lo que respecta a las puzolanas naturales, esto involucra sobre todo a aquellos países donde se tienen grandes yacimientos como el caso de Italia, México, Francia, Grecia, Chile, etcétera, donde se utilizan ampliamente.

Un investigador de Italia reconocido en el estudio de las puzolanas de origen natural es Franco Massazza, quien ha experimentado por más de 30 años con estos materiales, desde su caracterización hasta su reactividad ya sea con cal o su reactividad como cementos mezclados. Ha estudiado en forma importante aspectos de durabilidad, además es el autor del capítulo 10 (Puzolana y Cementos Puzolánicos) de uno de los libros más utilizados en el área del cemento y del concreto "Lea's, Chemistry of Cement and Concrete".

Otro investigador con gran visión ha sido el Dr. V. M. Malhotra, de CANMET (Cañada Centre for Mineral and Energy Technology), quien conjuntamente con el American Concrete Institute (ACI) ha sido el organizador de conferencias internacionales para tratar de incrementar el conocimiento en lo referente a la ceniza volante, humo de sílice, escorias y puzolanas naturales. La primera conferencia fue realizada en Monte Bello, Québec, Canadá en 1983, siguiendo con España en 1986, Trondheim, Noruega en 1989, en Estambul, Turquía en 1992, EE. UU en 1995. El Dr. Malhotra ha sido el editor de las memorias de esta serie de publicaciones especiales, sin embargo, el aporte relativo a las puzolanas naturales en estos eventos ha sido poco y la mayoría de los trabajos han sido orientados a las propiedades físico-mecánicas de estas puzolanas en el concreto.

El Comité 232 del ACI denominado "Use of Natural Pozzolans in Concrete" (Uso de Puzolanas Naturales en el Concreto), en su publicación, presenta información general de estos materiales, sin embargo se aplica al uso del concreto y no a la producción de cementos puzolánicos, así mismo la Portland Cement Association (PCA) tiene un documento denominado "Supplementary Cementing Materials for Use in Blended Cement" (Materiales Cementantes Suplementarios para uso en Cementos Mezclados), en el cual se da información general de los materiales puzolánicos, pero solo una pequeña parte se dedica a las puzolanas Naturales (Tamez, 2002).

## **2.2 Puzolana**

### **2.2.1 Definición**

Son productos naturales o artificiales, silíceos o sílico-aluminosos que en sí mismos poseen poca o ninguna propiedad aglomerante ni de actividad hidráulica, pero finamente molidas, a temperaturas ordinarias y en presencia de agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio formando compuestos que sí tienen propiedades aglomerantes e hidráulicas (NTC-3493, 1993).

Las puzolanas presentan en virtud de su inestabilidad química, reflejo del desorden estructural, alta susceptibilidad de reaccionar con otras sustancias para formar nuevos compuestos más estables, es así como atrapan la cal libre en el clinker.

Las puzolanas engloban materiales de diferente naturaleza, por esto cuando se habla de ellas se está haciendo alusión a rocas, suelos, sedimentos o productos artificiales que presentan propiedades puzolánicas.

### **2.2.2 Origen e historia del término puzolana**

Es a la civilización romana a quien se le debe el origen del nombre de puzolanas, como derivado del término "pozzuolana", con el que se referían a unas cenizas volcánicas consolidadas, encontradas en las proximidades del sitio de Pozzuoli o Puzzoli, cerca de Nápoles y con las que constituían los célebres morteros romanos de alta resistencia y mayor durabilidad al combinarla con cal.

Vitruvio en el siglo I a.C. ya menciona el uso de estos materiales al mortero que se confeccionaba en la proporción de una unidad de cal por tres de arena o dos por cinco (según la calidad de la arena) con el agregado de cenizas volcánicas.

No obstante, existen antecedentes previos sobre el uso de este tipo de morteros:

- En Grecia – particularmente en la ciudad de Thera - alrededor del 1400 a.C., se introdujo a la mezcla cal-arena, el polvo volcánico de la "tierra de Santorin", explotada en la isla, obteniéndose así morteros estables al agua. Esta forma de actuar era conocida fuera de la isla, ya que se ha encontrado "tierra de Santorin" en estatuas que adornaban el "Hephaisteion" de Atenas.
- A falta de roca volcánica en otras latitudes, se utilizaba teja o ladrillo picado (tejoleta) registrándose su uso en la época de la construcción de los aljibes de Jerusalén (bajo el mandato de Salomón, siglo X a.C). Esta costumbre parece haber sido introducida por los obreros fenicios que construyeron el templo de dicho rey y que conocían empíricamente las propiedades de los materiales llamados actualmente puzolanas artificiales (Crespo, 2005).



**FIGURA 1. Dique Romano sumergido en el mar Mediterráneo, realizado con cenizas volcánicas de Nápoles**

### 2.2.3 Tipos de materiales puzolánicos

Las puzolanas según su origen se dividen en dos grandes grupos, naturales y artificiales.

#### 2.2.3.1 Puzolanas Naturales

Son productos minerales con características composicionales (sílico - luminosos), estructurales (estructura imperfecta o amorfa) y texturales (grano fino) que los hacen aptos para su uso como adición mineral activa en la industria del cemento. El constituyente amorfo es vidrio producido por el enfriamiento brusco de la lava, como la pómez, las tobas, la escoria y la obsidiana.

Son derivadas de erupciones volcánicas, excepto las tierras diatomáceas, las cuales son formadas por silicatos amorfos hidratados, derivados de los esqueletos de microorganismos acuáticos. A la combinación de estructura pobremente cristalina o vítrea que puede poseer alta área superficial se le atribuye la reactividad de estos materiales. Son difíciles de evaluar debido a su variación Mineralógica (Carlos, 2005).

Entre las Principales Puzolanas Naturales, tenemos:

- **Materiales sedimentarios químicos:** Son sedimentos silicios como la ftanita y el pedernal constituidos por 95 % o más de sílice fibrosa microcristalina y sílice amorfa u ópalo y cuarzo criptocristalino, cuyo origen se debe a la precipitación de la sílice contenida en el agua de mar.

Estas tierras silíceas son llamadas tierras diatomeas, constituidas por caparazones de diatomeas o radiolarios marinos, formados por sílice amorfa u opalina, en otras palabras es una roca sedimentaria silícea formada por microfósiles de diatomeas, que son algas marinas unicelulares que secretan un esqueleto silíceo llamado frústula (Crespo, 2005).

A continuación, la Tabla 1 hace referencia a los compuestos químicos que poseen las tierras diatomeas, conteniendo así los márgenes entre los cuales se encuentran sus compuestos como también el promedio de ellos.

**TABLA 1. Composición química de las tierras diatomeas**

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
Variación %	42-58	13-19	4-14	1-12	1-11	1-7	1-7	-
Promedio %	57.4	15.8	5.5	4.7	2.1	3.2	3.1	-

Ejemplo de tierras diatomeas son las que han sido objeto de estudio en San Cristóbal de la Frontera, en el municipio de Candelaria de la Frontera, en el departamento de Santa Ana, ver figura 2.



**FIGURA 2. Cantera de tierra diatomea**

- **Materiales volcánicos:** La efusión del magma y el contacto del mismo con la atmósfera produce un enfriamiento brusco, con la consiguiente formación de rocas duras en las que parte de los minerales no han alcanzado a cristalizar, quedando en estado amorfo.

La obsidiana o vidrio volcánico que constituye parte importante de los basaltos, andesitas y otras rocas de enfriamiento rápido está constituida por sílice amorfa. En general los principales depósitos de puzolana son de origen volcánico y se explotan de preferencia las rocas acidas. Sin embargo, se conocen puzolanas constituidas por tobas basálticas alteradas y lavas básicas. Las andesitas pueden ser puzolanas efectivas si el contenido de sílice amorfa excede el contenido de sílice cristalina (Crespo, 2005).

Ejemplos de algunos lugares del país donde existe presencia de basaltos son: Conchagüita, volcán de Santa Ana, Izalco, Cerro Los Naranjos, Cerro de las Ninfas, Yacimiento existente en el Cerro La Herionda (Suchitoto), Sierra Tacuba, Cordillera del Bálsamo, Cordillera Jucuarán-Intipucá, etc.

Ejemplos de algunos lugares del país donde existe presencia de andesita son: Volcán de San Salvador, Caldera de Coatepeque, Volcán de San Vicente, Laguna Seca, El Pacayal (Chinameca), Conchagua, formación Cuscatlán, Volcán de Guazapa, Volcán de Cacahuatique, Cerro Tecapa, etc.

Basalto extraído para su posterior comercialización por la empresa La Cantera ubicada en el Km 57.5, carretera del litoral, San Diego, La Libertad. A 2 km al oriente del Puerto de La Libertad, ver figura 3 y 4.



**FIGURA 3. Cantera de Basalto en San Diego, La Libertad**





**FIGURA 4. Extracción de Basalto en San Diego, La Libertad**  
Fuente: La Cantera, Pedrera San Diego (Materiales Pétreos).

- **Materiales Piroclásticos:** Las acumulaciones de cenizas generadas durante las erupciones volcánicas explosivas, que por su alto contenido de materiales vítreos son propensas a sufrir reacciones como las requeridas para las puzolanas.

Más tarde por procesos geológicos de enterramiento estas cenizas se convierten en tobas, las cuales son rocas volcánicas bastante porosas, característica que les confiere una gran superficie interna favoreciendo su reactividad, entonces, como puzolana sirve tanto el sedimento como la roca (Rivas, 2012).

También se pueden incluir entre estos, lapilli, escoria volcánica, pumita, bombas volcánicas, etc. Ejemplo de escoria volcánica en figura 5 son los materiales esparcidos por el volcán Chaparrastique y de Pumita es la existente en el Volcán de Ilopango (ahora Caldera). La obsidiana o vidrio volcánico está también presente en tobas, tufas, y bombas volcánicas.



**FIGURA 5.** Escoria común en Volcán Chaparrastique

En rocas y materiales volcánicos hay que considerar dos factores diferentes controladores de la actividad puzolánica; por una parte, la composición química del magma originario que determina la de los productos, y por otra, la constitución y textura de los minerales de dichas rocas, las cuales dependen de la velocidad de enfriamiento y de los procesos de meteorización que los hallan afectado.

En las rocas volcánicas son especialmente interesantes las rocas ácidas (ricas en cuarzo y feldespato). Químicamente tienen la composición que se muestra en la tabla 2.

**TABLA 2.** Composición química de rocas y materiales volcánicos

<b>Composición</b>		<b>Valores límites</b>	<b>Valores medios</b>
<b>Óxido de Silicio</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	42-85	65
<b>Óxido de Aluminio</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	5-20	12.5
<b>Óxido de Hierro</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	1-14	5
<b>Óxido de Calcio</b>	<b>CaO</b>	0-12	3.5
<b>Óxido de Potasio</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	0-5	2
<b>Óxido de Sodio</b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0-5	2
<b>Óxido de Magnesio</b>	<b>MgO</b>	0-11	1.5
<b>Trióxido de Azufre</b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	0-1	0.5
<b>Perdida por Calcinación</b>	<b>P.C.</b>	0-15	6

- **Otras rocas y minerales no puzolánicos de origen:** Estos al descomponerse generan productos de naturaleza puzolánica, los cuales son muy escasos en el mundo.

### 2.2.3.2 Puzolanas Artificiales

Estos son materiales que deben su condición puzolánica a un tratamiento térmico adecuado. Dentro de esta denominación se incluyen los subproductos de determinadas operaciones industriales; tales como, residuos de bauxita, polvos de chimeneas de altos hornos, cenizas volantes, etcétera (Primero, 2016).

Entre estas se tienen:

- **Cenizas Volantes:** Producto de la combustión del carbón en las usinas termoeléctricas, donde son recogidas a través de electro filtros. Se dividen en dos categorías, las cuales están establecidas en la Norma ASTM C-618:

Clase F: son cenizas volantes con menos del 10% de óxido de calcio, resultantes de la combustión de la antracita y carbón bituminoso. Estas cenizas presentan un alto contenido de aluminosilicatos amorfos y también en menor proporción aluminosilicatos cristalinos, cuarzo, magnetita, hematita y hasta un 10 % de carbón sin quemar, presentan solo actividad puzolánica.

Clase C: de alto contenido de óxido de calcio (entre 15 y 35%), resultantes de la combustión del lignito y carbón sub bituminoso. Presentan elevados contenidos de aluminosilicatos amorfos y pequeñas cantidades de minerales cristalinos como aluminatos tricálcicos y sulfatos alcalinos con menos de un 1% de carbón sin quemar.

Un elevado porcentaje de los minerales cristalinos presentes resulta reactivo y les confiere a las cenizas propiedades cementicias las que se suman a la actividad puzolánica (Crespo, 2005).

La reactividad de las cenizas volantes como puzolanas depende del tipo y origen del carbón, composición química y mineralógica de éste, del contenido de fase vítrea después de quemado y de la granulometría principalmente.



**FIGURA 6. Ceniza volante**

**Las mayores ventajas del uso de las cenizas volantes son:**

- ✓ Reducción del impacto medioambiental, porque preserva el consumo de recursos naturales o materias primas (tanto en la fabricación del clinker, cementos de adición, como en la sustitución de cemento en hormigones), por ejemplo, en la producción de una tonelada de cemento, aproximadamente se deben extraer 1.6 toneladas de materia primas.
  
- ✓ Disminuye la emisión de gases de efecto invernadero, en particular CO<sub>2</sub>, que ha sido cuantificado por diversos expertos y asociaciones internacionales, por ejemplo, en la fabricación de cementos y hormigones por cada tonelada de cenizas empleadas se evita la emisión de alrededor de una tonelada de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.
  
- ✓ Produce un ahorro energético al ser sustituido parcial del cemento y también se obtienen hormigones con propiedades mejoradas (Torres, 2014).

- **Escorias de alto horno:** Surgen del proceso de reducción del mineral de hierro. Cuando la escoria es enfriada rápidamente con agua o aire, la mayor parte de la sílice, magnesio, alúmina y cal adoptan un estado amorfo, con las consecuentes propiedades hidráulicas.

Como subproductos industriales pueden obtenerse: escorias enfriadas lentamente al aire, escoria expandida mediante agregado de agua en el estado de fusión, escoria granulada enfriada rápidamente en agua, escoria pelletizada, etcétera (Crespo, 2005).



**FIGURA 7. Escorias de alto horno**

**Las mayores ventajas del uso de las escorias de hornos altos son:**

- ✓ La valorización de residuos y materias primas secundarias mediante su empleo en la construcción contribuye a la conservación de los recursos naturales.
- ✓ Ahorro energético y reducción de las emisiones a la atmósfera generadas en el proceso de fabricación del cemento.

- ✓ Disminución de las materias primas utilizadas para la fabricación del cemento.
- ✓ Obtención de cementos y hormigones de características mejoradas para determinadas aplicaciones (Torres, 2014).
- **Humos de Sílice:** Subproducto de las industrias que elaboran metales silíceos o aleaciones ferro-silíceas. En la reducción del cuarzo a silicio, a elevadas temperaturas, se produce óxido de silicio gaseoso, el cual es transportado a zonas de menor temperatura.

En contacto con el aire se oxida y se condensa en forma de pequeñas esferas de sílice amorfa. Este material, de elevada superficie específica, es recogido mediante filtrado de los gases (Crespo, 2005). La microsílice presenta colores grises que pueden variar de claro a oscuro dependiendo de los rellenos no silicios de la misma, y pueden ser carbón u óxidos de hierro por ser producto de un proceso de alto horno. En la figura 8 se observa el humo de sílice, su color y aspecto para así distinguirla de las otras puzolanas artificiales.



**FIGURA 8. Humos de Sílice**

**Características:**

La también conocida como microsílíce es producida como un polvo ultra fino de color gris, el cual tiene las siguientes propiedades típicas:

- a) Contienen por lo menos 90% de SiO<sub>2</sub>
- b) Partículas con tamaño promedio de 0.1-0.2 µm
- c) Superficie específica mayor de 15000 m<sup>2</sup>/kg

**Las mayores ventajas del uso del humo de sílices son:**

- ✓ Reducción del impacto medioambiental, por la disminución del volumen de residuos depositados en vertederos.
- ✓ Disminución de las materias primas utilizadas, conservando de esta forma las explotaciones mineras.
- ✓ Obtención de cementos y hormigones de propiedades mejoradas, ejemplo: El aumento de la resistencia, durabilidad, impermeabilidad, mejoramiento a la compresión, retracción.

**Las mayores desventajas del humo de sílices son:**

- ✓ Su dificultad de manipulación es en estado original, debido a su gran finura, lo que puede hacer necesario en algunos casos, un tratamiento previo del residuo.
- ✓ Que es un residuo industrial muy costoso (una tonelada de humo de sílice cuesta más o menos lo mismo que seis toneladas de cemento).
- ✓ La producción mundial de este residuo es muy pequeña en comparación con la demanda mundial de adiciones reactivas al cemento (Torres, 2014).



- **Sílice condensada:** Partículas esféricas de elevada área superficial y tamaño menor a una micra, generadas por la condensación de vapores en la producción de carburo de silicio (Crespo, 2005).



FIGURA 9. Sílice condensada

- **Sílice geotérmica:** Partículas de tamaño submicrónico, de elevada área superficial, producidas como incrustaciones en líneas de vapor geotermal en plantas de generación de electricidad (Crespo, 2005).



FIGURA 10. Sílice geotérmica



- **Cenizas de cáscaras de arroz:** La cáscara de arroz es la parte de la planta de arroz que cubre el grano, esta contiene una alta concentración de sílice, generalmente más de 80-85%. y es esto lo que le da a esta ceniza sus propiedades puzolánicas.

La cáscara de arroz es responsable de aproximadamente el 30% del peso grueso del grano de arroz y normalmente contiene el 80 % de sustancias orgánicas y el 20 % de inorgánicas. La cáscara de arroz se produce en millones de toneladas por año como un material desechado de la agricultura y de procesos industriales.

La cáscara de arroz calcinada bajo condiciones controladas en el rango de 550–700°C produce sílice en estado amorfo con una alta reactividad. La ceniza de cáscara de arroz es sumamente un material puzolánico. La sílice no-cristalina y la alta área de superficie específica de la ceniza de cáscara de arroz son responsables de su alta reactividad puzolánica.

La ceniza de cáscara de arroz se ha usado en las mezclas cal-puzolana y se puede utilizar convenientemente para sustituir parcialmente el cemento Portland (Torres, 2014).



**FIGURA 11. Cenizas de cáscaras de arroz**

- **Cenizas de caña de azúcar:** El bagazo de caña de azúcar es un residuo agroindustrial procedente de la industria azucarera, que después de recibir tratamiento térmico obtiene propiedades puzolánicas. Las cantidades de bagazo que se genera en la producción de azúcar son considerables, por tal razón este se aprovecha para la producción de electricidad en otros países.

Las condiciones de quema del bagazo son importantes en la obtención de las propiedades de la ceniza, a través de este proceso el bagazo atraviesa por varias modificaciones en su estructura, es por ello que para obtener una ceniza con alta actividad puzolánica, el bagazo debe someterse a temperaturas no máximas de 800° C.

La actividad puzolánica de las cenizas depende de algunos parámetros como: el tamaño de las partículas, la temperatura de calcinación, naturaleza cristalina y la composición química.

La ceniza resultante constituye una amenaza al medio ambiente ya que se coloca en vertederos sin ningún otro uso (Torres, 2014).



**FIGURA 12. Cenizas de caña de azúcar**

- **Arcillas termo-activadas:** Las arcillas activadas o calcinadas artificialmente son residuos de la quema de ladrillos de arcilla y otros tipos de arcilla que hayan estado sometidas a temperaturas entre 600 a 1000 ° C, ver figura 13 (Crespo, 2005).



**FIGURA 13.** Ladrillos siendo incinerados para producir cenizas de carácter puzolánico

### **2.2.3.3 Otras clasificaciones**

Los sistemas de clasificación mencionados en este documento son los que se consideraron de importancia; sin embargo, no son los únicos (Rivas, 2012).

### **2.2.4 Actividad Puzolánica**

La reacción entre una puzolana y el hidróxido de calcio es llamada la reacción puzolánica. Cuando reaccionan en una mezcla, el cemento Portland y la puzolana en la presencia de agua, una reacción similar a la reacción ácido-base se lleva a cabo, participando por una parte la cal y los álcalis liberados por la reacción de hidratación del cemento Portland y por la otra los óxidos ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) de la puzolana, por consiguiente, la presencia de la puzolana en el sistema de hidratación modifica los mecanismos de hidratación de los compuestos principales del cemento Portland, afectando el calor de hidratación, contenido de hidróxido de calcio, la cantidad de agua combinada y el grado de reacción de los componentes.

El principal producto de la reacción puzolánica es la fase silicato de calcio hidratado (C-S-H), que es similar al producido en la reacción del agua con el cemento Portland y que contribuye a la resistencia mecánica de las pastas, especialmente a edades avanzadas de hidratación.

Al igual que en las pastas de cemento Portland, en la reacción de hidratación de cemento mezclado con puzolanas, se pueden encontrar productos de la reacción muy similares a los encontrados en las pastas de cemento Portland sin puzolanas, la diferencia entre las fases encontradas involucra la variación en la reacción de sus componentes y su morfología.

El progreso de la reacción puzolánica es comúnmente evaluado en términos del consumo de Hidróxido de Calcio en la matriz del cemento (Mariano, 2008). La cantidad total de hidróxido de calcio combinado con la puzolana depende principalmente de:

- La naturaleza de las fases activas
- El contenido de SiO<sub>2</sub>
- Cantidad de fase amorfa
- Área superficial
- Relación cemento/puzolana
- Relación agua/sólidos
- Temperatura de fraguado y curado
- Tiempo de curado

### **2.2.5 Causas de la actividad puzolánica**

En la naturaleza se encuentran diversos materiales que presentan en estado natural propiedades puzolánicas. Por comportamiento puzolánico se entiende, "la capacidad de reacción de estos materiales con cal o con la cal generada por la reacción de los minerales del clínker en una solución acuosa, en presencia o ausencia de yeso, con formación de fases hidratadas que contribuyen al endurecimiento de la pasta". La mayoría de los materiales llamados puzolánicos son productos de naturaleza ácida, o sea en su composición química predominan los óxidos de silicio ( $\text{SiO}_3$ ), de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), capaces de reaccionar y fijar la cal ( $\text{CaO}$ ).

En el caso de los cementos puzolánicos, la cal liberada en las reacciones de hidratación puede reaccionar a su vez con la puzolana contenida en el cemento, formando compuestos con propiedades aglomerantes. La actividad de las puzolanas frente a la cal tiene su origen en la estructura inestable de los compuestos que la conforman, esencialmente compuestos derivados del óxido de silicio ( $\text{SiO}_3$ ), cristalográficamente amorfos (vidrio amorfo), y en la elevada superficie específica de estos compuestos (superficie activa para la reacción) (Rivas, 2012).

La actividad puzolánica responde a un principio general que reviste aspectos particulares en casos concretos. Dicho principio se basa en que la sílice y la alúmina, como componentes ácidos de los materiales puzolánicos, reaccionan con la cal a condición de que sus uniones en dichos materiales sean lábiles.

Los casos particulares en los que se da la necesaria labilidad de estas uniones están constituidos por las estructuras zeolíticas, los vidrios volcánicos y los materiales activados. El óxido de hierro se supone que actúa como la alúmina, pero de una forma más atenuada y lenta. En lo que se refiere a las puzolanas de origen mineral, su actividad se ha atribuido, tanto a los constituyentes amorfos, como a los cristalinos, y en particular a los de naturaleza zeolítica (David, 2017).

### **2.2.6 Aplicación de las puzolanas**

Las puzolanas se utilizan con dos fines principales, el primero es utilizarlo en la fabricación de cementos puzolánicos a partir de agregar material natural o artificial que es molido junto con el clinker; el segundo uso es introducirlo directamente en la concretera como un ingrediente más, en la elaboración del concreto o mortero. El uso de este material es utilizado por distintas razones, como fijar la cal liberada de los silicatos del cemento y mejorar la durabilidad del mismo; estas propiedades son de mucha ayuda cuando se utiliza concreto en obras sometidas a constante agua.

De todos los conglomerantes hidráulicos el cemento Pórtland y sus derivados son los más empleados en la construcción debido a estar formados, básicamente, por mezclas de caliza, arcilla y yeso que son minerales muy abundantes en la naturaleza, ser su precio relativamente bajo en comparación con otros materiales y tener unas propiedades muy adecuadas para las metas que deben alcanzar.

Dentro de los conglomerantes hidráulicos entran también los cementos de alto horno, los puzolánicos y los mixtos, teniendo todos éstos un campo muy grande de empleo en hormigones para determinados medios. Los cementos se emplean para producir morteros y hormigones cuando se mezclan con agua y áridos, naturales o artificiales, obteniéndose con ellos elementos constructivos prefabricados o contruidos "in situ".

Una de las nuevas tendencias de los diseñadores de superestructuras es la de utilizar resistencias mayores a  $f'c=70$  MPa con resistencias no de 28 días sino de 56 o 90 días para la edad de diseño de hormigón (David, 2017). Ciertos tipos de puzolanas naturales (tales como la piedra pómez en sus distintas variedades) o artificiales (tales como las cenizas volantes) pueden tener, entre otras, las siguientes aplicaciones:

- En vías de comunicación, como árido antideslizante y como relleno (filler) en las capas de rodadura.

- Como elemento filtrante in situ (caminos, campos de deportes, etc.) o en prefabricados (por ejemplo, tubos de drenaje).
- En estabilización mecánica o química de suelos.
- En suelo-cemento.
- En problemas de estanqueidad (inyecciones).
- En la preparación de áridos ligeros.
- En cerámica porosa

## **2.3 Aditivos para la elaboración de concreto**

### **2.3.1 Definición**

Los aditivos son productos que se adicionan en pequeña proporción al concreto durante el mezclado en porcentajes entre 0.1% y 5% (según el producto o el efecto deseado) de la masa o peso del cemento, con el propósito de producir una modificación en algunas de sus propiedades originales o en el comportamiento del concreto en su estado fresco y/o en condiciones de trabajo en una forma susceptible de ser prevista y controlada. Esta definición excluye, por ejemplo, a las fibras metálicas, las puzolanas y otros.

En la actualidad los aditivos permiten la producción de concretos con características diferentes a los tradicionales, han dado un creciente impulso a la construcción y se consideran como un nuevo ingrediente, conjuntamente con el cemento, el agua y los agregados.

Existen ciertas condiciones o tipos de obras que los hacen indispensables. Tanto por el Comité 116R del ACI como por la Norma ASTM C 125 definen al aditivo como: "Un material distinto del agua, de los agregados y cemento hidráulico que se usa como componente del concreto o mortero.

Las dosis en las que se utilizan los aditivos, están en relación a un pequeño porcentaje del peso de cemento, con las excepciones en las cuales se prefiere dosificar el aditivo en una proporción respecto al agua de amasado”.



**FIGURA 14. Aditivo siendo agregado al concreto**

### **2.3.2 Clasificación de aditivos**

Debido a que sus efectos son muy variados, una clasificación así es muy extensa, además debido a que un solo aditivo modifica varias características del concreto, además de no cumplir todas las que especifica.

**Según la norma técnica ASTM-C494 es:**

- a) TIPO A: Reductor de agua
- b) TIPO B: Retardante
- c) TIPO C: Acelerante
- d) TIPO D: Reductor de agua retardante
- e) TIPO E: Reductor de agua acelerante
- f) TIPO F: Súper reductor de agua
- g) TIPO G: Súper reductor de agua retardante



### **Según el comité 212 del ACI**

Los clasifica según los tipos de materiales constituyentes o a los efectos característicos en su uso:

- ✓ Aditivos acelerantes.
- ✓ Aditivos reductores de agua y que controlan el fraguado.
- ✓ Aditivos para inyecciones.
- ✓ Aditivos incorporadores de aire.
- ✓ Aditivos extractores de aire.
- ✓ Aditivos formadores de gas.
- ✓ Aditivos productores de expansión o expansivos.
- ✓ Aditivos minerales finamente molidos.
- ✓ Aditivos impermeables y reductores de permeabilidad.
- ✓ Aditivos pegantes (también llamados epóxicos).
- ✓ Aditivos químicos para reducir la expansión debido a la reacción entre los agregados y los alcalices del cemento.
- ✓ Aditivos fungicidas, germicidas o insecticidas.
- ✓ Aditivos floculadores.
- ✓ Aditivos colorantes.

### **2.4 Adiciones minerales activas**

Una de las prioridades del sector cementero es la búsqueda de cementos más eco-eficientes y respetuosos con el medioambiente. Para ello, los esfuerzos se dirigen hacia la fabricación de cementos con mayores contenidos de adiciones reactivas.

También existen otros materiales denominados inertes que pueden adicionarse al cemento con otros fines que no sea el consumo de cal (Torres, 2014).

#### **2.4.1 Definición de adición mineral activa**

Las adiciones minerales son materiales de origen natural o artificial que pueden incorporarse al concreto como reemplazo del cemento o del agregado fino, estos reaccionan con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente formando compuestos con propiedades hidráulicas dando lugar a modificaciones de las propiedades del mismo como también a mejoras tecnológicas en su desempeño, ya sea en su estado fresco como en sus propiedades resistentes y durables.

Hoy en día, los cementos con adiciones constituyen una importantísima opción para mitigar el impacto ambiental de la producción de los cementos portland al reducir los consumos energéticos y con ello las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera, además de permitir el consumo de los desechos de otros procesos industriales potencialmente contaminantes al medio ambiente, como el caso de las cenizas volantes y escorias de altos hornos.

Las adiciones minerales activas son materiales que dada la diversidad de materiales que pueden constituirse en adiciones minerales activas, es que admiten muchas clasificaciones.

En diferentes bibliografías y en internet, las clasificaciones varían según el autor. Éstas pueden ser por su forma de producción (naturales y artificiales), por su origen (orgánicas o inorgánicas), por su procesamiento térmico, por su carácter y composición (en relación a las cantidades relativas de óxidos de sílice y de aluminio), por su interacción con el cemento portland, entre otras.

Al utilizar adiciones con el concreto no deben sobrepasarse valores límites ya que, en caso contrario, pueden resultar perjudicadas la durabilidad del concreto o la

protección contra la corrosión, sin que esta influencia desfavorable pueda ser detectada mediante ensayos previos de corta duración.

Al inicio de las investigaciones acerca de los materiales suplementarios solo existían sistemas binarios, que es el que se obtiene al combinar el cemento Portland con un solo material cementicio suplementario. En la actualidad, el estudio e incorporación de nuevas adiciones ha devenido en el surgimiento de formulaciones más complejas como son los sistemas ternarios y los cuaternarios.

En general las adiciones, a diferencia de lo que ocurre con los aditivos, se agregan al concreto en cantidades importantes, por lo que es necesario tenerlas en cuenta al determinar la composición volumétrica del concreto.



**FIGURA 15. Diferentes tipos de adiciones minerales**

#### **2.4.2 Condiciones de empleo**

Las adiciones pueden ser empleadas para:

- a) Aumentar el cementante y corregir una deficiencia en el concreto en mezclas pobres en partículas muy finas, al influir en el comportamiento de la pasta fresca de la misma manera que el cemento, evitando problemas de trabajabilidad y acabado.

- b) Evitar el empleo de cemento adicional al requerido para obtener una resistencia determinada.
- c) Contribuir al desarrollo de la resistencia del concreto, permitiendo utilizar menos cemento para alcanzar una resistencia determinada.
- d) Modificar las propiedades de la pasta fresca y las del concreto endurecido y, al mismo tiempo, reducir el costo de la unidad cúbica de concreto.

### **2.4.3 Proporcionamiento**

Generalmente, el volumen de adición empleado puede ser alto si el concreto es diseñado para óptimas propiedades y máxima economía. Las adiciones deben ser consideradas como un ingrediente más del concreto y no como un reemplazo del cemento. Las técnicas de diseño de mezclas que incluyen adiciones no difieren de las utilizadas en el diseño de mezclas sin adiciones. Un método puede ser el indicado en la recomendación ACI 211.

Las adiciones se emplean en rangos que varían del 7% al 35% en peso del medio cementante total del concreto, dependiendo del uso y especificaciones. Pueden ser empleadas para compensar la deficiencia de finos, o ser consideradas como parte del agregado fino y su presencia no debería tener efecto sobre el contenido de cemento a menos que se modifiquen los requisitos de agua de la mezcla.

Siempre deben prepararse mezclas de prueba y ensayarse para verificar la validez de las proporciones del concreto seleccionadas que contienen aditivo, algunas causan un incremento en los requisitos de agua, otras tienen poco o ningún efecto, y finalmente otras reducen los requisitos de agua del concreto en el cual son empleadas (Cervantes, 2006).

#### **2.4.4 Diferencias entre aditivo y adición mineral**

A diferencia de los aditivos, que permiten obtener las propiedades deseadas, las "adiciones" son productos de origen mineral finamente divididas, cuya incorporación a la mezcla tiene por finalidad reaccionar químicamente con el hidróxido de calcio resultante de la hidratación del cemento, para formar tobermorita adicional, disminuyendo o eliminando los poros capilares e incrementando las resistencias mecánicas de la pasta y la durabilidad del concreto, cumpliéndose con ello la Teoría de Feret sobre "la relación inversa entre la porosidad y la resistencia del concreto".

Los aditivos no pueden ser un porcentaje muy elevado del peso total del cemento normalmente ronda alrededor del 5 % sin embargo las adiciones sustituyen gran parte del cemento agregando en cierta medida mejores capacidades y estas pueden rondar incluso sobre el 35% del peso total.

Por tanto, debido a esto podemos afirmar que las adiciones son un componente fundamental que requiere de un diseño de mezcla diferente, como razón didáctica podríamos ejemplificar un sistema ideal en el que se pueden agregar y desagregar componentes de una mezcla homogénea de la siguiente manera, supongamos que tenemos dos cementos uno adicionado al 35% y otro con aditivos al 5% si nosotros retiramos la adición mineral del 35% simplemente el cemento deja de funcionar.

Pero si del cemento con aditivos retiramos el 5% lo que nos queda es cemento portland que tiene su propio diseño de mezcla independiente del aditivo, claro dentro del ejemplo anterior podrían entrar muchas otras variables pero lo que se quiere esquematizar es la dependencia o independencia de uno u otro componente en la elaboración de concreto. Los aditivos, sustancias de origen químico, pueden modificar una o muchas de las propiedades del concreto. Las adiciones están referidas fundamentales al incremento de las resistencias, por aumento del gel, y al incremento de la durabilidad, por disminución significativa de la capilaridad.

#### **2.4.5 Efecto de la utilización de puzolanas sobre las propiedades del concreto fresco**

Las puzolanas producen una mezcla cohesiva que mantiene una consistencia plástica, mejorando la trabajabilidad, absorben el agua de la mezcla y la mantienen en el sistema, mejorando el acabado.

Su empleo reduce la segregación y exudación, e incrementa la resistencia por reemplazo de las partículas finas que faltan en el agregado. No requieren un incremento en el contenido total de agua para lograr la consistencia deseada. La contracción por secado y la absorción del concreto endurecido no son afectadas por su empleo.

Las puzolanas gruesas con un pobre perfil de partículas pueden requerir un incremento en el contenido de agua del concreto para un asentamiento dado, con el riesgo de incrementar la exudación y segregación.

Si su relación de área superficial de sólidos a volumen de agua es baja, la magnitud de la exudación es relativamente alta. Para tales mezclas, la exudación tiende a reducir la homogeneidad del concreto. La falta de ésta se manifiesta en grandes fisuras abiertas y reducción potencial del concreto con incremento de la permeabilidad y absorción. Un incremento del volumen de una puzolana adecuada resuelve los problemas mencionados al incrementar la relación del área superficial de sólidos al volumen de agua.

Las puzolanas incrementan la cohesividad de la mezcla al producir una pasta más plástica que permite que el concreto consolide fácilmente y fluya libremente bajo vibración. Igualmente ayuda a reducir la segregación. El perfil deberá ser partículas suaves y redondeadas a fin de reducir la demanda de agua, permitiendo máximas proporciones de materia sólida y mínimas de agua.

Las puzolanas pueden extender el tiempo de fraguado del concreto con reducción del cemento. Las características de tiempo de fraguado son influenciadas por la temperatura ambiente y del concreto, el tipo, fuente, contenido y fineza del cemento, contenido de agua de la pasta, los álcalis solubles en agua, el uso y dosáje de otros aditivos, la cantidad de puzolana y la fineza de ésta.

El efecto de la puzolana sobre el tiempo de fraguado se determina por ensayos. La presión sobre los encofrados puede incrementarse, con el resultado de una pérdida de asentamiento lenta, incremento de la trabajabilidad, o extensión de las características de tiempo de fraguado (Cervantes, 2006).

#### **2.4.6 Efecto de la utilización de puzolanas sobre las propiedades del concreto endurecido**

La puzolana en los concretos permite menor permeabilidad, reducción en el calor de hidratación, reducción en la reacción álcali-agregados, reducción en la expansión, incremento en la resistencia a edades tempranas, e incremento en la resistencia al ataque por sulfatos.

- **Resistencia**

Las puzolanas contribuyen a la resistencia debido a su composición química y a sus características físicas en términos del acomodo de partículas. Cuando se emplea puzolanas de baja actividad química para reemplazar al cemento sobre la base de iguales volúmenes, la resistencia inicial puede reducirse.

- **Resistencia a los sulfatos**

El empleo de puzolanas con cemento portland en el concreto suele incrementar la resistencia a ataques agresivos por agua de mar, soluciones de sulfatos en el suelo y aguas ácidas naturales.

La mejora es mayor para concretos con bajo contenido de cemento. El empleo de puzolanas con cemento portland resistente a los sulfatos puede no incrementar la resistencia a estos y si un compuesto aluminoso químicamente activo está presente en la puzolana, puede resultar una reducción en la resistencia del concreto a los sulfatos.

Los cementos mezclados que contienen sílice natural o puzolanas artificiales, escorias, o microsílices, tienen mejor resistencia a los sulfatos que los cementos portland que tenían el mismo contenido de aluminato tricálcico.

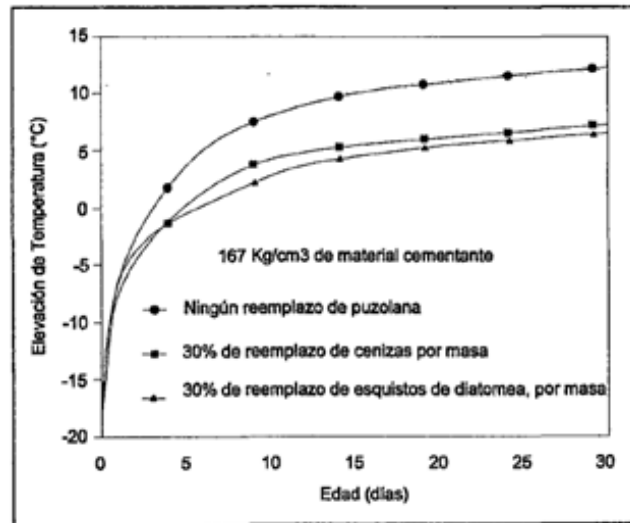
- **Elevación de temperatura**

Las puzolanas han sido empleadas en concretos masivos como un reemplazo parcial del cemento portland para reducir la elevación de temperatura.

El calor de hidratación con que una puzolana puede contribuir en la hidratación es aproximadamente el 50% que el que sería desarrollado por una cantidad igual de cemento portland. La magnitud más lenta de desarrollo de calor del concreto que contiene puzolana permite disminuir la elevación de temperatura y bajar los costos cuando se lo compara con los de un concreto sin puzolana.

La figura 16 muestra los efectos benéficos de emplear una ceniza y una puzolana natural en la mezcla de concreto para reducir la elevación de temperatura en concretos masivos. Como se puede apreciar la temperatura de la mezcla que no contiene adición puzolánica llega aproximadamente a los 12 grados centígrados a los 30 días; por otro lado, la que contiene un 30% de reemplazo de ceniza por masa llega a una temperatura por sobre los 6 grados centígrados a los 30 días. Por último, se observa que la mezcla con 30% de reemplazo de esquistos de diatomea por masa, está por sobre los 5 grados centígrados a los 30 días, concluyendo así la reducción de temperatura en cementos con adición puzolánica.





**FIGURA 16. Efecto de Puzolána sobre la elevación de temperatura del concreto.**  
Fuente: ACI 232, IR-00, " Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete"

- **Permeabilidad**

La permeabilidad del concreto con puzolana se reduce significativamente en edades posteriores. Ello se debe a una disminución de la segregación y exudación y a una reducción en los requerimientos de agua. La reducción de la permeabilidad, cuando se la relaciona con la resistencia a la penetración del ion cloruro, es importante para la protección de la corrosión del acero de refuerzo.

Se ha demostrado que el incremento en la concentración de puzolana natural y la disminución de la relación agua-cementante disminuyen la difusión y permeabilidad.

- **Resistencia a la congelación y deshielo**

El efecto de la puzolana sobre la resistencia del concreto durante los procesos de congelación y deshielo, así como la acción de los descongelantes químicos, dependen de las proporciones, la resistencia en compresión, y condiciones de humedad del concreto.

A demás, las puzolanas finamente divididas contienen residuos de carbón que tiende a reducir la cantidad de aire atrapado en la masa y, por ello, pueden requerir un mayor dosaje de aditivo incorporador de aire para obtener una cantidad de aire incorporado o el dosaje de aire deseado.

Los concretos con cenizas de cáscara de arroz tienen buena resistencia a la penetración de iones cloruro y buen comportamiento bajo ciclos de congelación y deshielo.

- **Contracción por secado**

La contracción por secado de concretos con cemento portland puzolánico depende del grado de hidratación del compuesto y de la demanda de agua de la mezcla. La tendencia al agrietamiento resultante de la contracción por secado en concretos que contienen puzolana es menor que la de concretos similares sin puzolana.

Los estudios demuestran que la contracción por secado de concretos con reemplazos del 10%, 20% y 30% por puzolana no tenían diferencias significativas con la de concretos que tenían el cemento portland de referencia (Cervantes, 2006).

#### **2.4.7 Aspectos económicos**

El proceso más caro en la fabricación del cemento portland es el relacionado al uso del horno, por el elevado consumo de combustible que éste necesita para producir el clínker. Por lo tanto, si se considera el hecho que en una tonelada de cemento con adición puzolánica se puede reducir hasta en un 50% del cemento portland, el cual es reemplazado por material puzolánico, se tiene una ganancia económica evidente, ya que el costo de obtención y procesamiento del material puzolánico es inferior al no requerir de tratamiento térmico (Román, 2009).

## **2.5 Caracterización de materiales**

### **2.5.1 ¿Qué es la caracterización de materiales?**

Consiste en la obtención de información acerca de un material bajo estudio (composición, estructura, topología, topografía, morfología, propiedades en general) a partir de la interacción de una señal (eléctrica, luminosa, térmica, etc.) con una porción de dicho material. Por tanto, toda caracterización de un material supone una agresión al mismo, es decir, una perturbación del mismo.

El estudio de la respuesta del material a dicha perturbación nos permite conocer las propiedades o más concretamente, las peculiaridades del mismo. A veces se suele confundir el término caracterización con el de análisis.

Toda caracterización implica realizar un análisis del material, sin embargo, no todo análisis implica realizar una caracterización. La ayuda de las nuevas técnicas de caracterización y análisis ha sido indispensable en el diseño, síntesis y procesado de los materiales, permitiendo un cuidadoso control de sus propiedades, e incluso en muchos casos, con la posibilidad de prefijar de antemano alguna de sus características (“materiales a la carta”).

El estudio de los materiales tiene sentido desde el momento en el que se piensa que van a tener una función útil en nuestra vida. Atendiendo a la función que va a tener un material, es necesario que éste posea una serie de propiedades que le van a ser útiles para poder desempeñar dicha función de manera adecuada y duradera.

Antiguamente la selección de materiales se hacía mediante ensayos de prueba y error. Se tomaban objetos directamente de la naturaleza y posteriormente se probaba su utilidad. Hoy en día es necesario conocer con antelación las propiedades de un determinado material con objeto de predecir si podrá ser útil o no para una determinada aplicación.

Si, por ejemplo, se desea un material muy resistente cuando esté sometido a esfuerzos unidireccionales, será necesario medir a partir de ensayos de tracción la tensión máxima que dicho material es capaz de soportar (Pres, 1993).



FIGURA 17. Cubos con adiciones puzolánicas sometido esfuerzos unidireccionales

## 2.5.2 Términos asociados a la caracterización

### Técnica instrumental o de análisis

Es un proceso científico fundamental que ha demostrado ser útil para proporcionar información acerca de la caracterización de sustancias y/o materiales. La espectroscopia infrarroja es un ejemplo de una técnica analítica.

En este caso el proceso científico consiste en la capacidad que tienen algunas sustancias de absorber una cierta cantidad de radiación infrarroja a valores de frecuencia muy concretos.

Como las frecuencias a las que se producen las absorciones se asocian a vibraciones concretas de enlaces o grupos de enlaces y la cantidad de radiación absorbida es función de la cantidad de dichos enlaces o grupos de enlaces presentes, mediante esta técnica se puede tener información sobre los enlaces y grupos de enlaces presentes en el material (análisis cualitativo) así como de la cantidad de ellos (análisis cuantitativo).

Ejemplos de materiales en que se aplica: polímeros, contaminantes ambientales, estudios forenses, medicina, agricultura, mineralogía, diversas áreas de la química (orgánica, organometálica, etcétera).



**FIGURA 18. Análisis de espectroscopia infrarroja**

### **Método instrumental o de análisis**

Como las técnicas analíticas (de caracterización) deben tener más de una aplicación, a parte de la propia caracterización, por ejemplo, seguimiento de procesos fisicoquímicos, es necesario definir un método instrumental. Precisamente éste es una aplicación específica de una técnica de análisis para resolver un determinado problema. Por tanto, el método es el procedimiento seguido durante la utilización de un equipo para obtener una información concreta (D.A. Skoog, 2004).

## 2.6 Métodos y ensayos para la evaluación de puzolanas

### 2.6.1 Ensayo de Fluorescencia de Rayos X

La fluorescencia de rayos X, consiste en emisión de rayos X secundarios (o fluorescentes) característicos de un material que ha sido excitado al ser «bombardeado» con rayos X de alta energía o rayos gamma. Este fenómeno es muy utilizado para análisis elemental y análisis químico, particularmente en la investigación de metales, vidrios, cerámicos y materiales de construcción, así como en la de geoquímica, ciencia forense y arqueología.



FIGURA 19. Equipo de Fluorescencia de Rayos X

### Principio de la Fluorescencia de Rayos X

La técnica de Fluorescencia de Rayos X se basa en el estudio de las emisiones de fluorescencia generadas después de la excitación de una muestra mediante una fuente de rayos X. La radiación incide sobre la muestra excitando los átomos presentes en la misma, que emiten a su vez radiación característica denominada fluorescencia de rayos X. Esta radiación, convenientemente colimada, incide sobre un cristal analizador (con espaciado interatómico  $d$ ) que la difracta en un ángulo ( $\theta$ ) dependiente de su longitud de onda ( $\lambda$ ) por la ley de Bragg ( $\text{sen } \theta = n\lambda/2d$ ).

Un detector que puede moverse sobre un determinado rango de dicho ángulo mide el valor de la intensidad de radiación en un ángulo determinado y por tanto para una longitud de onda específica, que es función lineal de la concentración del elemento en la muestra que produce tal radiación de fluorescencia.

### **2.6.2 Método de Difracción con Rayos X**

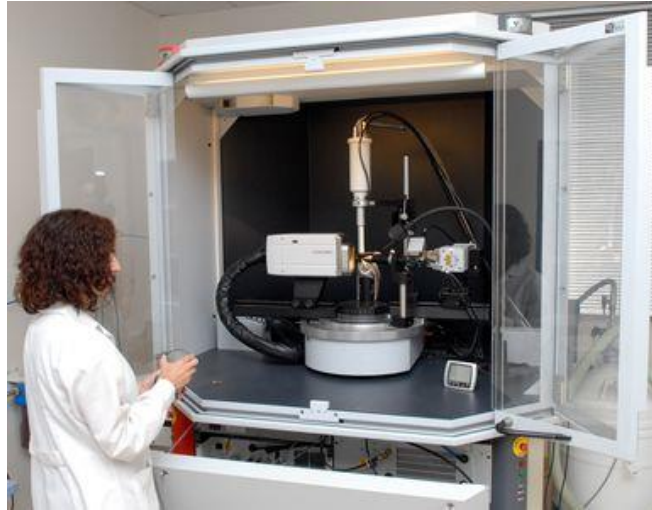
La cristalografía de rayos X nos proporciona la imagen más adecuada que podemos tener de las estructuras cristalinas. Los métodos de difracción de rayos X han constituido y constituyen la herramienta más poderosa de que se dispone para el estudio de la estructura íntima de la materia cristalina, dotando de una extensa base de resultados estructurales a la química, a la mineralogía y a la biología, donde el impacto que ha originado ha sido absolutamente revolucionario.

Una vez que se comprende el orden interno del medio cristalino se está en disposición de estudiar la determinación de la geometría de la celda unidad, mediante difracción de rayos X, para obtener las dimensiones de la celda unidad, el tipo de retículo, el sistema cristalino y los posibles grupos espaciales. El estudio de la dependencia de las intensidades de los haces de rayos refractados de las posiciones de los átomos dentro de una celda unidad, y el estudio de los métodos para obtener las posiciones atómicas a partir de valores experimentales de las intensidades constituye en campo profundo de estudio de la química inorgánica y la químico-física.

Dado que las longitudes de los rayos X son del mismo orden que las distancias interatómicas, cuando dichos rayos interactúan con sólidos cristalinos se produce un fenómeno de difracción que nos permite estudiar su estructura.

### **Principio de la Difracción de Rayos X**

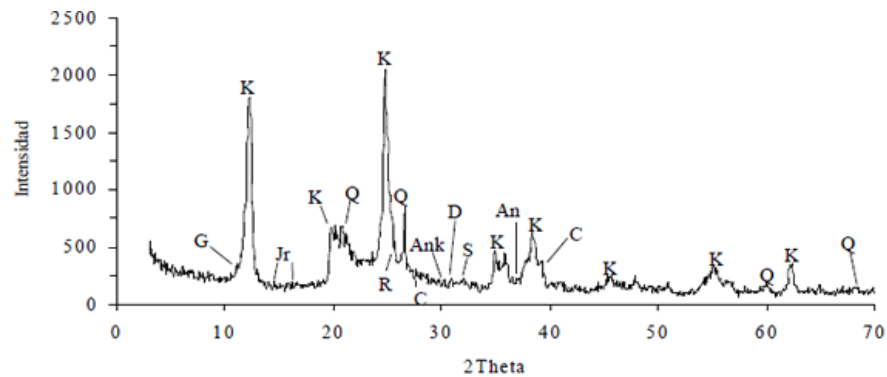
Una fase cristalina dada siempre produce un patrón de difracción característico, bien esté en estado puro o como constituyente de una mezcla. Este hecho es la base para el uso de la difracción como método de análisis químico. El análisis cualitativo se realiza mediante la identificación del patrón de esa fase. Para la identificación cualitativa se usa una base de datos contiene datos con información cristalográfica y bibliográfica para gran cantidad de fases cristalinas de materiales inorgánicos, minerales, productos farmacéuticos, etc.



**FIGURA 20. Difractómetro de Rayos X**

A partir del difractograma de una muestra la búsqueda se realiza mediante ordenador y consiste en identificar los patrones que mejor se ajustan a los picos del difractograma imponiendo restricciones en la composición química de la fase (si se conocen) o mediante los picos de mayor intensidad en el difractograma.

A continuación, la figura 21 nos presenta el ejemplo de un difractograma en el cual se pueden observar las diferencias entre picos, los cuales son diferentes para cada mineral (Stock, 2001).



**FIGURA 21. Difractograma de minerales**



### 2.6.3 Método de Luxan's

Este método consiste en medir la reactividad puzolánica en base a los cambios de la conductividad eléctrica. En la primera fase se mide la conductividad en un medio acuoso que contiene hidróxido de sodio al 0.5 %, para esto se puede utilizar una Sonda Hach, el cual es un aparato que se utiliza para realizar análisis en líquidos. Es un medidor multiparámetros pues tiene funciones como medir conductividad, temperatura, PH y TDS, basta con introducir el electrodo un breve periodo de tiempo dentro del líquido para obtener resultados precisos y fiables.



FIGURA 22. Sonda HACH

En la segunda fase se le agrega una cierta cantidad de material puzolánico al medio acuoso y se realiza nuevamente una medición, y se evalúa su actividad puzolánica en base a los cambios de conductividad que arrojaron los dos ensayos, teniendo como base tres categorías de reactividad, encontrando así en que rango de actividad puzolánica se encuentra el material en análisis. (M.P. Luxan's, 1989).

TABLA 3. Método de Luxan's

PUZOLANICIDAD	CAMBIO EN LA CONDUCTIVIDAD mS/cm
BUENA	Mayor de 1.2
MODERADA	Entre 1.2 – 0.4
NO PUZOLANICO	Menor de 0.4

Fuente: Rapid Evaluation of Pozzolanic Activity of Natural Products by Conductivity Measurement.

#### 2.6.4 Ensayo de Microscopio de Campo Claro

La microscopía óptica es una técnica cuyo fundamento es la generación de una imagen por interacción de la luz con la muestra. Esta imagen puede revelar detalles con un aumento de hasta 2000 veces y una resolución de 0,5 nm. La información que se obtiene con el microscopio óptico revela la forma, tamaño y ordenación de las características visibles del material.

En un microscopio de luz transmitida, la luz atraviesa la muestra y la imagen se recoge en la lente del objetivo. Para materiales opacos, la luz se hace pasar a través del objetivo, recogiendo en el mismo la imagen formada por reflexión. Ello permite un estudio pormenorizado de la topografía del material. En la figura 23 se representa el esquema de un microscopio óptico con sus partes principales.



FIGURA 23. Partes de un Microscopio de Campo Claro

El microscopio óptico puede operar en dos modos de imagen distintos, el de campo claro y el de campo oscuro. El modo de campo claro es el modo normal de operación de un microscopio, y se utiliza para materiales transparentes, donde el contraste de la luz transmitida se basa en las variaciones de color y densidad de la muestra. El modo de campo oscuro es menos común, pero posee un contraste superior. El modo

de reflexión se utiliza ampliamente para incrementar el contraste de superficies ásperas o rugosas.

### **2.6.5 Ensayo de Resistencia Mecánica**

La resistencia a la compresión simple es la característica mecánica principal del concreto. Se define como la capacidad para soportar una carga por unidad de área, y se expresa en términos de esfuerzo, generalmente en  $\text{kg/cm}^2$ , MPa y con alguna frecuencia en libras por pulgada cuadrada (psi).

Dentro de los métodos mecánicos conocidos para evaluar un material puzolánico en cuanto a su actividad puzolánica se encuentra el método del cemento, el cual incluye realizar ensayos de resistencia a la compresión y así determinar el índice de actividad resistencia mediante su diferenciación en base a una mezcla de control estándar, el cual indicara si las puzolanas presentan niveles mínimos de resistencia cuando son utilizadas en forma conjunta con el cemento. De acuerdo a la experiencia internacional es de los más confiables para evaluar la función de la puzolana en el cemento. Los métodos existentes exigen esperar de 7 a 28 días para determinar si un material presenta las propiedades puzolánicas (David, 2017).



**FIGURA 24. Prueba de resistencia en cubos**  
Fuente: Elaboración propia

### 2.6.6 Método de Frattini

El ensayo de Frattini es un método que evalúa la actividad puzolánica mediante la comparación del contenido de  $[Ca^{2+}]$  y  $[OH^-]$  en una solución acuosa. El ensayo consiste en mezclar  $20 \pm 0,01$  g de muestra de mezcla anhidra (75% cemento de referencia + 25 % puzolana) en 100 ml de agua destilada a una temperatura constante de  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  por un periodo dado (7 y 28 días), luego se filtra la disolución al vacío para encontrar el valor medio de concentración. Posteriormente se emplea la curva de solubilidad del hidróxido de calcio en una solución alcalina a la misma temperatura.

Se ubica el valor en el diagrama y teniendo en cuenta que dependiendo de la cantidad máxima de hidróxido de calcio con que la puzolana pueda combinarse y la velocidad a la cual ocurra la reacción, el material se ubicara en la zona puzolánica (por debajo de la isoterma de solubilidad) o no puzolánica de la curva de saturación de Frattini. Es decir, que las muestras que se encuentren por debajo de la curva de saturación presentarán mayor capacidad de reaccionar con el hidróxido de calcio (NTC-1512, 1989).

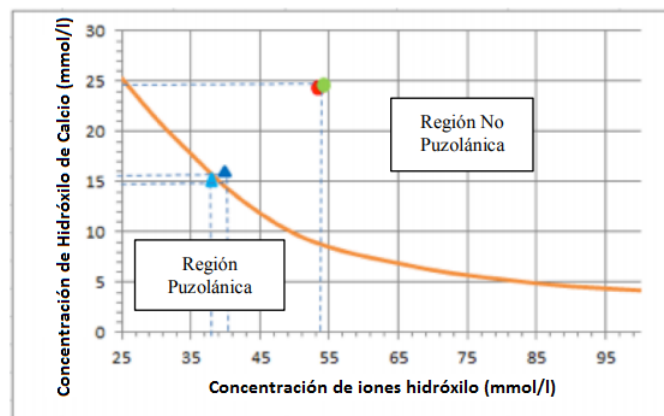


FIGURA 25. Curva de solubilidad del Hidróxido de calcio

El principio de este método se basa en la comparación de la cantidad de hidróxido de calcio presente en una disolución acuosa en contacto con el cemento hidratado, con la cantidad de hidróxido de calcio capaz de saturar un medio de la misma alcalinidad.

Por otro lado, un investigador de apellido Rabilero ha indagado en este método y menciona que este método es adecuado para evaluar la puzolanidad de los cementos y no de las puzolanas mismas. Por lo tanto, este método no indica que tan adecuado sea el material para bajar el calor de hidratación, o para desarrollar resistencias mecánicas, entre otras características que puede desarrollar un material puzolánico (Bouza, 1987).

Según investigaciones realizadas por un especialista en esta área Rodríguez Betancourt el método suficientemente fiable es el ensayo de resistencia mecánica, con el cual se determina el índice de actividad resistente, del cual al respecto se cita lo siguiente *“La evidencia definitiva de la actividad puzolánica de un material es su resistencia, combinada con su durabilidad. Se han dado casos de puzolanas que no pasan con éxito los test de puzolanidad, pero a pesar de esto tienen una buena actividad puzolánica.”* Con lo anterior se entiende que un ensayo definitivo para evaluar una puzolana es el ensayo de resistencia mecánica (Rodríguez, 2000).

### **2.6.7 Ensayos establecidos en la Norma ASTM C-114**

#### **Definición de análisis gravimétrico.**

Para comprender cada uno de los métodos descritos a continuación es necesario conocer la definición de análisis gravimétrico. En química analítica, el análisis gravimétrico o gravimetría consiste en determinar la cantidad proporcionada de un elemento o compuesto presente en una muestra, eliminando todas las sustancias que interfieren y convirtiendo el constituyente o componente deseado en un compuesto de composición definida, que sea susceptible de pesarse.

La gravimetría, como se sabe es un método analítico cuantitativo, es decir, que determina la cantidad de sustancia, midiendo el peso de la misma con una balanza analítica.

### **Ensayo para determinar el porcentaje de SiO<sub>2</sub>.**

Para determinar el porcentaje de silicio (SiO<sub>2</sub>) existe un método que se basa en la gravimetría. Se agrega al material en análisis cloruro de amonio (NH<sub>4</sub>Cl) y la solución no se evapora hasta la sequedad. Este método se desarrolló principalmente para materiales que se descomponen casi en su totalidad por ácido clorhídrico, por lo que no se puede utilizar para materiales que contienen grandes cantidades de material insoluble en ácido y que requieren una fusión preliminar de carbonato sódico (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>).

El reactivo a utilizar es el cloruro de amonio (NH<sub>4</sub>Cl) y el procedimiento para este ensayo incluye mezclar cuidadosamente el material en análisis con reactivos incluyendo el antes mencionado para provocar una reacción química, la mezcla posteriormente es sometida a baños de vapor, además atraviesa por un proceso de filtración. Luego de ciertos procedimientos es sometido a altas temperaturas y repitiendo el procedimiento en el horno agregándoles otros reactivos más, puede encontrarse la masa que corresponde al SiO<sub>2</sub>. Cabe mencionar que en este ensayo se debe tener sumo cuidado en guiarse exactamente como esta en la norma para evitar alteraciones, ya que si se modifica alguno de los procedimientos se corre el riesgo de obtener resultados no verídicos (ASTM-C114, 2015).



**FIGURA 26. Balanza analítica**

### Ensayo para determinar el porcentaje de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

El contenido de óxido férrico del material se determina en una porción separada de material en estudio, reduciendo el hierro al estado ferroso con cloruro estañoso (SnCl<sub>2</sub>) y titulando con una solución estandarizada de dicromato de potasio (K<sub>2</sub> Cr<sub>2</sub> O<sub>7</sub>). Esta determinación no se afecta por cualquier cantidad de titanio o vanadio que pueda estar presente en el material.



FIGURA 27. Procedimiento químico

Este ensayo inicia preparando el reactivo dicromato de potasio (K<sub>2</sub> Cr<sub>2</sub> O<sub>7</sub>) de manera que este pulverizado y secado, a una temperatura entre 180 °C y 200 °C, hasta que en pesajes sucesivos se obtenga peso constante. Se pesan exactamente 2,457 g de reactivo seco por cada litro de solución que se desee preparar.

Posteriormente se agregan otros reactivos y agua fría y si es necesario, se calienta la solución y se pulveriza el material en análisis con el extremo plano de una varilla de vidrio hasta que sea evidente que el material en análisis se ha descompuesto totalmente. Y se finaliza con otros procedimientos más minuciosos, obteniendo por medio de una fórmula el porcentaje de Trióxido de hierro contenido en el material en análisis (ASTM-C114, 2015).

### **Para determinar el porcentaje de $\text{Al}_2\text{O}_3$**

El porcentaje de óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) se calcula restando la suma de los porcentajes de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  y  $\text{P}_2\text{O}_5$  presentes en el material en análisis, el  $\text{TiO}_2$  y  $\text{P}_2\text{O}_5$  se determinan con procedimientos similares al de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{SiO}_2$ , y se determinan por separado (ASTM-C114, 2015).

### **2.6.8 Ensayo por Difracción Láser**

El fenómeno de la difracción láser se basa en que cuando un frente de ondas (luz) llega a un obstáculo se produce una dispersión del frente, de modo que se producen una serie de interferencias constructivas, que dan lugar a un patrón de difracción. La radiación láser es la utilizada por los equipos de granulometría para analizar los distintos tamaños de partícula del material escogido. Una de las principales características de este aparato es el rango de medida en la franja de 0,02 a 2000 micras (Martínez, 2007).



**FIGURA 28. Equipo de Difracción laser**

### **2.6.9 Método Blaine**

Para medir la superficie específica de un material puzolánico se puede utilizar el aparato de Blaine, el cual usa un método de permeabilidad al aire, el cual consiste en hacer pasar una cantidad determinada de aire a través de una capa de material en análisis de porosidad definida.



La cantidad y el tamaño de los poros existentes en dicha capa, son función del tamaño de las partículas y determinan el gasto del aire a través de la capa. La superficie específica según el método de Blaine para las puzolanas debe estar comprendida entre 2500 y 4000  $\text{cm}^2/\text{g}$ .



**FIGURA 29. Aparato de Blaine**

### **Superficie específica**

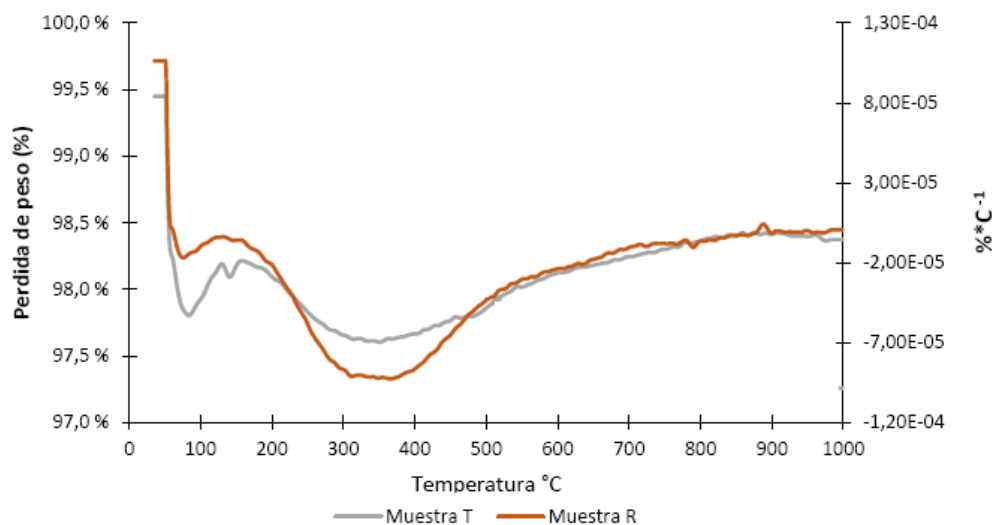
La superficie específica es una propiedad de los sólidos la cual es la relación entre el área superficial total y la masa del sólido, o volumen en bruto, o área en la sección transversal.

Es una magnitud científica derivada que puede ser utilizada para determinar el tipo y propiedades de un material (por ejemplo, suelos). Se la define tanto como área superficial dividida por masa (en cuyo caso sus unidades son  $\text{m}^2/\text{kg}$ ), o área superficial dividida por el volumen (en cuyo caso sus unidades son  $\text{m}^2/\text{m}^3$ ). Es de recordar que un material con área específica mayor será más fino que otro con área específica menor, por tanto, la superficie específica es una manera de representar la finura de un material.

En este caso una puzolana con alta superficie específica influye en el calor de hidratación y en la velocidad de hidratación, por lo tanto, un conglomerante cementicio a base puzolana tendrá mayor desarrollo de resistencia.

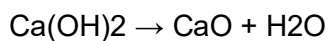
### 2.6.10 Método Termogravimétrico

La definición generalmente aceptada de análisis térmico abarca al grupo de técnicas en las que se mide una propiedad física de una sustancia y/o productos de reacción en función de la temperatura, mientras la sustancia se somete a un programa de temperatura controlado. En el método de la termogravimetría (TG), se registra continuamente la variación de masa de una muestra colocada en una atmósfera controlada, en función de la temperatura, o del tiempo, al ir aumentando la temperatura de la muestra. La representación de la masa o del porcentaje de masa en función del tiempo se denomina termograma o curva de descomposición térmica.



**FIGURA 30. Curva termo gravimétrica de dos muestras puzolánicas**  
Fuente: Caracterización de puzolanas procedentes de Guatemala.

En el estudio de las pastas de cemento/puzolana y de cal/puzolana la utilización de esta técnica es muy útil, porque permite observar la pérdida de masa debida a reacciones de deshidratación. Las reacciones de deshidratación que normalmente se observan son las siguientes:





SCH, ACH y SACH es la nomenclatura de silicato cálcico hidratado, aluminato cálcico hidratado y sílico-aluminato cálcico hidratado respectivamente. Es decir que al realizar análisis termogravimétrico a una puzolana puede verificarse si existe presencia de estas reacciones químicas, y si así fuese entonces se tiene una puzolana que tiene reactividad puzolánica. La medida de los saltos observados en el termograma nos permite determinar la variación en la masa de la muestra. Dichas variaciones de masa son características de las reacciones químicas que se producen en la experiencia (Martínez, 2007).



**FIGURA 31. Equipo de termogravimetría**

### **2.6.11 Método de Pérdida por Ignición**

Este procedimiento se emplea para determinar el porcentaje de material en ensayo que se volatiliza y elimina bajo las condiciones especificadas. Es uno de los parámetros analíticos de las rocas o minerales. Se obtiene calcinando la muestra y midiendo la diferencia de peso entre la muestra sin calcinar y calcinada, y se expresa en forma porcentual. Refleja el contenido de la muestra en componentes volátiles, como agua, carbonatos que se descomponen liberando CO<sub>2</sub>, sulfatos y sulfuros que se descomponen liberando SO<sub>2</sub>.

Para realizar el mismo primeramente se procede a pesar de 1 a 2 gramos de material pulverizado y se coloca en un crisol y se pesa, posteriormente se coloca el crisol con la muestra en el horno a una temperatura de 950°C, sin embargo, para el análisis en puzolanas la temperatura debe ser de  $750 \pm 50$  °C (ASTM-C311, 2004) y se deja en el mismo durante 15 minutos. Luego se saca el crisol del horno se coloca en un desecador para que enfríe y no adquiera humedad del ambiente; para finalizar se pesa nuevamente (ASTM-C114, 2015).



**FIGURA 32. Mufla para ensayo de pérdida por ignición**

El valor obtenido del ensayo es comparado con las características de la puzolana clase N y clase F en el caso de las naturales y artificiales respectivamente (NTC-3493, 1993). La tabla 4 de la norma da los requerimientos químicos el material en estudio.

**TABLA 4. Requerimiento químico (pérdida por ignición) para puzolanas**

Ensayo	Clase N	Clase F
Pérdida por Ignición, % máximo	10	6

Fuente: Norma ASTM C- 618 (Table 1 Chemical Requirements).

## **2.7 Variables sobresalientes en la caracterización de puzolanas**

### **2.7.1 Composición Química**

Para comprender lo que es la composición química de las puzolanas y como medirla partiremos de definiciones básicas tales como:

#### **Elemento químico**

Un elemento químico es un tipo de materia constituida por átomos de la misma clase. Comúnmente, posee un número determinado de protones en su núcleo, haciéndolo pertenecer a una categoría única clasificada con el número atómico, aun cuando este pueda desplegar distintas masas atómicas.

Cabe destacarse que los elementos químicos se encuentran reunidos en lo que se conoce como tabla periódica de los elementos y cada uno de ellos aparece en una posición dada en relación al número de protones presentes en su núcleo.

#### **Compuesto químico**

En química, un compuesto químico es una sustancia formada por la combinación de dos o más elementos distintos de la tabla periódica. Los compuestos son representados por una fórmula química. Por ejemplo, el hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) está constituida por dos átomos de hidrógeno, dos de oxígeno y uno de calcio.

#### **Composición química de las puzolanas**

La composición química de las puzolanas naturales, depende de la lava original que las forma, pues unas son más ácidas, menos alteradas y menos reactivas, y otras más básicas y alteradas.

En general las propiedades de las puzolanas dependen de la composición química y la estructura interna, radicando su gran diferencia en algo específicamente granulométrico.

Lo más recomendable en cuanto a las puzolanas es que tengan una composición química tal que la presencia de los tres principales óxidos, óxido de Sílice reactivo ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ), sea mayor al 70%, esto orientado a la ocupación en la fabricación de cemento; siendo estos valores favorables para dicho fin.

Las puzolanas presentan grandes ventajas al reaccionar con cementos, aumentando resistencias mecánicas y mejorando la durabilidad de las mezclas; sin embargo, se hace necesario el control de su comportamiento, identificando la variación en las propiedades como calor de hidratación, desarrollo del fraguado y la durabilidad.

## **2.7.2 Composición Mineralógica**

### **Definición de Mineral.**

Un mineral es una sustancia natural, de composición química definida, normalmente sólido e inorgánico, y que tiene una cierta estructura cristalina. Es diferente de una roca, que puede ser un agregado de minerales o no minerales y que no tiene una composición química específica.

Un sólido cristalino es aquel que tiene una estructura periódica y ordenada, que se expande en las tres direcciones del espacio, por lo que presenta una forma invariante, salvo por las variaciones de las fuerzas externas.

Se reconocen como cristalinos porque las partículas macroscópicas que los forman (los cristales) tienen formas regulares: si examinamos cristales de cloruro de sodio bajo una lente de aumento veremos que los cristales tienen forma de pequeños cubos.

## **Tipos de sólidos cristalinos:**

### **Molecular**

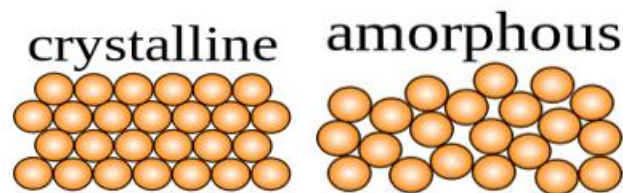
Los sólidos cristalinos moleculares se componen de moléculas las cuáles son mantenidas juntas por dispersión (o Londres), dipolo-dipolo y por las fuerzas de interpartículas con un enlace de hidrógeno.

### **Atómico**

Estos sólidos son blandos, pobres conductores eléctricos y térmicos y tienen un bajo punto de fusión.

### **Iónico**

Los sólidos cristalinos iónicos se componen de iones positivos y negativos mantenidos juntos por la atracción ion-ion, vienen en tres formas fundamentales: con agujeros trigonales, agujeros tetrahedrales y agujeros octohedrales.



**FIGURA 33. Diferencia entre minerales cristalinos y amorfos**

### **Sólido amorfo**

El sólido amorfo es un estado sólido de la materia, en el que las partículas que conforman el sólido carecen de una estructura ordenada. Estos sólidos carecen de formas bien definidas. Al ver el cristal a escala molecular veríamos que sus moléculas están relativamente fijas en sus posiciones, pero la disposición no es regular. Algo así como si mezcláramos muchas partículas de la misma forma con una melaza muy viscosa. Las partículas tendrían poca libertad de movimiento debido a la viscosidad del medio, pero no estarían dispuestas regularmente.

## Propiedades de los sólidos amorfos

Las moléculas de los sólidos amorfos están distribuidas al azar lo que se traduce en que las propiedades físicas macroscópicas del sólido son isotrópicas, idénticas en todas las direcciones, los sólidos amorfos tienen una temperatura característica a la cual sus propiedades experimentan cambios importantes. Esta temperatura se conoce como temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ).

## Diferencias con los sólidos cristalinos.

La principal diferencia entre un sólido cristalino y un sólido amorfo es su estructura. En un sólido cristalino existe una ordenación de los átomos a largo alcance, mientras que en los sólidos amorfos no se puede predecir donde se encontrará el próximo átomo.

En este hecho se basan los diferentes métodos de diferenciación entre ambos tipos de sólido, que en algunos casos no es fácil de establecer a simple vista. En la figura 34 se observa la notable diferencia de estructura entre un sólido cristalino y sólido amorfo.

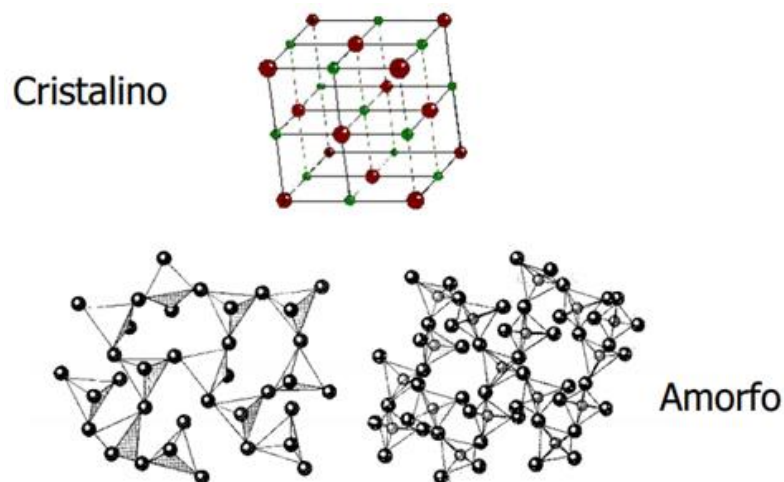


FIGURA 34. Estructura cristalina y amorfa



## **Vidrio**

El vidrio es un sólido amorfo con la estructura de un líquido. Técnicamente, un vidrio es un producto inorgánico de la fusión que se ha enfriado a una velocidad demasiado elevada para permitir la formación de cristales. Aunque popularmente se llama cristal y vidrio a un mismo material, existe una diferencia esencial entre ambos. El cristal hace referencia a un estado de ordenación de la materia que se encuentra en la naturaleza en diferentes formas (por ejemplo, cuarzo o cristal de roca).

El vidrio, sin embargo, es el resultado de la fusión de ciertos ingredientes (sílice, sosa y cal). Existen, sin embargo, vidrios creados por la naturaleza, como la obsidiana que se forma por el calor generado en el interior de los volcanes. Se llama erróneamente cristal al vidrio de plomo o vidrio óptico, pues su transparencia imita al cristal de roca natural; esta imitación había sido siempre la meta principal de los vidrieros. En las puzolanas se toma como compuesto reactivo la fase amorfa del dióxido de silicio mas no obstante dentro de los minerales existen los del orden de las zeolitas que son de naturaleza reactiva dado que poseen compuestos sílico-aluminosos.

## **Zeolitas**

Las Zeolitas o Ceolitas son minerales aluminosilicatos microporosos. Destacan por su capacidad de hidratarse y deshidratarse de un modo reversible. Hasta octubre de 2012 se han identificado 206 tipos de zeolitas según su estructura, de los que más de 40 son naturales; los restantes son sintéticos.

Las zeolitas naturales se encuentran, tanto en rocas sedimentarias como en volcánicas y metamórficas.

## **Composición química-mineralógica de las puzolanas**

Las propiedades de las puzolanas naturales varían dependiendo de su origen, la proporción variable de sus constituyentes y las características físicas y mineralógicas

variables de los componentes activos. Muchas de las puzolanas naturales contienen cantidades importantes de constituyentes diferentes de las sílices, tales como los óxidos de alúmina y hierro, los cuales deberán reaccionar con el hidróxido de calcio y los álcalis para formar productos complejos.

La actividad puzolánica no puede ser determinada exactamente por cuantificación de la presencia de sílice, alúmina y hierro. La cantidad de material amorfo usualmente determina la reactividad de una puzolana natural.

Los constituyentes de ésta pueden existir en diversas formas que varían desde material reactivo amorfo a productos cristalinos los cuales deberán reaccionar ya sea lentamente o no hacerlo. Es importante evaluar cada puzolana natural para confirmar su grado de actividad puzolánica.

No hay una distinción clara entre el material silicio que es considerado puzolana y aquel que no. En general, las sílices amorfas reaccionan con el hidróxido de calcio y los álcalis más rápidamente que aquellas sílices que están en forma cristalina, tal como el cuarzo. Es decir, cuanto mayor es la partícula (menor el área superficial por unidad de volumen) menos rápida es la magnitud de la reacción, por lo tanto, la composición química de una puzolana no determina claramente su habilidad para combinar con el hidróxido de calcio y los álcalis.

Las cenizas volcánicas y los tufos zeolíticos cuando se mezclan con cal, producen silicato de calcio hidratado (CSH) así como aluminato de calcio hidratado y aluminio silicato. Estos materiales deberán provenir de buenas puzolanas.

Las arcillas y esquitos naturales no son puzolánicos. El caolín de alta pureza puede ser procesado para formar una puzolana de alta pureza denominada Metacaolín altamente activo.

### **2.7.3 Finura de Partículas**

El termino finura refiere al tamaño y el termino partícula a una sección muy pequeña o cuerpo material de pequeñas dimensiones constituyente de un todo. El suelo es una mezcla de diferentes tamaños de partículas de roca y ocasionalmente puede poseer materia orgánica. La textura y propiedades físicas del suelo dependerán del tamaño de ellas. Mayores tamaños de partículas significarán mayor espacio entre ellas, resultando un suelo más poroso; y en caso contrario dificulta el paso del aire y el agua, por lo tanto, este suelo será menos poroso.

Por ejemplo, en el cemento portland consiste en partículas angulares individuales, con una variedad de tamaños resultantes de la pulverización del clínker en el molino. Aproximadamente 95% de las partículas del cemento son menores que 45 micrómetros, con un promedio de partículas de 15 micrómetros. La distribución total del tamaño de las partículas del cemento se llama "finura". La finura del cemento afecta el calor liberado y la velocidad de hidratación.

La mayor finura del cemento (partículas menores) aumenta la velocidad o tasa de hidratación del cemento y, por lo tanto, acelera el desarrollo de la resistencia. Los efectos de la mayor finura sobre la resistencia de las pastas se manifiestan, principalmente, durante los primeros siete días. Las puzolanas deben de poseer alta finura y por ende gran superficie específica esto les ayuda a poseer una mayor superficie de adsorción debido a que aun cumpliendo con otros requisitos para ser reactiva si posee un tamaño promedio de partículas muy grande la reacción no se dará de manera eficiente.

### **2.7.4 Reactividad Puzolánica**

La actividad puzolánica responde a un principio general, este se basa en que la sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y la alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), como componentes ácidos de materiales puzolánicos, reaccionan con la cal y el agua de amasado para producir silicatos de calcio hidratados.

---

## CAPITULO III

---

# “METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN”

### **3.1 Unidades de análisis**

#### **3.1.1 Tobas Volcánicas o Ingimbritas**

La toba volcánica del sitio en estudio aparentaba encontrarse en dos condiciones, en ciertas áreas se encontraba con una tonalidad más oscura y para extraerla se requería de un esfuerzo mayor, esto debido a que se encontraba totalmente solidificada, razón por la que se desprendían trozos pequeños, medianos y en algunos casos de tamaño mayor a los 70 cm. Ver Anexo A, descripción técnica Cantera El Delirio.



**FIGURA 35. Estrato de toba volcánica de cinco metros de altura (El Delirio San Miguel)**

También se encontraron áreas que mostraban signos de solidificación, pero que con un mínimo esfuerzo el material se desprendía en partículas pequeñas, idóneo para la presente investigación, mostraban consistencia porosa, ligera y mayormente de tonalidad gris claro.

En ciertas regiones podía apreciarse como material ajeno (material orgánico) que se encuentra sobre la capa superior del terreno se había infiltrado entre las hendiduras de la toba, notándose claramente las manchas de color café oscuro de dicho material, también en ciertas áreas presenta un color ligeramente rojizo.



**FIGURA 36. Visita a cantera el Delirio (Toba volcánica joven)**



**FIGURA 37. Verificación de consistencia de toba volcánica**



**FIGURA 38. Toba volcánica consolidada**

Al hablar de los orígenes o procedencia de la toba volcánica ubicada en el sitio conocido como El Delirio, se hace necesario mencionar sobre la estructura volcánica que conforma nuestro país, el origen del vulcanismo en El Salvador está relacionado con la subducción de placas de Cocos – Caribe que durante el tiempo geológico ha sido causa de formación de muchos volcanes. Existe un vasto número de volcanes que se encuentran en la zona oriental, razón que nos pone en cuestionamiento según los expertos sobre el origen y procedencia de los materiales que han de ser analizados en esta investigación. Estrato volcanes como El Chaparrastique, Tecapa, San Vicente, Ilopango, entre otros son algunos de los cuales pueden proceder los materiales en análisis.

Un dato que es de mucha importancia al habla de la procedencia de los materiales en cuestión es, las laderas del estrato volcán de Chaparrastique, estas forman parte de las municipalidades de San Miguel, Quelepa, Moncagua, Chinameca, San Jorge, San Rafael Oriente y El Tránsito, todas del Departamento de San Miguel, razón que nos impulsa a ubicar estas formaciones de materiales de consistencia porosa de manera casi acertada como producto de erupciones volcánicas provocadas por el estrato volcán de San Miguel.



### 3.1.2 Piedra pómez o pumita

La piedra pómez o pumita encontrada en una pared en forma de estrato del área en estudio, mostraba variaciones en los colores, con tonalidades blanca, café, amarilla y gris, cada color perteneciente a un solo estrato o capa, variando en un rango de espesores desde los 0.10 a 2 metros, ver figura 39.

La consistencia que este material presentaba era bastante porosa, ya que se encontraba en forma de pequeñas piedras pómez unidas por cada estrato, y que, al intentar desprenderlas, era fácil de hacerlo. Ver Anexo B, descripción técnica Piscinas de Moncagua.



**FIGURA 39. Estratos de material pómez (Moncagua-Piscinas)**

Presentaba alta porosidad, áspera, muy ligera y al caer sobre el agua no se precipitaban hasta el fondo, sino que flotaban, lo que indicaba su baja densidad, además se mostraban friables, ya que fácilmente se rompían en pequeños pedazos, estas características solo es posible obtenerlas cuando estratovolcanes realizan erupciones piroclásticas violentas proyectadas al aire, provocando así, una desgasificación en el interior de estos materiales y a su vez, atribuyendo características que los identifican.





**FIGURA 40. Roca pómez extraída de cueva en Moncagua**

Gran parte, o posiblemente toda la región que conforma la zona oriental de El Salvador presenta características relacionadas con suelos extrusivos, es decir, producto de erupciones volcánicas piroclásticas provocadas por estrato volcanes de la región, y en algunos casos, estrato volcanes que no forman parte de la región.

El volcán de San Miguel, es uno de los principales autores de formaciones geológicas a través del tiempo en El Salvador, pero también el estrato volcán de Chinameca o mejor conocido como El Pacayal, es parte de los autores de formaciones geológicas de la zona, al existir una ambigüedad, es decir, no conocerse directamente la procedencia de un material cabe la posibilidad de que este pueda formar parte de erupciones provocadas por otros estrato volcanes, y no así, directamente del estrato volcán del Pacayal, esto debido a la cadena volcánica que cruza la zona norte y sur del país, pudiendo ser estos materiales productos de erupciones provocadas por la caldera de Ilopango, volcán de San Vicente, Volcán de San Salvador entre otros.

### 3.1.3 Arcilla Termo-Activada

El ladrillo de barro cocido es uno de los productos artesanales más fabricados, y a su vez vendidos para toda obra civil en la región oriental del país. Entre las unidades de análisis presentes en esta investigación se encuentra la arcilla termo-activada, siendo este un subproducto del ladrillo de barro cocido y para su obtención es necesario que este sea sometido a temperaturas mayores a las habituales de cocción.

La arcilla termo-activada que se describe en esta investigación fue obtenida directamente de la zona oriente del país, donde se encuentra la ladrillera la Isla. Las dimensiones del horno son de aproximadamente 5 metros de largo por 4.5 metros de ancho, y 4.5 metros de altura ver figura 41, el número de ladrillos que se puede cocer y calcinar en dicho horno es de aproximadamente 1,400 según describe el propietario. Para obtener una descripción propia en cuanto al lugar y su ubicación y características de esta ladrillera. Ver Anexo C, descripción técnica Ladrillera La Isla.



FIGURA 41. Ladrillera la Isla

Según información descrita por el propietario los insumos necesarios para la elaboración de estos productos son, tierra blanca, arcilla y agua, ver figura 42, en el caso de la tierra blanca, este es un material con el cual se cuenta en la zona, ya que las formaciones de estos materiales como tierra blanca poseen las propiedades necesarias para su utilización.



**FIGURA 42. Insumos para la elaboración de ladrillos de barro**

En la siguiente figura es posible observar el ladrillo fresco preelaborado por medio de moldes de madera.



**FIGURA 43. Ladrillo fresco antes de ser llevado al horno**

La figura descrita a continuación muestra el empaquetado de ladrillos antes de ser sometidos al fuego para su posterior cocción y calcinación.



**FIGURA 44. Empaquetado de ladrillo para posterior quema**



**FIGURA 45. Madera colocada para encender horno**



Al finalizar la quema de estos materiales fue posible hacer el respectivo levantamiento de muestras.

Según información descrita por el propietario las temperaturas mayores que alcanza el horno se encuentran en la parte baja del mismo, por tal razón se habló con el propietario para extraer los ladrillos que se encontraban en la parte baja y que alcanzaban temperaturas superiores a las de cocción.

Por tal razón al hablar de puzolanas artificiales es necesario que estas puedan ser activadas térmicamente, es decir, puestas al horno y con temperaturas elevadas y mayores a las de cocción en un rango de 600 a 1000 grados centígrados produciéndose una descomposición de los minerales arcillosos como sílico-aluminatos de estructura amorfa, es decir, una estructura de los minerales de forma desordenada.



**FIGURA 46. Ladrillos cocidos**



**FIGURA 47. Toma de muestras para posteriores análisis**



**FIGURA 48. Ladrillo de barro cocido a diferentes temperaturas**

### 3.2 Criterios de selección para las unidades de análisis

En cuanto a las puzolanas naturales se mencionan a continuación los factores que rigieron la elección de los materiales.

- **Delimitación de la investigación:** Aunque algunas puzolanas naturales no sean muy comunes en el territorio nacional, no significa que no exista presencia de ellas, como es el caso de las tierras diatomeas, que como se mencionó anteriormente se encuentra un yacimiento en la zona occidental del país, precisamente en Candelaria de La Frontera perteneciente al departamento de Santa Ana, pese a lo anterior este material no se incluyó como unidad de análisis en esta investigación debido a que los objetivos de ésta se centran a materiales de la zona oriental del país. Estando disponibles en la zona oriental materiales puzolánicos como lo son la escoria volcánica, lapilli, toba volcánica y piedra pómez.
- **Trituración:** En la zona oriental se encuentran algunas puzolanas que corresponden al grupo de las naturales como es el caso de la escoria volcánica y lapilli que son muy sólidas, lo que dificulta su trituración debido a que el procedimiento de pulverización empleado en esta investigación es de manera manual; Asimismo también existen yacimientos de tobas volcánicas que es un material que se encuentra moderadamente consolidado y también se encuentran afloramientos de piedra pómez que es una piedra altamente friable, los cuales son materiales más convenientes ya que oponen una menor resistencia al momento de triturarlas.
- **Uso histórico:** A pesar de existir distintos tipos de puzolanas naturales, al momento de indagar en investigaciones sobre análisis de estas se observa un común denominador, el cual es la preferencia de utilizar tobas volcánicas (conocida como tierra blanca) como material de análisis, y en menor grado

también se elige la piedra pómez. Incluso estos materiales han sido utilizados desde la antigüedad en morteros, y ahora en día existen cementos adicionados con estos minerales en mercados internacionales.

- **Abundancia:** Al conocer las clases de puzolanas naturales que existen, y al investigar sobre la existencia de ellas en el país y precisamente en la zona oriental, se encuentra que la toba volcánica (tierra blanca) y la piedra pómez son algunas de las cuales cuentan con más presencia. En cuanto a las tobas volcánicas existen canteras que son explotadas, y en el caso de la piedra pómez, aunque pueden observarse comúnmente pequeños afloramientos aun no son explotados.
- **Accesibilidad y disponibilidad:** La accesibilidad es importante ya que permite llegar sin demasiadas complicaciones hasta el lugar de interés, en el caso de la toba volcánica no existen considerables inconvenientes en el tramo de San Miguel hasta el punto de extracción, el tiempo estimado en automóvil para arribar hasta el sitio de interés es de aproximadamente 29 minutos desde la ciudad de San Miguel. Con respecto a la piedra pómez no se tienen inconvenientes con el libre tránsito hasta el sitio de interés, estando a tan solo 823.95 metros desde el centro de la ciudad de Moncagua, con un tiempo estimado en automóvil para arribar hasta el sitio de interés de aproximadamente 27 minutos contados desde la ciudad de San Miguel.

Y en cuanto a la disponibilidad de estos materiales no está restringida debido a que en cuanto a la toba volcánica es explotada para comercialización, lo que no limita su uso hasta agotar la existencia de este, y en el caso de la piedra pómez se encuentra en un lugar público, lo que permite recolectar muestras para diferentes fines.



En cuanto a la puzolana artificial (arcilla termo-activada) se mencionan a continuación los factores que rigieron la elección de este material.

- **Delimitación de la investigación:** Puzolanas artificiales que puedan ser producidas por industrias de otras zonas del país no son tomadas en consideración en esta investigación debido a que los objetivos de ésta se centran estrictamente a materiales de la zona oriental del país. Teniendo así disponibles en la zona oriental puzolanas artificiales como la ceniza de arroz, ceniza de caña, arcilla termo-activada, entre otros.
- **Uso histórico:** Al indagar en literatura referente a las puzolanas se encuentra que las arcillas quemadas o calcinadas fueron las primeras puzolanas que se utilizaron en la antigüedad, estas fueron usadas en forma de polvo proveniente de la molienda de ladrillos, alfarería y tejas que se mezclaron con cal para producir morteros. Este proceso existe hasta hoy en día en distintos países a nivel internacional.
- **Abundancia:** Al conocer las clases de puzolanas artificiales que existen, y al investigar sobre la existencia de ellas en el país, y precisamente en la zona oriental, se encuentra a la arcilla termo-activada como una de las más abundantes, la cual es generada en un vasto número de fábricas de ladrillo artesanal.
- **Accesibilidad y disponibilidad:** La accesibilidad es importante ya que permite llegar sin demasiadas complicaciones hasta el lugar de interés, teniendo como una de las mejores opciones una fábrica de ladrillo artesanal ubicada en la carretera que conduce de la ciudad de Moncagua a la ciudad de Chapeltique, para la cual no existen considerables inconvenientes al momento de transitar en automóvil, necesitando 32 minutos aproximadamente para llegar hasta el sitio tomados desde la ciudad de San Miguel.

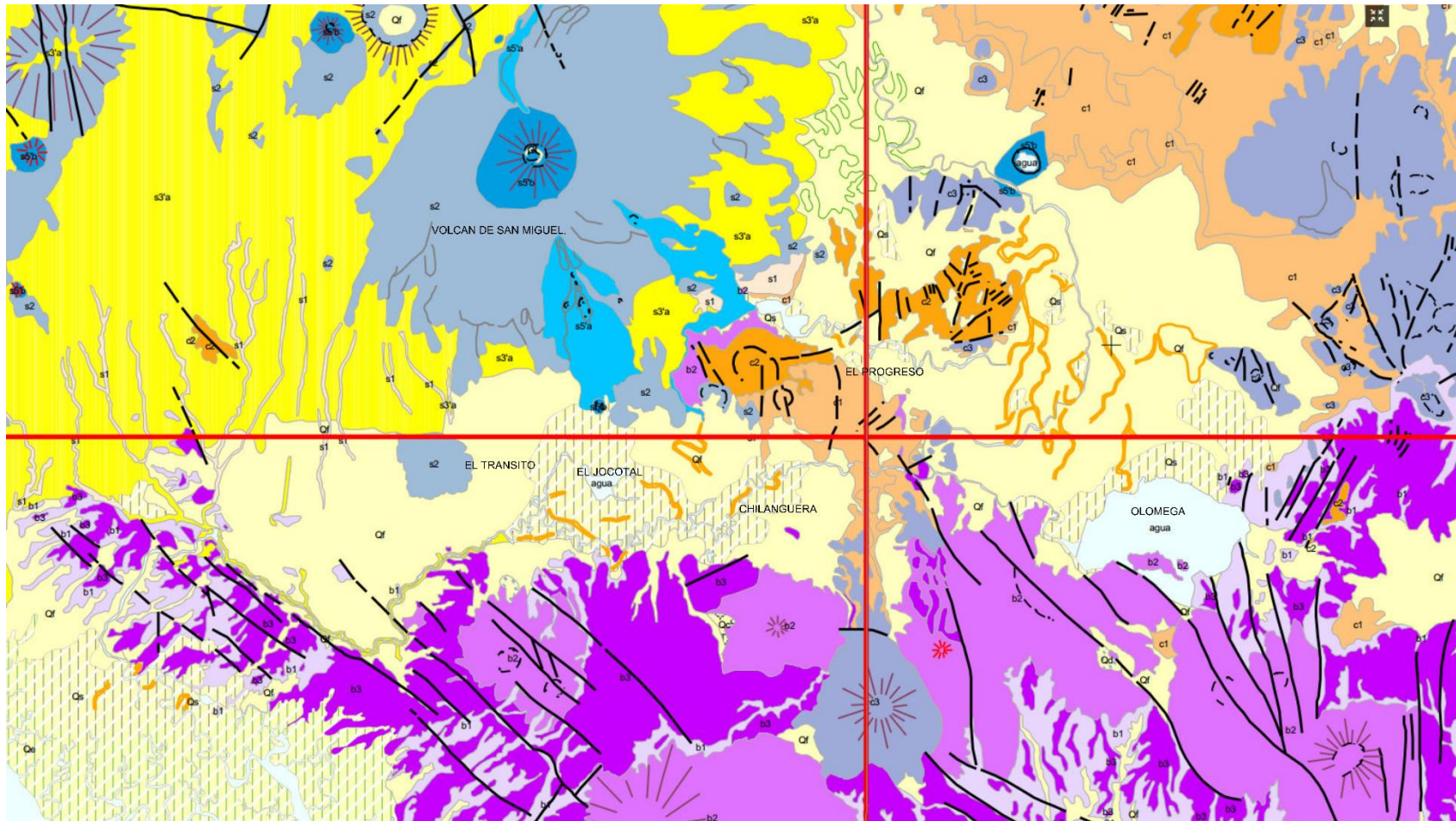
### **3.3 Delimitación de áreas en estudio**

Esta investigación consistió en analizar tres posibles materiales puzolánicos reactivos de origen natural, y un posible material puzolánico reactivo de origen artificial. Estos materiales fueron sometidos a la metodología propuesta para evaluar sus propiedades sobre la capacidad reactiva de formación de compuestos cementicios.

Para definir dichas zonas de estudio se hizo uso de la guía de expertos en el tema como Geólogos del Ministerio del Medio Ambiente y profesionales expertos en el área, así como también del Mapa Geológico de El Salvador (Mision-Geologica-de-El-Salvador, 1978).

Los expertos en el tema manifestaron que en el sitio conocido como El Delirio se encuentra material de carácter volcánico, pues en esa zona existe una cantera de la cual se extrae material conocido como Tierra Blanca que es la toba volcánica joven o tufo volcánico como también la presencia de Piedra pómez en ciertas zonas de Moncagua. Mediante una visita previa a la cantera el Delirio y las cuevas de Moncagua en el balneario el Capulín se delimitaron las coordenadas para su ubicación en el Mapa Geológico de El Salvador lo que permitió la identificación de los yacimientos.

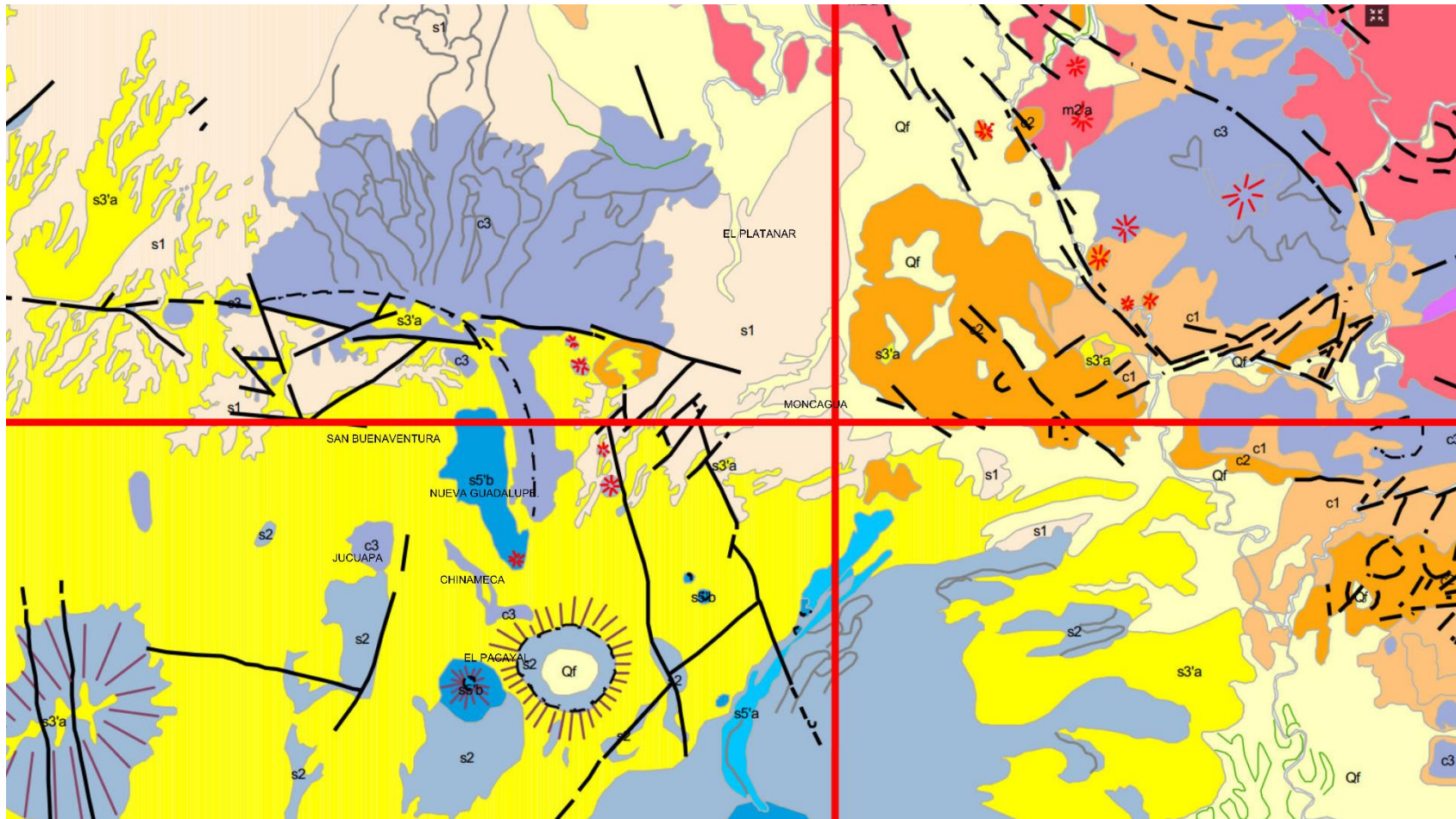
Para identificar el lugar de extracción del material puzolánico artificial fue necesario dirigirnos a una fábrica de ladrillo artesanal, este se encuentra ubicado en el lugar conocido como El Platanar, lugar donde existen grandes concentraciones de material piroclásticos, parte de materia prima con la que es elaborado el ladrillo de barro en la zona y por el que tiene unas amplias ventajas de poder ser un material puzolánico al ser sometido a temperaturas muy elevadas o superiores a las temperaturas de cocción del ladrillo de barro. Según el Mapa Geológico de El Salvador pueden identificarse los siguientes yacimientos en las zonas del Cantón el Delirio y el Balneario el Capulín, Moncagua, además, el “Anexo F, Formación geológica de El Salvador” hace una descripción del código o símbolo que presenta cada formación.



**FIGURA 49. Mapa Geológico de El Salvador, Cantera El Delirio - N247,013.22; E591,982.97**

Según el mapa geodésico los yacimientos de la zona poseen el código de color C1 que indica presencia de piroclásticas ácidas. Fuente: Mapa geológico de La Republica de El Salvador en Hoja *Blatt Sonsonate*. Hannover.





**FIGURA 50. Mapa Geológico de El Salvador, Balneario el Capulín Moncagua - N268,204.18; E581,387.63**

Según el mapa geodésico los yacimientos de la zona poseen el código de color S1 que indica presencia de epiclastitas volcánicas. Fuente: Mapa geológico de La Republica de El Salvador en Hoja *Blatt Sonsonate*. Hannover.

### 3.4 Consideraciones previas a la recolección

A continuación, se describe el procedimiento empleado para la recolección y preparación de las muestras. Una vez que han sido identificadas las áreas de estudio por medio de investigaciones preliminares y consultas a expertos con referencia al tema, se procedió al levantamiento de las muestras, presentando de esta manera una serie de pasos para realizar posteriormente los ensayos de la investigación.

Unos de los aspectos más importantes que deben tomarse en cuenta para la recolección de las muestras naturales son:

- **Identificar diferencia de suelos en el terreno:** Con el fin de evitar incluir un tipo de suelo con aspecto diferente en la recolección de muestras, con esto se tendrá un resultado más certero, de esta manera, se evita extraer una porción de suelo combinado.
- **Eliminar plantas y material orgánico:** Con el fin de evitar que el material en análisis sea contaminado.
- **Ubicar escorrentías dentro del terreno:** Esta observación se realiza para tener previamente localizado donde posiblemente se concentran los recorridos de las escorrentías dentro del terreno, para así evitar tomar muestras trasportadas de otras áreas debido a que la escorrentía arrastra todo tipo de material fino, el cual puede alterar el material propio del lugar.

Unos de los aspectos más importantes que deben tomarse en cuenta para la recolección de la muestra artificial son:

- **Verificación de extracción de muestra:** Al momento de la extracción del material se debe asegurar que solo se incluya el que presenta características arcillosas y no material de diferente naturaleza.

- **Eliminar impurezas:** Se debe cerciorar que el conglomerado de material con el que se realizaran los ladrillos esté libre de objetos extraños o cuerpos ajenos al material, con el fin de no alterar la composición química propia del material.
- **Temperatura de calcinación:** Debido a que la temperatura necesaria para considerar a una arcilla como termo-activada es de 600 a 1000°C y además se sabe que la temperatura de cocción promedio de ladrillos de albañilería dentro de un horno típico artesanal (de geometría rectangular) es de 900°C, se deduce que un ladrillo de albañilería puede considerarse como arcilla termo-activada (puzolana artificial) debido a que se encuentra dentro del rango de temperatura para considerarla arcilla termo-activada, aun incluso pudiéndose tomar ladrillos que tengan un aspecto ligeramente distinto al de un ladrillo que se usa comúnmente, es decir, de tonalidad más oscura (marrón), debido a los 100 °C de diferencia que existen entre el promedio la temperatura de cocción de un ladrillo de barro (900°C) y el límite de temperatura de una arcilla termo-activada (1000 °C).

### **Método de extracción para Toba volcánica**

Además de lo anterior se debe tener claro el tipo de muestreo que se debe emplear, en el caso de la toba volcánica se aplicó el muestreo compuesto, en el cual se trata de mezclar las muestras tomadas en un área determinada para obtener una sola que representa al total. Se asume que el valor que se obtiene de la muestra compuesta es una estimación válida de la media que se hubiera obtenido promediando los resultados de las muestras que la componen.

Este método tiene la ventaja de que permite un muestreo mayor sin aumentar el número de análisis. Este fue el tipo de muestreo determinado para dicha área debido a la homogeneidad del material ahí encontrado, lo cual se visualizó en la visita preliminar que se realizó.

Este método establece que en la muestra compuesta contribuyen por igual cada una de las muestras individuales y que no se deben efectuar cambios durante la manipulación para obtener la muestra compuesta, y de esta manera no afectar los resultados analíticos.

En cuanto al número de muestras para mezclar, este oscila entre 4 y 16, y como regla general, el área representada por una muestra compuesta no debería ser superior a 1 Hectárea (10,000 metros), por lo que dicha área de análisis era apta para aplicar este muestreo debido a que su área es de aproximadamente 6,779.65 m<sup>2</sup>. Debido a la homogeneidad del material los puntos de extracción pueden distribuirse a criterio personal de forma de zigzag, cuadrícula, etcétera.

En cuanto al tamaño de la muestra para determinaciones químicas, mineralógicas, físico-químicas y texturales debe ser tal que proporcionen las submuestras necesarias y permita la conservación de duplicados. La cantidad por cada muestra no debe ser inferior a 500 gramos.



**FIGURA 51. Puntos de extracción para toba volcánica según método compuesto**  
Fuente: Google Earth

### **Método de extracción para Piedra pómez**

El tipo de muestreo indicado para la extracción de piedra pómez es el muestreo ranurado discontinuo o chip sampling, donde se extraen fragmentos a lo ancho del estrato siguiendo una línea imaginaria que correspondería al eje de un supuesto canal de muestreo, es decir, se extrae material de diferentes puntos que se establecen en forma lineal en un eje transversal al rumbo del estrato, puede realizarse en la longitud completa del depósito o solo en determinados lugares de ella.

Este es un método utilizado fundamentalmente en minería subterránea, aunque también se usa en las exploraciones a cielo abierto. La distancia entre puntos es variable pero no debe superar los 20 centímetros y la cantidad de muestra debe ser igual.

En la siguiente figura se observan los diferentes estratos del área de análisis donde está ubicada la piedra pómez y también de los puntos de extracción aplicando el método de muestreo de ranurado discontinuo.

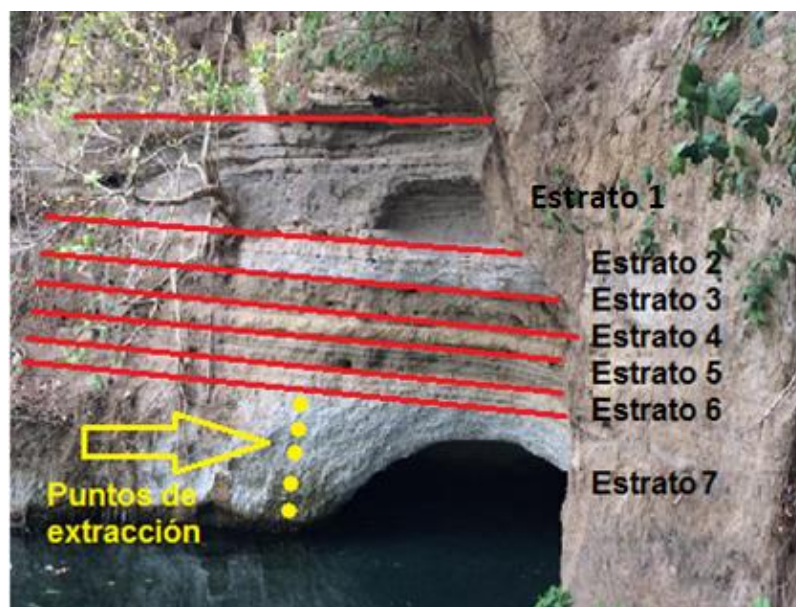


FIGURA 52. Puntos de extracción para piedra pómez según Método Chip Sampling.



### 3.5 Recolección y preparación de las muestras en estudio

#### Herramientas, utensilios y equipos utilizados:

- Pala y piochas
- Bolsas inertes
- Recipientes limpios
- Guantes inertes
- Bandejas de aluminio para secado en horno
- Mortero de ágata
- Tamiz #50, #100, #200, #325
- Tamizador eléctrico
- Horno

Habiendo ya ubicado las áreas en estudio, se efectuó la extracción de las muestras con herramientas y recipientes limpios y secos, como también teniendo las medidas higiénicas personales con el fin de evitar alteración a las muestras extraídas.



FIGURA 53. Toba volcánica consolidada y parte explotada



**FIGURA 54. Manipulación para toma de muestras**

En cuanto al material artificial, ya teniendo ubicada la fábrica artesanal que labora con arcilla se verifico el material que se utilizó en la elaboración del ladrillo, esto con el fin de que el material no se encuentre contaminando con residuos extraños a la arcilla, luego se procedió a la calcinación del ladrillo de arcilla a altas temperaturas.



**FIGURA 55. Vista a ladrillera**

Habiendo pasado el proceso de calcinación se tomaron las muestras y se almacenaron aislándolas de todo tipo de contaminación para su posterior análisis.



**FIGURA 56.** Ejemplos de ladrillos calcinados y fundidos, sometidos a temperaturas mayores de 1150 °C

Al contar con los materiales recolectados se procedió a la pulverización de manera manual, haciendo uso del mortero de ágata en el caso de la piedra pómez, y almádana para el ladrillo de barro, posteriormente se tamizo, luego se realizó un tratamiento térmico para eliminar la humedad. Cabe mencionar que los tamices utilizados para el análisis fueron # 50, #100, #200, #325.



**FIGURA 57.** Pulverización por medio de mortero de ágata y/o almádana



**FIGURA 58. Arcilla pulverizada para posterior tratamiento de tamizado**

Al haberse efectuado el tamizado de los tres materiales se procedió a colocarlos en bandejas de aluminio limpias para un posterior secado en horno a 100 ° C durante 24 horas, esto con el objetivo de extraer toda humedad presente en las muestras y así estar litas para sus análisis. “El objetivo del secado de muestras al horno fue evitar posibles puntos de humedad, ya que para la ejecución de estudios de este tipo la humedad debe ser menor al 3% para mejores resultados” (NTC-3493, 1993).



**FIGURA 59. Muestras al horno.**



### **3.6 Análisis y evaluación de métodos**

Existen diferentes métodos para la evaluación de puzolanas cuyo alcance es inherente a la cantidad de aspectos que se deseen conocer, tanto así, que existen metodologías que engloban uno o dos ensayos que concluyen por si mismos aspectos generales como la reactividad y otras más complejas que estudian a profundidad toda la estructura mineralógica, atómica y física de los materiales.

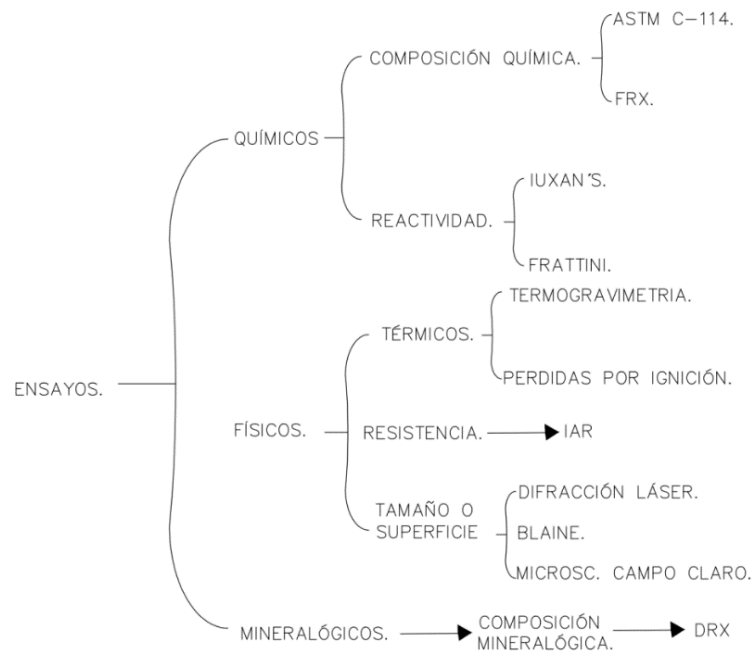
A continuación, se explica un poco del alcance de los métodos y ensayos anteriormente expuestos ordenándolos por grupo para su posterior comparación y construcción de una metodología que cumpla con los estándares deseados y se limite en el marco de las posibilidades de accesibilidad en nuestro medio sin menospreciar aspectos fundamentales de estudio, dado que existen diferentes ensayos para obtener resultados similares es necesario analizar cada uno de estos. En las puzolanas si se desea realizar un estudio que abarque los aspectos más importantes es fundamental analizar tres ejes no dependientes entre si hasta cierta medida como lo son sus propiedades químicas, físicas y mineralógicas. Por tanto, es necesario extraer de estos las unidades más idóneas para el estudio por medio de combinación de los diferentes métodos y ensayos.

Como ya se explicó antes los métodos han sido catalogados en químicos, físicos y mineralógicos, los métodos químicos son aquellos que surgen de una reacción química como lo son Luxan`s y Frattini donde a partir de la presencia de una reacción química se espera un cambio en la conductividad del medio que es directamente proporcional a esta y a la reactividad puzolánica, la clasificación de métodos y ensayos químicos también engloba aquellos que miden directamente la composición química aun cuando por ejemplo la fluorescencia de rayos X es un fenómeno físico, estos métodos son ASTM C-114 y FRX.

Los métodos y ensayos físicos son los que a través de cambios físicos inducidos en la muestra o mediciones en su estado inalterado permiten medir directa o

indirectamente propiedades de las puzolanas y dimensiones físicas, por ejemplo los cambios de peso ocasionados por la exposición térmica esperados en termogravimetría y pérdidas por ignición son señal de la presencia de aluminosilicatos cálcicos hidratados que son compuestos cementicos, en el IAR se mide directamente a resistencia a la compresión, dato que se compara con una muestra patrón para calcular su índice de resistencia. Los restantes métodos sirven para medir los tamaños de partículas o superficie, en el caso de difracción laser y microscopio de campo claro se puede obtener un dato del tamaño de las partículas por otro lado el ensayo de Blaine mide la superficie específica. En cuanto a los mineralógicos se encuentra aquí la difracción de rayos x cuya utilización arroja datos cuantificables de los minerales presentes en las muestras, pese a ser la difracción como en el caso de fluorescencia un fenómeno físico.

De esta manera se engloban los análisis en la figura 60 para facilitar su comparación y análisis.



**FIGURA 60. Análisis para la comparación de métodos en la caracterización de puzolanas**

Fuente: Elaboración propia

### **3.6.1 Métodos y ensayos químicos**

Estos refieren a ensayos y métodos que de manera directa o indirecta miden por medio de relaciones las propiedades químicas de los materiales o por medio de las propiedades químicas relacionan algún otro aspecto como la reactividad.

#### **Ensayo de Fluorescencia de Rayos X**

Este ensayo mide la radiación emitida por los átomos cuando son irradiados con luz en sus rangos no visibles de alta energía que en su mayoría pueden ser rayos X y en menor medida rayos gamma, al excitar los átomos en la muestra estos emiten radiación característica que pueden ser medidos por un detector que al captar la irradiación se mueve un ángulo dado directamente proporcional a la longitud de onda que es algo característico de cada elemento. También cierto movimiento en un rango sobre esos ángulos es indicativo de la concentración del elemento en la muestra, por tanto, explicado de forma sencilla podemos imaginarnos el rango de colores visibles para el ser humano, bajo la luz visible tenemos la luz infrarroja, microondas, ondas de radio y televisión que no podemos observar.

Así mismo las ondas con mayor energía como la ultravioleta, rayos X y rayos gamma son inimaginables para nuestro ojo, es decir que esta radiación emitida por los elementos presentes en la muestra por la excitación del bombardeo de rayos X podría ser medida como un color característico de cada elemento y entre mayor concentración de color mayor concentración del elemento, simplificado con este ejemplo podemos decir que así como cada color que percibimos con nuestro ojo es el reflejo de bombardear un cuerpo con luz visible siendo la luz que este refleja el color que percibimos, así la radiación que refleja un átomo bombardeado por rayos X es característica de él, lo que lo hace identificable y cuantificable.

Entendiendo esto es fácil analizar los pros y los contras de este ensayo, para empezar no es posible analizar los enlaces de los compuestos, por tanto, los resultados son puramente elementales pero por otra parte los resultados son sumamente fiables de

la distribución elemental en las muestras, este ensayo es muy usado en la evaluación de puzolanas dado que se pueden programar curvas de los compuestos que se sabe existen en una determinada muestra para usarlos con todas las muestras similares de un banco de materiales y obtener de manera inmediata las concentraciones de compuestos químicos.

Esta forma es muy usada por compañías dedicadas a la producción de cemento, pero posee la desventaja que una maquina calibrada de esta manera solo servirá para la zona representativa de esta calibración, otra forma es hacer este proceso a mano, determinando de cualquier otra manera cualitativa los compuestos que posee la muestra y utilizando los resultados para colocar cada elemento en cada uno de estos y lograr una concentración de compuestos.

### **Método de Luxan´s.**

Este método funciona al medir los cambios de conductividad eléctrica de un medio acuoso a una temperatura controlada de una mezcla de agua desionizada e hidróxido de sodio antes y después de haber agregado puzolana.

Analicémoslo con un ejemplo, los materiales puzolánicos en los suelos naturales tienen la capacidad reactiva que, al generar nuevos compuestos, estos supondrán un cambio sustancial en la conductividad del medio, en pocas palabras si se agrega un material no puzolánico la reactividad será mínima por tanto el cambio de conductividad también lo será, y al agregar un material con alta reactividad este cambio será sustancialmente mayor.

El resultado de esta prueba química es el de la medición directa de la reactividad puzolánica, pero se debe de tener sumo cuidado con la temperatura dado que una décima de grado centígrado puede cambiar el resultado, por tanto, genera un resultado preliminar no cien por ciento concluyente, pero si una idea lo suficientemente fiable para el estudio inicial de las puzolanas.



Lo anterior es debido a que si un material resulta excesivamente bueno en este ensayo, muy difícilmente cambiara ese resultado en ensayos subsiguientes, siendo nada más el umbral entre los cambios muy bajos de conductividad y los moderados (entre 0.35 mS/cm y 0.45 mS/cm) el que podría presentar algún tipo de inconsistencia dentro del margen de error pudiendo resultar este bajo o moderado a medida se avanza en la investigación pero de cualquier manera permite catalogar la posible reactividad y genera una excelente base de datos de donde partir sabiendo de buena manera los resultados posibles que se esperan, otra de las ventajas es el poco tiempo que necesita y su relativa facilidad.

### **Método de Frattini.**

Este método funciona de tal manera que mide una curva respecto al tiempo de la adsorción de hidróxido de calcio presente en una muestra midiéndola con otra de control capaz de saturar un medio con la misma alcalinidad, es decir, inicialmente poseen la misma cantidad de reactivo, este método es adecuado para evaluar la puzolanicidad de los cementos y no de las puzolanas mismas.

Como se mencionó anteriormente, este método no indica que tan adecuado sea el material para bajar el calor de hidratación, o para desarrollar resistencias mecánicas, entre otras características que puede desarrollar un material puzolánico, lo que lo hace no representativo fuera de esos aspectos, además que necesita mayor cantidad de tiempo de observación que otros métodos.

### **Ensayos establecidos en la Norma ASTM C-114.**

Estos ensayos elaborados para descomponer las muestras hasta aislar ya sea el dióxido de silicio, hierro o aluminatos consisten en la desintegración del material por medio de la adición de varios reactivos cuya concentración y tipo puede cambiar respecto a la resistencia de los materiales a descomponer, requieren de un alto conocimiento en el manejo y mezcla de las soluciones químicas así como de los

demás métodos de tratamiento de estas para su degradación, también es necesario de una gran variedad de reactivos que pudieran no estar disponibles o de fácil acceso.

### **3.6.2 Métodos y ensayos físicos**

Estos además de medir cualidades físicas, relacionan de manera directa o indirecta algunas cantidades físicas con ciertos aspectos químicos.

#### **Ensayo por microscopio de campo claro.**

Este ensayo sirve para observar las partículas de los materiales que se encuentran en el rango de las micras, por tanto, funciona para poder medir por medio de un programa informático los tamaños de las partículas que se están observando, se debe de realizar un tratamiento previo para separar las partículas en un medio acuoso y luego secar las muestras para que las partículas no absorban líquido, con este método se puede tener una idea general de los tamaños de las partículas presentes en las muestras, pero dada su dimensión éste podría no ser cien por ciento representativo de toda la muestra dado que pocos gramos del material poseen millones de partículas.

#### **Índice de actividad de resistencia**

Este es un ensayo normado por la ASTM C-311, que consiste en la sustitución en una mezcla controlada de concreto de cierta cantidad de puzolana con respecto a una mezcla patrón a la que no se le añade puzolana, la diferencia entre la resistencia obtenida a los 7 y 28 días dado que la reacción de las puzolanas con el hidróxido de calcio es lenta se espera una reducción entre la muestra que posee la puzolana y la que no, si la resistencia de la muestra puzolánica alcanza al menos el 75% de la resistencia de la muestra patrón se considera que es un material puzolanico. Este es uno de los ensayos más utilizados para el análisis de las puzolanas dado de que genera resultados prácticos y ayuda a tener una visión del comportamiento de los materiales mediante la implementación de los mismos en una situación similar a su implementación final cuando hablamos de adición mineral.

### **Ensayo por difracción láser**

Este ensayo consiste en hacer pasar las partículas en un frente de ondas, por tanto, estas se convierten en un obstáculo y se produce una dispersión del frente, estas interferencias pueden ser medidas por medio de la difracción láser, esta es usada en los equipos de granulometría para identificar los distintos tamaños de partícula lo que lo hace muy efectivo para estos análisis es su precisión cuyo rango oscila entre 0.02 a 2000 micras que en cuestiones de suelos es capaz de abarcar cualquier tipo de muestra.

### **Método Blaine.**

Este método consiste en hacer pasar una cantidad de viento a través de la muestra del material y medirlo, el viento que pasa a través del material es directamente proporcional a la porosidad de la muestra, por tanto, es posible a partir de esto calcular la superficie específica midiendo el gasto de aire a través de la capa. La superficie específica es determinante en el estudio de las puzolanas dado que el tamaño de las partículas es directamente proporcional a la superficie específica que se relaciona en centímetros cuadrados sobre gramos, es decir, entre más pequeñas son las partículas más centímetros cuadrados de superficie existirán en un gramo de material, por tanto, la adsorción es mucho más eficiente cuando se cumple con esta condición.

### **Método Termogravimétrico**

Este método mide las pérdidas de masa con respecto a las variaciones térmicas, las puzolanas al mezclarse con hidróxido de calcio generan compuestos cementicios, estos son silicatos y aluminatos cálcicos hidratados que al someterse a muy alta temperatura se descomponen, fenómeno que puede ser medido analizando por termogravimetría a las puzolanas.

Por tanto, se puede medir si existe presencia de estas reacciones dado que cuando hablamos de puzolanas las condiciones químicas y mineralógicas pueden encontrarse presentes y aun así no generar una óptima reactividad puzolánica si las

muestras no han tenido una reacción química de generación de compuestos silicio y aluminatos cálcicos, entonces las variaciones de masa serán bajas.

### **Método de pérdida por ignición**

De manera similar al anterior en este se analizan las diferencias en masa de una muestra antes y después de calcinarse, este método no permite un control tan a fondo como el anterior, sino que solamente mide la diferencia y se compara con una tabla para clasificar si se encuentra la pérdida en el rango de lo permitido en puzolanas o no, estos métodos permiten catalogar las puzolanas más no presentan un dato exacto de la cantidad de sílico-aluminatos cálcicos hidratados presentes en la reacción.

### **3.6.3 Métodos y ensayos mineralógicos**

#### **Método de difracción de rayos X.**

Este método funciona tanto para análisis químico como mineralógico de manera similar a la fluorescencia de rayos X la muestra es bombardeada con estos, salvo que la forma de captación y medición es totalmente diferente, en este método se miden los rayos difractados y éstos se asocian a la estructura interna del mineral, dado que los minerales poseen una forma definida y ordenada en todos los ejes del espacio esto permite identificar la geometría de la celda unidad, el estudio de esta para obtener las posiciones atómicas ayuda al estudio químico, por tanto, principalmente funciona para identificar los minerales presentes en la muestra y dado a que una fase cristalina dada siempre presenta un patrón de difracción característico, es posible el análisis cualitativo mediante la identificación del patrón de esta fase, y a partir de analizar el difractograma y sus diferentes picos y compararlos con una base de datos con información cristalográfica y bibliográfica es posible semicuantificar los compuestos químicos totales de la muestra, por tanto, es una herramienta fundamental para la identificación de la estructura mineralógica y complementaria para la cuantificación de la composición química.

### **3.7 Comparación de métodos**

Dado que los diferentes métodos y ensayos nos proporcionan de manera directa o indirecta resultados que puedan ser utilizados para el estudio de las puzolanas se debe de hacer una comparación pertinente de los métodos que se derivan de cada uno de los tres aspectos como lo son químico mineralógico y físico, analizando sus pros y sus contras entre la manera de obtención de información y la importancia de esta dando prioridad a las mediciones directas y a la accesibilidad de los equipos en nuestro entorno.

#### **Ensayos Químicos.**

Acá se encuentran catalogados la fluorescencia de rayos X el ensayo de Luxan el ensayo de Frattini y los ensayos de la norma ASTM C-114, se debe de partir de las diferencias entre estos, recordemos que la fluorescencia de rayos X proporciona un valor bastante acertado de los elementos presentes en las muestras pero no presenta información sobre los enlaces de los compuestos, por tanto, no se sabe en qué orden se encuentran enlazados estos átomos, por ende, es necesario identificar cualitativamente los compuestos de otra manera para poder cuantificarlos de forma más exacta utilizando este método, es decir, que es un método bastante fiable y preciso que puede ser utilizado para cuantificar la composición química valiéndose de otros métodos como la difracción de rayos X, dado que una relación entre estos mantiene un resultado con varianza baja.

En comparación con la fluorescencia de rayos X los resultados del ensayo de Luxan y Frattini son directamente dirigidos hacia la reactividad puzolánica de las muestras, por tanto, funcionan para catalogar la reactividad directamente y como un estudio previo de las puzolanas, los ensayos de la norma ASTM C-114 están directamente dirigidos a cuantificar la composición química, no con la misma precisión que se obtendría en un estudio de fluorescencia de rayos x pero sí de manera aceptable, la problemática surge en qué para desarrollar estas mediciones es necesario un conocimiento profundo en química y además de que estos ensayos no están al

alcance del público, en cambio a la fluorescencia de rayos X si es desarrollada como un servicio en algunos laboratorios centroamericanos.

Como ya se mencionó existe una similitud entre el método de Luxan que mide directamente la reactividad puzolánica por medio de los cambios de conducción eléctrica y el método de Frattini que la mide también a través de la adsorción de calcio durante el tiempo, la diferencia entre estos es que en el método de Frattini se mide la puzolanidad del cemento y no de las puzolanas en sí, también el tiempo de mediciones es bastante alto, en cambio con el método de luxan es posible hacer las mediciones en cuestión de minutos, por tanto mezclando el método de Luxan con otros métodos que posteriormente evalúen las puzolanas como adición mineral o el trabajo de estas en conjunto con el cemento se puede lograr una base de datos más completa.

### **Ensayos físicos.**

En los ensayos físicos es donde se puede diferenciar de mayor manera cómo se relacionan algunas cantidades físicas para obtener resultados de otras, por ejemplo, el índice de actividad de resistencia es utilizado para evaluar directamente el uso de las puzolanas como adición mineral mediante una aplicación práctica, por tanto, los resultados obtenidos presentan un valor de la reactividad puzolánica que es concluyente por sí mismo, dado que aun cumpliéndose los valores necesarios de las cantidades básicas influyentes en la reactividad y no cumpliendo con el índice de actividad de resistencia necesario para las puzolanas entonces se catalogará como no puzolanico, lo que invita a indagar en algunas características del material que pudieran estar influyendo en dicho resultado, por ejemplo, un material con alto contenido de dióxido de silicio que arroje resultados negativos en este ensayo podría deber a su alto contenido de cuarzo, es decir, de la fase cristalina del compuesto que no es reactiva lo que podría ser verificado mediante difracción de rayos X, como también de no ser así podría remitirse a la superficie específica del material dado que si las partículas son muy grandes presentan menos adsorción.

También tenemos los métodos que catalogan la presencia de los compuestos sílico-aluminatos cálcicos hidratados por medio del comportamiento de los materiales a la exposición térmica, como la son termogravimetría y el método de la pérdida por ignición, siendo el más completo de los dos la termogravimetría dado que se puede hacer un monitoreo durante todo el tiempo en el que la muestra está expuesta a las altas temperaturas, pero permite cuantificar muy poco sobre la cantidad de estos compuestos, por tanto si el estudio químico de las muestras se encuentra cuantificado y junto con este se realiza el índice de actividad de resistencia o el ensayo de Luxan puede concluirse de igual manera sobre si existen estos compuestos cementicios.

Dentro de los ensayos físicos también podemos observar aquellos dirigidos hacia los tamaños de las partículas o la superficie específica magnitudes que son directamente proporcionales, en este aspecto el ensayo por difracción láser presenta un resultado de la distribución de los tamaños de partículas en la muestra y el método de Blaine ayuda a calcular directamente a la superficie específica siendo el único problema entre estos su accesibilidad, por tanto, la observación y medición directa de las partículas presenta una idea general de las distribuciones de las partículas si el estudio principal no se centra en el tamaño de estas

Por lo tanto los métodos antes mencionados puede ser una herramienta a la cual recurrir como un índice secundario cuando se necesite verificar los tamaños de estas cómo puede ser cuando se cumplan las condiciones químicas y mineralógicas necesarias para reactividad puzolánica y no se estén generando los compuestos cementicios en la medida que se esperaría de un material que presenta estas magnitudes óptimas, por tanto, se debe estudiar si el problema se debe a la adsorción dado a que la reacción se genera sólo en las capas externas de las partículas, si estas partículas son demasiado grandes la generación de compuestos cementicios se ve afectada.

### **Ensayo mineralógico.**

Se ha planteado como única opción la difracción de rayos X dado que de otra manera es muy difícil la cuantificación de las fases cristalinas de los materiales debido a la complejidad del estudio de los minerales, es posible mediante otros métodos identificar la presencia de minerales más no cuantificarlos de manera precisa, por ejemplo, agregando unas gotas de vinagre al material ya que si este desprende burbujas indican la presencia de carbonatos ya que éstos se descomponen con los ácidos desprendiendo CO<sub>2</sub> pero la única forma de cuantificarlos con precisión es mediante la difracción de rayos X, también es una herramienta indispensable para mantener la precisión si se desea utilizar la fluorescencia de rayos X.

### **3.8 Propuesta Metodológica**

En base a lo anteriormente expuesto se presenta una propuesta metodológica que engloba algunos de los métodos y ensayos expuestos, metodología que pueda ser aplicable en nuestro medio y sirva para el estudio de la reactividad puzolánica de muestras teniendo por entendido que por la viabilidad y accesibilidad de equipos podría tomarse algún otro ensayo en cuenta de los aquí expuestos si el investigador lo considera pertinente, en este caso se parte como base fundamental un estudio que presente cantidades con el mínimo error posible que serán dadas en base a la difracción de rayos X y a la fluorescencia de rayos X.

Se debe de partir del método único expuesto para el análisis de las fases vítreas de los materiales, la difracción de rayos de rayos X, recordando que es fundamental la identificación de los minerales no reactivos presentes en las muestras, así como también, a partir de esto, el estudio de los compuestos químicos de estas, un pilar fundamental con el que deberán de complementarse los demás estudios.

En cuanto al área química se trabajará con la fluorescencia de rayos X, como se ha expuesto en anterioridad es necesaria su vinculación con la difracción de rayos X para lograr una cuantificación de la composición química de la muestra en específico



del dióxido de silicio el hierro y los aluminatos presentes, que son la base fundamental para la reactividad puzolánica, por tanto, en la difracción de rayos X se deberá de identificar las fases cristalinas tanto como los compuestos químicos presentes en las muestras para poder complementar el estudio utilizando la fluorescencia de rayos X y así obtener un error de pocas partes por millón, que pueda ser lo más representativo posible en cuanto a la composición química de las muestras.

También en esta misma área se realizará el ensayo de Luxan para representar preliminarmente la reactividad puzolánica de las muestras, lo que permitirá de manera inmediata verificar los resultados de su composición química y mineralógica, si presentan o no una tendencia a la reactividad.

En esta área no se utilizarán el ensayo de Frattini dado que necesita al menos un mes para presentar resultados y el ensayo de Luxan es beneficioso al utilizarlo junto con la difracción y fluorescencia de rayos X, ya que evalúa directamente la reactividad de las puzolanas no del cemento como en Frattini, dado que ese aspecto se evaluará de manera más fiable durante la aplicación del índice de actividad de resistencia.

En cuanto a los ensayos físicos el ensayo más importante es el del índice de actividad de resistencia, este permitirá corroborar de manera directa todos los datos obtenidos preliminarmente.

En el caso que existan muestras que reflejaran una reactividad puzolánica alta deducido de los resultados de la fluorescencia de rayos X, difracción de rayos X y ensayo de Luxan, y que el índice de actividad resistencia resultara por debajo de lo estandarizado, se remitirá a capturas digitales del microscopio de campo claro, para concluir si su comportamiento se debe a la adsorción de las partículas.

La implementación de la metodología puede esquematizarse en el ANEXO E, Esquema metodológico de la Investigación.

### **3.9 Aplicación de la propuesta metodológica**

#### **3.9.1 Aplicación para Fluorescencia de Rayos X**

Para el análisis de los tres materiales en estudio se realizó el siguiente procedimiento (F.R.X) “Bukler”

#### **Equipo herramientas y utensilios utilizados:**

- Materiales puzolánicos
- Equipo de FRX Bukler modelo
- Balanza electrónica
- Viales de pastico
- Tritón X – 100
- Galio
- Jeringa
- Pipetas normadas
- Agitador electrónico
- Porta muestras (plexiglás circular)
- Base centradora de la porta muestra

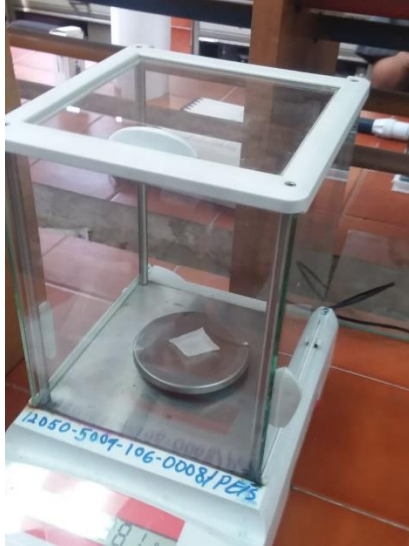
#### **Procedimiento:**

Se recortaron tres trozos de papel para pesar los materiales en balanza electrónica, cada uno para cada muestra respectivamente.



**FIGURA 61. Preparación de papel para pesar muestras a analizar**

Se procedió a pesar cada uno de los trozos de papel para verificar si el peso de cada uno es significativo.



**FIGURA 62. Peso de papel sobre balanza digital**

Luego se colocaron los trozos de papel dentro de la balanza electrónica, a continuación, se colocó una pequeña cantidad del material a analizar, este procedimiento se realizó para las tres muestras y así se obtuvo un peso de 50 mg.



**FIGURA 63. Peso de muestras**

Al haber obtenido el peso de cada muestra se procedió a depositarla en viales de plástico y ser tapados con sus respectivos tapones.



**FIGURA 64. Muestras colocadas en viales plásticos**

Luego se procedió a preparar una solución con el objetivo de dispersar las partículas de cada muestra en análisis, dentro del vial de cada muestra se colocó una cantidad de 10 mg de Tritón – X 100 al 1 %, este fue colocado por medio de una jeringa y una pipeta normada de plástico para mayor facilidad.



**FIGURA 65. Preparación para la solución a analizar**

Se colocó una cantidad de 10 microgramos de galio dentro de la solución por medio de una pipeta de plástico normada en microgramos.



**FIGURA 66. Pipeta para extraer solución de galio**

Obtenida la solución se procedió a realizar la homogenización por medio de un agitador electrónico, esta agitación se compone de dos velocidades de agitación, 2.5 minutos a una velocidad de 1500 RPM y otros 2.5 minutos a una velocidad de 2500 RPM.



**FIGURA 67. Agitador electrónico para homogenizar conglomerados de soluciones**

Finalizada la homogenización se sustrajo una pequeña cantidad de 10 microgramos por medio de una pipeta, esta cantidad de solución preparada es la que se colocó sobre el porta muestras (plexiglás circular) la cuales a su vez fue colocada sobre una base para que la pequeña cantidad de muestra quede centrada.



**FIGURA 68. Extracción de solución para colocación sobre porta muestra**

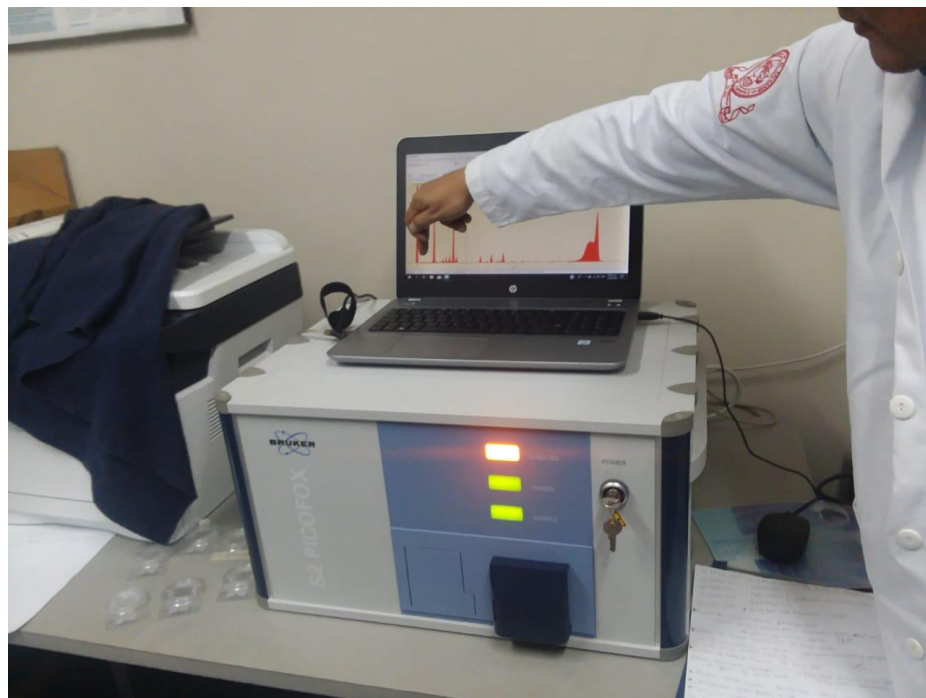
Si la cantidad de muestras a analizar es grande sobre un papel debe colocarse el nombre de cada una y estas deben ser colocadas sobre el nombre para lograr su identificación en todo momento y así evitar posibles confusiones.



**FIGURA 69. Materiales sobre porta muestras e identificados**

Finalizada la identificación de cada porta muestra con su respectiva muestra se procedió a dejarlas reposar por 24 horas para su secado, la idea es que estas quedaran totalmente secas y no dañar el equipo mientras son analizadas en el interior del mismo.

Pasado el tiempo de secado se procede a colocar los materiales en análisis sobre la porta muestra del equipo Bukler Modelo S2 PICOFOX.



**FIGURA 70. Equipo de Fluorescencia de Rayos X analizando muestras**

El tiempo de análisis para cada muestra dentro del equipo fue definido por el laboratorista y este dependerá de la complejidad de la investigación, para este análisis se estableció un tiempo 5 minutos por cada muestra dentro del equipo. Finalizado el análisis dentro del equipo se procedió a importar la información por medio de una USB a una computadora la cual poseía un Software especializado, esto en el objeto de identificar los elementos y sus respectivos porcentajes presentes en cada material.



### 3.9.2 Aplicación para Difracción de Rayos X

A continuación, se dará una breve explicación sobre el procedimiento realizado para la obtención de los resultados.

#### Equipos a utilizar:

- Difractómetro de rayos-X PANalytical modelo Empyrean
- Porta muestras para polvo

Para este análisis se utilizó un Difractómetro de Rayos-X PANalytical modelo Empyrean de la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), ver figura 71.



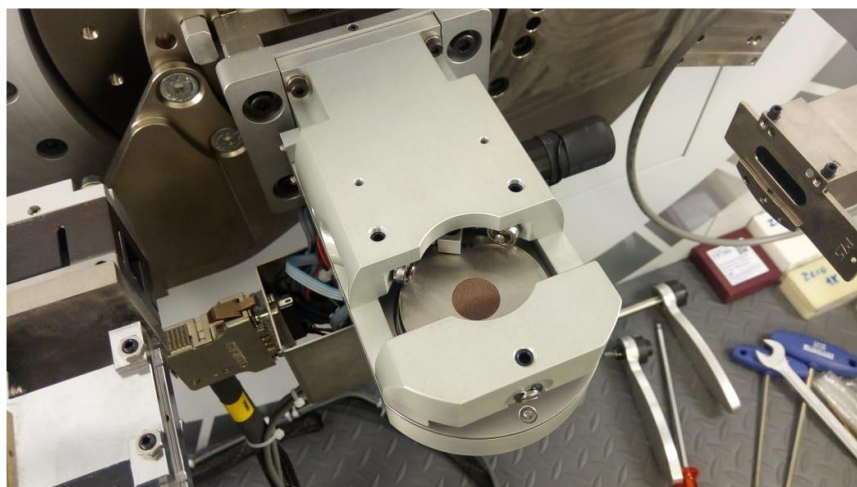
**FIGURA 71. Difractómetro de rayos-X PANalytical, modelo: Empyrean**

Se procedió en primer lugar por parte del ITCR a verificar las muestras en polvo entregadas por el cliente y que, si estas tenían la óptima granulometría, es decir en un rango de 50 a 150 micrones, además que la cantidad fuera la óptima para el análisis en un rango de 5 a 10 gramos por muestra.





**FIGURA 72. Porta muestras para posterior análisis**



**FIGURA 73. Montaje de la probeta dentro de Cuna reflexión-transmisión**

El análisis de Difractometría se realizó con un tubo de Cobre ( $\lambda=1.54 \text{ \AA}$ ) a una potencia de 45 kV y 40 mA, con un barrido de 5 a  $80^\circ$  (promedio). En este análisis se utilizó un Soller de 0.04 radianes en el extremo del tubo de rayos-X y un Soller large de 0.04 radianes en el extremo del detector, un slit de divergencia de  $1/4^\circ$  y un slit antiscatter de  $1/2^\circ$ . Para el filtrado de radiación  $K\beta$  se utilizó un filtro de Niquel. Para la adquisición de datos se utilizó el Software Data Collector y para el análisis de los difractogramas (resultados obtenidos con el DRX) se utilizó el software HighScore Plus.

### **3.9.3 Aplicación para Método de Luxan's**

Este método se basa en la conductividad eléctrica, realizando mediciones en suspensiones acuosas para evaluar la actividad puzolánica de los materiales en estudio.

#### **Materiales, herramientas y equipos utilizados:**

- Vaso de precipitados
- Agua desionizada (desmineralizada)
- Hidróxido de sodio
- Balanza analítica
- Agitador de vidrio
- Placa calefactora
- Termómetro de mercurio
- Sonda Hach
- Puzolana
- Servilleta de papel

#### **Procedimiento**

En esta investigación fueron 3 (tres) materiales analizados; por cada material se prepararon 200 mililitros de solución; en el caso de ser varios materiales en estudio la primera fase del procedimiento se puede hacer en conjunto, debido a que en esta investigación fueron 3 materiales se preparó 600 mililitros de solución y luego se vertieron 200 mililitros en cada vaso de precipitados para proceder individualmente con cada uno en la segunda fase.

La primera fase del método consistió en obtener una solución acuosa al 0.5 % de NaOH (Hidróxido de Sodio), se vertió en un vaso de precipitados 600 mililitros de agua desionizada, asegurándose que el vaso se encontrara limpio, seco y libre de residuos extraños, para así evitar contaminación en el medio acuoso y por ende resultados alterados.



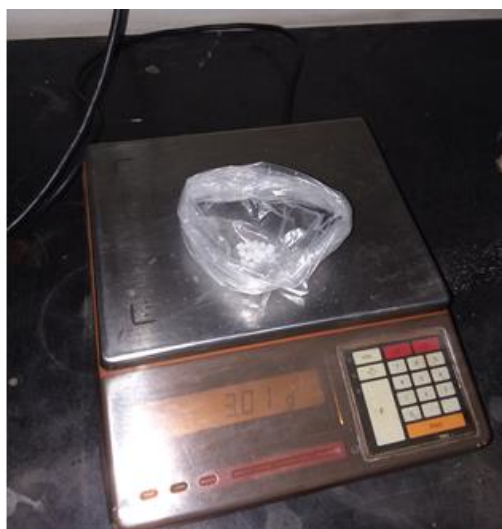
**FIGURA 74. Agua desionizada junto con vaso de precipitados**

Seguidamente se procedió a sacar del envase el hidróxido de sodio, lo cual debe realizarse de manera rápida para evitar intoxicación por inhalación, debido a que es muy fuerte y además tomar las medidas adecuadas en el manejo para evitar intoxicación por el contacto de este químico, como también deben usarse lentes de seguridad y guantes de neopreno o vinilo.



**FIGURA 75. Hidróxido de sodio en perlas**

Para una cantidad de 200 mililitros de agua desionizada se necesita 1 gramo para obtener una solución al 0.5 % de NaOH, de esta manera la solución requería un total de 3 gramos para ser mezclada en el vaso de precipitados ya que este contenía 600 mililitros de agua desionizada. Se hizo uso de la balanza analítica para esta operación, teniendo en consideración además el peso de la bolsa plástica que se utilizó.



**FIGURA 76. Hidróxido de sodio siendo pesado en balanza analítica**

Seguidamente se incorporó el hidróxido de sodio al agua desionizada y se mezcló con un agitador de vidrio durante 120 segundos de modo que el hidróxido de sodio se disolviera totalmente en el agua desionizada, y se notara con claridad un medio acuoso homogéneo, se dejó reposar un breve momento hasta asegurarse que no se precipitara hacia el fondo partículas de hidróxido de sodio. Se realizó este procedimiento evitando salpicaduras debido a que dicho químico a pesar de estar diluido puede provocar quemaduras y cicatrices permanentes.



**FIGURA 77. Disolviendo hidróxido de sodio**

Teniendo disuelto el NaOH (Hidróxido de Sodio) en el agua desionizada, es decir, teniendo la solución acuosa lista, se procedió a colocar el vaso de precipitados sobre la placa calefactora y se programó para alcanzar una temperatura de 40<sup>0</sup>C. La placa calefactora muestra la temperatura a la que se programa, pero por razones de precisión en esta ocasión se verificó con un termómetro de mercurio.



**FIGURA 78. Vaso de precipitados siendo calentado a una temperatura de 40<sup>0</sup>C**

Luego teniendo las medidas necesarias para evitar quemaduras se bajó el vaso de precipitados de sobre la placa calefactora y se procedió a verter 200 mililitros en cada vaso de precipitados para proceder de manera individual con cada una, teniendo un total de 3 (tres) vasos de precipitados con 200 mililitros de NaOH (Hidróxido de Sodio) cada uno.

Seguidamente haciendo uso de la Sonda Hach habiéndose asegurado que se encontrara limpio el electrodo de este ( en el caso de estarlo la lectura podría no ser correcta), se tomó la lectura de cada vaso de precipitados registrando así la conductividad que presento cada uno (este es el primer dato de interés que se debe anotar), debido a que proceden de una misma solución acuosa debió marcar el mismo resultado, dicho esto si variaba el resultado sería porque el vaso en el que se vertió estaba sucio, contaminado, o porque la temperatura a la que fueron tomadas las lecturas difieren de los 40<sup>0</sup>C.





**FIGURA 79. Toma de primera lectura utilizando Sonda Hach**

A continuación, se describen los pasos que corresponden a la segunda fase del método, se presenta el procedimiento que debe seguirse por cada puzolana en estudio.

Se pesaron 5 gramos de puzolana para ser agregados al medio acuoso (200 mililitros de agua desionizada al 0.5 % de NaOH).



**FIGURA 80. Pesando el material puzolánico**

Posteriormente se agregaron los 5 gramos de puzolana en el medio acuoso y se utilizó nuevamente el agitador de vidrio para disolverlo (en esta ocasión pudo notarse la diferencia entre cada material, debido a que cada una requería un periodo de tiempo de agitación diferente para disolverla completamente).



**FIGURA 81. Tres diferentes puzolanas disueltas en hidróxido de sodio al 0.5%**

Inmediatamente se colocó el vaso de precipitados sobre la placa calefactora a manera de alcanzar la misma temperatura a la cual fue tomada la lectura de la primera fase (40°C). Nuevamente se verificó la temperatura con un termómetro de mercurio.



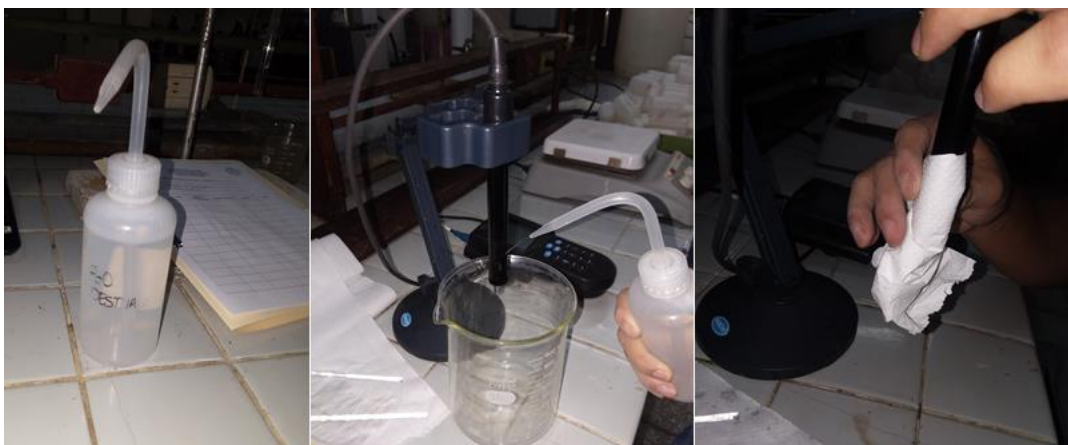
**FIGURA 82. Diferentes medios acuosos siendo calentados a una temperatura de 40°C**

Al alcanzar la temperatura mencionada se retiró el vaso de precipitado de sobre la placa calefactora y se procedió a determinar la conductividad que presentaba el medio acuoso modificado con la puzolana que se le adicionó (este es el segundo dato de interés que se debe anotar), que según el método aplicado dicha conductividad disminuiría debido a la reacción química que se produce entre la solución y la puzolana



**FIGURA 83. Toma de segunda lectura utilizando Sonda Hach**

Se procuró al momento de tomar el dato, que la Sonda Hach proporcionara la lectura final, debido a que mientras corrían los segundos el dato variaba centésimamente, de modo que se debió esperar un pequeño periodo de tiempo hasta que el equipo marcara el dato final. Este es el procedimiento recomendado para analizar cada material, teniendo el debido cuidado de usar vasos de precipitados y agitadores de vidrio diferentes para cada material en análisis, para evitar contaminar un medio acuoso con otro. Además de limpiar completamente la Sonda Hach al realizar toma de datos de diferentes medios acuosos, esta limpieza se realiza lavando el electrodo de la Sonda Hach con agua desionizada y secando con una servilleta limpia.



**FIGURA 84. Limpieza de electrodo de Sonda Hach**



### 3.9.4 Aplicación para Microscopio de Campo Claro

#### Equipos, materiales y herramientas utilizadas:

- Microscopio Óptico de campo claro
- Balanza analítica
- Beakers de vidrio de 50 mililitros esterilizados
- Pipetas de plástico
- Porta-muestras rectangulares de vidrio
- Cubre placa cuadradas de vidrio
- Horno
- Agua
- Material puzolanico
- Palillo agitador de madera

#### Preparación de materiales a analizar:

Haciendo uso de la balanza analítica para tener mayor precisión en las cantidades, se pesaron 50 miligramos de cada material a analizar.



FIGURA 85. Pesando material puzolánico

Para realizar análisis en el microscopio es necesario preparar porta-muestras (placas de vidrio) que contengan el material a analizar, recordando que dicho material no puede ser esparcido sobre el porta-muestras en estado pulverizado debido a que no podría visualizarse el verdadero tamaño de cada partícula por causa de la aglomeración entre ellas.

Para evitar el inconveniente anterior y otros más se debió realizar un procedimiento en húmedo para tener una mayor dispersión en el material y así lograr conocer el verdadero contorno de cada partícula para conocer su tamaño, para ello se procedió de la siguiente manera:

Teniendo el material previamente pesado, se procedió a llenar el beaker de 50 mililitros de capacidad, con una cantidad de 40 mililitros de agua a temperatura ambiente.



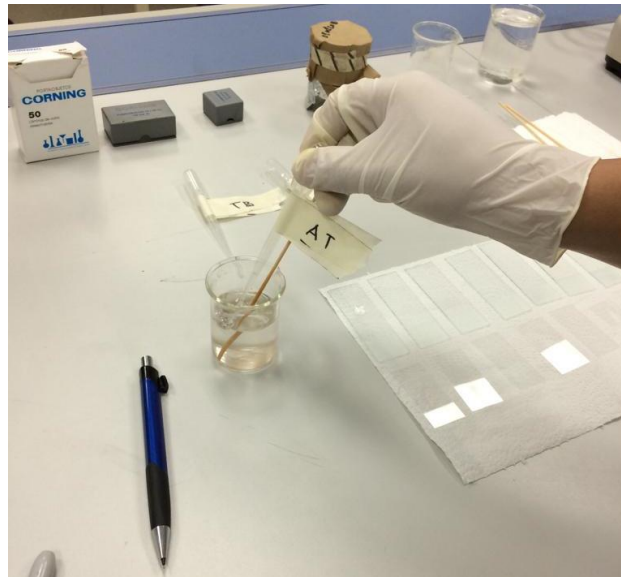
**FIGURA 86. Beakers esterilizados**

Depositando dentro del beaker el material puzolánico, se hizo uso de un palillo agitador para una mayor disolución y así evitar grumos en la solución.



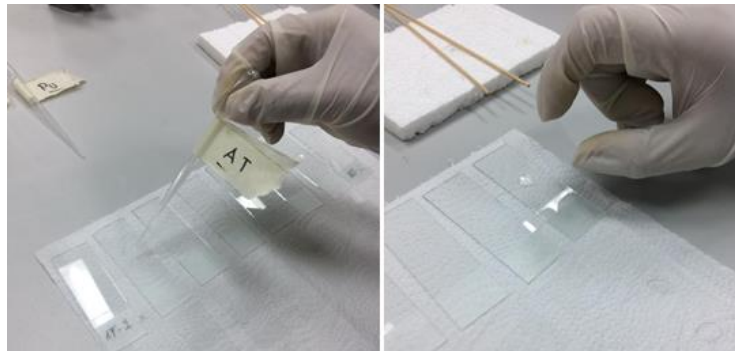
**FIGURA 87. Mezclando el material puzolánico con palillo agitador**

Luego haciendo uso de una pipeta de plástico se extrajo una cantidad moderada de la disolución tratando de evitar la inclusión de burbujas, ya que estas interfieren en el análisis de las muestras en el microscopio, debido a que al formarse burbujas se aglomeran las partículas en su contorno y esto evita visualizar las partículas individualmente.



**FIGURA 88. Haciendo uso de una pipeta de plástico para extraer solución**

Se colocó la cantidad de una gota de la solución sobre cada porta-muestras (placa de vidrio) y se verificó que las porta-muestras no contuvieran suciedad, es decir, que se encontraran totalmente transparentes. Después se colocó un cubre placa (tapa muestras) para inmovilizar y proteger las partículas del material (la cantidad de porta-muestras por cada material no está definida, sino que se deben preparar una cantidad significativa, en este caso 4 (cuatro) para tener una mayor cantidad de área que pudiera ser analizada).



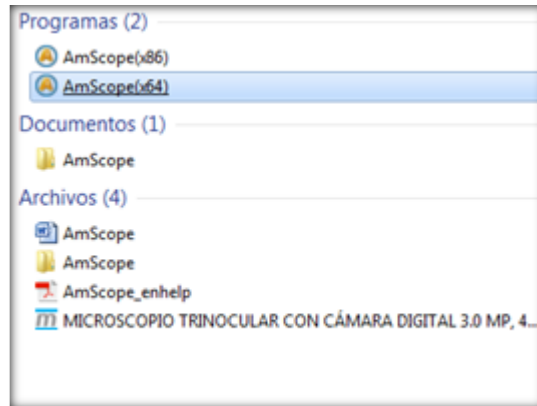
**FIGURA 89. Colocando una gota de solución en porta muestras**

Cuando hubo terminado el procedimiento anterior se colocaron las muestras dentro del horno a una temperatura de 130<sup>0</sup> Celsius por 30 minutos, esto con el fin que la humedad que absorbieron las partículas sea evaporada y pueda conocerse el tamaño real de cada partícula al analizarse en el microscopio.



**FIGURA 90. Porta-muestras colocadas dentro del horno**

Seguidamente se utilizó la computadora que está operando en conjunto con el microscopio y se procedió a abrir el programa AmScope buscándolo por su nombre en la barra de búsqueda en el menú de inicio, o también podía hacerse desde un acceso directo en el escritorio.



**FIGURA 91. Abriendo software AmScope**

Seguidamente se procedió a encender el microscopio girando una pequeña rosca que se encuentra en el costado inferior izquierdo del microscopio.



**FIGURA 92. Encendido del Microscopio de campo claro**

La ventana que apareció después de abrir el programa es donde se trabaja con las imágenes que visualiza la cámara, las secciones importantes de esta ventana son: El área de trabajo (1) donde se trabaja con las imágenes obtenidas, una barra de menús (2) que despliega diferentes opciones para trabajar, y una barra de herramientas (3) con accesos rápidos a funciones usadas frecuentemente. También, a la izquierda hay un panel lateral con más opciones que facilitan el trabajo con el video en vivo que se obtiene de la cámara.

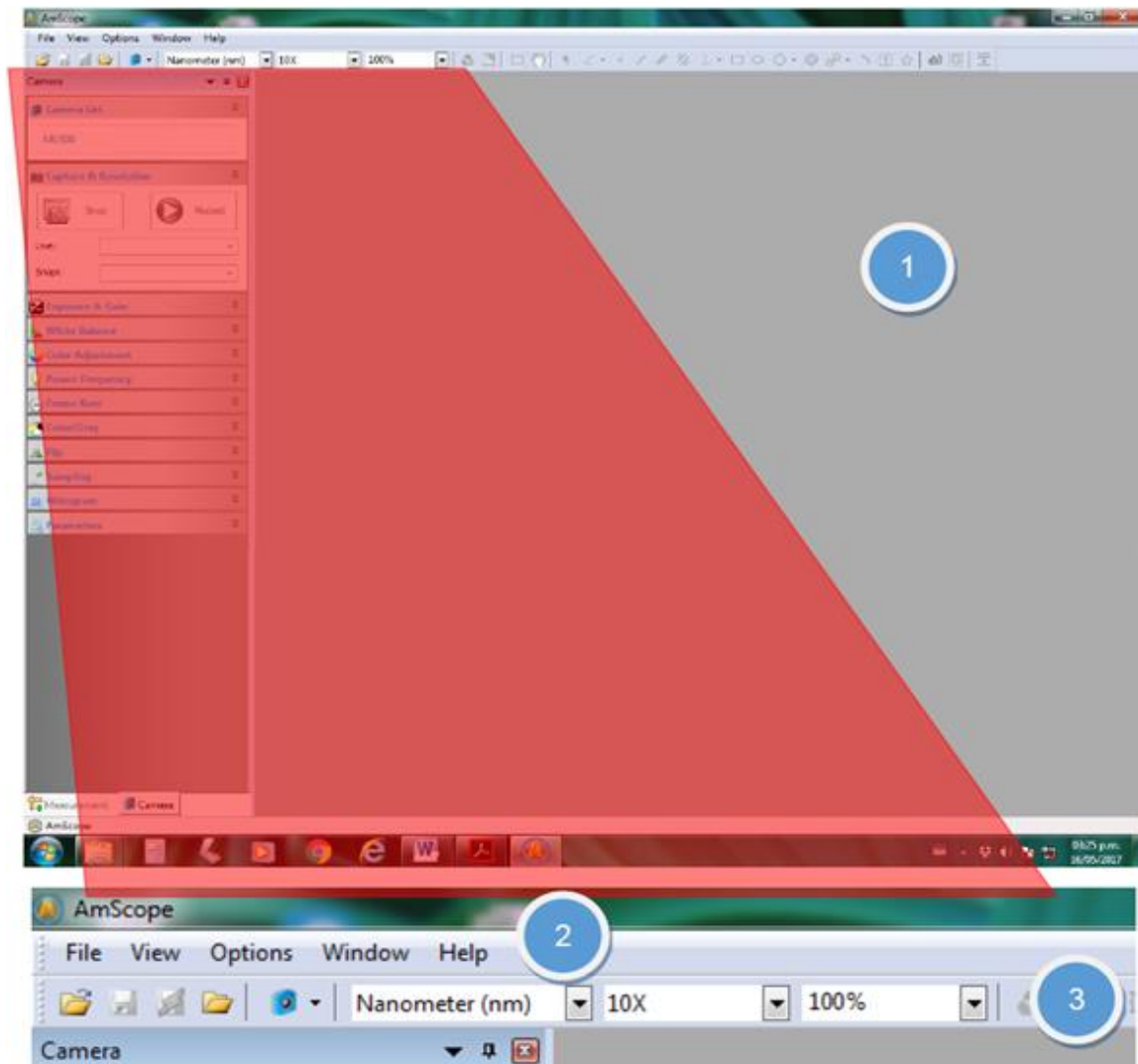
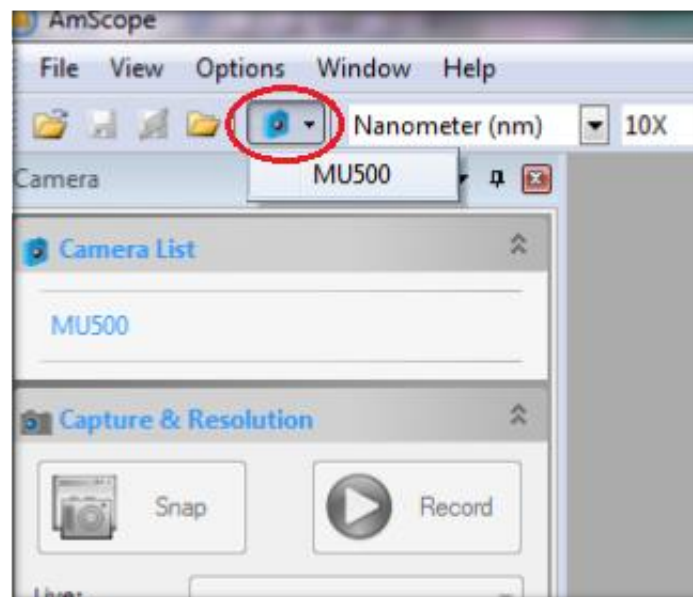


FIGURA 93. Ventana de trabajo del programa AmScope

Para obtener la imagen en vivo se usó el botón señalado en la siguiente figura, situado en la barra de herramientas y se seleccionó la cámara, otra manera para poder realizar dicha operación es seleccionando el nombre de la cámara en el panel lateral donde dice Cámara List.

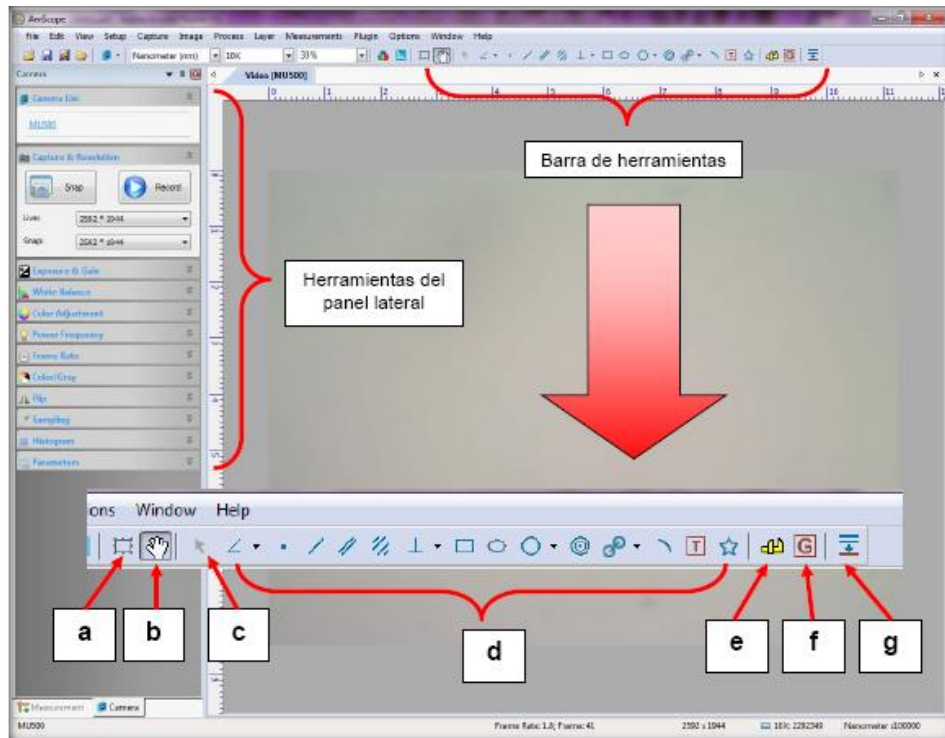
Además, se calibró el programa de acuerdo a la unidad de medida requerida en esta investigación, a modo de desactivar la que tenía por defecto el programa (Nanómetros) y activar la medición en micrómetros.



**FIGURA 94. Procedimiento para activar cámara**

Después de haber elegido la cámara aparece una imagen en la ventana de trabajo donde todas las opciones de la barra de herramientas y del panel lateral se activan instantáneamente.





**FIGURA 95. Opciones activadas en ventana de trabajo**

### **Descripción breve de barra de herramientas**

- a) Permite seleccionar fragmentos de imágenes usando un rectángulo.
- b) Cuando la imagen tiene un nivel alto de zoom, permite desplazar la pantalla por toda el área de la imagen.
- c) Permite seleccionar objetos como líneas de medición y etiquetas.
- d) Permiten medir longitudes, áreas o ángulos usando diferentes formas y opciones. El objeto incluye la figura que se indica en el botón y una etiqueta con su longitud.
- e) Sirve para calibrar el programa de acuerdo a los distintos poderes de magnificación del microscopio para poder hacer mediciones exactas.
- f) Calibra los colores grises en el video.
- g) Permite hacer una fusión de varias imágenes para lograr una imagen con mayor definición.



## Descripción breve de herramientas del panel lateral

Las herramientas del panel lateral se encuentran escondidas en pestañas, cuando la pestaña se abre la herramienta se activa. Algunas de estas herramientas son:

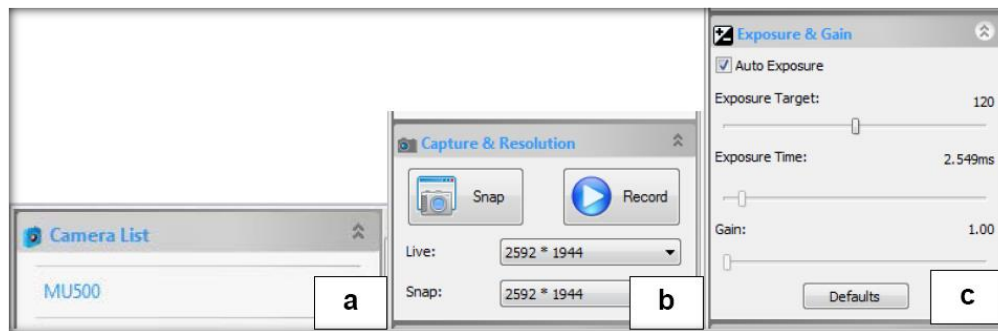
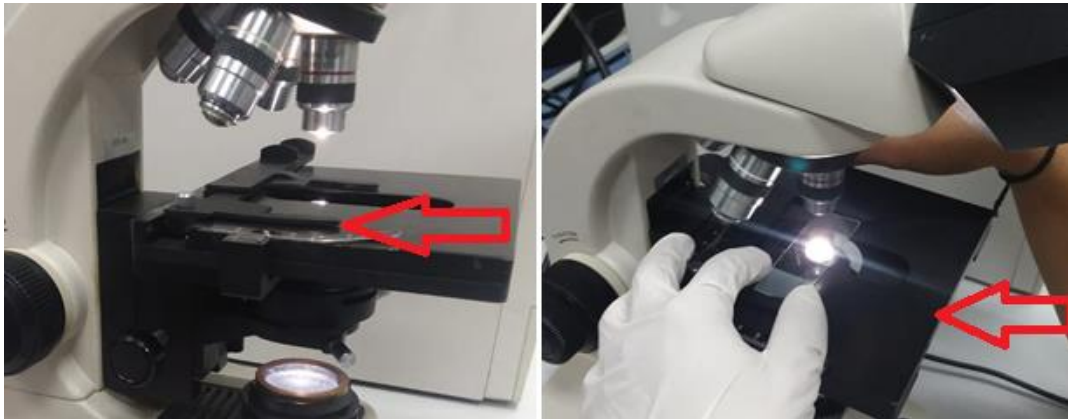


FIGURA 96. Opciones del panel lateral

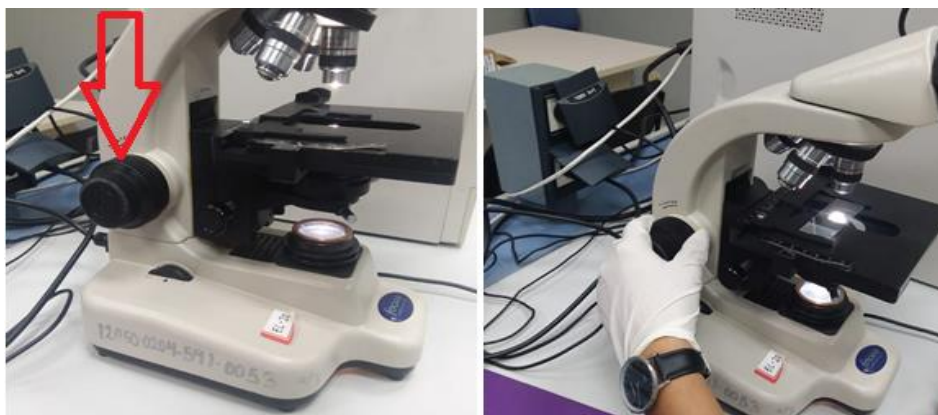
- a) Muestra la lista de cámaras disponibles, al elegir una, se abre el video en vivo.
- b) Permite capturar imágenes y video, también muestra las opciones de calidad del video en vivo y de las fotografías.
- c) Controla las opciones de exposición de la cámara, esto controla la intensidad de la luz en la imagen (si se ve muy oscura o muy brillante). Al abrir la pestaña aparece un rectángulo sobre el video, todo lo que está dentro del rectángulo es utilizado para calcular la exposición correcta si la casilla “Auto Exposure” está marcada.

Luego de mantener el material dentro del horno por los minutos antes indicados, se extrajeron los porta-muestras y se dejaron enfriar a temperatura ambiente por aproximadamente 20 minutos. Pasado ese tiempo se tomó un porta-muestras y se colocó bajo lente del microscopio, es decir, sobre la platina que es una plataforma horizontal con un orificio central, se colocó entre las llamadas pinzas sujetadoras las cuales inmovilizan el porta-muestras.



**FIGURA 97. Pinzas sujetadoras (Izquierda) y platina (Derecha)**

Luego para elevar la platina que contiene el porta-muestras hasta un punto muy cercano del lente, se hizo uso de dos tornillos que están en el costado izquierdo del microscopio o también se encuentran en el costado derecho, ambos lados tienen la misma función, la elección depende de cual lado se le facilita al usuario utilizar, el tornillo de mayor tamaño es para movimientos macrométricos, es decir, para movimientos verticales de mayor magnitud, y el tornillo de menor tamaño es para movimientos micrométricos, es decir, para movimientos verticales bastante leves. Estos tornillos ayudan a enfocar la muestra ya que no debe estar demasiado distante del lente ni demasiado cerca, haciendo uso del tornillo micrométrico se facilitó dicho enfoque.



**FIGURA 98. Tornillos para movimientos verticales de la platina**

Al tener el porta-muestras bajo el lente del microscopio se procedió a mover las pinzas sujetadoras las cuales tenían aprisionada el porta-muestra, con el fin de ubicar exactamente bajo el lente la parte de la porta-muestras que contiene el cubre placa, ya que es bajo el cubre placa que se encuentran las partículas a analizar.

Lo anterior se hizo con dos tornillos que están ordenados de forma vertical y se encuentran en el costado derecho del microscopio, con el tornillo inferior se hacen movimientos laterales y con el tornillo superior se hacen movimientos longitudinales, estos movimientos se hacen de manera leve, ya que son bastante sensibles.



**FIGURA 99. Tornillos para movimientos de las pinzas sujetadoras**

El primer lente del que se hizo uso es el 4X, la cual muestra una visión panorámica de las partículas de la muestra (se aprecian las partículas de manera distante), luego se enfocó con el 10X, el cual muestra un campo de visión más puntualizado, y por último se cambió el lente al 40X, dicho lente permite una visión más cercana de la muestra, es decir, logra mostrar una cuarta parte de la imagen que arroja el lente 10X, de esta manera se aprecian con mayor definición cada partícula (las imágenes que se muestran en esta investigación son las captadas con el último lente mencionado).

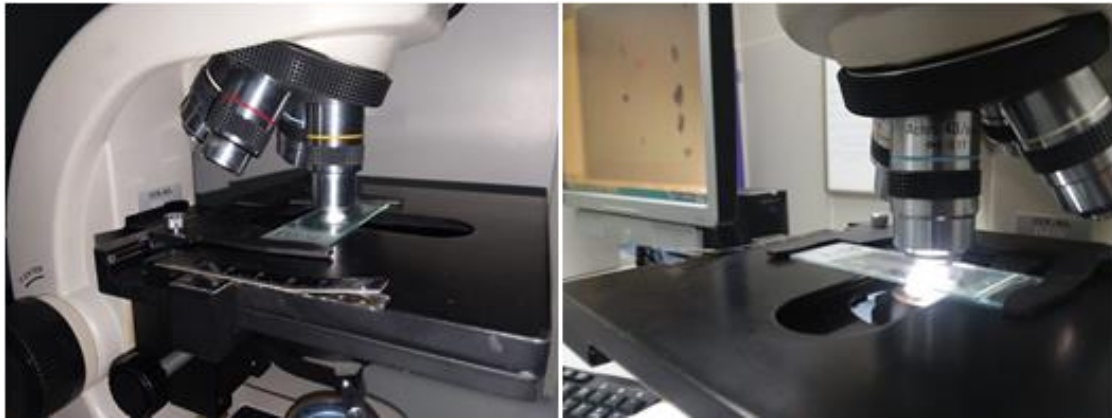


FIGURA 100. Oculares del microscopio

Ya teniendo enfocadas las partículas, se dió click en la siguiente herramienta para medir los tamaños de las partículas.

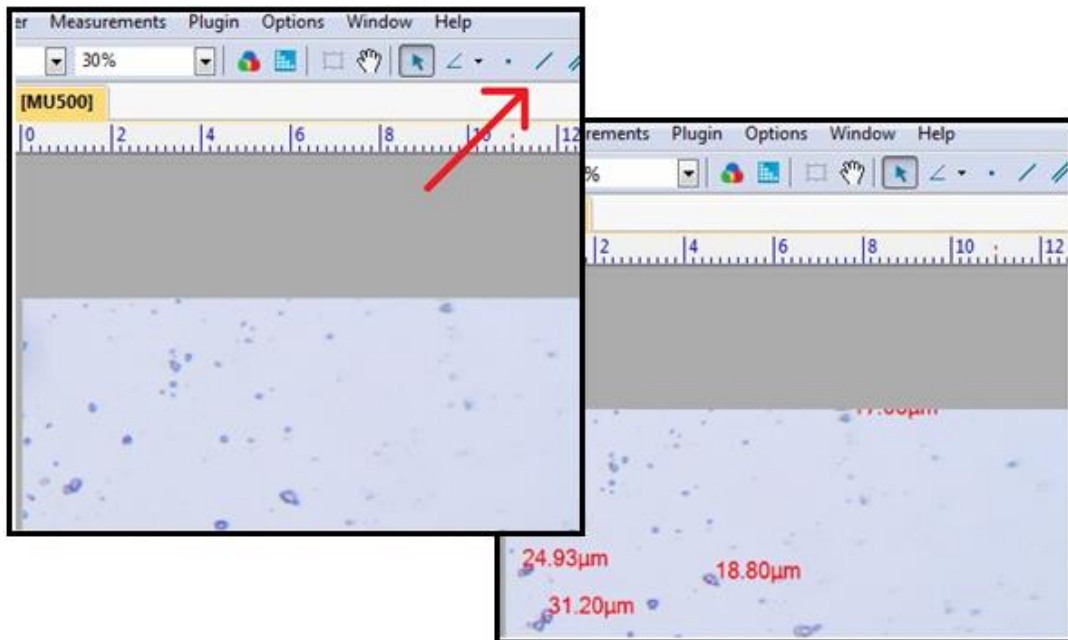
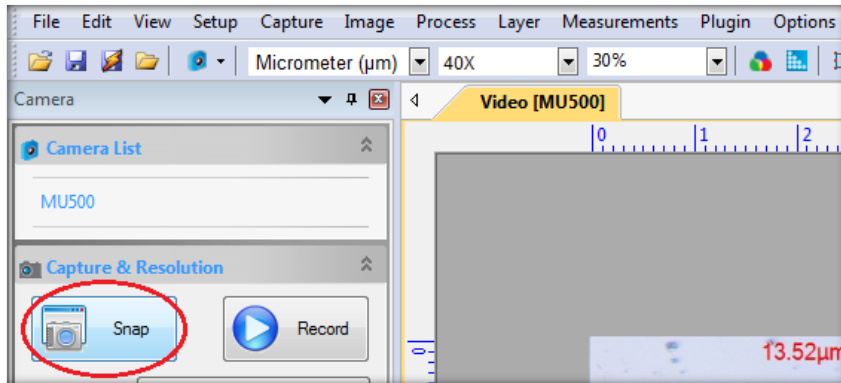


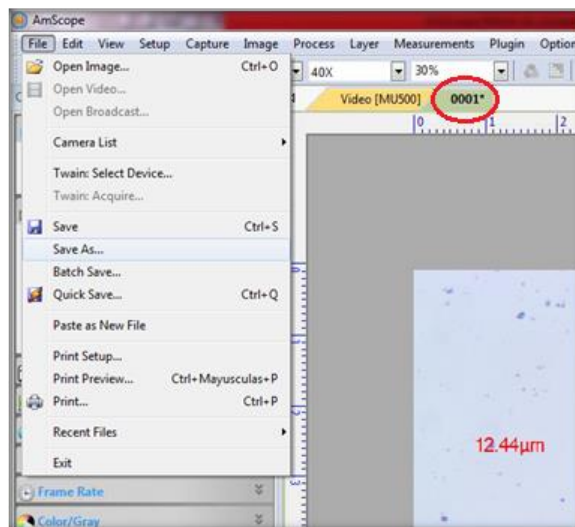
FIGURA 101. Medición de tamaños de partículas

Teniendo las partículas con su respectiva medida, se continuó con capturar la imagen que se había enfocado utilizando el botón “Snap” del panel lateral. La fotografía tomada siempre será de la imagen más actual del video en vivo de la cámara.



**FIGURA 102. Captura de imagen con partículas medidas**

Después de haber tomado la fotografía, ésta se abre en una nueva pestaña (señalada con el óvalo). Para guardar la imagen, así como se muestra en la nueva pestaña, se seleccionó “Save As” o guardar como en el menú “File”.



**FIGURA 103. Guardando captura**

### 3.9.5 Aplicación para Índice de actividad de resistencia

#### Materiales

##### Arena gradada normalizada

La arena usada para hacer los especímenes de ensayo para determinar el índice de actividad de resistencia con cemento Pórtland debe ser arena natural de sílice.



FIGURA 104. Arena de Ottawa

##### Cemento Pórtland

El cemento Pórtland usado en el ensayo de índice de actividad de resistencia debe tener por lo menos una resistencia a la compresión de 5,000 psi a los 28 días.



FIGURA 105. Tipo de cemento portland necesario para el ensayo



## **Puzolana**

Las puzolanas deben estar debidamente tamizadas en la malla número 325 y libre de humedad para que exista una óptima mezcla de los materiales en seco y no existan grumos.



**FIGURA 106. Toba volcánica (puzolana)**

## **EDADES Y NÚMERO DE ESPECÍMENES**

Se deben preparar especímenes de una mezcla de control y de una mezcla de ensayo (que contiene puzolana). En la mezcla de ensayo, se reemplaza el 20 % de la masa de la cantidad de cemento usado en la mezcla de control, por la misma masa del espécimen de ensayo.

La ASTM C 109 “*Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm ó 50,8 mm de lado*” establece que se deben preparar dos o tres cubos de una bachada de mortero para cada período o edad de ensayo especificado. Por lo tanto, en esta investigación se adoptó realizar 3 cubos de cada bachada de mortero para cada edad. En cuanto a las edades la ASTM C 618 “*Cenizas volantes y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, utilizadas como aditivos*”

*minerales en el concreto de cemento portland*” especifica que para el ensayo del índice de actividad de resistencia las edades indicadas son a los 7 días o 28 días para obtener resultados certeros, en esta investigación para obtener resultados más confiables se realizaron especímenes para ambas fechas en lugar de solo para una.

De modo que se debe hacer una bachada de mortero para 3 cubos de mezcla de control (sin puzolana) para el ensayo de resistencia a los 7 días y otros 3 cubos de mezcla de control para el ensayo de resistencia a los 28 días.

También se deben realizar 3 cubos de mezcla de ensayo por cada puzolana por cada edad, es decir, se deben realizar 3 cubos de mezcla de ensayo con escoria resultante de la calcinación de ladrillo de barro para el ensayo de resistencia a los 7 días y otros 3 cubos para el ensayo de resistencia a los 28 días, también realizar 3 cubos de mezcla de ensayo con Pumita para el ensayo de resistencia a los 7 días y otros 3 cubos para el ensayo de resistencia a los 28 días, y por ultimo también realizar 3 cubos de mezcla de ensayo con Tierra blanca para el ensayo de resistencia a los 7 días y otros 3 cubos para el ensayo de resistencia a los 28 días.

Se tiene un total de 6 cubos de mezcla de control y 18 cubos de mezclas de ensayo.

## **COMPOSICIÓN DE LOS MORTEROS**

### **Cantidades de material para mezcla de control**

Para realizar 3 cubos de esta mezcla se debe utilizar 250 gramos de cemento Pórtland, 687.5 gramos de arena de Ottawa y 121 mililitros de agua.

### **Cantidades de material para mezcla de ensayo**

Para realizar 3 cubos se debe utilizar 200 gramos de cemento Pórtland, 50 gramos de puzolana, 687.5 gramos de arena de Ottawa y la cantidad de agua necesaria en mililitros para lograr una trabajabilidad similar a la de la mezcla de control.



## REALIZACION DE LOS CUBOS

### Preparación de los moldes para el llenado

#### Herramientas y materiales utilizados:

- Moldes de los cubos
- Placa no absorbente
- Esponja o trapo para engrasar
- Grasa o aceite
- Varilla 3/8"
- Recipiente para aceite



FIGURA 107. Moldes para la realización de cubos de mortero

En las caras interiores de los moldes y de la placa plana no absorbente, se debe aplicar un recubrimiento delgado de un agente desmoldante, que puede ser aceite o grasa, en este caso se utilizó aceite de motor. Para esta labor se empleó una esponja impregnada sujeta en la punta de una varilla de hierro.

Se eliminó cualquier exceso del agente desmoldante utilizando un trapo, hasta que se logró una capa delgada y uniforme sobre las superficies inferiores. La capa resultante debe ser al menos la suficiente para permitir que una huella dactilar se pueda distinguir después de un leve contacto.



FIGURA 108. Aplicación de agente desmoldante en interior de moldes



FIGURA 109. Prueba de la huella dactilar

## Preparación de las mezclas

### Equipos y herramientas utilizados:

- Balanza
- Recipiente de mezclado
- Paleta mezcladora
- Probetas graduadas
- Palustre
- Guantes de cuero
- Cuchara

## Preparación de las mezclas

Luego se pesó la cantidad de cemento, arena, y puzolana (en el caso de las mezclas de ensayo) según las cantidades descritas anteriormente, se aseguró que todos los utensilios se encontraran limpios y secos.



**FIGURA 110. Pesando materiales en diferentes balanzas para su verificación**

Seguidamente se midió en la probeta la cantidad de agua requerida, todo según las cantidades mencionadas anteriormente.



**FIGURA 111. Probeta con agua**

Para obtener la mezcla de control y las mezclas de ensayo se procedió individualmente de la siguiente manera:

Se colocó el recipiente de mezclado en posición de trabajo, cuidando que estuviera limpio y seco. A continuación, se agregó todo el cemento, arena y puzolana (en el caso de las mezclas de ensayo) requerido/s para mezclar.



**FIGURA 112. Materiales dentro del recipiente de mezclado**

Con la paleta se mezclaron los materiales a fin de obtener un material visiblemente homogéneo.



**FIGURA 113. Materiales mezclados en seco**

Posteriormente se incorporó paulatinamente el agua de amasado en el recipiente y se mezcló.

Adicionalmente se debió arrastrar con el palustre todo el mortero adherido a la pared del recipiente hacia el fondo y mezclar bien hasta lograr una masa homogénea con la textura correcta.

### **Llenado de los moldes**

#### **Herramientas utilizadas:**

- Paleta
- Compactador (Pisón metálico o de madera)
- Palustre

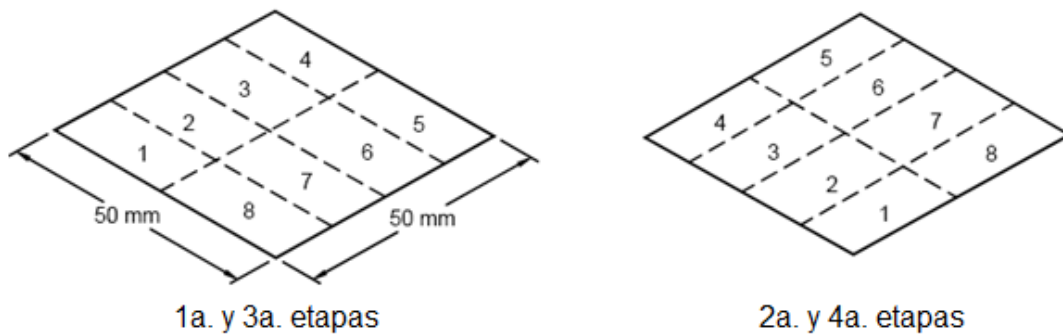
El proceso de llenado de los moldes se debe iniciar antes de 150 segundos, contados desde la terminación de la mezcla de mortero. En cada compartimiento se colocó una capa de mortero de 25 mm (aproximadamente la mitad de la profundidad del molde).



**FIGURA 114. Llenando moldes con mortero**

Luego se apisonó con 32 golpes del compactador en 10 segundos en 4 etapas de 8 golpes adyacentes, como se ilustra en la siguiente figura.





**FIGURA 115. Orden en que se deben apisonar las capas**

En cada etapa se golpeó siguiendo una dirección perpendicular a los de la anterior. La presión del compactador debe ser de dirección perpendicular a los de la anterior. La presión del compactador debe ser de forma que asegure un llenado uniforme de los compartimientos. Y de esta manera se completaron las cuatro etapas de compactación (32 golpes).



**FIGURA 116. Apisonamiento de mortero**

Una vez terminada la operación anterior, en todos los compartimientos, se llenaron con una segunda capa y se apisonaron como se explicó anteriormente. Durante la compactación de la segunda capa, al completar cada etapa y antes de iniciar la siguiente, se introdujo en el compartimiento con la ayuda del palustre, el mortero que se había depositado en los bordes del molde.



**FIGURA 117. Compactación de segunda capa**

Al finalizar la compactación, se debe tener en cuenta que las caras superiores de los cubos deben quedar un poco más altas que los bordes superiores del molde. El mortero que se depositó en los bordes del molde debió verterse en los compartimientos con ayuda del palustre.

En cuanto a la superficie de los cubos se alisó con el lado plano de éste, una vez en sentido perpendicular a la longitud del mismo y otra en su sentido longitudinal.

El mortero que sobresalía de la cara superior del molde se retiró haciendo uso del palustre, sosteniéndolo casi perpendicularmente, con un movimiento de vaivén a lo largo de la longitud del molde.



**FIGURA 118. Uso del palustre**

## ALMACENAMIENTO DE LOS ESPECÍMENES

Terminada la operación de llenado, las formaletas se colocaron en un ambiente que previniera la pérdida de humedad de los cubos durante un período de 72 horas con las caras superiores de los cubos expuestas al aire, pero protegidas contra la eventual caída de gotas de agua.



FIGURA 119. Formaletas en ambiente apropiado para reposar

Luego de transcurridas las 72 horas se procedió a desarmar cada formaleta o molde para preparar los cubos, removiéndolos de los moldes y sumergiéndolos en agua saturada con cal dentro de tanques de almacenamiento construidos de material no corrosivo, donde permanecerían hasta ser ensayados, unos a los 7 días y otros a los 28 días.



FIGURA 120. Formaletas desarmadas



## DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

### Equipos y herramientas utilizadas:

- Trapo
- Calibrador
- Balanza
- Máquina para ensayos de concreto

Ya pasado el respectivo periodo de fraguado se sacaron las formaletas de la pila de almacenamiento. Las superficies de los cubos se secaron con el trapo y los granos de arena sueltos y las incrustaciones sobre las caras que iban a estar en contacto con los bloques de apoyo de la máquina de ensayo se retiraron.



FIGURA 121. Cubos secos y libres de incrustaciones

Se comprobó, por medio de una regla, que estas caras fueran perfectamente planas ya que cuando la carga se aplica en las caras de un cubo cuyas superficies no son totalmente planas, se obtienen resultados mucho menores a la resistencia real, además se midieron las caras de cada cubo para determinar el área, el cual sería uno de los valores necesarios para conocer la carga máxima que resistiría cada cubo, esto se realizó con un calibrador o también llamado Pie de Rey.



**FIGURA 122. Pie de Rey y su uso**

Luego se colocó cuidadosamente el cubo en la máquina de ensayo, teniendo en cuenta que las superficies sobre las que se iba a ejercer presión fueran las que estuvieron en contacto con las paredes del molde.

Se centró el cubo debajo del bloque superior de la máquina de ensayo y se aplicó una carga en la maquina progresivamente hasta el momento en que se deformó o se agrietó el cubo, quedando señalado el valor de la presión ultima y fue este valor el que se registró.



**FIGURA 123. Ensayo de resistencia a la compresión de los especímenes**

---

## CAPITULO IV

---

### “ANALISIS Y PROCESAMIENTO DE RESULTADOS”

#### 4.1 Análisis y procesamiento de Fluorescencia de Rayos X

1 ppm = 1 miligramo (por cada kilogramo de muestra)

**TABLA 5. Resultados de partes por millón de muestras en análisis(FRX)**

MATERIALES	Elementos		
	Si	Al	Fe
TOBA VOLCÁNICA	372 200	68 700	4 500
PIEDRA POMEZ	306 700	92 800	6 500
ARCILLA TERMO-ACTIVADA	226 500	122 600	14 200

Donde la calibración de cada elemento posee una variabilidad de:

Silicio **±5,000 ppm**

Aluminio **±3,000ppm**

Hierro **±1,000ppm**

#### **Cálculos de pesos moleculares en toba volcánica**

Sabemos que la distribución atómica del dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>) es de dos átomos de oxígeno por cada átomo de silicio, por tanto, para calcular los miligramos de oxígeno necesarios para la cantidad de ppm presentes en la muestra tenemos.

$$\frac{ppm O}{ppm Si} = \frac{2 \text{ peso atómico } O}{\text{peso atómico de } Si}$$

$$ppm O = \frac{2 \text{ peso atómico } O}{\text{peso atómico } Si} \times ppm Si.$$

Sustituyendo tenemos:

$$ppm O = \frac{2 (15.999)}{28.085} \times 372 200 = \mathbf{424 058 ppm}$$

Las ppm o miligramos de la molécula serian:

$$ppm SiO_2 = ppm Si + ppm O$$

$$ppm SiO_2 = 372200 + 424058$$

Es decir, ppm SiO<sub>2</sub> = **796 258 ppm**

De igual manera sabemos que la distribución atómica del Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> es de 1.5 átomos de oxígeno por cada átomo de Aluminio, por tanto, para calcular los miligramos de oxígeno necesarios para la cantidad de ppm presentes en la muestra tenemos.

$$\frac{ppm O}{ppm Al} = \frac{1.5 \text{ peso atómico } O}{\text{peso atómico } Al}$$

$$ppm O = \frac{1.5 \text{ peso atómico } O}{\text{peso atómico } Al} \times ppm Al.$$

Sustituyendo tenemos:

$$ppm O = \frac{1.5(15.999)}{26.982} \times 68\,700 = 61\,104 \text{ ppm}$$

Las ppm o miligramos de la molécula serian:

$$ppm Al_2O_3 = ppm Al + ppm O$$

$$ppm Al_2O_3 = 68700 + 61104$$

Es decir, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = **129 804 ppm**

La distribución atómica del Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> es de 1.5 átomos de oxígeno por cada átomo de Hierro, por tanto, para calcular los miligramos de oxígeno necesarios para la cantidad de ppm presentes en la muestra tenemos.

$$\frac{ppm\ O}{ppm\ Fe} = \frac{1.5\ peso\ atómico\ O}{peso\ atómico\ Fe}$$

$$ppm\ O = \frac{1.5\ peso\ atómico\ O}{peso\ atómico\ Fe} \times ppm\ Fe$$

Sustituyendo.

$$ppm\ O = \frac{1.5\ (15.999)}{55.845} \times 4500 = 1\ 934\ ppm$$

Las ppm de la molécula sería:

$$ppm\ Fe_2O_3 = ppm\ Fe + ppm\ O$$

$$ppm\ Fe_2O_3 = 4500 + 1934$$

Es decir, ppm Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = **6434ppm**

**Por tanto, tenemos:**

$$SiO_2 = 796\ 258\ ppm$$

$$Al_2O_3 = 129\ 804\ ppm$$

$$Fe_2O_3 = 6434\ ppm$$

Por tanto, en la **Toba volcánica** SiO<sub>2</sub>+AlO<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 932,496 ppm equivalentes a 93.249%.

Repitiendo el proceso anterior para los demás datos de la tabla obtenemos:

### **Piedra pómez**

$SiO_2 = 656\,132\text{ppm}$

$Al_2O_3 = 175\,339\text{ppm}$

$Fe_2O_3 = 9\,293\text{ppm}$

Por tanto, en la **piedra pómez**  $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 = 840,764$  ppm equivalentes a **84.076%**

### **Arcilla termo-activada**

$SiO_2 = 484\,558\text{ppm}$

$Al_2O_3 = 231\,644\text{ppm}$

$Fe_2O_3 = 20\,302\text{ppm}$

Por tanto, en la arcilla **termo-activada**  $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 = 736,504$  ppm equivalentes a **73.650%**.

A continuación, la siguiente tabla muestra el resumen de cada uno de los compuestos y sus respectivos porcentajes presentes en cada unidad de análisis.

**TABLA 6. Resumen de compuestos presentes en la muestra por medio de FRX**

UNIDADES DE ANALISIS	COMPUESTOS DE INTERES			SUMA DE COMPUESTOS
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<b>Toba volcánica</b>	796258	129804	6434	93.25
<b>Piedra pómez</b>	656132	175339	9293	84.08
<b>Arcilla termo-activada</b>	484558	231644	20302	73.65

Analizando los resultados totales se puede observar que todos los materiales cumplen con más de 70% de  $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$  por lo que químicamente no debería de haber problema con la reactividad puzolánica, sin embargo, la sílice no reactiva puede formar un papel muy importante por lo que debe de analizarse su composición mineralógica.

## 4.2 Análisis y procesamiento de Difracción de Rayos X

Los resultados de difracción de rayos x y todos los porcentajes siguientes están expresados en porcentaje de peso de la muestra total, en la siguiente tabla tenemos las fases cristalinas de los tres materiales en estudio, junto con la formula química general del mineral utilizada para el estudio.

**TABLA 7. Resultados de composición mineralógica de Difracción de rayos X**

FASE CRISTALINA	DRX			FORMULA.
	TV	PP	AT	
KAERSUTITE (AMPHIBOLE)	-	16.96%	2.77%	{Na}{Ca2}{Mg4Ti}{Al2Si6O23}(OH)2
ANORTHITE (PLAGIOCLASE)	35.36%	42.67%	45.93%	CaAl2Si2O8
CLINOCHLORE	1.38%	0.74%	0.16%	(Mg5)Al2Si3O10(OH)8
QUARTZ	0.07%	0.15%	3.79%	SiO2
AMORPHOUS	63.19%	39.48%	16.95%	SiO2
KAOLINITE	-	-	6.59%	(K,H3O)(Al, Mg, Fe)2(Si, Al)4O10
GEHLENITA	-	-	9.87%	Ca2Al(SiAl)O7
CALCITE	-	-	4.28%	CaCO3
DOLOMITE	-	-	4.72%	CaMg(CO3)2
DIOPSIDE	-	-	4.94%	CaMgSi2O6
<b>TOTAL</b>	100.00%	100.00%	100.00%	

Como se puede observar mineralógicamente las muestras más parecidas son la toba volcánica y la piedra pómez.

A continuación, se calcula el porcentaje de peso atómico esperado con la formula general del mineral de kaersutita con el fin de calcular la suma de SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> presentes en cada material, para ello se separan los átomos de cada elemento para multiplicarlos por su peso atómico, luego se calcula el peso atómico de las moléculas de interés presentes en el mineral para saber su porcentaje.



**TABLA 8. Peso molecular de compuestos de interés en Kaersutita.**

KAERSUTITE (AMPHIBOL)	{Na}{Ca2}{Mg4Ti}{Al2Si6O23}(OH)2								TOTAL
	Na	Ca	Mg	Ti	Al	Si	O	H	
ATOMOS	1	2	4	1	2	6	25	2	43.00
Peso atómico Total	22.990	80.156	97.220	47.867	53.964	168.510	399.975	2.016	872.698
SiO2						168.510	191.988		360.498
Al2O3					53.96		48.00		101.961
<b>SiO2%</b>									<b>41.31%</b>
<b>Al2O3%</b>									<b>11.68%</b>

De lo anterior se puede ver que la Kaersutita posee un 41.31% de SiO<sub>2</sub> y un 11.68% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> cuya suma es de 52.99%, dichos valor luego será multiplicado por el porcentaje de este mineral presente en las muestras es decir por ejemplo la pumita posee un 16.96% de kaersutita sabemos que de ese 16.96% un 52.99% son moléculas sílico aluminosas reactivas. De igual manera se calculan los porcentajes para los demás minerales.

**TABLA 9. Peso molecular de compuestos de interés en Anortita.**

ANORTHITE (PLAGIOCLASE)	CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>				TOTAL
	Ca	Al	Si	O	
Total	40.078	53.964	56.170	127.992	278.204
SiO2			56.170	63.996	120.166
Al2O3		53.964		47.997	101.961
<b>SiO2%</b>					<b>43.19%</b>
<b>Al2O3%</b>					<b>36.65%</b>

**TABLA 10. Peso molecular de compuestos de interés en Clinocloro.**

CLINOCHLORE	(Mg <sub>5</sub> )Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>					TOTAL
	Mg	Al	Si	O	H	
TOTAL	121.525	53.964	84.255	287.982	8.064	555.790
SiO2			84.255	95.994		180.249
Al2O3		53.964		47.997		101.961
<b>SiO2%</b>						<b>32.43%</b>
<b>Al2O3%</b>						<b>18.35%</b>

**TABLA 11. Peso molecular de compuestos de interés en Diopside.**

DIOPSIDE	CaMgSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>				TOTAL
	Ca	Mg	Si	O	
TOTAL	40.078	24.305	56.170	95.994	216.547
SiO <sub>2</sub>			56.170	63.996	120.166
<b>SiO<sub>2</sub>%</b>					<b>55.49%</b>

**TABLA 12. Peso molecular de compuestos de interés en Gehlenita.**

GEHLENITA	Ca <sub>2</sub> Al(SiAl) <sub>7</sub> O <sub>7</sub>				TOTAL
	Ca	Al	Si	O	
TOTAL	80.156	53.964	28.085	111.993	274.198
SiO <sub>2</sub>			28.085	31.998	60.083
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		53.964		47.997	101.961
<b>SiO<sub>2</sub>%</b>					<b>21.91%</b>
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>%</b>					<b>37.19%</b>

**TABLA 13. Peso molecular de compuestos de interés en Kaolinite.**

KAOLINITE	[Al <sub>4</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub> ]				TOTAL
	Si	Al	O	H	
TOTAL	112.340	107.928	287.982	8.064	516.314
SiO <sub>2</sub>	112.340		127.992		240.332
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		107.928	95.994		203.922
<b>SiO<sub>2</sub>%</b>					<b>46.55%</b>
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>%</b>					<b>39.50%</b>

En la siguiente tabla se recogen todos los anteriores resultados y se suman los porcentajes para obtener el porcentaje total de las moléculas de los compuestos de interés, podemos notar la ausencia de hierro esto debido a que los minerales suelen tener en ocasiones hierro como parte de sus impurezas y en diferentes proporciones, para este cálculo no se sabe el nivel de estas impurezas y en las formulas químicas de los minerales no aparece hierro como un elemento presente, por tanto este dato deberá de ser comparado con la fluorescencia de rayos X para saber si existen estas impurezas.

**TABLA 14. Pesos moleculares totales de compuestos de interés en minerales.**

<b>% DE COMPUESTOS DE INTERES EN MINERALES</b>				
<b>MINERAL/COMPUESTOS</b>	<b>%SiO2</b>	<b>%Al2O3</b>	<b>Fe2O3</b>	<b>% TOTAL</b>
KAERSUTITE (AMPHIBOLE)	41.31%	11.68%	-	52.99%
ANORTHITE (PLAGIOCLASE)	43.19%	36.65%	-	79.84%
CLINOCHLORE	32.43%	18.35%	-	50.78%
QUARTZ	100%	-	-	100.00%
AMORPHOUS	100%	-	-	100.00%
KAOLINITE	46.55%	39.50%	-	86.05%
GEHLENITA	21.91%	37.19%	-	59.10%
CALCITE	-	-	-	0.00%
DOLOMITE	-	-	-	0.00%
DIOPSIDE	55.49%	-	-	55.49%

Utilizamos estos porcentajes para calcular el total de SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> total presente en las muestras.

**TABLA 15. Suma de compuestos de interés en Toba volcánica.**

<b>SUMA DE COMPUESTOS DE INTERES TOBA VOLCÁNICA</b>			
<b>FASE CRITALINA</b>	<b>%TV</b>	<b>% DE SiO<sub>2</sub>+ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> DE CADA MINERAL.</b>	<b>%TOTAL EN MUESTRA DE SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>
ANORTHITE (PLAGIOCLASE)	35.36%	79.84%	28.23%
CLINOCHLORE	1.38%	50.78%	0.70%
QUARTZ	0.07%	100.00%	0.07%
AMORPHOUS	63.19%	100.00%	63.19%
<b>TOTAL</b>	<b>100.00%</b>	-	<b>92.19%</b>

La tierra blanca posee una gran cantidad de material reactivo.

**TABLA 16. Suma de compuestos de interés en Piedra pómez.**

<b>SUMA DE COMPUESTOS DE INTERES PIEDRA POMEZ.</b>			
<b>FASE CRITALINA</b>	<b>%PP</b>	<b>% DE SiO<sub>2</sub>+ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> DE CADA MINERAL.</b>	<b>%TOTAL EN MUESTRA DE SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>
KAERSUTITE (AMPHIBOLE)	16.96%	52.99%	8.99%
ANORTHITE (PLAGIOCLASE)	42.67%	79.84%	34.07%
CLINOCHLORE	0.74%	50.78%	0.38%
QUARTZ	0.15%	100.00%	0.15%
AMORPHOUS	39.48%	100.00%	39.48%
<b>TOTAL</b>	<b>100.00%</b>	-	<b>83.06%</b>

La pumita al poseer mayor cantidad de anortita y karsutita posee menor cantidad de material reactivo.

**TABLA 17. Suma de compuestos de interés en Arcilla termo-activada.**

<b>SUMA DE COMPUESTOS DE INTERES ARCILLA TERMO-ACTIVADA</b>			
<b>FASE CRITALINA</b>	<b>%AT</b>	<b>% DE SiO<sub>2</sub>+ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> DE CADA MINERAL.</b>	<b>%TOTAL EN MUESTRA DE SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>
KAERSUTITE (AMPHIBOLE)	2.77%	52.99%	1.47%
ANORTHITE (PLAGIOCLASE)	45.93%	79.84%	36.67%
CLINOCHLORE	0.16%	50.78%	0.08%
QUARTZ	3.79%	100.00%	3.79%
AMORPHOUS	16.95%	100.00%	16.95%
KAOLINITE	6.59%	86.05%	5.67%
GEHLENITA	9.87%	59.10%	5.83%
CALCITE	4.28%	0.00%	0.00%
DOLOMITE	4.72%	0.00%	0.00%
DIOPSIDE	4.94%	55.49%	2.74%
<b>TOTAL</b>	<b>100.00%</b>	-	<b>73.20%</b>

La arcilla termo-activada posee el 73.20% de SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, la ASTM C-618 establece como mínimo un 70% independientemente de su estado reactivo para ser considerado un material puzolanico, químicamente el material cumple sin embargo si restamos la sílice no reactiva del cuarzo de 3.79% podría significar un problema a la reactividad final.

### 4.3 Análisis y procesamiento de Método De Luxan's

En las tablas 17-19 se muestran los resultados de las mediciones de conductividad de las mezclas de 0.5% de NaOH a 40 °C para las diferentes puzolanas.

TABLA 18. Lecturas de conductividad para toba volcánica

Lecturas de Solución al 0.5% de NaOH a 40 °C para Toba volcánica	CONDUCTIVIDAD (microSiemens/cm)
Toma 1	31.5
Toma 2	32.6
Toma 3	32.2
<b>PROMEDIO</b>	<b>32.10</b>

TABLA 19. Lecturas de conductividad para piedra pómez

Lecturas de Solución al 0.5% de NaOH a 40 °C para Piedra Pómez	CONDUCTIVIDAD (microSiemens/cm)
Toma 1	32.3
Toma 2	31.9
Toma 3	32.1
<b>PROMEDIO</b>	<b>32.10</b>

TABLA 20. Lecturas de conductividad para arcilla termo-activada

Lecturas de Solución al 0.5% de NaOH a 40 °C para Arcilla Termo-activada	CONDUCTIVIDAD (microSiemens/cm)
Toma 1	31.8
Toma 2	32.4
Toma 3	32.1
<b>PROMEDIO</b>	<b>32.10</b>

En las tablas 21-23 se muestran los resultados de las mediciones de conductividad de las mezclas de 0.5% de NaOH a 40 °C adicionada con puzolana.

**TABLA 21. Lecturas de conductividad agregando toba volcánica**

<b>Lecturas de Solución al 0.5% de NaOH a 40 °C + Toba volcánica</b>	<b>CONDUCTIVIDAD (microSiemens/cm)</b>
Toma 1	30.9
Toma 2	30.8
Toma 3	30.7
<b>PROMEDIO</b>	<b>30.80</b>

**TABLA 22. Lecturas de conductividad agregando piedra pómez**

<b>Lecturas de Solución al 0.5% de NaOH a 40 °C + Piedra Pómez</b>	<b>CONDUCTIVIDAD (microSiemens/cm)</b>
Toma 1	31.8
Toma 2	31.3
Toma 3	31.2
Toma 4	30.3
<b>PROMEDIO</b>	<b>31.15</b>

**TABLA 23. Lecturas de conductividad agregando arcilla termo-activada**

<b>Lecturas de Solución al 0.5% de NaOH a 40 °C + Arcilla Termo-activada</b>	<b>CONDUCTIVIDAD (microSiemens/cm)</b>
Toma 1	31.1
Toma 2	30.7
Toma 3	31.2
<b>PROMEDIO</b>	<b>31.00</b>

En la siguiente tabla se muestra el promedio de lecturas de las mediciones de soluciones al 0.5% de NaOH a 40 °C, y el promedio de lecturas de las mediciones de soluciones adicionadas con puzolanas.

**TABLA 24. Diferencias de conductividades entre soluciones iniciales y finales**

<b>PUZOLANA</b>	<b>Promedio de lectura en solución 0.5% de NaOH a 40 °C (A)</b>	<b>Promedio de lectura en solución 0.5% de NaOH + Puzolana (B)</b>	<b>Diferencia C= A - B</b>
PIEDRA POMEZ	32.1 mS/cm	31.15 mS/cm	0.95 mS/cm
TOBA VOLCÁNICA	32.1 mS/cm	30.8 mS/cm	1.3 mS/cm
ARCILLA TERMO-ACTIVADA	32.1 mS/cm	31.0 mS/cm	1.1 mS/cm

La diferencia de los dos promedios se compara con la siguiente tabla para categorizar la puzolanidad de cada puzolana de acuerdo a los cambios de conductividad.

**TABLA 25. Tabla método de Luxan's**

<b>PUZOLANIDAD</b>	<b>CAMBIO EN LA CONDUCTIVIDAD mS/cm</b>
BUENA	Mayor de 1.2
MODERADA	Entre 1.2 – 0.4
NO PUZOLANICO	Menor de 0.4

**TABLA 26. Categorías de puzolanidad de las tres puzolanas en estudio**

<b>PUZOLÁNA</b>	<b>DIFERENCIA DE CONDUCTIVIDAD(ms/cm)</b>	<b>CATEGORIA</b>	<b>PUZOLANIDAD (LUXAN'S)</b>
PIEDRA POMEZ	0.95	Entre 1.2-0.4	Moderada
TOBA VOLCÁNICA	1.3	Mayor de 1.2	Buena
ARCILLA TERMO-ACTIVADA	1.1	Entre 1.2-0.4	Moderada

Conforme a los rangos establecidos por Luxan's la puzolana Toba volcánica puede ser considerada con buena puzolanidad, mientras que las puzolanas Piedra pómez y Arcilla termo-activada son consideradas como puzolanas con moderada puzolanidad.

#### 4.4 Análisis y procesamiento de Microscopio de Campo Claro

Todas las mediciones siguientes son en micrómetros:

**TABLA 27. Distribución de tamaño de partículas para toba volcánica**

TOBA VOLCÁNICA				
	12.89	24.53	29.19	34.74
	18.23	12.01	22.02	15.01
	14.24	18.67	17.35	15.01
	27.07	26.86	23.48	32.41
	15.87	24.06	29.45	30.02
	32.27	21.52	15.87	38.18
	25.05	17.71	35.95	25.33
	18.26	18.67	28.22	31.18
	12.89	19.94	26.63	37.98
	15.87	10.57	20.14	24.03
	10.44	26.09	25.7	17.47
	14.2	22.02	18.85	34.72
	12.4	23.94	35.03	42.73
	14.05	22.2	30.34	41.22
	11.67	23.6	24.73	35.67
	11.07	18.67	36.55	30.22
	20.08	25.91	22.93	19.04
	38.63	22.2	20.38	23.09
	32.04	34.46	26.24	-
	12.62	31.59	25.59	-
<b>Promedio=</b>	<b>18.49</b>	<b>22.26</b>	<b>25.732</b>	<b>29.34</b>
<b>Promedio Total=</b>	<b>23.96 μ</b>			

El resultado de la tierra blanca o toba volcánica es 23.96 micrómetros lo que podría afectar en baja medida a la reactividad dado que un valor óptimo sería de al rededor 20 micrómetros para poder omitir cualquier disminución de la reactividad referente a baja superficie específica, el valor por sí mismo no es concluyente dado que la reactividad dependerá en mucha mayor medida de sus composiciones química y mineralógica, dado que el tamaño promedio de partículas no se encuentra en un rango muy elevado que impida la reactividad.



**TABLA 28. Distribución de tamaño de partículas para piedra pómez**

<b>PIEDRA PÓMEZ</b>				
	34.95	16.81	18.94	37.79
	19.63	15.01	26.56	18.82
	34.2	13.9	15.54	14.62
	24.36	27.71	26.38	11.67
	21.2	12.7	13.86	21.17
	17.05	17.33	27.25	25.48
	24.28	12.75	18.8	22.44
	28.87	26.66	17.96	32.67
	39.33	20.91	24.53	18.45
	12.44	15.01	15.57	16.21
	21.94	35.57	23.45	32.5
	13.52	31.2	19.14	18.23
	17.66	21.94	17.66	20.87
	15.06	9.87	21.8	22.2
	24.93	28.89	31.74	19.14
	18.8	20.82	22.02	27.66
	31.3	15.06	18.23	19
	23.09	24.03	22.66	28.61
	28.1	36.97	14.76	-
	24.55	19.66	15.21	-
<b>Promedio=</b>	<b>23.76</b>	<b>21.14</b>	<b>20.60</b>	<b>22.64</b>
<b>Promedio Total =</b>	<b>22.04 μ</b>			

El resultado de la pumita o piedra pómez es 22.04 micrómetros lo que podría afectar en muy baja medida a la reactividad, el valor por sí mismo no es concluyente dado que la reactividad dependerá en mucha mayor medida de sus composiciones química y mineralógica, el dato no se encuentra en un rango que impida la reactividad puzolánica.

**TABLA 29. Distribución de tamaño de partículas para arcilla termo-activada**

ARCILLA TERMO-ACTIVADA			
31.37	17.63	19.36	15.01
43.9	21.07	26.58	-
30.05	44.26	20.79	-
19.66	18.8	14.05	-
11.55	27.74	19.63	-
19.77	23.09	13.9	-
19.04	26.86	8.08	-
13.86	10.33	18.48	-
23.21	12.7	34.66	-
12.91	32.54	17.36	-
35.96	24.36	11.55	-
34.72	20.82	10.46	-
20.79	10.46	18.48	-
15.06	15.19	16.21	-
20.17	11.6	22.21	-
37.31	12.7	16.17	-
26.58	18.51	19.22	-
31.94	31.37	10.46	-
14.61	12.06	14.05	-
18.48	17.32	20.82	-
<b>Promedio=</b>	<b>24.047</b>	<b>20.47</b>	<b>17.626</b>
<b>Promedio Total=</b>	<b>19.29 μ</b>		

El promedio de tamaños de partículas de la Arcilla Termo-Activada es 19.29 micrómetros, es el dato más bajo de todos los materiales y en cuanto a su interpretación no debería de significar ningún inconveniente a la reactividad, por tanto ninguno de los tres materiales presentara disminución de la reactividad puzolánica significativa referente a los tamaños de partículas dado que los datos no son excesivamente altos como para generar mayor influencia que la que aportan sus composiciones químicas y mineralógicas.

**TABLA 30. Resumen de tamaño de distribución de partículas por medio de MCC**

	<b>TOBA VOLCÁNICA</b>	<b>PIEDRA PÓMEZ</b>	<b>ARCILLA TERMO-ACTIVADA</b>
<b>PROMEDIO TOTAL</b>	23.96 μ	22.04 μ	19.29 μ

#### 4.5 Análisis y procesamiento de Ensayo de Resistencia a la compresión

##### Para 7 días

A continuación, se muestran los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión a los 7 días de cubos de mortero elaborados con mezcla patrón (sin puzolana) y de cubos de mortero elaborados con mezcla de ensayo (con puzolana) necesarios para determinar el índice de actividad de resistencia de cada puzolana, el cual se determinó haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$\%IAR = (R \text{ puzolana} / R \text{ patrón}) * 100$$

IAR: Índice de actividad de resistencia

R: Resistencia promedio

**TABLA 31. Muestras Patrón compuestas por cemento y arena (MP)**

DESCRIPCION	CARGA ULTIMA (Lbf)	ESFUERZO DE FALLA ULTIMO (Lbf/pulg2)	PROMEDIO
MP-1	9,270.00	2,294.50	2,293.67
MP-2	9,810.00	2,428.16	
MP-3	8,720.00	2,158.36	

**TABLA 32. Piedra pómez compuesta por cemento arena y puzolana (PP)**

DESCRIPCION	CARGA ULTIMA (Lbf)	ESFUERZO DE FALLA ULTIMO (Lbf/pulg2)	PROMEDIO	% IAR
PP-1	6,700.00	1,658.37	1,715.30	75 %
PP-2	7,070.00	1,749.96		
PP-3	7,080.00	1,737.58		

**TABLA 33. Arcilla termo-activada compuesta por cemento arena y puzolana (AT)**

DESCRIPCION	CARGA ULTIMA (Lbf)	ESFUERZO DE FALLA ULTIMO (Lbf/pulg2)	PROMEDIO	% IAR
AT-1	7,300.00	1,806.89	1,647.65	71.83 %
AT-2	6,330.00	1,566.79		
AT-3	6,340.00	1,569.27		

**TABLA 34. Toba volcánica compuesta por cemento arena y puzolana (TV)**

DESCRIPCION	CARGA ULTIMA (Lbf)	ESFUERZO DE FALLA ULTIMO (Lbf/pulg2)	PROMEDIO	% IAR
TV-1	7,930.00	1,962.82	1,836.59	80.07 %
TV-2	7,240.00	1792.03		
TV-3	7,090.00	1,754.91		

A los 7 días el mejor comportamiento lo obtuvo el mortero elaborado con Toba volcánica, contando con un valor de compresión promedio de 1,836.59 Lbf/pulg2; mientras el que logro la resistencia media es la Piedra pómez contando con un valor de compresión promedio de 1,715.30 Lbf/pulg2; y el material que obtuvo resistencia baja es la Arcilla termo-activada contando con un valor de compresión promedio de 1,647.65 Lbf/pulg2.

Simultáneamente se obtuvieron los valores del índice de actividad de resistencia de cada material, los cuales reflejaron que la Toba volcánica muestra el más alto carácter puzolánico teniendo un índice de actividad de resistencia del 80.07 %, cumpliendo con lo establecido en la norma ASTM C-618 que define que un material puede clasificarse como puzolánico si el índice de actividad de resistencia es mayor o igual al 75%.

El valor del índice de actividad de resistencia de la Piedra pómez es del 75%, lo que indica que este material se puede considerar como puzolánico debido a que exactamente cumplió con el mínimo establecido en la norma ASTM C-618. Y, por último, se obtuvo que el valor del índice de actividad de resistencia de la Arcilla termo-activada es del 71.83%, lo que indica que este material no se puede considerar como puzolánico debido a que está muy por debajo del mínimo (75%) establecido en la norma ASTM C-618, siendo este material no recomendado para fines de inclusión en cementos debido a su mínima contribución de resistencia.

**Para 28 días:**

A continuación, se muestran los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión a los 28 días de cubos de mortero elaborados con mezcla patrón (sin puzolana) y de cubos de mortero elaborados con mezcla de ensayo (con puzolana) necesarios para determinar el índice de actividad de resistencia de cada puzolana, y de esta manera se conoce la resistencia que alcanzó cada material luego de 21 días más, el cual se determinó haciendo uso de la misma ecuación:

$$\%IAR = (R \text{ puzolana} / R \text{ patrón}) * 100$$

IAR: Índice de actividad de resistencia

R: Resistencia promedio

**TABLA 35. Muestras Patrón compuestas por cemento y arena (MP)**

DESCRIPCION	CARGA ULTIMA (Lbf)	ESFUERZO DE FALLA ULTIMO (Lbf/pulg2)	PROMEDIO
MP-1	12,375.45	3,063.15	3,062.05
MP-2	13,096.35	3,241.59	
MP-3	11,641.20	2,881.41	

**TABLA 36. Piedra pómez compuesta por cemento arena y puzolana (PP)**

DESCRIPCION	CARGA ULTIMA (Lbf)	ESFUERZO DE FALLA ULTIMO (Lbf/pulg2)	PROMEDIO	% IAR
PP-1	8,984.50	2,223.83	2,343.07	76.52
PP-2	9,858.45	2,440.15		
PP-3	9,555.80	2,365.24		

**TABLA 37. Arcilla termo-activada compuesta por cemento arena y puzolana (AT)**

DESCRIPCION	CARGA ULTIMA (Lbf)	ESFUERZO DE FALLA ULTIMO (Lbf/pulg2)	PROMEDIO	% IAR
AT-1	9,786.50	2,422.34	2,248.37	73.43
AT-2	8,498.55	2,103.55		
AT-3	8,965.90	2,219.23		

**TABLA 38. Toba volcánica compuesta por cemento arena y puzolana (TV)**

DESCRIPCION	CARGA ULTIMA (Lbf)	ESFUERZO DE FALLA ULTIMO (Lbf/pulg2)	PROMEDIO	% IAR
TV-1	10,586.55	2,620.37	2,490.42	81.33
TV-2	9,895.40	2,449.30		
TV-3	9,702.70	2,401.60		

A los 28 días el mejor comportamiento lo obtuvo el mortero elaborado con Toba volcánica, contando con un valor de compresión promedio de 2,490.42 Lbf/pulg2. Por otro lado, el que logro nuevamente la resistencia media es la Piedra pómez contando con un valor de compresión promedio de 2,343.07 Lbf/pulg2; y el material que nuevamente obtuvo resistencia baja es la Arcilla termo-activada contando con un valor de compresión promedio de 2,248.37 Lbf/pulg2. Lo anterior indica valores congruentes con el comportamiento obtenido a los 7 días.

También se obtuvieron los valores del índice de actividad de resistencia de cada material, los cuales arrojaron que la Toba volcánica muestra el más alto carácter puzolánico teniendo un índice de actividad de resistencia del 81.33 %, cumpliendo nuevamente con lo establecido en la norma ASTM C-618 que define que un material puede clasificarse como puzolánico si el índice de actividad de resistencia es mayor o igual al 75%. El valor del índice de actividad de resistencia de la Piedra pómez es del 76.52%, lo que indica que este material se puede considerar como puzolánico, y pudiéndose notar el aumento de resistencia obtenido en los 21 días más de fraguado, característica propia de las puzolanas las cuales tienen una lenta adquisición de resistencia, y por consiguiente aumentó el índice de actividad de resistencia.

Y, por último, se obtuvo que el valor del índice de actividad de resistencia de la Arcilla termo-activada es del 73.43%, lo que indica que este material no se puede considerar como puzolánico debido a que está por debajo del mínimo (75%).

---

## CAPITULO V

---

### “CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES”

## CONCLUSIONES

Se sabe, que el estudio de las puzolanas está basado en tres ejes fundamentales, físico, químico y mineralógico, la metodología utilizada por ende debe permitir el análisis correcto de dichos factores como punto principal, en cuanto a la composición química se obtuvieron resultados de los tres principales elementos que conforman los compuestos representados en unidades de partes por millón presentes en peso de cada muestra, lo que permitió calcular los pesos totales de los compuestos (óxidos de silicio, hierro y aluminio) que las muestras presentaban, obteniendo de manera fiable los porcentajes de los compuestos de interés.

En cuanto a la composición mineralógica los resultados de difracción de rayos X expresaron directamente los porcentajes, pero dado que los minerales pueden presentar impurezas en cierto grado, no es totalmente fiable el cálculo de los compuestos químicos presentes, se utilizaron las fórmulas estándar de cada mineral para calcular los porcentajes de los compuestos de interés y se compararon con la fluorescencia de lo cual se puede concluir que no se omitieron minerales en el análisis mineralógico por la proximidad de los valores totales.

Los análisis de tamaños de partículas, ensayo de Luxan's e índice de actividad de resistencia permitieron corroborar información del comportamiento puzolanico esperado a partir de su catalogación como material puzolanico o no, condición establecida por sus composiciones, e identificar en caso de fallo los valores influyentes, de ello, se logró concluir y analizar las propiedades básicas de las puzolanas a fin de identificar a ciencia cierta él o los factores influyentes en cualquier tipo de resultado, por tanto, la propuesta metodológica en general permitió la generación de información e interpretación concluyente del comportamiento y propiedades de los materiales, por medio del análisis eficiente de los tres ejes fundamentales en un estudio puzolanico, de cada material en estudio podemos concluir:



➤ **Toba volcánica.**

De los resultados de Fluorescencia de rayos X se obtuvo que la toba volcánica posee un 93.25% de la suma de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ , dicha cifra satisface la norma ASTM C-618, por lo tanto, se cataloga como material puzolánico.

La diferencia con el mismo valor calculado con los resultados de Difracción de rayos X es de 1.06% (0.64% en impurezas que no aparecen en Difracción de Rayos X y el restante 0.42% de variabilidad) es de debido a las calibraciones de los equipos y en gran medida a las impurezas de hierro presentes en las muestras que se encuentran dentro de los minerales y que no es posible identificar con este ensayo. También indica que los minerales y sus proporciones fueron bien identificados y no se omitió ningún mineral en la calibración del ensayo de Difracción de rayos X lo que hubiere generado una variabilidad mucho mayor, por tanto, su capacidad química cumple para ser una posible puzolana reactiva. Cabe destacar que el contenido de cuarzo presente en la muestra fue de 0.07%, por tanto, los sílico-aluminatos reactivos rondan el 93.18%.

Según el ensayo de Luxan's su reactividad es buena, pues arrojó un delta de conductividad de 1.3 microSiemens/cm, el cual es el mayor delta que se obtuvo en comparación de los otros dos materiales, por ende, es el único material según dicho método que es catalogado como puzolana reactiva.

En cuanto al Índice de Actividad de Resistencia (IAR) fue de 80.07% a los 7 días y de 81.33% a los 28 días corroborando la información preliminar ya que cualquier valor igual o mayor al 75% se considera puzolana reactiva según la norma ASTM C-618, la diferencia de 1.26% se debe a la reactividad de la Anortita (35.36% del peso total del material) que como todo mineral puzolánico actúa mejor a medida pasa el tiempo y en mucha menor medida a la aportación del cloncloro dado que la presencia de este en la muestra es de solo 1.38%, el cuarzo presente en la muestra es no reactivo.

De acuerdo con los análisis en el microscopio de campo claro, el tamaño promedio de partículas determinado fue de 23.96 micrómetros, a pesar de esto, si las partículas fueran aún más pequeñas es posible el mejoramiento de la reactividad, debido a que se tendría una mejor reacción química entre los materiales de la mezcla, formado así compuestos con propiedades conglomerantes e hidráulicas.

De los datos anteriores se puede concluir que la composición química, mineralógica y el tamaño de las partículas permiten la alta reactividad puzolánica, el estudio preliminar de reactividad mediante el ensayo de Luxan's estableció una buena reactividad, lo que pudo ser comprobado mediante el índice de actividad de resistencia, no existe ninguna discordancia entre los datos obtenidos con los diferentes ensayos, por lo que la puzolana extraída de toba volcánica tamizada cumple con todas las condiciones y puede ser catalogada como material puzolánico reactivo según la metodología propuesta en esta investigación.

Según los resultados anteriores se sabe que la toba volcánica analizada conocida también como tierra blanca cumple con las propiedades propias de una puzolana reactiva, por lo que realizando el resto de ensayos de protocolo establecidos en la norma ASTM C-618 y C-311 podría ser utilizada como una adición mineral en cementos, es decir, puede utilizarse para elaborar concreto o mortero siendo introducido directamente en la concretera junto con el cemento y áridos.

Este material aportaría propiedades que mejorarían el comportamiento del concreto como por ejemplo, para obras o estructuras sometidas a ambientes agresivos como es el caso de estructuras que están en contacto con el agua de mar, así como se llegó a utilizar en la antigüedad que se elaboraba un conglomerante a partir de cenizas volcánicas para construir obras en contacto con el agua de mar resistiendo eficazmente un ambiente muy desfavorable, tanto que hasta hoy en día se conservan restos de ciertas estructuras antiguas.

Además, la presencia de una puzolana en el cemento portland tiene dos efectos distintos y en los que juega un papel importante el tiempo. Inicialmente, actúa como un inerte no nocivo, con un endurecimiento más lento que el portland base. Más adelante, aparece como un componente activo, cuyos óxidos ácidos combinan gradualmente con la cal liberada en la hidratación de los silicatos del portland, para formar nuevos compuestos hidráulicos estables; las discrepancias mecánicas con el portland disminuyen, más tarde desaparecen y, finalmente, la resistencia del cemento puzolánico es superior a la del cemento portland, a igualdad de condiciones, por lo que puede ser utilizado en estructuras que requieran una alta resistencia.

Otra propiedad sobresaliente que se obtendría al utilizar esta adición mineral es el aumento de la resistencia al agrietamiento, propiedad ideal para pavimentos, lo cual podría reducir significativamente la cantidad de grietas que deterioran rápidamente las carreteras y que generan costos altos sus reparaciones, y que a su vez son causas de accidentes de tránsito. Por último, esta adición mineral puede ser utilizada para realizar obras en las cuales se requiere una larga durabilidad, entre otras más propiedades más que podría añadir este material al cemento.

#### ➤ **Piedra pómez.**

La piedra pómez del yacimiento de Moncagua es un material químicamente muy parecido a la toba volcánica, la suma de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  que resultó del análisis de Fluorescencia de rayos X es de 84.08%, dicho valor cumple con lo establecido en la norma ASTM C-618 que establece que dicha suma debe ser igual o mayor a 70 %.

El valor de la suma de los mismos compuestos determinado a partir de los resultados de Difracción de rayos X fue de 83.06%, atribuible a las mismas condiciones que el material anterior dado que en los cálculos se utilizaron las formulas sin impurezas de hierro, esta cuenta con menos material amorfo que la muestra de toba volcánica, sin embargo, tiene mayor presencia de Anortita contando con un 42.67% del total del peso de la muestra, cuyo porcentaje reactivo ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ ) es de 79.84%, es decir,

que a pesar del bajo contenido de material amorfo, la piedra pómez analizada cuenta con el mineral anortita, el cual favorece el porcentaje de  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  requerido, ya que dicho mineral está mayoritariamente compuesto por  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Además, la piedra pómez posee un 16.96% de Kaersutita cuya fórmula química es  $\{\text{Na}\}\{\text{Ca}_2\}\{\text{Mg}_4\text{Ti}\}(\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{23})(\text{OH})_2$  la cual aporta solo el 52.99% en material reactivo, por tanto, simplificando, solo alrededor de la mitad de la kaersutita es reactiva, de ahí resulta que la suma de  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  total en la muestra sea menor que en la de toba volcánica, en cuanto al cuarzo que es sílice no reactiva solo posee el 0.15% lo cual no presenta un problema a la reactividad.

En cuanto al ensayo por el método de Luxan's, este presentó una reactividad moderada, pues arrojó un delta de conductividad de 0.95 microSiemens/cm, el cual es el menor delta que se obtuvo en comparación a los otros dos materiales en análisis.

En cuanto Índice de Actividad de Resistencia (IAR) a los 7 días fue de 75.00% y a los 28 días fue de 76.52%, satisfaciendo así la norma ASTM C-618 que establece que dicho valor debe ser igual o mayor al 75% para considerarse puzolana reactiva. La diferencia de 1.52% se debe al aumento de la curva de reactividad de los minerales puzolánicos (Anortita, Kaersutita y Cloncloro) que presentan mayor ganancia de resistencia conforme pasa el tiempo con lo cual se comprueba la suposición inicial de reactividad moderada determinada por el método de Luxan's, que, a pesar de ser un método indirecto, produce resultados congruentes con los métodos directos incluidos en esta propuesta metodológica.

De acuerdo con los análisis en el microscopio de campo claro, el tamaño promedio de partículas es de 22.04 micrómetros, ligeramente menor al tamaño de partículas encontrados en la toba volcánica, de igual manera es un tamaño aceptable para una puzolana.

Por último, no existe ninguna discordancia entre los datos obtenidos con los diferentes ensayos, por lo que la puzolana extraída de piedra pómez tamizada cumple con todas las condiciones químicas, mineralógicas y físicas, y puede ser catalogada como material puzolánico reactivo.

Según los resultados anteriores se sabe que la piedra pómez analizada conocida también como pumita cumple con las propiedades propias de una puzolana reactiva, aunque no presenta resultados tan altos como el de la toba, aun así cumple con las condiciones puzolánicas, por lo que realizando el resto de ensayos de protocolo establecidos en la norma ASTM C-618 y C-311 también podría ser utilizada como una adición mineral en cementos, es decir, puede utilizarse para elaborar concreto o mortero siendo introducido directamente en la concretera junto con el cemento y áridos.

Este material aportaría propiedades que mejorarían el comportamiento del concreto como, por ejemplo, en estado fresco mejora la trabajabilidad, además de reducir la exudación y segregación. Y por último también incrementa la cohesividad, lo que permite que el concreto se consolide fácilmente y fluya libremente bajo vibración.

#### ➤ **Arcilla termo-activada**

La Arcilla Termo-activada es un material bastante diferente a los otros que se analizaron, además posee mayor diversidad de minerales sílico-aluminosos y cuarzo, en cuanto a su composición química determinada a través de análisis de Fluorescencia de rayos X, arroja que la suma de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  es 73.65%.

El valor de la suma de los mismos compuestos determinado a partir de los resultados de Difracción de rayos X fue de 73.20%, este fue el material que mayor cantidad de hierro posee  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 2.03\%$ , químicamente cumple, sin embargo, en cuanto a composición mineralógica posee un contenido de cuarzo de 3.79% y diversidad de minerales arcillosos, la ASTM C-618 establece un 70% como mínimo para la suma

de los 3 compuestos ( $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) independiente de su condición reactiva, en este caso donde la sílice no reactiva no es mínima como en los otros materiales, lo cual genera una condición desfavorable en el material.

En cuanto al ensayo de Luxan's, este presentó una reactividad puzolánica moderada, pues arrojó un delta de conductividad de 1.1 microSiemens/cm, el cual aparenta ser más reactivo que la piedra pómez al comparar los dos deltas, sin embargo, están ubicados en la misma categoría.

Los resultados del Índice de Actividad de Resistencia (IAR) fueron de 71.83% y 73.43% a los 7 y 28 días respectivamente, por tanto, no cumple con el índice de actividad de resistencia, pues la norma ASTM C-618 establece que dicho valor debe ser igual o mayor al 75% para considerarse como puzolana reactiva.

Dado que el tamaño de las partículas es de 19.29 micrómetros (el menor de los tres materiales) debió ser el material con una mejor reactividad puzolánica, pero fue lo contrario de acuerdo a los resultados del Índice de actividad de resistencia, por lo tanto, los problemas de reactividad se refieren directamente a la composición mineralógica y no a su estructura física, los minerales presentes poseen menor aportación de compuestos puzolánicos que en los demás materiales y específicamente el cuarzo que si se resta del 73.65% de  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  total en la muestra nos deja con un 69.86% de compuestos reactivos, también la velocidad de reacción de los minerales arcillosos es más lenta, por tanto, a pesar de cumplir con la composición química, tamaño de partículas y de producir un resultado moderado en el ensayo de Luxan's, no cumple con las condiciones mineralógicas y por ende tampoco con la reactividad.

Por lo tanto, la arcilla termo-activada no es indicada para ser utilizada como adición mineral debido a que no cumple con los requisitos de una puzolana reactiva.

## RECOMENDACIONES

Las siguientes recomendaciones se presentan de acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo de tesis con el objetivo de incrementar y reforzar la información que servirá para evaluar y caracterizar materiales similares de otras zonas, como también para otros tipos de materiales puzolánicos.

- A la hora de realizar todos los ensayos se recomienda que sean de una misma muestra común, de tal manera que puedan complementarse y compararse entre sí.
- El material a analizar debe tener un tamaño de grano menor o igual a 45 micrómetros para ser aptos de utilizar en los diferentes ensayos de esta metodología.
- A fin de obtener un mejor panorama de las características y propiedades de los materiales en análisis se recomienda realizar el mayor número posible de análisis en cada uno de los ensayos propuestos.
- Tener en cuenta que la realización del proceso de calcinación del ladrillo de barro puede realizarse en una mufla donde la temperatura puede ser controlada, de esta manera puede conocerse exactamente la temperatura a la que fue sometido, además se podría realizar calcinaciones a diferentes temperaturas realizar ensayos con estas y de esta manera conocer la temperatura de calcinación ideal para dicha arcilla.
- El agua a utilizar en los morteros no debe contener químicos ni agentes externos a su composición que puedan ocasionar que el mortero disminuya su resistencia. Por lo general, se recomienda que el agua sea potable; se dice que el agua para beber es buena para hacer mortero, pero, por otra parte, el agua que es buena para hacer mortero no necesariamente es buena para beber.

- Si hay alguna curvatura apreciable en los cubos de mortero a ensayar se debe moler la cara o las caras a fin de obtener una superficie plana de caso contrario debe descartarse la muestra ya que las imperfecciones o deficiencias en pastas pueden alterar los resultados de ensayos a compresión.
- Realizar cubos de mortero con diferentes porcentajes de sustituciones de puzolana a fin de conocer el porcentaje óptimo que permite el mejor comportamiento ante ensayos de resistencia a la compresión.
- Realizar ensayos de compresión a mayor tiempo que los 28 días para valorar la puzolanidad a mayor tiempo, debido a que las puzolanas adquieren su mayor resistencia a edades tardías.
- Realizar pruebas de resistencia en cilindros de concreto y compararlos con los resultados de compresión obtenidos a partir de los cubos de mortero.
- Se propone realizar la molienda mecánicamente para evitar contaminaciones del material, inhalación de este y sobreesfuerzo físico.
- Se propone utilizar el equipo apropiado en la implementación de esta metodología para obtener resultados confiables.
- En la actualidad hay un clima de confianza en el uso de materiales innovadores a gran escala, para ello es necesario un soporte científico y tecnológico que se debe ofrecer en las universidades.
- Se recomienda que este trabajo de tesis sea el inicio de posteriores investigaciones, en los que se pueda analizar el comportamiento experimental en estructuras reales, de esta manera se constata los resultados que arroja esta metodología.



- Se recomienda para futuras investigaciones englobar más tipos de puzolanas, con el fin de extender el uso del modelo planteado.
- Elaborar un balance costo-beneficio para la inclusión de materiales puzolánicos en cementos destinados a distintos fines.

## FUENTES BIBLIOGRAFICAS

ASTM-C114. (2015). Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement. West Conshohocken.

ASTM-C311. (2004). Muestreo y ensayo de cenizas o puzolanas naturales para uso como aditivo mineral en el concreto de cemento pórtland. West Conshohocken.

Bouza, A. R. (1987). Las Puzolanas. La Habana: Oriente.

Carlos, B. S. (2005). Las puzolanas y su aplicacion en la ingenieria civil.

Cervantes, B. W. (2006). Aditivos y adiciones minerales para el concreto. Lima.

Crespo, E. Q. (2005). Relacion entre las propiedades geotécnicas y los componentes puzolánicos de los sedimentos Pampeanos. Córdoba.

D.A. Skoog, J. L. (2004). Análisis instrumental. Madrid: McGraw-Hill.

David, C. R. (2017). Caracterización y evaluación de las puzolanas del cantón Gonzanamá y Paltas. Loja.

Diaz, R. A. (2007). Clasificación de Arcillas presentes en los bancos de Guatajiagua, departamento de Morazán, y Facultad Multidisciplinaria Oriental. En M. E. Gomez. San Miguel.

M.P. Luxan's, M. M. (1989). Rapid Evaluation of Pozzolanic Activity of Natural Products by Conductivity Measurement.

Mariano, R. R. (2008). Determinación de la reactividad puzolánica de adiciones mineras de origen natural con el cemento Portland. Santa Cruz Xoxocotlan.

Martínez, L. S. (2007). Nuevas aportaciones en el desarrollo de materiales cementantes con residuo de Catalizador de Craqueo Catalítico Usado (FCC). Valencia.

Mision-Geologica-de-El-Salvador. (1978). Mapa Geologico de La Republica de El Salvador. En *Hoja.Blatt Sonsonate*. Hannover.

NTC-1512. (1989). Ensayo químico para determinar la actividad puzolánica . Bogota: ICONTEC.

NTC-3493. (1993). Cenizas volantes y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, utilizadas como aditivos minerales en el concreto de cemento Pórtland. Bogotá: ICONTEC.

Pres, P. (1993). Concise Enciclopedia of Materials Characterization. R.W. Cahn FRS and E. Lifshin .

Primero, Y. H. (2016). Potencialidades de las tobas zeolitizadas del yacimiento San Andrés y los productos de su calcinacion para obtención de aglomerantes ternarios.

Rivas, V. R. (2012). Geología y caractrización física de puzolanas de la zona oriental de Guatemala. San Carlos.

Rodriguez, B. (2000). Propiedades puzolánicas de desechos de la industrian azucarera. Madrid.

Román, G. A. (2009). Fisuración por retracción en hormigones: Influencia del tipo de Cemento. Santiago, Chile.

Stock, B. C. (2001). Elements of X-Ray Diffraction. Prentice Hall .

Tamez, P. L. (2002). Desarrollo de un metodo para evaluar materiales naturales con potencial puzolanicos para su uso en cemento. Nuevo Leon.

Torres, M. A. (2014). Caracterización y evaluación de residuos agrícolas cubanos como materiales puzolánicos. Santa Clara, Cuba .

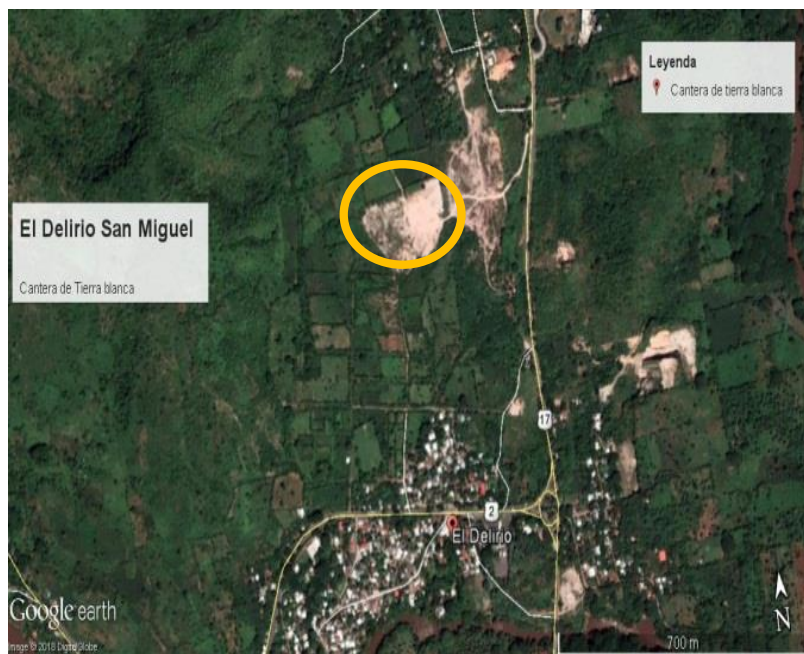
**ANEXOS**

## CANTERA EL DELIRIO SAN MIGUEL

**Punto de Georreferencia del proyecto:** N247,013.22 ; E591,982.97

**Ubicación:** Carretera de San Miguel a El Delirio, cantón El Delirio, municipio y departamento de San Miguel. (21 km de san miguel hacia El Delirio).

### *Características más sobresalientes del sitio y su entorno*



**Área total del terreno:** 6,779.65 m<sup>2</sup>

**Colindancias:**

**Al norte y poniente:** Con un sitio de extracción de material.

**Al sur:** Con terreno para cultivo de granos básicos y viviendas.

**Al oriente:** Con terrenos para cultivos de granos básicos.

**Tipo de yacimiento:** Es yacimiento superficial.

**Volumen del depósito:** El volumen del depósito es de 5,500 m<sup>3</sup> de material

**Cuerpos de agua presentes:** Ninguno.

**Drenajes naturales:** Dentro del terreno, ninguno.

**Topografía:** Varía de ondulada suave a ondulada.

**Vegetación compatible:** De acuerdo al VIGEA, la vegetación es la de zonas de cultivos o mezclas de sistemas productivos.

**Vegetación existente:** En el sitio se encontró vegetación como pasto, dado que el sitio es utilizado para el cultivo de granos básicos.

**Uso del suelo:** De acuerdo al VIGEA, el uso es para cultivo de granos básicos.

**Dentro de un área natural protegida:** De acuerdo al VIGEA, no se encuentra dentro de un área natural protegida.

**Dentro de un área de conservación:** De acuerdo al VIGEA, se encuentra dentro del Área de Conservación Tecapa — San Miguel.

**Dentro de la Franja Costera:** De acuerdo al VIGEA, se encuentra dentro de la Franja Costera.

**Alrededores:** Zonas de cultivos, canteras de material pétreo, zonas boscosas, viviendas.

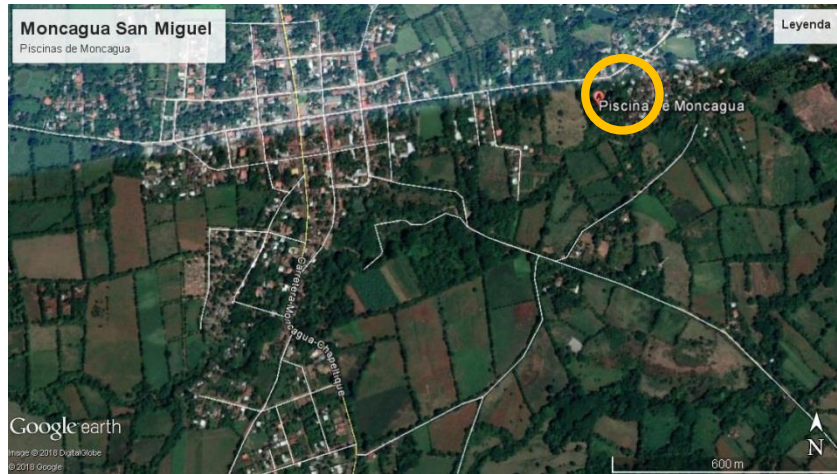
## ANEXO A. Descripción técnica Cantera el Delirio, Municipio de San Miguel

## PISCINAS DE MONCAGUA

**Punto de georreferencia del proyecto:** N268,204.18 ; E581,387.63

**Ubicación:** Sobre la carretera que conduce de San Miguel hacia San Salvador se encuentra el desvío de Moncagua, rumbo al norte nos conduce directamente hacia el Centro de Moncagua. El lugar de donde serán extraídas las muestras es exactamente de las piscinas de Moncagua o Turicentro El Capulín.

### *Características más sobresalientes del sitio y su entorno*



**Acceso a piscinas:** Desde centro de Moncagua hay aproximadamente 823.95 metros al oriente para encontrar el lugar.

**Área total del terreno:** 11,022.21 m<sup>2</sup>

**Colindancias:**

**Al norte:** Exactamente con la carretera que conduce a las piscinas.

**Al sur y poniente:** Con terreno para cultivo de granos básicos.

**Al oriente:** Con terrenos para cultivos de granos básicos y viviendas.

**Tipo de yacimiento:** Es yacimiento superficial con varias capas de roca pómez.

**Volumen del depósito:** No identificado.

**Cuerpos de agua presentes:** Se encuentran dos yacimientos de aguas cristalinas.

**Drenajes naturales:** Dentro del terreno, existen uno, esto debido al efecto de los yacimientos de aguas cristalinas que se encuentran.

**Topografía:** Varía de ondulada suave a ondulada.

**Vegetación compatible:** De acuerdo a visualización personal como grupo de tesis la vegetación es la de zonas de cultivos o mezclas de sistemas productivos.

**Vegetación existente:** En el sitio se encontró vegetación como pasto y árboles de Mango, Almendro, Ceibo, Maquilishuat, Amate, Guanacaste, Palmeras, etc.

**Alrededores:** Zonas boscosas y viviendas.

## ANEXO B. Descripción técnica Piscinas de Moncagua, Municipio de Moncagua

## LADRILLERA LA ISLA, EL PLATANAR

**Punto de georreferencia de Ladrillera:** 13°34'33.7"N, 88°16'9.55 "O.

**Ubicación:** Sobre la carretera que conduce de Moncagua hacia Chapeltique a 5.32 Km se encuentra la ladrillera La Isla. Perteneciente a cantón El Platanar, municipio de Moncagua, departamento de San Miguel.

### *Características más sobresalientes del sitio y su entorno*



**Acceso a ladrillera:** Sobre Carretera Moncagua-Chapeltique.

**Productos que fabrican:** Ladrillo de barro, teja y piso.

**Colindancias:**

**Al norte:** Exactamente con la carretera que conduce hacia Chapeltique.

**Al sur:** Exactamente con la carretera que conduce hacia Moncagua.

**Al oriente:** Con empresa comercializadora de materiales pétreos.

**Al poniente:** Con el Caserío La Isla.

**Cuerpos de agua presentes:** Ninguno.

**Drenajes naturales:** Dentro del terreno, Ninguno.

**Topografía:** Varía de ondulada suave a ondulada.

**Vegetación existente:** En el sitio se encontró vegetación como pasto y árboles de variadas especies.

**Alrededores:** Zonas boscosas subtropicales y viviendas.

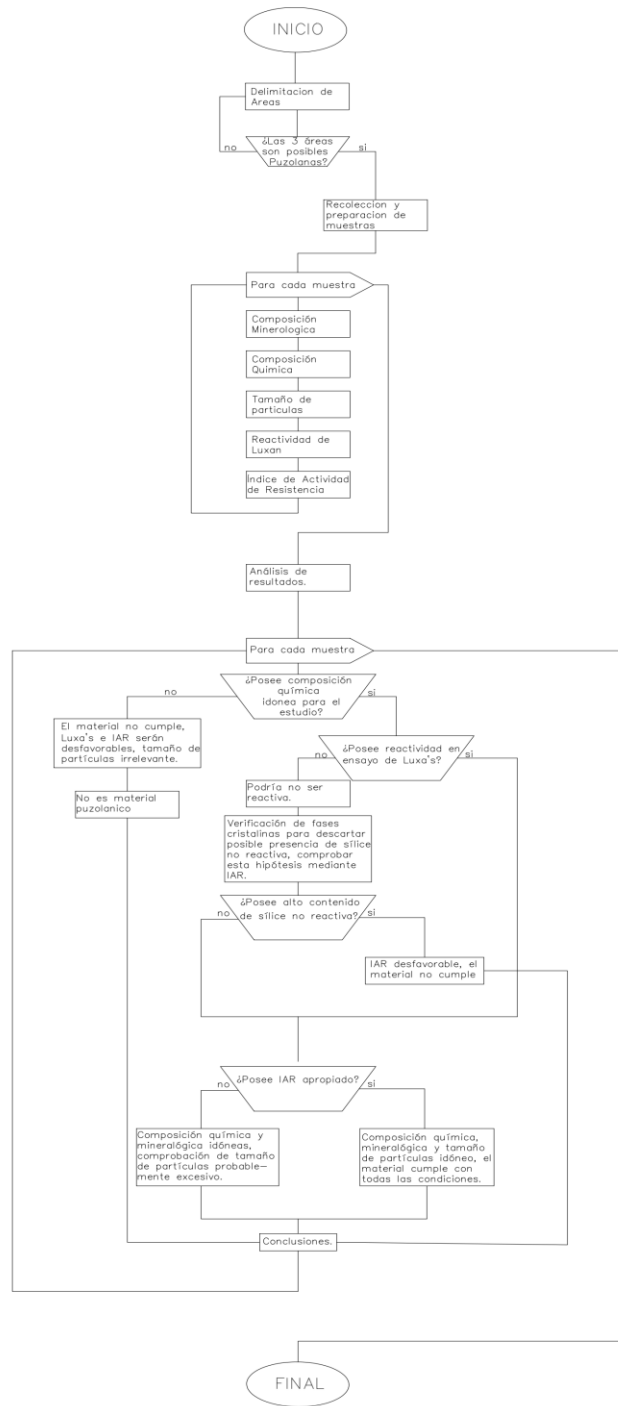
## ANEXO C. Descripción técnica Ladrillera La Isla, Municipio de Moncagua



VARIABLES EN ESTUDIO						
Unidades de análisis	Ensayo	Instrumento	VARIABLES	UNIDAD	Definición Operacional	Indicadores
Toba volcánica o tufo volcánico; piedra pómez o pumita; arcilla termo-activada o ladrillo de arcilla calcinado	Fluorescencia de rayos X	Espectrómetro de Fluorescencia de rayos X	Composición química	Partes por millón (ppm)	Definida por la determinación global de todos los compuestos químicos presentes en la muestra.	a) Porcentaje de elementos químicos b) Porcentaje de compuestos químicos
	Difracción de rayos X	Difractómetro de rayos X	Composición mineralógica	N/A	Definida por la determinación global de todos los minerales presentes en la muestra.	Fases cristalinas
	Método de Luxan	Sonda Hach	Reactividad Puzolánica	Conductividad (mS/cm)	Define la actividad puzolánica del material a través del cambio de conductividad en un medio acuoso patrón vs medio acuoso puzolanico.	Resistencia eléctrica del medio acuoso
	Ensayo de medición de partículas	Microscopio de campo claro	Finura de partícula	Micrómetros (μm)	Refiere expresamente al tamaño de partícula, en una muestra no homogénea, indica la categorización de los diferentes tamaños de partículas	Distribución del tamaño de partículas.
	Índice de actividad de resistencia	Prensa hidráulica	Reactividad Puzolánica	Esfuerzo (Lbf/pulg 2)	Indica el potencial de reacción puzolánica de un espécimen o mortero en base a su resistencia a la compresión.	Resistencia mecánica a la compresión.

#### ANEXO D. Cuadro resumen de variables en estudio

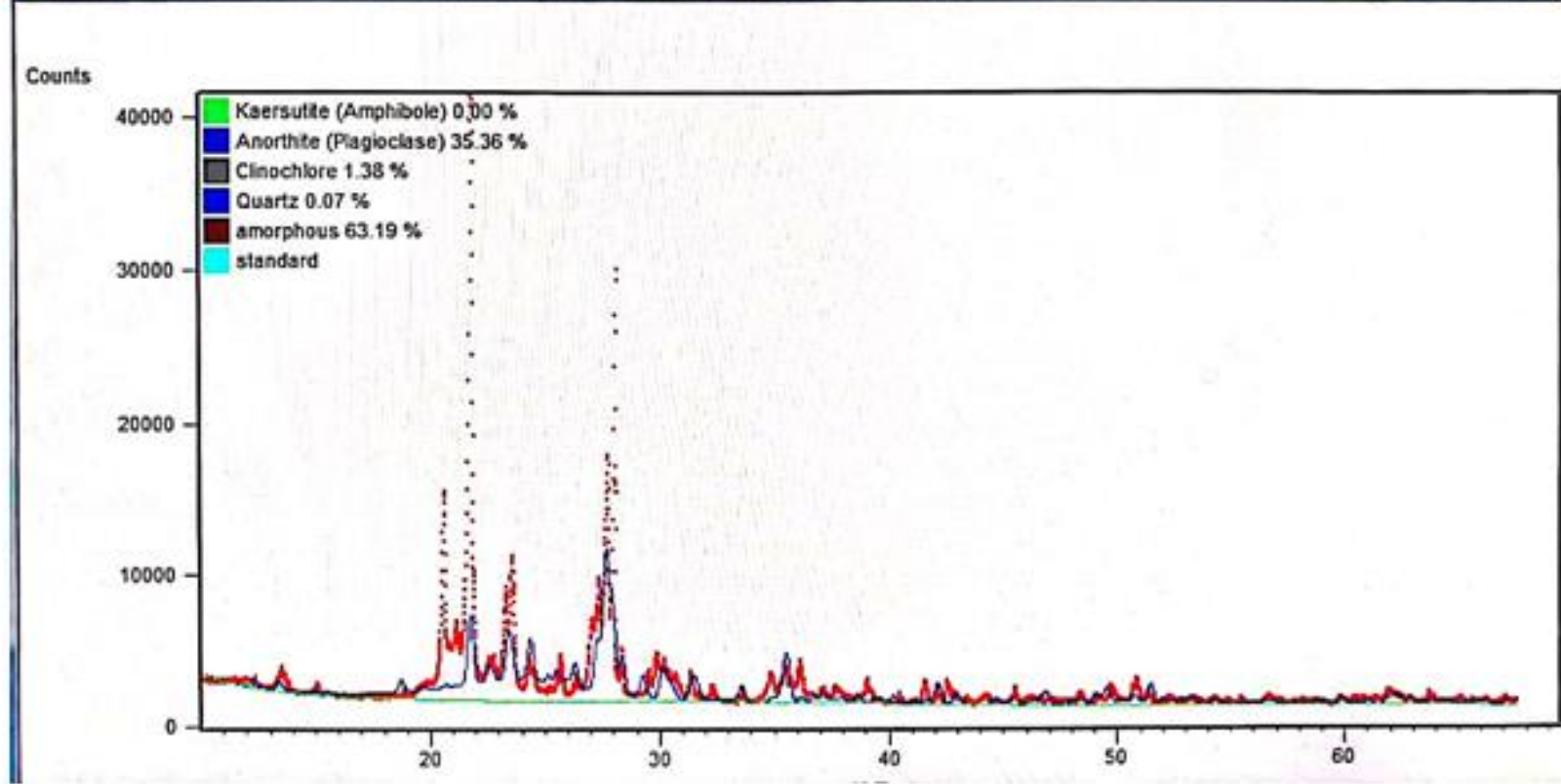
FLUJOGRAMA DE TRABAJO.



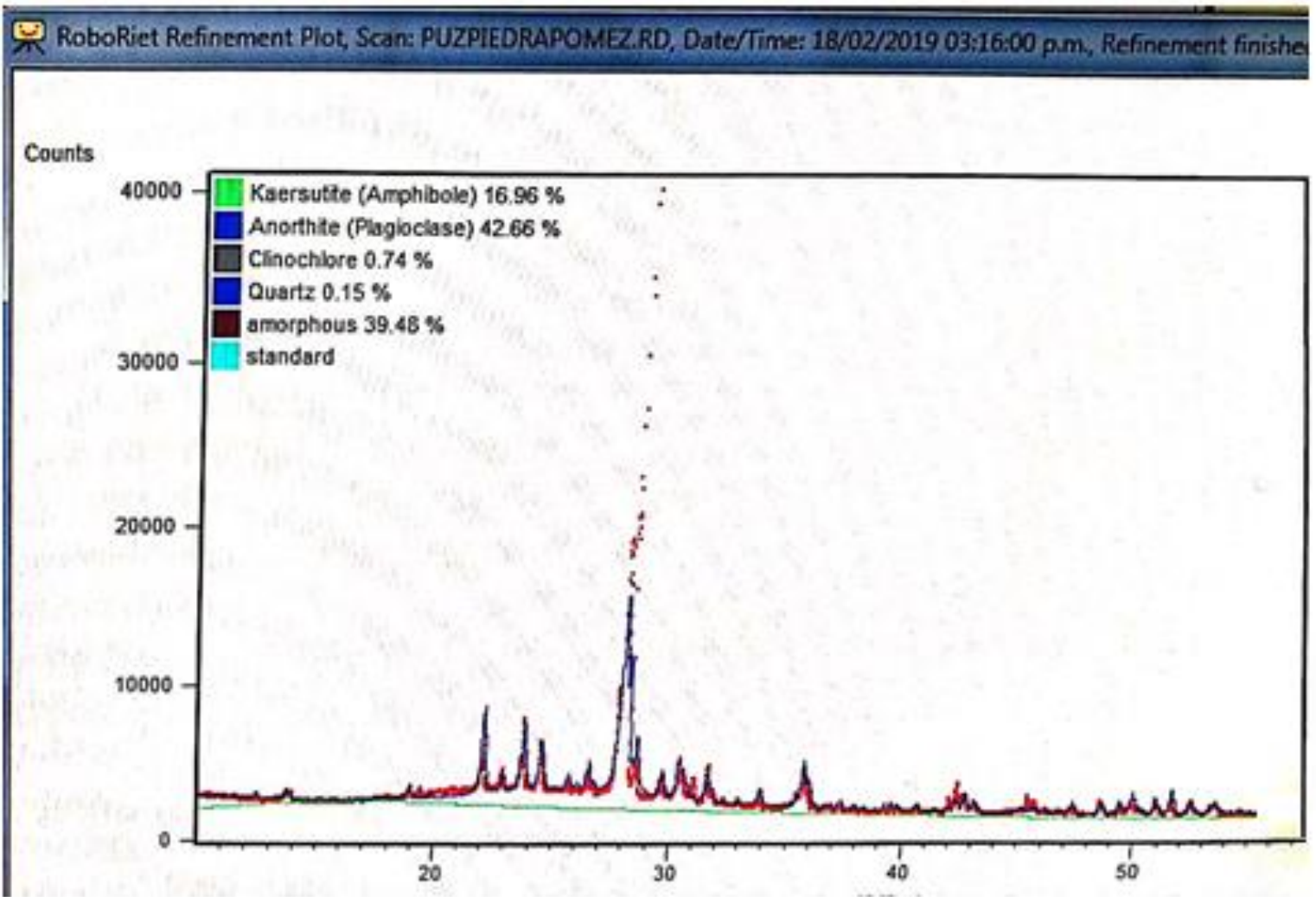
**ANEXO E. Esquema metodológico de la Investigación**

Formación	Simbolo	Litología
----	---	Agua
Bálsamo	b1	Epiclastitas volcánicas, piroclastitas, corrientes de lava intercaladas
	b2	Efusivas andesíticas, piroclastitas, epiclastitas volcánicas subordinadas
	b3	Efusivas andesíticas-basálticas
Chalatenango	ch1	Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas con tobas ardientes y fundidas; efusivas ácidas intercaladas
	ch2	Efusivas ácidas; rolitas
Cuscatlán	c1	Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas, tobas ardientes y fundidas
	c1'1	Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas, tobas ardientes y fundidas, edad de Chalatenango localmente
	c2	Efusivas ácidas e intermedias-ácidas
	c3	Efusivas andesíticas-basálticas
Metapán	me1	Conglomerado de cuarzo, areniscas, siltitas y lutitas, vulcanitas básicas-intermedias subordinadas
	me1'a	Conglomerado de cuarzo, areniscas, siltitas y lutitas, vulcanitas básicas-intermedias subordinadas; metasedimentos y metavulcanitas
	me2	Calizas y calizas margosas
	me3	Conglomerado de cuarzo y caliza rojo, areniscas; intercalaciones de vulcanitas
Morazán	m2	Efusivas básicas-intermedias hasta intermedias-ácidas, piroclastitas, epiclastitas volcánicas. Alteración regional por influencia hidrotermal
Morazán Chalatenango	m2	Efusivas básicas-intermedias hasta intermedias-ácidas, piroclastitas, epiclastitas volcánicas. Alteración regional por influencia hidrotermal
San Salvador	Q'f	Aluviones, localmente con intercalaciones de piroclastitas
	Q'm	Aluviones, localmente con intercalaciones de piroclastitas: manglares
	Q's	Aluviones, localmente con intercalaciones de piroclastitas: barras costeras
	s1	Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas, tobas ardientes y fundidas; efusivas andesíticas
	s2	Efusivas andesíticas y basálticas: piroclastitas
	s3	Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas (tobas color café)
	s3á	Piroclastitas, epiclastitas volcánicas (tobas color café): efusivas ácidas
	s4á	Piroclastitas ácidas (tierra blanca)
	s4á	Piroclastitas ácidas (tierra blanca): efusivas ácidas
	s5	Efusivas basálticas
s5'c	Efusivas basálticas: cenizas y tobas de lapilli	

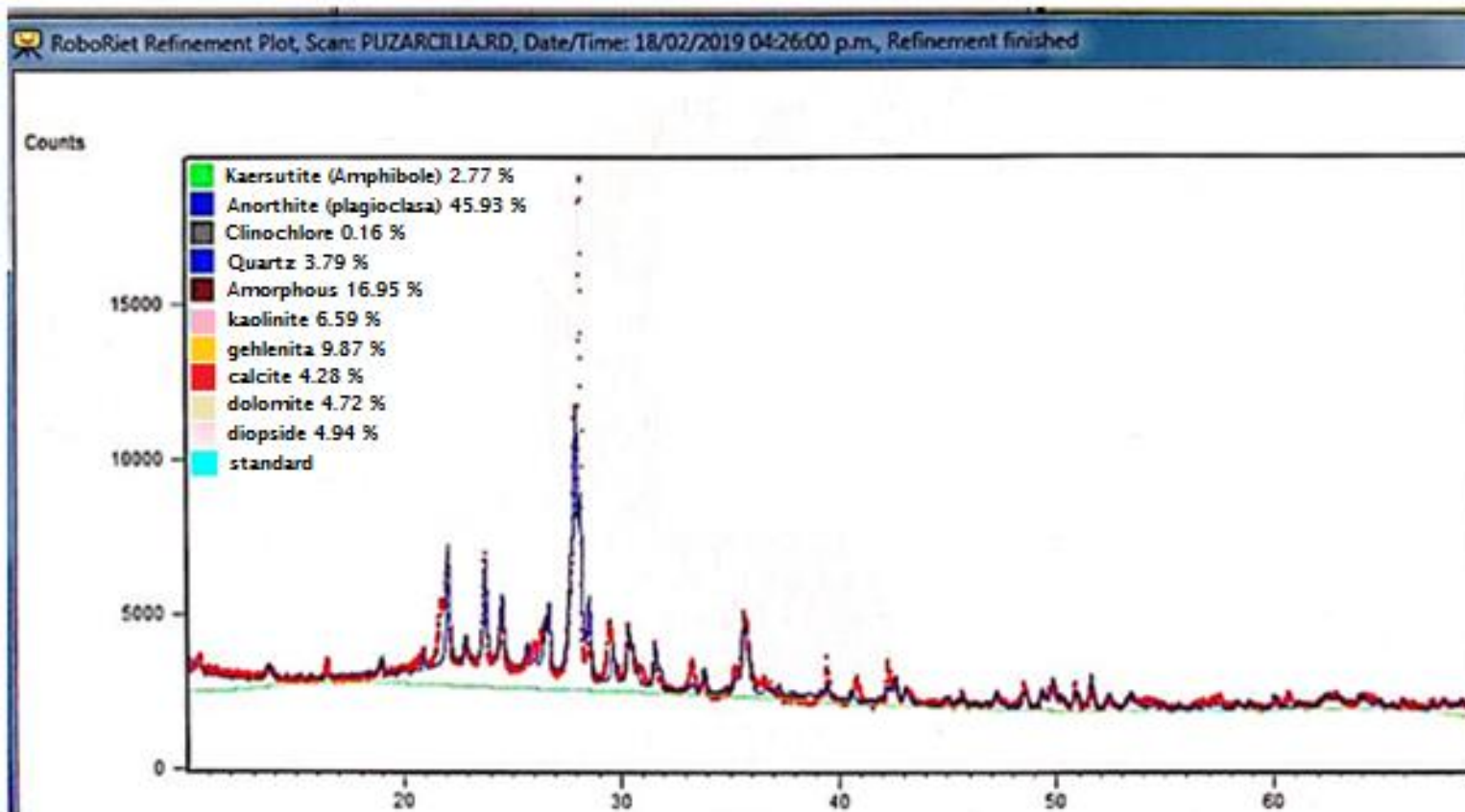
## ANEXO F. Formación Geológica de El Salvador



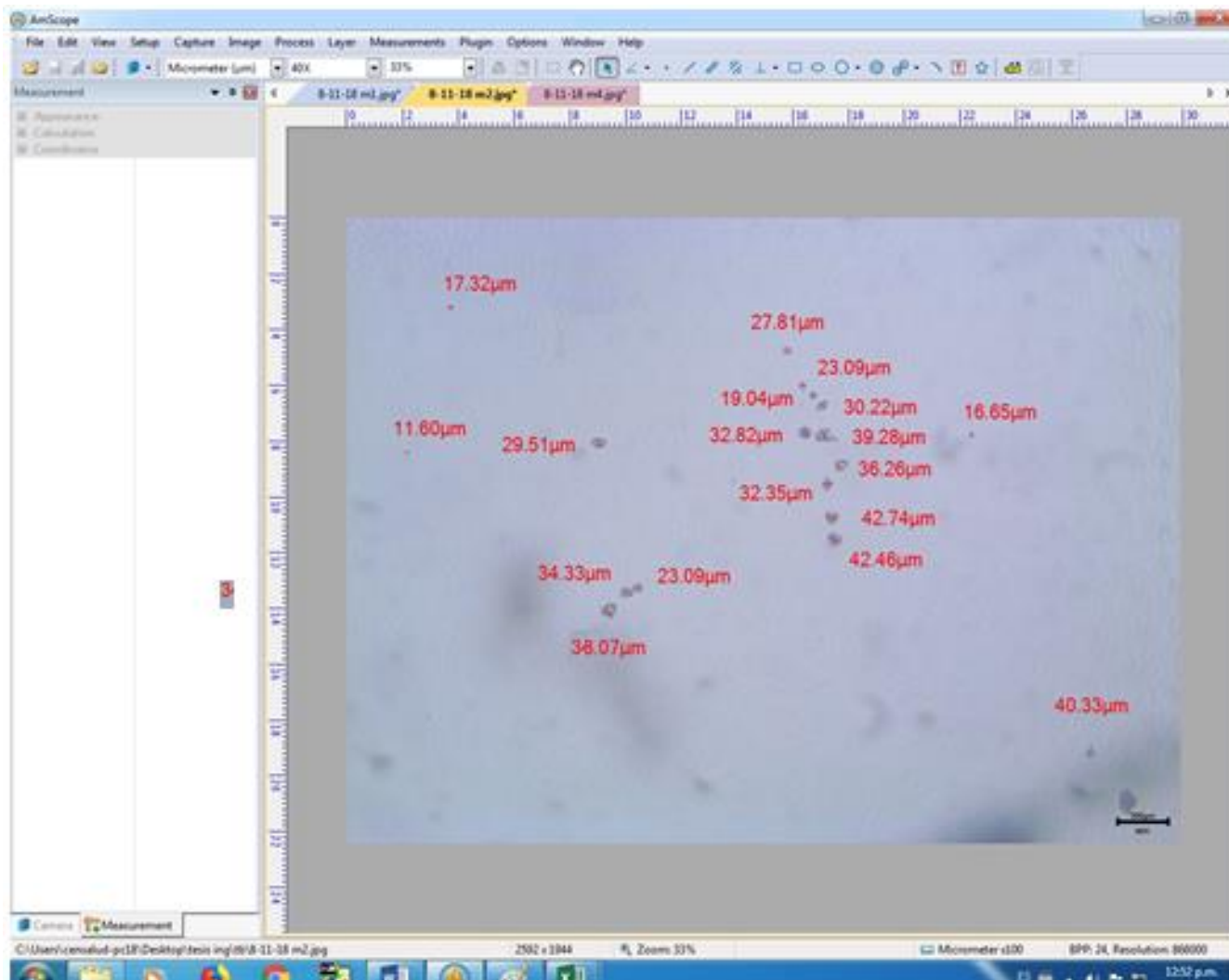
ANEXO G. Difractograma de rayos X – Toba volcánica



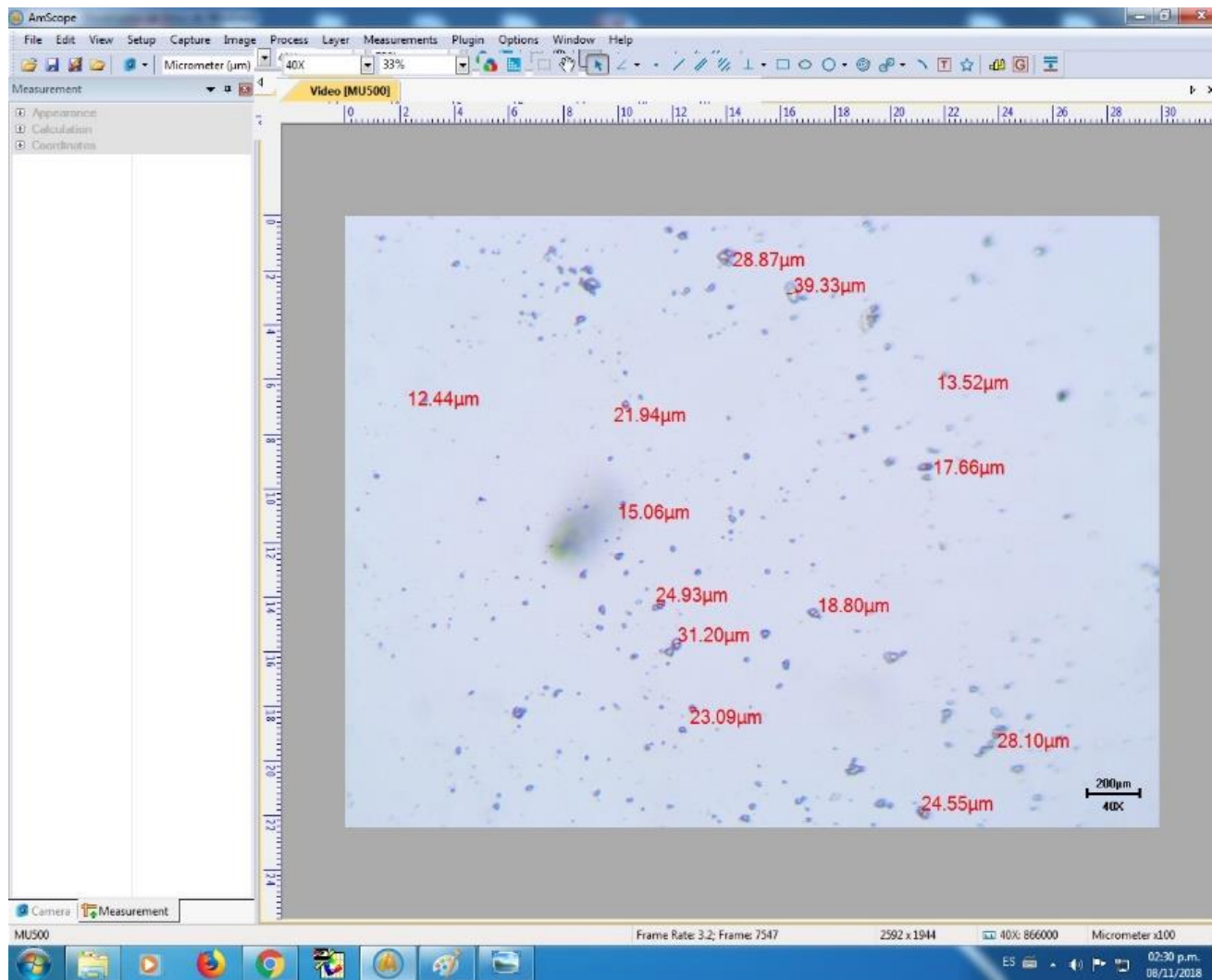
ANEXO H. Difractograma de rayos X – Piedra pómez



ANEXO I. Difractograma de rayos X – Arcilla termo-activada

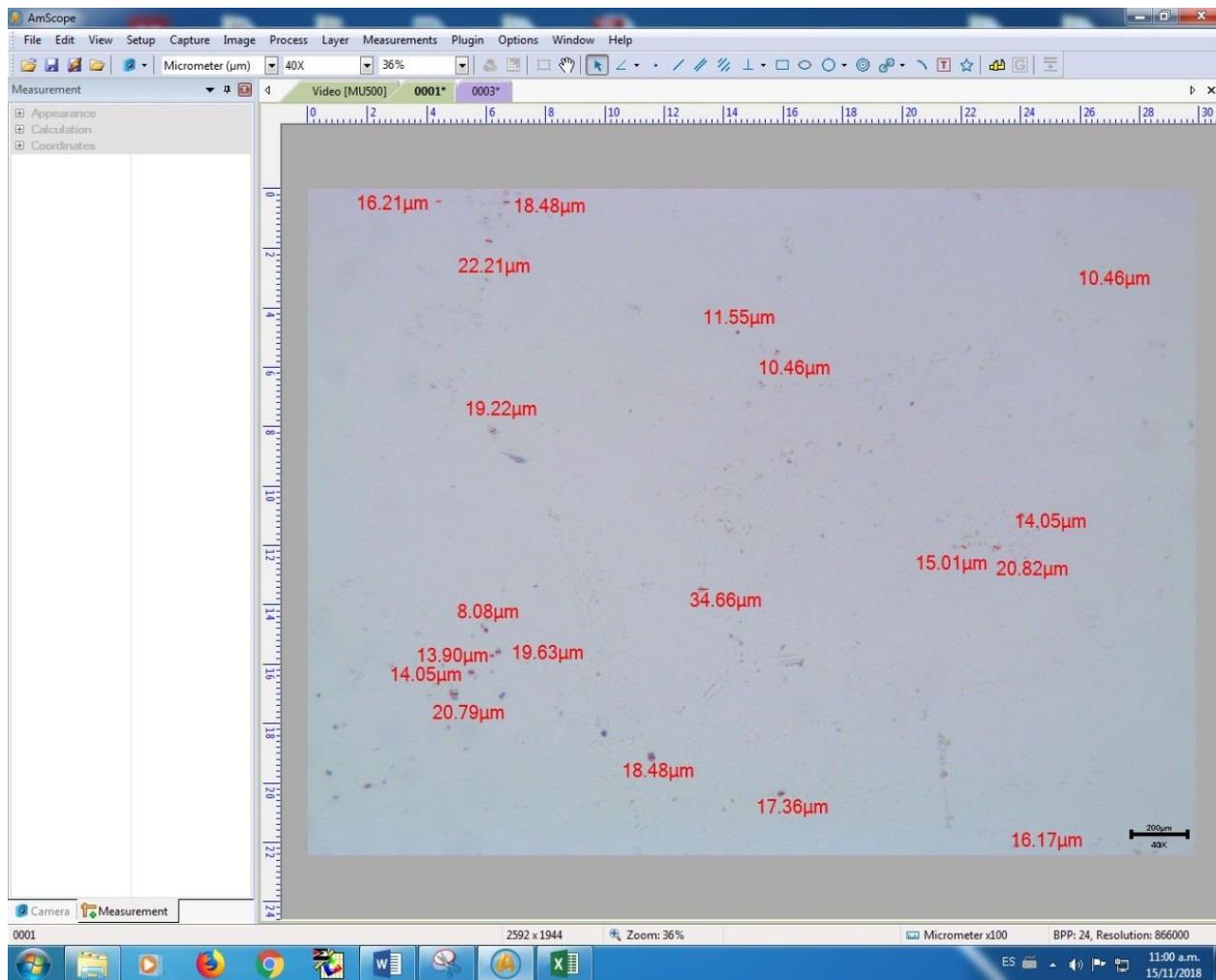


**ANEXO J. Vista microscópica de partículas (MCC) – Toba volcanica**



**ANEXO K. Vista microscópica de partículas (MCC) – Piedra pómez**





**ANEXO L. Vista microscópica de partículas (MCC) – Arcilla termo-activada**