



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN  
NICOLÁS DE HIDALGO**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN  
CIENCIAS DE LA TIERRA**



**TESIS:**

**“Mineralogía ambiental en los monumentos históricos  
(caso de estudio: El Acueducto de Morelia-Michoacán-  
México)”**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL  
TERRITORIO**

**PRESENTA:**

**Ing. Bicara Nfundiko Christian**

**DIRECTOR:**

**Dr. Mikhail Ostrooumov**

**MORELIA, MICHOACÁN, FEBRERO 2018.**



## Índice

|                                                                      |           |
|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| Resumen.....                                                         | 15        |
| Abstract .....                                                       | 16        |
| Introducción .....                                                   | 17        |
| Antecedentes.....                                                    | 18        |
| <br>                                                                 |           |
| Fundamentos de la investigación.....                                 | 21        |
| <b>Planteamiento del problema.</b> .....                             | <b>21</b> |
| <b>Justificación.</b> .....                                          | <b>22</b> |
| <b>Hipótesis</b> .....                                               | <b>23</b> |
| <b>Objetivo general.</b> .....                                       | <b>23</b> |
| <b>Objetivos particulares.</b> .....                                 | <b>23</b> |
| <br>                                                                 |           |
| Capítulo 1 Geología del estado de Michoacán .....                    | 24        |
| <b>1.1. Antecedentes históricos de Morelia.</b> .....                | <b>24</b> |
| <b>1.2. Geología general.</b> .....                                  | <b>27</b> |
| <b>1.3. Geología regional</b> .....                                  | <b>29</b> |
| <b>1.4. Geología local</b> .....                                     | <b>31</b> |
| <b>1.5. Geología estructural.</b> .....                              | <b>39</b> |
| <br>                                                                 |           |
| Capítulo 2 Los monumentos históricos en Michoacán .....              | 44        |
| <b>2.1. Aproximación al concepto de monumentos históricos.</b> ..... | <b>44</b> |
| <b>2.2. Los Acueductos de México</b> .....                           | <b>45</b> |
| <b>2.3. El Acueducto de Morelia.</b> .....                           | <b>47</b> |
| <b>2.4. Restauración de los monumentos históricos.</b> .....         | <b>48</b> |
| <br>                                                                 |           |
| Capítulo 3 La ignimbrita, sus características generales.....         | 54        |
| <b>3.1. Origen y descripción petrofísica de la Ignimbrita.</b> ..... | <b>54</b> |

|                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.2. Origen de las ignimbritas. ....                                    | 57  |
| 3.2.1. Minerales y elementos de las riolitas.....                       | 58  |
| 3.2.2. Usos de la ignimbrita .....                                      | 61  |
| 3.3. Identificación visual de las rocas ígneas y tabla de colores. .... | 62  |
| 3.4. Principales causas de la degradación de la roca.....               | 62  |
| Capítulo 4 Trabajo de campo.....                                        | 65  |
| 4.1. Breve descripción del área de estudio. ....                        | 65  |
| 4.2. Criterio de selección de muestras. ....                            | 69  |
| 4.3. Localización de la muestra.....                                    | 70  |
| 4.4. Permiso y obtención de muestras. ....                              | 71  |
| 4.5. Breve descripción de materiales .....                              | 71  |
| Capítulo 5 Descripción de las técnicas analíticas. ....                 | 74  |
| 5.1. Método de Difracción de Rayos X. ....                              | 74  |
| 5.2. Método de Fluorescencia de Rayos X.....                            | 75  |
| 5.3. Método de Espectroscopia Infrarroja (EIR). ....                    | 78  |
| 5.4. Método de Espectrometría Raman.....                                | 80  |
| 5.5. Método de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB). ....           | 81  |
| Capítulo 6. Resultados y análisis .....                                 | 83  |
| 6.1. Resultado de Difracción de Rayos X. ....                           | 83  |
| 6.2. Resultado de Fluorescencia de Rayos X.....                         | 88  |
| 6.3. Resultado de Espectroscopia Infrarroja (EIR). ....                 | 91  |
| 6.4. Resultado de Espectrometría Raman.....                             | 96  |
| 6.5. Resultado de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB). ....        | 98  |
| Capítulo 7 Conclusiones y propuesta de restauración .....               | 106 |
| 7.1. Propuesta de restauración .....                                    | 110 |
| Bibliografía .....                                                      | 115 |

## Índice de tablas e ilustraciones

### Ilustraciones

|                                                                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ilustración 1. Deterioro y error en la restauración de la ignimbrita del Acueducto de Morelia. ....                                                                                       | 22 |
| Ilustración 2. Traza probable de la ciudad de Morelia 1541 (Elaboración propia con base a Cervantes et al, 2001). ....                                                                    | 24 |
| Ilustración 3. Plano de la ciudad de Morelia 1874 (Elaboración propia con base a Cervantes et al, 2001). ....                                                                             | 26 |
| Ilustración 4. Columna estratigráfica generalizada del estado de Michoacán (Fuente: Imagen tomada de Consejo de Recursos Minerales ,1995) .....                                           | 30 |
| Ilustración 5. Columna estratigráfica (elaboración propia con base a Garduño-Monroy e Israde, 2004). ....                                                                                 | 35 |
| Ilustración 6. Mapa de entorno tectónico regional entre Pátzcuaro y Acambay, incluyendo la ciudad de Morelia (Garduño-Monroy et al., 2009). ....                                          | 41 |
| Ilustración 7. Mapa geológico de Morelia, Michoacán escala 1: 150 000 (Elaboración propia con base a Israde Alcántara et al., 2009). ....                                                 | 42 |
| Ilustración 8. Mapa geológico de Morelia, Michoacán escala 1: 150 000 mostrando las trazas de dos perfiles geológicos (Elaboración propia con base a Israde Alcántara et al., 2009). .... | 42 |
| Ilustración 9. Perfil geológico 1. ....                                                                                                                                                   | 43 |
| Ilustración 10. Perfil geológico 2. ....                                                                                                                                                  | 43 |
| Ilustración 11. Proceso de formación de la caldera (Buque-Escobar, 2016 y Borsdorf, 2002). ....                                                                                           | 58 |
| Ilustración 12. La columna estratigráfica de la caldera Atécuaro. ....                                                                                                                    | 60 |
| Ilustración 13. Ubicación del área de estudio. ....                                                                                                                                       | 65 |
| Ilustración 14. Crecimiento de la mancha urbana de Morelia 1960, 1975, 1990 y 1997 (López Granados, 1999). ....                                                                           | 69 |
| Ilustración 15. Inspección previa a la toma de muestra. ....                                                                                                                              | 70 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ilustración 16. Localización de la muestra (Elaboración propia). .....                                                                                                                                                                                                                                     | 70 |
| Ilustración 17. Ejemplo de la ignimbrita beige (5YR/7/1/) de Morelia. ....                                                                                                                                                                                                                                 | 72 |
| Ilustración 18. Ejemplo de la ignimbrita café (10R/6/1/). ....                                                                                                                                                                                                                                             | 73 |
| Ilustración 19. Ejemplo de la ignimbrita rosa claro (5YR/7/1/). ....                                                                                                                                                                                                                                       | 73 |
| Ilustración 20. Difractómetro D2 Phaser .....                                                                                                                                                                                                                                                              | 75 |
| Ilustración 21. Espectrómetro A Rayos-X modelo S8 TIGER .....                                                                                                                                                                                                                                              | 77 |
| Ilustración 22. Espectrómetro FT-IR.....                                                                                                                                                                                                                                                                   | 79 |
| Ilustración 23. Espectrómetro RAMAN Type: Senterra. ....                                                                                                                                                                                                                                                   | 81 |
| Ilustración 24. Microscopio Electrónico de Barrido GOEL JSM-7600F. ....                                                                                                                                                                                                                                    | 82 |
| Ilustración 25 Resultados de los análisis de DRX. Las especies minerales están<br>abreviadas: M. #AC= Numero de muestra del Acueducto, M. #AF= Numero de<br>muestra del Afloramiento, Qz = Cuarzo, Crs=Cristobalita, Td=Tridimita, Sa=Sanidina,<br>Ab = Albita, Ad=Andesina Ak=Ankerita, Hl = Halita. .... | 84 |
| Ilustración 26. Resultados de los análisis de DRX. Las especies minerales están<br>abreviadas: M. #AC= Numero de muestra del Acueducto, Qz=Cuarzo,<br>Crs=Cristobalita, Td=Tridimita, Sa=Sanidina, Ab = Albita, Ad=Andesina Ak=Ankerita,<br>Hl = Halita, Ms=Moscovita, Cal=Calcita .....                   | 85 |
| Ilustración 27. Resultados de los análisis de DRX. Las especies minerales están<br>abreviadas: M. #AC= Numero de muestra del Acueducto, Crs=Cristobalita,<br>Td=Tridimita, Sa=Sanidina, Ab = Albita, Hl = Halita, Ad=Andesina, Ak=Ankerita,<br>Mnt=Montmorillonita .....                                   | 86 |
| Ilustración 28. Resultados de los análisis de DRX. Las especies minerales están<br>abreviadas: M. #AC= Numero de muestra del Acueducto, Qz=Cuarzo, Td=Tridimita,<br>Sa=Sanidina, Ak=Ankerita, Crs=Cristobalita, An=Anortita, Hl=Halita, Ms=Moscovita.<br>.....                                             | 87 |
| Ilustración 29. Resultados Espectrogramas Infrarroja (EIR) las especies minerales<br>están abreviadas: M. #AC= Numero de muestra del Acueducto, M. #AF= Numero de<br>muestra del Afloramiento, Qz=Cuarzo, Bt=Biotita, Mnt=Montmorillonita, Ak=Ankerita,<br>Hb=Hornblenda, Hd= heulandita. ....             | 92 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Ilustración 30. Resultados Espectrogramas Infrarroja (EIR) las especies minerales están abreviadas: La= labradorita, Sa=Sanidina, Hb=Hornblenda, Hd= heulandita, Mnt=Montmorillonita, Qz=Cuarzo, Bt=Biotita, Ak=Ankerita, Clt=Clorita, Ct=Coalinita. ....                    | 93  |
| Ilustración 31. Resultados de Espectrogramas Infrarroja (EIR) las especies minerales están abreviadas: Sa=Sanidina, Bt=Biotita, La= labradorita, Hd= heulandita, Mnt=Montmorillonita, Hb=Hornblenda, Qz=Cuarzo, Ak=Ankerita, Clt=Clorita, Ct=Coalinita, Mg=Magnesio.....     | 94  |
| Ilustración 32. Resultados de Espectrogramas Infrarroja (EIR) las especies minerales están abreviadas: Hd= heulandita, Mnt=Montmorillonita, Sa=Sanidina, Ms=Moscovita, Hb=Hornblenda, La= labradorita, Hd= heulandita, Yeso= $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ..... | 95  |
| Ilustración 33. Resultados de los análisis de los Espectros Raman. Las especies minerales están abreviadas: M. #AC= Numero de muestra del Acueducto, Qz=Cuarzo, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ = Yeso, MO=Materia orgánica .....                                  | 97  |
| Ilustración 34. Resultado de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 9 del Acueducto de Morelia X: 272354 Y: 2179441 .....                                                                                                                                         | 99  |
| Ilustración 35. Resultado de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 13 del Acueducto de Morelia X: 272223 Y: 2179472. ....                                                                                                                                        | 100 |
| Ilustración 36. Resultado C de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 15 del Acueducto de Morelia X: 271160 Y: 2180153 .....                                                                                                                                      | 101 |
| Ilustración 37. Resultado de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 16 del Acueducto de Morelia X: 271259 Y: 2180109. ....                                                                                                                                        | 102 |
| Ilustración 38. Resultado de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 17 del Acueducto de Morelia X: 271334 Y: 2179983. ....                                                                                                                                        | 103 |
| Ilustración 39. Resultado de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 18 del Acueducto de Morelia X: 271549 Y: 2179783 .....                                                                                                                                        | 104 |
| Ilustración 40. Resultado de difracción de Rayos X del Afloramiento 1. Coordenadas X: 270356 Y: 2180637 .....                                                                                                                                                                | 120 |

|                                                                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Ilustración 41. Resultado de difracción de Rayos-X del afloramiento 2 X: 270356 Y: 2180637. ....                                                              | 120 |
| Ilustración 42. Resultado de difracción de Rayos-X coordenadas X: 270356 Y: 2180637. ....                                                                     | 121 |
| Ilustración 43. Resultados de difracción de Rayos-X de la muestra número 1 del Acueducto de Morelia X: 272666 Y: 217890. ....                                 | 121 |
| Ilustración 44. Resultado de difracción de Rayos-X muestra número 2 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272550 Y: 2179406. ....                           | 122 |
| Ilustración 45. Resultados de difracción de Rayos-X muestra número 3 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272470 Y: 2179423. ....                          | 122 |
| Ilustración 46. Resultados de difracción de Rayos-X muestra número 4 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272439 Y: 2179428. ....                          | 123 |
| Ilustración 47. Resulta de difracción de Rayos-X muestra número 5 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272435 Y: 2179430. ....                             | 123 |
| Ilustración 48. Resultado de difracción de Rayos-X muestra número 6 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272423 Y: 2179431. ....                           | 124 |
| Ilustración 49. Resultado de difracción de Rayos-X muestra número 7 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272393 Y: 2179439. ....                           | 124 |
| Ilustración 50. Resultado de difracción de Rayos-X muestra número 8 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272383 Y: 2179440. ....                           | 125 |
| Ilustración 51. Resultado de difracción de Rayos-X muestra 9 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272354 Y: 2179441. ....                                  | 125 |
| Ilustración 52. Resultado de difracción de Rayos-X muestra número 10 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272338 Y: 2179445. ....                          | 126 |
| Ilustración 53. Resultado de difracción de Rayos-X del Acueducto de Morelia muestra número 11 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272317 Y: 2179449. .... | 126 |
| Ilustración 54. Resultado de difracción de Rayos-X muestra número 12 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272293 Y: 2179457. ....                          | 127 |

|                                                                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Ilustración 55. Resultado de difracción de Rayos-X muestra número 13 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272223 Y: 2179472 .....   | 127 |
| Ilustración 56. Resultado de difracción de Rayos-X muestra número 14 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 271140 Y: 2180160. ....   | 128 |
| Ilustración 57. Resultado de difracción de Rayos-X muestra número 15 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 271160 Y: 2180153 .....   | 128 |
| Ilustración 58. Resultado de difracción de Rayos-X muestra 16 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 271160 Y: 2180109.....           | 129 |
| Ilustración 59. Resultado de difracción de Rayos-X muestra 17 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 271334 Y: 2179983.....           | 129 |
| Ilustración 60. Resultado de difracción de Rayos-X muestra número 18 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 271549 Y: 2179783. ....   | 130 |
| Ilustración 61. Resultado de difracción de Rayos-X muestra 19 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272011 Y: 2179489.....           | 130 |
| Ilustración 62. Resultado de difracción de Rayos-X muestra número 20 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272187 Y: 2179489. ....   | 131 |
| Ilustración 63. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X Afloramiento número 1 coordenadas X: 270356 Y: 2180637.....                      | 131 |
| Ilustración 64. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X Afloramiento número 2 coordenadas X: 270356 Y: 2180637.....                      | 132 |
| Ilustración 65. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X Afloramiento número 3 coordenadas X: 270356 Y: 2180637.....                      | 132 |
| Ilustración 66. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 1 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272666 Y: 217980. ....  | 133 |
| Ilustración 67. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 2 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272550 Y: 2179406. .... | 133 |
| Ilustración 68. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 3 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272470 Y: 2179423. .... | 133 |
| Ilustración 69. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 4 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272439 Y: 2179428. .... | 134 |

|                                                                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Ilustración 70. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 5 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272435 Y: 2179430. ....  | 134 |
| Ilustración 71. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 6 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272423 Y: 2179431. ....  | 134 |
| Ilustración 72. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 7 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272393 Y: 2179439. ....  | 135 |
| Ilustración 73. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 8 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272383 Y: 2179440. ....  | 135 |
| Ilustración 74. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 9 del Acueducto de Morelia coordenadas x: 272354 Y: 2179441.....   | 135 |
| Ilustración 75. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 10 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272328 Y: 2179445. .... | 136 |
| Ilustración 76. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 11 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272317 Y: 2179449. .... | 136 |
| Ilustración 77. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 12 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272293 Y: 2179457. .... | 136 |
| Ilustración 78. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 13 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272223 Y: 2179472. .... | 137 |
| Ilustración 79. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 14 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 271140 Y: 2180160. .... | 137 |
| Ilustración 80. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 15 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 271160 Y: 2180153. .... | 137 |
| Ilustración 81. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 16 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 271259 Y: 2180109. .... | 138 |
| Ilustración 82. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 17 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 271314 Y: 2179983. .... | 138 |
| Ilustración 83. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 18 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 271549 Y: 2179783. .... | 139 |
| Ilustración 84. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 19 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272011 Y: 2179526. .... | 139 |

|                                                                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Ilustración 85. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 20 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272187 Y: 2179489. ....  | 140 |
| Ilustración 86. Resultado de Espectroscopia Infrarroja Afloramiento número 1 coordenadas X: 270356 Y: 2180637. ....                      | 140 |
| Ilustración 87. Resultado de Espectroscopia Infrarroja Afloramiento número 2 coordenadas X: 270356 Y: 2180637. ....                      | 141 |
| Ilustración 88. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 1 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272666 Y: 217980. ....   | 141 |
| Ilustración 89. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 2 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272550 Y: 2179406. ....  | 142 |
| Ilustración 90. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 3 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272470 Y: 2179423. ....  | 142 |
| Ilustración 91. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 4 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272439 Y: 2179428. ....  | 143 |
| Ilustración 92. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 5 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272435 Y: 2179430. ....  | 143 |
| Ilustración 93. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 6 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272423 Y: 2179431. ....  | 144 |
| Ilustración 94. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 7 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272393 Y: 2179439. ....  | 144 |
| Ilustración 95. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 8 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272383 Y: 2179440. ....  | 145 |
| Ilustración 96. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 9 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272354 Y: 2179441. ....  | 145 |
| Ilustración 97. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 10 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272338 Y: 2179445. .... | 146 |
| Ilustración 98. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 11 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272317Y:2179449. ....   | 146 |
| Ilustración 99. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 12 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272293 Y: 2179457. .... | 147 |

|                                                                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Ilustración 100. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 13 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272223 Y: 2179472. .... | 147 |
| Ilustración 101. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 14 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 271140 Y: 2180160. .... | 148 |
| Ilustración 102. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 15 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 271160 Y: 2180153. .... | 148 |
| Ilustración 103. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 16 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272259 Y: 2180109. .... | 149 |
| Ilustración 104. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 17 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 271334 Y: 2179983. .... | 149 |
| Ilustración 105. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 18 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272550 Y: 2179406. .... | 150 |
| Ilustración 106. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 19 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272011 Y: 2179526. .... | 150 |
| Ilustración 107. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 20 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272187 Y: 2179489. .... | 151 |
| Ilustración 108. Resultado de Espectrometría Raman muestra 18 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 271549 Y: 2179783. ....             | 151 |
| Ilustración 109. Resultado de Espectrometría Raman muestra 17 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 271334 Y: 2179983. ....             | 152 |
| Ilustración 110. Resultado de Espectrometría Raman muestra 16 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 271259 Y: 2180109. ....             | 152 |
| Ilustración 111. Resultado A de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 9 del Acueducto de Morelia X: 272354 Y: 2179441. ....   | 153 |
| Ilustración 112. Resultado B de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 9 del Acueducto de Morelia X: 272354 Y: 2179441. ....   | 153 |
| Ilustración 113. Resultado C de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 9 del Acueducto de Morelia X: 272354 Y: 2179441. ....   | 154 |
| Ilustración 114. Resultado A de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 13 del Acueducto de Morelia X: 272223 Y: 2179472. ....  | 154 |

|                                                                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Ilustración 115. Resultado B de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 13 del Acueducto de Morelia X: 272223 Y: 2179472. .... | 155 |
| Ilustración 116. Resultado C de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 13 del Acueducto de Morelia X: 272223 Y: 2179472. .... | 155 |
| Ilustración 117. Resultado A de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 15 del Acueducto de Morelia X: 271160 Y: 2180153. .... | 156 |
| Ilustración 118. Resultado B de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 15 del Acueducto de Morelia X: 271160 Y: 2180153. .... | 156 |
| Ilustración 119. Resultado C de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 15 del Acueducto de Morelia X: 271160 Y: 2180153. .... | 157 |
| Ilustración 120. Resultado A de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 16 del Acueducto de Morelia X: 271259 Y: 2180109. .... | 157 |
| Ilustración 121. Resultado B de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 16 del Acueducto de Morelia X: 271259 Y: 2180109. .... | 158 |
| Ilustración 122. Resultado C de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 16 del Acueducto de Morelia X: 271259 Y: 2180109. .... | 158 |
| Ilustración 123. Resultado A de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 17 del Acueducto de Morelia X: 271334 Y: 2179983. .... | 159 |
| Ilustración 124. Resultado B de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 17 del Acueducto de Morelia X: 271334 Y: 2179983. .... | 159 |
| Ilustración 125. Resultado C de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 17 del Acueducto de Morelia X: 271334 Y: 2179983. .... | 159 |
| Ilustración 126. Resultado A de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 18 del Acueducto de Morelia X: 271549 Y: 2179783. .... | 160 |
| Ilustración 127. Resultado B de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 18 del Acueducto de Morelia X: 271549 Y: 2179783. .... | 160 |
| Ilustración 128. Resultado C de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 18 del Acueducto de Morelia X: 271549 Y: 2179783. .... | 161 |

## Tablas

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Descripción de algunos ejemplos de ignimbrita de la región de Morelia. .... | 32 |
| Tabla 2. Descripción de algunos ejemplos de ignimbrita de la Falla la Paloma. ....   | 36 |
| Tabla 3 Descripción macroscópica de la ignimbrita de Morelia y del afloramiento. ... | 71 |
| Tabla 4.Resultados de Fluorescencia de Rayos X. ....                                 | 89 |

## Resumen

En este trabajo de investigación se presenta la caracterización, desde el punto de vista mineralógico-geoquímico, de los procesos de degradación característicos de las ignimbritas usadas en la construcción de los monumentos del centro histórico de la ciudad de Morelia, en particular del Acueducto. Hay que recordar que este monumento es uno de los primeros conjuntos arquitectónicos del periodo barroco en Morelia y fue construido totalmente con ignimbritas (“cantera”), concluyendo su edificación entre 1728 y 1730. Esta ignimbrita se caracteriza no sólo por poseer diferentes composiciones mineralógicas y particularidades geoquímicas, sino también por presentar diversas texturas petrográficas. En este sentido, sobre la base del conocimiento de la composición mineralógica y cristaloquímica de estos materiales sería posible explicar los mecanismos y particularidades de su intemperismo natural y/o urbano, lo que finalmente serviría para proponer en cada caso concreto las metodologías adecuadas para su conservación en el patrimonio histórico. Las muestras de estudios se caracterizaron por medio de análisis químicos, difracción de rayos-X, microscopía electrónica de barrido, espectrometría infrarroja y espectroscopía Raman. Los resultados de la investigación en laboratorio mostraron que el material original de las ignimbritas estudiadas está constituido de fenocristales de cuarzo, plagioclasas, feldespatos potásicos, cristobalita, tridimita, biotita, fragmentos de vidrio volcánico con diferente grado de desvitrificación, y de inclusiones líticas y en segundo lugar, se encuentra la presencia de la formación de neominerales que indican la degradación de la ignimbrita, como son la presencia de yeso ( $\text{Ca SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), la halita ( $\text{NaCl}$ ), y los fostatos ( $\text{PO}_4$ ), estos dos últimos formados por la acumulación de patinas compuestos por minerales arcillosos como la montmorillonita. Los agentes externos encontrados fue la presencia de las esférulas de fosfato en la muestra número 17 del acueducto de Morelia por medio de la microscopia electrónica de barrido y también se encontró la presencia de carbono. Estos datos, a su vez, podrán servir en un futuro estudio sistemático de los conjuntos arquitectónicos no sólo en Morelia, sino también en otras ciudades de la República Mexicana que son consideradas en el mundo como patrimonio de la humanidad.

**Palabras clave:** Mineralogía ambiental, Cristaloquímica, monumentos históricos, acueducto, Morelia.

## Abstract

In this work we will present the characterization, from the mineralogical and geochemical of the degradation processes characteristic of the ignimbrites used in the construction of the monuments of the historical center of the city of Morelia, in particular the aqueduct of Morelia Michoacán. Remember that this monument is one of the first architectural ensembles of the Baroque in Morelia, concluding its construction between 1728 and 1730 and was built entirely with ignimbrites ("quarry"). This ignimbrite is characterized not only by having different mineralogical compositions and geochemical peculiarities, but also by presenting diverse petrographic textures. In this sense, on the basis of the knowledge of the mineralogical composition, crystal chemistry of these materials, it would be possible to explain the mechanisms and peculiarities of their natural and/or urban weathering, which would finally serve to propose in each case the appropriate methodologies for their conservation in the historical patrimony. The samples of studies were characterized by chemical analysis, X-ray diffraction, scanning electron microscopy, infrared spectrometry and Raman spectroscopy. The original material of the ignimbrites studied is constituted phenocrysts quartz, plagioclase, potassium feldspar, Cristobalite, Tridymite, biotite, fragments of volcanic glass with different degree of devitrification, and lytic inclusions and the second place we have presence of the formation of neominerales, that indicate the degradation of this ignimbrite, such as the presence of gypsum ( $\text{Ca SO}_4 \cdot 2\text{H}_2 \text{O}$ ), calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), Halite ( $\text{NaCl}$ ), and phosphates ( $\text{PO}_4$ ), that two latter formed by the accumulation of patinas composed of clay minerals such as montmorillonite. The external agents found were the presence of phosphate spherules in sample number 17 of Morelia Acueduct by means of the scanning electron microscopy and we found to the presences of carbon. Those information, in turn, will be able to serve in a future systematic study of the architectonic ensembles not only in Morelia but also in other cities of the Mexican Republic that are considered in the world as patrimony of the humanity.

**Key words:** *Historical buildings, Environmental mineralogy, weathering, acueduct, Morelia.*

## Introducción

A lo largo de la historia, la civilización se ha preocupado por representar sus actividades y dejar un legado para el resto de la humanidad. Los monumentos históricos son un claro ejemplo de cómo los hombres desde la antigüedad buscan dejar sus huellas en el mundo.

Existen diversas definiciones sobre los monumentos históricos; algunos los definen como aquellos bienes muebles e inmuebles como ruinas, construcciones y objetos - entre otros - de propiedad fiscal, municipal o particular, que por su valor histórico o artístico o por su antigüedad deben ser conservados para el conocimiento y disfrute de las generaciones presentes y futuras (Consejo de Monumentos Nacionales, 2016).

Por otra parte, en la Ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, Artísticas e Históricas de México establece en el artículo 35 que son monumentos históricos los bienes vinculados con la historia de la nación, a partir del establecimiento de la cultura hispánica en el país, en los términos de la declaratoria respectiva o por determinación de la Ley (DOF, 2015).

En este sentido, se conoce bien que en los monumentos ocurren los procesos de alterabilidad; entre los cuales se puede distinguir dos tipos fundamentales:

- 1) Naturales, que se caracterizan por los mismos mecanismos y productos de alteración ya establecidos en diferentes tipos de yacimientos y rocas
- 2) Artificiales, los cuales están relacionados con el ambiente específico urbano que conducen a la transformación de los materiales pétreos naturales (Carroll, 1971).

Este trabajo de investigación indaga sobre los monumentos históricos y el caso específico del Acueducto de Morelia en Michoacán; con el objetivo de poder caracterizar, desde el punto de vista mineralógico, los procesos de degradación que son particulares en las rocas volcánicas piroclásticas (ignimbritas) usadas en la construcción de los monumentos históricos de la ciudad.

Esta investigación presenta en un primer momento los antecedentes del problema para tener una idea general sobre la problemática de los monumentos; posteriormente, se presenta el marco teórico donde se hace una descripción general de la Geología de Michoacán, de su situación geográfica y de los monumentos históricos de la zona para saber cómo se formó la ignimbrita que se utilizó para la construcción de estos monumentos históricos.

En los primeros capítulos se describe la Geología de Morelia, su situación geográfica y los monumentos históricos de la ciudad, con el fin de describir con más detalles cómo se utilizó la ignimbrita y la ubicación de los bancos de la zona.

En los capítulos posteriores, se describe la historia y el contexto de los Acueductos en México y del Acueducto de Morelia, que es el objeto de estudio de este trabajo de investigación.

Finalmente, en el último capítulo del Marco Teórico se describen las principales características de las ignimbrita y sus causas de degradación, particularmente en los monumentos históricos.

Posteriormente, se presenta el trabajo de campo, donde se hizo la descripción del área de estudio, para lo cual se diseñó un criterio de selección de las muestras que permitió la localización y la toma de la muestra; así mismo, se describe el tratamiento de las muestras y los resultados obtenidos.

## **Antecedentes**

Esta investigación científica buscó conocer los estudios previos sobre algunos monumentos históricos en México; donde la ignimbrita sea el elemento arquitectónico y decorativo principal.

En primer lugar, debe considerarse el estudio realizado sobre el Exconvento San Francisco de Morelia, Michoacán; este estudio, encontró que la degradación originó algunas neoformaciones minerales específicas, entre las cuales predominan sulfatos (yeso), cloruros (halita), fosfatos de calcio amorfos y, en menor proporción, carbonatos (calcita, amerita). Esta composición mineralógica muestra que los principales elementos indicadores de alteración en los edificios históricos estudiados son azufre, cloro y fósforo. Al mismo tiempo, hay que señalar el diferente grado de desvitrificación de las ignimbritas, lo que es un factor importante en su degradación: una menor intensidad y/o ausencia de devitrificación es característica de las ignimbritas que presentan buena consolidación y mejores propiedades de resistencia mecánica a los procesos de intemperismo (Ostroumov et al., 2003).

En segundo lugar, se retoma el estudio acerca de la Geología en la región de Morelia donde se relaciona el origen de este material con la edad de Mioceno (Garduño-Monroy & Israde, 2004) . Sobre esta roca se presenta una serie de productos lacustres y fluviolacustres, mismos que van de 8 a 3 Ma, aflora al sur, este y suroeste de la ciudad de Morelia.

Además, se consideró el trabajo de Cisneros (2016) que encontró cinco unidades estratigráficas en la zona: las dos primeras halladas conforman el basamento y corresponden a la unidad ignimbrita de Atécuaro conformada por lavas andesita-basáltica e ignimbrita, la unidad Cuitzeo conformada por ignimbritas, lavas de composición andesita-basáltica e ignimbritas, la unidad Quinceo, la unidad Tetillas y la Unidad de Conos Cinerfíticos.

El municipio de Morelia forma parte de la cuenca de Cuitzeo, esta cuenca es después de la Chapala, la más extensa a nivel regional, desde el punto de vista de la tectónico, la sucesión de Mil Cumbres, aflora al sur y es el basamento de la cuenca de Cuitzeo, se interrumpe por la intersección de un segmento del sistema activo de la falla Morelia–Acambay (Garduño-Monroy & Israde, 2004) .

La secuencia localizada en el sector norte de la depresión de Cuitzeo corresponde a un bloque basculado hacia el sur, la cual permitió la formación de la depresión de Charo y Morelia; esta depresión y basculamiento fueron generados por fallas E-O y

ENE-OSO. Este sistema al reactivarse con procesos de subsidencia-creep falla ha dado lugar en la ciudad de Morelia a fenómenos de hundimientos que se alinean en la dirección de esta falla regional E-O y ENE-OSO.

La cuenca está limitada al este por la caldera de los Azufres y al oeste por vulcanitas pliocuaternarios cuyos productos formaron los volcanes en escudo Quinceo-Las Tetillas, los cuales forman parte del vulcanismo del Corredor Tarasco, todos de composición calco-alcalina (Garduño-Monroy & Israde, 2004) .

Como cuarto antecedente, se tiene el trabajo sobre de la “piedra cantera” de Morelia, donde se revisaron las características geológicas, petrológicas y físico mecánicas; así como, los volúmenes y las condiciones actuales de extracción que se realizan en los principales bancos de este material. Por medio de una cartografía y una descripción estratigráfica detallada realizada en Morelia, se identificaron y caracterizaron los principales horizontes de la ignimbrita. Los niveles superiores rosadas, mejor consolidados (o soldados) y con mejores propiedades físico-mecánicas corresponden a los horizontes explotados en las canteras históricas de Morelia. Los niveles inferiores generalmente muestran una mayor variedad de tonalidades rosa, blanco, ocre y café, mostrando también una mayor diversidad petrográfica y física (Bigioggero et al., 2004).

Como quinto antecedente, es importante considerar el trabajo de Feilden (2004) sobre la historia de la conservación de los monumentos donde declara la importancia de la correcta intervención ética en la conservación.

Feilden (2004) menciona que para que el patrimonio en tierra sea importante debemos considerar estas particularidades en el estado del edificio, que deberá ser documentado, antes del inicio de cualquier intervención y al respecto también argumenta que:

- Los materiales y métodos de intervención utilizados para la conservación de las estructuras deben ser documentados, siempre que sea posible.
- Los vestigios históricos no deben ser removidos, destruidos ni falsificados.

- Sin importar cuál sea la intervención en la estructura, ésta deberá ser mínima, reversible o, por lo menos, no perjudicar posibles futuras intervenciones. Por ejemplo, un mal diagnóstico inicial en un monumento puede desencadenar en un cambio litológico de la pieza original y con ello, impedir una segunda restauración; ocasionando posteriormente, la pérdida de la pieza.
- Cualquier intervención deberá ser orientada por el máximo respeto hacia la integridad estética, histórica y física del bien cultural.

Según Feilden (2004) se debe destacar que la intervención de conservación debe ser armoniosa en color, estilo y textura y si fueran necesarias ampliaciones o adiciones a la estructura original, éstas deben relacionarse en forma y escala, y tener menos impacto que el material original para ser identificables por el observador experimentado .

Además, la intervención en la estructura existente debe ser reversible o repetida, si es técnicamente posible, o, por lo menos, que no perjudique la acción de posibles futuras intervenciones o el acceso a indicios incorporados en el objeto. Por otro lado, es importante mencionar que la intervención de conservación debe permitir la retención máxima del material original existente (Feilden, 2004).

## **Fundamentos de la investigación**

### **Planteamiento del problema.**

Los monumentos históricos forman parte fundamental de la cultura de las civilizaciones, por ello existe siempre la idea de conservarlos por parte de las sociedades actuales.

Morelia forma parte de las ciudades que aún preservan sus monumentos históricos, particularmente el Acueducto, mismo que fue terminado de construir entre 1827 y 1830. Actualmente a menos de 200 años de construcción se empiezan a observar los efectos producidos por la degradación en la ignimbrita, la situación se puede constatar con la aparición de varias manchas producto de la humedad,

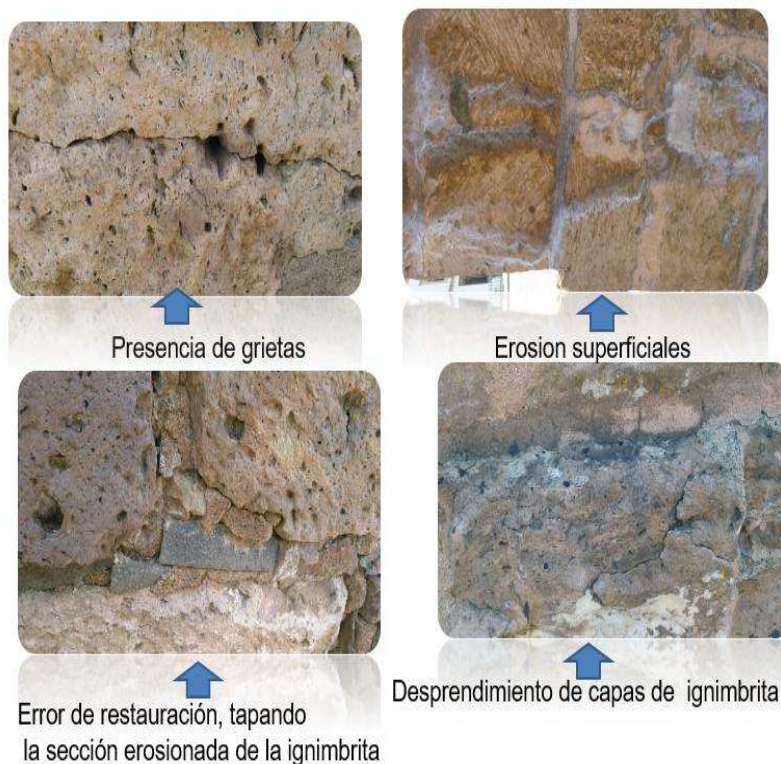
eflorescencias (cristalización de sales que vienen de la humedad de esta ignimbrita), la presencia de los minerales arcillosos como la montmorillonita, costras de alteración formadas por una asociación de minerales; también, se pueden observar la presencia de musgos y líquenes a lo largo del Acueducto, eso sumándose a la degradación litológica del propio material.

Además, el Acueducto de Morelia se encuentra en el centro de la ciudad y el monumento se vuelve vulnerable a la contaminación producida por la actividad antropogénica como: el vandalismo, los mercados al aire libre, los gases de vehículos y las emisiones de la industria.

### Justificación.

#### Ilustración 1 Deterioro y error en la restauración de la ignimbrita del Acueducto de Morelia.

El Acueducto es uno de los primeros monumentos construidos en Morelia enteramente de cantera (ignimbrita), el cual ha sufrido distintos procesos de degradación y malas restauraciones. Es por ello que se realiza un estudio mineralógico acerca de estos factores para contribuir a la evaluación y aplicación de políticas ambientales para mejorar las intervenciones en los monumentos históricos y proponer mejores procesos de restauración.



Como se puede observar en la ilustración 1, la presencia de deterioro del material y error en las restauraciones previas de la ignimbrita se refleja en la aparición de grietas, erosiones superficiales y hasta desprendimiento de capas.

## **Hipótesis**

Los procesos de degradación de la ignimbrita pueden ser naturales o por acción antropogénica, por lo que es necesario realizar estudios con la ayuda de distintas técnicas analíticas para determinar las causas de éstos y buscar la posibilidad de disminuirlos.

## **Objetivo general.**

Caracterizar, desde el punto de vista mineralógico, los procesos de degradación que son característicos en las rocas volcánicas piroclásticas (ignimbritas) usadas en la construcción de los monumentos históricos de la ciudad de Morelia, en particular del Acueducto de la ciudad.

## **Objetivos particulares.**

1. Realizar el análisis cristaloquímico de los minerales de las ignimbrita de la zona, tratando de localizar con ello el nivel o estrato de donde proviene cada bloque de cantera usado en el Acueducto.
2. Utilizar las técnicas analíticas modernas para caracterizar los minerales de la ignimbrita de la zona de estudio como: Difracción de Rayos X, Análisis de Fluorescencia de Rayos X, Microscopía Electrónica de Barrido Espectrometría Infrarroja y Espectroscopia Raman.
3. Contribuir a la evaluación y aplicación de políticas ambientales para las intervenciones en los monumentos históricos.
4. Elaborar una propuesta de restauración.

## Capítulo 1 Geología del estado de Michoacán

### 1.1. Antecedentes históricos de Morelia.

Del primer asentamiento humano que vivió en el Valle de Guayangareo se sabe que fue un grupo prehispánico que floreció durante el periodo clásico de las culturas mesoamericanas y de los que sólo quedan diversos fragmentos de cerámica y puntas de flechas de obsidiana. Esta aldea se encontraba al oriente entre las faldas de la loma de Santa María y el volcán de Punhuato (Zamudio, 1995).

A continuación se muestran una traza de población de la ciudad de Morelia realizada alrededor del año 1541, misma que señala la concentración de la población en ese momento y que fue retomada del estudio de Cervantes et al. (2001).

**Ilustración 2** Traza probable de la ciudad de Morelia 1541 (Elaboración propia con base a Cervantes et al, 2001).



En el Valle de Guayangareo, entre los años del 350 al 700 hubo un nuevo asentamiento que coincidió con el desarrollo de Teotihuacán en Altiplano Central (Herrejón, 1991).

En el siglo XVI, a la llegada de los españoles y después de una violenta conquista que significó el dominio de este territorio, México se cubre de pueblos y ciudades siguiendo los antiguos patrones europeos e intentaba unificar las poblaciones a semejanza de un tablero de ajedrez (damero), sobreponiéndose en muchos casos a los ancestrales ciudades indígenas (López, 1999).

El primer español que tuvo interés en las tierras del valle de Guayangareo fue Bernardino de Albarnoz y se llamó Valladolid porque la ciudad del mismo nombre en España fue la patria de su fundador, Don Antonio de Mendoza. En la antigüedad se le designaba con el nombre de Valladolid de Michoacán, para distinguirla de otras con el mismo nombre. El nombre de Morelia, que hoy lleva la ciudad, le fue dado por decreto que expidió la Legislatura del Estado el día 12 de septiembre de 1828, para honrar la memoria de José María Morelos y Pavón (Herrejón, 1991).

La creación de la ciudad de Morelia fue producto de la lucha política entre dos instituciones: la Diócesis de Michoacán y el Virreinato de Nueva España, encarnada en dos personas: el obispo Don Vasco de Quiroga y el virrey Antonio de Mendoza. En el mandato del 23 de Abril de 1541, el virrey ordena la construcción de la nueva ciudad donde Valladolid (antigua Morelia) reunía las seis siguientes cualidades (Vargas Uribe, 2009):

1. “Se localiza en una loma por donde de todas partes se sube y los edificios están seguros.
2. La ciudad está descombrada de montes y sierras para que el sol al salir y los aires purifiquen las inundaciones de la tierra.
3. La ciudad presenta dos ríos que los abastecen.
4. La ciudad dispone de mucha leña debido a la presencia de montes inagotables.
5. Abundancia de pan, pues dispone a sus alrededores de grandes áreas para cultivo de maíz de riego.

6. Tiene abundancia de pescado y carne”.

Inicialmente fue un villorrio rodeado de pueblos indígenas, en donde se formaron los barrios de San Francisco y Capuchinas, que más tarde se convertirían en los conventos de San Francisco y San Agustín. Las construcciones iniciales fueron hechas en la parte alta del Valle con lo que se evitaban las inundaciones. En 1540 se construyeron los Colegios de San Nicolás y de San Miguel, en 1660 se inició la construcción de la iglesia la Compañía que es ahora la actual catedral, y que se terminó de edificar en el año 1744 (Commons, 1973; Garduño Monroy et al., 2002).

En la ilustración 3 se observa que en el año 1874 ya la ciudad de Morelia contaba de un plano donde se podría localizar la concentración de la población y ubicar las zonas que tiene ríos.

**Ilustración 3 Plano de la ciudad de Morelia 1874 (Elaboración propia con base a Cervantes et al., 2001).**



Felipe Díaz Ortega levantó el primer plano de la ciudad de Valladolid en 1794, la cual fue dividida en cuatro cuadras mayores y estos a su vez en tres menores; esta división sirvió para crear alcaldes de barrio y como base para la organización del crecimiento espacial de la ciudad, tal crecimiento estuvo limitado al norte por la presencia del Río Grande y al sur por la del Río Chiquito (ver Ilustración 3). Los ejes que daban origen a los cuatro carteles mayores de la ciudad corresponden actualmente a: de norte a sur a la Avenida Morelos Norte y Avenida Morelos Sur; y de este a oeste, la Avenida Francisco I. Madero Oriente y Avenida Francisco I. Madero Poniente (Commons, 1973).

En 1852 se inició la expansión territorial de la ciudad, la cual para ese entonces contaba con 30 calles, de las cuales 18 eran laterales y 12 longitudinales. En el periodo de 1856 a 1860 se conservó casi sin variación ortogonal y en 1873 la traza siguió siendo en su mayoría ortogonal. Para 1883 las calles sumaban 99, de las cuales 55 eran laterales y 44 longitudinales, que en conjunto daban cuerpo a 200 manzanas cortadas en su mayoría en ángulos rectos (Vargas Uribe, 2009).

## **1.2. Geología general.**

La ciudad de Morelia se localiza dentro del Cinturón Volcánico Trasmexicano (CVTM), donde ha alojado el vulcanismo más reciente de centro de México desde, hace 12 Ma por la subducción de la Placa de Cocos. En la zona de Morelia se observa a la Sierra de Mil Cumbres (SMC), conformada por una serie de vulcanitas similares en composición a las de la Sierra Madre Occidental (SMO), donde siempre destacan las estructuras caldéricas y las mesas de productos piroclásticos (ignimbritas). La diferencia entre la SMO y la SMC está basada en la edad de las mesas de ignimbritas, ya que en la primera zona son del Eoceno y en la segunda zona corresponden al Oligoceno-Mioceno (Ferrari, 1994).

La SMC es un elemento clave para definir la transición entre la Sierra Madre Occidental y el CVTM, ya que se formó hace 23-14 Ma en una zona tectónicamente compleja debido a la subducción subhorizontal de la placa Farallón por debajo de la Norteamericana. Sus estructuras presentan una orientación NE-SO y sus magmas

tienen una amplia variabilidad geoquímica debido a que sufrieron diferentes procesos magmáticos a lo largo de su evolución (Garduño-Monroy & Arreygüe-Rocha, 2001)

En la sierra de Mil Cumbres y sobre todo al SE de Morelia podemos reconocer una morfología típica de la SMC, con estructuras caldéricas (calderas de Atécuaro y la Escalera) y con mesas basculadas de ignimbritas hacia el norte y hacia el sur.

Desde el punto de vista de la estructura regional, la SMC constituye un alto estructural (horst) que separa, hacia el norte a las depresiones lacustres del CVTM y al sur da lugar a las depresiones de Tierra Caliente. En ambos casos, la deformación que se observa es generada por la fallas lítricas con planos inclinados hacia el sur y hacia el norte. El basculamiento generado va de 20 a 30° en el límite sur del Lago de Cuitzeo y en el área de Morelia el basculamiento llega a ser de unos 5 a 10°.

Desde el punto de vista del fracturamiento regional se reconocen con claridad el fallamiento NE-SO y E-O, ambos labrando la arquitectura del valle de Guayangareo (Garduño-Monroy, 2004).

En el trabajo de tesis de Gómez (2102) se estudió por primera vez de forma semi-detallada que la SMC está compuesta por un arco volcánico continental que comprende cuatro estructuras volcánicas independientes: las calderas de Atécuaro (CA), La Escalera (CLE), los Complejos Volcánicos de Indaparapeo (CVI) y Garnica (CVG).

La SMC está conformada por muchas estructuras volcánicas; entre ellas flujos de lava, domos, depósitos de flujos piroclásticos, flujos de escombros y avalanchas de escombros; su composición es muy variada, desde andesítico-basáltica a riolítica; todas de tipo calcoalcalino, típicas de ambientes de subducción.

La distribución espacio-temporal de la SMC es la clave de la evolución tectónica y magmática del centro de nuestro país. La CA, la CLE, el CVI y el CVG, al igual que varias estructuras Miocénicas ubicadas en el extremo sur del CVTM, sufrieron un

fuerte control tectónico-estructural, afectadas por una extensión NO-SE de grandes magnitudes (Garduño-Monroy & Arreygue-Rocha, 2001).

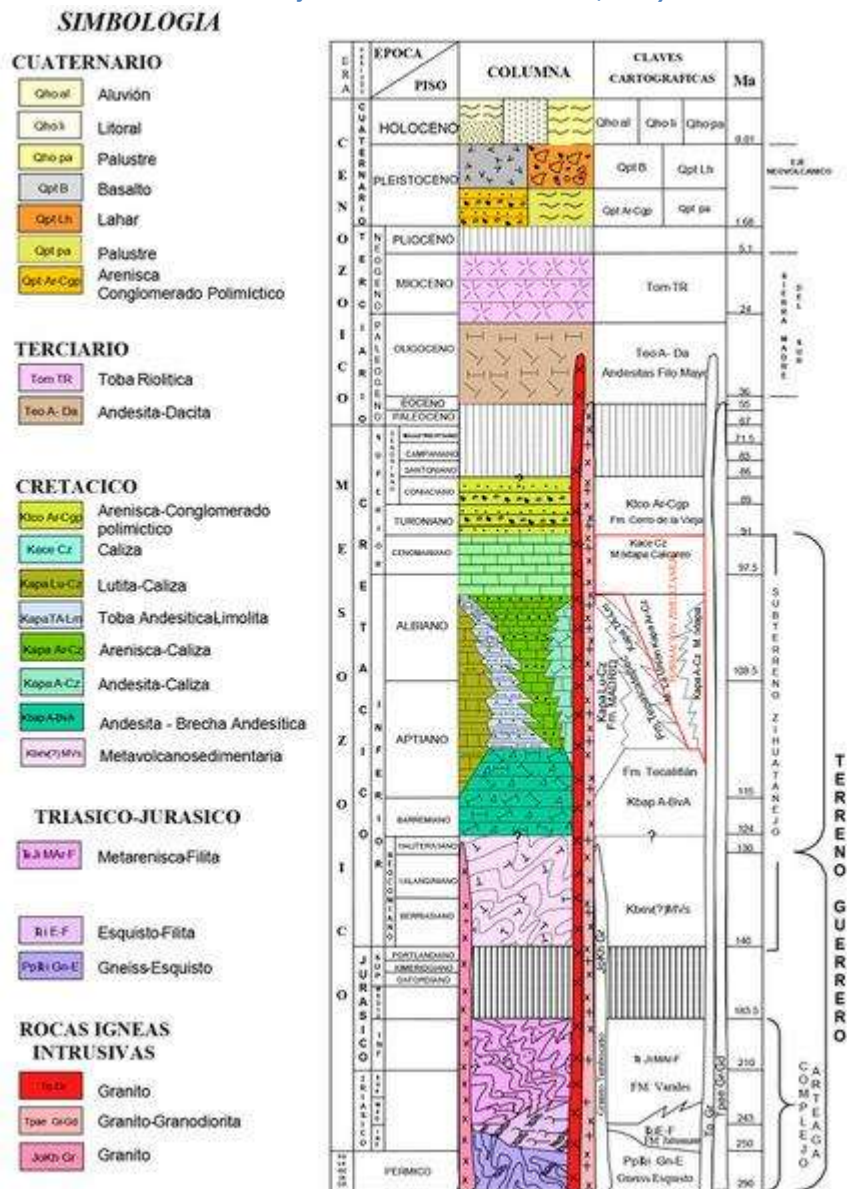
### **1.3. Geología regional**

En este apartado se presenta un breve resumen sobre la geología de estado de Michoacán, ya que los monumentos históricos fueron contruidos a partir de ignimbrita que era el material que se encontraba disponible en la época y que presentaba características propias para las edificaciones.

La estructura geológica del estado de Michoacán se encuentra constituida, en término generales, por rocas de un basamento metamórfico, rocas sedimentarias mesozoicas y rocas ígneas intrusivas y efusivas cenozoicas. Al SO y NE del estado se encuentran las rocas metamórficas mesozoicas que se consideran como las rocas más antiguas y constituyen el llamado complejo metamórfico (Consejo de Recursos Minerales, 1995).

En la siguiente página se muestra la ilustración 4, que señala la columna estratigráfica generalizada del estado de Michoacán.

Ilustración 4 Columna estratigráfica generalizada del estado de Michoacán (Fuente: Imagen tomada de Consejo de Recursos Minerales ,1995)



La era Mesozoica está representada en gran parte por una secuencia clástica marina, en cuya base se encuentra la formación Angao, del Jurásico Superior. Las rocas ígneas intrusivas y efusivas del Cretácico están distribuidas al este y suroeste del estado, además de un paquete vulcano sedimentario; en el sureste existen rocas sedimentarias marinas correspondientes a las formaciones San Lucas, Morelos y Mal Paso.

En la entidad, el periodo Cenozoico está constituido por una secuencia sedimentaria continental, perteneciente El Grupo Balsas, está conformada de un gran paquete de

rocas terrígenas y por rocas volcánicas de diversa composición e ígneas intrusivas de composición intermedia a ácida.

La era Cuaternaria está representada por rocas efusivas que constituyen el CVTM, además de depósitos lacustres, depósitos de pie de monte y aluvión (Consejo de Recursos Minerales, 1995).

#### 1.4. Geología local

En la ciudad de Morelia se pueden identificar siete estratos de una columna estratigráfica (Garduño-Monroy & Israde, 2004) , a continuación se explican brevemente:

1. Complejo andesítico de Mil Cumbres del Mioceno medio-superior (19 Ma).
2. Secuencia de flujos piroclásticos del Mioceno “cantera de Morelia” ( $14.47 \pm 0.54$  Ma).
3. Complejo volcánico del Punhuato ( $15.9 \pm 6$  Ma )
4. Secuencia fluvio-lacustre Cuitzeo –Morelia del Mioceno-Plioceno.
5. Vulcanismo del Corredor Tarasco del Cuaternario (2 o 3 Ma al presente)
6. Paleosuelos y tepetates.
7. Suelos.

El Complejo andesítico de Mil Cumbres del Mioceno medio-superior ( $>12$  Ma) son rocas volcánicas que se encuentran aflorando en la región de Ocolusen (ver ilustración 5), donde se pueden observar estructuras de flujos de lava que se intercalan con brechas y productos piroclásticos de color rojo o bien amarillo. Las rocas se alteran a color gris o bien en colores verdosos. Muchos de ellos tienen vetillas de calcita o bien de calcedonia (variedad microcristalina del cuarzo) (Garduño-Monroy & Israde, 2004) .

En el subsuelo esta andesita no ha sido atravesada por las perforaciones de sondeos o pozos de agua y en la superficie no se ha encontrado su base, por lo que se desconoce su espesor total, pero se considera sea mayor de los 200 metros con base a los pozos perforados.

Estas andesitas configuraron el edificio volcánico que da lugar a la Caldera de Atécuaro. Las andesitas y los productos piroclásticos se observan en la cañada del río Chiquito y en la zona de Ocolusen, sobre todo en un camino abandonado resalta la alternancia de lavas y productos piroclásticos. Estos últimos están tan alterados que forman un material arcilloso color amarillo. Hacia el sureste de Morelia las andesitas se intercalan con niveles de flujos piroclásticos y configuran a otros centros volcánicos de tipo caldera, como lo que ha denominado caldera La Escalera (Chiesa et al.,1999).

En la Secuencia de flujos piroclásticos del Mioceno “cantera de Morelia” (12 Ma), se trata de producto piroclásticos de composición riolítica de colores claros y sobre todo rocas ricas en líticos de andesitas o bien en pómez, por lo que se clasifica como una roca piroclástica también denominada ignimbrita, la cual se compone de diferentes niveles presentando variaciones laterales.

Algunas ignimbritas han podido ser descritas durante el transcurso de la asignatura Geología de Campo de la Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio, previo al trabajo de esta investigación, a continuación se muestran algunos ejemplos:

**Tabla 1. Descripción de algunos ejemplos de ignimbrita de la región de Morelia.**

| <b>Coordenadas</b>    | <b>Descripción de la ignimbrita</b>                                                                                           |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| X:272638<br>Y:2177414 | Presencia de la ignimbrita de color blanco, presencia de pómez de 1 cm y flujo de ceniza, la matriz es de 80 a 90%.           |
| X:272697<br>Y:217733  | Presencia de ignimbrita de color rosa-claro, semi soldada, con una matriz de 80 a 90 % y con líticos de 3mm.                  |
| X:272656<br>Y:2177197 | Presencia de ignimbrita de color café poco soldada y pómez son fibrosos, de color claro, líticos de 2cm, la matriz es de 90%. |

Tabla 1. Descripción de algunos ejemplos de ignimbrita de la región de Morelia (continuación).

| Coordenadas            | Descripción de la ignimbrita                                                                                                                                                                        |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| X:272687<br>Y:2177166  | Presencia de ignimbrita rosada, soldada; pómez de 1cm vítreo claro, y se puede observar la presencia del cuarzo, plagioclasas, anfíboles.                                                           |
| X:272678<br>Y:2177127  | Ignimbrita poca soldada de color gris-violeta con matriz de 90%, pómez blanco de 1.5 cm.                                                                                                            |
| X:272334<br>Y:2177213  | Ignimbrita rosada claro, soldada con presencia de pómez y líticos; se puede observar minerales como el cuarzo y plagioclasas.                                                                       |
| X:272336<br>Y:2177179  | Presencia de ignimbrita muy alterada por procesos de meteorización y poco soldada.                                                                                                                  |
| X:272348<br>Y:2177128  | Presencia de ignimbrita blanca a café, soldada y pómez de 1cm, se observa también la presencia de pocos fiames.                                                                                     |
| X:270009<br>Y:2177684  | Presencia de ignimbrita rosada, semisoldada con un espesor del afloramiento de 3.5m, matriz de 85%, presencia de líticos de 1.5cm. La ignimbrita está muy fracturada por procesos de meteorización. |
| X:2669919<br>Y:2177690 | Presencia de ignimbrita de color rosa, poco soldada, matriz de 85%, pómez blanco a rosada fibrosa de 2mm.                                                                                           |
| X:269821<br>Y:2177640  | Afloramiento de ignimbrita rosada de un espesor de 6m, soldada, las pómez son alargadas.                                                                                                            |
| X:270219<br>Y:2177392  | Ignimbrita rosada, soldada pómez blanca a café de 1cm, presencia de fiames.                                                                                                                         |
| X:270830<br>Y:2177319  | Presencia ignimbrita blanco a café, soldada, matriz de 90%, se observan fiames y la presencia anfíboles de color negro por la oxidación.                                                            |
| X:270725<br>Y:2177371  | Presencia de ignimbrita con fuerte meteorización, de color blanco y rosada, poco soldada, con pómez fibrosa, matriz de 90%                                                                          |
| X:270695<br>Y:2177384  | Presencia de ignimbrita de color rosada, poco soldada, matriz de 85 %, líticos oscuros y rosas de 1.5cm.                                                                                            |
| X:270619<br>Y:2177396  | Presencia de Ignimbrita de color blanco, pómez fibrosa de 1.5cm color café a blanca, fragmento de lítico de 4cm, matriz de 98%.                                                                     |

**Tabla 1. Descripción de algunos ejemplos de ignimbrita de la región de Morelia (continuación).**

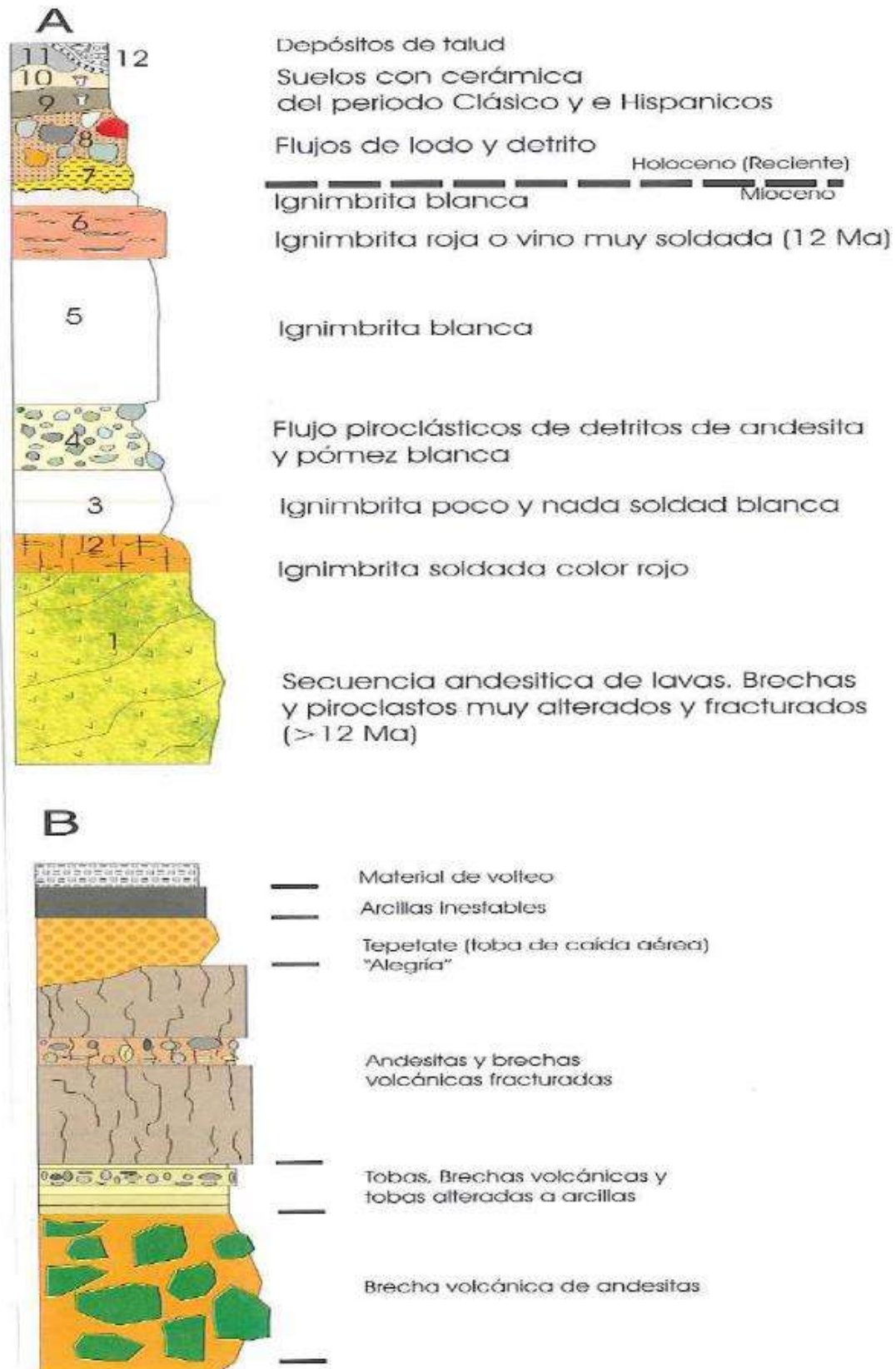
| <b>Coordenadas</b>    | <b>Descripción de la ignimbrita</b>                                                                                           |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| X:270720<br>Y:2177478 | Presencia de ignimbrita color blanco, semi soldada, matriz de 80%, se observa los líticos y pómez de 3cm.                     |
| X:270779<br>Y:2177484 | Presencia de ignimbrita con alto grado de meteorización de color blanco, matriz de 95%, poca soldada, líticos oscuros de 2cm. |
| X:270840<br>Y:2177490 | Presencia de ignimbrita de color verdoso claro, semi soldada, con pómez de 4mm fibroso, matriz de 80%, líticos de 2mm.        |

Se puede observar que esta columna estratigráfica se divide en varias capas, a continuación se hará una breve explicación de la misma (Garduño-Monroy & Israde, 2004) :

- Brechas de arrastre y flujos piroclásticos que solo se observan en las cercanías del edificio volcánico de Atécuaro, donde se puede observar una estructura caldérica de 5 km de diámetro
- Ignimbrita muy soldada de color vino, con fiames más oscuros y líticos. Se observa únicamente en la zona del club Campestre.
- Cantera color blanco o gris claro con grande pómez, es la más abundante y aflora a todo lo largo del escarpe de la falla La Paloma.

Visualmente, las capas antes descritas se pueden observar en la ilustración 5, que se encuentra en la siguiente página.

Ilustración 5. Columna estratigráfica (elaboración propia con base a Garduño-Monroy e Israde, 2004).



Así mismo, durante el transcurso de la asignatura Geología de Campo de la Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio, se realizó un levantamiento

del afloramiento de la Falla La Paloma, previo al trabajo de esta investigación, a continuación se muestran algunos ejemplos:

**Tabla 2. Descripción de algunos ejemplos de ignimbrita de la Falla la Paloma.**

| <b>Coordenadas</b>    | <b>Descripción de la ignimbrita</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| X:272110<br>Y:2177338 | Presencia de ignimbrita blanca, con matriz de 92%, se observa también pómez y líticos pero muy finos.                                                                                                                                                                                                                                  |
| X:272152<br>Y:2177288 | Presencia de ignimbrita de color verdoso, matriz de 70%, pómez redondeada, poca soldada.                                                                                                                                                                                                                                               |
| X:272199<br>Y:2177241 | Presencia de ignimbrita de color café, matriz de color blanco, los líticos oscuros, pómez de 2cm y alargados, se observa el conglomerado monolíticos.                                                                                                                                                                                  |
| X:272202<br>Y:2177229 | Presencia de ignimbrita blanca, soldada, matriz de 85%, se puede observar cristal de cuarzo, anfíboles y plagioclasas, con clasto heterolitológico, estos clastos están mezclados con flujos fluviales, clastos de dacitas formando un Lahar heterolitológico de color café, los líticos hacia la parte de cima se hacen más pequeños. |

Los niveles faltantes de la columna son los siguientes:

- Cantera con líticos que a veces aparentan verdaderos conglomerados, solo que ellos tienen una matriz con pómez.
- Flujos piroclásticos de cantera blanca o gris presentando grandes fragmentos de pómez.
- Ignimbrita soldada color vino, con fiammes y líticos más oscuro, esta característica ayuda a diferenciarla. Es la cantera con las que construyeron las obras civiles durante el siglo XVII, ya que es la que configura la cima de la loma de Morelia, siendo visible en la colonia obrera y centro.
- Cantera color blanco con micas, muchos fragmentos de pómez y eventuales líticos. Esta ignimbrita junto con el nivel 6, son las que coronan la Geología de la zona. Esta se observa en la parte alta de la loma de Santa María y sobre todo en el Tecnológico de Monterrey.

Por su parte, el Complejo volcánico del Punhuato (Mioceno) es una secuencia volcánica donde se han observado lavas, brechas que con su morfología y sus

estructuras están más asociadas a un complejo de domos. En el flanco occidental de este edificio volcánico se observa una estructura en forma de herradura abierta en la misma dirección (Garduño-Monroy & Israde, 2004) . En la salida de este cráter se observa claramente un lóbulo o abanico de depósito que evidentemente es el material acumulado después de la destrucción del cono. En la región de Atapaneo se han observado otros domos aislados, que podrían ser contemporáneos al Complejo de Punhuato Otros depósitos de Punhuato están asociados al colapso, de manera que forman un abanico de depósito ahora ya cubierto por la zona urbana.

En este complejo sobreyacen a la secuencia de Mil Cumbres y está representado por domos y flujos de lava andesítica y dacítica, así como una avalancha de escombros que forma un abanico hacia el occidente, asociada con estructura de colapso en forma de herradura. Las lavas andesíticas son masivas, de textura afanítica, color gris oscuro y superficies de alteración color rojo (Garduño-Monroy & Arreygue-Rocha, 2001), Gómez (2012) fechó una muestra tomada de esta lava con el método  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  en roca total en  $15.9 \pm 0.6$  Ma

La Secuencia fluvio-lacustre Cuitzeo –Morelia del Mioceno-Plioceno, se encuentra en el trébol que forman el Libramiento y la Calzada La Huerta, sobre las ignimbritas de la cantera de Morelia una secuencias fluvio-lacustres de entre 7 a 10 metros, que presenta basculamiento de  $5^\circ$  al sur. Está constituida por limos, arcillas y niveles de ceniza volcánica color blanco. Hacia la zona de La Huerta la secuencia muestra un aspecto más de epiclásticas, es decir, cenizas volcánicas con matriz arcillosa o bien productos de pómez retrabajados, alternando eventualmente con niveles arcillosos o limosos, dando el aspecto de tepetates que pueden ser considerados como depósitos de Lahares del Mioceno-Plioceno (Garduño-Monroy & Israde, 2004)

Por otra parte, la Secuencia de pómez de Caída aérea (Alegría) tiene diferentes niveles de pómez color amarillo, espesores variables pero que siempre son más importantes hacia las cercanías de los volcanes del Quinceo-Las Tetillas. Los mejores afloramientos están en la zona del Tecnológico de Morelia donde se aprecian hasta 5 metros de diferentes niveles.

En las faldas de la falla La Paloma y más precisamente en la zona de Ocolusen estos depósitos de pómez se encuentran descansando sobre el escarpe de la falla, poniéndose en contacto con las andesitas del Mioceno.

Al norte de Morelia, en el municipio de Tarímbaro, aflora un depósito de caída de ceniza y pómez de aproximadamente 3 m de espesor, el cual representa una etapa de actividad explosiva probablemente del volcán Quinceo, posterior al emplazamiento de sus flujos de lava. El depósito de caída de pómez, el cual tiene pómez de color beige, sub-redondeadas y sub-angulosas, menores de 0.5 cm con soporte grano-a-grano (Garduño-Monroy & Israde, 2004).

Dos muestras de lava andesítica-basáltica del cono de escoria Zapote Alto, ubicado al NE de la SMC, fueron fechadas con el método K/Ar en  $0.79 \pm 0.06$  Ma y  $0.81 \pm 0.08$  Ma por (Garduño-Monroy & Arreygue-Rocha, 2001).

El Vulcanismo Monogenético del Corredor Tarasco es la cima más importante de la ciudad de Morelia la conforman los volcanes tipo escudo de Quinceo y Las Tetillas, no obstante el volcán de El Águila también forma parte de este vulcanismo. En las faldas de todos estos aparatos podemos reconocer volcanes de ceniza y lava (tipo Parícutín) que conforman los bancos de arena de Joyitas y del actual basurero de la ciudad de Morelia. Asociado a este vulcanismo se tienen pequeños domos con lavas en donde destacan los cristales hornblenda. Las lavas que los componen y sus piroclastos son de composición andesítica y eventualmente andesítica basáltica (Garduño-Monroy & Israde, 2004).

Los depósitos que sobreyacen a las SMC tratan de volcanes tipo semi-escudo, domos y conos de escoria, flujos de lava andesítica-basáltica y andesítica, asociados a los volcanes el Quinceo, Tetillas, El Águila, El Melón, etc., que afloran al NO de la ciudad de Morelia, en la colonia Tres Puentes y Torreón Nuevo. Las lavas son masivas, de textura porfírica, color gris oscuro con superficies de alteración color rojo. Consisten de fenocristales de olivino y plagioclasa; la matriz es microlítica traquítica con olivino, plagioclasa, clinopiroxeno y óxidos. Muestras tomadas de varios afloramientos fueron fechadas con el método de  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  en roca total en

1.42  $\pm$  0.12 Ma para el Quinceo 0.33  $\pm$  0.04 Ma para las Tetillas del Quinceo y 0.62  $\pm$  0.02 Ma para El Águila (Garduño-Monroy & Arreygue-Rocha, 2001)

Finalmente, los Depósitos de epiclastitas (Tepetates) se ubican al sur de la ciudad de Morelia, más precisamente al sur del San Miguel del Monte y San José de las Torres, sobre los depósitos piroclásticos relacionados con la caldera de Atécuaro, se han desarrollado sedimentos de tipo detrítico, constituidos de conglomerados, micro conglomerados, arenas arcillosas y limos de color café. Tienen la característica de estar bien cimentados y su aspecto se asemeja al de un paleosuelo. En todas las columnas estudiadas sobresalen una secuencia de rocas detríticas de granulometría grueso (conglomerados), que se encuentran erosionando a las facies inferiores, sugiriendo hacia su parte somera un periodo de presencia de agua con alta energía, que permitió el depósito de (lluvias o deshielo). Sobre estos depósitos se han desarrollado suelos que varían de andosoles a luvisoles (Garduño-Monroy & Israde, 2004).

### **1.5. Geología estructural.**

En este apartado se presentan algunas fallas presentes en la región y una breve explicación de estos fenómenos. La zona de Morelia se encuentra entre dos provincias geológicas importantes y eso ha permitido, mediante estudios de mesoestructuras obtener una reconstrucción de los sistemas más importantes y de la cinemática de ellos. En las rocas de la Sierra de Mil Cumbres se encontraron estructuras importantes de orientación NO-SE, NE-SO y E-O, estas últimas formando parte del sistema de fallas Morelia-Acambay, que está compuesta de fallas normales que se extienden por más de 30 km, desde el estado de Michoacán hasta Querétaro (Garduño-Monroy & Israde, 2004). Muy regionalmente este sistema puede dividirse en dos sectores, uno conforma la depresión de Maravatío-Venta de Bravo donde las fallas normales no han generado un basculamiento importante. Otro sector se refiere al Cuitzeo donde el basculamiento es importante y va de unos 30° en la margen sur del lago de Cuitzeo a 10-5° en la zona de Morelia. Normalmente estas estructuras cortan a los sistemas NO-SE (Garduño Monroy, 1999).

El sistema de fallas más antiguo está representado con dirección NO-SE que se expresa en el corte de lavas e ignimbritas del Mioceno y en la formación del graben de Cuitzeo. Las fallas más recientes pertenecen al sistema de fallas Morelia-Acambay con dirección E-O las cuales ocurren en respuesta al campo de esfuerzos regional, que determina la distribución del vulcanismo actual en la zona de estudio (Cisneros, 2016).

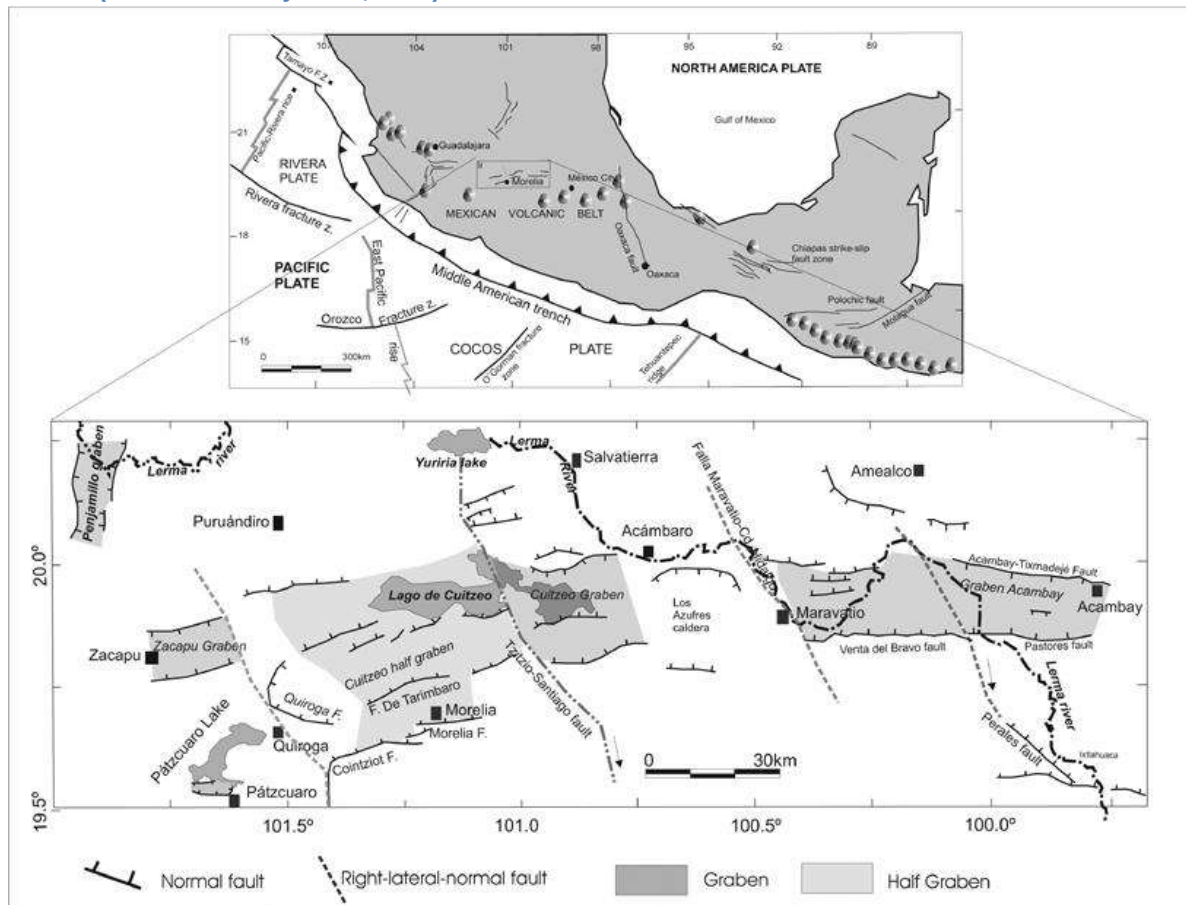
El sistema de fallas Morelia-Acambay (MAFS) consiste en una serie de fallas normales de dirección E-O y NE-SO que cortan la parte central del Cinturón Volcánico Transmexicano. El sistema de fallas se asocia a la formación de las depresiones lacustres de Chapala, Zacapu, Cuitzeo, Maravatío y Acambay. Las fallas E-O de MAFS aparecieron hace 7-9 millones de años durante Mioceno temprano. Las fallas NNO-SSE son más viejas y se han reactivado en el tiempo, desplazando y controlando a las depresiones lacustres E-O (Garduño-Monroy et al., 2009).

En el mapa estructural de la región que se muestra a continuación (ilustración 6), se observan las diferentes fallas, incluso zonas de graben.

Además, es importante mencionar que en la ciudad de Morelia se han reconocido dentro de la zona urbana y de norte a sur las siguientes fallas (Garduño-Monroy & Israde, 2004) :

- El Realito.
- La Soledad.
- La Colina.
- Central camionera.
- Cuautla.
- Torremolinos.
- Chapultepec.
- La Paloma.

Ilustración 6. Mapa de entorno tectónico regional entre Pátzcuaro y Acambay, incluyendo la ciudad de Morelia (Garduño-Monroy et al., 2009).



Por otra parte, en la ilustración 7 se observa el mapa geológico de Morelia, Michoacán y se pueden observar las diferentes secuencias de ignimbrita; mientras que en la ilustración 8, 9 y 10 se muestra dos trazas de perfil geológico que señalan la Caldera de Atécuaro, zona de donde fueron tomados los materiales para la construcción de los monumentos históricos de la ciudad.

Ilustración 7 Mapa geológico de Morelia, Michoacán escala 1: 150 000 (Elaboración propia con base a Israde Alcántara et al., 2009).

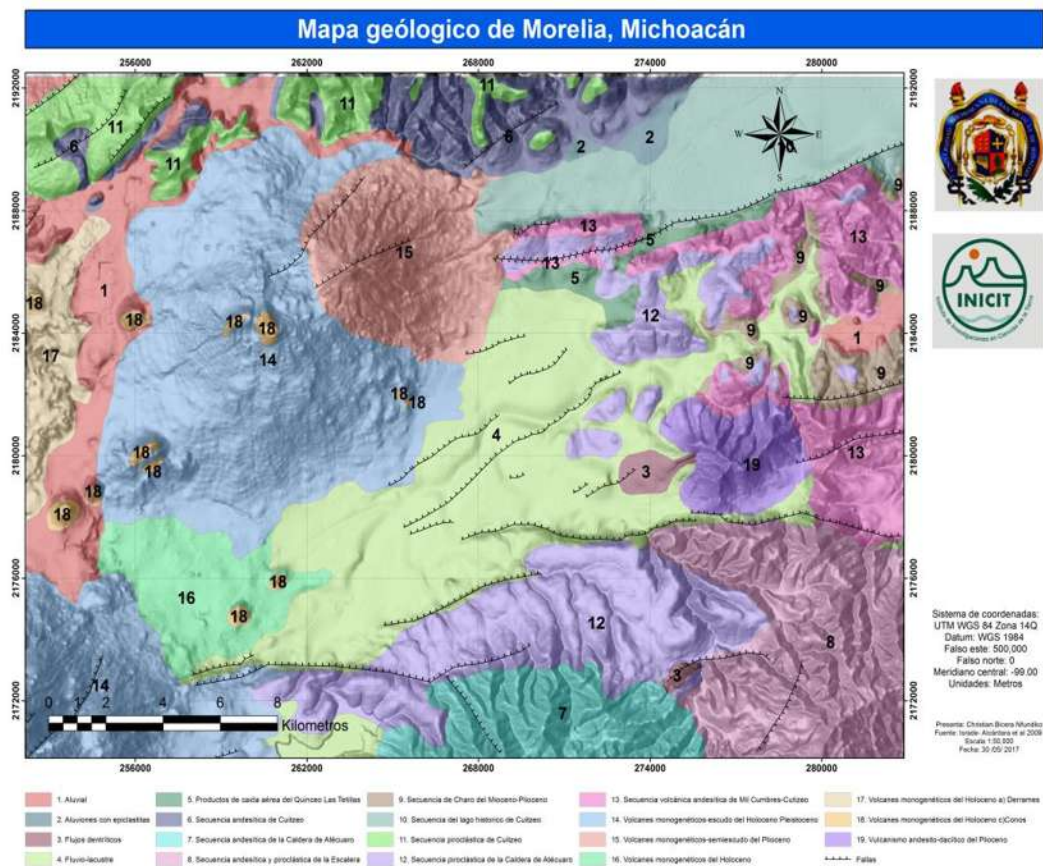
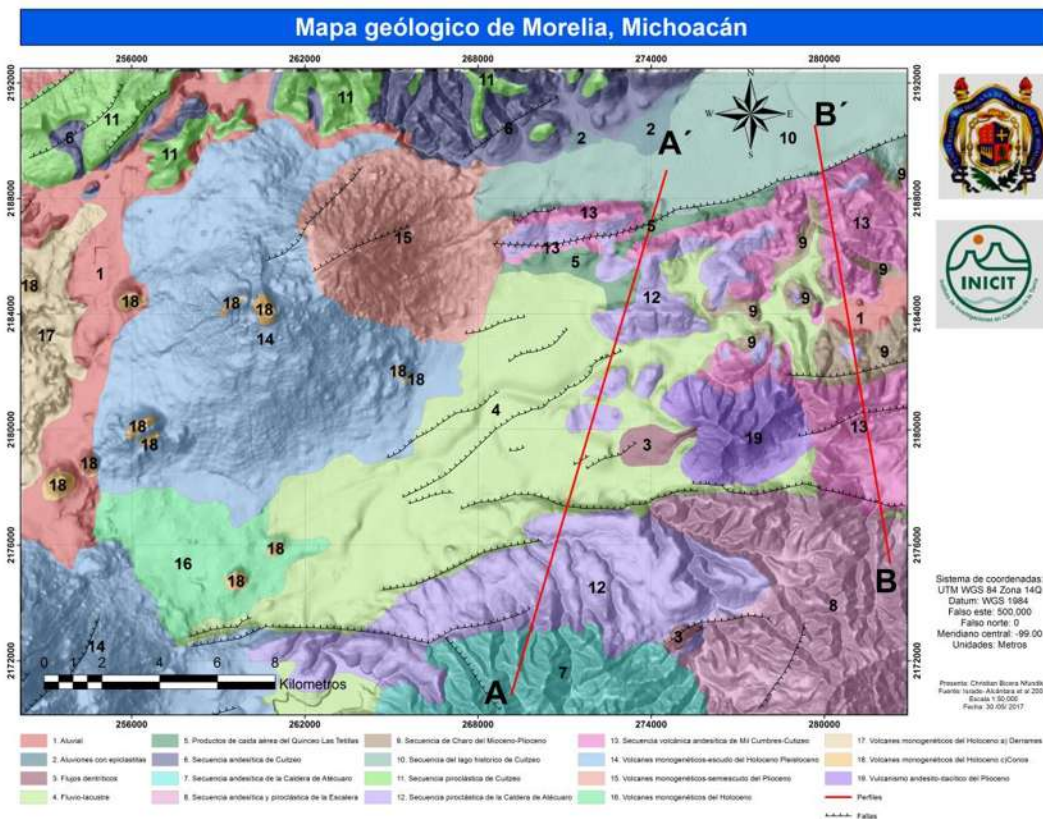
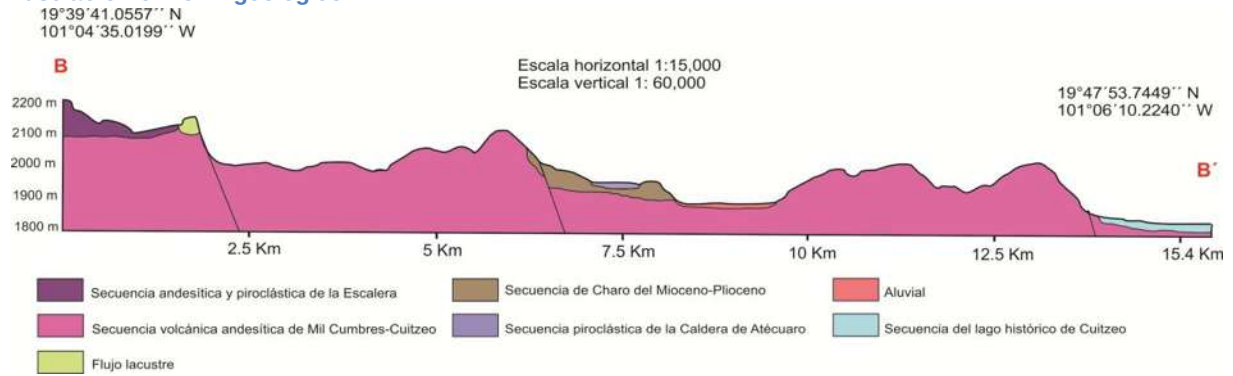


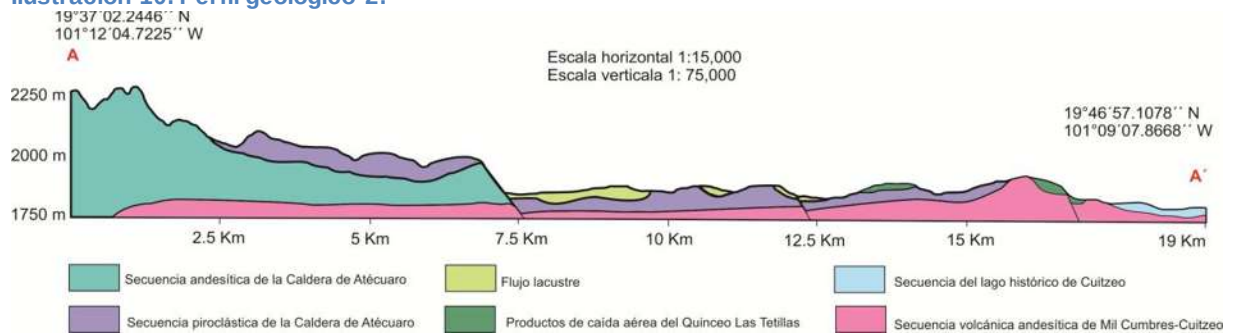
Ilustración 8 Mapa geológico de Morelia, Michoacán escala 1: 150 000 mostrando las trazas de dos perfiles geológicos (Elaboración propia con base a Israde Alcántara et al., 2009).



### Ilustración 9. Perfil geológico 1.



### Ilustración 10. Perfil geológico 2.



## Capítulo 2 Los monumentos históricos en Michoacán

### 2.1. Aproximación al concepto de monumentos históricos.

Los monumentos históricos han sido estudiados y definidos a partir de distintas disciplinas y campos del conocimiento, a continuación se otorgarán unos conceptos acerca de los momentos:

1. En la Carta Internacional sobre la Conservación y la Restauración de los Monumentos y los Sitios se estipula en su artículo 1 que la noción de monumento comprende tanto la creación arquitectónica aislada como el sitio urbano o rural que ofrece el testimonio de una civilización particular, de una fase representativa de la evolución o progreso, o de un suceso histórico. Se refiere no solamente a las grandes creaciones sino igualmente, a las obras modestas que han adquirido con el tiempo un significado cultural (UNESCO, 1964).

2. En la Ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, Artísticas e Históricas de México en su artículo 35 define como monumentos históricos los bienes vinculados con la historia de la nación, a partir del establecimiento de la cultura hispánica en el país, en los términos de la declaratoria respectiva o por determinación de la ley (Segob, 2015).

3. El Consejo de Monumentos Nacionales de Chile definen como monumentos Históricos los lugares, ruinas, construcciones y objetos de propiedad fiscal, municipal o particular que por su calidad e interés histórico o artístico o por su antigüedad, se han declarados como tales por decreto supremo, dictado a solicitud y previo acuerdo del Consejo (Dirección de bibliotecas, 2017).

Como se observa, cada país ha otorgado un valor y concepto diferente a los monumentos históricos; sin embargo, a nivel mundial es aceptada la política de recuperación de estos espacios por formar parte de la historia y la cultura.

## 2.2. Los Acueductos de México

En este apartado se recuerda que muchos de los Acueductos de México hoy en día ya no funcionan por falta de mantenimiento y otros, yacen en ruinas o son poco conocidos por encontrarse en lugares apartados.

A continuación se explican los principales que existen en México (Romeros, 2016):

### Los Acueductos de la Capital

Estos Acueductos se encuentran en la ciudad de México y fueron uno de los primeros en ser construidos antes de la conquista Española, tenían como objetivo surtir el agua potable desde los manantiales de Chapultepec. Estos Acueductos se caracterizaban por dos caños de argamasa, anchos y largos; uno traía agua dulce que se usaba para el consumo humano y el otro caño era vacío para que de allí se usara el agua para limpiar el caño que surtía el agua para la población. A la llegada de los españoles se realizó una modificación y una construcción de un nuevo acueducto con la mampostería y con un total de mil arcos; eso fue en los años 1620, aun así la población se quejaba de la insuficiente cantidad de agua y se reportó un mal funcionamiento de más de 40 arcos y finalmente, por falta de mantenimiento se derrumbó en 1889. Lo único que queda en el día de hoy son tres arcos, disfrazados de castillo en ruinas ubicadas por Chapultepec, se reporta que hubo un sustituto de este acueducto en el año de 1779, otro que traía el agua dulce de Chapultepec por la calzada y recorría una distancia de unos 4 kilómetros sobre 904 arcos de mampostería, hoy día ambos están dañados y no funcionan (Romeros, 2016).

### Los Acueductos de las viejas ciudades virreinales

Esos conjuntos de Acueductos se localizan en las ciudades de Morelia, Querétaro y Oaxaca. La idea de estas edificaciones surgió en Santiago de Querétaro.

Las construcciones surgieron por falta de agua en las ciudades antes mencionadas, por los que los pobladores tuvieran que ir a recoger el agua en los pozos o en los ríos a grande distancia, que al parecer no era de buena calidad.

De allí surgió la idea de construir un Acueducto en la ciudad de Querétaro aprovechando el manantial denominado el Capulín. Este acueducto mide 1280 metros de longitud, y corría sobre setenta y cuatro arcos de cantería, cuya altura máxima es de entre 20 y 23.5 metros; los arcos miden en promedio quince metros de ancho y con esta característica se repartía el agua a diez fuentes públicas en distintos rumbo de la ciudad. En los años 1785, el país tuvo escasez de alimentos y falta de lluvia y la mayor parte de la población se congregaron en la Valladolid de Michoacán (hoy Morelia) en búsqueda de alimentos y bienestar. En esta época Fray Antonio de San Miguel Obispo de la ciudad notó la presencia de muchas poblaciones sin trabajo y pasando necesidad, de allí decidió dar empleo para ganarse la vida a través de la construcción del Acueducto de Morelia (Romeros, 2016).

#### El Acueducto de Oaxaca

El Acueducto de San Felipe del Agua surtía agua a la ciudad de Oaxaca, se inició su construcción en el Siglo XVIII con cantera, material que es muy común en la zona; no se terminó su construcción por falta de recursos financieros y la mala ubicación de los caudales y por falta del servicio de alcantarillado. Por esta razón, los habitantes de Oaxaca tomaban agua con baja calidad y poco potabilizada, por lo que padecieron escasez de agua en los meses de marzo, abril y mayo de cada año (Romeros, 2016).

#### Los Acueductos de Guadalupe y Los Remedios en la zona Metropolitana del Valle de México

Estos Acueductos surgieron en el siglo XVII con la idea del Arzobispo Don Fray Payo Enríquez de Ribera, quien dio la idea de aprovechar el agua de río a través de tres surcos para abastecer a la ciudad de Guadalupe (Ciudad de México) que padecía de escasez de aguas y este Acueducto estaba compuesto por un caño, que según parece corría a flor de tierra y no tuvo mucho tiempo de vida. En 1747 se construyó otro acueducto con mampostería ubicado en el Santuario de Guadalupe con la característica de estar construido con doce mil novecientos treinta y cinco varas<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Es importante mencionar que una vara equivale actualmente a 0.83820168 metros <https://www.convertunits.com/from/vara/to/metro>

que tenía servicio de alcantarillado y como el agua tenía que venir de una gran distancia usaron dos mil arcos, pero con la humedad y falta de mantenimiento se fue destruyendo poco a poco.

El Acueducto de Remedios se encuentra en el Estado de México fue construido en el siglo XVIII hasta el momento se sabe que cuenta con una centena de arcos y dos extrañas torres que lo flanquean; la información con la que se cuenta es escasa porque no ha sido objeto de amplios estudios (Romeros, 2016).

### Los Acueductos de Cempoala y Xalpa

El Acueducto de Cempoala se encuentra ubicado en el estado de Hidalgo fue construido en el siglo XVI y se atribuye su construcción al Franciscano Fray Francisco Tembleque que se dio cuenta que su población le faltaba agua potable y lo realizó gracias a la presencia de los manantiales que se encontraba a poca distancia del lugar. El Acueducto se construyó, pues, como un amplio artejo de cal y canto que cruza en su trayecto tres barrancas, con una longitud 888 metros.

El Acueducto de Xalpa ubicado en el Municipio de Cuautitlán del Estado de México empezó a construirse en 1706 y su primer uso fue el 4 de noviembre de 1854; este Acueducto está caracterizado por poseer cuarenta y tres arcos, con un espesor de las paredes de los arcos de dos y medio metros, va aumentando hacia el fondo de la barrancas en donde mide seis metros, la longitud total de la arquería superior es de cuatrocientos treinta y ocho metros y su altura, en la parte que atraviesa la barranca, alcanza sesenta y un metros y fue construido por cal y canto (Romeros, 2016).

### **2.3. El Acueducto de Morelia.**

Desde los inicios de Morelia, el abasto del agua fue un problema constante y no porque no hubiese una fuente cercana del vital líquido, sino porque el sitio de la fundación estaba ubicado en la cima de la pequeña loma que se encuentra en el valle, aunque era una lomita de poca altura, la pendiente representaba un problema para el suministro del agua (Zamudio, 1995).

Intentando solventar este problema, al momento de la fundación se habría planeado la construcción de un vía para transportar agua. Y en efecto, el proyecto se llevó a la obra, la construcción que surtía del líquido vital a los pobladores de la nueva ciudad fue construido de adobe y pasto, lógicamente por el tipo de material constantemente sufría rupturas y descomposturas que derivaban en carencias de agua y constante gastos económicos (Ferreira, 2017).

Las primeras reparaciones importantes fueron hechas de canoas de madera tallada, por ser un material que se pensaba más durable; sin embargo, no era lo suficientemente resistente para evitar las continuas averías que siguieron acompañando la historia del abastecimiento de agua hasta principios del siglo XVIII.

En el inicio del siguiente siglo, específicamente en el año 1705, el Obispo de Michoacán, Don Manuel Escalante, ponderando las vicisitudes que ocasionaba el continuo problema de agua construyó, a expensas de sus arcas, un Acueducto de cantera para la ciudad que quedó finalizado entre los años 1728 y 1730, iniciando inmediatamente después la construcción de una cañería subterránea. El derrumbe de 30 varas de atarjea y de más de 22 arcos en 1748 no solo trajeron consigo la restauración de dicha obra, sino la revisión del estado en general en el que se encontraba, los arquitectos determinaron que por las malas condiciones y defectos de la obra, otros 53 arcos tenían que ser reedificados. En el año de 1788, se construyó una sección de más de 50 varas a lo largo del Acueducto (Zamudio, 1995).

Actualmente, el Acueducto de Morelia no transporta agua potable como estaba previsto en su diseño, ni tiene otro uso particular; sólo se conserva como parte de los monumentos históricos del primer cuadro de la ciudad de Morelia.

#### **2.4. Restauración de los monumentos históricos.**

Este apartado se inicia con algunas definiciones, mismas que se irán presentando desde las enciclopedias, hasta las emitidas por algunos estudiosos y especialistas

en la materia, cada uno de los términos servirá más adelante para explicar la propuesta de restauración.

Conservación: (del latín *conservatio*, -onis) Acción y efecto de conservar o conservarse (RAE, 2006a).

Conservar: (del latín *conservare*) Mantener algo o cuidar de su permanencia, sinónimo de preservar, guardar. Antónimo de deteriorar (Espasa, 1965).

Deteriorar (del latín *deteriorare*) Estropear, menoscabar, poner en inferior condición una cosa (RAE, 2006b).

Adentrarse al tema de la conservación y restauración de los monumentos históricos, se puede definir la conservación como el conjunto de actividades destinadas a salvaguardar, mantener y prolongar la permanencia de los objetos culturales para transmitirlos al futuro, es la actividad u operación que se realiza físicamente sobre el objeto cultural, destinada a salvaguardarlo, mantenerlo y prolongar su permanencia para transmitirlo al futuro (Berrio & Bellinger, 1984).

Cesare Brandi cuando aborda el concepto de la restauración preventiva nos dice que se entiende por restauración preventiva todo aquello que trata de evitar la necesidad de una intervención de restauración, y que por ello adquiere la misma importancia que la restauración efectiva. Hacia la restauración preventiva deberían dirigirse las autoridades encargadas de la conservación de las obras del arte (Brandi, 2011).

En este momento la conservación, cuya finalidad es la de preservar el objeto (bien cultural), forma parte de la dinámica socio-cultural de un grupo determinado, implicando con ella proporcionar continuidad al objeto y al testimonio histórico, tal como lo marca la Carta Internacional de Venecia 1964.

En el apartado anterior, referente a las definiciones, se menciona que es usual que adopten instantáneamente los términos de restauración y conservación; es necesario

aclarar que sus connotaciones son diferentes, y por ello, a continuación se presentan algunos tratamientos dados por diferentes autores a ambos conceptos:

Se entiende como restauración todo el proceso de que es objeto el monumento desde que inicia la investigación hasta la obra de intervención, de modo que se conserve y se puede transmitir al futuro. Se aclara que esta acepción del término implica al proceso completo (Azavedo, 1981).

También se entiende que la restauración debe limitarse solo a aquellos elementos que comprometan la buena conservación del objeto y no tener como finalidad embellecerlo, ya que no debe tener más ambición que retornarlo rigurosamente a su estado original o permitirle funcionar absolutamente como en sus primeros tiempos (Rinuy, 2014).

Por otra parte (Gilberte, 1997) dice que la restauración es una operación técnica cuyo objeto es prolongar la vida de una obra de arte al hacer más lento el proceso de deterioro que afecta a los materiales de los que está constituida. La restauración es también una operación crítica orientada a la obtención de un equilibrio entre dos requisitos: la honestidad histórica y el placer estético.

- La restauración interviene una vez que se han hecho los trabajos de conservación (Espinoza, 1981).

El patrimonio cultural en México está formado por el legado que nos dejaron nuestros antepasados, y que entendemos como bienes culturales, mismos que se constituyen como la memoria de la cultura.

La noción de monumento comprende las creaciones del intelecto humano en general y en particular las obras arquitectónicas, escultóricas y pictóricas que ofrecen el testimonio de una civilización, de una fase significativa de su evolución o de un suceso histórico (Secretaría del Patrimonio Nacional, 1975).

De acuerdo con la legislación mexicana, se consideran monumentos históricos los bienes inmuebles construidos en los siglos XVI, XVII, XIX y los bienes muebles que

se encuentren o hayan encontrado en ellos y hayan sido ejecutados en los mismos siglos (Dirección General de Obras en Sitios y monumentos del Patrimonio cultural, 1981).

La ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, e Históricas, establece tres tipos de monumentos:

- Monumentos arqueológicos: aquellos bienes muebles e inmuebles producto de culturas anteriores al establecimiento de la hispanidad en el territorio nacional.
- Monumentos artísticos: obras que revisten valor estético relevante. Salvo el muralismo mexicano, las obras de artistas vivos no podrán declararse monumentos.
- Monumentos históricos: son los bienes vinculados con la historia de la nación, a partir del establecimiento de la cultura hispánica en el país.

A lo largo de la historia las comunidades se han preocupado de conservar sus monumentos. Para ello, se han realizado trabajos de restauración y se ha formado organismos internacionales que se encargan de organizar y difundir los diversos trabajos de restauración en el mundo. Sin embargo, aún no existe un criterio definido a seguir pues en los trabajos de restauración que se han llevado a cabo se han seguidos diversos caminos. Se mencionarán algunos criterios de restauración y el cuidado que se han realizado anteriormente:

1. Primeramente la posición del francés, Eugène Emmanuel Viollet-le-Duce, en su libro *Teoría de la Arquitectura* manifestó que en la restauración y conservación de monumentos históricos, el restaurador debe intervenir como arquitecto, es decir, que se debe completar todo aquello que fue ideado y creado originalmente, con el objeto de devolverle su esplendor y carácter original (*Diccionario Razonado de la Arquitectura Francesa del siglo XI al XVII*, 1868).
2. En la teoría del restaurador, el inglés John Ruskin considera que todo monumento lleva inherente el espíritu artístico de su creador, lo que le imprime un valor de autenticidad único e irrepetible, supone así que el monumento representa un todo congruente y aunque pueden restituir los valores formales a los edificios, es imposible que se le restituyan los valores genuinos que el artista incorpora con sus sentimientos e intención a sus obras. Propone una

restauración que se enfoque a consolidar las ruinas en el estado que presenten, esta teoría es compartida por muchos restauradores, quienes prefieren sobre todo el valor de autenticidad del monumento. Transportando estas ideas a las idiosincrasias de los países de América Latina y particularmente de México, el problema sería considerando que muchos de los monumentos coloniales históricos-arquitectónicos, están incorporados de alguna manera en el desarrollo y diario vivir de las personas; pues en ellos frecuentemente se realizan diversas situaciones como la actividad política, el comercio y la educación, por lo que requieren forzosamente ser restaurados.

3. Existe también una posición intermedia o híbrida que propone que para la reconstrucción de edificios se debe de realizar una restauración de acuerdo a los valores regionales; dicha propuesta surge combinando ambas teorías, esto ha dado como resultado la reparación de varios monumentos que no han satisfecho ni a unos ni a otros restauradores. Las críticas más fuertes a los trabajos de restauración se han hecho precisamente a aquellos que han seguido a esta última corriente.

Como se observa, la restauración es más que un simple reacondicionamiento, o preservación de la obra, cualquier acción que se realice a algún monumento implica con el eterno conflicto entre las corrientes racionales y artísticas de la restauración, debido a que se trabaja con la memoria y acervo cultural de la humanidad (Carreón et al., 2004).

Por otro lado, es importante de tomar en cuenta los siguientes puntos de la Carta Internacional sobre la Conservación y la Restauración de Monumentos y Sitios que a continuación se enumeran (UNESCO, 1964):

**Artículo 9.** La restauración es una operación que debe tener un carácter excepcional. Tiene como fin conservar y revelar los valores estéticos e históricos del monumento y se fundamenta en el respeto a la esencia antigua y a los documentos auténticos. Su límite está allí donde comienza la hipótesis: en el plano de las reconstituciones basadas en conjeturas, todo trabajo de complemento reconocido como indispensable por razones estéticas o técnicas aflora de la composición

arquitectónica y llevará la marca de nuestro tiempo. La restauración estará siempre precedida y acompañada de un estudio arqueológico e histórico del monumento.

**Artículo 10.** Cuando las técnicas tradicionales se muestran inadecuadas, la consolidación de un monumento puede ser asegurada valiéndose de todas las técnicas modernas de conservación y de construcción cuya eficacia haya sido demostrada con bases científicas y garantizada por la experiencia.

**Artículo 12.** Los elementos destinados a reemplazar las partes inexistentes deben integrarse armoniosamente en el conjunto, distinguiéndose claramente de las originales, a fin de que la restauración no falsifique el documento artístico o histórico.

**Artículo 13.** Los añadidos no deben ser tolerados en tanto que no respeten todas las partes interesantes del edificio, su trazado tradicional, el equilibrio de su composición y sus relaciones con el medio ambiente.

## Capítulo 3 La ignimbrita, sus características generales

### 3.1. Origen y descripción petrofísica de la ignimbrita.

La ignimbrita o piedra de cantera de la ciudad de Morelia (Corona et al., 1997) no representa solamente el principal material de construcción de la antigua ciudad de Valladolid, pero representa hoy por hoy una tradición y un símbolo que le confiere su principal característica que le ha valido ser “la Ciudad Rosada de la Nueva España” y desde 1991 ser Patrimonio de la Humanidad (UNESCO, 1972). Por esta razón, se puede explicar el concepto de esta ignimbrita a continuación:

La ignimbrita o piedra de cantera de Morelia ha sido también comúnmente denominada como piedra pómez, toba riolítica o riolita; sin embargo, de acuerdo a sus características petrográficas, el término más adecuado corresponde al de una ignimbrita y mejor aún al de una ignimbrita riolítica.

Por su parte, Pola et al. (2016) dice que las ignimbritas exhiben comportamientos mecánicos complejos debido a una gran variedad en su soldadura, textura y características granulométricas.

Además, una ignimbrita es roca formada por el depósito y consolidación de ceniza y flujos piroclásticos producidos por una erupción de tipo “nubes ardientes”, este término incluye ya sea una toba soldada o no-soldada y la recristalización de flujos de ceniza (Bates & Jackson, 1984).

Si se observa con atención la definición anterior, podemos notar que emergen dos consideraciones sumamente importantes para entender la génesis de la Piedra de Cantera.

La primera consideración se refiere al hecho que los diferentes niveles de ésta hermosa piedra rosada fueron generados invariablemente a partir de un proceso caracterizado por una serie de explosiones volcánicas violentas y no de flujos

piroclásticos como se piensa siempre que se habla del vulcanismo (Bates & Jackson, 1984).

De hecho con base a esta primera consideración es posible imaginar con relativa precisión el escenario del Valle de Morelia hace unos 14 o 17 millones de años considerando algunos fechamientos radiométricos hechos en las ignimbritas de Morelia, que le asignan esta edad (Pasquerè, 1991).

Sin embargo, Gómez (2012) pone en duda el argumento sobre la presencia de un hiatus de actividad volcánica en la SMC en el Mioceno temprano-medio con los nuevos fechamientos de su estudio (entre 23 y 14 Ma).

Asimismo argumenta que la posición geográfica y edad de la SMC nos permite presentar más datos sobre la evolución del centro del país y la transición entre la SMO y el CVTM. La orientación NE-SO de la SMC, así como la emisión de las lavas andesítico-basálticas de las calderas de Atécuaro y La Escalera, y los complejos volcánicos de Indaparapeo y Garnica, entre 23 y 19.5 Ma, tienen las mismas características químicas de las lavas tipo SCORBA de la SMO, por lo que se favorece la hipótesis de que la SMC se parece químicamente a la SMO y que se formó a partir de la extensión NO-SE; lo cual indicaría la contemporaneidad al último periodo de actividad silícica de la SMO y al desprendimiento de la Placa Farallón.

Gómez (2012) se refiere a la complejidad e importancia de su nomenclatura desde el punto de vista geológico, ya que a pesar de que el término fue acuñado desde los trabajos de Marshall (1935), es claro que el término de ignimbrita ha sido usado con diversos significados debido a la imprecisión de la misma definición de origen que no permitió individuar bien las diferencias composicionales, genéticas y de granulometría.

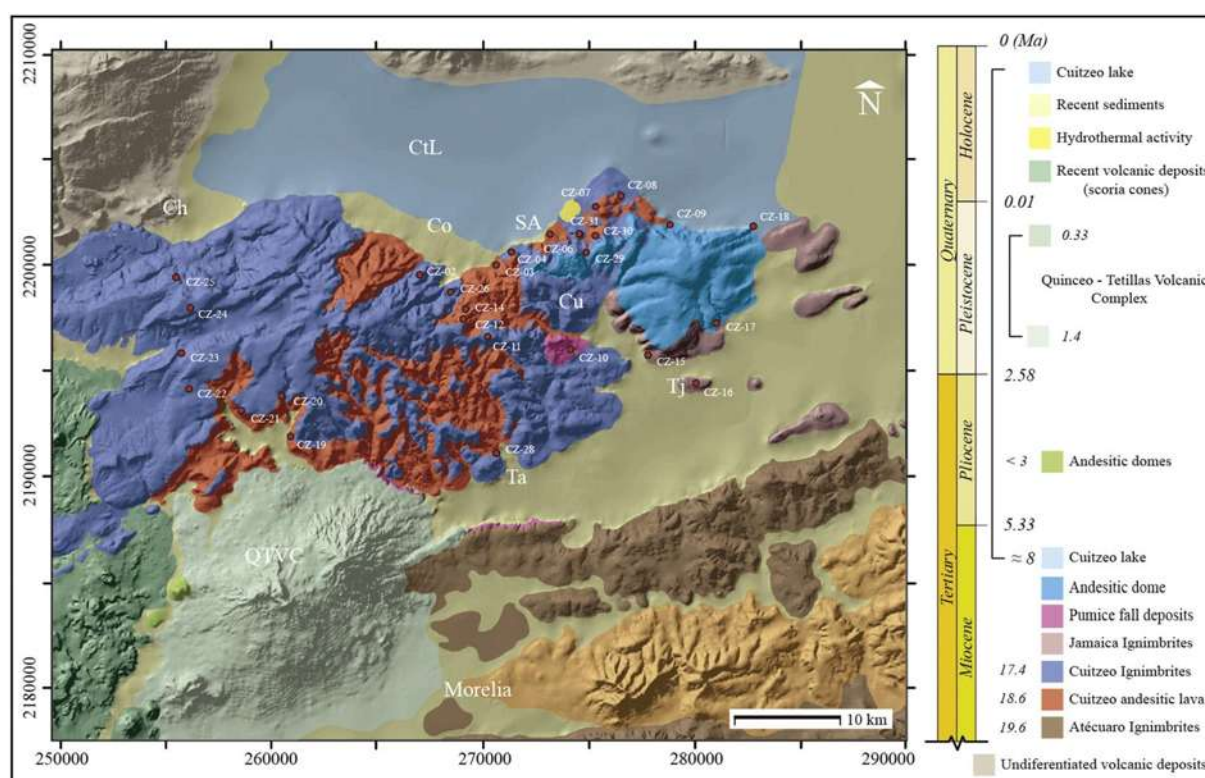
En cuanto a la composición y estructura, la ingnimbrita puede estar compuesto de pómez, cristales, clastos, líticos y una masa –o matriz- de vidrio anguloso (*shard glass*). Su estructura en campo puede ser masiva y pobremente clasificada (*pyroclastic flow deposits*) o bien puede ser estratificada, de grano fino y bien

clasificada (pyroclastic surge deposits), como en el caso de la Piedra de Cantera de Morelia (Walker, 1973).

Por otra parte, en cuanto a la diferenciación genética la ignimbrita es un depósito piroclástico o un cuerpo rocoso compuesto principalmente por material pumicítico que muestra evidencias del emplazamiento de un flujo de una concentración de partículas incandescentes que pudo haberse generado por diferentes tipos de erupciones y regímenes de depósito (Fisher & Schminke, 1984).

En la ilustración 11 se observan las distribuciones litológicas de las ignimbritas en las diferentes zonas de la región de Michoacán y sus edades respectivas.

**Ilustración 11.** Mapa geológico sobre un modelo sombreado de la relevación (DEM data with 20m cell resolution).



Los círculos rojos indican la ubicación de cada sección geológica descrita. La evolución temporal y la distribución espacial de cada depósito fueron asignadas por correlaciones estratigráficas (Israde-Alcántara & Garduño-Monroy, 1999; Garduño-Monroy et al., 2009; Gómez-Vasconcelos et al., 2015; Cisneros-Máximo, 2016).

Las abreviaturas son: CTL= Lago Cuitzeo; SA= San Agustín del maíz; TA= Tarímbaro; CP= Copándaro de Galeana; Cu= Cuto; TJ=Téjaro; QTV= complejo volcánico Quinceo-tetillas; CH= Chucándiro.

### 3.2. Origen de las ignimbritas.

En esta sección se explica la formación de las ignimbritas; sabiendo que las ignimbritas son flujos piroclásticos de piedra pómez derivados del derrumbamiento de una columna de tipo pliniana. Se caracteriza por presentar una gran cantidad de fragmentos piroclásticos y gas magnético (Carrara, 1997). La columna de erupción es mucho más densa que el aire circundante pero aun así, la columna volcánica se levanta a una altura de varios kilómetros debido a la fuerza de la explosión; sin embargo, al llegar a una altura, la energía que la sostiene, la velocidad de expansión y la fuerza de gravedad hacen que la columna colapse; la altura alcanzada y la densidad de la misma proporcionan la energía para su rápida dispersión radial del centro eruptivo del flujo piroclástico (Rittman, 1960). Al convertirse en un flujo automáticamente proporciona el mecanismo que transporta a grandes distancias el material piroclástico.

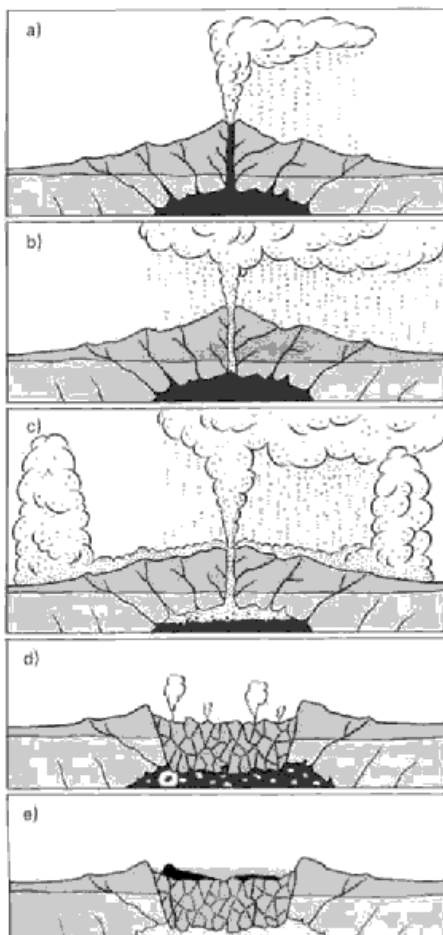
Las ignimbritas están asociadas a las calderas volcánicas, cuando un volcán entra en erupción puede vaciar su compartimento de magma debajo del edificio y debido a la presión litostática sobre el lecho de la cámara magmática llega a un momento en que excede la presión de la cámara magmática y colapsa sobre sí misma ocasionando una erupción con gran cantidad de material lítico, proveniente de lo que fuera el cono del volcán, mezclándose con una gran cantidad de vapor magmático y ocasionando un flujo piroclástico que inicia la formación de depósitos de ignimbritas. Tal fue el caso en la formación de la ignimbrita de Morelia, el proceso de formación de los bancos de la región está asociado al aparato volcánico denominado “caldera de Atécuaro” que se ubica a varios kilómetros al sur de la ciudad de Morelia y pertenece a la Sierra de Mil Cumbre (Carreón, 1999).

Es preciso tener claro que se llama caldera a una estructura que se genera sobre un volcán andesítico, el cual al entrar en erupción varía su comportamiento del magma derrumbando el edificio volcánico, el mismo es destruido en su parte somera y

dejando una depresión semejante a un cráter de más de 5 kilómetros de diámetro, que es lo que se conoce como nombre de caldera (Garduño-Monroy et al., 1999).

Los flujos piroclásticos se presentan cuando una columna pliniana colapsa, el material expulsado desciende por gravedad los flancos del volcán en forma de nube o flujo piroclástico. Un flujo piroclástico consiste en una masa de gas caliente, cargada de pómez, ceniza, fragmentos líquidos de lava y escombros (Kanen, 2001).

Este conjunto debe su movilidad y capacidad de avance a los gases que se liberan del material incandescente durante el transporte, posibilitando la distensión y el ascenso convectivo. La velocidad inicial puede alcanzar hasta 150m/seg (500km/h) y la extensión decenas de kilómetros (Ball, 2005).



**Ilustración 11. Proceso de formación de la caldera** (Buque-Escobar, 2016; Borsdorf, 2002).

- a. En un volcán del tipo andesítico.
- b. Ascenso de una cámara magmática, que hace que el aparato volcánico se expanda.
- c. El cono se hincha al máximo, se fractura y se altera por fluidos magmáticos, dejando escapar el magma en forma de nubes ardientes de flujos piroclásticos.
- d. y e. El depósito o cámara magmática se vacía y el volcán se derrumba sobre sí mismo produciendo una enorme flujo piroclástico y formando así la caldera (Buque-Escobar, 2016).

### **3.2.1. Minerales y elementos de las riolitas.**

Las riolitas son rocas ígneas de origen efusivo, de carácter ácido, de tipo granítico que han llegado a la superficie terrestre y en ocasiones revelan un

aspecto fluidal, de donde reciben su nombre. Presentan cristales de cuarzo alargados y alineados sobre una matriz ortoclasa (López, 1993).

Las riolitas son rocas con textura porfídica, con fenocristales de cuarzo, ortoclasa y plagioclasas sódicas en una matriz de grano fino, en ocasiones presentan micas y materiales ferromagnetismos. (Hurlbut & Cornelis, 1996)

Pueden presentar apariencias muy distintas que dependen del tipo de erupción y enfriamiento que hayan sufrido; así pues, pueden tener estructuras de fluidez (con líneas y bandas en rocas); estructuras porfídicas donde los cristales de cuarzo (con bordes corroídos) y los de feldespatos y la biotita (como único mineral máfico) se encuentran englobados en una masa o matriz vítrea, o bien tener un carácter hipocristalino (parte vítrea y parte cristalina) totalmente vítreo (como las obsidianas o la piedra pómez) (Hurlbut & Cornelis, 1996).

Los minerales más comunes de la riolitas son la sílice y los feldespatos. La sílice es el elemento más común en este tipo de rocas y en general de las rocas ígneas. Se presenta en la naturaleza como seis minerales distintos: cuarzo, calcedonia (variedad microcristalina del cuarzo), tridimita, ópalo, cristobalita, lechaterita (López, 1993).

En la zona predominan las rocas intermedias de composición andesítica y andesita-basáltica con contenidos de sílice entre 53.37% y 76.12% en peso compuestas por plagioclasa, olivino, clinopiroxeno y ortopiroxeno. En menor proporción ocurren rocas ácidas dacíticas compuestas por plagioclasa, piroxenos, cuarzo y hornblenda (Cisneros, 2016).

Como se observa en el trabajo de (Pola et al., 2016) muestra que en las propiedades petrofísicas existe una gran dependencia de las características texturales y particularmente sobre el contenido de los fragmentos de piedra pómez. En su trabajo se describe diferentes litofacies: en primer lugar las rocas pómez, clasificadas como lapilli-Tuff masivo, se compone prevalentemente de fragmentos de piedra pómez subredondeados y deformados de tamaño de 8mm apoyado en una matriz fino y de líticos densos; en segundo lugar, los lítica y pómez se compone de fragmentos líticos

subredondeados y vesiculadas (de color gris claro, negro, rojo) y piedra pómez (a partir del milímetro a un centímetro de tamaño), apoyado por una matriz de cenizas y en tercer lugar, se encuentran los líticos estratificado-lapilli que se compone de fragmentos líticos subredondeados, apoyado en una matriz de color marrón y presenta varias capas con grano de tamaño.

Este estudio se centra en la ignimbrita de Atécuaro (16.4Ma) porque durante el periodo colonial y post-colonial de la ciudad, los monumentos fueron construidos con estas rocas y también se utilizaron extensivamente como materiales de construcción.

Estas ignimbritas son flujos piroclásticos de pómez soldada que conforme el subsuelo de Morelia. Los depósitos están formados por ignimbrita aparentemente masiva, de color claro pero varía entre vino, rojo, naranja, rosa, gris y blanco tiene grado de soldamiento y compactación; la textura de las 4 unidades que comprende esta ignimbrita es eutaxítica (con fragmentos de vidrio aplastados) (Israde-Alcántara & Garduño-Monroy, 2004).

En la figura se aprecia la columna estratigráfica de compuesta de la secuencia de flujos piroclásticos de pómez de la caldera de Atécuaro (Gómez, 2012).

**Ilustración 12. La columna estratigráfica de la caldera Atécuaro.**



Gómez (2012) dice que estas rocas al ser observadas bajo el microscopio tienen una textura vitrocrystalina con pómez fibrosas y flares con altos niveles de desvitrificación (15-35%).

### 3.2.2. Usos de la ignimbrita

En este apartado se describen los diferentes usos de la ignimbrita; en primer lugar se deben decir que las propiedades de las rocas piroclásticas, su estructura, su ocurrencia y su forma actual depende de los escenarios volcánicos en que se formaron (Salazar, 2015).

Otra propiedad importante en la seleccionar un banco de material para el uso, será la localización y amplitud de exposición del afloramiento de la roca, ya que desde el punto de vista económico la cantera es un material relativamente barato, principalmente por su abundancia en cantidad y variedad.

Desde el punto de vista de su explotación y uso, la ignimbrita debe considerarse como un yacimiento mineral no metálico, ya que su composición química demuestra estar constituido casi en su totalidad por elementos y minerales no metálicos y tan solo insignificantes trazas de algunos elementos metálicos no económicamente explotables (Salazar, 2015).

El campo de aplicación de la ignimbrita dentro de la industria de la construcción, comprende su utilización como protector en diques, cortinas y obras hidráulicas, para mampostería, recubrimientos de fachadas de edificios y residencias, en la fabricación de pisos y adoquines, para fabricar gravas y arenas, etc.

Así entonces, quedan fuera de este contexto un grupo importante de rocas, cuya composición química y mineralógica (monominerálicas), les otorgue un campo de aplicación mucho más especificado, tal es el caso del yeso, anhidrita, sal gema, carbón, barita, fosforita, y algunos otros mantos minerales no metálicos (Salazar, 2015).

### 3.3. Identificación visual de las rocas ígneas y tabla de colores.

Los colores pueden ser convenientemente medidos a través de la comparación de un cuadro de colores. La colección de cuadros generalmente usada es una versión modificada de la colección que apareció en el libro de color Munsell incluye solo una porción de los suelos estudiados. Alrededor de una quinta parte de la gama completa de colores de esta edición. Los nueve cuadros de la colección de suelos muestran 322 colores estándares diferentes y se presentan acomodados de acuerdo con la especificación Munsell. Cada color tiene tres cualidades en sus atributos: matiz, intensidad y croma (Munsell, 2000).

Matiz: es un atributo de color por el cual distinguimos el rojo del verde, el azul del amarillo, etc. Hay un orden natural de matices: rojo, amarillo, verde, azul, púrpura. Uno puede mezclar las pinturas de colores adyacentes en esta serie para obtener una variación continua de un color a otro.

Intensidad: el valor indica la claridad de un color. La escala oscila entre el 0 (puro negro) y el 10 (puro blanco). El blanco, negro y los grises entre ellos se llaman “colores neutros”. Estos no tienen matiz. Los colores que tienen matiz se llaman “colores cromáticos”. La escala de valor se aplica a colores cromáticos, así como neutros.

Croma: es el grado de salida de un color del color neutro del mismo valor. Los colores de bajo croma son a veces llamados débiles mientras que los alto croma son llamados “altamente saturados”, “fuertes” o “vivos”.

### 3.4. Principales causas de la degradación de la roca

Las causas del deterioro de los materiales que forman monumentos pueden ser de dos tipos: externas o internas (Oyarzun & Higuera, 2017).

Las principales **causas externas** serían:

- **Agua:** la acción del agua sobre los minerales puede originar procesos muy diversos, tanto físicos (acción en cuña de ciclos hielo-deshielo); como químicos: disolución e hidrólisis de minerales, fundamentalmente. En el caso de los monumentos históricos, su acción se podrá ver potenciada por factores climáticos y de composición del aire, puesto que los componentes de éste pueden pasar al agua. A esto habría que agregarle que los minerales que son disueltos dan origen a otros, los cuales al cristalizar pueden originar presiones en el orden de los MPa (mega pascales). Un caso notable en este sentido es la epsomita, con una presión de cristalización de 290 MPa. No obstante, estas presiones son equivalentes a las que puede ejercer el hielo, de hasta 193 MPa.
- **Atmósfera:** los componentes atmosféricos pueden ser muy variados, y pueden en unos casos actuar directamente sobre los minerales (caso del ozono), y en otros aportar agentes que las aguas, o el propio vapor de agua que la atmósfera pueden incorporar, actuando sobre las rocas en forma líquida. En el caso de los monumentos históricos los principales contaminantes atmosféricos son: los óxidos de nitrógeno, carbono y azufre procedentes de la combustión de hidrocarburos, el gas metano emitido por los fertilizantes y la quema de bosques, y los gases de combustión liberados en la incineración de residuos sólidos.
- **Organismos vivos (biodeterioro):** la acción de los organismos sobre los monumentos puede ser muy variada e incluye desde fenómenos puramente físicos, como la acción de las raíces de plantas, que pueden introducirse por las grietas o por las juntas de las edificaciones, o afectar a las cimentaciones, o los efectos químicos o físico-químicos producidos por la acción de los excrementos de aves, o por la acción de líquenes o de bacterias.
- **Antropogénicas:** se incluyen aquí los factores relacionados con la acción del hombre, ya sea previamente a la instalación del material, o durante la misma (tipo de labra, tratamientos que reciba, cargas estructurales que se le apliquen, posición geométrica en que se dispongan, tipo de elemento arquitectónico, los suelos sufren efectos muy distintos que las paredes o las fachadas), o tras la misma (instalación de letreros). Por otra parte debemos incluir en este apartado el tráfico. Por un lado, favorece la presencia de contaminantes en la atmósfera, que resultan especialmente agresivos en el

ámbito urbano. Por otro, las vibraciones que se relacionan con el tráfico pesado pueden afectar a la estabilidad de las construcciones próximas.

- **Otros:** existen agentes externos de menor importancia como la acción del viento y de las temperaturas (o de sus variaciones extremas).

Por otra parte, tenemos las **causas internas**, propias de la roca que sufre el proceso o procesos correspondientes:

- **Mineralogía:** la composición mineralógica del material de construcción es siempre fundamental para explicar las transformaciones pueda sufrir, pues cada mineral presenta distintas susceptibilidades a los agentes externos descritos: unos son fácilmente solubles o hidrolizables, o sufren más la acción de los agentes atmosféricos, o se desgastan con mayor facilidad por presentar menor dureza. Por ejemplo, la calcita, un mineral presente en algunas rocas de construcción, o en el mármol, es fácilmente hidrolizable:  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$  y consecuentemente  $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^-$ . Por su parte, el dióxido de azufre atmosférico produce ácido sulfúrico, que reacciona con la calcita generando yeso.
- **Textura.** La disposición textural de los minerales puede afectar también a su comportamiento frente a la meteorización. Por ejemplo, las rocas de grano más grueso se degradan; en general, más rápidamente que las de grano más fino.
- **Tectónica.** El hecho de que una roca haya sufrido los efectos de deformación tectónica suelen implicar la aparición de diaclasas o microfracturas, que pueden ser prácticamente invisibles. Sin embargo, bajo la acción de cargas se manifiestan por fenómenos de rotura, que a su vez favorecen la acción de otros agentes externos, como la infiltración de soluciones.

## Capítulo 4 Trabajo de campo

### 4.1. Breve descripción del área de estudio.

El área de estudio se encuentra localizado al noroeste del Estado de Michoacán entre los paralelos 19°52' y 19°26' de latitud norte; los meridianos 101° 02' y 101° 31' de longitud oeste, a una altitud entre 1,500 y 3,000 metros. Colinda al norte con los municipios de Huaniqueo, Chucándiro, Copándaro y Tarímbaro; al este con los municipios de Tarímbaro, Charo, Tzitzio y Madero; al sur con los municipios de Madero, Acuitzio, Pátzcuaro y Huiramba; al oeste con los municipios de Huiramba, Lagunillas, Tzintzuntzan, Quiroga, Cuitzeo y Huaniqueo (INEGI, 2009).

El municipio cubre una superficie del 2.04% de la superficie del estado, con una extensión de planicie de 25 km de oriente a poniente y de 15 km de norte a sur.

La temperatura en la ciudad oscila entre los 12 a 22 °C variando de acuerdo a la época del año. La precipitación anual oscila entre los 600 - 1,500 mm. Para el año 2010 Morelia contaba con una población de 729 mil 279 habitantes. Los municipios que están más próximos a la ciudad son Tarímbaro y Charo al norte y al este, respectivamente (INEGI, 2009).

**Ilustración 13. Ubicación del área de estudio.**



## **Relieve local**

La superficie estatal forma parte de las provincias: Sierra Madre del Sur y Cinturón Volcánico Transmexicano. Desde el inicio de la zona costera ubicada en el suroeste hacia el nororiente, predominan las sierras con elevaciones como cerro La Bufa con 2 600 metro sobre el nivel del mar (msnm) y cerro La Magueyera con 2 120 msnm, conformadas por rocas sedimentarias (se forman en las playas, los ríos y océanos y en donde se acumulen la arena y barro), ígneas (la roca derretida se enfría y se solidifica) y metamórficas (han sufrido cambios por la presión y las altas temperaturas), interrumpidas por una llanura en donde se encuentra Apatzingán de la Constitución, que cuenta con algunas zonas bajas representadas por lomeríos y valles; en uno de ellos se construyó la presa Infiernillo; continuando hacia el nororiente existe la presencia de sierras, lomeríos y sierras de origen volcánico, con pequeñas llanuras y valles, en esta zona las elevaciones llegan a 3 840 msnm como el Cerro Pico de Tancítaro o el Volcán Parícutín con 2 800 msnm (INEGI, 2017).

## **Clima**

En el 54.5% del estado el clima es cálido subhúmedo, localizado en la planicie costera del pacífico y Sierra Madre del Sur, el 29% templado subhúmedo en eje neo volcánico, 15% seco y semiseco, localizado en las partes bajas y medias de la depresión del Balsas y Tepalcatepec, 1 % templado húmedo y el 0.5% cálido húmedo se presentan regiones altas del Cinturón Volcánico Transmexicano (INEGI, 2017).

La temperatura media anual es de 20°C, las temperaturas más baja se presentan en el mes de enero es alrededor de 8°C la temperatura máxima promedio es de 31°C y se presenta en los meses de abril y mayo.

Las lluvias se presentan durante el verano en los meses de junio a septiembre, la precipitación media del estado es de 850 mm anuales; los climas cálido y templado subhúmedo de Michoacán favorecen el cultivo de aguacate, siendo este estado, el principal productor a nivel nacional (INEGI, 2017).

## **Vegetación**

Existen esencialmente tres tipos de vegetación en la zona que se corresponden con la sub provincia fisiográfica a la que pertenecen (INEGI, 2009), mismas que a continuación se describen:

1. Subprovincia Neo volcánica Tarasco: forma bosques de pino-encino que ocupan un porcentaje importante de la subprovincia.
2. Subprovincia de las Sierras y Bajo Michoacano: está ocupada en su mayoría por agricultura, principalmente de temporal. Los tipos de vegetación más importantes son: matorral subtropical, bosques de encino y de pino, así como pastizal inducido.
3. Subprovincia de Mil Cumbres: Los bosques de pino ocupan una superficie importante en zona y se ubican principalmente al oeste. Se desarrollan principalmente en las sierras, aunque pueden también encontrarse en mesetas, lomeríos, valles o llanuras. Los bosques de encino ocupan una superficie menor, al igual que el bosque de oyamel, el bosque meso filo y la selva baja caducifolia.

De manera puntual, en el área de estudio predominan bosques inducidos de eucaliptos en alternancia con pequeños manchones de bosques remanentes de encinos.

## **Hidrografía**

La ciudad de Morelia se encuentra ubicada dentro de la región hidrológica Lerma-Santiago en la cuenca endorreica de Cuitzeo. En este tendencia nace el Río Chiquito, que es parte de la cuenca del mismo nombre, el cual se alimentaba por los arroyos La cuadrilla y Agua Escondida; más adelante se une con el arroyo el saletille y luego se une con el arroyo El Peral y Río Bello para finalmente unirse dentro de la ciudad de Morelia con el rio grande (Ortuño, 2009).

## **Desarrollo Urbano**

A finales del siglo XIX, entre 1882 y 1900, la ciudad mantuvo un crecimiento poblacional con tasa anual de un 2.5%. Entre 1900 y 1910, la tasa disminuyo a 0.7% (Cervantes-Sánchez & Dávila Munguía, 2001). En el periodo comprendido de 1940 a 1970 se dio una urbanización acelerada, la construcción de la carretera México-

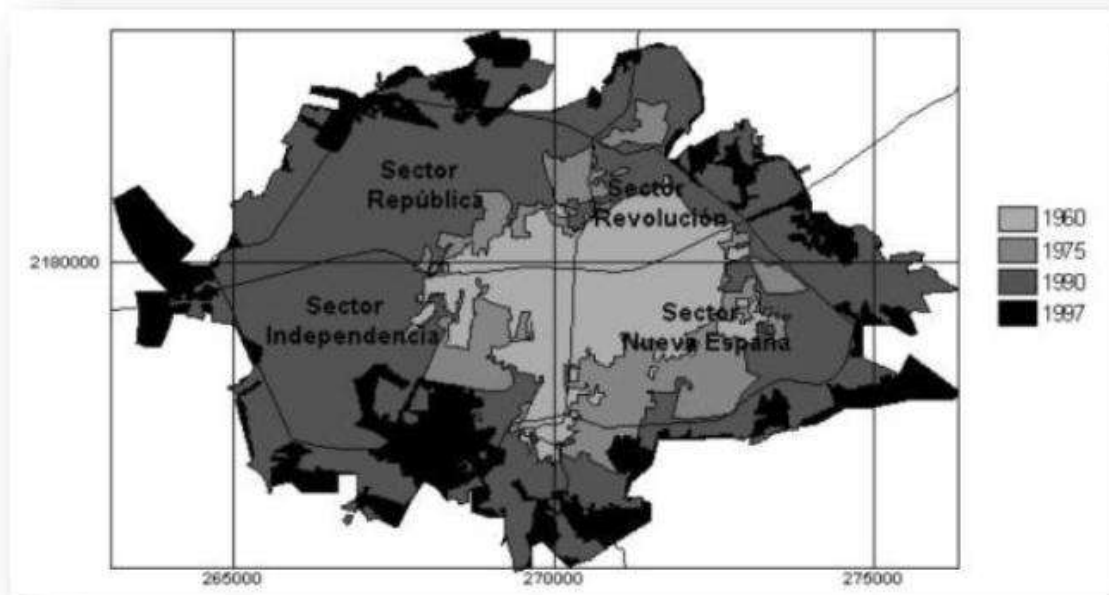
Guadalajara influyó de manera determinante en el crecimiento de la ciudad. En 1946 los cuarteles cambian su denominación por sectores, siendo cuatro: Independencia, República, Revolución y Nueva España (Cervantes Sánchez et al., 2001).

De 1950 a 1970 el área urbana aumentó de 725 ha en 1950 a 1,002 ha en 1960 y, a 1,377 ha en 1970; en 1958 la densidad de construcción se estableció en la zona Noroeste (ilustración 14). El número de colonias que surgieron de 1955 y sus siguientes diez años fueron las más importantes, se inició la urbanización de los pueblos de Santa María de Guido y de Santiaguito; así como otros ranchos y ejidos, en ese momento inicia la urbanización desordenada en términos de afectación a la anterior traza urbana; ahora crece solo como una mancha a la cual se integran colonias (Commons, 1973).

De 1970 a 1977 el área urbanizada se incrementa en 346 hectáreas, pasando de 1,377 hectáreas a 1,723 hectáreas. Para 1980 las zonas urbanas llegaban casi a las 1,900 hectáreas (Vargas Uribe, 2009). Entre 1980 y 1990 disminuyó la tasa de crecimiento de población de Morelia a 3.7%; sin embargo la población aumento de 297,544 a 428,486 habitantes. En 1983, el Congreso del estado de Michoacán aprobó el primer plan director de desarrollo urbano de Morelia, pero para 1987 el Ayuntamiento de Morelia autorizó la modificación del plan de 1983. En 1991, se procedió nuevamente a su actualización, para después quedar el municipio a cargo del ordenamiento de su territorio y ser la autoridad de los programas de desarrollo urbano (Cervantes Sánchez et al., 2001).

En el año de 1995, la ciudad tenía 615 mil 846 habitantes y para el año 2000 aumentó a 757 mil 416 personas. La tendencia de crecimiento predominante se muestra hacia el oeste y noroeste, así como al norte hacia el municipio de Tarímbaro (Cervantes Sánchez et al., 2001). En lo que respecta a la mancha urbana de los años 1960, 1975, 1990 y 1997, los cambios fueron en la superficie ocupada de la ciudad de Morelia al tener una superficie inicial de 1,004 ha en 1960 y de 5,972 ha en 1997, obteniendo un porcentaje de cambio del 600% (López, 1999).

Ilustración 14. Crecimiento de la mancha urbana de Morelia 1960, 1975, 1990 y 1997 (López Granados, 1999).



#### 4.2. Criterio de selección de muestras.

Después de varias salidas al campo de estudio, se procedió a la toma de muestras en las áreas donde se apreció un mayor deterioro de la ignimbrita; así como una mayor erosión y desgaste, de tal manera que total se recolectaron que cumplieron los diferentes requisitos:

1. Alto grado nivel de degradación en la roca ignimbrita.
2. Medio nivel de degradación de la roca ignimbrita.
3. Bajo nivel de degradación de la roca ignimbrita.

En los tres niveles de degradación fueron seleccionados porque se buscar comparar el diferente grado de deterioro que fueron alcanzados por la roca. Por otra parte, el afloramiento fue seleccionado porque el grado de deterioración de esta roca es mucho menor o nulo y reflejo todas las características de este tipo de roca sin alteración.

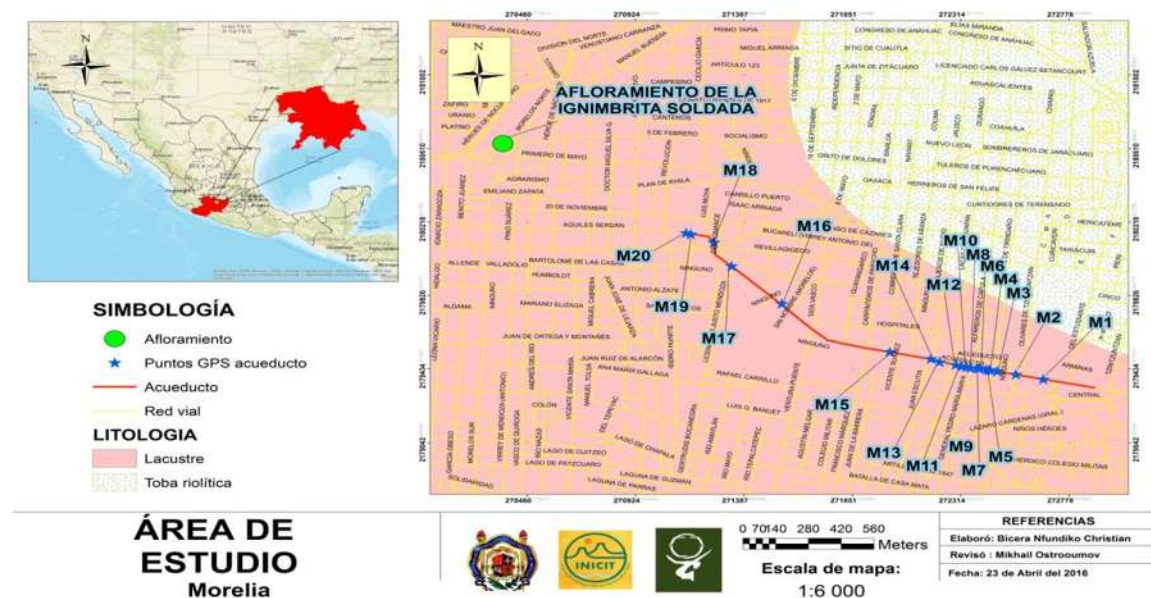
Ilustración 15. Inspección previa a la toma de muestra.



#### 4.3. Localización de la muestra.

En el siguiente mapa se observa el Acueducto de Morelia y específicamente los diferentes puntos que se utilizaron para tomar las 20 muestras y también la muestra del afloramiento.

Ilustración 16. Localización de la muestra (Elaboración propia).



#### 4.4. Permiso y obtención de muestras.

Para realizar cualquier investigación científica se requiere un procedimiento que siga una serie de pasos ordenados. En el caso de este trabajo, con fecha del 29 de enero del 2017, se elaboró una solicitud para el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) donde se exponía la solicitud de un permiso para la extracción de 20 muestras del Acueducto de Morelia de un tamaño de 20 gramos; en el escrito se precisó que durante la recolección de la muestra no se dañaría el monumento ya que el procedimiento no es de carácter invasivo.

#### 4.5. Breve descripción de materiales

En este capítulo se describe desde el punto de vista macroscópico la ignimbrita del Acueducto de Morelia y del afloramiento que se utilizará para realizar los análisis del laboratorio. Hay que señalar que los colores fueron identificados según la tabla de colores de Munsell (2000).

**Tabla 3 Descripción macroscópica de la ignimbrita de Morelia y del afloramiento.**

| MUESTRAS DEL<br>ACUEDUCTO Y<br>AFLORAMIENTO | COORDENADAS |         | DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA                                |
|---------------------------------------------|-------------|---------|---------------------------------------------------------|
|                                             | X           | Y       |                                                         |
| 1                                           | 272666      | 2179380 | Ignimbrita de color rosa clara (5YR/7/1), poca soldada. |
| 2                                           | 272550      | 2179406 | Ignimbrita de color beige(10R/7/2) , poca soldada       |
| 3                                           | 272470      | 2179423 | Ignimbrita de color rosa pálido (5YR/8/2), poca soldada |
| 4                                           | 272439      | 2179428 | Ignimbrita de color café (2.5YR/7/1), poca soldada      |
| 5                                           | 272435      | 2179430 | Ignimbrita de color gris(GLEY2/6/10B/), soldada         |
| 6                                           | 272423      | 2179431 | Ignimbrita de color café (2.5YR/7/2), poca soldada      |
| 7                                           | 272393      | 2179439 | Ignimbrita de color rosa rojiza (5YR/7/3), soldada      |
| 8                                           | 272383      | 2179440 | Ignimbrita de color café (2.5YR/6/3), poca soldada      |

|              |        |         |                                                          |
|--------------|--------|---------|----------------------------------------------------------|
| 9            | 272354 | 2179441 | Ignimbrita de color gris claro(10R/8/1/), poca soldada   |
| 10           | 272338 | 2179445 | Ignimbrita de color rosa rojiza (5YR/7/3/), poco soldada |
| 11           | 272317 | 2179449 | Ignimbrita de color gris claro(10R/8/1/), soldada        |
| 12           | 272293 | 2179457 | Ignimbrita de color beige(5YR/7/1/), poco soldada        |
| 13           | 272223 | 2179472 | Ignimbrita de color rosa claro (5YR/8/1/), soldada       |
| 14           | 271140 | 2180160 | Ignimbrita de color café (2.5YR/8/2/), poco soldada.     |
| 15           | 271160 | 2180153 | Ignimbrita de color gris(10R/7/2/), poca soldada         |
| 16           | 271259 | 2180109 | Ignimbrita de color gris claro(10R/8/1/), poca soldada   |
| 17           | 271334 | 2179983 | Ignimbrita de color beige(10R/6/1/), poco soldada        |
| 18           | 271549 | 2179783 | Ignimbrita de color café (2.5YR/8/1/), poca soldada      |
| 19           | 272011 | 2179526 | Ignimbrita de color beige (5YR/7/3/), poca soldada       |
| 20           | 272187 | 2179489 | Ignimbrita de color café (2.5YR/7/1/), poca soldada      |
| AFLORAMIENTO | 270356 | 2180637 | Ignimbrita soldada de color rosa claro (5YR/7/1/)        |

A continuación se muestra gráficamente las diferentes muestras del Acueducto y del afloramiento.

**Ilustración 17. Ejemplo de la ignimbrita beige (5YR/7/1/) de Morelia.**



En esta foto se puede observar macroscópicamente una ignimbrita beige (5YR/7/1/), poco soldada.

**Ilustración 18. Ejemplo de la ignimbrita café (10R/6/1/).**



En esta foto se puede observar macroscópicamente una ignimbrita café (10R/6/1/), poco soldada.

**Ilustración 19. Ejemplo de la ignimbrita rosa claro (5YR/7/1/).**



En esta foto se puede observar macroscópicamente una ignimbrita rosa claro (5YR/7/1/), soldada.

## Capítulo 5 Descripción de las técnicas analíticas.

### 5.1. Método de Difracción de Rayos X.

El equipo que se utilizó para realizar los análisis de Difracción de Rayos X se llama Difractómetro D2 Phaser, segunda generación y es de la Marca Bruker. Este método se basa en la difracción de un haz de rayos X que inciden sobre cristales del material analizado. Permite obtener una información detallada sobre la cristaloquímica de los minerales; así como, la composición de las fases minerales en diferentes sustancias y formaciones naturales.

Se realizó la preparación de las muestras mediante el método de polvo con tamaños de grano de entre 10 y 40  $\mu\text{m}$ ; se pesaron 0.5 gramos de muestra y se colocó en tubos capilares de vidrio. Estos se introdujeron al difractómetro D5000, con espejo Gôebel para muestras no planas, con cámara de alta temperatura de hasta 900 °C y con un generador de Rayos X.

El ordenador se controla las condiciones de medida obteniéndose así que del difractograma, y finalmente, con el Software EVA Plus se identificaron las fases mineralógicas presentes en cada una de las muestras. El diagnóstico y estudio cristaloquímica de los minerales por DRX consiste en identificar todas las fases cristalinas que contienen las sustancias minerales analizadas. Cada fase cristalina está dando un difractograma individual que se caracteriza por las posiciones e intensidades bien definidas de los máximos o líneas reflejadas.

Por eso, el conjunto registrado de los rayos X reflejados por diferentes ángulos  $\Theta$  de alguna sustancia cristalina es la constante de esta sustancia independientemente de la composición de la mezcla mineral y de la morfología de los individuos minerales.

Sabiendo que con el ángulo inicial del registro y su escala se calculan las posiciones exactas de los máximos y por las tablas especiales se determinan las distancias interplanares ( $d$  en Å o nanómetros) (Ostrooumov, 2009). Cuando un haz de rayos X incide en un material sólido, parte de este haz se dispersa en todas direcciones a causa de los electrones asociados a los átomos o iones que encuentra en el

trayecto, pero el resto del haz puede dar lugar al fenómeno de difracción de rayos X, que tiene lugar si existe una disposición ordenada de átomos y si se cumplen las condiciones que vienen dadas por la ley de Bragg que relaciona la longitud de onda de los rayos X y la distancia interatómica con el ángulo de incidencia del haz difractado. Si no se cumple la ley de Bragg, la interferencia es de naturaleza no constructiva y el campo del haz difractado es de muy baja intensidad. Fueron descubiertos por Roentgen en 1895 y posteriormente, Von Laue fue el primero en utilizarlos en monocristales para obtener patrones de difracción, por lo que la aplicación fundamental de la DRX es la identificación cualitativa de la composición mineralógica de una muestra cristalina. Los rayos X al ser irradiados sobre la muestra a analizar se difractan con ángulos que dependen de las distancias interatómicas. Para ello es aplicable la ley de Bragg:  $n\lambda = 2d \cdot \sin \Theta$ , en la que “d” es la distancia entre los planos interatómicos que producen la difracción (Ostrooumov, 2009).

**Ilustración 20. Difractómetro D2 Phaser**



## **5.2. Método de Fluorescencia de Rayos X.**

El equipo que se utilizó para los análisis de fluorescencia de Rayos-X se llama Espectrómetro de Rayos-x modelo S8 TIGER de la marca BRUKER. El sistema S8 TIGER es un espectrómetro de dispersión por longitud de onda disponible en tres variantes:

- La variante de base S8-1 KW con un máximo de 50 kV y 50 mA. Esta variante puede utilizarse sin sistema de refrigeración externo.
- La variante S8-3 KW del rango medio de performance con 60 kV y 150 mA. La tensión más alta permite el análisis mejor de los elementos pesados.
- La variante high-end S8-4 kW. La alta tensión máxima está también 60 kV, pero la corriente del tubo puede aumentarse a 170 mA. Esta característica única en el mercado permite tiempos de medida más cortas para el análisis de los elementos ligeros.

Las tres variantes de sistema tienen la misma configuración estándar (Bruker A X, 2009).

Primero, la muestra se prepara en un mortero de ágata y luego se pulveriza hasta obtener un material homogéneo para posteriormente enviarlas al laboratorio.

En el laboratorio, las muestras están sujetas a una radiación en el espectrómetro, excitada con una alta tensión de hasta 60 kV<sup>1</sup>. Los mejores límites de detección para los elementos ligeros se realizan con medidas en vacío, líquidos y polvos sueltos pueden medirse también en modo de nitrógeno o helio.

El haz del tubo de rayos X choca con la muestra y provoca la fluorescencia de rayos X, los elementos individuales de la tabla periódica tienen una fluorescencia de rayos X característica. Para generarla, la energía del haz primario tiene que estar más grande que la radiación de excitación característica.

En fluorescencia de rayos X “la huella dactilar” de cada elemento, es captada por los detectores del S8 TIGER. Las intensidades medidas se utilizan para determinar las concentraciones elementales. La utilización de esta técnica fue muy importante porque nos da información cualitativa y cuantitativa de la composición elemental de cada una de las muestras.

La determinación de las concentraciones en porcentaje de los óxidos (SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), se obtuvieron a través de un

Espectrómetro previamente calibrado con muestras internacionales de referencia geoquímica, previo al análisis de elementos mayores (Ostrooumov, 2009).

En el laboratorio de FRX se dispone de un espectrómetro secuencial de rayos X equipado con tubo de rodio y ventana de berilio de 125 micras, utilizado en la determinación de elementos mayores (Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K y P) de muestras de rocas, minerales, sedimentos y suelos.

Los errores estimados en las determinaciones son menores a 1% en elementos mayores. En todos los casos, las curvas de calibración han sido construidas con estándares emitidos por instituciones de reconocido prestigio internacional.

El análisis de elementos mayores ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), se realiza en muestra fundida (perla). Las perlas son preparadas mezclando 1 g de muestra en polvo con 9 g de mezcla fundente  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ - $\text{LiBO}_2$  (50:50 wt%). La solución de LiBr actúa como agente no-mojante, favoreciendo que la perla se despreque del molde durante el proceso de enfriado. Como complemento del análisis de elementos mayores, se requiere determinar la pérdida por calcinación (PXC), lo cual se hace calentando a  $1000^\circ\text{C}$  por una hora, un gramo de muestra en “base seca”, en un crisol de porcelana y dejando enfriar lentamente la muestra hasta temperatura ambiente para obtener el peso total calcinado (Bruker A X, 2009).

**Ilustración 21. Espectrómetro A Rayos-X modelo S8 TIGER**



### 5.3. Método de Espectroscopia Infrarroja (EIR).

El equipo que se utilizó para el Espectroscopia Infrarroja se llama Espectrómetro de FT-IR el modelo es TENSOR 27 y la marca es BRUKER y la serie es T 27.0680.04 el Rango es de  $4000-400\text{ cm}^{-1}$ . El equipo está controlado por un PC, con software (OPUS) desarrollado por el proveedor y que es compatible con Windows. El componente básico del que consta un espectrofotómetro de IR, que permite medir la absorción de radiación infrarroja por parte de las moléculas, son: la fuente monocromador, detección, registrador, porta muestras. La técnica tiene muchas ventajas, por ejemplo nos da el espectro más rápido a comparación de las otras técnicas analíticas utilizada en esta investigación y tiene más aplicaciones ya que se puede usar en materia orgánica o inorgánica, como los minerales.

Para estos análisis se prepararon las muestras, primeramente utilizando el método de polvo donde se pulverizó la muestra en un mortero de ágata, hasta obtener un tamaño de grano de  $35\text{ }\mu\text{m}$ . Después las muestras se deben de meter en un horno donde se quita toda la humedad, el procedimiento durante una hora.

Luego se pesaron  $3 \times 10^{-3}\text{ g}$  de sedimento y se mezcló con  $3 \times 10^{-1}\text{ g}$  de Bromuro de Potasio (KBr), cuyas bandas no interfieren con las de la muestra analizada; posteriormente, se colocaron en un dado metálico y éste se prensa a una presión de 20 toneladas durante un minuto para formar una pastilla, que posteriormente se colocó en el espectrómetro de infrarrojo; el cual realiza un espectrograma para cada muestra analizada, haciendo correcciones para agua  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{CO}_2$  atmosférico. La absorción de radiación infrarroja por moléculas está asociada a cambios en los estados vibraciones y/o rotacionales.

Los modos de vibración de una molécula incluyen deformaciones tipo tracción (elongación) compresión y bandeo. La finalidad de las aplicaciones de la Espectroscopia Infrarroja es la determinación de los grupos funcionales que contiene un determinado mineral, a partir del estudio de los espectros de absorción/transmisión/reflexión en la región espectral determinada. En el campo mineralógico, la EIR permite obtener datos nuevos e importantes sobre las sustancias minerales; así mismo, permite resolver las siguientes tareas mineralógicas:

- Identificación de las sustancias mineralógicas (especies y variedades).
- Estudio cualitativo y cuantitativo de las mezclas minerales.
- Estudio de las particularidades cristaloquímicas ( $\text{SiO}_4$ ,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{PO}_4$ ,  $\text{CH}_2$ , por la cantidad y posición de las bandas de absorción.
- Estudio de isomorfismo y polimorfismo.
- Determinación de las particularidades estructurales (el grado orden-desorden de estructura y deformación de los poliedros).
- Estudio del grado de cristalinidad y de las sustancias amorfas.
- Estudio de transformaciones en los procesos de calentamiento y diferentes reacciones químicas (formación de una nueva sustancia, mezcla de fases, productos intermedios, disociación) (Ostrooumov, 2009).

Así pues, el paso de los rayos infrarrojos a través de las sustancias origina la excitación de los niveles vibratorios de las moléculas. Si la frecuencia de la radiación infrarroja coincide con la frecuencia de vibración de la molécula, entonces ocurre la absorción de la energía, por lo cual la molécula pasa de un estado vibratorio a otro superior. Esto origina la formación de la banda de absorción en el espectro, la cual se caracteriza por una configuración, intensidad y frecuencia o longitud de onda (Bruker, 2016).

Ilustración 22. Espectrómetro FT-IR



#### 5.4. Método de Espectrometría Raman.

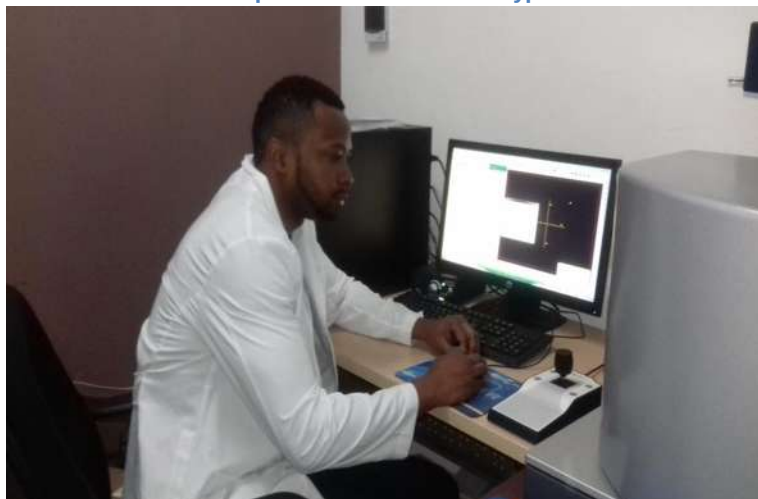
El método de la espectrometría Raman últimamente se utiliza en diferentes investigaciones mineralógicas y gemológicas. Esta técnica no es destructiva es decir no exige ninguna preparación especial de las muestras naturales y al mismo tiempo rápida y muy sensible (Ostrooumov, 2012a).

En particular menciono unos ejemplos del uso de la Espectroscopia de Raman (ER) en Ostrooumov (2012b):

1. Investigaciones cristal químicas (centros de color de lapislázuli, orden-desorden en las estructuras, estudio de los microcristales con los tamaños hasta 100 Å, politipos, soluciones sólidas, transformaciones de fases, etc.),
2. Análisis de fases de minerales (por ejemplo, identificación de los compuestos en soluciones sólidas),
3. Estudio de las inclusiones (sólidas, fluidas, gaseosas),
4. Identificación de los minerales y sus variedades,
5. Cálculo de los constantes termodinámicos de los minerales,
6. Origen del color de minerales,
7. Estudios de polimorfismo, politipos, transformaciones de fases,
8. Caracterización de defectos y estructura interna de minerales,
9. Estudios de los microcristales hasta 100Å.

Es conocido que la resolución de un microscopio está limitada por la longitud de onda de la radiación empleada. Así por ejemplo, la resolución de un microscopio óptico es alrededor de 0.2 micras que representa el límite práctico de tales instrumentos. La búsqueda de instrumentos más poderosos condujo al empleo de electrones en lugar de luz visible. Los electrones pueden poseer longitudes de onda del orden de nanómetros y en la diferencia de rayos X (y gamma) se focalizan fácilmente con ayuda de lentes magnéticos (Ostrooumov, 2009)

Ilustración 23. Espectrómetro RAMAN Type: Senterra.



### 5.5. Método de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).

El equipo utilizado para este análisis se llama Microscopía Electrónica de Barrido de modelo GOEL JSM-7600F. Este equipo (GOEL JSM-7600F FEG-SEM) combina dos tecnologías probadas –un electrón columna con detectores semi-en-lente y una en la lente Schottky pistola de emisión de campo para ofrecer una resolución ultra alta combinada con una amplia gama de corrientes de sonda para todos Aplicaciones (1pA a más de 200 nA). El JSM-7600F integra con éxito un conjunto completo de detectores que lo hacen ideal para: nanotecnología, ciencia de materiales, biología, microscopía, litografía y análisis estructural y de composición (EDS, EBSD, WDS, CL, etc.) (Redigolo, 2015).

La MEB es una técnica del estudio topográfico de la superficie de los cuerpos sólidos (en particular, minerales y rocas), que sirve como soporte visual para otros análisis. La espectrometría por dispersión de energía de rayos X, combinada con la MEB, permite conocer los elementos químicos que se encuentran en las muestras analizadas y obtener los datos sobre su concentración.

Para este análisis se utilizó una cantidad mínima de sedimento que fue colocada en un porta muestras cilíndrico de cobre de 15mm de largo por 5mm de diámetro; posteriormente, fueron metalizadas con cobre (Cu), para proceder a su respectiva observación y determinación de un microanálisis químico elemental.

Las ventajas de los microscopios electrónicos de barrido son las siguientes:

- Posibilidad de observación directa de las muestras masivas sin una preparación especial. Sólo en el caso de los dieléctricos, cuando el material estudiado no es un conductor, se hace una evaporización de las muestras con una capa fina conducida de metal (oro, plata) o de carbón con el espesor 200 Å (sin esta operación en la superficie aparece una carga, que influye sobre la pantalla).
- Caracterización completa de la estructura de las muestras voluminosas ya que la imagen se diferencia por la profundidad grande de penetración, la cual es 100 veces más que la de los microscopios ópticos. El campo de observación es bastante grande (Ostrooumov, 2009).

Ilustración 24. Microscopio Electrónico de Barrido GOEL JSM-7600F.



## Capítulo 6 Resultados y análisis

En este capítulo se mostrarán los resultados y el análisis respectivo de las muestras tomadas en el Acueducto de Morelia y en el afloramiento UTM zona 14N:270356 y 21480637, es decir la zona ubicada en el centro de Morelia; se muestran las cinco técnicas analíticas utilizadas en esta investigación.

### 6.1. Resultado de Difracción de Rayos X.

Se realizaron 23 análisis de difracción, de las cuales 20 pertenecen al Acueducto de Morelia y tres al afloramiento ubicado en las coordenadas UTM zona 14N:270356 y 21480637 (zona centro de Morelia). Se pueden observar a través de los resultados de los difractómetros del Acueducto de Morelia la presencia del feldespatos de diferente naturaleza (sanidina y plagioclasas de composición ácida–media = oligoclasa–andesina), y tres formas cristalinas de sílice (cuarzo, cristobalita y tridimita).

Por otra parte, en las muestras número 8, 9 ,13 ,14 y 18 (del Acueducto) se detectó la presencia del mineral llamado montmorillonita. Así mismo, se observó la presencia de nuevas fases minerales (llamadas neo formaciones), entre estos minerales llama la atención la formación de sulfatos y carbonatos de calcio: yeso, calcita y muy rara vez ankerita; dichos resultados se pueden observar en las muestras número 6 ,7 y 18 del Acueducto.

A continuación se presenta los resultados de los difractómetros de cada una de las muestras y sus respectivas interpretaciones:

Ilustración 25 Resultados de los análisis de DRX. Las especies minerales están abreviadas: M. #AC= Numero de muestra del Acueducto, M. #AF= Numero de muestra del Afloramiento, Qz = Cuarzo, Crs=Cristobalita, Td=Tridimita, Sa=Sanidina, Ab = Albita, Ad=Andesina Ak=Ankerita, Hl = Halita.

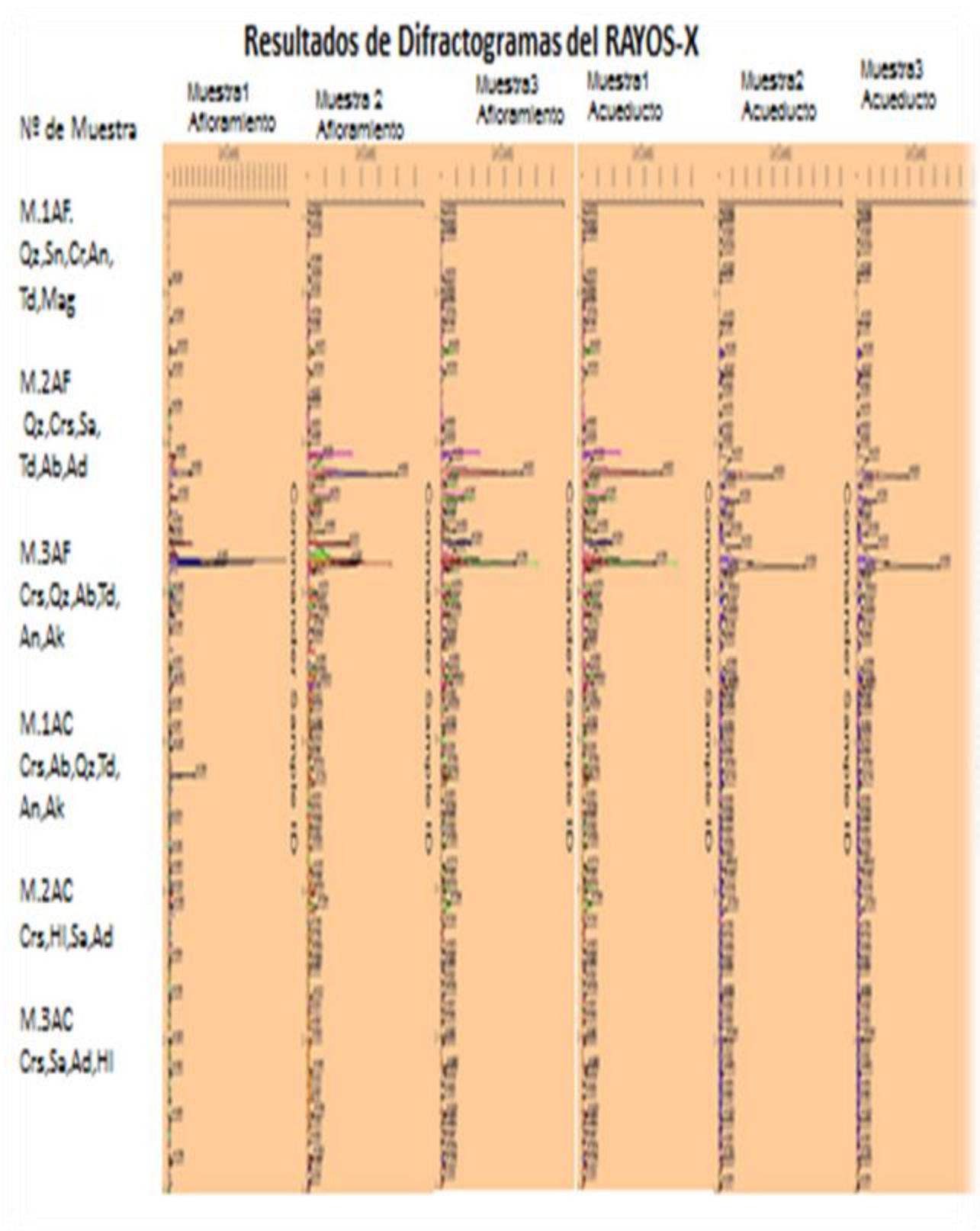


Ilustración 26. Resultados de los análisis de DRX. Las especies minerales están abreviadas: M. #AC= Numero de muestra del Acueducto, Qz=Cuarzo, Crs=Cristobalita, Td=Tridimita, Sa=Sanidina, Ab = Albita, Ad=Andesina Ak=Ankerita, Hl = Halita, Ms=Moscovita, Cal=Calcita

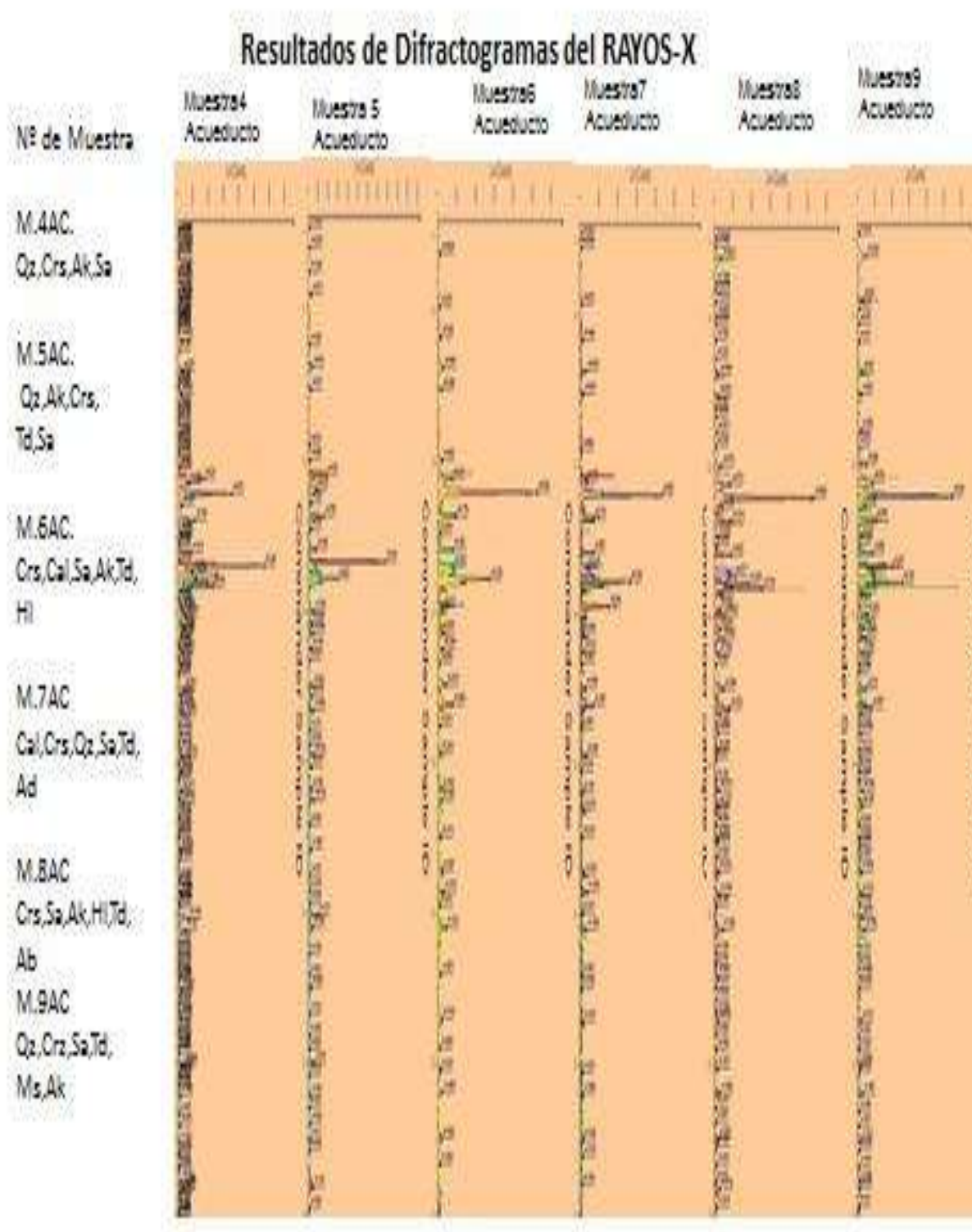


Ilustración 27. Resultados de los análisis de DRX. Las especies minerales están abreviadas: M. #AC= Numero de muestra del Acueducto, Crs=Cristobalita, Td=Tridimita, Sa=Sanidina, Ab = Albita, Hl = Halita, Ad=Andesina, Ak=Ankerita, Mnt=Montmorillonita

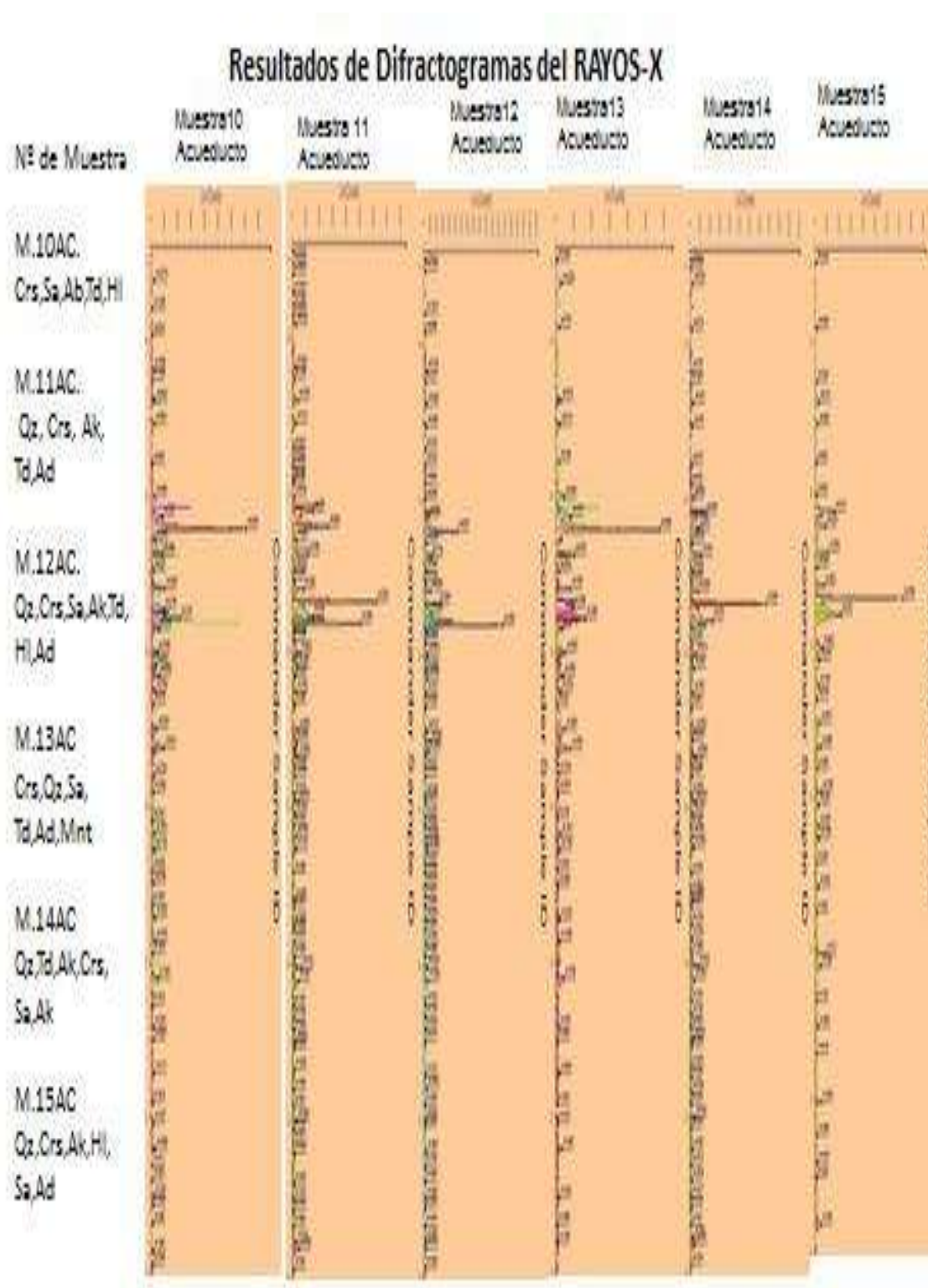
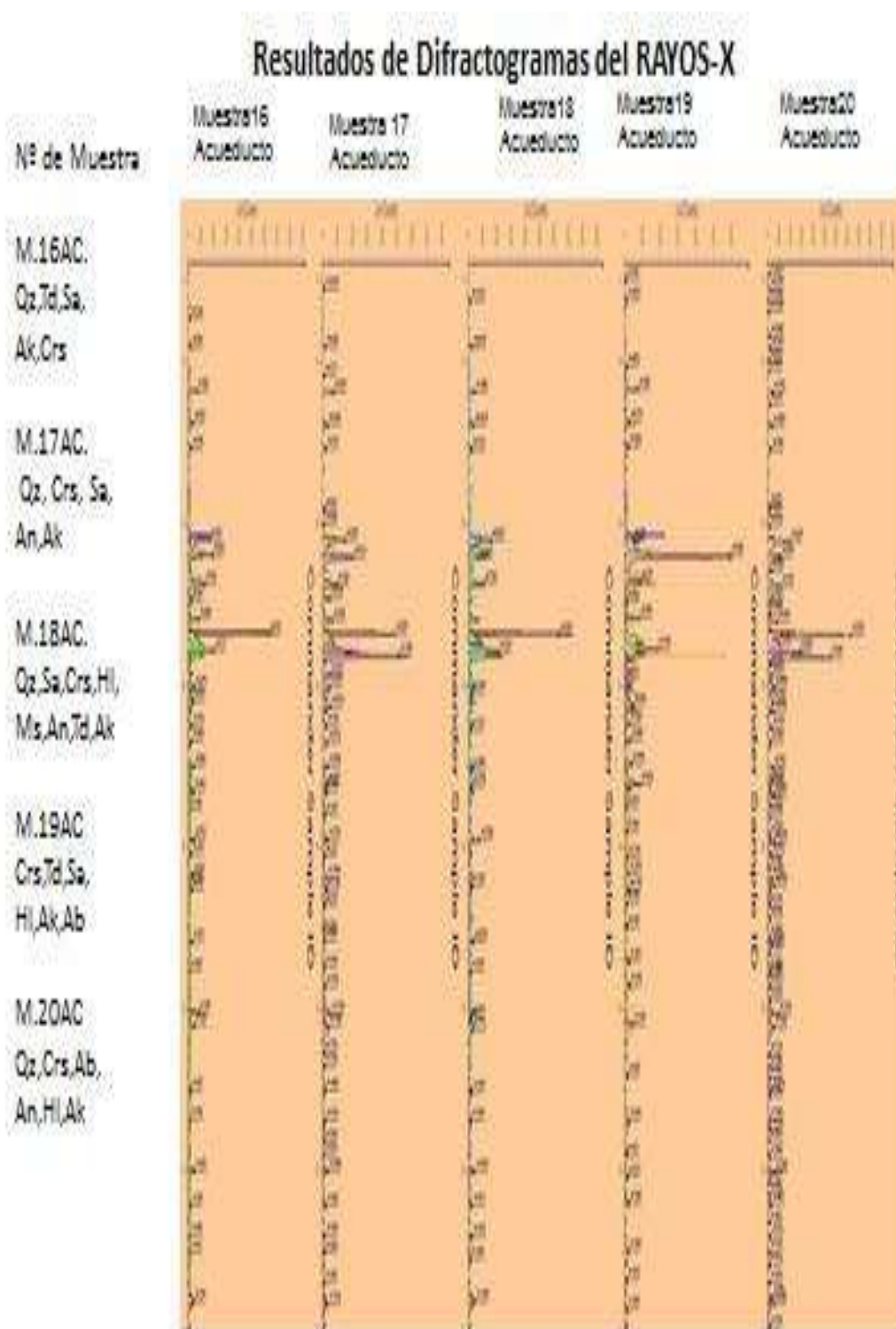


Ilustración 28. Resultados de los análisis de DRX. Las especies minerales están abreviadas: M. #AC= Numero de muestra del Acueducto, Qz=Cuarzo, Td=Tridimita, Sa=Sanidina, Ak=Ankerita, Crs=Cristobalita, An=Anortita, Hl=Halita, Ms=Moscovita.



## 6.2. Resultado de Fluorescencia de Rayos X.

Se realizaron 23 análisis, de los cuales 20 corresponden al Acueducto y 3 al afloramiento de la ignimbrita soldada ubicado en las coordenadas UTM zona 14N: 270356 y 21480637 (zona centro de Morelia). Estos análisis de fluorescencia de Rayos-X ayudaron a tener la concentración de los elementos en porcentaje de los 10 elementos mayores que se puede observar aquí ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  y  $\text{P}_2\text{O}_5$ ).

Hay que señalar que estos elementos mayores se encuentran en todas las 23 muestras analizando y se pueden entonces diferenciar los elementos de acuerdo a dos grupos; el primer grupo donde se pueden encontrar los  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , y  $\text{K}_2\text{O}$  esos son el grupo típico de estos tipos de rocas por eso se colocó en este primer grupo. En el segundo grupo, se encuentran los minerales:  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$  y  $\text{CaO}$ , que son antigénicos o biogénicos ya que estos elementos precipitan junto a los carbonatos; además, de estos dos grupos aparecen también en las muestras la presencia del fosfatos  $\text{P}_2\text{O}_5$  y cloro.

En general, se destaca que en los elementos mayores tienen un contenido del  $\text{SiO}_2$  que varía de 66.6 a 79% eso se debe a las variaciones en la composición mineralógico-petrográfica de estas rocas volcánicas que es la ignimbrita. De acuerdo con un estudio realizado por Soloviev (1976), estas rocas volcánicas (ignimbritas) corresponden a rocas con alto contenido de Al (normativas en corindón, pertenecientes a una serie (potásica-sódica) las cuales, además, se puede observar la presencia de más potasio, titanio y menos hierro que las rocas riolíticas metaluminosas. También aquí podemos ver la presencia de los elementos traza como Rb, Sr, Ba y Zr, pero estos elementos traza se presentan en menor abundancia. Hay que señalar que los tres primeros elementos son impurezas típicas en feldespato potásico (sanidina); mientras que el zirconio se encuentra formando una fase mineral propia (zircón). A continuación se describen los resultados obtenidos para cada muestra:

Tabla 4.Resultados de Fluorescencia de Rayos X.

| Numero de Muestra         | %SiO <sub>2</sub> | %Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | %K <sub>2</sub> O | %Na <sub>2</sub> O | %Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | %CaO | %P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | %MgO  | %Cl       | %TiO <sub>2</sub> | %SO <sub>3</sub> | CuO     |
|---------------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------|--------------------|---------------------------------|------|--------------------------------|-------|-----------|-------------------|------------------|---------|
| Muestra#1del Afloramiento | 66.6              | 12.7                            | 5.24              | 4.38               | 2.41                            | 3.64 | 0.984                          | 0.854 | 0.556     | 0.185             | 2.17             |         |
| Muestra#2del Afloramiento | 71.6              | 13.5                            | 5.57              | 3.61               | 2.30                            | 1.55 | 0.924                          |       | 0.213     | 0.207             | 0.335            |         |
| Muestra#3del Afloramiento | 71.0              | 13.6                            | 5.48              | 3.54               | 2.14                            | 1.87 | 0.950                          |       | 0.234     | 0.185             | 0.776            |         |
| Muestra#1del Acueducto    | 70.1              | 12.9                            | 5.70              | 4.46               | 2.21                            | 2.01 | 0.959                          | 0.609 | 0.432     | 0.201             | 0.198            |         |
| Muestra#2del Acueducto    | 69.8              | 13.00                           | 5.83              | 4.11               | 2.26                            | 1.98 | 0.901                          | 0.404 | 0.246     | 0.198             | 1.04             |         |
| Muestra#3del Acueducto    | 65.6              | 12.6                            | 4.63              | 3.00               | 1.96                            | 10.4 | 0.753                          | 0.556 |           | 0.186             | 0.116            |         |
| Muestra#4del Acueducto    | 67.6              | 14.6                            | 5.76              | 3.65               | 1.53                            | 3.56 | 0.92                           | 0.509 | 994PPM    | 0.186             | 1.29             |         |
| Muestra#5del Acueducto    | 71.6              | 13.9                            | 5.22              | 3.67               | 2.02                            | 1.95 | 1.01                           |       |           | 0.201             | 825PPM           |         |
| Muestra#6del Acueducto    | 70.0              | 11.5                            | 5.84              |                    | 1.86                            | 5.51 | 0.869                          | 1.42  |           | 0.163             | 0.719            |         |
| Muestra#7del Acueducto    | 57.8              | 10.7                            | 4.06              | 3.29               | 2.62                            | 18.1 | 0.716                          | 0.803 | 0.115     | 0.192             | 1.36             |         |
| Muestra#8del Acueducto    | 69.3              | 14.2                            | 6.06              | 2.69               | 2.29                            | 2.77 | 0.916                          | 1.43  |           | 0.178             |                  |         |
| Muestra#9del Acueducto    | 72.3              | 13.1                            | 5.69              | 3.03               | 1.60                            | 1.53 | 0.826                          | 1.40  |           | 890PPM            | 0.267            |         |
| Muestra#10del Acueducto   | 72.0              | 13.8                            | 5.40              |                    | 2.00                            | 1.55 | 0.781                          | 0.598 |           | 0.139             | 0.886            |         |
| Muestra#11del Acueducto   | 70.1              | 14.9                            | 4.91              | 3.28               | 1.85                            | 2.14 | 0.854                          | 0.405 |           | 0.186             | 1.00             |         |
| Muestra#12del Acueducto   | 69.7              | 13.5                            | 5.12              | 3.53               | 1.75                            | 2.95 | 0.976                          |       |           | 0.175             | 2.33             |         |
| Muestra#13del Acueducto   | 72.5              | 14.0                            | 5.88              |                    | 1.56                            | 1.54 | 1.13                           | 1.41  |           | 0.102             | 0.374            |         |
| Muestra#14del Acueducto   | 71.3              | 13.5                            | 5.79              |                    | 2.27                            | 1.75 | 1.15                           | 0.707 |           | 0.202             | 0.931            |         |
| Muestra#15del Acueducto   | 70.5              | 13.8                            | 5.27              | 3.40               | 1.91                            | 2.90 | 0.823                          |       |           | 0.182             | 0.953            |         |
| Muestra#16del Acueducto   | 67.3              | 12.9                            | 5.32              | 2.42               | 1.65                            | 3.94 | 0.898                          | 0.413 | 0.105     | 0.155             | 4.59             | 63.3PPM |
| Muestra#17del Acueducto   | 64.5              | 11.2                            | 6.64              |                    | 1.86                            | 5.99 | 0.888                          | 0.838 | 106.31PPM | 0.172             | 6.59             |         |
| Muestra#18del Acueducto   | 69.7              | 12.5                            | 5.17              | 3.04               | 1.85                            | 3.01 | 0.865                          | 0.388 |           | 0.191             | 3.03             |         |
| Muestra#19del Acueducto   | 64.8              | 11.5                            | 4.86              | 2.19               | 1.60                            | 6.01 | 1.16                           | 0.767 |           | 0.169             | 6.51             | 77.9PPM |
| Muestra#20del Acueducto   | 69.6              | 12.4                            | 5.33              | 3.72               | 1.85                            | 2.87 | 0.919                          |       |           | 0.180             | 2.85             |         |

| Numero de Muestra         | %Rb <sub>2</sub><br>O | %CeO <sub>2</sub> | %ZrO <sub>2</sub> | %SrO       | %MnO   | %ZnO        | BaO   | V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | PbO        | As <sub>2</sub><br>O <sub>3</sub> | MoO <sub>3</sub> |
|---------------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|------------|--------|-------------|-------|-------------------------------|------------|-----------------------------------|------------------|
| Muestra#1del Afloramiento | 195PP<br>M            |                   | 222PPM            | 256PP<br>M |        | 109PP<br>M  | 0.125 | 359PP<br>M                    |            |                                   |                  |
| Muestra#2del Afloramiento | 206PP<br>M            |                   | 248PPM            | 136PP<br>M | 148PPM | 57.7P<br>PM | 0.136 |                               |            |                                   |                  |
| Muestra#3del Afloramiento | 196PP<br>M            | 509PPM            | 204PPM            | 146PP<br>M | 179PPM |             |       |                               |            |                                   |                  |
| Muestra#1del Acueducto    | 202PP<br>M            |                   | 185PPM            | 179PP<br>M | 138PPM | 63.7P<br>PM |       |                               |            |                                   |                  |
| Muestra#2del Acueducto    |                       |                   |                   |            | 250PPM |             | 0.146 |                               | 260<br>PPM |                                   |                  |
| Muestra#3del Acueducto    | 156PP<br>M            |                   | 203PPM            | 282PP<br>M | 217PPM |             | 0.127 |                               |            |                                   |                  |
| Muestra#4del Acueducto    | 194PP<br>M            | 0.101             | 166PPM            | 377PP<br>M |        |             | 0.150 |                               |            | 70.2<br>PPM                       |                  |
| Muestra#5del Acueducto    | 191PP<br>M            |                   | 198PPM            | 136PP<br>M | 276PPM | 64.9P<br>PM | 0.155 | 220PP<br>M                    |            |                                   |                  |
| Muestra#6del Acueducto    | 98.3P<br>PM           |                   | 91.8PP<br>M       | 557PP<br>M |        | 167PP<br>M  | 0.214 | 177PP<br>M                    | 126<br>PPM |                                   |                  |
| Muestra#7del Acueducto    | 163PP<br>M            |                   | 173PPM            | 493PP<br>M | 306PPM | 107PP<br>M  | 0.148 |                               |            |                                   |                  |
| Muestra#8del Acueducto    | 74.8P<br>PM           |                   | 153PPM            | 283PP<br>M | 171PPM | 170PP<br>M  | 0.140 |                               |            | 54.1<br>PPM                       |                  |
| Muestra#9del Acueducto    | 207PP<br>M            |                   | 171PPM            | 102PP<br>M |        | 132PP<br>M  | 0.115 |                               |            |                                   |                  |
| Muestra#10del Acueducto   | 176PP<br>M            |                   | 154PPM            | 252PP<br>M |        |             | 0.114 |                               |            |                                   |                  |
| Muestra#11del Acueducto   | 157PP<br>M            |                   | 166PPM            | 291PP<br>M | 0.171  | 67.6P<br>PM | 0.170 |                               |            | 45.3<br>PPM                       |                  |
| Muestra#12del Acueducto   | 166PP<br>M            |                   | 149PPM            | 547PP<br>M | 326PPM | 64.5P<br>PM | 0.162 |                               |            |                                   |                  |
| Muestra#13del Acueducto   | 202PP<br>M            |                   | 165PPM            | 121PP<br>M |        | 157PP<br>M  |       |                               |            |                                   |                  |
| Muestra#14del Acueducto   | 222PP<br>M            |                   | 219PPM            | 203PP<br>M |        |             | 0.178 |                               |            |                                   |                  |
| Muestra#15del Acueducto   | 195PP<br>M            |                   | 188PPM            | 260PP<br>M | 225PPM |             | 0.165 |                               |            |                                   |                  |
| Muestra#16del Acueducto   | 179PP<br>M            | 661PPM            | 187PPM            | 187PP<br>M | 129PPM | 85.9P<br>PM | 0.147 |                               |            |                                   | 64.8<br>PPM      |
| Muestra#17del Acueducto   | 189PP<br>M            |                   | 172PPM            | 313PP<br>M | 326PPM | 112PP<br>M  | 0.160 |                               | 196<br>PPM |                                   | 43.1<br>PPM      |
| Muestra#18del Acueducto   | 183PP<br>M            |                   | 183PPM            | 165PP<br>M | 203PPM | 92PP<br>M   | 0.161 |                               |            |                                   |                  |
| Muestra#19del Acueducto   | 161PP<br>M            |                   | 132PPM            | 411PP<br>M |        | 210PP<br>M  | 0.241 |                               | 219<br>PPM |                                   |                  |
| Muestra#20del Acueducto   | 185PP<br>M            | 653PPM            | 191PPM            | 173PP<br>M |        |             | 0.122 | 165PP<br>M                    |            |                                   |                  |

### 6.3. Resultado de Espectroscopia Infrarroja (EIR).

Se realizaron 22 análisis de Espectroscopia Infrarrojo, donde 20 corresponden al Acueducto y 2 al afloramiento de la ignimbrita soldada del afloramiento ubicado en las coordenadas UTM zona 14N 270356 y 21480637.

Se puede observar en general que tanto en el afloramiento como en el Acueducto la muestra presenta una alteración, este proceso de alteración afecta al Acueducto y al afloramiento.

Se puede observar la presencia de los silicatos (sílice-oxígeno) en todo los espectros varia en los rangos de  $466\text{ cm}^{-1}$  hasta  $785\text{ cm}^{-1}$ .

Así como la presencia de agua molecular con hidrofita y los minerales arcillosos. Esas dos fases se diferencian por sus génesis de tal manera que los minerales arcillosos presentes en estos resultados de espectroscopia infrarrojo son resultados de alteración ambiental. Por otra parte, se observa en los espectros la presencia de la zeolita y silicatos que son alterados por los procesos de devitrificación. En la interpretación de los resultados tenemos picos que corresponden a las diferentes fases de minerales; por ejemplo, los silicatos varían de  $466\text{ cm}^{-1}$  hasta  $785\text{ cm}^{-1}$  y de intervalos de  $1036\text{ cm}^{-1}$  hasta  $1112\text{ cm}^{-1}$ ; los minerales arcillosos como la montmorillonita, la heulandita que es un tipo de zeolita varía de  $3448\text{ cm}^{-1}$  hasta  $3630\text{ cm}^{-1}$ . Los casos más concretos donde los picos del cuarzo son  $1099\text{ cm}^{-1}$ , la biotita que es una mica  $3443\text{ cm}^{-1}$  (Ostrooumov, 2009).

A continuación se explica con detalles cada espectro y sus principales minerales:

Ilustración 19. Resultados Espectrogramas Infrarroja (EIR) las especies minerales están abreviadas: M. #AC= Numero de muestra del Acueducto, M. #AF= Numero de muestra del Afloramiento, Qz=Cuarzo, Bt=Biotita, Mnt=Montmorillonita, Ak=Ankerita, Hb=Hornblenda, Hd= heulandita.

### . Resultado de Espectrogramas Infrarroja (EIR).

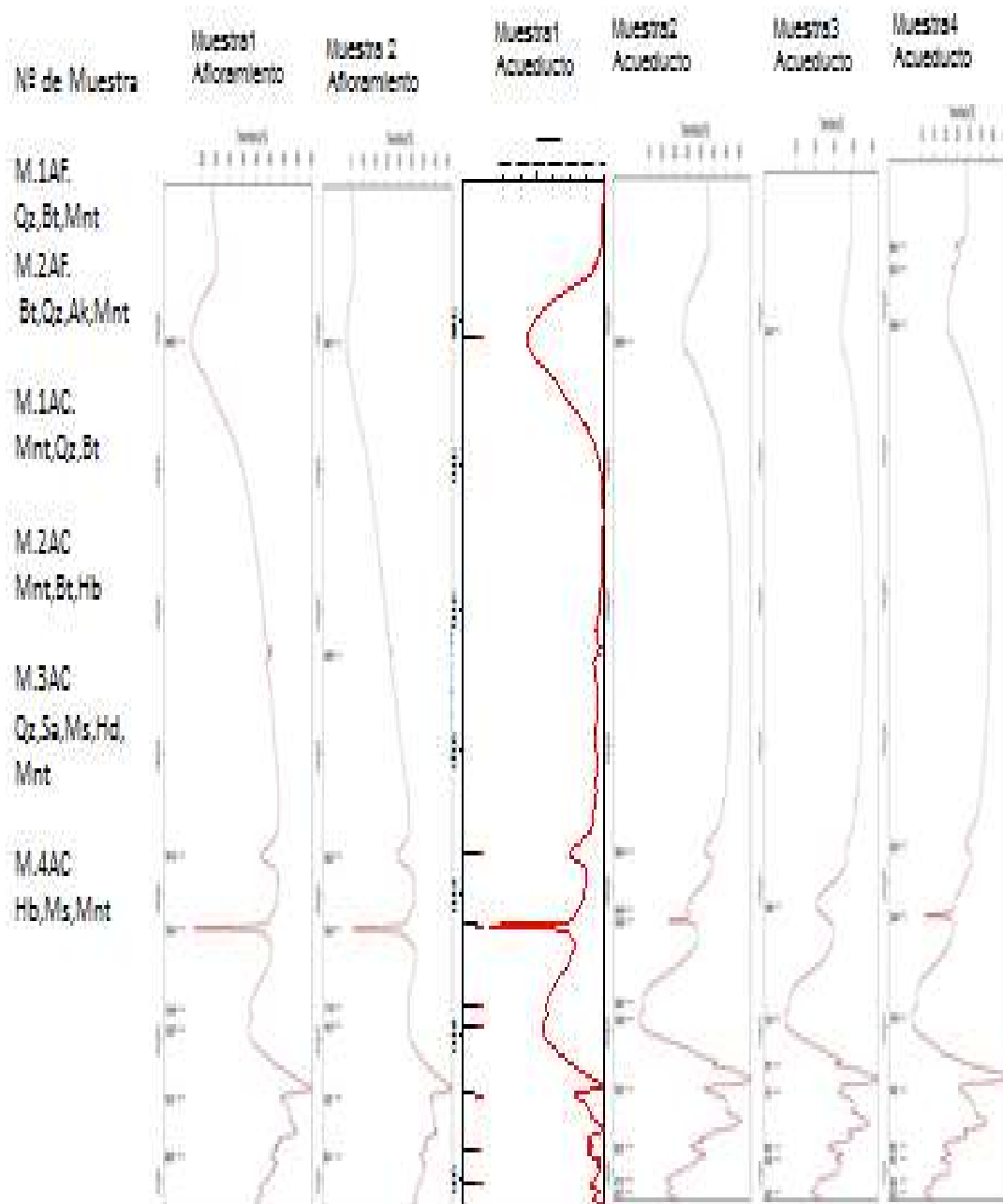


Ilustración 30. Resultados Espectrogramas Infrarroja (EIR) las especies minerales están abreviadas: La=labradorita, Sa=Sanidina, Hb=Hornblenda, Hd= heulandita, Mnt=Montmorillonita, Qz=Cuarzo, Bt=Biotita, Ak=Ankerita, Clt=Clorita, Ct=Coalinita.

### Resultado de Espectrogramas Infrarroja (EIR).

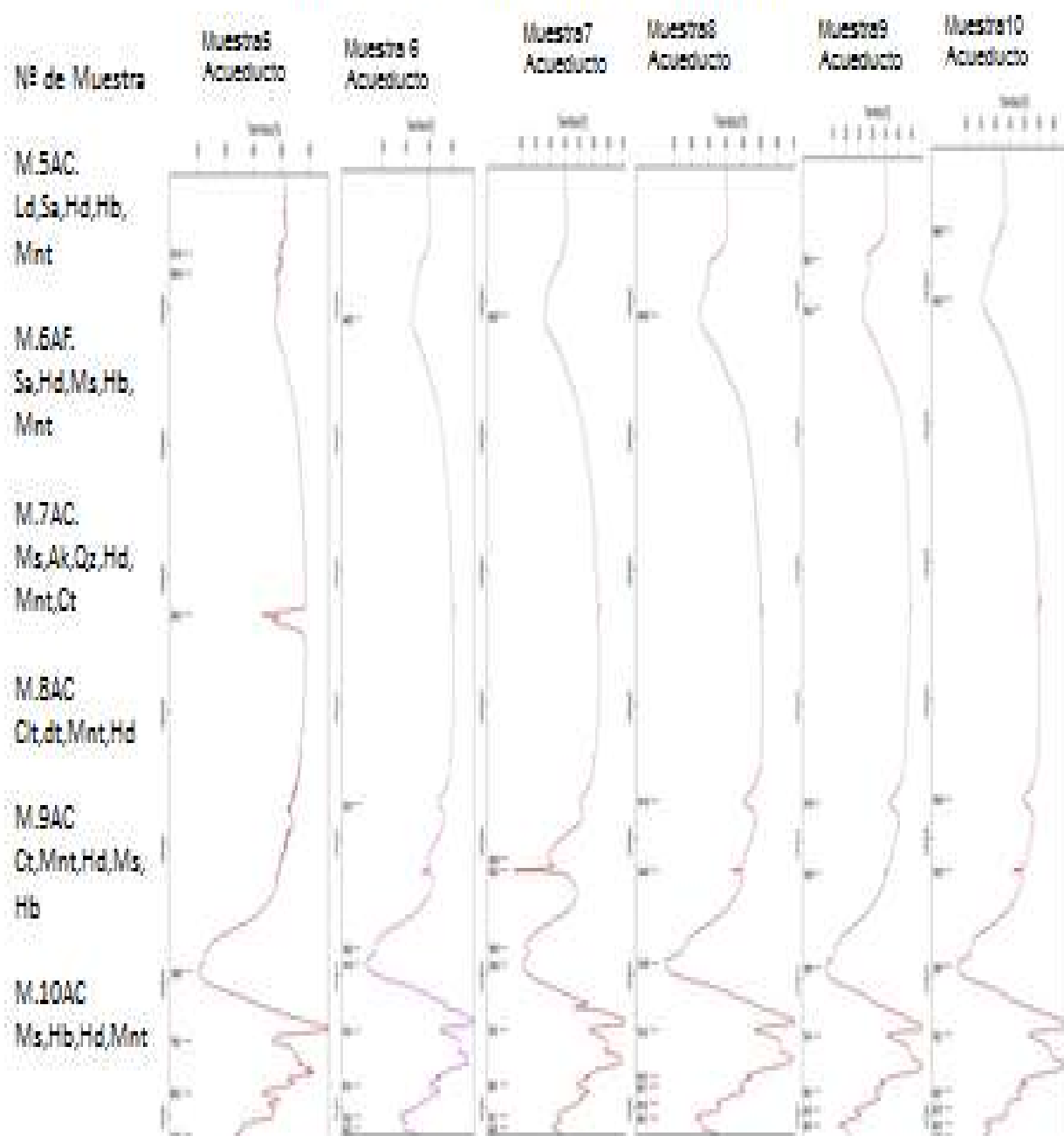


Ilustración 2. Resultados de Espectrogramas Infrarroja (EIR) las especies minerales están abreviadas: Sa=Sanidina, Bt=Biotita, La= labradorita, Hd= heulandita, Mnt=Montmorillonita, Hb=Hornblenda, Qz=Cuarzo, Ak=Ankerita, Clt=Clorita, Ct=Coalinita, Mg=Magnesio.

### Resultado de Espectrogramas Infrarroja (EIR).

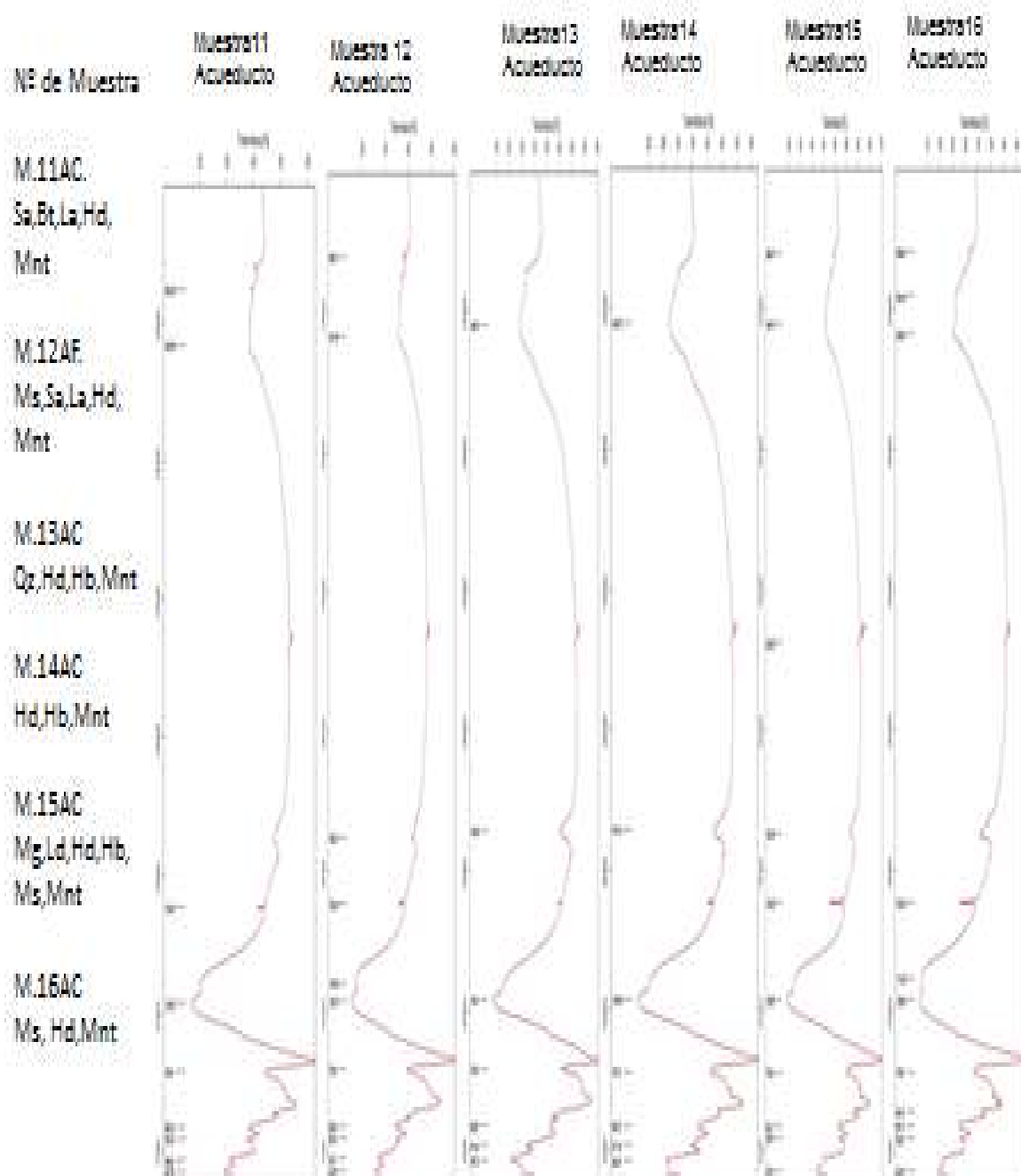
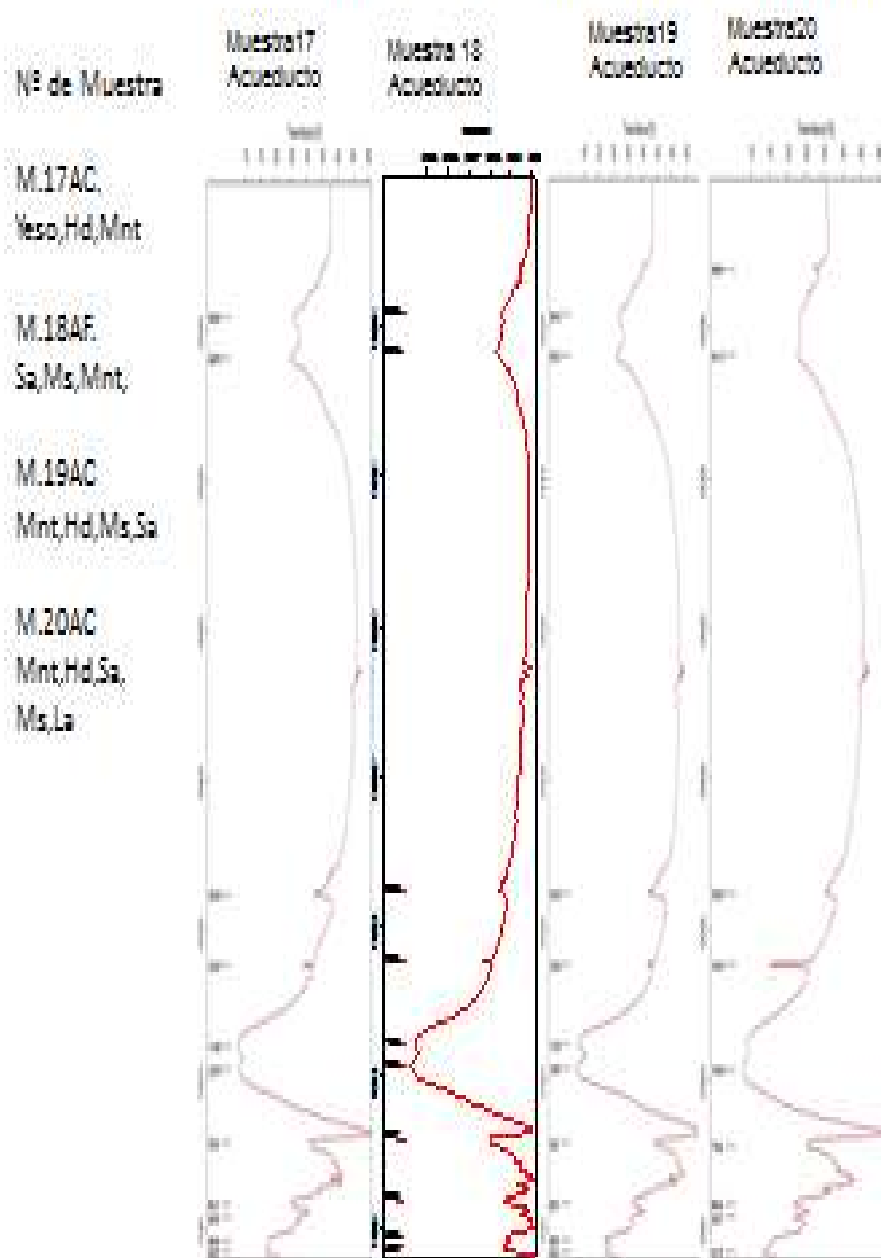


Ilustración 32. Resultados de Espectrogramas Infrarroja (EIR) las especies minerales están abreviadas: Hd= heulandita, Mnt=Montmorillonita, Sa=Sanidina, Ms=Moscovita, Hb=Hornblenda, La= labradorita, Hd= heulandita, Yeso=  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

### Resultado de Espectrogramas Infrarroja (EIR).

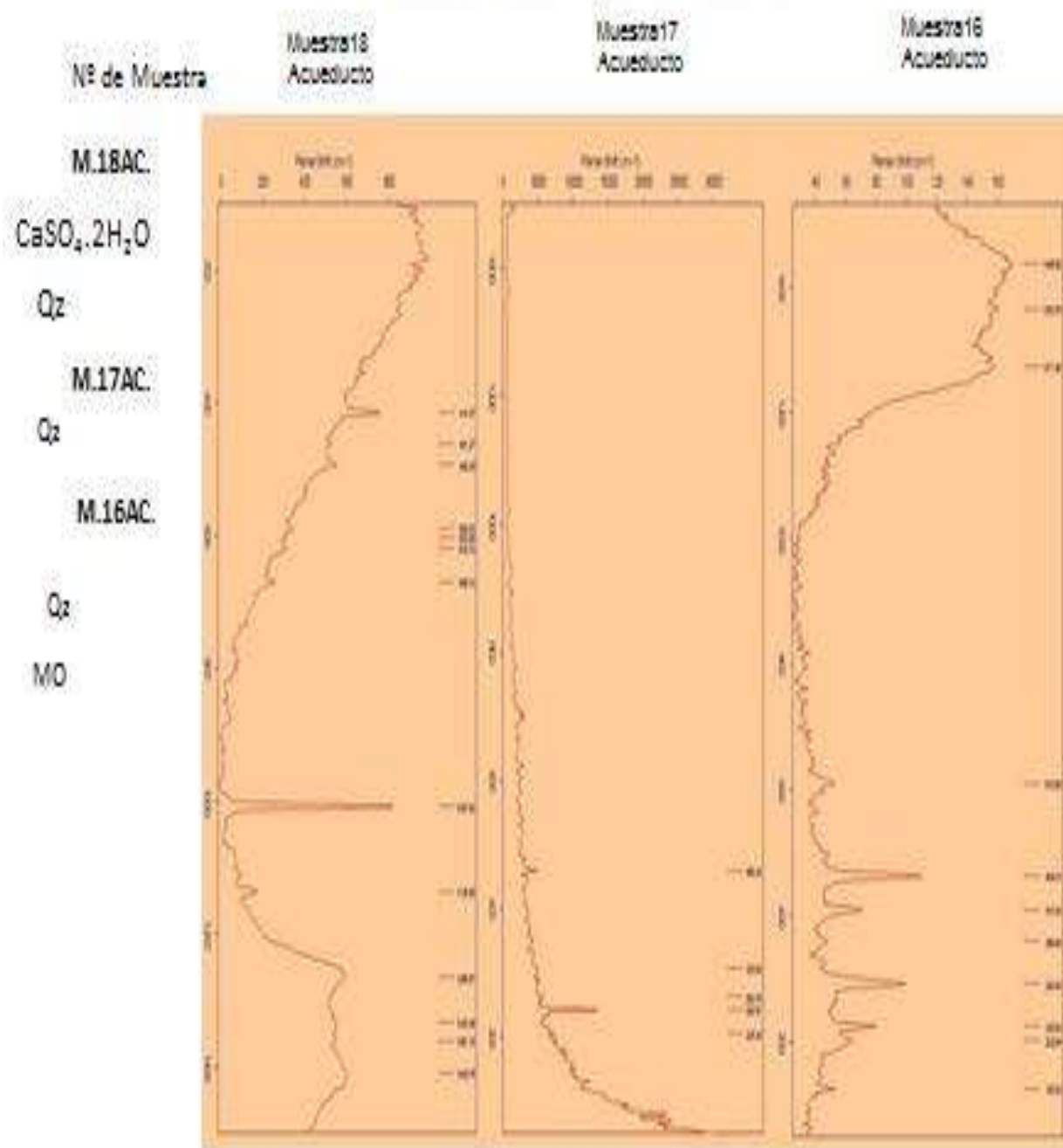


#### **6.4. Resultado de Espectrometría Raman.**

Se realizaron tres análisis de Espectrometría Raman eso fue en la muestra número 16, 17 y 18 del Acueducto de Morelia. Se eligieron estas tres muestras debido a su grado de deterioro, donde la muestra número 18 es la más deteriorada; seguida de la muestra número 16 y finalmente por la muestra número 17, que está menos deteriorada, y de allí se puede comparar el grado de alteración de esta ignimbrita que forma el Acueducto.

Ilustración 3. Resultados de los análisis de los Espectros Raman. Las especies minerales están abreviadas: M. #AC= Numero de muestra del Acueducto, Qz=Cuarzo,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ = Yeso, MO=Materia orgánica

### Resultado de los Espectros Raman.



**Muestra número 18 del Acueducto de Morelia X: 271549****Y: 2179783**

En esta muestra se puede observar a través de los espectros que las líneas características más intensas están comprendidas entre ( $1007\text{ cm}^{-1}$   $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $414\text{ cm}^{-1}$ ,  $461\text{ cm}^{-1}$ ,  $493\text{ cm}^{-1}$ ,  $619\text{ cm}^{-1}$ ). Se observa el pico  $1007\text{ cm}^{-1}$  eso confirma la presencia de sulfato de calcio con agua yeso con la formula cristaloquímica  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ; también se observan los picos característicos del cuarzo en esta muestra, es decir,  $414\text{ cm}^{-1}$ ,  $461\text{ cm}^{-1}$ ,  $493\text{ cm}^{-1}$ .

**Muestra número 17 del Acueducto de Morelia X: 271334****Y: 2179983**

Los espectros presentes en la muestra número 17 del Acueducto reflejan valores que están comprendidos entre ( $464\text{ cm}^{-1}$ ,  $306\text{ cm}^{-1}$  hasta  $206\text{ cm}^{-1}$ ), valores típicos del Cuarzo.

**Muestra número 16 del Acueducto de Morelia X: 271259****Y: 2180109**

En esta muestra se puede observar a través de los espectros que las líneas características más intensas están comprendidas entre  $464\text{ cm}^{-1}$  hasta  $206\text{ cm}^{-1}$  típico del cuarzo; también aparecen bandas de  $1272\text{ cm}^{-1}$  hasta  $1436\text{ cm}^{-1}$  eso se debe y está relacionado con los compuestos orgánicos.

## 6.5. Resultado de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).

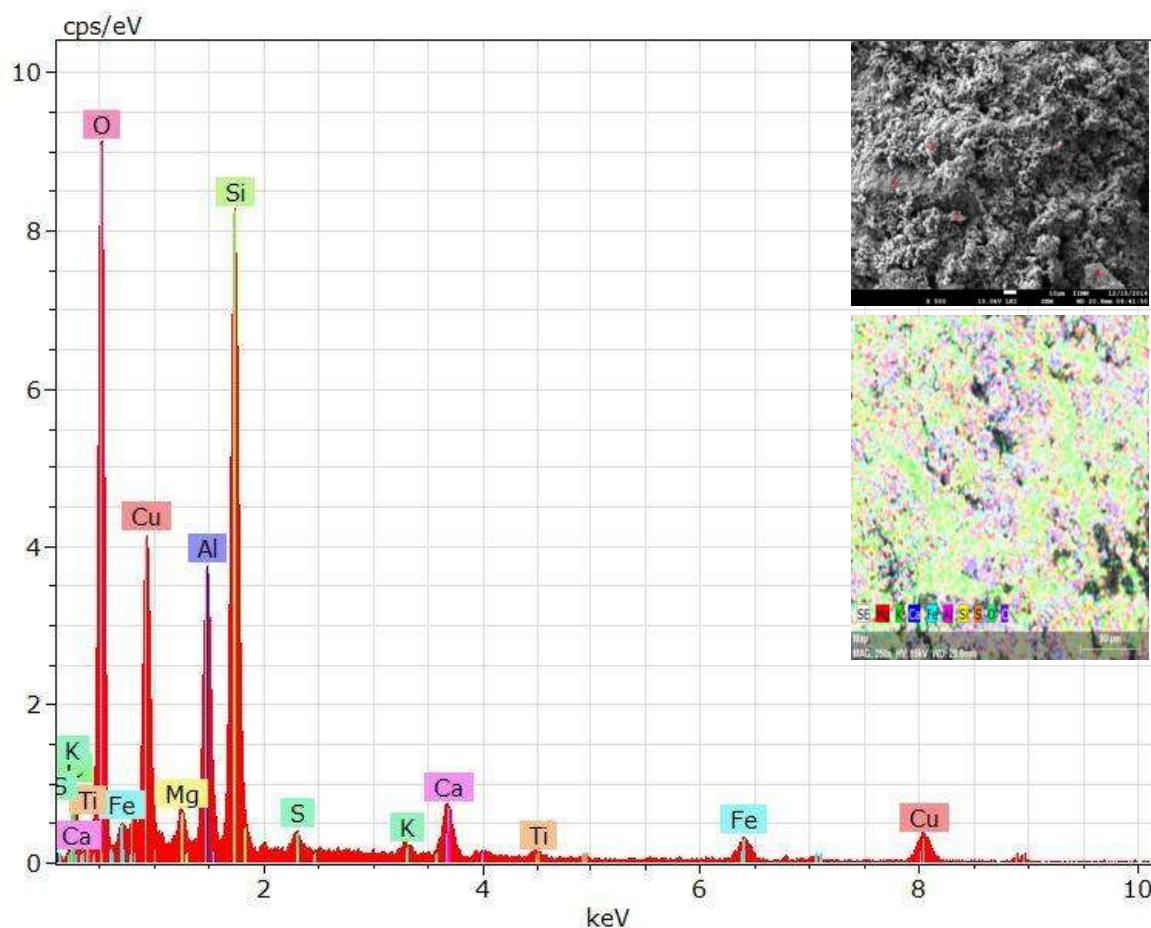
Se realizaron los análisis de seis muestras del Acueducto de Morelia, es decir, aquellas que se identificaron con los números 15, 9, 13, 16, 17 y 18; donde las muestras 18 y 17 son las más alteradas y las muestras número 9 y 17 menos alteradas a comparación de la muestra número 18 y 17 de este mismo Acueducto; las muestras número 13 y 15 con menor grado de alteración al compararlos con las muestras enumeradas arriba. Para estos análisis se hicieron los análisis microscópicos puntuales de 500 X de las partículas y se hizo un mapeo químico de 250 x y a través de ese proceso, se pudo observar que la muestras número 16 y 17 eran las más alteradas; dicho resultado es debido a la presencia del sulfato de calcio y sulfuro; además, mediante el mapeo químico se aprecia la concentración de dichos elementos.

La utilización de esta técnica de microscopía electrónica de barrido ha corroborado la presencia de los minerales de neoformación (yeso, carbonatos y minerales arcillosos) que anteriormente se habían encontrado mediante difracción de rayos X. A continuación, se presentan los resultados de los análisis realizados a través del mapeo químico y de sus gráficas.

**Muestra número 9 del Acueducto de Morelia X: 272354  
Y: 2179441**

En la imagen del microscopio de la muestra número 9 del Acueducto se puede observar los diferentes lugares donde se eligió realizar los análisis

**Ilustración 34. Resultado de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 9 del Acueducto de Morelia X: 272354 Y: 2179441**



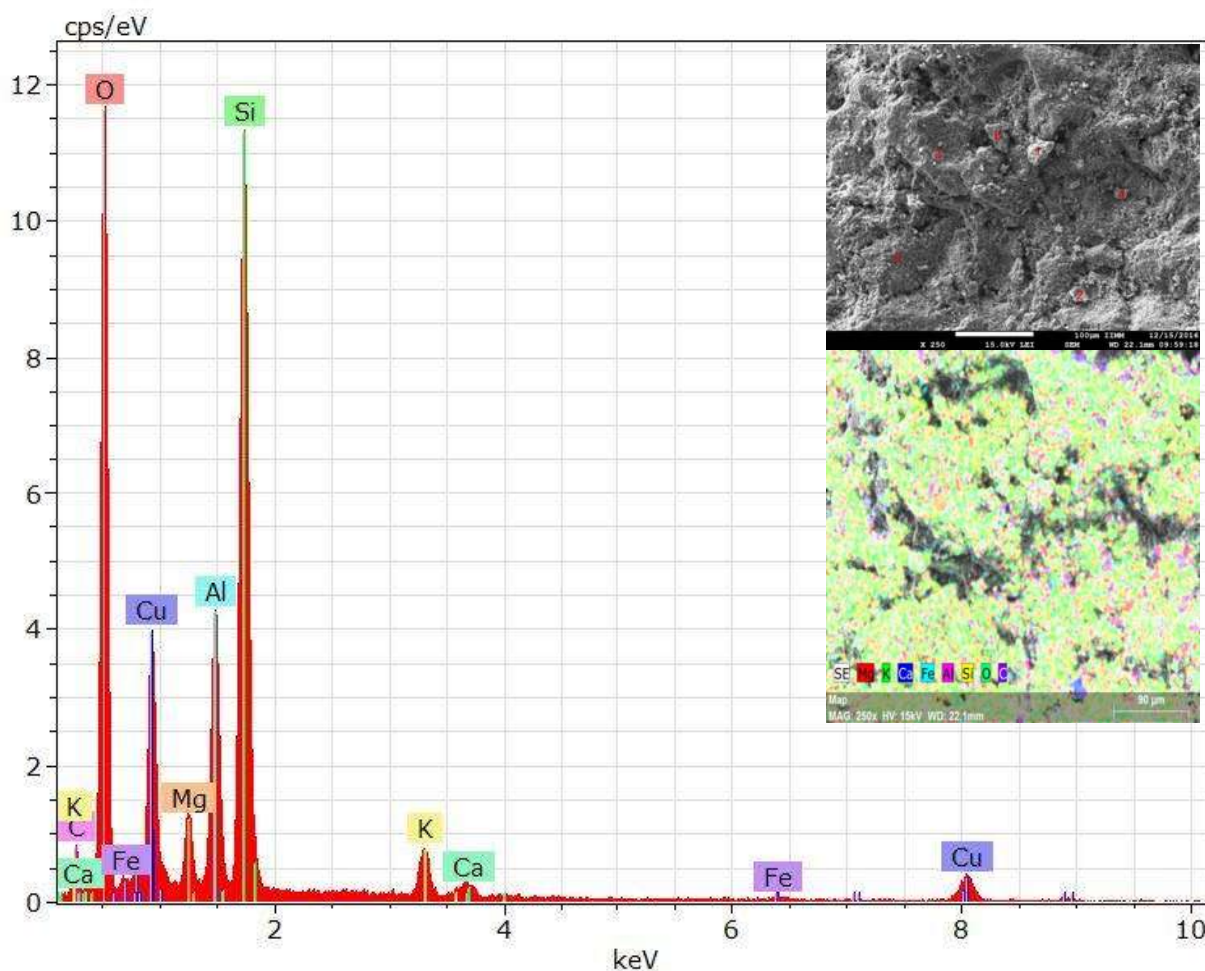
El mapeo químico de la muestra número 9 se puede observar a través de los colores como se posiciona los elementos y están concentrados en la muestra, misma que refleja una mayor presencia de silicatos.

En los análisis puntuales de la muestra número 9 del Acueducto de Morelia se puede ver como el contenido de sílice y del aluminio; además de una alta presencia de oxígeno en toda la muestra porque es típico de esta ignimbrita. Así mismo, se observa la presencia de calcio, hierro, carbono y azufre que son indicadores de los procesos de degradación. La presencia de cobre en la muestra se debe al que el recipiente en que se preparo es de este material.

**Muestra número 13 del Acueducto de Morelia X: 272223  
Y: 2179472**

En la imagen de la muestra número 13 del Acueducto con un aumento de 250X se puede apreciar los diferentes lugar donde se hicieron los análisis.

**Ilustración 35. Resultado de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 13 del Acueducto de Morelia X: 272223 Y: 2179472.**



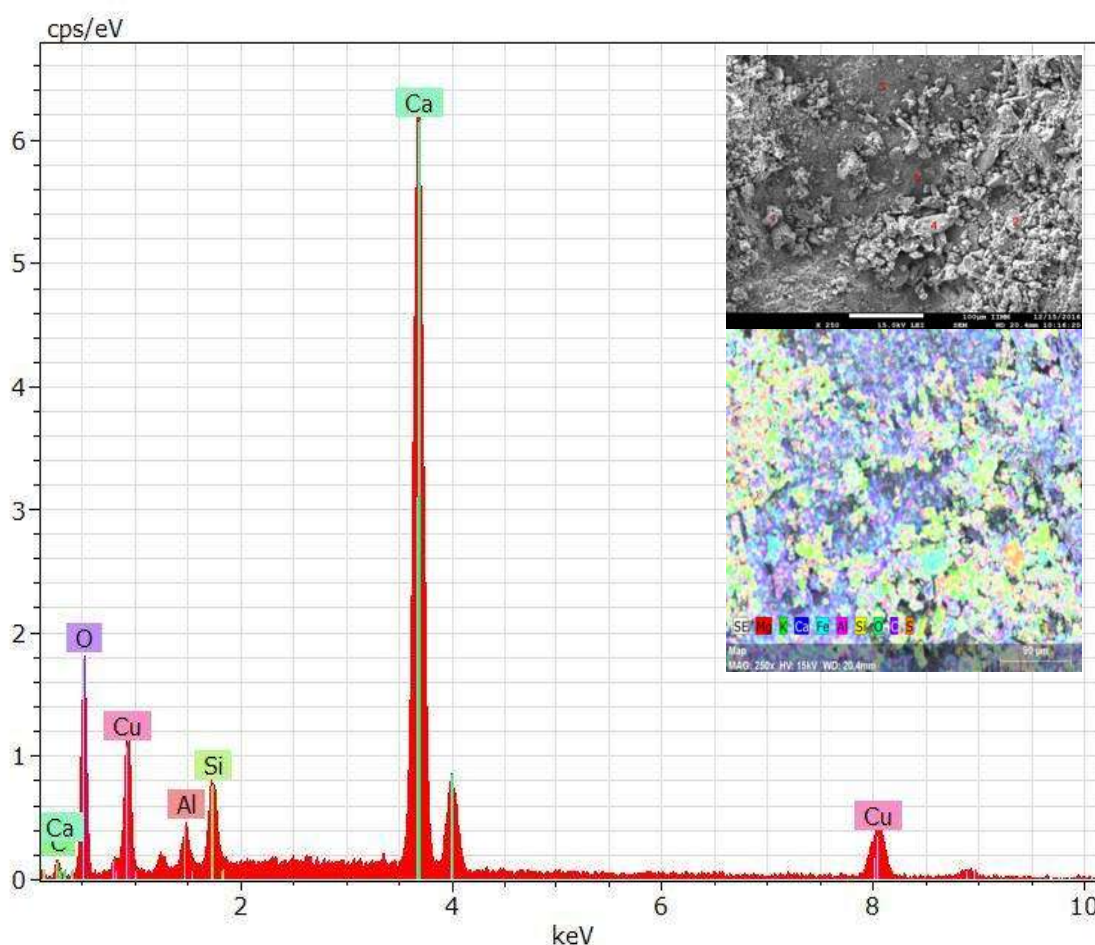
En el mapeo químico de esta muestra número 13 se puede observar, a través de los colores, cómo se posicionan los elementos y cómo están concentrados en la muestra donde en su mayoría son silicatos.

A través de los resultados de los análisis puntuales de los elementos se observa la presencia de los silicatos (sílices-oxígenos) que son típicos de esta muestra; también se refleja la presencia de aluminio pero en poca proporción; además, se ve un poco de carbonato y hierro en la muestra.

**Muestra número 15 del Acueducto de Morelia X: 271160  
Y: 2180153**

En la imagen se observa la muestra número 15 del Acueducto con un aumento de 250X, donde se pueden apreciar los diferentes lugares objeto de análisis.

**Ilustración 36. Resultado C de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 15 del Acueducto de Morelia X: 271160 Y: 2180153**



El mapeo químico puntual de los elementos con un aumento de 500X donde se pueden apreciar la distribución de los elementos donde predomina el calcio y en poco porcentaje está los silicatos.

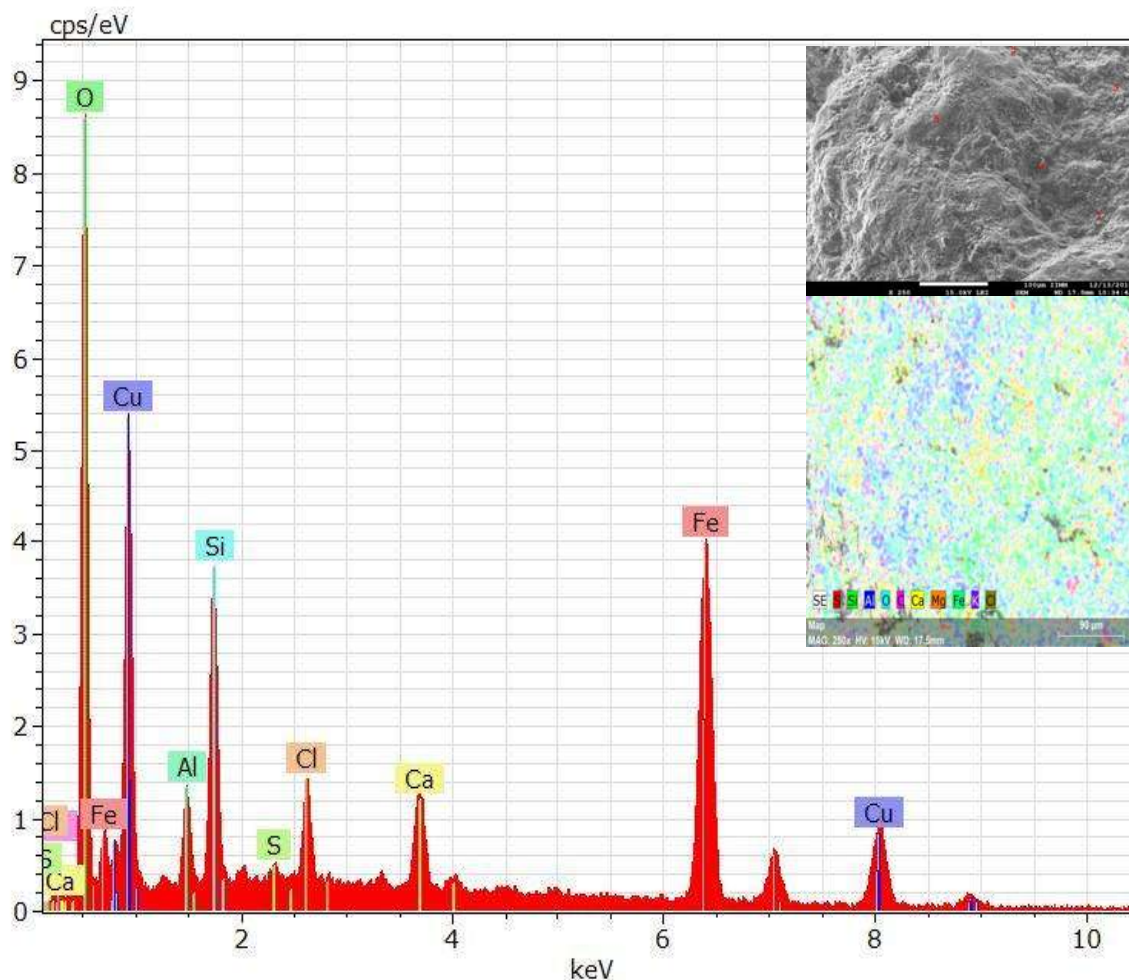
En los análisis puntuales de la muestra número 15 se puede apreciar el alto contenido del calcio en comparación con la sílice y el oxígeno y el aluminio que son

los típicos de esta roca. Eso se debe a los procesos de degradación que ha sufrido esta roca.

**Muestra número 16 del Acueducto de Morelia X: 271259  
Y: 2180109**

Se puede apreciar la muestra número 16 desde el microscopio con un aumento de 250X, también se observan los puntos que se eligieron para realizar el análisis.

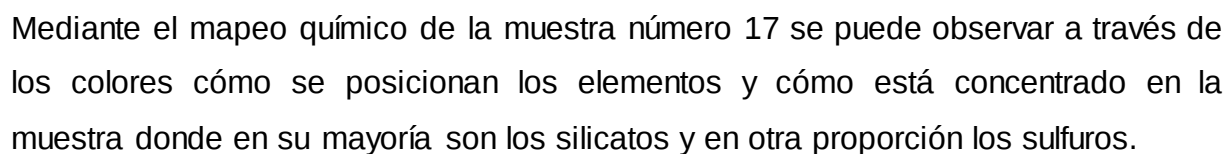
**Ilustración 4 Resultado de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 16 del Acueducto de Morelia X: 271259 Y: 2180109.**



Mediante el mapeo puntual de esta muestra se refleja la presencia de los silicatos; también los sulfatos que son típicos de estos procesos de degradación y además se observa la presencia de cloruros.

**Muestra número 17 del Acueducto de Morelia X: 271334  
Y: 2179983**

**Ilustración 5. Resultado de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 17 del Acueducto de Morelia X: 271334 Y: 2179983.**

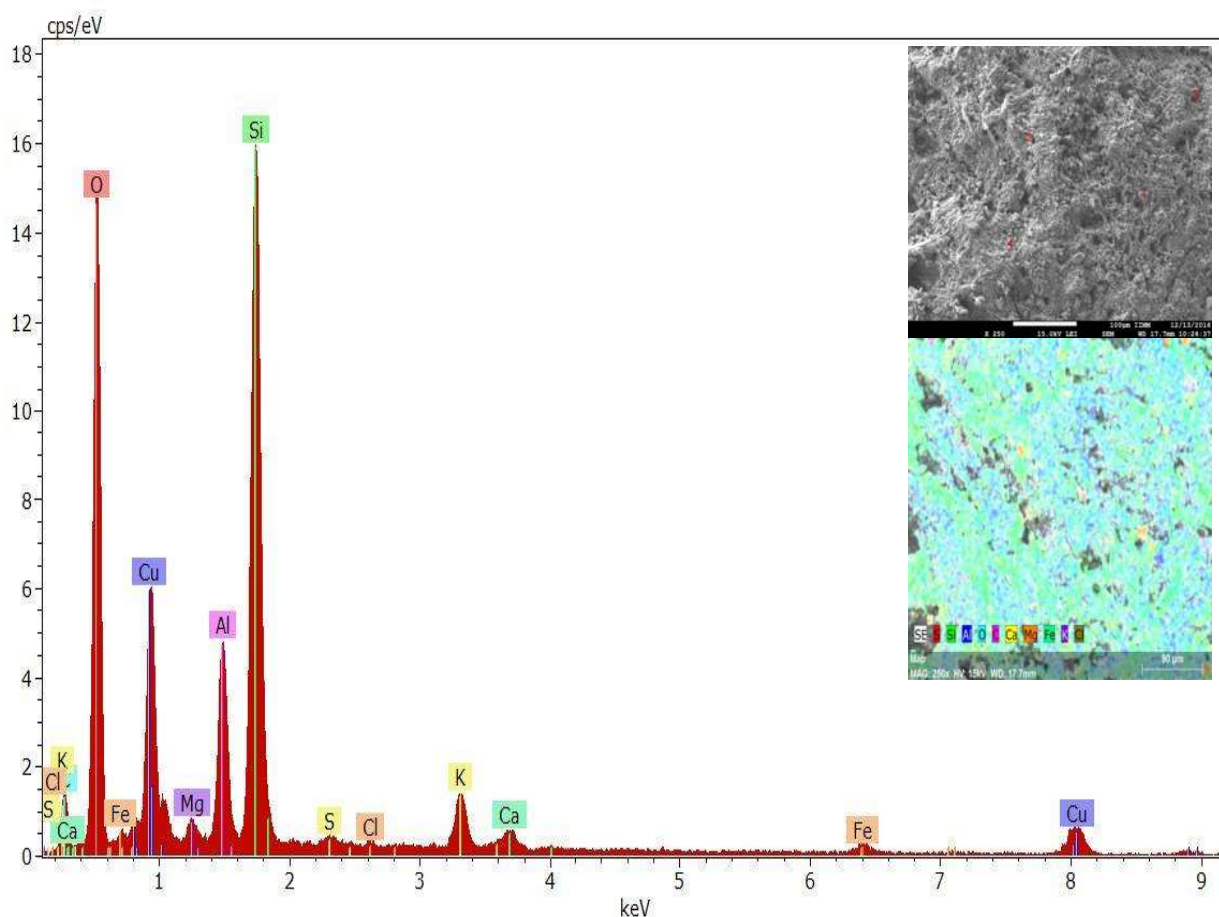


Los análisis puntuales en esta muestra muestran la presencia de los silicatos pero también se puede observar la presencia del calcio, de azufre, y de los fosfatos que son indicadores de estos procesos de degradación.

**Muestra número 18 del Acueducto de Morelia X: 271549  
Y: 2179783**

La imagen de la muestra número 18 del Acueducto con un aumento de 250X donde se puede apreciar los diferentes lugares donde se hicieron los análisis.

**Ilustración 39. Resultado de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 18 del Acueducto de Morelia X: 271549 Y: 2179783**



Mediante el mapeo químico puntual de los elementos con un aumento de 500X se puede apreciar la distribución de los elementos donde predominan los silicatos (típicos de estas rocas).

Los análisis puntuales de los elementos con unos aumentos de 250X donde se observa el alto contenido de los silicatos; se observa también la presencia de los sulfuros y cloruros como consecuencia de la alteración.

## Capítulo 7 Conclusiones y propuesta de restauración

La presente investigación tuvo como objetivo de caracterizar, desde el punto de vista mineralógico, los procesos de degradación que son característicos en las rocas volcánicas piroclásticas (ignimbritas) usadas en la construcción de los monumentos históricos de la ciudad de Morelia; en particular del Acueducto de la ciudad, dicho objetivo se logró cumplir y por tanto, es posible responder que sí se comprobó la hipótesis de investigación.

Durante esta investigación se confirmó que los procesos de degradación de la ignimbrita pueden ser naturales o por acción antropogénica, y que se generó un proceso que permitió la formación de nuevos minerales; ello se determinó a través de distintas técnicas analíticas que fueron la difracción de Rayos X, la fluorescencia de Rayos-X, Espectrometría Raman, Espectroscopia Infrarroja y la Microscopía Electrónica de Barrido, mismas que se aplicaron a muestras con distinto grado de alteraciones.

Con las técnicas analíticas de difracción de Rayos X, fluorescencia de Rayos-X se analizaron un total de 23 muestras, de las cuales 20 eran del Acueducto de Morelia y tres pertenecieron al afloramiento mientras que a través de la Espectroscopia Infrarroja se analizaron 22 muestras de las cuales, 20 fueron obtenidas del Acueducto de Morelia y dos del afloramiento.

Mediante la técnica analítica de la Microscopía Electrónica de Barrido también se analizaron un total de seis muestras del Acueducto de Morelia y en el caso de la técnica analítica Espectrometría Raman, se estudiaron tres muestras del Acueducto de Morelia.

Se puede concluir que la composición mineralógica de la ignimbrita fresca de Morelia se caracteriza por tener fases minerales, principalmente silicatos donde se encontraron las diferentes fases como podríamos ver en los resultados de los análisis la sanidina, oligoclasa–andesina y micas; así mismo, se encontró la

presencia de los óxidos como el cuarzo, cristobalita, timidita, hematita; dichos elementos se encuentran en forma de fenocristales en la matriz del vidrio volcánico.

Por otra parte, en los resultados de los análisis también se confirma que existe un proceso de degradación de la ignimbrita del Acueducto de Morelia debido a la naturaleza litológica del material, es decir, es de tipo natural y ello promovió la presencia de formación de dos tipos principales de agregados minerales llamado neoformación que se relaciona con una alteración secundaria de baja escala y que son los siguientes:

a) Montmorillonita: es un mineral del grupo de los silicatos, subgrupo filosilicatos y particularmente pertenece a las arcillas, según su composición química es un hidroxisilicato de magnesio y aluminio, con otros posibles elementos. Estos elementos se encontraron a través de la técnica analítica de difracción de Rayos-X en un total de cinco muestras que representan un 21.75% de las muestras analizadas y a través de la técnica analítica Espectroscopia Infrarroja se encontraron en las 22 muestras analizadas

b) Neoformación mineral: son nuevas fases minerales que se forman por los procesos de alteración que sufre la roca madre; predominan los sulfatos (yeso  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) que se encontraron en la técnica analítica de Espectrometría Raman con un total de 30% al respecto de los análisis realizados en el Acueducto de Morelia y a través de la técnica analítica de la Espectroscopia Infrarrojo se encontraron también los sulfatos (yeso  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), específicamente en la muestra 17 del Acueducto de Morelia.

Además, se encontraron los cloruros (halita) a través de la técnica analítica difracción de Rayos-X en 8 muestras, que representa un 34.38% del total de la muestra analizada. Así mismo, se detectó la presencia de los carbonatos a través de la técnica analítica de fluorescencia de Rayos-X en todas las 23 muestras analizadas.

Por otra parte, la degradación por los agentes externos o antropogénicos se detectan por la presencia de las esférulas de fosfatos que se encontraron en la muestra número 17 del Acueducto de Morelia utilizando la técnica de Microscopia

Electrónica de Barrido; esas esférulas de fosfatos son típicas de materiales asociados a actividades industriales, sabiendo que a poca distancia (5.3 kilómetros) se encuentra la ciudad industrial de Morelia.

También se encontró la presencia de carbono utilizando la técnica analítica de la Microscopia Electrónica de Barrido en todas las seis muestras analizadas, ello se debe a las emisiones de los vehículos que transitan en esta vía, que es una de las principales de la ciudad.

En este sentido, se puede concluir que las acciones antropogénicas relacionadas con la emisiones de contaminantes hacia la atmosfera a través de vehículos e industrias no acarrearán un impacto mayor para la degradación de la roca en el Acueducto de Morelia.

Con relación al grado de devitrificación de la ignimbrita se puede decir que existe una estrecha relación entre las propiedades mecánicas de las rocas y el grado de soldado: las muestras de ignimbritas más resistentes, más soldadas (son inalteradas o se caracterizan por menor grado de alteración), al contrario en el caso de las ignimbritas estas presentan una menor resistencia mecánica y las muestras se caracterizan por el alto grado de alteración (alto grado de desvitrificación).

Además, es importante mencionar que se encontraron diferencias significativas con el estudio previo de Serrato Rodríguez quien realizó en diciembre del 1993 un estudio con tres muestras de corazones de la ignimbrita tomados de tres tramos de la arquería del acueducto. Los resultados de este estudio arrojaron la presencia de arcillas montmorillonitas en pequeñas cantidades. El mismo estudio concluyó que esta montmorillonita proviene del intemperismo, pero de épocas geológicas anteriores.

Por otra parte, el análisis químico practicado a las muestras arrojó los siguientes resultados: con un contenido de carbonatos de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) de 15.88% en peso,

carbonato de magnesio ( $\text{MgCO}_3$ ) de 1.73%, óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) de 8.66% y el sílice ( $\text{SiO}_2$ ) de 74%.

Contrario al procedimiento realizado en los estudios anteriores, en esta investigación utilizando las técnicas de difracción de Rayos X y de Espectroscopia Infrarroja se pudo encontrar la alta presencia de la montmorillonita en la mayoría de estas técnicas.

Además, los análisis químicos realizados en la presente investigación mostraron unas variaciones considerables, para ejemplificar este hecho se promediaron los resultados obtenidos para la muestra y fueron los siguientes: con un contenido de carbonatos de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) de 3.89% en peso, carbonato de magnesio ( $\text{MgCO}_3$ ) de 0.79%, óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) de 1.97% y el sílice ( $\text{SiO}_2$ ) de 68.93%.

Es decir, después de 20 años de que se tomaron las primeras muestras los elementos estudiados presentaron las siguientes variaciones: con un contenido de carbonatos de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) de 11.99% en peso, carbonato de magnesio ( $\text{MgCO}_3$ ) de 0.94%, óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) de 6.69% y el sílice ( $\text{SiO}_2$ ) de 5.07%.

A continuación se puede observar como esos elementos fueron alterados a través del tiempo:

**Tabla 5. Comparación de los elementos químicos alterados en la ignimbrita.**

| Año/Elementos | $\text{CaCO}_3$ | $\text{MgCO}_3$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{SiO}_2$ |
|---------------|-----------------|-----------------|-------------------------|----------------|
| 1998          | 15.88%          | 1.73%           | 8.66%                   | 74%            |
| 2017          | 3.89%           | 0.79%           | 1.97%                   | 68.93%         |
| Variaciones   | 11.99%          | 0.94%           | 6.69%                   | 5.07%          |

Derivado de todo lo anterior, se observa que la ignimbrita sufre un proceso de degradación natural mayor que el que ocasiona el hombre; por lo tanto, cuando se utilice la ignimbrita como un material para la construcción de los monumentos históricos, se debe considerar una política de restauración permanente, es decir; los monumentos históricos como el Acueducto de Morelia deberían recibir

mantenimientos en ciertos periodos del tiempo( dependiendo del diagnóstico de cada momento) y no de manera eventual o casual.

La restauración debe realizarse tomando en cuenta la preservación de la estructura, pero en el mismo nivel de importancia se encuentra la sustitución de materiales que corresponda a la propuesta original, es decir, que provenga del mismo afloramiento, para tratar de mantener la propuesta inicial de los constructores.

### **7.1. Propuesta de restauración**

En el año 1997 se realizó la primera restauración oficial de Acueducto de Morelia, los primeros diagnósticos previos a la restauración arrojaron los siguientes resultados (Cabrera, 1998):

1. El tramo de arquería que aún existe, a pesar de tener más de 200 años de haberse construido, no presenta daños estructurales serios.
2. Los factores naturales y humanos han dejado en esta arquería huellas que pone al monumento en riesgo de sufrir deterioros más graves, o incluso derrumbes, por las causas que a continuación se describen:
3. La contaminación atmosférica producida por los gases emanados de motores de combustión interna ha dañado la piedra, causando manchas de hollín y los daños consecuentes.
4. Deterioro físico y visual. Diversos objetos metálicos en la estructura, como alcayatas, soleras, pernos, clavos, etc., además de ser elementos ajenos a la integridad arquitectónica del monumento, han agujerado y producido manchas oscuras en la piedra por el óxido de metal.
5. Daño natural. El agua de lluvia que cae dentro del antiguo ducto o canal es la causa más importante del deterioro de la mampostería debido a la pérdida del aplanado que impermeabilizaba los planos interiores; al infiltrarse agua por gravedad y capilaridad en la piedra y las juntas de mortero, va arrastrando la mezcla al grado que todos los arcos; por otra parte en el interior, exhiben la mayoría de sus juntas huecos de ancho y profundidad considerable.

Después de realizar el diagnóstico se decidieron algunas acciones de rescate y conservación que a continuación se describe (Cabrera, 1998):

- Liberaciones: de juntas, de sales, de flora parasita, de herrajes y letreros, de instalaciones parasitas.
- Consolidaciones: Restitución del junta perdida de la ignimbrita, inyección de grietas y fisuras.
- Restituciones: de la ignimbritas faltantes, reintegración de rejillas y puertas de las cajas de agua, reintegración del aplanado perdido del canal.

Desde los primeros trabajos se consideró lavar la ignimbrita con jabón no iónico y desmancharla con soluciones acuosas de amoníaco. El procedimiento consistió en remover la suciedad superficial de la cantera con jabón concentrado diluido en agua a razón de 4 centímetros cúbicos en 15 litros de agua.

En el caso de las juntas de los bloques unidas por cal, se eligió la cal viva proveniente de la caldera llamada Cal Muro; además se sustituyeron algunas piezas de mampostería fracturada o porción faltante solo si la porción faltante pone en riesgos la estabilidad estructural del arco o parte de inmueble. Para eso ello, se restituyeron las piezas faltantes sin tener en cuenta exactamente de donde salió esta ignimbrita, lo que si importaba para este proyecto era de cuidar la estructura del acueducto y que no faltara ninguna pieza (sin tener en cuenta el aspecto geológico, es decir, el origen de la ignimbrita).

Después de revisar el procedimiento de la restauración anterior, es importante de mencionar que existe otra alternativa para rescatar los monumentos históricos en Morelia sin alterar las construcciones originales en gran proporción.

En primer lugar, la técnica será conocer claramente el origen de la ignimbrita donde fue extraído para su construcción y de allí ir a buscar las piezas de reemplazo.

De hecho, se realizaron dos perfiles geológicos de la zona de Morelia, mismos que mostraron la existencia de ignimbrita con las características que presenta el

Acueducto de Morelia; sin embargo, no se conoce el volumen total de la reserva de esta ignimbrita, solo se sabe que proviene de la Caldera de Atécuaro.

Estos tipos de monumentos requieren de un programa de mantenimiento permanente; sin embargo, se ha observado que por los altos costos no se realiza desde 1997, una solución a este problema podría ser dividir los 1.700 metros de longitud en tramos más pequeños que pueda ser entendido anualmente.

Según Esperanza Ramírez Romero, presidenta del patronato Morelia patrimonio de la humanidad, el costo de mantenimiento de cada arco tiene un valor actual 8 mil pesos mexicanos (López, 2017) y el Acueducto está conformado por 253 arcos lo cual daría un total de 2,024,000 pesos mexicanos. Tomando en cuenta que los periodos municipales son de tres años, se podría gastar una tercera parte de la cantidad total cada año.

Para este tipo de restauraciones se requieren las participaciones de las autoridades federales, estatales y municipales porque es un esfuerzo conjunta de todo los integrantes de la sociedad, ya que en 1991 la UNESCO declaró a Morelia como Patrimonio de la Humanidad, por eso la tarea de cuidar y conservar estos bellos monumentos pero hasta ahora no se encuentra ningún antecedente en la literatura donde la UNESCO haya financiado económicamente los procesos de restauración del Acueducto de Morelia.

Por otra parte, es importante considerar y valorar la presencia de vehículos en algunos tramos del acueducto ya que la presencia de los vehículos automotores, especialmente de índole pesado, puede llegar a afectar cualquier trabajo de restauración que se realice por los choques, vibraciones que ocasiona el flujo vehicular.

Además, debe considerarse un fondo anual para trabajo de restauración, ya que podría darse el caso que se podría requerir una intervención inmediata como los casos de derrumbe de los arcos o mampostería ocasionado por fenómenos naturales como puede ser las lluvias intensas, ventiscas extremas o huracanes,

terremotos y también los daños ocasionados por factores humanos como un choque de vehículos en el Acueducto así como vandalismo.

Para realizar los trabajos de restauración es importante que se siga un curso legal porque el monumento del Acueducto de Morelia se encuentra entre la jurisdicción de dos instituciones: El Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) y el Ayuntamiento de Morelia.

El Instituto Nacional de Antropología e Historia, INAH, es el organismo del gobierno federal fundado en 1939, para garantizar la investigación, conservación, protección y difusión del patrimonio prehistórico, arqueológico, antropológico, histórico y paleontológico de México. Su creación ha sido fundamental para preservar nuestro patrimonio cultural (Mexico es cultura, 2016); mientras que el ayuntamiento de Morelia, su función es gestionar el patrimonio cultural de la ciudad así como su conservación y promoción (artículo 50, reglamento del organización del administración pública municipal de Morelia) (Ayuntamiento de Morelia, 2015).

Finalmente, toda la acción anteriormente descrita sería sometida a consideración de algunos de los actores que participaron en los trabajos de restauraciones y conservaciones del año 1997; ello con la finalidad de incorporar la experiencia previa y los conocimientos adquiridos durante el proceso anterior.

Los actores que participaron anteriormente y que serían considerados durante este nuevo proceso de restauración serían: el Gobierno del Estado de Michoacán, el ayuntamiento de Morelia, el comité pro-restauración, los medios de comunicaciones, las asociaciones de ingenieros civiles e el colegios de arquitectos de Michoacán y la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo a través del Instituto de Investigaciones en Metalurgia y Materiales y del Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra.

Como no existe una base de datos públicos y de fácil acceso para el público y para los investigadores tendría que realizarse en primer lugar un levantamiento de dos tipos:

- Levantamiento Fotográfico : Se propone que se realice a un levantamiento de fotografía los 253 arcos que entrega el Acueducto de Morelia tanto de la parte superior del canal e inferior por las caras laterales
- Levantamiento mineralógico: se propone que de cada arco se tome una muestra de 10 gramos de cada una de las caras del acueducto de Morelia, esta cantidad se sugiere porque es un tamaño de muestra que permite conocer las características químicas, cristaloquímicas, las concentraciones de los elementos sin dañar la estructura del monumento.
- Levantamiento estructural: Se propone que se realice un tercer levantamiento que se enfoque en la estructura de cada uno de los arcos del Acueducto de Morelia es decir estudiar el grado de inclinación que ha sufrido la estructura hasta este momento, el hundimiento que ha presentado, las grietas que presentan hoy día, ya sea por causa natural como los movimientos telúricos o la edad de la ignimbrita.

Estos tres levantamientos previos a cualquier trabajo de conservación o restauración son indispensables, porque permitiría identificar posible focos rojos que requieran intervenciones inmediatas por riesgo de colapso o para evitar un daño mayor.

Posteriormente, podría realizarse cualquier trabajo de mantenimiento por parte de la autoridades; sin embargo, se recomienda ampliamente que las acciones que se emprenda se acompañen por un grupo de expertos como geólogos, arquitectos, civiles, albañiles.

## Bibliografía

- A.Rittman. (1960). *Volcanoes and their activity*. Italy: University of Catania.
- Ayuntamiento de Morelia. (2015). Reglamento de organización del administración pública municipal de Morelia. Morelia: Catálogo Electrónico de la legislación del Estado de Michoacán. Retrieved from [leyes.michoacan.gob.mx/destino/O1398fu.pdf](http://leyes.michoacan.gob.mx/destino/O1398fu.pdf)
- Azavedo, S. (1981). *Estación de Ferrocarril de San Lazaro, investigación, análisis y proyecto de Restauración*. Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía.
- Baker, P. (2007). Pyroclastic rocks by R. V. Fisher and H.-U. Schmincke, Springer-Verlag, Berlin, New York: 472. ISBN 3-540-12756-9. *Geological Journal*, 20(3), 295–296. <https://doi.org/10.1002/gj.3350200312>
- Ball, J. (2005). Types of volcanics Eruptions. *Geoscience News and Information*, 1, 6. Retrieved from <https://geology.com/volcanoes/types-of-volcanic-eruptions/>
- Bates, R. & Jackson, J. (1984). Dictionary of geological terms (Tercera, p. 550). The American Geological Institute.
- Bigioggero, B.; Corona-Chávez, P.; Garduño-Monroy, V.; Carranza, E.; Lanza, L. . (2004). La “piedra de cantera ”de morelia desarrollo entre la tradicion y la cultura:un acercamiento geologico y una alternativa. In V. Garduno-Monroy (Ed.), *Contribuciones a la geologia e impacto a impacto ambiental* (Primera, pp. 14–42). Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo.
- Brandi, C. (2011). *Principios Teóricos de la Restauracion*. Roma: Instituto Nacional de Antropologia e Historia.
- Bruker. (2016). Espectrometro de FT-IR. Retrieved from [www.fisica.unam.mx/andreahtecnicas\\_equipos/ftir.html](http://www.fisica.unam.mx/andreahtecnicas_equipos/ftir.html)
- Bruker A X. (2009). *S8 TIGER Manual usuario*. Karlsruhe: Bruker AXS GmbH.
- Buque-Escobar, G. (2016). Un modelo educativo. Retrieved January 1, 2017, from <http://gduquees.blogspot.mx/2013/06/>
- Cabrera, J. (1998). Restauración de 1997. In *El Acueducto de Morelia* (p. 46). Morelia: Gobierno del Estado de Michoacan;Universidad Michoacan de San Nicolas de Hidalgo;Morelia,Patrimonio de la Humanidad,A.C.
- Carrara, L. (1997). *La piedra de cantera nella zona di Morelia Michoacan Messico;caratteri geologici e petrografici,caratteristiche fisico-meccaniche d impiego a scopo di restauro monumentale*. Universita degli Studi de Milano.
- Carreón,H.;Garduño-Monroy, V.; Ostrooumov, M. (2004). Analisis litológico, geoquimico y efectos de intemperismo del Ex-Convento de San Francisco,Morelia, Michoacán, México: Una propuesta metodologica para su restauracion. In V. Garduño-Monroy (Ed.), *Contribuciones a la geología e impacto a impacto ambiental* (pp. 44–45). Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Carroll, D. (1971). *Rock weathering*. New York,: Plenum Press,.
- Cervantes, E. & Dávila-Munguía, C. (2001). *Estudio geológico-geomorfológico de los Volcanes Tetillas- Quinceo, Morelia, Michoacán. Propuesta de cartografía jerárquica*. Morelia.

- Chiesa, S.; Garduño-Monroy, V.; Rodríguez, T.; Israde-Alcantar, E.; Arreygue, E.; Canuti, P. (1999). Efectos del clima (El Niño) en los fenómenos de Fluencia de las fallas geológicas de la ciudad de Morelia. *Geos*, Vol.9(No.2), p.84-93.
- Cisneros, G. (2016). *Estudio geológico-geomorfológico de los volcanes tetillas-Quinceo, Morelia, Michoacán. Propuesta de cartografía jerárquica*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Commons, A. (1973). *Evolución espacial de la ciudad de Morelia*. Uruapan: Gobierno del Estado de Michoacán. VI Congreso Nacional de Geografía.
- Consejo de Monumentos Nacionales. (2016). Monumentos Históricos - CMN. Consejo de Monumentos Nacionales. Gobierno de Chile. Retrieved March 20, 2017, from <http://www.monumentos.cl/consejo/606/w3-propertyvalue-36970.html>
- Consejo de recursos minerales. (1995). *Monografía geológico-minera del estado de Michoacan*. (Coordinación general de minería, Ed.) (Primero).
- Corona-Chávez, P.; Bigioggero, B.; Garduño-Monroy, V. (1997). *La Piedra de Cantera entre la tradición y la cultura. In Primer Foro Internacional sobre la Piedra de Cantera, Retrospectiva y perspectivas*. Morelia: Fimax Publicistas.
- Dirección General de Obras en Sitios y monumentos del Patrimonio cultural (1981). *Especificaciones generales de restauración*. Mexico: Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas. Retrieved from <https://books.google.com.mx/books/about/Especificaciones>
- Díaz-Berrio, S. & Orive, O. (1984). Terminología general en materia de conservación del Patrimonio Cultural Prehispánico. *Cuadernos de Arquitectura Mesoamericana*, 3, 5–10.
- Dirección de bibliotecas, archivos y museos. (2017). Consejo de Monumentos Nacionales de Chile. Chile. Retrieved from <http://www.monumentos.cl/monumentos>
- DOF. (2015). Ley Federal Sobre Monumentos Y Zonas Arqueológicas, Artísticas E Históricas, 1–21.
- Espasa. (1965). Conservar. Retrieved from <http://enciclopediaespasa.com>
- Espinoza, A. (1981). *La restauración, aspectos teóricos e históricos*. INAH/SEP.
- Feilden, B. (2004). *Conservation of Historic Buildings*. (E. Butterworth-Heinemann., Ed.). Oxford.
- Ferrari, L.; Garduño-Monroy, V.; Pasquarè, G.; Tibaldi, A. (1994). Volcanic and tectonic evolution of the central México: Oligocene to present. *Geofísica Internacional*, Vol.33(Num.1), p.91-105.
- Ferreira, E. (2017). *Deterioro por la vegetación en la construcción de la zona de monumentos históricos de la ciudad de Morelia, Michoacán, México*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Garduño-Monroy, V.; Arreygue R.; Canuti, P.; Casaglie, N.; Iotti, A.; Chiesa, S. (2002). Análisis geomecánico de la inestabilidad del escarpe La Paloma, en la Ciudad de Morelia, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 19, 91–106. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57219202>
- Garduño-Monroy, V.; Corona-Chávez, P.; Israde, I.; Mennelle, L.; Arreygue, E.; Bigioggero, B. (1999). *Carta geológica de Michoacan Escala 1:250 000*. (U. Departamento de geología y Mineralogía, IIM, Ed.). Morelia.
- Garduño-Monroy, V. & Israde, E. (2004). La geología de la región de Morelia. In *Contribuciones a la geología e impacto ambiental* (Primera). Morelia.

- Garduño-Monroy, V. & Israde-Alcántara, I.; (1999). Lacustrine record in volcanic intra-arc setting. The evolution of the Late Neogene Cuitzeo basin system (central western Michoacan, Mexico). *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*. Vol.15, Vol.15(No.1-3), 209–227.
- Garduño-Monroy, V.; Pérez-Lopez, R., Israde-Alcantara, I., Rodríguez-Pascua, M.; Szykaruk, E., Hernández-Madrigal, V.; Mora-Chaparro, J. (2009). Paleoseismology of the southwestern Morelia-Acambay fault system, central Mexico. *Geofísica Internacional*, 48(3), 319–335.
- Garduño-Monroy V.; Estrada, G.; García, A.; Carreón, H. (1999). El Origen volcánico de la cantera de Morelia.
- Garduño-Monroy, V.; Arregue-Rocha, E.; Garcia, R. (2001). Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* *Research*, v. 18., 37-54.
- Gilbert, E. (1976). *The restorer's handbook of easel painting* (Primera). New York: Van Nostrand Reinhold.
- Gómez, M. (2012). *Geología y estratigrafía volcánica en la sierra de Mil Cumbres*. Universidad Michoacán de San Nicolás de Hidalgo.
- Herrejón, C. & Jaramillo, J. (1991). *Los orígenes de Valladolid de Michoacán y su calzada de Guadalupe*. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Hurlbut, S. & Cornelis, K. (1996). *Manual de Mineralogía* (segunda). Barcelona: Reverte, S.A.
- INEGI. (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Morelia, Michoacán de Ocampo. *Prontuario de Información Geográfica Municipal de Los Estados Unidos Mexicanos. Morelia, Michoacán de Ocampo*, 1–9. Retrieved from <http://inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/16/16040.pdf>.
- INEGI. (2017). *cuentame*. Retrieved April 23, 2017, from <http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/mich/territorio/clima.aspx?tema=me&e=16>
- Kanen, R. (2001). Pyroclastic Deposit. Retrieved August 9, 2016, from <http://geologyone.com/pyro.htm>.
- López, E. (1999). *Cambio de uso de suelo y crecimiento urbano en la Ciudad de Morelia*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Lopez, R. (2017). El Acueducto, sin mantenimiento por más de 20 años. Retrieved February 1, 2017, from <http://michoacantrespuntocero.com/el-acueducto-sin-mantenimiento-por-mas-de-20-anos/>
- Lopez, R. (1993). *Geología general de México*. Ciudad de México: Trillas.
- Marshall, P. (1935). *Acid rocks of Tupo-Rotorua volcanic district*. New Zealand.
- México es cultura de la carretera nacional. (2016). Reseña INAH. Retrieved July 2, 2017, from [www.difusion.inah.gob.mx/index.php/resenas/32-resena-en-2016](http://www.difusion.inah.gob.mx/index.php/resenas/32-resena-en-2016)
- Munsell, A. (2000). *Munsell soil color charts*. New Windsor: Gretag Macbeth.
- Ortuño, Y. (2009). *Modelo dinámico de cambio de cobertura y uso de suelo en una zona de transición urbano-rural, entre la ciudad de Morelia y el ejido de Jesús del Monte*. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Ostrooumov, M.; Garduño-Monroy, V.; Carreón, H.; Rufino, S. (2003). Mineralogía y geoquímica de los procesos de degradación en monumentos históricos: Primer acercamiento a un caso mexicano (Morelia, Michoacán). *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 20(3), 223–232.
- Ostrooumov, M. (2012a). *Avances recientes de la Espectroscopia Raman en Ciencias de la Tierra* (Monografía). Mexico: Instituto de Geofísica.
- Ostrooumov, M. (2012b). *Catálogo de FT-Raman Espectros* (Monografía). México: Instituto de Geofísica.
- Ostrooumov, M. (2009). *Mineralogía Avanzada en México*. Morelia: Boletín de la Sociedad Mexicana de Mineralogía.
- Oyarzun, P. & Higuera, R. (2016). Mineralogía y geoquímica ambiental: Introducción al curso. Retrieved August 1, 2017, from [https://previa.uclm.es/users/higuera/MGA/Tema00\\_Intro.htm](https://previa.uclm.es/users/higuera/MGA/Tema00_Intro.htm)
- Pasquerè, G.; Garduño-Monroy, V.; Tibaldi, A.; Vezzol, L. (1991). Geological map of the central sector of Mexican Volcanic Belt, States of Guanajuato and Michoacan, 22. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/313366242>
- Pola, A.; Martínez-Martínez, J.; Macías, J.; Fusi, N.; Crosta, G.; Garduño-Monroy, V.; Núñez-Hurtado, J. (2016). Geomechanical characterization of the Miocene Cuitzeo ignimbrites, Michoacán, Central Mexico. *Engineering Geology*, 214, 79–93. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.10.003>
- RAE. (2006a). Conservación. Retrieved from [lexicon.org/es/conservacion](http://lexicon.org/es/conservacion)
- RAE. (2006b). Deteriorar. Retrieved from [lexicon.org/es/deteriorar](http://lexicon.org/es/deteriorar)
- Redigolo, M. (2015). *Standard Operating Procedure : Geol Jsm 7600F Scanning Electron Microscope*. Microscope. Virginia.
- Ribadeneira, A. (2003). Teoría de la arquitectura. In *Diccionario razonado de la arquitectura francesa del siglo XI al XVI tema sobre la arquitectura* (p. 228). Taschen.
- Rinuy, A. (2014). La restauration hier et aujourd'hui en sauver l'art, conserver, analyser et restaurer. París.
- Romeros, M. (2016). Los Acueductos de México. FCE: México.
- Salazar, G. (2015). Reconsideraciones de la ley minera referente al trámite de concesiones para exploración y explotación de yacimientos de roca-cantera, grava, arena y arcilla. Retrieved July 4, 2016, from <http://html.rincondelvago.com/concesion-minera-en-panama.html>
- Secretaría del Patrimonio Nacional (1975). Vocabulario arquitectónico ilustrado. Mexico. Retrieved from [https://books.google.com/books/about/Vocabulario\\_arquitectonico](https://books.google.com/books/about/Vocabulario_arquitectonico)
- Segob. (2015). Ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, Artísticas e Históricas. Diario Oficial de la Federación. Retrieved from [www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/131\\_280115.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/131_280115.pdf) · Archivo PDF
- UNESCO. (1964). Carta Internacional sobre la Conservación y la Restauración de los Monumentos y los Sitios. Venecia. Retrieved from [http://www.icomos.org/charters/venice\\_sp.pdf](http://www.icomos.org/charters/venice_sp.pdf)
- UNESCO. (1972). Patrimonio mundial. Retrieved September 11, 2017, from [www.unesco.org/new/es/mexico/work-areas/culture/world-heritage](http://www.unesco.org/new/es/mexico/work-areas/culture/world-heritage)
- Vargas Uribe, G. (2009). *Del proyecto de ciudad a la ciudad sin proyecto: el desarrollo histórico territorial de la traza urbana de la ciudad de Valladolid-Morelia 1541-2009*. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de

Hidalgo.

Walker, G. (1973). Explosive volcanic eruptions – a new classification scheme. *International Journal of Earth Sciences*, 62(2), 431–446. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01840108>

Zamudio, F. (1995). *Morelia patrimonio de la humanidad*. Morelia: Colegio de Michoacán.



[illegible]

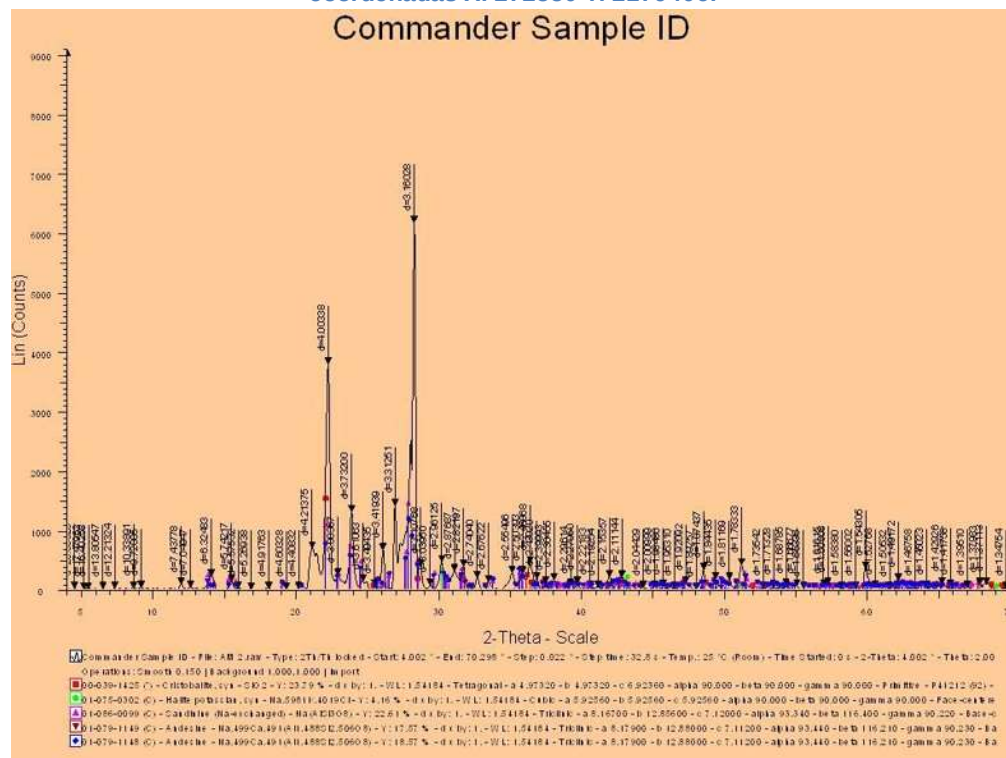
**Commander Sample ID**

The figure shows an X-ray diffraction (XRD) pattern. The y-axis represents intensity in 'Lin (Counts)' ranging from 0 to 7000. The x-axis represents the diffraction angle '2-Theta - Scale' ranging from approximately 5 to 68 degrees. Several sharp diffraction peaks are visible, with prominent ones at approximately 21°, 23°, 26°, 29°, 31°, 38°, 42°, 45°, 48°, 50°, 52°, 55°, 58°, 60°, and 62° 2θ.

**Legend:**

- Commander Sample ID - Fit: fit to basis 3, max Type: 2Th; locked Start: 4.002 ° End: 70.298 ° Step: 0.022 ° Temp: 25 ° (room) Time Started: 0 s - 2 Th bin: 4.002 ° Th
- Smooth: 0.150 Background: 4.000, 1.000 [in part]
- 00-036-1425 C<sub>2</sub>-C Nitrocellulose - QDZ-VI 77.30 % - d By: L - VdL: 1.24184 - Tetragonal - a: 4.97320 - b: 4.97320 - c: 6.92360 - alpha: 90.000 - beta: 90.000 - gamma: 90.000 - Prime Ref: F(12) (2) -
- 03-065-0466 C<sub>2</sub>-O-kartellite, tra - QDZ-VI 36.33 % - d By: L - VdL: 1.24184 - Hexagonal - a: 4.31410 - b: 4.31410 - c: 6.54040 - alpha: 90.000 - beta: 90.000 - gamma: 120.000 - Prime Ref: P 321 (1) 54
- 00-10-0393 C<sub>2</sub>-Rhombohedral - BaSO<sub>4</sub> 02 - VI 19.21 % - d By: L - VdL: 1.24184 - Triclinic - a: 8.16500 - b: 12.87300 - c: 7.11100 - alpha: 93.150 - beta: 116.400 - gamma: 90.250 - Rietveld
- 00-071-0261 C<sub>2</sub>-Tetrahedron - QDZ-VI 47.34 % - d By: L - VdL: 1.24184 - Triclinic - a: 8.93200 - b: 12.16000 - c: 8.12400 - alpha: 90.000 - beta: 90.000 - gamma: 90.000 - Rietveld - FI 6 - 64 - 13
- ▼ 00-015-1202 D<sub>2</sub>-Asterite, sodita, Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub> 02 - CO<sub>2</sub> BaCO<sub>3</sub> 144.00 % - VI 31.23 % - d By: L - VdL: 1.24184 - Triclinic - a: 8.17400 - b: 12.86500 - c: 7.10200 - alpha: 93.150 - beta: 116.100 - gamma: 90.500
- 00-041-0596 C<sub>2</sub>-Asterite - CO<sub>2</sub>+BaCO<sub>3</sub> 0.302 + 15.21 % - d By: L - VdL: 1.24184 - Triclinic - a: 8.28700 - b: 8.28700 - c: 16.15200 - alpha: 90.000 - beta: 90.000 - gamma: 120.000 - Prime Ref: -

**Ilustración 44. Resultado de difracción de Rayos-X muestra número 2 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272550 Y: 2179406.**



**Ilustración 45.Resultados de difracción de Rayos-X muestra número 3 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272470 Y: 2179423.**

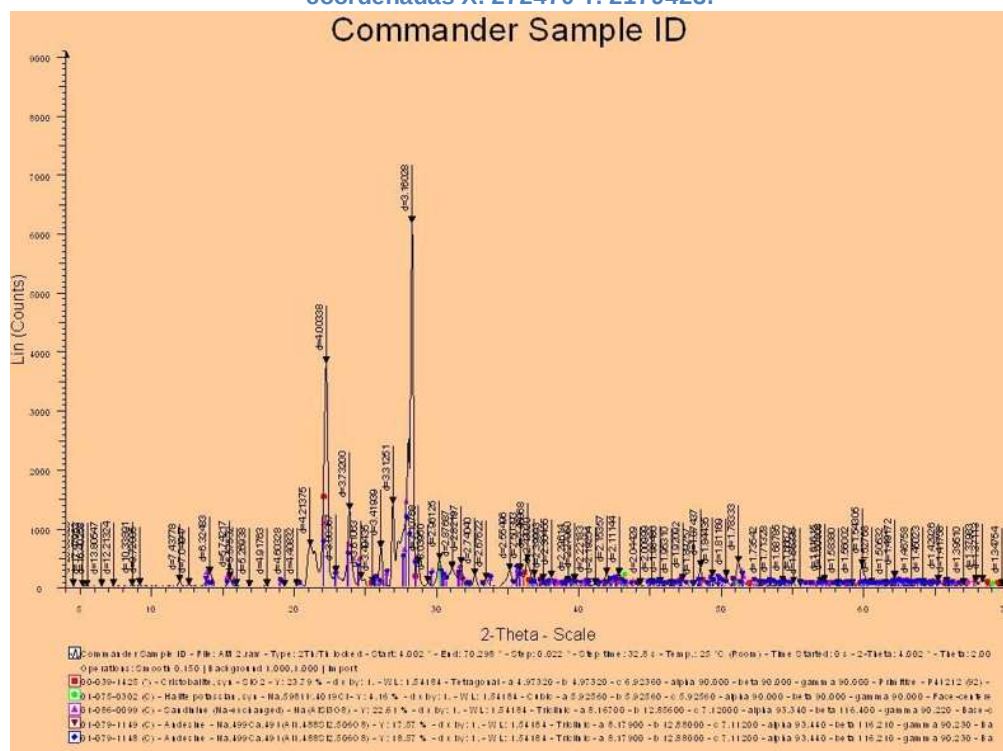


Ilustración 46. Resultados de difracción de Rayos-X muestra número 4 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272439 Y: 2179428.

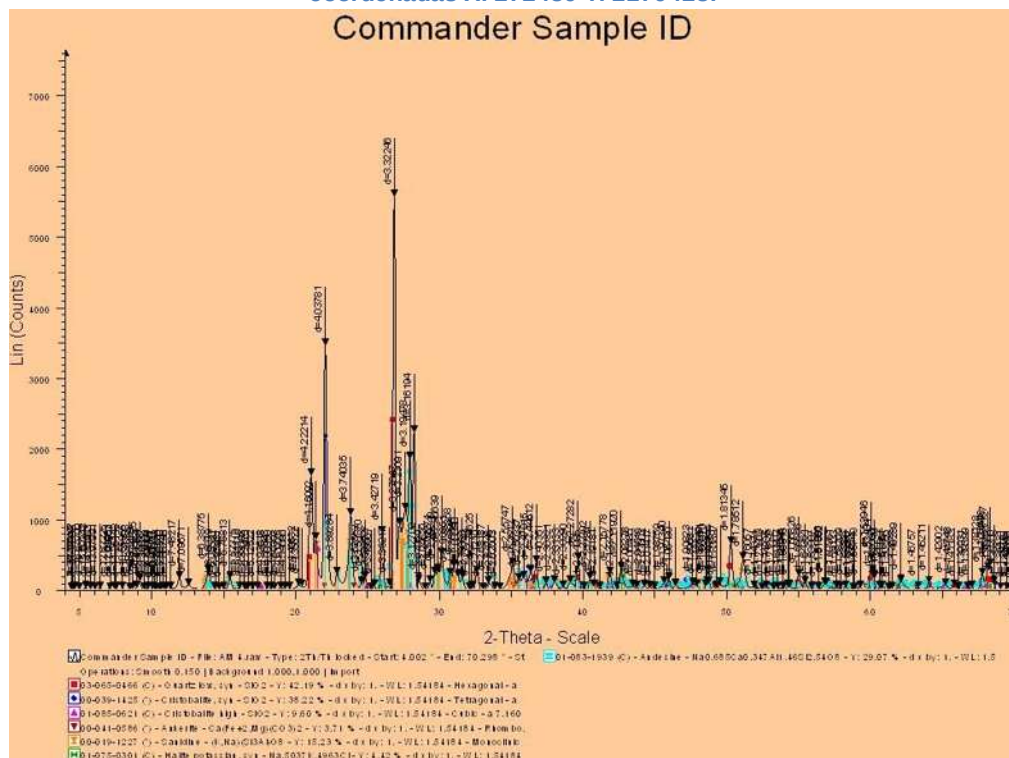
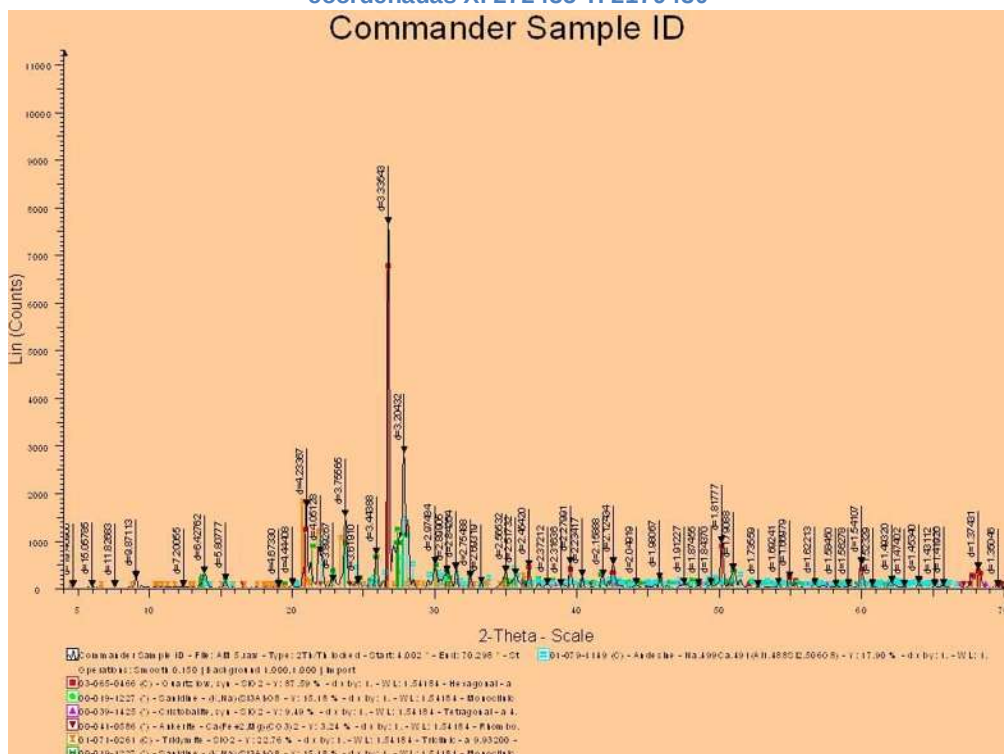
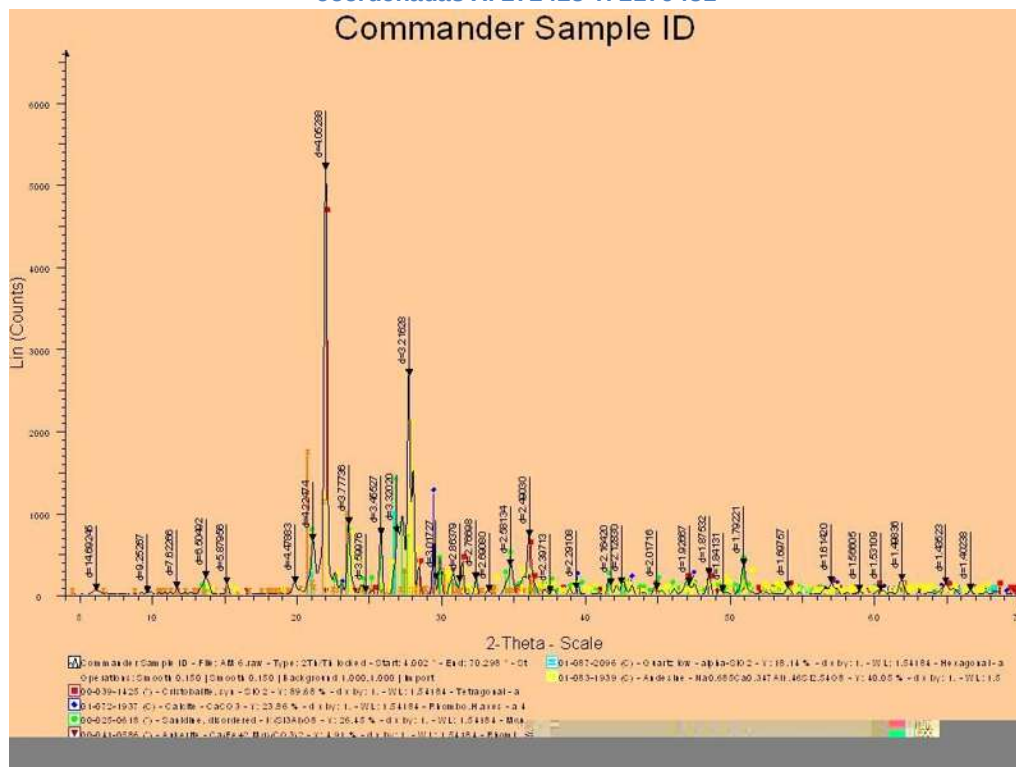


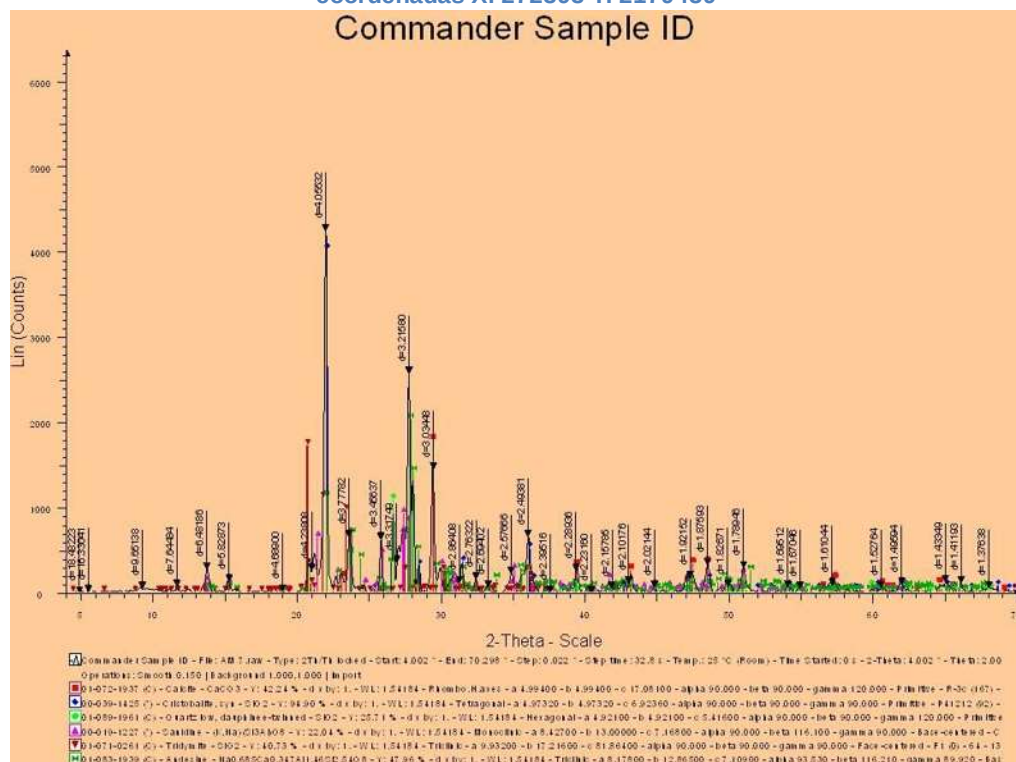
Ilustración 47. Resulta de difracción de Rayos-X muestra número 5 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272435 Y: 2179430



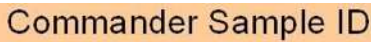
**Ilustración 48. Resultado de difracción de Rayos-X muestra número 6 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272423 Y: 2179431**



**Ilustración 49. Resultado de difracción de Rayos-X muestra número 7 del Acueducto de Morelia  
coordenadas X: 272393 Y: 2179439**



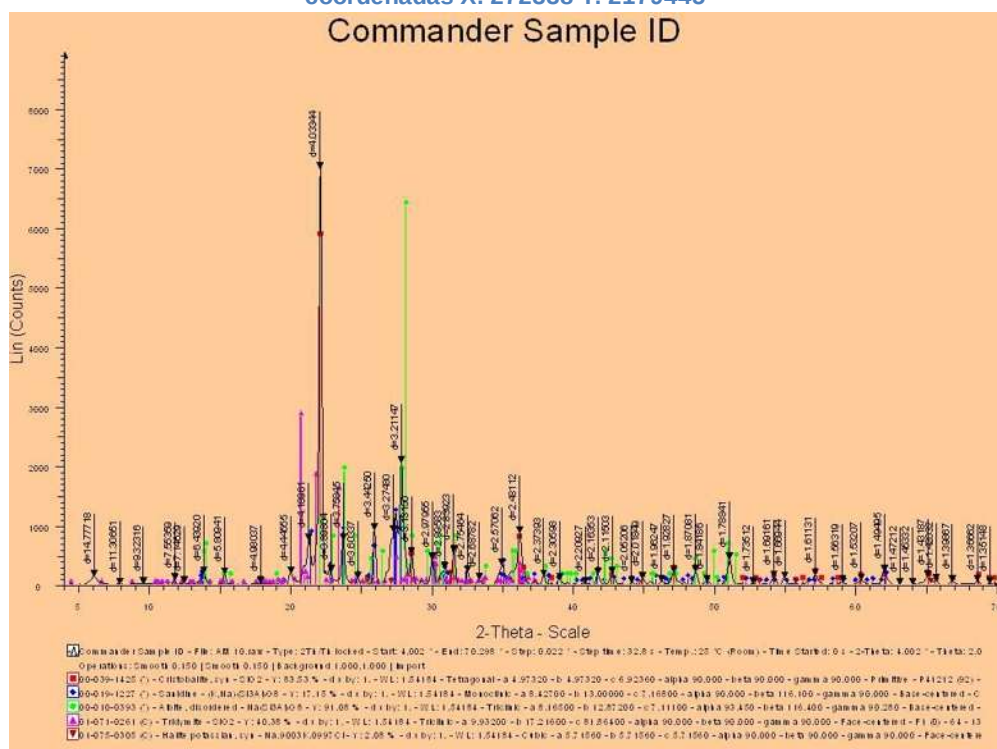
Commander Sample ID



272354 Y: 2179441



**Ilustración 52. Resultado de difracción de Rayos-X muestra número 10 del Acueducto de Morelia  
coordenadas X: 272338 Y: 2179445**



**Ilustración 53. Resultado de difracción de Rayos-X del Acueducto de Morelia muestra número 11 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272317 Y: 2179449.**

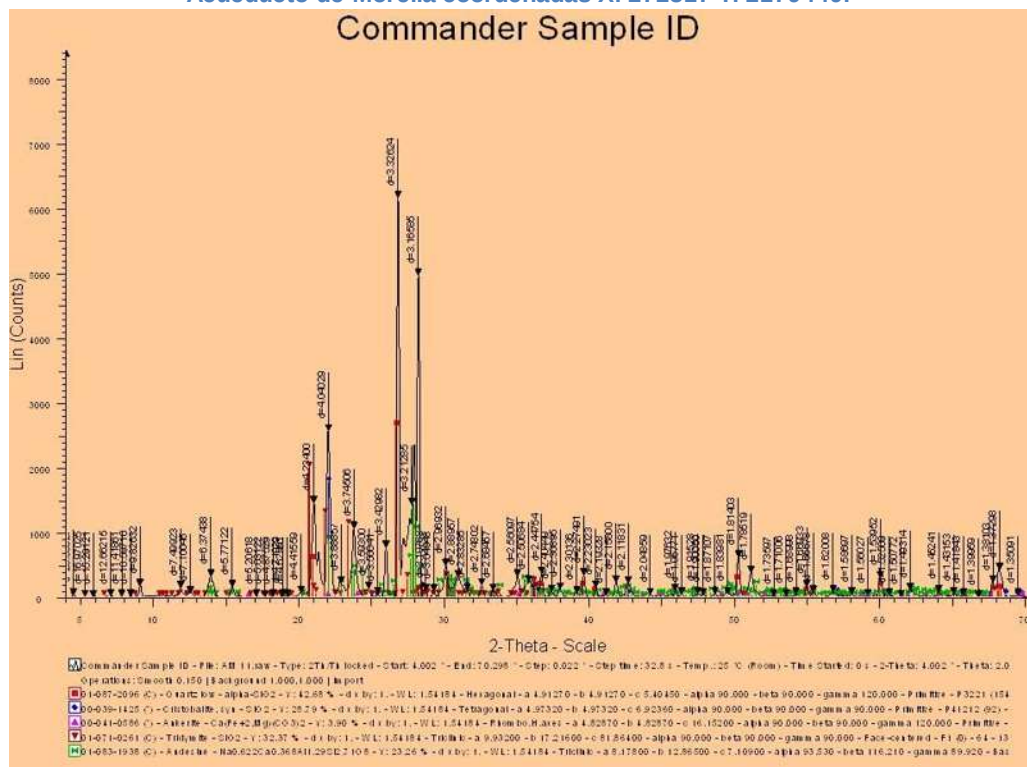


Ilustración 54. Resultado de difracción de Rayos-X muestra número 12 del Acueducto de Morelia  
coordenadas X: 272293 Y: 2179457

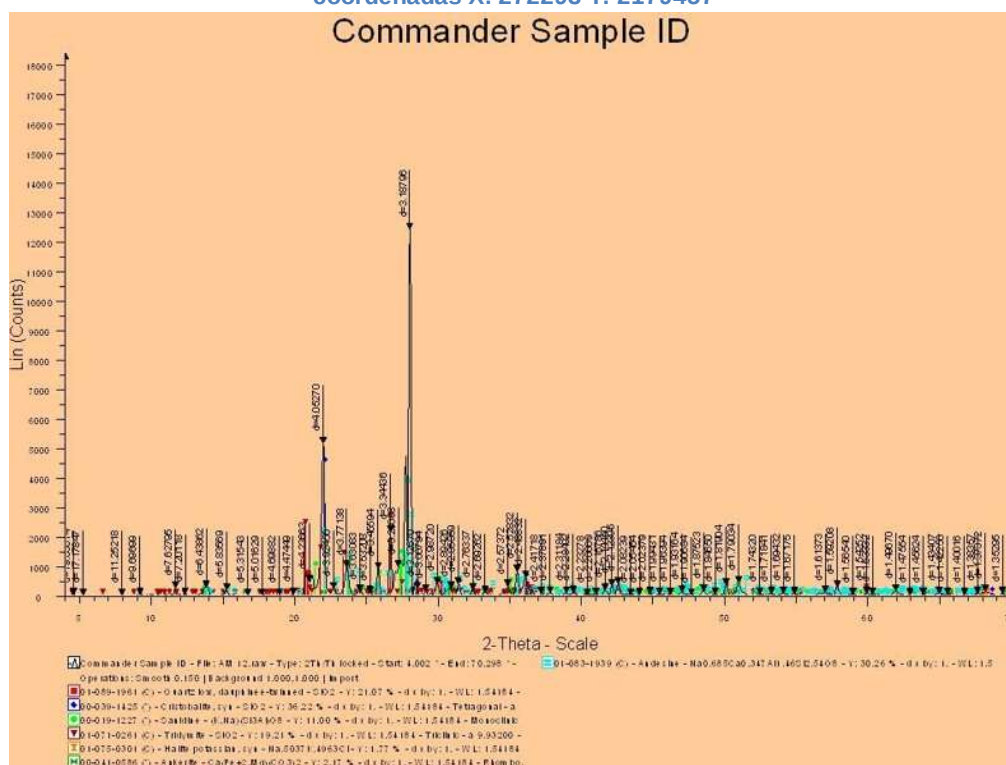


Ilustración 55. Resultado de difracción de Rayos-X muestra número 13 del Acueducto de Morelia  
coordenadas X: 272223 Y: 2179472

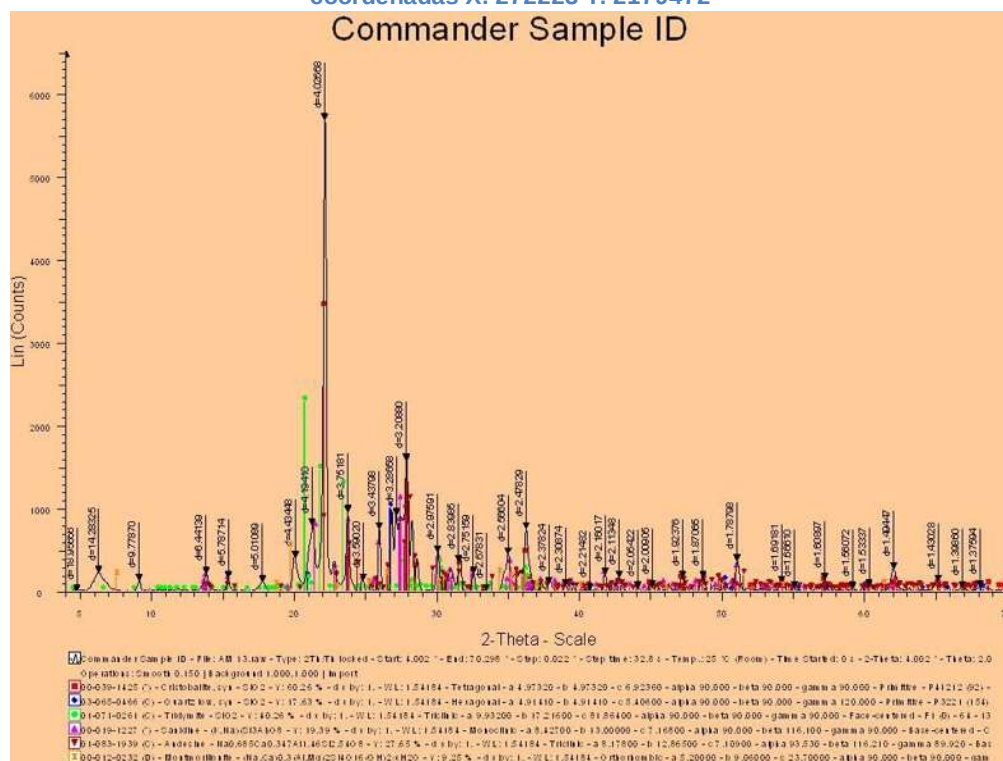


Ilustración 56. Resultado de difracción de Rayos-X muestra número 14 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 271140 Y: 2180160.

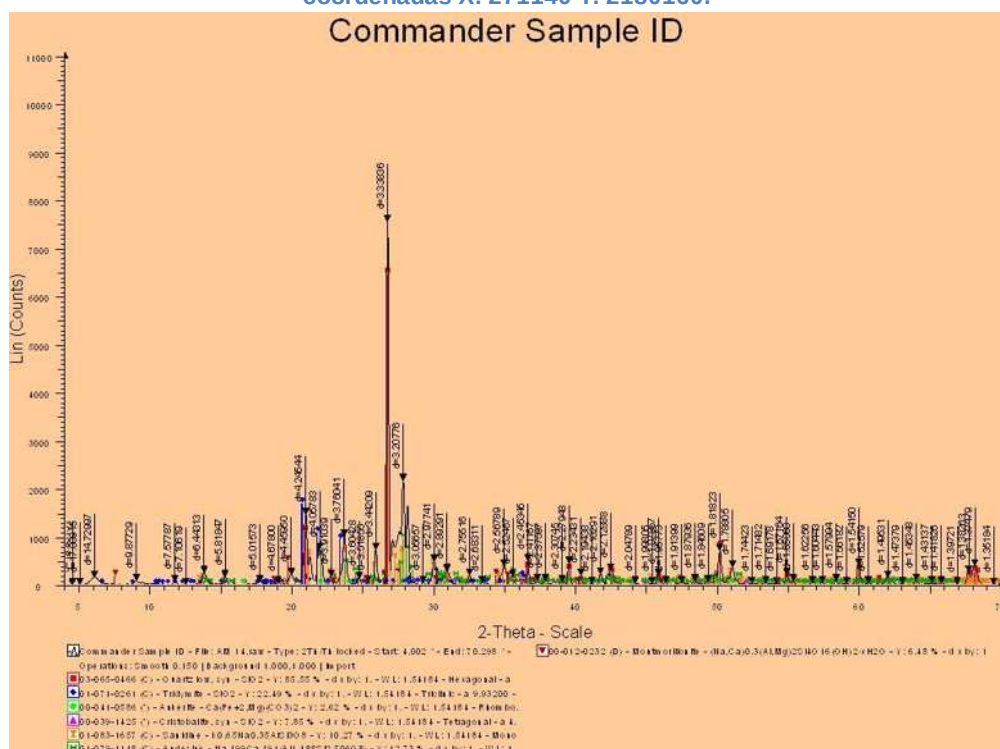


Ilustración 57. Resultado de difracción de Rayos-X muestra número 15 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 271160 Y: 2180153

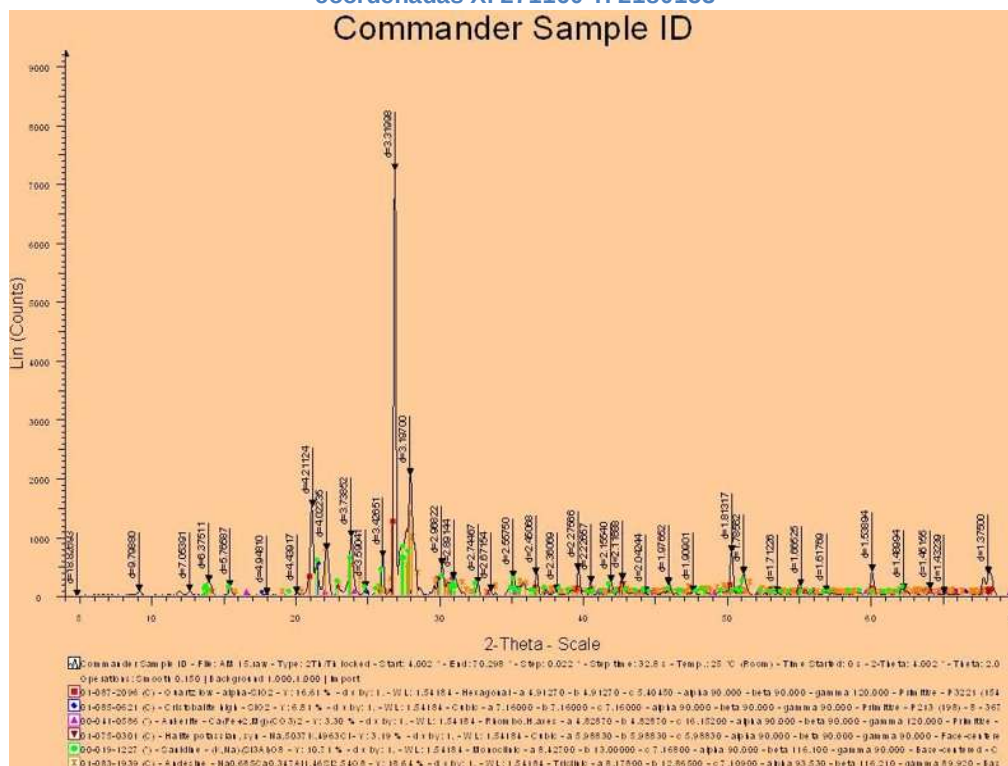


Ilustración 58. Resultado de difracción de Rayos-X muestra 16 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 271160 Y: 2180109.

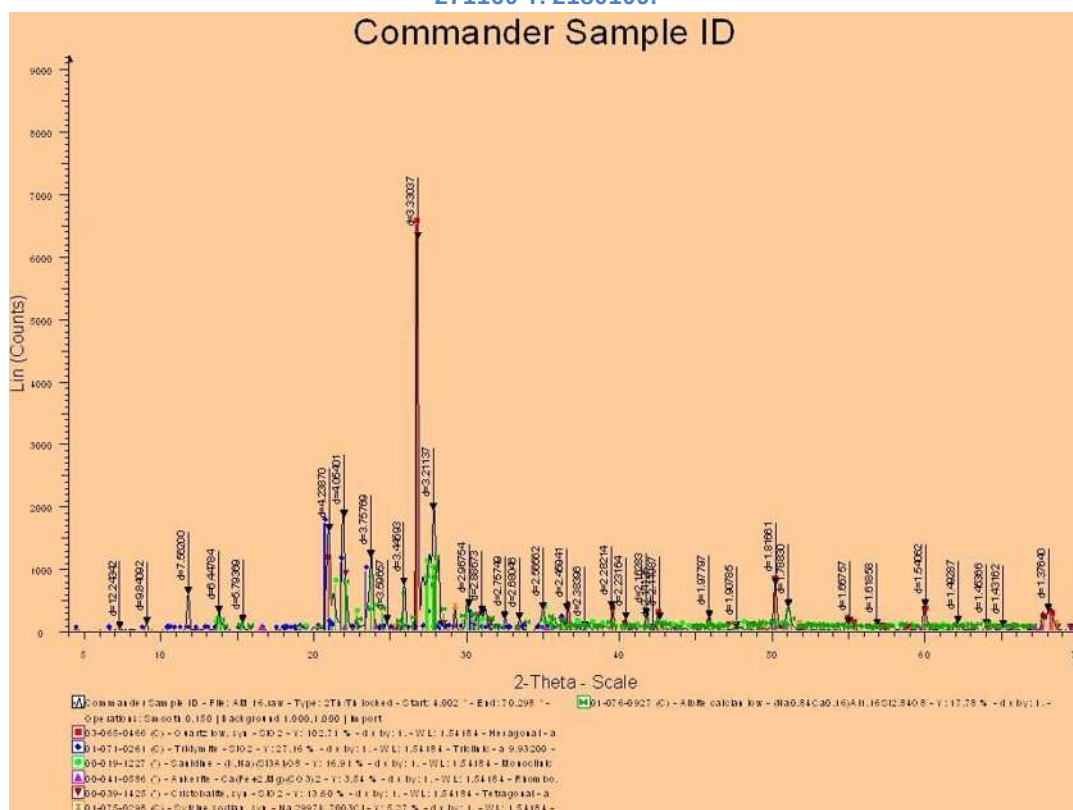
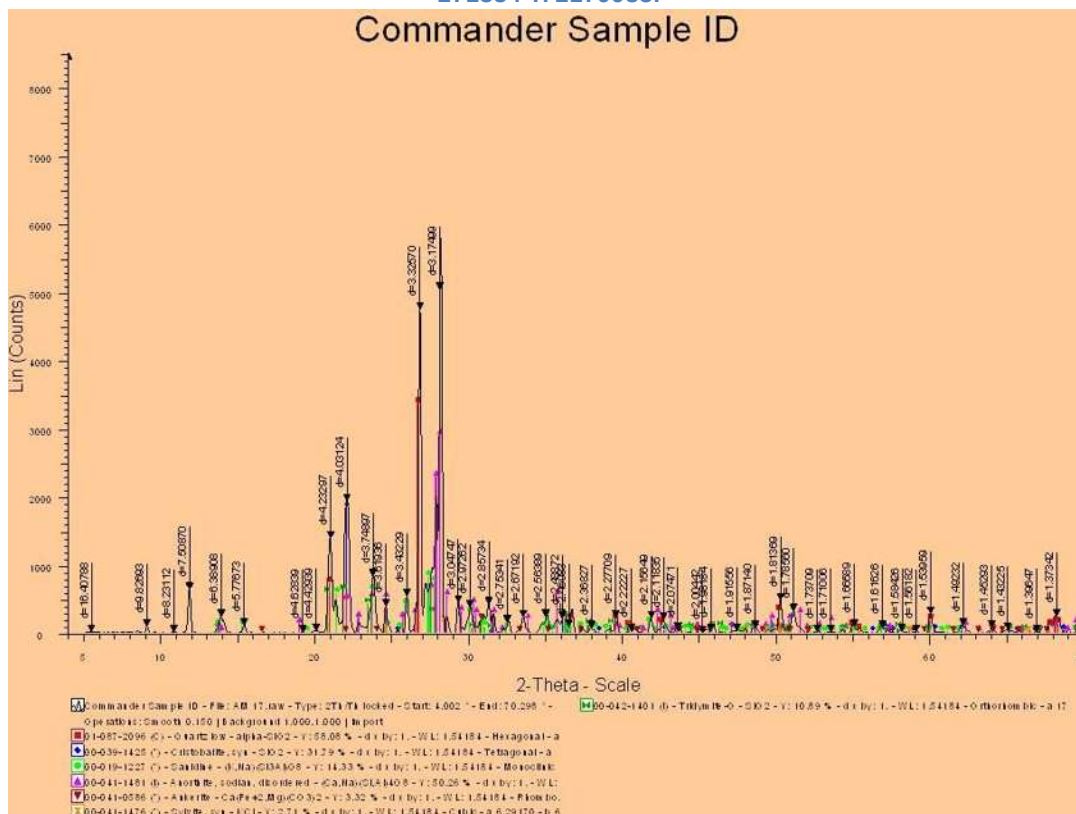
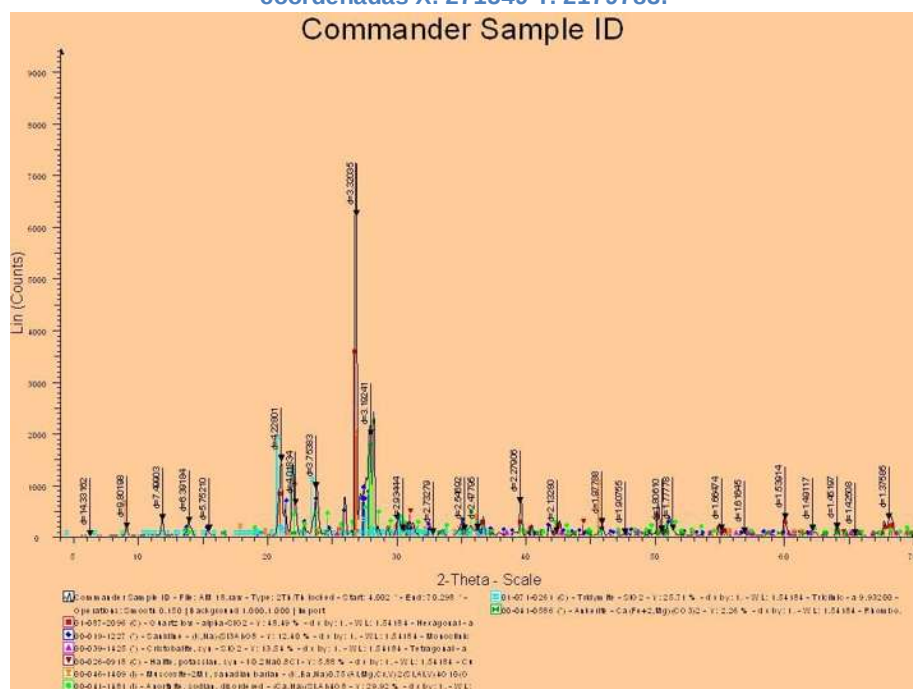


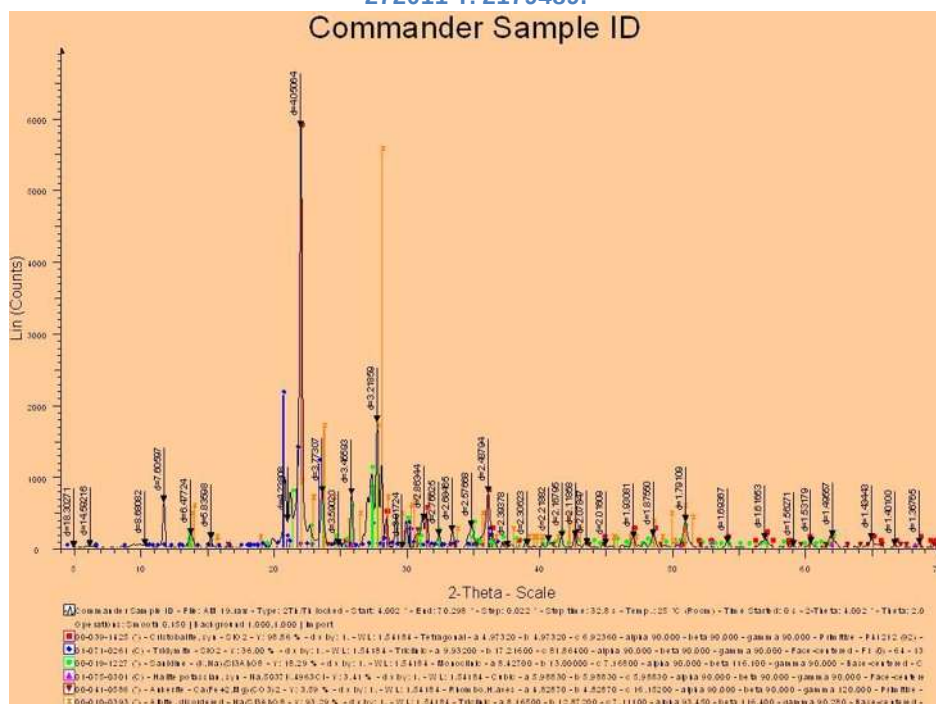
Ilustración 59. Resultado de difracción de Rayos-X muestra 17 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 271334 Y: 2179983.



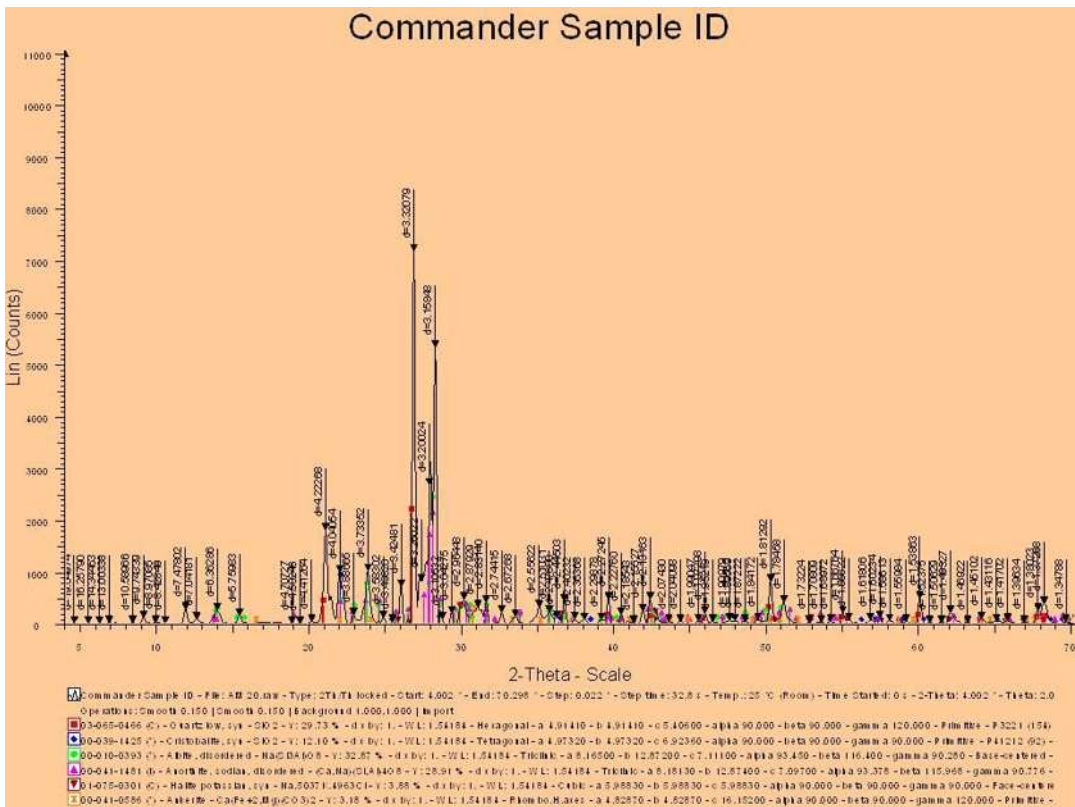
**Ilustración 60. Resultado de difracción de Rayos-X muestra número 18 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 271549 Y: 2179783.**



**Ilustración 61. Resultado de difracción de Rayos-X muestra 19 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272011 Y: 2179489.**



**Ilustración 62. Resultado de difracción de Rayos-X muestra número 20 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272187 Y: 2179489.**



**Ilustración 63. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X Afloramiento número 1 coordenadas X: 270356 Y: 2180637.**

Eval2 V2.5.500 Admin 12/13/2016 1:38:00 PM

Sample: Afloramiento1

Measured on 12/13/2016 1:22:19 PM

Sample measured by Admin

Measurement method: Full Analysis-He34mm

| SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | CaO       | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SO <sub>3</sub> |
|------------------|--------------------------------|------------------|-------------------|-----------|--------------------------------|-----------------|
| 47.2 KCps        | 5.8 KCps                       | 23.4 KCps        | 0.1 KCps          | 14.6 KCps | 57.2 KCps                      | 3.7 KCps        |
| 66.6 %           | 12.7 %                         | 5.24 %           | 4.38 %            | 3.64 %    | 2.41 %                         | 2.17 %          |

|          |          |          |          |          |          |          |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| P2O5     | MgO      | Cl       | TiO2     | BaO      | V2O5     | SrO      |
| 0.8 KCps | 0.2 KCps | 1.7 KCps | 0.9 KCps | 0.3 KCps | 0.2 KCps | 5.7 KCps |
| 0.984 %  | 0.854 %  | 0.556 %  | 0.185 %  | 0.125 %  | 359 PPM  | 256 PPM  |

|                  |                   |          |                |           |
|------------------|-------------------|----------|----------------|-----------|
| ZrO <sub>2</sub> | Rb <sub>2</sub> O | ZnO      | Intensity Scal | Compton   |
| 6.6 KCps         | 4.4 KCps          | 0.8 KCps |                | 51.4 KCps |
| 222 PPM          | 195 PPM           | 109 PPM  | 1.522          | 63 %      |

**Ilustración 64. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X Afloramiento número 2 coordenadas X: 270356 Y: 2180637.**

Eval2 V2.5.500 Admin 12/13/2016 1:38:30 PM

Sample: Afloramiento2

Measured on 12/13/2016 1:29:30 PM

Sample measured by Admin

Measurement method: Full Analysis-He34mm

| SiO2      | Al2O3    | K2O       | Na2O     | Fe2O3     | CaO      | P2O5     |
|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|----------|
| 55.7 KCps | 6.9 KCps | 27.2 KCps | 0.1 KCps | 62.1 KCps | 6.8 KCps | 0.8 KCps |
| 71.6 %    | 13.5 %   | 5.57 %    | 3.61 %   | 2.30 %    | 1.55 %   | 0.924 %  |

| SO3      | Cl       | TiO2     | BaO      | ZrO2     | Rb2O     | MnO      |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0.6 KCps | 0.7 KCps | 1.1 KCps | 0.3 KCps | 7.4 KCps | 5.3 KCps | 0.3 KCps |
| 0.335 %  | 0.213 %  | 0.207 %  | 0.136 %  | 248 PPM  | 206 PPM  | 148 PPM  |

| SrO      | ZnO      | Intensity Scal | Compton   |
|----------|----------|----------------|-----------|
| 3.5 KCps | 0.5 KCps |                | 52.1 KCps |
| 136 PPM  | 57.7 PPM | 1.395          | 71 %      |

**Ilustración 65. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X Afloramiento número 3 coordenadas X: 270356 Y: 2180637.**

Eval2 V2.5.500 Admin 12/13/2016 1:38:55 PM

Sample: Afloramiento3

Measured on 12/13/2016 1:36:42 PM

Sample measured by Admin

Measurement method: Full Analysis-He34mm

| SiO2      | Al2O3    | K2O       | Na2O     | Fe2O3     | CaO      | P2O5     |
|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|----------|
| 56.4 KCps | 7.0 KCps | 27.2 KCps | 0.1 KCps | 58.6 KCps | 8.4 KCps | 0.9 KCps |
| 71.0 %    | 13.6 %   | 5.48 %    | 3.54 %   | 2.14 %    | 1.87 %   | 0.950 %  |

| SO3      | Cl       | TiO2     | CeO2     | ZrO2     | Rb2O     | MnO      |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1.4 KCps | 0.8 KCps | 1.0 KCps | 0.2 KCps | 6.3 KCps | 5.1 KCps | 0.4 KCps |
| 0.776 %  | 0.234 %  | 0.185 %  | 509 PPM  | 204 PPM  | 196 PPM  | 179 PPM  |

| SrO      | Intensity Scal | Compton   |
|----------|----------------|-----------|
| 3.8 KCps |                | 51.2 KCps |
| 146 PPM  | 1.370          | 74 %      |

**Ilustración 66. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 1 del Acueducto de Morelia**  
**coordenadas X: 272666 Y: 217980.**

Eval2 V2.5.500 Admin 12/13/2016 1:08:54 PM

Sample: AM1

Measured on 12/13/2016 10:49:37 AM

Sample measured by Admin

Measurement method: Full Analysis-He34mm

| SiO2      | Al2O3    | K2O       | Na2O     | Fe2O3     | CaO      | P2O5     |
|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|----------|
| 53.8 KCps | 6.4 KCps | 27.5 KCps | 0.2 KCps | 58.6 KCps | 8.7 KCps | 0.9 KCps |
| 70.1 %    | 12.9 %   | 5.70 %    | 4.46 %   | 2.21 %    | 2.01 %   | 0.959 %  |

| MgO      | Cl       | TiO2     | SO3      | Rb2O     | ZrO2     | SrO      |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0.2 KCps | 1.4 KCps | 1.0 KCps | 0.4 KCps | 5.1 KCps | 5.8 KCps | 4.5 KCps |
| 0.609 %  | 0.432 %  | 0.201 %  | 0.198 %  | 202 PPM  | 185 PPM  | 179 PPM  |

| MnO      | ZnO      | Intensity Scal | Compton   |
|----------|----------|----------------|-----------|
| 0.3 KCps | 0.5 KCps |                | 51.9 KCps |
| 138 PPM  | 63.7 PPM | 1.410          | 70 %      |

**Ilustración 67. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 2 del Acueducto de Morelia**  
**coordenadas X: 272550 Y: 2179406.**

Eval2 V2.5.500 Admin 12/13/2016 1:10:13 PM

Sample: AM2

Measured on 12/13/2016 10:57:05 AM

Sample measured by Admin

Measurement method: Full Analysis-He34mm

| SiO2      | Al2O3    | K2O       | Na2O     | Fe2O3     | CaO      | SO3      |
|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|----------|
| 56.2 KCps | 6.8 KCps | 29.5 KCps | 0.1 KCps | 61.8 KCps | 8.9 KCps | 2.0 KCps |
| 69.8 %    | 13.0 %   | 5.83 %    | 4.11 %   | 2.26 %    | 1.98 %   | 1.04 %   |

| P2O5     | MgO      | Cl       | TiO2     | BaO      | PbO      | MnO      |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0.9 KCps | 0.1 KCps | 0.8 KCps | 1.1 KCps | 0.3 KCps | 1.8 KCps | 0.5 KCps |
| 0.901 %  | 0.404 %  | 0.246 %  | 0.198 %  | 0.146 %  | 260 PPM  | 250 PPM  |

| ZrO2     | Rb2O     | SrO      | CuO      | MoO3     | Intensity Scal | Compton   |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------------|-----------|
| 6.6 KCps | 5.3 KCps | 3.5 KCps | 0.1 KCps | 2.0 KCps |                | 50.1 KCps |
| 212 PPM  | 202 PPM  | 135 PPM  | 68.4 PPM | 62.4 PPM | 1.348          | 76 %      |

**Ilustración 68. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 3 del Acueducto de Morelia**  
**coordenadas X: 272470 Y: 2179423.**

Eval2 V2.5.500 Admin 12/13/2016 1:10:58 PM

Sample: AM3

Measured on 12/13/2016 11:04:16 AM

Sample measured by Admin

Measurement method: Full Analysis-He34mm

| SiO2      | Al2O3    | CaO       | K2O       | Na2O     | Fe2O3     | P2O5     |
|-----------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|----------|
| 58.0 KCps | 7.1 KCps | 52.5 KCps | 26.4 KCps | 0.1 KCps | 51.8 KCps | 0.8 KCps |
| 65.6 %    | 12.6 %   | 10.4 %    | 4.63 %    | 3.00 %   | 1.96 %    | 0.753 %  |

| MgO      | TiO2     | BaO      | SO3      | SrO      | MnO      | ZrO2     |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0.2 KCps | 1.0 KCps | 0.3 KCps | 0.2 KCps | 7.1 KCps | 0.5 KCps | 6.7 KCps |
| 0.556 %  | 0.186 %  | 0.127 %  | 0.116 %  | 282 PPM  | 217 PPM  | 203 PPM  |

| Rb2O     | Intensity Scal | Compton   |
|----------|----------------|-----------|
| 4.0 KCps |                | 47.3 KCps |
| 156 PPM  | 1.236          | 77 %      |

**Ilustración 69. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 4 del Acueducto de Morelia**  
**coordenadas X: 272439 Y: 2179428.**

Eval2 V2.5.500 Admin 12/13/2016 1:11:41 PM

Sample: AM4

Measured on 12/13/2016 11:11:28 AM

Sample measured by Admin

Measurement method: Full Analysis-He34mm

| SiO2      | Al2O3    | K2O       | Na2O     | CaO       | Fe2O3     | SO3      |
|-----------|----------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|
| 55.5 KCps | 7.8 KCps | 30.1 KCps | 0.1 KCps | 16.6 KCps | 42.6 KCps | 2.6 KCps |
| 67.6 %    | 14.6 %   | 5.76 %    | 3.65 %   | 3.56 %    | 1.53 %    | 1.29 %   |

| P2O5     | MgO      | TiO2     | BaO      | CeO2     | Cl       | SrO       |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| 0.9 KCps | 0.2 KCps | 1.0 KCps | 0.4 KCps | 0.4 KCps | 0.3 KCps | 10.1 KCps |
| 0.920 %  | 0.509 %  | 0.186 %  | 0.150 %  | 0.101 %  | 994 PPM  | 377 PPM   |

| Rb2O     | ZrO2     | As2O3    | Intensity Scal | Compton   |
|----------|----------|----------|----------------|-----------|
| 5.3 KCps | 6.8 KCps | 0.9 KCps |                | 52.1 KCps |
| 194 PPM  | 166 PPM  | 70.2 PPM | 1.305          | 73 %      |

**Ilustración 70. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 5 del Acueducto de Morelia**  
**coordenadas X: 272435 Y: 2179430.**

Eval2 V2.5.500 Admin 12/13/2016 1:12:15 PM

Sample: AM5

Measured on 12/13/2016 11:18:40 AM

Sample measured by Admin

Measurement method: Full Analysis-He34mm

| SiO2      | Al2O3    | K2O       | Na2O     | Fe2O3     | CaO      | P2O5     |
|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|----------|
| 61.5 KCps | 7.8 KCps | 28.2 KCps | 0.1 KCps | 60.3 KCps | 9.6 KCps | 1.0 KCps |
| 71.6 %    | 13.9 %   | 5.22 %    | 3.67 %   | 2.02 %    | 1.95 %   | 1.01 %   |

| TiO2     | BaO      | SO3      | MnO      | V2O5     | ZrO2     | Rb2O     |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1.2 KCps | 0.4 KCps | 0.2 KCps | 0.6 KCps | 0.2 KCps | 6.7 KCps | 5.5 KCps |
| 0.201 %  | 0.155 %  | 825 PPM  | 276 PPM  | 220 PPM  | 198 PPM  | 191 PPM  |

| SrO      | ZnO      | Intensity Scal | Compton   |
|----------|----------|----------------|-----------|
| 3.9 KCps | 0.6 KCps |                | 51.2 KCps |
| 136 PPM  | 64.9 PPM | 1.263          | 81 %      |

**Ilustración 71. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 6 del Acueducto de Morelia**  
**coordenadas X: 272423 Y: 2179431.**

Eval2 V2.5.500 Admin 12/13/2016 1:12:51 PM

Sample: AM6

Measured on 12/13/2016 11:25:51 AM

Sample measured by Admin

Measurement method: Full Analysis-He34mm

| SiO2      | Al2O3    | K2O       | CaO       | Fe2O3     | MgO      | P2O5     |
|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|
| 60.1 KCps | 6.3 KCps | 31.2 KCps | 25.9 KCps | 50.0 KCps | 0.5 KCps | 0.9 KCps |
| 70.0 %    | 11.5 %   | 5.84 %    | 5.51 %    | 1.86 %    | 1.42 %   | 0.869 %  |

| SO3      | BaO      | TiO2     | SrO       | V2O5     | ZnO      | PbO      |
|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|
| 1.5 KCps | 0.5 KCps | 0.9 KCps | 14.3 KCps | 0.1 KCps | 1.4 KCps | 0.9 KCps |
| 0.719 %  | 0.214 %  | 0.163 %  | 557 PPM   | 177 PPM  | 167 PPM  | 126 PPM  |

| Rb2O     | ZrO2     | Intensity Scal | Compton   |
|----------|----------|----------------|-----------|
| 2.6 KCps | 5.6 KCps |                | 49.4 KCps |
| 98.3 PPM | 91.8 PPM | 1.287          | 75 %      |

**Ilustración 72. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 7 del Acueducto de Morelia**  
**coordenadas X: 272393 Y: 2179439.**

Eval2 V2.5.500 Admin 12/13/2016 1:15:45 PM

Sample: AM7

Measured on 12/13/2016 11:59:25 AM

Sample measured by Admin

Measurement method: Full Analysis-He34mm

|           |           |          |           |          |           |          |
|-----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| SiO2      | CaO       | Al2O3    | K2O       | Na2O     | Fe2O3     | SO3      |
| 47.0 KCps | 85.3 KCps | 5.4 KCps | 21.8 KCps | 0.1 KCps | 56.2 KCps | 2.8 KCps |
| 57.8 %    | 18.1 %    | 10.7 %   | 4.06 %    | 3.29 %   | 2.62 %    | 1.36 %   |

|          |          |          |          |          |          |          |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| MgO      | P2O5     | TiO2     | BaO      | Cl       | SrO      | MnO      |
| 0.2 KCps | 0.7 KCps | 0.8 KCps | 0.3 KCps | 0.4 KCps | 9.8 KCps | 0.5 KCps |
| 0.803 %  | 0.716 %  | 0.192 %  | 0.148 %  | 0.115 %  | 493 PPM  | 306 PPM  |

|          |          |          |                |           |
|----------|----------|----------|----------------|-----------|
| ZrO2     | Rb2O     | ZnO      | Intensity Scal | Compton   |
| 5.7 KCps | 3.3 KCps | 0.7 KCps |                | 44.2 KCps |
| 173 PPM  | 163 PPM  | 107 PPM  | 1.345          | 65 %      |

**Ilustración 73. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 8 del Acueducto de Morelia**  
**coordenadas X: 272383 Y: 2179440.**

Eval2 V2.5.500 Admin 12/13/2016 1:17:03 PM

Sample: AM8

Measured on 12/13/2016 12:06:36 PM

Sample measured by Admin

Measurement method: Full Analysis-He34mm

|           |          |           |           |          |           |          |
|-----------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|----------|
| SiO2      | Al2O3    | K2O       | CaO       | Na2O     | Fe2O3     | MgO      |
| 53.6 KCps | 7.2 KCps | 30.0 KCps | 12.2 KCps | 0.1 KCps | 60.5 KCps | 0.4 KCps |
| 69.3 %    | 14.2 %   | 6.06 %    | 2.77 %    | 2.69 %   | 2.29 %    | 1.43 %   |

|          |          |          |          |          |          |          |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| P2O5     | TiO2     | BaO      | SrO      | MnO      | ZnO      | ZrO2     |
| 0.8 KCps | 0.9 KCps | 0.3 KCps | 7.1 KCps | 0.4 KCps | 1.4 KCps | 5.6 KCps |
| 0.916 %  | 0.178 %  | 0.140 %  | 283 PPM  | 171 PPM  | 170 PPM  | 153 PPM  |

|          |          |                |           |
|----------|----------|----------------|-----------|
| Rb2O     | As2O3    | Intensity Scal | Compton   |
| 1.9 KCps | 0.7 KCps |                | 51.5 KCps |
| 74.8 PPM | 54.1 PPM | 1.387          | 70 %      |

**Ilustración 74. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 9 del Acueducto de Morelia**  
**coordenadas x: 272354 Y: 2179441.**

Eval2 V2.5.500 Admin 12/13/2016 1:17:35 PM

Sample: AM9

Measured on 12/13/2016 12:13:48 PM

Sample measured by Admin

Measurement method: Full Analysis-He34mm

|           |          |           |          |           |          |          |
|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|----------|
| SiO2      | Al2O3    | K2O       | Na2O     | Fe2O3     | CaO      | MgO      |
| 56.5 KCps | 6.6 KCps | 27.8 KCps | 0.1 KCps | 43.8 KCps | 6.7 KCps | 0.4 KCps |
| 72.3 %    | 13.1 %   | 5.69 %    | 3.03 %   | 1.60 %    | 1.53 %   | 1.40 %   |

|          |          |          |          |          |          |          |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| P2O5     | SO3      | BaO      | TiO2     | Rb2O     | ZrO2     | ZnO      |
| 0.7 KCps | 0.5 KCps | 0.3 KCps | 0.5 KCps | 5.6 KCps | 5.4 KCps | 1.1 KCps |
| 0.826 %  | 0.267 %  | 0.115 %  | 890 PPM  | 207 PPM  | 171 PPM  | 132 PPM  |

|          |                |           |
|----------|----------------|-----------|
| SrO      | Intensity Scal | Compton   |
| 2.7 KCps |                | 54.5 KCps |
| 102 PPM  | 1.393          | 71 %      |

**Ilustración 75. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 10 del Acueducto de Morelia**  
**coordenadas X: 272328 Y: 2179445.**

Eval2 V2.5.500 Admin 12/13/2016 1:14:09 PM

Sample: AM10

Measured on 12/13/2016 11:33:04 AM

Sample measured by Admin

Measurement method: Full Analysis-He34mm

| SiO2      | Al2O3    | K2O       | Fe2O3     | CaO      | SO3      | P2O5     |
|-----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|
| 58.8 KCps | 7.4 KCps | 27.5 KCps | 56.7 KCps | 7.2 KCps | 1.7 KCps | 0.7 KCps |
| 72.0 %    | 13.8 %   | 5.40 %    | 2.00 %    | 1.55 %   | 0.886 %  | 0.781 %  |

| MgO      | TiO2     | BaO      | SrO      | Rb2O     | ZrO2     | Intensity Scal |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------------|
| 0.2 KCps | 0.8 KCps | 0.3 KCps | 6.9 KCps | 4.9 KCps | 5.9 KCps |                |
| 0.598 %  | 0.139 %  | 0.114 %  | 252 PPM  | 176 PPM  | 154 PPM  | 1.333          |

| Compton   |
|-----------|
| 53.3 KCps |
| 75 %      |

**Ilustración 76. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 11 del Acueducto de Morelia**  
**coordenadas X: 272317 Y: 2179449.**

Eval2 V2.5.500 Admin 12/13/2016 1:14:41 PM

Sample: AM11

Measured on 12/13/2016 11:40:15 AM

Sample measured by Admin

Measurement method: Full Analysis-He34mm

| SiO2      | Al2O3    | K2O       | Na2O     | CaO       | Fe2O3     | SO3      |
|-----------|----------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|
| 62.2 KCps | 8.7 KCps | 27.7 KCps | 0.1 KCps | 11.0 KCps | 57.8 KCps | 2.1 KCps |
| 70.1 %    | 14.9 %   | 4.91 %    | 3.28 %   | 2.14 %    | 1.85 %    | 1.00 %   |

| P2O5     | MgO      | TiO2     | MnO      | BaO      | SrO      | ZrO2     |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0.9 KCps | 0.1 KCps | 1.1 KCps | 4.2 KCps | 0.5 KCps | 8.7 KCps | 6.9 KCps |
| 0.854 %  | 0.405 %  | 0.186 %  | 0.171 %  | 0.170 %  | 291 PPM  | 166 PPM  |

| Rb2O     | ZnO      | As2O3    | Intensity Scal | Compton   |
|----------|----------|----------|----------------|-----------|
| 4.8 KCps | 0.7 KCps | 0.7 KCps |                | 49.8 KCps |
| 157 PPM  | 67.6 PPM | 45.3 PPM | 1.211          | 87 %      |

**Ilustración 77. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 12 del Acueducto de Morelia**  
**coordenadas X: 272293 Y: 2179457.**

Eval2 V2.5.500 Admin 12/13/2016 1:15:15 PM

Sample: AM12

Measured on 12/13/2016 11:47:28 AM

Sample measured by Admin

Measurement method: Full Analysis-He34mm

| SiO2      | Al2O3    | K2O       | Na2O     | CaO       | SO3      | Fe2O3     |
|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 58.5 KCps | 7.4 KCps | 26.9 KCps | 0.1 KCps | 14.0 KCps | 4.7 KCps | 49.9 KCps |
| 69.4 %    | 13.5 %   | 5.12 %    | 3.53 %   | 2.95 %    | 2.33 %   | 1.75 %    |

| P2O5     | TiO2     | BaO      | SrO       | MnO      | Rb2O     | ZrO2     |
|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|
| 1.0 KCps | 1.0 KCps | 0.4 KCps | 15.1 KCps | 0.7 KCps | 4.7 KCps | 7.4 KCps |
| 0.976 %  | 0.175 %  | 0.162 %  | 547 PPM   | 326 PPM  | 166 PPM  | 149 PPM  |

| ZnO      | Intensity Scal | Compton   |
|----------|----------------|-----------|
| 0.6 KCps |                | 50.8 KCps |
| 64.5 PPM | 1.295          | 79 %      |

**Ilustración 78. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 13 del Acueducto de Morelia  
coordenadas X: 272223 Y: 2179472.**

Eval2 V2.5.500 Admin 12/13/2016 1:17:56 PM

Sample: AM13

Measured on 12/13/2016 12:20:59 PM

Sample measured by Admin

Measurement method: Full Analysis-He34mm

| SiO2      | Al2O3    | K2O       | Fe2O3     | CaO      | MgO      | P2O5     |
|-----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|
| 57.4 KCps | 7.3 KCps | 28.9 KCps | 42.9 KCps | 6.8 KCps | 0.4 KCps | 1.0 KCps |
| 72.5 %    | 14.0 %   | 5.88 %    | 1.56 %    | 1.54 %   | 1.41 %   | 1.13 %   |

| SO3      | TiO2     | Rb2O     | ZrO2     | ZnO      | SrO      | Intensity Scal |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------------|
| 0.7 KCps | 0.5 KCps | 5.5 KCps | 5.1 KCps | 1.4 KCps | 3.3 KCps |                |
| 0.374 %  | 0.102 %  | 202 PPM  | 165 PPM  | 157 PPM  | 121 PPM  | 1.382          |

| Compton   |
|-----------|
| 54.6 KCps |
| 71 %      |

**Ilustración 79. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 14 del Acueducto de Morelia  
coordenadas X: 271140 Y: 2180160.**

Eval2 V2.5.500 Admin 12/13/2016 1:18:26 PM

Sample: AM15

Measured on 12/13/2016 12:28:10 PM

Sample measured by Admin

Measurement method: Full Analysis-He34mm

| SiO2      | Al2O3    | K2O       | Fe2O3     | CaO      | P2O5     | SO3      |
|-----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|
| 55.3 KCps | 6.8 KCps | 28.0 KCps | 50.3 KCps | 7.6 KCps | 1.0 KCps | 1.7 KCps |
| 71.3 %    | 13.5 %   | 5.79 %    | 2.27 %    | 1.75 %   | 1.15 %   | 0.931 %  |

| MgO      | TiO2     | BaO      | Rb2O     | ZrO2     | SrO      | Intensity Scal |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------------|
| 0.2 KCps | 1.0 KCps | 0.4 KCps | 5.6 KCps | 7.0 KCps | 5.1 KCps |                |
| 0.707 %  | 0.202 %  | 0.178 %  | 222 PPM  | 219 PPM  | 203 PPM  | 1.407          |

**Ilustración 80. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 15 del Acueducto de Morelia  
coordenadas X: 271160 Y: 2180153.**

Eval2 V2.5.500 Admin 12/13/2016 1:19:28 PM

Sample: AM15

Measured on 12/13/2016 12:35:22 PM

Sample measured by Admin

Measurement method: Full Analysis-He34mm

| SiO2      | Al2O3    | K2O       | Na2O     | CaO       | Fe2O3     | SO3      |
|-----------|----------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|
| 59.7 KCps | 7.7 KCps | 28.1 KCps | 0.1 KCps | 13.9 KCps | 55.0 KCps | 1.9 KCps |
| 70.5 %    | 13.8 %   | 5.27 %    | 3.40 %   | 2.90 %    | 1.91 %    | 0.953 %  |

| P2O5     | TiO2     | BaO      | SrO      | MnO      | Rb2O     | ZrO2     |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0.8 KCps | 1.0 KCps | 0.4 KCps | 7.2 KCps | 0.5 KCps | 5.5 KCps | 7.0 KCps |
| 0.823 %  | 0.182 %  | 0.165 %  | 260 PPM  | 225 PPM  | 195 PPM  | 188 PPM  |

| ZnO      | Intensity Scal | Compton   |
|----------|----------------|-----------|
| 0.7 KCps |                | 50.4 KCps |
| 81.7 PPM | 1.283          | 80 %      |

**Ilustración 81. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 16 del Acueducto de Morelia  
coordenadas X: 271259 Y: 2180109.**

Eval2 V2.5.500 Admin 12/13/2016 1:19:55 PM

Sample: AM16

Measured on 12/13/2016 12:42:34 PM

Sample measured by Admin

Measurement method: Full Analysis-He34mm

| SiO2      | Al2O3    | K2O       | SO3      | CaO       | Na2O     | Fe2O3     |
|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 57.2 KCps | 7.1 KCps | 27.9 KCps | 9.3 KCps | 18.5 KCps | 0.1 KCps | 45.6 KCps |
| 67.3 %    | 12.9 %   | 5.32 %    | 4.59 %   | 3.94 %    | 2.42 %   | 1.65 %    |

| P2O5     | MgO      | TiO2     | BaO      | Cl       | CeO2     | ZrO2     |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0.9 KCps | 0.1 KCps | 0.8 KCps | 0.4 KCps | 0.4 KCps | 0.3 KCps | 6.3 KCps |
| 0.898 %  | 0.413 %  | 0.155 %  | 0.147 %  | 0.105 %  | 661 PPM  | 187 PPM  |

| SrO      | Rb2O     | MnO      | ZnO      | MoO3     | CuO      | Intensity Scal |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------------|
| 5.0 KCps | 4.8 KCps | 0.3 KCps | 0.7 KCps | 2.1 KCps | 0.1 KCps |                |
| 187 PPM  | 179 PPM  | 129 PPM  | 85.9 PPM | 64.8 PPM | 63.3 PPM | 1.293          |

| Compton   |
|-----------|
| 50.3 KCps |
| 77 %      |

**Ilustración 82. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 17 del Acueducto de Morelia  
coordenadas X: 271314 Y: 2179983.**

Eval2 V2.5.500 Admin 12/13/2016 1:20:30 PM

Sample: AM17

Measured on 12/13/2016 12:49:47 PM

Sample measured by Admin

Measurement method: Full Analysis-He34mm

| SiO2      | Al2O3    | SO3       | CaO       | K2O       | Fe2O3     | P2O5     |
|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| 54.7 KCps | 6.0 KCps | 13.5 KCps | 28.3 KCps | 24.2 KCps | 49.7 KCps | 0.9 KCps |
| 64.5 %    | 11.2 %   | 6.59 %    | 5.99 %    | 4.64 %    | 1.86 %    | 0.888 %  |

| MgO      | TiO2     | BaO      | Cl       | MnO      | SrO      | PbO      |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0.3 KCps | 0.9 KCps | 0.4 KCps | 0.2 KCps | 0.7 KCps | 8.0 KCps | 1.3 KCps |
| 0.838 %  | 0.172 %  | 0.160 %  | 631 PPM  | 324 PPM  | 313 PPM  | 196 PPM  |

| Rb2O     | ZrO2     | ZnO      | MoO3     | Intensity Scal | Compton   |
|----------|----------|----------|----------|----------------|-----------|
| 4.9 KCps | 6.3 KCps | 0.9 KCps | 1.4 KCps |                | 50.1 KCps |
| 189 PPM  | 172 PPM  | 112 PPM  | 43.1 PPM | 1.303          | 74 %      |

**Ilustración 83. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 18 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 271549 Y: 2179783.**

Eval2 V2.5.500 Admin 12/13/2016 1:20:54 PM

Sample: AM18

Measured on 12/13/2016 12:57:00 PM

Sample measured by Admin

Measurement method: Full Analysis-He34mm

| SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | SO <sub>3</sub> | CaO       | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
|------------------|--------------------------------|------------------|-------------------|-----------------|-----------|--------------------------------|
| 59.4 KCps        | 6.9 KCps                       | 27.3 KCps        | 0.1 KCps          | 6.1 KCps        | 14.3 KCps | 52.7 KCps                      |
| 69.7 %           | 12.5 %                         | 5.17 %           | 3.04 %            | 3.03 %          | 3.01 %    | 1.85 %                         |

| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | MgO      | TiO <sub>2</sub> | BaO      | MnO      | ZrO <sub>2</sub> | Rb <sub>2</sub> O |
|-------------------------------|----------|------------------|----------|----------|------------------|-------------------|
| 0.9 KCps                      | 0.1 KCps | 1.1 KCps         | 0.4 KCps | 0.5 KCps | 6.3 KCps         | 5.1 KCps          |
| 0.865 %                       | 0.388 %  | 0.191 %          | 0.161 %  | 203 PPM  | 183 PPM          | 183 PPM           |

| SrO      | ZnO      | Intensity Scal | Compton   |
|----------|----------|----------------|-----------|
| 4.5 KCps | 0.8 KCps |                | 51.0 KCps |
| 165 PPM  | 92.9 PPM | 1.290          | 78 %      |

**Ilustración 84. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 19 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272011 Y: 2179526.**

Eval2 V2.5.500 Admin 12/13/2016 1:21:24 PM

Sample: AM19

Measured on 12/13/2016 1:07:55 PM

Sample measured by Admin

Measurement method: Full Analysis-He34mm

| SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SO <sub>3</sub> | CaO       | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
|------------------|--------------------------------|-----------------|-----------|------------------|-------------------|--------------------------------|
| 54.3 KCps        | 6.2 KCps                       | 13.1 KCps       | 27.7 KCps | 25.0 KCps        | 0.1 KCps          | 41.7 KCps                      |
| 64.8 %           | 11.5 %                         | 6.51 %          | 6.01 %    | 4.86 %           | 2.19 %            | 1.60 %                         |

| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | MgO      | BaO      | TiO <sub>2</sub> | SrO       | PbO      | ZnO      |
|-------------------------------|----------|----------|------------------|-----------|----------|----------|
| 1.2 KCps                      | 0.2 KCps | 0.5 KCps | 0.9 KCps         | 10.3 KCps | 1.5 KCps | 1.7 KCps |
| 1.16 %                        | 0.767 %  | 0.241 %  | 0.169 %          | 411 PPM   | 219 PPM  | 210 PPM  |

| Rb <sub>2</sub> O | ZrO <sub>2</sub> | CuO      | Intensity Scal | Compton   |
|-------------------|------------------|----------|----------------|-----------|
| 4.1 KCps          | 5.9 KCps         | 0.1 KCps |                | 51.3 KCps |
| 161 PPM           | 132 PPM          | 77.9 PPM | 1.323          | 71 %      |

**Ilustración 85. Resultado de Fluorescencia de Rayos-X muestra número 20 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272187 Y: 2179489.**

Eval2 V2.5.500 Admin 12/13/2016 1:21:46 PM  
 Sample: AM20  
 Measured on 12/13/2016 1:15:07 PM  
 Sample measured by Admin  
 Measurement method: Full Analysis-He34mm

| SiO2      | Al2O3    | K2O       | Na2O     | CaO       | SO3      | Fe2O3     |
|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 59.3 KCps | 6.8 KCps | 28.1 KCps | 0.1 KCps | 13.6 KCps | 5.7 KCps | 52.7 KCps |
| 69.6 %    | 12.4 %   | 5.33 %    | 3.72 %   | 2.87 %    | 2.85 %   | 1.85 %    |

| P2O5     | TiO2     | BaO      | CeO2     | ZrO2     | Rb2O     | SrO      |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0.9 KCps | 1.0 KCps | 0.3 KCps | 0.3 KCps | 6.5 KCps | 5.1 KCps | 4.7 KCps |
| 0.919 %  | 0.180 %  | 0.122 %  | 653 PPM  | 191 PPM  | 185 PPM  | 173 PPM  |

| V2O5     | Intensity Scal | Compton   |
|----------|----------------|-----------|
| 0.1 KCps |                | 51.0 KCps |
| 165 PPM  | 1.291          | 78 %      |

**Ilustración 86. Resultado de Espectroscopia Infrarroja Afloramiento número 1 coordenadas X: 270356 Y: 2180637.**

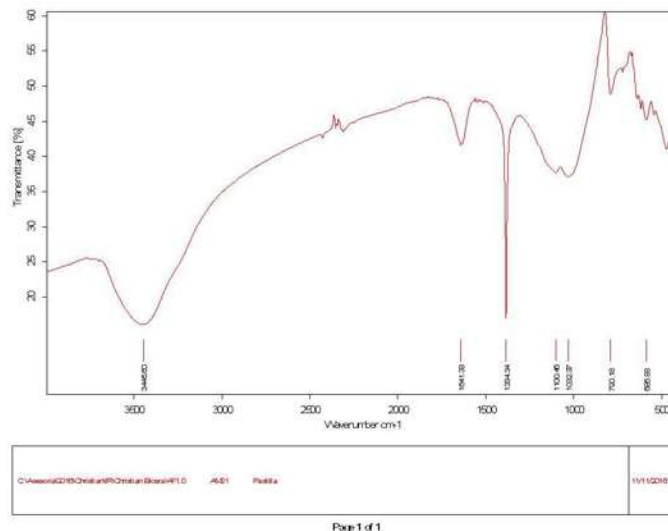


Ilustración 87. Resultado de Espectroscopia Infrarroja Afloramiento número 2 coordenadas X: 270356 Y: 2180637.

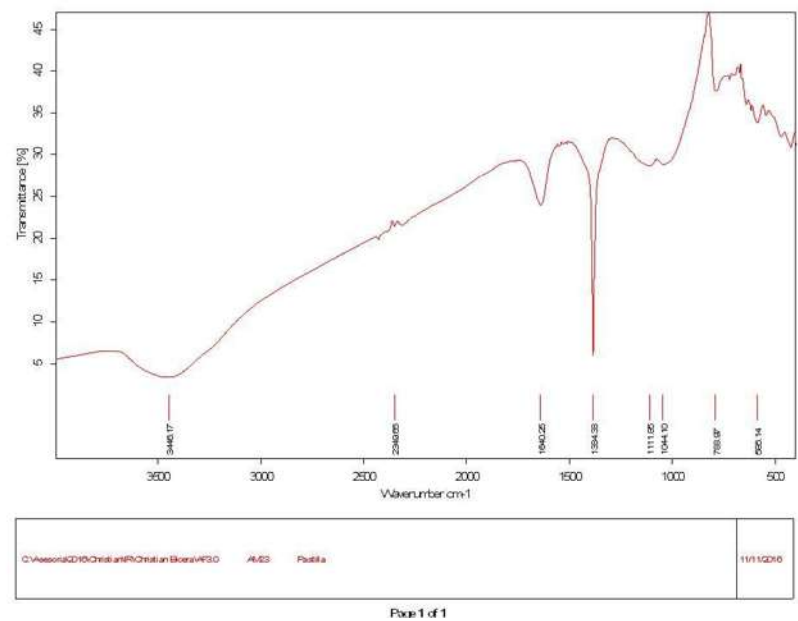


Ilustración 88. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 1 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272666 Y: 217980.

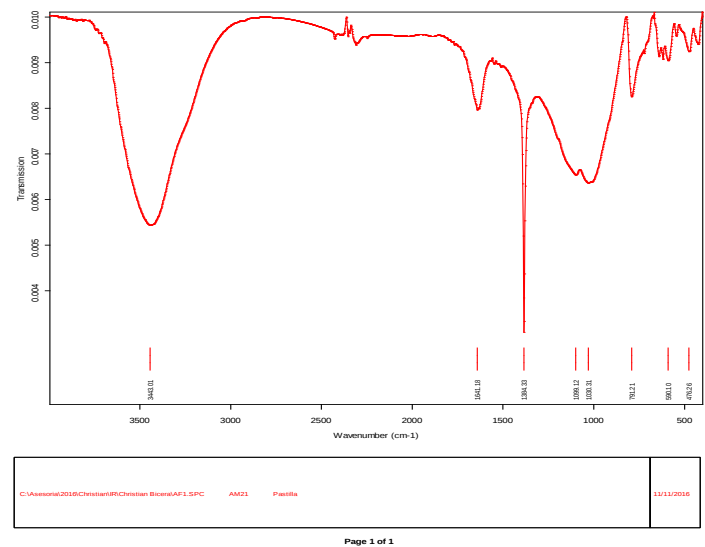


Ilustración 89. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 2 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272550 Y: 2179406.

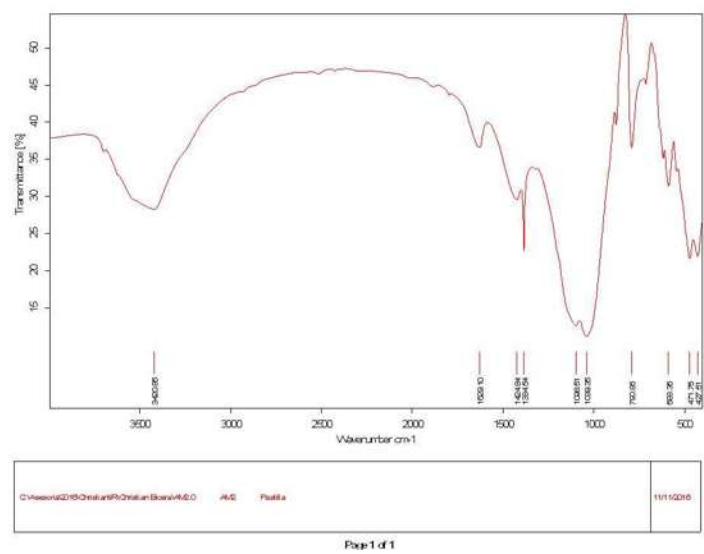


Ilustración 90. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 3 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272470 Y: 2179423.

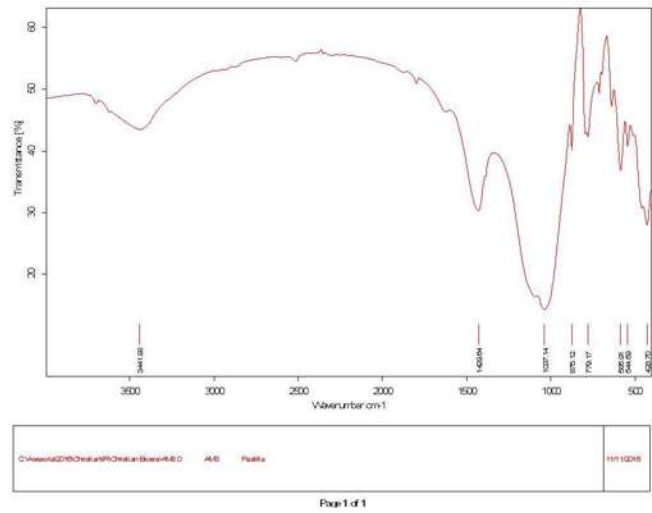


Ilustración 91. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 4 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272439 Y: 2179428.

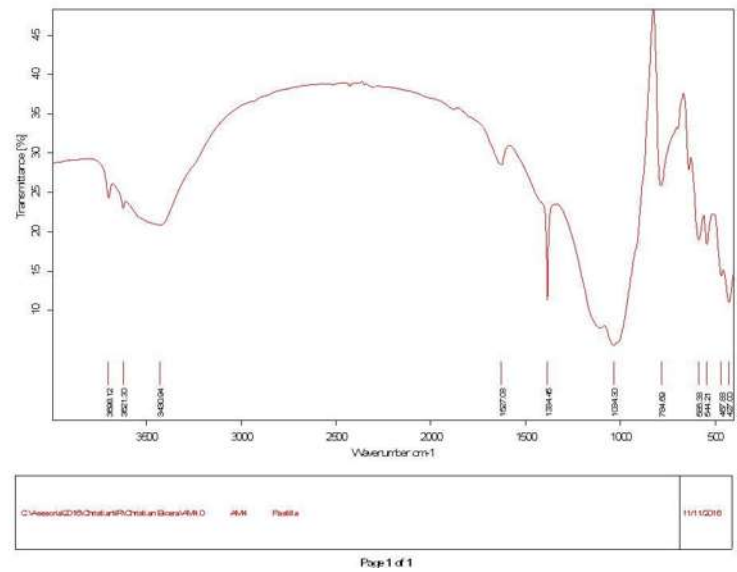
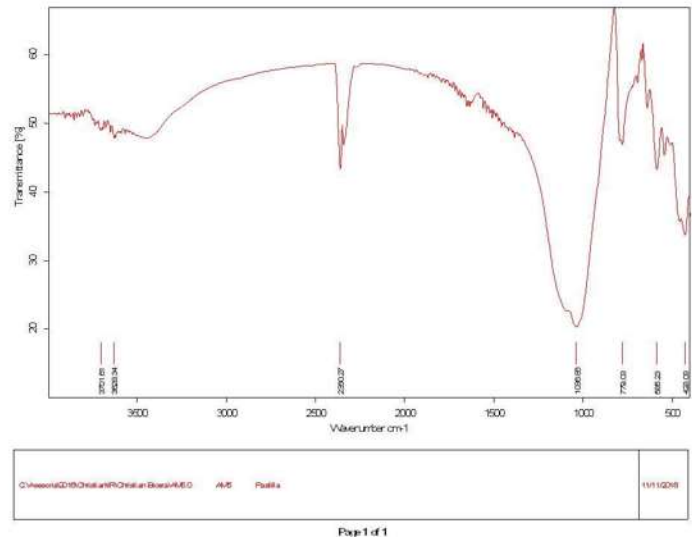


Ilustración 92. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 5 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272435 Y: 2179430.



**Ilustración 94. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 7 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272393 Y: 2179439.**

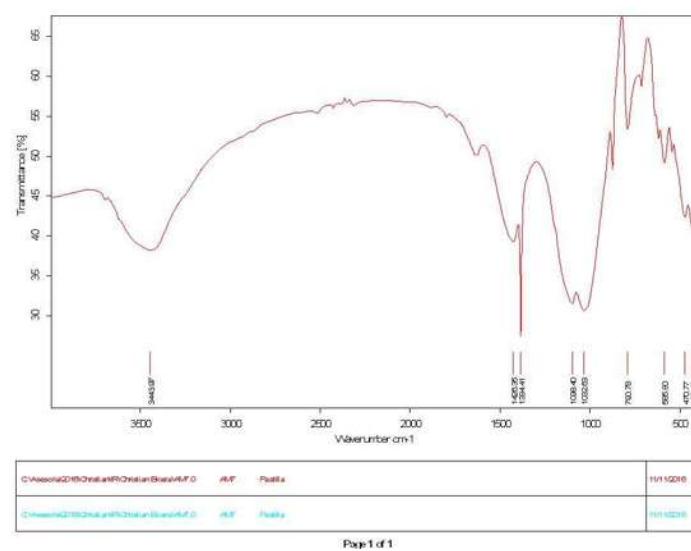
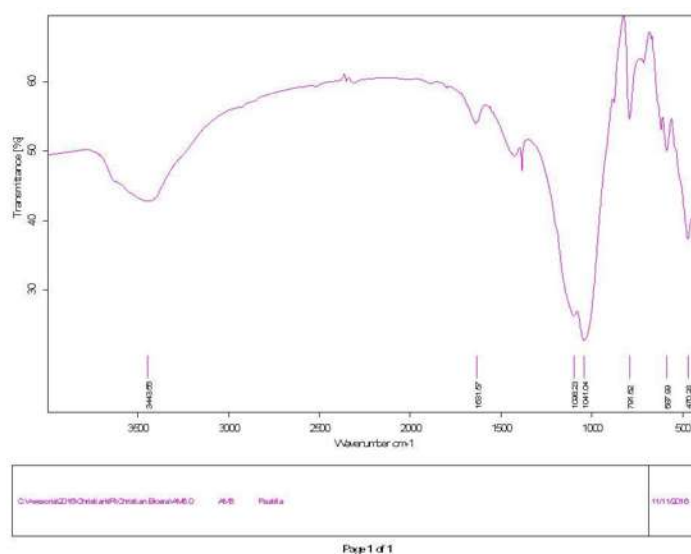


Ilustración 95. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 8 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272383 Y: 2179440.

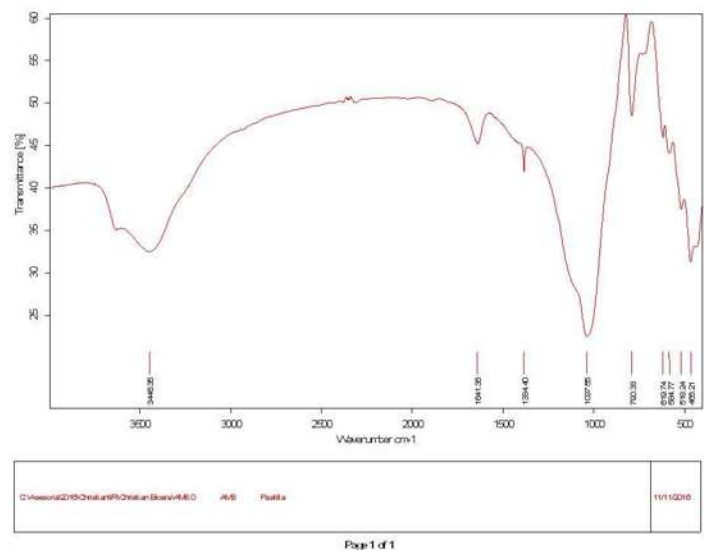


Ilustración 96. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 9 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272354 Y: 2179441.

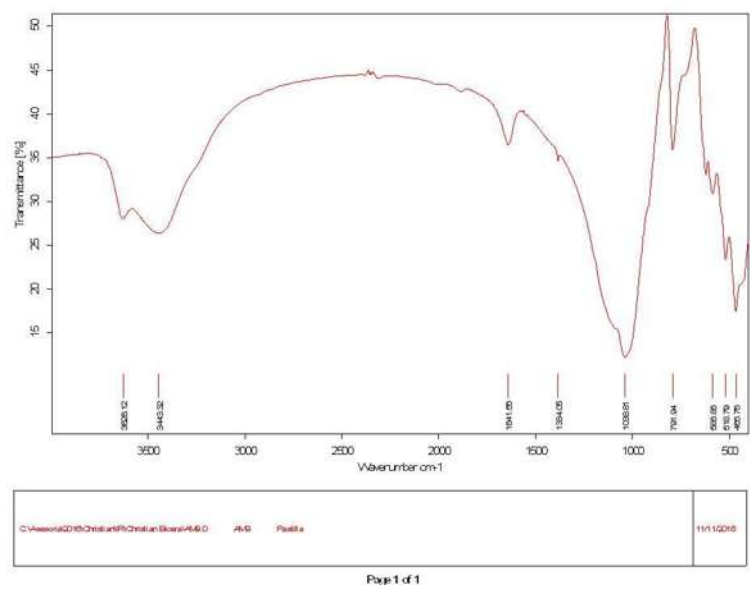


Ilustración 97. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 10 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272338 Y: 2179445.

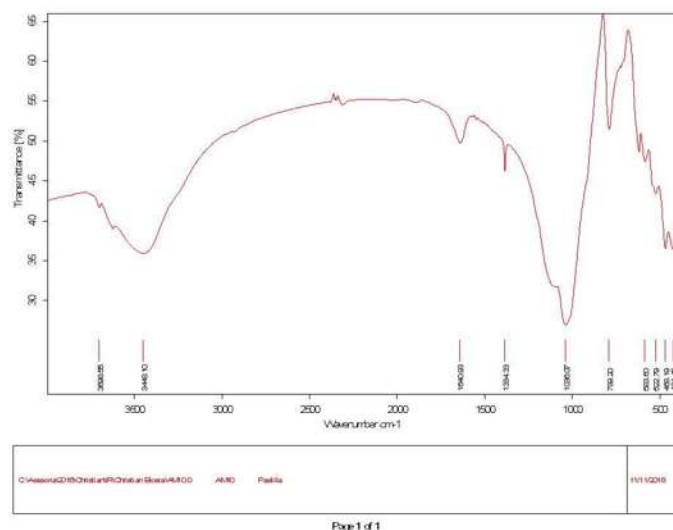
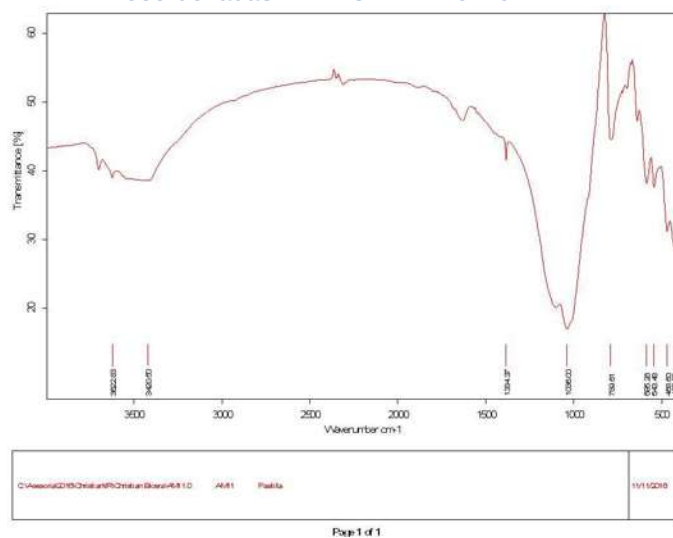
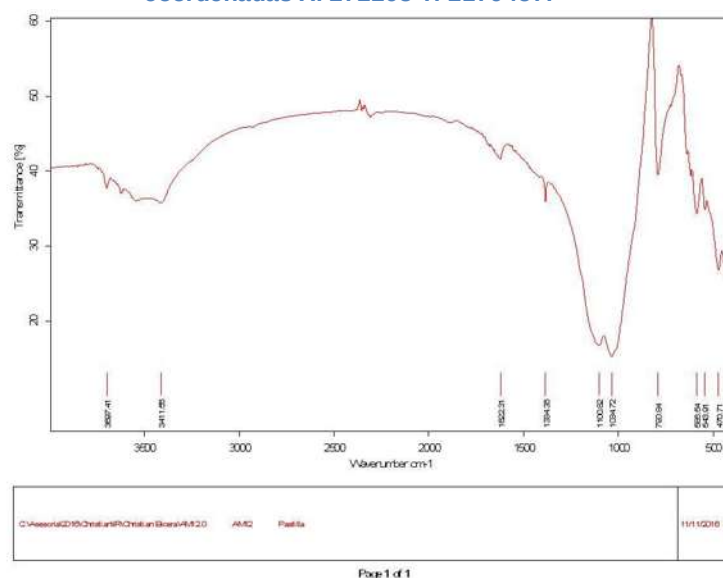


Ilustración 98. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 11 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272317Y:2179449.



**Ilustración 99. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 12 del Acueducto de Morelia**  
**coordenadas X: 272293 Y: 2179457.**



**Ilustración 100. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 13 del Acueducto de Morelia**  
**coordenadas X: 272223 Y: 2179472.**

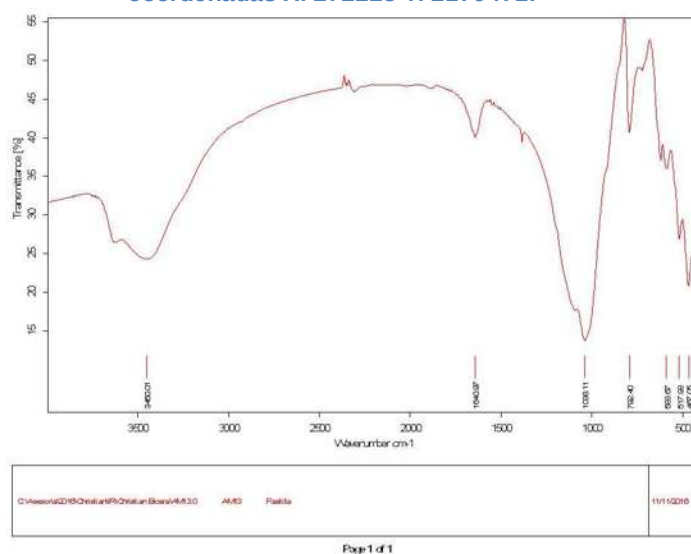


Ilustración 101. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 14 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 271140 Y: 2180160.

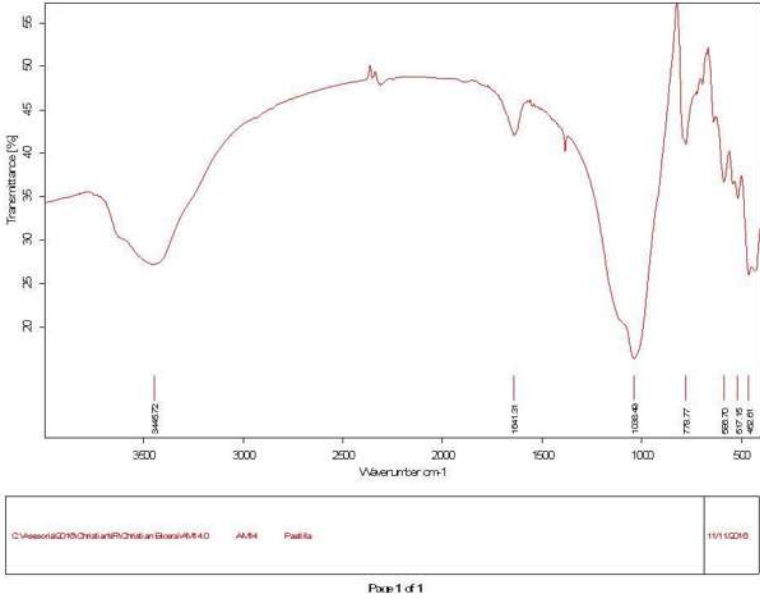


Ilustración 102. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 15 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 271160 Y: 2180153.

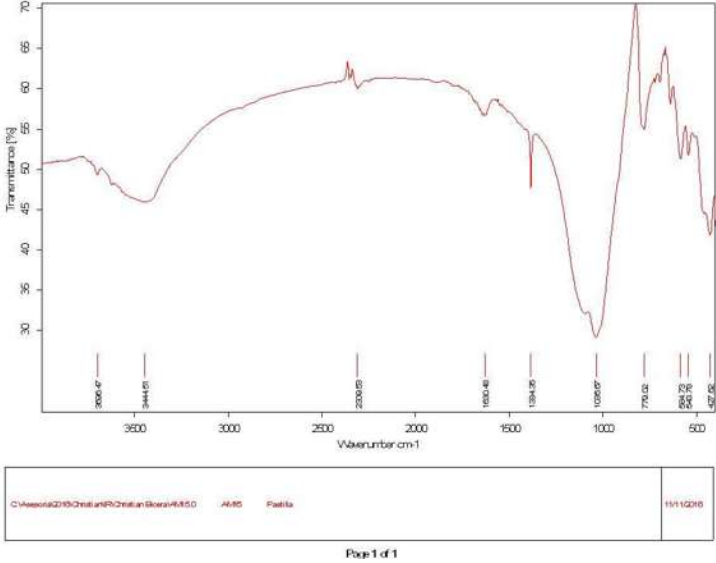


Ilustración 103. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 16 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272259 Y: 2180109.

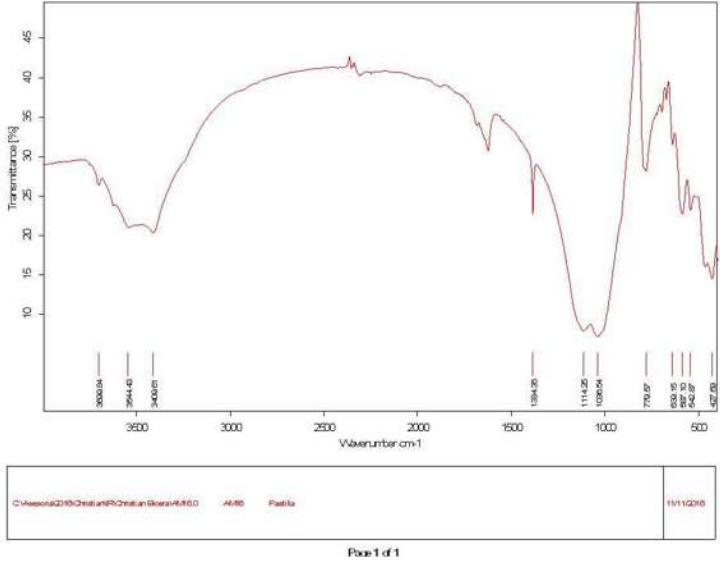


Ilustración 104. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 17 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 271334 Y: 2179983.

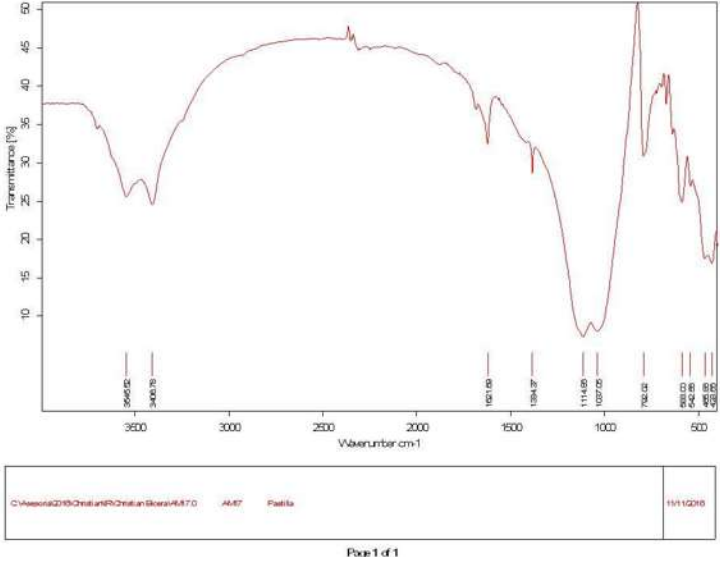


Ilustración 105. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 18 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272550 Y: 2179406.

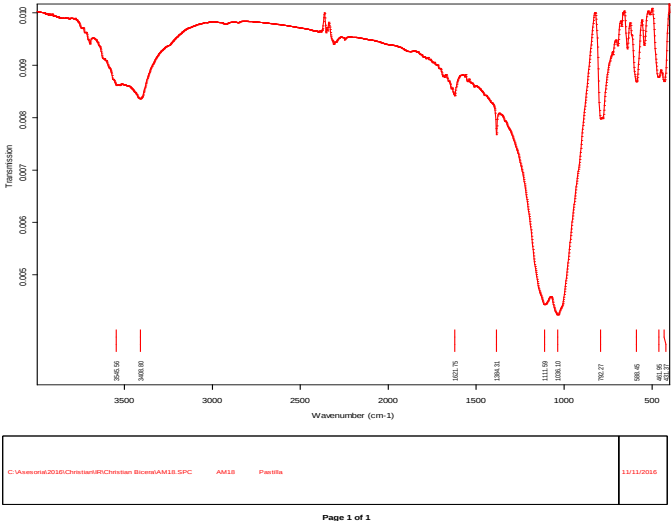


Ilustración 106. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 19 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272011 Y: 2179526.

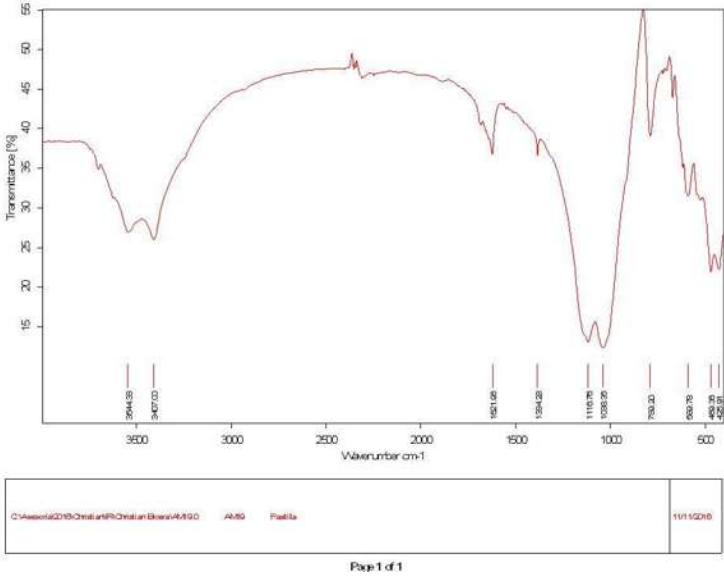


Ilustración 107. Resultado de Espectroscopia Infrarroja muestra número 20 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 272187 Y: 2179489.

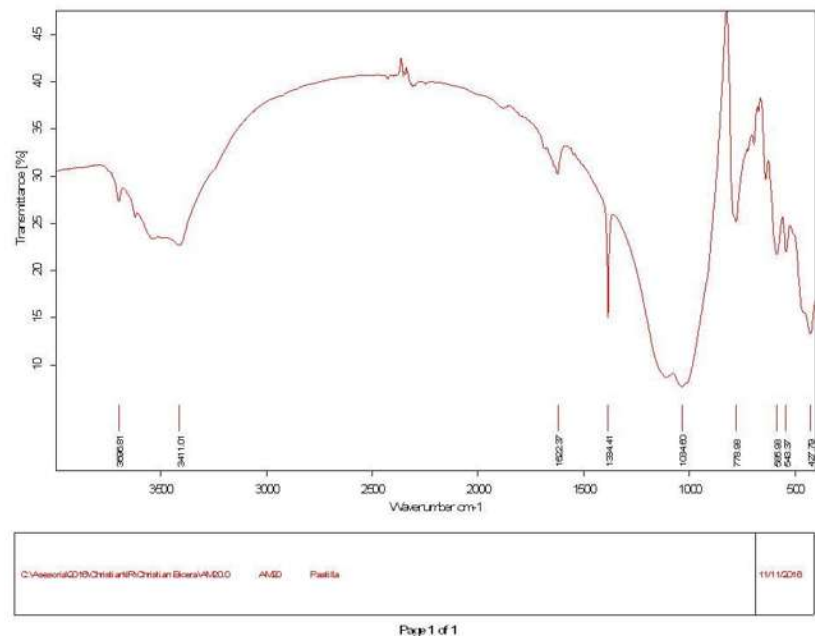


Ilustración 108. Resultado de Espectrometría Raman muestra 18 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 271549 Y: 2179783.

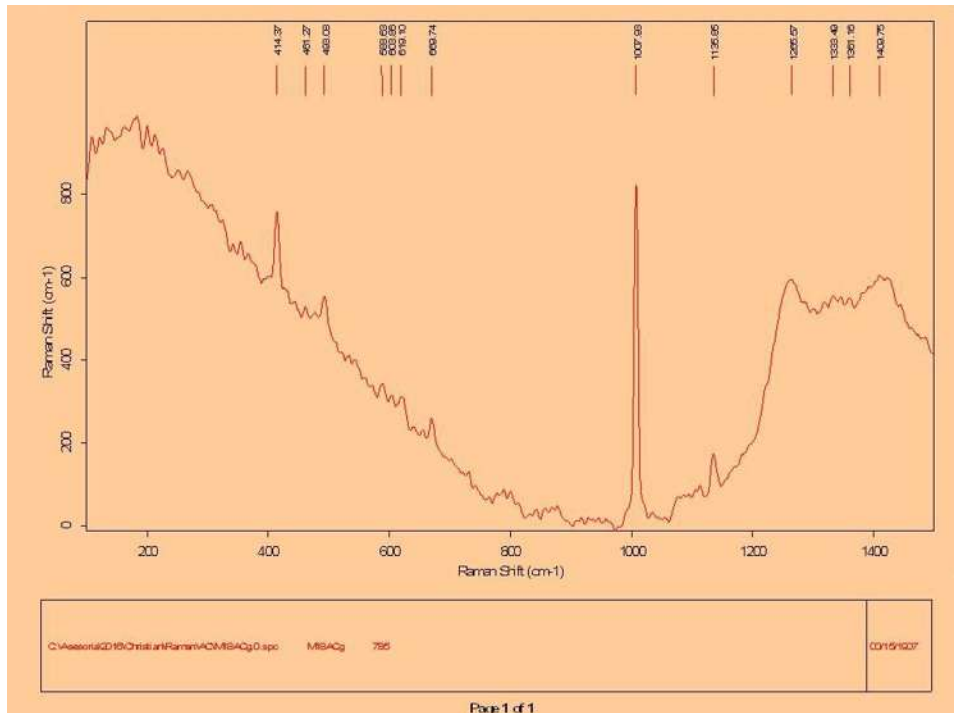


Ilustración 109. Resultado de Espectrometría Raman muestra 17 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 271334 Y: 2179983.

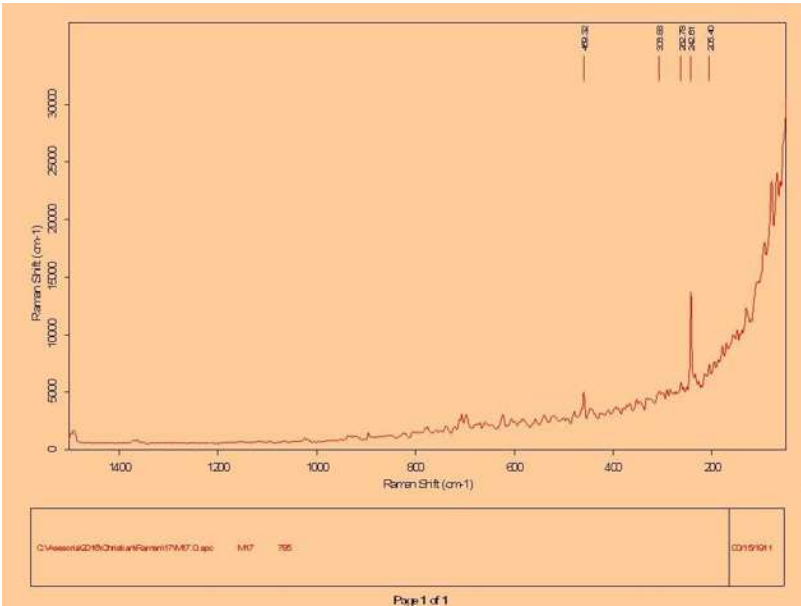


Ilustración 110. Resultado de Espectrometría Raman muestra 16 del Acueducto de Morelia coordenadas X: 271259 Y: 2180109.

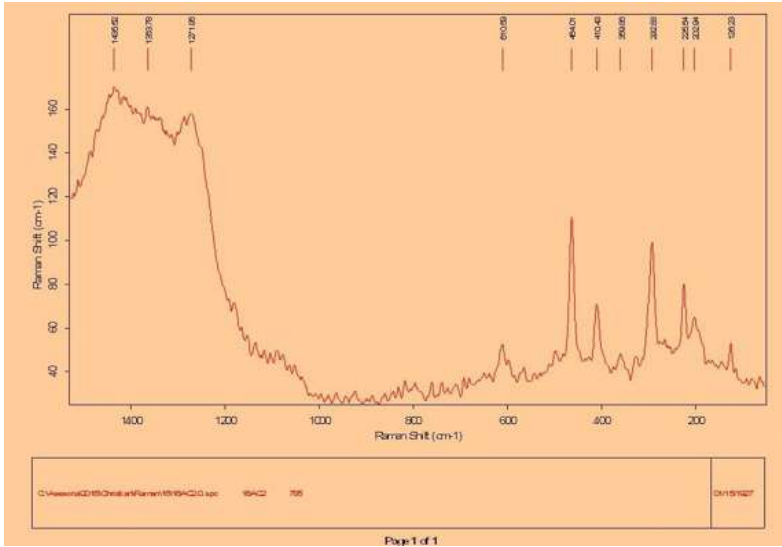


Ilustración 111. Resultado A de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 9 del Acueducto de Morelia X: 272354 Y: 2179441.

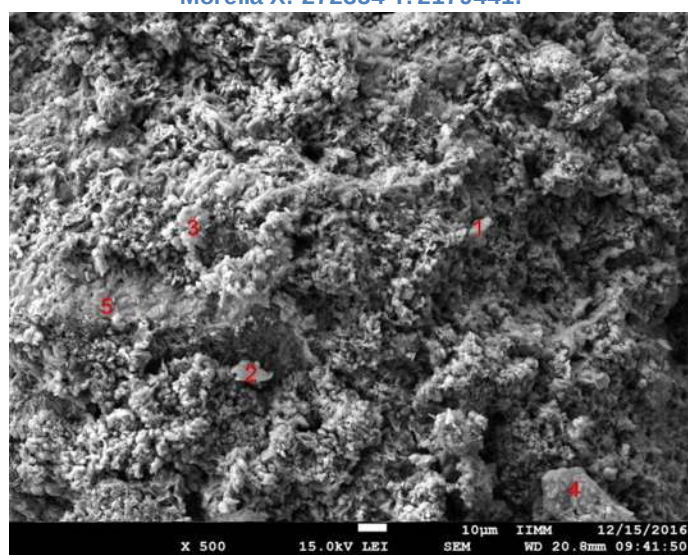
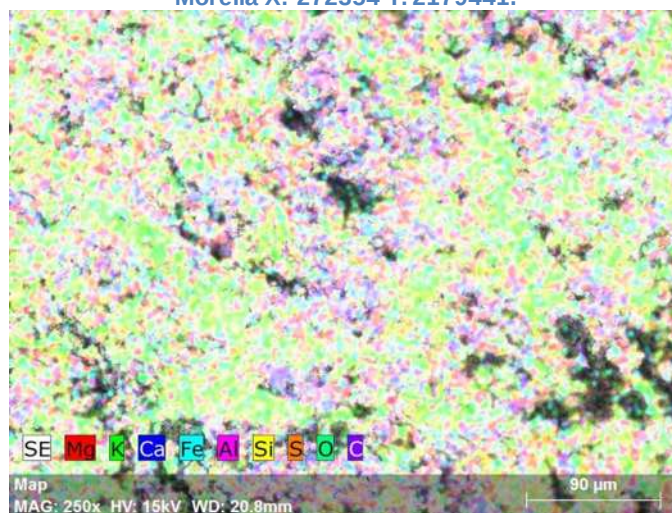
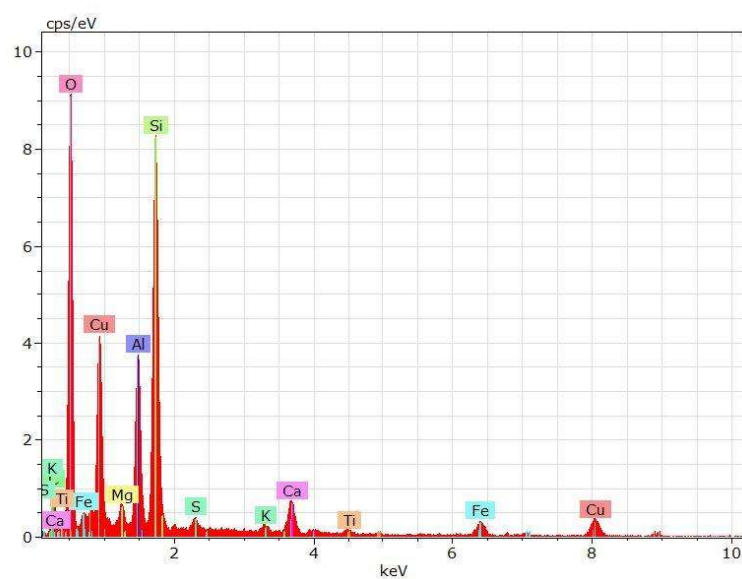


Ilustración 112. Resultado B de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 9 del Acueducto de Morelia X: 272354 Y: 2179441.



**Ilustración 113. Resultado C de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 9 del Acueducto de Morelia X: 272354 Y: 2179441.**



**Ilustración 114. Resultado A de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 13 del Acueducto de Morelia X: 272223 Y: 2179472.**

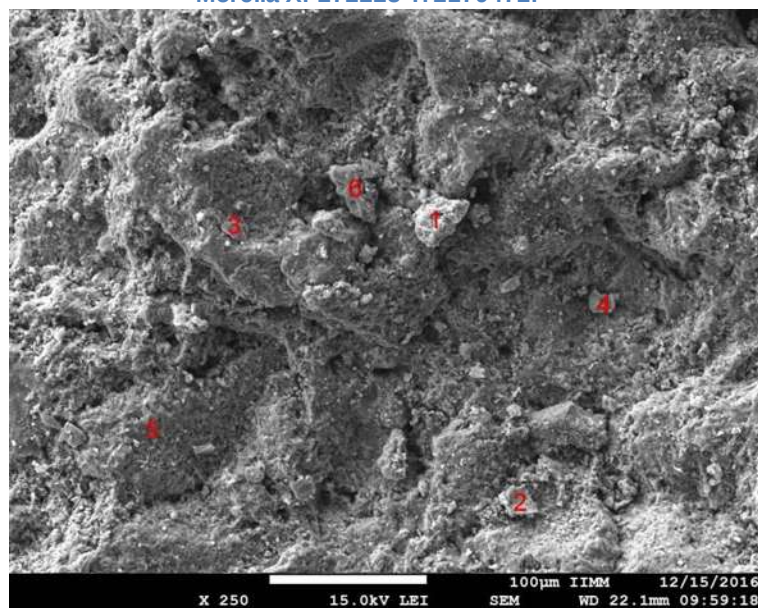


Ilustración 115. Resultado B de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 13 del Acueducto de Morelia X: 272223 Y: 2179472.

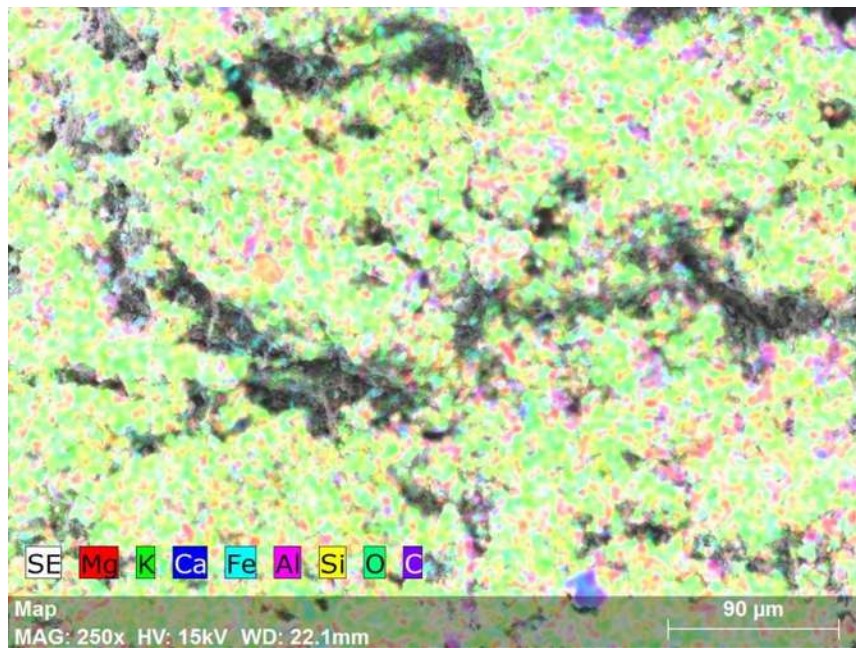


Ilustración 116. Resultado C de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 13 del Acueducto de Morelia X: 272223 Y: 2179472.

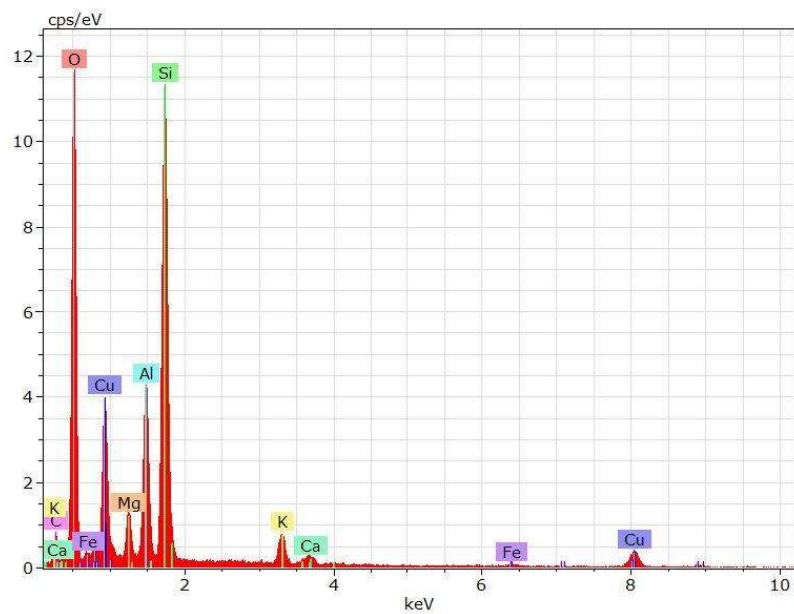


Ilustración 117. Resultado A de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 15 del Acueducto de Morelia X: 271160 Y: 2180153.

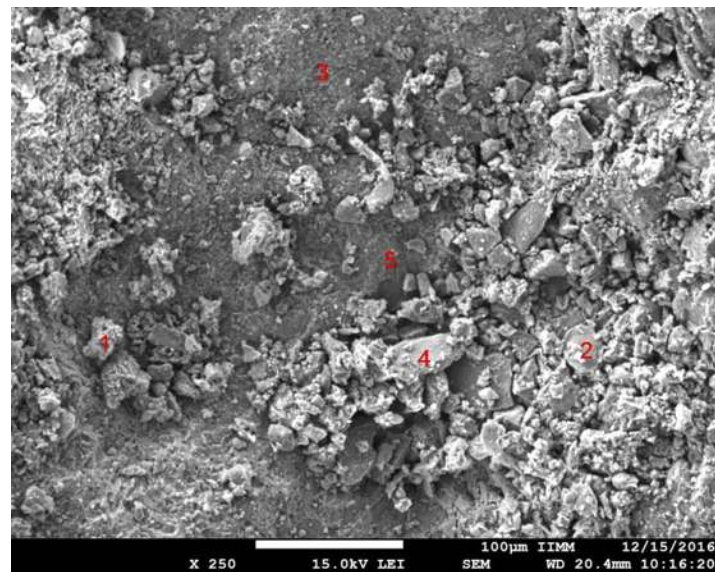
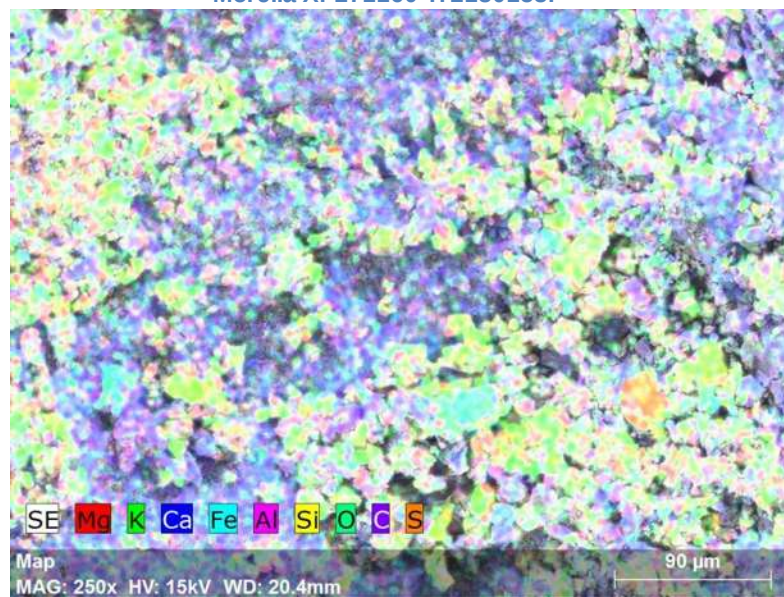
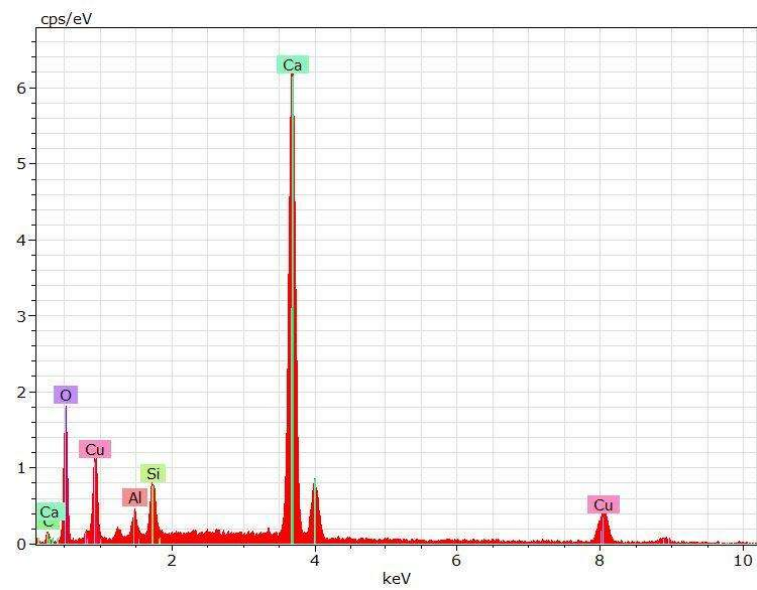


Ilustración 118. Resultado B de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 15 del Acueducto de Morelia X: 271160 Y: 2180153.



**Ilustración 119. Resultado C de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 15 del Acueducto de Morelia X: 271160 Y: 2180153.**



**Ilustración 120. Resultado A de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 16 del Acueducto de Morelia X: 271259 Y: 2180109.**

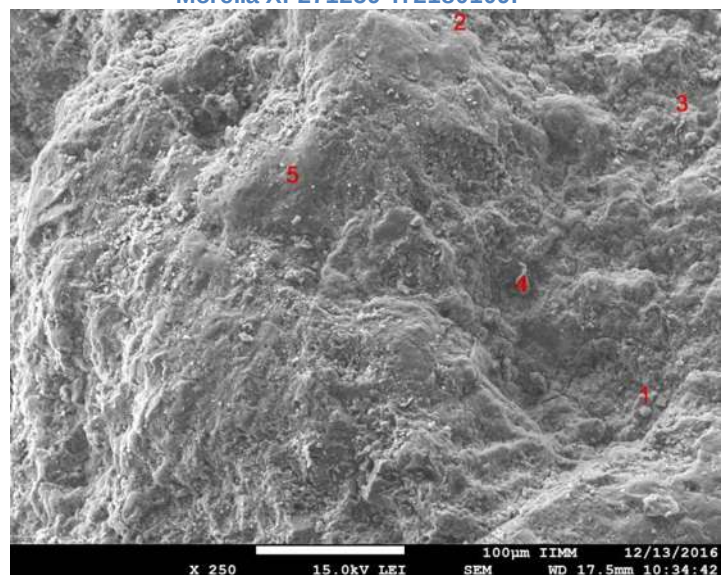


Ilustración 121 Resultado B de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 16 del Acueducto de Morelia X: 271259 Y: 2180109.

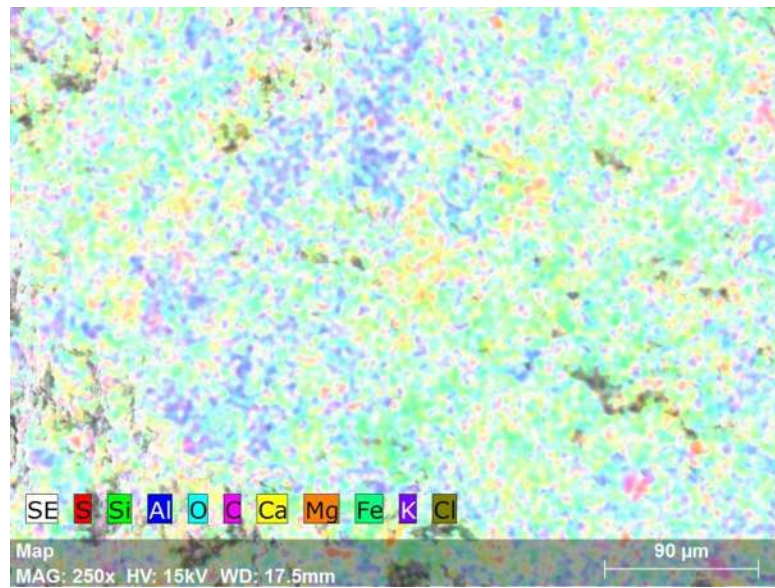


Ilustración 122. Resultado C de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 16 del Acueducto de Morelia X: 271259 Y: 2180109.

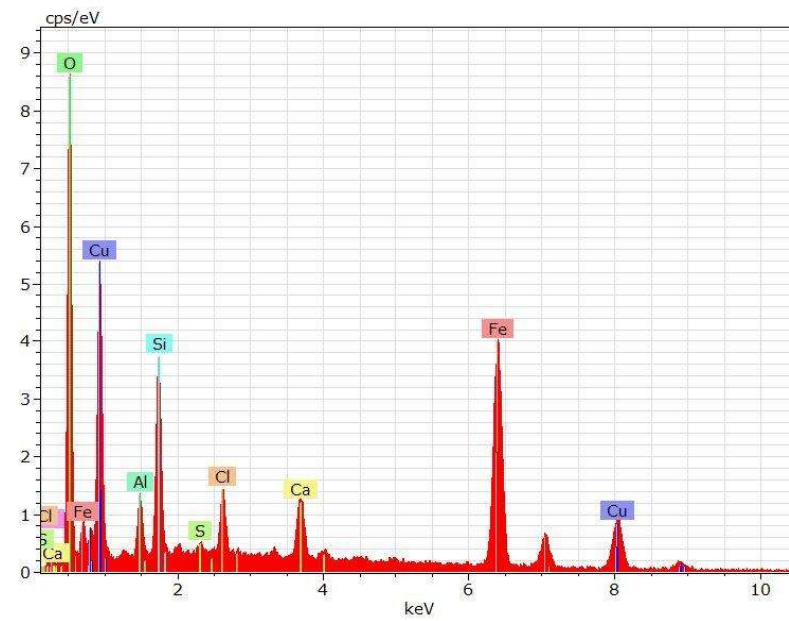


Ilustración 123. Resultado A de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 17 del Acueducto de Morelia X: 271334 Y: 2179983.

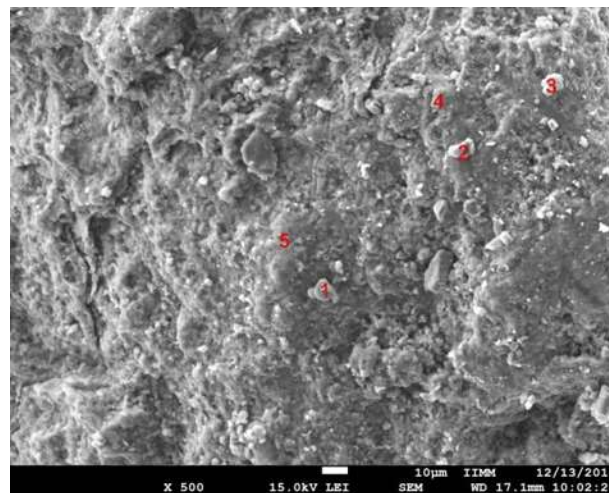


Ilustración 124. Resultado B de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 17 del Acueducto de Morelia X: 271334 Y: 2179983.

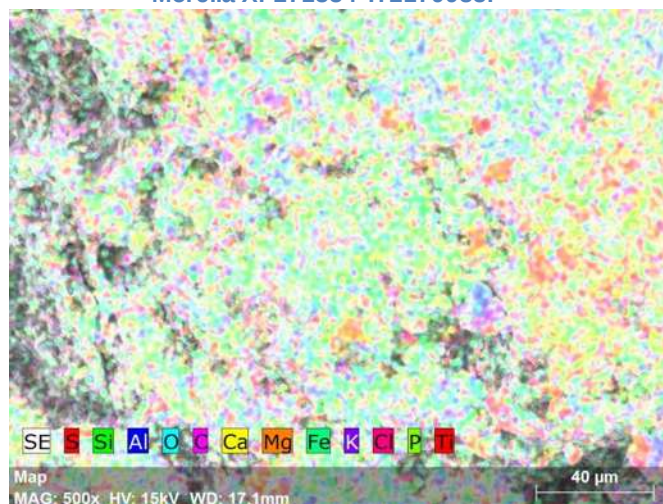


Ilustración 125. Resultado C de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 17 del Acueducto de Morelia X: 271334 Y: 2179983.

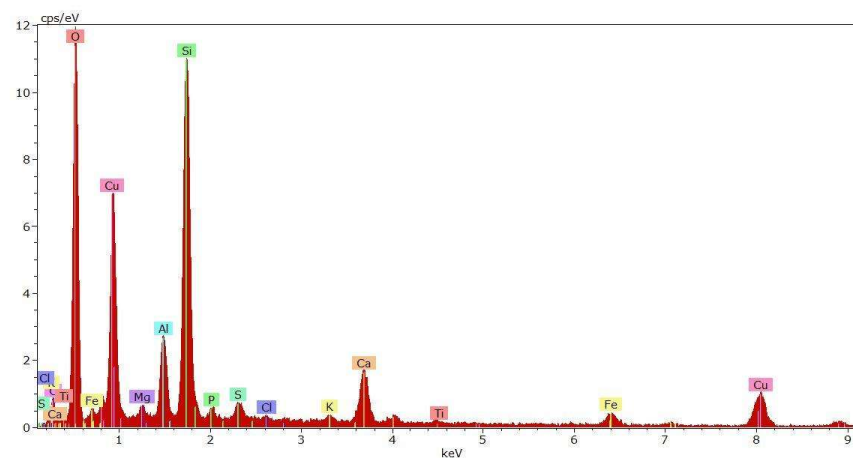


Ilustración 126. Resultado A de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 18 del Acueducto de Morelia X: 271549 Y: 2179783.

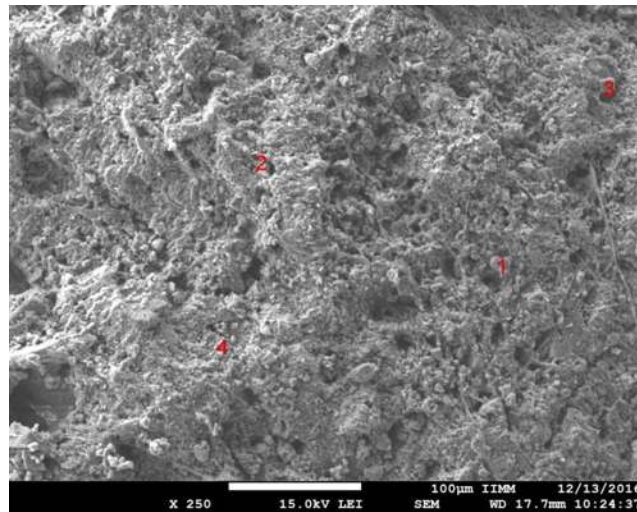
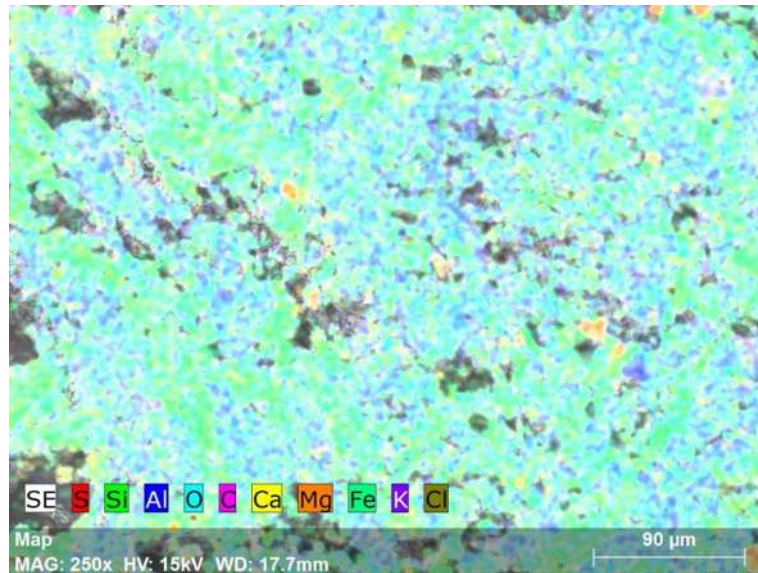


Ilustración 127. Resultado B de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 18 del Acueducto de Morelia X: 271549 Y: 2179783.



**Ilustración 6 Resultado C de Microscopía Electrónica de Barrido muestra número 18 del Acueducto de Morelia X: 271549 Y: 2179783.**

