

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE
MATERIAL PARTICULADO EN
HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO,
UTILIZANDO LA TÉCNICA DE
DIFRACCIÓN DE RAYOS X.

TESIS

Que para obtener el Grado de:
Maestro en Ciencias-Geología.



PRESENTA:

OCHOA CONTRERAS ROBERTO.

Hermosillo, Sonora, Mayo del 2017

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

Dedicatoria

Con especial dedicatoria a mis padres, *Griselda Contreras Granillo* y *Roberto Ochoa Martínez*, por ser el mejor ejemplo a seguir, haberme apoyado en cada momento, enseñarme a no darme por vencido y dar siempre lo mejor de mí.

A mi abuela *Olga Martínez López* y mi hermana *Ana Cristina Ochoa Contreras* por estar siempre presentes apoyando desde el inicio de mis estudios, a mis abuelos *Luis Gustavo Contreras* y *Teresa Granillo*, mis tíos y tías por sus ánimos y buenos deseos.

A una persona importante para mí, que aunque no se encuentre presente sé que desde el cielo está cuidando mis pasos, a mi abuelo †*Celestino Ochoa Sánchez*.

Agradecimientos

A mi director de tesis **Dr. Juan José Palafox Reyes** y co-directora **Dra. Diana María Meza Figueroa** por su enorme ayuda desde el inicio de este proyecto, por compartir su conocimiento, sus consejos y guías durante el posgrado, por aceptarme como tesista, su apoyo y contribución durante la realización del proyecto hasta la culminación. Pero sobre todo por su amistad.

A la **Dra. Teresa Pi Puig** por su colaboración y facilitar al acceso de los laboratorios de DRX del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, por compartir sus conocimientos sobre las técnicas y métodos de laboratorio para DRX, entre muchas cosas. Al **Dr. Francisco Martín Romero** por la facilitación al acceso del equipo portátil de DRX-FRX. Al **Dr. Jesús Roberto Vidal** y al comité del posgrado por sus consejos, recomendaciones y seguimiento del proyecto durante todo el periodo académico.

A mis compañeros de laboratorio, por el gran apoyo y amistad brindada durante estos años, y sobre todo por hacerme sentir parte de este increíble grupo de trabajo.

En general un agradecimiento a cada persona que de una u otra forma contribuyeron a realizar este proyecto.

Agradecimientos a instituciones

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por brindarme el apoyo de una beca de posgrado durante el periodo 2015-1 al 2016-2, facilitando la culminación en tiempo y forma de este trabajo.

Al proyecto CONACYT No.167676 “Caracterización espacio-temporal de trazadores geoquímicos en partículas para identificación de fuentes geogénicas y de tráfico en zonas áridas y relación con biomarcadores de daño genotóxico en Hermosillo, Sonora.” A cargo de la Dra. Diana Meza Figueroa, por el apoyo económico para estancias de investigación, uso de instalaciones y material de laboratorio.

A la Universidad de Sonora y al Departamento de Geología, por darme la oportunidad de integrarme al programa de Maestría en Ciencias-Geología y brindarme una correcta formación académica.

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por el uso de instalaciones y apoyos en estancias de investigación.

ÍNDICE DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS.....	6
LISTA DE TABLAS	8
LISTA DE ANEXOS	10
I. Abstract.....	16
II. Resumen	18
1. Introducción.....	20
2. Objetivos	24
2.1. Objetivo General.....	24
2.2. Objetivos Particulares.....	24
3. Generalidades del área de estudio	25
3.1. Localización	25
3.2. Clima	26
3.3. Fisiografía, Geomorfología e Hidrografía	28
3.4. Edafología	30
3.5. Geología local.....	33
4. Antecedentes.....	36
5. Metodología	40
5.1. Selección de lugares estratégicos de muestreo.....	44
5.1.1. Muestreo de escuelas	45
5.1.2. Muestreo de suelo	47
5.1.3. Muestreo de calle.....	49
5.2. Preparación de muestras	51
6. Análisis químico y mineralógico.....	55
6.1. Fluorescencia de rayos x con micro tubos	56
6.1.1. Ventajas y limitaciones de la técnica.....	57
6.1.2. Control de calidad.....	57
6.2. Difracción de Rayos X	62
6.2.1. Ventajas y limitaciones de la técnica.....	64
6.2.2. Equipos de DRX y ajustes operarios	65
6.2.3. Software de interpretación	75
6.2.4. Fase cualitativa de análisis	76
6.2.5. Fase de semi-cuantificación	76

7. Resultados y discusión	78
7.1. Suelos periurbanos	79
7.1.1. <i>Granulometría</i>	79
7.1.2. <i>DRX</i>	81
7.1.3. <i>Factores de enriquecimiento mediante normalización elemental</i>	88
7.2. Polvos Urbanos.....	89
7.2.1. <i>Polvo urbano sedimentado en calles</i>	90
7.2.2. <i>Polvo urbano sedimentado en escuelas</i>	93
7.3. <i>Minerales y compuestos utilizados en la fabricación de materiales antrópicos y sus implicaciones a la salud</i>	100
8. Conclusiones y recomendaciones	118
Anexo I	119
Anexo II	121
Anexo III.....	124
Anexo IV.....	127
Anexo V	138
Bibliografía.....	178

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localización del área de estudio. Fuente: editado de CONABIO, 2008.	25
Figura 2. Vientos dominantes en la ciudad de Hermosillo.	27
Figura 3. Hidrología periurbana de la ciudad de Hermosillo.	29
Figura 4. Mapa de suelos edafológicos.	32
Figura 5. Mapa geológico de Hermosillo.	33
Figura 6. Modelo ilustrativo del cinturón de polvo global.	40
Figura 7. Ubicación de lugares de colecta de muestras con clave ES respecto a cuencas hidrográficas urbanas.	46
Figura 8. Colecta de muestra en patio de escuela.	47
Figura 9. Ubicación de lugares de colecta de muestras con clave 1PH, 2VR, 3CL, 4CM y 5RG respecto a la edafología.	48
Figura 10. Modelo ilustrativo de la técnica de muestreo superficial de tresbolillo.	49
Figura 11. Ubicación de muestras de polvo urbano en calles con clave CB.	50
Figura 12. Horno de secado al aire modelo VWR 1600 HAFO Series.	51
Figura 13. Ro-Tap Tyler Modelo RX-86 y torre de tamices utilizados.	52
Figura 14. Torre de 7 tamices de acero inoxidable con diferente tamaño de malla, recipiente de fondo y tapa superior.	52
Figura 15. Baño ultrasónico utilizado en la limpieza de tamices.	54
Figura 16. Principios de la técnica de fluorescencia de rayos x. Editado de Horiba Scintific, 2017.	56
Figura 17. Equipo portátil de fluorescencia de rayos x (FRXP) con tubos miniaturizados marca <i>Thermo Scientific Niton</i> modelo <i>FXL</i>	58
Figura 18. Esclarecimiento de la técnica de difracción de rayos x.	63
Figura 19. Cabina del difractómetro <i>PANalytical</i> modelo <i>EMPYREAN</i>	65
Figura 20. Cabina del difractómetro <i>Bruker</i> modelo <i>D8 Advance</i>	66
Figura 21. Analizador <i>Olympus TERRA-476</i>	67
Figura 22. Porta-muestra ordinario de simple cavidad utilizada en equipo <i>Bruker</i> modelo <i>D8 Advance</i>	73

Figura 23. Preparación de muestra utilizando porta-muestra de doble fondo en el equipo <i>PANalytical Empyrean</i>	74
Figura 24. Celda vibrante utilizada en el equipo portátil <i>Olympus</i> modelo <i>Terra-476</i>	74
Figura 25. Mapa de muestras analizadas por DRX en las tres diferentes matrices.....	78
Figura 26. Curvas granulométricas de suelos edafológicos de Hermosillo.....	80
Figura 27. Comparativo de porcentajes de granulometría capaz de re-suspenderse en muestras de matriz de suelo.....	81
Figura 28. Especies minerales en matriz de suelo.....	82
Figura 29. Análisis semi-cuantitativo por DRX de la muestra 1PH en malla 635.....	84
Figura 30. Análisis semi-cuantitativo por DRX de la muestra 2VR a 635 en malla 635.	85
Figura 31. Análisis semi-cuantitativo por DRX de la muestra 3CL en malla 635.....	86
Figura 32. Análisis semi-cuantitativo por DRX de la muestra 4CM en malla 635.....	87
Figura 33. Análisis semi-cuantitativo por DRX de la muestra 5RG en malla 635.	88
Figura 34. Mapa de localización de muestras analizadas por DRX respecto a tipo de suelo.	89
Figura 35. Promedio de numero de muestras entre especies minerales, según su matriz de polvo urbano.	90
Figura 36. Especies minerales en polvo urbano de calles.	91
Figura 37. Especies minerales en polvo urbano sedimentado en escuelas antes de lluvias (pre-monzón).	94
Figura 38. Especies minerales en polvo urbano sedimentado en escuelas después de lluvias (post-monzón).....	97

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Índice clasificatorio de aridez de Lang descrita en Almorox (2003).....	41
Tabla 2. Tamaño de granulometría según el mallado del tamiz.	53
Tabla 3. Recuperación elemental en equipo <i>Thermo Scientific Niton FXL</i> para el NIST-SRM 2710a montana soil, comparando dos modalidades de análisis.	60
Tabla 4. Recuperación de estándares certificados NIST-SRM en equipo portátil de fluorescencia de rayos x <i>Thermo Scientific Niton</i> modelo <i>FXL</i> del Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía (LANGEM).	61
Tabla 5. Tensión y potencia de energía aplicada al tubo de rayos x utilizado en análisis realizados.....	68
Tabla 6. Rango de análisis respecto al ángulo 2Θ utilizado en análisis realizados.....	68
Tabla 7. Longitud de onda característica según el tubo emisor de rayos x del equipo.	69
Tabla 8. Condiciones operarias de tiempo y avance de escaneo en equipos fijos <i>Bruker</i> y <i>PANalytical</i> , y exposiciones para equipo portátil <i>Olympus</i> utilizados durante los análisis.	69
Tabla 9. Configuración instrumental de movimiento de muestra durante análisis.	69
Tabla 11. Mineralogía identificada en muestras de suelo periurbano en granulometría de $20\mu\text{m}$	82
Tabla 12. Mineralogía identificada en muestras de polvo urbano sedimentado en calles, los análisis se llevaron a cabo en granulometría de $20\mu\text{m}$	91
Tabla 13. Mineralogía identificada en muestras de polvo urbano sedimentado en canchas de escuelas durante el periodo de antes de lluvias, los análisis se llevaron a cabo en granulometría de $20\mu\text{m}$	94
Tabla 14. Mineralogía identificada en muestras de polvo urbano sedimentado en canchas de escuelas durante el periodo referente a después de lluvias, los análisis se llevaron a cabo en granulometría de $20\mu\text{m}$	98
Tabla 15. Minerales de cristobalita identificados en polvo urbano de Hermosillo.	101
Tabla 16. Minerales de cordierita identificados en polvo urbano de Hermosillo.	102
Tabla 17. Minerales de caolín identificados en suelos periurbanos de Hermosillo.	103
Tabla 18. Mineral de sal amoniaco identificado en suelos periurbanos de Hermosillo.....	104
Tabla 19. Mineral de watanabeita identificado en suelos periurbanos de Hermosillo.	105
Tabla 20. Minerales de magnesita identificados en polvo urbano de Hermosillo.	106

Tabla 21. Mineral de bayerita identificado en polvo urbano de Hermosillo.	107
Tabla 22. Mineral de plattnerita identificado en polvo urbano de Hermosillo.	108
Tabla 23. Mineral de crocoita identificado en polvo urbano de Hermosillo.	108
Tabla 24. Minerales de lopezita identificados en polvo urbano de Hermosillo.	110
Tabla 25. Mineral de perovskita identificado en polvo urbano de Hermosillo.....	110
Tabla 26. Mineral de Urea identificado en polvo urbano de Hermosillo.	111
Tabla 27. Mineral de Osbornita identificado en polvo urbano de Hermosillo.	112
Tabla 28. Zinc identificado en polvo urbano de Hermosillo.	113
Tabla 29. Mineral con contenidos de Zn identificado en polvo urbano de Hermosillo.	113
Tabla 30. Mineral de antarctita identificado en polvo urbano de Hermosillo.	114
Tabla 31. Mineral de bernalita identificado en polvo urbano de Hermosillo.	114
Tabla 32. Mineral de wustita identificado en polvo urbano de Hermosillo.	115
Tabla 33. Mineral de cementita identificado en polvo urbano de Hermosillo.....	115
Tabla 34. Mineral de digenita identificado en polvo urbano de Hermosillo.	116
Tabla 35. Mineral de circón identificado en polvo urbano de Hermosillo.....	117

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Cadena de custodia elaborada a partir de la NMX-AA-132-SCFI, 2006.	120
Anexo 2. Gráfico de exactitud (%D) para valores recuperados del NIST 2709a en equipo portátil de fluorescencia de rayos x <i>Thermo Scientific Niton</i> modelo <i>FXL</i>	122
Anexo 3. Gráfico de precisión (%RSD) para valores recuperados del NIST 2709a en equipo portátil de fluorescencia de rayos x <i>Thermo Scientific Niton</i> modelo <i>FXL</i>	122
Anexo 4. Gráfico de exactitud (%D) para valores recuperados del NIST 2710a en equipo portátil de fluorescencia de rayos x <i>Thermo Scientific Niton</i> modelo <i>FXL</i>	122
Anexo 5. Gráfico de precisión (%RSD) para valores recuperados del NIST 2710a en equipo portátil de fluorescencia de rayos x <i>Thermo Scientific Niton</i> modelo <i>FXL</i>	123
Anexo 6. Gráfico de exactitud (%D) para valores recuperados del NIST 2711 en equipo portátil de fluorescencia de rayos x <i>Thermo Scientific Niton</i> modelo <i>FXL</i>	123
Anexo 7. Gráfico de precisión (%RSD) para valores recuperados del NIST 2711 en equipo portátil de fluorescencia de rayos x <i>Thermo Scientific Niton</i> modelo <i>FXL</i>	123
Anexo 8. Curva granulométrica para suelo 1PH.	125
Anexo 9. Curva granulométrica para suelo 2VR.	125
Anexo 10. Curva granulométrica para suelo 3CL.	125
Anexo 11. Curva granulométrica para suelo 4CM.	126
Anexo 12. Curva granulométrica para suelo 5RG.	126
Anexo 13. Normalización respecto a Cambisol para la muestra ES-03 a 20 μ m.	128
Anexo 14. Normalización respecto a Cambisol para la muestra 2ES-03 a 20 μ m.	128
Anexo 15. Normalización respecto a Calcisol para la muestra ES-05 a 20 μ m.	129
Anexo 16. Normalización respecto a Calcisol para la muestra 2ES-05 a 20 μ m.	129
Anexo 17. Normalización respecto a Cambisol para la muestra ES-09 a 20 μ m.	130
Anexo 18. Normalización respecto a Cambisol para la muestra 2ES-09 a 20 μ m.	130
Anexo 19. Normalización respecto a Calcisol para la muestra ES-12 a 20 μ m.	131
Anexo 20. Normalización respecto a Calcisol para la muestra 2ES-12 a 20 μ m.	131
Anexo 21. Normalización respecto a Calcisol para la muestra ES-14 a 20 μ m.	132
Anexo 22. Normalización respecto a Calcisol para la muestra 2ES-14 a 20 μ m.	132

Anexo 23. Normalización respecto a Calcisol para la muestra ES-19 a 20 μ m.	133
Anexo 24. Normalización respecto a Calcisol para la muestra 2ES-19 a 20 μ m.	133
Anexo 25. Normalización respecto a Cambisol para la muestra ES-25 a 20 μ m.	134
Anexo 26. Normalización respecto a Cambisol para la muestra 2ES-25 a 20 μ m.	134
Anexo 27. Normalización respecto a Cambisol para la muestra ES-26 a 20 μ m.	135
Anexo 28. Normalización respecto a Cambisol para la muestra 2ES-26 a 20 μ m.	135
Anexo 29. Normalización respecto a Cambisol para la muestra ES-31 a 20 μ m.	136
Anexo 30. Normalización respecto a Cambisol para la muestra 2ES-31 a 20 μ m.	136
Anexo 31. Normalización respecto a Phaeozem para la muestra ES-33 a 20 μ m.	137
Anexo 32. Normalización respecto a Phaeozem para la muestra 2ES-33 a 20 μ m.	137
Anexo 33. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-02.....	139
Anexo 34. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave ES-02.	139
Anexo 35. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-03.....	140
Anexo 36. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave ES-03.	140
Anexo 37. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-05.....	141
Anexo 38. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave ES-05.	141
Anexo 39. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-06.....	142
Anexo 40. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave ES-06.	142
Anexo 41. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-09.....	143
Anexo 42. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave ES-09.	143
Anexo 43. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-12.....	144
Anexo 44. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave ES-12.	144
Anexo 45. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-14.....	145
Anexo 46. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave ES-14.	145
Anexo 47. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-19.....	146
Anexo 48. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave ES-19.	146
Anexo 49. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-26.....	147

Anexo 50. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave ES-26.	147
Anexo 51. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-28.....	148
Anexo 52. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave ES-28.	148
Anexo 53. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-31.....	149
Anexo 54. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave ES-31.	149
Anexo 55. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-33.....	150
Anexo 56. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave ES-33.	150
Anexo 57. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-03.....	151
Anexo 58. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-03.	151
Anexo 59. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-05.....	152
Anexo 60. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-05.	152
Anexo 61. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-09.....	153
Anexo 62. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-09.	153
Anexo 63. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-12.....	154
Anexo 64. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-12.	154
Anexo 65. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-14.....	155
Anexo 66. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-14.	155
Anexo 67. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-19.....	156
Anexo 68. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-19.	156
Anexo 69. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-25.....	157
Anexo 70. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-25.	157
Anexo 71. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-31.....	158
Anexo 72. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-31.	158
Anexo 73. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-33.....	159
Anexo 74. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-33.	159
Anexo 75. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 1PH.	160
Anexo 76. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave 1PH.....	160

Anexo 77. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2VR.....	161
Anexo 78. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave 2VR.	161
Anexo 79. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 3CL.	162
Anexo 80. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave 3CL.....	162
Anexo 81. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 4CM.	163
Anexo 82. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave 4CM.....	163
Anexo 83. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 5RG.	164
Anexo 84. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave 5RG.	164
Anexo 85. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave CB-16.....	165
Anexo 86. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave CB-16.....	165
Anexo 87. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave CB-19.....	166
Anexo 88. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave CB-19.....	166
Anexo 89. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave CB-21.....	167
Anexo 90. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave CB-21.....	167
Anexo 91. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave CB-27.....	168
Anexo 92. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave CB-27.....	168
Anexo 93. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave CB-86.....	169
Anexo 94. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave CB-86.....	169
Anexo 95. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-03, realizando en equipo Terra, Olympus.	170
Anexo 96. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-05, realizando en equipo Terra, Olympus.	170
Anexo 97. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-09, realizando en equipo Terra, Olympus.	170
Anexo 98. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-12, realizando en equipo Terra, Olympus.	170
Anexo 99. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-14, realizando en equipo Terra, Olympus.	171
Anexo 100. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-19, realizando en equipo Terra, Olympus.	171

Anexo 101. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-25, realizando en equipo Terra, Olympus.	171
Anexo 102. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-31, realizando en equipo Terra, Olympus.	171
Anexo 103. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-33, realizando en equipo Terra, Olympus.	172
Anexo 104. Comparativo de difractogramas para las muestras de clave 2ES-33, 2ES-31, 2ES-25, 2ES-19, 2ES-14, 2ES-12, 2ES-09, 2ES-05 Y 2ES-03.	172
Anexo 105. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-02, realizando en equipo Terra, Olympus.	172
Anexo 106. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-03, realizando en equipo Terra, Olympus.	172
Anexo 107. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-05, realizando en equipo Terra, Olympus.	173
Anexo 108. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-06, realizando en equipo Terra, Olympus.	173
Anexo 109. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-09, realizando en equipo Terra, Olympus.	173
Anexo 110. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-12, realizando en equipo Terra, Olympus.	173
Anexo 111. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-14, realizando en equipo Terra, Olympus.	174
Anexo 112. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-19, realizando en equipo Terra, Olympus.	174
Anexo 113. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-25, realizando en equipo Terra, Olympus.	174
Anexo 114. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-26, realizando en equipo Terra, Olympus.	174
Anexo 115. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-31, realizando en equipo Terra, Olympus.	175
Anexo 116. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-33, realizando en equipo Terra, Olympus.	175
Anexo 117. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-34, realizando en equipo Terra, Olympus.	175

Anexo 118. Comparativo de difractogramas para las muestras de clave ES-02, ES-03, ES-05, ES-06, ES-09, ES-12, ES-14, ES-19, ES-25, ES-26, ES-28, ES-31, ES-33 Y ES-34..... 175

Anexo 119. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave CB-16, realizando en equipo Terra, Olympus. 176

Anexo 120. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave CB-19, realizando en equipo Terra, Olympus. 176

Anexo 121. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave CB-21, realizando en equipo Terra, Olympus. 176

Anexo 122. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave CB-27, realizando en equipo Terra, Olympus. 176

Anexo 123. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-86, realizando en equipo Terra, Olympus. 177

Anexo 124. Comparativo de difractogramas para las muestras de clave CB-16, CB-19, CB-21, CB-27 Y CB-86. 177

I. Abstract

The follow work of professional thesis have the current studied area of the city of Hermosillo, Sonora, which is located at the northern of Mexico, and it is characterized to have an extreme arid climate, enhancing the erosion of the media. This professional thesis work studies the mineralogy of the particulate matter (PM) collected at specified zones of the city, this PM is a product of a complex mix of anthropogenic adjuncts (generated by the human activities) and geogenic (geology media), this PM have different size, form and chemical composition.

The results of this work were separated in three different mattress, which have a tendency to increase the quantity of mineral species at the follow order: soil < sediment dust at schools before the rain period < sedimented dust at schools after the rain period < sedimented dust at urban streets, reflecting the input of anthropogenic activities and the integration of this materials at the natural mineral dust of the city.

The complexity of the mineral species increase at the collected samples after the rain period (monsoon) reflecting the superficial carrying of the hydrographic urban basins, deposit and subsequently re-suspension.

The soils are characterized by a principally composed mix of quartz, muscovite, calcite and microcline, the collected dust sedimented at schools shows a composed mineralogy of: albite, calcite, quartz, cordierite, hematite, microcline and muscovite, and the dust sedimented at streets: albite, calcite, quartz, hematite and microcline. This three mattress shows a principal general composition similar between them, instead, the mineral species considerate trace or minor identified represents significative and complex variations.

In several published articles, the urban dust is studied from a geochemical perspective, comparing it with a geochemical background to know if it exceeds or not. Objectively, we found a smaller number of publications that used the XRD technique in urban dust and not established some mineralogical comparison with non-impacted soils. The technique is useful for any matrix, but nevertheless, the conditions of analysis are an important factor for the identification of all the mineral phases present, a conventional or rapid analysis would only identify the major mineralogy. Therefore, in order to

exploit the potential of this technique, it is advisable to perform a correct analysis and a detailed interpretation.

Finally, for future XRD analysis in this type of materials, in this work it is suggested to use a double layer sample holder in order to reduce the common problem of preferential orientation on the faces of the crystals, perform the analysis on a wide spectrum (4° - 70° or greater in 2θ) to discard the problem of inadequate cut in 2θ providing insufficient data, perform a slow analysis (1 hour or more) which would indicate a large number of readings to obtain a more detailed analysis and finally the sample should be properly homogenized and in granulometry below $440\mu\text{m}$ in order to irradiate a greater amount of particles and avoiding an irregular irradiated surface.

II. Resumen

El presente trabajo de tesis tiene como área de estudio la ciudad de Hermosillo, Sonora, la cual se encuentra localizada al noroeste de México, y se caracteriza por tener un clima de extrema aridez, favoreciendo ampliamente la erosión del medio. Este trabajo centrará el estudio a la mineralogía del material particulado recolectado en zonas específicas de la ciudad, este material particulado es producto de una mezcla compleja de agentes antropogénicos (generados por acción del hombre) y geogénicas (entorno geológico), las cuales varían en tamaño, forma y composición química.

Los resultados de este trabajo realizados en tres matrices distintas indican un aumento en la cantidad de especies minerales en el siguiente orden: suelos < polvo de escuelas < polvo de calles, reflejando el aporte de actividades antropogénicas y la integración de estos materiales al polvo mineral natural de la ciudad.

La complejidad de especies minerales aumenta también en las muestras colectadas después de la temporada de lluvias (monzón) reflejando el acarreo superficial en las cuencas, depósito y posteriormente re-suspensión.

Los suelos se caracterizan por una mezcla compuesta principalmente por cuarzo, muscovita, calcita y microclina, el polvo colectado en escuelas muestra una mineralogía compuesta por: albita, calcita, cuarzo, cordierita, hematita, microclina y muscovita, y el de calles: albita, calcita, cuarzo, hematita y microclina. Las tres matrices descritas presentan una composición principal generalmente semejante entre ellas, más sin embargo, las especies minerales consideradas menores y traza identificados representan variaciones significativas y complejas.

En varios artículos publicados, el polvo urbano es estudiado desde una perspectiva geoquímica, haciendo un comparativo con un fondo geoquímico para saber si excede o no el mismo. Objetivamente, se encontró una cantidad menor de publicaciones que utilizan la técnica DRX en el polvo urbano y no establecen algún comparativo mineralógico con los suelos no impactados. La técnica es útil para cualquier matriz, mas sin embargo, las condiciones de análisis son un factor importante para lograr la identificación de todas las fases mineralógicas presentes, al realizar un análisis convencional o rápido solo se lograrían identificar la mineralogía mayor. Por tanto, para

lograr explotar el potencial de esta técnica, es recomendable realizar un correcto análisis e interpretación minuciosamente detallada.

Finalmente, para futuros análisis por DRX en este tipo de materiales, en este trabajo se sugiere utilizar un sujetador de muestra de doble fondo con el fin de reducir la problemática de orientación preferencial en las caras de los cristales, realizar el análisis en un espectro amplio (4° - 70° o mayor en 2Θ) para descartar el problema de corte inadecuado en 2Θ proporcionando datos insuficientes, realizar un análisis lento (1 hora o más) con lo cual indicaría una cantidad mayor de lecturas para obtener un análisis más detallado y finalmente la muestra deberá estar debidamente homogeneizada y en granulometría por debajo de las $440\mu\text{m}$ con el fin de irradiar una mayor cantidad de partículas y evitando una superficie irradiada irregular.

1. Introducción

El suelo urbano está atrayendo la atención de numerosos investigadores, debido a que al menos el 49% de la población mundial vive en áreas urbanas y se estima que para el 2050 incrementa al 84%. Estos suelos están siendo sometidos a una severa presión antropogénica debido al desarrollo urbano, el cual mediante procesos de urbanización y manipulación de materiales los cuales han sido transportados o distribuidos por la actividad urbana en el ambiente urbano crean el suelo urbano, el cual es completamente diferente al suelo natural (Rodríguez-Seijo *et al.*, 2015). Estos materiales derivados de actividades antropogénicas han aumentado su intensidad debido al incremento en la densidad de población y un rápido crecimiento económico, convirtiéndose en una problemática ambiental en crecimiento (Yang *et al.*, 2015).

Científicos ambientales están reconociendo cada vez más que el polvo es el principal vehículo de transporte de este tipo de contaminantes, debido a que las partículas de polvo suspendidas pueden ser transportadas por largas distancias y pueden moverse a escala regional, continental o incluso global (Field *et al.*, 2009). En las zonas áridas, las bajas precipitaciones, temperaturas extremas y altos índices erosivos, provocan un incremento en la transportación, re-suspensión y acumulación del polvo en el ambiente (Del Río-Salas *et al.*, 2012; Moreno-Rodríguez *et al.*, 2015; Meza-Figueroa *et al.*, 2016).

El material particulado está definido como el conjunto de partículas sólidas y/o líquidas (excepto agua) que se encuentran suspendidos en la atmósfera (Mészáros, 1999) incluyendo a los aerosoles. Por tanto, la naturaleza de este material, su impacto ambiental y los efectos a la salud humana puede ser estimado por una interacción de varios factores y procesos que pueden influir en su formación, transporte y transformación (Basha *et al.*, 2005).

Este material puede provenir de dos fuentes: antropogénicas y geogénicas (Satsangi & Yadav, 2014). Las antropogénicas son generadas por el hombre tales como emisiones vehiculares, cementos en construcción, fertilizantes en la agricultura, entre otros. Mientras que las geogénicas son de origen natural o geológico generadas a partir de las rocas madre o suelos cercanos. Estos materiales derivados de ambas procedencias

poseen características físicas, morfológicas, químicas y termodinámicas muy variables (Reis *et al.*, 2014).

Un principal componente del material particulado de origen antrópico es el polvo generado en la ciudad (también llamado polvo urbano) el cual se deriva de materiales relacionados a la construcción (bloques, pinturas, concreto y metal), deterioro de asfalto, emisiones de tráfico vehicular, materiales biogénicos¹, entre otros. (Reis *et al.*, 2014).

La abundancia de polvo atmosférico presenta una notoria vinculación al clima árido y porcentajes bajos de humedad, se ha demostrado en publicaciones recientes que las mayores concentraciones de material particulado suspendido en el aire ocurren durante el pre-monzón y post-monzón, y menores concentraciones durante la temporada de lluvias (monzón) e invierno (Moreno-Rodríguez *et al.*, 2015; Meza-Figueroa *et al.*, 2016).

En zonas urbanas, la escorrentía superficial origina un factor de enriquecimiento al polvo urbano, agregando una gran cantidad de contaminantes emergentes procedentes de una continua actividad antropogénica, estos contaminantes emergentes se definen como aquellos residuos difícil de tratar, resistentes en el medio ambiente y del cual se desconoce el efecto en la salud humana, por lo tanto no se encuentra regulados. Entonces, partiendo del conocimiento que cualquier producto elaborado por el hombre utiliza como materia prima materiales geológicos, y estos a su vez mediante la manufacturación dan como producto materiales sintéticos y/o nano-estructurados con propiedades físicas y químicas similares que los geológicos, estos productos pueden ingresar al ambiente como contaminante emergente desconociendo su efecto en el ecosistema y en donde la escorrentía superficial actúa como corrientes de arrastre y transporte de diversos materiales acumulándolos hacia la parte baja de la cuenca, que durante los periodos secos estos materiales acumulados son re-suspendidos.

El polvo urbano en diámetros menores a 100 μm es considerado de alto riesgo para la salud humana debido a su fácil re-suspensión pudiendo ser respirado con mayor facilidad (Ferreira-Baptista & De Miguel, 2005; Satsangi & Yadav, 2014), asociándolo a enfermedades respiratorias y cardiovasculares crónicas, reducción de función

¹ Producido por la acción de un organismo vivo.

² Cifras de población estimada en un periodo de tiempo entre los censos oficiales.

pulmonar, cáncer y mortalidad prematura (Pope, 2004; Bell *et al.*, 2004). Los niños pequeños en un rango de 0-5 años de edad son los principales afectados por este material debido a sus largos periodos de exposición en los patios de juegos al aire libre (Morrison *et al.*, 2013) y su conducta de introducir objetos a la boca, chuparse los dedos y/o manos, además de que presentan una alta absorción de metales pesados en el sistema digestivo y presentan mayor sensibilidad a metales pesados en la hemoglobina que los adultos (Meza-Figueroa *et al.*, 2007; García-Rico *et al.*, 2008; Reis *et al.*, 2014; García-Rico *et al.*, 2016).

Estudios diversos mencionan componentes los cuales son de interés para la salud humana entre los que se mencionan los siguientes: Cr hexavalente presentando potencial cancerígeno, Zn y Cu los cuales a niveles altos son asociados a enfermedades de Alzheimer, Pb por su alta toxicidad y V asociado a un incremento de pulso arterial (Potgieter-Vermaak *et al.*, 2012).

Una de las técnicas más importantes utilizadas para la caracterización mineralógica de polvos poli-cristalinos es la difracción de rayos x (DRX), la cual permite la identificación de fases cristalinas en materiales o mezclas tan complejas como son los polvos urbanos. La caracterización de estos polvos por DRX representa un reto analítico debido a su alto contenido de materia orgánica, hidrocarburos y compuestos sintéticos. Para que esta técnica sea eficaz e idónea, el material analizado deberá poseer cristalinidad adecuada y en caso de ser un compuesto, los componentes deberán estar contenidos en porcentaje mayor al 3% (por debajo de este porcentaje, ningún material será detectado). Este límite de detección presenta variabilidades según la propiedad de difracción característica del material (Lozano y Bernal, 2005). Por lo que una combinación de esta técnica con la fluorescencia de rayos x (FRX) pueden proporcionar una gran información de la composición química y mineralógica de complejas mezclas (Prandel *et al.*, 2014).

En la región centro-occidental de Sonora, al NW de México se encuentra la ciudad de Hermosillo, esta región representa una de las zonas más áridas del mundo con temperaturas mayores a los 40 °C durante el verano, junto con la falta de humedad y escasa cubierta vegetal provocan los factores propicios para una alta erosión del suelo y una gran cantidad de material particulado en suspensión transportados por el viento y otros medios. Esta ciudad es caracterizada por un alto parque vehicular (per cápita) y

una deficiencia en los sistemas de drenaje de lluvias, lo cual promueve una fuerte erosión de suelos y asfalto, favoreciendo el transporte de contaminantes emergentes hacia los bajos topográficos, donde subsecuentemente serán re-suspendidos (Meza-Figueroa *et al.*, 2007; Moreno-Rodríguez *et al.*, 2015; Meza-Figueroa *et al.*, 2016). El conjunto de estas condiciones representa una interesante área de estudio para el estudio del polvo urbano como vehículo de transporte de contaminantes emergentes asociados a actividades antropogénicas.

Este estudio plantea utilizar la técnica de DRX para caracterizar mineralógicamente los contaminantes emergentes del polvo urbano en la ciudad de Hermosillo, Sonora. Desarrollando el estudio de polvo en tres matrices distintas: suelo, calle y polvo depositado en canchas de zonas susceptibles como son las escuelas primarias. Se plantea un análisis comparativo de tres equipos de DRX para determinar su potencial en la caracterización de muestras poli-cristalinas complejas como es el polvo urbano.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Evaluar el potencial de la técnica de DRX en el diagnóstico de minerales considerados contaminantes emergentes asociadas al polvo urbano.

2.2. Objetivos Particulares

- Caracterizar las cuencas urbanas de la ciudad de Hermosillo, Sonora, para identificar áreas de acumulación de polvo urbano que a la vez son reservorios para re-suspensión de polvo.
- Caracterizar la mineralogía de suelos aparentemente no impactados por actividades antropogénicas.
- Caracterizar la mineralogía de polvo urbano en calles.
- Caracterizar la mineralogía de polvo urbano en zonas susceptibles.
- Reconocer la procedencia de los componentes del polvo urbano conforme a su fuente geogénica o antropogénica.
- Comparar los resultados de tres equipos diferentes de DRX, incluyendo los efectos de preparación de muestra y porta-muestra en la orientación preferencial de las caras de los cristales.
- Comparar resultados de este estudio con otros similares en el mundo y evaluar el potencial de la técnica de DRX aplicada a mezclas complejas de polvo urbano.

3. Generalidades del área de estudio

3.1. Localización

La ciudad de Hermosillo, Sonora, México, se localiza en las coordenadas UTM 3218573 N, 504784 E zona 12R. La ciudad se encuentra en el centro del estado de Sonora, siendo la capital y ciudad más grande del estado (ver Figura 1).

El estado de Sonora colinda con los estados de Chihuahua al este, Sinaloa al sur y Baja California al noroeste, a 270km. hacia el norte comparte una extensa frontera con Arizona y una pequeña proporción con Nuevo Mexico de Estados Unidos, y hacia el oeste colinda con el Mar de Cortés o Golfo de California.

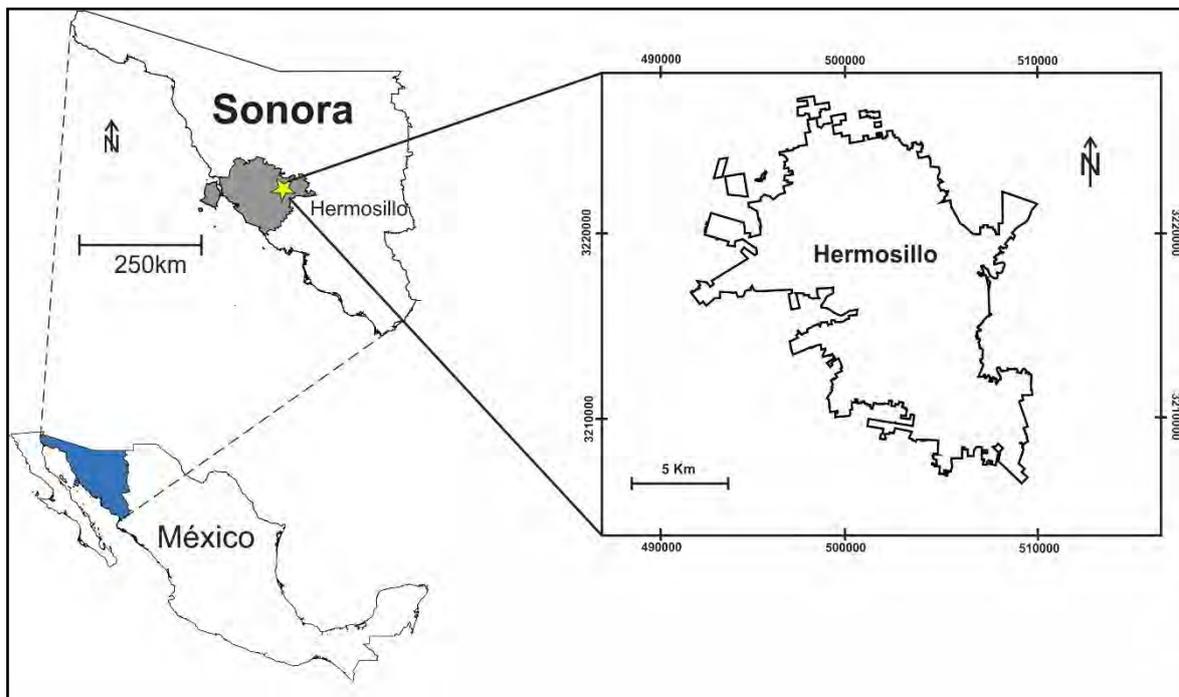


Figura 1. Mapa de localización del área de estudio. Fuente: editado de CONABIO, 2008.

3.1.1. Demografía

La ciudad de Hermosillo cuenta con una población de 884, 273 habitantes de acuerdo a los resultados obtenidos por un censo de población y vivienda en el 2010 y resultados intercensales² 2015 (INEGI, 2016). Siendo la décimo-sexta ciudad más grande de México.

El índice de desarrollo humano (IDH) o calidad de vida es muy alto, posicionándose en 5to lugar de las mejores ciudades de México para vivir. (INEGI, 2012). Se caracteriza por un rápido índice de crecimiento debido a su fuerte actividad en el sector industrial, agrícola, ganadero y pesquero.

3.2. Clima

El clima de la región se caracteriza por ser predominantemente muy seco (INEGI, 2014) con largos periodos donde la precipitación es nula o casi nula, y desértico según el índice de aridez de Lang descrita en (Almorox, 2003).

La temperatura media máxima mensual es de 34.8°C en el mes de julio y la temperatura media mínima mensual es de 18.3°C en el mes de enero, la temperatura media anual es de 28.1°C, y se presentan heladas ocasionales de diciembre a marzo, mientras que durante el verano se presentan temperaturas extremas superiores a los 45°C.

El mes en el cual se presenta la mayor humedad relativa es diciembre con un máximo promedio de 62% y el mes con menos humedad relativa es abril con un porcentaje mínimo promedio de 24.6%, en donde la poca humedad durante el año favorece los procesos de emisión de polvo mediante la re-suspensión. En cuanto a la insolación máxima, el mes en el cual se presenta mayor tiempo de horas luz es mayo con un promedio máximo de 326 horas luz.

² Cifras de población estimada en un periodo de tiempo entre los censos oficiales.

3.2.1. Vientos dominantes

Las corrientes de viento más fuertes se presentan durante los meses de julio, agosto y septiembre que corresponde a la temporada de monzón, con velocidades que varían de 60 a 80 Km/h, y una dirección preferencial con rumbo suroeste-noreste durante la mañana (ver Figura 2) y en dirección en sentido contrario durante la tarde, esto coincide con los meses con menor humedad en el ambiente. Ocasionalmente pueden presentarse ráfagas de hasta 120 Km/h durante el paso de huracanes y tormentas tropicales en el golfo de California.

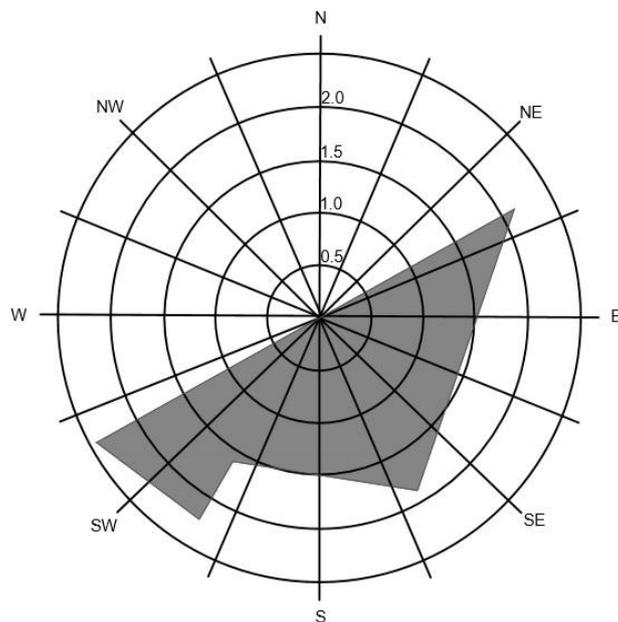


Figura 2. Vientos dominantes en la ciudad de Hermosillo, Fuente: editado de PDUCPH, 2015.

3.2.2. Vegetación

Según (INEGI, 2014) el tipo de vegetación existente en el área cercana a la ciudad corresponde a la de “selva seca y matorrales” de zona semiáridas. Entre lo que encontraremos la presencia de matorral espinoso, mezquite y palo verde, pero principalmente la abundancia de una variedad de arbustos espinosos.

En cuanto a la región comprendida dentro de la mancha urbana, se tiene escasa presencia de vegetación típica de la región, predominando vegetación inducida³ como árbol de fuego, ceiba, gredilla, benjamina, fresno y variedades de palmas, entre otros.

3.3. Fisiografía, Geomorfología e Hidrografía

3.3.1. Fisiografía

Fisiográficamente se encuentra en la provincia de la Sierra Madre Occidental (Raisz, 1964), más específicamente en la sub-provincia de Sierras Alargadas o Sierras Altas Sonorenses, la cual corresponde a una característica fisiográfica de transición entre las sub-provincias de Sierras Sepultadas y Mesetas de Lavas riolíticas.

3.3.2. Hidrografía

La ciudad de Hermosillo se encuentra en la región hidrológica Sonora sur 9 (RH9) cubriendo redes de arroyos (ver Figura 3) en las cuencas hidrológicas del Río Sonora y Río Bacoachi, las cuales reciben aguas de los arroyos cercanos. La zona norte de la ciudad de Hermosillo está compuesta por la sub-cuenca La Manga, la cual pertenece a la cuenca hidrológica del Río Bacoachi y las sub-cuencas La Poza, Río San Miguel y Río Sonora-Hermosillo, pertenecientes a la cuenca hidrológica del Río Sonora. Mientras que hacia la zona sur de la ciudad se extienden las sub-cuencas La Manga, Río Sonora-Hermosillo y La Poza.

³ Hace referencia a la vegetación que originalmente no existía en ese lugar y que ha sido inducida al mismo.

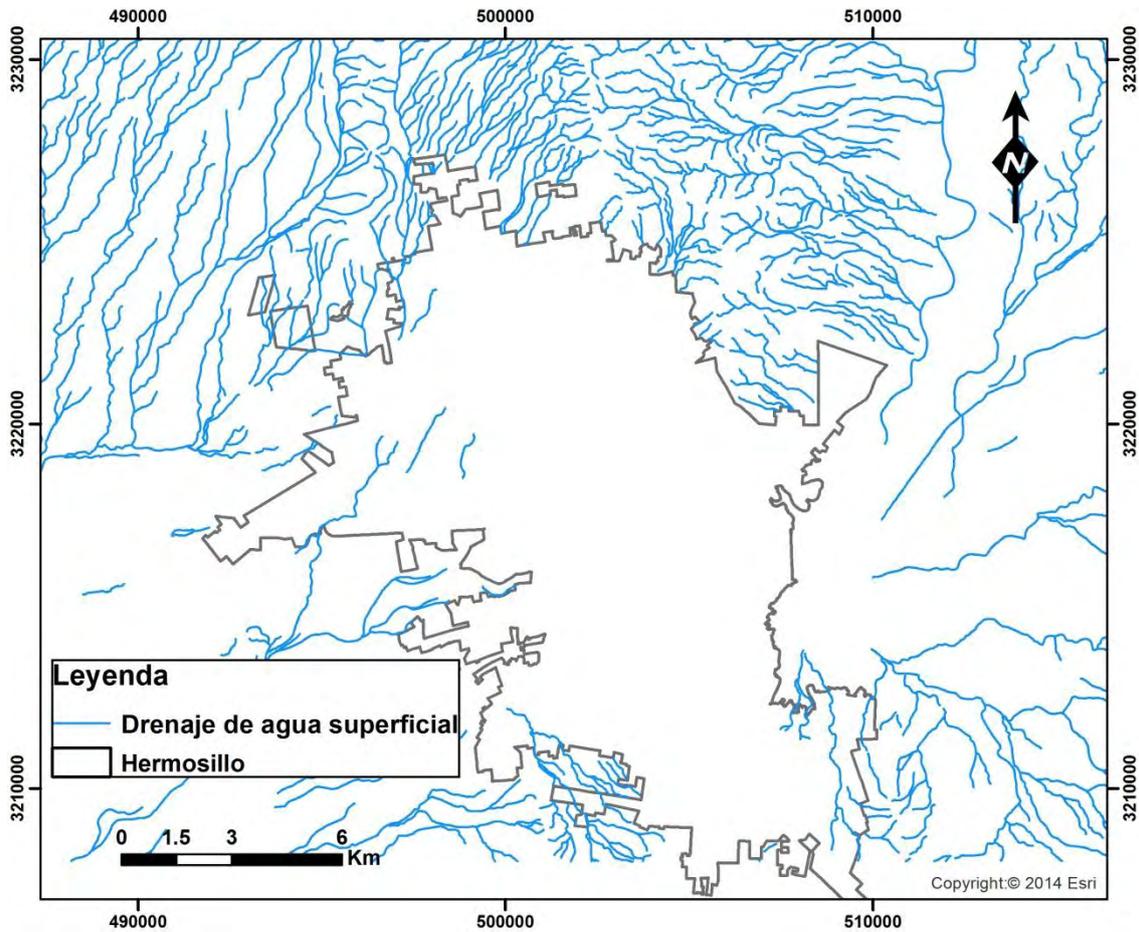


Figura 3. Hidrología periurbana de la ciudad de Hermosillo. Editado de INEGI, 2008.

Adyacente a la ciudad de Hermosillo tenemos la presa General Abelardo L. Rodríguez la cual es alimentada por los cauces del Rio Sonora y su principal afluente que es el Rio San Miguel. Conformando un sistema en conjunto con la presa Rodolfo Félix Valdez mejor conocida como "El Molinito" formando el sistema de presas A. L. Rodríguez – El Molinito, la cual es una zona de preservación ecológica natural protegida (González-Sandoval, 2005).

Partiendo de la cortina de contención de la presa Abelardo L. Rodríguez encontramos el lecho del rio cuyo cauce comúnmente es llamado como "El vado del rio" el cual se encuentra revestido de paredes de concreto con una longitud de 8 kilómetros, atravesando la ciudad de Hermosillo de este a oeste dividiendo la ciudad en dos grandes zonas norte y sur.

En esta zona la precipitación total anual es de 212.57 milímetros y los meses más lluviosos son durante el monzón, que corresponde a los meses de: julio, agosto y parte de septiembre registrándose una humedad relativa promedio del 53% mientras que en los meses de marzo a junio y en octubre la presencia de lluvias es mínima, con una humedad relativa del 30%.

3.3.3. Geomorfología

Geomorfológicamente se encuentra dentro del grupo de lomeríos y valles, formado por las estribaciones de la Sierra Madre Occidental, ya que dentro del área se encuentra un conjunto de altos topográficos los cuales presentan con una orientación norte-sur. Dentro del área tenemos una altitud promedio de 250 metros sobre nivel del mar, teniendo casi en su totalidad terrenos planos con una ligera orientación preferencial con rumbo hacia el Rio Sonora.

En este sector encontramos varios lugares con altura mayor al promedio, siendo los más importantes el Cerro de La Campana, Sierra La Flojera, Cerro La Cementera y Sierra Bachoco, siendo este último el punto más alto en el área con 670 metros sobre el nivel del mar, y algunos lomeríos que van desde 350 metros hasta los 400 metros de altura aproximadamente.

3.4. Edafología

En cuanto a la clasificación suelo, el área de estudio está conformada por 6 de los 30 grupos de suelos reconocidos por el Sistema Internacional Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (FAO, 2015), en base a su primer nivel de referencia. Teniendo presencia en el área de Calcisol, Regosol, Leptosol, Cambisol, Phaeozem y Vertisol (ver Figura 4), mencionados por orden de mayor a menor según la cantidad de metros cuadrados abarcados en el área. Es posible encontrar dentro del área Arenosol, Fluvisol y Luvisol, los cuales no se les toma gran importancia debido a sus escasos metros de cobertura.

Abarcando la mayor cobertura y estando ampliamente distribuido en el área de estudio está el grupo de los Calcisoles también conocidos en otras clasificaciones como Xerosoles o Yermosoles, el cual se caracteriza por su ocurrencia en zonas áridas y de escasa humedad. En donde la falta de humedad provoca la acumulación de sustancias solubles formando una capa impermeable de sales y carbonatos, en los que predomina el caliche.

El Grupo de los Regosoles es comúnmente asociado a regiones áridas, semiáridas y montañosas, es caracterizado por ser un suelo relativamente joven y pedregoso, los cuales se desarrollan sobre materiales no consolidados con escasa materia orgánica. Su uso varía dependiendo de su profundidad, pedregosidad y fertilidad, provocando rendimientos variables para la agricultura.

A diferencia de los Regosoles, el grupo de los Phaeozem son suelos con un alto potencial agrícola debido a sus características, presentando un alto contenido de materia orgánica, un clima favorable entre húmedo- templado e intensamente lixiviados.

Comprendidos en las partes topográficas altas del área de estudio se hallan los suelos del grupo de Leptosoles los cuales se encuentran ampliamente distribuidos en la zona, estos se caracterizan por ser suelos extremadamente pedregosos y/o gravillosos con menor del 20% de tierra fina, y posicionados sobre roca continua.

Los Vertisoles son suelos presentes en climas semiáridos y semi-húmedos con una marcada estación de sequía y lluvias. Se caracterizan por su alto contenido en arcillas las cuales tienen la propiedad de expandirse con la humedad o se contraen en temporadas de sequía, por lo cual los hace un tipo de suelos altamente fértiles pero difíciles de trabajar durante el estiaje⁴.

Otro grupo de suelos presente en nuestra área son los Cambisoles, cuyo nombre hace alusión a los cambios manifestados en los horizontes en cuanto a color, estructura, contenido de arcillas y carbonatos, entre otros. Este grupo de suelos aparece sobre todas las morfologías, climas y tipos de vegetación.

En escasos metros del área de estudio se encontró el grupo de los Arenosoles, los cuales comprenden suelos arenosos, incluyendo arenas residuales después de la

⁴ Nivel más bajo de una corriente de agua durante época de sequía.

meteorización del sedimento o rocas ricas en cuarzo y horizontes arenosos recién depositados como movimientos de dunas o tierras de playa. Los Arenosoles se caracterizan por ser un horizonte no consolidado con la propiedad física de tener una textura granulométrica gruesa, por lo cual presentan una alta permeabilidad y baja capacidad de almacenar agua y nutrientes.

El grupo de los Fluvisoles son suelos azonales⁵ genéticamente jóvenes desarrollados en depósitos recientes, aluviales, lacustres y marinos. En nuestra área de estudio son difícilmente reconocibles debido a su escasa presencia.

Solo en un pequeño horizonte de suelo a las afueras del área urbana al SW, se encuentra el grupo de los Luvisoles, este grupo se caracteriza por su alto contenido de arcilla en el subsuelo como resultado de procesos pedogenéticos⁶ como migración de arcillas.

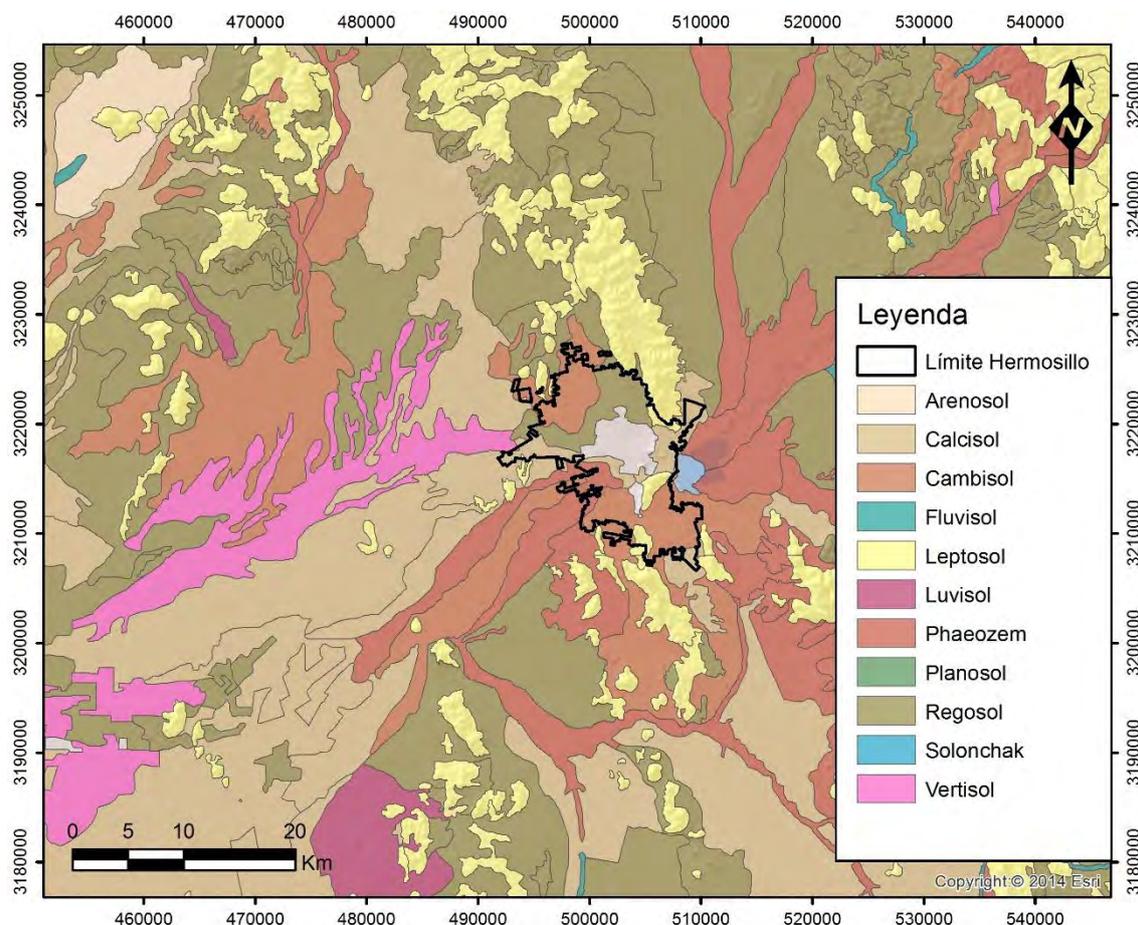


Figura 4. Mapa de suelos edafológicos. Editado de INEGI, 2008.

⁵ Suelos inmaduros que se encuentran en la primera etapa de su desarrollo.

⁶ Procesos que añaden, eliminan o transforman componentes del suelo.

3.5. Geología local

Según el Servicio Geológico Mexicano (SGM, 1999), en el área de estudio se encuentran presentes aflorando rocas paleozoicas, mesozoicas, cenozoicas, sedimentos cuaternarios y rocas intrusivas de composición granítica (ver Figura 5). A continuación, se describirá la litología presente.

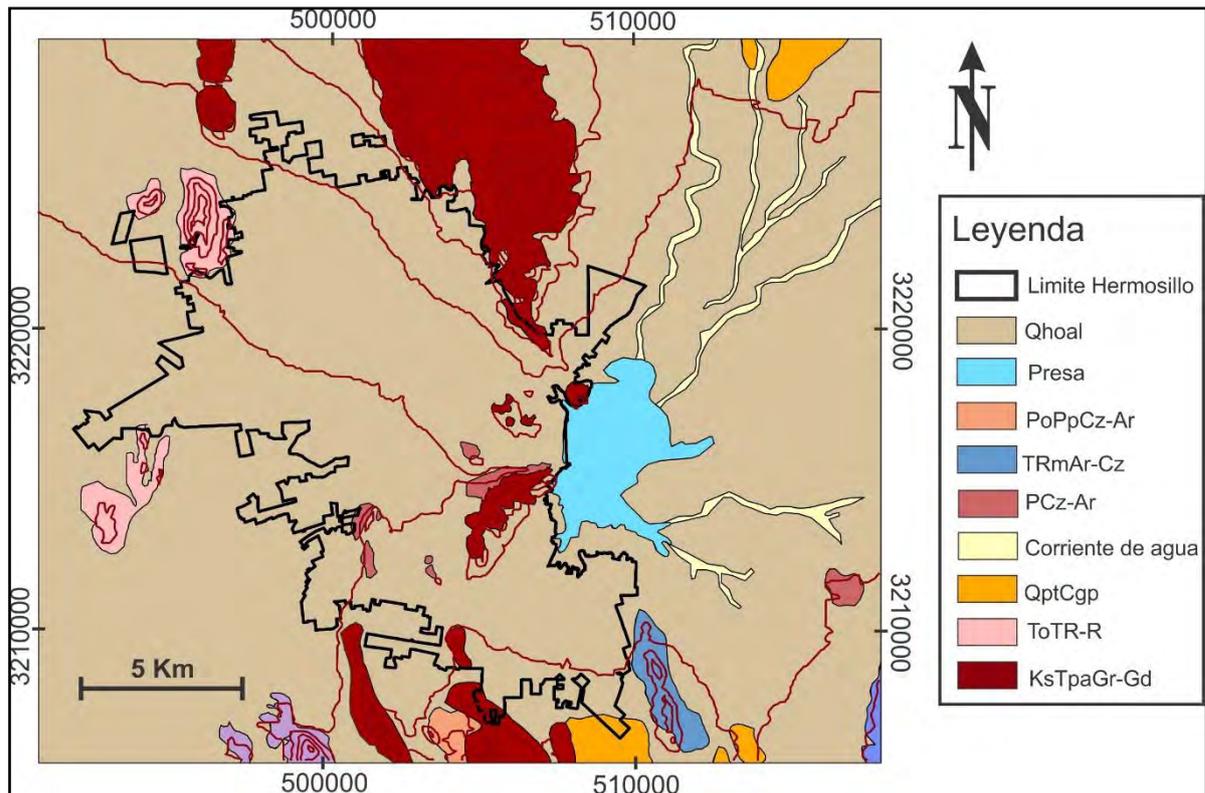


Figura 5. Mapa geológico de Hermosillo, abreviaciones: Qhoal=Aluvión (Cuaternario), PoPpCz-Ar=Caliza-Arenisca (Ordovícico-Pérmico), TrmAr-Cz=Arenisca-Caliza (Jurásico), PCz-Ar=Caliza-Arenisca (Proterozoico), QptCgp= Conglomerado polimigtico (Cuaternario), ToTR-R= Toba riolitica-Riolita (Terciario), KsTpaGr-Gd= Granito-Granodiorita (Roca intrusiva). (Fuente: editado de SGM, 1999).

Paleozoico

Las rocas paleozoicas se encuentran aflorando en el Cerro de la Campana, Tecoripa, Lomas El Rayo y los alrededores del Vado del Rio con nomenclatura PoPpCz-Ar (ver Figura 5), estas rocas corresponden al Carbonífero - Pérmico de ambiente de plataforma somera (Peiffer-Rangin, 1978), y consisten en calizas y brechas calcáreas metamorfoseadas (producto del intrusivo que los afecta), las cuales corresponden petrográficamente a rocas corneanas con apariciones de cristales de

vesubianita, el mineral característico más abundante en estas rocas es la wollastonita. El color general de estos afloramientos es de colores blancos a verdosos, y en ocasiones gris oscuro con una superficie de intemperismo áspera y muy irregular. La estratificación es de mediana a gruesa y en ocasiones se observa masivo debido al metamorfismo de contacto. (Rodríguez-Castañeda, 1981). Inclusive aledañas a rocas Paleozoicas, el SGM (1999) reporta rocas Proterozoicas con nomenclatura PCz-Ar.

Mesozoico

Al SE de Hermosillo en la Sierra La Flojera, Cerro Prieto y Cerro Las Hilachas, (ver Figura 5) se encuentran aflorando rocas mesozoicas del triásico medio al triásico superior. Estos afloramientos consisten en calizas, areniscas, limolitas, microconglomerados y algunas alternancias de calizas y cuarcitas representadas por TRmAr-Cz (ver Figura 5).

Cenozoico

El terciario lo tenemos representado al SW de Hermosillo (ver Figura 5) por brechas sedimentarias de color café rosado, mal consolidadas, donde la mayor aportación de fragmentos son de roca volcánica e intrusiva, los cuales están contenidos en matriz tobacea que le da dicha coloración mencionada. El tamaño de fragmentos es muy variable, con algunos muy angulares y otros redondeados. Estos sedimentos se encuentran cubiertos por derrames de tobas riolíticas.

El volcanismo terciario (medio-superior) lo tenemos representado por derrames piroclásticos riolíticos, tobas, brechas volcánicas y dacitas, representado como ToTR-R.

Los depósitos cuaternarios en nuestra área de estudio los tenemos representado con 4 unidades litológicas: 1) conglomerado mal clasificado en una matriz arenosa con cementante calcáreo, los cuales pertenecen a antiguos depósitos de río, representado por QptCgp. 2) Arenas, gravas y limos provenientes del producto de la erosión de las sierras de alrededor y materiales acarreados por ríos. 3) Aluvión constituido principalmente de arenas y arcilla correspondientes a planicies de inundación. 4) Talud, esta unidad está

formada por clastos procedentes de rocas intrusivas del área. (Rodríguez-Castañeda, 1981).

Intrusivos graníticos

Aflorando en gran parte de nuestra área de estudio tenemos un intrusivo de composición granítica-granodiorita de edad cretácica con nomenclatura KsTpaGr-Gd. Aflora en los cerros El Coloso, La Cementera, Piedra Bola, El Mariachi y Sierra El Bachoco (ver Figura 5). Su morfología es suave, formando lomeríos de suelos arenosos de composición cuarzo-feldespáticos y arcillas residuales. Asociados a estos afloramientos encontramos diques de diversas composiciones (como riolíticos, andesita-diorita y pegmatita-aplita de edad terciaria). Esta unidad se encuentra intrusionando a unidades paleozoicas (PoPpCz-Ar) y es cubierta por sedimentos cuaternarios (QptCgp), según el SGM (1999).

4. Antecedentes

Existen diversos estudios epidemiológicos donde se evalúa el riesgo a la salud humana por exposición a metales pesados, los cuales se centran en el contenido total de metales y de sus fuentes de emisión o procedencia, sin embargo, existe escasa información del punto de vista químico y mineralógico de estos metales y en particular casi no hay trabajos publicados que establezcan la asociación de los metales con sus minerales, ya sean de fuente geogénica o antropogénica (Gunawardana *et al.*, 2014; Faiz *et al.*, 2009; Ferreira-Baptista & De Miguel, 2005; Al-Khashman, 2004).

Un gran número de investigaciones referentes al polvo urbano en las últimas décadas han indagado sobre varios aspectos de este problema asociando las concentraciones de material particulado en el ambiente y los potenciales efectos a la salud humana por exposición a estos materiales a través de inhalación, ingestión y/o contacto dérmico. Probablemente, la pregunta más difícil acerca del potencial adverso del polvo urbano a los efectos a la salud es la evaluación cuantitativa de las tasas de exposición (Ferreira-Baptista & De Miguel, 2005; Satsangi & Yadav, 2014).

En Hermosillo se realizó una caracterización de partículas atmosféricas acerca de la contaminación por metales, colectadas por muestreos a partículas con filtros PM⁷₁₀ (diámetro aerodinámico de 10 µm) y PM_{2.5} (diámetro aerodinámico de 2.5 µm), estas partículas presentaron principal abundancia de elementos naturales con algunas presencias de elementos directamente relacionados con actividades humanas las cuales son de mucho interés para la salud humana y otras perspectivas ambientales (Ramírez-Leal *et al.*, 2007). También se colectaron muestras de polvo sedimentado en techos de escuelas y polvo suspendido en el aire a alturas de 1 a 2 m (Meza-Figueroa *et al.*, 2007; Del Río-Salas *et al.*, 2012; Moreno Rodríguez *et al.*, 2015).

Meza-Figueroa *et al.*, (2007), colectaron muestras de polvo sedimentado en techos de escuelas, esto con el fin de obtener un panorama en la distribución de metales como Cd, Cr, Co, Cu, Ni, Pb, V y Zn en Hermosillo y así evaluar la calidad del polvo con respecto a su contenido en metales. Concluyendo que la contaminación por metales presenta una distribución espacial diferente en dos áreas de la ciudad, la parte sur presenta mayor

⁷ Abreviación utilizada para "material particulado".

concentración de metales pesados que la parte norte/central. Los autores resaltan la idea de que un análisis mineralógico debería ser efectuado para comprobar esto.

De la Parra-Velasco, (2008), en su trabajo de tesis profesional realizó una evaluación de la erosión eólica urbana en la ciudad de Hermosillo, para ello se utilizaron seis colectores de tipo BSNE, ubicados en áreas de mayor interés. Los resultados indicaron que existe una mayor erosión hídrica que eólica. También se realizó un análisis mineralógico por difracción de rayos x, donde los minerales predominantes son: cuarzo, labradorita, albita, calcita y ortoclasa. Incluso se analizaron metales pesados donde los que excedieron el límite permisible establecido por la Norma Oficial Mexicana fueron As y Cr.

Del Río-Salas *et al.*, (2012), realizaron un estudio para determinar la distribución espacial de la concentración de plomo en la ciudad de Hermosillo. Para ello muestrearon polvo suspendido y polvo sedimentado en techos de 24 escuelas las cuales se analizaron por relación de isotopos, para ello se utilizaron end-members⁸ de las composiciones isotópicas de plomo en rocas, suelos y polvos urbanos. Concluyendo que las zonas noroeste, centro y sur de la ciudad mostraron mayor afinidad a un origen antropogénico, mientras el resto del área urbana muestra una gran influencia de componente geogénico. Los resultados muestran una asociación isotópica del polvo sedimentado en techos y gasolina con plomo que dejó de ser usada desde 1997. Esto demuestra un ciclo de re-suspensión - sedimentación por procesos de erosión, tráfico y topografía del área urbana.

Cruz-Campas *et al.*, (2013) evaluaron la calidad del aire en la ciudad de Hermosillo, para ello se estudiaron las partículas suspendidas totales (PST) y metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr) durante un periodo de muestreo de junio de 2001 a mayo del 2002. Utilizaron el método de alto volumen y posteriormente por espectroscopia de absorción atómica, resultando que la calidad del aire en la ciudad de Hermosillo con respecto a PST se encontró no satisfactoria y mala durante ese periodo. Y en cuanto a la relación con metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr), las concentraciones detectadas se encontraron por debajo de los máximos permisibles, las cuales no representan peligro o riesgo a la

⁸ Refiriéndose a minerales que está en un extremo final de una serie de minerales en términos de pureza.

salud. Sin embargo, las altas concentraciones de material particulado provocan una mala calidad de aire.

Moreno-Rodríguez *et al.*, (2015), analizaron tendencias históricas de partículas suspendidas totales (PST) en la ciudad de Hermosillo haciendo principal énfasis a la temporada de monzón como generador de polvo. Para ello se utilizaron parámetros meteorológicos colectados en un periodo de 12 años (2000-2012) y muestreos de PST y PM₁₀ en cuatro sitios de monitoreo. Los resultados de la tendencia histórica de PST muestran que existe una conexión entre el periodo de lluvia dentro del entorno urbano y las emisiones de polvo del post monzón. El comportamiento del monzón aumenta la emisión de polvo del área urbana. Adicionándole la falta de un sistema de drenaje pluvial, la escorrentía superficial urbana, el depósito de sedimentos y un mal uso de suelos promueve la re-suspensión de polvo. Otros autores afirman que la precipitación (monzón) indica las variaciones en una escala espacio-temporal de la interacción entre lo natural y los contaminantes antropogénicos (Migliavacca *et al.*, 2009).

El muestreo de PST y PM₁₀ muestra que el material particulado analizado está dominado por fases de plagioclasa, cuarzo, calcita, y montmorillonita con sulfato de bario, y partículas enriquecidas en Cu, Fe, La, y Ce. Mediante un análisis de elementos traza se identificaron dos fases de incorporación de metales al polvo, procedentes de una fuerte contribución de cementos, erosión de edificaciones y otras actividades de construcción, y el tráfico vehicular.

García-Rico *et al.*, (2016), se realizaron el primer estudio en México en donde se estima el riesgo a la salud por exposición a múltiples metales como As, Cr, Mn, y Pb de tres diferentes fuentes de polvo (patios de escuela, techos y calles) en Hermosillo. Donde el mayor nivel de concentración se encuentra en el polvo de calle, excepto por Mn, el cual tiene mayor concentración en patios de escuelas. El factor de enriquecimiento de estos metales sugiere que son de origen antropogénico, a excepción de Mn. Este trabajo representa una herramienta útil para futuros estudios en biomarcadores⁹.

Con fin de entender los procesos de suspensión de polvo a lo largo de zonas climáticas semiáridas, Meza-Figueroa *et al.*, (2016), monitorearon el material particulado suspendido total (MPST) en dos diferentes niveles (peatonal y techo) durante un año en

⁹ Indicadores que se miden objetivamente indicando si un proceso biológico es normal o patológico.

la ciudad de Hermosillo, localizada en el corazón del desierto de Sonora. Donde los resultados reportan valores mínimos durante la temporada de monzón e invierno. Mientras que los valores máximos se muestran en picos asociados al incremento de temperatura, así como la disminución de humedad. Concluyendo que las altas concentraciones de MPST se encuentran a nivel peatonal durante el pre-monzón y post-monzón, las cuales concuerdan con la entrada y re-suspensión de polvo de calles posiblemente atribuido a horas de alto tráfico vehicular.

5. Metodología

A escala global, las mayores emisiones del polvo se producen en regiones áridas o semi-áridas, estas fuentes emisoras de carácter natural o geogénico a nivel mundial representan el 75% de las emisiones, mientras que las fuentes antropogénicas representan el 25%, estas variaciones en las emisiones de polvo pueden impactar el clima, la calidad de aire y la salud humana (Ginoux *et al.*, 2012).

La ciudad de Hermosillo incluida en el desierto de Sonora, se ubica en el cinturón de las principales regiones desérticas emisoras de polvo (ver Figura 6) a nivel mundial propuesta por Prospero (2002), donde la región del desierto de Sonora integra el Golfo de California al oeste, donde la fuente emisora de polvo es natural, y el lado este, la fuente de polvo es antrópica (Ginoux *et al.*, 2012).

Este cinturón de polvo incluye las regiones desérticas más grandes del planeta, colocando una gran cantidad de material particulado, contaminantes y alérgenos potenciales en suspensión, transportados por el viento y otros medios por miles de kilómetros desde su fuente emisora (Goudie, 2013).



Figura 6. Modelo ilustrativo del cinturón de polvo global. Editado de Ginoux *et al.*, 2012.

La región de Hermosillo se caracteriza por tener temperaturas mayores a los 40 °C durante el verano, junto con la falta de humedad y escasa cubierta vegetal provocan los factores propicios para una alta erosión del suelo. Esta serie de factores característicos representan una de las zonas más áridas del mundo, para ello, la aridez se calculó siguiendo la metodología descrita en Almorox (2003):

$$P_f = P/T_m$$

Dónde:

P_f : Índice de aridez de Lang.

P: Precipitación total anual (mm).

T_m : Temperatura media anual (°C).

Tabla 1. Índice clasificatorio de aridez de Lang descrita en Almorox (2003), donde P_f : Índice de aridez de Lang.

P_f	Zona
0-20	Desiertos
20-40	Árida
40-60	Húmedas de estepa y sabanas
60-100	Húmedas de bosques claros
100-160	Húmedas de grandes bosques
>160	Prehúmedas con prados y tundras

El índice de aridez considera las precipitaciones caídas a lo largo del año y la temperatura como dato indicador de evaporación, donde los datos arrojaron valores de extrema aridez a desérticos según el índice clasificatorio (ver Tabla 1).

En este tipo de zonas áridas donde el rápido crecimiento de la ciudad enfrenta una dinámica ambiental particular principalmente por procesos de transportación del polvo vinculado al clima y fuentes de tráfico (Moreno-Rodríguez *et al.*, 2015; Meza-Figueroa *et al.*, 2016), siendo singularmente complejo durante periodos de clima seco. Esto debido a la acumulación de sedimentos después del periodo de lluvias, lo cual representa un área donde predomina una re-suspensión de material particulado en el ambiente por tráfico vehicular. En interpretaciones previas la humedad es el factor principal de control del contenido de material particulado suspendido en el ambiente

(Csavina *et al.*, 2014; Meza-Figueroa *et al.*, 2016). En donde una alta humedad relativa permite un incremento en la velocidad de fricción estática, esto conduce a cambios en los flujos de emisión de polvo y consecuentemente en las concentraciones de material particulado atmosférico (Csavina *et al.*, 2014).

El suelo y sedimentos están conformados por una mezcla de varias partículas de diferentes tamaños, las cuales representan una información valiosa al momento de interpretar su origen y propiedades físicas tal como son la textura, factores y procesos formadores (edafogénesis), clasificación de suelos, erosión y contaminación.

El suelo está conformado por granos, los cuales presentan variaciones respecto a su tamaño, estos van desde grandes bloques hasta partículas diminutas que no se pueden ver a simple vista. Según su granulometría, los suelos pueden clasificarse en bloque, grava, arena, limo y arcilla. Uno de los factores más significativos del suelo que controlan la capacidad de transporte y sedimentación de partículas es el tamaño de grano. Esto es debido a que el transporte de estos materiales puede darse de diferentes formas como el arrastre, saltación y suspensión, donde generalmente las partículas grandes ($>500 \mu\text{m}$) son arrastradas, las que se encuentran en el rango de $500\text{-}20\mu\text{m}$ para saltación, mientras que las partículas en suspensión son aquellas más finas ($<20 \mu\text{m}$). El tiempo el cual las partículas permanecen en la atmósfera es diferente según el diámetro de partícula, composición química y propiedades termodinámicas (Field *et al.*, 2009).

El suelo representa una mezcla compleja de varios compuestos, y debido a la complejidad de su composición su estudio resulta ser muy relevante (Prandel *et al.*, 2014). Realizar una caracterización física del suelo tiene como objetivo principal establecer la respuesta del suelo a las prácticas asociadas a los diferentes sistemas de producción, así como para evaluar la susceptibilidad a sufrir algún proceso de degradación.

Para realizar una clasificación del suelo es indispensable hacer un análisis granulométrico, la metodología utilizada para realizar este análisis consiste en tamizar mecánicamente la muestra de suelo haciéndola pasar por una serie de tamices ordenados de mayor a menor abertura de malla separando partículas en diferentes fracciones granulométricas. Después de realizar el tamizado, se determina el porcentaje de muestra que es retenido y el que pasa por cada malla. Obteniendo dichos datos, se grafican en

una escala semi-logarítmica donde se definen los porcentajes para cada diámetro de partícula (ver Figura 26). Debido a que se consideran de fácil re-suspensión y pueden ser inhaladas al respirar, la fracción granulométrica menor a 100 μm (tamiz de mallas 120, 230, 325, 635 y <635), se vincula a un alto riesgo a la salud humana (Ferreira-Baptista & De Miguel, 2005; Satsangi & Yadav, 2014), haciendo principal énfasis a este tamaño de partícula.

Existe una correlación entre el incremento de concentraciones de metales traza y un decrecimiento del tamaño de partícula. Teniendo en cuenta que los metales pesados pueden depositarse en sobre cualquier sustrato¹⁰, las altas concentraciones están comúnmente asociadas a materiales de granos finos (Horowitz, 1985). Desde el punto de vista humano, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US-EPA) considera que, a menor tamaño de partícula, el impacto a la salud humana es mayor, ya que el material particulado puede ser más fácilmente inhalado y mientras menor sea el tamaño de partícula aumentara su grado de penetración a los pulmones (EPA, 2016).

La morfología y la composición química del polvo urbano coadyuva a entender su fuente de procedencia, de acuerdo a su morfología pueden ser divididas en dos categorías: partículas de origen natural (polvo de suelo o minerales) y de origen antropogénico. Las morfologías de origen natural son sólidos de formas irregulares, y en su mayoría dependen del hábito mineral, su composición, tiempo de vida y transportación. Mientras que las partículas de origen antropogénico son producto de procesos de combustión, presentando morfologías variables o amorfas, generalmente con formas semiesféricas como resultado de procesos secundarios o reacciones entre partículas preexistentes en fase líquida o gaseosa (Satsangi & Yadav, 2014; Bell *et al.*, 2004).

Existe una relación entre los contenidos de materiales amorfos, al incrementar el tamaño del diámetro de la partícula, el contenido en material amorfo se reduce, y proporcionalmente el contenido en cuarzo aumenta (Gunawardana *et al.*, 2014).

La identificación de materiales o mezclas tan complejas como lo son los polvos urbanos representa un verdadero reto para su caracterización, debido a su alto contenido de materia orgánica, hidrocarburos y compuestos sintéticos procedentes de continuas

¹⁰ Capa base sobre la cual se aplica otra capa superpuesta.

actividades antropogénicas. La detección de sus componentes mineralógicos considerados como menor y/o traza en granulometrías menores a 100 μm , representan principal interés debido a implicaciones a la salud humana por su grado de toxicidad, fácil inherencia y exposición, sin embargo, el grado de impacto a la salud por estos tipos de contaminantes emergentes es aún desconocido.

Una de las técnicas más importantes utilizadas para la caracterización mineralógica en polvos poli-cristalinos es la difracción de rayos x (DRX), la cual permite la identificación de fases cristalinas en materiales o compuestos como el polvo urbano. Complementando la información de DRX, la técnica de fluorescencia de rayos x (FRX) proporcionan una gran información de la composición química y mineralógica de mezclas complejas (Prandel *et al.*, 2014).

5.1. Selección de lugares estratégicos de muestreo

El muestreo principal decidió realizarse en patios o canchas principales de escuelas primarias, tomando en cuenta que el polvo urbano es considerado de alto riesgo para la salud humana en partículas menores a 100 μm debido a su fácil suspensión pudiendo ser respirado con mayor facilidad (Ferreira-Baptista & De Miguel, 2005; Satsangi & Yadav, 2014), afectando desproporcionalmente a los niños pequeños (0-5 años) debido a sus largos periodos de exposición en los patios de juegos al aire libre (Morrison *et al.*, 2013) y su conducta de introducir objetos a la boca y lamerse los dedos y/o manos, además de que presentan una alta absorción de metales pesados en el sistema digestivo y presentan mayor sensibilidad a metales pesados en la hemoglobina que los adultos (Meza-Figueroa *et al.*, 2007; Reis *et al.*, 2014). Asociando el polvo a enfermedades respiratorias y cardiovasculares crónicas, reducción de función pulmonar, cáncer y mortalidad prematura (Pope, 2004; Bell *et al.*, 2004).

Este muestreo en escuelas primarias consistió en dos etapas, una antes de lluvias y otra después de lluvias, esto con el fin de comparar efectos en el material particulado de antes y después del monzón, considerando que las muestras colectadas durante el post-monzón concentran un mayor aporte de material transportado por escorrentía (Reyes et al. 1994; Moreno-Rodríguez et al., 2015; García-Rico *et al.*, 2016; Meza-Figueroa *et al.*, 2016). Estas dos etapas de muestreo fueron realizadas en los meses de Junio (pre-

monzón) y Octubre (post-monzón) durante el año 2015, donde se colectaron 70 muestras en escuelas, de las cuales 35 fueron antes de lluvia y 35 después de lluvias (las mismas 35 escuelas).

También se realizó el muestreo de suelos según su clasificación edafológica (phaeozem, cambisol, calcisol, regosol y vertisol) donde fueron colectadas 5 muestras (equivalente a 1 muestra por suelo), lejano al área urbanizada, los cuales aparentemente no han sido en gran parte impactados por factores antropogénicos, esto con el fin de obtener un fondo geoquímico aproximado mediante FRX para las muestras de polvo urbano.

Además, se incluyeron muestras de polvo urbano de calles, con lo cual obtendríamos la contraparte del muestreo en matriz de suelo, siendo estos los mayormente impactados por continuas actividades humanas. Donde la principal diferencia entre el polvo de calle y de escuela reside en que el polvo de calle procede principalmente de la cubierta asfáltica y del parque vehicular, así como una mezcla con compuestos de combustión y un porcentaje menor de minerales derivados de los suelos circundantes. Y en el caso del polvo en escuelas, la mayoría tienen patios escolares con suelos descubiertos, el cual es reflejado en el polvo sedimentado en canchas escolares.

Con ello se colectaron muestras de tres matrices de polvo distintas, lo que son: polvo sedimentado en canchas, calles y suelo periurbano¹¹.

5.1.1. Muestreo de escuelas

La selección de los lugares a muestrear consistió en determinar las sub-cuencas hidrográficas urbanas generando un modelo de elevación digital junto con vectores de flujo y drenaje de la ciudad de Hermosillo tomando en cuenta las intervenciones antropogénicas como edificaciones, campos de cultivo, las rutas de escorrentía natural, entre otras. Sectorizando la ciudad de Hermosillo en 9 sub-cuencas en total.

El motivo de sectorizar el área de estudio en cuencas hidrográficas urbanas es debido al factor de escurrimiento de agua superficial, el cual sirve como arrastre de sedimentos

¹¹ Que se sitúa en la periferia del núcleo urbano.

hacia los bajos topográficos donde estos lugares sirven como reservorios de polvo idóneos para ser re-suspendidos mediante las constantes actividades antrópicas.

Después de sectorizar la ciudad de Hermosillo, según datos de la Secretaría de Educación y Cultura (SEC) en el 2015 se tienen ubicadas 308 escuelas primarias las cuales a partir de la determinación de las cuencas hidrográficas urbanas fueron seleccionadas escuelas que se aproximaran a la parte alta, baja y en algunos casos en los laterales de la cuenca. Obteniendo un total de 35 lugares de muestreo ampliamente distribuidos en las 9 sub-cuencas de la ciudad de Hermosillo, Sonora (ver Figura 7).

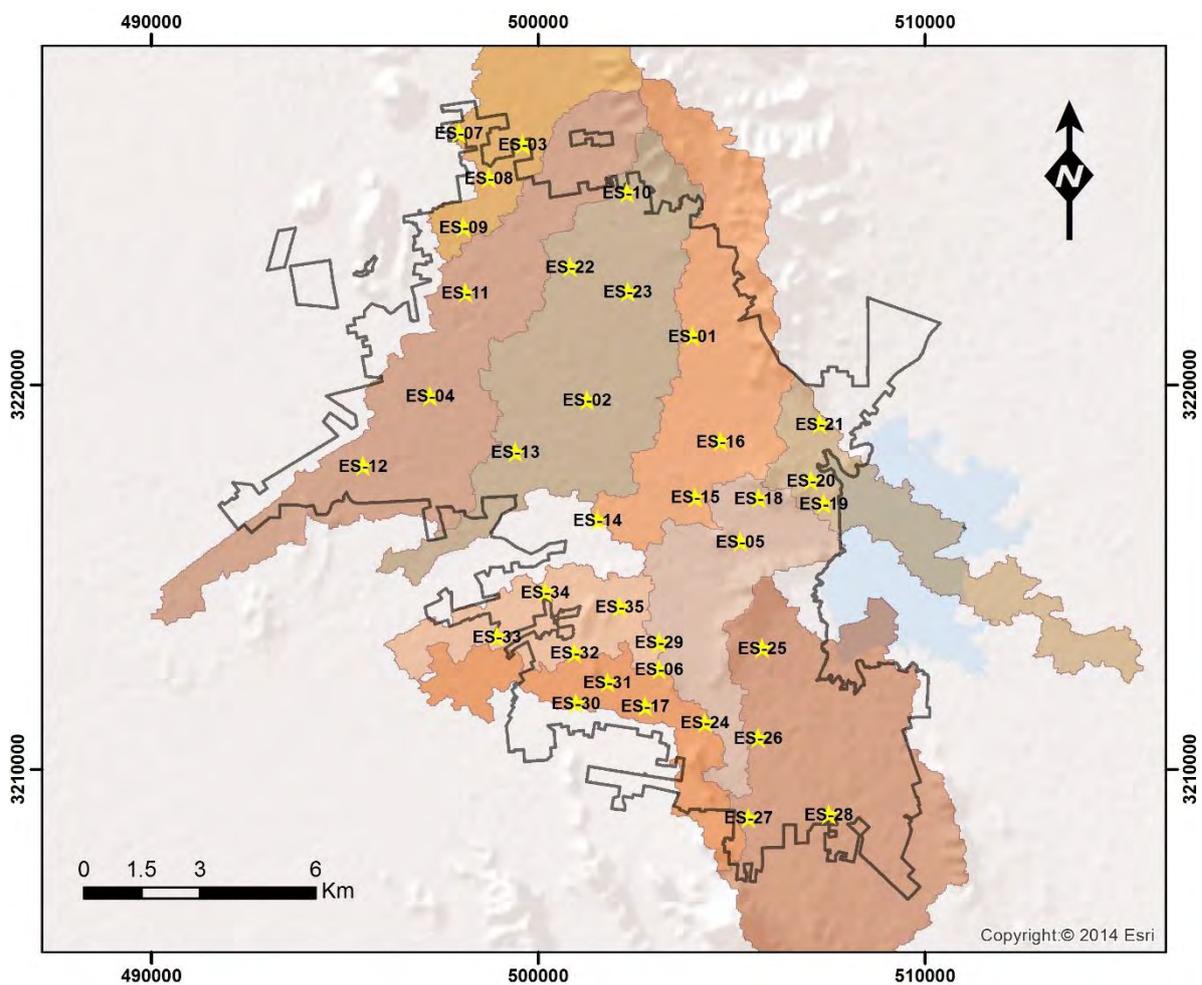


Figura 7. Ubicación de lugares de colecta de muestras con clave ES respecto a cuencas hidrográficas urbanas.

La colecta de muestra en patios y canchas principales de escuelas consistió en barrer el total de la superficie hasta lograr acumular una cantidad adecuada (mayor a 500 gramos aproximadamente) para realizar los análisis correspondientes. Para la colecta de muestra

se utilizaron escobetillas y recogedores de polietileno (ver Figura 8), este material fue colocado en contenedores esterilizados de polietileno de alta densidad cerrados herméticamente y etiquetadas conforme a su cadena de custodia (ver Anexo 1), siguiendo la metodología sugerida por EPA (1993).



Figura 8. Colecta de muestra en patio de escuela.

5.1.2. Muestreo de suelo

El muestreo de suelo consistió en identificar la edafología de la ciudad de Hermosillo, para ello se hizo uso de la clasificación de la Base de Referencia Mundial para los Recursos del Suelos (FAO, 2015) y mapas edafológicos proporcionados por INEGI, 2004.

La metodología de selección de lugares a muestrear fue en principio ubicar los suelos edafológicos que engloba o abarca el área urbanizada de la ciudad, conteniendo 6 de los 30 grupos de suelos según la clasificación de la Base de Referencia Mundial para los Recursos del Suelos. Los principales grupos ubicados fueron: Calcisol, Regosol, Leptosol, Cambisol, Phaeozem y Vertisol. De menor importancia fueron encontrados Arenosol, Fluvisol y Luvisol, los cuales no fueron contemplados en el muestreo debido a su limitada aparición.

Dentro de los 6 principales grupos encontrados, el grupo de los Leptosoles fue descartado debido a que este se caracteriza por ser un suelo extremadamente pedregoso con menos del 20% en materiales granulométricamente finos y posicionados sobre roca

continua, resultando inadecuado e impreciso respecto al tipo de análisis que se pretende realizar. De este modo resultan 5 los grupos de suelo edafológico muestreados (ver Figura 9), las ubicaciones de estas muestras se eligieron a consideración tomando en cuenta que estos lugares sean lo menos contaminados posibles por agentes antropogénicos.

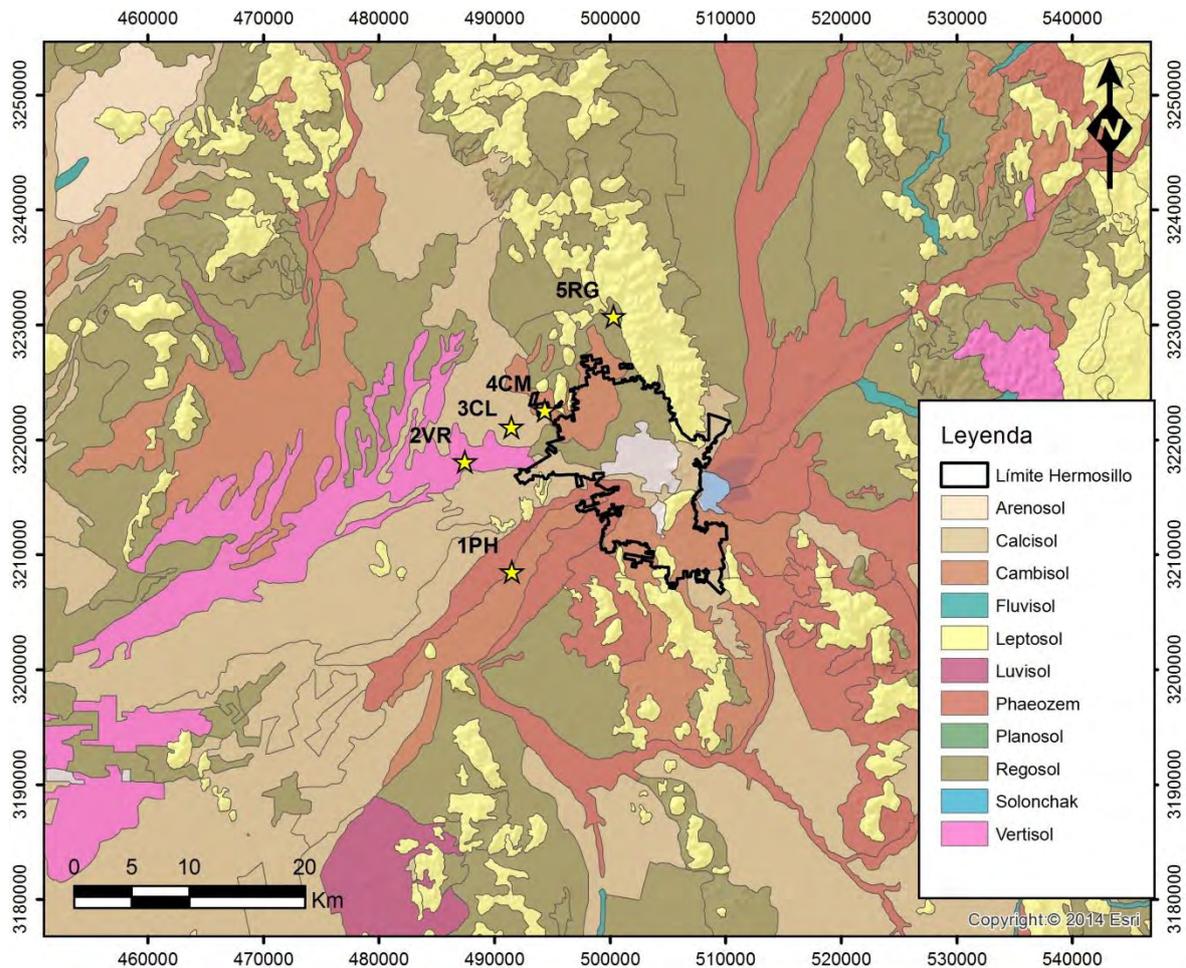


Figura 9. Ubicación de lugares de colecta de muestras con clave 1PH, 2VR, 3CL, 4CM y 5RG respecto a la edafología.

En cuanto a las muestras de suelo colectadas en diferentes horizontes edafológicos, la toma de muestra consistió en la técnica de muestreo superficial de tresbolillo para la formación de muestras compuestas descrita por la NMX-AA-132-SCFI, 2006.

Esta técnica consiste en trazar diagonales de manera que los sitios de muestreo representen puntas de figuras geométricas (ver Figura 10) y la profundidad de donde se colecte la muestra no deberá ser mayor a 30 centímetros del perfil de suelo.

El muestreo fue superficial ya que representa la parte del suelo que puede ser suspendida y contribuir a la composición de los polvos urbanos. Para la colecta se utilizó una pala metálica, colectando una pequeña porción de muestra en cada punta de la figura geométrica colectando al menos 500 gramos entre todas las puntas. La muestra obtenida fue resguardada en contenedores esterilizados de polietileno de alta densidad cerrados herméticamente y etiquetadas conforme a su cadena de custodia.

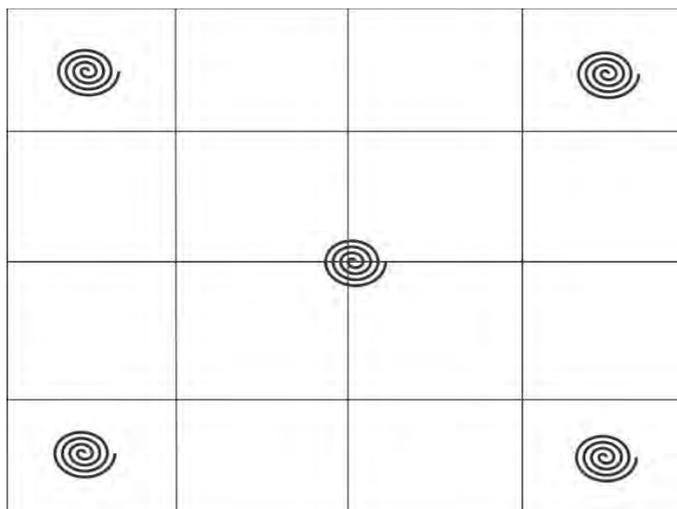


Figura 10. Modelo ilustrativo de la técnica de muestreo superficial de tresbolillo.

5.1.3. Muestreo de calle

En este muestreo de polvo urbano en calles fueron colectadas 107 calles dentro de la zona urbana. Los puntos de recolección fueron seleccionados en relación con la densidad de calles pavimentadas y de mayor afluencia de tráfico vehicular (principalmente transporte urbano).

Cabe mencionar que estas muestras pertenecen a una base de muestras anteriormente colectadas por trabajos previos (en la tesis profesional de Castillo-Morales en el 2013) englobado dentro de este proyecto de investigación. Sin embargo, debido a la gran cantidad de muestras resultaba imposible analizarlas todas, por lo cual fueron seleccionadas solo 5 muestras para su análisis (ver Figura 11), las cuales fueron consideradas de suma importancia relacionadas a trabajos previos de bioaccesibilidad¹²

¹² Potencial de una sustancia para ser absorbida por un organismo.

de metales en fase gástrica e intestinal, extracción secuencial química, así como lugares de mayor concentración de metales pesados (Castillo-Morales, 2013).

Esto con el objetivo de tomar como ejemplo para evaluar la diversidad mineralógica y de compuestos en el polvo de calle en comparación con los suelos y el polvo colectado en las escuelas.

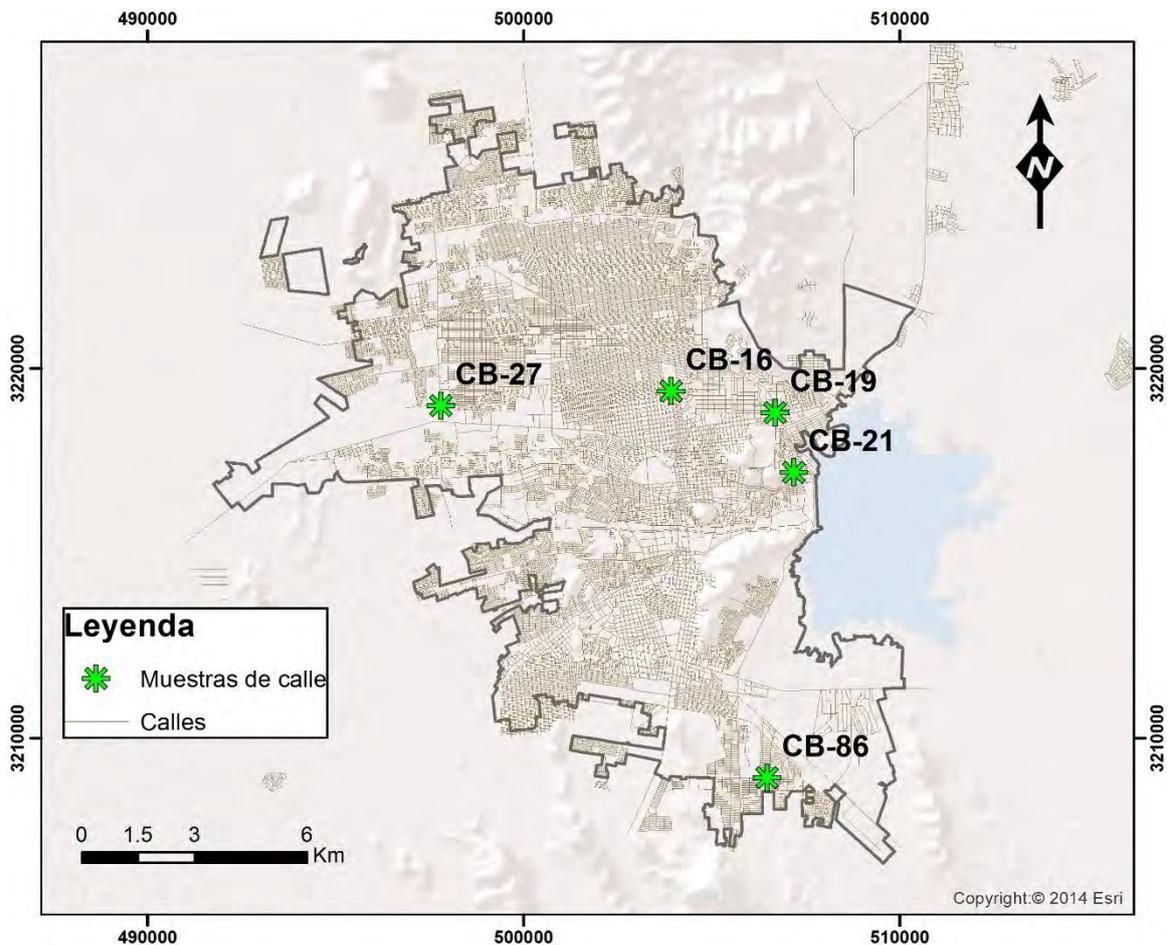


Figura 11. Ubicación de muestras de polvo urbano en calles con clave CB. Editado de ICRESON, 2013.

La toma de muestra consistió en barrer la superficie de calle en un área de 2 metros x 2 metros, para ello se utilizaron escobetillas y recogedores de polietileno hasta lograr acumular una cantidad de 500 gramos aproximadamente. El material colectado fue depositado en contenedores esterilizados de polietileno de alta densidad cerrados herméticamente y etiquetadas conforme a su cadena de custodia, siguiendo la metodología descrita en US-EPA (1993).

5.2. Preparación de muestras

La preparación de muestras colectadas consistió en verter el material colectado separado en charolas etiquetadas según su cadena de custodia, y se ingresaron a un horno de secado al aire modelo *VWR 1600 HAFO Series* (ver Figura 12) a temperatura menor a 40° por un periodo de 24 horas continuas hasta lograr evaporar el total de la humedad en ellas, siguiendo la metodología sugerida en (Reis *et al.*, 2014).



Figura 12. Horno de secado al aire modelo VWR 1600 HAFO Series.

Posteriormente la muestra colectada pasa a ser tamizada utilizando un *Ro-Tap Tyler Model RX-86* (ver Figura 13) el cual es un agitador que reproduce movimientos circulares y de golpeteo repetitivo que simula un tamizado de forma manual de la torre de tamices.



Figura 13. Ro-Tap Tyler Modelo RX-86 y torre de tamices utilizados.

Los tamices utilizados fueron integrados a una torre compuesta por 7 tamices de acero inoxidable con diferente mallado para separar las fracciones granulométricas de la muestra, con diferentes mallas, ordenados de mayor a mayor, una tapa y un fondo (ver Figura 14).



Figura 14. Torre de 7 tamices de acero inoxidable con diferente tamaño de malla, recipiente de fondo y tapa superior.

Obteniendo tamaños de grano desde 1 mm a $<20\mu\text{m}$ (ver Tabla 2), adquiriendo como resultado las siguientes granulometrías:

Tabla 2. Tamaño de granulometría según el mallado del tamiz.

Tamiz N°	tamaño de partícula que pasa (µm)
18	1000
35	500
60	250
120/140	125/106
230	63
325	45
635	20
<635	<20

5.2.1. Metodología de limpieza de tamices

La limpieza de los tamices se consideró como una de las principales prioridades en el manejo de muestras, ya que contener la muestra corre el riesgo de ser contaminada por agentes externos, por lo cual, al finalizar de tamizar cada muestra la torre de tamices pasa por un proceso de limpieza, el cual consistió en primera instancia en ingresar el tamiz en baño ultrasónico, en donde el sonicador (ver Figura 15) cuenta con un recipiente lleno de agua en donde el tamiz es sumergido por un periodo de 1 a 15 minutos, el tiempo el cual los tamices se mantienen sumergidos difiere según el mallado del tamiz. La función del sonicador o baño ultrasónico en la limpieza de tamices está en producir ondas ultrasónicas generadas por vibraciones de alta intensidad las cuales ayudan a desprender partículas adheridas en las mallas.



Figura 15. Baño ultrasónico utilizado en la limpieza de tamices.

Posteriormente, cada tamiz fue enjuagado con agua y rociado con alcohol etílico desnaturalizado para remover grasas y aceites que pudieran quedar en ellos, así como utilizarlo como agente antiséptico eliminando bacterias. Finalizando este proceso, los tamices son dejados secando al sol hasta quedar completamente secos para su próxima reutilización.

5.2.2. Control de muestras

Para el control de muestras fue elaborada una cadena de custodia (ver Anexo 1) tomando como base la norma NMX-AA-132-SCFI, 2006 utilizado en muestro de suelo para la identificación y cuantificación de metales y manejo de la muestra. En la cual se lleva un registro a detalle desde el inicio de la toma de muestra hasta su lugar de almacenaje y actividades en que sea involucrada la muestra.

También se lleva registro sobre las características del sitio donde se tomó la muestra, materiales que puedan influir en los análisis a realizar, características de la muestra y un control de pesos por fracción granulométrica.

Debido al gran volumen de información, ya que por cada muestreo realizado se originó una bitácora diferente, solo se anexa una como ejemplo (ver Anexo 1), el resto de cadenas de custodia no se anexan en esta tesis.

6. Análisis químico y mineralógico

Actualmente la técnica de difracción de rayos x (DRX) es una de las principales herramientas utilizadas en muestras poli-cristalinas para realizar una caracterización mineralógica y semi-cuantificación de agregados, como soporte a estos análisis, los resultados fueron complementados por la técnica de fluorescencia de rayos x (FRX) proporcionando una gran información sobre la composición química de la muestra, al mismo tiempo sirviendo como base para la interpretación mineralógica de agregados cristalinos al polvo y apoyo al momento de convalidar resultados de interpretación en DRX.

La caracterización química de las muestras se realizó midiendo la composición química elemental sin realizarle algún tratamiento químico, para ello se utilizó un equipo portátil de fluorescencia de rayos x (FRXP) con tubos miniaturizados modelo *Thermo Scientific Niton* modelo *FXL* (ver Figura 17) del Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía (LANGEM). En cuanto a la caracterización mineralógica de las muestras por difracción de rayos X (DRX) se realizó utilizando varios equipos, entre ellos el difractómetro marca *PANalytical* modelo *Empyrean* (ver Figura 19) con tubo de Rayos X (Cu K_α) del Laboratorio de Difracción de Rayos X en el Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). También se utilizó el difractómetro marca *Bruker* modelo *D8 Advance* (ver Figura 20) con tubo de rayos x (Cu K_α) del Laboratorio de Geoquímica y Cristalografía del departamento de Geología en la Universidad de Sonora.

Por último, con fin de realizar una intercalibración¹³ entre equipos, se utilizó un analizador marca *Olympus* modelo *Terra-476 portátil* (ver Figura 21) con tubo de rayos x (Co K_α) del Laboratorio de Geoquímica en el Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Este analizador integra las técnicas de DRX y FRX en un mismo equipo.

En este capítulo se pretende hacer una breve descripción de las dos técnicas comúnmente empleadas para realizar estudios químicos por FRX y mineralógicos por DRX. Así como una generalizada distinción comparativa de los diferentes instrumentos analíticos utilizados.

¹³ Ejercicio para determinar cuál de los métodos analíticos se considera más exacto y preciso.

6.1. Fluorescencia de rayos x con micro tubos

La fluorescencia de rayos x (FRX) es una técnica analítica instrumental no destructiva que mide la composición elemental de una sustancia generalmente sólida al ser expuesta a una radiación de rayos x.

El fenómeno de los rayos x se puede describir en dos etapas: excitación y emisión. Los rayos x poseen una energía tal que al incidir sobre la muestra pueden ionizarla expulsando electrones de capas más internas (excitación). Estos iones son altamente inestables y esas vacantes son ocupadas por electrones de capas superiores en cascada (ver Figura 16). Estos saltos de electrones de un nivel de mayor energía a uno de menor desprenden una radiación característica (emisión) que es la fluorescencia de rayos x. El conjunto de saltos de electrones entre capas de un elemento forma el espectro característico del elemento y es único (Gutiérrez-Ginés *et al.*, 2010).

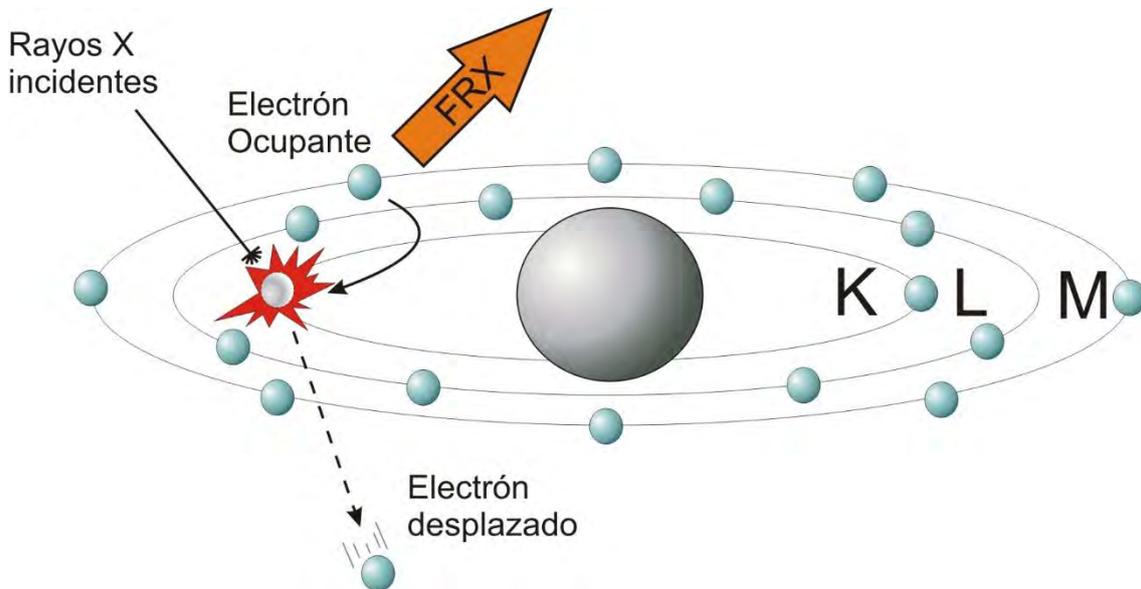


Figura 16. Principios de la técnica de fluorescencia de rayos x. Editado de Horiba Scintific, 2017.

El análisis cualitativo se obtiene a partir de la energía característica, o su longitud de onda emitida por la radiación de fluorescencia de rayos x. Mientras que el análisis cuantitativo se obtiene por conteo de los rayos x para una longitud de onda determinada.

6.1.1. Ventajas y limitaciones de la técnica

Este fenómeno es considerado como una de las mejores técnicas analíticas para realizar análisis químico elemental en cualquier tipo de muestra las ventajas de utilizar esta técnica incluye el hecho de que:

- ✓ Es un análisis no destructivo ni contaminante.
- ✓ La preparación de muestra es relativamente sencilla o nula.
- ✓ No es necesaria una gran cantidad de material para el análisis.
- ✓ Ofrece análisis elementales fiables de manera rápida.
- ✓ Técnica aplicable a cualquier elemento químico con número atómico mayor que el Flúor.
- ✓ No requiere operadores con una formación técnica especial.
- ✓ Para equipos portátiles como el *Niton FXL* y *Terra-476*, son equipados con baterías y memoria interna, no requiriendo un computador.
- ✓ Permite análisis en muestras en polvo, solidas o liquidas.

Las limitaciones para esta técnica incluyen:

- ✓ No detecta elementos muy ligeros.
- ✓ El análisis de líquidos requiere el uso de He.
- ✓ Tiene un límite de detección de 10 a 20 (mg.kg^{-1}).

6.1.2. Control de calidad

Los procesos de control de calidad para estos análisis se realizaron de acuerdo a lo establecido en la norma de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos US-EPA Método 6200 (EPA, 2007), donde se realizaron lecturas de blancos, material de referencia para corroborar la exactitud y duplicados de análisis para aumentar la precisión de las lecturas para ello se utilizó un equipo portátil de fluorescencia de rayos x (FRXP) con tubos miniaturizados modelo *Thermo Scientific Niton* modelo *FXL* (ver Figura 17) del Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía (LANGEM).



Figura 17. Equipo portátil de fluorescencia de rayos x (FRXP) con tubos miniaturizados marca *Thermo Scientific Niton* modelo *FXL*.

Previamente se procesó la muestra para dar las condiciones ideales de análisis, el proceso según el Método 6200 de la US-EPA consiste en homogeneizar la muestra, secar en horno por un lapso de 2 a 4 horas a temperatura menor de 150°C y pasar por un tamiz de malla 60 (250 μm), en caso de tamizar y que la granulometría sea mayor, habrá que molturar hasta que pase por el tamiz de 250 μm .

En primera instancia se realiza un "System-check"¹⁴ para determinar si el equipo de FRXP se encuentra operando en condiciones óptimas de energía, estabilidad y resolución.

El siguiente paso es obtener la dispersión del conjunto de valores obtenidos de mediciones repetidas de una magnitud (precisión) y cuán cerca del valor real se encuentra el valor medido (exactitud).

Para verificar la precisión y exactitud de los análisis se evaluó la concentración elemental de los estándares certificados de referencia SRM-NIST 2710a Montana Soil, SRM-NIST 2709^a y SRM-NIST 2711 analizándolos por lo menos una vez por día de análisis. Haciendo uso del protocolo del Método 6200 de la US-EPA verificando la desviación estándar relativa %RSD (precisión) y la diferencia porcentual %D

¹⁴ Función del equipo *Thermo Scientific Niton FXL* a realizar una revisión operativa del sistema.

(exactitud), el método 6200 recomienda realizar 7 réplicas de un análisis de estándar certificado de referencia (en nuestro caso el 2710a Montana Soil) para evaluar la exactitud de los análisis. Cabe mencionar que, al aumentar las repeticiones o réplicas de los análisis mejorara la sensibilidad y precisión de estos.

La ecuación para calcular el %RSD es la siguiente:

$$\%RSD = (SD/CMM) * 100$$

Dónde:

%RSD= Desviación Estándar Relativa

SD= Desviación Estándar Medida

CMM= Concentración Media Medida

Los datos obtenidos de %RSD se consideran adecuadamente precisos al no ser mayores al $\pm 20\%$ a excepción del Cromo $\pm 30\%$ siendo válido para muestras con valores superiores a 52 mg.kg^{-1} , esto ha sido corroborado en base al estándar certificado de referencia SRM-NIST 2709a, 2710a y 2711. Al igual que para la diferencia porcentual (%D), cada elemento analizado en el estándar certificado (2710a Montana Soil) debe estar en un rango no mayor de $\pm 20\%$ para corroborar que la exactitud del protocolo analítico se considere confiable.

La ecuación para calibrar %D es la siguiente:

$$\%D = ((C_s - C_k) / C_k) * 100$$

Dónde:

%D= Diferencia de porcentaje

C_k = Concentración certificada del estándar de la muestra

C_s = Concentración medida del estándar de la muestra

El equipo *Thermo Scientific Niton FXL*, cuenta con dos modalidades de análisis diferentes, el modo "Test All"¹⁵ y "Soils"¹⁶, con el fin de corroborar que modo de

¹⁵ Modo de análisis para todo tipo de matriz.

análisis resulta más confiable en respecto a precisión (%RSD) y exactitud (%D), se realizó el análisis del estándar 2710a Montana Soil en siete réplicas de 60 segundos cada una utilizando estas dos modalidades de análisis (ver Tabla 3).

Tabla 3. Recuperación elemental en equipo *Thermo Scientific Niton FXL* para el NIST-SRM 2710a montana soil, comparando dos modalidades de análisis.

NIST-SRM 2710a		Test All			Soils		
Elemento	VR	Promedio	%RSD	%D	Promedio	%RSD	%D
Zr	200	222.67	1.03	10.18	232.7	0.64	14.05
Sr	255	253.92	0.4	-0.43	251.6	0.88	-1.35
U	9.11	8.2	19.96	-11.04	7.38	3.87	-23.37
Rb	117	111.57	1.5	-4.87	112.21	1.04	-4.27
Th	18.1	58.99	7.59	69.32	68.18	8.97	73.45
Pb	5520	5791.69	0.28	4.69	5778.61	0.55	4.48
As	1540	1659.63	1.62	7.21	1684.47	1.06	8.58
Hg	9.88	18.51	11.6	46.63	17.25	13.13	42.73
Zn	4180	4236.65	0.54	1.34	4305.62	0.59	2.92
W	190	154.22	6.54	-23.2	163.89	7.4	-15.93
Cu	3420	3617.85	0.39	5.47	3662.35	0.54	6.62
Fe	43200	46141.76	0.45	6.38	46433.08	0.58	6.96
Mn	2140	2046.01	1.36	-4.59	2124.29	1.33	-0.74
Cr	23	37.65	9.07	38.91	38.19	10.72	39.77
V	82	96.39	5.64	14.93	99.25	11.33	17.38
Ti	3110	2941.31	1.37	-5.74	3053.72	1.48	-1.84
Sc	9.9	33.47	16.22	70.42	33.45	20.85	70.4
Ca	9640	8443.41	0.77	-14.17	8245.6	0.73	-16.91
K	21700	20294.63	0.52	-6.92	20574.2	0.65	-5.47

Dónde: VR=Valor real del material de referencia certificado, dado en mg.kg^{-1} . Promedio= Recuperación promedio de la medición del material de referencia certificado, dado en mg.kg^{-1} .

Con esto se afianza que la modalidad de análisis “Test all” resulta ser mejor en cuanto a precisión (%RSD), y en cuanto a exactitud (%D) ambos modos son similares, excepto que se tiene más confiabilidad en U en “Test all” y W en “Soils”. La exactitud (%D) resulta ser mala en ambos métodos para los elementos Th, Hg, Cr y Sc. La precisión (%RSD) y exactitud (%D) del equipo fue evaluada por el método 6200 US-EPA analizando en modo “Test all” los materiales de estándar de referencia SRM-NIST 2709a, 2710a y 2711 (ver Tabla 4).

¹⁶ Modo de análisis para matrices de suelo.

Tabla 4. Recuperación de estándares certificados NIST-SRM en equipo portátil de fluorescencia de rayos x *Thermo Scientific Niton* modelo *FXL* del Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía (LANGEM). Utilizando el método 6200 de la US-EPA, el cual considera aceptable un %D entre ± 20 , excepto para el Cr con un %D entre ± 30 . El límite de cuantificación del método 6200 para Cr es de 52 mg.kg^{-1} .

Elemento	2709a				2710a				2711			
	VR	Promedio	%RSD	%D	VR	Promedio	%RSD	%D	VR	Promedio	%RSD	%D
Zr	195	162.05	0.83	-17	200	228.55	1.03	14.28	NR	-	-	-
Sr	239	226.71	0.72	-5	255	251.34	0.4	-1.43	242	225.33	0.52	-6.89
U	3.2	3.94	71.14	25	9	9.65	19.96	5.93	3.01	1	0	67
Rb	99	85.99	1.01	-13	117	111.43	1.5	-4.76	120	112.3	1.09	-6.42
Pb	17.3	14.94	7.52	-14	5520	5775.46	0.28	4.63	1400	1430	0.51	2.16
As	10.5	9.2	14.78	-12	1540	1679.15	1.62	9.04	107	121.95	6.12	13.97
Zn	103	92.8	3.57	-10	4180	4279.42	0.54	2.38	414	372.94	1.65	9.92
W	NR	-	-	-	190	199	6.54	4.73	NR	-	-	-
Cu	33.9	37.13	6.53	10	3420	3659.09	0.39	6.99	140	130.16	4.3	-7.03
Fe	33600	28987	0.31	-14	43200	46064	0.45	6.63	28200	23997	0.26	14.9
Mn	529	488.97	4.68	-8	2140	2088	1.36	-2.43	675	429.91	4.39	36.31
Cr	130	101.4	4.79	-22	23	39.44	9.07	71.48	52.3	48.1	5.35	-8.04
V	110	115.8	5.13	5	82	98.04	5.64	19.57	80.7	82.1	6.33	1.73
Ti	3360	3678.63	0.47	9	3110	3080	1.37	0.97	3170	2709.94	0.44	14.51
Ca	19100	20791	0.42	9	9640	8376	0.77	13.12	24200	22391.49	0.28	-7.47
K	21100	19693	0.7	-7	21700	20812	0.52	-4.09	25300	22033.83	0.33	12.91

Abreviaturas: NR=No reportado en material de referencia certificado. VR=Valor real del material de referencia certificado, dado en mg.kg^{-1} . Promedio= Recuperación promedio de la medición del material de referencia certificado, dado en mg.kg^{-1} .

El método 6200 US-EPA considera aceptables valores entre $\pm 20\%$ tanto para precisión y exactitud (RSD% y %D), excepto para el Cr el cual aumenta a $\pm 30\%$. Mediante la lectura de recuperación en 3 estándares certificados NIST, para los valores del cromo en el NIST 2710a (ver Anexo 4 y Anexo 5) la exactitud aparenta inapropiada debido a que el límite de cuantificación del método 6200 para Cr es de 52 mg.kg^{-1} , resultando debidamente adecuada para los NIST 2709a y 2711 donde la cantidad de Cr aparece en mayor proporción.

Respecto al NIST 2709a y 2711, la exactitud (%D) y precisión (RSD%) resulta ser mala para el elemento U (ver Anexo 2, Anexo 3, Anexo 6 y Anexo 7). Por tanto, este elemento no será tomado en cuenta como válido para este estudio.

Esta técnica analítica se utilizó como una guía en la interpretación de la DRX y en la correlación de los minerales encontrados con los datos de geoquímica total por muestra.

6.2. Difracción de Rayos X

La difracción de rayos x (DRX) es una técnica instrumental rápida, confiable y no destructiva, la cual es usada para la identificación de minerales y materiales cristalinos que se desconocen, esta técnica es particularmente útil para la identificación de minerales de grano fino y mezclas de minerales que pueden no prestarse para otras técnicas analíticas.

Este tipo de análisis puede proporcionar más información adicional que una identificación básica. Por ejemplo, si la muestra se trata de una mezcla, este análisis nos permite determinar la proporción de los diferentes minerales presentes (cuantitativo), el grado de cristalinidad del mineral o minerales presentes, posibles desviaciones de la composición ideal de los minerales (cualitativo), el estado de la estructura de los minerales (utilizado para deducir la temperatura y/o presión de formación) y el grado de hidratación para minerales que contengan agua en sus estructuras (Flhor, 1997).

Los fundamentos de esta técnica provienen de la estructura tridimensional de los materiales, la cual se define como la repetición regular de planos de átomos que forman un cristal. Cuando un haz enfocado de rayos x interactúa con estos planos, parte de estos son transmitidos, absorbidos por la muestra, otra parte es refractada y dispersada, y otra parte más se difracta. Los rayos x son difractados de manera diferente para cada mineral, dependiendo de qué átomos componen la red cristalina y como están ordenados estos átomos.

Los rayos x son generados dentro de un tubo sellado que se encuentra bajo vacío, aplicando una corriente de alto voltaje se calienta un filamento (por lo general de cobre y cobalto) dentro del tubo, este voltaje acelera los electrones que al incidir en el objetivo se producen los rayos x con una longitud de onda característica de ese objetivo. Un detector detecta la señal de los rayos x, procesándola y convirtiendo la señal en una frecuencia de conteo. El escaneo por rayos x resulta del cambio de ángulo entre el tubo emisor de rayos x, la muestra y el detector (ver Figura 18).

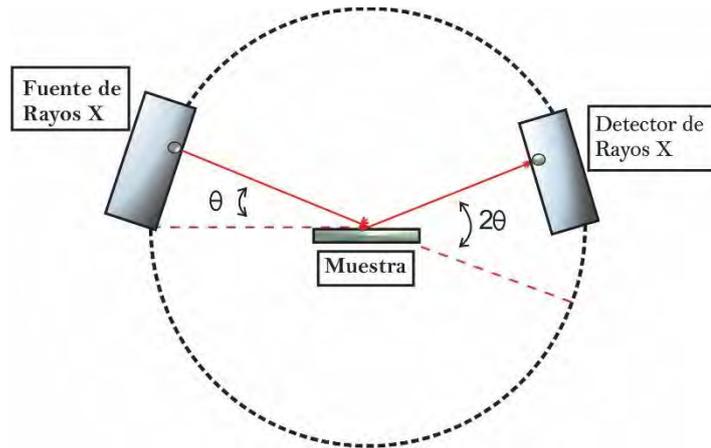


Figura 18. Esclarecimiento de la técnica de difracción de rayos x.

Cuando los rayos x inciden sobre la muestra y son difractados, los planos de átomos pueden ser medidos aplicando la Ley de Bragg, esta ley relaciona la longitud de onda de radiación electromagnética respecto al ángulo de difracción y a la distancia entre los planos de átomos en una muestra cristalina. La ley de bragg descrita en (Bragg & Bragg, 1913) es:

$$n\lambda=2d \text{ Sen}\Theta$$

Dónde:

n: numero entero

λ : longitud de onda de los rayos x

d: distancia entre los planos de átomos

Θ : ángulo entre los rayos incidentes y los planos de dispersión.

Cuando los rayos x incidentes en una muestra cristalina durante el escaneo son difractados producen una interferencia constructiva, la cual cada difracción generara un pico en el difractograma, estos picos son la conversión de distancias similares entre planos de átomos. El conjunto característico de distancias entre planos de átomos generado en un escaneo de rayos x proporciona un patrón de difracción único o “huella dactilar” del mineral o minerales presentes en la muestra. Cuando se interpreta mediante comparación con patrones de estándares de referencia y mediciones, esta “huella dactilar” permite la identificación del material (Flhor, 1997).

6.2.1. Ventajas y limitaciones de la técnica

Las ventajas de utilizar esta técnica incluyen el hecho de que:

- ✓ Es un análisis no destructivo ni contaminante.
- ✓ Proporciona una determinación rápida para materiales cristalinos (incluyendo compuestos inorgánicos, aleaciones de metales, farmacéuticos, entre otros.).
- ✓ La preparación de muestra es relativamente sencilla.
- ✓ Para el análisis no es necesario una gran cantidad de material (~15mg para equipos portátiles y ~1g en equipos fijos).
- ✓ El mantenimiento y operación se vuelve sencillo utilizando equipos de cómputo moderno.
- ✓ En los equipos como el *PANalytical Empyrean* se pueden configurar hasta 30 muestras continuas sin la necesidad de abrir la cámara.
- ✓ Para equipos portátiles como *Olympus Terra* los análisis son rápidos, obteniendo espectros completos desde el primer minuto.
- ✓ Interpretación de datos relativamente sencilla.

Las limitaciones para esta técnica incluyen:

- ✓ Capacidad solo de detectar materiales que posean cristalinidad.
- ✓ En mezcla de materiales, la detección se limita al 3% de la muestra.
- ✓ Los componentes del mismo grupo de minerales que posean una estructura cristalográfica aparentemente similar serán difíciles de determinar debido a su similitud de patrones o picos sobrepuestos.
- ✓ Debido a la ausencia de goniómetro mecanizado, en equipos portátiles como *Olympus Terra*, el intervalo angular 2θ máximo del espectro será limitado a 5-55°.
- ✓ Para la etapa de interpretación de difractogramas, es necesario el acceso a bases de datos PDF características a la longitud de onda del tubo de rayos x empleado en el análisis y en específico con los patrones de referencia concerniente al material que se pretende identificar (minerales, fármacos, cerámicos, inorgánicos, etc.).
- ✓ En mezclas complejas de materiales, la identificación de todas las fases se vuelve complicada y puede consumir bastante tiempo.

6.2.2. Equipos de DRX y ajustes operarios

En los análisis realizados por DRX fueron utilizados tres diferentes difractómetros, de los cuales uno de ellos es portátil y los otros dos son fijos. Los equipos utilizados fueron los siguientes:

Diffractómetro PANalytical modelo *Empyrean* (ver Figura 19), localizado en el Laboratorio de Difracción de Rayos X en el Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México. Realizando un total de 34 análisis, incluidas muestras de suelo (con claves: 1PH, 2VR, 3CL, 4CM y 5RG) y polvo de patios de escuelas (de clave ES y 2ES).



Figura 19. Cabina del difractómetro *PANalytical* modelo *EMPYREAN*.

Diffractómetro *Bruker* modelo *D8 Advance* (ver Figura 20), localizado en el Laboratorio de Geoquímica y Cristalografía del Departamento de Geología de la Universidad de Sonora. Realizando un total de 12 análisis, incluyendo muestras de polvos de calle (de clave CB) y complementos de apoyo.



Figura 20. Cabina del difractómetro *Bruker* modelo *D8 Advance*.

Analizador *Olympus* modelo *Terra-476* portátil (ver Figura 21), localizado en el Laboratorio de Geoquímica en el Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México. Realizando un total de 27 análisis, incluyendo muestras de polvo de patios de escuelas (de clave ES y 2ES) y polvos de calles (de clave CB).



Figura 21. Analizador *Olympus TERRA-476*.

Entre los tres equipos empleados se realizaron un total de 73 análisis de muestras, de las cuales algunas fueron analizadas en segunda ocasión utilizando un difractómetro diferente o condiciones de análisis diferente. Por tanto, resultó posible realizar un comparativo de manera generalizada entre los difractómetros utilizados.

6.2.2.1. Condiciones operativas

Las condiciones de lectura son las instrucciones operarias que le da el usuario al difractómetro, estas pueden ser modificadas en cuanto a tensión y potencia de energía aplicada al tubo generador de rayos x, velocidad de vibración y/o spin¹⁷ de la muestra con opción de activarlo y desactivarlo, el rango del difractograma en función al ángulo 2θ , tiempo por paso de escaneo, avance de ángulo 2θ por paso de la muestra.

Para la configuración en cuanto a tensión y potencia de energía para el tubo de rayos x, el espectro de rayos x es modificado según a mayor sea la tensión y potencia generadora

¹⁷ Giro o rotación bajo su mismo eje.

de rayos x, mayor será el índice de conteos obtenidos respecto al ángulo 2Θ . El tubo generador de radiación se necesita operar bajo una configuración mayor a una potencia de 20mA y 30kV de tensión (ver Tabla 5), la cual es comúnmente utilizada en materiales poli-cristalinos (Flhor, 1997). La desventaja de aumentar la potencia del tubo es que se reduce la vida del foco.

Tabla 5. Tensión y potencia de energía aplicada al tubo de rayos x utilizado en análisis realizados.

Equipo	Potencia	Tensión
Bruker	35mA	40kV
PANalytical	40mA	45kV
Olympus	10W	30kV

En cuanto al rango del difractograma en función al ángulo 2Θ , este solo modifica a que ángulo empieza y a que ángulo termina el espectro, esto puede ser útil para casos en que se conozca la muestra analizada, debido a que el operario conoce aproximadamente a que intervalo angular 2Θ es posible que aparezcan los picos característicos de dicho material. Sin embargo, si se diera el caso de que la muestra posea picos por fuera de este rango, estos no serán visibles a la hora de interpretar, por lo cual se recomienda utilizar un rango amplio, cuando menos de $4-55^\circ$ en 2Θ (ver Tabla 6).

Tabla 6. Rango de análisis respecto al ángulo 2Θ utilizado en análisis realizados.

Equipo	Rango del ángulo 2Θ
Bruker	4-55°
PANalytical	4-70°
Olympus	5-55°

La longitud de onda en el cual los rayos x son emitidos es característica del metal según el ánodo que posee el tubo de rayos x, generalmente los más usuales en equipos fijos son los tubos con ánodo de cobre, mientras que en los portátiles se utilizan de cobalto (ver Tabla 7). La longitud de onda crea un efecto acordeón para los espectros, mientras mayor sea la longitud de onda (Å) el espectro será más compacto.

Tabla 7. Longitud de onda característica según el tubo emisor de rayos x del equipo.

Equipo	Ánodo del tubo de rayos x	Longitud de onda
Bruker	Cobre	1.5406Å
PANalytical	Cobre	1.5406Å
Olympus	Cobalto	1.7902Å

El tiempo por paso de escaneo y el avance por paso es uno de los factores más importantes de la lectura, debido a que estos brindan la definición o detalle del difractograma, puesto que a cada paso es una lectura realizada, por tanto a mayor número de pasos, el espectro resultara con mayor definición de sus picos. En el caso del analizador *Olympus*, este se maneja mediante exposiciones las cuales desde un primer instante nos brinda un espectro a bajo detalle el cual va adquiriendo mayor precisión conforme aumentan las exposiciones (ver Tabla 8).

Tabla 8. Condiciones operarias de tiempo y avance de escaneo en equipos fijos *Bruker* y *PANalytical*, y exposiciones para equipo portátil *Olympus* utilizados durante los análisis.

Equipo	Avance 2 θ por Paso	Tiempo por paso	Total de pasos o exposición
Bruker	0.02°	2 Seg./Paso	2451 Pasos
PANalytical	0.003°	29 Seg. /Paso	20112 Pasos
Olympus	/	/	<50 Exposiciones

Mientras que el spin de muestra durante el análisis reduce el efecto de orientación preferencial de las caras de los cristales, para el caso de vibraciones este efecto queda completamente descartado (ver Tabla 9). Este efecto de rotación, balanceo y/o vibración permite maximizar el número de partículas irradiadas por el rayo incidente en la muestra (Smith, 2001) y, por ende, los conteos de fases cristalinas aumentarán.

Tabla 9. Configuración instrumental de movimiento de muestra durante análisis.

Equipo	Movimiento de muestra
Bruker	Spin
PANalytical	Spin
Olympus	Vibración

Se pudiera dar el caso en donde la preparación de muestra posicione a los cristales en un ángulo donde no se difracten, para ello se utiliza el spin, con esta configuración, los planos de Bragg cuya inclinación está dentro del ángulo de divergencia podrán encontrar alguna posición en la que ocurra la difracción. En cuanto a los equipos que funcionen mediante vibraciones o balanceos (Ver tabla 9), tal es el caso del equipo *Olympus Terra*, los análisis brindaran un mayor conteo de cristales dentro de la difracción que los equipos que utilicen spin.

6.2.2.2. Límites de detección

Para que un material cristalino sea detectado deberá mantener una distribución uniforme en la muestra, considerando por lo menos un 3% de abundancia en su contenido analizado (por debajo del 3% ningún material será detectado), este límite de detección presenta variabilidades según la propiedad de difracción característica del material (Lozano y Bernal, 2005).

Una gran cantidad de fases cristalinas en una mezcla reduce el número proporcional de la fracción de volumen difractado (Smith, 2001), para que la detección de un mineral sea estable, deberá poseer un pico de por lo menos 10 conteos por paso (CPS) por encima del background¹⁸ (Schlutz, 1964).

Uno de los problemas que se ha detectado al aplicar la técnica de DRX, es al identificar las fases existentes en una muestra poli-cristalina, las cuales presentan picos de difracción que se superponen y por consiguiente dificultan la determinación de la estructura cristalina de cada una de ellas (Ramón-García, 2007). Para este problema existe el método Rietveld, el cual determina con mayor precisión los parámetros estructurales de la muestra a partir de la construcción de un modelo teórico que se ajusta al patrón de difracción experimental, mediante el método de mínimos cuadrados. Este método nos permite obtener con mayor precisión parámetros de red, posiciones atómicas, tamaños de cristal, micro-deformaciones, cuantificar las fases cristalinas presentes y definir superposiciones de picos de difracción (Ramón-García, 2007). Sin embargo, para este trabajo no se utilizó este método.

¹⁸ Referente al valor de fondo.

6.2.2.3. Preparación de muestra

Para un análisis por DRX en polvos, el requerimiento mínimo que debe presentar la muestra es tener homogeneidad y poseer una granulometría por debajo de 440μ (equivalente al tamiz no. 325), en caso de no poseer esta granulometría deberá ser tamizada o molturada en su caso, de tal manera que la superficie analizada no sea rasposa o irregular, cabe mencionar que el volumen de partículas capaces de difracción es inversamente relacionado a su tamaño de partícula y al campo de irradiación de los rayos x.

Una estimación aproximada de la cantidad de partículas requeridas para cualquier análisis de DRX en polvos se puede obtener por la ecuación descrita en Smith (2001), en la cual:

$$\sigma = \frac{\sqrt{n}}{n}$$

Dónde:

σ = Densidad de carga superficial.

n = Número de partículas irradiadas por los rayos x.

Para que un error de estándar 2.3σ sea menor al 1%, el número de partículas irradiadas deberá ser mayor que 52900 partículas. Este número de partículas es utilizado como guía de condición mínima para la muestra, inclusive una muestra con partículas de $1\mu\text{m}$ puede fallar al cumplir las condiciones deseadas, especialmente considerando que esto aplica para todas las fases individuales en la muestra incluyendo las que se presentan en muy pequeñas cantidades (Smith, 2001).

El volumen de partículas irradiadas depende de la anchura del haz de rayos x y de la profundidad de penetración de estos. Si la profundidad de penetración excede el grosor de la muestra, el artefacto o el porta-muestra sobre el que se montó el material podrá ser introducido en el difractograma reduciendo la intensidad de picos presentes, por tanto, es recomendado preparar la muestra con la granulometría recomendada anteriormente y con grosor adecuado de muestra.

La principal problemática al realizar un análisis convencional en polvos por DRX es la orientación preferencial de las caras en las estructuras cristalinas de los minerales, para ello es indispensable realizar una correcta preparación de muestra. Sin embargo, esta problemática puede resultar beneficiosa en algunos casos, especialmente con las muestras que en su contenido cuentan con minerales arcillosos, en los cuales para realizar una fácil interpretación de patrones es necesario utilizar una alta orientación de la muestra.

Algunas técnicas comunes de preparación de muestras arcillosas pueden ser:

- Centrifugación (Kinter and Diamond, 1956),
- Filtros al pasar por una aspiradora (Drever, 1973),
- Evaporación en una superficie delgada segregando partículas.

Un factor influyente para realizar una adecuada preparación de muestra es al momento de elegir qué tipo de porta-muestra utilizar, esto depende de la cantidad de muestra disponible y si es necesario una reducción al problema de orientación preferencial.

6.2.2.4. Tipos de porta muestra

Existe una gran variedad de maneras y tipos de porta-muestra en donde la muestra es ingresada al equipo para su análisis, la más habitual es un porta-muestra de simple cavidad el cual fue utilizado en el equipo *Bruker D8 Advance* (ver Figura 22), donde la muestra es vertida sobre esa cavidad relleno y quedando a nivel de superficie exterior, es indispensable que la superficie donde inciden los rayos x quede completamente lisa, para ello se utiliza un vidrio de cristal templado con el cual se frota la superficie aplanando la muestra en la cavidad. Este tipo de porta-muestra resulta útil para muestras sencillas donde no sea necesaria una resolución muy detallada debido a que la superficie de incidencia es frotada pudiendo crear una orientación preferencial de las caras de los cristales.



Figura 22. Porta-muestra ordinario de simple cavidad utilizada en equipo *Bruker* modelo *D8 Advance*.

Otro tipo de porta-muestra comúnmente utilizado es el de doble fondo o doble superficie, empleado en el equipo *PANalitical Empyrean* (ver Figura 23), en el cual su preparación es similar al de simple cavidad, con la diferencia que la superficie donde inciden los rayos x no ha sufrido una orientación preferencial de las caras de los cristales, esto sucede debido a que la superficie que se frota para aplanar la muestra queda por lado contrario a donde inciden los rayos x.

La preparación para este tipo de porta-muestra consiste en tomar un anillo y el sujetador, relleno la cavidad con la muestra que se pretende analizar, después la muestra es aplanada utilizando un cilindro de aluminio hasta quedar a nivel, enseguida se le adapta una base al anillo con la cual queda cubierto un fondo. Posteriormente el sujetador se desprende del anillo completando la preparación para este tipo de porta-muestra.





Figura 23. Preparación de muestra utilizando porta-muestra de doble fondo en el equipo *PANalytical Empyrean*. 1. Sujetador y anillo relleno con la muestra. 2. Adaptación de base al anillo con cavidad rellena. 3. Desprendimiento del sujetador liberando la base y anillo con muestra.

Para el equipo portátil *Olympus Terra-476* el tipo de porta-muestra consiste en una celda vibrante (ver Figura 24) en donde la muestra es depositada en una cavidad y mediante el proceso de convección por agitación se obtienen múltiples orientaciones de su estructura cristalina, descartando completamente la problemática de la orientación preferencial de las caras de los cristales.



Figura 24. Celda vibrante utilizada en el equipo portátil *Olympus* modelo *Terra-476*.

6.2.3. Software de interpretación

El uso de software¹⁹ moderno de DRX se ha convertido en una poderosa herramienta de apoyo para esta técnica facilitando al operario con plataformas más amigables y novedosas opciones de visualización.

La fase de identificación de los análisis realizados en los equipos *PANalytical* y *Bruker* se llevaron a cabo usando el software de *Bruker Diffrac-plus.EVA* (Bruker AXS GmbH, Germany), mientras que los análisis realizados en el equipo portátil *Olympus* fue utilizado el software *XPowder PRO* (Versión 2010.01.35). Ambos softwares fueron apoyados por archivos de difracción de polvo (PDF-2), la cual es base de datos del centro internacional de datos de difracción (ICDD).

Usualmente el tratamiento dado a los difractogramas se considera mínimo, las herramientas del software que se aplicaron fueron *Strip-K α 2*²⁰ y correcciones al background, las cuales no modifican los espectros originales obtenidos, sin embargo, en algunos espectros de muestras de polvos de calle se les aplico un ligero *Smooth*²¹ debido a su baja definición y alto índice de ruido.

La comparación de patrones de difracción puede utilizarse efectivamente para identificación utilizando apropiadamente una base de datos de patrones de referencia dependiendo del material analizado. Las búsquedas automáticas de posibles patrones que concuerden con los picos en un difractograma suelen ser bastantes, sin embargo, el usuario deberá seleccionar manualmente un dictamen correcto en base a un examen comparativo visual o poseer un buen entendimiento sobre las características de la muestra.

El criterio de selección de patrones utilizado fue por comparación mediante emparejamiento, utilizando la base de datos PDF del ICDD, emparejando perfectamente los patrones de los minerales con el difractograma, donde las intensidades mayoritarias fueron casi en su totalidad emparejadas coincidiendo ampliamente, salvo en algunos casos donde la interpretación era bastante compleja y requeriría un análisis con un tratamiento especial a la muestra.

¹⁹ Programa informático computacional.

²⁰ Herramienta del software *Bruker Diffrac-plus.EVA* la cual reduce o elimina el doblete de radiación $K\alpha_1$ - $K\alpha_2$.

²¹ Herramienta del software *Bruker Diffrac-plus.EVA* la cual suaviza el espectro.

6.2.4. Fase cualitativa de análisis

La fase cualitativa de los análisis se basa en un conjunto característico de distancias entre planos de átomos generado en un escaneo por DRX y calculado mediante la Ley de Bragg, esta es representada en un difractograma por picos, en el cual cada patrón de difracción es único del material cristalino analizado.

Cada posición de los picos está definida por la celda unitaria de átomos, mientras que la intensidad del pico es resultado de la distribución de átomos presentes, por tanto, cada material cristalino posee su propia “huella dactilar”. Esto permite utilizar la técnica de DRX como identificación de fases minerales realizando comparaciones de los patrones experimentales con la base de datos de patrones conocidos o también llamados Powder Diffraction Files (PDF) del Centro Internacional de Datos de Difracción (ICDD). Los PDF contienen mediciones experimentales y patrones calculados digitalmente de miles de materiales, esta base de datos de referencia incluye patrones de metales, minerales, compuestos orgánicos e inorgánicos, entre otros. Lo cual permite a esta técnica orientar sus resultados hacia una identificación más precisa.

Otros factores como son la micro-absorción y la rugosidad de la superficie afectan la calidad de los datos medidos. La absorción afecta significativamente la profundidad de penetración de los rayos x y por tanto el volumen efectivo de la muestra. Una baja absorción de compuestos orgánicos incrementa el número de cristales disponibles, por tanto, una alta absorción presenta serios problemas reduciendo el número de cristales.

6.2.5. Fase de semi-cuantificación

La fase de semi-cuantificación es posible al incluir en su mayoría las posibles fases presentes en un difractograma, mientras menos picos queden sin reconocer la estimación será mejor. Por tanto, lo que no se encuentre identificado u omiso en el difractograma serán tomadas como una estimación de fracciones negativas.

Para determinar un cálculo semi-cuantificatorio exitoso, se deberá utilizar cambio en los patrones y funciones de ensanchamiento para determinar el mejor ajuste basado en el

factor R^{22} , por lo cual se considera necesaria una minuciosa examinación del difractograma. La cuantificación se basa en ajustes geométricos de emparejamiento entre los datos de patrones de difracción identificados y las mediciones en el difractograma. Gracias al uso de softwares modernos se pueden realizar mejores aproximaciones basándose en propiedades físicas como la densidad, conductividad y resistencia, los cuales pudieran ser ignorados durante la cuantificación.

²² En cristalografía es conocido como factor residual o de confiabilidad, basado en el modelo cristalográfico y datos experimentales.

7. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos para las 23 muestras analizadas fueron separados según su matriz (ver Figura 25), considerando los resultados obtenidos por la FRXP y la DRX. Estos presentan un marcado impacto por actividades antropogénicas las cuales ingresan contaminantes emergentes al polvo urbano de la ciudad, sin embargo, el índice de agregados emergentes presenta variaciones en las especies minerales y variedad en sus compuestos antrópicos, los cuales van en aumento respecto al siguiente orden: suelos < polvo de escuelas antes de lluvias < polvo de escuelas después de lluvias y con un mayor número de agregados de especies minerales encontramos el polvo de calles. Cabe destacar que aun el alto número de especies minerales antrópicas identificadas, la mineralogía mayor es principalmente de origen natural o geogénica, comprendiendo por encima del 50% en la mayoría de los análisis semi-cuantitativos realizados.

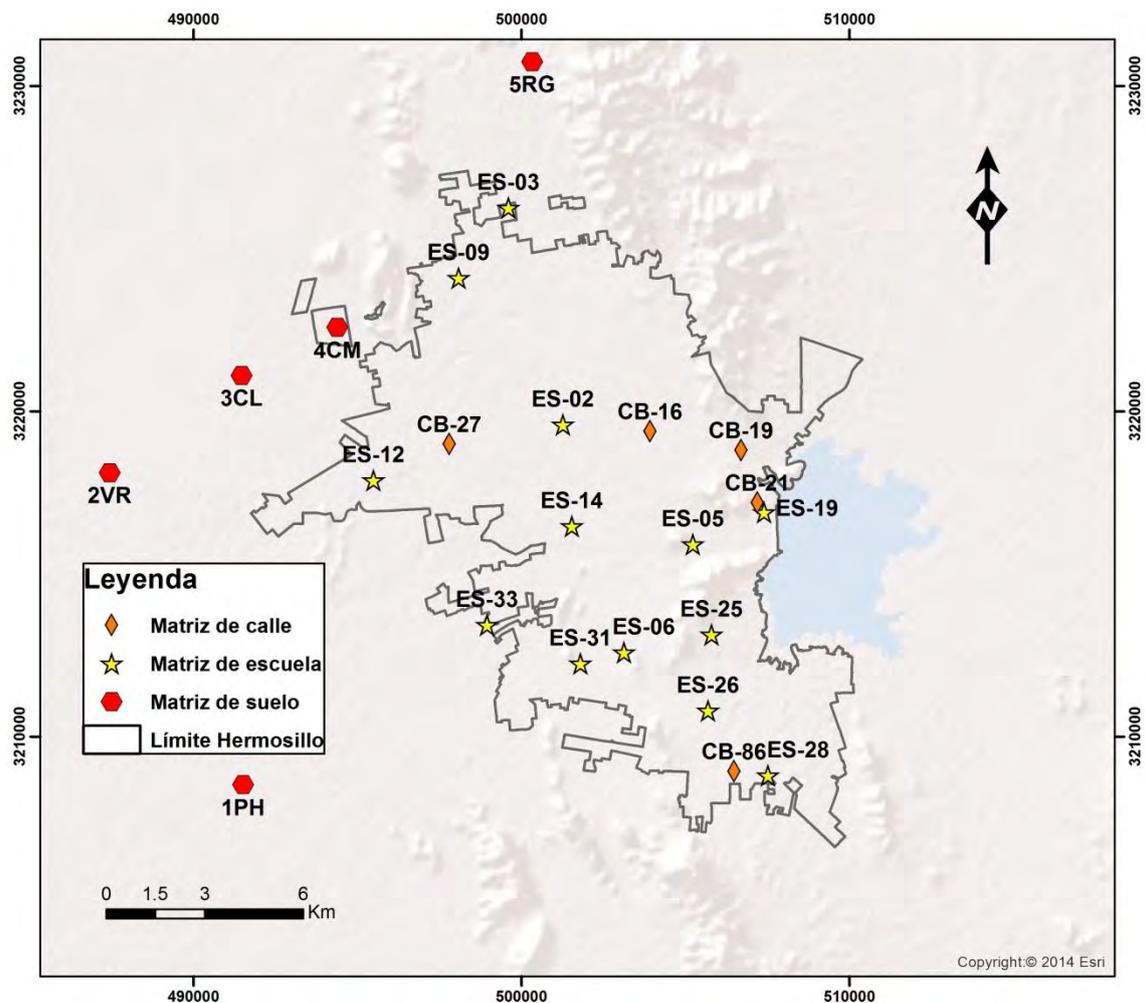


Figura 25. Mapa de muestras analizadas por DRX en las tres diferentes matrices.

A continuación, se describen a mayor detalle la información obtenida para las 23 muestras analizadas por DRX, entre las tres diferentes matrices:

7.1. Suelos periurbanos

Para la matriz de suelos, los resultados fueron separados en tres secciones, evaluando la granulometría, factores de enriquecimiento mediante normalización geoquímica por FRX y un análisis mineralógico por DRX descritos a continuación.

7.1.1. Granulometría

Los resultados granulométricos muestran porcentajes donde los diámetros de partícula interactúan con la cantidad de material (ver Figura 26), aportando una idea del grado de homogeneidad del suelo y sus contenidos de grava, arena, limo y arcilla. En general, la granulometría indica una tendencia de incremento similar, con algunas variaciones como para la muestra de clave 5RG (regosol) donde los porcentajes de gruesos resultan en menor proporción respecto a los demás suelos, mientras que la muestra de clave 1PH (phaeozem) la cantidad de granulometría fina resulta por encima del resto de suelos.

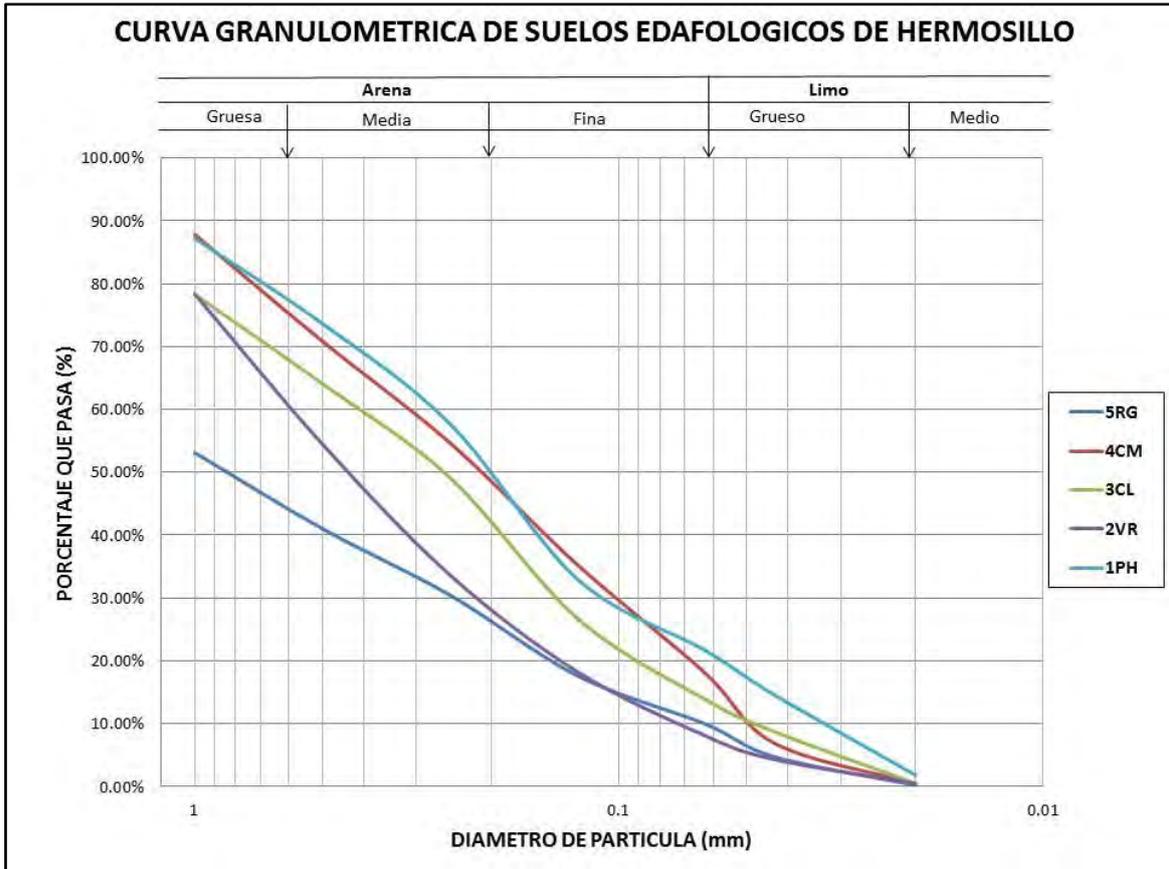


Figura 26. Curvas granulométricas de suelos edafológicos de Hermosillo. Dónde: 1PH=Phaeozem, 2VR=Vertisol, 3CL=Calcisol, 4CM=Cambisol y 5RG=Regosol.

Los resultados del análisis textural (Figura 26) muestran el contenido de las partículas finas contenidas en cada tipo de suelo local, y que pueden llegar a suspenderse en el aire (considerándose aquellas menores a $100\mu\text{m}$ según Ferreira-Baptista & De Miguel, 2005; Satsangi & Yadav, 2014). Este tipo de partículas pueden ingresar a las calles y zona urbanizada, mezclándose con el polvo urbano. En base a lo anterior, se estima que la cantidad potencial a ser re-suspendida, comprende un aproximado del 25% (ver Figura 27), con un máximo de 30% para la muestra de clave 4CM (cambisol) y un mínimo de 23% para 3CL (calcisol).

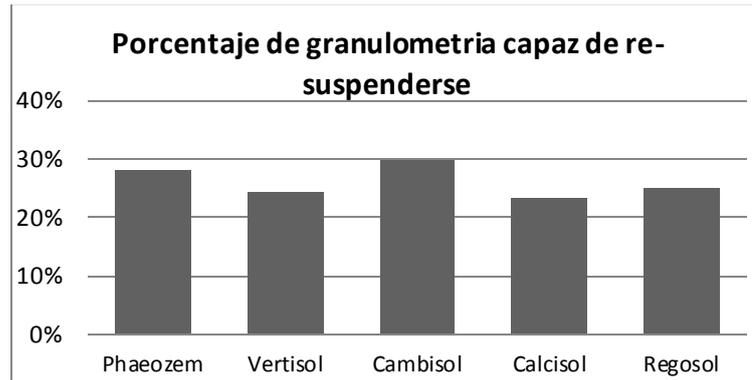


Figura 27. Comparativo de porcentajes de granulometría capaz de re-suspenderse en muestras de matriz de suelo.

Cabe mencionar que este tipo de análisis no se realizó en muestras de polvo urbano colectado en escuelas y calles, considerándose imprecisos debido a la constante actividad antrópica modificando ininterrumpidamente el lugar de colecta. Adicionalmente, la distribución granulométrica de los polvos urbanos es casi homogénea, generalmente menor a la malla 35 (500 μm).

7.1.2. DRX

Las muestras con clave 1PH, 2VR, 3CL, 4CM y 5RG de suelo en fracción granulométrica de 20 μ (Tamiz de malla 635) fueron analizadas por la técnica de DRX, estas muestras aparentemente no se encontraban impactadas por actividades antropogénicas debido a la lejanía al perímetro urbano, sin embargo, para las muestras 4CM y 5RG los análisis determinaron un considerable impacto de minerales de origen antrópico identificando una gran cantidad de especies minerales de origen no natural, esto resulta posible al realizar la interpretación por software, donde la base de datos PDF contiene los patrones de difracción de minerales naturales y sintéticos lo cual nos permite mediante comparación identificar esta clase de minerales.

Dentro de las 32 fases minerales identificadas, 17 corresponden a fuentes geogénicas, en cuanto a las 15 restantes (ver Figura 28), su fuente de procedencia no corresponde con el entorno natural donde fueron colectadas, por tanto el explicar su origen resulta ambiguo en algunos casos.

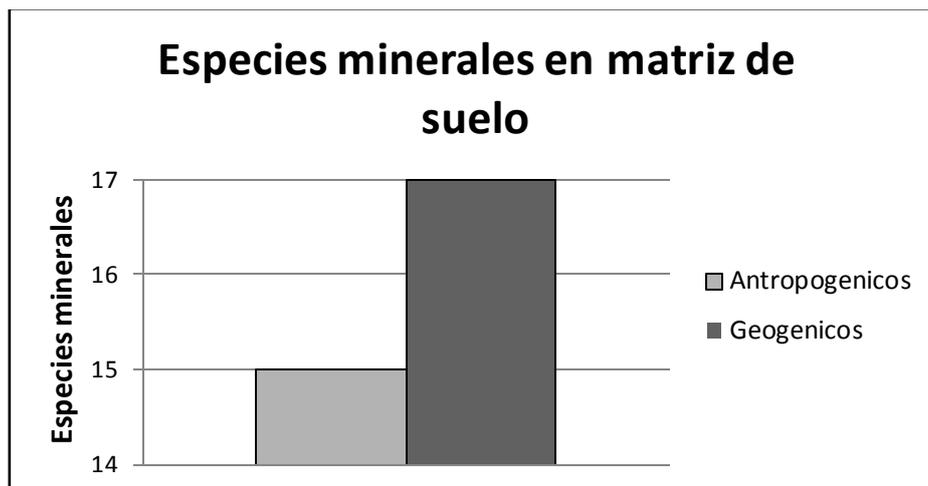


Figura 28. Especies minerales en matriz de suelo.

En estas muestras fueron identificados un total de 32 minerales diferentes (ver Tabla 10). En general, presentan una mineralogía compuesta principalmente por cuarzo bajo, plagioclasas (que se ajustan a un patrón de albita), micas (que se ajustan a un patrón de muscovita), carbonatos (que se ajustan a un patrón de calcita) y feldespatos (que se ajustan a un patrón de microclina intermedia). Los cuales son caracterizados como minerales mayoritarios en abundancia respecto a los diez primeros metros de la corteza continental (Bartolomé, 1996).

Tabla 10. Mineralogía identificada en muestras de suelo periurbano en granulometría de 20 μ m.

Formula química	Mineral	1PH	2VR	3CL	4CM	5RG
$(Ca_{5,1}Na_{0,5})(Fe^{3+}, Al, Fe^{2+}, Mg)(Al, Mg)_6[HSi_{12}O_{36}(OH)_{12}][(CO_3)_{1,2}(H_2O)_{12}]Na(AlSi_3O_8)$	Aerinita	-	-	-	-	x
$(K_{0,22}Na_{0,78})(AlSi_3O_8)$	Albita (tratada térmicamente)	-	-	-	x	-
$(Na, Ca)Al(Si, Al)_3O_8$	Albita alta	x	x	-	-	-
$(Na, Ca)Al(Si, Al)_3O_8$	Albita cálcica ordenada	-	-	x	-	x
$(Ca, Na)(Al, Si)_2Si_2O_8$	Anortita sódica ordenada	-	x	-	-	-
$Al_4SO_4(OH)_{10}^{-5}H_2O$	Basaluminita	-	-	-	-	x
$Fe^{+3}(OH)_3$	Bernalita	-	-	-	-	x
$(K, H)_2(Mg, Fe^{+2})(Al, Fe^{+3})_2(SiO_4)_3$	Biotita	-	-	x	-	-
$CaCO_3$	Calcita	x	-	-	-	x
$(Ca, Mg)CO_3$	Calcita magnésica	-	-	-	x	-
$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Caolinita	x	x	-	-	-

$Mg_2Al_4Si_5O_{18}$	Cordierita	-	-	-	-	x
SiO_2	Cristobalita, Syn.	-	-	x	-	x
SiO_2	Cuarzo	x	-	-	-	-
SiO_2	Cuarzo bajo	-	x	x	x	x
$Zn_{0.586}Fe_{0.414}S$	Esfalerita ferrosa, Syn.	-	-	-	-	x
$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 4H_2O$	Haloisita	-	-	-	-	x
Fe_2O_3	Hematita, Syn.	-	-	-	x	-
$Fe^{+2}TiO_3$	Ilmenita	-	x	-	-	-
$Na_{0.45}Ca_{0.55}Al_{1.55}Si_{2.45}O_8$	Labradorita	x	-	-	-	-
$Ca_4Al_8Si_{16}O_{48} \cdot 16H_2O$	Laumontita	x	-	-	-	-
$K_2C_2^{+6}O_7$	Lopezita, Syn.	-	-	-	x	-
$MgCO_3$	Magnesita	-	-	x	-	-
Fe_3O_4	Magnetita	-	-	x	-	-
$KAlSi_3O_8$	Microclina intermedia	x	x	-	x	x
$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	Muscovita	-	x	x	x	x
$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Nacrita	-	-	-	-	x
$KAlSi_3O_8$	Ortoclasa	-	-	x	-	-
$(K, Ba)(Si, Al)_4O_8$	Ortoclasa bórica	-	x	-	-	x
FeS_2	Pirita	-	-	-	-	x
$ScPO_4$	Pretulita	-	-	x	-	-
$(NH_4)Cl$	Sal amoniaca, Syn.	-	-	-	x	-
$KAlSi_3O_8$	Sanidina alta, Syn.	x	x	-	-	-
$(K_{0.93}Na_{0.07})(AlSi_3O_8)$	Sanidina baja	x	-	-	-	-
$Ca_{0.1}Mg_{0.33}Fe_{0.57}(CO_3)$	Siderita cálcica - magnésica, Syn.	-	-	-	x	-
$Na_{7.88}(Al_6Si_6O_{24})(CO_3)_{0.93}$	Sodalita deshidratada, Syn.	-	-	-	x	-
$Na_8(AlSiO_4)_6(ClO_3)_{1.91}(OH)_{0.99}$	Sodalita, Syn.	-	-	x	-	-
$Cu_4As_2S_5$	Watanabeita	-	-	-	-	x
$CaSO_4(H_2O)_2$	Yeso	x	-	-	-	-

Abreviaciones: 1PH=Phaeozem, 2VR=Vertisol, 3CL=Calcisol, 4CM=Cambisol y 5RG=Regosol.

Las muestras con clave 1PH, 2VR, 3CL presentan una mineralogía principalmente compuesta de elementos naturales o geogénicos, más sin embargo este no es el caso de las muestras 4CM y 5RG, los análisis determinaron un considerable impacto de minerales de origen antrópico debido a una muy variada mineralogía no natural o procedente de otro lugar.

Para la muestra con clave 1PH (phaeozem), los resultados indicaron que su mineralogía se compone principalmente por materiales geogénicos (ver Figura 29) en los que resaltan: cuarzo, albíta alta y labradorita, comprendiendo un aproximado de 76.4% de la muestra.

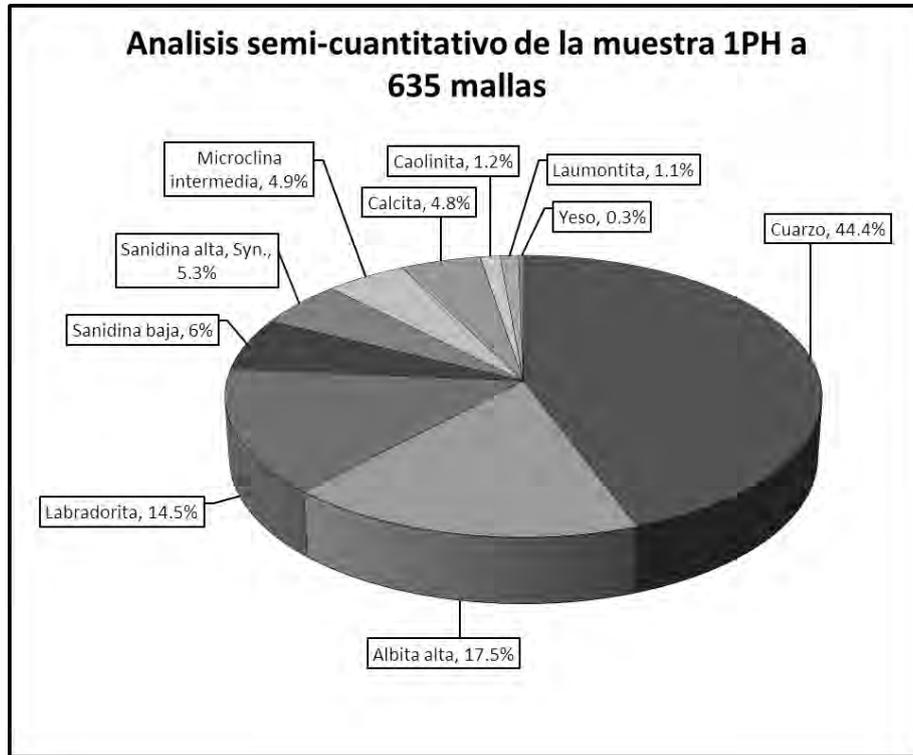


Figura 29. Análisis semi-cuantitativo por DRX de la muestra 1PH en malla 635.

En cuanto a la muestra de clave 2VR (vertisol), este suelo se compone por una mineralogía geogénica, de los cuales sus principales componentes son: albíta alta, anortita sódica, microclina intermedia y sanidina alta, comprendiendo un aproximado de 75% de la muestra (ver Figura 30).

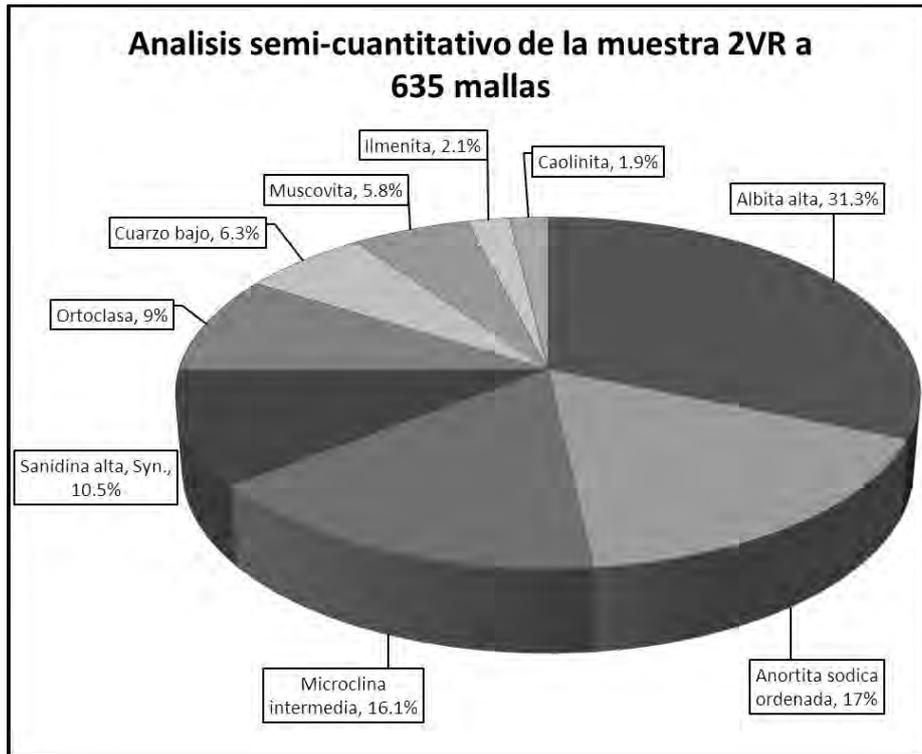


Figura 30. Análisis semi-cuantitativo por DRX de la muestra 2VR a 635 en malla 635.

El análisis de polvo en suelo calcisol (muestra de clave 3CL), se observa un ligero impacto antropogénico con la identificación de los minerales pretulita, sodalita y cristobalita, de los cuales se desconoce su procedencia, más sin embargo, cabe resaltar que dichos minerales también han sido identificados en muestras de polvo urbano, por lo que se sospecha que se deriven de alguna actividad antrópica en esa área. Entre la mineralogía mayor se tiene: albita ordenada, cristobalita sintética, ortoclasa, cuarzo bajo, ortoclasa bórica y pretulita, comprendiendo un porcentaje aproximado del 82.9% de la muestra (ver Figura 31).

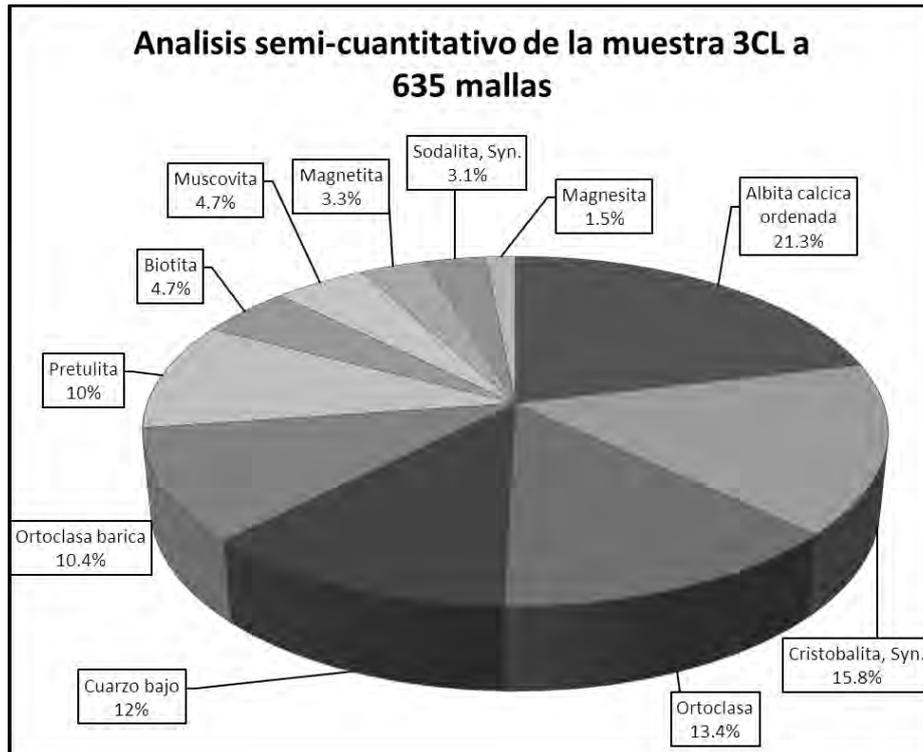


Figura 31. Análisis semi-cuantitativo por DRX de la muestra 3CL en malla 635.

Para la muestra referente al suelo cambisol (con clave 4CM), esta fue colectada al noroeste de Hermosillo en los exteriores de la ciudad (ver Figura 9) en donde aparentemente el suelo no hallase gran parte impactado por actividades antrópicas, más sin embargo, en los últimos años existe una notoria tendencia de crecimiento urbano hacia esa región, integrando actividades antrópicas como la construcción de nuevos conceptos habitacionales y un nuevo parque industrial en la ciudad, lo cual pudiera explicar la procedencia de alguna de estas mineralogías antropogénicas. Su mineralogía es muy diversa, entre los minerales antropogénicos que destacan tenemos: lopezita (syn.), hematita (syn.), sal amoniaca (syn.), sodalita (syn.) y minerales con contenidos magnésicos (calcita magnésica y siderita cálcico - magnésica).

Los componentes mineralógicos mayores se identificaron: albita tratada térmicamente, microclina intermedia, lopezita sintética y cuarzo bajo, comprendiendo un porcentaje aproximado del 82.6% del total de la muestra (ver Figura 32).

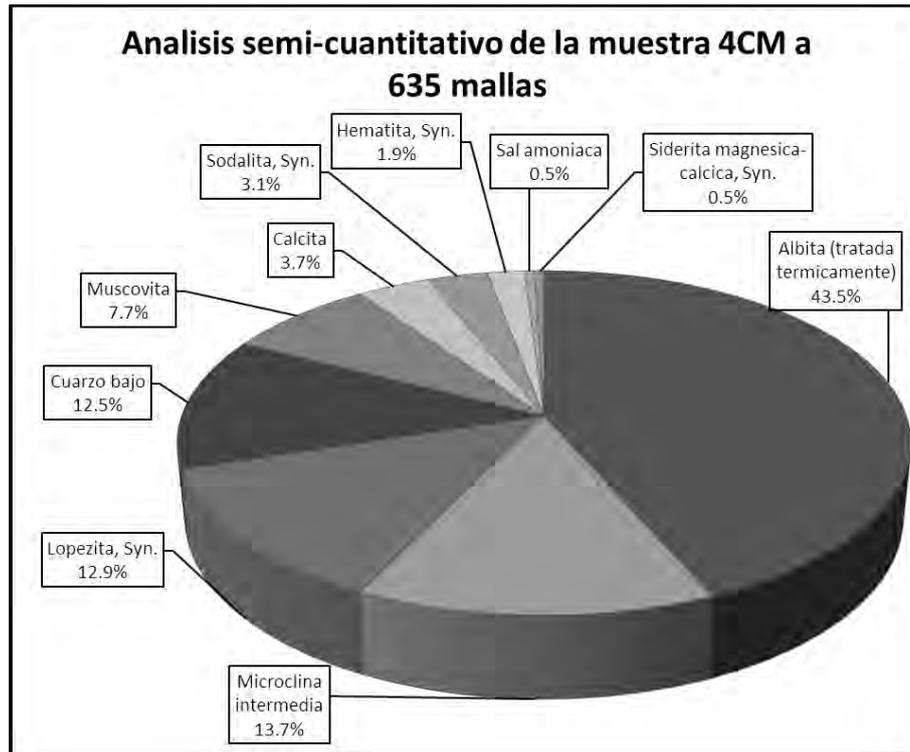


Figura 32. Análisis semi-cuantitativo por DRX de la muestra 4CM en malla 635.

En la muestra de suelo referente a regosol (de clave 5RG), los componentes aparentemente antropogénicos principales se dividen en 2 grupos: (1) grupo de sulfuros y (2) grupo de caolines.

- 1) En el grupo de los sulfuros se encuentra la esfalerita ferrosa, syn., pirita, y watanabeita.
- 2) Los caolines están presentes en dos variedades, nacrita y haloisita.

Otros minerales identificados de procedencia antrópica fueron: cordierita, cristobalita, bernalita y aerinita, los cuales también fueron identificados en matriz de polvos urbanos. Los componentes mineralógicos mayores se identificaron: calcita, albita cálcica ordenada y microclina intermedia, comprendiendo un porcentaje aproximado del 64.3% del total de la muestra (ver Figura 33), predominando los carbonatos.

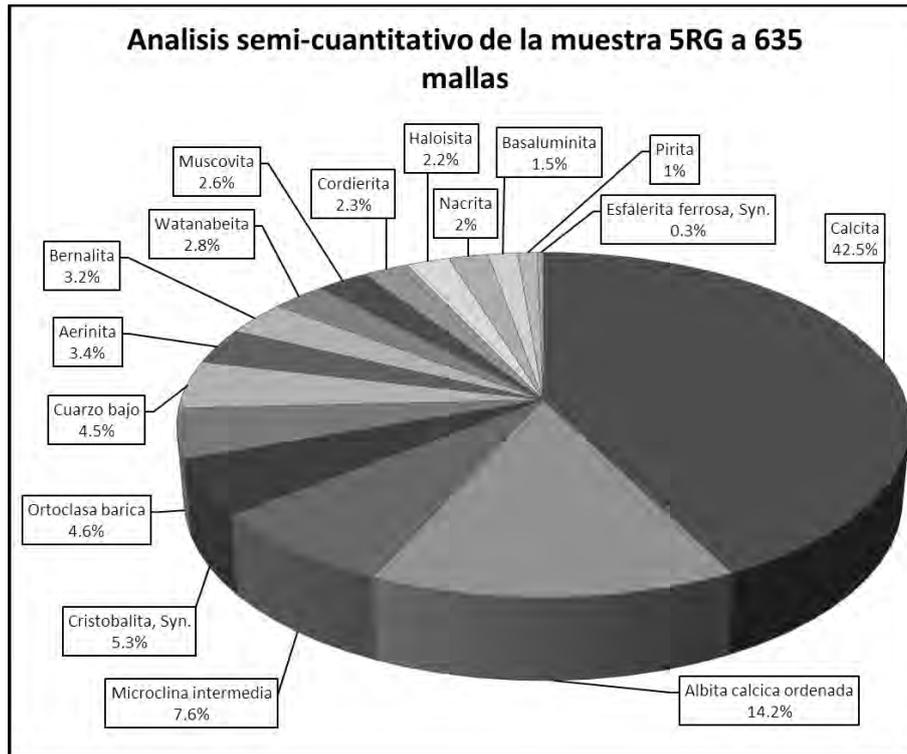


Figura 33. Análisis semi-cuantitativo por DRX de la muestra 5RG en malla 635.

7.1.3. Factores de enriquecimiento mediante normalización elemental

Establecer un fondo geoquímico base en zonas urbanas resulta complicado debido a que en su mayoría se encuentran afectados por factores antropogénicos y es difícil encontrar suelos que no han sido impactados por el hombre, sin embargo, esto fue posible utilizando los resultados de recuperación elemental por FRX de las muestras de suelos (calcisol, regosol, cambisol, phaeozem y vertisol) en conjunto con los resultados de las muestras de polvos urbanos (ver Figura 34), tomando en cuenta la ubicación interna al área que abarca el tipo de suelo, la cual se utilizó como base de referencia o fondo geoquímico, permitiendo identificar el grado de impacto químico-elemental que excede los niveles recuperados en suelo periurbano.

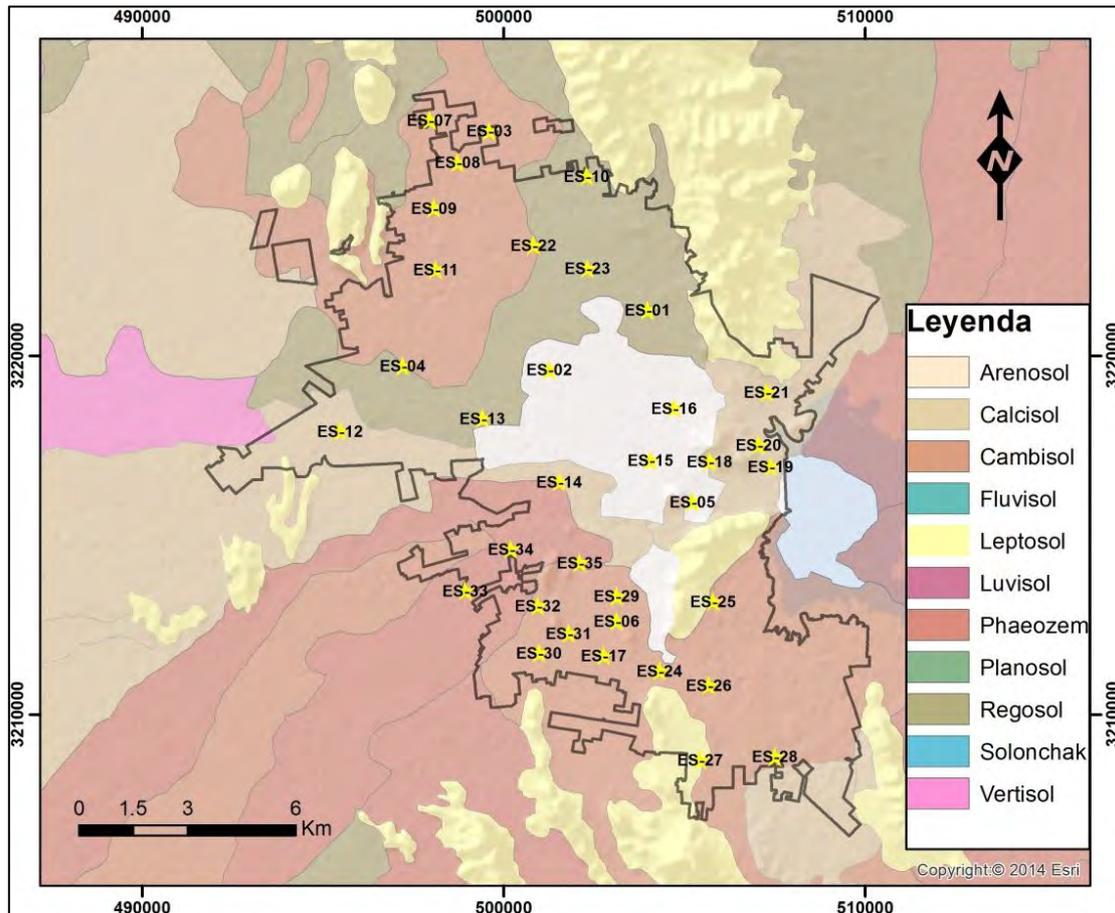


Figura 34. Mapa de localización de muestras analizadas por DRX respecto a tipo de suelo.

Debido al exceso de información generada, no fue posible agregarla a detalle solo los gráficos en la sección de Anexos IV.

7.2. Polvos Urbanos

La posición multifuncional del suelo en un ecosistema está determinada por una variabilidad de factores (Sielaff & Einax, 2007), que, debido a su ausencia de homogeneidad, es necesario realizar análisis de un gran número de conjuntos de muestras para realizar una completa caracterización del polvo urbano, una manera simple de obtener caracterización del polvo urbano en la ciudad fue la de analizar el polvo sedimentado en la parte baja de las cuencas urbanas. Utilizando como lugares de muestreo entornos delicados como las escuelas primarias y vías de alta actividad

antropogénica como son las calles. De esta manera es posible explorar las vías de posibles contaminantes emergentes desde el entorno de origen.

Correspondiente a los tres muestreos de polvo urbano (sedimentado en escuelas antes de lluvias, sedimentado en escuelas después de lluvias y sedimentado en calles), los resultados muestran un incremento muy notorio en la cantidad de especies minerales identificadas (ver Figura 35). Afirmando con ello la presunción donde la complejidad de especies minerales aumenta en las muestras colectadas después de la temporada de lluvias (monzón) reflejando el acarreo superficial en las cuencas hacia los bajos topográficos, donde el polvo urbano es depositado y posteriormente su re-suspensión.

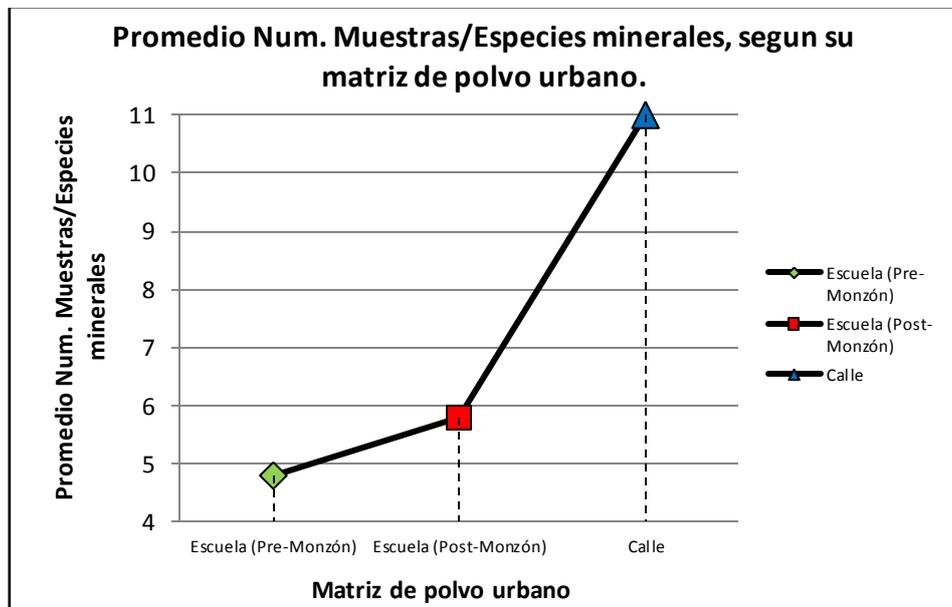


Figura 35. Promedio de numero de muestras entre especies minerales, según su matriz de polvo urbano.

A continuación, se mencionan las especies minerales identificadas en los diferentes muestreos de polvo urbano:

7.2.1. Polvo urbano sedimentado en calles

Los resultados de los análisis por DRX de cinco muestras colectadas en suelo de calle con clave CB-16, CB-19, CB-21, CB-27 y CB-86. Arrojaron un total de 63 minerales diferentes contenidos en esas muestras, de los cuales, alrededor de 42

minerales muy posiblemente se originen de forma antropogénica, y los 21 minerales restantes se asocian a un origen geogénico o natural (ver Figura 36).



Figura 36. Especies minerales en polvo urbano de calles.

La composición general del polvo urbano en calles responde a una mezcla compuesta principalmente de plagioclasas (que se ajustan a patrones de albita cálcica ordenada y albita tratada con calor), carbonatos (que se ajustan a un patrón de calcita, syn.), óxidos (que se ajustan a un patrón de cuarzo bajo, syn. y hematita, syn.) y feldespatos (que se ajustan a patrones de microclina intermedia y ordenada) (ver Tabla 11).

Tabla 11. Mineralogía identificada en muestras de polvo urbano sedimentado en calles, los análisis se llevaron a cabo en granulometría de 20µm.

Formula química	Mineral	CB-16	CB-19	CB-21	CB-27	CB-86
$\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	Albita	-	-	-	-	x
$\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	Albita (tratada con calor)	x	-	x	x	x
$\text{K}_{0.2}\text{Na}_{0.8}\text{AlSi}_3\text{O}_8$	Albita alta	-	x	-	-	-
$(\text{Na}_{0.75}\text{Ca}_{0.25})(\text{Al}_{1.26}\text{Si}_{2.74}\text{O}_8)$	Albita cálcica baja	-	-	-	-	x
$(\text{Na}, \text{Ca})\text{Al}(\text{Si}, \text{Al})_3\text{O}_8$	Albita cálcica ordenada	x	x	x	-	-
$\text{Ca}(\text{SO}_4)$	Anhidrita	-	-	x	-	-
$(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Al}, \text{Si})_2\text{Si}_2\text{O}_8$	Anortita sódica ordenada	x	-	-	-	x
$(\text{Na}_{0.85}\text{K}_{0.14})(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	Anortoclasa	-	-	-	x	-

Al(OH)_3	Bayerita	-	-	-	x	-
SnS_2	Berndtita	x	-	-	-	-
CaCO_3	Calcita	x	-	-	x	-
CaCO_4	Calcita, Syn.	-	x	x	-	x
$\text{Na}_{7.86}(\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24})(\text{CO}_3)(\text{H}_2\text{O})_{3.3}$	Cancrinita, Syn.	-	x	-	x	-
$\text{Ca}_5(\text{Si}_6\text{O}_{17})(\text{H}_2\text{O})_5$	Clinotobermorita	-	x	-	-	-
SiO_2	Cristobalita, Syn.	-	x	-	-	-
$\text{Pb(CrO}_4)$	Crocoita	-	x	-	-	-
$\text{H}_{10}\text{V}_6\text{O}_{16}$	Doloresita	-	x	-	-	-
$\text{Na}_2\text{Mg(CO}_3)_2$	Eitelita	-	x	-	-	-
$(\text{Zn}_{0.35}\text{Fe}_{0.65})\text{Fe}_2\text{O}_4$	Franklinita ferrosa, Syn.	x	-	-	-	-
BiF_3	Gananita	x	-	-	-	-
$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$	Grosularia, Syn.	-	-	-	-	x
Fe_2O_3	Hematita, Syn.	x	x	x	-	-
CaCl_2	Hidropilita	x	-	-	-	-
$(\text{Ca}_{7.7}\text{Cd}_{0.8})(\text{PO}_4)_6(\text{H}_2\text{O})_{2.4}$	Hidroxilapatito, Syn.	-	-	-	-	x
(Fe, Rh)	Hierro-Rodio	-	-	x	-	-
$\text{Ti}_{0.895}\text{O}_{0.77}$	Hongquilita, Syn.	-	-	-	x	-
$\text{Na}_{0.45}\text{Ca}_{0.55}\text{Al}_{1.55}\text{Si}_{2.45}\text{O}_8$	Labradorita	-	-	x	-	-
$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	Lopezita	x	-	-	-	-
$\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}\text{O}_4$	Magnetita	-	x	-	-	-
$(\text{Na, Ca})_4(\text{SiAl})_{12}(\text{O, OH})_{24}(\text{Cl, CO}_3)$	Marialita cálcica	-	x	-	-	-
CuAsSe_2	Mgita, Syn.	-	x	-	-	-
$\text{K}_{0.871}\text{Na}_{0.12}\text{Rb}_{0.008}\text{Al}_{0.94}\text{Si}_{3.06}\text{O}_8$	Microclina intermedia	x	-	-	-	x
KAlSi_3O_8	Microclina ordenada	-	-	x	-	-
$\text{K}_{0.96}\text{Na}_{0.04}\text{AlSi}_3\text{O}_8$	Micropertita	x	-	-	-	x
$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	Muscovita	-	-	-	x	-
$\text{KMgAlSi}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Muscovita magnésica	-	x	-	-	-
KAlSi_3O_8	Ortoclasa	-	-	-	-	x
TiN	Osbornita, Syn.	x	-	x	-	-
PdO	Paladinita	-	-	-	x	-
$\text{Ca(TiO}_3)$	Perovskita, Syn.	-	-	x	-	-
FeS_2	Pirita	-	-	x	-	-
PbO_2	Plattnerita, Syn.	x	-	-	-	-
Pb	Plomo	-	-	x	-	-
Mn(OH)_2	Pyrochroita	-	x	-	x	-
$(\text{Na}_{0.5}\text{Nd}_{1.5})(\text{TiSb})\text{O}_7$	Pyrocloro, Syn.	-	-	-	x	-
$\text{Fe}_{0.95}\text{S}$	Pyrrhotita, Syn.	-	x	x	-	-
SiO_2	Cuarzo bajo	x	x	-	x	x
SiO_3	Cuarzo bajo, Syn.	-	-	x	-	-
MnO_2	Ramsdellita	-	x	-	-	-
$\text{Ca(VO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Rossite, Syn.	-	x	-	-	-
TiO_2	Rutilo, Syn.	-	x	-	-	-
$\text{Ca}_8(\text{Al}_{12}\text{O}_{24})(\text{MoO}_4)_2$	Sodalita, Syn.	-	x	-	-	-

$\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$	Spodumena β , Syn.	-	-	x	x	-
$\text{Mn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Switzerita	-	x	-	-	-
ThO_2	Thorianita	-	-	x	x	-
FeS	Troilita, Syn.	x	-	-	-	-
$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	Urea, Syn.	x	-	-	-	-
$\text{Ca}_{10}(\text{Mg,Fe})_2\text{Al}_4(\text{SiO}_4)_5$ $(\text{Si}_2\text{O}_7)_2(\text{OH,F})_4$	Vesubiana	-	-	-	x	-
$\text{Mg}_{1.34}\text{Fe}_{0.16}\text{Al}_{0.12}\text{Ti}_{0.38}\text{O}(\text{BO}_3)$	Warwickita	-	-	-	x	-
Fe_2O	Wuestita, Syn.	-	x	-	-	-
$\text{Zn}_{0.566}\text{Fe}_{0.434}\text{S}$	Wurtzita ferrosa, Syn.	-	-	x	-	-
$\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Yeso, Syn.	x	-	-	-	-
Zn	Zinc, Syn	-	x	x	x	-

Cabe mencionar que en el caso del zinc, este elemento químico identificado se incluye de manera sintética, el cual hace referencia que se deriva de algún compuesto antropogénico desconocido, derivando al zinc como sub-producto.

7.2.2. Polvo urbano sedimentado en escuelas

Los resultados de los análisis al polvo sedimentado en canchas fueron separados en antes y después de lluvias, ratificando que las muestras colectadas durante el post-monzón concentran un mayor aporte de material transportado por escorrentía reflejado por una mayor cantidad de especies minerales de origen antrópicos.

Los resultados de estos análisis se mencionan a continuación:

7.2.2.1. Muestreo pre-monzón

Los resultados de los análisis de polvo urbano en escuelas antes de lluvias, proyectan un total de 76 minerales, de los cuales 42 son de procedencia antropogénica o de desconocida procedencia, mientras que los 34 restantes son de origen geogénico (ver Figura 37), la incorporación de contaminantes urbanos al polvo mineral se percibe ligeramente a menor cantidad de especies minerales antrópicas identificadas durante este muestreo que en los referentes a después de lluvias y polvo sedimentado en calles, en las cuales van en aumento.



Figura 37. Especies minerales en polvo urbano sedimentado en escuelas antes de lluvias (pre-monzón).

La composición general de los polvos urbanos en escuelas se deriva de una mezcla principalmente compuesta por plagioclasas (que se ajustan a un patrón de albita tratada térmicamente y albita cálcica ordenada), carbonato (que se ajusta a un patrón de calcita), silicatos (que se ajustan a un patrón de cuarzo y cordierita), óxidos (que se ajustan a un patrón de hematita, syn.), feldespato (que se ajustan a un patrón de microclina intermedia) y micas (que se ajustan a un patrón de muscovita) (ver Tabla 12).

Tabla 12. Mineralogía identificada en muestras de polvo urbano sedimentado en canchas de escuelas durante el periodo de antes de lluvias, los análisis se llevaron a cabo en granulometría de 20µm.

Formu la química	Mineral	ES -02	ES -03	ES -05	ES -06	ES -09	ES -12	ES -14	ES -19	ES -26	ES -28	ES -31	ES -33
$Cu^{+2}Mn_6^{+3}SiO_{12}$	Abswumbachita, Syn.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x
$Na(AlSi_3O_8)$	Albita (calentada)	x	x	x	-	-	-	x	x	-	x	-	x
$Na(AlSi_3O_8)$	Albita baja	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-
$(Na_{0.75}Ca_{0.25})(Al_{1.26}Si_{2.74}O_8)$	Albita cálcica baja	-	x	-	-	-	x	-	x	-	-	-	x
$(Na, Ca)(Si, Al)_4O_8$	Albita cálcica ordenada	-	-	x	x	x	-	x	-	x	x	x	-
$Na(AlSi_3O_8)$	Albita desordenada	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$Na(AlSi_3O_8)$	Albita intermedia	-	-	-	-	-	-	-	x	x	-	-	-
$Na(AlSi_3O_8)$	Albita ordenada	-	-	-	-	x	x	-	-	x	-	-	x

$\text{Na}_{0.622}\text{Ca}_{0.368}\text{Al}_{1.29}\text{Si}_2$ $_{71}\text{O}_8$	Andesina	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-
CaSO_4	Anhidrita, Syn.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-
$(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Al}, \text{Si})_2\text{Si}_2\text{O}_8$	Anortita sódica ordenada	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-
$\text{Ba}_4\text{Ti}_7\text{NbSi}_4\text{O}_{28}$	Baotita	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\text{Fe}^{+3}(\text{OH})_3$	Bernalita	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\text{Pb}_2\text{Sb}_2\text{O}_7$	Bindhemita, Syn	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-
BeO	Bromelita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-
CaCO_3	Calcita	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	X	X
CaCO_3	Calcita, Syn.	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	-
Ti_2S	Carlinita, Syn.	X	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-
CoS_2	Catterita, Syn.	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CoAsS	Cobaltita, Syn.	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-
$\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$	Cordierita	X	X	-	X	X	X	-	-	-	-	-	X
$(\text{Mg}_{1.785}\text{Cu}_{0.215})(\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18})$	Cordierita cúprica, Syn.	-	-	-	-	-	-	-	X	X	-	-	-
$(\text{Mg}_{1.91}\text{Cu}_{0.09})(\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18})$	Cordierita, Syn.	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	X	-
CuS	Covelita	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	X	-
PbCrO_4	Crocoita	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-
$\text{Na}_3(\text{AlF}_6)$	Criolita	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cu_{18}S	Digenita, Syn.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-
$\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe})(\text{CO}_3)_2$	Dolomita ferrosa	-	-	-	-	X	X	-	-	-	-	-	-
$\text{Ca}_2\text{Al}_{2.16}\text{Fe}_{0.84}\text{Si}_3\text{O}_{13}\text{H}$	Epidota	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-
Cu_3SbS_4	Farmatinita, Syn.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-
$\text{Ca}_5\text{F}(\text{PO}_4)_3$	Fluorapatito	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\text{Zn}_8\text{Be}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\text{S}_2$	Genthelvita	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-
$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Gibbsita, Syn.	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaCl	Halita	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-
$\text{K}_{0.4}\text{Na}_{0.6}\text{Cl}$	Halita potásica, Syn.	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-
Fe_2O_3	Hematita	-	-	X	-	-	-	-	-	X	-	-	-
Fe_2O_3	Hematita, Syn.	-	X	-	X	X	X	X	X	-	-	X	-
$\text{NaCa}_2(\text{Mg}_3\text{Ti}^{4+}\text{Al})(\text{Si}_6\text{Al}_2)\text{O}_{22}\text{O}_2$	Kaersutita, Syn.	X	-	-	X	-	-	-	-	-	X	-	-
$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	Caolinita	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\text{CaMn}(\text{CO}_3)_2$	Kutnohorita	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-
FeAs_2	Loellinguita, Syn.	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PbTiO_3	Macedonita, Syn.	X	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-
$(\text{Mg}, \text{Fe})\text{CO}_3$	Magnesita ferrosa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-

MgCO ₃	Magnesita, Syn.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-
Na ₂ K ₂ (Fe, Mn) ₃ Mg ₂ Ti ₂ Si ₈ O ₂₄ (OH, O) ₇	Magnesiomastrolita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X
KAlSi ₃ O ₇	Microclina	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
KAlSi ₃ O ₈	Microclina intermedia	X	-	-	X	X	-	X	X	X	X	X	X	X
K _{0.96} Na _{0.04} AlSi ₃ O ₈	Micropertita	-	X	X	-	-	X	X	-	-	-	-	-	-
KAlSi ₃ O ₈	Micropertita intermedia	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₂	Muscovita	X	X	X	-	X	X	X	X	X	X	X	X	X
(Ba, K)Al ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₂	Muscovita bámica	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	-
K(Al, Cr) ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH, F) ₂	Muscovita cromiana	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-
NaMgF ₃	Neighborita, Syn.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X
(K, Ba, Na)(Si, Al) ₄ O ₈	Ortoclasa	X	X	-	X	-	-	X	-	-	-	-	-	-
(Ca _{0.96} Ti _{1.04})O ₆	Perovskita, Syn.	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-
Pb	Plomo, Syn.	X	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(CdYb)(TiSb)O ₇	Pyrocloro, Syn.	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-
SiO ₂	Cuarzo	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
MnCO ₃	Rodocrosita, Syn.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X
Na ₂ CaMg ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂	Richterita, Syn.	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe ₃ NiN	Roaldita, Syn.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-
Ca ₂ Ce ₃ (CO ₃) ₅ F ₃	Rotgenita-(Ce)	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TiO ₂	Rutilo, Syn	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-
K _{0.65} Na _{0.35} AlSi ₃ O ₈	Sanidina	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
KAlSi ₃ O ₈	Sanidina alta, Syn.	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-
(K _{0.93} Na _{0.07})(AlSi ₃ O ₈)	Sanidina baja	-	-	-	X	-	X	-	-	-	X	X	-	-
K(Si ₃ Al)O ₈	Sanidina desordenada	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-
Ca ₈ (Al ₁₂ O ₂₄)(MoO ₄) ₂	Sodalita, Syn.	-	X	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-
PtAs ₂	Sperrylita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X
SiO ₂	Stishovita, Syn.	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-
MnS	Sulfuro de Manganeso	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-
SiO ₂	Tridimita desordenada baja, Syn.	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ca ₁₀ Al ₄ (Mg, Fe) ₂ (Si ₉ O ₃₄ (OH) ₄	Vesubianita ferrosa	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-
PbMoO ₄	Wulfenita, Syn.	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-
Ca ₄ Al ₆ O ₁₂ SO ₄	Yeelimita, Syn.	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CaSO ₄ · 2H ₂ O	Yeso, Syn.	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

7.2.2.2. Muestreo post-monzón

Los resultados de los análisis de polvo urbano en escuelas, arrojan un total de 64 minerales, de los cuales 37 son de procedencia antropogénica o se desconoce su procedencia y los 27 restantes son de origen geogénico (ver Figura 38).



Figura 38. Especies minerales en polvo urbano sedimentado en escuelas después de lluvias (post-monzón).

La composición general de los polvos urbanos en escuelas se deriva de una mezcla principalmente compuesta por plagioclasas (que se ajustan a un patrón de albita cálcica baja y albita cálcica ordenada), carbonatos (que se ajusta a un patrón de calcita, syn. y dolomita), silicatos (que se ajustan a un patrón de cuarzo), óxidos (que se ajustan a un patrón de hematita, syn.), feldespato (que se ajustan a un patrón de microclina intermedia) y micas (que se ajustan a un patrón de muscovita magnésica) (ver Tabla 13).

Tabla 13. Mineralogía identificada en muestras de polvo urbano sedimentado en canchas de escuelas durante el periodo referente a después de lluvias, los análisis se llevaron a cabo en granulometría de 20µm.

Formula Química	Mineral	2E								
		S- 03	S- 05	S- 09	S- 12	S- 14	S- 19	S- 25	S- 31	S- 33
$(\text{Na}_{0.75}\text{Ca}_{0.25})(\text{Al}_{1.26}\text{Si}_{2.74}\text{O}_8)$	Albita cálcica baja	-	x	-	-	x	x	-	-	x
$(\text{Na, Ca})\text{Al}(\text{Si, Al})_3\text{O}_8$	Albita cálcica ordenada	x	-	x	x	-	-	-	x	x
$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	Albita ordenada	-	-	-	-	-	-	x	-	-
$(\text{Na}_{0.45}\text{Ca}_{0.55})(\text{Al}_{1.55}\text{Si}_{2.45}\text{O}_8)$	Anortita (intercambio sódico)	-	-	-	-	-	-	-	x	-
$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	Anortita ordenada	-	x	-	-	-	-	-	-	-
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Antarticita, Syn.	-	-	x	-	-	-	-	-	-
As	Arsénico	-	-	-	-	-	x	-	-	-
$(\text{Na, Ca})\text{Fe}^{+3}\text{Si}_2\text{O}_6$	Augita-Agirina	-	-	-	-	-	-	-	x	-
AuCu_3	Auricupride, Syn.	x	-	-	-	-	-	-	-	-
$\text{Fe}^{+3}(\text{OH})_3$	Bernalita	-	-	-	-	-	x	-	-	-
CaO	Cal, Syn.	-	-	-	x	-	-	-	-	-
$(\text{Mg}_{0.129}\text{Ca}_{0.871})(\text{CO}_3)$	Calcita magnésica	-	-	-	-	x	-	x	-	-
CaCO_3	Calcita, Syn.	x	x	x	x	-	x	x	x	x
$\text{Cu}_9\text{Al}(\text{AsO}_4)_2(\text{SO}_4)_{1.5}(\text{OH})_{12}(\text{H}_2\text{O})_{18}$	Calcofilita	-	-	-	-	-	-	-	-	x
Cu_2S	Calcosita alta	-	-	-	x	-	-	-	-	-
CuSbS_2	Calcostibita, Syn.	-	-	-	x	-	-	-	-	-
Fe_3C	Cementita, Syn.	-	x	-	-	-	-	-	-	-
$\text{K}_{0.17}\text{Mg}_2\text{Al}_{4.17}\text{Si}_{4.83}\text{O}_{18}$	Cordierita	x	-	x	-	-	-	-	-	x
$\text{Mg}_2(\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18})$	Cordierita, Syn.	-	x	-	-	-	x	x	x	-
SiO_2	Cristobalita, Syn.	-	-	-	-	-	-	-	x	-
SiO_2	Cuarzo	x	x	x	x	x	x	x	x	x
$\text{Cu}_{1.8}\text{S}$	Digenita, Syn.	-	-	-	-	-	x	-	-	-
$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Dolomita	-	-	x	x	x	x	x	x	-
$\text{Ca}(\text{Mg,Fe})(\text{CO}_3)_2$	Dolomita ferrosa	x	-	-	-	-	-	-	-	-
$\text{Fe}(\text{WO}_4)$	Ferberita	-	-	-	-	-	-	x	x	-
$\text{Cu}_4\text{FeZnSn}_2\text{O}_8$	Ferrokersterita zinciana, Syn.	-	-	-	-	-	-	x	-	-
$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$	Fluorapatito, Syn.	-	x	-	-	-	-	-	-	-
$\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$	Freibergita	x	x	-	-	-	-	-	-	-
NaCl	Halita	-	x	-	-	-	-	-	-	-
$\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$	Hedenberguita	-	-	-	-	-	-	x	-	-
FeO_2	Hematita	-	x	-	-	-	-	x	-	-

FeO ₃	Hematita, Syn.	x	-	x	x	x	x	-	x	x
Fe ₂ ⁺² Cl(OH) ₃	Hibbinguita	-	-	-	-	-	-	-	-	x
CaCl ₂	Hidropilita	x	-	-	-	-	-	-	-	-
Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH)	Hidroxilapatito	-	x	-	-	-	-	-	-	-
Ba(Mn ₆ ⁺⁴ Mn ₂ ⁺³)O ₁₆	Holandita	-	x	-	-	-	-	-	-	-
(Mg _{0.129} Mn _{0.829} Zn _{0.007} Fe _{0.035})(Fe _{1.97} Al _{0.03})O ₄	Jacobsita	-	-	-	x	-	-	-	-	-
Mn ₃ (BO ₃) ₂	Jimboita, Syn.	x	-	-	-	-	-	-	-	-
K ₂ Cr ₂ ⁺⁶ O ₇	Lopezita, Syn.	-	-	x	-	-	-	-	-	-
Fe ⁺² Fe ₂ ⁺³ O ₄	Magnetita, Syn.	-	-	-	x	-	-	-	-	-
KAlSi ₃ O ₈	Microclina	-	-	-	-	-	x	-	-	-
KAlSi ₃ O ₈	Microclina intermedia	x	x	-	-	x	-	x	x	x
KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	Muscovita	x	x	x	-	-	-	-	-	-
(K, Ba, Na) _{0.75} (Al, Mg, Cr, V) ₂ (Si, Al, V) ₄ O ₁₀ (OH, O) ₂	Muscovita (vanadio-bario)	-	-	x	-	-	-	-	-	-
(Ba, K)Al ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₂	Muscovita bórica	-	-	-	-	-	-	x	x	-
KMgAlSi ₄ O ₁₀ (OH) ₂	Muscovita magnésica	-	-	-	x	x	x	-	-	x
TiN	Osbornita, Syn.	-	-	-	x	-	-	-	-	-
MgO	Priklasa	-	-	-	x	-	-	-	-	-
(Ca, Na) ₂ (Nb, Ti) ₂ O ₆ F	Pyrocloro (Calenta)	x	-	-	-	x	-	-	-	-
Mn(CO ₃)	Rhodocrosita, Syn.	x	-	-	-	-	-	-	-	-
S	Rosickyita, Syn.	-	-	x	-	-	-	-	-	-
(Na, K)(Si ₃ Al)O ₈	Sanidina potásica desordenada, Syn.	-	-	x	-	-	-	-	-	-
Na ₄ Si ₃ Al ₃ O ₁₂ Cl	Sodalita, Syn	-	-	-	-	-	x	-	-	-
Cu ₂ FeSnS ₄	Stannita	-	x	-	-	-	-	-	-	-
Cu ₁₂ As ₄ S ₁₃	Tennanita	-	-	x	-	-	-	x	x	-
HgSe	Tiemannita	-	-	-	-	-	-	-	x	-
NaMn ₆ O ₁₂ · 3H ₂ O	Todorokita	-	-	-	-	-	-	-	-	x
Fe ₂ TiO ₄	Ulvospinel, Syn.	-	-	-	x	-	-	-	-	-
Ca ₁₉ (Al _{9.26} Mg _{2.21} Fe _{2.17})Si ₁₈ O ₆₈ .88(OH) _{9.12}	Vesubianita	-	-	x	-	-	x	-	-	-
Ca ₁₀ Al ₄ (Mg, Fe) ₂ Si ₉ O ₃₄ (OH) ₄	Vesubianita ferrosa	-	-	-	-	-	x	-	-	-
FeWO ₄	Wolframita	-	-	-	-	-	-	x	-	-
FeO	Wuestita	-	x	-	-	-	-	-	-	-
PbMoO ₄	Wulfenita	-	-	-	-	-	-	-	x	-
ZrSiO ₄	Zircón	-	-	x	-	-	-	-	x	-

7.3. Minerales y compuestos utilizados en la fabricación de materiales antrópicos y sus implicaciones a la salud.

Debido a la gran cantidad de minerales identificados, solo se mencionarán los que resultan de mayor incertidumbre e interés sobre sus posibles efectos al ambiente y a la salud humana. Entre los minerales que se presentan interés particular se encuentran los siguientes:

Sílice - SiO₂

Uno de los componentes naturales principales en el polvo urbano es el dióxido de sílice o cuarzo, el cual fue identificado en todos los análisis (Ver tabla 13 y tabla 14), usualmente es encontrado en mayores concentraciones seguido de minerales arcillosos y plagioclasas. El cuarzo ordinario es principalmente atacado por agentes de molienda (intemperismo mecánico)²³ o agentes químicos como el ácido fluorhídrico, los cuales reducen su tamaño de partícula. El cuarzo se ha producido de manera sintética de numerosas maneras, obteniendo cristales por debajo de los 760°C en fundición de sílice con diferentes compuestos.

Estudios recientes reconocen que una exposición excesiva de nano-sílice en el polvo está asociado a silicosis, cáncer pulmonar y enfermedades autoinmunes considerando determinante su patogenicidad²⁴, sin embargo su grado de toxicidad en sus variantes sintéticas se vuelve impredecible (Turci *et al.*, 2016). Una de las principales aplicaciones del nano-sílice es en la industria del caucho, especialmente en la producción de llantas de automóvil, donde el uso de nano-sílice mejora la resistencia al rodado y el agarre en terrenos húmedos (Hentschke *et al.*, 2016).

Substancias extrañas entran a ambientes internos de cuerpos vivos y son acumulados en varios órganos. El dióxido de silicio sintético en forma de cristobalita presente en varias muestras analizadas (ver tabla 15) es un silicato polimorfo y estable a temperaturas menores a 1470°C, meta-estable²⁵ a temperatura ambiente y puede convertirse en estructuras de cuarzo lentamente. Este material puede ser encontrado en pulmones

²³ Terminio geológico referente a la destrucción de la roca por exposición al ambiente.

²⁴ Capacidad para causar una enfermedad.

²⁵ Transformación de estado lenta debido a que no se encuentra en equilibrio por un considerable espacio de tiempo.

humanos como resultado de contaminantes ambientales procedentes de actividades volcánicas o industriales, provocando alteraciones en sistemas que participan en su eliminación, la sílice es un elemento traza normalmente presente en el cerebro, pero su función biológica es desconocida al igual que su entrada y distribución en el cerebro, pudiendo deberse a contaminación de vasos sanguíneos (Kopani *et al.*, 2016).

Tabla 14. Minerales de cristobalita identificados en polvo urbano de Hermosillo.

Nombre del mineral	Formula química	Clave de muestra	DRX semi-cuantitativo
Cristobalita Syn.	SiO ₂	3CL	15.8%
		5RG	5.3%
		CB-19	3.7%
		2ES-31	4.1%

Rafnsson y Gunnarsdottir (1997) determinaron la incidencia de tumores cerebrales en poblaciones expuestas a cristobalita, los resultados muestran un alto riesgo de exposición, sin embargo, los resultados no fueron estadísticamente significantes existiendo escasa evidencia que prueba que las nano-partículas de cristobalita pueden causar enfermedades.

Cordierita - Mg₂Al₄Si₅O₁₈

La cordierita es un silicato de magnesio y aluminio identificado en gran parte de las muestras analizadas en matriz de escuelas inclusive de suelo (ver tabla 16), mas no fueron identificadas en matriz de calles probablemente debido a la baja resolución y alto índice de ruido en los difractogramas.

La cordierita es considerada un excelente cerámico refractario²⁶ debido a su alta resistencia térmica, baja constante dieléctrica²⁷ y dilatación térmica. Lo que hace interesante a la cordierita es su alto grado de fundición (se funde a los 1460°C), resistencia a exposición a choques térmicos y una alta estabilidad química. Estas propiedades consideran a la cordierita cerámica como un material adecuado para el uso industrial con diversas aplicaciones como insolación térmica y eléctrica, estufas, filtros

²⁶ Que resistela acción del fuego.

²⁷ Material de baja conductividad eléctrica o aislante.

y en purificación de emisiones en vehículos portadores de catalizador (Sembiring *et al.*, 2015; Behnammou *et al.*, 2016; Wu *et al.*, 2016).

Tabla 15. Minerales de cordierita identificados en polvo urbano de Hermosillo.

Nombre del mineral	Formula química	Clave de muestra	DRX semi-cuantitativo
Cordierita	$Mg_2Al_4Si_5O_{18}$	5RG	2.3%
		ES-02	1.1%
		ES-03	1.4%
		ES-06	3.1%
		ES-09	2.4%
		ES-12	1.2%
		ES-33	2.3%
		2ES-03	2.3%
		2ES-09	1.9%
		2ES-33	1.5%
Cordierita, Syn.	$Mg_2(Al_4Si_5O_{18})$	ES-05	2.6%
		ES-31	5.0%
		2ES-05	2.9%
		2ES-19	2.2%
		2ES-25	2.7%
		2ES-31	1.4%
Cordierita cúprica, Syn.	$(Mg_{1.785}Cu_{2.15})(Al_4Si_5O_{18})$	ES-19	1.7%
		ES-26	1.5%

Sembiring, *et al.*, (2015) en estudios recientes de materiales cerámicos han utilizado materiales como espinela y cristobalita en la formación de cordierita sintética, promoviendo una interdifusión²⁸ a temperaturas mayores que 1110°C, convirtiéndose en una fase líquida de cristobalita penetrando a espinela promoviendo la formación de cordierita como fase dominante. Cabe mencionar que la cristobalita identificada en este estudio (ver tabla 15) posiblemente sea derivadas de cordierita proveniente de cerámicos refractarios u otros materiales referentes debido a su procedencia sintética.

Otros minerales usados frecuentemente para la síntesis de cordierita cerámica son la caolinita, sepiolita, talco, diatomita, feldespatos y ceniza. La reacción de síntesis de cordierita mejora utilizando aditivos como Zircón (ZrO_2) el cual fue identificado en varias muestras (ver Tabla 34) y Titanita (TiO_2), haciéndola más densa (Behnammou *et al.*, 2016).

²⁸ También llamado difusión de impurezas, donde los átomos de un metal se difunden o migran a otro.

Algunos investigadores han vinculado una mayor incidencia a compuestos con contenidos en magnesio como cordierita a trastornos del tracto digestivo, y sugieren que puede existir una relación entre la absorción de magnesio y la ulcera gastroduodenal²⁹ (Gunnar, 1998).

Caolín - $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$

El caolín ordinario es un resultado de la descomposición de minerales aluminosos, especialmente feldespatos de rocas graníticas, neises y pórfidos. Puede ocurrir en cuerpos que se han formado in-situ³⁰ por descomposición directa de la roca original, o puede haber sido transportado y ocurrir como extensas capas sedimentarias (Gaines *et al.*, 1997).

Son tres los minerales de caolín identificados entre los cuales tenemos caolinita, nacrita y haolisita (ver tabla 17).

Tabla 16. Minerales de caolín identificados en suelos periurbanos de Hermosillo.

Nombre del mineral	Formula química	Clave de muestra	DRX semi-cuantitativo
Caolinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	1PH	1.2%
		2VR	1.9%
		ES-3	1.1%
Nacrita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	5RG	2.0%
Haolisita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	5RG	2.2%

Los usos del caolín son muy numerosos y variados, llegando a cubrir más de un centenar de aplicaciones en productos industriales muy diferentes entre sí, los caolines son procesados previamente para incrementar las propiedades deseadas que residen en las partículas más finas. Un caolín comercial de alta calidad apenas deberá tener partículas superiores a $20\mu\text{m}$, y entre sus propiedades destacan su color blanco, inherencia ante agentes químicos, aparente ausencia de toxicidad, elevada refractariedad, poder absorbente y adherente (Maseda & Ortuño, 2014).

²⁹ Capa de revestimiento del estómago o duodeno.

³⁰ Término que hace referencia a la acción en un lugar original.

La utilización más común del caolín es en la industria del papel, utilizado como aditamento para mejorar la textura y coloración blanca, facilitar la impresión y suavizar el papel. Otro importante uso es en la cerámica, donde abarca diferentes sectores como azulejos, porcelanas eléctricas e industriales, representando entre un 25-60% en su composición. Otros usos comunes del caolín son: en la fibra de vidrio, pigmento blanco en pinturas, productos agroquímicos, pesticidas, cosméticos y sustituto de resinas, adhesivos y caucho. Los refractarios usados industrialmente, en especial los accesorios de enhornamiento³¹ consisten en materiales basados en cordierita, donde se utiliza un grado especial de caolín en la fabricación de catalizadores de cordierita para vehículos (Bartolomé, 1996).

Sal amoniacal, Syn. – (NH₄) Cl

El cloruro de amonio o sal amoniacal por lo general es un producto formado por sublimación alrededor de fumarolas volcánicas, depósitos de guano y vetas de carbón, sin embargo, esta ocurrencia no presenta una explicación lógica a la presencia de esta sal en el sitio (ver tabla 18).

Uno de los usos que se le da a este material es como fuente de compuesto de potasa, el cual es comúnmente utilizado como fertilizantes (Gaines *et al.*, 1997), donde muy posiblemente se encuentren vinculados a los amplios campos de cultivo cercanos a la costa de Hermosillo y ubicados al este de la ciudad (ver Figura 9).

Tabla 17. Mineral de sal amoniaco identificado en suelos periurbanos de Hermosillo.

Nombre del mineral	Formula química	Clave de muestra	DRX semi-cuantitativo
Sal amoniacal Syn.	(NH ₄) Cl	4CM	0.5%

Este mineral se ajusta a un patrón de sal amoniacal de carácter sintético, donde al parecer hace referencia a un producto de algún proceso industrial o fabricado mediante algún tratamiento químico no natural.

³¹ Hace referencia al ingreso del material a hornos para ser tratados por acción del calor.

En la industria farmacéutica, el cloruro de amonio es utilizado en la medicina veterinaria como componente activo para el tratamiento de determinadas neuralgias³² debido a su efecto analgésico y antiinflamatorio para el alivio prolongado del dolor (Luque-López, 2013), sin embargo, el efecto de este componente hacia la salud humana se desconoce.

Watanabeita – Cu₄As₂S₅

Este mineral es considerado como una sal sulfatada de cobre, pudiendo contener mínimas cantidades de plomo en variedades aun no reportadas, Este mineral fue identificado en una muestra de suelo ubicado en las periferias de la ciudad (ver Figura 9 y tabla 19), en donde posiblemente la ocurrencia de este mineral se asocia al cuarzo en vetas hidrotermales de la región. El patrón de DRX presenta una similitud a su forma de carácter sintético Cu₂₄As₁₂S₃₁ (Gaines *et al.*, 1997).

Tabla 18. Mineral de watanabeita identificado en suelos periurbanos de Hermosillo.

Nombre del mineral	Formula química	Clave de muestra	DRX semi-cuantitativo
Watanabeita	Cu ₄ As ₂ S ₅	5RG	2.8%

Existe escasa información sobre este mineral y sus procesos oxidativos en el ambiente, sin embargo, niveles altos de Cu son asociados a enfermedades de Alzheimer (Potgieter-Vermaak *et al.*, 2012), por lo cual resulta un compuesto de interés para la salud humana.

Cuando se ingiere sulfato de cobre, en cantidades del orden de gramos, se producen náuseas, vómito, diarrea, sudoración, hemólisis intravascular y posible fallo renal, en raras ocasiones, se observan convulsiones, coma y la muerte. La inhalación de polvos, humos o nieblas de sales de cobre como (watanabeita) pueden causar congestión nasal (mucosas) y ulceración con perforación del tabique nasal. Los humos desprendidos durante el calentamiento del cobre metálico pueden producir fiebre, náuseas, gastralgias y diarrea (Gunnar, 1998).

³² Dolor punzante muy intenso que se produce en un nervio dañado.

Magnesita – MgCO₃

Fueron identificadas tres especies distintas de magnesita (ver Tabla 19), de manera natural generalmente se deriva a partir de la alteración de las rocas que en su contenido presentan magnesio por acción de aguas que contienen ácido carbónico. La magnesita cristalizada se forma de varias maneras, como la reacción de sulfato de magnesio sobre aragonito durante la formación de depósitos salinos, también puede formarse por la acción gradual de aguas que contienen magnesio sobre cuerpos de calcita cambiando a esta, primero a dolomita y finalmente a magnesita (Gaines *et al.*, 1997).

Debido a la gran variedad de fuentes y usos de la magnesita, hacen uno de los minerales industriales más complejos desde el punto de vista comercial y de productos, basado en ciertas aplicaciones como fertilizantes agrícolas, industrias del vidrio y cerámicos, papel, plásticos, insecticidas y pesticidas, explosivos y tratamiento de aguas residuales (IGME, 2014).

Tabla 19. Minerales de magnesita identificados en polvo urbano de Hermosillo.

Nombre del mineral	Formula química	Clave de muestra	DRX semi-cuantitativo
Magnesita	MgCO ₃	3CL	1.5%
Magnesita ferrosa	(Mg, Fe)CO ₃	ES-28	0.7%
Magnesita Syn.	MgCO ₃	ES-26	0.8%

La magnesita sintética o también conocida como magnesita refractaria (calcinada a 1500-2000°C), es más estable a altas temperaturas y es ampliamente utilizada en industrias del acero y cementos (IGME, 2014), donde posiblemente estén vinculadas magnesita ferrosa y magnesita sintética identificadas en matriz de escuelas (ver Tabla 19).

Se han descrito casos de riesgo en la salud humana por tetania³³ de magnesio similares a la producida por deficiencia de calcio, dado que esta tetania es clínicamente similar a la causada por deficiencias de calcio solo se puede establecer determinando los niveles en sangre.

³³ Trastorno que causa contracciones involuntarias en músculos.

Estudios en animales evidenciaron que las esquiras de magnesio que penetran en la piel o en heridas profundas pueden provocar "tumores aeroformes" debido a la evolución del hidrogeno al introducir magnesio en los tejidos. Las heridas contaminadas con magnesio cicatrizan muy lentamente y en polvo fino podría ser irritante para los ojos y vías respiratorias, pero no es específicamente toxico (Gunnar, 1998).

Bayerita – Al (OH)₃

El aluminio es uno de los metales más empleados en construcción en competencia con los aceros, el aluminio es un metal que se oxida rápidamente con el aire y ambientes húmedos dando origen al hidróxido de aluminio también conocido como alúmina o bayerita, identificado en matriz de polvo sedimentado en calle (ver Tabla 20). En general, la alúmina es un excelente conductor de calor y electricidad, y en relación con su peso, es casi dos veces mejor que el cobre. Una de sus aplicaciones más comunes es en radiadores de calefacciones o disipadores de calor, en aleaciones con otros elementos (como Cu, Mg, Si, Zn y Mn) se aplica en la industria de la construcción, automóviles y latas (Cardarelli, 2008; Pancorbo, 2011).

Tabla 20. Mineral de bayerita identificado en polvo urbano de Hermosillo.

Nombre del mineral	Formula química	Clave de muestra	DRX semi-cuantitativo
Bayerita	Al(OH) ₃	CB-27	5.5%

Estudios sobre el efecto para la salud humana exposiciones elevadas (100mg/m³) de óxidos de aluminio demuestran que exposición durante más de veinte años de exposición puede desarrollar alteraciones pulmonares, que se caracterizan por cambios restrictivos leves y predominantemente asintomáticos en la función pulmonar (Gunnar, 1998).

Plattnerita – PbO₂

Es un dióxido de plomo que pertenece al grupo del rutilo, aparece de manera natural formándose por alteración hidrotermal y posteriormente alterado en intemperie típicamente en climas áridos coincidiendo con el clima de la región. Inclusive su ocurrencia se vincula a la alteración de otros productos en base al plomo como

pigmentos en pinturas. Entre los usos que se le da al mineral plattnerita se incluye en la industria de las pinturas, utilizada para las coloraciones café y negro (Eastaugh *et al.*, 2008), este mineral fue identificado en matriz de calle y de manera sintética (ver Tabla 21), donde posiblemente esté vinculado a pigmentos de pinturas de edificios aledaños al lugar de colecta de muestra.

Tabla 21. Mineral de plattnerita identificado en polvo urbano de Hermosillo.

Nombre del mineral	Formula química	Clave de muestra	DRX semi-cuantitativo
Plattnerita, Syn.	PbO ₂	CB-16	0.1%

Otro uso para este mineral de forma sintética es en la industria electroquímica, específicamente en baterías ácidas de plomo (Cardarelli, 2008), las cuales son comúnmente utilizadas en la mayoría de los automóviles.

Crocoita – Pb (CrO₄)

El mineral crocoita naturalmente ocurre como fase secundaria en sistemas hidrotermales como consecuencia de fluidos ricos en cromo de rocas ultramáficas (Frost, 2004). Sin embargo, el principal uso para este mineral es en la industria de las pinturas y pigmentos, utilizado como material nano-estructurado en pigmento amarillo de pinturas en base de plomo (Jeffs & Jones, 1999), el cual es en la actualidad utilizado en pinturas de tráfico en calles, apuntando hacia esta fuente el origen de crocoita en el polvo urbano de matriz de calle y escuela (ver Tabla 22). Otros pigmentos obtenidos a partir de este material son el naranja, rojo y verde de cromo (Gunnar, 1998).

Tabla 22. Mineral de crocoita identificado en polvo urbano de Hermosillo.

Nombre del mineral	Formula química	Clave de muestra	DRX semi-cuantitativo
Crocoita	Pb(CrO ₄)	ES-12	1.8%
		CB-19	1.2%

El consumo industrial del plomo va en aumento y ha sido utilizado por otras industrias como la del plástico, por lo cual son muchas las exposiciones que pueden dar lugar a una intoxicación por plomo. La principal vía de entrada al organismo es por el aparato respiratorio, mientras que el grado de absorción depende de la proporción en forma de partículas de un tamaño inferior a 5 micras y del volumen/minuto respirado. Una vez en el organismo, el plomo no se metaboliza, sino que se absorbe, se distribuye y excreta directamente, la velocidad de absorción depende de la fisiografía de la persona expuesta (edad y estado nutricional), la absorción en un adulto está comprendida entre 10-15%, mientras que los niños y mujeres embarazadas aumentan hasta en un 50%. Una vez en la sangre, el plomo se distribuye en tejido blando, tejido mineralizado y sangre, y deberán transcurrir varios meses o incluso años para disminuir los niveles de plomo en sangre (Gunnar, 1998).

En niños se ha reportado deficiencias neurológicas, siendo el destino más sensible por intoxicación. También se ha observado una disminución en la agudeza auditiva y velocidad de conducción nerviosa, inhibidor para la producción de hemoglobina, anemia, hipertensión y efectos endocrinos que impiden el crecimiento y desarrollo de huesos y dientes (Gunnar, 1998).

Lopezita – $K_2Cr_2O_7$

La lopezita es un mineral de coloración rojo-naranja generalmente utilizado en la manufacturación de pigmentos y pinturas, es considerado altamente corrosivo y como un fuerte agente oxidante donde es utilizado en la fabricación de productos químicos orgánicos. Este mineral también se utiliza en pirotecnia, fósforos, curtido de pieles, estampados en telas, tratamiento de madera, impermeabilizantes, baterías secas y fármacos (NCBI, 2017). Debido al amplio campo de utilización y la identificación de este mineral dentro de las tres diferentes matrices analizadas (ver Tabla 23), resulta complicada una vinculación hacia una fuente de origen específica, por tanto se desconoce su entendimiento de la proveniencia de este material.

Tabla 23. Minerales de lopezita identificados en polvo urbano de Hermosillo.

Nombre del mineral	Formula química	Clave de muestra	DRX semi-cuantitativo
Lopezita	$K_2Cr_2O_7$	CB-16	12.6%
Lopezita, syn	$K_2Cr_2^{+6}O_7$	4CM	12.9%
		2ES-09	5.4%

Las implicaciones a la salud por este mineral se vinculan con la dificultad de absorción en el aparato digestivo y en combinación con proteínas en capas superficiales de la piel, formando complejos estables. Los efectos nocivos se observan principalmente en la piel y el aparato respiratorio, provocando úlceras, dermatitis, efectos respiratorios agudos (aparición de estornudos, rinorrea³⁴, lesiones del tabique nasal, enrojecimiento de garganta y crisis asmáticas típicas) y efectos cancerígenos en pulmón, senos nasales y tracto digestivo (Gunnar, 1998; NCBI, 2017).

Perovskita – Ca (TiO₃)

La perovskita es utilizada como pigmento blanco en pinturas y barnices, inclusive es utilizada en tapicería, electrónica, fabricación de adhesivos, tejados, plásticos y cosméticos, también se emplea como componente de esmaltes y vitrales en cerámicos y agente compresor de fibra de vidrio. Más sin embargo, el principal uso de este material procede del aglomerado con alquitrán, utilizado en el sellado de los firmes y superficies pavimentadas, la cual cubre la mayor parte de calles urbanas, siendo este la principal fuente o foco emisor de este mineral identificado en matriz de polvo de calle y escuela (ver Tabla 24).

Tabla 24. Mineral de perovskita identificado en polvo urbano de Hermosillo.

Nombre del mineral	Formula química	Clave de muestra	DRX semi-cuantitativo
Perovskita, Syn.	$Ca(TiO_3)$	ES-19	0.2%
		CB-21	1.4%

Experimentos en animales han demostrado que el polvo de titanio es ligeramente tóxico. Sin embargo, este material parece potenciar la capacidad fibrogénica del cuarzo durante

³⁴ Flujo abundante de mucosidad nasal.

la exposición combinada. Una exposición prolongada a este polvo puede provocar formas leves de enfermedad pulmonar crónica (fibrosis) asemejándose a silicosis y una elevada incidencia de bronquitis crónica, caracterizándose por una alteración de la respiración pulmonar, capacidad ventilatoria y una disminución de la alcalinidad de la sangre (Gunnar, 1998).

Urea – CO (NH₂)₂

La urea es químicamente una molécula orgánica, y su uso en suelo es mucho más amplio que un mineral utilizado en la agricultura como fertilizante (Geisseler *et al.*, 2016). El uso de urea a nivel mundial ha incrementado más de 100 veces que en las pasadas 4 décadas y se constituye como más del 50% del fertilizante en base a nitrógeno utilizado a nivel mundial (Gilbert *et al.*, 2006). Otras aplicaciones del uso de urea en productos incluyen sistemas de catalizadores reductores de NO₂, explosivos, medicamentos farmacéuticos, cosméticos, modificadores de viscosidad en el papel, deshielo en autopistas, agente saborizante, humectante y deshidratante, productos de limpieza, aditivo en la formulación de alimentos, agente adhesivo en maderas y repelente contra insectos (US-EPA, 2011). Este mineral fue identificado en matriz de polvo sedimentado en calle y ajustándose a un patrón de carácter sintético (ver Tabla 25), el cual hace referencia a un sub producto de origen antropogénico.

Tabla 25. Mineral de Urea identificado en polvo urbano de Hermosillo.

Nombre del mineral	Formula química	Clave de muestra	DRX semi-cuantitativo
Urea, Syn.	CO(NH ₂) ₂	CB-16	3.9%

La urea en el cuerpo humano es eliminada por el sistema urinario, aproximadamente la mitad del total de sólidos urinarios (aproximadamente entre 20-25g de urea son secretados en orina humana por día). Un elevado nivel de urea puede asociarse a enfermedades cardíacas, obstrucciones urinarias, desorden gastrointestinal y enfermedades renales, inclusive a niveles por debajo de lo normal es asociada a indicadores de deshidratación, hambre y estado de shock. Muy pocos estudios se han

realizado asentando a vías de absorción, distribución, metabolismo y excreción. Sin embargo, la principal ruta de exposición de la urea es por vía oral donde es absorbida dentro del torrente sanguíneo por tracto gástrico, ningún estudio ha sido reportado por vías de absorción mediante su inhalación (US-EPA, 2011).

El mineral osbornita identificado en varias muestras (ver Tabla 26), se asocia a la Urea (como fuente de nitrato), para la producción de hidracina, este compuesto es utilizado principalmente para la manufactura de sustancias químicas agrícolas (agroquímicos), agentes inhibidores de corrosión, productos farmacéuticos y combustible de vehículos aéreos como combustibles de propulsión en aviones y cohetes, ampliamente utilizada por la nasa y la U.S. Army (WHO, 1991), coincidiendo en el área de estudio con la muestra de clave 2ES-12 de matriz de escuela (ver Figura 7) la cual se encuentra próximo con áreas aledañas al aeropuerto, la base aérea militar mexicana y los amplios campos agrícolas de la costa de Hermosillo donde posiblemente sea el foco emisor de este mineral.

Tabla 26. Mineral de Osbornita identificado en polvo urbano de Hermosillo.

Nombre del mineral	Formula química	Clave de muestra	DRX semi-cuantitativo
Osbornita, Syn.	TiN	CB-16	1.2%
		CB-21	1.3%
		2ES-12	0.6%

Zinc - Zn

Trabajos previos han encontrado la fuente principal de zinc de material particulado en la atmósfera en cual la procedencia principalmente se deriva de incineraciones, producción de metal, combustión de combustibles fósiles y fuentes de tráfico vehicular donde ZnO es la fase dominante y esta es emitida por el proceso de rodamiento y deterioro de llantas de automóviles aclarando el motivo por el cual solo fue identificado en matriz de polvo sedimentado en calle (ver Tabla 27), e inclusive este mineral ha sido identificado en emisiones de procesos de fundición de metal en forma de ZnS (Ochoa-Gonzales *et al.*, 2016).

Tabla 27. Zinc identificado en polvo urbano de Hermosillo.

Nombre	Formula química	Clave de muestra	DRX semi-cuantitativo
Zinc, Syn.	Zn	CB-19	0.4%
		CB-21	0.5%
		CB-27	0.7%

La principal propiedad del zinc para proteger metales ferrosos de la corrosión reside en que el zinc actúa como ánodo con el hierro y así, los agentes corrosivos atacan preferentemente al zinc y protege los demás metales alargando la vida útil de tres a seis años más, tal es el caso de las láminas galvanizadas utilizadas ampliamente en construcción. Las aleaciones del zinc con otros metales como los identificados en este análisis (ver Tabla 28), son utilizados para la fabricación de piezas automotrices, herramientas de maquinaria, ornamentas y juguetes. Cuando se alea con cobre (Ferrokersterita zinciana) se obtiene el importante grupo de aleaciones denominadas bronces o latón (Gunnar, 1998).

Tabla 28. Compuestos con contenidos de Zn identificado en polvo urbano de Hermosillo.

Nombre del compuesto	Formula química	Clave de muestra	DRX semi-cuantitativo
Esfalerita ferrosa, Syn.	$Zn_{586}Fe_{414}S$	5RG	0.3%
Franklinita ferrosa, Syn.	$(Zn_{35}Fe_{65})Fe_2O_4$	CB-16	0.7%
Wurtzita ferrosa, Syn.	$Zn_{566}Fe_{434}S$	CB-21	1.5%
Genthelvita	$Zn_8Be_6Si_6O_{24}S_2$ $CuFZnSn_2O_8$	ES-09	1.5%
Ferrokersterita zinciana, Syn.		2ES-25	4.2%

Antarcticita – $CaCl_2 \cdot 6H_2O$

Aunque la ocurrencia de este mineral se vincula a climas extremadamente fríos y secos como de la Antártica donde fue primeramente descrita, su formación se asocia a otros minerales como la halita, yeso o celestina. Formándose como inclusiones fluidas de sales precipitadas del yeso relleno de cavidades. Aunque la antarcticita fue

inicialmente reportada en lagos salinos de los valles secos del polo sur, también se ha reportado en el Desierto de Mojave en California (Rosen, 1989, 1991).

Este mineral se encuentra sobre todo como sub-producto de la degradación de morteros de yeso y cemento por el ataque de soluciones sulfatadas en muros donde se utilizaron este tipo de aglomerantes (Pancorbo, 2011), por lo que el entendimiento de la presencia de este mineral en matriz de polvo de escuela (ver Tabla 29) indican un vínculo a materiales de construcción en los muros de las escuelas de los cuales deriva la presencia de este mineral.

Tabla 29. Mineral de antarcicita identificado en polvo urbano de Hermosillo.

Nombre del mineral	Formula química	Clave de muestra	DRX semi-cuantitativo
Antarcicita, Syn.	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	2ES-09	1.0%

Bernalita – $\text{Fe}^{+3}(\text{OH})_3$

La bernalita es uno de los 16 óxidos de hierro que se conocen, donde muy probablemente se derive de metales oxidados o de su estado natural como hematita, la cual se identificó de manera común en gran parte de las muestras analizadas en las matrices de suelo y polvo sedimentado en escuelas (ver Tabla 30).

Algunos usos donde se utiliza este mineral es como pigmentación verde (Eastaugh *et al.*, 2008), estructuras de acero en construcción, carrocería y piezas de automóviles, también se emplea en la fundición y aleación con otros metales.

Tabla 30. Mineral de bernalita identificado en polvo urbano de Hermosillo.

Nombre del mineral	Formula química	Clave de muestra	DRX semi-cuantitativo
Bernalita	$\text{Fe}^{+3}(\text{OH})_3$	2ES-19	5.3%
		ES-05	5.5%
		5RG	3.2%

Wustita – FeO

La formación de este mineral es un sub-producto de alteración de otros minerales de hierro a altas temperaturas en ambiente reductores donde su ocurrencia

deriva principalmente de escoria antropogénica y meteoritos, donde este mineral coincide en la muestra de clave 2ES-05 con las recientes actividades de instalación de herrería y soldadura realizadas tiempo antes de la colecta de muestra, donde la escoria derivada de estos materiales pudo haber sido arrojada al suelo. Incluso este mineral también fue identificado en matriz de calle (ver Tabla 31), donde se desconoce su procedencia.

Tabla 31. Mineral de wustita identificado en polvo urbano de Hermosillo.

Nombre del mineral	Formula química	Clave de muestra	DRX semi-cuantitativo
Wustita	FeO	2ES-05	0.2%
Wustita, Syn.	FeO	CB-19	0.7%

Existen riesgos al inhalar polvo de hierro, este es un irritante local para los pulmones y el tracto gastrointestinal, una prolongada exposición de hierro y otros metales puede afectar la función pulmonar. Los experimentos en animales indican que el polvo de óxido de hierro podría actuar como sustancia “co-cancerígena”, potenciando el desarrollo de cáncer cuando se combina simultáneamente con la exposición a sustancias cancerígenas (Gunnar, 1998).

Es importante resaltar que el proceso reductor de este mineral puede vincularse a la formación a fases ferromagnéticas como cementita (Esguerra *et al.*, 2009), la cual fue identificada en la misma muestra de clave 2ES-05 en matriz de polvo sedimentado en escuela, donde se identificó wustita (ver Tabla 31 y Tabla 32).

Tabla 32. Mineral de cementita identificado en polvo urbano de Hermosillo.

Nombre del mineral	Formula química	Clave de muestra	DRX semi-cuantitativo
Cementita, Syn.	Fe ₃ C	2ES-05	0.3%

Digenita – Cu_{1.8}S

Contenidos en cobre ha sido vinculado a múltiples orígenes, como fundiciones, combustión de aceite, humo de madera y balatas en el sistema de frenado en

automóviles (Ochoa-Gonzales *et al.*, 2016). Potgieter-Vermaark *et al.*, 2012, asocia niveles altos de Cu en cuerpo humano a enfermedades de Alzheimer.

El mineral digenita es un sulfuro de cobre utilizado en la protección de superficies metálicas como protección contra la corrosión ampliamente utilizado en la ingeniería de los materiales (Liu *et al.*, 2015), este mineral muy posiblemente se encuentre vinculado a los procesos de fricción y desgaste de balatas que ocurre en los sistemas de frenado de automóviles. Cabe resaltar que este mineral fue identificado en polvo urbano en matriz de escuelas (ver Tabla 33) donde su ubicación se caracteriza por colindar con calles de alto tráfico de vehículos de carga pesada y transporte público, en los cuales el proceso de fricción y desgaste de balatas es aún mayor, aunando la existencia de reductores de velocidad forzando a estos vehículos a realizar un frenado.

Tabla 33. Mineral de digenita identificado en polvo urbano de Hermosillo.

Nombre del mineral	Formula química	Clave de muestra	DRX semi-cuantitativo
Digenita, Syn.	Cu _{1.8} S	2ES-19 ES-28	0.9% 0.6%

Las nano-partículas de sulfuro de cobre como digenita son ampliamente usadas en los campos de baterías de litio, materiales de electrodos plasmonicos, sensores y celdas solares (Senthilkumar & Babu., 2015).

Circón – ZrSiO₄

El circonio en la industria es utilizado como arena de fundición, abrasivo, componente en refractarios y cerámicos. También se utiliza en la fabricación de hierro fundido y aceros, aplicado a lámparas exteriores de iluminación, pirotecnia, fundentes de soldadura y pigmento para plásticos. El metal macizo se emplea en revestimientos de reacción para procesos químicos, aunque el circonio no es del todo considerado fisiográficamente inerte, en seres humanos la tolerancia parece mucho mayor que los demás metales pesados, inclusive se ha recomendado y utilizado para el tratamiento de intoxicación por plutonio, dermatitis de Rhus y desodorante corporal. Los efectos por

inhalación de compuestos de circonio han demostrado que una breve exposición produce abscesos y granulomas³⁵ peri-bronquiales y neumonía lobular (Gunnar, 1998).

El circón también es utilizado ampliamente en catalizadores de automóviles como aditivo en los monolitos de cordierita aumentando su densidad (Behnammou *et al.*, 2016), coincidiendo su identificación con las mismas muestras donde fue identificada cordierita en polvo urbano (ver Tabla 15 y Tabla 34).

Tabla 34. Mineral de circón identificado en polvo urbano de Hermosillo.

Nombre del mineral	Formula química	Clave de muestra	DRX semi-cuantitativo
Circón	ZrSiO ₄	2ES-09	0.8%
		2ES-31	0.7%

³⁵ Masa de células inmunes formada para defender al organismo de factores irritantes.

8. Conclusiones y recomendaciones

Se concluye que los tres equipos utilizados proporcionan información útil a diversas escalas: los equipos como el PANalytical y el Bruker Advance permiten la identificación de fases minerales complejas ya que proporcionan mayor detalle en los espectros o difractogramas. En el caso del equipo Olympus Terra, las limitaciones son menores cuando se busca la identificación de mineralogías que aparecen en mayor abundancia.

La variedad de especies minerales aumentó en el siguiente orden: polvo colectado en calles > polvo en escuelas después de lluvias > polvo en escuelas antes de lluvias > suelo. Esto refleja la influencia de la escorrentía superficial en el transporte, acumulación y suspensión de minerales de origen antrópico en los bajos topográficos de las cuencas estudiadas. Estos materiales se integran al polvo y depositan en el interior de las zonas de juegos de las escuelas representando una vía de exposición de contaminantes emergentes a niños. El análisis textural de los suelos indica que una fracción importante de los mismos es susceptible a suspenderse y convertirse en un medio de transporte para los contaminantes emergentes detectados.

Los principales grupos de especies minerales de origen antrópico se asocian a: desgaste vehicular, deterioro de materiales de construcción y productos agroquímicos. Todos estos minerales representan contaminantes emergentes que requieren estudios futuros para comprender los efectos a la salud humana, animal/plantas y efectos en los ecosistemas, por lo que se recomienda continuar con estudios enfocados a la evaluación de la toxicidad de los mismos.

La combinación de técnicas analíticas de uso común en estudios geológicos como lo son la DRX y la FRXP representan un potencial importante en la detección de contaminantes emergentes con estructuras cristalinas y composición iguales a minerales geogénicos y de los cuales no se cuenta con información de metodologías de detección rápida.

Anexo I

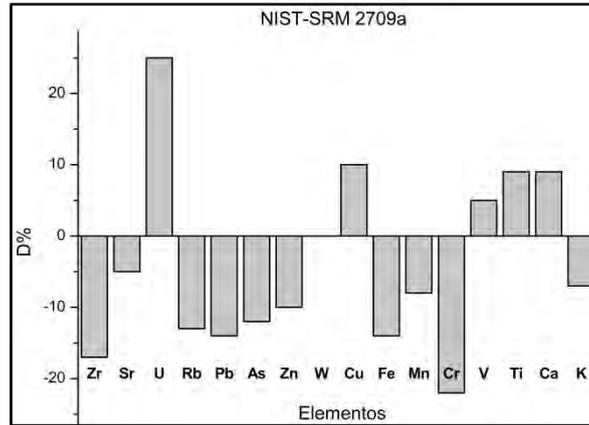
“Cadena de custodia”

CADENA DE CUSTODIA			
Proyecto: CONACYT 167676; Caracterización espacio-temporal de trazadores geoquímicos en partículas para identificación de fuentes geogénicas y de tráfico en zonas áridas y relación con biomarcadores de daño genotóxico en Hermosillo, Sonora.			
Responsable de muestreo			
Datos de identificación del sitio			
Clave de muestra			
Fecha y hora de recolección de muestra			
Lugar de almacenamiento de muestra			
Análisis a realizar			
Personas que realizaron el muestreo			
Ubicación del sitio (dirección)			
Nombre de la escuela			
Nombre del director (a)			
Teléfono y correo			
Características del sitio		Materiales de limpieza utilizados en la zona :	
Vegetación		Sopladora	
Animales		Mapeador o trapeador	
Edificación e infraestructura		Diésel, gasolina, petróleo	
Materiales Externos de relleno		Escobas	
Actividades ajenas al proceso de contaminación que pudieran influir en la calidad de muestra		Detergentes químicos	
		Otros (especifique)	
Características de la muestra:		Muestra:	Peso:
Color		Total	325 (45µm)
Textura		Total seca	635 (20µm)
Presencia de humedad		Fracción Total > 18 (1mm)	< 635
Presencia de hojarasca		35 (500µm)	Numero de bolsas:
Otros (especificar):		60 (250µm)	Observaciones:
		120/140 (125µm)	
		230 (63µm)	
Personas participantes en operaciones de cada etapa de la muestra:		Actividad:	Fecha:

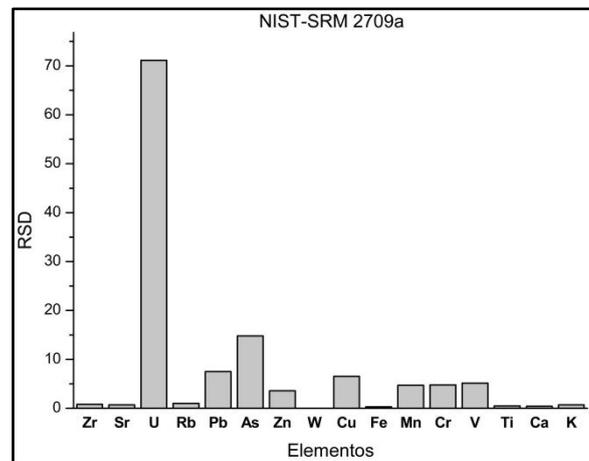
Anexo 1. Cadena de custodia elaborada a partir de la NMX-AA-132-SCFI, 2006.

Anexo II

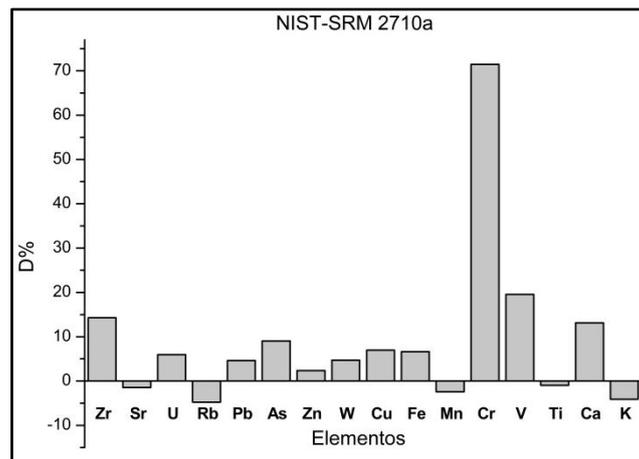
“Gráficos de barras de recuperación para materiales de estándares certificados NIST por FRX”



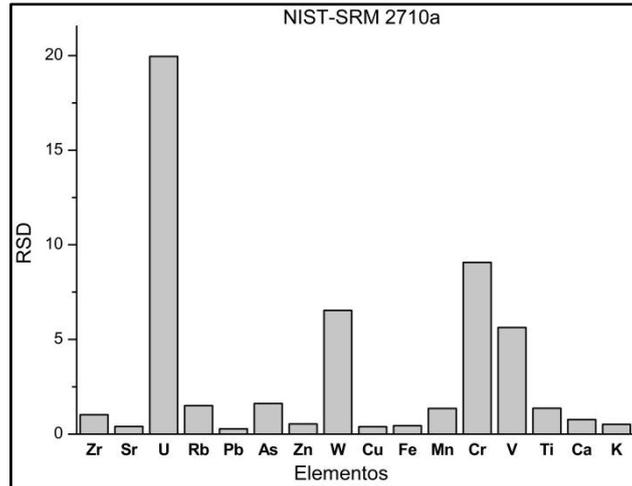
Anexo 2. Gráfico de exactitud (%D) para valores recuperados del NIST 2709a en equipo portátil de fluorescencia de rayos x *Thermo Scientific Niton* modelo *FXL*.



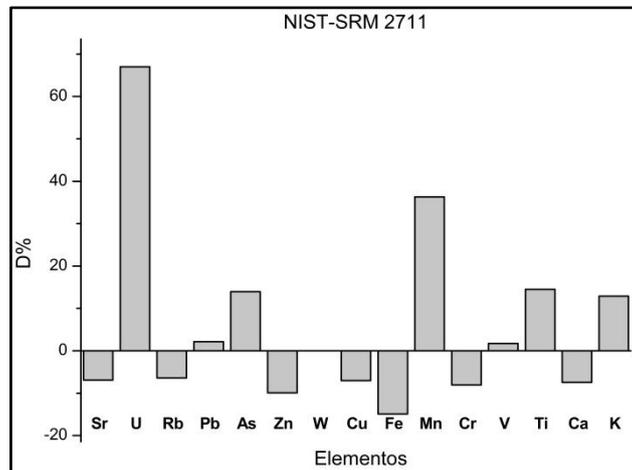
Anexo 3. Gráfico de precisión (%RSD) para valores recuperados del NIST 2709a en equipo portátil de fluorescencia de rayos x *Thermo Scientific Niton* modelo *FXL*.



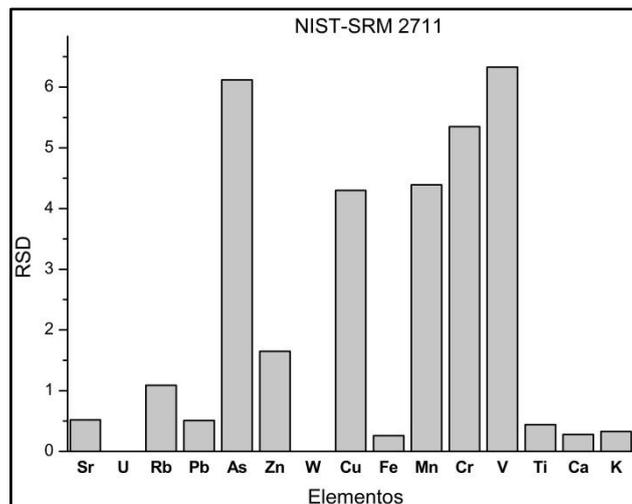
Anexo 4. Gráfico de exactitud (%D) para valores recuperados del NIST 2710a en equipo portátil de fluorescencia de rayos x *Thermo Scientific Niton* modelo *FXL*.



Anexo 5. Gráfico de precisión (%RSD) para valores recuperados del NIST 2710a en equipo portátil de fluorescencia de rayos x *Thermo Scientific Niton* modelo *FXL*.



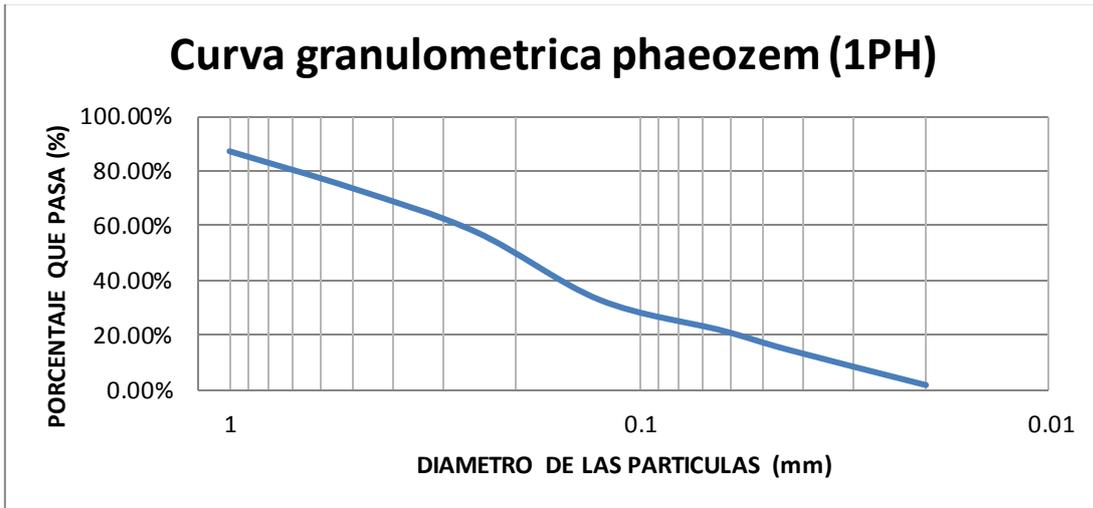
Anexo 6. Gráfico de exactitud (%D) para valores recuperados del NIST 2711 en equipo portátil de fluorescencia de rayos x *Thermo Scientific Niton* modelo *FXL*.



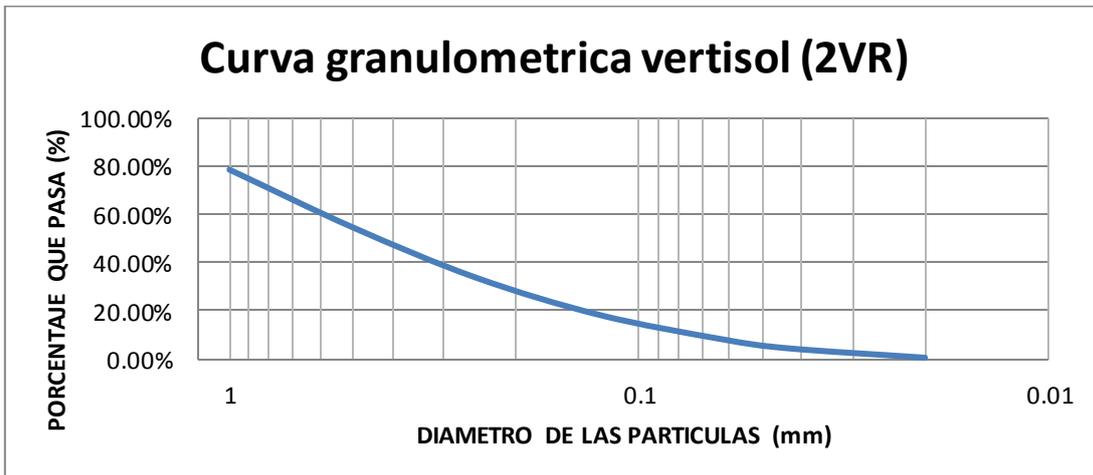
Anexo 7. Gráfico de precisión (%RSD) para valores recuperados del NIST 2711 en equipo portátil de fluorescencia de rayos x *Thermo Scientific Niton* modelo *FXL*.

Anexo III

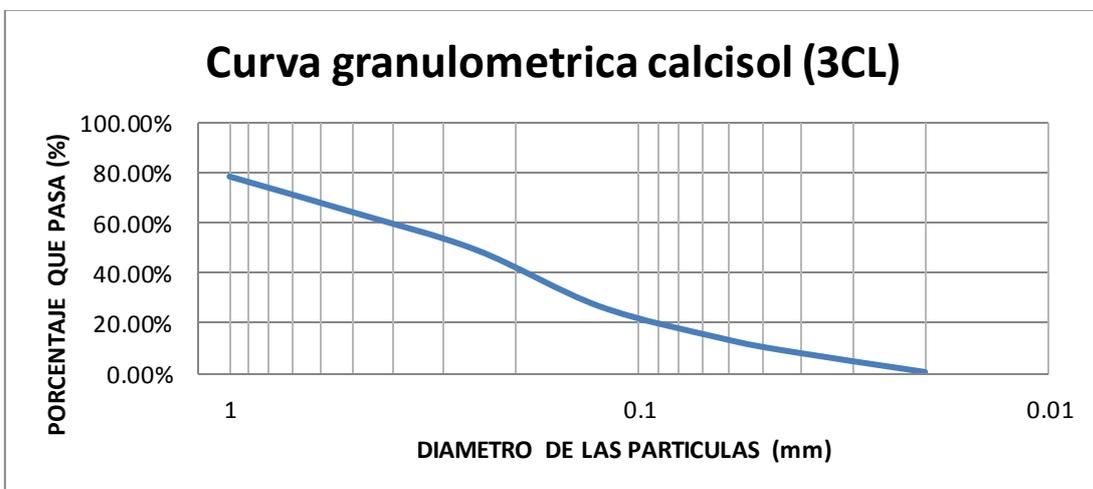
“Curvas granulométricas para suelos”



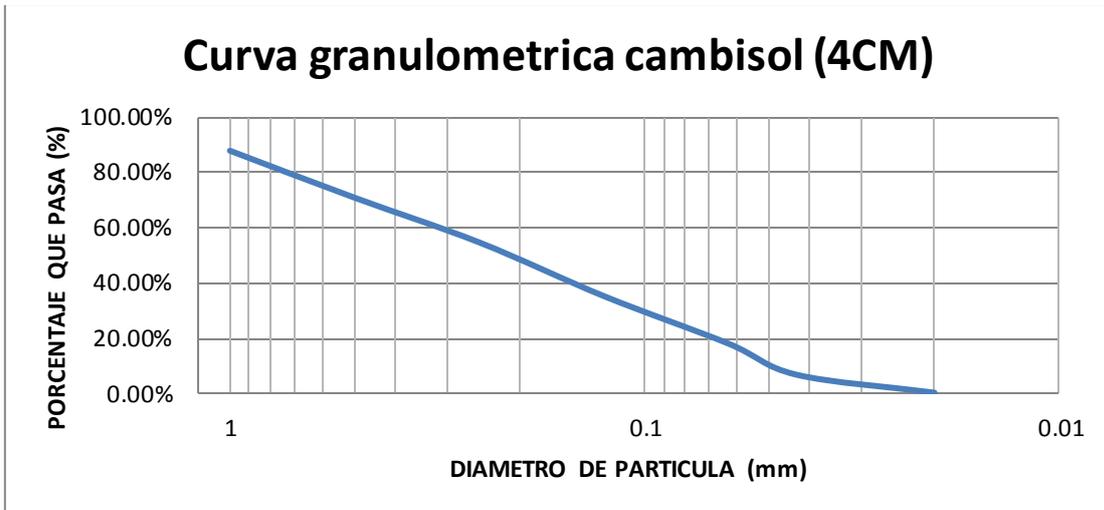
Anexo 8. Curva granulométrica para suelo 1PH.



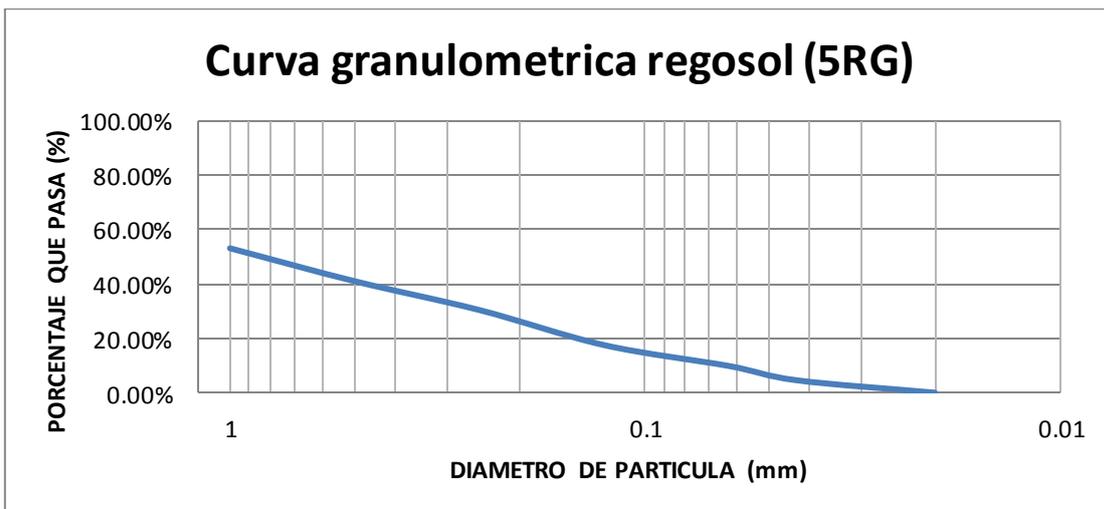
Anexo 9. Curva granulométrica para suelo 2VR.



Anexo 10. Curva granulométrica para suelo 3CL.



Anexo 11. Curva granulométrica para suelo 4CM.

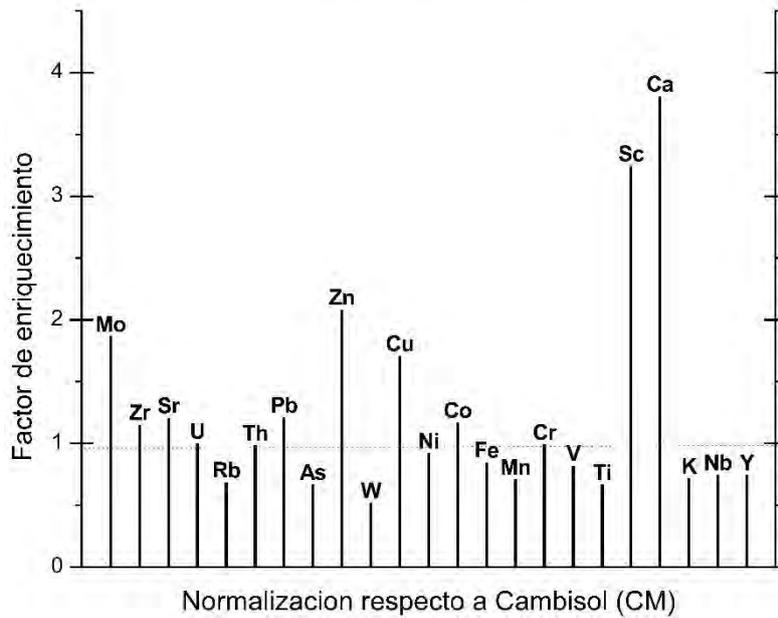


Anexo 12. Curva granulométrica para suelo 5RG.

Anexo IV

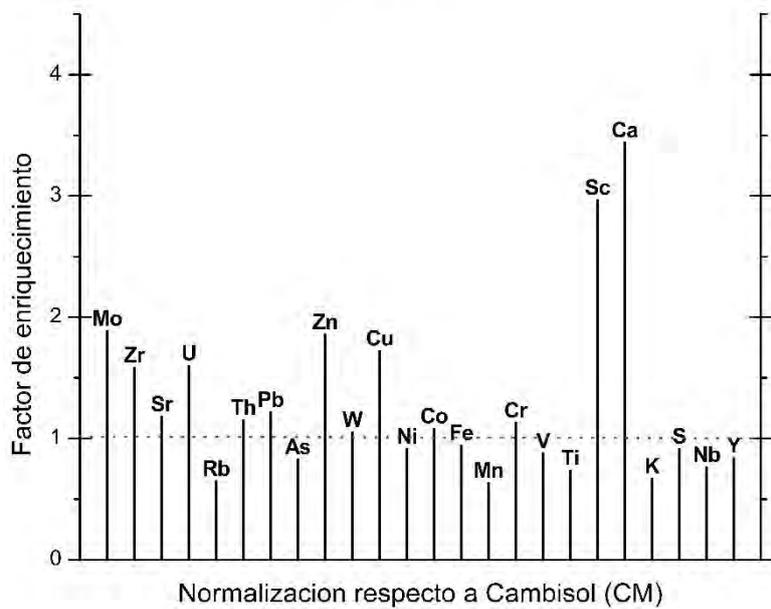
“Normalización químico-elemental respecto a fondo geoquímico”

ES-03 (635 mallas)



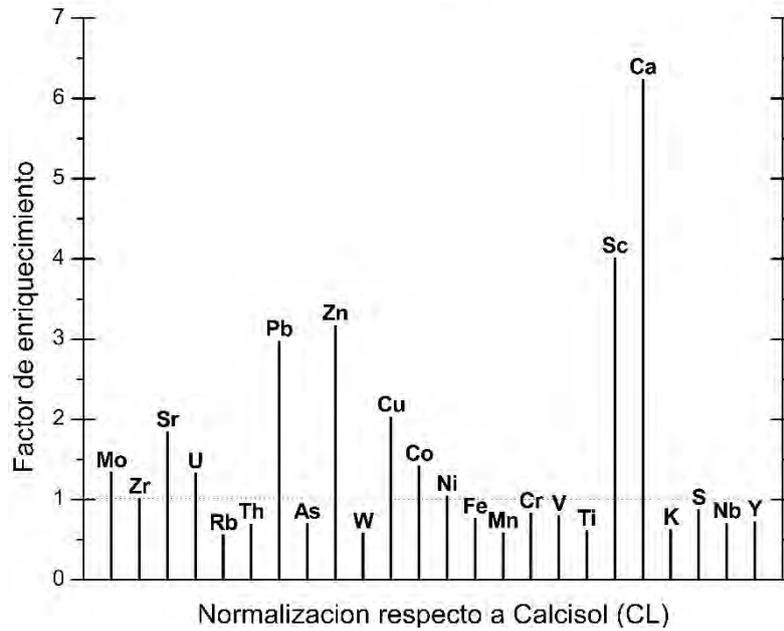
Anexo 13. Normalización respecto a cambisol para la muestra ES-03 a 20µm.

2ES-03 (635 mallas)



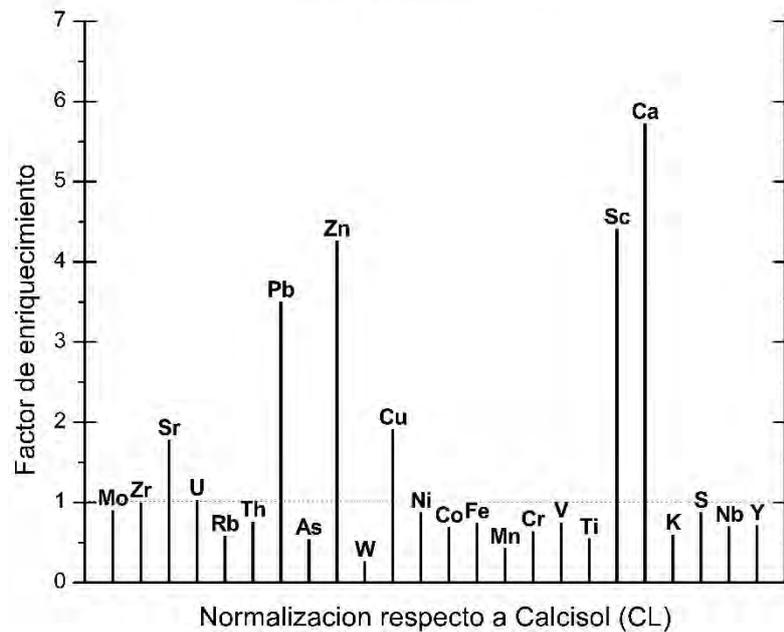
Anexo 14. Normalización respecto a Cambisol para la muestra 2ES-03 a 20µm.

ES-05 (635 mallas)



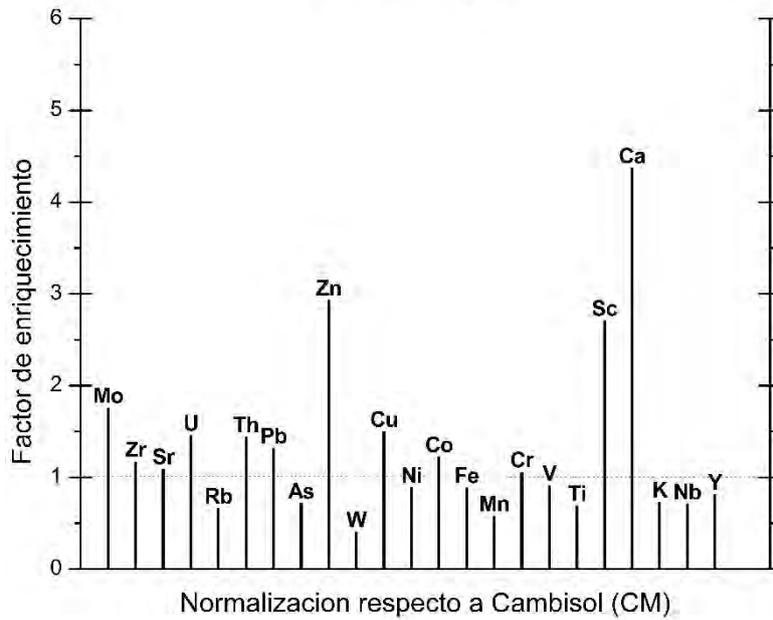
Anexo 15. Normalización respecto a Calcisol para la muestra ES-05 a 20 μ m.

2ES-05 (635 mallas)



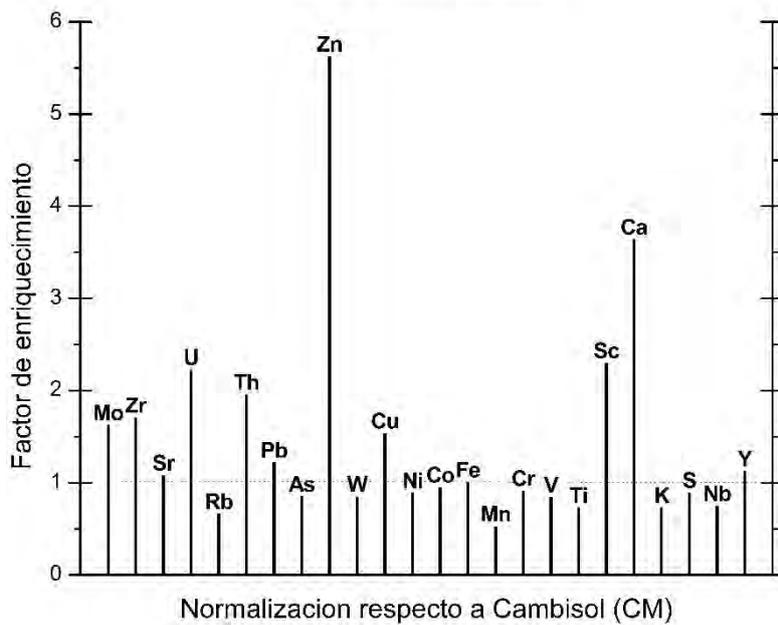
Anexo 16. Normalización respecto a Calcisol para la muestra 2ES-05 a 20 μ m.

ES-09 (635 mallas)



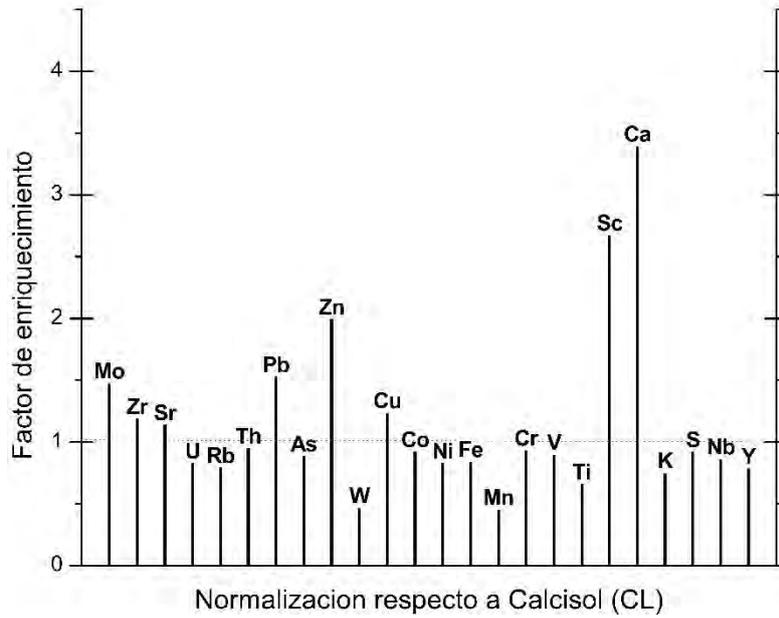
Anexo 17. Normalización respecto a Cambisol para la muestra ES-09 a 20 μ m.

2ES-09 (635 mallas)



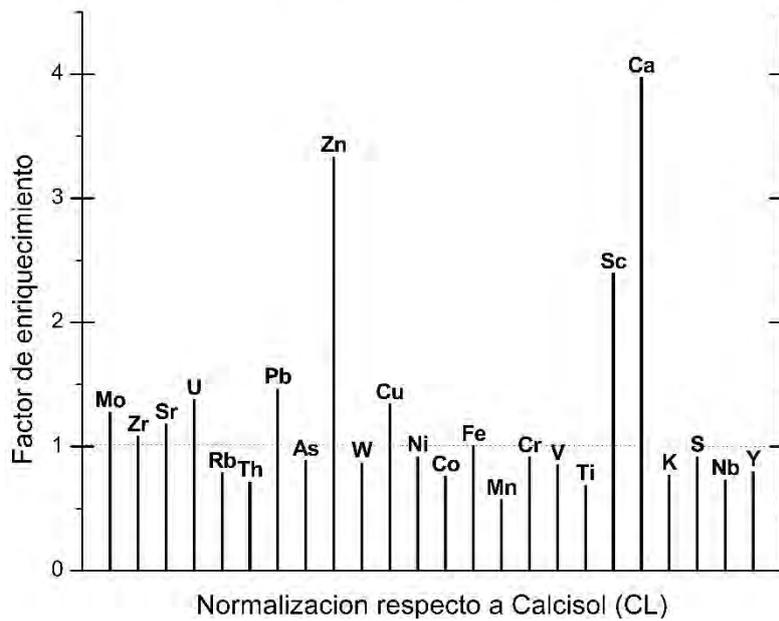
Anexo 18. Normalización respecto a Cambisol para la muestra 2ES-09 a 20 μ m.

ES-12 (635 mallas)



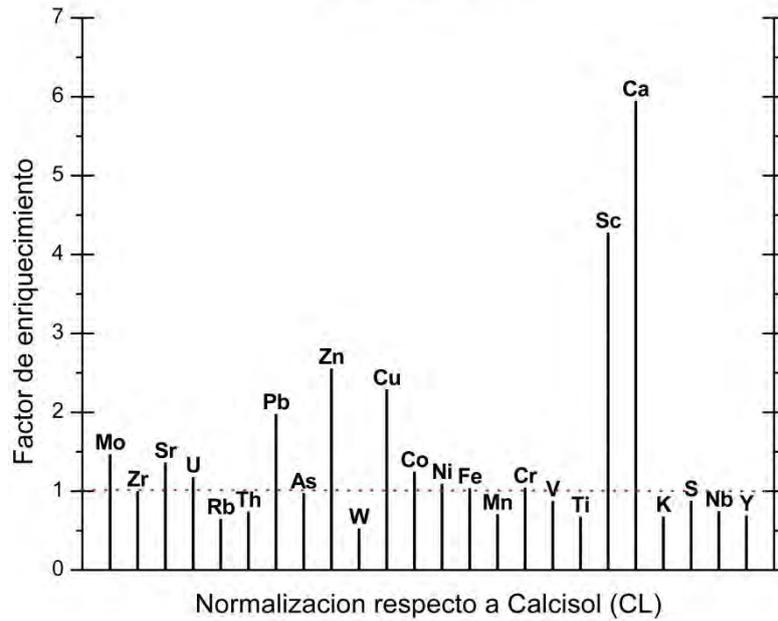
Anexo 19. Normalización respecto a Calcisol para la muestra ES-12 a 20 μ m.

2ES-12 (635 mallas)



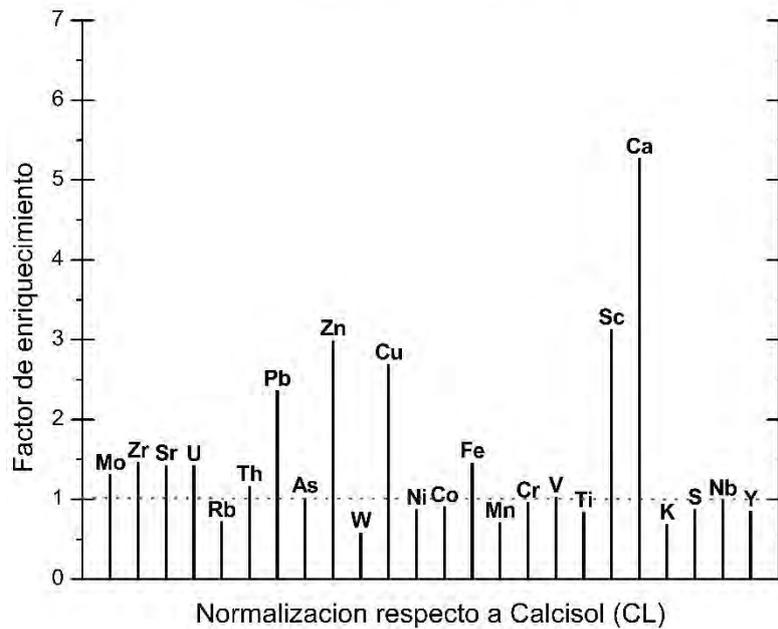
Anexo 20. Normalización respecto a Calcisol para la muestra 2ES-12 a 20 μ m.

ES-14 (635 mallas)

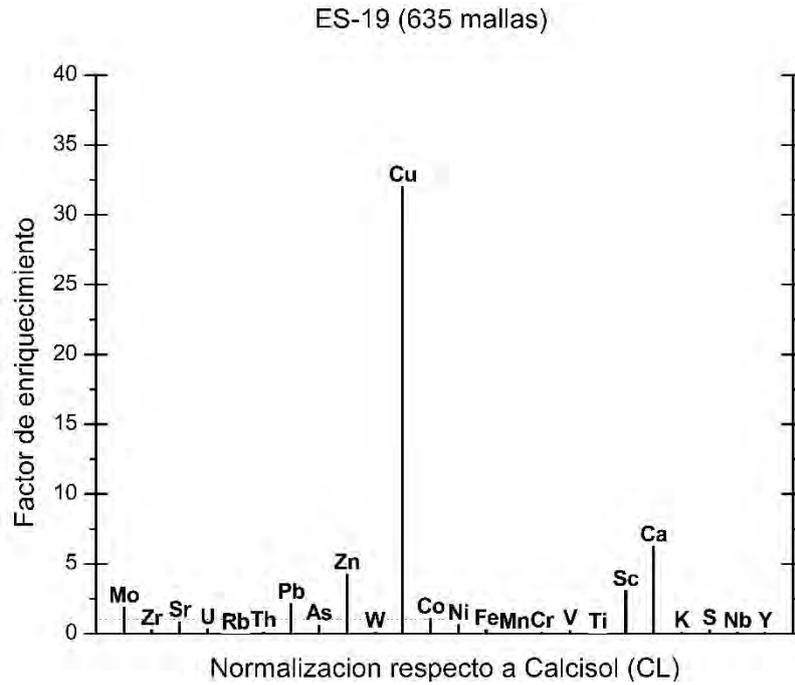


Anexo 21. Normalización respecto a Calcisol para la muestra ES-14 a 20 μ m.

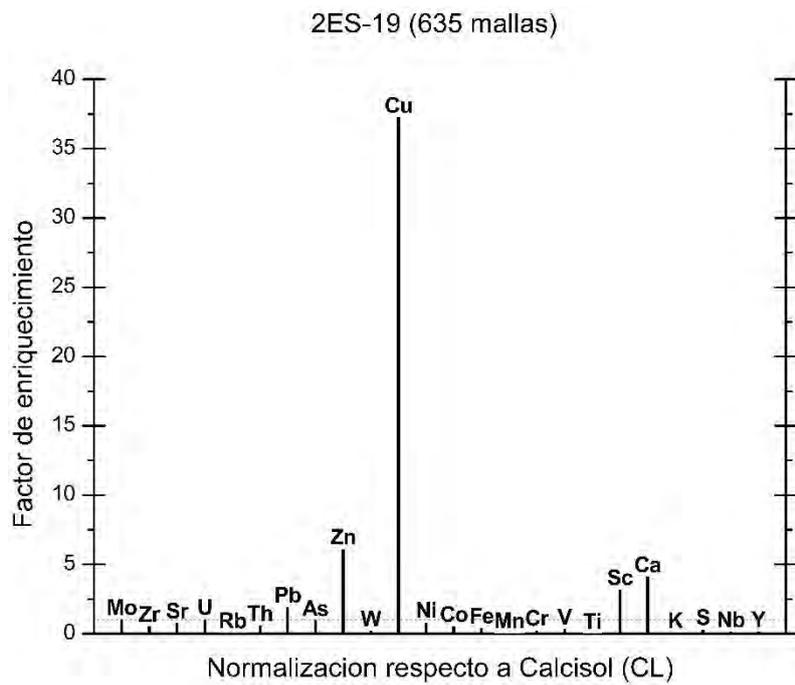
2ES-14 (635 mallas)



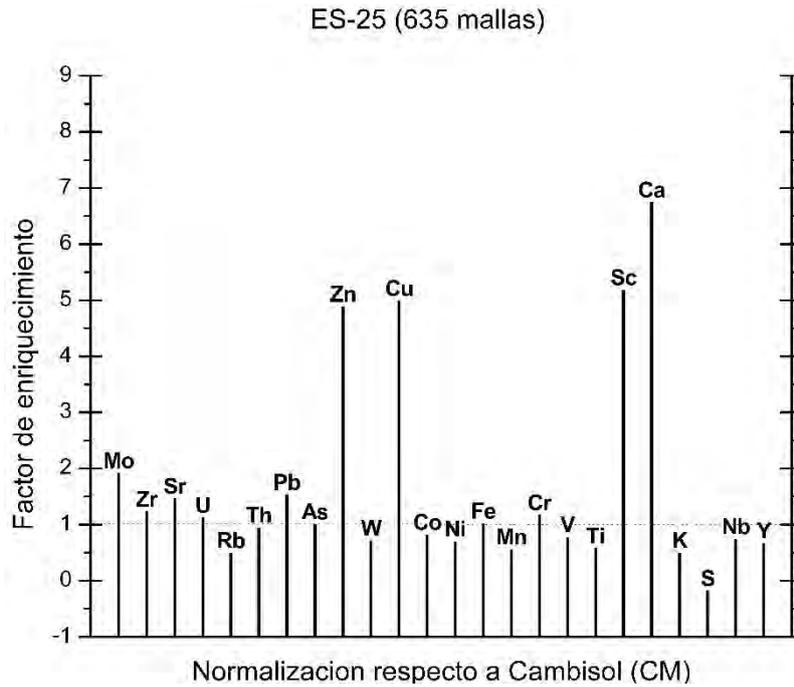
Anexo 22. Normalización respecto a Calcisol para la muestra 2ES-14 a 20 μ m.



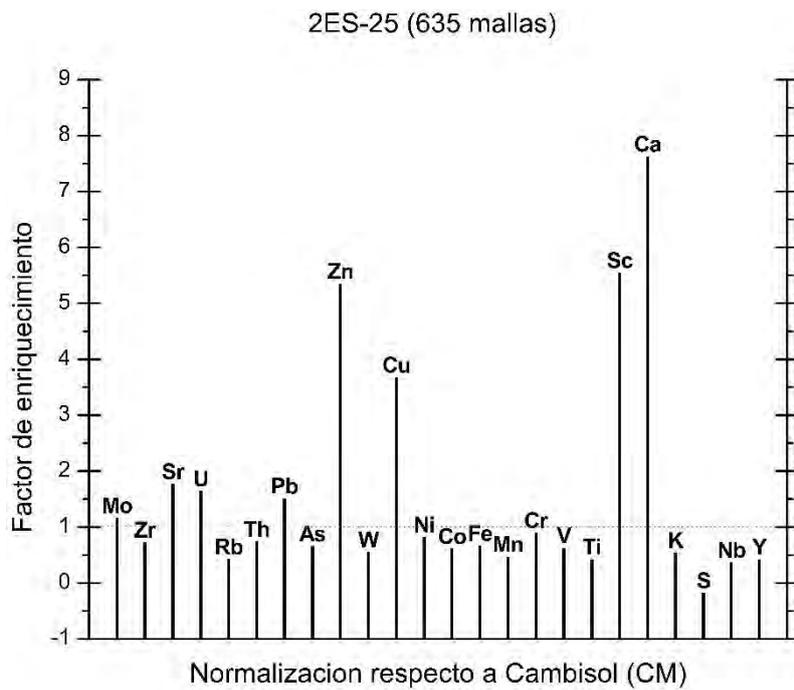
Anexo 23. Normalización respecto a Calcisol para la muestra ES-19 a 20 μ m.



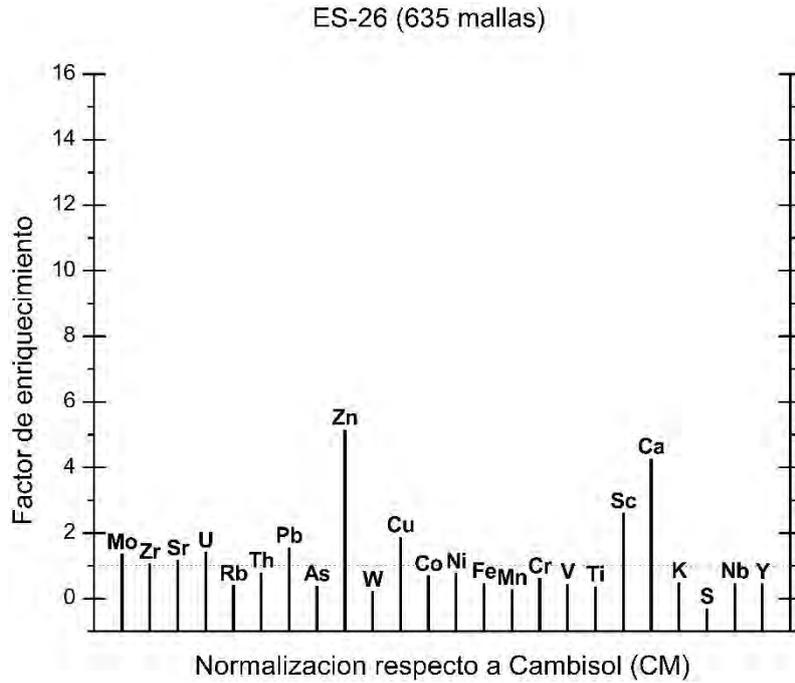
Anexo 24. Normalización respecto a Calcisol para la muestra 2ES-19 a 20 μ m.



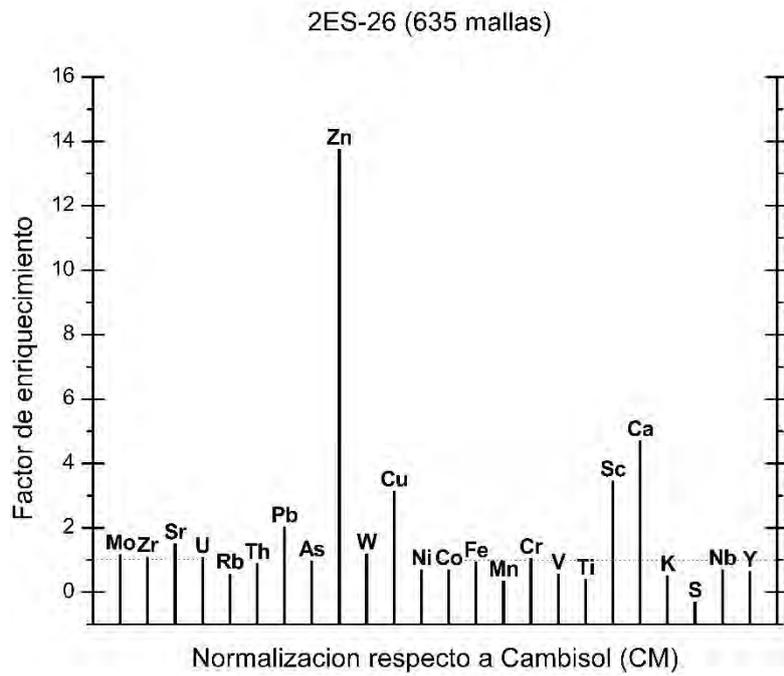
Anexo 25. Normalización respecto a Cambisol para la muestra ES-25 a 20 μ m.



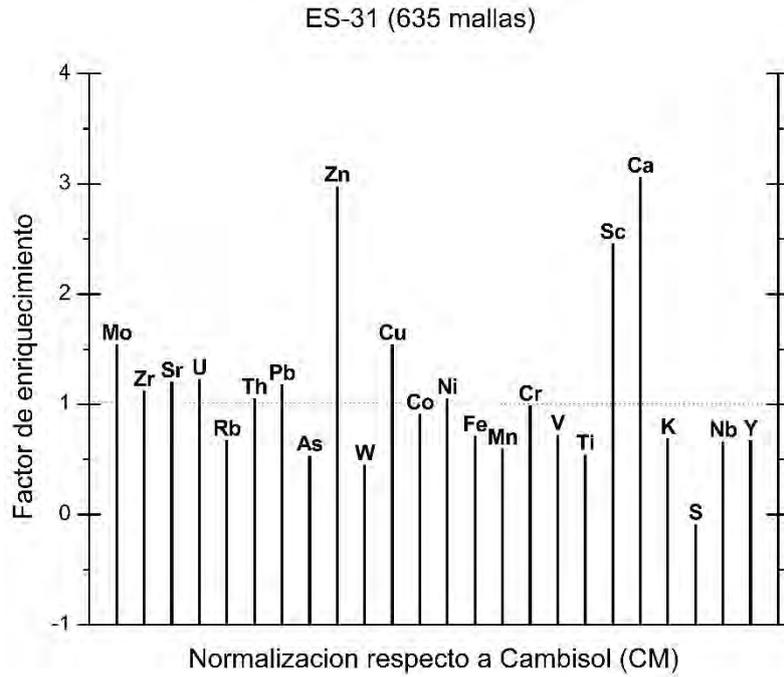
Anexo 26. Normalización respecto a Cambisol para la muestra 2ES-25 a 20 μ m.



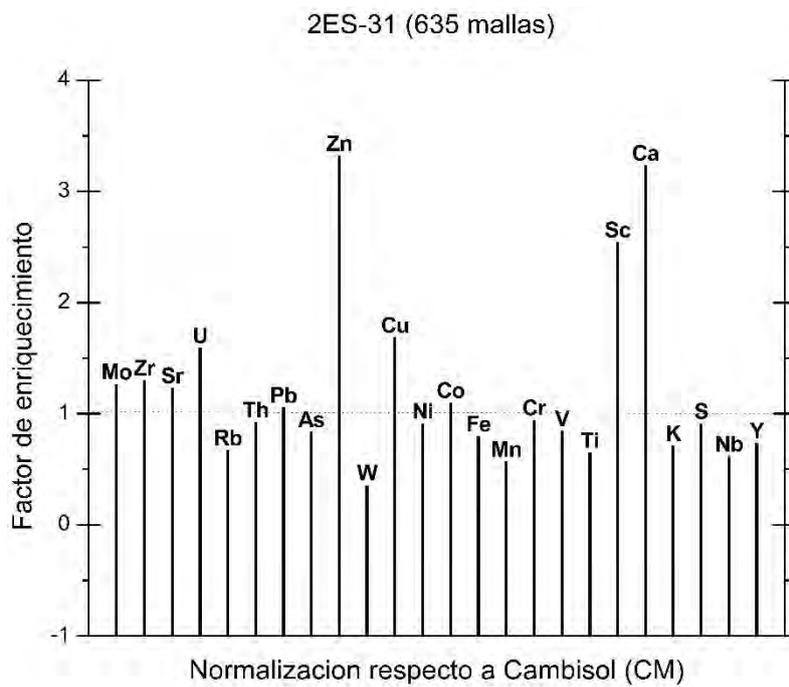
Anexo 27. Normalización respecto a Cambisol para la muestra ES-26 a 20 μ m.



Anexo 28. Normalización respecto a Cambisol para la muestra 2ES-26 a 20 μ m.

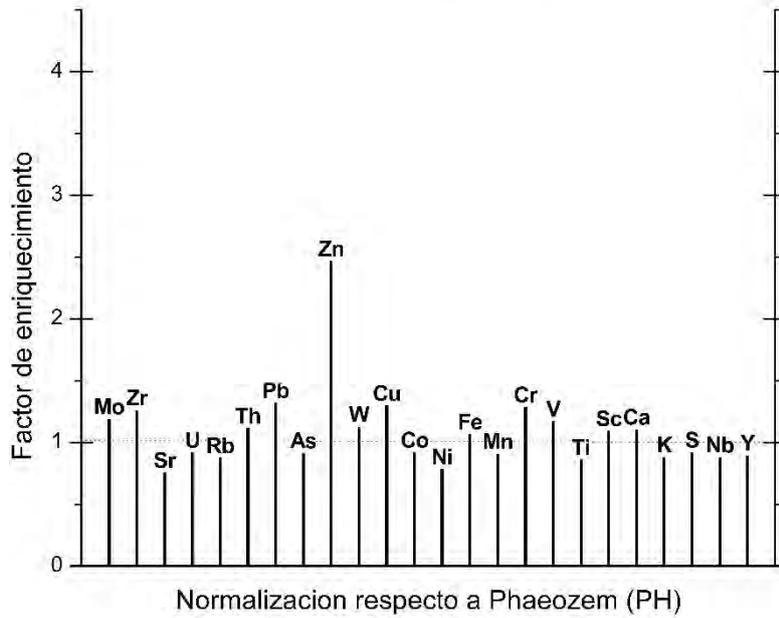


Anexo 29. Normalización respecto a Cambisol para la muestra ES-31 a 20 μ m.



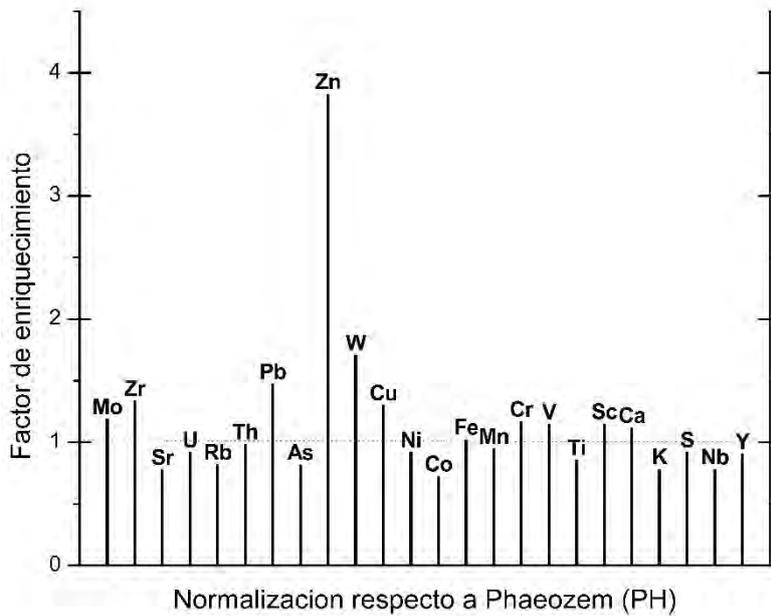
Anexo 30. Normalización respecto a Cambisol para la muestra 2ES-31 a 20 μ m.

ES-33 (635 mallas)



Anexo 31. Normalización respecto a Phaeozem para la muestra ES-33 a 20µm.

2ES-33 (635 mallas)

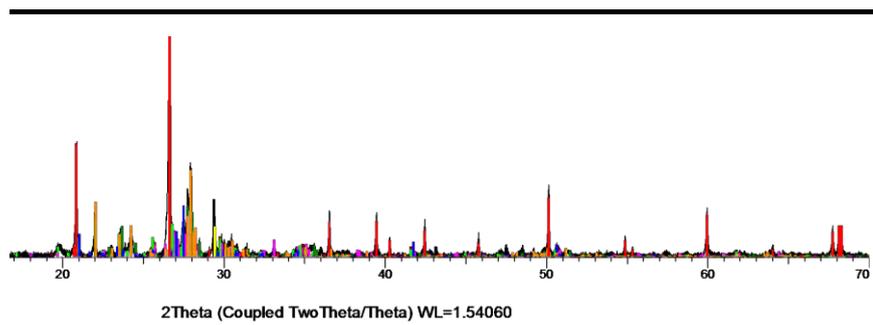


Anexo 32. Normalización respecto a Phaeozem para la muestra 2ES-33 a 20µm.

Anexo V

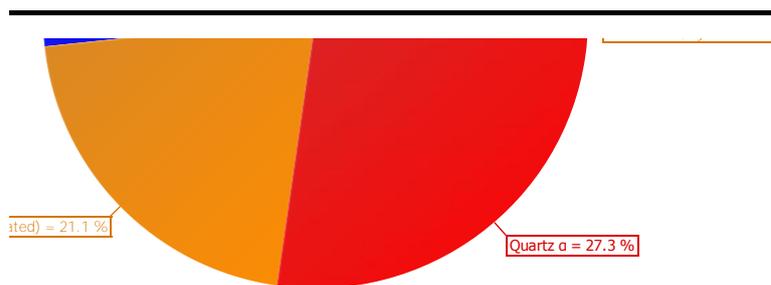
“Difractogramas”

(Coupled TwoTheta/Theta)



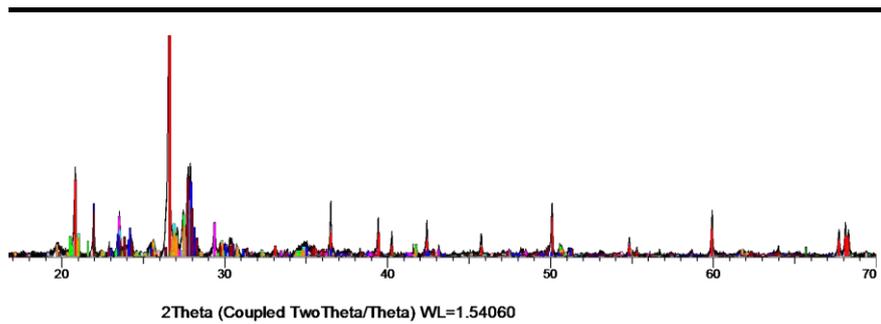
Anexo 33. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-02.

(Coupled TwoTheta/Theta)



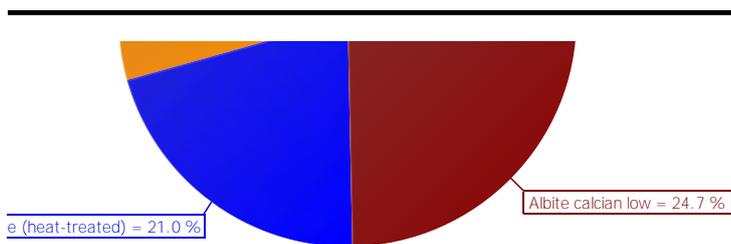
Anexo 34. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave ES-02.

(Coupled TwoTheta/Theta)



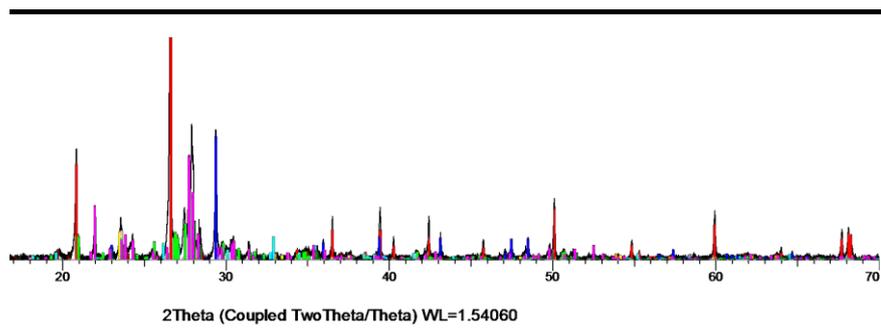
Anexo 35. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-03.

(Coupled TwoTheta/Theta)



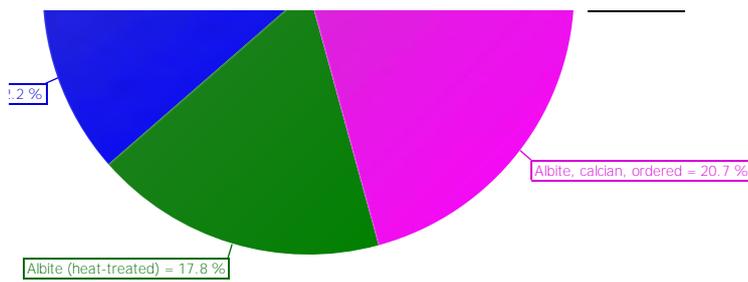
Anexo 36. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave ES-03.

(Coupled TwoTheta/Theta)



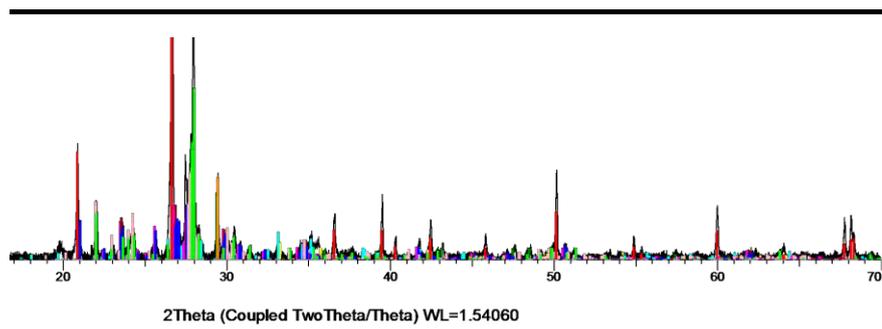
Anexo 37. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-05.

(Coupled TwoTheta/Theta)



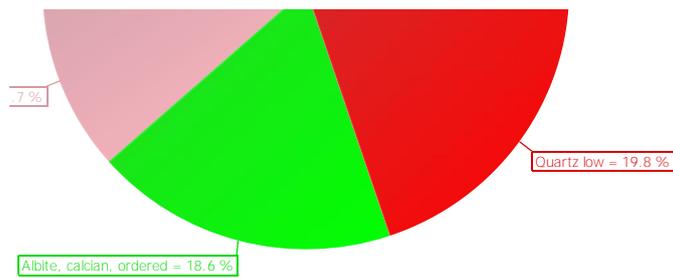
Anexo 38. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave ES-05.

(Coupled TwoTheta/Theta)



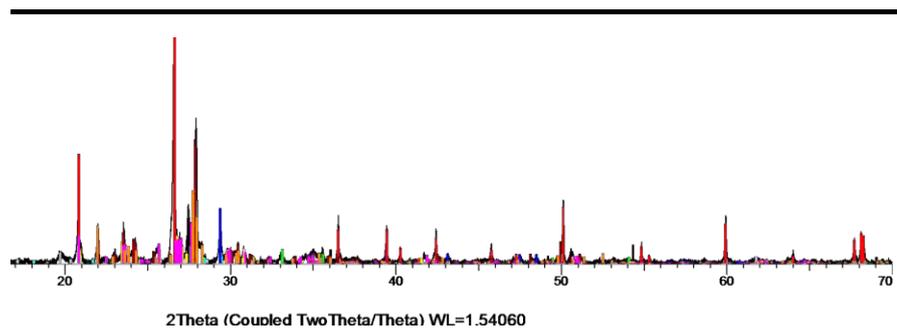
Anexo 39. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-06.

(Coupled TwoTheta/Theta)



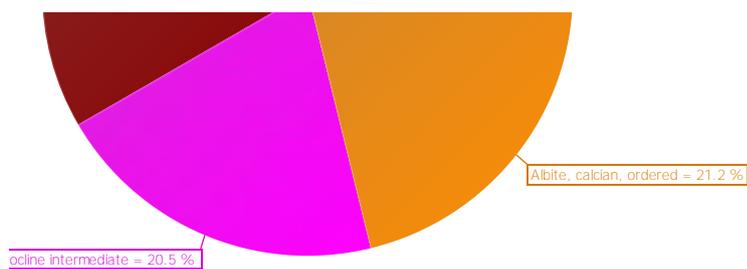
Anexo 40. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave ES-06.

(Coupled TwoTheta/Theta)



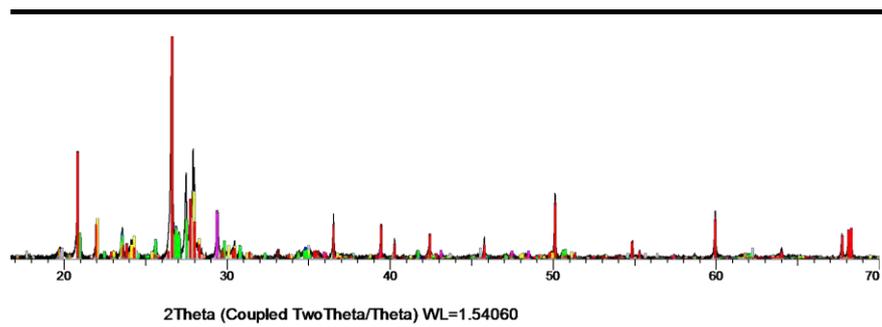
Anexo 41. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-09.

(Coupled TwoTheta/Theta)



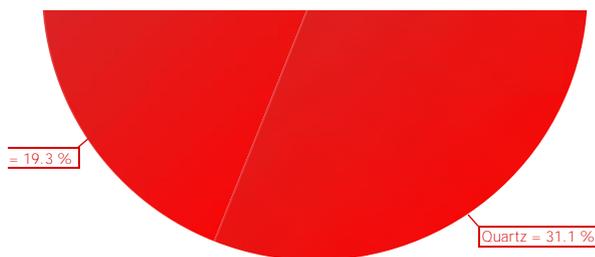
Anexo 42. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave ES-09.

(Coupled TwoTheta/Theta)



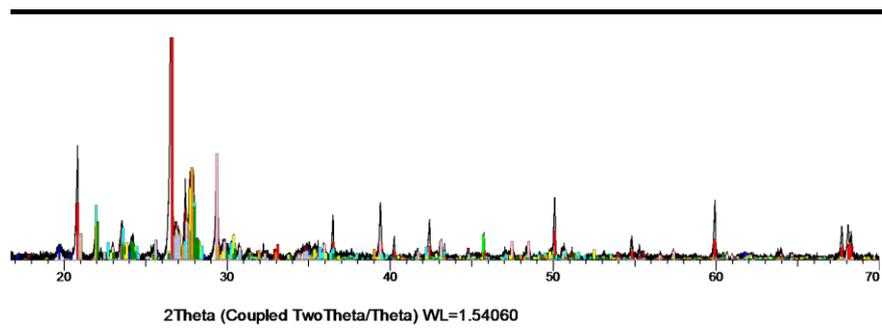
Anexo 43. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-12.

(Coupled TwoTheta/Theta)



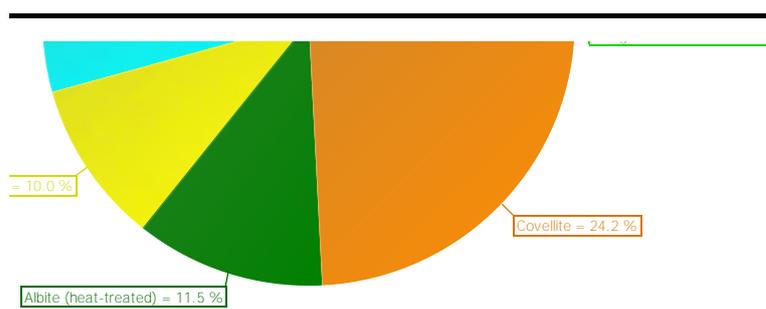
Anexo 44. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave ES-12.

(Coupled TwoTheta/Theta)



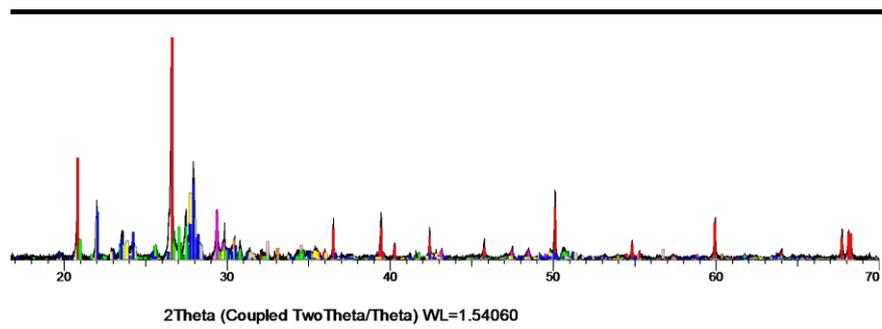
Anexo 45. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-14.

(Coupled TwoTheta/Theta)



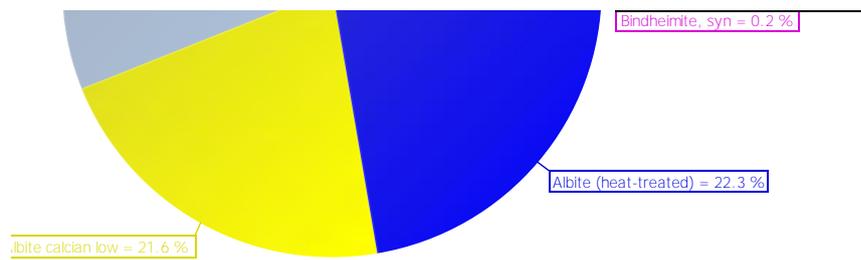
Anexo 46. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave ES-14.

(Coupled TwoTheta/Theta)



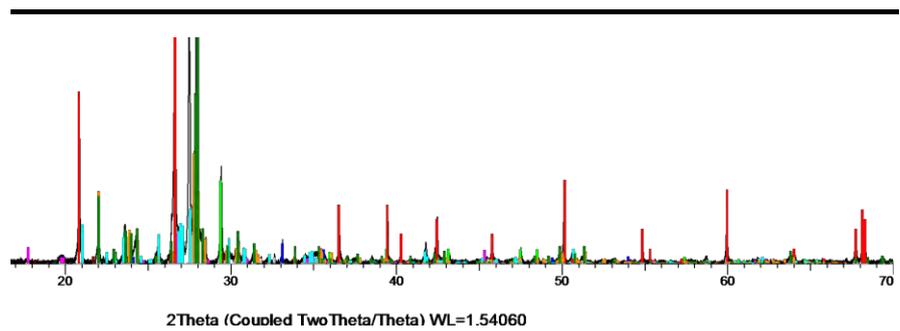
Anexo 47. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-19.

(Coupled TwoTheta/Theta)



Anexo 48. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave ES-19.

(Coupled TwoTheta/Theta)



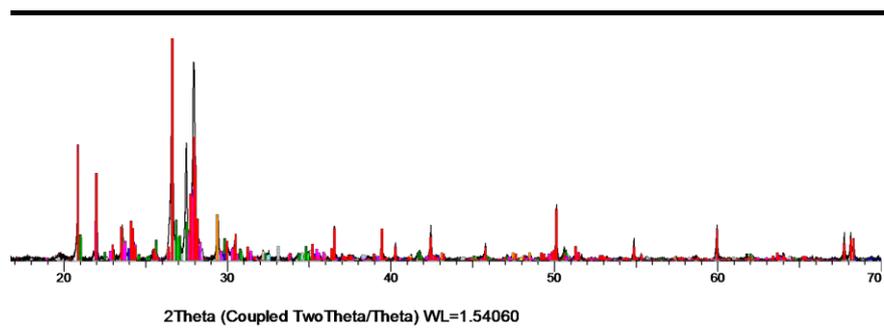
Anexo 49. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-26.

(Coupled TwoTheta/Theta)



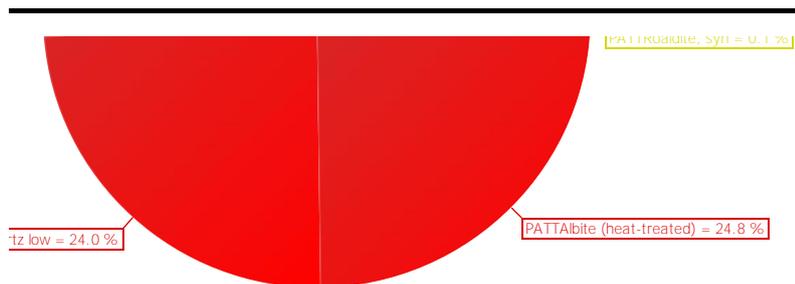
Anexo 50. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave ES-26.

(Coupled TwoTheta/Theta)



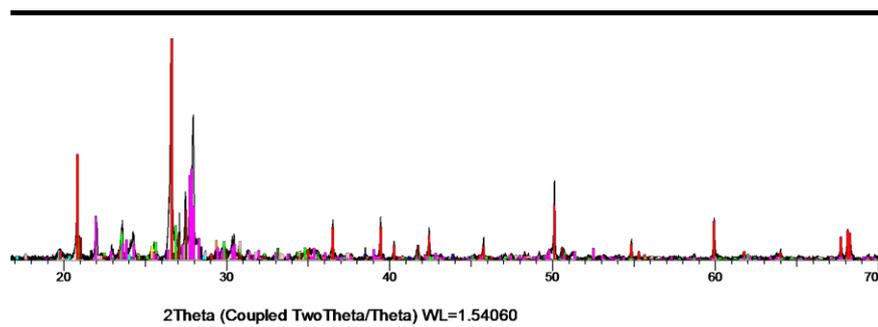
Anexo 51. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-28.

(Coupled TwoTheta/Theta)



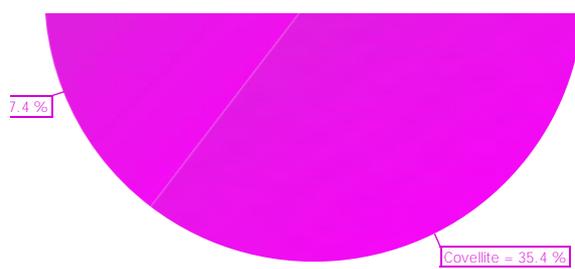
Anexo 52. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave ES-28.

(Coupled TwoTheta/Theta)



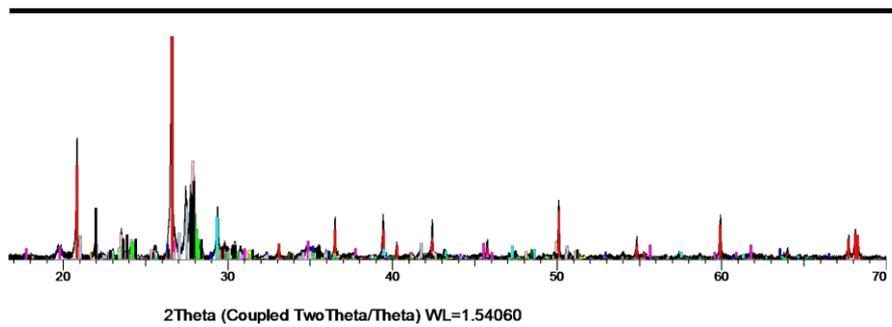
Anexo 53. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-31.

(Coupled TwoTheta/Theta)



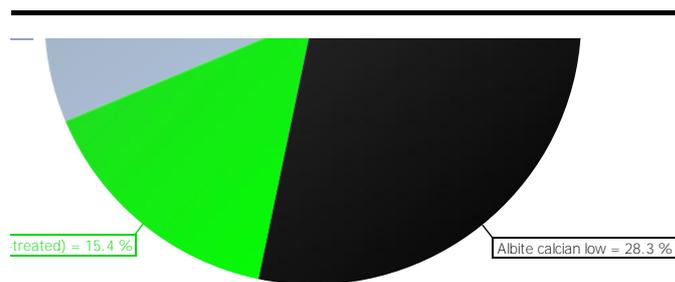
Anexo 54. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave ES-31.

(Coupled TwoTheta/Theta)



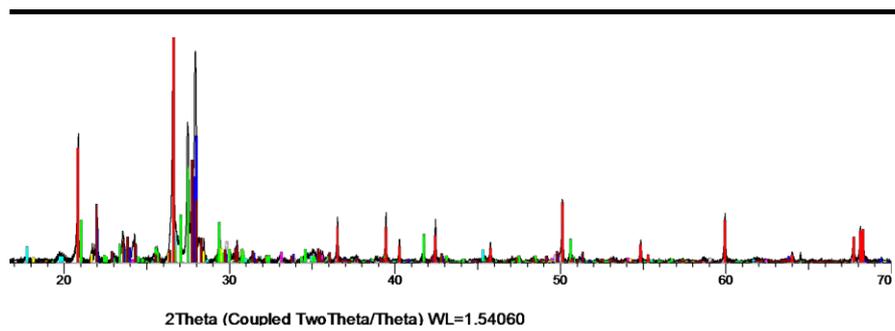
Anexo 55. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-33.

(Coupled TwoTheta/Theta)



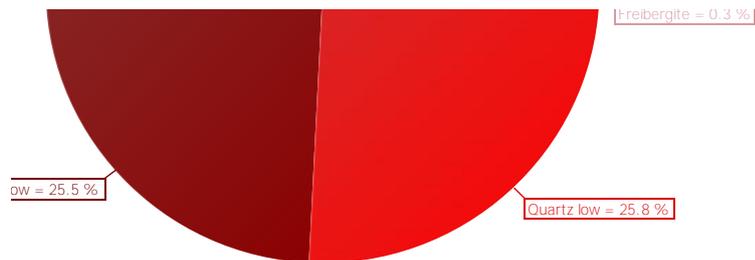
Anexo 56. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave ES-33.

(Coupled TwoTheta/Theta)



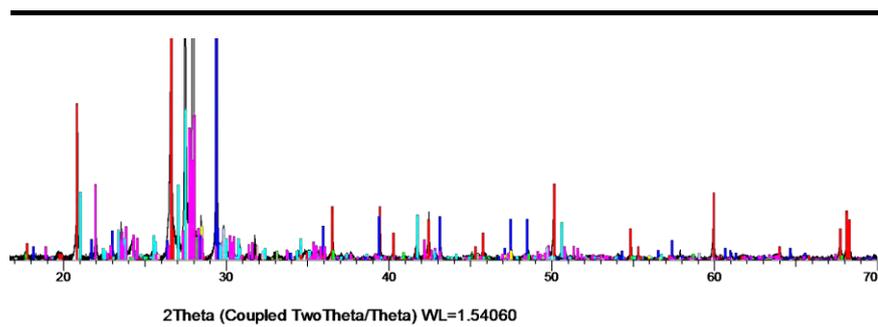
Anexo 57. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-03.

(Coupled TwoTheta/Theta)



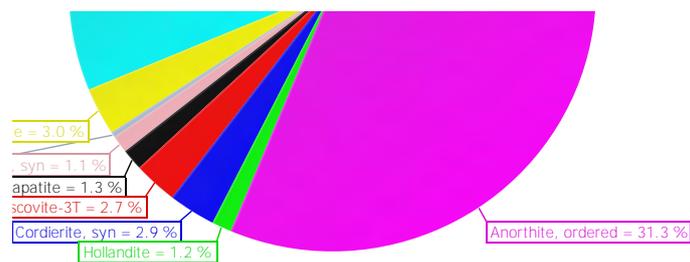
Anexo 58. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-03.

(Coupled TwoTheta/Theta)



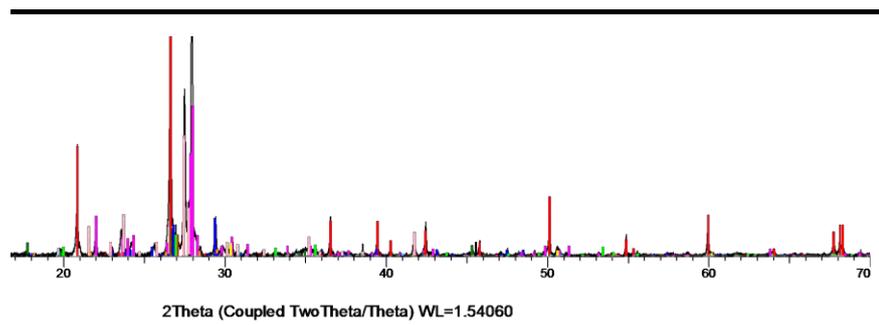
Anexo 59. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-05.

(Coupled TwoTheta/Theta)



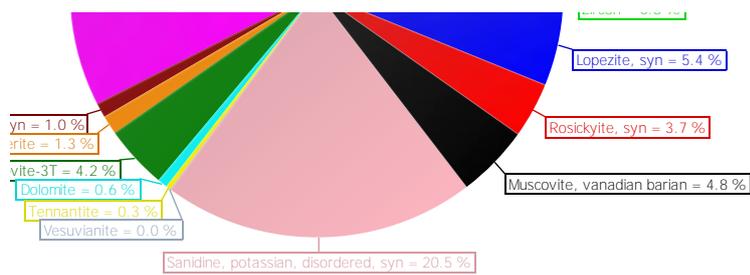
Anexo 60. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-05.

(Coupled TwoTheta/Theta)



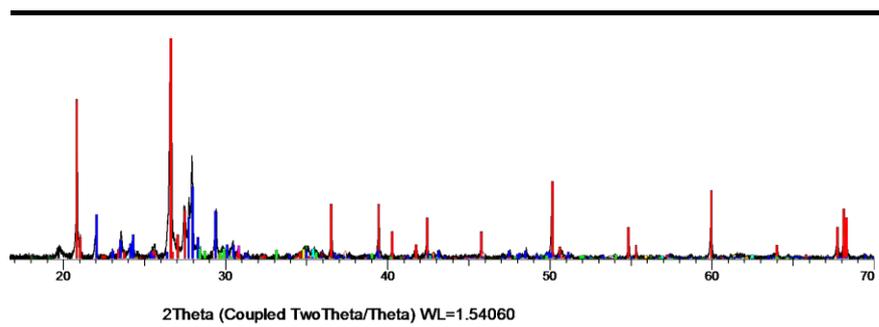
Anexo 61. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-09.

(Coupled TwoTheta/Theta)



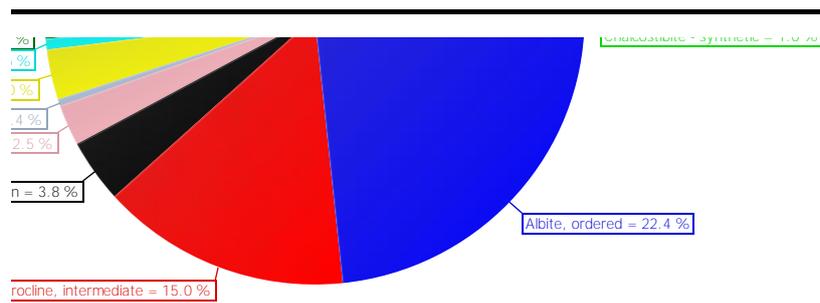
Anexo 62. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-09.

(Coupled TwoTheta/Theta)



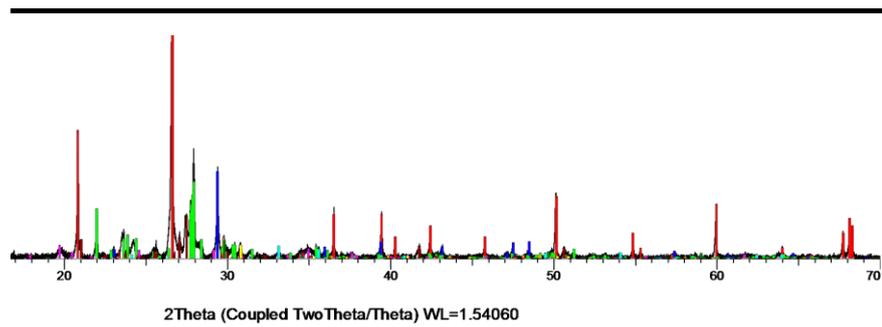
Anexo 63. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-12.

(Coupled TwoTheta/Theta)



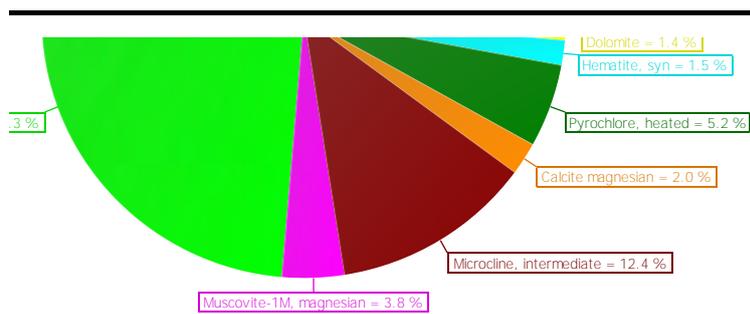
Anexo 64. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-12.

(Coupled TwoTheta/Theta)



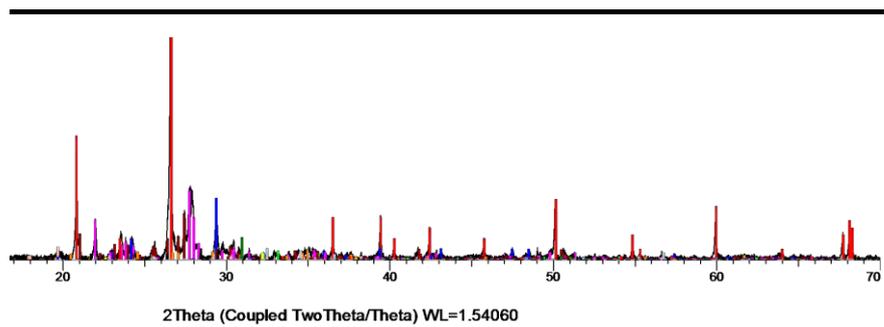
Anexo 65. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-14.

(Coupled TwoTheta/Theta)



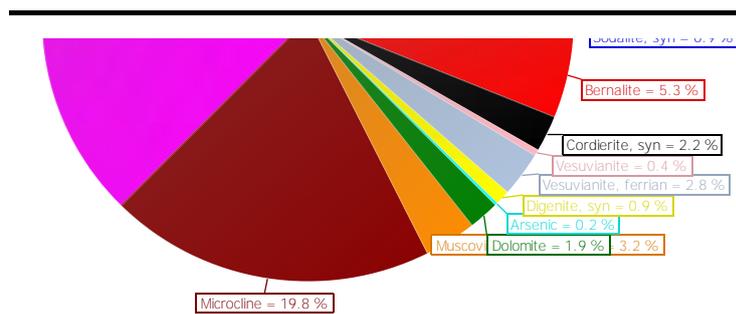
Anexo 66. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-14.

(Coupled TwoTheta/Theta)



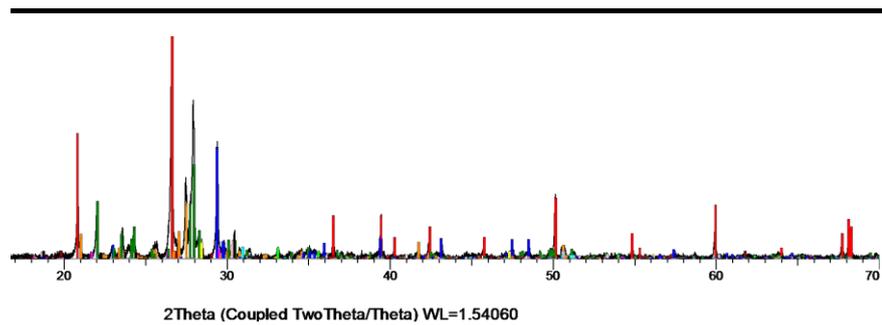
Anexo 67. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-19.

(Coupled TwoTheta/Theta)



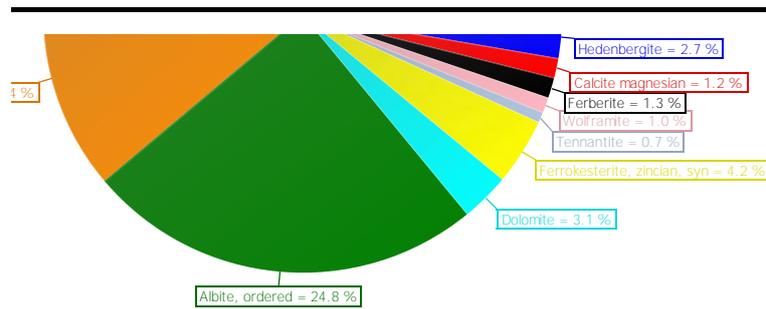
Anexo 68. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-19.

(Coupled TwoTheta/Theta)



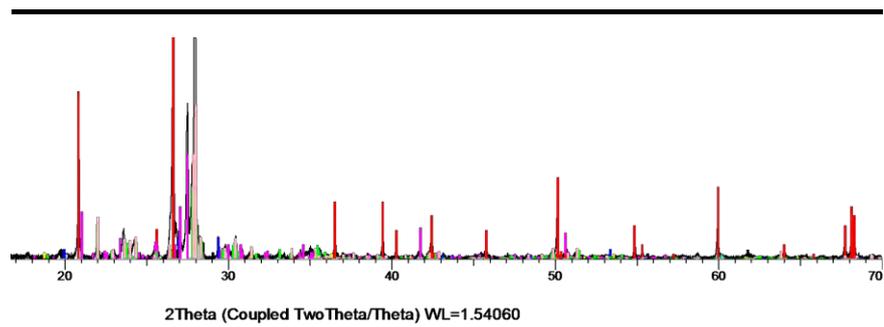
Anexo 69. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-25.

(Coupled TwoTheta/Theta)



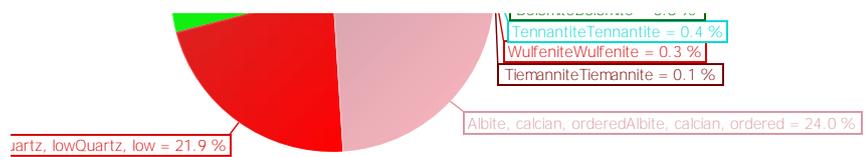
Anexo 70. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-25.

(Coupled TwoTheta/Theta)



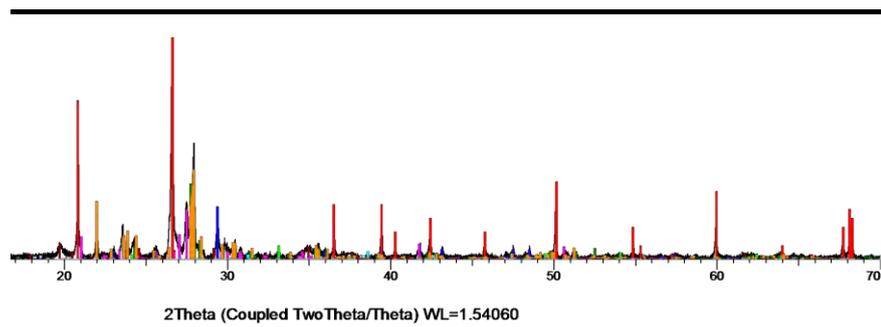
Anexo 71. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-31.

(Coupled TwoTheta/Theta)



Anexo 72. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-31.

(Coupled TwoTheta/Theta)



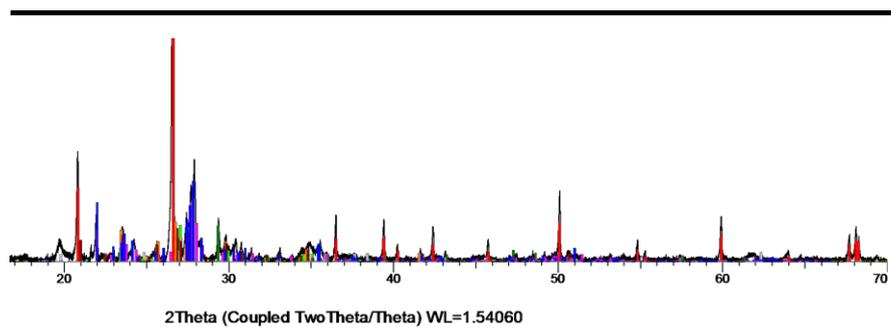
Anexo 73. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-33.

(Coupled TwoTheta/Theta)



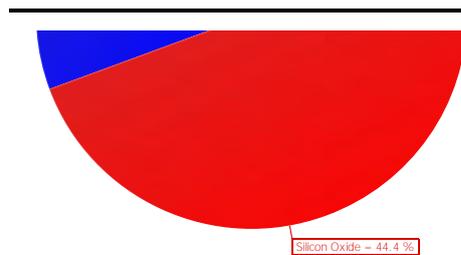
Anexo 74. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-33.

(Coupled TwoTheta/Theta)



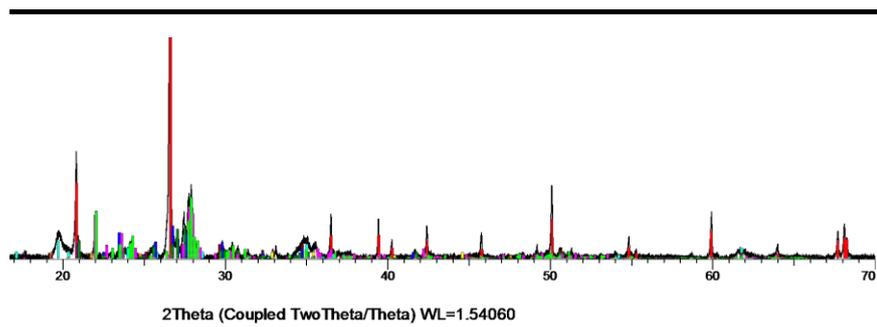
Anexo 75. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 1PH.

(Coupled TwoTheta/Theta)



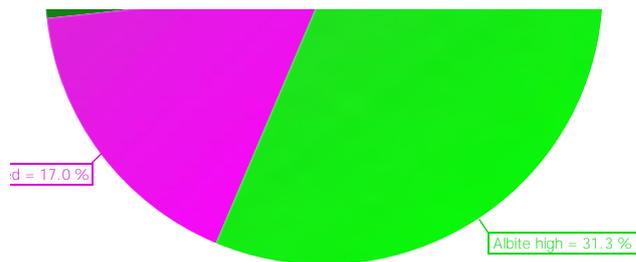
Anexo 76. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave 1PH.

(Coupled TwoTheta/Theta)



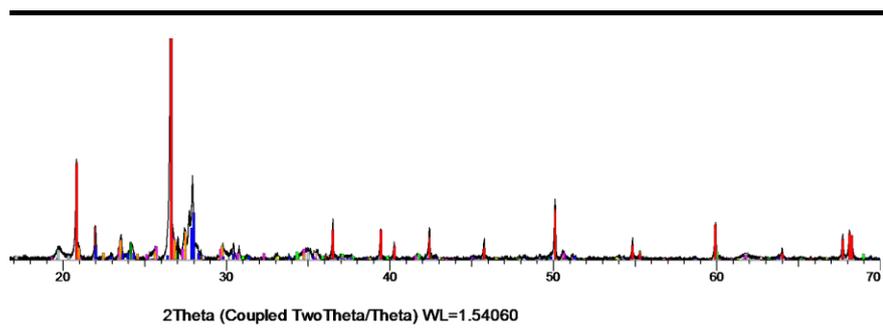
Anexo 77. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2VR.

(Coupled TwoTheta/Theta)



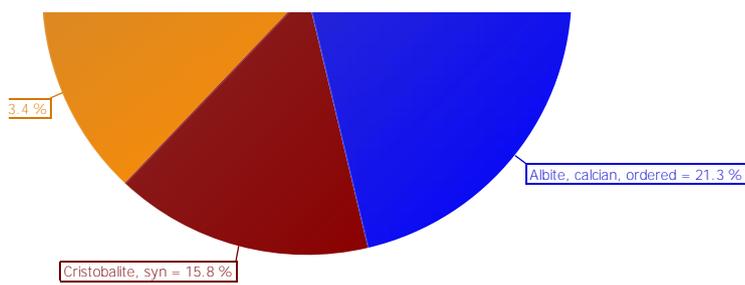
Anexo 78. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave 2VR.

(Coupled TwoTheta/Theta)



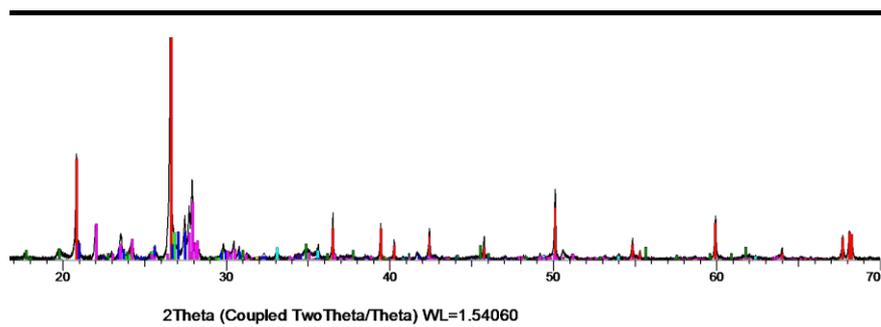
Anexo 79. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 3CL.

(Coupled TwoTheta/Theta)



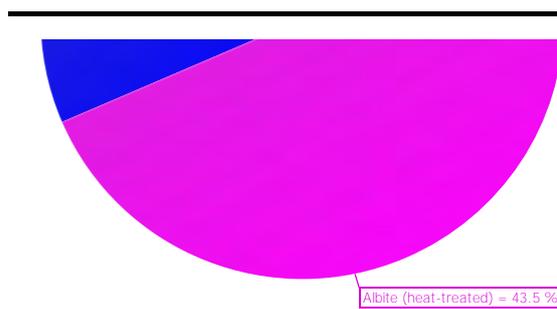
Anexo 80. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave 3CL.

(Coupled TwoTheta/Theta)



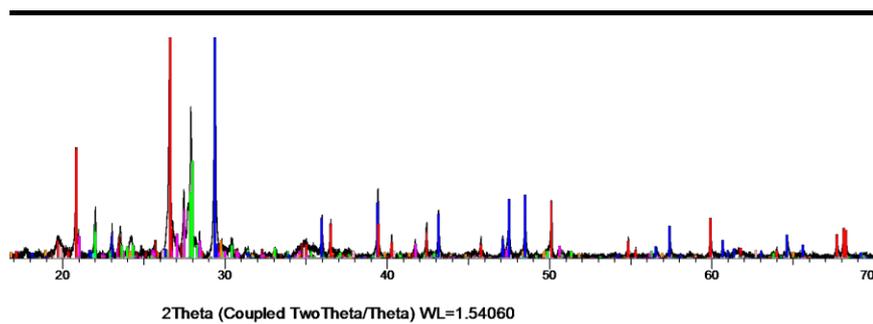
Anexo 81. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 4CM.

(Coupled TwoTheta/Theta)



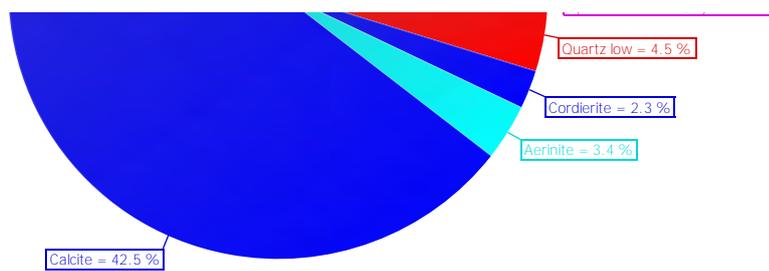
Anexo 82. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave 4CM.

(Coupled TwoTheta/Theta)



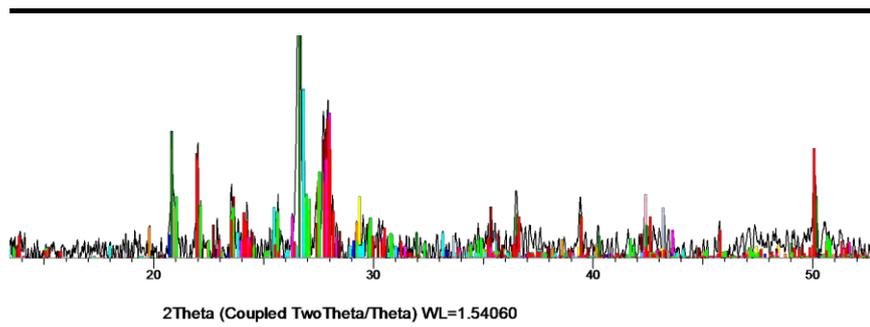
Anexo 83. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 5RG.

(Coupled TwoTheta/Theta)



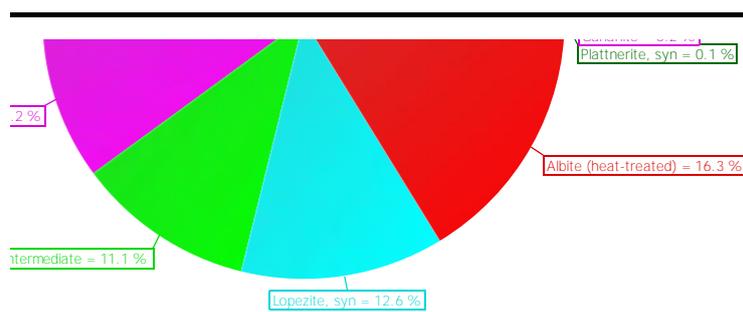
Anexo 84. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave 5RG.

(Coupled TwoTheta/Theta)



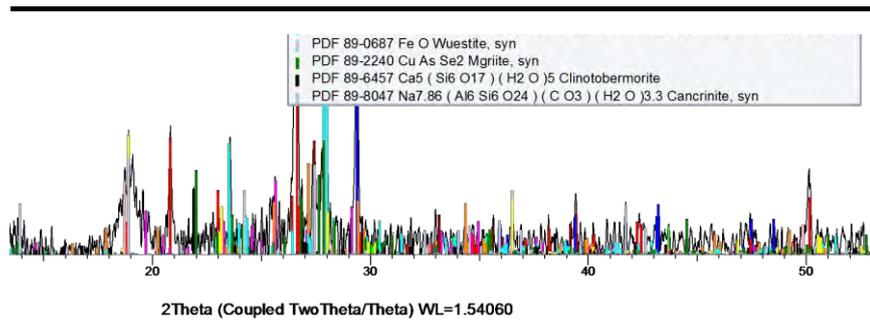
Anexo 85. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave CB-16.

(Coupled TwoTheta/Theta)



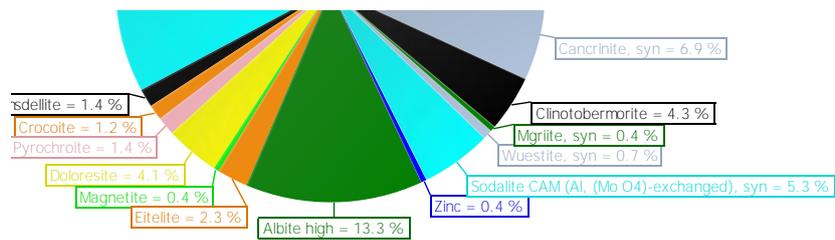
Anexo 86. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave CB-16.

(Coupled TwoTheta/Theta)



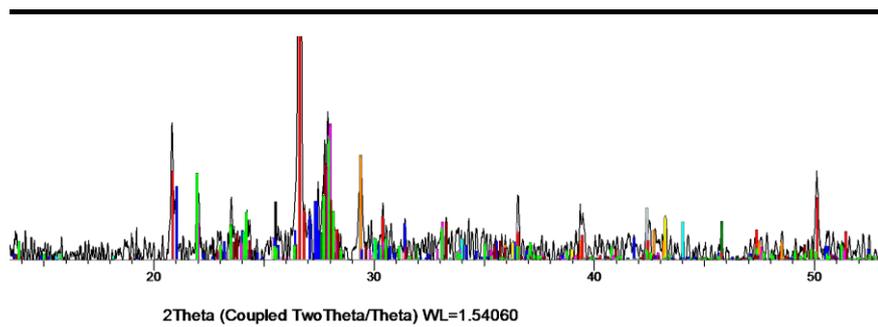
Anexo 87. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave CB-19.

(Coupled TwoTheta/Theta)



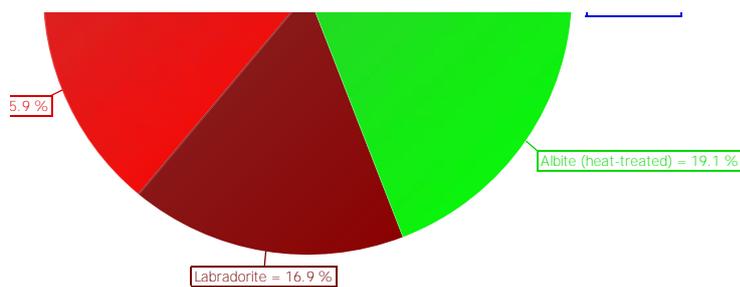
Anexo 88. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave CB-19.

(Coupled TwoTheta/Theta)



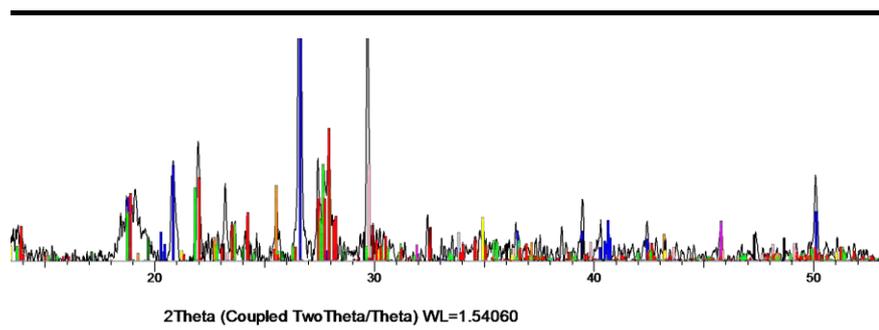
Anexo 89. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave CB-21.

(Coupled TwoTheta/Theta)



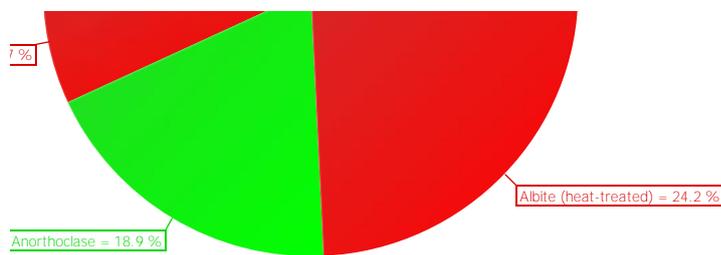
Anexo 90. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave CB-21.

(Coupled TwoTheta/Theta)



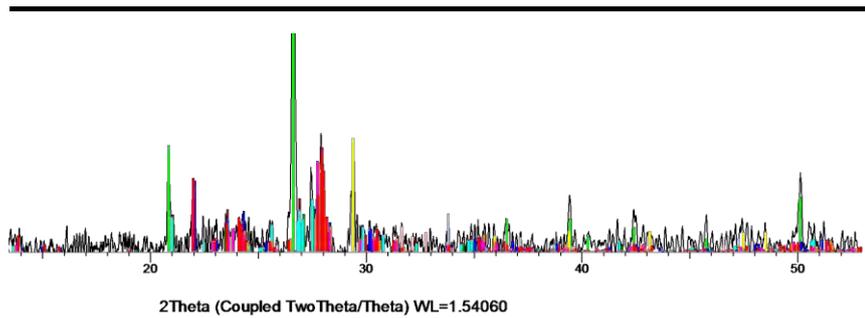
Anexo 91. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave CB-27.

(Coupled TwoTheta/Theta)



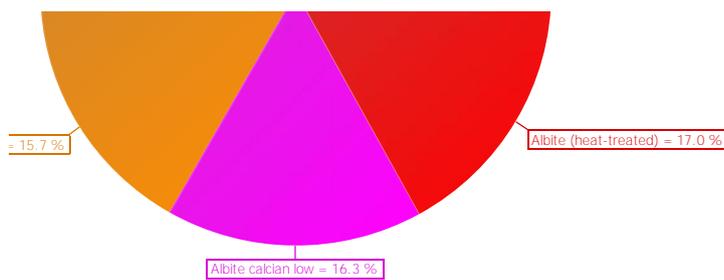
Anexo 92. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave CB-27.

(Coupled TwoTheta/Theta)

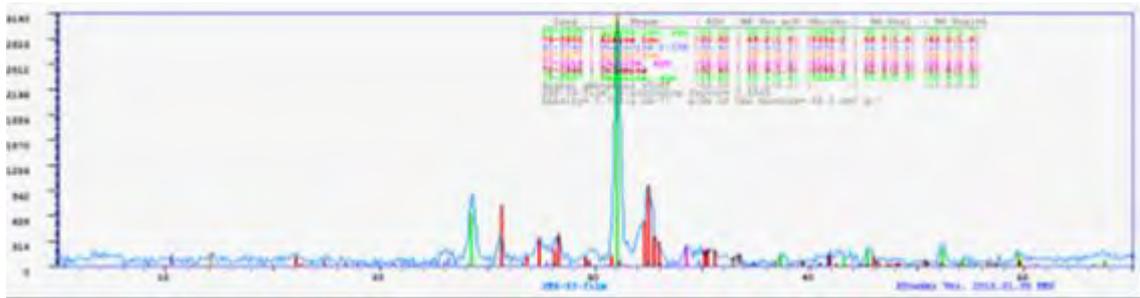


Anexo 93. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave CB-86.

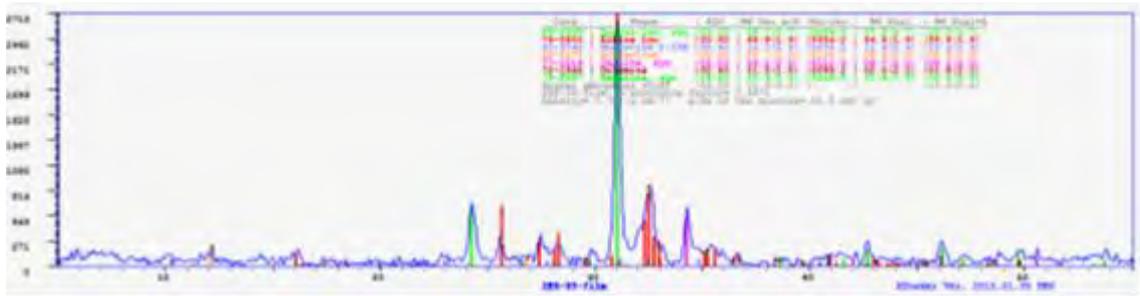
(Coupled TwoTheta/Theta)



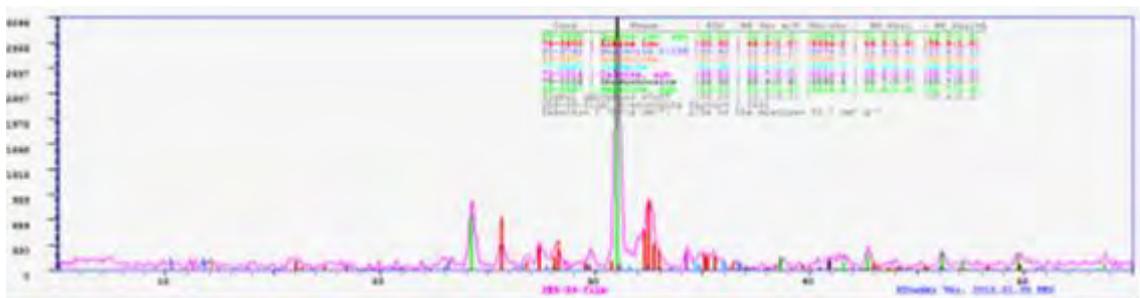
Anexo 94. Análisis semi-cuantitativo por DRX realizado a la muestra de clave CB-86.



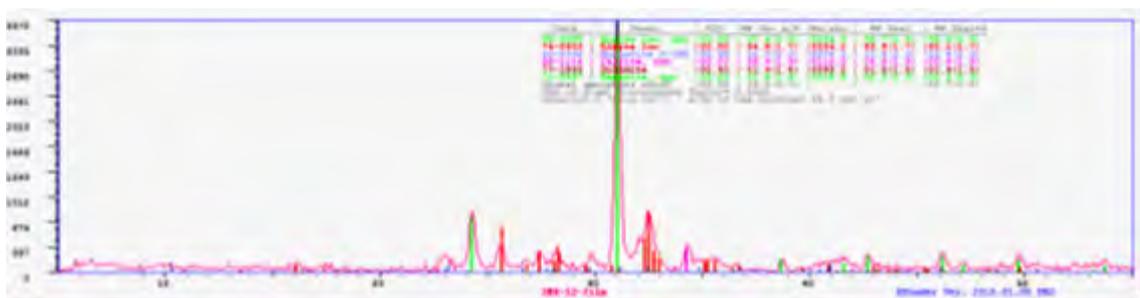
Anexo 95. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-03, realizando en equipo Terra, Olympus.



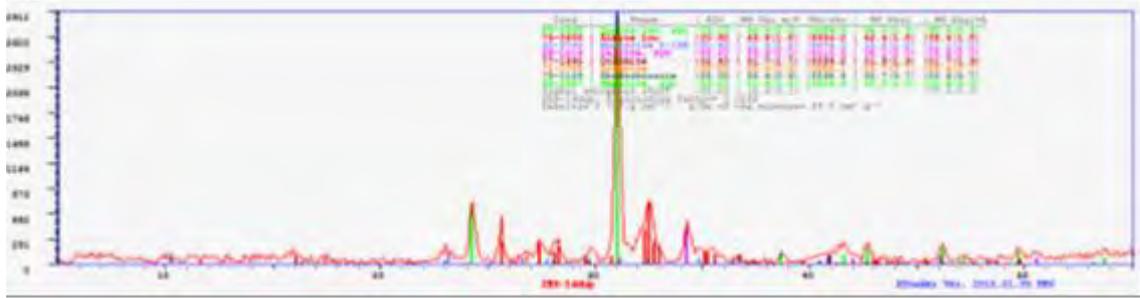
Anexo 96. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-05, realizando en equipo Terra, Olympus.



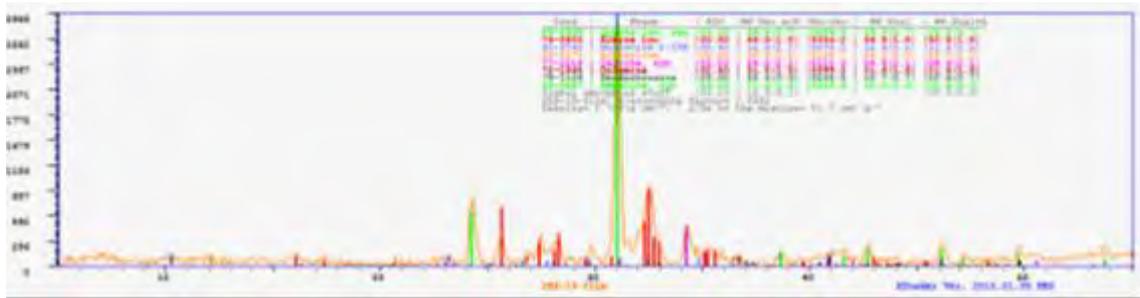
Anexo 97. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-09, realizando en equipo Terra, Olympus.



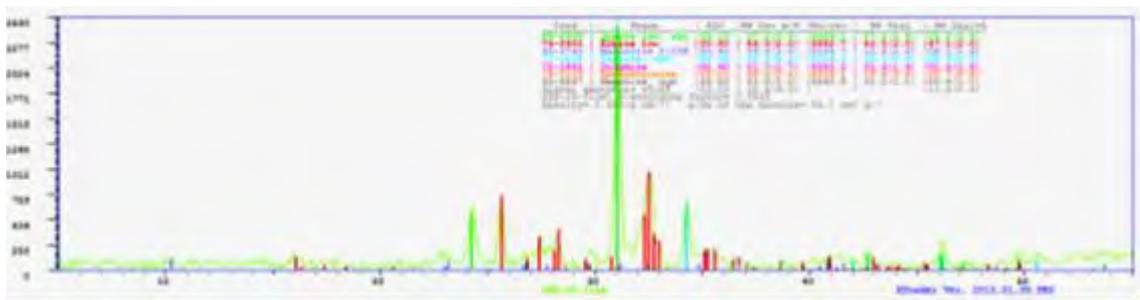
Anexo 98. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-12, realizando en equipo Terra, Olympus.



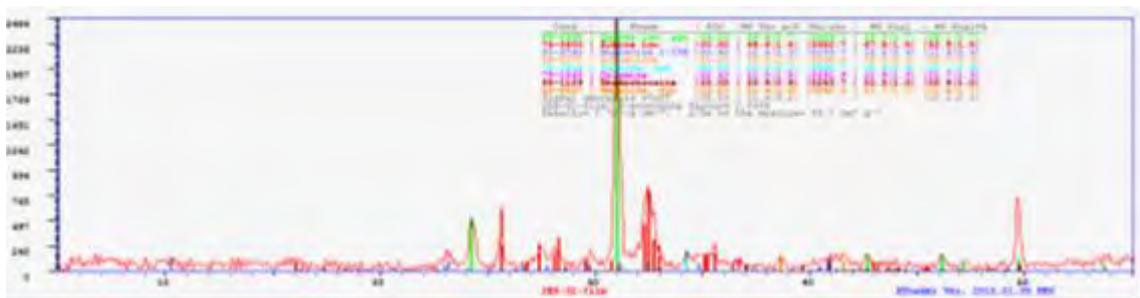
Anexo 99. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-14, realizando en equipo Terra, Olympus.



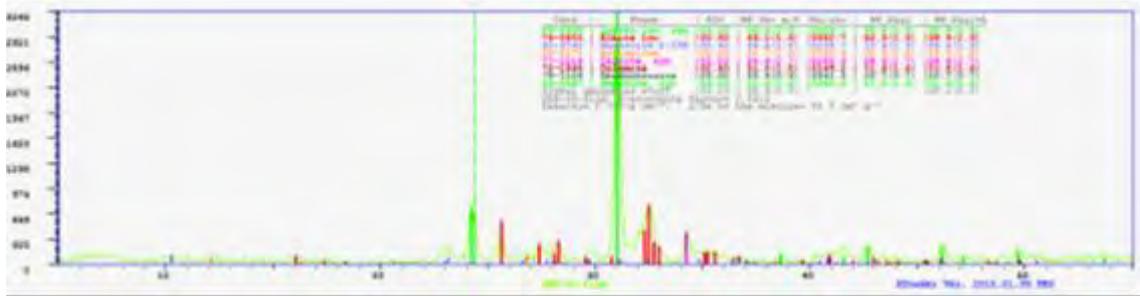
Anexo 100. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-19, realizando en equipo Terra, Olympus.



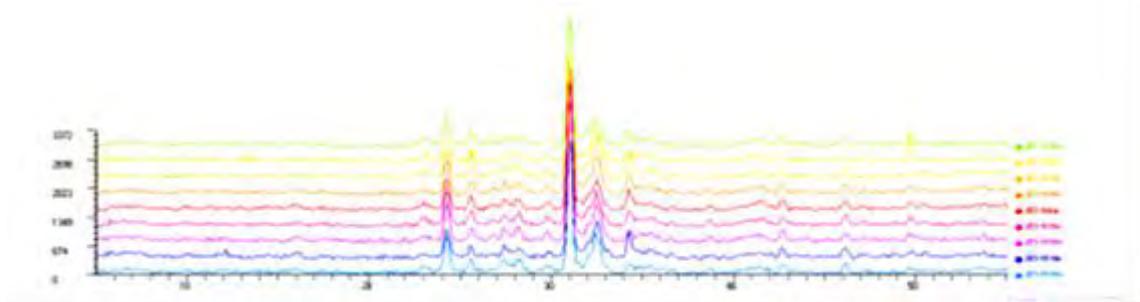
Anexo 101. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-25, realizando en equipo Terra, Olympus.



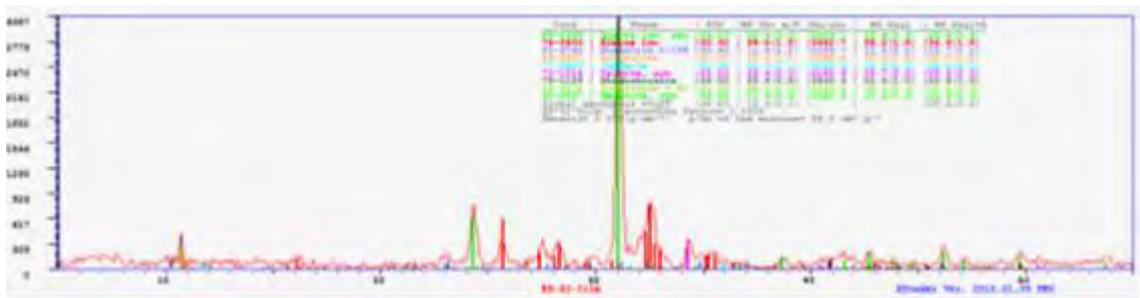
Anexo 102. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-31, realizando en equipo Terra, Olympus.



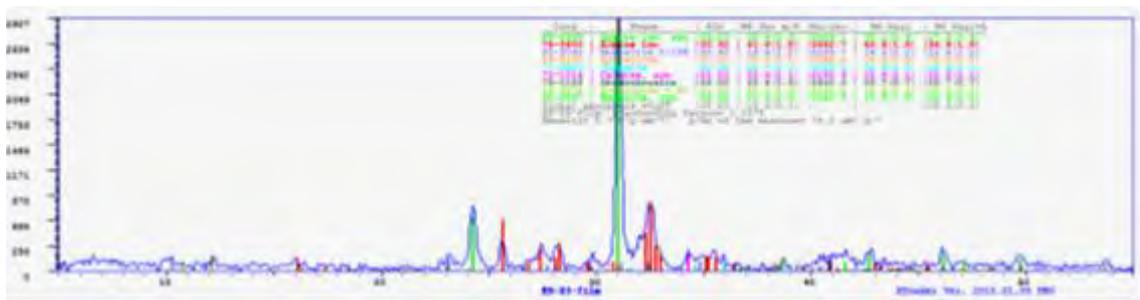
Anexo 103. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave 2ES-33, realizando en equipo Terra, Olympus.



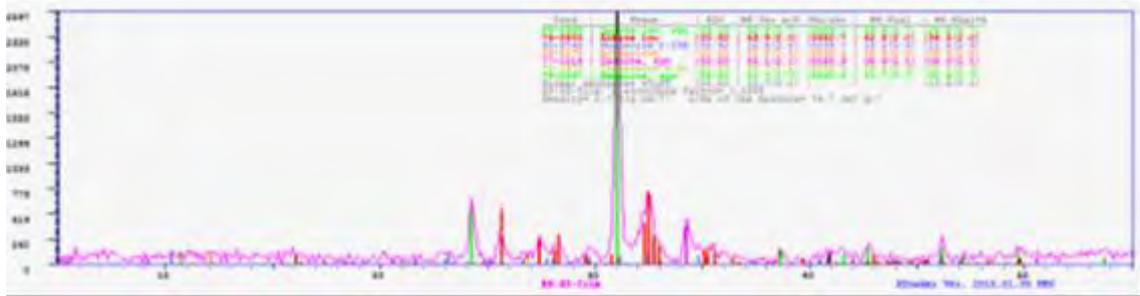
Anexo 104. Comparativo de difractogramas para las muestras de clave 2ES-33, 2ES-31, 2ES-25, 2ES-19, 2ES-14, 2ES-12, 2ES-09, 2ES-05 Y 2ES-03.



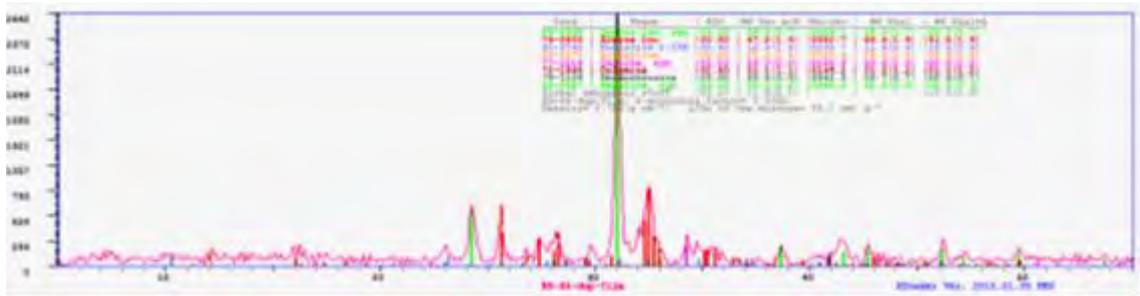
Anexo 105. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-02, realizando en equipo Terra, Olympus.



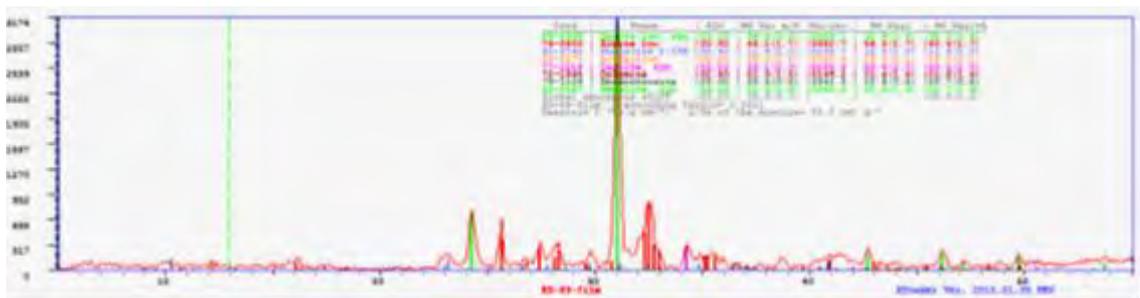
Anexo 106. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-03, realizando en equipo Terra, Olympus.



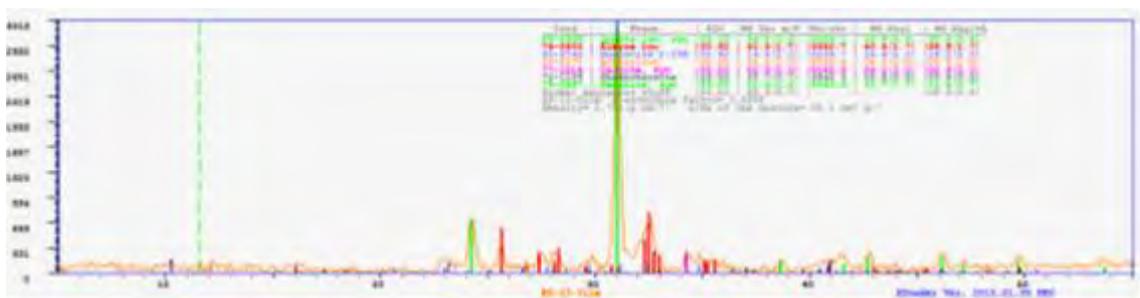
Anexo 107. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-05, realizando en equipo Terra, Olympus.



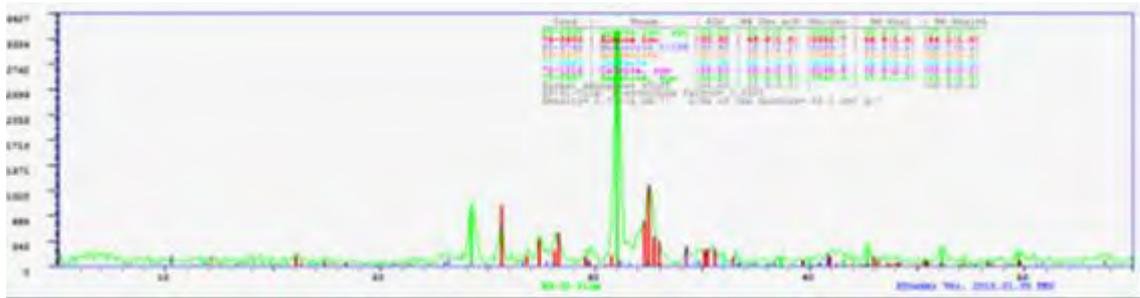
Anexo 108. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-06, realizando en equipo Terra, Olympus.



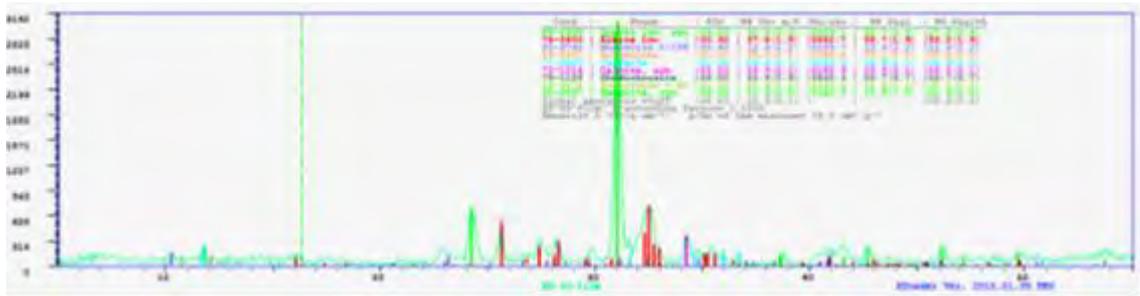
Anexo 109. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-09, realizando en equipo Terra, Olympus.



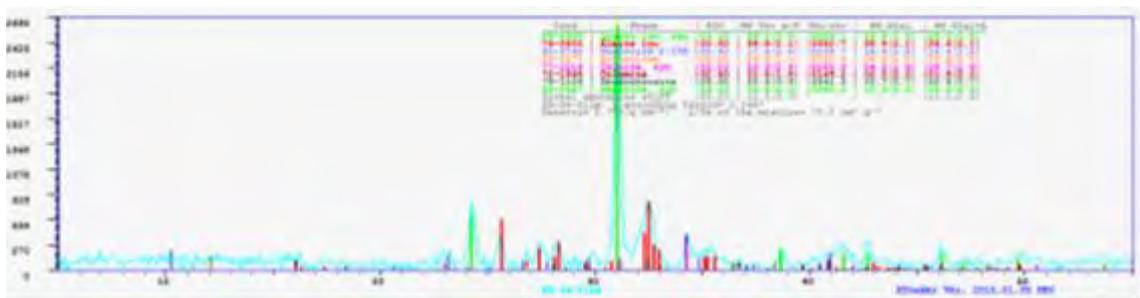
Anexo 110. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-12, realizando en equipo Terra, Olympus.



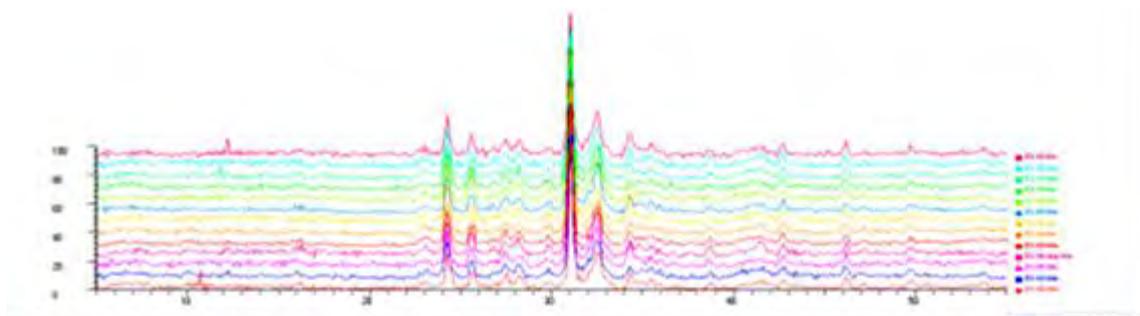
Anexo 115. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-31, realizando en equipo Terra, Olympus.



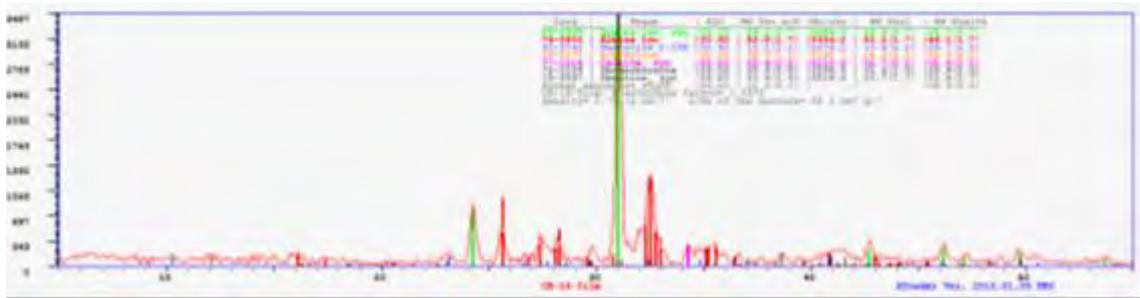
Anexo 116. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-33, realizando en equipo Terra, Olympus.



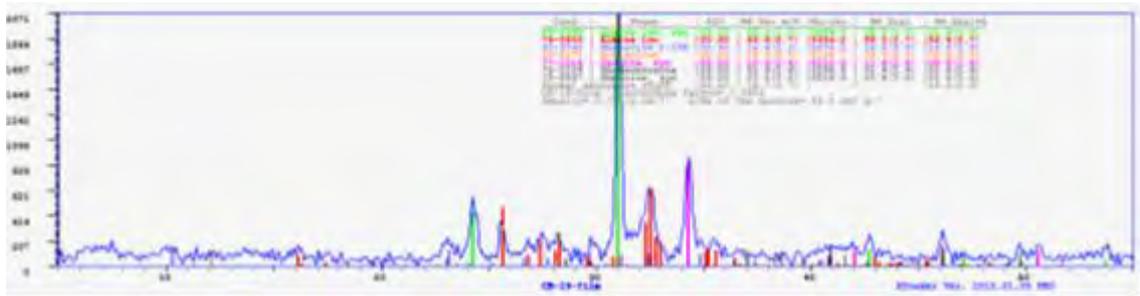
Anexo 117. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-34, realizando en equipo Terra, Olympus.



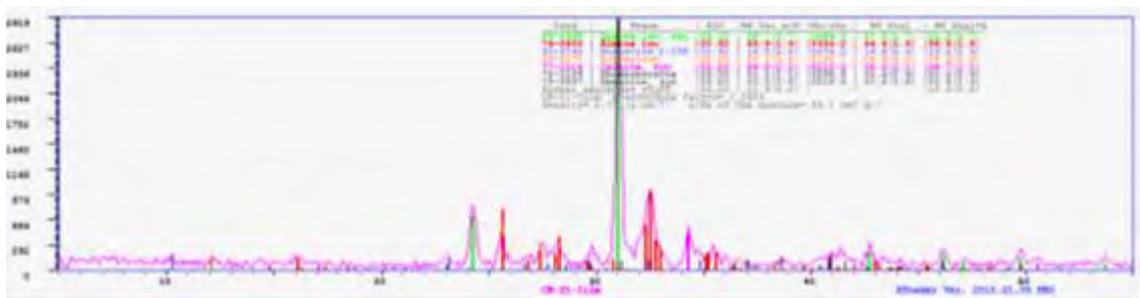
Anexo 118. Comparativo de difractogramas para las muestras de clave ES-02, ES-03, ES-05, ES-06, ES-09, ES-12, ES-14, ES-19, ES-25, ES-26, ES-28, ES-31, ES-33 Y ES-34.



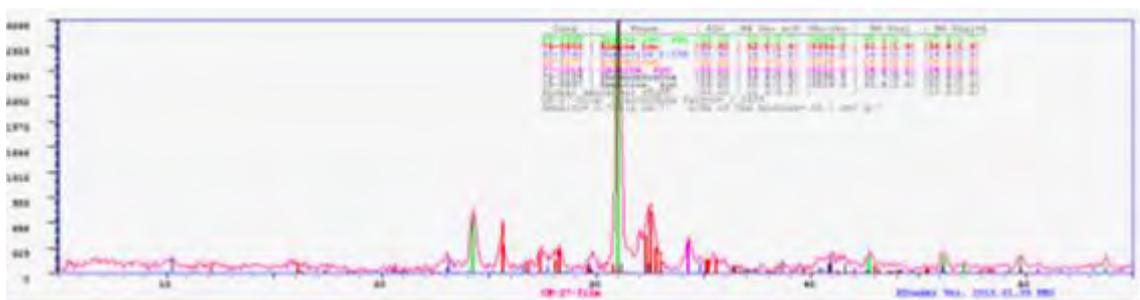
Anexo 119. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave CB-16, realizando en equipo Terra, Olympus.



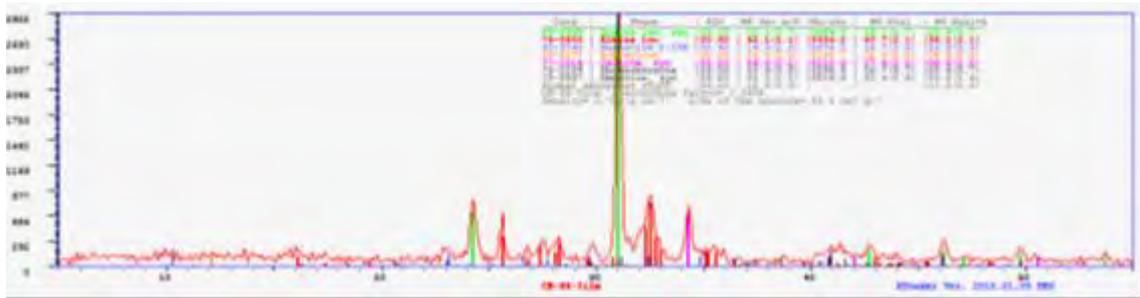
Anexo 120. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave CB-19, realizando en equipo Terra, Olympus.



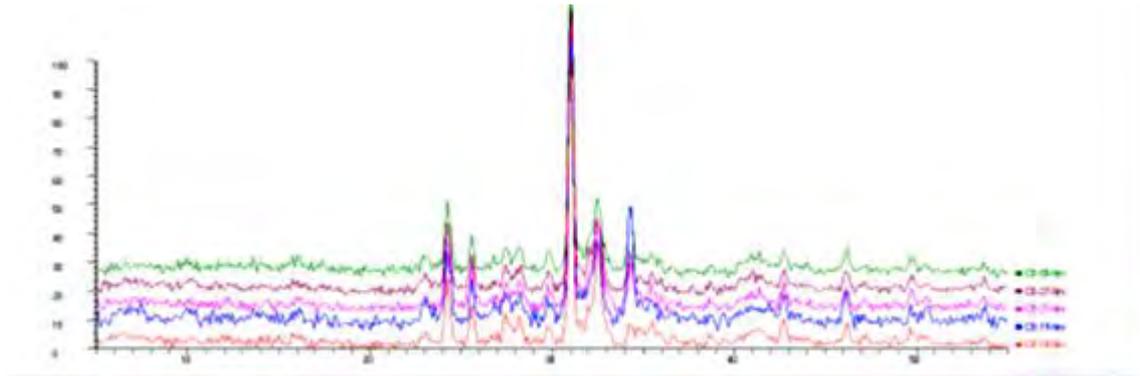
Anexo 121. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave CB-21, realizando en equipo Terra, Olympus.



Anexo 122. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave CB-27, realizando en equipo Terra, Olympus.



Anexo 123. Análisis por DRX realizado a la muestra de clave ES-86, realizando en equipo Terra, Olympus.



Anexo 124. Comparativo de difractogramas para las muestras de clave CB-16, CB-19, CB-21, CB-27 Y CB-86.

Bibliografía

Al-Khashman, O., 2004, Heavy metal distribution in dust, street dust and soils from the work place in Karak Industrial Estate, Jordan, *Atmospheric Environment*, 38(39), 6803–6812 pp. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2004.09.011.

Almorox, J., 2003, *Climatología aplicada al medio ambiente y agricultura*. Escuela técnica superior de ingenieros agrónomos, ISBN: 84-7401-179-5.

Bartolomé, J. F., 1997. El Caolín: composición, estructura, génesis y aplicaciones. *Boletín de la sociedad española de Cerámica y Vidrio*. Volumen 36-1. 7-19 pp.

Basha, R. M., Murali, M., Siddiqi, H. K., Ghosal, K., Siddiqi, O. K., Lashuel, H. A., Yuan-Wen, G., Lahiri, D. K., Zawia, N. H., 2005. Lead (Pb) exposure and its effect on APP proteolysis and AB aggregation. *The FASEB Journal*. FJ Express. 2083 pp.

Bell, M. L., Samet, J. M., Dominici, F., 2004, Time-Series Studies of Particulate Matter, *Annual Reviews of Public Health*, 25, 247-80 pp.

Benhammou, A., El Hafiane, Y., Abourriche, A., Abouliatim, Y., Nibou, L., Yaacoubi, A., Tessier-Doyen, N., Smith, A., Tanouti, B., 2016. Influence of sintering temperature of the microstructural and mechanical properties of cordierite synthesized from andalusite and talc. *Materials Letter*. Elsevier. Volume 172. 198-201 pp. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.02.153>.

Bragg, W. H., Bragg, W. L., 1913, The reflection of x-rays by crystals. *Cambridge philosophical society*, 17(1), 43 pp. DOI: 10.1098/rspa.1913.0040.

Cardarelli, F., 2008, *Materials Handbook: A Concise Desktop Reference*. Springer Science & Business Media, 1339 pp. ISBN: 1846286697, 9781846286698.

Castillo-Morales, U. R., 2013, *Diagnostico de línea base de la disponibilidad y bioaccesibilidad gástrica e intestinal de metales asociados a estrés oxidativo en polvo urbano y parques de Hermosillo, Sonora.*, Hermosillo, Sonora, Universidad de Sonora, División de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Geología, Tesis profesional de Maestría en Ciencias-Geología, 91 pp.

CONABIO, 2008. Catálogo de metadatos geográficos., Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad., Consulta: 20/02/17 <<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>>.

Cruz-Campas, M. E., Gómez Álvarez, A., Quintero Núñez, M., Varela Salazar, J., 2013. Evaluación de la calidad del aire respecto de partículas suspendidas totales (PST) y metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr) en la ciudad de Hermosillo, Sonora, México, durante un periodo anual. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29(4), 269-283 pp.

Csavina, J., Field, J., Félix, O., Corral-Avitia, A.Y., Sáez, A. E., Bettertorn, E. A., 2014, Effect of wind speed and relative humidity on atmospheric dust concentrations in semi-arid climates. *Science of the Total Environment*, Elsevier, 487, 82-90 pp. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.03.138.

De La Parra-Velasco, M. L. H., 2008, Evaluación de la erosión eólica, en Hermosillo, Sonora, México. Maestría en Ciencias-Geología en Universidad de Sonora, División de ciencias exactas y naturales, Departamento de Geología, Tesis profesional de maestría.

Del Rio-Salas, R., Ruiz J., De la O-Villanueva M., Valencia-Moreno M., Moreno-Rodríguez V., Gómez-Álvarez A., Grijalva T., Mendivil H., Paz-Moreno F., Meza-Figueroa D., 2012, Tracing geogenic and anthropogenic sources in urban dusts: Insights from lead isotopes, *Atmospheric Environment*, Elsevier, 60, 202-210 pp. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2012.06.061.

Drever, J. I., 1973, The preparation of oriented clay mineral specimens for X-ray diffraction analysis by a filter-membrane peel technique. *American mineralogist*. Volume 58, 553-554 pp.

Eastaugh, N., Walsh, V., Chaplin, T., Siddall, R., 2008, *Pigment Compendium: A Dictionary and Optical Microscopy of Historical Pigments*, Butterworth-Heinemann, 958 pp. ISBN: 978-0-7506-8980-9(hbk).

EPA, 1993. Vacuum Dust Sampling Plan for Stratford, Public health advisory emergency response site (WA4-915), U.S. EPA, Edwin, NJ.

EPA, 2007, Method 6200: Field portable x-ray fluorescence spectrometry for the determination of elemental concentrations in soil and sediment, 32 pp.

EPA, 2016. Particulate Matter (PM) Pollution, <<https://www.epa.gov/pm-pollution>>, Actualización: 1/12/16, Consulta: 20/02/17.

Esguerra, A., Vanegas, O., Fajardo, M., Barona, W., Sánchez, H., 2009, Valuación de la reducibilidad de la calamina proveniente de una siderurgia de la región, por reducción con monóxido de carbono. Suplemento de la revista latinoamericana de metalurgia y materiales, 3, 1289-1294 pp.

Faiz, Y., Tufail, M., Tayyeb, J., M., Chaudhry, M. M., Naila-Siddique. 2009. Road dust pollution of Cd, Cu, Ni, Pb and Zn along Islamabad Expressway, Pakistan. Elsevier. Microchemical Journal. Volumen 92. 186-192 pp.

FAO, 2015, World reference base for soil resources 2014, International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, 106, 192 pp., ISBN: 978-92-5-108369-7.

Ferreira-Baptista, L., De Miguel, E., 2005, Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: A tropical urban environment, Atmospheric Environment, Elsevier, 39(25), 4501-4512 pp. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2005.03.026.

Field, J. P., Belnap, J., Breshears, D. D., Neff, J. C., Okin, G., Whicker, J. J., Painter, T. H., Ravi, S., Reheis, M. C., Reynolds, R. L., 2009, The ecology of dust. Frontiers in Ecology and the Environment. The Ecology Society of America. DOI: 10.1890/090050.

Flhor, J. K., 1997, X-Ray Powder Diffraction handout. U.S. Geological Survey (USGS). Handout information. <<https://pubs.usgs.gov/info-handout/diffraction/html/>>, consulta: 20/02/17.

Frost, R. L., 2004, Raman microscopy of selected chromate minerals. Journal of raman spectroscopy, 35(2), 153–158 pp. DOI: 10.1002/jrs.1121.

Gaines, R. V., Skinner, H. C. W., Foord, F. E., Mason, B., Rosenzweig, A., 1997, Dana's New Mineralogy: The System of Mineralogy of James Dwight Dana and Edward Salisbury Dana. 8th Edition, 1819 pp. ISBN-10: 0471193100.

García-Rico, L., Meza-Figueroa, D., Gandolfi, J. A., Del Río-Salas, R., Romero, M. R., Meza-Montenegro, M. M., 2016, Dust-Metal sources in an urbanized arid zone: implications for health-risk assessments. *Archives of environmental contaminations and toxicology*, 70(3), 522-533 pp. DOI: 10.1007/s00244-015-0229-5.

García-Rico, L., Torres, M., Baez, A., 2008, Determination of trace elements in total suspended particles at the Southwest of Mexico City from 2003 to 2004, *Chemistry and Ecology*, 24, 157-67 pp.

Geisseler, D., Lazicki, P. A., Scow, K. M., 2016, Mineral nitrogen input decreases microbial biomass in soils under grasslands but not annual crops. *Applied Soil Ecology* 106, 1-10 pp.

Gilbert, P. M., Harrison, J., Heil, C., Seitzinger, S., 2006, Escalating worldwide use of urea – a global change contribution to coastal eutrophication. *Biogeochemistry*, 77, 441-463 pp. DOI 10.1007/s10533-005-3070-5.

Ginoux, P., J. M. Prospero, T. E. Gill, N. C. Hsu, Zhao, M., 2012, Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products, *Reviews of Geophysics*, 50(3), 36 pp. DOI: 10.1029/2012RG000388.

González-Sandoval, J., 2005, Carta Geohidrológica de la ciudad de Hermosillo, Sonora, México., Hermosillo, Sonora, Universidad de Sonora, División de ciencias exactas y naturales, Departamento de Geología, Tesis profesional de Maestría en Ciencias-Geología.

Goudie, A. S., 2013, Desert dust and human health disorders. *Environment International*, Elsevier, 63, 101-113 pp.

Gunawardana, C., Egodawatta, P., Goonetilleke, A., 2014, Role of particle size and composition in metal adsorption by soils deposited on urban road surfaces, *Environmental Pollution*, Elsevier, 184, 44-53 pp. DOI: 10.1016/j.envpol.2013.08.010.

Gunnar, N., 1998. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. Metales: propiedades químicas y toxicas. Capítulo 63. Editorial Chantal Dufresne. Cuarta edición. ISBN: 84-7434-987-7.

Gutiérrez-Ginés, M. J., Ranz, I., 2010, Utilización de un equipo portátil de fluorescencia de rayos x para el estudio de metales pesados en suelos: puesta a punto y aplicación a vertederos, Madrid, España, Universidad de Alcalá, Departamento de Ecología, 109-120 pp, I.S.B.N.: 978-84-8138-865-7.

Hentschke, R., Ballnus, C., Meyer, J., 2016, Remarks on the interpretation of IR-absorption studies applied to the surfaces of silica nanoparticles, The Journal of Physical and Chemistry, 120(17), 9229-9235 pp. DOI:10.1021/acs.jpcc.6b00807.

Horiba Scientific, 2017, <<http://www.horiba.com/scientific/products/x-ray-fluorescence-analysis/tutorial/x-ray-fluorescence-the-basic-process/>>, Consulta: 20/02/17.

Horowitz, J. A., 1985, A primer on trace metal-sediment chemistry, U. S. Geological Survey Water-Supply Paper 84-2277, Department of the Interior. USA. 67 pp.

INEGI, 2004, Guía para la interpretación de cartografía edafológica, <<http://www.inegi.org.mx/inegi/SPC/doc/INTERNET/EDAFI.pdf>>, consulta: 18/10/15, ISBN: 970-13-4376-X.

INEGI, 2008, Edafología, Recursos naturales, <<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/edafologia/>>, Consulta: 20/02/17.

INEGI, 2012, Perspectiva estadística de Sonora, 99 pp., <www.inegi.org.mx>, Consulta: 20/02/17.

INEGI, 2014, Uso de suelo y vegetación, <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/uso_suelo/>, Consulta: 20/02/17.

INEGI, 2016, Encuesta intercensal 2015, <<http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/accesomicrodatos/encuestas/hogares/especiales/ei2015/>>, Consulta: 05/03/17.

Jeffs, R. A., Jones, W., 1999, Additives for paint. Paint and Surface Coatings: Theory and Practice. Edition Lambourne, R., Steven, Woodhead Publishing, 185-197 pp. ISBN: 978-1-85573-348-0.

Kinter, E. B., Diamond, S., 1956, A new method for preparation and treatment of oriented-aggregate specimens of soil clays for X-ray diffraction analysis. *Soil Science*, 81(2), 111-120 pp.

Kopani, M., Kopaniova, A., Trnka, M., Caplovicova, M., Rychly, B., Jakubovsky, J., 2016, Cristobalite and hematite particles in human brain. *Biological Trace Elements Research*, 174(1), 52-57 pp. DOI 10.1007/s12011-016-0700-9.

Liu, L., Chen, R., Liu, W., Zhang, Y., Shi, X., Pan, Q., 2015, Fabrication of superhydrophobic copper sulfide film for corrosion protection of copper. *Surface and coatings technology*, Elsevier, 272, 221-228 pp.

Lozano, R., Bernal, J. P., 2005. Characterization of a new set of eight geochemical reference materials for XRF major and trace element analysis. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. Volumen 22-3. 329-344 pp.

Luque-López, L., 2013, Criolectroforesis con cloruro de amonio: una descripción de su efecto analgésico y antiinflamatorio en burstis intertuberal (bicipital) y lesiones en el tendón del bíceps braquial., *Especialidad en Medicina Deportiva del equino.*, Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Veterinarias, Tesina profesional, 24 pp.

Maseda, M. T., Ortuño, M. G., 2014, Panorama minero. Instituto Geológico y Minero de España, < <http://www.igme.es/PanoramaMinero/PMLin.htm>>, Consulta: 20/02/17.

Mészáros, E., 1999. *Fundamentals of atmospheric aerosol chemistry*. Editorial Budapest: Akadémiai Kiadó. 308 pp. ISBN: 9630576244 9789630576246.

Meza-Figueroa, D., De la O-Villanueva, M., De la Parra, M., 2007, Heavy metal distribution in dust from elementary schools in Hermosillo, Sonora, México, *Atmospheric Environment*, Elsevier, 41(2), 276–288 pp.

Meza-Figueroa, D., González-Grijalva, B., Del Rio-Salas, R., Coímbra, R., Ochoa-Landin, L., Moreno-Rodríguez, 2016, Traffic signatures in suspended dust at pedestrian levels in semiarid zones: Implications for human exposure, *Atmospheric environment*, Elsevier, 138, 4-14 pp. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.05.005.

Migliavacca, D. M., Teixeira, E. C., Gervasoni, E., Conceicao R. V., Rodriguez M. T., 2009, Characterization of wet precipitation by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) in the metropolitan area of Porto Alegre, Brazil. *Journal of Hazardous Materials*, 171, 230-240 pp. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.05.135.

Moreno-Rodríguez, V., Del Rio-Salas, R., Adams, D. K., Ochoa-Landin, L., Zepeda, J., Gómez-Álvarez, A., Palafox-Reyes, J. J., Meza-Figueroa, D., 2015, Historical trends and sources of TSP in Sonoran desert city: Can the North American Monsoon enhance dust emissions?. *Atmospheric Environment*, 110, 111-121 pp.

Morrison, D., Lin, Q., Wiehe, S., Liu, G., Rosenman, M., Fuller, T., Wang, J., Filippelli, G., 2013, Spatial relationship between lead sources and children's blood lead levels in the urban center of Indianapolis (USA). *Environmental Geochemistry Health*, 35(2), 171-183 pp., DOI: 10.1007/s10653-012-9474-y.

NCBI, 2017, PubChem Compound Database; CID=24502, <<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/24502>>, Consulta: 06/01/17.

Ochoa-González, R., Strekopytov, S., Amato, F., Querol, Z., Reche, C., Weiss, D., 2016, New Insights from Zinc and Copper Isotopic Compositions into the Sources of Atmospheric Particulate Matter from Two Major European Cities. *Environmental Science and Technology*, 50, 9816-9824 pp. DOI: 10.1021/acs.est.6b00863.

Pancorbo, F. J., 2011, Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación, Editorial Marcombo, 594 pp. ISBN: 978-84-267-1576-0.

PDUCPH, 2015, Programa de desarrollo urbano del centro de población de Hermosillo 2015. Ayuntamiento de Hermosillo. Folleto técnico, 40 pp.

Peiffer-Rangin, F., 1979. Les zones isopoques de Paleozoique inferior du nord-ouest mexicain, témoins de relais entre les Appalaches et Cordillere ouest-américaine: *Comptes Rendus de L Academie des Sciences*. Vol. 288. 1517-1519 pp.

Pope, C. A., 2004. Air Pollution and Health – Good News and Bad. *The New England Journal of Medicine*. Editorials. Massachusetts Medical Society. 1132 - 1134 pp.

Potgieter-Vermaak, S., Rotondo, G., Novakovic, V., Rollins, S., Van Grieken, R., 2012. Component-specific toxic concerns of the inhalable fraction of urban road dust. *Environmental Geochemistry of Health*. Volume 34. Elsevier. 689-696 pp.

Prandel, L. V., Saab, S. C., Brinatti, A. M., Giarola, N. F. B., Leite, W. C., Cassaro, F. A. M., 2014, Mineralogical analysis of clays in hardsettings soils horizons, by x-ray fluorescence and x-ray diffraction using Rietveld method, *Radiation Physics and Chemistry*, Elsevier, 95, 65-68 pp.

Prospero, J. M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S. E., Gill, T. E., 2002. Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. *Revist of Geophysics*. Volume 40. 1002 pp.

Rafnsson, V., Gunnarsdottir, H., 1997, Lung cancer incidence among an Icelandic cohort exposed to diatomaceous earth and cristobalite. *Scandinavian journal of work environment & health*, 23(3), 187-192 pp. PMID: 9243728.

Raisz, E., 1964. *Landforms of Mexico*: Cambridge, Mass., U. S. Office of Naval Research. Geography Branch. Mapa con texto. Escala 1:3,000,000. Segunda edición.

Ramón-García, Ma. L., 2007, *Introducción al método rietveld*, Centro de investigación en energía, Universidad Nacional Autónoma de México, Folleto técnico, 34 pp.

Reis, A. P., Patinha, C., Wragg, J., Dias, A. C., Cave, M., Sousa, A. J., Costa, C., Cachada, A., Ferreira da Silva, E., Rocha, F., Duarte, A., 2014, Geochemistry, mineralogy, soil-phase fractional and oral bioaccessibility of lead in urban soils of Lisbon, *Environmental Geochemistry Health*, 36, 867-881 pp, DOI: 10.1007/s10653-014-9605-8.

Reyes, S., Douglas, M. W., Maddox, R. A., 1994. The southwest area monsoon of north-america (travason/swamp). *Atmosfêra*. Volume 7-2. 117-137 pp. ISSN: 0187-6236.

Rodríguez-Castañeda, J. L., 1981. Notas sobre la geología del área de Hermosillo, Sonora. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología. *Revista Volumen 5-1*. 30-36 pp.

Rodríguez-Sejío, A., Andrade, M. L., Vega, F. A., 2015, Origin and spatial distribution of metals in urban soils. *Journal of soils and sediments*, 1-13 pp., DOI 10.1007/s11368-015-1304-2.

Rosen, M. R., 1989, Sedimentologic, geochemical, and hydrologic evolution of an intracontinental, closed-basin playa (Bristol Dry Lake, California): a model for playa development and its implications for paleoclimate. PhD Dissertation, University of Texas at Austin.

Rosen, M. R., 1991, Sedimentologic and geochemical constraints on the evolution of Bristol Dry Lake Basin, California, USA. *Paleogeography, paleoclimatology, paleoecology*. Elsevier, 84, 229-257 pp. DOI: 10.1016/0031-0182(91)90046-T

Satsangi, P. G., Yadav, S., 2014, Characterization of PM_{2.5} by X-ray diffraction and scanning electron microscopy-energy dispersive spectrometer: its relation with different pollution sources, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11(1), 217-232 pp., DOI: 10.1007/s13762-012-0173-0.

Schlutz, L. G., 1964, Quantitative interpretation of Mineralogical Composition from X-ray and Chemical data from Pierre Shale, Geological survey professional paper 391-C.

Sembiring, S., 2015. Synthesis and characterization of refractory cordierite precursors from rice husk silica. Satya Wacana University Press. 110-117 pp. ISBN: 9786021047217.

Senthilkumar, M., Babu, M. S., 2015, Synthesis and characterization of hexagonal faceted copper sulfide (Cu_{1.8}S) nanodisks. *Material Science in Semiconductor Processing*, Elsevier, 40. 203-208 pp.

SGM, 1999, Carta Geológico-Minera Hermosillo H12-8 Sonora, escala 1:250,000, Cartografía y edición por el servicio geológico mexicano, mapa con texto.

Sielaff, K., Einax, J. W., 2007. The application of Multivariate Statistical Methods for the Evaluation of Soil Profiles. *Journal of Soils and Sediments*. Volume 7-1. Ecomed publisher. 45-52 pp. DOI: <http://dx.doi.org/10.1065/jss2006.11.193>.

Smith, D. K., 2001. Particle statics and whole-pattern methods in quantitative X-ray powder diffraction analysis. Powder Diffraction. Volume 16-4. International Centre for Diffraction Data. DOI:10.1154/1.1423285.

Turci, F., Pavan, C., Leinardi, R., Tomatis, M., Pastero, L., Garry, D., Anguissola, S., Lison, D., Fubini, B., 2016. Revisiting the paradigm of silica pathogenicity with synthetic quartz crystals: the role of crystallinity and surface disorder. Particle and Fibre Toxicology. 13-32 pp. DOI 10.1186/s12989-016-0136-6.

US-EPA, 2011. Toxicological review of urea. EPA/635/R-10/005F, Manuscrito preliminar, <www.epa.gov/iris>, Consulta: 20/02/17.

WHO, 1991. Hydrazine. Health and Safety Guide. Health and Safety Guide No. 56, Editorial Geneva, 6829 pp. ISBN: 9241510560. ISSN: 0259-7268.

Wu, J., Hu, C., Xu, X., Zhang, Y., Lu, C., Wang, D., 2016. Preparation and thermal shock resistance of cordierite-spodumene composite ceramics for solar heat transmission pipeline. Ceramics international, 42, 13547-13554 pp.

Yang, Y., Li, Y. Q., Wals, S., Mitch, W. A., 2015. Degradation of Methyl Bromide by reaction with Thiosulfate and Electrolysis. Environmental Science and Technology. Volume 49. 4515-4521 pp.