



**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN  
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

**POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS**

**Espectrometría de rayos gamma *in situ* para  
evaluar el deterioro y propiedades de las rocas de  
construcción: metodología, interpretación y  
aplicación en el patrimonio cultural edificado**

Tesis que presenta

**Alejandro Méndez Gaona**

Para obtener el grado de

**Doctor en Geociencias Aplicadas**

**Codirectores de la Tesis:**

**Dr. Vsevolod Yutsis**

**Dr. Rubén Alfonso López Doncel**

San Luis Potosí, S.L.P., febrero de 2026



## Constancia de aprobación de la tesis

La tesis “**Espectrometría de rayos gamma *in situ* para evaluar el deterioro y propiedades de las rocas de construcción: metodología, interpretación y aplicación en el patrimonio cultural edificado**” presentada para obtener el Grado de Doctor en Geociencias Aplicadas fue elaborada por **Alejandro Méndez Gaona** y aprobada el **03 de febrero de 2026** por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

**Dr. Vsevolod Yutsis**  
Codirector de la tesis

**Dr. Rubén Alfonso López Doncel**  
Codirector de la tesis

**Dr. Alfredo Aguillón Robles**  
Miembro del Comité Tutorial

**Dr. Uwe Jenchen**  
Miembro del Comité Tutorial

**Dr. José Alfredo Ramos Leal**  
Miembro del Comité Tutorial

**Dr. Sanjeet Kumar Verma**  
Miembro del Comité Tutorial



## **Créditos Institucionales**

Esta tesis fue elaborada en el Laboratorio de Geofísica de la División Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la codirección de los doctores Vsevolod Yutxis y Rubén Alfonso López Doncel.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (No. 813460) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.

Copia del acta de examen



## **Dedicatorias**

Para mi esposa Lidia  
y mis papás

## Agradecimientos

En primer lugar, a mi esposa Lidia. Gracias por tu amor. Este doctorado es por ti y prueba que con el tiempo juntos todo es posible. Te amo.

Muchas gracias a mis papás Sóstenes y Ma. Tereza por todo su apoyo y amor incondicional, los quiero mucho.

A mis hermanos Lucía, Axel, Alan y Sara, gracias y sé que puedo contar con ustedes.

Gracias a ti Julio, prácticamente mi hermano, te debemos mucho.

Les agradezco a Enrique y Enedelia, mis suegros, por su amabilidad y hospitalidad. También a Kike, Maggie y Juanito, por los momentos que hemos y seguiremos compartiendo.

Quiero agradecer al Dr. Vsevolod Yutsis por su sinceridad, apoyo, consejos y porque siempre estuvo disponible para tratar cualquier asunto.

Le agradezco al Dr. Rubén A. López Doncel por su ánimo, comentarios siempre motivadores y por su interés en seguir trabajando conmigo.

A los miembros del comité Dr. Alfredo Aguillón, Dr. Uwe Jenchen, Dr. Sanjeet y Dr. José Alfredo Ramos por sus comentarios atinados que sirvieron para mejorar tanto mis presentaciones como este trabajo de tesis.

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por otorgarme inicialmente la beca para estos estudios de doctorado.

Agradezco al Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica por las becas para el trabajo de campo y la publicación de un artículo.

Igualmente agradezco al Instituto de Geología de la UASLP por permitirme el uso de sus laboratorios y equipos. Gracias Miguel y los chicos del laboratorio de geoquímica por ayudarme con la preparación de las muestras. También agradezco al Ing. Erasmo Mata por la elaboración de las láminas delgadas y a Juan Carlos por su gran ayuda para el corte de las muestras.

Específicamente agradezco el apoyo económico para análisis geoquímicos al Dr. Alfredo Aguillón y al Dr. Uwe Jenchen.

Agradezco a mis compañeros, el personal y a la comunidad del IPICYT. También al Dr. Randall Guevara por su ayuda en campo.

En particular quiero agradecerle Alan por tu ayuda con la edición de varias figuras.

Mi reconocimiento al INAH de San Luis Potosí por permitir este estudio en las Cajas del Agua, específicamente al Mtro. Hugo Cotonieto que otorgó el visto bueno y al Arq. Leonardo González por su seguimiento a este trabajo.

Les agradezco por las facilidades prestadas y su interés en esta temática a las restauradoras Ana y Verónica de la Unidad de Gestión del Centro Histórico.

Agradezco inmensamente a la Dra. Claudia A. García Solís por el apoyo para llevar a cabo las mediciones en la Zona Arqueológica de Chichén Itzá y su disponibilidad para colaborar en la publicación de un artículo derivado de este trabajo. Asimismo, a todo el personal de esta zona arqueológica que estuvo involucrado en el desarrollo de este trabajo.

A mis amigos Javier y Yolanda, siempre un gusto platicar con ustedes.

A todas las personas que omito involuntariamente y que formaron parte de alguna u otra manera en mi formación.

# Contenido

Constancia de aprobación de la tesis	ii
Créditos institucionales	iii
Acta de examen	iv
Dedicatorias	v
Agradecimientos	vi
Lista de tablas	x
Lista de figuras	xiii
Anexos	xix
Resumen	xx
Abstract	xxi
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Justificación del estudio	2
1.3. Espectrometría de rayos gamma	2
1.4. Novedad del tema	4
1.5. Objetivos	5
1.5.1. Objetivo general	5
1.5.2. Objetivos específicos	5
1.6. Hipótesis	6
1.7. Áreas de estudio	7
1.7.1. Centro Histórico de San Luis Potosí	7
1.7.1.1. Contexto histórico	10
1.7.1.2. Contexto geológico	11
1.7.2. Zona Arqueológica de Chichén Itzá	14
1.7.2.1. Contexto histórico	16
1.7.2.2. Contexto geológico	17
1.8. Estructura y contenido de la tesis	21
2. Espectrometría de rayos gamma: fundamentos teóricos	23
2.1. Radiación gamma	24
2.2. Interacciones con la materia	24
2.3. Detección de la radiación	28
2.3.1. Espectrómetros de escintilación	28
2.3.2. Factores que afectan la detección	30
2.4. Distribución de radioelementos	33
2.4.1. Potasio	33
2.4.2. Uranio	34
2.4.3. Torio	34
2.4.4. Rocas ígneas intrusivas y volcánicas	35
2.4.5. Rocas sedimentarias	36
2.4.6. Rocas metamórficas	38
3. Metodología propuesta para la espectrometría de rayos gamma <i>in situ</i> en construcciones	39

3.1. Consideraciones previas	39
3.1.1. Calibración del espectrómetro	40
3.1.2. Selección de afloramientos apropiados	42
3.1.3. Condicionantes ambientales	43
3.2. Espectrometría de rayos gamma en los afloramientos	44
3.3. Espectrometría de rayos gamma en las construcciones	45
3.4. Correcciones típicas	46
3.5. Correcciones propuestas	47
3.6. Interpretación de los datos espectrométricos	51
3.6.1. Variaciones causadas por meteorización/deterioro	52
3.6.2. Variaciones causadas por cambios en propiedades físicas y contenido de humedad	56
4. Litología y patrones de deterioro	59
4.1. Materiales y métodos	59
4.1.1. Descripción litológica	59
4.1.2. Descripción de las formas de deterioro y condiciones de meteorización	59
4.1.3. Muestreo	61
4.1.4. Petrografía	61
4.1.5. Difracción de rayos X	63
4.2. Ignimbrita Cantera, San Luis Potosí	63
4.2.1. Afloramiento	63
4.2.2. Caja del Agua Conservera	65
4.2.3. Caja del Agua del Santuario	69
4.2.4. Petrografía	72
4.2.5. Difracción de rayos X	77
4.3. Formación Chichén Itzá, Zona Arqueológica de Chichén Itzá	79
4.3.1. Afloramientos	79
4.3.2. Templo Norte del Gran Juego de Pelota	82
4.3.3. Petrografía	85
4.3.4. Difracción de rayos X	92
5. Espectrometría de rayos gamma	95
5.1. Materiales y métodos	95
5.1.1. Equipo, adquisición y procesado de datos espectrométricos	95
5.1.2. Medición de humedad	97
5.2. Ignimbrita Cantera, San Luis Potosí	98
5.2.1. Afloramiento	98
5.2.2. Caja del Agua Conservera	103
5.2.3. Caja del Agua del Santuario	108
5.2.4. Diferencias entre el afloramiento y las Cajas del Agua	116
5.3. Formación Chichén Itzá, Zona Arqueológica de Chichén Itzá	119
5.3.1. Afloramientos	119
5.3.2. Templo Norte del Gran Juego de Pelota	125
5.3.3. Diferencias entre los afloramientos y el Templo Norte	131
6. Propiedades físicas y mecánicas	135
6.1. Materiales y métodos	135
6.1.1. Experimentos petrofísicos	135

6.1.2. Cálculo de propiedades petrográficas y químicas relacionadas	144
6.2. Ignimbrita Cantera, San Luis Potosí	146
6.2.1. Densidad y porosidad	146
6.2.2. Absorción de agua	148
6.2.3. Expansión hídrica y térmica	153
6.2.4. Resistencia a la cristalización de sal	156
6.2.5. Índice de empaquetamiento de cationes y peso atómico medio	158
6.2.6. Correlaciones entre propiedades	159
6.3. Formación Chichén Itzá, Zona Arqueológica de Chichén Itzá	162
6.3.1. Densidad y porosidad	162
6.3.2. Absorción de agua	164
6.3.3. Resistencia a la cristalización de sal	166
6.3.4. Peso atómico medio	168
6.3.5. Correlaciones entre propiedades	169
7. Propiedades geoquímicas	171
7.1. Materiales y métodos	171
7.2. Ignimbrita Cantera, San Luis Potosí	177
7.2.1. Concentraciones de elementos mayores	177
7.2.2. Clasificación por elementos mayores	184
7.2.3. Índices de meteorización	185
7.2.4. Concentraciones de elementos traza y tierras raras	187
7.3. Formación Chichén Itzá, Zona Arqueológica de Chichén Itzá	192
7.3.1. Concentraciones de elementos mayores	192
7.3.2. Índices de meteorización	197
7.3.3. Concentraciones de elementos traza y tierras raras	199
8. Discusión	205
8.1. Metodología propuesta para la corrección de datos espectrométricos en construcciones	205
8.2. Controles mineralógicos y litológicos en la espectrometría de rayos gamma	207
8.3. Variaciones en la espectrometría de rayos gamma causadas por meteorización química	210
8.4. Patrones de deterioro	213
8.5. Contenido de humedad y atenuación de los rayos gamma	216
8.6. Modificación de propiedades físicas por procesos de deterioro en rocas de construcción	219
8.7. Consideraciones sobre la espectrometría de rayos gamma en el estudio del patrimonio edificado	226
9. Conclusiones	229
Referencias	235
Anexos	279

## Lista de tablas

1. Coeficientes de <i>stripping</i> y su descripción.	41
2. Características de las muestras recolectadas de la Ignimbrita Cantera en el afloramiento y en la CAS.	61
3. Características de las muestras recolectadas de la Formación Chichén Itzá en los afloramientos.	62
4. Composición de las muestras de la Ignimbrita Cantera en porcentaje. Mat: matriz. Q: cuarzo. F: feldespato alcalino. Op: opacos. Bi: biotita. Po: pómez. FL: fragmentos líticos. Cl: clorita. Cal: calcita. Tot: total.	73
5. Normalización de los parámetros cuarzo (Q), feldespatos alcalinos (A) y plagioclasas (P) para graficar en el diagrama QAP.	77
6. Coordenadas de los afloramientos estudiados en la Zona Arqueológica de Chichén Itzá.	80
7. Resultados del análisis petrográfico y clasificación de las rocas.	86
8. Coeficientes de <i>stripping</i> y sensibilidades del espectrómetro RS-125.	96
9. Rectas de regresión calculadas, desviación estándar, coeficiente de correlación de Pearson y coeficiente de determinación para las variables tasas de conteo y contenido de humedad para el afloramiento.	100
10. Promedio de los valores corregidos con respecto a la coloración observada de las rocas.	102
11. Coeficientes de correlación de Pearson para las rocas del afloramiento.	102
12. Rectas de regresión calculadas, desviación estándar, coeficiente de correlación de Pearson y coeficiente de determinación para las variables tasas de conteo y contenido de humedad para la cara norte de la Caja del Agua Conservera.	106
13. Promedio de los valores corregidos con respecto a las fachadas de la Caja del Agua Conservera.	109
14. Coeficientes de correlación de Pearson para cada fachada por separado y para el total de todos los bloques de la Caja del Agua Conservera.	110
15. Rectas de regresión calculadas, desviación estándar, coeficiente de correlación de Pearson y coeficiente de determinación para las variables tasas de conteo y contenido de humedad para la cara este de la Caja del Agua del Santuario.	112
16. Promedio de los valores corregidos con respecto a las fachadas de la Caja del Agua del Santuario.	115
17. Coeficientes de correlación de Pearson para cada fachada por separado y para el total de todos los bloques de la Caja del Agua del Santuario.	116
18. Rectas de regresión calculadas, desviación estándar, coeficiente de correlación de Pearson y coeficiente de determinación para las variables tasas de conteo y contenido de humedad para las brechas de los afloramientos.	120
19. Rectas de regresión calculadas, desviación estándar, coeficiente de correlación de Pearson y coeficiente de determinación para las variables	122

tasas de conteo y contenido de humedad para las calizas de los afloramientos.	
20. Promedio de los valores corregidos de acuerdo con la litología.	123
21. Coeficientes de correlación de Pearson separados de acuerdo con la litología de los afloramientos.	124
22. Rectas de regresión calculadas, desviación estándar, coeficiente de correlación de Pearson y coeficiente de determinación para las variables tasas de conteo y contenido de humedad para las brechas del Templo Norte.	127
23. Rectas de regresión calculadas, desviación estándar, coeficiente de correlación de Pearson y coeficiente de determinación para las variables tasas de conteo y contenido de humedad para las calizas del Templo Norte.	129
24. Promedio de los valores corregidos de acuerdo con la litología.	130
25. Coeficientes de correlación de Pearson separados de acuerdo con la litología de la pared interna oeste del Templo Norte.	131
26. Temperatura mostrada en la plancha y temperatura real calculada según el manual del fabricante.	142
27. Parámetros de peso y resultados de los cálculos de densidad y porosidad.	147
28. Promedio de los resultados de densidad y porosidad. Se incluye también la coloración registrada en campo para comparación.	148
29. Parámetro de peso, resultados de absorción de agua y coeficiente de saturación.	149
30. Promedio de los resultados de absorción y coeficiente de saturación.	150
31. Resultados de absorción por capilaridad, penetración y capacidad de agua en dos ejes diferentes con sus anisotropías respectivas.	151
32. Resultados de expansión hídrica y térmica, coeficiente de expansión térmica, y deformación térmica residual.	154
33. Resultados de la pérdida de peso para el ciclo 24.	156
34. Resultados para el cálculo del índice de empaquetamiento de cationes y peso atómico medio.	159
35. Matriz de coeficientes de correlación con las correlaciones más importantes remarcadas: celeste excelente correlación, verde oscuro gran correlación, verde claro muy buena correlación, amarillo buena correlación, naranja claro correlación media.	160
36. Parámetros de peso y resultados del cálculo de densidad y porosidad.	162
37. Parámetro de peso y resultados de los experimentos de absorción y coeficiente de saturación.	164
38. Resultados de absorción capilar, penetración y capacidad de agua en dos diferentes ejes y sus anisotropías respectivas.	165
39. Resultados de la pérdida de peso para el ciclo 24.	166
40. Resultados para el cálculo del peso atómico medio.	168
41. Matriz de coeficientes de correlación con las correlaciones más importantes remarcadas: celeste excelente correlación, verde oscuro gran correlación, verde claro muy buena correlación, amarillo buena correlación, naranja claro correlación media.	170

42. Detalles y concentraciones originales de elementos mayores en porcentaje.	178
43. Valores de elementos mayores ajustados incluyendo LOI.	178
44. Valores ajustados incluyendo la separación del CaO en silicatos y en minerales no silicatos.	179
45. Valores resultantes de la transformación clr para el PCA.	181
46. Componentes principales y porcentaje de varianza explicada por cada uno.	182
47. Índices de meteorización calculados.	185
48. Concentraciones originales de elementos traza en ppm.	188
49. Concentraciones originales de elementos de las tierras raras en ppm.	191
50. Detalles y concentraciones originales de elementos mayores en porcentaje. Los valores con el símbolo < indican que están por debajo del límite de detección.	193
51. Elementos mayores ajustados incluyendo LOI. Los valores por debajo del límite de detección fueron sustituidos por concentraciones bajas para no tener valores faltantes (ceros) y poder realizar el PCA.	195
52. Valores resultantes de la transformación clr para el PCA.	195
53. Componentes principales y porcentaje de varianza explicada por cada uno.	196
54. Resultados de índices de meteorización.	198
55. Concentraciones originales de elementos traza en ppm.	200
56. Concentraciones originales de elementos de las tierras raras en ppm.	202



## Lista de figuras

1. Centro Histórico de San Luis Potosí. La zona en amarillo es el núcleo del polígono de protección y en verde su zona de amortiguamiento ( <i>buffer zone</i> ) de acuerdo con UNESCO (2009). El círculo rojo muestra la posición de la Caja del Agua Conservera y el círculo amarillo la de la Caja del Agua del Santuario (fotografía tomada de Google Earth).	8
2. Inmuebles seleccionados en el Centro Histórico de San Luis Potosí. A. Caja del Agua Conservera. B. Caja del Agua del Santuario.	9
3. Mapa geológico simplificado del CVSSM donde aflora la Ignimbrita Cantera (modificado de SGM, 2008).	13
4. Zona Arqueológica de Chichén Itzá con los sitios principales. En el Gran Juego de Pelota se ubica el Templo Norte (fotografía tomada de Google Earth).	15
5. Monumento seleccionado de la Zona Arqueológica de Chichén Itzá: el Templo Norte del Gran Juego de Pelota.	16
6. Mapa geológico simplificado de la parte central de Yucatán donde aflora la Formación Chichén Itzá (modificado de Zarate-Barradas <i>et al.</i> , 2006).	19
7. Espectro de emisión de rayos gamma de los tres isótopos radioactivos con los picos utilizados para su identificación (tomado de Ellis & Singer, 2008).	25
8. Espectro de energía hipotético registrado por un espectrómetro. Los espectros específicos de cada radioelemento se muestran a otra escala para apreciar sus diferencias (modificado de Ellis & Singer, 2008).	29
9. A y B. Medición en una superficie plana en donde la radiación detectada proviene directamente del área en la que está colocado el espectrómetro. C. En una superficie cóncava se registra más radiación. D. Si el espectrómetro se coloca cerca de otras superficies, entonces detectará más radiación por la influencia de dicha superficie. E. En una superficie convexa se registra menos radiación. F. Si el espectrómetro se coloca cerca de un borde, entonces la superficie está incompleta y se registra menos radiación.	48
10. Localización del afloramiento estudiado (círculo rojo) perteneciente a la Ignimbrita Cantera (coordenadas: 22.089545, -101.073008) (fotografías tomadas de Google Earth).	63
11. Detalle de la Ignimbrita Cantera en la que se pueden distinguir cristales de cuarzo y feldespato de colores grises y blancos, así como minerales oscuros.	64
12. División del afloramiento de acuerdo con las diferencias de color. CRC: rosa claro. CRO: rosa oscuro. CN: naranja.	65
13. Mapeo litológico de la CAC que muestra la coloración de los bloques. En negro están las piezas en donde no se pudo identificar el tipo de roca porque están cubiertas. A. Fachada norte. B. Fachada oeste. C. Fachada sur. D. Fachada este.	66
14. Mapeo de las formas de deterioro de la CAC. A. Fachada norte. B. Fachada oeste. C. Fachada sur. D. Fachada este.	67

15. Mapeo litológico de la CAS que muestra la coloración de los bloques. En negro están las piezas en donde no se pudo identificar el tipo de roca porque están cubiertas. A. Fachada norte. B. Fachada oeste. C. Fachada sur. D. Fachada este.	70
16. Mapeo de las formas de deterioro de la CAS. A. Fachada norte. B. Fachada oeste. C. Fachada sur. D. Fachada este.	71
17. Variaciones de la matriz. A. Influencia de óxidos en la coloración de la matriz de una muestra rosa claro A2. B. Matriz sin influencia de óxidos en muestra de coloración blanca A6. C. Matriz uniformemente anaranjada en muestra que macroscópicamente se aprecia de tonalidad naranja A8. D. Otro tipo de tono de matriz ligeramente más rojiza en muestra de color rosa claro A9. Todas las microfotografías en nicoles cruzados.	74
18. A. Inclusiones de minerales accesorio pesados en cuarzo. B. Macra simple en feldespato alcalino. C. Mineral opaco con su halo de óxido influenciando la coloración de la matriz (nicoses paralelos). D. Crecimiento de calcita probablemente por alteración de pómez. Todas las microfotografías en nicoles cruzados a menos que se indique lo contrario.	75
19. Diagrama QAP con divisiones de Le Maitre (2002). Tfa: traquita de feldespato alcalino. Ctfa: cuarzo-traquita de feldespato alcalino. Rfa: riolita de feldespato alcalino.	78
20. Difractogramas para todas las muestras del afloramiento y la de la CAS. B. biotita. Ca: calcita. H: hematita. M: montmorillonita. Q: cuarzo. S: sanidino.	79
21. Ubicación de los afloramientos estudiados en la Zona Arqueológica de Chichén Itzá (fotografía tomada de Google Earth).	80
22. Brecha con una coloración naranja de la matriz con clastos naranjas y blancos-grises que pasa a una caliza blanca-gris.	81
23. Mapeo litológico de la pared interna oeste del TN. El azul representa a las calizas y el naranja a las brechas calcáreas.	83
24. Mapeo de las formas de deterioro de la pared interna oeste del TN.	84
25. A. Partículas de coloides de paleosuelos. B. Cuarzo anguloso con alteración. Nótese la porosidad fenestral (nicoses cruzados). C. Intraclasto de caliza con microfósiles. D. Peloides en cemento esparítico. Todas las microfotografías en nicoles paralelos a menos que se indique lo contrario.	88
26. A. Laminación gruesa de algas. B. Laminación delgada de algas (nicoses cruzados). C. Vista general de microfósiles: tintínidos, algas verdes y foraminíferos bentónicos. D. Gasterópodo en el centro de la microfotografía y demás microfósiles de algas verdes, tintínidos y foraminíferos bentónicos. Todas las microfotografías en nicoles paralelos a menos que se indique lo contrario.	89
27. A. Intraclasto de caliza. B. Peloides con una coloración anaranjada y rojiza. C. Peloides y oncoide con un fragmento de braquiópodo. D. Foraminíferos bentónicos en cemento esparítico. Todas las microfotografías en nicoles paralelos.	91
28. Difractogramas de todas las muestras de roca y del sascab. Ca: calcita.	92
29. Difractograma de la muestra de suelo SUE1. H: hematita. Ha: halloysita. Q: cuarzo.	93

30. Tasas de conteo de radiación total, potasio, uranio y torio registradas en el afloramiento graficadas contra el contenido de humedad.	98
31. Gráficas de radiación total, potasio, uranio y torio registrados en el afloramiento contra contenido de humedad con los valores descartados en color negro. Se muestran las rectas de regresión lineal calculadas una vez descartados los datos anormalmente altos y bajos.	99
32. Gráficas de radiación total, potasio, uranio y torio registrados en el afloramiento contra contenido de humedad con los valores descartados inicialmente, pero ya corregidos en color gris.	101
33. Tasas de conteo de radiación total, potasio, uranio y torio registradas en la cara norte de la Caja del Agua Conservera contra el contenido de humedad.	103
34. A. Las tasas de conteo en superficies cóncavas son más altas (en negro) que las medias en superficies planas (en blanco), mientras que las tasas de conteo en superficies convexas son menores (en gris). B. Las tasas de conteo con influencias de otras superficies son más altas (en negro) que las medias en superficies normales $2\pi$ (en blanco), mientras que las tasas de conteo en esquinas, por ejemplo, son menores (en gris).	105
35. Gráficas de radiación total, potasio, uranio y torio registrados en la cara norte de la Caja del Agua Conservera contra contenido de humedad con los valores descartados en color negro. Se muestran las rectas de regresión lineal calculadas una vez descartados los datos anormalmente altos y bajos.	106
36. Gráficas de radiación total, potasio, uranio y torio registrados en la cara norte de la Caja del Agua Conservera contra contenido de humedad con los valores descartados inicialmente, pero ya corregidos en color gris.	107
37. Tasas de conteo de radiación total, potasio, uranio y torio registradas en las caras este, oeste y sur de la Caja del Agua Conservera contra el contenido de humedad. De referencia se incluye la recta de regresión calculada de la cara norte.	108
38. Gráficas de radiación total, potasio, uranio y torio registrados en las caras este, oeste y sur de la Caja del Agua Conservera contra contenido de humedad con los valores ya corregidos con la recta de regresión calculada de la cara norte.	109
39. Tasas de conteo de radiación total, potasio, uranio y torio registradas en la cara este de la Caja del Agua del Santuario contra el contenido de humedad.	111
40. Gráficas de radiación total, potasio, uranio y torio registrados en la cara este de la Caja del Agua del Santuario contra contenido de humedad con los valores descartados en color negro. Se muestran las rectas de regresión lineal calculadas una vez descartados los datos anormalmente altos y bajos.	112
41. Gráficas de radiación total, potasio, uranio y torio registrados en la cara este de la Caja del Agua del Santuario contra contenido de humedad con los valores descartados inicialmente, pero ya corregidos en color gris.	113
42. Tasas de conteo de radiación total, potasio, uranio y torio registradas en las caras norte, oeste y sur de la Caja del Agua del Santuario contra el	114

contenido de humedad. De referencia se incluye la recta de regresión calculada de la cara este.	
43. Gráficas de radiación total, potasio, uranio y torio registrados en las caras norte, oeste y sur de la Caja del Agua del Santuario contra contenido de humedad con los valores ya corregidos con la recta de regresión calculada de la cara este.	115
44. Radiación total y concentraciones reales de potasio, uranio y torio para el afloramiento (en negro), Caja del Agua Conservera (en blanco) y Caja del Agua del Santuario (en gris).	117
45. Tasas de conteo de radiación total, potasio, uranio y torio registradas en las brechas de los afloramientos graficadas contra el contenido de humedad.	119
46. Gráficas de radiación total, potasio, uranio y torio registrados en las brechas del afloramiento contra contenido de humedad con los valores descartados en color rojo oscuro. Se muestran las rectas de regresión lineal calculadas una vez descartados los datos anormalmente altos y bajos.	120
47. Gráficas de radiación total, potasio, uranio y torio registrados en las brechas del afloramiento contra contenido de humedad con los valores descartados inicialmente, pero ya corregidos en color rojo oscuro.	121
48. Tasas de conteo de radiación total, potasio, uranio y torio registradas en las calizas de los afloramientos graficadas contra el contenido de humedad.	121
49. Gráficas de radiación total, potasio, uranio y torio registrados en las calizas del afloramiento contra contenido de humedad con los valores descartados en color azul oscuro. Se muestran las rectas de regresión lineal calculadas una vez descartados los datos anormalmente altos y bajos.	122
50. Gráficas de radiación total, potasio, uranio y torio registrados en las calizas del afloramiento contra contenido de humedad con los valores descartados inicialmente, pero ya corregidos en color azul oscuro.	123
51. Tasas de conteo de radiación total, potasio, uranio y torio registradas en las brechas del Templo Norte graficadas contra el contenido de humedad.	125
52. Gráficas de radiación total, potasio, uranio y torio registrados en las brechas del Templo Norte contra contenido de humedad con los valores descartados en color rojo oscuro. Se muestran las rectas de regresión lineal calculadas una vez descartados los datos anormalmente altos y bajos.	126
53. Gráficas de radiación total, potasio, uranio y torio registrados en las brechas del Templo Norte contra contenido de humedad con los valores descartados inicialmente, pero ya corregidos en color rojo oscuro.	127
54. Tasas de conteo de radiación total, potasio, uranio y torio registradas en las calizas del Templo Norte graficadas contra el contenido de humedad.	128
55. Gráficas de radiación total, potasio, uranio y torio registrados en las calizas del Templo Norte contra contenido de humedad con los valores	129

descartados en color azul oscuro. Se muestran las rectas de regresión lineal calculadas una vez descartados los datos anormalmente altos y bajos.	
56. Gráficas de radiación total, potasio, uranio y torio registrados en las calizas del afloramiento contra contenido de humedad con los valores descartados inicialmente, pero ya corregidos en color azul oscuro.	130
57. Radiación total y concentraciones reales de potasio, uranio y torio para las brechas y calizas del afloramiento (naranja claro y azul claro) y del Templo Norte (naranja oscuro y azul oscuro).	133
58. Prueba de absorción de agua por capilaridad en donde una cara del cubo tiene que estar en contacto con la superficie del agua para que esta absorba agua del menisco.	138
59. Prueba de expansión hídrica en donde se muestra la configuración usada para medir los cambios de longitud de una muestra. Se utilizó un cilindro inerte para que el micrómetro no estuviera en contacto directo con el agua.	140
60. Prueba de expansión térmica en donde se observa la configuración elegida para medir los cambios de longitud de la muestra en dos ejes.	141
61. Resultado de la prueba de absorción por capilaridad. Cada muestra tiene dos líneas que representan sus absorciones en dos ejes. Nótese que la muestra A8 tiene una pendiente muy baja, llegando a la hora casi con el mismo valor de absorción. La muestra A7 tiene este comportamiento similar, pero solo para su eje Z.	151
62. Muestra A4-B al finalizar la prueba de absorción de agua por capilaridad donde se nota cómo el agua logra saturar prácticamente todo el cubo.	153
63. Gráficas de expansión térmica en el intervalo de 30-90-30°C.	155
64. Progresión del experimento de resistencia a la cristalización de sal por DWL hasta que la completa destrucción de las muestras en el ciclo 26.	157
65. Evolución de las muestras desde el inicio antes de comenzar con la prueba de DWL hasta el ciclo 17.	158
66. Resultado de la prueba de absorción por capilaridad. Cada muestra tiene dos líneas que representan sus absorciones en dos ejes. Nótese cómo las muestras C1 y C2 no tienen pendiente, por lo que las propiedades calculadas pueden resultar en valores sobreestimados.	166
67. Progresión del experimento de resistencia a la cristalización de sal por DWL hasta el ciclo 26.	167
68. Las muestras de calizas desde el inicio antes de comenzar con la prueba de DWL hasta el ciclo 17 permanecen prácticamente sin cambios perceptibles.	168
69. A. Gráfica de los coeficientes de los componentes principales, es decir, los óxidos. B. Gráfica de las muestras en el sistema de coordenadas de componentes principales.	182
70. Diagrama TAS con todas las muestras de la Ignimbrita Cantera clasificándose como riolita.	184
71. Diagrama de elementos traza normalizados con los valores de UCC de Rudnick & Gao (2003).	189

72. Diagrama de REE normalizados con valores de UCC de Rudnick & Gao (2003). Nótese que las tendencias marcan un ligero enriquecimiento de todos los elementos, excepto por la anomalía negativa de Eu.	192
73. A. Gráfica de los coeficientes de los componentes principales, es decir, los óxidos. B. Gráfica de las muestras en el sistema de coordenadas de componentes principales.	196
74. Diagrama de elementos traza normalizados con la PAAS de Taylor & McLennan (1985).	201
75. Diagrama de REE normalizados con la PAAS de Pourmand et al. (2012).	203

## **Anexos**

1. In situ gamma-ray spectrometry as a non-destructive test for the assessment of building stones: methodology, application, and interpretation	279
2. Insights into gamma-ray spectrometry of building stones in the North Temple of the Great Ball Court, Archaeological Zone of Chichen Itza, Mexico	301
3. Litología y deterioro de la Caja del Agua Conservera	325
4. Litología y deterioro de la Caja del Agua del Santuario	335
5. Litología y deterioro del Templo Norte	339
6. Espectrometría de rayos gamma en el afloramiento de la Ignimbrita Cantera	343
7. Espectrometría de rayos gamma en la Caja del Agua Conservera	345
8. Espectrometría de rayos gamma en la Caja del Agua del Santuario	357
9. Espectrometría de rayos gamma en los afloramientos de la Formación Chichén Itzá	363
10. Espectrometría de rayos gamma en el Templo Norte	365

## Resumen

Espectrometría de rayos gamma *in situ* para evaluar el deterioro y propiedades de las rocas de construcción: metodología, interpretación y aplicación en el patrimonio cultural edificado

**PALABRAS CLAVE.** Pruebas no destructivas, Ignimbrita Cantera, Formación Chichén Itzá, meteorización química

La espectrometría de rayos gamma es una prueba no destructiva que no se ha utilizado extensivamente para el estudio del deterioro, por lo cual se propuso una metodología para consolidar este método para la evaluación de las rocas usadas en las construcciones, principalmente en las que son patrimonio cultural.

La metodología consistió en la corrección de los datos espectrométricos y su interpretación se enfocó en la pérdida de potasio, uranio y torio por procesos de meteorización, con lo cual las construcciones, al estar expuestas a la intemperie, deberían de tener menor radiación que afloramientos con menor tiempo de exposición.

Para probar la metodología se eligieron dos áreas de estudio: el Centro Histórico de San Luis Potosí y la Zona Arqueológica de Chichén Itzá. De la primera se seleccionaron la Caja del Agua Conservera y del Santuario construidas con la Ignimbrita Cantera. De la segunda se eligió el Templo Norte del Gran Juego de Pelota construido con calizas y brechas de la Formación Chichén Itzá.

La interpretación de la espectrometría de rayos gamma fue que las construcciones efectivamente están más meteorizadas que los afloramientos por la pérdida de los radioelementos. Esto se confirmó mediante análisis petrográficos, geoquímicos y por el cálculo de índices de meteorización.

Se encontró que la Caja del Agua del Santuario está más deteriorada que la Caja del Agua Conservera, lo cual tiene sentido considerando que las rocas que las componen tienen una gran absorción por capilaridad que provocó el deterioro en las zonas inferiores, además de que son muy poco resistentes a la cristalización de sal. Esto demostró que la espectrometría de rayos gamma fue útil para identificar áreas deterioradas y con alto contenido de humedad y sales.

En el Templo Norte se encontró además otra utilidad de la espectrometría de rayos gamma: la distinción de diferentes litologías aunque no se puedan distinguir a simple vista y la posibilidad de identificar bloques propensos a deteriorarse por su mayor porcentaje de porosidad como fue el caso de las brechas.

Con estos resultados se concluyó que la espectrometría de rayos gamma se puede aplicar en cualquier tipo de roca sin importar su composición (riolítica y carbonatada) y concentración inicial de radioelementos (muy alta y muy baja), en diferentes condiciones climáticas (semiáridas y tropicales) y en construcciones que tengan poco o mucho tiempo de exposición (cerca de 200 años y mínimo 800 años).



## **Abstract**

In situ gamma-ray spectrometry for deterioration and building stones properties assessment: methodology, interpretation and application in built cultural heritage

**KEY WORDS.** Non destructive tests, Cantera Ignimbrite, Chichen Itza Formation, chemical weathering

Gamma ray spectrometry is a non destructive test that has not been used extensively for the study of stone deterioration, so a methodology was proposed to consolidate this method for the assessment of rocks used for construction, mainly in built cultural heritage.

The methodology consisted in correcting the spectrometric data and its interpretation focused on the loss of potassium, uranium and thorium due to weathering processes, so that the constructions, being exposed to weathering, should have less radiation than outcrops with less exposure time.

To test the methodology, two study areas were chosen: the Historic Center of San Luis Potosí and the Archaeological Zone of Chichen Itza. In the first, the Caja del Agua Conservera and the Caja del Agua del Santuario, built with the Cantera Ignimbrite, were selected. From the latter, the North Temple of the Great Ballcourt, built with limestones and breccias from the Chichen Itza Formation, was chosen.

The interpretation of the gamma-ray spectrometry was that the buildings are indeed more weathered than the outcrops due to the loss of radioelements. This was confirmed by petrographic and geochemical analyses, as well as by the results from weathering indices.

The Caja del Agua del Santuario was found to be more deteriorated than the Caja del Agua Conservera, which is in concordance with the fact that the rocks that compose them have high capillary absorption, causing deterioration in the lower areas, and are also very low resistant to salt crystallization. This demonstrated that gamma-ray spectrometry was useful for identifying deteriorated areas with high moisture and salt content.

In the North Temple, another use of gamma-ray spectrometry was also found: the distinction of different lithologies even if they cannot be distinguished in plain sight and the possibility of identifying blocks prone to deterioration due to their higher percentage of porosity, as was the case with the breccias.

With these results it was concluded that gamma-ray spectrometry can be applied to any type of rock regardless of its composition (rhyolitic and carbonates) and initial concentration of radioelements (very high and very low), in different climatic conditions (semi-arid and tropical) and in constructions that have little or high exposure time (about 200 years and at least 800 years).



# 1. Introducción

## 1.1. Planteamiento del problema

Las rocas utilizadas en la construcción de monumentos e inmuebles que son patrimonio cultural están expuestas a procesos de deterioro, de la misma manera que las rocas en los afloramientos están sometidas a meteorización. El deterioro, definido como los procesos de meteorización que experimentan las rocas de construcción (Vergès-Belmin, 2011; Steiger *et al.*, 2014), se puede observar casi en cualquier edificación, sin importar si son relativamente recientes o en monumentos antiguos como los de zonas arqueológicas.

Los procesos de deterioro provocan cambios en las propiedades de las rocas, lo cual afecta, en mayor o menor medida, su durabilidad (Siegesmund *et al.*, 2002; Benavente *et al.*, 2004; Přikryl, 2013; Steiger *et al.*, 2014; Çelik & Aygün, 2019). Por esta razón, es necesario evaluar tanto el origen, tipo, y extensión de los patrones de deterioro, así como las propiedades de las rocas antes de iniciar cualquier trabajo de restauración (Siedel & Siegesmund, 2014).

Para este propósito de evaluar el deterioro y las propiedades de las rocas de construcción se prefieren las pruebas no destructivas (*non-destructive tests*, NDT) (Fais *et al.*, 2017), ya que como su nombre lo indica, no provocan daños ni son invasivas, lo cual ha aumentado su popularidad para el estudio del patrimonio cultural, ayudando a la conservación de los materiales, al contrario de métodos tradicionales en los que se requieren tomar muestras.

Existe un gran número de NDT que se han utilizado para caracterizar a los materiales de construcción. Algunos ejemplos son: monitoreo de temperatura (Halsey *et al.*, 1998), medidores de humedad (Halsey *et al.*, 1998; Wilhelm *et al.*, 2016; Hatır *et al.*, 2019; Theodoridou & Török, 2019), susceptibilidad magnética (Williams-Thorpe *et al.*, 2000; Monna *et al.*, 2008), martillo de Schmidt (Török, 2002; Aoki & Matsukura, 2007; Hatır *et al.*, 2019; Theodoridou & Török, 2019), durómetro (Török, 2002; Aoki & Matsukura, 2007; Wilhelm *et al.*, 2016), tomografía de resistividad eléctrica (Sass & Viles, 2006), mediciones ultrasónicas (Fontaine *et al.*,

2015; Fais *et al.*, 2017; Menningen *et al.*, 2018), tubo de Karsten (Fontaine *et al.*, 2015; Padilla-Ceniceros *et al.*, 2017), escáner láser (Fais *et al.*, 2017) y métodos sísmicos (Orenday-Tapia *et al.*, 2018, 2021; Hatir *et al.*, 2019). Aún más ejemplos y detalles teóricos y prácticos de los NDT se pueden encontrar en reseñas de varios autores, por ejemplo, McCann & Forde (2001), Schuller (2003), Basu & Aydin (2004), Aydin & Basu (2005), Phillipson *et al.* (2007), Török (2010), Hendrickx (2013), Siedel & Siegesmund (2014), Siegesmund & Dürrast (2014) y Tejedor *et al.* (2022).

## **1.2. Justificación del estudio**

Este listado de ejemplos demuestra la gran diversidad de NDT disponibles actualmente, pero también deja en evidencia que el uso de espectrómetros portátiles de rayos gamma no es común como NDT en el estudio del deterioro de rocas de construcción (Siedel & Siegesmund, 2014), lo cual representa un área de oportunidad para consolidar esta técnica.

## **1.3. Espectrometría de rayos gamma**

Primeramente, los rayos gamma son un tipo de radiación electromagnética que se origina por el decaimiento del potasio y de los isótopos de uranio y torio en sus cadenas de decaimiento. Cada uno de estos elementos emite rayos gamma con una energía definida, por lo cual, al cuantificar esta energía, se puede detectar el isótopo del cual provienen (IAEA, 2003; Ellis & Singer, 2008). De esta manera, mediante la espectrometría de rayos gamma (*gamma-ray spectrometry*, GRS) se identifica la presencia y concentración del potasio, uranio y torio (Rider, 2002; Telford *et al.*, 2004; IAEA, 2010).

El potasio es un elemento bastante común, formando parte de la estructura de minerales como feldespatos, micas y minerales arcillosos, mientras que el uranio y el torio tienen abundancias mucho menores comparadas con el potasio y se

encuentran principalmente en minerales accesorio pesados (Dickson & Scott, 1997; Rider, 2002).

Estos minerales se distribuyen en los diferentes tipos de rocas y les confieren cierto nivel de radiación. Las rocas ígneas ultrabásicas y básicas (peridotita, gabro, basalto) son menos radioactivas que rocas ígneas de composición intermedia (diorita, andesita), mientras que las rocas ígneas félsicas (granito, riolita) son más radioactivas que las anteriores porque tienen más minerales con potasio y concentraciones más altas de uranio y torio (Galbraith & Saunders, 1983; Dickson & Scott, 1997). En rocas sedimentarias, las areniscas de cuarzo y calizas presentan menor radiación que las areniscas feldespáticas, líticas y que las lutitas porque en todas estas rocas predominan minerales con altas concentraciones de radioelementos (Rider, 2002; Sanjurjo-Sánchez & Alves, 2017). Por otra parte, la radiación de las rocas metamórficas depende mayormente de la concentración original de potasio, uranio y torio de su protolito porque la distribución de potasio, uranio y torio no cambia de manera significativa (Dickson & Scott, 1997; Sanjurjo-Sánchez & Alves, 2017).

Estos patrones de radioactividad en minerales y rocas hacen que la medición de la radiación total y el uso de la GRS estén ampliamente extendidos en las geociencias, utilizando para ello espectrómetros portátiles, herramientas de detección diseñadas especialmente para pozos, además de equipo de laboratorio. Por ejemplo, se han aplicado para conocer la distribución de potasio, uranio y torio (Davis & Guilbert, 1973; Myers, 1989; Hladil *et al.*, 2003; Airo & Loukola-Ruskeeniemi, 2004; Doveton & Merriam, 2004; Trindade *et al.*, 2014; Pracejus *et al.*, 2018), distinguir cambios mineralógicos, litológicos, de facies y de ambiente de depósito (Myers & Wignall, 1987; Myers & Bristow, 1989; Hurst, 1990; Martinius *et al.*, 2002; Deconinck *et al.*, 2003; Hesselbo *et al.*, 2009; Šimíček *et al.*, 2012; Day-Stirrat *et al.*, 2021; Moskalewicz *et al.*, 2022), en el estudio de afloramientos como análogos de reservorios de hidrocarburos (Hornung & Aigner, 1999; Evans *et al.*, 2007; Eltom *et al.*, 2013; Méndez-Gaona, 2014; Keeton *et al.*, 2015), para hacer correlaciones (Ettensohn *et al.*, 1979; Slatt *et al.*, 1992; van Buchem *et al.*, 1992; Krassay, 1998; Hadley *et al.*, 2000; Hampson *et al.*, 2005; Bataller *et al.*, 2022), y análisis de

estratigrafía de secuencias (Aigner *et al.*, 1995; Davies & Elliott, 1996; Parkinson, 1996; Koptíková *et al.*, 2010).

Para el estudio conjunto de rocas y suelos es más común utilizar detectores aéreos y montados en vehículos para hacer levantamientos de GRS más regionales, aunque también se emplean espectrómetros portátiles y muestreo para análisis de radioelementos en laboratorio para determinar su distribución y distinguir unidades litológicas y de suelo (Galbraith & Saunders, 1983; Dauth, 1997; Wilford *et al.*, 1997; Pickup & Marks, 2000; Laubenstein & Magaldi, 2008; Moonjun *et al.*, 2017; Fall *et al.*, 2020; Stanfoca-Casagrande *et al.*, 2024), además de derivar ciertas propiedades específicas de los suelos (Martz & de Jong, 1990; Taylor *et al.*, 2002; Viscarra-Rossel *et al.*, 2007; Rawlins *et al.*, 2009; Schuler *et al.*, 2011; Petersen *et al.*, 2012; Rodrigues *et al.*, 2015; Coulouma *et al.*, 2016; de Mello *et al.*, 2021).

La GRS se ha empleado para estudios más específicos como en la identificación del tipo de vegetación (Aspin & Bierwirth, 1997), calcular la cantidad de agua almacenada en la nieve (Kuittinen & Vironmäki, 1980), detectar zonas con contaminación radioactiva (Minty & Brodie, 1994; Ivanov *et al.*, 2019; Martin *et al.*, 2019), para cuantificar la dosis de radiación (Yasmin *et al.*, 2018), y en la arqueología para detectar estructuras sepultadas (Ruffell *et al.*, 2006; Sanjurjo-Sánchez *et al.*, 2018a).

## **1.4. Novedad del tema**

Con respecto a la caracterización de materiales y rocas de construcción, que es la temática de esta tesis, la medición de radiación y la GRS se ha empleado para calcular la dosis de exposición por medio de la distribución de potasio, uranio y torio (Batista-Rodríguez *et al.*, 2022), aunque generalmente se toman muestras con este propósito (Croft & Hutchinson, 1999; Righi & Bruzzi, 2006; Sonkawade *et al.*, 2008; Moharram *et al.*, 2012), lo cual busca evitarse en la conservación de monumentos. Un trabajo destacable es el realizado por Williams-Thorpe *et al.* (2000), quienes aplicaron la GRS *in situ* para determinar la procedencia de columnas de granito

comparadas con afloramientos del mismo tipo de roca y propusieron correcciones de los datos radiométricos, aunque no son aplicables para cualquier construcción.

Ahora bien, aunque sí existen investigaciones que demuestran que la meteorización es un proceso que afecta la distribución de los radioelementos en los minerales y que esto es detectable por medio de la GRS (Tieh *et al.*, 1980; Dickson *et al.*, 1996; Ruffell & Worden, 2000; Chen & Chan, 2002; Carrier *et al.*, 2006; Schnyder *et al.*, 2006; Chan *et al.*, 2007; Wilford, 2012; Ruffell, 2016; Holbrook *et al.*, 2019; Papadopoulos, 2019), este hecho no se ha aplicado extensivamente *in situ* en monumentos para evaluar los procesos de deterioro, exceptuando los trabajos realizados por Sanjurjo-Sánchez *et al.* (2018b), Méndez-Gaona (2020) y Hernández-Santomé *et al.* (2025), sin embargo, en el primero no se proporciona ninguna base metodológica, no se muestra el procesamiento de los datos y se hicieron pocas mediciones; en el segundo, aunque sí se obtuvieron datos espectrales, se trabajó principalmente con la radiación total; y en el último, al igual que en el primero, el número de mediciones efectuadas es bajo.

## **1.5. Objetivos**

### **1.5.1. Objetivo general**

Lo anterior deja en evidencia la falta de investigaciones robustas sobre la aplicación de la GRS para evaluar el deterioro de las rocas que componen las construcciones y monumentos. Por lo cual, el objetivo de esta tesis es proporcionar una metodología repetible en cualquier construcción para el levantamiento, corrección e interpretación de datos de GRS con un espectrómetro portátil y que esté enfocada en la evaluación del deterioro y ciertas propiedades de las rocas de construcción.

### **1.5.2. Objetivos específicos**

Para lograr este propósito, se llevó a cabo un levantamiento de datos de GRS y se corrigieron de acuerdo con el contenido de humedad y geometría de la superficie de medición porque ambos influyen en la obtención de datos. Para la interpretación

se consideraron aspectos mineralógicos y litológicos, así como las propiedades físicas y geoquímicas porque estas son afectadas por procesos de deterioro y meteorización. Todos estos datos fueron analizados estadísticamente para comprobar sus relaciones y así darle validez a la metodología.

## **1.6. Hipótesis**

La hipótesis entonces es que se pueden usar los datos de la GRS *in situ* obtenidos con un espectrómetro portátil para relacionar la distribución de los radioelementos en los bloques de roca con el deterioro de los monumentos sin importar el tipo de litología usada, la fecha de construcción, ni las condiciones climáticas en las que se encuentren.

Esta hipótesis se basa en que la distribución original de potasio, uranio y torio en minerales y rocas, la cual se puede determinar mediante GRS, es modificada por procesos de meteorización química porque el potasio es un elemento muy móvil, además que el uranio y torio también pueden ser movilizados dependiendo de las condiciones ambientales (Adams & Weaver, 1958; Adams *et al.*, 1959; Langmuir, 1978; Langmuir & Herman, 1980; Rasbury & Cole, 2009; Wang *et al.*, 2021), por lo cual la meteorización se puede interpretar a partir de la GRS. Otro aspecto que se debe considerar es que las propiedades físicas de las rocas, especialmente la densidad y porosidad, son modificadas por los procesos de deterioro (Esaki & Jiang, 2000; Benavente *et al.*, 2001; Brimblecombe & Camuffo, 2003; Martinho & Dionísio, 2020), dando lugar a posibles acumulaciones de humedad y sales dentro y entre los bloques, lo cual generaría atenuación de la radiación. Si se toma todo esto en cuenta, entonces el levantamiento de datos de GRS *in situ* podrá ser aplicable como NDT para evaluar el deterioro y ciertas propiedades de las rocas que componen a los monumentos y al patrimonio cultural de cualquier país.



## **1.7. Áreas de estudio**

Con la finalidad de comprobar la hipótesis y cumplir el objetivo de que la GRS *in situ* sea una NDT que se emplee para la evaluación del deterioro se seleccionaron tres monumentos en dos áreas de estudio de importancia cultural: la Caja del Agua Conservera y la Caja del Agua del Santuario en el Centro Histórico de San Luis Potosí, S.L.P., y el Templo Norte del Gran Juego de Pelota en la Zona Arqueológica de Chichén Itzá, Yucatán.

La elección de estos lugares obedece a que son muy distintos, con lo cual se pudo probar la aplicación del método de GRS *in situ* en los siguientes contextos:

- Diferentes tipos de roca. Para las Cajas del Agua se emplearon ignimbritas riolíticas y en el Templo Norte se usaron calizas y brechas calcáreas.
- Diferentes periodos de exposición a la intemperie desde su edificación. Las Cajas del Agua tienen casi 200 años y el Templo Norte por lo menos 800 años.
- Diferentes condiciones ambientales y climáticas de exposición. Las Cajas del Agua están expuestas a un ambiente urbano con clima seco y a casi 2,000 m de altura, mientras que el Templo Norte se ubica en una zona menos urbanizada con un clima tropical y prácticamente a nivel del mar.

A continuación, se presentan las características de las zonas de estudio y su contexto histórico, además de una breve descripción del marco geológico regional.

### **1.7.1. Centro Histórico de San Luis Potosí**

El Centro Histórico de San Luis Potosí (Fig. 1) fue declarado Patrimonio Cultural de la Humanidad por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, UNESCO) en el 2010 como parte del “Camino Real de Tierra Adentro” (UNESCO, 2010b), una ruta comercial que estuvo activa entre los siglos XVI y XIX que iniciaba en la actual Ciudad de México, pasaba por varios estados de



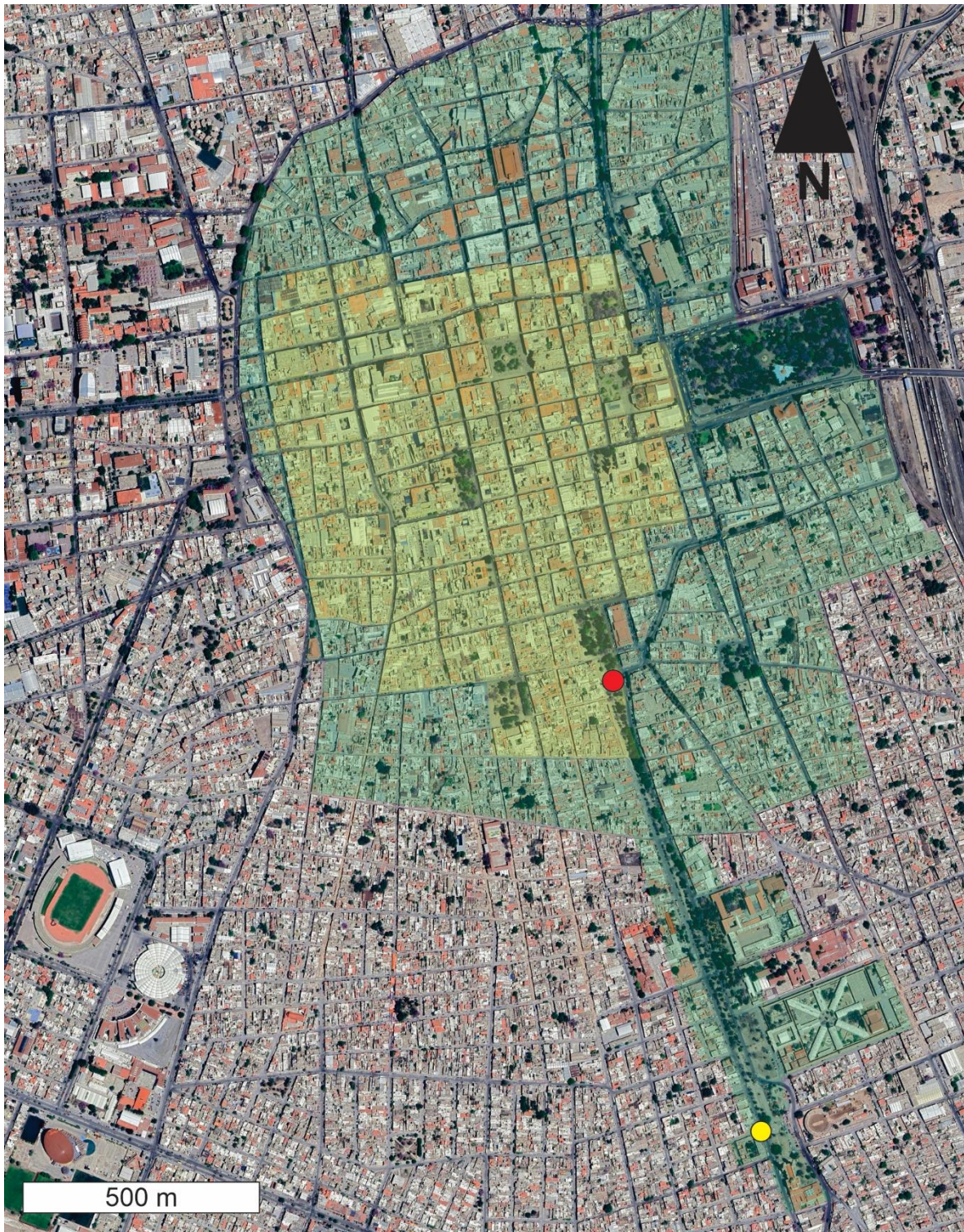


Figura 1. Centro Histórico de San Luis Potosí. La zona en amarillo es el núcleo del polígono de protección y en verde su zona de amortiguamiento (*buffer zone*) de acuerdo con UNESCO (2009). El círculo rojo muestra la posición de la Caja del Agua Conservera y el círculo amarillo la de la Caja del Agua del Santuario (fotografía tomada de Google Earth).



México, entre estos San Luis Potosí, y llegaba hasta Santa Fe, Nuevo México en Estados Unidos (UNESCO, 2010a).

Como se mencionó anteriormente, se eligieron dos construcciones del Centro Histórico (Fig. 2): la Caja del Agua Conservera (CAC) y la Caja del Agua del Santuario (CAS). Se seleccionaron estas debido a que la primera es el ícono de la ciudad, además de que sus dimensiones son lo suficientemente grandes como para obtener una cantidad de datos estadísticamente aceptable y porque se han



Figura 2. Inmuebles seleccionados en el Centro Histórico de San Luis Potosí. A. Caja del Agua Conservera. B. Caja del Agua del Santuario.

planeado y llevado a cabo varias restauraciones en ambos monumentos por parte del municipio (Beltrán-Zavala & Roque-Jiménez, 2018; Roque-Jiménez *et al.*, 2022; Mora, 2024).

#### *1.7.1.1. Contexto histórico*

Durante el gobierno de Ildefonso Díaz de León se planeó un sistema de abastecimiento de agua potable para la ciudad de San Luis Potosí desde la llamada Cañada del Lobo en la Sierra de San Miguelito, además de la construcción de inmuebles para la recolección y distribución de agua conocidos actualmente como Cajas del Agua (González-Urriza, 2017). Su diseño ha sido atribuido a José Guerrero Solache, mientras que su construcción estuvo a cargo de Juan N. Sanabria (Beltrán-Zavala & Roque-Jiménez, 2018; Roque-Jiménez *et al.*, 2022).

Dicho sistema de abastecimiento en la Calzada de Guadalupe fue inaugurado en 1831 durante el gobierno de José Guadalupe de los Reyes (Beltrán-Zavala & Roque-Jiménez, 2018). La CAC se terminó en 1835 (Beltrán-Zavala & Roque-Jiménez, 2018) y las columnas que la rodean se colocaron en 1953 (Beltrán-Zavala *et al.*, 2015). Por otra parte, la CAS se terminó en 1831 al mismo tiempo que el sistema de abastecimiento de agua (Roque-Jiménez *et al.*, 2022).

La ubicación de la CAC es en la Calzada de Guadalupe entre las calles Joaquín Sevilla y Olmedo y Gral. Fuero en el Barrio de San Sebastián. La CAS se ubica en la esquina de la Calzada de Guadalupe con la calle Fernando Montes de Oca en el Barrio de San Miguelito.

El estilo artístico de ambas Cajas del Agua es neoclásico y se construyeron con cantera y mampostería (Beltrán-Zavala & Roque-Jiménez, 2018; Roque-Jiménez *et al.*, 2022). Las características constructivas de la CAC son (Beltrán-Zavala & Roque-Jiménez, 2018): 6.00 m de ancho y 8.25 m de alto con una planta circular con cuatro fachadas similares y a los lados de cada una hay macetones colocados sobre pedestales. En la parte baja de todas las fachadas hay una pileta y un diseño de guirnalda. En el medio de las caras se observa un diseño que asemeja cortinajes y debajo de la cornisa asemeja un patrón de hojas. La parte superior está

parcialmente cubierta de azulejos y está coronada por un piñón. Las columnas alrededor de la CAC tienen características similares (Beltrán-Zavala *et al.*, 2015). Por otra parte, las características constructivas de la CAS son (Roque-Jiménez *et al.*, 2022): 2.10-2.90 m de ancho y 6.20 m de alto con una planta rectangular con cuatro caras similares, destacando la fachada este que es la única en donde se tiene una pileta. Hacia arriba se tiene una moldura y un cinturón con canales verticales. En todas las caras, excepto en la oeste, se encuentran cartelas que en sus puntas tienen diseños de hojas sobre las cuales hay un cuadrado a bajo relieve con dos niveles. En la parte superior se encuentra un peldaño con cuatro piñas en sus esquinas y en la cima un tambor con una piña. Anteriormente, la CAC tenía seis columnas con una reja metálica, pero fueron retiradas en el 2017.

Uno de los sitios de extracción del material empleado en las construcciones del Centro Histórico se encuentra en los alrededores de la Presa El Potosino en la comunidad de Escalerillas, al suroeste de San Luis Potosí (López-Doncel *et al.*, 2015; Roque-Jiménez *et al.*, 2022).

#### 1.7.1.2. Contexto geológico

San Luis Potosí se encuentra en la provincia fisiográfica conocida como Mesa Central, la cual es una planicie elevada que se distribuye por el centro-norte de México y está bordeada por la Sierra Madre Oriental al norte y este, Sierra Madre Occidental al oeste, y por la Faja Volcánica Transmexicana al sur (Aguillón-Robles *et al.*, 1994; Nieto-Samaniego *et al.*, 2005).

La Mesa Central está cortada por el sistema de fallas San Luis-Tepehuanes que la divide en dos regiones: norte y sur. La parte norte presenta cuencas continentales rellenas de sedimentos aluviales y lacustres, mientras que el rasgo más característico de la región sur es su cubierta de rocas volcánicas del Cenozoico (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005).

Es en esta porción sur que se ubica el Campo Volcánico de San Luis Potosí (CVSLP) cuyo vulcanismo inició en el Eoceno medio con lavas andesíticas (Labarthe-Hernández *et al.*, 1982), seguido en el Oligoceno por lavas y productos

piroclásticos de composición andesítica a riolítica (Aguillón-Robles *et al.*, 1994, 2014), mientras que en el Mioceno el vulcanismo estuvo representado por basaltos y riolitas, finalizando con la emisión intermitente de lavas basaníticas en el Plioceno-Pleistoceno (Tristán-González *et al.*, 2009; Latorre-Correa *et al.*, 2023).

De acuerdo con sus características litológicas, estratigráficas y estructurales, Tristán-González *et al.* (2009) dividieron al CVSLP en seis complejos volcánicos: Ahualulco, Pinos, Villa Hidalgo, La Repartición, Sierra de San Miguelito, y Santa María del Río.

El Complejo Volcánico Sierra de San Miguelito (CVSSM) rodea al oeste y sur a la ciudad de San Luis Potosí (Fig. 3) y se compone por un paquete de rocas volcánicas del Oligoceno medio y Mioceno (Labarthe-Hernández *et al.*, 1982). La secuencia perteneciente al Oligoceno (31-26 Ma) está formada por lavas de composición riolítica (Latita Portezuelo y Riolita San Miguelito) que forman domos entre los cuales se encuentra un depósito grueso de flujos piroclásticos (Ignimbrita Cantera) que se extiende en la mayor parte de la Sierra de San Miguelito, además de ignimbritas y flujos sin soldar (Riolita Panalillo) (Labarthe-Hernández *et al.*, 1982; Labarthe-Hernández & Jiménez-López, 1992; Tristán-González *et al.*, 2009). La última actividad volcánica del CVSSM fue durante el Mioceno (21.5 y 20.3 Ma) con lavas basálticas (Basalto Cabras) y traquíticas (Traquita Los Castillo) (Aguillón-Robles *et al.*, 1994; Tristán-González *et al.*, 2009).

Las rocas de la Ignimbrita Cantera han sido usadas para la construcción de la mayoría de los edificios y monumentos del Centro Histórico de San Luis Potosí (Labarthe-Hernández & Jiménez-López, 1992; López-Doncel *et al.*, 2015).

La descripción informal de esta unidad fue hecha por Labarthe-Hernández & Tristán-González (1978) y la formal por Labarthe-Hernández *et al.* (1982) dividiéndola en cuatro miembros, aunque posteriormente Labarthe-Hernández & Jiménez-López (1992) reconocieron que era mejor utilizar una división de acuerdo con su grado de soldamiento, separándola entonces en dos miembros: un miembro inferior no

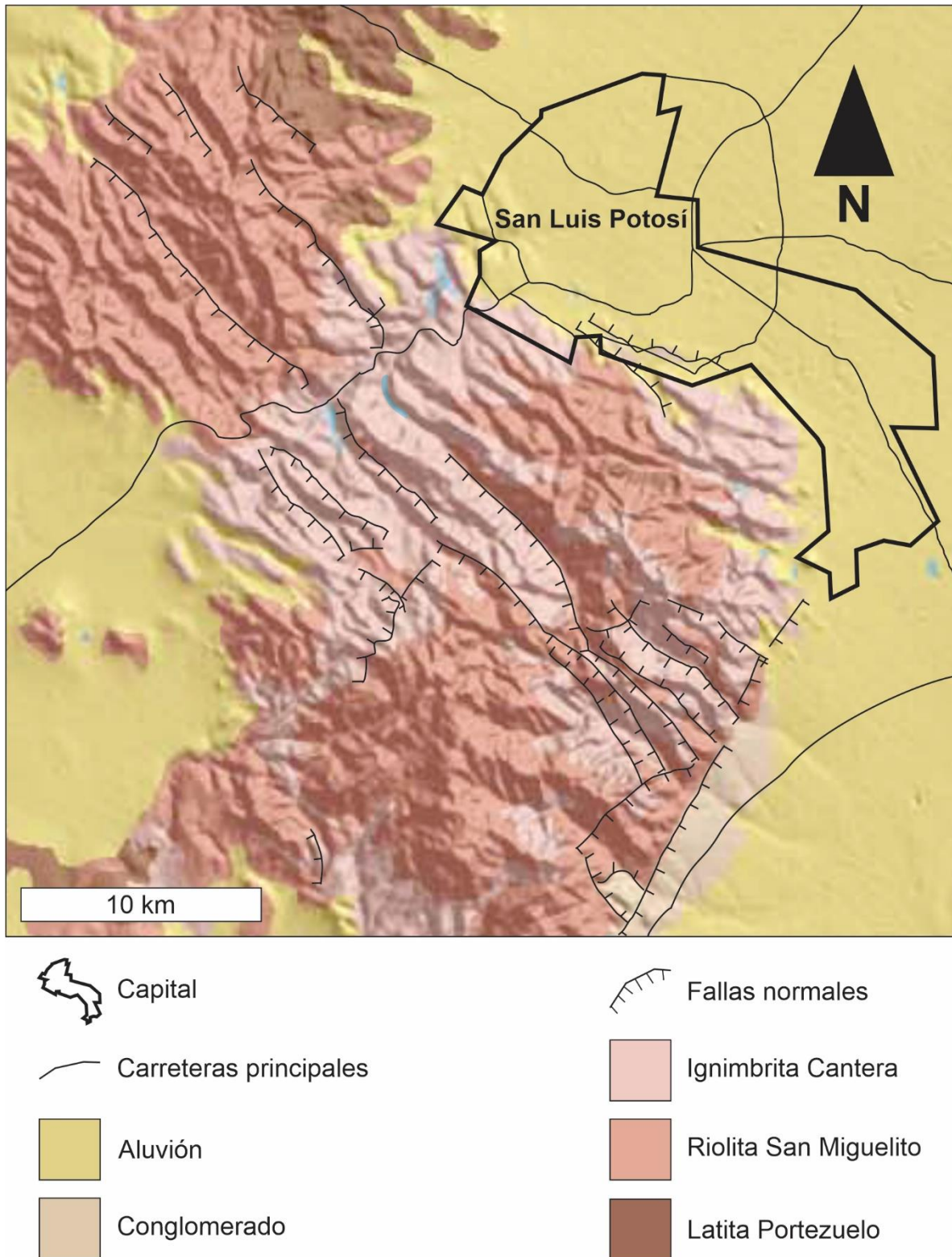


Figura 3. Mapa geológico simplificado del CVSSM donde aflora la Ignimbrita Cantera (modificado de SGM, 2008).



soldado de color blanco grisáceo a rosa y un miembro superior bien soldado de color rosa a café claro, división que ha sido empleada también por otros autores (por ejemplo, Caballero-Miranda *et al.*, 2009).

El espesor de la Ignimbrita Cantera es variable, pudiendo alcanzar más de 300 m en el CVSSM (Labarthe-Hernández & Jiménez-López, 1992; López-Loera & Tristán-González, 2013). Su matriz es de ceniza volcánica con pómez, líticos de riolita y arenisca, fenocristales de cuarzo y feldespato (sanidino), además de biotita, óxidos de hierro y escasa plagioclasa (López-Loera & Tristán-González, 2013; Torres-Hernández *et al.*, 2014).

Esta composición permite clasificarla como una ignimbrita riolítica (Labarthe-Hernández *et al.*, 1982; López-Loera & Tristán-González, 2013; Torres-Hernández *et al.*, 2014). Se determinó su edad en  $29 \pm 1.5$  Ma (Labarthe-Hernández *et al.*, 1982) y  $29.2 \pm 0.8$  Ma (Aguillón-Robles *et al.*, 1994), lo que la sitúa en el Oligoceno.

### **1.7.2. Zona Arqueológica de Chichén Itzá**

La Zona Arqueológica de Chichén Itzá (Fig. 4), en el estado de Yucatán, fue adscrita a la lista de Patrimonio Cultural por la UNESCO en 1988 (UNESCO, 1988), por lo cual es importante que se sigan evaluando los patrones de deterioro de los monumentos y así poder aplicar más medidas de restauración y conservación.

Con este propósito, y como se señaló al principio de este capítulo, las NDT son preferibles en la investigación del subsuelo y de los monumentos de Chichén Itzá. Por ejemplo, se ha utilizado el radar de penetración terrestre (georradar) (Sauck *et al.*, 1998), métodos geofísicos como tomografía de resistividad eléctrica en la Pirámide de Kukulcán (conocida también como El Castillo) para detectar estructuras (Chávez *et al.*, 2015, 2018; Tejero-Andrade *et al.*, 2018), equipo portátil de fluorescencia de rayos X para identificar la composición de materiales arqueológicos como la escultura del Jaguar Rojo también en la Pirámide de Kukulcán (Juárez-Rodríguez *et al.*, 2018), además de resistividad eléctrica y monitoreo de humedad y temperatura para evaluar el comportamiento de sales causantes de deterioro en los elementos policromos de la Subestructura de Guerreros (García-Solís *et al.*, 2025).





Figura 4. Zona Arqueológica de Chichén Itzá con los sitios principales. En el Gran Juego de Pelota se ubica el Templo Norte (fotografía tomada de Google Earth).



De esta zona arqueológica se seleccionó el Templo Norte (TN) del Gran Juego de Pelota (Fig. 5), el cual es el juego de pelota más grande de Mesoamérica (Evans, 2008). Específicamente se hizo el levantamiento de los datos de GRS en la pared interior del lado oeste.



Figura 5. Monumento seleccionado de la Zona Arqueológica de Chichén Itzá: el Templo Norte del Gran Juego de Pelota.

#### *1.7.2.1. Contexto histórico*

Chichén Itzá fue una importante capital maya establecida en el norte de la Península de Yucatán, específicamente en la zona denominada como Tierras Bajas del Norte. Si bien existieron asentamientos en los alrededores de Chichén Itzá, fue a partir del período Clásico Tardío (600-900 d. C.) que se comenzó con la construcción de los

edificios de estilo llamado Maya o Puuc en la parte sur del sitio (en lo que se ha llegado a denominar Chichén Viejo), además de la llegada de extranjeros (Baudez, 2004; Juárez-Rodríguez *et al.*, 2018).

En el Postclásico Temprano (900-1200 d. C.) se incrementó la construcción de monumentos (incluyendo el TN del Gran Juego de Pelota), lo cual se realizó en el estilo llamado Tolteca en la parte norte del sitio, conocido como Chichén Nuevo (Baudez, 2004; Juárez-Rodríguez *et al.*, 2018).

En los inicios del Postclásico Tardío (1200-1521 d. C.) cesó la construcción de grandes edificios y se presentó un declive de la ciudad, aunque continuó siendo un sitio de peregrinaje (Baudez, 2004).

Con respecto al TN, se sitúa en el extremo norte del Gran Juego de Pelota, siendo opuesto al Templo Sur del mismo complejo. Tiene aproximadamente 10 m de largo y 6 m de ancho con una fachada de tres accesos separados por dos columnas (Fig. 5) (Bíró & Pérez de Heredia, 2021). Tanto las columnas como la parte interior están decoradas en bajo relieve y se plantea que fue construido para celebrar la llegada de una nueva figura religiosa, ya que en su bóveda norte aparecen varias representaciones de su predecesor y en las paredes este y oeste se observan festividades y ritos relacionados (Baudez, 2004; Baudez & Latsanopoulos, 2010; Bíró & Pérez de Heredia, 2021).

Todas las edificaciones de la Zona Arqueológica de Chichén Itzá fueron construidas con calizas y brechas calcáreas que afloran dentro y a los alrededores del área (Juárez-Rodríguez *et al.*, 2018), pudiéndose incluso distinguir canteras y piezas extraídas no terminadas o desechadas en varios lugares.

#### *1.7.2.2. Contexto geológico*

La Zona Arqueológica de Chichén Itzá está localizada en la provincia fisiográfica denominada Península de Yucatán, la cual es una plataforma continental carbonatada en el sureste de México que se depositó durante el Cretácico hasta el

Holoceno (Zarate-Barradas *et al.*, 2005) alcanzando un espesor de hasta 3500 m (Viniegra-Osorio, 1981; Hildebrand *et al.*, 1991; Ward *et al.*, 1995).

Una de las principales características de la Plataforma de Yucatán (PY) es su topografía plana sin corrientes superficiales y relieve kárstico dividido en dos grandes regiones separadas por la Sierra de Ticul de aproximadamente 100 m de altura con una dirección NW-SE (de Pablo-Galán, 1996; Zarate-Barradas *et al.*, 2005). La región sur se considera más antigua y está constituida por planicies y lomeríos, mientras que la región norte está representada por planicies más recientes (Lugo-Hubp *et al.*, 1992; de Pablo-Galán, 1996). Otro rasgo importante en la parte norte es que predominan las dolinas conocidas localmente como cenotes, los cuales son formados por procesos disolución de las calizas (Lugo-Hubp *et al.*, 1992). Estos se concentran en una banda semicircular de unos 90 km de radio llamada Anillo de Cenotes que se ha relacionado con el cráter de impacto Chicxulub cerca del límite Cretácico-Paleógeno (Hildebrand *et al.*, 1991; Perry *et al.*, 1995; Ward *et al.*, 1995; Stinnesbeck *et al.*, 2004; Lefticariu *et al.*, 2006).

Los primeros estudios geológicos en el área fueron los de Heilprin (1891), Sapper (1896) y Engerrand & Urbina (1910), seguidos por los de Butterlin (1958) y Butterlin & Bonet (1960, 1963), los cuales complementaron la información de pozos perforados por parte de Pemex (López-Ramos, 1973).

En varios de estos pozos se perforó el basamento de la PY, encontrándose rocas metamórficas del Paleozoico (López-Ramos, 1973; Viniegra-Osorio, 1981; Hildebrand *et al.*, 1991; Ward *et al.*, 1995; Stinnesbeck *et al.*, 2004) o Neoproterozoico (Krogh *et al.*, 1993; Keppie *et al.*, 2011). Sobre este basamento se identificaron capas rojas de areniscas y limolitas del Triásico-Jurásico que sugieren que la plataforma estaba emergida, aunque para el Jurásico Superior comenzó una lenta y continua subsidencia, depositándose evaporitas y calizas hasta el Cretácico Superior (López-Ramos, 1973; Zarate-Barradas *et al.*, 2005; Padilla-y Sánchez, 2007).

Aflorando sobre las rocas del Cretácico Superior está la Formación Icaiché (Paleoceno), una secuencia de caliza intercalada con marga y yeso (López-Ramos,

1973; Bonet & Butterlin, 1979) que yace bajo la Formación Chichén Itzá (Eoceno) conformada por caliza y brecha calcárea (Fig. 6) (Butterlin & Bonet, 1960; Bonet & Butterlin, 1979). Sobre esta formación se depositó de manera concordante un paquete de caliza y coquina del Oligoceno, pero también puede ser cubierta discordantemente por la Formación Carrillo Puerto compuesta por caliza y brecha carbonatada del Mioceno-Plioceno (López-Ramos, 1973; Bonet & Butterlin, 1979; Zarate-Barradas *et al.*, 2005). Fue durante este tiempo que la PY comenzó a emerger en la parte sur (Sansores-Manzanilla, 1959; Padilla-y Sánchez, 2007), mientras que el resto de la plataforma siguió emergiendo gradualmente a partir del

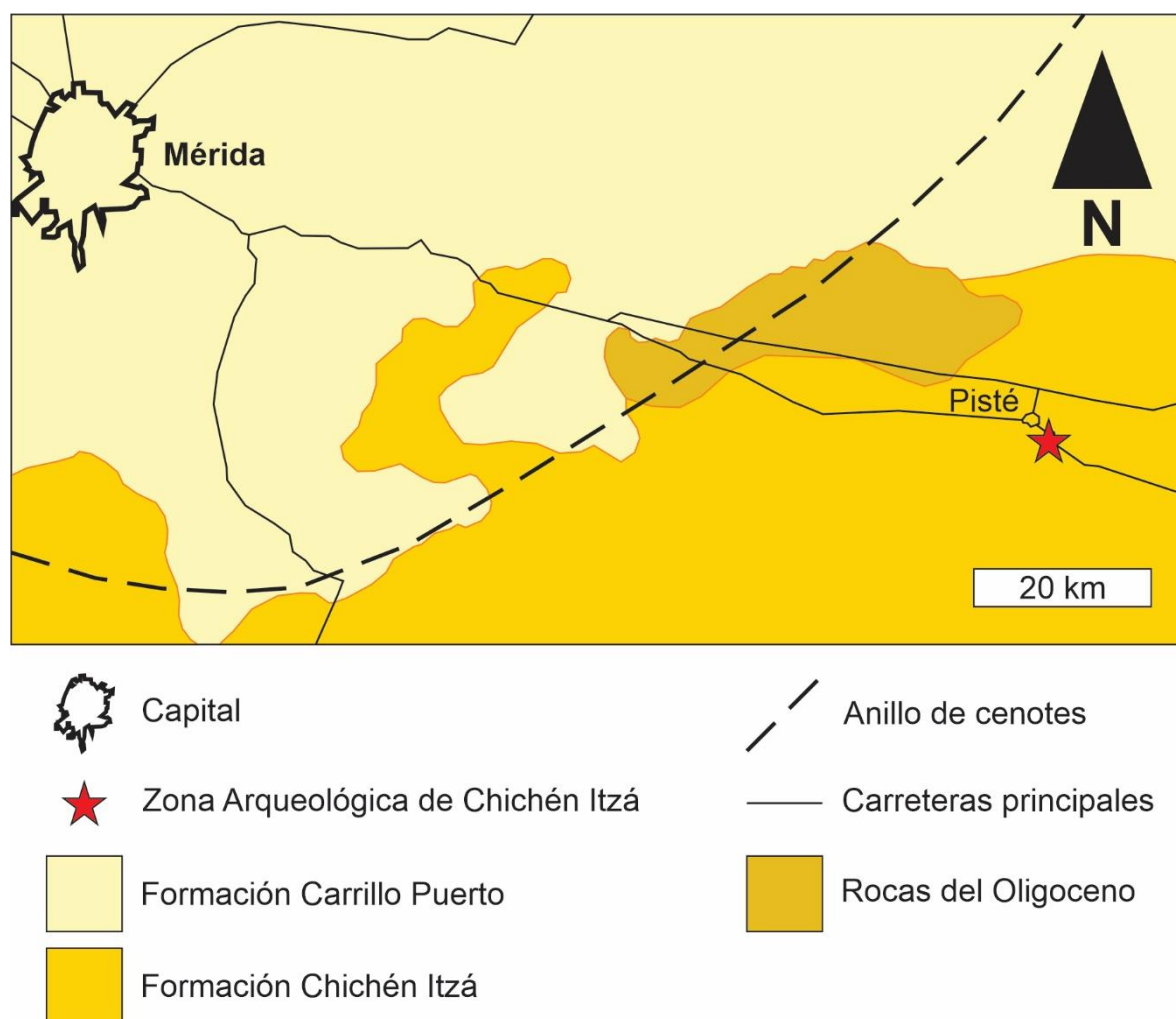


Figura 6. Mapa geológico simplificado de la parte central de Yucatán donde aflora la Formación Chichén Itzá (modificado de Zarate-Barradas *et al.*, 2006).

Plioceno-Pleistoceno, lo cual explica las diferencias en el relieve kárstico (Lugo- Hubp *et al.*, 1992; de Pablo-Galán, 1996). Rocas del Pleistoceno-Holoceno se encuentran en las costas de Yucatán y están conformadas por caliza y coquina (López-Ramos, 1973). Todas estas unidades no muestran deformación y solo están inclinadas ligeramente (Zarate-Barradas *et al.*, 2005).

Como puede notarse, los afloramientos de calizas abundan en la PY, siendo el material de construcción clave de la cultura maya (Straulino-Mainou, 2012; Straulino-Mainou *et al.*, 2013; Espinosa-Morales *et al.*, 2020; García-Solís *et al.*, 2023), además de la extracción de un material calcáreo poco denso y frágil llamado sascab o sahcab en canteras con el nombre derivado de sascaberas (Folan, 1978; Beach, 1998; Arnold, 2005; García-Solís *et al.*, 2023). Específicamente en la Zona Arqueológica de Chichén Itzá, las rocas empleadas para la edificación de sus monumentos pertenecen a la Formación Chichén Itzá.

La descripción formal de esta formación fue hecha por Butterlin (1958), mientras que Butterlin & Bonet (1960) describieron su contenido fósil. Posteriormente, Butterlin & Bonet (1963) la dividieron en tres miembros (Xbacal, Pisté y Chumbec) en concordancia con su estudio previo, aunque en la actualidad no se suele dividir debido a que sus características litológicas son similares (Zarate-Barradas *et al.*, 2006).

El espesor de la Formación Chichén Itzá es cercano a 300 m según información de pozos (López-Ramos, 1973), mientras que en afloramientos se reportan aproximadamente 100 m (Zarate-Barradas *et al.*, 2005). Está constituida por un paquete de caliza y brecha calcárea con coloraciones blancas, amarillas e incluso rojizas y en ocasiones puede presentar horizontes de marga (Sansores-Manzanilla, 1959; López-Ramos, 1973; Zarate-Barradas *et al.*, 2005). Contiene abundantes fósiles, especialmente foraminíferos, además de algas calcáreas e impresiones de moluscos mal conservados, con los cuales se determinó una edad del Eoceno para esta formación (Butterlin & Bonet, 1960, 1963; López-Ramos, 1973; Bonet & Butterlin, 1979).

## 1.8. Estructura y contenido de la tesis

Habiendo considerado la problemática del deterioro en el patrimonio edificado y el campo de oportunidad para consolidar la GRS *in situ* como NDT para su estudio, la cual es una temática prácticamente nueva, se detallaron los objetivos, hipótesis y las áreas de estudio de esta tesis.

Antes de proceder con la descripción del contenido de los próximos capítulos, es necesario aclarar algunos aspectos sobre la terminología utilizada en esta tesis. Se empleará el término roca como sinónimo de piedra cuando se refiera a los materiales pétreos constituyentes de los monumentos. Además, la palabra meteorización se utilizará para referirse al proceso geológico en general, mientras que el término deterioro se usará en un sentido aplicado a los procesos que experimentan las rocas en una construcción.

Otra aclaración es que, derivado de la investigación de esta tesis, se publicaron dos artículos (Méndez-Gaona *et al.*, 2025a, b) (Anexos 1 y 2). El primero se enfoca en la metodología sugerida para el levantamiento de datos de espectrometría de rayos gamma *in situ* con un espectrómetro portátil, se ejemplifica el proceso de corrección, interpretación y aplicación de los datos en las ignimbritas riolíticas empleadas en las construcciones de San Luis Potosí. Por otra parte, el segundo artículo demuestra que la metodología previa es aplicable también en rocas con menor radiación, es decir, las calizas de Chichén Itzá. El contenido de ambos artículos fue utilizado en las diferentes secciones de este texto.

Ahora bien, en el capítulo 2 se describen los fundamentos teóricos y bases físicas sobre los rayos gamma: su origen, características y su interacción con la materia, conceptos básicos para comprender su detección. Sobre este aspecto se describe el funcionamiento de los espectrómetros escintilómetros y se detallan los factores internos y externos que afectan sus tasas de conteo. Finalmente, se enlista la distribución del potasio, uranio y torio en minerales y rocas.

El capítulo 3 está reservado para la descripción detallada de la metodología propuesta con un enfoque en las correcciones por geometría y humedad, además

de los pasos para realizar cada una. Se incluye también la base para la interpretación de los datos.

Comenzando con el capítulo 4 se presentan los resultados de esta tesis. Primero se muestran los resultados que tienen que ver con la litología, desde la descripción a nivel de afloramiento, en las construcciones, hasta la descripción petrográfica por lámina delgada y difracción de rayos X. También se incluye en este capítulo la descripción de los patrones de deterioro en las construcciones.

En el capítulo 5 se encuentran los resultados del levantamiento de la GRS en los afloramientos y construcciones siguiendo la metodología propuesta.

El capítulo 6 trata sobre las propiedades físicas de las rocas empleadas en la construcción de los monumentos estudiados y sus correlaciones, así como una interpretación de cómo los parámetros influyen en los patrones de deterioro.

La última parte de resultados se muestra en el capítulo 7, específicamente se presentan los resultados de los análisis geoquímicos de elementos mayores y el cálculo de índices de meteorización química obtenidos a partir de estos datos, además de concentraciones de elementos traza y de las tierras raras.

En el capítulo 8 se presenta la discusión de los resultados y se presenta en diferentes secciones que relacionan la interpretación de la GRS con la mineralogía y litología, con la humedad, deterioro, meteorización química y los controles petrofísicos, así como las correlaciones entre todas estas propiedades. Finalmente se proporcionan las ventajas de la GRS para el estudio del deterioro en el patrimonio edificado.

Las conclusiones forman parte del capítulo 9, donde se incluyen además ciertas recomendaciones e implicaciones sobre la espectrometría de rayos gamma para el trabajo de restauración y conservación.



## 2. Espectrometría de rayos gamma: fundamentos teóricos

En este capítulo se describen las bases teóricas sobre la radiación gamma. El conocimiento de su origen e interacción con la materia es fundamental para comprender el proceso de detección que puede ser afectado por factores internos y externos, además de la distribución de los radioelementos.

Primeramente, la radiación es el conjunto de todos los decaimientos espontáneos de núcleos inestables en donde se emiten partículas u ondas electromagnéticas (Adams & Gasparini, 1970; Gilmore, 2008; Ferronsky, 2015). Esta radiación nuclear puede ser de tres tipos: alfa, beta y gamma (Basdevant *et al.*, 2005). La radiación alfa ( $\alpha$ ) se compone de núcleos de helio, es decir, dos neutrones y dos protones, resultando en una carga positiva, mientras que la radiación beta ( $\beta$ ) se trata de electrones con carga negativa (aunque puede estar compuesta también por positrones, la antipartícula del electrón con carga positiva) (Knoll, 2010; Cerrito, 2017). Por otra parte, la radiación gamma ( $\gamma$ ) es un tipo de onda electromagnética sin masa ni carga (fotones) (Luthi, 2001; Telford *et al.*, 2004; Ellis & Singer, 2008; Gilmore, 2008; Serra, 2008).

Debido a la naturaleza de la radiación alfa y beta, tienen poca capacidad de penetrar o recorrer grandes distancias en los materiales. Por ejemplo, las partículas alfa pueden ser detenidas por una hoja de papel y las partículas beta por varios milímetros de aluminio (Telford *et al.*, 2004), por lo cual no son importantes para la espectrometría en rocas o suelos, a diferencia de los rayos gamma (Luthi, 2001; Ellis & Singer, 2008; Serra, 2008).

Ahora bien, es necesario hacer una distinción entre los rayos X, los cuales también son ondas electromagnéticas que comparten ciertas características con los rayos gamma como su alta energía y longitud de onda. Lo que diferencia a estas ondas electromagnéticas es su procedencia: los rayos X son emitidos por los electrones que rodean al núcleo atómico, mientras que los rayos gamma son originados en el núcleo (Adams & Gasparini, 1970; Gilmore, 2008).

## 2.1. Radiación gamma

Específicamente, después de que un núcleo ha decaído espontáneamente por radiación alfa o beta, queda en un estado excitado de energía y, para llegar a un estado estable, emite un rayo gamma de una cierta energía (Adams & Gasparini, 1970; Gilmore, 2008; Knoll, 2010; L'Annunziata, 2020a; Cerrito, 2017).

La unidad que se usa para referirse a la energía de la radiación gamma es el electronvoltio (eV) que se define como la energía cinética adquirida por un electrón acelerado a través de un potencial eléctrico de 1 voltio (Knoll, 2010; Cerrito, 2017). Generalmente, y como se encontrará en esta tesis, se usan los prefijos kilo (keV) y mega (MeV) debido a los altos rangos de energía de los rayos gamma de hasta 3 MeV (Fig. 7) (Adams & Gasparini, 1970; Rider, 2002; Telford *et al.*, 2004).

La radiación gamma es generada por el potasio y ciertos elementos en las cadenas de decaimiento del uranio y torio (Serra, 2008). El potasio tiene tres isótopos naturales:  $^{39}\text{K}$ ,  $^{40}\text{K}$  y  $^{41}\text{K}$  con abundancias de 93.2581%, 0.0117% y 6.7302% respectivamente (Ferronsky, 2015). De estos isótopos, solamente el  $^{40}\text{K}$  es inestable y genera un rayo gamma de 1.46 MeV cuando decae a argón ( $^{40}\text{Ar}$ ) (Fig. 7) (Adams & Gasparini, 1970; IAEA, 1979; Basdevant *et al.*, 2005; Knoll, 2010). El uranio también tiene tres isótopos que ocurren naturalmente:  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  y  $^{238}\text{U}$  con sus abundancias respectivas de 0.0055%, 0.7200% y 99.2745% (Ferronsky, 2015). Como puede notarse, el  $^{238}\text{U}$  es el isótopo más abundante y por esta razón sus otros dos isótopos no se emplean en la GRS (Adams & Gasparini, 1970; Luthi, 2001). La serie de decaimiento del uranio tiene un pico distintivo de 1.76 MeV causado por el  $^{214}\text{Bi}$  (Fig. 7). En el caso del torio, su principal isótopo es el  $^{232}\text{Th}$  y su cadena de decaimiento produce un pico distintivo de 2.62 MeV originado por el  $^{208}\text{Tl}$  (Fig. 7) (Rider, 2002; IAEA, 2003, 2010; Telford *et al.*, 2004).

## 2.2. Interacciones con la materia

Conforme los rayos gamma generados por estos radioelementos viajan a través de

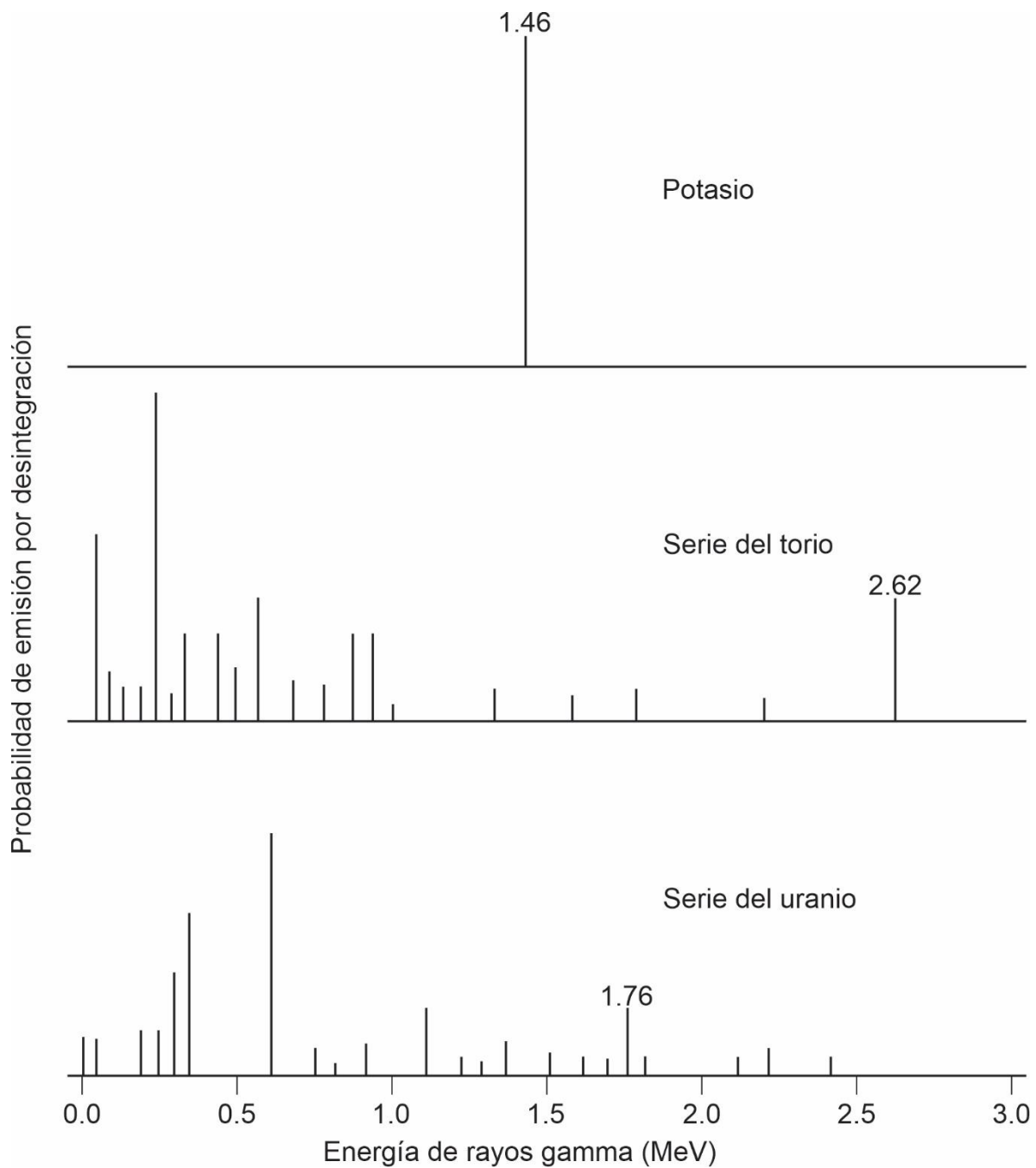


Figura 7. Espectro de emisión de rayos gamma de los tres isótopos radioactivos con los picos utilizados para su identificación (tomado de Ellis & Singer, 2008).

la materia, van perdiendo energía progresivamente, lo cual se denomina atenuación (Rider, 2002). La probabilidad que tiene un rayo gamma de ser atenuado cuando pasa a través de un material se conoce como coeficiente de absorción lineal y

depende de la sección transversal del material (es decir, de su área) y de su número de átomos por unidad de volumen (Knoll, 2010). Tomando en cuenta esta probabilidad y la densidad del material, entonces se puede calcular qué tan fácilmente pueden atravesar los rayos gamma un medio dado, lo cual se conoce como coeficiente de absorción de masa (Adams & Gasparini, 1970; L'Annunziata, 2020a).

Además, la atenuación depende de la energía de los rayos gamma (Gilmore, 2008; L'Annunziata, 2020a). Por ejemplo, para elementos ligeros y rayos gamma de energía intermedia, el coeficiente de absorción de masa variará principalmente por la densidad aparente del material y no por su composición química (Ellis & Singer, 2008; Knoll, 2010). Esta relación es importante y se utiliza para calcular la densidad de rocas y suelos (Luthi, 2001), además de ser un factor que influye al momento de detectar la radiación gamma (Rider, 2002; Telford *et al.*, 2004; Serra, 2008; Ferronsky, 2015).

La interacción de los rayos gamma con la materia también depende de su energía y puede clasificarse en tres tipos: efecto fotoeléctrico, dispersión Compton y producción de pares (Adams & Gasparini, 1970; Knoll, 2010; Ferronsky, 2015; Cerrito, 2017; L'Annunziata, 2020a).

El efecto fotoeléctrico sucede cuando un rayo gamma colisiona con un electrón. El rayo gamma entonces pierde toda su energía y desaparece porque se la transfiere al electrón que después es eyectado del átomo. El efecto fotoeléctrico es el proceso dominante para los rayos gamma con energías menores a 100 keV (Knoll, 2010; Ferronsky, 2015; L'Annunziata, 2020a).

La dispersión Compton también sucede por la colisión de un rayo gamma con un electrón, pero a diferencia del efecto fotoeléctrico, solamente le transfiere una parte de su energía. Entonces el rayo gamma es desviado con cierto ángulo y con una energía menor a la original, mientras que el electrón es eyectado del átomo (Adams & Gasparini, 1970; Knoll, 2010; L'Annunziata, 2020a). Este proceso de interacción predomina para rayos gamma de energía intermedia de 100 keV a 2 MeV (Ferronsky, 2015).

En la producción de pares, el rayo gamma interactúa con el campo eléctrico del núcleo atómico. Aquí el rayo gamma desaparece y se forma un par electrón-positrón, sin embargo, este proceso solo ocurre cuando la energía del rayo gamma es mayor a 1.022 MeV. Como puede notarse, este proceso de interacción sucede a altas energías ( $>1.022$  MeV) (Adams & Gasparini, 1970; Gilmore, 2008; Knoll, 2010; Ferronsky, 2015; L'Annunziata, 2020a).

Todas estas interacciones de los rayos gamma pueden ocurrir con cualquier tipo de materia, incluso en sistemas biológicos, teniendo implicaciones importantes para la salud pública. Anteriormente, la exposición a la radiación se medía como la carga que generaba en el aire y se utilizaba como unidad el roentgen (R). Posteriormente surgió la dosis absorbida que podía ser aplicable a cualquier material y se define como la energía generada por la radiación que es absorbida por la materia. Se utilizaba como unidad el rad (*radiation absorbed dose*) que ha sido reemplazado por el gray (Gy) ( $1\text{ Gy} = 100\text{ rad} = 100\text{ R}$ ) (Basdevant *et al.*, 2005; Knoll, 2010; Cerrito, 2017; L'Annunziata, 2020a).

Para obtener un mejor estimado del daño biológico que produce la radiación, se utiliza la dosis equivalente, la cual, como indica su nombre, equivale al mismo efecto de 1 Gy, pero en un organismo (Basdevant *et al.*, 2005). La unidad antigua para medir la dosis equivalente era el rem (*roentgen equivalent man*), mientras que en actualidad se emplea el sievert (Sv) ( $1\text{ Sv} = 100\text{ rem}$ ) (Knoll, 2010; Cerrito, 2017; L'Annunziata, 2020a).

Una persona puede recibir radiación de diferentes fuentes, por ejemplo, de rayos de origen cósmico (0.26 mSv al nivel mar hasta 0.40 mSv a 2000 m de altura), rayos gamma terrestres (0.46 mSv), radiación gamma por materiales de construcción (0.07 mSv), radón (un producto de decaimiento del uranio y torio, 2.0 mSv), comidas (0.3 mSv) (Basdevant *et al.*, 2005), además de la dosis de radiación médica y radiación artificial por contaminación (L'Annunziata, 2020a).

## **2.3. Detección de la radiación**

Todas estas interacciones de los rayos gamma con la materia son la base para comprender su detección (Adams & Gasparini, 1970; Gilmore, 2008). Uno de los primeros instrumentos para detectar la radiación gamma fue el contador Geiger-Müller que basa su funcionamiento en la ionización de un gas para generar una corriente proporcional a la energía del rayo gamma incidente (IAEA, 1979; Luthi, 2001). Actualmente se usan los contadores de centello o escintilómetros, llamados espectrómetros porque permiten identificar el origen del espectro de energía (Rider, 2002; Telford *et al.*, 2004). A diferencia del contador Geiger-Müller, estos emplean cristales sólidos como forma de detección. A continuación, se describe el funcionamiento de los espectrómetros y las condiciones que afectan la detección de la radiación gamma.

### **2.3.1. Espectrómetros de escintilación**

La detección comienza cuando un rayo gamma llega al espectrómetro e interactúa con los electrones de un cristal especial llamado escintilador (o fósforo) por los procesos descritos anteriormente y estos generan destellos de luz (Adams & Gasparini, 1970; IAEA, 1979; L'Annunziata, 2020b). Aunque existen cristales con diferentes composiciones, son muy comunes los de yoduro de sodio con impurezas de talio que ayudan a la emisión de los destellos de luz (Luthi, 2001; Ellis & Singer, 2008; Gilmore, 2008; Serra, 2008). La energía de los pulsos de luz es proporcional a la energía del rayo gamma incidente, por lo cual, el elemento que lo originó puede ser reconocido (Rider, 2002; IAEA, 2010; Knoll, 2010; Cerrito, 2017).

Los destellos de luz son captados entonces por un fotocátodo que produce electrones y estos a su vez son multiplicados por un tubo fotomultiplicador para crear una corriente eléctrica que sigue siendo proporcional a la energía del rayo gamma incidente original (Adams & Gasparini, 1970; IAEA, 1979, 2010; Gilmore, 2008; Knoll, 2010; Cerrito, 2017; L'Annunziata, 2020b).

Una descripción técnica completa sobre los componentes y funcionamiento de los espectrómetros puede consultarse en Gilmore (2008), Knoll (2010) y Cerrito (2017). La energía resultante se convierte a una tasa de conteo en un periodo de tiempo determinado, por ejemplo, cuentas por segundo (cps) o cuentas por minuto (cpm) y se muestra como un espectro de energía con múltiples picos que provienen del potasio y de las cadenas de decaimiento del uranio y torio (Fig. 8), aunque también incluye picos de rayos gamma secundarios atenuados por dispersión Compton que se acumulan en la parte de baja energía del espectro (Fig. 8) (IAEA, 2010; Knoll, 2010; Ferronsky, 2015; L'Annunziata, 2020b).

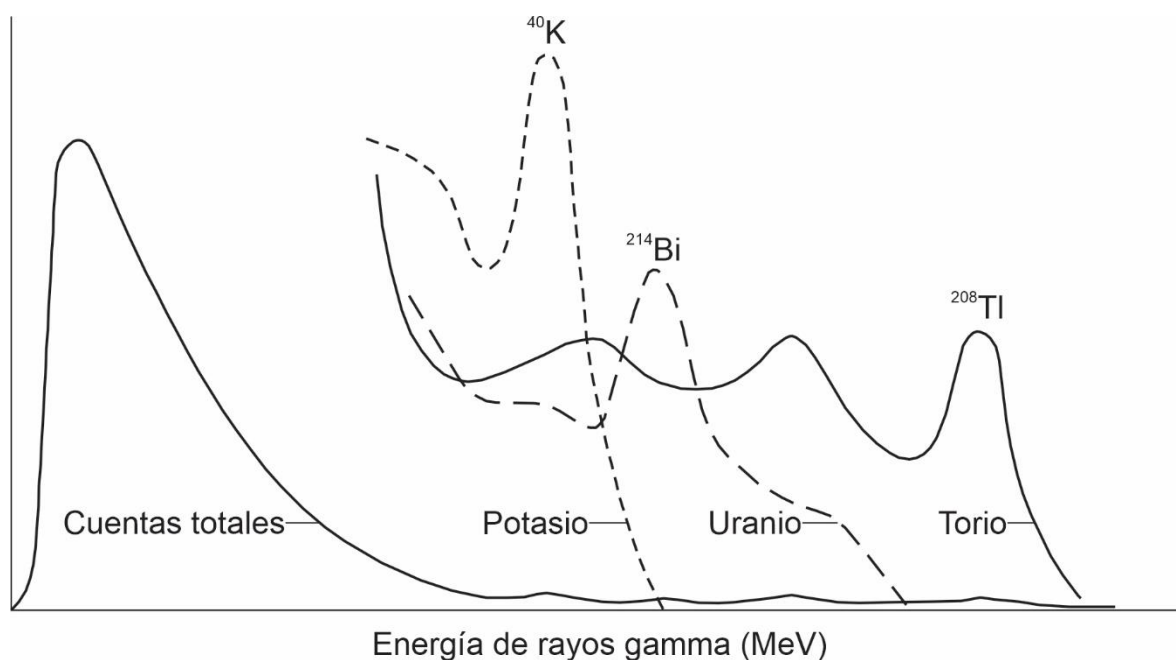


Figura 8. Espectro de energía hipotético registrado por un espectrómetro. Los espectros específicos de cada radioelemento se muestran a otra escala para apreciar sus diferencias (modificado de Ellis & Singer, 2008).

Los espectrómetros separan la energía en canales o ventanas para identificar la contribución del potasio, uranio y torio por sus picos distintivos de 1.46, 1.76 y 2.62 MeV respectivamente (IAEA, 1991, 2010; Rider, 2002; Telford *et al.*, 2004). De acuerdo con la IAEA (2003), estos canales deben abarcar los rangos de energía de

0.40-2.81 MeV para las cuentas totales, 1.37-1.57 MeV para el potasio, 1.66-1.86 MeV para el uranio, y 2.41-2.81 MeV para el torio. Al comparar la concentración conocida de estos elementos en un material se puede entonces calibrar el espectrómetro para que calcule la concentración por medio del espectro de energía que registre (Killeen, 1979; Rider, 2002). Es costumbre dar los resultados en uranio equivalente (eU) y torio equivalente (eTh) porque los picos usados para calcular sus concentraciones son de otros miembros de sus cadenas de decaimiento ( $^{214}\text{Bi}$  y  $^{208}\text{Tl}$ ) (IAEA, 1991, 2003; Telford *et al.*, 2004). Las ecuaciones para la calibración se muestran en el próximo capítulo en la sección “3.1.1. Calibración del espectrómetro”.

### **2.3.2. Factores que afectan la detección**

Una característica de los espectrómetros es su resolución, es decir, qué tan bien pueden distinguir entre dos picos que estén muy cercanos (IAEA, 2003). Se puede calcular por la altura y ancho de los picos en el espectro y generalmente se proporciona como un porcentaje de FWHM (*full width at half max*) y mientras menor sea, mejor es la resolución del equipo (Gilmore, 2008). Generalmente los espectrómetros escintiladores tienen una muy buena resolución de entre 3-10% (IAEA, 1979, 2003; Knoll, 2010; Cerrito, 2017; L’Annunziata, 2020b).

La tasa de conteo es también afectada por el tiempo muerto del espectrómetro. Este concepto se refiere al tiempo que le toma al circuito electrónico recuperarse después de procesar un pulso, tiempo durante el cual no puede detectar más cuentas (Serra, 2008; IAEA, 2010). Para la mayoría de los espectrómetros este tiempo es de solo algunos microsegundos y no afecta la tasa de conteo a menos que esta sea muy alta (Killeen, 1979; Knoll, 2010).

Ahora bien, existen factores que influyen en la tasa de conteo que no están relacionados con los detectores y más bien son causados por la naturaleza aleatoria del decaimiento radioactivo, radiación de fondo (*background*), geometría de la superficie de medición y la atenuación de la radiación. Cada uno de estos factores se detallan a continuación, mientras que sus correcciones se discuten en las



secciones “3.4. Correcciones típicas” y “3.5. Correcciones propuestas” del capítulo siguiente.

En primer lugar, considerando que la radiación se genera por el decaimiento aleatorio de los elementos radioactivos, entonces las cuentas registradas de rayos gamma no serán exactamente iguales si se hacen varias mediciones en un mismo punto (IAEA, 1979; Luthi, 2001; Knoll, 2010), aunque esto se puede evitar tan solo aumentando los tiempos de conteo del equipo (Adams & Gasparini, 1970; Killeen, 1979; Svendsen & Hartley, 2001; IAEA, 2003, 2010; Ellis & Singer, 2008; Serra, 2008; Sêco *et al.*, 2021).

La radiación de fondo se considera como toda aquella radiación que no proviene de la fuente que se está midiendo directamente (IAEA, 1979, L'Annunziata, 2020b). Principalmente esta radiación de fondo es natural y puede tener un origen cósmico o terrestre (Grasty, 1976, 1979; Killeen, 1979; Carroll, 1981; Grasty & Minty, 1995; Bierwirth, 1996; IAEA, 2003; Basdevant *et al.*, 2005; Knoll, 2010).

La radiación cósmica primaria proviene del espacio e interactúa con las partículas en la atmósfera terrestre, lo que causa la generación de partículas secundarias de radiación cósmica (Grasty, 1979; IAEA, 1979, 2003). La radiación terrestre es la producida por el potasio y las cadenas de decaimiento del uranio y torio en rocas, suelos o materiales de construcción (Gilmore, 2008; Knoll, 2010; Ferronsky, 2015; Cerrito, 2017).

Uno de los principales productos de las cadenas del uranio y torio que contribuye significativamente a la radiación de fondo es el radón ( $^{222}\text{Rn}$  y  $^{220}\text{Rn}$  respectivamente) (Grasty, 1979; Carroll, 1981; Grasty & Minty, 1995; IAEA, 2003; Knoll, 2010; Cerrito, 2017). Se encuentra en forma gaseosa y puede escapar hacia la atmósfera desde las rocas o suelos dependiendo de sus condiciones de porosidad o por fracturas (Adams & Gasparini, 1970; Grasty, 1976, 1997; IAEA, 1979, 2010; Bierwirth, 1996; Minty *et al.*, 1997; Basdevant *et al.*, 2005). Una vez en el aire, puede ser capturado por el agua de lluvia e infiltrarse de nuevo en diversos materiales, por lo que no se recomienda llevar a cabo levantamiento de datos de GRS durante o después de lluvias recientes porque las cuentas, específicamente

del uranio, serán más altas (IAEA, 1991; Grasty & Minty, 1995; Ferronsky, 2015). Incluso otros factores atmosféricos como la presión, humedad, viento y temperatura pueden afectar la distribución de radón (Pitkin, 1968; Grasty, 1976, 1979, 1997; IAEA, 2003, Knoll, 2010). Todo esto deja en evidencia la alta movilidad del radón y esto puede generar desequilibrio en la cadena de decaimiento del uranio (Adams & Gasparini, 1970; Dickson, 1995; Bierwirth, 1996; Minty *et al.*, 1997; Chiozzi *et al.*, 2000; Gilmore, 2008; IAEA, 2010), lo cual, en términos prácticos, dejará incompleta su serie de decaimiento y se pueden hacer estimaciones erróneas de uranio (IAEA, 1979, 2003).

La geometría de la superficie de medición puede causar variaciones en las cuentas registradas con un espectrómetro portátil (Løvborg *et al.*, 1971; Killeen, 1979; Myers & Bristow, 1989; Parkinson, 1996; Williams-Thorpe *et al.*, 2000; IAEA, 2010; L'Annunziata, 2020b; Sêco *et al.*, 2021). Esto se debe a que el espectrómetro no solamente detecta la radiación que proviene del ángulo sólido justo debajo de este (cerca del 90%), sino que también registra la radiación que se encuentra alrededor de su radio de detección (Adams & Gasparini, 1970; IAEA, 1979; Luthi, 2001; Serra, 2008; Ferronsky, 2015). Por ejemplo, si existe la influencia de otras superficies o si la medición se efectúa en bordes, entonces las cuentas serán más altas o bajas respectivamente (IAEA, 2003; Killeen, 1979; Bierwirth, 1996; Telford *et al.*, 2004).

Finalmente, el otro factor que afecta la tasa de conteo es la atenuación de la radiación, que como se describió en la sección “2.2 Interacciones con la materia”, es la pérdida de energía de un rayo gamma conforme interactúa con un material y es dependiente de la densidad de dicho material. Tomando esto en cuenta, los rayos gamma que se generan a cierta profundidad en las rocas o suelos serán completamente atenuados y entonces solo se detectarán los rayos gamma que se generen cerca de la superficie, aproximadamente entre los 25-50 cm (IAEA, 1979; Luthi, 2001; Telford *et al.*, 2004). Se debe tomar en consideración que cualquier material que se encuentre entre la trayectoria de un rayo gamma y el detector producirá atenuación, por ejemplo, vegetación o nieve (Grasty, 1976; IAEA, 1991; Aspin & Bierwirth, 1997; Wilford & Minty, 2007). Aún más, los rayos gamma experimentarán mayor atenuación con el incremento del contenido de humedad en

las rocas y suelos (Carroll, 1981; Grasty & Minty, 1995; Cook *et al.*, 1996; Grasty, 1997; Minty *et al.*, 1997; Wilford *et al.*, 1997; IAEA, 2003, 2010; Ferronsky, 2015; Sanjurjo-Sánchez *et al.*, 2018a; Stanfoca-Casagrande *et al.*, 2024).

## **2.4. Distribución de radioelementos**

En esta sección se enlistan los minerales con contenidos de potasio, uranio y torio y sus concentraciones en los diferentes tipos de rocas con un enfoque en las respuestas probables que tendrían en la GRS.

Si bien es posible que la distribución de los radioelementos pueda ser afectada por procesos de meteorización, esta temática se detalla en la sección “3.6. Interpretación de los datos espectrométricos” del próximo capítulo, ya que constituye un fundamento del uso de la GRS para determinar el deterioro de las rocas de construcción mediante la metodología propuesta en esta tesis.

### **2.4.1. Potasio**

El potasio es un elemento alcalino común en la corteza terrestre (Wilford *et al.*, 1997; Ellis & Singer, 2008; Ferronsky, 2015) y se encuentra en la estructura de un gran número de minerales comunes como los feldespatos de potasio ortoclasa y microclina, y en las micas moscovita, biotita, glauconita y flogopita (Dickson & Scott, 1997; IAEA, 2003; Telford *et al.*, 2004; Wilford & Minty, 2007; Artemieva *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2021). En minerales arcillosos forma parte de la estructura de la illita (Rider, 2002; Serra, 2008) y en evaporitas, la silvita es el mineral de este tipo con la mayor cantidad de potasio (Telford *et al.*, 2004; Wilford & Minty, 2007; Ellis & Singer, 2008; Wang *et al.*, 2021). Ocurre también en los feldespatoideos leucita y nefelina (Luthi, 2001; IAEA, 2003; Serra, 2008).

Se considera que el potasio es un elemento móvil por procesos de meteorización en los que es removido de los minerales y pasa a estar en solución (Myers & Wignall, 1987; Wilford, 1995; Cook *et al.*, 1996; Ruffell *et al.*, 2006; Chan *et al.*, 2007; Ruffell, 2016; Wang *et al.*, 2021), pudiendo ser adsorbido en la superficie de varias arcillas

tales como la montmorillonita, clorita y caolinita (Dickson & Scott, 1997; Wilford *et al.*, 1997; Pickup & Marks, 2000).

#### **2.4.2. Uranio**

El uranio es un componente menor de la corteza terrestre con una concentración de 2.5-3.0 partes por millón (ppm) (Adams & Gasparini, 1970; McLennan *et al.*, 1980). Se encuentra principalmente en minerales accesorio pesados como circón, titanita, allanita, xenotima, monacita y apatito (Pitkin, 1968; Wilford, 1995; Luthi, 2001; Rider, 2002; Wilford & Minty, 2007; Serra, 2008; Sanjurjo-Sánchez & Alves, 2017), aunque puede encontrarse como pequeñas inclusiones en minerales formadores de roca (Adams & Weaver, 1958; Adams *et al.*, 1959; Dickson & Scott, 1997; Wilford *et al.*, 1997; IAEA, 2003).

En ambientes oxidantes, el uranio es propenso a ser movilizado en solución (Nielsen *et al.*, 1987; Dickson, 1995; Taboada *et al.*, 2006; Chan *et al.*, 2007; Rasbury & Cole, 2009; Sanjurjo-Sánchez & Alves, 2017; Papadopoulos, 2019; Fall *et al.*, 2020) para posteriormente ser adsorbido en la superficie de ciertas arcillas (Hesselbo, 1996; Ruffell & Worden, 2000; Ruffell *et al.*, 2003, 2006; Laubenstein & Magaldi, 2008; Day-Stirrat *et al.*, 2021), ser captado por óxidos de hierro, aluminio y manganeso (Adams & Weaver, 1958; Adams *et al.*, 1959; Langmuir, 1978; Scheepers & Rozendaal, 1993; Wilford *et al.*, 1997; Pickup & Marks, 2000; Martin *et al.*, 2019; Cole *et al.*, 2020; de Mello *et al.*, 2021), e incluso ser incorporado en materia orgánica (Swanson, 1961; van Buchem *et al.*, 1992; Wilford, 1995; Hladil *et al.*, 2003; Airo & Loukola-Ruskeeniemi, 2004; Rasbury & Cole, 2009; Tissot & Dauphas, 2015; Pracejus *et al.*, 2018; Stanfoca-Casagrande *et al.*, 2024).

#### **2.4.3. Torio**

El torio es un componente menor de la corteza terrestre con una concentración cercana a 12 ppm (Adams & Gasparini, 1970; Wilford *et al.*, 1997; Ferronsky, 2015). Al igual que el uranio, se encuentra en minerales accesorio pesados como circón,

monacita, xenotima, apatito, titanita, allanita y epidota (Pitkin, 1968; Langmuir & Herman, 1980; Wilford, 1995; Luthi, 2001; Rider, 2002; IAEA, 2003; Telford *et al.*, 2004; Wilford & Minty, 2007; Ellis & Singer, 2008), y también está presente como pequeñas inclusiones en minerales formadores de roca (Adams & Weaver, 1958; Adams *et al.*, 1959; Dickson & Scott, 1997; Gunn *et al.*, 1997; Ruffell *et al.*, 2006; Serra, 2008; Wilford, 2012; Sanjurjo-Sánchez & Alves, 2017).

El torio se considera un elemento estable, relativamente inmóvil e insoluble (Galbraith & Saunders, 1983; Nielsen *et al.*, 1987; Wilford, 1995; Wilford *et al.*, 1997; Chan *et al.*, 2007; Sanjurjo-Sánchez & Alves, 2017), aunque en presencia de ácidos de origen orgánico (por ejemplo, ácidos húmicos en suelos) puede ser movilizado (Langmuir & Herman, 1980; Ruffell *et al.*, 2003, 2006; Taboada *et al.*, 2006; Wilford & Minty, 2007; Ruffell, 2016). Ciertas cantidades de torio que son removidas por meteorización son fácilmente adsorbidas en minerales arcillosos (Myers & Bristow, 1989; Hurst, 1990; van Buchem *et al.*, 1992; Taylor *et al.*, 2002; Ivanov *et al.*, 2019; Day-Stirrat *et al.*, 2021; de Mello *et al.*, 2021), por óxidos de aluminio y hierro (Adams *et al.*, 1959; Myers, 1989; Scheepers & Rozendaal, 1993; Cook *et al.*, 1996; Dickson & Scott, 1997; Gunn *et al.*, 1997; Fall *et al.*, 2020), y materia orgánica en suelos (Adams & Weaver, 1958; Wilford, 2012; Pickup & Marks, 2000; Ruffell & Worden, 2000; Deconinck *et al.*, 2003; Stanfoca-Casagrande *et al.*, 2024).

#### **2.4.4. Rocas ígneas intrusivas y volcánicas**

Las rocas ígneas de composición ultrabásica o ultramáfica (peridotita) y básica o máfica (gabro y basalto) tienen las concentraciones más bajas de radioelementos (Dickson & Scott, 1997; Gunn *et al.*, 1997; Wilford *et al.*, 1997; IAEA, 2003; Telford *et al.*, 2004; Wilford, 2012; Sanjurjo-Sánchez & Alves, 2017) porque estos no entran en la estructura de los minerales que cristalizan primero. Conforme evoluciona el magma, cristalizan rocas de composición intermedia (diorita y andesita) en donde el contenido de potasio, uranio y torio aumenta un poco (Adams *et al.*, 1959; Galbraith & Saunders, 1983; Bierwirth, 1996; Wilford & Minty, 2007). Finalmente cristalizan las rocas ígneas ácidas o félsicas (granito y riolita) con las

concentraciones más altas de radioelementos (Cook *et al.*, 1996; Dickson & Scott, 1997; Gunn *et al.*, 1997; Wilford *et al.*, 1997; Wilford, 2012; Artemieva *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2021), por lo cual mostrarán valores altos de radiación en comparación con los demás tipos de rocas ígneas (Pitkin, 1968; Luthi, 2001; Telford *et al.*, 2004; Serra, 2008; IAEA, 2010; Ferronsky, 2015; Sanjurjo-Sánchez & Alves, 2017).

En estas rocas, el potasio es el radioelemento más común, seguido por el torio y el uranio con la menor concentración (Galbraith & Saunders, 1983; Dickson & Scott, 1997; Sanjurjo-Sánchez & Alves, 2017), teniendo valores de Th/U cercanos a 3.8 (Adams *et al.*, 1959; McLennan *et al.*, 1980; Bierwirth, 1996; Serra, 2008). Estos radioelementos se encuentran principalmente en feldespatos, micas y minerales accesorio pesados (Pitkin, 1968; Rider, 2002; Taylor *et al.*, 2002; IAEA, 2003; Telford *et al.*, 2004; Wilford, 2012; Wang *et al.*, 2021). En rocas volcánicas, especialmente el uranio y el torio se encuentran dispersos en el vidrio y alrededor de los cristales minerales por el rápido enfriamiento de las lavas (Adams *et al.*, 1959; Tieh *et al.*, 1980; Dickson & Scott, 1997; Ruffell *et al.*, 2003).

#### **2.4.5. Rocas sedimentarias**

El contenido de radioelementos en las rocas sedimentarias es mucho más variable que el de las rocas ígneas (Sanjurjo-Sánchez & Alves, 2017). Si bien las areniscas se comúnmente se componen por cuarzo, las cuales tendrán valores muy bajos de radioactividad, pueden tener cantidades importantes de feldespatos de potasio, micas, arcillas, minerales pesados y fragmentos líticos (fragmentos derivados de otras rocas), causando que su radioactividad sea más alta (Pitkin, 1968; Selley, 1985; Luthi, 2001; Rider, 2002; Ruffell *et al.*, 2003; Serra, 2008; Ferronsky, 2015; Fall *et al.*, 2020). Las concentraciones promedio para areniscas son 1.2 % de potasio, 1.9 ppm de uranio y 5.7 ppm de torio (Bierwirth, 1996).

Ahora bien, existe una relación entre el tamaño de grano de las areniscas con su radioactividad (Rider, 2002; Taylor *et al.*, 2002; Serra, 2008; Keeton *et al.*, 2015). Esto es posible porque las areniscas de cuarzo tienden a ser de tamaño de grano grueso y tener baja radioactividad, mientras que areniscas y rocas sedimentarias de

grano fino tienen mayor contenido de feldespatos de potasio, micas y arcillas con una radiación más alta (Selley, 1985; Evans *et al.*, 2007). Sin embargo, esta relación difícilmente es constante por la adición de minerales radioactivos en las areniscas de grano grueso, así que esta relación se debe de usar con precaución (Myers & Bristow, 1989; Luthi, 2001; Rider, 2002; Taylor *et al.*, 2002; Keeton *et al.*, 2015).

También se utiliza la relación entre radioelementos Th/K para estimar el tipo de mineral radioactivo. Por ejemplo, una arenisca con un valor Th/K muy alto corresponde con una predominancia de minerales accesorio pesados que son ricos en torio, pero no en potasio, mientras que un valor Th/K bajo es común en areniscas feldespáticas (Rider, 2002; Serra, 2008).

Las lutitas, conformadas por partículas de grano mucho más fino que las areniscas, se componen principalmente de minerales arcillosos y, debido a su gran contenido de radioelementos, tienen una radiación alta (Adams *et al.*, 1959; Pitkin, 1968; Ruffell & Worden, 2000; Ruffell *et al.*, 2006; Serra, 2008; Ferronsky, 2015; Yasmin *et al.*, 2018). Sin embargo, algunas lutitas pueden tener valores un poco más bajos de radioactividad si están dominadas por caolinita (Ellis & Singer, 2008). Los valores de la relación Th/K ayudan a identificar el tipo de arcillas, ya sea caolinita o illita, con valores altos y bajos respectivamente (Myers & Wignall, 1987; Hesselbo, 1996; Rider, 2002; Deconinck *et al.*, 2003; Ellis & Singer, 2008; Hesselbo *et al.*, 2009). Las concentraciones promedio en lutitas son 2.7% de potasio, 3.7 ppm de uranio y 12 ppm de torio (Adams *et al.*, 1959; Bierwirth, 1996).

Otro posible modificador de la radiación en lutitas es su contenido asociado de materia orgánica, la cual, como se explicó anteriormente, suele adsorber uranio, dándole una mayor radioactividad a estas rocas (Pitkin, 1968; van Buchem *et al.*, 1992; Wilford *et al.*, 1997; Ruffell & Worden, 2000; Luthi, 2001; Ruffell *et al.*, 2006; Wilford & Minty, 2007; Ellis & Singer, 2008; Sanjurjo-Sánchez & Alves, 2017). Entonces, la relación Th/U puede servir para definir el ambiente de depósito de las lutitas: valores altos indican procedencia continental de las arcillas, mientras que valores bajos indican depósito en ambientes marinos asociados con materia orgánica (Rider, 2002; Hampson *et al.*, 2005; Serra, 2008; Koptíková *et al.*, 2010).

Las calizas, a diferencia de las areniscas y lutitas, se componen solamente de calcita (y dolomita, un carbonato de calcio con magnesio), por lo que su radiación es muy baja (Rider, 2002; Laubenstein & Magaldi, 2008; Ferronsky, 2015; Sanjurjo-Sánchez & Alves, 2017). Tienen en promedio 0.3% de potasio, 1.6 ppm de uranio y 1.6 ppm de torio (Bierwirth, 1996; Serra, 2008).

Sin embargo, la radioactividad en las calizas es aumentada por la adición de potasio y torio, la cual se origina por el aporte de material clástico (por ejemplo, minerales arcillosos) (Galbraith & Saunders, 1983; Selley, 1985; Koptíková *et al.*, 2010; Ferronsky, 2015). También puede tener niveles más altos de radiación por la fijación de uranio en materia orgánica (Serra, 2008; Ruffell & Worden, 2000; Luthi, 2001; Sanjurjo-Sánchez & Alves, 2017) y en la estructura de la calcita donde reemplaza al calcio (Adams & Weaver, 1958; Rider, 2002; Rasbury & Cole, 2009).

#### **2.4.6. Rocas metamórficas**

Se sugiere que el metamorfismo no afecta el contenido de los radioelementos (Dickson & Scott, 1997), por lo tanto, se puede esperar que la radioactividad de las rocas metamórficas será similar a la de su protolito (Sanjurjo-Sánchez & Alves, 2017). Sin embargo, los procesos metamórficos pueden estar asociados con fluidos que causan disolución y que al migrar redistribuyen los radioelementos (Adams *et al.*, 1959; Pitkin, 1968; Sanjurjo-Sánchez & Alves, 2017).

Aun así, se puede derivar que las rocas con baja radiación, después de experimentar procesos de metamorfismo, seguirán teniendo baja radiación, y lo mismo sucede con rocas con alta radiación. Por ejemplo, las rocas metamórficas como pizarra y esquisto derivadas de lutitas tendrán también alta radiación (Serra, 2008; Sanjurjo-Sánchez & Alves, 2017), mientras que el mármol originado por el metamorfismo de calizas seguirá teniendo una radiación baja.



### **3. Metodología propuesta para la espectrometría de rayos gamma *in situ* en construcciones**

Primeramente, es necesario aclarar que la metodología detallada en este capítulo aplica solo para la detección de rayos gamma naturales, no para aparatos con fuentes artificiales de radiación gamma y que ya se han aplicado al estudio de construcciones, ya se sea *in situ* para identificar sales, calcular la densidad y porosidad (Livingston *et al.*, 1986; Larson, 2006) o en muestras analizadas en laboratorio para el cálculo de su densidad, porosidad o contenido de humedad (Kumaran & Bomberg, 1985; Siengsanoh *et al.*, 2021). El funcionamiento de estos métodos de radiación artificial, específicamente para materiales de construcción, puede consultarse en Wormald & Britch (1969), McCann & Forde (2001), Svahn (2006), mientras que su aplicación en geociencias en general ha sido descrita por Killeen (1979), Luthi (2001), Rider (2002), Telford *et al.* (2004), Ellis & Singer (2008), Serra (2008) y Ferronsky (2015).

La metodología que se presenta a continuación implica: la calibración del espectrómetro portátil, la selección apropiada de un afloramiento para comparar las concentraciones de los radioelementos con las de las construcciones, las particularidades para la adquisición de datos de rayos gamma, las correcciones comunes, así como las nuevas correcciones propuestas, y las bases para la interpretación de los datos espectrométricos.

Todas estas partes que conforman la metodología tienen su fundamento en el marco teórico del capítulo anterior, especialmente los factores que afectan la detección de la radiación como atenuación por el contenido de humedad, por la densidad del material, y la geometría de la superficie de medición.

#### **3.1. Consideraciones previas**

Antes de aplicar esta metodología es necesario contar con espectrómetro portátil de rayos gamma que esté calibrado y tener uno o varios afloramientos apropiados, además de tener un medidor de humedad para hacer las correcciones. En esta

sección se detalla el procedimiento que se utiliza para la calibración del equipo, cuáles características deben de tener los afloramientos y cuándo se debe evitar llevar a cabo las mediciones espectrométricas.

### 3.1.1. Calibración del espectrómetro

El propósito de la calibración de un espectrómetro portátil de rayos gamma es convertir las tasas de conteo a concentraciones de potasio, uranio y torio. La calibración se realiza en bloques de concreto de dimensiones específicas y con concentraciones conocidas de cada radioelemento (IAEA, 2003). Generalmente se emplean cuatro bloques de concreto, tres de los cuales tienen concentraciones altas de uno solo de los radioelementos, mientras que el restante contiene muy poco potasio, uranio y torio para detectar la radiación de fondo (IAEA, 1979, 1991), con lo cual se puede hacer la sustracción de la radiación de fondo con las siguientes ecuaciones:

$$cK = cK_o - cBK \quad (1)$$

$$cU = cU_o - cBU \quad (2)$$

$$cTh = cTh_o - cBTh \quad (3)$$

donde  $cK$  son las cuentas corregidas de potasio,  $cK_o$  son las cuentas observadas de potasio,  $cBK$  son las cuentas de la radiación de fondo de potasio;  $cU$  son las cuentas corregidas de uranio,  $cU_o$  son las cuentas observadas de uranio,  $cBU$  son las cuentas de la radiación de fondo de uranio;  $cTh$  son las cuentas corregidas de torio,  $cTh_o$  son las cuentas observadas de torio,  $cBTh$  son las cuentas de la radiación de fondo de torio.

Sin embargo, es posible que, en los canales de energía del potasio (1.37-1.57 MeV), uranio (1.66-1.86 MeV) y torio (2.41-2.81 MeV) (IAEA, 2003) se registren rayos gamma de los otros radioelementos por procesos de atenuación (Killeen, 1979; IAEA, 1979, 1991, 2010; Telford *et al.*, 2004). Esto se puede representar de la siguiente manera:

$$cK_r = cK - cUK - cThK \quad (4)$$

$$cU_r = cU - cKU - cThU \quad (5)$$

$$cTh_r = cTh - cKTh - cUTh \quad (6)$$

donde  $cK_r$  son las cuentas reales del potasio,  $cUK$  y  $cThK$  son las cuentas del uranio y torio respectivamente detectadas en los canales de energía del potasio;  $cU_r$  son las cuentas reales del uranio,  $cKU$  y  $cThU$  son las cuentas del potasio y torio respectivamente detectadas en los canales de energía del uranio;  $cTh_r$  son las cuentas reales del torio,  $cKTh$  y  $cUTh$  son las cuentas del potasio y uranio respectivamente detectadas en los canales de energía del torio. Para resolver las Ecuaciones 4-6 se requieren seis coeficientes de *stripping*  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $a$ ,  $b$ , y  $y$  (IAEA, 1979, 1991, 2003; Killeen, 1979) (Tabla 1) que son propios de cada espectrómetro.

Tabla 1. Coeficientes de *stripping* y su descripción.

Coeficiente de <i>stripping</i>	Descripción
$\alpha$ (alfa)	Cuentas del torio en los canales de energía del uranio
$\beta$ (beta)	Cuentas del torio en los canales de energía del potasio
$\gamma$ (gamma)	Cuentas del uranio en los canales de energía del potasio
$a$	Cuentas del uranio en los canales de energía del torio
$b$	Cuentas del potasio en los canales de energía del torio
$y$	Cuentas del potasio en los canales de energía del uranio

Entonces, al agregar los coeficientes de *stripping*, las Ecuaciones 4-6 se transforman respectivamente en:

$$cK_r = cK - \gamma[cU - y(cK) - \alpha(cTh)] - \beta[cTh - a(cU) - b(cK)] \quad (7)$$

$$cU_r = cU - y[cK - \gamma(cU) - \beta(cTh)] - \alpha[cTh - a(cU) - b(cK)] \quad (8)$$

$$cTh_r = cTh - b[cK - \gamma(cU) - \beta(cTh)] - a[cU - y(cK) - \alpha(cTh)] \quad (9)$$

Una vez que las cuentas para cada radioelemento han sido corregidas a sus valores reales, se procede con el cálculo de las concentraciones, para lo cual se utilizan las constantes de sensibilidad del espectrómetro (IAEA, 2003, 2010). Por ejemplo, si en un bloque de calibración con 8% de potasio, el espectrómetro detecta 12 cps, su sensibilidad será de 1.5 cps/%. Al igual que los coeficientes de *stripping*, los valores de sensibilidad son diferentes para cada equipo, y deben de ser proporcionadas por

el fabricante. Las ecuaciones para el cálculo de las concentraciones quedan de la siguiente manera (IAEA, 1979):

$$K = \frac{cK_r}{sK} \quad (10)$$

$$U = \frac{cU_r}{sU} \quad (11)$$

$$Th = \frac{cTh_r}{sTh} \quad (12)$$

donde K (%), U (ppm), Th (ppm) son las concentraciones para cada radioelemento y sK (cps/% o cpm/%), sU (cps/ppm o cpm/ppm), sTh (cps/ppm o cpm/ppm) son las sensibilidades para el potasio, uranio y torio respectivamente.

Detalles técnicos sobre la construcción de bloques de calibración y el procedimiento para calibrar equipos de rayos gamma se pueden consultar en Ward (1978), Løvborg *et al.* (1981) y Løvborg (1984).

### 3.1.2. Selección de afloramientos apropiados

Para aplicar la metodología propuesta en esta tesis, en primer lugar, se necesitan seleccionar afloramientos que pertenezcan a la misma formación, unidad o miembro que las rocas utilizadas en las construcciones en donde se llevará a cabo la GRS. Así se podrán obtener muestras en los afloramientos para realizar distintos análisis en laboratorio cuyos resultados serán representativos de las construcciones y así se evitarán procedimientos invasivos en estas.

Además, al tener afloramientos con la misma litología que los bloques de las construcciones, se tendrá la certeza que las posibles variaciones en la radiación y en el contenido de radioelementos no se deberán a diferencias por el tipo de roca o minerales, sino que más bien dependerán de otros factores, como se explica más adelante en la sección “3.6. Interpretación de los datos espectrométricos”.

En segundo lugar, los afloramientos elegidos no deben estar meteorizados, de preferencia deben de ser sitios de extracción de material como canteras, de tal manera que se puede suponer que el lecho rocoso en estos lugares mantiene su

concentración original de radioelementos (Myers & Wignall, 1987; Ruffell, 2016; Sêco *et al.*, 2021). Esto es con la finalidad de comparar su radioactividad con la de los bloques de roca de las construcciones, los cuales seguramente han experimentado procesos de meteorización y deterioro que modificaron su concentración de potasio, uranio y torio (Sanjurjo-Sánchez *et al.*, 2018b; Méndez-Gaona, 2020).

### **3.1.3. Condicionantes ambientales**

La GRS no se deberá de realizar mientras llueve porque el radón en la atmósfera es transportado por las gotas y se deposita en la superficie de las rocas en los afloramientos y construcciones, aumentando las cuentas del uranio (IAEA, 1991; Knoll, 2010; Ferronsky, 2015). Inmediatamente después de que deje de llover tampoco es recomendable porque el radón aún puede permanecer en las superficies (Pitkin, 1968), aunque los niveles de radón pueden volver a puntos mínimos después de aproximadamente tres horas (IAEA, 1979; Grasty & Minty, 1995). Por otra parte, las concentraciones más altas de radón son en las mañanas (Grasty, 1976, 1979; Minty *et al.*, 1997), aproximadamente entre las 4-9 am (IAEA, 2003), por lo que las mediciones no se deben realizar en este periodo. Si se evitan todas estas condiciones, la radiación de fondo será extremadamente baja.

De preferencia, las lecturas de contenido de humedad deberán hacerse en lugares en donde la luz solar no dé directamente en las rocas para evitar lecturas con 0% de contenido de humedad por evaporación. Esto dificultaría la interpretación, porque es muy probable que el sistema de poros interno de las rocas conserve su contenido de humedad. Sin embargo, estas condiciones ideales son a menudo difíciles de lograr y es fácil identificar esta situación al graficar los datos de la GRS y los de humedad como se describe más adelante en la sección “3.5. Correcciones propuestas”.

### 3.2. Espectrometría de rayos gamma en los afloramientos

Habiendo seguido las recomendaciones de la sección previa, se puede comenzar con el levantamiento de los datos de GRS.

Se sugiere que el afloramiento se divida en una red de puntos con un espaciado constante. Dependiendo de su extensión y variaciones litológicas, estos puntos pueden tener una separación entre 20-50 cm (Myers & Bristow, 1989; Ruffell & Worden, 2000; Evans *et al.*, 2007; Ruffell, 2016).

Idealmente, la superficie de medición deberá ser uniforme, aunque esto es casi imposible en los afloramientos. En la sección “3.5. Correcciones propuestas” se discuten las correcciones sugeridas para las variaciones relacionadas con la geometría de las superficies. El espectrómetro calibrado se tratará entonces de colocar en contacto con la superficie de las rocas y se comenzará con la adquisición de datos espectrométricos. Se sugiere que además de las concentraciones de los radioelementos, se obtengan datos de radiación total.

Ahora bien, el tiempo de conteo seleccionado dependerá del contenido de radioelementos: mientras mayor sean sus concentraciones, menor tiempo es necesario para alcanzar valores estadísticamente correctos, disminuyendo así el error (Adams & Gasparini, 1970; Killeen, 1979; Ellis & Singer, 2008; Serra, 2008). Usualmente se utilizan tasas de conteo de dos o más minutos (Myers & Wignall, 1987; Myers & Bristow, 1989; van Buchem *et al.*, 1992; Davies & Elliot, 1996; Svendsen & Hartley, 2001; Hampson *et al.*, 2005; Eltom *et al.*, 2013).

Inmediatamente antes o después de la adquisición de los datos espectrométricos se medirá el contenido de humedad. Esto para que no haya modificaciones por causa de la temperatura o por exposición a la luz solar.

Se deben registrar tantos detalles de los afloramientos como sea posible para hacer una correcta interpretación de los datos radiométricos (IAEA, 2003). De vital importancia es el reconocimiento litológico: minerales principales, textura, estructuras sedimentarias como estratificación, gradación, entre otras. Igualmente, se deben describir las condiciones generales como el color de las rocas, cualquier

variación de tonalidad, geometría de la superficie, presencia de vegetación, etcétera. Todos estos elementos podrían proporcionar explicación para las variaciones a los datos espectrométricos.

### **3.3. Espectrometría de rayos gamma en las construcciones**

En las construcciones, el número de puntos que se medirá dependerá del número de bloques del que estén compuestas y se sugiere tomar por lo menos una lectura en cada bloque. Si los bloques son de dimensiones lo suficientemente grandes como para que se hagan varias mediciones, entonces se sugiere tomar más lecturas. De igual manera, si una misma pieza tiene diferentes patrones de deterioro, se recomienda que se lleven a cabo más mediciones para relacionar la respuesta con el deterioro.

Al igual que en los afloramientos, el espectrómetro calibrado se colocará en contacto con la superficie de los bloques y se comenzará con la adquisición de los datos. No se deberá omitir ningún bloque, solamente aquellos demasiado pequeños en los que el espectrómetro esté influenciado por los bloques vecinos.

El tiempo de medición deberá de ser el mismo que se utilizó en los afloramientos e igualmente se medirá el contenido de humedad justo antes o después de los datos espectrométricos.

En las construcciones, los aspectos que se tienen que detallar son la litología de los bloques, si las piezas han sido reemplazadas o intervenidas, la geometría en la que se tomaron los datos, por ejemplo, cerca del piso o en esquinas, si existe o no deterioro y de qué tipo, especialmente los patrones de desprendimiento, colonización biológica, alteración cromática, depósitos y presencia de sales en la superficie. Llevar un registro preciso de cualquier modificación de las condiciones de las rocas ayudará a la interpretación de las variaciones de la radiación y contenido de radioelementos (Méndez-Gaona, 2020; Hernández-Santomé *et al.*, 2025).

### 3.4. Correcciones típicas

De acuerdo con la sección “2.3.2. Factores que afectan la detección” del capítulo anterior, la adquisición de los datos de GRS es afectada por la resolución y tiempo muerto del equipo, la aleatoriedad del decaimiento radioactivo y la radiación de fondo. Aquí se presentan las correcciones que se efectúan comúnmente para estos factores según la literatura.

Debido a que la resolución del equipo es un factor que no puede corregirse, sino que es intrínseco del espectrómetro, solo se puede mejorar si se opta por la utilización de instrumentos con cristales escintiladores de otra composición o más grandes. De igual forma, el decaimiento aleatorio de los radioelementos no se corrige, sino que solamente se aumenta el tiempo de adquisición de datos espectrométricos.

El tiempo muerto se puede corregir con la siguiente ecuación (IAEA, 1991):

$$c = \frac{c_o}{1-\tau} \quad (13)$$

donde  $c$  son las cuentas corregidas para cualquier radioelemento,  $c_o$  son las cuentas observadas para cualquier radioelemento,  $\tau$  el tiempo muerto del instrumento. Generalmente, el tiempo muerto está dado en microsegundos (Killeen, 1979) y debe ser proporcionado por el fabricante del espectrómetro, aunque muchos de los equipos modernos efectúan esta corrección automáticamente (IAEA, 2003, 2010).

La radiación de fondo que registra un espectrómetro proviene por la radiación cósmica y la terrestre. La radiación de fondo de origen cósmico afecta más a los levantamientos aéreos de rayos gamma (Killeen, 1979; Wilford & Minty, 2007) que a los efectuados con equipos portátiles. Además, este componente cósmico tiene energías mayores a 3 MeV (IAEA, 1979, 2010; Carroll, 1981; Grasty & Minty, 1995; Minty *et al.*, 1997), por lo cual no se registrarán en los canales de energía típicos de los espectrómetros portátiles.

Al contrario, la radiación de fondo que más influye en las mediciones con equipos portátiles es la radiación terrestre producida por el radón (IAEA, 2003). Como se discutió en la sección “3.1.3. Condicionantes ambientales”, este componente se



puede reducir al mínimo si se evita llevar a cabo GRS durante y después de que haya llovido o durante ciertas horas en la mañana. La mayoría de los espectrómetros modernos hacen la corrección de radiación de fondo mediante cálculos del espectro y sus picos de energía (IAEA, 2010; L'Annunziata, 2020b), pero si esto no es posible, entonces se resta la radiación de fondo a las cuentas observadas como en las Ecuaciones 1-3. Los valores de radiación de fondo se pueden determinar sobre un gran cuerpo de agua (Adams & Gasparini, 1970; Killeen, 1979), aunque esto difícilmente es representativo del área de estudio porque en ocasiones no hay cuerpos de agua cercanos y entonces la radiación de fondo podría ser diferente (IAEA, 1979).

### 3.5. Correcciones propuestas

Si bien ha habido intentos por hacer correcciones debidas a la geometría de la superficie (Schwarz *et al.*, 1992; Williams-Thorpe *et al.*, 2000), estas no son aplicables en todas las situaciones, así que simplemente se sugiere omitir geometrías no uniformes en los afloramientos (Myers & Bristow, 1989; Chiozzi *et al.*, 2000), usar un colimador de plomo alrededor del espectrómetro (Løvborg *et al.*, 1971; Killeen, 1979; Hernández-Santomé *et al.*, 2025) o utilizar las relaciones entre radioelementos para la interpretación (IAEA, 1979, 2003; Davies & Elliot, 1996; Hadley *et al.*, 2000; Hampson *et al.*, 2005). Por otra parte, muchas veces las fachadas de las construcciones cuentan con detalles artísticos, grabados, bajorrelieves, salientes, entre otros, y evitar hacer mediciones en geometrías como estas no es una opción porque así se perderían datos importantes. Esta situación motiva el planteamiento de una corrección por la geometría de la superficie de medición y por la ubicación del espectrómetro cuando esté influenciado por una o más superficies en su círculo (o esfera) de influencia (Fig. 9).

Una superficie plana se denomina geometría de  $2\pi$ , en la cual el espectrómetro registra la radiación que proviene desde la parte justo debajo de este (Fig. 9A, B) (Løvborg *et al.*, 1971; Myers & Bristow, 1989; L'Annunziata, 2020b). Si el

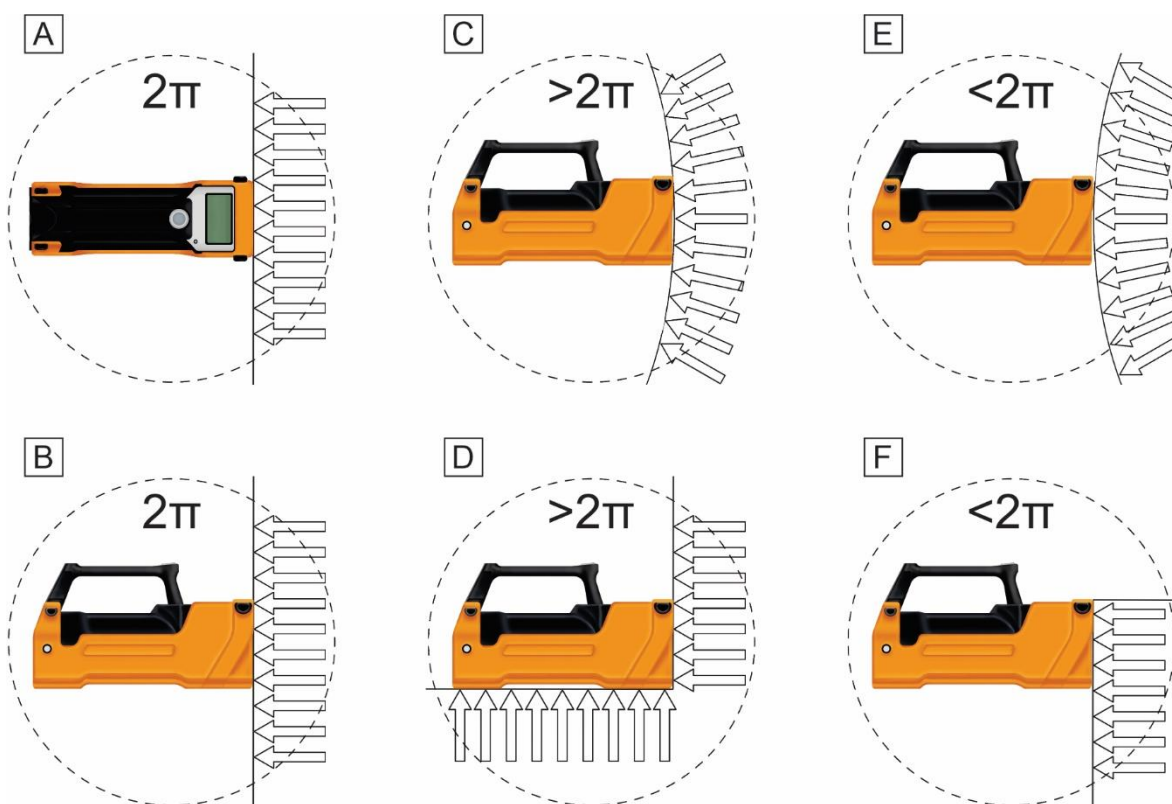


Figura 9. A y B. Medición en una superficie plana en donde la radiación detectada proviene directamente del área en la que está colocado el espectrómetro. C. En una superficie cóncava se registra más radiación. D. Si el espectrómetro se coloca cerca de otras superficies, entonces detectará más radiación por la influencia de dicha superficie. E. En una superficie convexa se registra menos radiación. F. Si el espectrómetro se coloca cerca de un borde, entonces la superficie está incompleta y se registra menos radiación.

espectrómetro se coloca cerca de otra superficie, por ejemplo, el piso, entonces esta superficie contribuirá a la tasa de conteo por el círculo de detección del equipo. También en superficies cóncavas, el espectrómetro registrará mayores tasas de conteo. En estos casos se tiene una geometría  $>2\pi$  (Fig. 9C, D) (Ettensohn *et al.*, 1979; IAEA, 1979, 2003; Telford *et al.*, 2004). Al contrario, cuando el equipo se coloca en superficies planas incompletas, por ejemplo, en un borde, entonces detectará menos cuentas porque su círculo de influencia estará incompleto. Lo mismo sucede si se usa en superficies convexas, teniendo geometrías  $<2\pi$  (Fig. 9E, F) (Killeen, 1979).

Suponiendo condiciones ideales en las que el contenido de humedad tanto superficial como interno que reside dentro del sistema poroso de las rocas es cero, entonces las variaciones geométricas se podrían corregir solamente recalculando las cuentas tomadas en geometrías diferentes a  $2\pi$  de acuerdo con la desviación estándar de las mediciones adquiridas en superficies adecuadas de  $2\pi$ . Para esto se sugiere hacer la GRS en temporada seca (Williams-Thorpe *et al.*, 2000; Hernández-Santomé *et al.*, 2025), aunque esto es más aplicable en suelos (Wilford, 1992; Schuler *et al.*, 2011; Coulouma *et al.*, 2016; Stanfoca-Casagrande *et al.*, 2024). Sin embargo, realmente estas condiciones de 0% de humedad difícilmente son alcanzables. Es por esto por lo que tanto las correcciones propuestas por geometría y humedad se realizarán al mismo tiempo.

En primer lugar, de todos los afloramientos en los que se llevó a cabo GRS, se elegirá uno con las mejores condiciones de acuerdo con lo descrito en la sección “3.1. Consideraciones previas” e igualmente en una construcción se seleccionará una fachada o cara y después se graficarán las cuentas contra el contenido de humedad. Esto se hará para la radiación total y para cada radioelemento por separado. Se espera una correlación con una pendiente negativa, es decir, con valores más altos de humedad, menores deberían de ser las cuentas debido a la atenuación de la radiación por el contenido de humedad como se describe en la sección “2.3.2. Factores que afectan la detección”. Las cuentas adquiridas en superficies con geometrías diferentes a  $2\pi$  y los datos demasiado dispersos que puedan explicarse por lecturas anómalas de humedad, materiales sobre la roca, patrones de deterioro, entre otros, serán omitidos para calcular una recta por el método de regresión lineal simple:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i \quad i = 1, \dots, n \quad (14)$$

donde  $y_i$  representa el conjunto de lecturas de radiación gamma en cps o cpm,  $\beta_0$  es el valor en el que la recta interseca con el eje y,  $\beta_1$  es la pendiente de la recta,  $x_i$  representa los valores de humedad en porcentaje,  $\varepsilon_i$  es el error.

Las incógnitas  $\beta_0$  y  $\beta_1$  pueden resolverse por el método de mínimos cuadrados por:

$$\beta_0 = \bar{y} - \beta_1 \bar{x} \quad (15)$$

$$\beta_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (16)$$

donde  $\bar{x}$  representa el promedio del conjunto de datos de humedad en porcentaje,  $\bar{y}$  representa el promedio del conjunto de datos de radiación gamma en cps o cpm.

Además de la recta de regresión lineal, se necesita la desviación estándar de los datos observados con respecto a los valores estimados, la cual se calcula de la siguiente manera:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - (\beta_0 + \beta_1 x_i))^2}{(n-2)}} \quad (17)$$

Al final de estos pasos se deberá de contar con cuatro líneas de regresión (una para potasio, uranio, torio y radiación total) para el afloramiento seleccionado y cuatro más la construcción. Si se estudian más construcciones, entonces cada una deberá de tener su propia recta calculada. Cada recta de regresión deberá de tener su respectiva desviación estándar.

Ahora se podrán corregir los datos descartados al principio, es decir, aquellos con geometrías diferentes a  $2\pi$  y demás cuyos valores estén por encima o debajo de la desviación estándar calculada. Los demás valores no deberán corregirse para no sobreestimar o subestimar otros procesos que puedan influir en las variaciones de las cuentas. Para los valores anormalmente altos se usará la siguiente fórmula:

$$y_{corr} = \hat{y}_i + \sqrt{y_i - \hat{y}_i} \quad (18)$$

y para valores anormalmente bajos:

$$y_{corr} = \hat{y}_i - \sqrt{y_i - \hat{y}_i} \quad (19)$$

donde  $y_{corr}$  es el valor corregido de la radiación en cps o cpm,  $\hat{y}$  son los valores obtenidos a partir del modelo de regresión lineal. Con estas ecuaciones se disminuye la varianza de los datos y se logra que se ubiquen más cerca de la recta de regresión lineal.

El mismo procedimiento de corrección se utilizará para corregir los datos de radiación total y de los radioelementos potasio, uranio y torio por separado. Las

rectas de regresión lineal obtenidas se usarán para corregir los datos de los demás afloramientos y en las otras fachadas o caras de la construcción.

Una vez corregidas las tasas de conteo, se procede a hacer la corrección por humedad, la cual simplemente implica recalcular las cuentas a 0% de humedad. Esto se logra con la ecuación:

$$y_{0\%hum} = y_{corr} - (\beta_1 x_i) \quad (20)$$

donde  $y_{0\%hum}$  es el valor corregido de la radiación en cps o cpm para un valor de humedad del 0%. De igual manera, esto se deberá hacer para la radiación total y para cada radioelemento por separado.

Con esta metodología, las tasas de conteo estarán completamente corregidas para los efectos geométricos y de humedad, y listas para hacer el cálculo de las concentraciones siguiendo las Ecuaciones 7-12 y así realizar una interpretación apropiada de la distribución de los radioelementos como se explica en la siguiente sección.

### **3.6. Interpretación de los datos espectrométricos**

En esta sección se discute la interpretación de los datos obtenidos por GRS. Tomando en cuenta que las rocas de los afloramientos y las de las construcciones son iguales, entonces las variaciones entre ambos estarán relacionadas con la meteorización y deterioro de las rocas, los cuales involucran una redistribución del potasio, uranio y torio, así como modificaciones en sus propiedades físicas y mecánicas.

Por lo tanto, se necesita una comprensión profunda de todos estos factores que afectan la calidad de los datos espectrométricos de rayos gamma para llevar a cabo una interpretación correcta (Hesselbo, 1996; Taylor *et al.*, 2002; Chan *et al.*, 2007; IAEA, 2010; Trindade *et al.*, 2014; Ruffell, 2016; de Mello *et al.*, 2021). Además, se recomienda utilizar cualquier otro análisis que ayude al entendimiento de la distribución del potasio, uranio y torio, por ejemplo, análisis geoquímicos en laboratorio (Hurst, 1990; Williams-Thorpe *et al.*, 2000; Svendsen & Hartley, 2001;

Chen & Chan, 2002; Eltom *et al.*, 2013; Sanjurjo-Sánchez *et al.*, 2018b; Sêco *et al.*, 2021), petrografía y la evaluación de las propiedades mecánicas de las rocas (IAEA, 2003; Méndez-Gaona, 2020).

### **3.6.1. Variaciones causadas por meteorización/deterioro**

Las variaciones de radiación que no dependen de la litología se pueden atribuir a la distribución de los radioelementos por procesos de meteorización y materiales que atenúan los rayos gamma en afloramientos (Hadley *et al.*, 2000; Chen & Chan, 2002; Chan *et al.*, 2007; Ruffell, 2016; de Mello *et al.*, 2021) y en construcciones por procesos de deterioro (Sanjurjo-Sánchez *et al.*, 2018b; Méndez-Gaona, 2020; Hernández-Santomé *et al.*, 2025).

La distribución del potasio, uranio y torio en minerales y rocas se describe en la sección “2.4. Distribución de radioelementos” del capítulo anterior. A partir de estos datos se deriva la respuesta que tendrán a los procesos de meteorización y deterioro.

El potasio forma parte de la estructura de minerales como micas y feldespatos alcalinos, los cuales son fácilmente meteorizados (Myers & Wignall, 1987; Scheepers & Rozendaal, 1993; Wilford *et al.*, 1997; Chan *et al.*, 2007; Trindade *et al.*, 2014; Hernández-Santomé *et al.*, 2025). Esto provoca la liberación del potasio que pasa a estar en solución y puede ser transportado y posteriormente ser adsorbido por minerales arcillosos. Este fenómeno se vería reflejado en la GRS como una disminución de la radiación por pérdida de potasio (Gunn *et al.*, 1997; Chen & Chan, 2002; Hampson *et al.*, 2005) en rocas ígneas de composición intermedia a ácida y en areniscas feldespáticas o líticas porque estos minerales son comunes en estos tipos de rocas.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que la pérdida de potasio puede ser poca al principio de la meteorización, provocando que la radiación no disminuya demasiado, sino solamente hasta etapas más avanzadas (Scheepers & Rozendaal, 1993; Chen & Chan, 2002; Fall *et al.*, 2020). Esto es cierto además para rocas ígneas intermedias y básicas (Dickson & Scott, 1997).

Después de la meteorización de los minerales con potasio, este puede seguir residiendo en la arcilla illita, que es un producto secundario de alteración. Conforme el grado de meteorización aumenta, la illita se transforma en caolinita (Myers, 1989; Dickson & Scott, 1997; Wilford *et al.*, 1997; Taylor *et al.*, 2002; Schuler *et al.*, 2011; Wilford, 2012) que básicamente no contiene potasio, así que la respuesta radiométrica para este radioelemento sería pronunciadamente más baja con etapas más avanzadas de meteorización (Rider, 2002; Hampson *et al.*, 2005; Schuler *et al.*, 2011).

El uranio y el torio se encuentran en minerales accesorio pesados como circón y monacita los cuales son resistentes (Adams & Weaver, 1958; Adams *et al.*, 1959; Langmuir & Herman, 1980; Scheepers & Rozendaal, 1993; Wilford, 1995; Dickson & Scott, 1997), por lo que difícilmente estos elementos serán movilizados por meteorización química (Tieh *et al.*, 1980; Nielsen *et al.*, 1987). Sin embargo, es posible que estos cristales y los que se encuentran como inclusiones en feldespatos y micas, sean removidos por la fragmentación física de las rocas, provocando una disminución en la respuesta radiométrica tanto en rocas ígneas como en areniscas.

Ahora bien, en el caso de rocas volcánicas, es posible que, por su proceso de formación de rápido enfriamiento, el uranio y torio se encuentren dispersos en el vidrio volcánico o alrededor de los minerales. Esto provocaría que su movilización por procesos de meteorización sea más fácil (Tieh *et al.*, 1980) y se verían mayores cambios en sus respuestas radiométricas.

De manera similar, cuando el potasio y el torio son adsorbidos por minerales arcillosos que se encuentran, por ejemplo, en calizas con componentes terrígenos y lutitas, pueden ser movilizados más fácilmente porque no se encuentran en las estructuras minerales. Esto provocaría una disminución en las cuentas de estos radioelementos conforme aumenta la meteorización. Una problemática sería que, en lutitas, el torio está presente además en minerales accesorio pesados de tamaño fino, así que para definir su movilidad por meteorización se puede usar la Th/K que tendría un valor alto. Además, como el uranio también se encuentra en estos

minerales, la relación Th/U debería de permanecer relativamente constante (Adams & Weaver, 1958).

En calizas, debido a que el uranio puede formar parte de la estructura de la calcita, los procesos de meteorización química, por ejemplo, disolución, provocarán pérdida de uranio. Una complicación es que el uranio también se encuentra en materia orgánica, por lo que su distribución podría ser heterogénea (van Buchem *et al.*, 1992; Martinius *et al.*, 2002; Rider, 2002; Wilford, 2012).

Casos especiales ocurren cuando los radioelementos están asociados con minerales secundarios producidos por procesos de meteorización. Por ejemplo, los óxidos de hierro pueden adsorber uranio y torio. Esto puede aumentar la radiación en rocas altamente meteorizadas, lo cual se observa especialmente en el desarrollo de suelos, lateritas o bauxitas que se enriquecen en uranio y torio (Adams & Weaver, 1958; Scheepers & Rozendaal, 1993; Dickson, 1995; Wilford, 1995; Cook *et al.*, 1996; Dauth, 1997; Dickson & Scott, 1997; Gunn *et al.*, 1997; Wilford *et al.*, 1997; Taylor *et al.*, 2002; Moonjun *et al.*, 2017; Fall *et al.*, 2020), generando que difícilmente sean movilizados. Aquí también se deben considerar casos especiales en los que el torio es movilizad por compuestos orgánicos como materia orgánica o ácidos húmicos (Langmuir & Herman, 1980; Bierwirth, 1996; Ruffell *et al.*, 2003, 2006; Taboada *et al.*, 2006; Wilford & Minty, 2007; Wilford, 2012; Ruffell, 2016), así que estos modificarán las distribuciones de este elemento en cualquier contexto.

En general, se puede resumir que rocas más meteorizadas tendrán en conjunto una radiación gamma más baja que las rocas con menor meteorización por la movilidad química de los radioelementos o por la fragmentación física y consecuente pérdida de los granos minerales con elementos radioactivos. Además, el potasio se considera más móvil que el uranio y torio, mientras que el uranio es móvil en condiciones oxidantes y el torio es mayormente inmóvil.

Todo esto se puede aplicar al deterioro que experimentan las rocas de una construcción, aunque también intervienen procesos antropogénicos. Las variaciones en la radiación gamma podrían deberse al desprendimiento de varias partes de los bloques (Sanjurjo-Sánchez *et al.*, 2018b; Méndez-Gaona, 2020), al



depósito de materiales endógenos y exógenos, y posiblemente por la colonización biológica.

El desprendimiento de cualquier tipo puede llevar a la pérdida de cristales de minerales pesados o de feldespatos de potasio, lo cual se vería como una disminución general en la radiación total. En el primer caso, las contribuciones del uranio y torio serían menores, y en el último caso disminuiría el potasio. La erosión también puede originar estas respuestas en la radiación, ya sea por la remoción de cristales o de la matriz que puede contener uranio y torio en rocas volcánicas o solamente uranio en calizas.

Las partículas de polvo que se adhieren a las superficies de los bloques en las construcciones pueden generar algo de radiación porque isótopos hijo de las cadenas de decaimiento del uranio y torio se encuentran en la atmósfera (Adams *et al.*, 1959; Hladil *et al.*, 2003), además de la contribución por la contaminación causada por emisiones de vehículos.

Debido a que cualquier material entre la roca y el detector atenúa en cierta medida la radiación (Adams & Gasparini, 1970; IAEA, 1979, 2003; Dickson *et al.*, 1981; Gunn *et al.*, 1997), entonces el aumento del espesor de depósitos en los bloques de una construcción se observará como valores más bajos de cuentas. Esto sería en el caso de la existencia de cubiertas de cemento, costras de yeso y sales superficiales. Por otra parte, la atenuación se podría deber en ocasiones a contenidos altos de humedad y sales dentro del sistema de poros de la roca que no se aprecian en la superficie, a menos que exista un desprendimiento.

La colonización biológica podría tener varios efectos como la captación del uranio en solución que se reflejaría en cuentas más altas de este elemento, aunque esto dependería de la cantidad y tipo de colonización biológica. Además, este deterioro puede hacer que el torio sea fácilmente movilizado, aumentando su lixiviación que se vería como una pérdida de radiación.

### **3.6.2. Variaciones causadas por cambios en propiedades físicas y contenido de humedad**

Además del cambio de concentración de los radioelementos causado por la meteorización química, los procesos de alteración física que generalmente actúan al mismo tiempo conllevan cambios en las propiedades físicas y mecánicas de las rocas (Chan *et al.*, 2007), por lo que existe una relación entre estas y la radiación gamma.

Las propiedades que se consideran aquí son la densidad y porosidad, cuyas variaciones provocan cambios a su vez en la capacidad de retención de agua, absorción de agua por capilaridad, permeabilidad, y resistencia.

Como se discute en la sección “2.2. Interacciones con la materia” del capítulo anterior, la densidad de un material es un parámetro importante que atenúa la radiación gamma: entre mayor sea la densidad, menor serán las cuentas registradas. De hecho, la atenuación de rayos gamma se usa para evaluar la densidad aparente (Doveton & Merriam, 2004; Ellis & Singer, 2008; Ferronsky, 2015). Ahora bien, las variaciones de densidad aparente se dan principalmente cambios en el porcentaje de porosidad, los cuales a su vez influyen en la capacidad de la roca para almacenar fluidos, además de que el aumento en el contenido de dichos fluidos provocaría un aumento en la densidad (Hornung & Aigner, 1999; Luthi, 2001; Chan *et al.*, 2007).

Para rocas menos meteorizadas, la porosidad es relativamente baja y está desconectada. Conforme la roca se meteoriza, se incrementa la porosidad y la interconectividad de los poros, resultando en una lixiviación de potasio más eficiente y constante (Chan *et al.*, 2007). En el caso de las calizas, los procesos de químicos de disolución de carbonatos conllevan un aumento en la porosidad. Si el uranio se encuentra en la estructura de la calcita, entonces este podría ser lixiviado y la radiación de la roca disminuiría.

Aún más, conforme la porosidad aumenta, la superficie en la que pueden actuar los procesos de meteorización química se incrementa y la pérdida de radioelementos será cada vez mayor (Sanjurjo-Sánchez & Alves, 2017; Holbrook *et al.*, 2019). Este

aumento en la porosidad permite que una roca almacene más fluidos, aumentando su densidad aparente y causando mayor atenuación de la radiación. Sin embargo, una roca con muy baja porosidad es probable que no almacene cantidades importantes de humedad y, por lo tanto, no tendría atenuación (Hernández-Santomé *et al.*, 2025). Igualmente, las sales deberían de contribuir a disminuir la tasa de conteo, lo cual ayudaría a identificar bloques en las construcciones en donde estas cristalicen debajo de la superficie.

Como se sugiere en las correcciones propuestas, la humedad superficial se puede determinar con un medidor de humedad para compararla con las tasas de conteo y deberían de tener una relación negativa, es decir, la radiación disminuirá con el aumento del contenido de humedad. En caso de que se detecte una humedad superficial de 0.0% con valores anormalmente bajos de radiación, esto significaría que los valores de humedad interna de los bloques son mayores. Esto es posible si la humedad superficial es modificada por un aumento en la temperatura ambiental o por una evaporación directa por luz solar. En el caso de las construcciones, esto puede suceder si se tienen superficies de deterioro o de intervenciones que no permitan tomar una medida de humedad directamente. Aun así, la GRS ayudaría a identificar bloques con mayor humedad.

Otra propiedad petrofísica que se relaciona con el agua es la absorción capilar. En una construcción, la absorción capilar de agua puede darse en el contacto entre el suelo y la parte inferior, así que valores anormalmente bajos en estas zonas (nótese que, por geometría, en estas áreas se tendrían tasas de conteo más altas) podrían indicar almacenamiento de agua y sales. Hernández-Santomé *et al.* (2025) evaluaron esta propiedad mediante GRS en fachadas de dos construcciones a diferentes alturas.

La radioactividad se relaciona también con la permeabilidad, que es modificada por la presencia de cemento carbonatado y minerales arcillosos (Hornung & Aigner, 1999). En el primer caso, la tasa de conteo de carbonatos sería baja y en arcillas alta, pudiéndose así hacer distinciones. Aún más, la presencia de minerales

arcillosos es un factor clave para la capacidad de intercambio de cationes, la cual también se podría evaluar mediante GRS (Rodrigues *et al.*, 2015).

Finalmente, la meteorización química de minerales como feldespatos y micas resulta en su transformación en minerales arcillosos, la cual va acompañada por una reducción en la resistencia física de las rocas (Chen & Chan, 2002; Chan *et al.*, 2007; Wilford, 2012; Sanjurjo-Sánchez & Alves, 2017). Por lo tanto, se esperaría que rocas más meteorizadas tuvieran una menor radiación y también menor durabilidad.

Es importante aclarar que, para una interpretación apropiada de las propiedades físicas de las rocas mediante GRS, se necesitan datos experimentales que pueden ser obtenidos de rocas en los afloramientos.

## **4. Litología y patrones de deterioro**

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de la descripción litológica y condiciones de deterioro de los bloques utilizados en las construcciones y de sus respectivos afloramientos en ambas áreas de estudio.

Este tipo de descripciones son básicas para determinar la mineralogía que controla la distribución de los radioelementos y los procesos de meteorización/deterioro que han experimentado para hacer interpretaciones de acuerdo con estos, siguiendo lo establecido en la sección “3.6. Interpretación de los datos espectrométricos”.

### **4.1. Materiales y métodos**

#### **4.1.1. Descripción litológica**

Para cada bloque de las construcciones se registró su litología, características texturales, componentes minerales reconocibles, y coloración. Además, se tomaron fotografías de las diferentes fachadas de cada construcción. Sobre dichas fotografías se colocaron digitalmente los datos de forma gráfica para elaborar mapeos litológicos. Estos son importantes para encontrar relaciones entre el tipo de roca y los daños en las construcciones (Přikryl, 2007; Siedel & Siegesmund, 2014).

Una vez identificados los materiales utilizados en las construcciones, se seleccionaron afloramientos de la misma unidad o formación para describirlos también. En cada uno de estos se hizo un reconocimiento detallado del tipo de roca, textura, componentes minerales, estructuras, contenido fósil, coloración y el registro de cualquier variación composicional.

#### **4.1.2. Descripción de las formas de deterioro y condiciones de meteorización**

Al igual que la litología, se registraron los patrones de deterioro en cada bloque de las construcciones. La nomenclatura para el deterioro usada en esta tesis es la propuesta por Vergès-Belmin (2011) en el glosario del Consejo Internacional de Monumentos y Sitios (International Council on Monuments and Sites, ICOMOS). Su

elección se debe a que el ICOMOS es el organismo internacional ligado a la UNESCO que se encarga de la conservación de los monumentos a nivel mundial y porque este glosario representa un esfuerzo para la estandarización de la nomenclatura de los patrones de deterioro (Siedel & Siegesmund, 2014).

De acuerdo con este glosario de Vergès-Belmin (2011), las formas de deterioro se dividen en cinco grandes grupos:

- Grietas y deformación. Las grietas se refieren a la separación de la roca y la deformación al cambio de forma.
- Desprendimiento. Involucra las formas en la que se desprende la superficie de la roca.
- Formas inducidas por pérdida de material. Describe la morfología de la roca después del desprendimiento, incluso cuando los procesos que lo ocasionaron ya no estén activos.
- Alteración cromática y depósito. La alteración cromática se refiere a cualquier cambio de color de la superficie de la roca, mientras que el depósito describe los materiales sobre los bloques, sean ajenos o propios de la roca.
- Colonización biológica. Engloba la acción de organismos y microorganismos que pueden llegar a colonizar las rocas.

Una vez detallados los daños y su extensión se superpusieron digitalmente sobre las fotografías de las construcciones para elaborar mapeos de deterioro, los cuales son recomendables para encontrar relaciones posibles con la ubicación del bloque, evaluar el progreso del daño con el tiempo y de esta manera tener un punto de inicio para medidas de conservación o restauración (Siegesmund *et al.*, 2002; Inkpen, 2003; Doehne & Price, 2010; Goudie & Viles, 2010; Siedel & Siegesmund, 2014; Přikryl, 2017).

En los afloramientos también se registraron las condiciones de meteorización. El enfoque en estos fue en cambios de coloración o tonalidad en las rocas, oxidación de minerales, estructuras de disolución y fracturas.

#### 4.1.3. Muestreo

Se recolectaron doce muestras de un afloramiento de la Ignimbrita Cantera en la comunidad de Escalerillas, San Luis Potosí, con distintas características (Tabla 2). Por razones de conservación, de las Cajas del Agua no se buscó obtener ninguna muestra, sino que solamente se recogieron fragmentos desprendidos naturalmente por el deterioro en la CAS (Tabla 2).

Tabla 2. Características de las muestras recolectadas de la Ignimbrita Cantera en el afloramiento y en la CAS.

Nomenclatura de la muestra	Detalles característicos
A1	Ignimbrita rosa claro con partes naranjas
A2	Ignimbrita rosa claro
A3	Ignimbrita rosa claro
A4	Ignimbrita rosa oscuro
A5	Ignimbrita rosa oscuro
A6	Ignimbrita blanca
A7	Ignimbrita blanca con banda rosa claro
A8	Ignimbrita naranja
A9	Ignimbrita rosa claro
A10	Ignimbrita rosa claro
A11	Ignimbrita rosa claro
A12	Ignimbrita naranja
CAS1	Ignimbrita deteriorada café de la CAS

En los afloramientos de la Zona Arqueológica de Chichén Itzá se recolectaron diez muestras de roca, una de sascab y otra más de suelo rojo (Tabla 3) cuyo desarrollo es característico sobre la PY (Bautista-Zúñiga *et al.*, 2003, 2005, 2011; Cabadas-Báez *et al.*, 2010a, b).

#### 4.1.4. Petrografía

Del total de las 25 muestras recolectadas se pudieron procesar solamente 22 por sus dimensiones o nivel de consolidación para elaborar láminas delgadas en el laboratorio de preparación del Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de

Tabla 3. Características de las muestras recolectadas de la Formación Chichén Itzá en los afloramientos.

Nomenclatura de la muestra	Detalles característicos
B1	Brecha calcárea gris
B2	Brecha calcárea beige
C1	Caliza blanca con bandas cafés
C2	Caliza blanca
C3	Caliza blanca con laminación beige
CL1	Caliza con laminación
CL2	Caliza con laminación
L1	Caliza con bandas cafés
L2	Caliza con bandas cafés
CIA1	Caliza blanca
SAS1	Sascab poco consolidado
SUE1	Suelo rojo

San Luis Potosí (UASLP). Al final se obtuvieron 44 láminas delgadas de las muestras de San Luis Potosí y 29 de las de Chichén Itzá, dando un total de 73.

La descripción petrográfica de las láminas delgadas se llevó a cabo con un microscopio óptico. En cada lámina de las rocas de la Ignimbrita Cantera se realizó un conteo de entre 500 y 1000 puntos para reconocer los constituyentes minerales y con esto se hizo su clasificación composicional. En el caso de las calizas de la Formación Chichén Itzá, se identificaron los tipos de cemento/matriz y los granos aloquímicos. Para estas rocas se usó la clasificación de Dunham (1962) modificada por Embry & Klovan (1971). Consúltase Flügel (2010) para un completo análisis sobre las calizas.

La petrografía fue necesaria para determinar los constituyentes que componen a las diferentes rocas y en concordancia evaluar la distribución de los radioelementos. Además, las características texturales afectan las propiedades físicas de las rocas y su reacción a los procesos de meteorización y deterioro (Price, 1995; Siegesmund *et al.*, 2002; Benavente *et al.*, 2004; Přikryl & Török, 2010; Přikryl, 2013; White & Buss, 2014), así que este tipo de análisis es básico para el entendimiento adecuado de dichos procesos.



#### 4.1.5. Difracción de rayos X

Una porción de todas las 25 muestras fue triturada para análisis por difracción de rayos X que se realizó con un difractómetro de rayos X Bruker D8 Advance en el Laboratorio Nacional de Investigaciones en Nanociencias y Nanotecnología (LINAN) del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT).

Este tipo de análisis es útil para identificar los componentes minerales que no se pueden reconocer por medio de la petrografía en lámina delgada.

### 4.2. Ignimbrita Cantera, San Luis Potosí

#### 4.2.1. Afloramiento

El afloramiento seleccionado corresponde a un sitio de extracción de material de la Ignimbrita Cantera al sureste de la ciudad de San Luis Potosí (Fig. 10).

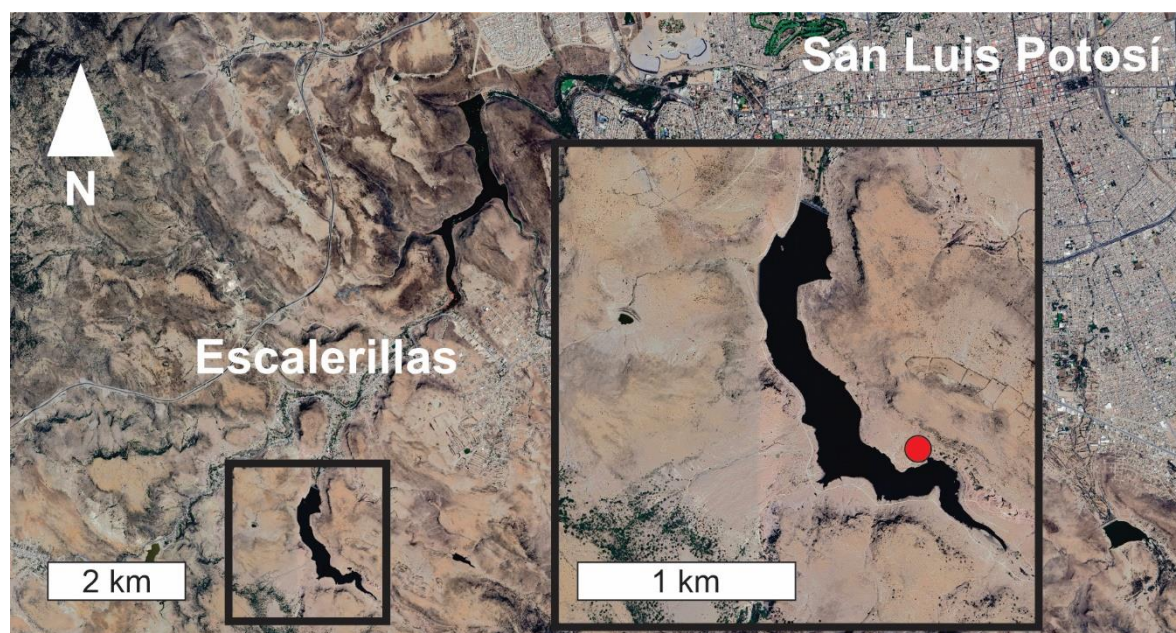


Figura 10. Localización del afloramiento estudiado (círculo rojo) perteneciente a la Ignimbrita Cantera (coordenadas: 22.089545, -101.073008) (fotografías tomadas de Google Earth).

Mineralógica y texturalmente, el afloramiento es muy homogéneo, se distinguen fenocristales de cuarzo y feldespato principalmente de 1 mm (Fig. 11). En menor medida se observan cristales oscuros en ocasiones oxidados (Fig. 11), así como escasos fragmentos de pómez de tamaños variables (mayormente entre 1-2 cm) sin orientación preferencial. Estas características han sido reportadas para otros afloramientos de la Ignimbrita Cantera (por ejemplo, Labarthe-Hernández & Tristán-González, 1978; Labarthe-Hernández *et al.*, 1982; Labarthe-Hernández & Jiménez-López, 1992).

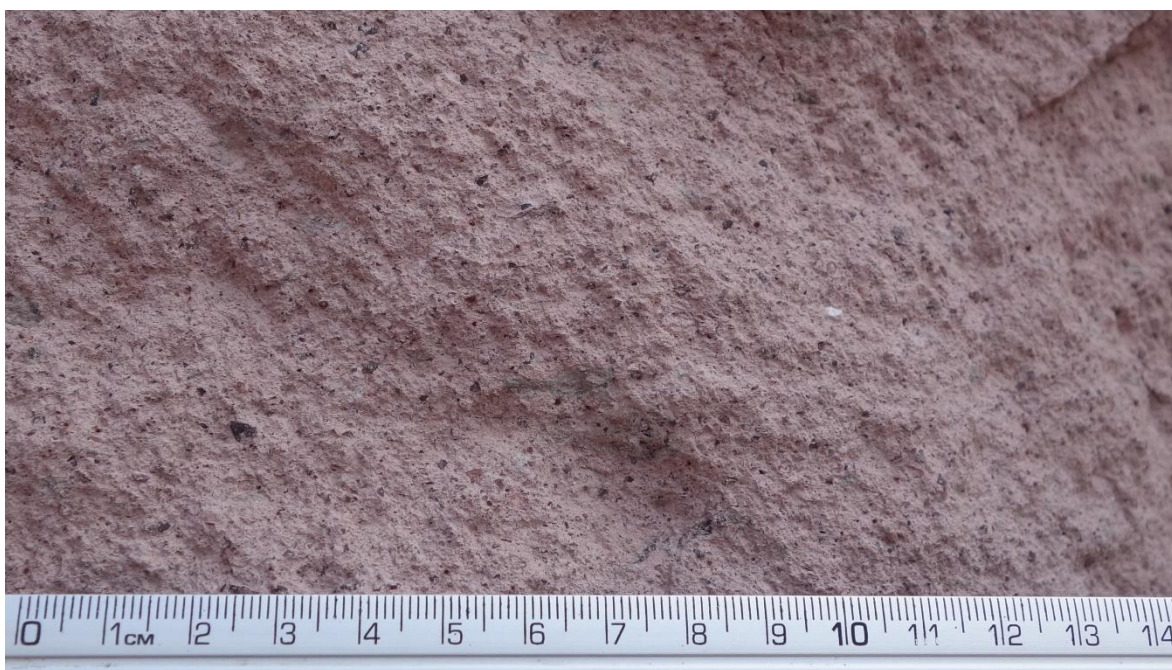


Figura 11. Detalle de la Ignimbrita Cantera en la que se pueden distinguir cristales de cuarzo y feldespato de colores grises y blancos, así como minerales oscuros.

Las variaciones que sí son notorias en el afloramiento son los de coloración (Fig. 12): el rosa claro (CRC) es el color original de la roca que cambia a rosa oscuro (CRO) o a naranja (CN). Todos estos colores pueden adquirir tonalidades cafés probablemente por la adhesión de materiales como polvo y suelo. Hacia la cima del afloramiento se localizaron capas medianas de color blanco rosáceo.



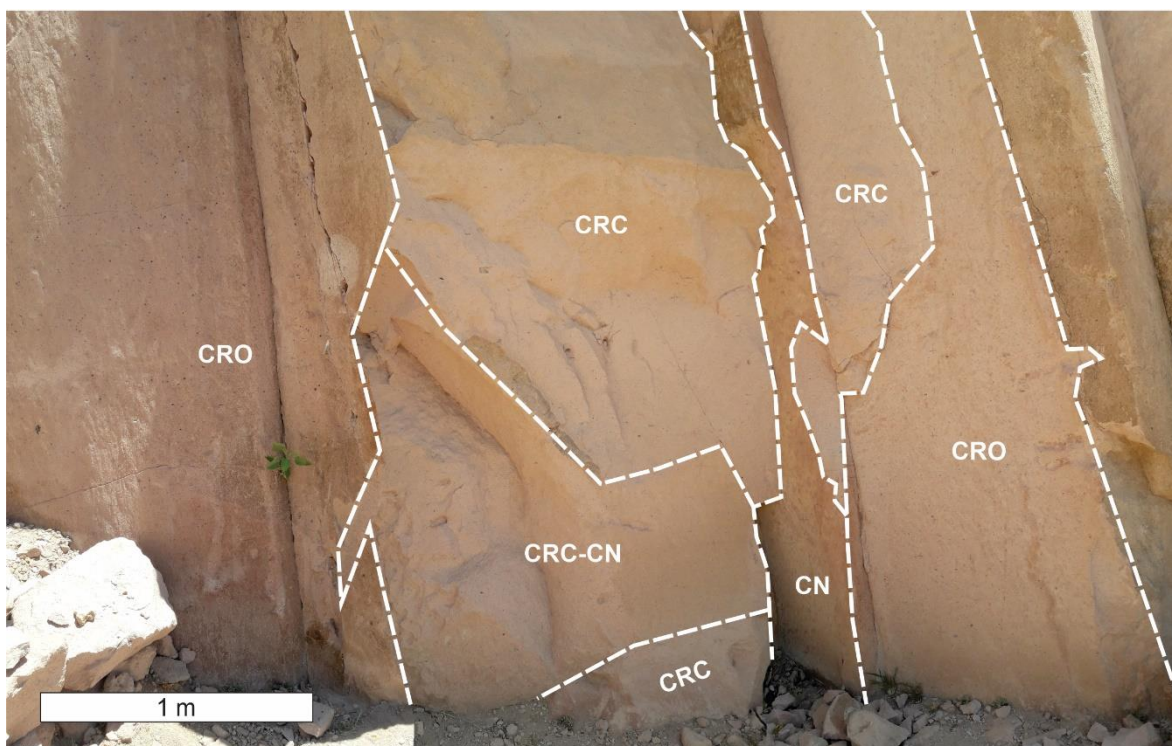


Figura 12. División del afloramiento de acuerdo con las diferencias de color. CRC: rosa claro. CRO: rosa oscuro. CN: naranja.

#### 4.2.2. Caja del Agua Conservera

Mineralógicamente, en la CAC las rocas de la Ignimbrita Cantera son iguales a las del afloramiento con fenocristales de cuarzo y feldespato, minerales oscuros y fragmentos de pómez. De forma similar, se identificaron bloques con las mismas tres variantes de coloración que en el afloramiento: CRC, CRO y CN, e igualmente están afectadas a distintos grados por tonalidades cafés. Sin embargo, predominan los bloques de color naranja CN (Fig. 13). Estas diferencias de coloración han sido identificadas en otras construcciones del Centro Histórico de San Luis Potosí (por ejemplo, López-Doncel *et al.*, 2015; Montante-Hernández, 2019).

En la CAC, las formas de deterioro que se encontraron para cada familia están representadas en la Figura 14 y son las siguientes:

- Grietas. Son pocas y se encuentran ubicadas en las caras secundarias. Tienen una extensión de varias decenas de centímetros.



Figura 13. Mapeo litológico de la CAC que muestra la coloración de los bloques. En negro están las piezas en donde no se pudo identificar el tipo de roca porque están cubiertas. A. Fachada norte. B. Fachada oeste. C. Fachada sur. D. Fachada este.



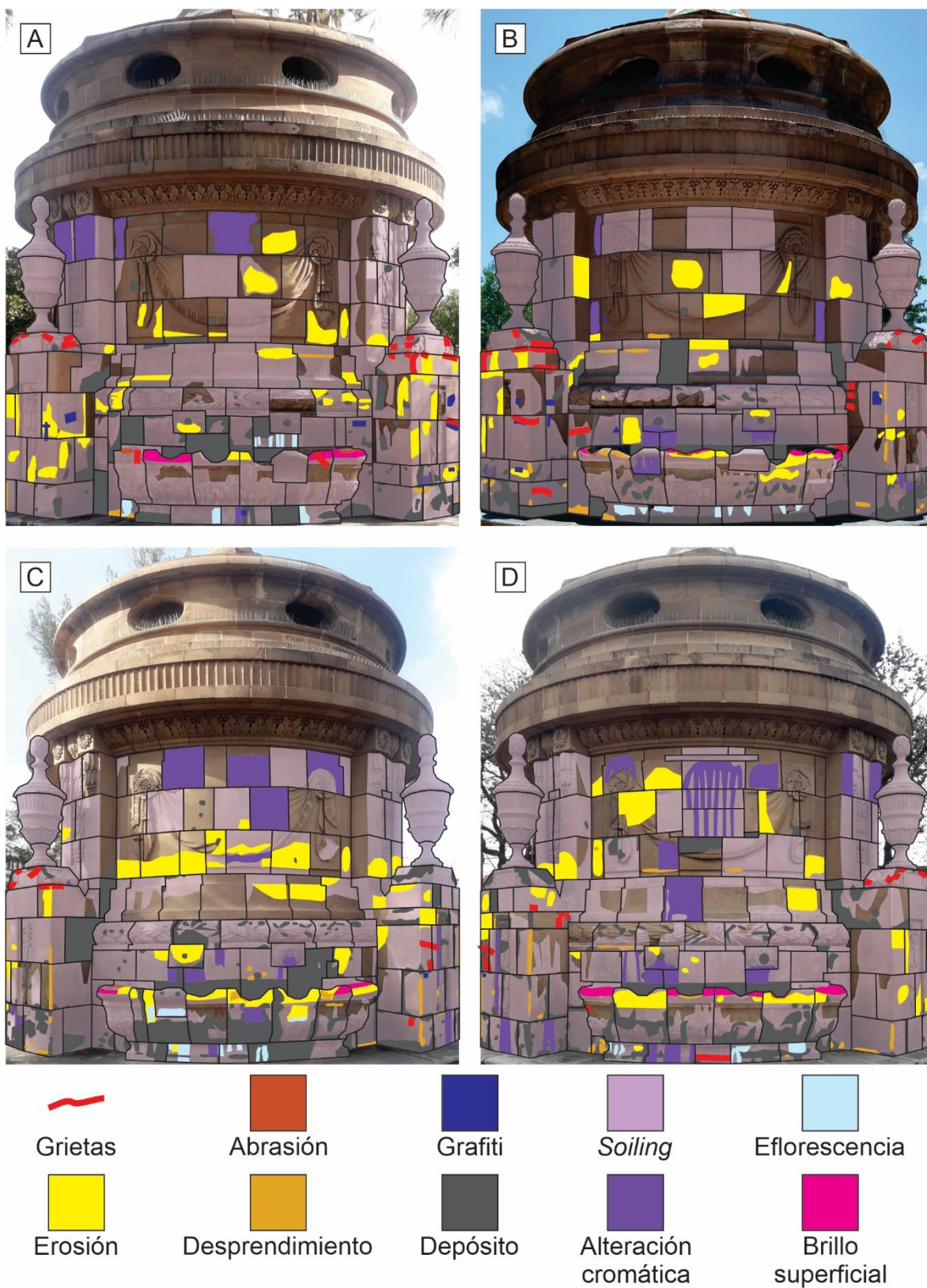


Figura 14. Mapeo de las formas de deterioro de la CAC. A. Fachada norte. B. Fachada oeste. C. Fachada sur. D. Fachada este.

- Desprendimiento. Es poco común y abarca una superficie mínima. El subtipo *blistering* es causado probablemente por la cristalización de sales transportadas por el ascenso de agua por capilaridad, ya que es más común en las zonas inferiores de las fachadas (Benavente *et al.*, 2001; Steiger, 2003). El subtipo fragmentación se observa principalmente en las aristas de los bloques. El subtipo descamación, al igual que el *blistering*, se presenta las partes bajas probablemente inducido por el mismo fenómeno.
- Formas inducidas por pérdida de material. Ocupa más extensión que la familia de desprendimiento. El subtipo erosión es la principal forma de deterioro y está representado por la pérdida de componentes como cristales de cuarzo o feldespato y en menor medida por erosión de la matriz. El subtipo abrasión se encontró en las partes superiores de la pileta por el contacto de las personas con estas piezas.
- Alteración cromática y depósito. Esta familia abarca la mayor superficie en la CAC. La alteración cromática está representada por los cambios de color rosa a tonalidades naranjas por procesos de meteorización como se vio en los afloramientos. El depósito puede ser de distinta composición y se englobó aquí cualquier material que cubría la superficie de los bloques. El subtipo blanqueamiento se encontró en varios bloques posiblemente por el escurrimiento de agua porque se encuentran debajo de la parte superior o de las llaves por donde solía salir el agua. El subtipo eflorescencia es común en las partes inferiores que están en contacto con el suelo, lo que sugiere que están ligadas a la ascensión de agua por capilaridad al igual que la descamación y *blistering*. El subtipo de brillo superficial está asociado a la abrasión en las partes superiores de la pileta debido al contacto de las personas. El subtipo grafiti está conformado por rayaduras en los bloques, pero son muy pocos. El subtipo *soiling* es el más extendido y se observa como un color café oscuro en las superficies de la mayoría de los bloques predominando en las partes de bajas de la CAC hasta aproximadamente 2 m de altura, por lo que quizás se relacione con partículas exógenas

antropogénicas (Honeyborne, 2006), polvo adherido o contaminantes atmosféricos de vehículos (Watt & Hamilton, 2003).

- Colonización biológica. Esta familia de deterioro no se identificó en la CAC debido a que se han efectuado campañas de conservación y restauración (Beltrán-Zavala & Roque-Jiménez, 2018) en donde se retiraron plantas en las partes inferiores y superiores.

En el Anexo 3 se detalla el número asignado para cada bloque de la CAC, sus variaciones de coloración y los tipos de deterioro que presenta cada uno. Registros sobre las formas de deterioro han sido realizados anteriormente (por ejemplo, González-Sámano, 2012; Beltrán-Zavala *et al.*, 2015; Beltrán-Zavala & Roque-Jiménez, 2018) con los cuales se pueden hacer comparaciones del avance de los patrones de daño.

#### **4.2.3. Caja del Agua del Santuario**

Como en la CAC, las rocas de la Ignimbrita Cantera que se observaron en la CAS son iguales a las del afloramiento con fenocristales de cuarzo y feldespato, minerales oscuros y fragmentos de pómez. Asimismo, los bloques presentan las tres variantes de coloración CRC, CRO y CN que las rocas del afloramiento, siendo también afectadas por tonalidades cafés (Fig. 15).

En esta construcción se reconocieron básicamente las mismas formas de deterioro que en la CAC, con algunas variaciones en su distribución y extensión según lo muestra el mapeo de deterioro en la Figura 16. Se identificaron:

- Grietas. Su cantidad y longitud es mucho menor comparadas con las grietas de la CAC, siendo de solo unos pocos centímetros.
- Desprendimiento. Es mucho más común en esta construcción que en la CAC y predomina en los bloques inferiores. El subtipo *blistering* es causado posiblemente por la cristalización de sales. El subtipo fragmentación se observa mayormente en las aristas de los bloques. El subtipo descamación

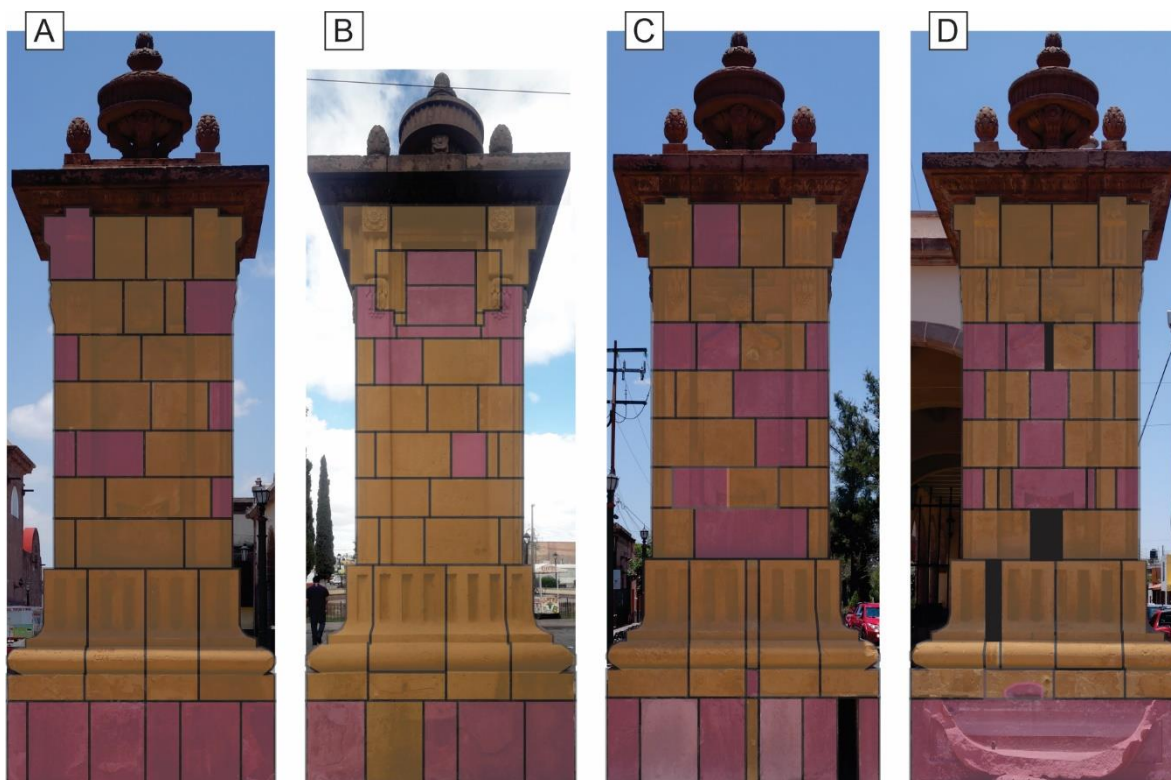


Figura 15. Mapeo litológico de la CAS que muestra la coloración de los bloques. En negro están las piezas en donde no se pudo identificar el tipo de roca porque están cubiertas. A. Fachada norte. B. Fachada oeste. C. Fachada sur. D. Fachada este.

está muy asociado con el *blistering* porque este genera el levantamiento de las superficies que evoluciona a desprendimiento en forma de descamación. Este tipo de deterioro se ubica preferencialmente en los bloques inferiores de las caras norte y oeste.

- Formas inducidas por pérdida de material. En la CAS, a diferencia de la CAC, estos patrones de deterioro tienen menos extensión que los de desprendimiento. El subtipo erosión sigue siendo la principal forma de deterioro, sobre todo por pérdida de componentes y en menor medida por erosión de la matriz. Se observaron perforaciones producidas por la colocación de una placa en la cara oeste. El subtipo de parte faltante se presenta en la cara este porque parte de la pileta fue desprendida por el



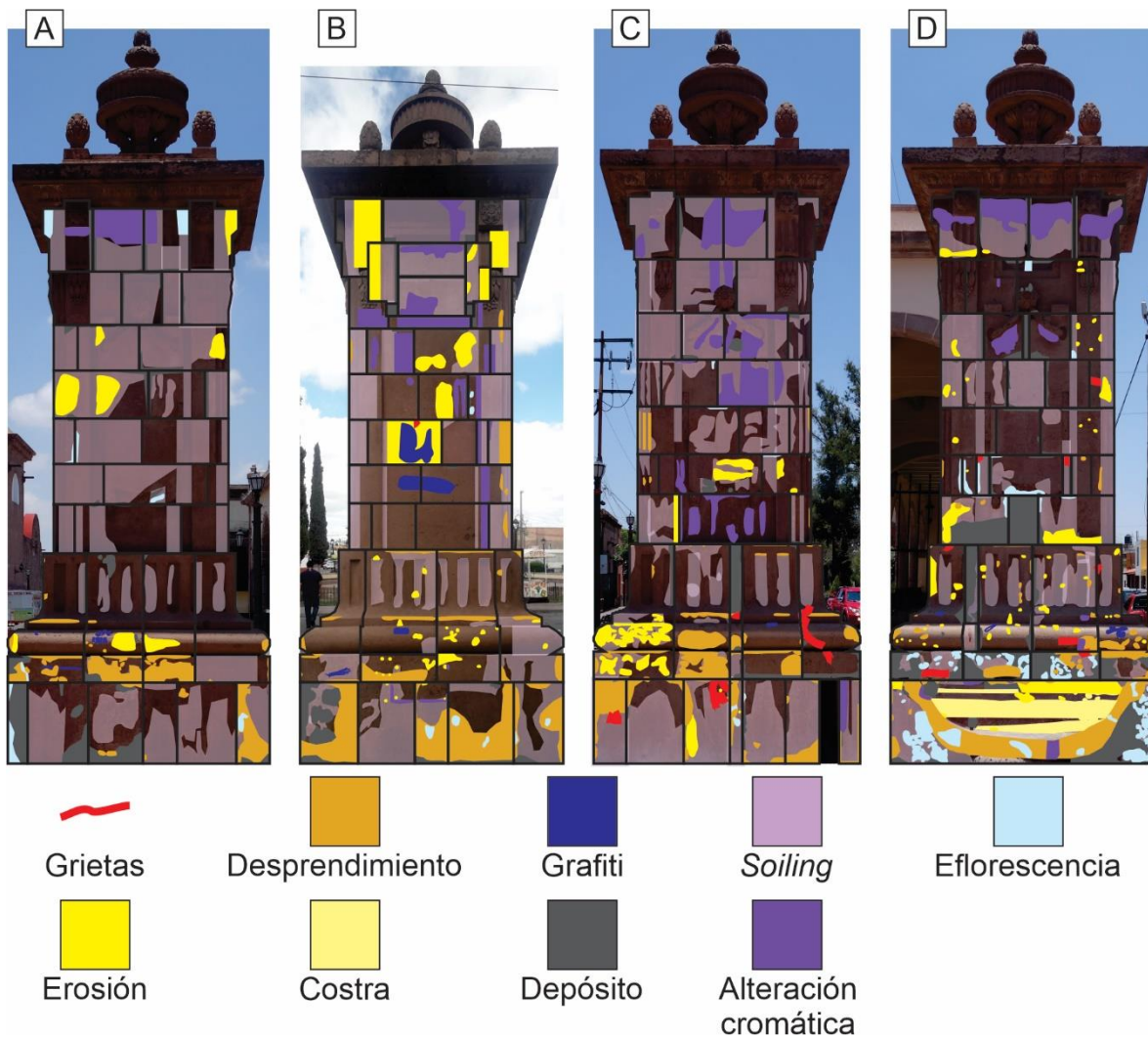


Figura 16. Mapeo de las formas de deterioro de la CAS. A. Fachada norte. B. Fachada oeste. C. Fachada sur. D. Fachada este.

impacto de un vehículo. Los fragmentos fueron resguardados por la Unidad de Gestión del Centro Histórico del municipio (Roque-Jiménez *et al.*, 2022) y posteriormente reinstalados durante la última campaña de restauración (Mora, 2024).

- Alteración cromática y depósito. Al igual que en la CAC, esta familia es la que más extensión tiene en las caras de la CAS y está representada por los mismos cambios de color rosa a tonalidades naranjas. Los depósitos mapeados corresponden a materiales exógenos sobre la superficie de los

bloques. El subtipo blanqueamiento se encontró en las partes superiores, por los que se relaciona con el escurrimiento de agua desde estas zonas. El subtipo costra se encontró en la sección inferior en la pileta y se formó muy probablemente por la evaporación de los niveles de agua que dejaron carbonatos incrustados. El subtipo eflorescencia es común en las partes inferiores y está casi seguramente relacionado con la ascensión de agua por capilaridad. El subtipo subeflorescencia se identificó por la descamación de varios bloques, por lo que se infiere que estos patrones están relacionados. El subtipo grafiti se identifica por rayaduras de la superficie de los bloques, aunque es un daño menor. El subtipo *soiling* está más marcado en los bloques inferiores, al igual que en la CAC.

- Colonización biológica. Si bien no existe esta familia en los bloques de la construcción, sí crecen plantas en el contacto entre los bloques inferiores y la banqueta. Esto se debe a la abundancia de agua de fuentes antropogénicas y la existencia de un depósito de agua (aljibe) que alimentaba la pileta (Roque-Jiménez *et al.*, 2022).

En el Anexo 4 se detalla el número asignado para cada bloque de la CAS, sus variaciones de coloración y los patrones de deterioro de cada uno. Registros sobre las formas de deterioro en esta construcción han sido realizados por Roque-Jiménez *et al.* (2022), de tal manera que pueden servir como base para hacer comparaciones y monitorear los procesos de deterioro.

#### **4.2.4. Petrografía**

El análisis petrográfico y conteo de puntos se realizó para las 44 láminas delgadas. Debido a que se obtuvieron varias láminas de cada muestra, sus resultados se promediaron y se calculó el porcentaje de cada componente (Tabla 4). A continuación, se describen las características petrográficas para las rocas de la Ignimbrita Cantera.

Tabla 4. Composición de las muestras de la Ignimbrita Cantera en porcentaje. Mat: matriz. Q: cuarzo. F: feldespato alcalino. Op: opacos. Bi: biotita. Po: pómez. FL: fragmentos líticos. Cl: clorita. Cal: calcita. Tot: total.

Muestra	Mat	Q	F	Op	Bi	Po	P	FL	Cl	Cal	Tot
A1	70.54	11.21	14.12	3.13	0.59	0.14	0.17	0.05	0.05	0.00	100
A2	80.18	10.22	7.23	1.31	0.58	0.27	0.17	0.04	0.00	0.00	100
A3	75.89	12.96	8.81	1.34	0.64	0.18	0.18	0.00	0.00	0.00	100
A4	78.50	11.86	7.97	0.92	0.41	0.17	0.17	0.00	0.00	0.00	100
A5	73.58	9.66	11.87	3.66	0.25	0.46	0.17	0.35	0.00	0.00	100
A6	75.24	8.72	12.86	2.01	0.49	0.43	0.18	0.03	0.04	0.00	100
A7	76.03	12.38	9.59	1.34	0.38	0.09	0.19	0.00	0.00	0.00	100
A8	78.20	10.92	8.67	1.23	0.76	0.05	0.17	0.00	0.00	0.00	100
A9	77.88	11.68	8.76	0.23	0.80	0.22	0.43	0.00	0.00	0.00	100
A10	81.50	9.59	7.01	0.91	0.76	0.04	0.19	0.00	0.00	0.00	100
A11	78.04	10.61	8.40	1.45	0.33	1.00	0.17	0.00	0.00	0.00	100
A12	79.19	9.08	7.14	0.80	0.49	0.50	0.13	0.00	0.00	2.67	100

La matriz está compuesta de ceniza y es criptocristalina. Representa aproximadamente el 70-82% de las muestras. Ocasionalmente se observa teñida de colores rojizos o anaranjados por la tinción de óxidos originados por diversos minerales que se disuelven parcialmente (Fig. 17).

El cuarzo en la mayoría de las muestras es el mineral principal. Generalmente se presenta como fenocristales subhedrales de 0.5 mm a 2 mm, aunque pueden ser de menor tamaño (0.1 mm). Es raro observar bahías de reabsorción y menos frecuente encontrar cuarzo con forma hexagonal. Algo común en los cristales son las inclusiones de minerales accesorio pesados (Fig. 18A), probablemente circón, xenotima o apatito.

El feldespato es el segundo mineral principal y en ocasiones supera al cuarzo en porcentaje. Al igual que este último, se presenta como fenocristales subhedrales comúnmente de 0.5 mm a 2 mm o de menor tamaño. La mayoría de los feldespatos no tienen maclas, pero si llegan a presentar entonces es una macla simple (Fig. 18B). De forma similar al cuarzo, presentan inclusiones de minerales accesorio pesados.



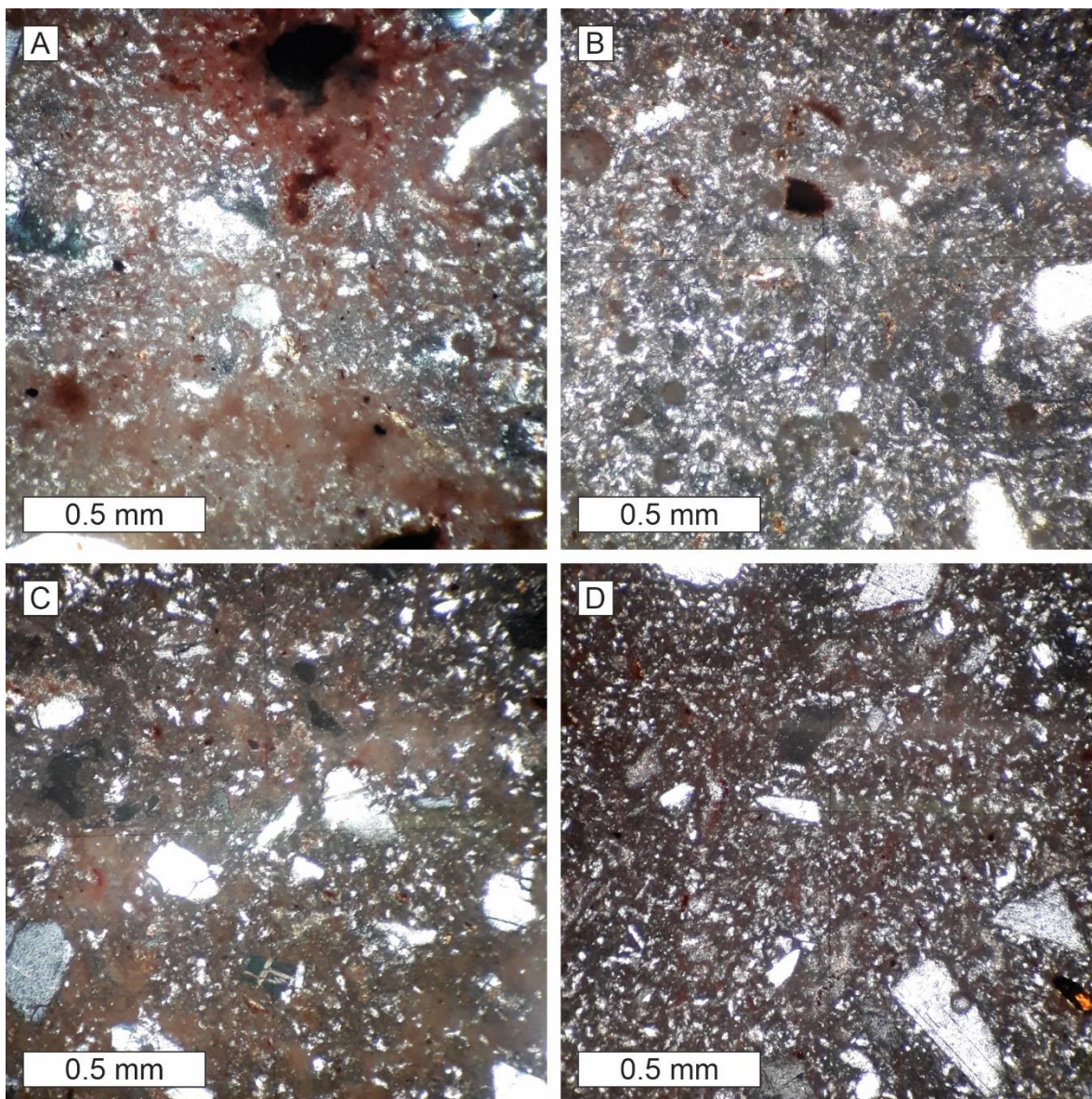


Figura 17. Variaciones de la matriz. A. Influencia de óxidos en la coloración de la matriz de una muestra rosa claro A2. B. Matriz sin influencia de óxidos en muestra de coloración blanca A6. C. Matriz uniformemente anaranjada en muestra que macroscópicamente se aprecia de tonalidad naranja A8. D. Otro tipo de tono de matriz ligeramente más rojiza en muestra de color rosa claro A9. Todas las microfotografías en nicoles cruzados.

Los minerales opacos y la biotita son los otros minerales más frecuentemente encontrados después del cuarzo y feldespato, siendo la mayoría de menor tamaño



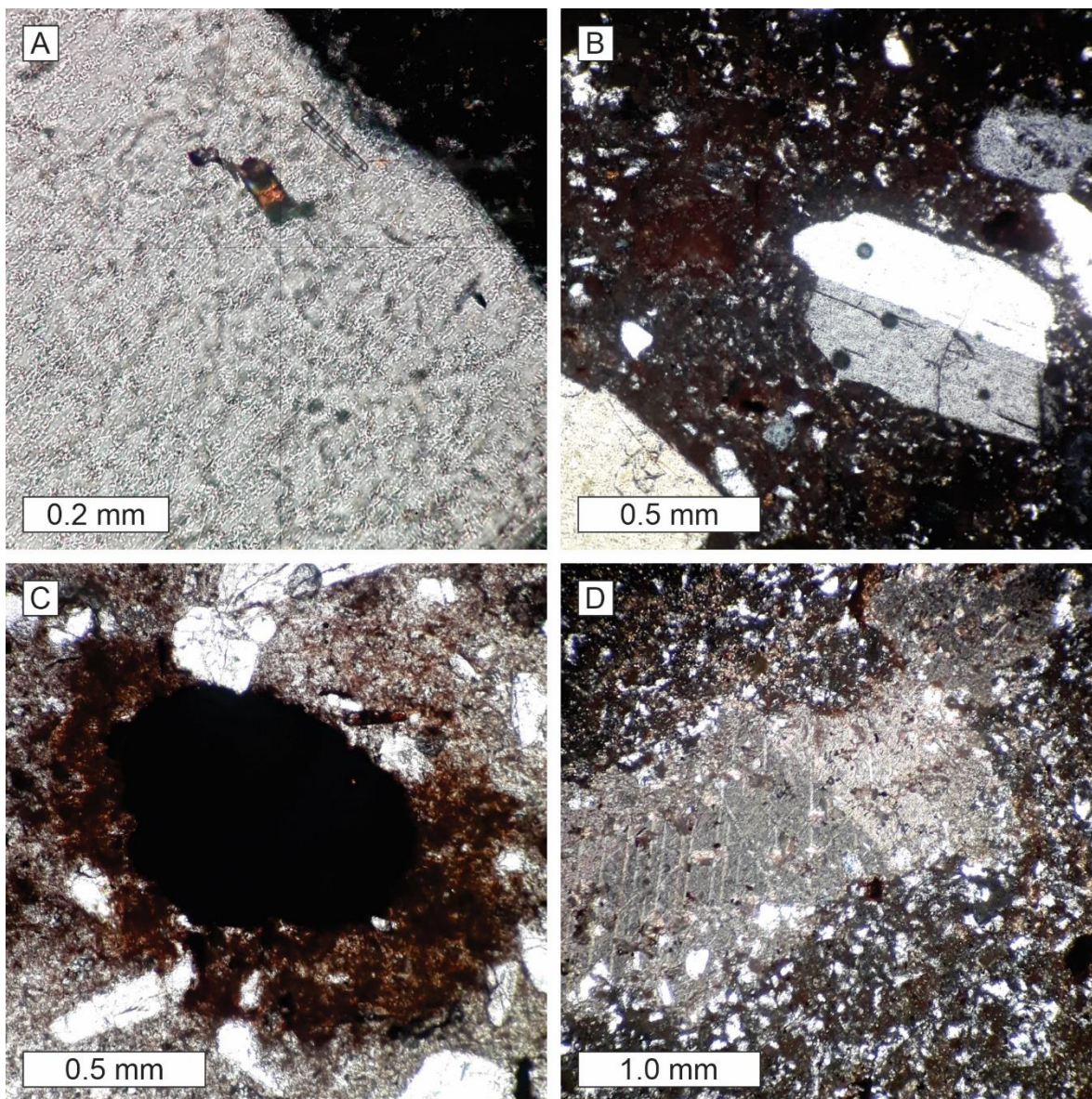


Figura 18. A. Inclusiones de minerales accesorio pesados en cuarzo. B. Macla simple en feldespato alcalino. C. Mineral opaco con su halo de óxido influenciando la coloración de la matriz (nicos paralelos). D. Crecimiento de calcita probablemente por alteración de pómez. Todas las microfotografías en nicos cruzados a menos que se indique lo contrario.

(<0.5 mm). Los minerales opacos son anhedrales a subhedrales y manchan a la matriz de un color anaranjado o rojizo debido a su oxidación (Fig. 18C). La biotita es euhedral a subhedral y se distingue bien su clivaje. Presenta comúnmente un

halo de óxido alrededor que también puede manchar la matriz, aunque la extensión que este halo puede alcanzar es poca comparada con la de los óxidos.

Los fragmentos de pómez tienen una proporción similar a los minerales opacos o biotita en algunas muestras. Sus tamaños son muy variables de entre 0.5 mm hasta varios centímetros y son subredondeados a subangulosos.

Se distinguieron cristales muy pequeños ( $<0.25$  mm) en la matriz que por su alto relieve corresponden con minerales accesorio pesados. Es precisamente por su tamaño menor que en el conteo de puntos no están representados, pero sí están presentes en todas las muestras.

Las plagioclasas son menos frecuentes en comparación con los minerales opacos y la biotita, aunque su tamaño está en el mismo rango de estos ( $<0.5$  mm). Se distinguen por sus maclas polisintéticas. En menor proporción se observaron fragmentos líticos de origen plutónico y sedimentario, posiblemente arenisca, además de clorita. Solo en la muestra A12 se identificó calcita (Fig. 18D) que puede ser un mineral que comúnmente rellena los poros de las ignimbritas por alteración después de su depósito (Tucker, 2001; Boggs, 2009).

Los componentes minerales concuerdan con descripciones petrográficas previas de la Ignimbrita Cantera con variaciones ligeras en sus porcentajes, pero siempre con la predominancia de cuarzo y feldespato (por ejemplo, Labarthe-Hernández & Tristán-González, 1978; Labarthe-Hernández *et al.*, 1982; Labarthe-Hernández & Jiménez-López, 1992; Maldonado-Sánchez, 1997; González-Sámano, 2012; Siegesmund *et al.*, 2022). Existe una discrepancia con los resultados de Torres-Sánchez *et al.* (2019) y Torres-Sánchez (2020) que reportan orto y clinopiroxenos e incluso olivino en menor proporción. Además, Pötzl *et al.* (2022) encontraron esmectitas y cuarzo como componentes principales, mientras que los feldespatos de potasio fueron identificados como componentes menores junto con plagioclasas, moscovita/illita y caolinita. Esto se debe a que posiblemente sus muestras corresponden a otro miembro de la Ignimbrita Cantera, pertenecen a otras facies de esta o representan estados más alterados.

El conteo de puntos se utilizó para clasificar composicionalmente a las rocas de acuerdo con el diagrama QAP (cuarzo-feldespato alcalino-plagioclasa). Los parámetros obtenidos (Tabla 4) fueron recalculados (Tabla 5) para graficarlos en dicho diagrama (Fig. 19). El resultado es que todas las muestras caen en el campo de la riolita de feldespato alcalino.

Tabla 5. Normalización de los parámetros cuarzo (Q), feldespatos alcalinos (A) y plagioclasas (P) para graficar en el diagrama QAP.

Muestra	Q	A	P	Total
A1	43.96	55.37	0.67	100.00
A2	58.00	41.03	0.97	100.00
A3	59.04	40.14	0.82	100.00
A4	59.30	39.85	0.85	100.00
A5	44.52	54.70	0.78	100.00
A6	40.07	59.10	0.83	100.00
A7	55.87	43.27	0.86	100.00
A8	55.26	43.88	0.86	100.00
A9	55.97	41.97	2.06	100.00
A10	57.12	41.75	1.13	100.00
A11	55.32	43.79	0.89	100.00
A12	55.53	43.67	0.80	100.00

#### 4.2.5. Difracción de rayos X

Los resultados de la difracción de rayos X (Fig. 20) tienen una excelente coincidencia con la petrografía, siendo el cuarzo el mineral principal junto con el feldespato alcalino que corresponde al sanidino. Los óxidos de hierro observados en la petrografía aquí se identificaron como hematita y sus picos poco definidos indican que no está muy bien cristalizada, lo cual correspondería con su dispersión en la matriz. La arcilla revelada por la difracción de rayos X es la montmorillonita que posiblemente está asociada con alteración (Folk, 1980; Tucker, 2001; Boggs, 2009; Bjørlykke, 2015). Al igual que en la petrografía, solamente la muestra A12 mostró la presencia de calcita.

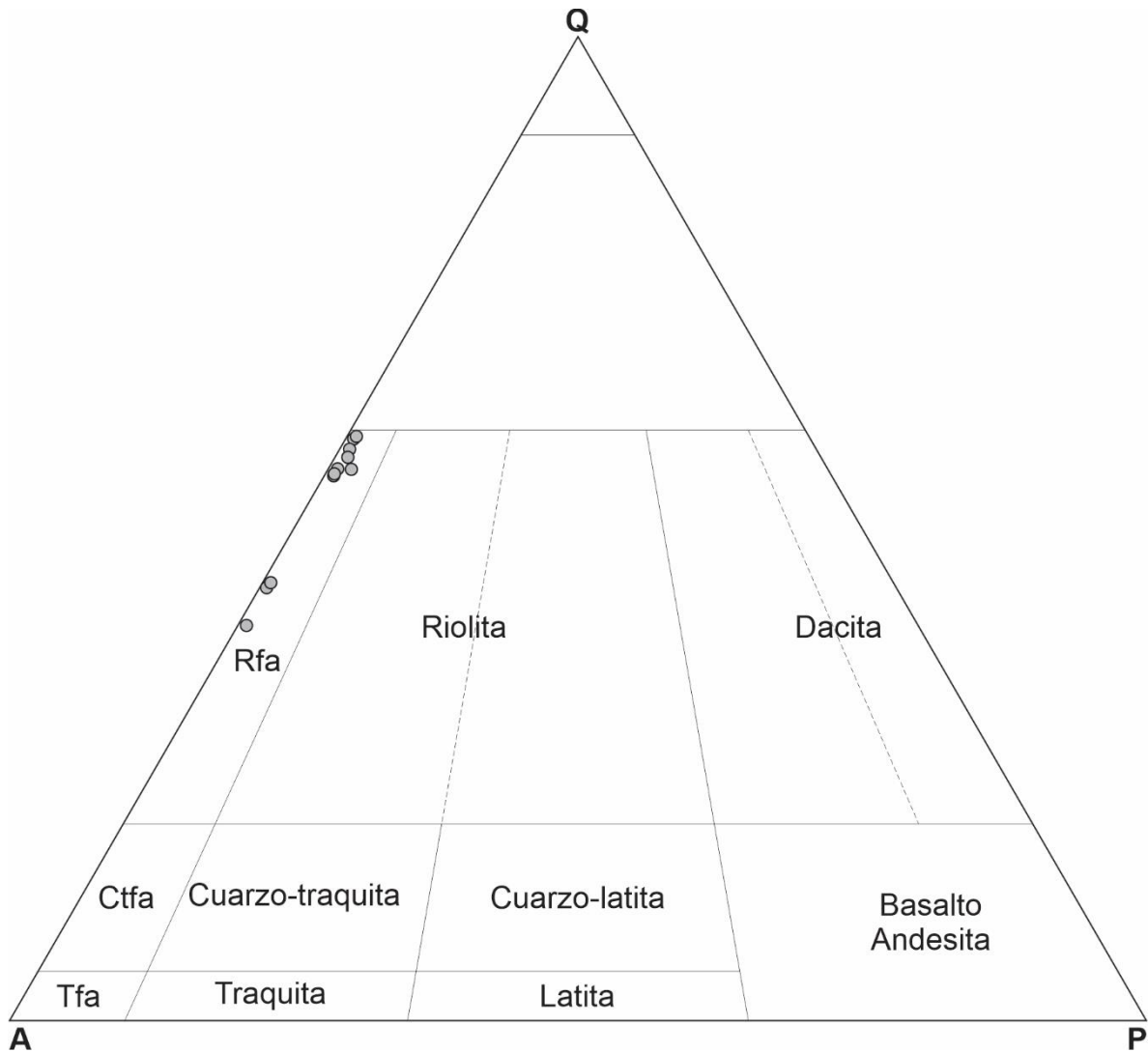


Figura 19. Diagrama QAP con divisiones de Le Maitre (2002). Tfa: traquita de feldespato alcalino. Ctfa: cuarzo-traquita de feldespato alcalino. Rfa: riolita de feldespato alcalino.

En el difractograma para la muestra CAS1, que corresponde a los fragmentos recogidos de la CAS, se identificaron los mismos minerales que en las demás muestras. Y al igual que la muestra A12, se tiene la presencia de calcita (Fig. 20). Esto podría indicar que varios bloques de rocas usados en las construcciones pueden tener calcita naturalmente, aunque parece más probable que esta calcita esté asociada con reparaciones que se efectuaron con cemento y que por disolución y posterior depósito entró en el sistema de poros de la roca.



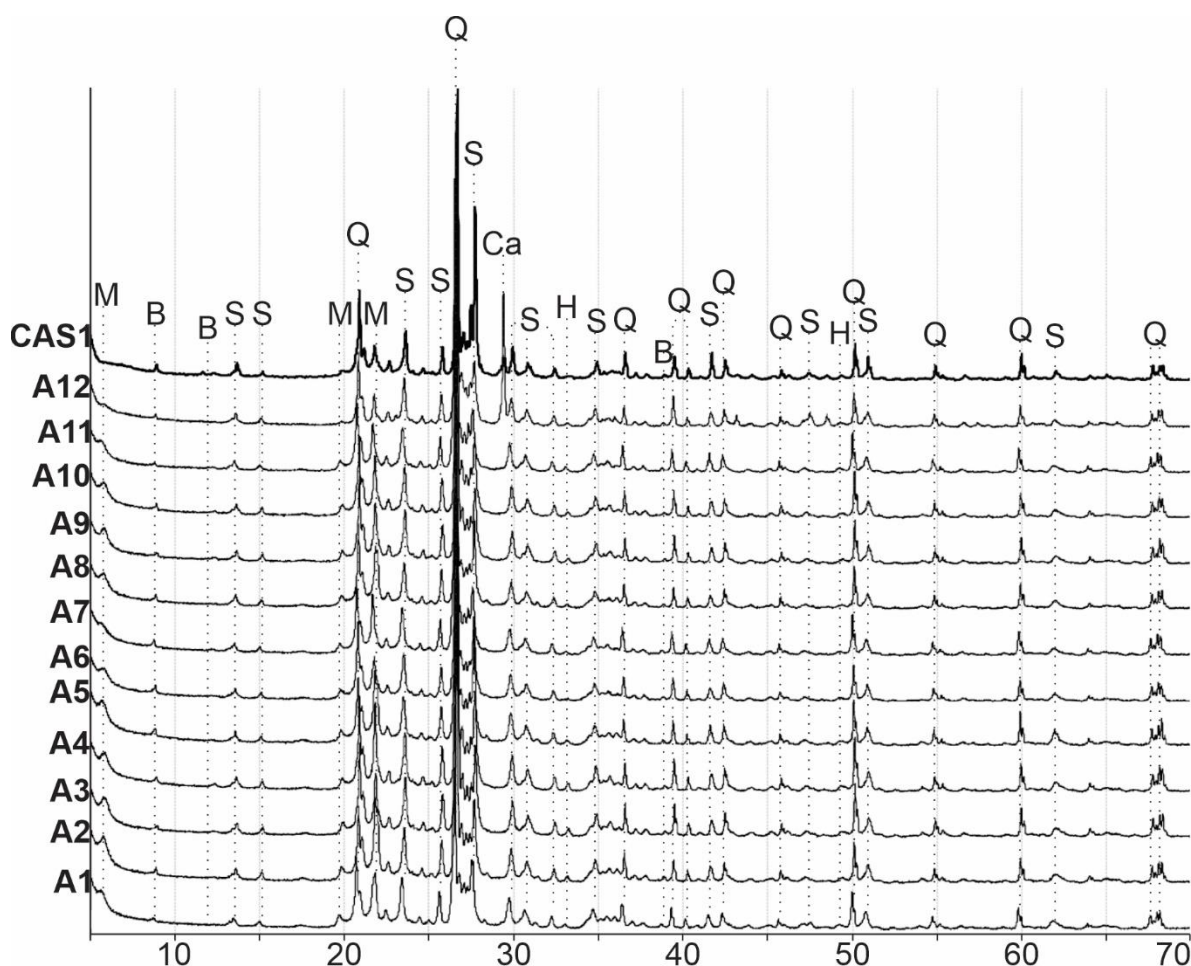


Figura 20. Difractogramas para todas las muestras del afloramiento y la de la CAS. B. biotita. Ca: calcita. H: hematita. M: montmorillonita. Q: cuarzo. S: sanidino.

### 4.3. Formación Chichén Itzá, Zona Arqueológica de Chichén Itzá

#### 4.3.1. Afloramientos

Los afloramientos seleccionados se distribuyen en la mitad norte de la Zona Arqueológica de Chichén Itzá (Fig. 21). Las coordenadas de cada uno se proporcionan en la Tabla 6.

En los afloramientos AF1-AFE1 se distinguieron brechas calcáreas con una matriz de color blanco o naranja con sus clastos redondeados igualmente con estas coloraciones (Fig. 22). Los clastos son de 1 cm a 5 cm de diámetro y tienen una

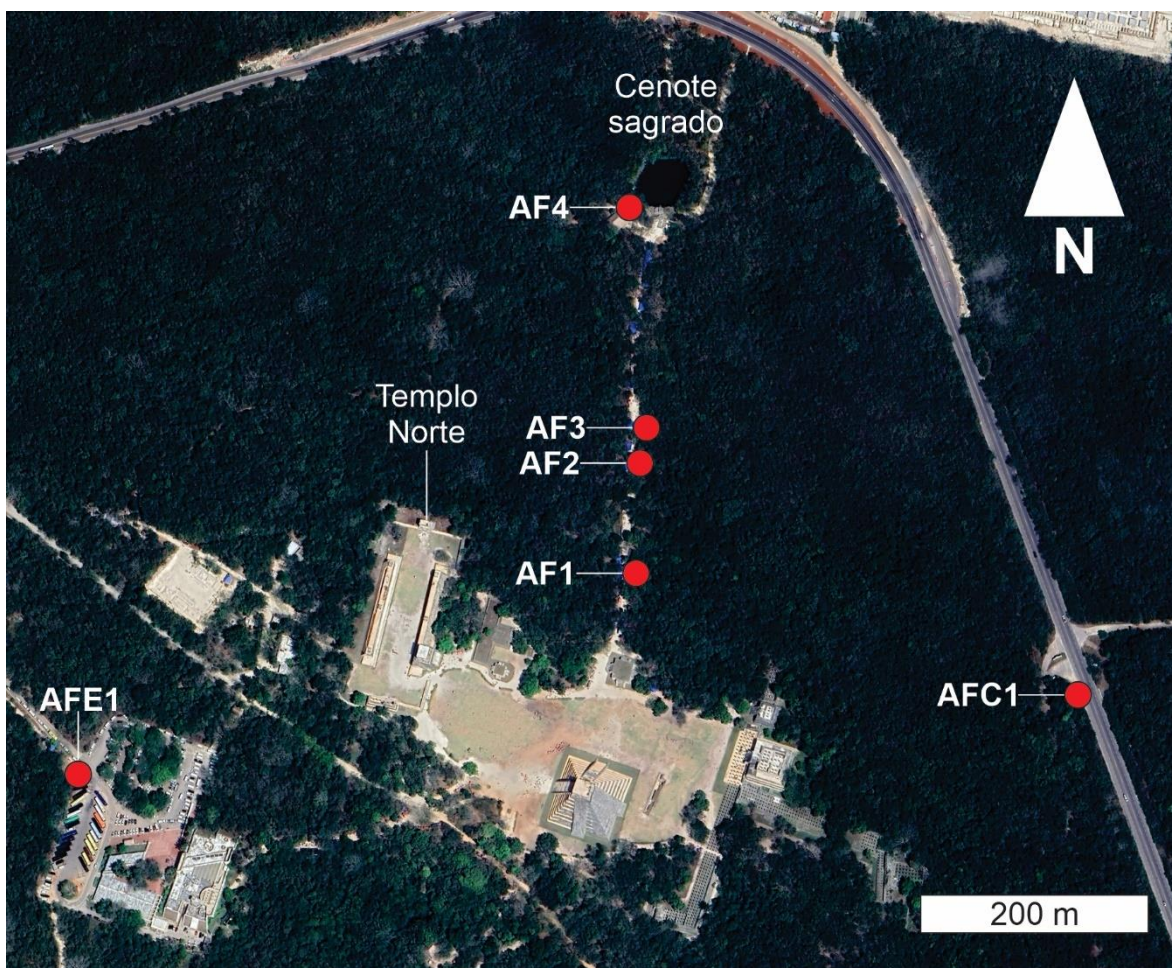


Figura 21. Ubicación de los afloramientos estudiados en la Zona Arqueológica de Chichén Itzá (fotografía tomada de Google Earth).

Tabla 6. Coordenadas de los afloramientos estudiados en la Zona Arqueológica de Chichén Itzá.

Nomenclatura afloramiento	Coordenadas
AF1	20.685098, -88.568154
AF2	20.685575, -88.568044
AF3	20.686881, -88.567957
AF4	20.687565, -88.568104
AFE1	20.683187, -88.572909
AFC1	20.682811, -88.564297





Figura 22. Brecha con una coloración naranja de la matriz con clastos naranjas y blancos-grises que pasa a una caliza blanca-gris.

composición calcárea. Las brechas pasan transicionalmente a calizas masivas sin estratificación de color blanco y gris, aunque en ocasiones se distingue en las calizas laminación con una coloración café. En algunas zonas se identificaron moldes de gasterópodos menores a 1 cm de longitud. Generalmente las calizas tienen algo de karstificación o partes con alveolización (se evitó tomar mediciones espectrométricas en estas superficies).

Por otra parte, en el afloramiento AFC1 se distinguió una caliza beige con estratos de aproximadamente 50 cm. También se observaron brechas similares a las de los demás afloramientos de la zona.

En general, las características litológicas descritas en los afloramientos de la Zona Arqueológica de Chichén Itzá corresponden con las que otros autores,

principalmente destacando la presencia de brechas con coloraciones naranjas o rojizas (Heilprin, 1891; Engerrand & Urbina, 1910; Sansores-Manzanilla, 1959; López-Ramos, 1973; de Pablo-Galán, 1996; Zarate-Barradas *et al.*, 2005).

#### **4.3.2. Templo Norte del Gran Juego de Pelota**

En el TN, al igual que en los afloramientos, los bloques están conformados por los mismos tipos de roca y sus variaciones: calizas blancas y beige con laminación café o rojiza, además de brechas con coloraciones naranjas y rojizas (Fig. 23). En ocasiones fue difícil identificar la litología por el desarrollo de deterioro en las superficies de los bloques, aunque como se explica en la sección “5.3. Zona Arqueológica de Chichén Itzá” del capítulo 5, la GRS resultó útil para diferenciar entre litologías.

Las formas de deterioro que se encontraron se muestran en forma de mapeo en la Figura 24 y son las siguientes:

- Grietas. Están presentes en muy pocos bloques y no cortan a través de la pared. Generalmente son de pocos centímetros de longitud.
- Formas inducidas por pérdida de material. El subtipo de erosión se presenta en muy pocos bloques y puede ser tanto erosión de componentes como de matriz. El subtipo de microkarstificación es el patrón de deterioro principal, encontrándose en la parte superior y media de la pared, lo que parece indicar que está influenciado más por el escurrimiento del agua de lluvia que por la capilaridad de las rocas. El subtipo perforaciones es común, pero su extensión es mínima comparada con la microkarstificación y posiblemente son originadas por animales. El subtipo *pitting* es, después de la microkarstificación, la forma de deterioro con mayor extensión y se encuentra en los bloques que no están cubiertos por la bóveda, por lo que se puede sugerir que este patrón está también relacionado con el agua y consecuente crecimiento de organismos que suelen generar este tipo de daño.





Figura 23. Mapeo litológico de la pared interna oeste del TN. El azul representa a las calizas y el naranja a las brechas calcáreas.



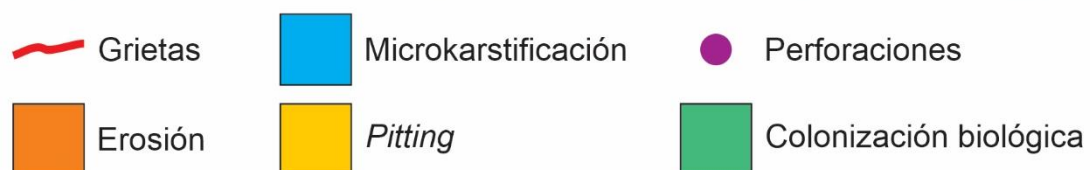


Figura 24. Mapeo de las formas de deterioro de la pared interna oeste del TN.

- Alteración cromática y depósito. Solamente se detectó el subtipo incrustación que presentan la mayoría de los bloques por la disolución y precipitación de los carbonatos, generando una superficie que obstaculizó la identificación de la litología.
- Colonización biológica. En la parte de la pared no cubierta por la bóveda se alcanzó a apreciar una coloración difusa gris claro dejada por colonización biológica.

Todos los patrones de deterioro encontrados en la pared oeste del TN están relacionados con el agua: ya sean estructuras por disolución y reprecipitación de los carbonatos o por el crecimiento de organismos por la disponibilidad de agua. Aún más, al comparar el mapeo litológico con el de daños, se puede observar que mayormente las brechas tienen microkarstificación y erosión, lo cual podría deberse a un porcentaje de poros más grande que influyó en su capacidad de retención de agua y por lo tanto en su deterioro.

En el Anexo 5 se detalla el número asignado para cada bloque de la pared interna oeste del TN, su litología y tipos de deterioro que presenta cada uno. Mapeos litológicos y de deterioro para esta misma pared y para todo el interior y exterior del TN fueron realizados por López-Torres (2025). En la misma zona arqueológica se han detectado otros tipos de deterioros como sales (García-Solís *et al.*, 2025) y colonización biológica (González-Gómez *et al.*, 2018), con lo cual el TN puede ser susceptible a estos daños.

#### **4.3.3. Petrografía**

El análisis petrográfico y reconocimiento de componentes de las calizas y brechas se realizó para las 29 láminas delgadas. Si bien se generalizaron los resultados para cada muestra, todas sus variaciones se detallan en la Tabla 7 al igual que su clasificación de acuerdo con los parámetros de Dunham (1962) modificados por Embry & Klovan (1971). A continuación, se describen las características de las rocas de la Formación Chichén Itzá.

Tabla 7. Resultados del análisis petrográfico y clasificación de las rocas.

Muestra	Cemento/matriz	Aloquímicos	Clasificación principal	Clasificación secundaria
B1	Micrita Doloesparita	Extraclastos arcillosos, cuarzo. Peloides.	Floatstone	Mudstone Wackestone Grainstone
B2	Micrita Doloesparita	Intraclastos de calizas (algas verdes, tintínidos), extraclastos arcillosos, cuarzo. Peloides.	Floatstone	Mudstone Grainstone
C1	Micrita	Algas coralinas, tintínidos, algas verdes, foraminíferos bentónicos, gasterópodos.	Bindstone	Mudstone Wackestone Packstone
C2	Micrita	Tintínidos, algas verdes, foraminíferos bentónicos, gasterópodos, algas coralinas.	Wackestone Packstone	Mudstone
C3	Micrita	Algas coralinas.	Bindstone	Mudstone
CL1	Micrita Esparita	Algas coralinas. Peloides, foraminíferos bentónicos.	Bindstone	Mudstone Grainstone
CL2	Micrita Esparita	Algas coralinas. Tintínidos, algas verdes, foraminíferos bentónicos, peloides.	Bindstone	Mudstone Wackestone Packstone Grainstone
L1	Esparita Micrita	Intraclastos de calizas, peloides. Foraminíferos bentónicos.	Grainstone	Mudstone Wackestone
L2	Esparita Micrita	Oncoides, peloides. Algas coralinas.	Grainstone	Mudstone
CIA1	Esparita Micrita	Foraminíferos bentónicos, peloides.	Grainstone	Mudstone



Las brechas calcáreas B1 y B2 tienen una matriz micrítica que cambia a un cemento doloesparítico en muy pocas ocasiones. Solamente en las brechas se encontró esta característica. Se identificó una porosidad principalmente fenestral (birds-eyes).

Los granos identificados fueron principalmente partículas anaranjadas y rojizas de tamaños variables, desde varios centímetros hasta 0.5 cm, comúnmente angulosas o subangulosas (Fig. 25A), las más pequeñas bien redondeadas. Por sus características no fue posible asociarlos con ningún mineral en específico, no se muestran opacos, sino translúcidos, no tienen extinción ni pleocroísmo. Por esto, se interpretaron como partículas procedentes de fuera de la cuenca de depósito, posiblemente coloides de suelos producidos por floculación (Bjørlykke, 2015) transportados por el viento, ya que no existe evidencia de corrientes superficiales en la PY, además de que corresponden bastante bien con las características de los suelos rojos que se encuentran actualmente, así que la producción de suelos de este tipo estaba activa para el tiempo de depósito de la Formación Chichén Itzá. Estas partículas también han sido descritas (como óxidos u oxihidróxidos de hierro) por Rodríguez-Pérez *et al.* (2021) en la Formación Chichén Itzá y en muestras de otras formaciones por Krekeler *et al.* (2010) y Salgado-Garrido *et al.* (2022) por lo que su aporte parece estar extendido. López-Torres (2025) las reporta solamente como minerales rojos en muestras de afloramientos de la Zona Arqueológica de Chichén Itzá. Otros componentes identificados en las brechas calcáreas B1 y B2 fueron cristales de cuarzo anguloso con fracturas rellenas del mismo material color rojizo (Fig. 25B). Aunque son escasos (entre 5 y 2 cristales de cuarzo por lámina delgada), su presencia es importante porque refleja aporte clástico eólico y su relación con los paleosuelos por su alteración (Garzanti, 2017). Además, se observaron intraclastos de caliza que contenían microfósiles como algas verdes o tintínidos (Fig. 25C), y peloides (Fig. 25D).

Estas brechas calcáreas se clasificaron como floatstone, aunque en partes se podrían clasificar de manera secundaria como mudstone-wackstone o grainstone.

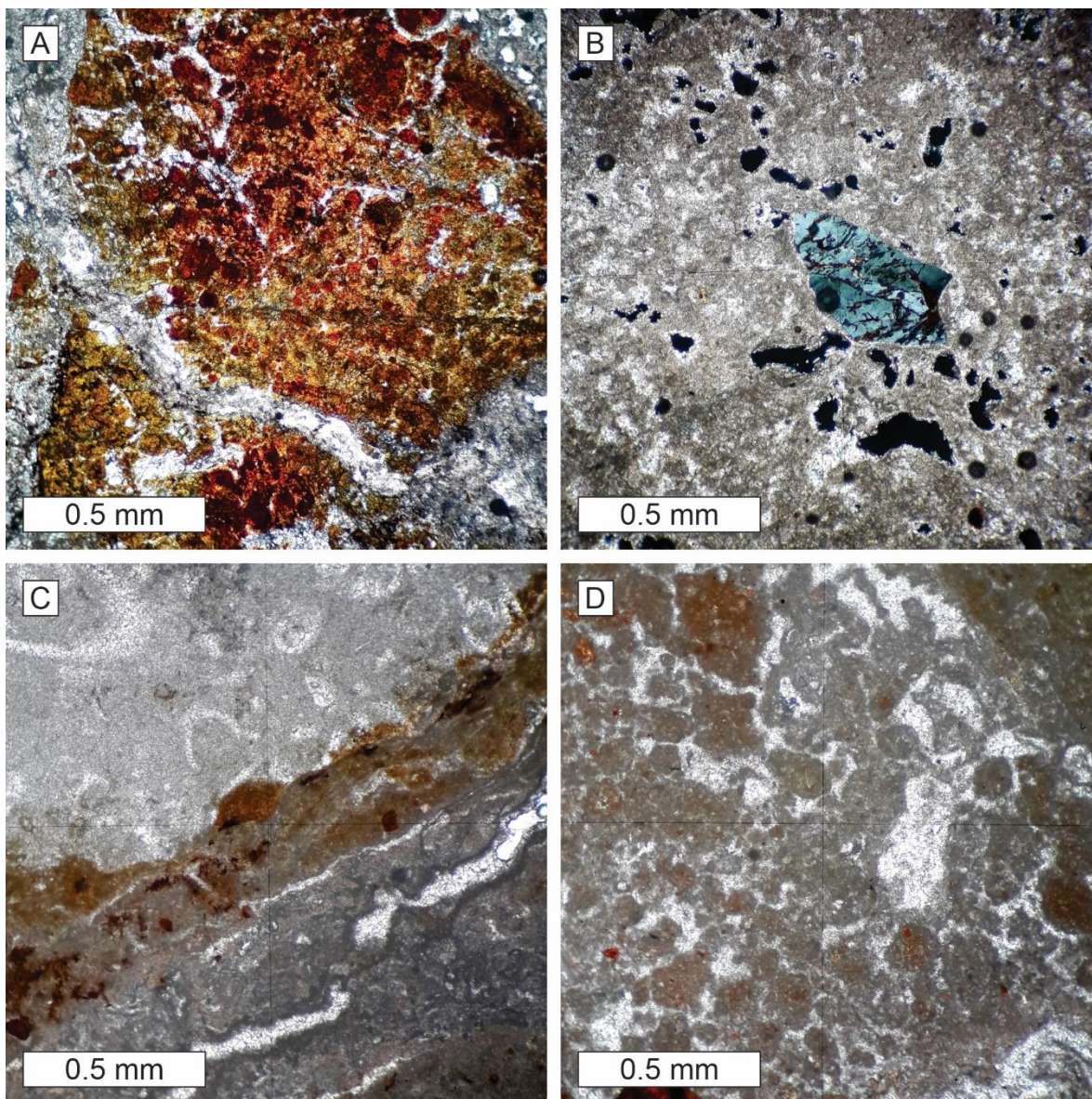


Figura 25. A. Partículas de coloides de paleosuelos. B. Cuarzo anguloso con alteración. Nótese la porosidad fenestral (nicoles cruzados). C. Intraclasto de caliza con microfósiles. D. Peloides en cemento esparítico. Todas las microfotografías en nicoles paralelos a menos que se indique lo contrario.

Las calizas presentan mayores variaciones que las brechas. En primer lugar, hay calizas en donde se identificaron crecimientos de algas coralinas que varían en espesor y color en una matriz micrítica (muestras C1, C3, CL1 y CL2). La laminación más gruesa de algas es de color café oscuro y pueden alcanzar varios centímetros



(Fig. 26A), aunque generalmente se observan en promedio de 1 cm de espesor. Su porosidad es menor comparada con la matriz micrítica. Por otra parte, la laminación

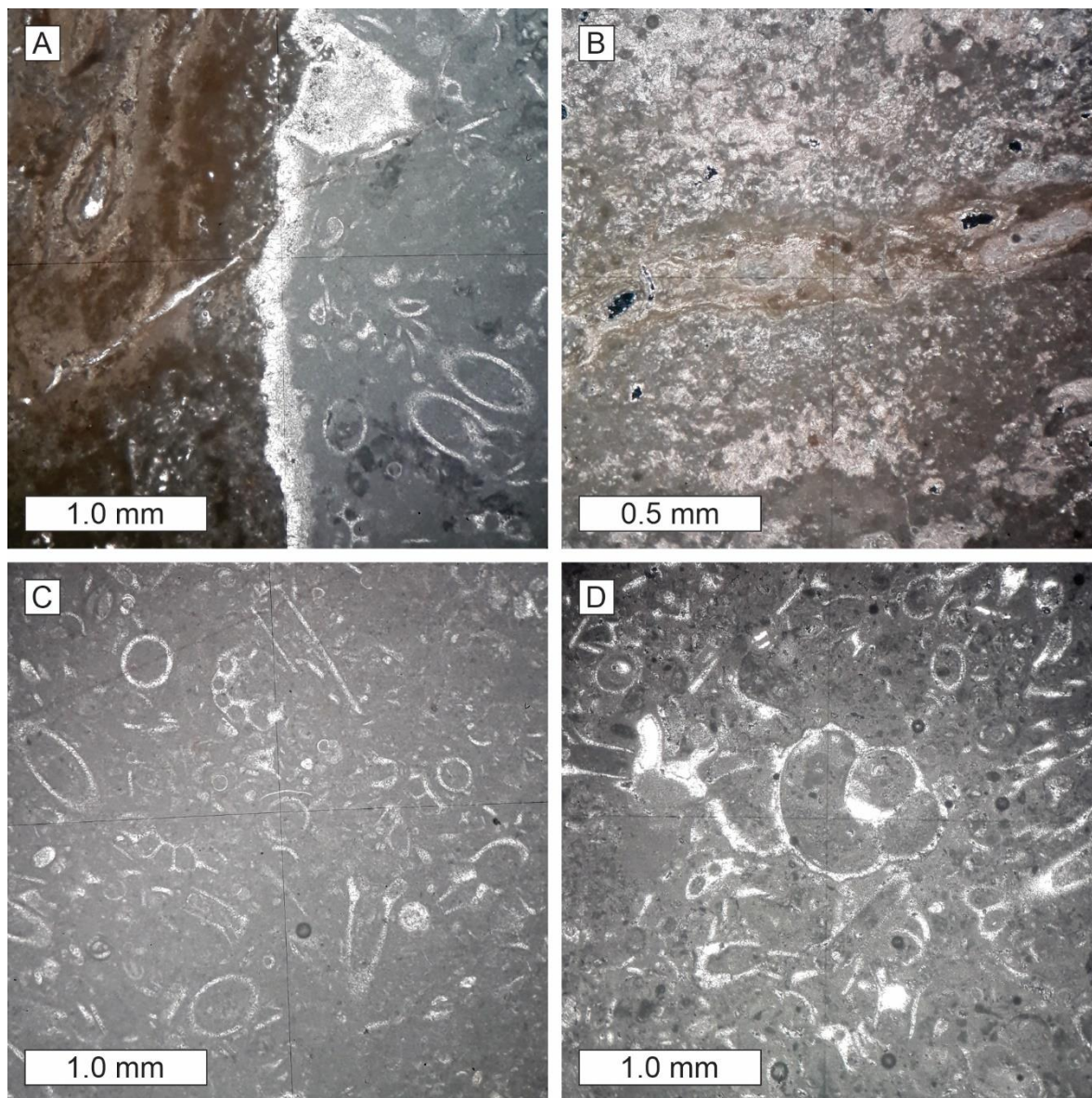


Figura 26. A. Laminación gruesa de algas. B. Laminación delgada de algas (nicoles cruzados). C. Vista general de microfósiles: tintínidos, algas verdes y foraminíferos bentónicos. D. Gasterópodo en el centro de la microfotografía y demás microfósiles de algas verdes, tintínidos y foraminíferos bentónicos. Todas las microfotografías en nicoles paralelos a menos que se indique lo contrario.

más delgada de algas es de color café claro y tienden a ser de milímetros de espesor (Fig. 26B). Se observó que en estas láminas de algas la porosidad del tipo fenestral laminar es mayor que en las más gruesas.

En estas calizas se observaron también microfósiles de algas verdes, foraminíferos bentónicos y gasterópodos (Fig. 26C y D). Solamente en las muestras CL1 y CL2 se encontraron, además, peloides en una matriz microesparítica o en esparita.

La clasificación principal de estas muestras de calizas es bindstone debido a la laminación por algas, aunque de forma secundaria se pueden clasificar como mudstone, wackestone, packstone e incluso grainstone (en el caso de las muestras con peloides CL1 y CL2).

Solamente la muestra C2 consiste en una matriz micrítica con los mismos conjuntos de microfósiles (tintínidos, algas verdes, foraminíferos bentónicos, gasterópodos, algas coralinas), clasificándose como wackestone-packstone y en segundo lugar como mudstone. Es común la porosidad fenestral e intrapartícula.

Finalmente, las muestras L1, L2 y CIA1 están formadas por cemento esparítico, aunque en partes se observa una matriz micrítica. Los granos identificados fueron intraclastos de calizas (Fig. 27A), peloides (Fig. 27B) y oncoides (Fig. 27C) que predominan en el cemento esparítico y tienen una coloración anaranjada similar a la de las partículas de coloides de suelo identificadas en las brechas, por lo que se interpreta que estos granos estuvieron también relacionados con el aporte terrígeno, aunque no sean depósitos directos de este. En algunas partes son comunes las algas coralinas y foraminíferos bentónicos (Fig. 27D). Se clasificaron como grainstone y de manera secundaria como mudstone o wackestone. Al igual que las demás muestras, el tipo de porosidad que predomina es la fenestral e intrapartícula.

Cabe destacar que los mismos tipos de microfauna han sido reportados, a excepción de tintínidos (véase descripción en Tappan & Loeblich, 1968), por Butterlin & Bonet (1960, 1963), López-Ramos (1973) y Bonet & Butterlin (1979) en rocas de la Formación Chichén Itzá.



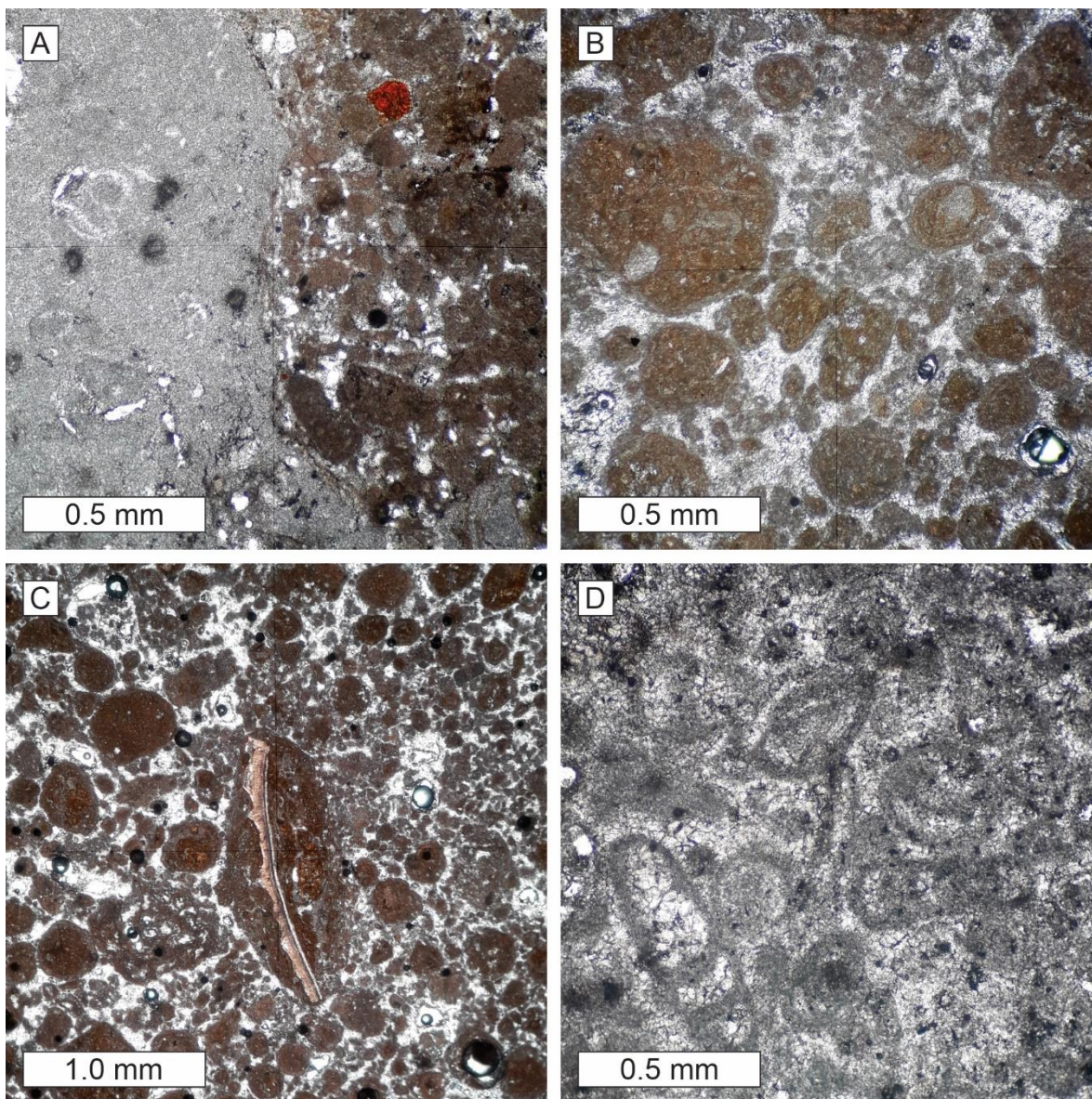


Figura 27. A. Intraclasto de caliza. B. Peloides con una coloración anaranjada y rojiza. C. Peloides y oncoide con un fragmento de braquiópodo. D. Foraminíferos bentónicos en cemento esparítico. Todas las microfotografías en nicoles paralelos.

Las asociaciones de cemento/matriz y aloquímicos permite interpretar que las rocas de esta formación se depositaron en ambientes someros en una rampa carbonatada, lo cual concuerda con los resultados de López-Torres (2025). Análisis de microfacies en rocas de la Formación Icaiché (que se encuentra

estratigráficamente debajo de la Formación Chichén Itzá) muestran también depósitos en estos tipos de ambientes (García-Solís *et al.*, 2023).

#### 4.3.4. Difracción de rayos X

De acuerdo con los resultados obtenidos para todas las muestras, incluyendo la de sascab, la calcita es el principal componente (Fig. 28). La gran proporción de calcita hace que no se distingan otros componentes como los materiales anaranjados y rojizos en las brechas, pero en los análisis geoquímicos sí se observan cambios composicionales que se explican en la sección “7.3. Formación Chichén Itzá, Zona Arqueológica de Chichén Itzá” del capítulo 7. Sobre esto, López-Torres (2025)

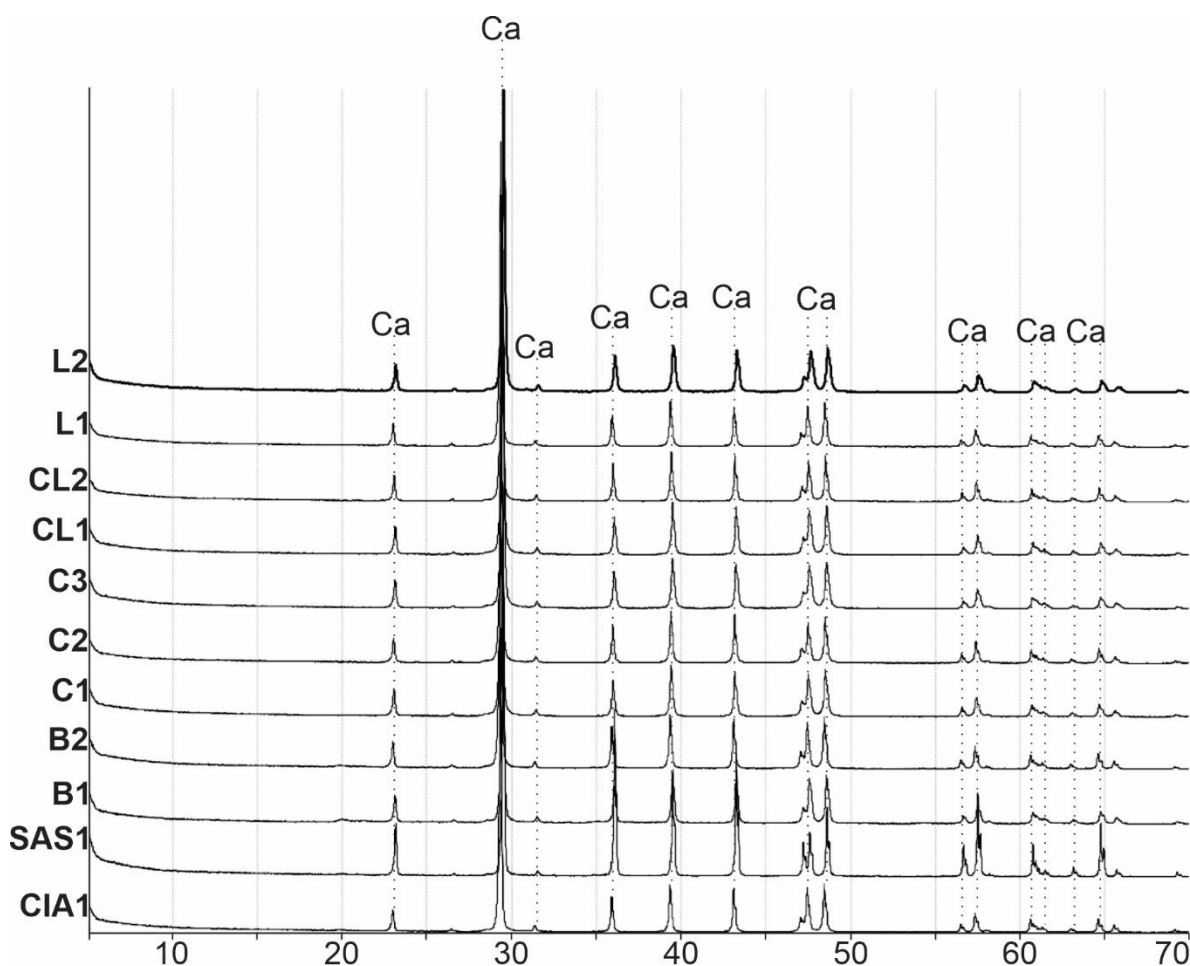


Figura 28. Difractogramas de todas las muestras de roca y del sascab. Ca: calcita.

realizó una disolución de los carbonatos para distinguir otras fases, encontrando minerales de origen metamórfico que en realidad corresponderían a fases ricas en hierro y aluminio. En el caso del sascab, por la misma situación de que la calcita es el componente principal, no se distinguen otros minerales como montmorillonita, dolomita o cuarzo (Arnold, 2005; Sánchez del Río *et al.*, 2009) que pueden estar presentes también.

El difractograma de la muestra de suelo se presenta en la Figura 29. Los componentes identificados fueron cuarzo, halloysita y hematita. Esto es indicativo de que las partículas anaranjadas y rojizas encontradas en la petrografía en floatstones y grainstones representan paleosuelos por su componente arcilloso (halloysita, característica de suelos tropicales con lixiviación intensa; Chamley, 1989; Tucker, 2001), el óxido que le da esa coloración (hematita, óxido comúnmente encontrado en suelos; Velde & Meunier, 2008) y los cuarzos que se encontraron con alteración. Bautista-Zúñiga *et al.* (2004) reportaron calcita, cuarzo, bohemita y halloysita en rocas de la Formación Chichén Itzá, Rodríguez-Pérez *et al.* (2021)

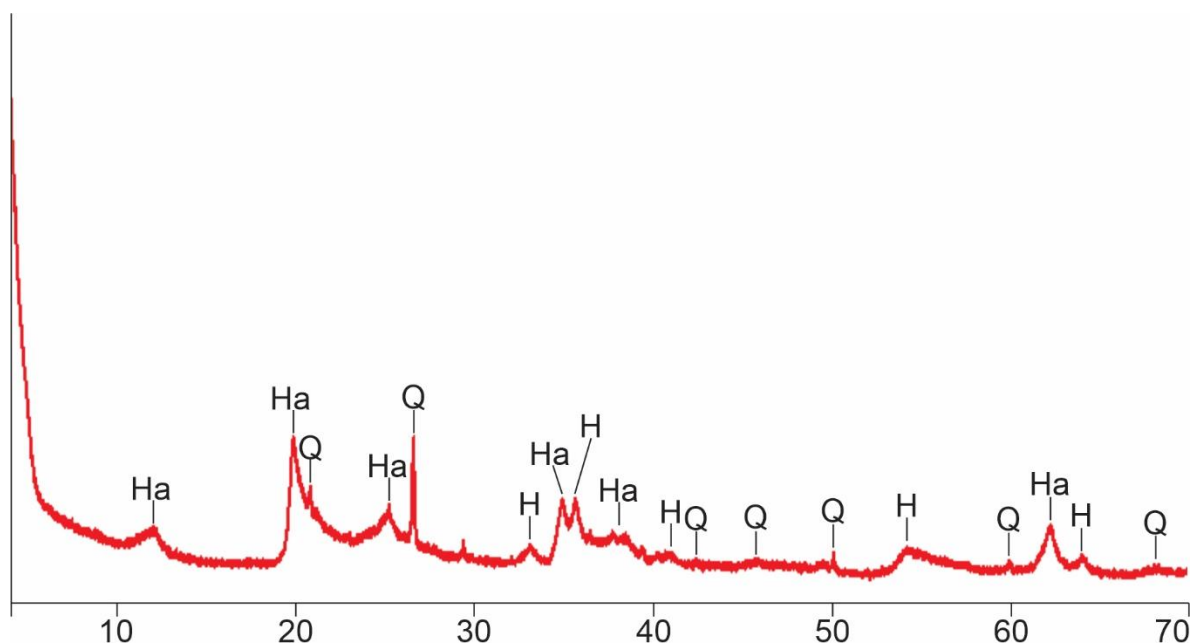


Figura 29. Difractograma de la muestra de suelo SUE1. H: hematita. Ha: halloysita. Q: cuarzo.



identificaron fases menores de caolinita, montmorillonita y moscovita igualmente en la Formación Chichén Itzá, mientras que Maldonado *et al.* (2011) y May-Crespo *et al.* (2012, 2021) encontraron cuarzo, caolinita, hematita y goethita en calizas usadas para la construcción en Yucatán. Además, estos minerales han sido reportados en suelos de la PY (Isphording & Wilson, 1974), junto con caolinita, montmorillonita, magnetita, boehmita, goethita, calcita (Schultz *et al.*, 1971; Isphording, 1984; de Pablo-Galán, 1996; Beach, 1998; Bautista-Zúñiga *et al.*, 2003, 2011; Shang & Tiessen, 2003; Sedov *et al.*, 2008; Cabadas-Báez *et al.*, 2010a, b).



## **5. Espectrometría de rayos gamma**

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de la GRS en las construcciones y en los afloramientos respectivos en ambas áreas de estudio.

Se ejemplifican los pasos de la sección “3.5. Correcciones propuestas” del capítulo 3 con los datos espectrométricos adquiridos que involucran la creación de una recta por el método de regresión lineal con datos de humedad, corregir los datos por medio de esta recta y recalcular los valores para interpretar los resultados de la GRS de acuerdo con la litología, formas de deterioro y contenido de humedad según se expone en las secciones “2.4. Distribución de radioelementos”, “3.6. Interpretación de los datos espectrométricos” y los resultados del capítulo 4. Todos estos temas se relacionan y se tratan con más detalle en el capítulo 8.

### **5.1. Materiales y métodos**

Para las condiciones previas que son necesarias para la adquisición de datos espectrométricos véase el capítulo 3. Todas estas se consideraron antes de llevar a cabo el registro de los datos de GRS.

#### **5.1.1. Equipo, adquisición y procesamiento de datos espectrométricos**

La GRS se efectuó con un espectrómetro portátil RS-125 de Radiation Solutions Inc. Todas las especificaciones técnicas y parámetros que se presentan en esta sección provienen del manual del fabricante Radiation Solutions Inc. (2021).

El espectrómetro está conformado por un gran cristal escintilador de yoduro de sodio de 6.3 in<sup>3</sup> (2 pulgadas de ancho, 2 pulgadas de largo, y 1.575 pulgadas de espesor) que le confiere una gran sensibilidad. El rango de energía que detecta está entre los 30 keV a 3000 keV dividido en 1024 canales. Puede funcionar en rangos de temperatura entre -20 °C y 50 °C, aunque este límite de operación se debe a la pantalla, no a la eficiencia de detección.

El equipo fue calibrado en el mismo sitio de fabricación con bloques de calibración contruidos según las especificaciones técnicas de Grasty *et al.* (1991). Los parámetros resultantes para los coeficientes de *stripping* y sensibilidades se dan en la Tabla 8.

Tabla 8. Coeficientes de *stripping* y sensibilidades del espectrómetro RS-125.

Parámetro	Valor
Coeficiente de <i>stripping</i> $\alpha$	0.784
Coeficiente de <i>stripping</i> $\beta$	0.936
Coeficiente de <i>stripping</i> $\gamma$	1.156
Coeficiente de <i>stripping</i> $a$	0.005
Coeficiente de <i>stripping</i> $b$	0.002
Coeficiente de <i>stripping</i> $y$	-0.001
Sensibilidad potasio $S_K$ (cpm/%)	52.710
Sensibilidad potasio $S_K$ (cps/%)	0.878
Sensibilidad uranio $S_U$ (cpm/ppm)	4.790
Sensibilidad uranio $S_U$ (cps/ppm)	0.080
Sensibilidad torio $S_{Th}$ (cpm/ppm)	1.680
Sensibilidad torio $S_{Th}$ (cps/ppm)	0.028

Antes de comenzar con la adquisición de datos de GRS, el espectrómetro entró en una fase de estabilización de 5-10 minutos en donde calculó la radiación de fondo para sustraerla de los datos que tomaron. Este proceso es totalmente automático.

En los afloramientos, las mediciones se hicieron de acuerdo con una red de puntos con una separación de 30 cm, además de lecturas adicionales dependiendo de las características de las rocas. Se tomaron 41 mediciones en el afloramiento de la Ignimbrita Cantera y 20 en los afloramientos de la Formación Chichén Itzá. En las construcciones, principalmente en las Cajas del Agua, se hicieron varias mediciones en cada bloque debido a su tamaño, y solo algunos bloques fueron descartados porque su superficie era menor a las dimensiones del espectrómetro. En total se registraron 402 puntos en la CAC, 226 en la CAS y 119 en la pared oeste del TN.

El espectrómetro se colocó directamente sobre las superficies de medición planas y cualquier modificación de la forma o demás superficies que pudieran influir en las tasas de conteo se registraron.

El equipo registra la radiación gamma total en cps en el modo survey. En el modo assay, registra simultáneamente la radiación total en cpm y potasio, uranio y torio también en cpm. Se utilizaron ambos tipos de registro al mismo tiempo, survey + assay en todos los puntos.

El tiempo de adquisición seleccionado fue de dos minutos por punto para disminuir el error derivado de la aleatoriedad de los datos radiométricos (Radiation Solutions Inc., 2021). El error para los datos registrados en la Ignimbrita Cantera, debido a las interferencias entre radioelementos, fue de 0.31%, 1.03 ppm, 2.50 ppm para el potasio, uranio y torio respectivamente. En el caso de la Formación Chichén Itzá, el error fue de 0.06% para el potasio, 0.39 ppm para el uranio y 0.54 ppm para el torio debido a sus bajas concentraciones.

Al terminar la medición, el espectrómetro corrige el tiempo muerto automáticamente, el cual es de 24 microsegundos ( $2.4 \times 10^{-5}$  s) y efectúa el cálculo de concentración de potasio en % y uranio y torio en ppm. A partir de estas concentraciones determina la tasa de exposición, dosis absorbida o dosis equivalente en R/h, Gy/h y Sv/h respectivamente.

Todos los datos se guardaron en la memoria del equipo y fueron posteriormente descargados y analizados por medio del software RSAnalyst proporcionado por Radiation Solutions Inc.

### **5.1.2. Medición de humedad**

Al finalizar el registro espectrométrico, exactamente en donde se colocó el equipo se tomaron lecturas de humedad con un medidor de humedad marca Duro. Este tipo de instrumento representa, al igual que el espectrómetro de rayos gamma, otro método no destructivo útil para la caracterización de los materiales (Phillipson *et al.*, 2007). Este equipo tiene una escala en porcentaje y una precisión de 0.05 %. Permite realizar mediciones rápidas al contacto con la superficie de las rocas.

En cada punto se midió varias veces la humedad para hacer un promedio de las lecturas, ya que existían pequeñas variaciones dependiendo de las condiciones de

la superficie de las rocas. Esto se hizo para todos los puntos de afloramientos y de construcciones.

Esta medida fue básica para poder realizar las correcciones de los datos espectrométricos porque el contenido de humedad es una variable que atenúa a la radiación gamma y provoca que se detecten menos cuentas, detectándose entonces concentraciones menores de radioelementos.

## 5.2. Ignimbrita Cantera, San Luis Potosí

### 5.2.1. Afloramiento

Una vez obtenidos los datos espectrométricos en el afloramiento, el primer paso de la metodología propuesta es graficarlos en contra del contenido de humedad tal como se muestra en la Figura 30.

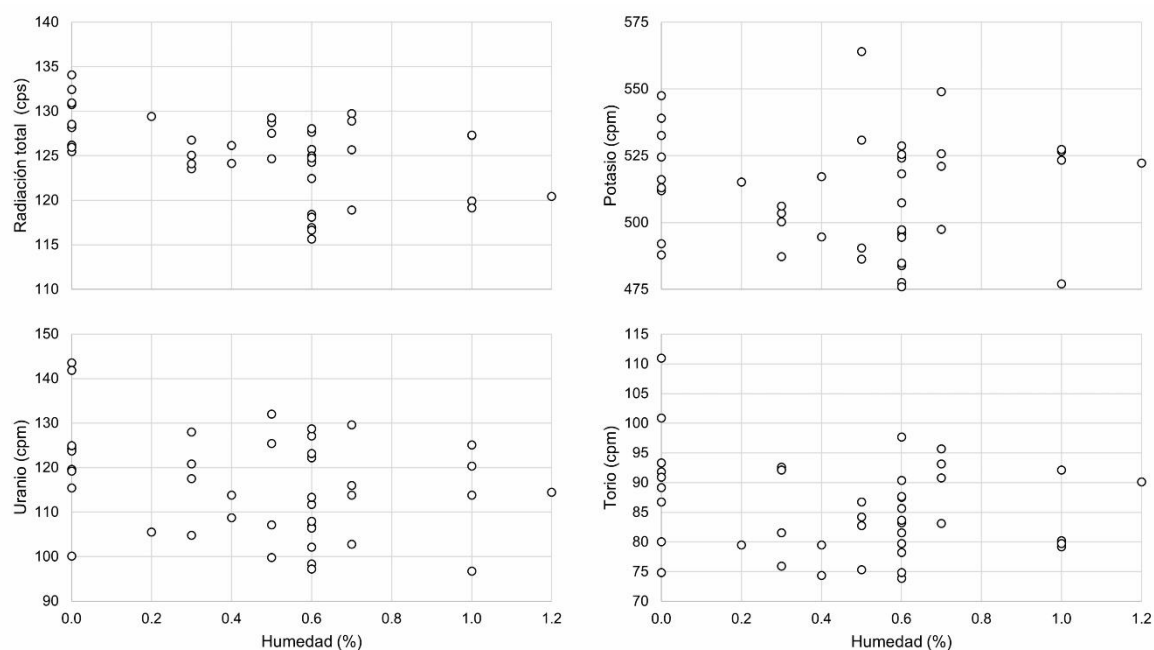


Figura 30. Tasas de conteo de radiación total, potasio, uranio y torio registradas en el afloramiento graficadas contra el contenido de humedad.

Graficar los datos ayuda a visualizar cuáles datos tomados en geometrías diferentes a  $2\pi$  son anormalmente altos y bajos. Estos valores fueron descartados para calcular la recta de regresión lineal (Ecuaciones 14-16), la cual se incluye en cada gráfico de la Figura 31. Se calculó además el coeficiente de correlación de Pearson:

$$\rho(x, y) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma_x} \right) \left( \frac{y_i - \bar{y}}{\sigma_y} \right) = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (21)$$

donde  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$  son las desviaciones estándar para  $x$  y  $y$  respectivamente, las cuales, en este caso, son las tasas de conteo y el contenido de humedad, mientras que  $\text{cov}(x, y)$  se refiere a la covarianza de  $x$  y  $y$ . Con este coeficiente se puede calcular el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) que aparece junto con la recta de regresión lineal en las gráficas de la Figura 31:

$$R^2 = \left( \frac{\text{cov}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y} \right)^2 \quad (22)$$

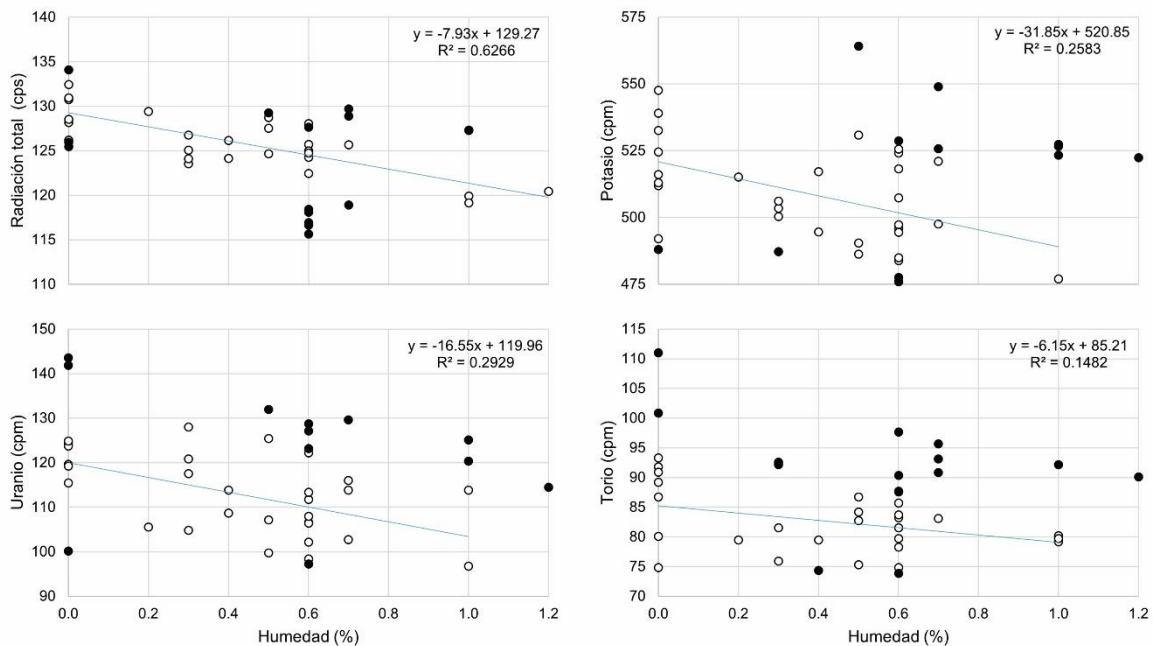


Figura 31. Gráficas de radiación total, potasio, uranio y torio registrados en el afloramiento contra contenido de humedad con los valores descartados en color negro. Se muestran las rectas de regresión lineal calculadas una vez descartados los datos anormalmente altos y bajos.

En la Tabla 9 se muestran los cálculos anteriores. Con este paso se eliminaron las influencias de la geometría de la superficie. Nótese la correlación negativa entre la radiación y la humedad producto de la atenuación y cómo la pendiente en la tasa de conteo del torio es menos pronunciada debido a que su energía es más alta y, por lo tanto, experimenta menos atenuación (Fig. 31).

Tabla 9. Rectas de regresión calculadas, desviación estándar, coeficiente de correlación de Pearson y coeficiente de determinación para las variables tasas de conteo y contenido de humedad para el afloramiento.

	Recta	Desviación estándar	Coeficiente de correlación	Coeficiente de determinación
Total	$y = -7.93x + 129.27$	2.07	-0.7916	0.6266
Potasio	$y = -31.85x + 520.85$	15.67	-0.5082	0.2583
Uranio	$y = -16.55x + 119.96$	7.58	-0.5412	0.2929
Torio	$y = -6.15x + 85.21$	4.83	-0.3849	0.1482

Una vez obtenida la recta de regresión lineal, se calculó la desviación estándar según la Ecuación 17 y ambas fueron usadas para corregir los datos descartados por geometrías diferentes a  $2\pi$  con las Ecuaciones 18 y 19. Otros valores que sobrepasaron la desviación estándar de los datos originales fueron también corregidos, mientras que la mayoría de todos los demás valores no se corrigieron para no sobreestimar el modelo de regresión lineal. Las gráficas de los valores corregidos se muestran en la Figura 32.

Ahora bien, para poder hacer la interpretación de las variaciones de los datos de la GRS debidas a la meteorización, es necesario eliminar la variable de la humedad. Para esto se recalcularon los valores de radiación para un contenido de humedad de 0.0% con la Ecuación 20.

Una vez obtenidas las tasas de conteo reales, se calcularon las concentraciones de los radioelementos con las Ecuaciones 7-12. Todos los datos de GRS y humedad obtenidos en el afloramiento se dan en el Anexo 6.

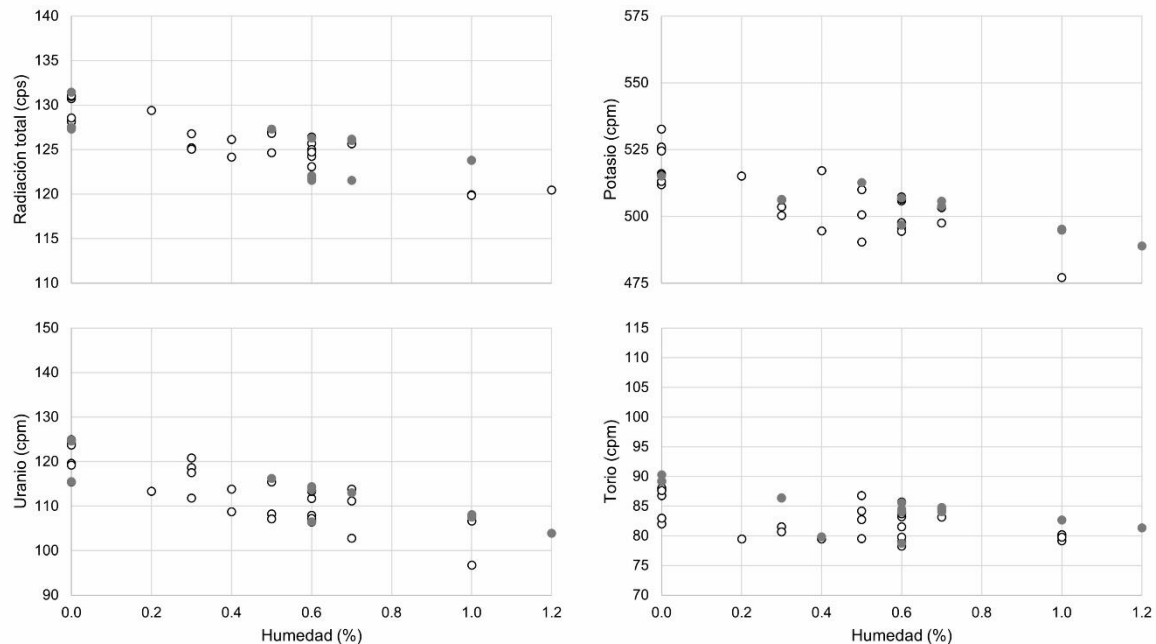


Figura 32. Gráficas de radiación total, potasio, uranio y torio registrados en el afloramiento contra contenido de humedad con los valores descartados inicialmente, pero ya corregidos en color gris.

Con las concentraciones se calcularon los promedios de los datos con respecto a las diferentes coloraciones de las rocas (Tabla 10). En el caso de la radiación total, la variante CN es la que presenta el promedio más alto. Se interpretó que esta coloración representa un estado de meteorización, específicamente de disolución de óxidos de hierro y su redistribución en la matriz. Considerando que el uranio y torio pueden residir en la matriz de ceniza y que son atrapados por óxidos de hierro, entonces se interpreta que una vez que son liberados, principalmente el uranio por su relación Th/U más baja que las demás, se adhieren a la matriz por oxidación. Al contrario, las coloraciones que se combinan con el color café tienen los valores más bajos de radiación total. Como se explica en los resultados litológicos, este color café es producto de una alteración más significativa, con lo cual se puede interpretar que la radiación total disminuye ligeramente con la meteorización cuando no están involucrados los óxidos de hierro. Nótese cómo la relación Th/U para CRC café es más alta, lo que implica una mayor pérdida de uranio sin su retención en óxidos de

Tabla 10. Promedio de los valores corregidos con respecto a la coloración observada de las rocas.

Coloración	Total (cps)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/K	Th/U
CN	131.05	7.3	11.2	51.2	7.1	4.7
CRC	129.71	7.2	11.4	50.7	7.1	4.5
CRC café	127.45	7.1	9.6	52.1	7.3	5.4
CRC-CN	128.77	7.1	11.9	48.8	6.9	4.1
CRC-CRO	130.49	7.1	10.6	50.9	7.1	4.8
CRO	128.63	7.2	11.1	50.2	7.0	4.5
CRO café	127.84	7.2	11.2	50.1	7.0	4.5

hierro. Las rocas CRO son las que tienen los promedios más bajos de radiación total, las cuales son las otras variantes meteorizadas de CRC. Las concentraciones de potasio son prácticamente iguales para todas las coloraciones, implicando que no existe liberación de potasio en las rocas de los afloramientos.

Se calcularon los coeficientes de correlación de Pearson entre la radiación total, potasio, uranio y torio (Tabla 11). Las correlaciones son positivas entre la radiación total y cada radioelemento, lo que resulta obvio considerando que cada uno tiene una contribución directa a la radiación total. El potasio tiene una correlación negativa poco significativa con el uranio, mientras que no tiene ninguna correlación con el torio. Por otra parte, el uranio se correlaciona negativamente con el torio, lo cual podría indicar la mayor movilidad del uranio.

Tabla 11. Coeficientes de correlación de Pearson para las rocas del afloramiento.

	Total	Potasio	Uranio	Torio
Total	1	0.3162	0.2159	0.2721
Potasio	-	1	-0.3188	0.0467
Uranio	-	-	1	-0.2777
Torio	-	-	-	1



### 5.2.2. Caja del Agua Conservera

La CAC tiene cuatro caras principales y cuatro salientes menores, de las cuales la cara norte es la que menos luz solar recibe durante el transcurso del día, solamente en la parte final y de manera oblicua, además de que recibe sombra de varias casas y un árbol. Esto es importante porque, como se precisa en la sección “3.1.3. Condicionantes ambientales”, para hacer el modelo de regresión lineal se requiere de preferencia una fachada o pared que reciba poca luz solar. Por esta razón se eligió calcular la recta de regresión lineal con la cara norte y aplicarla a las demás.

En la Figura 33 se muestran las gráficas de los datos espectrométricos en contra del contenido de humedad para la cara norte de la CAC.

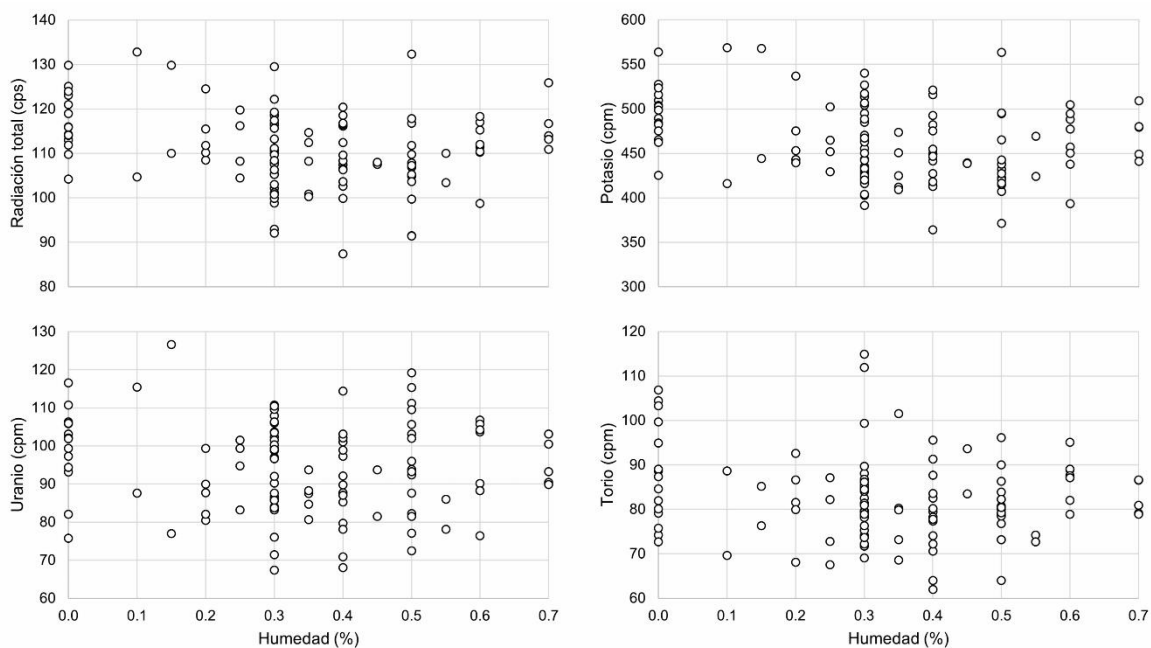


Figura 33. Tasas de conteo de radiación total, potasio, uranio y torio registradas en la cara norte de la Caja del Agua Conservera contra el contenido de humedad.

La cara norte de la CAC representa un ejemplo excelente de cómo las geometrías diferentes a  $2\pi$  aumentan o disminuyen las tasas de conteo, ya sea por mediciones en superficies cóncavas o convexas (Fig. 34A) o por la influencia de otras

superficies como el piso o en los bordes de los bloques (Fig. 34B). Como se muestra a continuación, las correcciones propuestas efectivamente eliminaron estas variaciones, así que la interpretación de los datos está sobre una base sólida.

Después de identificar los bloques con valores anormalmente altos y bajos por geometrías diferentes a  $2\pi$  y descartarlos, se procedió con el cálculo de la recta de regresión lineal (Fig. 35).

En la Tabla 12 se muestran los cálculos estadísticos para la cara norte de la CAC. Nótese la correlación negativa entre la radiación y la humedad producto de la atenuación y cómo la pendiente en la tasa de conteo del torio es menos pronunciada debido a que su energía es más alta y, por lo tanto, experimenta menos atenuación (Fig. 35).

Con la ecuación de la recta y la desviación estándar se corrigieron los datos descartados por haberse tomado en geometrías diferentes a  $2\pi$ . Otros valores que sobrepasaron la desviación estándar fueron también corregidos. Las gráficas de los valores corregidos se muestran en la Figura 36.

Con la ecuación de la recta de regresión lineal de la cara norte se corrigieron los valores de las demás caras de la CAC. Como se menciona en la sección “3.5. Correcciones propuestas”, esta recta de regresión lineal se aplica directamente a las demás fachadas sin tener que descartar valores en estas caras. En la Figura 37 aparecen los datos no corregidos de radiación total, potasio, uranio y torio para las demás caras de la CAC. Nótese cómo en las tasas de conteo con valores de humedad de 0.0% se ubican mayormente por debajo de la línea de regresión. Esto se debe a fluctuaciones por evaporación de la humedad superficial por el aumento de temperatura durante el día y la luz solar directa. Sin embargo, se puede interpretar que los datos de GRS efectivamente permiten identificar que en estos bloques existen valores más altos de humedad en el sistema interno de poro.

En la Figura 38 se muestran los datos ya corregidos con la ecuación de la recta de regresión y desviación estándar de la cara norte de la CAC.

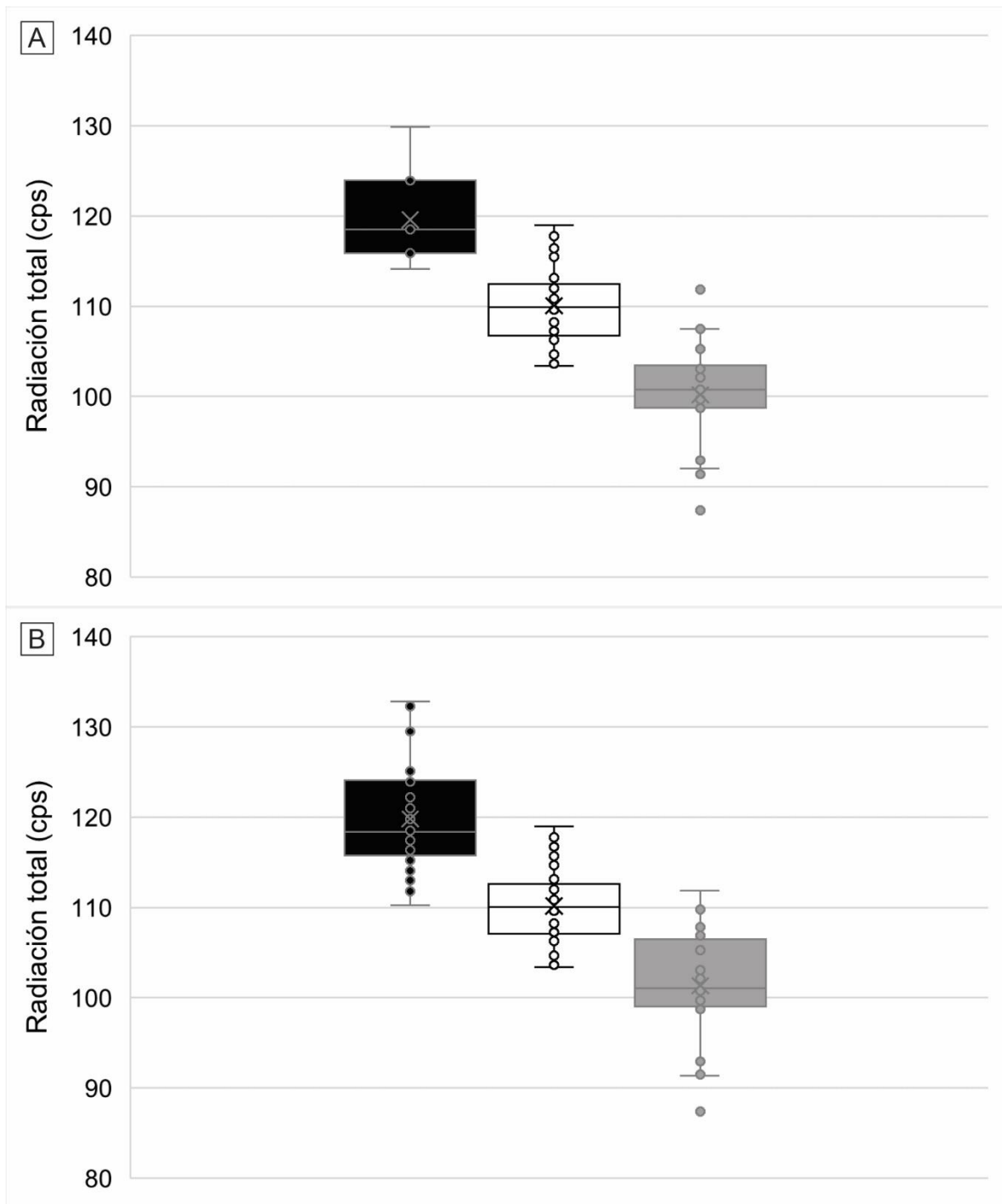


Figura 34. A. Las tasas de conteo en superficies cóncavas son más altas (en negro) que las medias en superficies planas (en blanco), mientras que las tasas de conteo en superficies convexas son menores (en gris). B. Las tasas de conteo con influencias de otras superficies son más altas (en negro) que las medias en superficies normales  $2\pi$  (en blanco), mientras que las tasas de conteo en esquinas, por ejemplo, son menores (en gris).

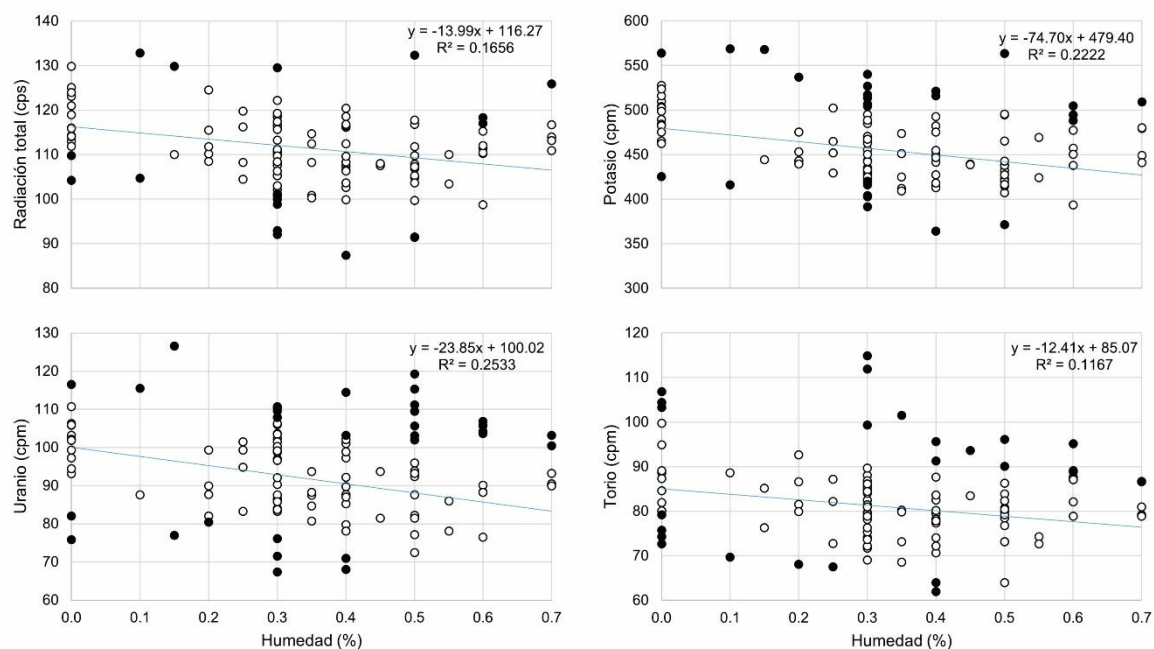


Figura 35. Gráficas de radiación total, potasio, uranio y torio registrados en la cara norte de la Caja del Agua Conservera contra contenido de humedad con los valores descartados en color negro. Se muestran las rectas de regresión lineal calculadas una vez descartados los datos anormalmente altos y bajos.

Tabla 12. Rectas de regresión calculadas, desviación estándar, coeficiente de correlación de Pearson y coeficiente de determinación para las variables tasas de conteo y contenido de humedad para la cara norte de la Caja del Agua Conservera.

	Recta	Desviación estándar	Coeficiente de correlación	Coeficiente de determinación
Total	$y = -13.99x + 116.27$	5.85	-0.4070	0.1656
Potasio	$y = -74.70x + 479.40$	26.64	-0.4714	0.2222
Uranio	$y = -23.85x + 100.02$	7.45	-0.5033	0.2533
Torio	$y = -12.41x + 85.07$	5.80	-0.3416	0.1167

Posteriormente, las tasas de conteo corregidas para la cara norte y demás fachadas de la CAC se recalcularon para un contenido de humedad de 0.0%. A su vez, estas cuentas sin la influencia de la humedad se usaron para calcular las concentraciones reales de los radioelementos. Todos los datos de GRS y humedad obtenidos en la CAC se dan en el Anexo 7.

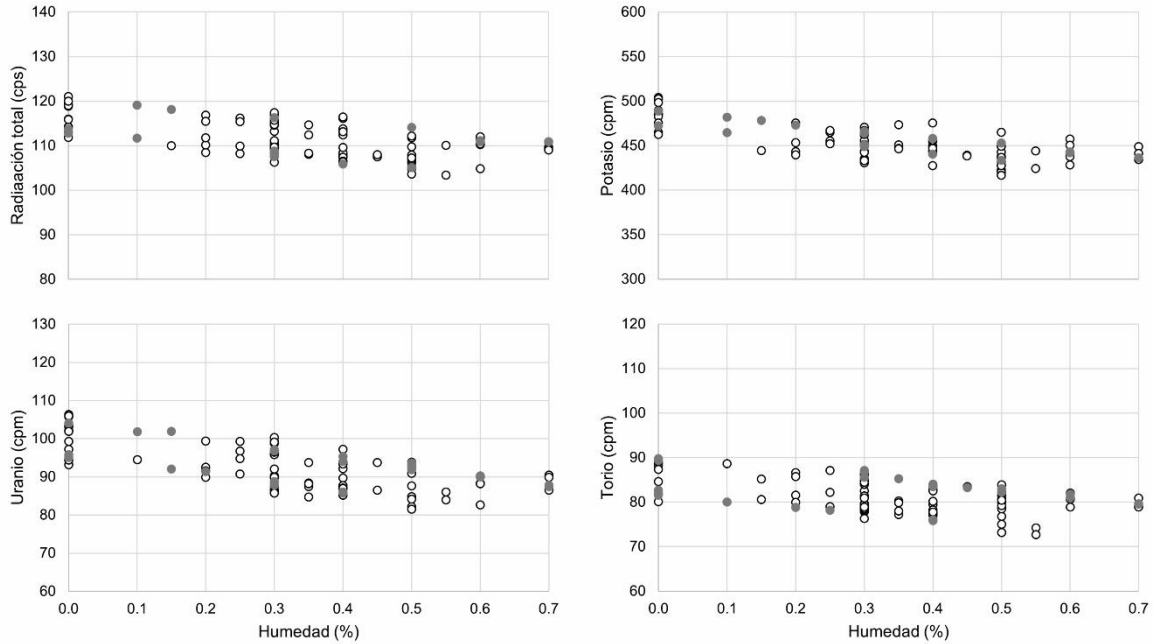


Figura 36. Gráficas de radiación total, potasio, uranio y torio registrados en la cara norte de la Caja del Agua Conservera contra contenido de humedad con los valores descartados inicialmente, pero ya corregidos en color gris.

Con las concentraciones se calcularon los promedios de los datos con respecto a las diferentes fachadas de la CAC (Tabla 13). Nótese cómo la radiación total y las concentraciones de los radioelementos son bastante similares en todas las caras de la CAC. Además, destaca la relación Th/U cercana a 7, la cual se puede considerar muy alta, ya que el promedio en rocas ígneas es de aproximadamente 4 (Adams *et al.*, 1959; McLennan *et al.*, 1980; Bierwirth, 1996; Serra, 2008). Esto indica una pérdida considerable de uranio con respecto al torio. Entonces, probablemente el uranio sigue siendo lixiviado de los óxidos de hierro que le dan la tonalidad CN a los bloques, mientras que el torio no se moviliza tan fácilmente.

También se calcularon los coeficientes de correlación de Pearson entre la radiación total, potasio, uranio y torio para cada fachada de la CAC por separado y todas juntas (Tabla 14). Las correlaciones son positivas entre la radiación total y cada radioelemento, aunque especialmente significativas con el potasio y torio. El potasio

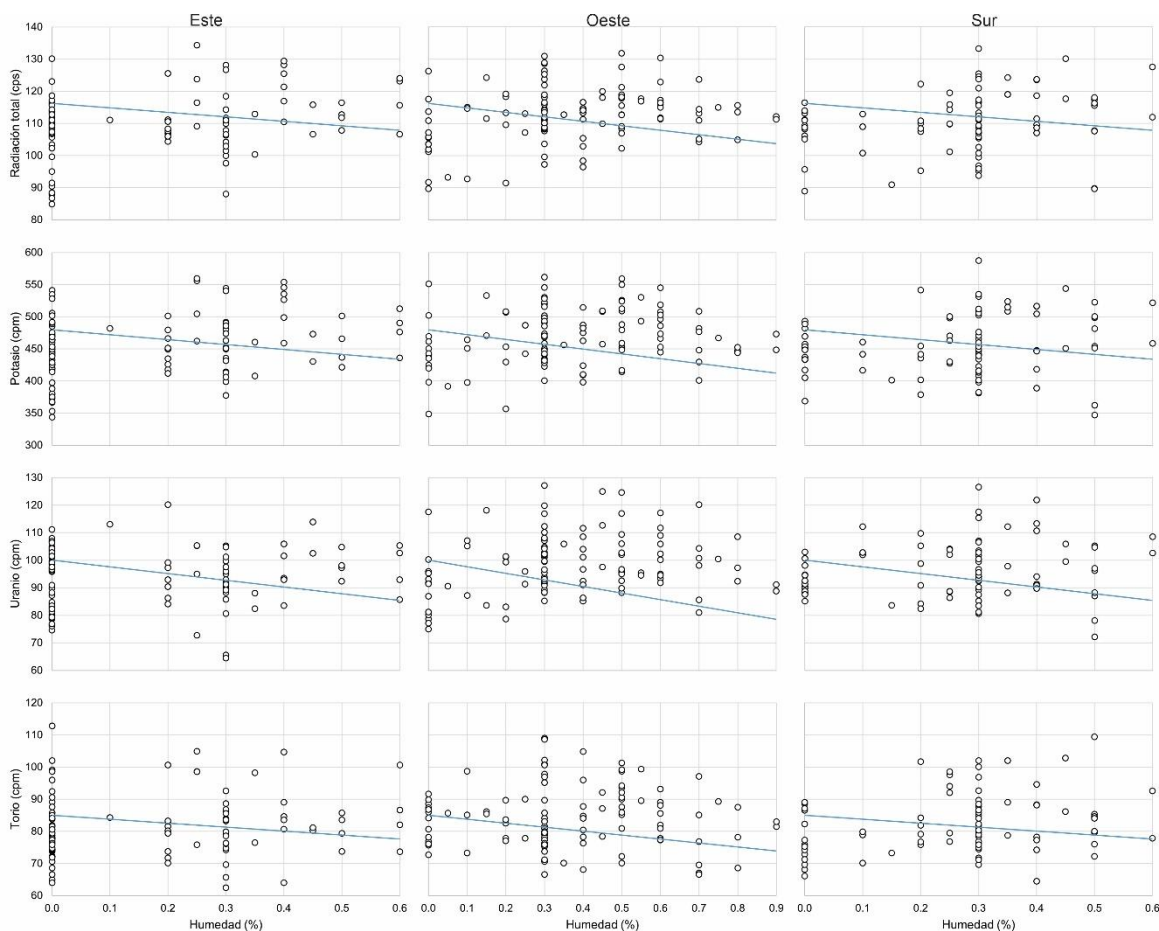


Figura 37. Tasas de conteo de radiación total, potasio, uranio y torio registradas en las caras este, oeste y sur de la Caja del Agua Conservera contra el contenido de humedad. De referencia se incluye la recta de regresión calculada de la cara norte.

tiene una correlación negativa poco significativa con el uranio, mientras que muestra una correlación positiva poco significativa con el torio. Por otra parte, el uranio se correlaciona negativamente con el torio de forma medianamente significativa.

### 5.2.3. Caja del Agua del Santuario

La CAS tiene cuatro caras, las cuales cada una recibe luz solar durante alguna parte del día: la cara este la recibe solamente durante la mañana, la cara sur durante la primera mitad del día, la cara oeste parcialmente en el transcurso del día, la cara

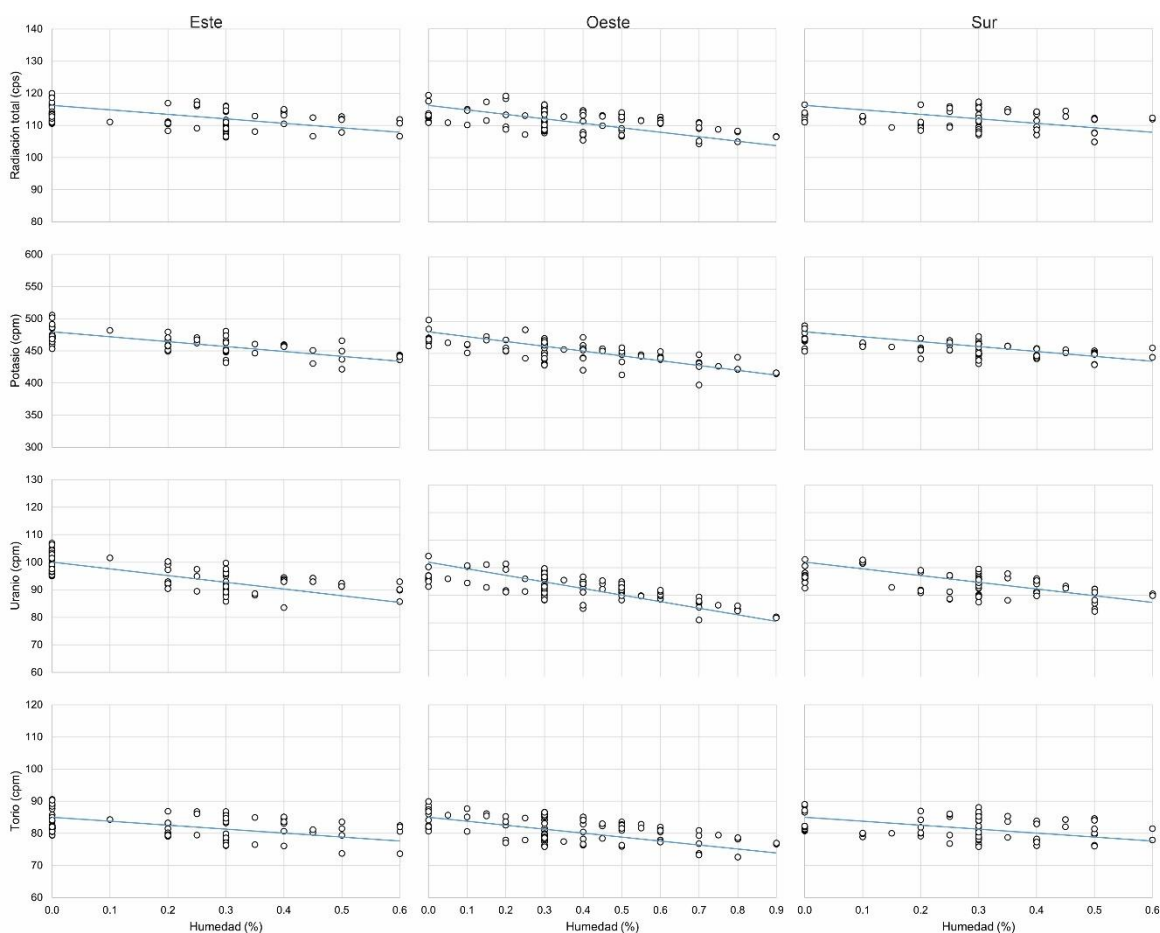


Figura 38. Gráficas de radiación total, potasio, uranio y torio registrados en las caras este, oeste y sur de la Caja del Agua Conservera contra contenido de humedad con los valores ya corregidos con la recta de regresión calculada de la cara norte.

Tabla 13. Promedio de los valores corregidos con respecto a las fachadas de la Caja del Agua Conservera.

Fachada	Total (cps)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/K	Th/U
Este	114.69	6.81	7.10	49.43	7.26	7.09
Norte	115.85	6.83	7.11	50.11	7.34	7.17
Oeste	116.82	6.84	7.31	50.20	7.34	6.94
Sur	115.44	6.81	7.12	49.89	7.32	7.12



Tabla 14. Coeficientes de correlación de Pearson para cada fachada por separado y para el total de todos los bloques de la Caja del Agua Conservera.

	Total	Potasio	Uranio	Torio
Cara este				
Total	1	0.4699	0.0105	0.6328
Potasio	-	1	-0.2563	0.2489
Uranio	-	-	1	-0.4513
Torio	-	-	-	1
Cara norte				
Total	1	0.5256	0.2796	0.4516
Potasio	-	1	-0.1740	0.1768
Uranio	-	-	1	-0.2386
Torio	-	-	-	1
Cara oeste				
Total	1	0.4885	0.4079	0.4956
Potasio	-	1	-0.0541	0.1510
Uranio	-	-	1	-0.3158
Torio	-	-	-	1
Cara sur				
Total	1	0.4976	0.0454	0.7021
Potasio	-	1	-0.3562	0.4462
Uranio	-	-	1	-0.4037
Torio	-	-	-	1
Caja del Agua Conservera				
Total	1	0.4948	0.2109	0.5704
Potasio	-	1	-0.1901	0.2428
Uranio	-	-	1	-0.3315
Torio	-	-	-	1

norte en la parte final de forma oblicua. De acuerdo con lo anterior, se consideró que los valores de humedad en la cara este tenían menos probabilidad de ser modificados durante el transcurso del día, además de que en esta cara este se tiene un solo bloque grande (el de la pileta), lo cual permitió verificar que las mediciones sean homogéneas y por estas razones se empleó esta cara para calcular la ecuación de la recta por regresión lineal.

Las gráficas de las tasas de conteo en contra del contenido de humedad para la cara este de la CAS se muestran en la Figura 39.

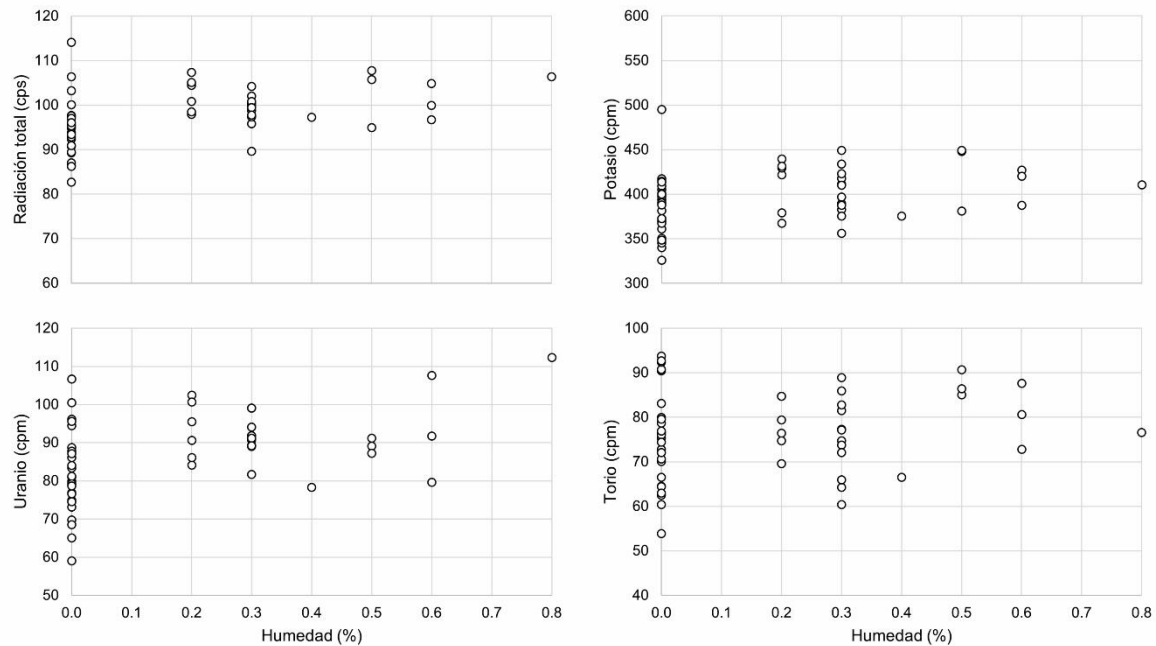


Figura 39. Tasas de conteo de radiación total, potasio, uranio y torio registradas en la cara este de la Caja del Agua del Santuario contra el contenido de humedad.

Siguiendo la misma metodología, se descartaron los valores anormalmente altos y bajos por haber sido tomados en geometrías diferentes a  $2\pi$ , además de otros valores con errores relacionados con la medición de humedad superficial debidos a evaporación que se observan como acumulaciones de tasas de conteo con rangos amplios con un 0.0% de humedad (Fig. 39). Una vez descartados los valores, se calculó la recta de regresión lineal (Fig. 40).

La recta calculada, así como demás datos estadísticos para la cara este de la CAS se dan en la Tabla 15. Nótese la correlación negativa que existe entre las tasas de conteo y la humedad debido a la atenuación, además de cómo la pendiente de la recta en el caso del torio es menos pronunciada que las demás porque experimenta menos atenuación por ser rayos gamma de más alta energía (Fig. 40).

Los valores descartados fueron entonces corregidos con la recta y su desviación estándar calculada. Las gráficas de estas tasas de conteo corregidas se muestran en la Figura 41.

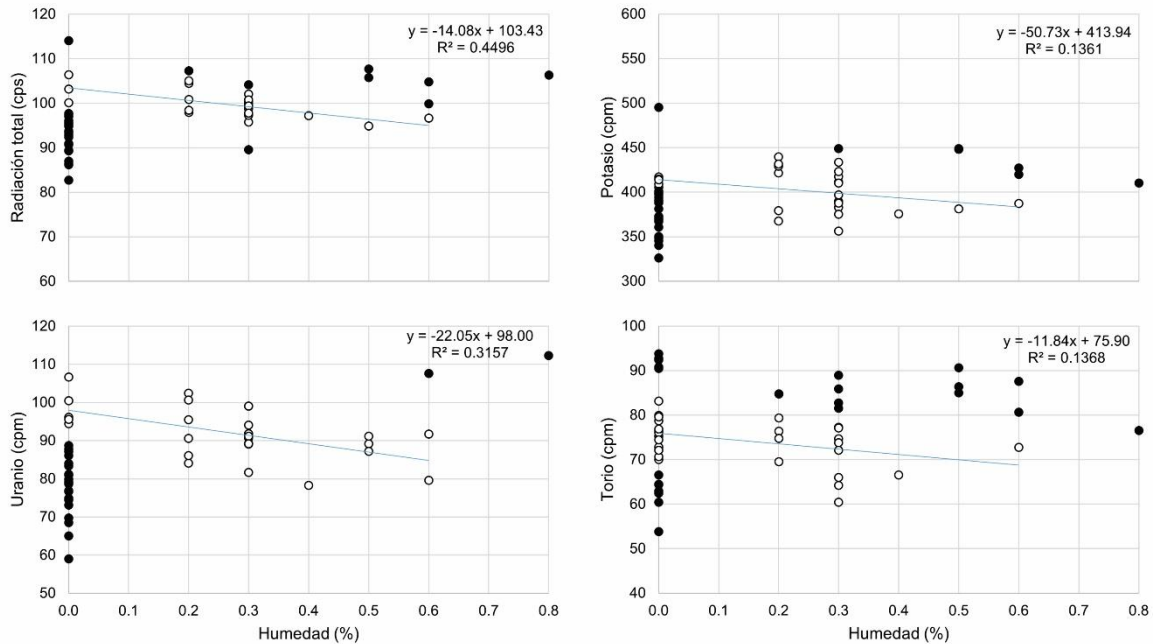


Figura 40. Gráficas de radiación total, potasio, uranio y torio registrados en la cara este de la Caja del Agua del Santuario contra contenido de humedad con los valores descartados en color negro. Se muestran las rectas de regresión lineal calculadas una vez descartados los datos anormalmente altos y bajos.

Tabla 15. Rectas de regresión calculadas, desviación estándar, coeficiente de correlación de Pearson y coeficiente de determinación para las variables tasas de conteo y contenido de humedad para la cara este de la Caja del Agua del Santuario.

	Recta	Desviación estándar	Coeficiente de correlación	Coeficiente de determinación
Total	$y = -14.08x + 103.43$	2.34	-0.6705	0.4496
Potasio	$y = -50.73x + 413.94$	20.87	-0.3689	0.1361
Uranio	$y = -22.05x + 98.00$	5.58	-0.5619	0.3157
Torio	$y = -11.84x + 75.90$	4.99	-0.3699	0.1368

Los valores adquiridos de las demás caras de la CAS (Fig. 42) se corrigieron también con la ecuación de la recta de la cara este (Fig. 43). En estas figuras también se puede notar cómo muchas cuentas tienen un amplio rango con valores de humedad de 0.0%. Esto se debe a las fluctuaciones de humedad por evaporación

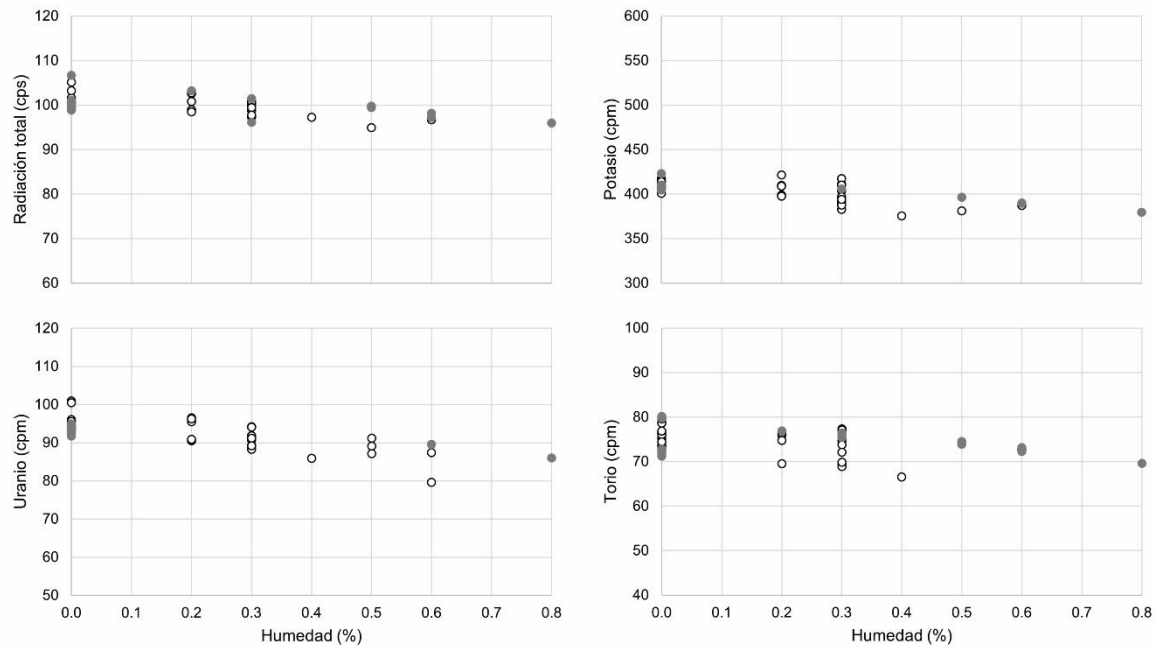


Figura 41. Gráficas de radiación total, potasio, uranio y torio registrados en la cara este de la Caja del Agua del Santuario contra contenido de humedad con los valores descartados inicialmente, pero ya corregidos en color gris.

superficial mencionadas anteriormente. Sin embargo, la GRS adecuadamente identifica que la humedad en el sistema interno de poros de las rocas sí contiene alguna cantidad de humedad, por lo cual este método puede ser usado incluso cuando no se conozcan los valores reales de humedad.

Ya con los datos corregidos, estos se recalcularon para un contenido de humedad de 0.0% para quitar la influencia de esta variable y así obtener las concentraciones reales de los radioelementos. Todos los datos de GRS y humedad obtenidos en la CAS se pueden consultar en el Anexo 8.

Los promedios de la radiación total, potasio, uranio, torio y sus relaciones para todas las caras de la CAS se muestran en la Tabla 16. Nótese cómo la radiación total y las concentraciones de los radioelementos son bastante similares en todas las caras de la CAS.

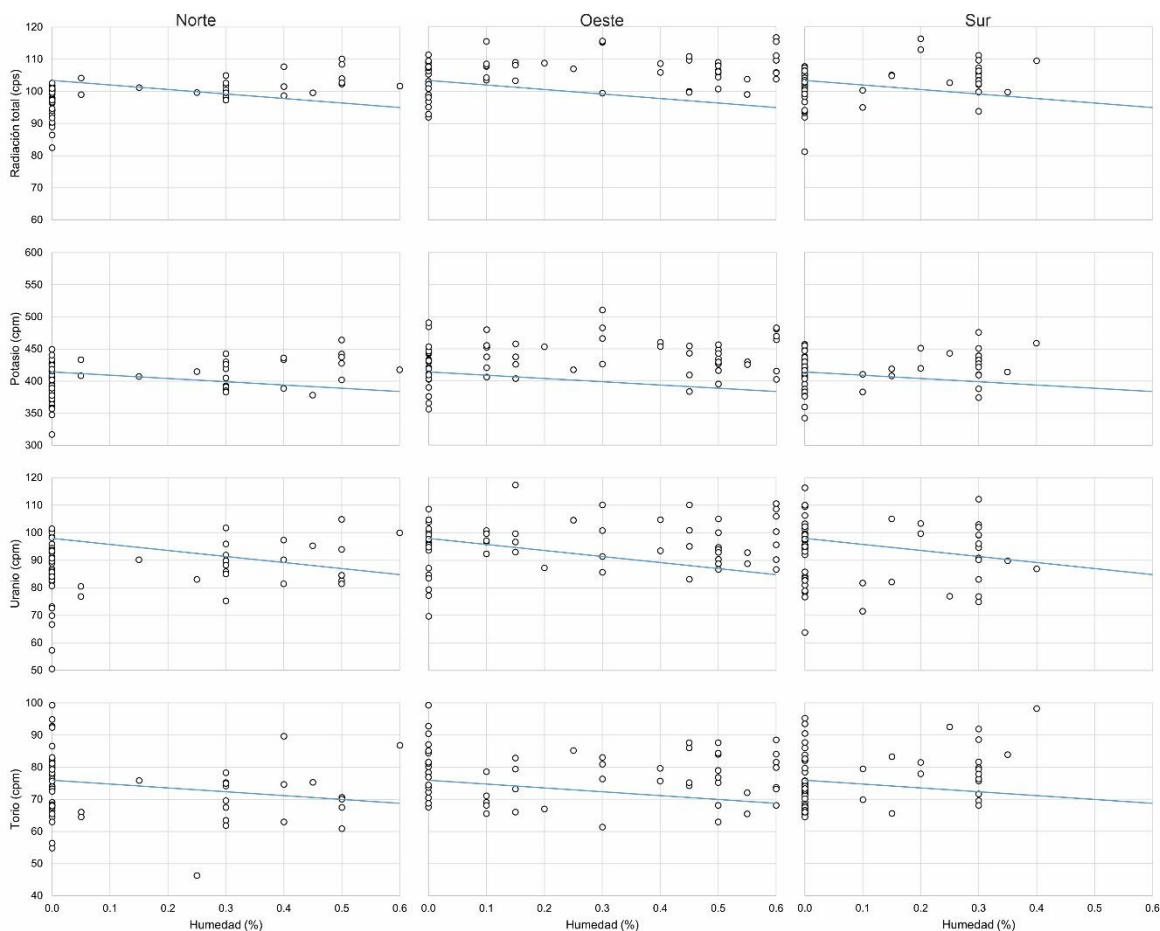


Figura 42. Tasas de conteo de radiación total, potasio, uranio y torio registradas en las caras norte, oeste y sur de la Caja del Agua del Santuario contra el contenido de humedad. De referencia se incluye la recta de regresión calculada de la cara este.

Por otra parte, los coeficientes de correlación de Pearson para la radiación total y cada radioelemento se proporcionan en la Tabla 17 para cada cara de la CAS por separado y todas juntas. Las correlaciones son positivas entre la radiación total y cada radioelemento, aunque su importancia varía en todas las caras de la CAS. El potasio tiene una correlación negativa poco significativa con el uranio, mientras que no muestra una correlación con el torio. Por otra parte, el uranio se correlaciona negativamente con el torio de forma medianamente significativa.

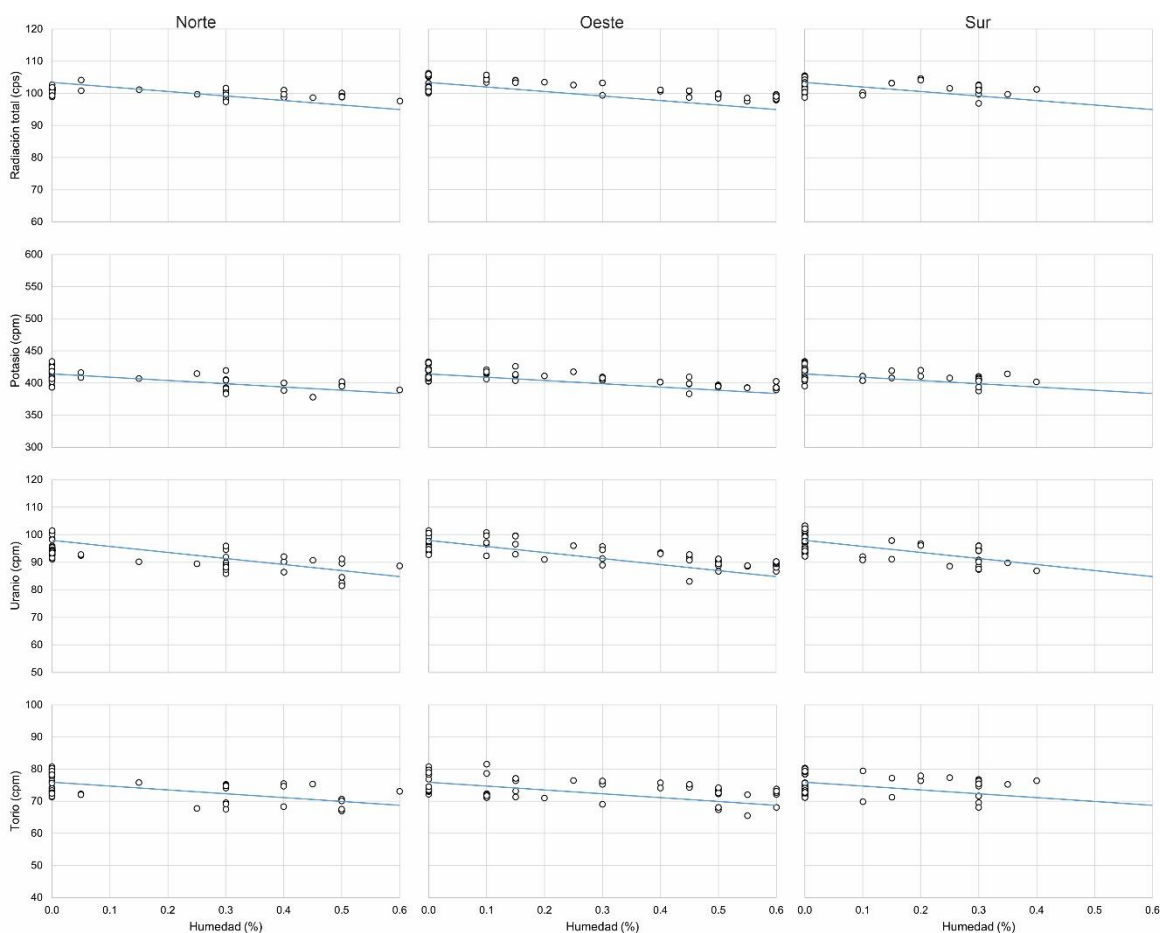


Figura 43. Gráficas de radiación total, potasio, uranio y torio registrados en las caras norte, oeste y sur de la Caja del Agua del Santuario contra contenido de humedad con los valores ya corregidos con la recta de regresión calculada de la cara este.

Tabla 16. Promedio de los valores corregidos con respecto a las fachadas de la Caja del Agua del Santuario.

Fachada	Total (cps)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/K	Th/U
Este	102.31	5.67	7.62	44.88	7.92	5.94
Norte	102.40	5.68	7.64	44.38	7.82	5.88
Oeste	105.44	5.75	8.12	45.34	7.89	5.63
Sur	103.80	5.73	7.97	44.53	7.78	5.67

Tabla 17. Coeficientes de correlación de Pearson para cada fachada por separado y para el total de todos los bloques de la Caja del Agua del Santuario.

	Total	Potasio	Uranio	Torio
Cara este				
Total	1	0.4891	0.3771	0.3074
Potasio	-	1	-0.1018	0.1713
Uranio	-	-	1	-0.4082
Torio	-	-	-	1
Cara norte				
Total	1	0.2650	0.2927	0.0715
Potasio	-	1	-0.1967	-0.0485
Uranio	-	-	1	-0.5741
Torio	-	-	-	1
Cara oeste				
Total	1	0.2897	0.4160	0.2933
Potasio	-	1	-0.2875	0.0035
Uranio	-	-	1	-0.4052
Torio	-	-	-	1
Cara sur				
Total	1	0.5023	0.0877	0.3172
Potasio	-	1	-0.3536	0.1827
Uranio	-	-	1	-0.5828
Torio	-	-	-	1
Caja del Agua del Santuario				
Total	1	0.4164	0.3721	0.2810
Potasio	-	1	-0.1705	0.0873
Uranio	-	-	1	-0.4373
Torio	-	-	-	1

#### 5.2.4. Diferencias entre el afloramiento y las Cajas del Agua

En primer lugar, comparando la ecuación de la recta de la radiación total del afloramiento con las de las construcciones, específicamente el término  $\beta_0$  que es el valor en el que la recta cruza el eje de las ordenadas (eje Y), se notan las diferencias en el conteo causadas por la meteorización y deterioro. En el afloramiento este valor es de 129.27, mientras que en la CAC es de 116.27 y en la CAS 103.43. Las tasas de conteo del potasio siguen este mismo patrón, siendo más altas en el afloramiento y menores en la CAS.



En el caso del uranio y torio, esta tendencia se mantiene, aunque con algunas diferencias importantes. Por ejemplo, la ecuación de la recta del uranio para la CAC y la CAS son prácticamente iguales, lo que significa que su comportamiento durante los procesos de deterioro es similar. Para el torio, el término  $\beta_0$  es igual en la ecuación del afloramiento y de la CAC, aunque la pendiente de esta última es más pronunciada.

Al comparar los promedios de radiación total se observa que son más altos en el afloramiento, después en la CAC y finalmente en la CAS, con lo cual se puede interpretar que el afloramiento refleja menor meteorización que las Cajas del Agua, mientras que la CAC ha experimentado menos deterioro que la CAS (Fig. 44). Esta afirmación apoya en los resultados del capítulo 4, en donde se puede ver que en la

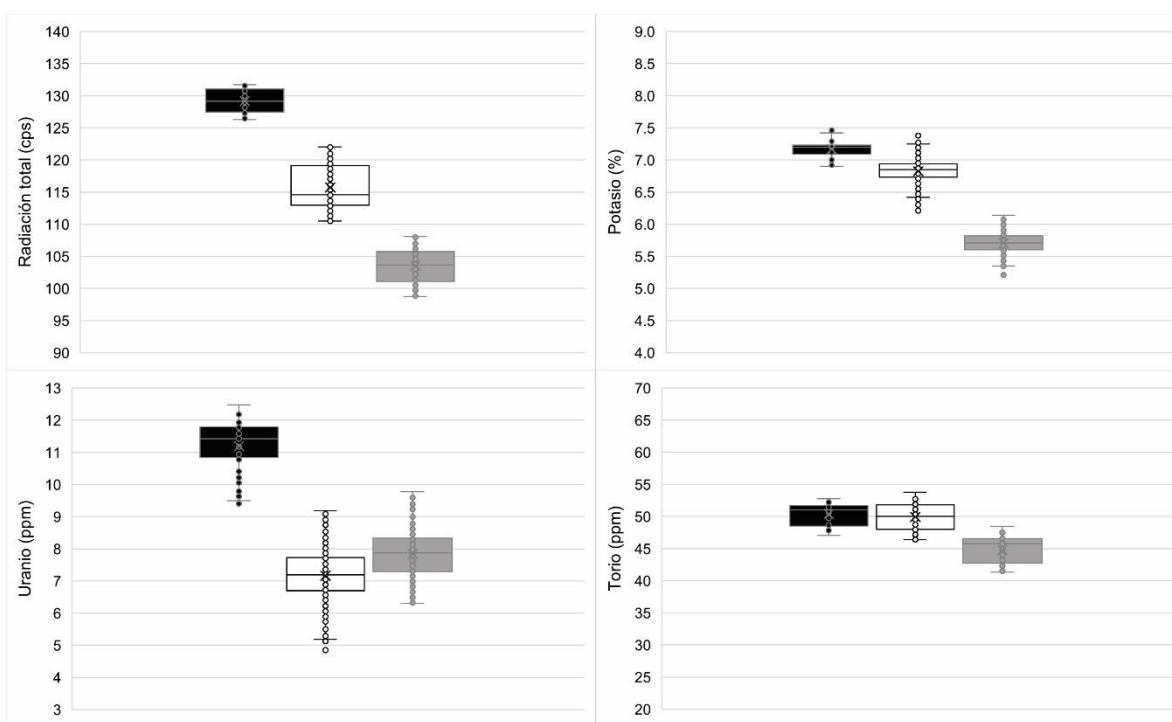


Figura 44. Radiación total y concentraciones reales de potasio, uranio y torio para el afloramiento (en negro), Caja del Agua Conservera (en blanco) y Caja del Agua del Santuario (en gris).

CAS predomina el desprendimiento causado por sales y humedad. Además, es posible que exista más sal en el sistema de poros y esto cause una mayor atenuación de las tasas de conteo.

Lo mismo sucede para las concentraciones de potasio y torio, siendo más altas en el afloramiento, seguidas por la CAC y CAS con las concentraciones más bajas (Fig. 44). Sin embargo, las diferencias no son extremadamente altas, sino solamente de 1.46 % de potasio y 5.79 ppm de torio, con lo cual se puede interpretar que los procesos de meteorización y deterioro no producen una gran pérdida de radioelementos. Además, el torio puede ser captado por los mismos óxidos de hierro de la matriz, con lo cual su distribución puede no variar tanto. Esto se ve reflejado en la relación Th/K que varía entre 7.07 y 7.85 en donde el potasio es el que está siendo mayormente lixiviado (Hampson *et al.*, 2005).

En el afloramiento también el uranio es más alto que en las construcciones y tiene una relación Th/U de 4.64 más cercana a lo normal para rocas ígneas de 3.8. Sin embargo, a diferencia del potasio y torio, en la CAS la concentración de uranio es más alta que en la CAC, aunque solamente por 0.68 ppm (Fig. 44). Esto pudiera significar que la pérdida de uranio en ambas construcciones ocurre de la misma manera, mientras que el torio, conforme progresa el deterioro, puede ser lixiviado de los óxidos de hierro de la matriz (Scheepers & Rozendaal, 1993).

Todos estos resultados indican que tanto la radiación total como el potasio muestran un comportamiento sencillo ante los procesos de meteorización y deterioro, siendo el potasio lixiviado de las rocas, aunque de manera no tan importante debido probablemente a que son las primeras etapas de meteorización (Scheepers & Rozendaal, 1993; Chen & Chan, 2002; Chan *et al.*, 2007). Por otra parte, las concentraciones de uranio y torio son más variables y se tienen que tomar en cuenta los procesos de disolución y oxidación de minerales que pueden incorporar estos dos radioelementos (Dickson & Scott, 1997; Wilford, 2012).

## 5.3. Formación Chichén Itzá, Zona Arqueológica de Chichén Itzá

### 5.3.1. Afloramientos

Debido a que se encontraron dos litologías diferentes en los afloramientos, se graficaron los datos espectrométricos por separado. En la Figura 45 se muestran los datos registrados en las brechas calcáreas.

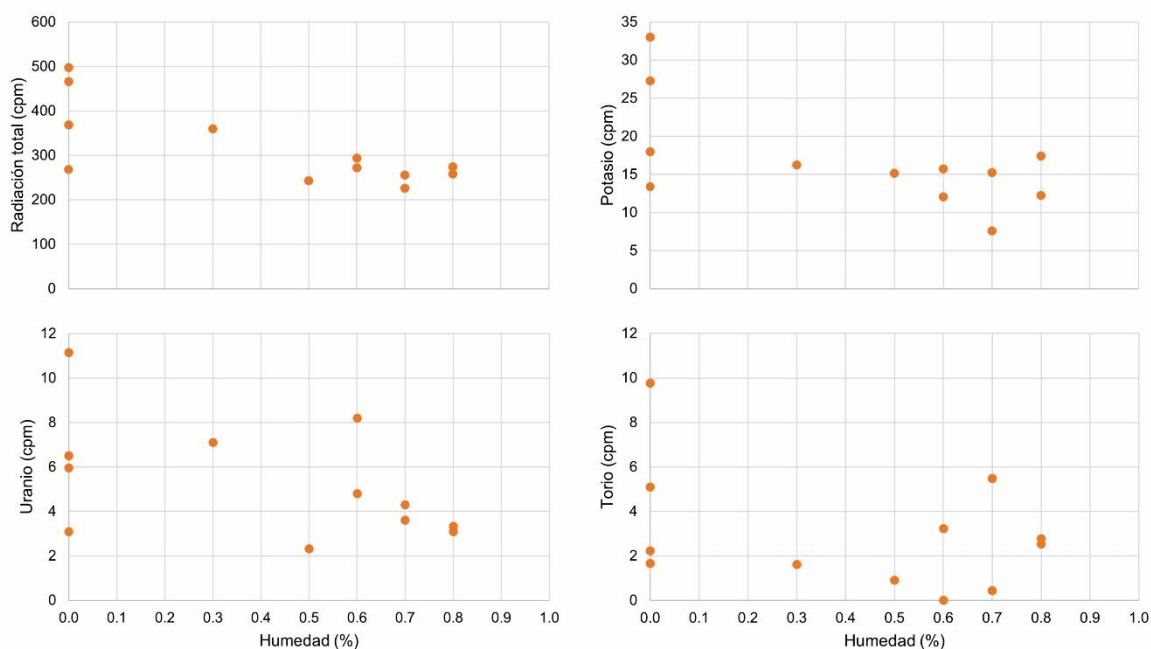


Figura 45. Tasas de conteo de radiación total, potasio, uranio y torio registradas en las brechas de los afloramientos graficadas contra el contenido de humedad.

De acuerdo con la metodología, se descartaron los valores anormalmente altos y bajos ocasionados por geometrías diferentes a  $2\pi$  (Fig. 46). La línea de regresión calculada, así como demás parámetros se muestran en la Tabla 18.

Una vez obtenida la recta, se calculó la desviación estándar y con ambas se corrigieron los datos descartados inicialmente (Fig. 47).

Para las calizas, los datos originalmente registrados se muestran en las gráficas de la Figura 48. Los datos descartados y la línea de regresión se pueden observar en la Figura 49. En la Tabla 19 se indican otros parámetros estadísticos calculados.

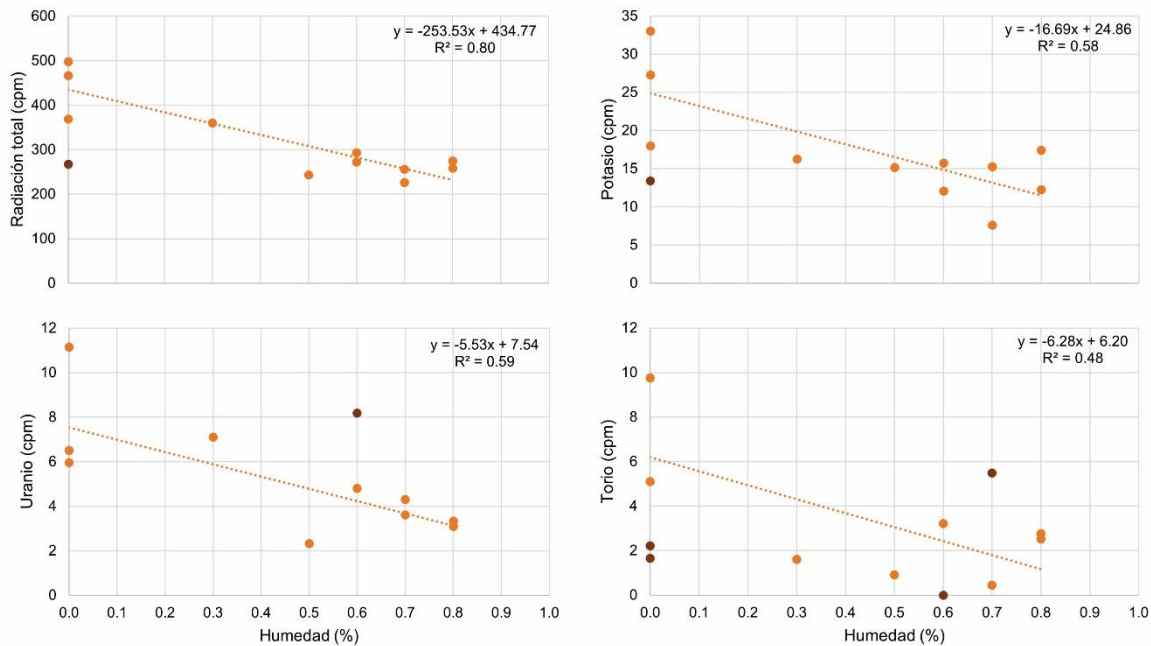


Figura 46. Gráficas de radiación total, potasio, uranio y torio registrados en las brechas del afloramiento contra contenido de humedad con los valores descartados en color rojo oscuro. Se muestran las rectas de regresión lineal calculadas una vez descartados los datos anormalmente altos y bajos.

Tabla 18. Rectas de regresión calculadas, desviación estándar, coeficiente de correlación de Pearson y coeficiente de determinación para las variables tasas de conteo y contenido de humedad para las brechas de los afloramientos.

	Recta	Desviación estándar	Coeficiente de correlación	Coeficiente de determinación
Total	$y = -253.53x + 434.77$	43.77	-0.89	0.80
Potasio	$y = -16.69x + 24.86$	4.87	-0.76	0.58
Uranio	$y = -5.53x + 7.54$	1.70	-0.77	0.59
Torio	$y = -6.28x + 6.20$	2.33	-0.69	0.48

Finalmente, los datos espectrométricos ya corregidos de las calizas se muestran en la Figura 50.

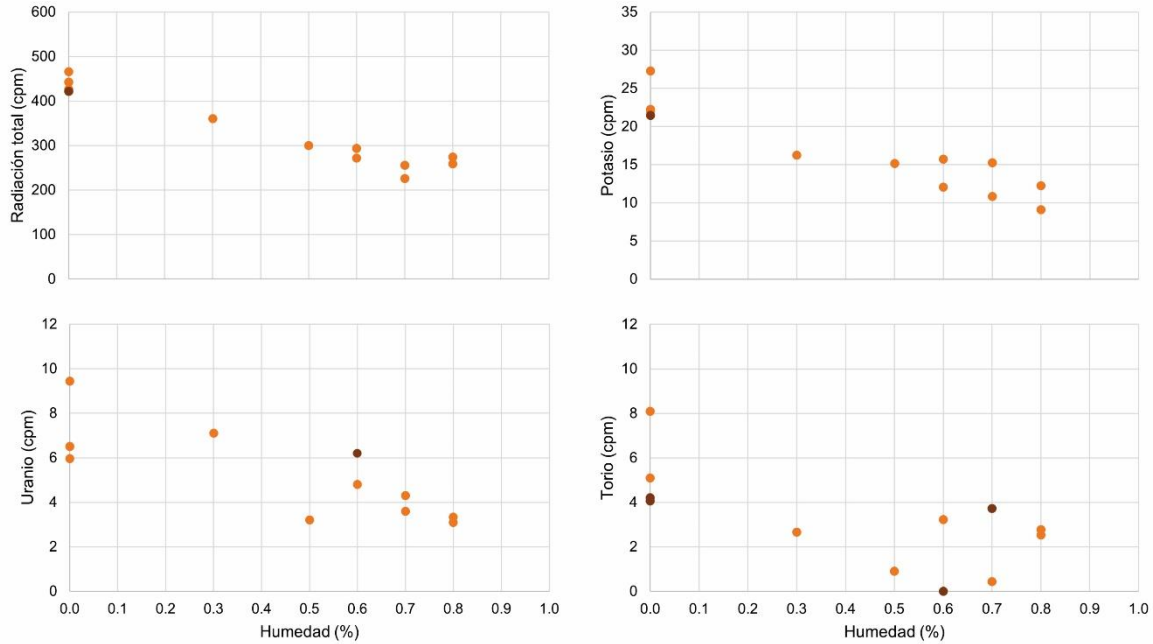


Figura 47. Gráficas de radiación total, potasio, uranio y torio registrados en las brechas del afloramiento contra contenido de humedad con los valores descartados inicialmente, pero ya corregidos en color rojo oscuro.

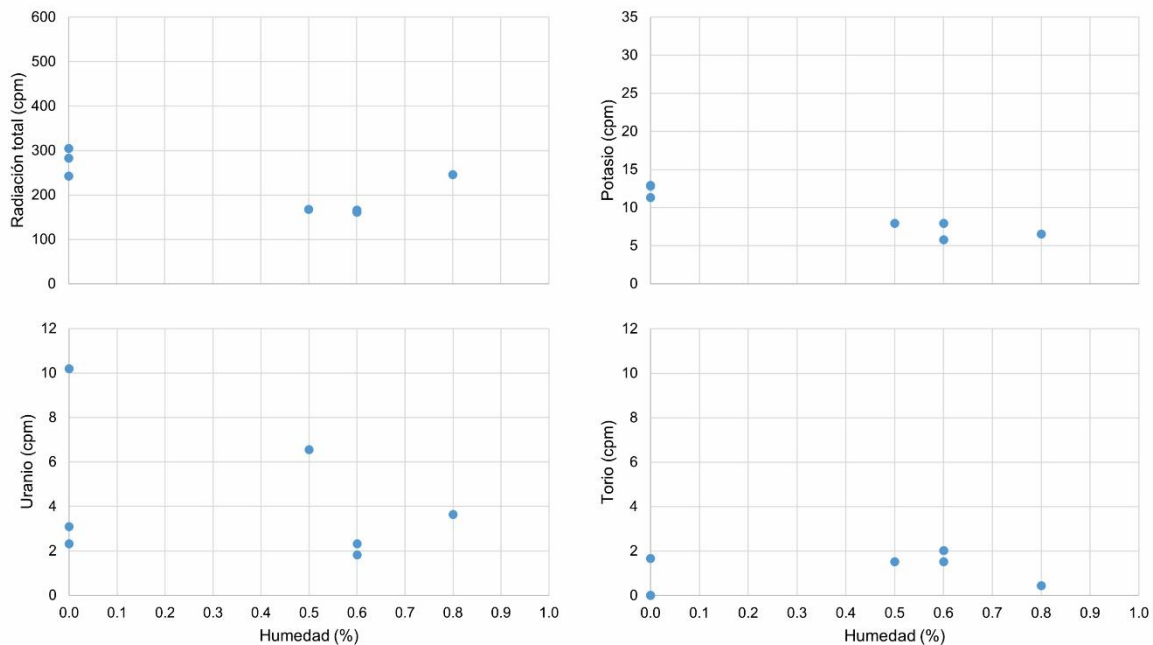


Figura 48. Tasas de conteo de radiación total, potasio, uranio y torio registradas en las calizas de los afloramientos graficadas contra el contenido de humedad.

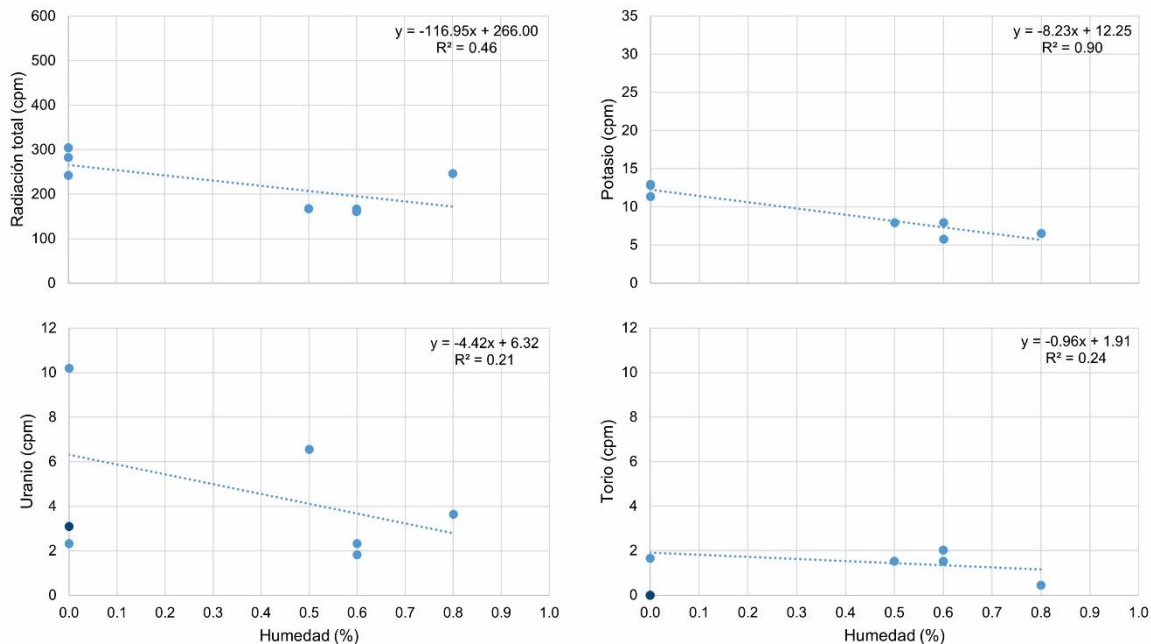


Figura 49. Gráficas de radiación total, potasio, uranio y torio registrados en las calizas del afloramiento contra contenido de humedad con los valores descartados en color azul oscuro. Se muestran las rectas de regresión lineal calculadas una vez descartados los datos anormalmente altos y bajos.

Tabla 19. Rectas de regresión calculadas, desviación estándar, coeficiente de correlación de Pearson y coeficiente de determinación para las variables tasas de conteo y contenido de humedad para las calizas de los afloramientos.

	Recta	Desviación estándar	Coeficiente de correlación	Coeficiente de determinación
Total	$y = -116.95x + 266.00$	47.79	-0.68	0.46
Potasio	$y = -8.23x + 12.25$	1.01	-0.95	0.90
Uranio	$y = -4.42x + 6.32$	3.28	-0.45	0.21
Torio	$y = -0.96x + 1.91$	0.60	-0.49	0.24

Todos los datos, tanto los de las brechas como los de las calizas se recalcularon para un contenido de humedad de 0.0% y después se calcularon las concentraciones de los radioelementos. Todos los datos de GRS y humedad obtenidos en los afloramientos para ambas litologías se dan en el Anexo 9.

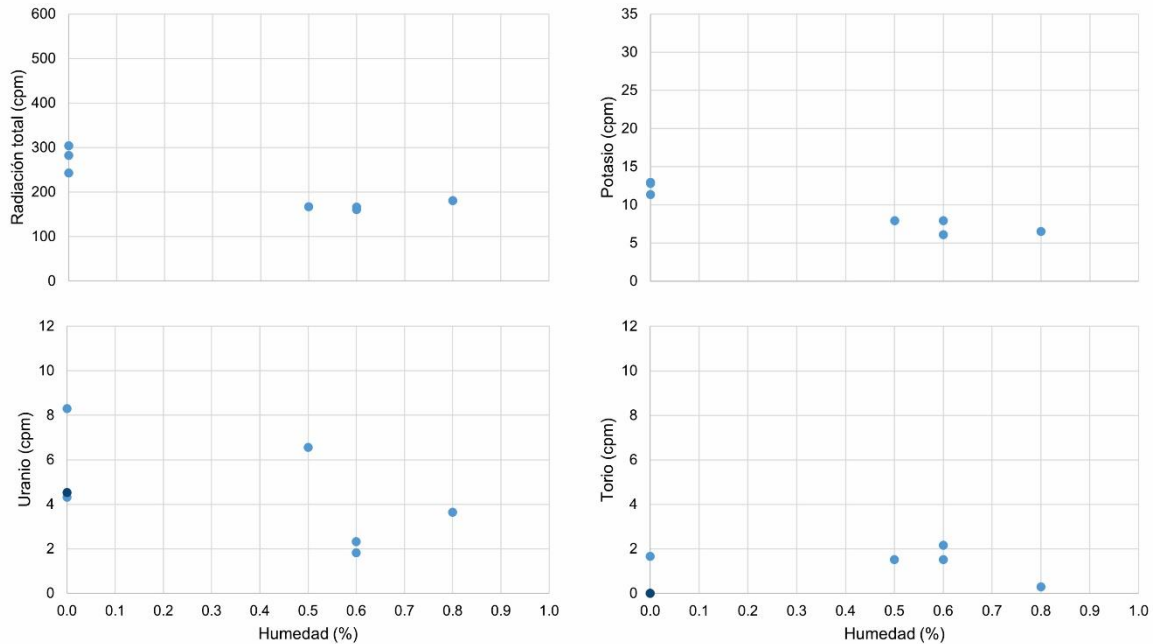


Figura 50. Gráficas de radiación total, potasio, uranio y torio registrados en las calizas del afloramiento contra contenido de humedad con los valores descartados inicialmente, pero ya corregidos en color azul oscuro.

Se calcularon los promedios de los datos espectrométricos de acuerdo con su litología (Tabla 20). En el caso de la radiación total, las brechas son las que exhiben los valores más altos, casi el doble que las calizas. También tienen los valores más altos de potasio y torio. Al contrario, las calizas presentan las concentraciones promedio más altas que las brechas, aunque solamente por 0.3 ppm. Estos resultados indican que las partículas rojizas que se identificaron en la petrografía como coloides de minerales arcillosos de paleosuelos son los que provocan que las brechas sean más radioactivas, precisamente por la adsorción de potasio y torio en sus superficies. Además, la relación Th/U del promedio de uranio y torio es de 4.57

Tabla 20. Promedio de los valores corregidos de acuerdo con la litología.

Litología	Total (cpm)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)
Brechas	438.73	0.28	0.7	3.2
Calizas	256.71	0.10	1.0	0.8



que significa un ambiente de depósito con influencia de aporte continental (Rider, 2002; Koptíková *et al.*, 2010). Las concentraciones de uranio son mucho más parecidas entre ambas litologías porque estas dependen del ambiente de depósito, es decir, marino somero y se relacionan simplemente con la calcita y con la materia orgánica, con las diferencias posiblemente por la captación por los crecimientos de algas en las calizas de tipo bindstone. Esto también se ve reflejado por la relación Th/U de 0.8, valor común para las calizas según Adams *et al.* (1959).

Los coeficientes de correlación de Pearson entre la radiación total, potasio, uranio y torio para brechas y calizas se muestran en la Tabla 21. Los resultados de las brechas indican que existe una buena correlación negativa entre la radiación total y el potasio, y con el uranio, aunque es poco significativa, mientras que con el torio tiene una buena correlación positiva, con lo cual el principal radioelemento que contribuye a la radiación de las brechas es el torio. La buena correlación negativa que existe entre el potasio y el torio puede deberse a la mineralogía de las arcillas en donde domina el torio. Finalmente, la excelente correlación negativa entre el uranio y el torio se debe al ambiente de depósito, es decir, con aporte de paleosuelos, con lo cual domina el torio. Para las calizas, los coeficientes de correlación se invierten en el caso de la radiación total con el potasio y torio, siendo ahora positiva para el primero y negativa para el segundo, manteniéndose

Tabla 21. Coeficientes de correlación de Pearson separados de acuerdo con la litología de los afloramientos.

	Total	Potasio	Uranio	Torio
Brechas				
Total	1	-0.5946	-0.2019	0.4404
Potasio	-	1	0.4535	-0.4889
Uranio	-	-	1	-0.9026
Torio	-	-	-	1
Calizas				
Total	1	0.3515	-0.1771	-0.5664
Potasio	-	1	-0.7323	0.2493
Uranio	-	-	1	-0.5387
Torio	-	-	-	1

prácticamente igual para el uranio. Igualmente, las correlaciones del potasio con el uranio y torio se invierten, aunque solo es significativa la relación del potasio con uranio, la cual es negativa, implicando que el potasio no se encuentra en la calcita o materia orgánica. La única correlación que se mantiene igual entre ambas litologías es la del uranio con el torio, siendo también buena y negativa.

### 5.3.2. Templo Norte del Gran Juego de Pelota

En esta sección también se dividen los resultados de acuerdo con el tipo de roca. Primeramente, en la Figura 51 se muestran los datos de las brechas en la pared interna oeste del TN.

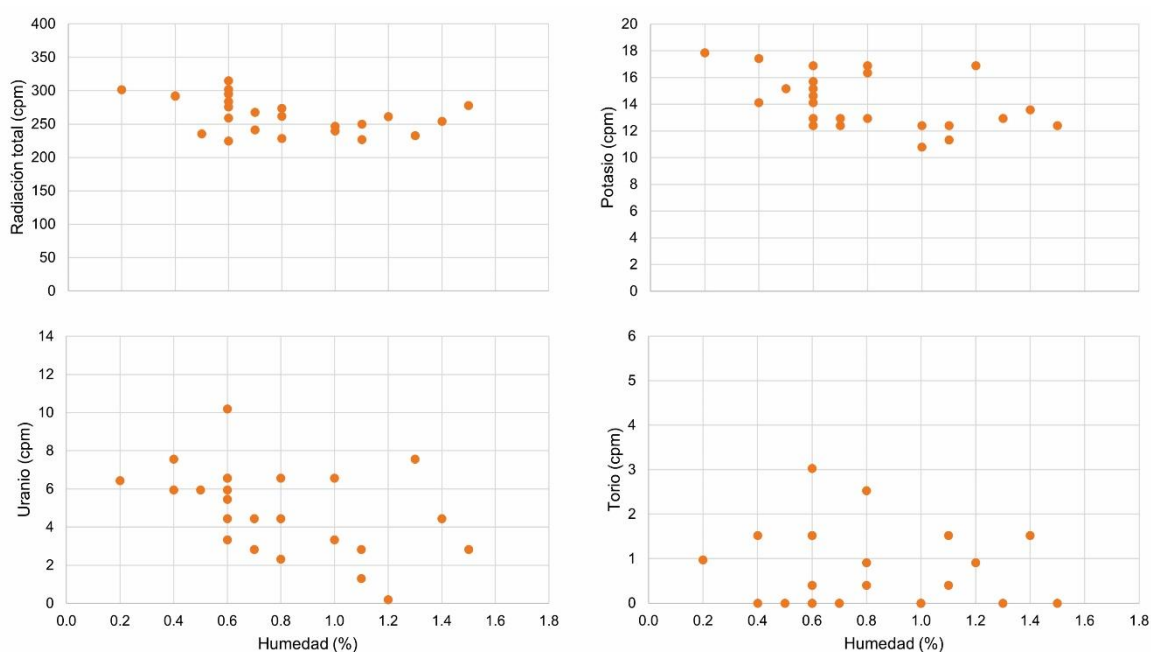


Figura 51. Tasas de conteo de radiación total, potasio, uranio y torio registradas en las brechas del Templo Norte graficadas contra el contenido de humedad.

Cabe destacar que en el TN solo se encontraron geometrías  $>2\pi$  relacionadas con la influencia de otras superficies, específicamente las demás paredes del TN y el piso, así que las tasas de conteo con estas geometrías deberían de ser más altas

y, por lo tanto, corresponderían a datos que se necesitarían descartar. Sin embargo, debido a los valores bajos de radiación, la influencia de otras superficies fue mínima y se descartaron muy pocos datos como se puede apreciar en la Figura 52. Otra aclaración importante es que se descartaron valores con tasas de conteo de 0.0 porque sus valores no dependen de la humedad, simplemente no se detectó la presencia de radioelementos.

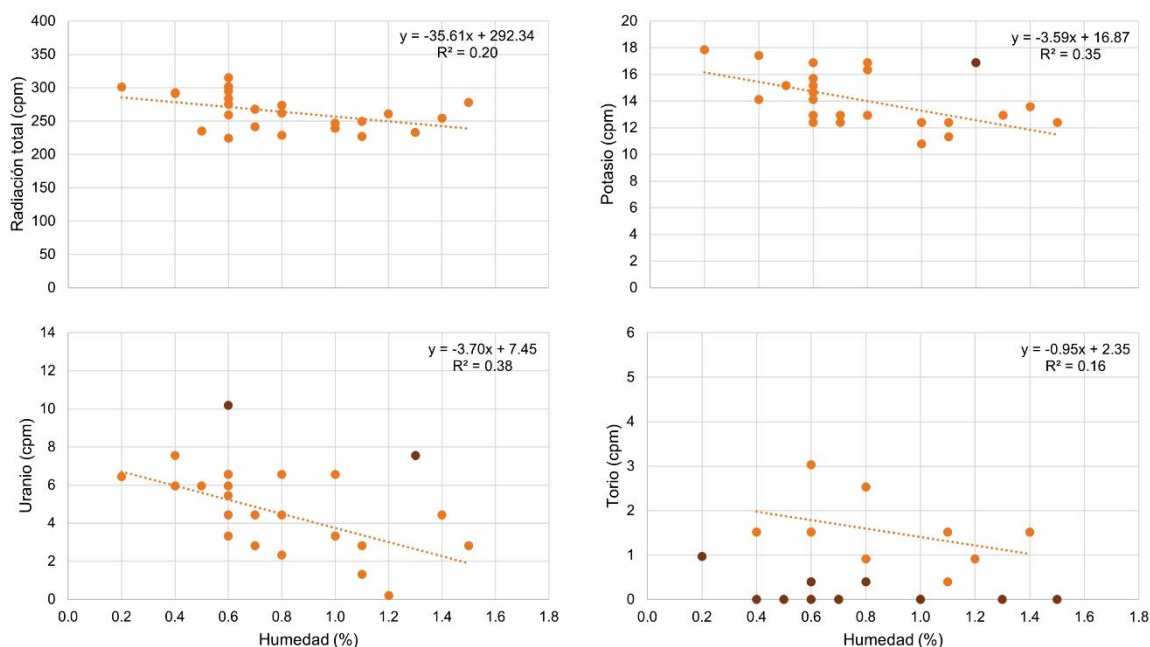


Figura 52. Gráficas de radiación total, potasio, uranio y torio registrados en las brechas del Templo Norte contra contenido de humedad con los valores descartados en color rojo oscuro. Se muestran las rectas de regresión lineal calculadas una vez descartados los datos anormalmente altos y bajos.

La ecuación de la recta generada por el método de regresión lineal, así como los demás parámetros se proporcionan en la Tabla 22. Con esta recta, además de la desviación estándar, se corrigieron los datos cuyos resultados se pueden observar en la Figura 53.

Tabla 22. Rectas de regresión calculadas, desviación estándar, coeficiente de correlación de Pearson y coeficiente de determinación para las variables tasas de conteo y contenido de humedad para las brechas del Templo Norte.

	Recta	Desviación estándar	Coeficiente de correlación	Coeficiente de determinación
Total	$y = -35.61x + 292.34$	24.54	-0.45	0.20
Potasio	$y = -3.59x + 16.87$	1.67	-0.59	0.35
Uranio	$y = -3.70x + 7.45$	1.59	-0.62	0.38
Torio	$y = -0.95x + 2.35$	0.75	-0.40	0.16

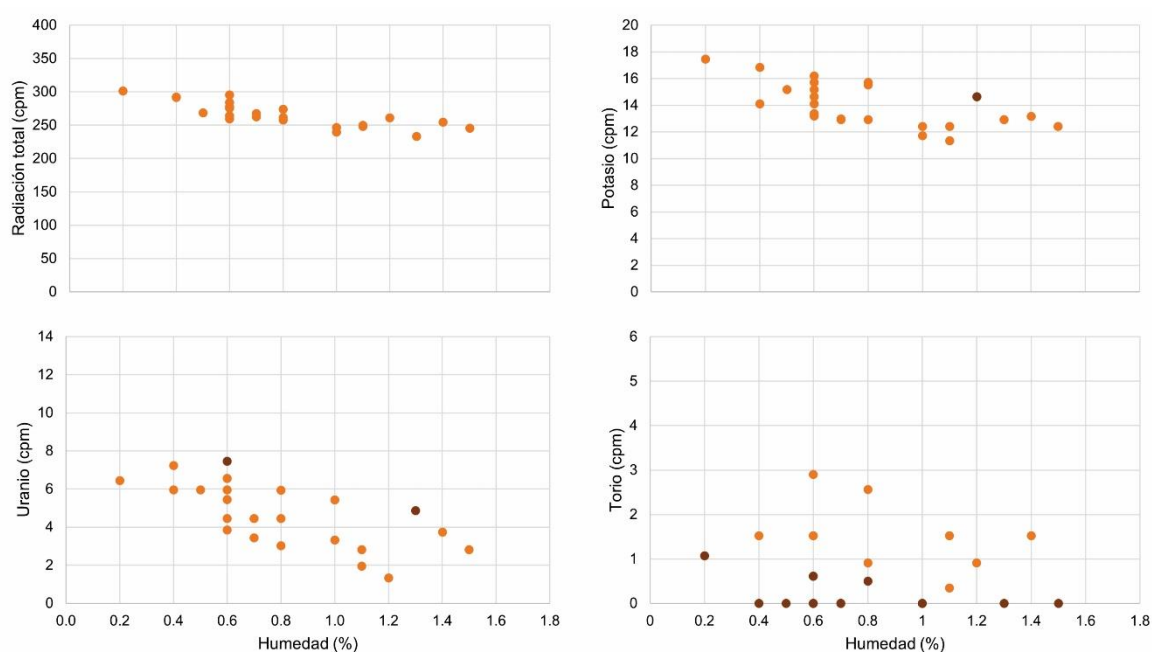


Figura 53. Gráficas de radiación total, potasio, uranio y torio registrados en las brechas del Templo Norte contra contenido de humedad con los valores descartados inicialmente, pero ya corregidos en color rojo oscuro.

Los datos registrados en los bloques de calizas de la pared interna oeste del TN se muestran en las gráficas de la Figura 54, los datos descartados y la línea de regresión aparecen en las gráficas de la Figura 55. La situación de tasas de conteo de 0.0 cpm se trató de la misma que la de las brechas, es decir, estos datos se descartaron para construir la ecuación de la recta.

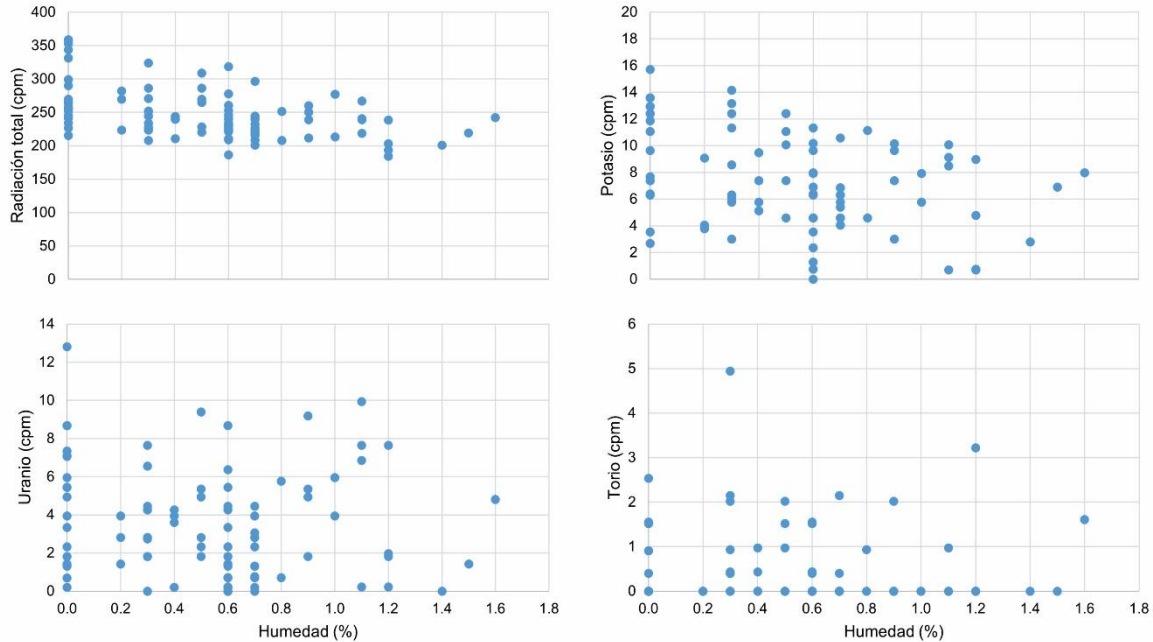


Figura 54. Tasas de conteo de radiación total, potasio, uranio y torio registradas en las calizas del Templo Norte graficadas contra el contenido de humedad.

En la Tabla 23 se detalla la ecuación de la recta y los parámetros estadísticos calculados. Con esta línea de regresión y la desviación estándar se corrigieron los datos, produciendo las gráficas de la Figura 56.

Al igual que con los datos de los afloramientos, todos los valores se recalcularon para una humedad de 0.0% para determinar las concentraciones reales de los radioelementos. Todos los datos de GRS y humedad obtenidos en los bloques de la pared interna oeste del TN para ambas litologías se dan en el Anexo 10.

Una vez obtenidas las concentraciones reales para el potasio, uranio y torio, se calcularon sus promedios de acuerdo con el tipo de roca (Tabla 24). En el caso de la radiación total, las brechas son las que exhiben los valores más altos, aunque solo por 25.4 cpm más que las calizas. Las concentraciones de los tres radioelementos también son más altas en las brechas, aunque sus diferencias no son tan pronunciadas. Esto concuerda con la distribución de potasio y torio en la fracción de coloides de minerales arcillosos de paleosuelos encontrada en el

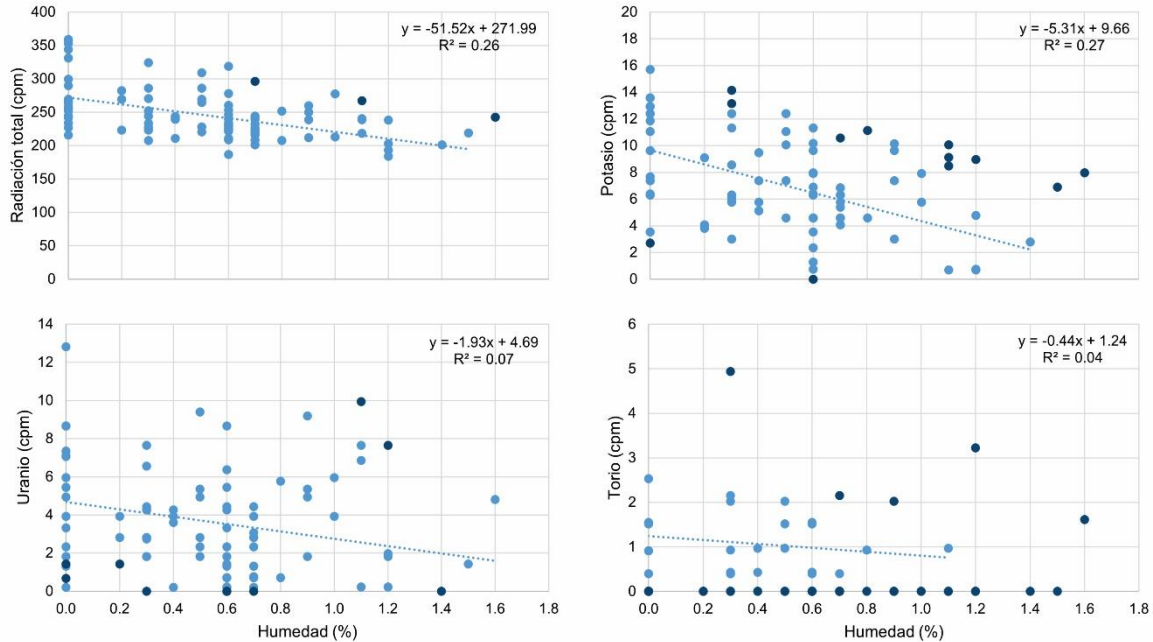


Figura 55. Gráficas de radiación total, potasio, uranio y torio registrados en las calizas del Templo Norte contra contenido de humedad con los valores descartados en color azul oscuro. Se muestran las rectas de regresión lineal calculadas una vez descartados los datos anormalmente altos y bajos.

Tabla 23. Rectas de regresión calculadas, desviación estándar, coeficiente de correlación de Pearson y coeficiente de determinación para las variables tasas de conteo y contenido de humedad para las calizas del Templo Norte.

	Recta	Desviación estándar	Coeficiente de correlación	Coeficiente de determinación
Total	$y = -51.52x + 271.99$	32.03	-0.51	0.26
Potasio	$y = -5.31x + 9.66$	3.01	-0.52	0.27
Uranio	$y = -1.93x + 4.69$	2.66	-0.26	0.07
Torio	$y = -0.44x + 1.24$	0.64	-0.20	0.04

análisis petrográfico. En ambos tipos de roca predomina el uranio sobre el torio, con relaciones Th/U entre 0.38 y 0.50, lo cual puede indicar cambios de microfacies que provocan una distribución irregular de estos elementos (Sêco *et al.*, 2021).

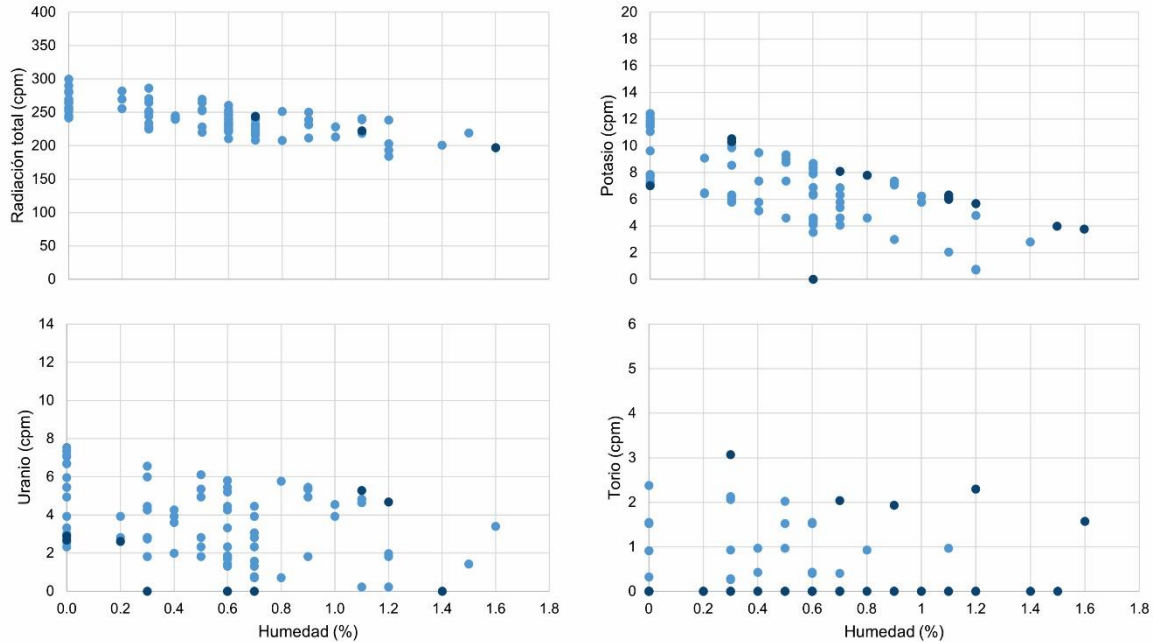


Figura 56. Gráficas de radiación total, potasio, uranio y torio registrados en las calizas del afloramiento contra contenido de humedad con los valores descartados inicialmente, pero ya corregidos en color azul oscuro.

Tabla 24. Promedio de los valores corregidos de acuerdo con la litología.

Litología	Total (cpm)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)
Brechas	294.39	0.15	1.4	0.7
Calizas	268.99	0.09	0.8	0.3

Los coeficientes de correlación de Pearson entre la radiación total, potasio, uranio y torio para brechas y calizas se muestran en la Tabla 25. La radiación total en ambos tipos de rocas no tiene correlaciones significativas con ninguno de los radioelementos, excepto medianamente con el torio en el caso de las brechas. Esto indica que los datos están bastante dispersos, lo cual se puede interpretar como una heterogeneidad en las facies de los bloques elegidos para la construcción del TN porque existen diferentes tipos de calizas según el análisis petrográfico, desde mudstone hasta grainstone con algo de aporte de paleosuelos hasta bindstone con



Tabla 25. Coeficientes de correlación de Pearson separados de acuerdo con la litología de la pared interna oeste del Templo Norte.

	Total	Potasio	Uranio	Torio
Brechas				
Total	1	0.2971	-0.1936	0.4703
Potasio	-	1	-0.7011	0.3789
Uranio	-	-	1	-0.7344
Torio	-	-	-	1
Calizas				
Total	1	-0.0273	0.3575	0.3806
Potasio	-	1	-0.5449	-0.0814
Uranio	-	-	1	0.1852
Torio	-	-	-	1

laminación de algas. La correlación de potasio con uranio es negativa y significativa, tanto en brechas como en calizas, lo cual concuerda con las diferencias entre la procedencia de ambos elementos. Por otra parte, la correlación entre potasio y torio es positiva y poco significativa en las brechas, indicando la misma procedencia. Finalmente, solo en las brechas se tiene una correlación negativa importante para el uranio y torio, lo cual se interpreta como diferencias en el aporte de los coloides de paleosuelos.

### 5.3.3. Diferencias entre los afloramientos y el Templo Norte

Al comparar las ecuaciones de las rectas para las brechas entre los afloramientos y el TN, se nota una clara diferencia tanto en la pendiente como en el término  $\beta_0$ , indicando que los afloramientos están menos meteorizados que los bloques del TN. Esta tendencia también se puede observar en las líneas de regresión del potasio. Esto parece indicar que el potasio es fácilmente lixiviado de las brechas que, como se discutió en los resultados del capítulo 4, están considerablemente más deterioradas por patrones de erosión. Por otra parte, el uranio se comporta de manera similar, quizás debido a la disolución y reprecipitación en los mismos bloques, ya que el uranio se asocia con la estructura de la calcita (Chiozzi *et al.*,

2000). Considerando esto, el uranio no sería un buen indicador de la meteorización en el caso de las brechas. Al contrario, el torio, que reside en las partículas arcillosas junto con el potasio, sí tiene una disminución en los bloques del TN. Quizás parte de su movilidad esté modificada por procesos de biodeterioro, ya que la colonización biológica está relacionada con los patrones de daños descritos.

Las rectas de regresión de la radiación total en las calizas de los afloramientos y en el TN son prácticamente iguales y parecen no responder a los procesos de meteorización o deterioro por la predominancia de uranio que, como se describió en el párrafo anterior, parece no ser un buen indicador de dichos procesos. Sin embargo, individualmente los términos  $\beta_0$  de las líneas de regresión del potasio y torio siguen siendo buenos indicadores de que los bloques del TN están más meteorizados o deteriorados que los afloramientos.

Al comparar las concentraciones de los radioelementos que se obtuvieron a partir de las correcciones por las ecuaciones de las rectas, queda en evidencia que tanto el potasio como el torio disminuyen en los bloques del TN, ya sea que se encuentren en brechas o en calizas (Fig. 57). Sin embargo, resulta posible también que algunos cambios en las concentraciones, especialmente en el caso del uranio, se deban a las distintas microfacies y que varíe por el contenido de materia orgánica (Fig. 57) (Rider, 2002). Por lo tanto, el uranio se debería de usar con precaución, tanto en calizas como en brechas. Igualmente, la radiación total en las calizas parece responder a las variaciones de concentración del uranio, con lo cual es posible que este parámetro sea mejor utilizarlo para determinar bloques con humedad más que como indicador del deterioro.

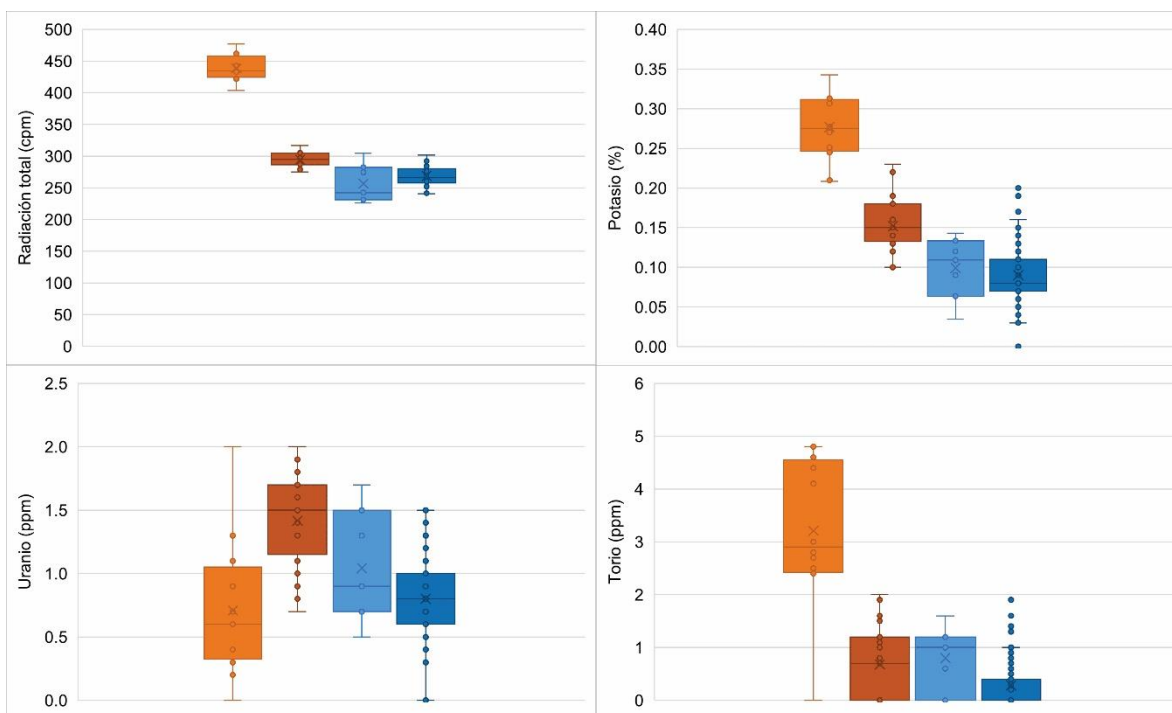


Figura 57. Radiación total y concentraciones reales de potasio, uranio y torio para las brechas y calizas del afloramiento (naranja claro y azul claro) y del Templo Norte (naranja oscuro y azul oscuro).



## **6. Propiedades físicas y mecánicas**

En este capítulo se describen los resultados de las pruebas petrofísicas realizadas a las muestras obtenidas de los afloramientos (véase la Tabla 2 en la sección “4.1.3. Muestreo” para la nomenclatura y detalles de cada muestra).

Las propiedades físicas y mecánicas de las rocas de construcción son importantes porque determinan su durabilidad y su resistencia a los procesos de deterioro (Price, 1995; Benavente *et al.*, 2001, 2004; Ceryan *et al.*, 2008; Přikryl, 2013; Çelik & Aygün, 2019). Los parámetros evaluados aquí ayudan a la interpretación de la GRS porque las propiedades de las rocas son modificadas por procesos de meteorización tanto física como química (Esaki & Jiang, 2000; Gupta & Rao, 2001; Siegesmund *et al.*, 2002; Brimblecombe & Camuffo, 2003; Ceryan, 2012; Pola *et al.*, 2012; Siedel & Siegesmund, 2014; White & Buss, 2014), con lo cual se pueden relacionar con la pérdida de radioelementos.

Si bien existen numerosos parámetros petrofísicos, en esta tesis se determinaron solamente la densidad, porosidad, propiedades de absorción, expansión hídrica, propiedades térmicas, resistencia a la cristalización por sal, además del peso atómico medio e índice de empaquetamiento de cationes. Detalles sobre otras propiedades importantes y la metodología para evaluarlas pueden consultarse en Siegesmund & Dürrast (2014), Steiger *et al.* (2014) y Siedel & Siegesmund (2014).

### **6.1. Materiales y métodos**

#### **6.1.1. Experimentos petrofísicos**

En esta sección se describe el procedimiento para cada uno de los experimentos realizados según las diferentes normativas de acuerdo con Siegesmund & Dürrast (2014). El procesamiento de las muestras y las pruebas petrofísicas se hicieron en el Laboratorio de Preparación y Laboratorio de Petrofísica del Instituto de Geología de la UASLP.

La gran mayoría de las pruebas requiere especímenes cúbicos, por lo que las muestras se cortaron de 65 mm de lado y, dependiendo de las dimensiones de cada muestra, se obtuvieron varios cubos. Para la Ignimbrita Cantera, no fue posible obtener cubos de las muestras A1, A2, A5, A6 ni de los fragmentos recogidos de la CAS. En el caso de la Formación Chichén Itzá, solamente se hicieron cubos de las muestras C1, C2 y C3. Por otra parte, los experimentos de expansión requieren especímenes con un tamaño de 15×15×100 mm que se obtuvieron de las muestras A3, A4, A8-A12 para la Ignimbrita Cantera solamente.

Se midieron primero los parámetros de peso seco ( $w_{dry}$ , el peso de la muestra después de haber sido calentada en un horno durante 24 horas a una temperatura de 100°C), peso saturado ( $w_{sat}$ , el peso de la muestra después de retirar todo el aire de los poros por medio de una bomba de vacío y rellenarlos con agua destilada) y peso sumergido ( $w_{sub}$ , mismas condiciones que el peso saturado, pero siendo pesada al estar sumergida en agua destilada) para calcular la densidad aparente ( $\rho_{bulk}$ , *bulk density*) y densidad de matriz ( $\rho_{matriz}$ ) con las siguientes fórmulas:

$$\rho_{bulk} = \frac{w_{dry}}{w_{sat} - w_{sub}} \quad (23)$$

$$\rho_{matriz} = \frac{w_{dry}}{w_{dry} - w_{sub}} \quad (24)$$

Es necesario contar con ambas densidades porque sus valores pueden variar de acuerdo con el grado de meteorización de las rocas (Price & Velbel, 2003; Ceryan, 2008, 2012; Ceryan *et al.*, 2008; Chiu & Ng, 2014).

La porosidad se considera como uno de los parámetros más importantes para caracterizar la durabilidad de las rocas (Benavente *et al.*, 2001; Brimblecombe & Camuffo, 2003; Přikryl, 2013) porque permite el acceso de agua que es uno de los agentes principales de deterioro (Grossi *et al.*, 1995; Price, 1995; Grossi & Murray, 1999; Siegesmund *et al.*, 2002; Benavente *et al.*, 2004; Franzen & Mirwald, 2004, 2009; Wedekind *et al.*, 2013; Martinho & Dionísio, 2020). La porosidad ( $\phi$ ) se calculó utilizando los resultados de ambos tipos de densidad según la ecuación:

$$\phi = \frac{\rho_{matriz} - \rho_{bulk}}{\rho_{matriz}} \cdot 100 \quad (25)$$

Cabe destacar que los valores de porosidad representan solamente la porosidad efectiva, es decir, que comprende todos los espacios a los que pueden acceder los fluidos, en este caso, el agua (Siegesmund & Dürrast, 2014; Martinho & Dionísio, 2020).

Esencialmente, las propiedades hídricas indican cuánta agua puede absorber una roca, lo cual depende del porcentaje y tipo de porosidad, además del tamaño de poro (Přikryl, 2013; Siegesmund & Dürrast, 2014; Martinho & Dionísio, 2020). Es importante conocer estos parámetros porque el agua es uno de los agentes principales que se involucra con el deterioro por congelamiento-descongelamiento, disolución de minerales, transporte de sales y promueve la colonización biológica (Fookes *et al.*, 1988; Price, 1995; Siegesmund *et al.*, 2002; Yu & Oguchi, 2010b; Wedekind *et al.*, 2013; McAllister *et al.*, 2017). Las propiedades hídricas determinadas fueron la absorción de agua en condiciones de presión normal, en vacío y por capilaridad.

La absorción de agua a presión atmosférica ( $W_{atm}$ ) se determinó sumergiendo la muestra en agua durante 48 horas. Posteriormente, se sacó del recipiente y se pesó, obteniendo así el parámetro de peso húmedo ( $w_{wet}$ ). La absorción de agua en estas condiciones se calculó de la siguiente manera:

$$W_{atm} = \frac{w_{wet} - w_{dry}}{w_{dry}} \cdot 100 \quad (26)$$

La absorción forzada de agua en condiciones de vacío ( $W_{vac}$ ) se obtiene con los parámetros  $w_{sat}$  y  $w_{dry}$  anteriormente descritos:

$$W_{vac} = \frac{w_{sat} - w_{dry}}{w_{dry}} \cdot 100 \quad (27)$$

Una vez obtenidos  $W_{atm}$  y  $W_{vac}$  se determinó el grado de saturación ( $S$ ) que describe qué tanta porosidad está accesible para la absorción de agua, lo cual es importante para evaluar la resistencia al congelamiento (Siegesmund & Dürrast, 2014). El cálculo de  $S$  es el cociente de ambos parámetros:

$$S = \frac{W_{atm}}{W_{vac}} \quad (28)$$



La absorción de agua por capilaridad (valor  $w$ ) se obtuvo al poner en contacto la superficie de una muestra con agua para que esta sea absorbida solamente por capilaridad (Fig. 58). Mientras el agua era absorbida, se registraban los cambios de peso con respecto al tiempo, con lo cual el valor  $w$  fue determinado por:

$$\text{valor } w = \frac{m_w}{\sqrt{t}} \quad (29)$$

donde  $m_w$  es el peso absorbido por unidad de área ( $\text{kg/m}^2$ ) y  $\sqrt{t}$  es la raíz del tiempo en horas. Comúnmente se suele dar el valor  $w$  para la primera hora y es válido siempre y cuando la pendiente de la recta no sea cero (Siegesmund & Dürrast, 2014). Esta prueba se llevó a cabo dos veces en cada muestra, una en el plano  $xy$  (eje  $Z$ ) que es paralelo a la laminación y otra en el plano  $yz$  (eje  $X$ ) que es perpendicular a la laminación.



Figura 58. Prueba de absorción de agua por capilaridad en donde una cara del cubo tiene que estar en contacto con la superficie del agua para que esta absorba agua del menisco.

Simultáneamente al estar realizando la prueba de absorción por capilaridad, se medía la altura que alcanzaba el agua en la muestra (z) para determinar la penetración de agua por capilaridad (valor b) y se calculó como sigue:

$$\text{valor } b = \frac{z}{\sqrt{t}} \quad (30)$$

Generalmente z se expresa en metros y, al igual que para el valor w, la penetración se da para la primera hora (Siegesmund & Dürrast, 2014). Aquí también se obtuvieron dos valores de penetración, uno paralelo y otro perpendicular a la laminación.

Muchas rocas tienen texturas heterogéneas, por lo que sus propiedades físicas medidas en sus distintos ejes pueden ser muy diferentes, lo cual se define como (Siegesmund *et al.*, 2002; López-Doncel *et al.*, 2018). Este parámetro es un factor importante que define la resistencia de una roca (Přikryl & Török, 2010), por lo cual se calculó la anisotropía (A) para las pruebas de absorción y penetración de agua por capilaridad (López-Doncel *et al.*, 2018):

$$A = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{x_{\max}} \cdot 100 \quad (31)$$

donde  $x_{\max}$  y  $x_{\min}$  representan el valor máximo y mínimo respectivamente.

El cociente del valor w y valor b resulta en la capacidad de absorción de agua (Cap) de una roca:

$$\text{Cap} = \frac{\text{valor } w}{\text{valor } b} \quad (32)$$

Esta propiedad depende del tamaño de poro y la cantidad de poros accesibles para el agua (Siegesmund & Dürrast, 2014).

La expansión hídrica es provocada principalmente por la presencia de minerales arcillosos expansivos que se hidratan al entrar en contacto con el agua y depende en menor medida de la distribución de tamaño de poro (Weiss *et al.*, 2004; Ruedrich *et al.*, 2011; Wedekind *et al.*, 2013; Möller *et al.*, 2018). La expansión hídrica ( $E_{\text{híd}}$ ) se determinó según la metodología de López-Doncel *et al.* (2013), para lo cual se sumergieron completamente en agua los prismas y se midieron los cambios en

longitud durante un periodo de 1.5 horas (Fig. 59). Debido a que las variaciones de longitud son muy pequeñas ( $\pm 1 \times 10^{-2}$  mm) sus unidades se expresan en mm/m.

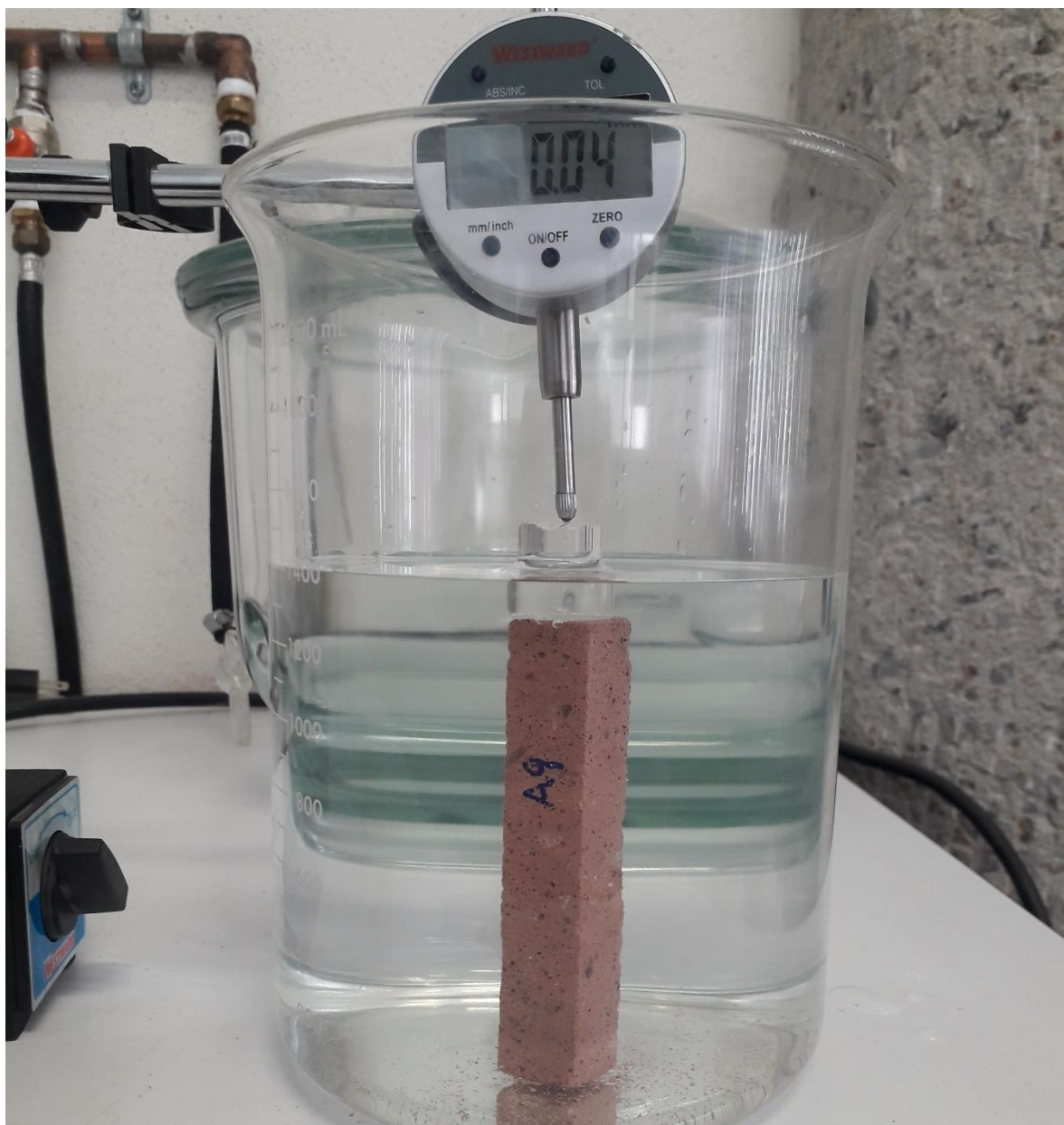


Figura 59. Prueba de expansión hídrica en donde se muestra la configuración usada para medir los cambios de longitud de una muestra. Se utilizó un cilindro inerte para que el micrómetro no estuviera en contacto directo con el agua.

Las rocas en una construcción están expuestas a ciertas condiciones de temperatura por la exposición a la luz solar directa o a cambios de temperatura por ciclos de calentamiento-enfriamiento relacionados con la posición de la fachada y de elementos que proporcionen sombra, además de los cambios de temperatura diarios y por temporada que finalmente causan la expansión de la roca y su deterioro por el gradiente térmico generado entre la superficie y su interior (Fookes *et al.*, 1988; Feilden, 2003; Weiss *et al.*, 2004; Goudie & Viles, 2010; McAllister *et al.*, 2017). Esta propiedad depende principalmente de las características mineralógicas de las rocas (López-Doncel *et al.*, 2018).

Para evaluar la expansión térmica ( $E_{\text{térm}}$ ) se usaron también prismas y se midieron los cambios de longitud causados por el aumento de temperatura (Fig. 60). En este



Figura 60. Prueba de expansión térmica en donde se observa la configuración elegida para medir los cambios de longitud de la muestra en dos ejes.

experimento se utilizó una plancha de calentamiento, sin embargo, aquí se tiene que hacer una aclaración importante: la temperatura mostrada no corresponde a la temperatura real de la plancha, sino que es menor (Tabla 26). La temperatura real está definida por la ecuación  $y = 0.7655x + 5.9091$  con un  $R^2$  de 0.9999. Tanto los resultados como las gráficas de esta prueba se muestran con los rangos reales de temperatura.

Tabla 26. Temperatura mostrada en la plancha y temperatura real calculada según el manual del fabricante.

Temperatura mostrada (°C)	Temperatura real (°C)
50	45
100	85
150	125
200	165
250	205
300	245
350	285
400	325
450	365
500	405
550	440

Para la prueba de expansión térmica se partió de la temperatura ambiental de entre 25-30°C y se aumentó la temperatura 5°C cada 10 minutos hasta alcanzar 90°C y se mantuvo en este valor por 10 minutos, para posteriormente disminuir 5°C cada 10 minutos hasta llegar al valor inicial de temperatura. Se empleó este gradiente de temperatura (0.5°C por minuto) porque así se simulan las condiciones naturales en una construcción (Koch & Siegesmund, 2006; Siegesmund & Dürrast, 2014). Durante la duración del experimento se midieron los cambios de longitud de la muestra en dos ejes diferentes y con estos datos se calculó el coeficiente de expansión térmica ( $\alpha$ ):

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L} \cdot \Delta T \quad (33)$$

donde L es la longitud original,  $\Delta L$  es el cambio de longitud (la resta de la longitud original menos la longitud final) y  $\Delta T$  es el intervalo de temperatura medido en grados Kelvin.

Otro parámetro derivado de esta prueba fue la deformación residual ( $\varepsilon_{rs}$ ) en mm/m que se refiere al cambio de longitud de la muestra después de que se dejó enfriar a temperatura ambiente ( $\Delta L_{rt}$ ) con respecto su longitud original (L):

$$\varepsilon_{rs} = \frac{\Delta L_{rt}}{L} \quad (34)$$

Es importante conocer el valor de deformación residual porque mientras más alto sea significa que las rocas tienen menor cohesión y, por lo tanto, serán más susceptibles al deterioro (López-Doncel *et al.*, 2018).

Las sales son una de las causas más importantes para el deterioro de las rocas (Benavente *et al.*, 2004, 2007; Török & Přikryl, 2010). Generalmente son transportadas por el agua que sube por capilaridad (Charola, 2000; Benavente *et al.*, 2001), aunque algunos de sus componentes pueden provenir de la mampostería, contaminación atmosférica, brisa marina, entre otros (Steiger, 2003; Doehne & Price, 2010; Goudie & Viles, 2010).

La cristalización de estas sales puede generar esfuerzos suficientemente grandes como para causar daños (Fookes *et al.*, 1988; Price, 1995; Benavente *et al.*, 2001; Siegesmund *et al.*, 2002; Cardell *et al.*, 2008). El crecimiento y daño de estos cristales depende de la solubilidad e hidratación de las sales, la saturación de la solución y tasa de evaporación (Benavente *et al.*, 2007; Doehne & Price, 2010; Yu & Oguchi, 2010a, b), lo cual está controlado por la presencia de agua o humedad y por aumento de la temperatura (Charola, 2000; Benavente *et al.*, 2001; Doehne, 2002; Steiger, 2003; Goudie & Viles, 2010). Se sugiere consultar los trabajos de Charola (2000), Benavente *et al.* (2001), Doehne (2002), Steiger (2003) y Yu & Oguchi (2010b) para una explicación detallada sobre los mecanismos de cristalización y daño por sales.

Lo anterior resalta la importancia del parámetro de resistencia a la cristalización de sal que se evaluó por el método de pérdida de peso seco (*dry weight loss*, DWL)

(López-Doncel *et al.*, 2016; Özşen *et al.*, 2017). Este consistió en sumergir una muestra cúbica en una solución al 10% de sulfato de sodio ( $\text{NaSO}_4$ ) durante 4 horas para después secarla en un horno a  $100^\circ\text{C}$  durante 20 horas. Después de este periodo se sacó del horno y se pesó para determinar qué tanto peso perdió (o ganó) con respecto a su peso seco original. Este conjunto de pasos se denomina ciclo y la DWL significa el porcentaje de peso perdido en un número determinado de ciclos que depende de la resistencia de la muestra a la presión causada por la cristalización de la sal.

Una característica importante sobre esta prueba es la utilización de sulfato de sodio por ser considerada como la sal más destructiva por el cambio de fase anhidra a hidratada, es decir, de thenardita a mirabilita (Steiger, 2003; Doehne & Price, 2010; Yu & Oguchi, 2010a). Otro aspecto notable es que la prueba de DWL tiene sus desventajas, por ejemplo, los patrones de deterioro son diferentes a los que se observan en las construcciones quizás por la distribución no homogénea de la sal (Doehne, 2002) y se han sugerido variaciones de esta prueba, por ejemplo, que la solución sea absorbida por capilaridad (Benavente *et al.*, 2001). Sin embargo, la amplia utilización de esta prueba permite comparar los resultados.

### 6.1.2. Cálculo de propiedades petrográficas y químicas relacionadas

En este capítulo también se incluyen las propiedades denominadas índice de empaquetamiento de cationes y peso atómico medio derivadas a partir de los resultados de la petrografía (véase la Tabla 4 de la sección “4.2.4. Petrografía” de los resultados de la Ignimbrita Cantera) y de los análisis geoquímicos de elementos mayores respectivamente. Estas propiedades inciden en la durabilidad de las rocas de construcción por su relación con la densidad (Ceryan *et al.*, 2008; Ceryan, 2012; Siegesmund & Dürrast, 2014).

El índice de empaquetamiento de cationes ( $k$ ) para un mineral se determina con la siguiente ecuación (Buntebarth, 1982):

$$k = \frac{c}{N_L V_M} \quad (35)$$

donde C es el número de cationes por mole,  $N_L$  es número de Avogadro y  $V_M$  el volumen molar. Alternativamente se puede calcular por:

$$k = \frac{C\rho}{M_M} \quad (36)$$

donde  $\rho$  es la densidad del mineral y  $M_M$  es su masa molecular. Por ejemplo, en el cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), el número de cationes es 1 (por el Si), su densidad es  $2.65 \text{ g/cm}^3$  y su masa molecular es 60.0838 unidades de masa atómica (peso atómico del Si + peso atómico del O multiplicado por dos;  $28.0850 + 2[15.9994]$ ).

El valor de k para una roca se calcula como (Buntebarth, 1982):

$$k = \sum_{i=1}^n x_i \cdot k_i \quad (37)$$

Esto significa que el valor k para una roca es la sumatoria de cada valor k de los minerales encontrados mediante el análisis petrográfico ( $k_i$ ) multiplicado por el porcentaje de cada fase mineral ( $x_i$ ). Esta propiedad fue calculada solamente para las muestras de la Ignimbrita Cantera porque están compuestas de diferentes minerales, mientras que las rocas de la Formación Chichén Itzá se componen de calcita básicamente y su análisis petrográfico se basó más bien en la identificación de los aloquímicos, no en su conteo.

El peso atómico medio (*mean atomic weight*, MAW) se calculó con la siguiente fórmula (Birch, 1961):

$$MAW = \left( \sum \frac{x_i}{m_i} \right)^{-1} \quad (38)$$

donde  $x_i$  es la concentración determinada por análisis geoquímicos de cada elemento por separado (no en su forma de óxido como comúnmente se reportan los resultados) en decimales, y  $m_i$  es la masa atómica de cada elemento. Este parámetro se calculó tanto para las muestras de la Ignimbrita Cantera como para las de la Formación Chichén Itzá.



## 6.2. Ignimbrita Cantera, San Luis Potosí

### 6.2.1. Densidad y porosidad

Los parámetros usados para el cálculo de la densidad y porosidad, así como los resultados de estas pruebas se proporcionan en la Tabla 27.

En total, estas pruebas se hicieron en 31 especímenes. Sin embargo, para simplificar los resultados, se decidió trabajar con el promedio de cada muestra (Tabla 28).

La densidad aparente es muy similar entre todas las muestras (exceptuando el valor bajo de A9), por lo que no parece existir una relación entre esta propiedad y la coloración. Por otra parte, la densidad de la matriz sí parece tener una relación con el color de las muestras. Específicamente, las rocas con una coloración del tipo rosa claro2 tienen los valores más bajos, seguidas por las naranjas, mientras que las de color rosa claro1, blanco y rosa oscuro tienen valores más altos similares. Esto significa que el grado de oxidación de la hematita y biotita puede influir en esta propiedad, causando valores más bajos en la densidad de matriz, aunque no tan pronunciados.

De manera similar, la porosidad es más baja en las muestras de color rosa claro2 y naranjas y más alta en las coloraciones rosa oscuro, blanca y rosa claro1. Parece que además de disminuir la densidad de la matriz, en el caso de las rocas con tonos naranjas, la oxidación puede causar cambios en porosidad, específicamente reduciendo el tamaño de poro, aunque esto solo sería confirmado pruebas de distribución de radio de poro.

Para la Ignimbrita Cantera, González-Sámano (2012) reportó valores de  $2.26 \text{ g/cm}^3$  y  $2.60 \text{ g/cm}^3$  para la densidad aparente y de la matriz respectivamente, mientras que para la porosidad obtuvo 12.83% con el mismo método usado en esta tesis y 12.07% por porosimetría de mercurio. Siegesmund *et al.* (2022) reportaron valores de densidad aparente de  $2.02 \text{ g/cm}^3$  y  $2.25 \text{ g/cm}^3$ , densidad de matriz de  $2.54 \text{ g/cm}^3$  y  $2.62 \text{ g/cm}^3$ , y porosidad de 20.5% y 14.4%. Como puede notarse, los valores de

Tabla 27. Parámetros de peso y resultados de los cálculos de densidad y porosidad.

Muestra	Peso seco (g)	Peso sumergido (g)	Peso húmedo en vacío (g)	Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad de matriz (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidad (%)
A3-A	469.55	286.31	566.51	1.68	2.56	34.60
A3-B	510.89	311.34	612.63	1.70	2.56	33.77
A3-C	491.30	299.44	591.11	1.68	2.56	34.22
A4-A	458.17	279.68	549.68	1.70	2.57	33.89
A4-B	478.99	292.55	575.66	1.69	2.57	34.15
A7	488.91	298.44	589.19	1.68	2.57	34.49
A8-A	492.35	298.89	591.27	1.68	2.54	33.83
A8-B	470.36	284.88	564.30	1.68	2.54	33.62
A8-C	480.31	290.96	575.59	1.69	2.54	33.48
A8-D	445.83	270.03	534.21	1.69	2.54	33.45
A9-A	514.41	313.72	632.25	1.61	2.56	36.99
A9-B	487.56	296.92	598.07	1.62	2.56	36.70
A9-C	437.07	266.09	536.64	1.62	2.56	36.80
A9-D	486.16	295.74	595.14	1.62	2.55	36.40
A9-E	483.87	294.70	590.90	1.63	2.56	36.13
A10-A	488.70	290.81	575.35	1.72	2.47	30.45
A10-B	486.96	291.92	574.33	1.72	2.50	30.94
A10-C	473.74	285.69	562.82	1.71	2.52	32.14
A10-D	491.04	296.07	583.65	1.71	2.52	32.20
A10-E	501.64	301.23	594.15	1.71	2.50	31.58
A10-F	490.10	292.72	577.17	1.72	2.48	30.61
A10-X	338.95	205.06	408.14	1.67	2.53	34.07
A10-Y	368.44	223.15	443.22	1.67	2.54	33.98
A11-A	490.61	296.56	587.49	1.69	2.53	33.30
A11-B	434.65	262.35	521.95	1.67	2.52	33.63
A11-C	438.35	264.64	523.20	1.70	2.52	32.82
A11-D	478.44	290.28	573.02	1.69	2.54	33.45
A12-A	470.38	283.15	555.57	1.73	2.51	31.27
A12-B	435.01	259.74	509.91	1.74	2.48	29.94
A12-C	494.57	298.75	586.59	1.72	2.53	31.97
A12-D	446.99	268.80	527.69	1.73	2.51	31.17

densidad aparente y porosidad de estos autores difieren grandemente de los presentados aquí. Al contrario, los resultados de López-Doncel *et al.* (2015) y Pötzl

Tabla 28. Promedio de los resultados de densidad y porosidad. Se incluye también la coloración registrada en campo para comparación.

Muestra	Coloración	Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad de matriz (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidad (%)
A3	Rosa claro1	1.69	2.56	34.20
A4	Rosa oscuro	1.70	2.57	34.02
A7	Blanco	1.68	2.57	34.49
A8	Naranja1	1.69	2.54	33.60
A9	Rosa claro1	1.62	2.56	36.60
A10	Rosa claro2	1.72	2.50	31.32
A11	Rosa claro2	1.69	2.53	33.30
A12	Naranja2	1.73	2.51	31.09

*et al.* (2022) coinciden mejor con los obtenidos aquí. Por ejemplo, reportaron valores de densidad de 2.33-2.61 g/cm<sup>3</sup> y porosidad de 17.88-34.14%, y densidad aparente de 1.78 g/cm<sup>3</sup>, densidad de matriz de 2.58 g/cm<sup>3</sup> y porosidad de 31.1% respectivamente. Además, López-Doncel *et al.* (2015) relacionaron los valores de estos parámetros de acuerdo con las tonalidades.

### 6.2.2. Absorción de agua

El parámetro para el cálculo de la absorción de agua en presión atmosférica, el resultado de este cálculo, de la absorción de agua en condiciones de vacío y del coeficiente de saturación se muestran en la Tabla 29.

Al igual que con los resultados de densidad y porosidad, se decidió calcular el promedio de la absorción de cada muestra para comparar con la coloración observada (Tabla 30). Ambas propiedades de absorción siguen la misma tendencia en todas las muestras, donde las que tienen los valores más altos de absorción a presión normal también tienen los valores más altos para la absorción en vacío. Siegesmund *et al.* (2022) encontraron valores de absorción en condiciones de presión normal de 4.8-8.5% y absorción en condiciones de vacío de 6.4-10.12%, los cuales son notablemente más bajos que los encontrados aquí. Sin embargo, los

Tabla 29. Parámetro de peso, resultados de absorción de agua y coeficiente de saturación.

Muestra	Peso húmedo (g)	Absorción en presión normal (%)	Absorción en vacío (%)	Coeficiente de saturación
A3-A	-	-	20.65	-
A3-B	591.54	15.79	19.91	0.79
A3-C	569.94	16.01	20.32	0.79
A4-A	-	-	19.97	-
A4-B	554.66	15.80	20.18	0.78
A7	573.66	17.33	20.51	0.84
A8-A	570.21	15.81	20.09	0.79
A8-B	544.92	15.85	19.97	0.79
A8-C	553.21	15.18	19.84	0.77
A8-D	-	-	19.82	-
A9-A	612.36	19.04	22.91	0.83
A9-B	579.86	18.93	22.67	0.84
A9-C	-	-	22.78	-
A9-D	577.81	18.85	22.42	0.84
A9-E	574.29	18.69	22.12	0.84
A10-A	559.37	14.46	17.73	0.82
A10-B	-	-	17.94	-
A10-C	546.43	15.34	18.80	0.82
A10-D	566.59	15.39	18.86	0.82
A10-E	576.20	14.86	18.44	0.81
A10-F	559.61	14.18	17.77	0.80
A10-X	394.54	16.40	20.41	0.80
A10-Y	430.38	16.81	20.30	0.83
A11-A	570.44	16.27	19.75	0.82
A11-B	507.36	16.73	20.09	0.83
A11-C	-	-	19.36	-
A11-D	554.55	15.91	19.77	0.80
A12-A	537.24	14.21	18.11	0.78
A12-B	494.69	13.72	17.22	0.80
A12-C	569.09	15.07	18.61	0.81
A12-D	-	-	18.05	-

valores que obtuvieron para el coeficiente de saturación (0.75-0.84) sí coinciden con los calculados en este trabajo. Similarmente, Pötzl *et al.* (2022) reportaron un valor de 14% de absorción de agua y un coeficiente de saturación de 0.77.

Tabla 30. Promedio de los resultados de absorción y coeficiente de saturación.

Muestra	Coloración	Absorción en presión normal (%)	Absorción en vacío (%)	Coeficiente de saturación
A3	Rosa claro1	15.90	20.29	0.79
A4	Rosa oscuro	15.80	20.18	0.78
A7	Blanco	17.33	20.51	0.84
A8	Naranja1	15.61	19.97	0.78
A9	Rosa claro1	18.88	22.53	0.84
A10	Rosa claro2	14.85	18.32	0.81
A11	Rosa claro2	16.30	19.87	0.82
A12	Naranja2	14.33	17.98	0.80

El coeficiente de saturación entre 0.75 y 0.90 indica que la Ignimbrita Cantera podría ser resistente a la presión que ejerce el agua al congelarse; si tuviera valores menores a 0.75 entonces definitivamente sería resistente a este fenómeno y si tuviera valores mayores a 0.90 entonces ciertamente no sería resistente (Benavente *et al.*, 2004; Siegesmund & Dürrast, 2014). Sin embargo, las temperaturas bajas extremas en San Luis Potosí no son habituales y no se llega al punto de congelación del agua, por lo que el uso de la Ignimbrita Cantera como material de construcción es adecuado en la ciudad.

Los resultados de la absorción de agua por capilaridad (valor w), así como la penetración (valor b) y la capacidad de absorción de agua se muestran en la Tabla 31 junto con el porcentaje de anisotropía. Esta prueba solo se realizó en ciertos especímenes de cada muestra, por lo que no fue necesario calcular el promedio. Cada destacar que los cubos de la Ignimbrita Cantera son homogéneos (como lo demuestra la anisotropía) y no presentan laminación distinguible, así que se asumió que el valor w más bajo corresponde a la absorción en el plano xy (eje Z), mientras que el valor w más alto corresponde a la absorción en el plano yz (eje X) (Fig. 61).

De acuerdo con los resultados de absorción por capilaridad, las muestras con los valores más altos pueden absorber 11-19 kg/(m<sup>2</sup>√h), lo cual significa que, por cada metro cuadrado en contacto con agua, las rocas de la Ignimbrita Cantera podrían absorber por capilaridad 11-19 kg de agua en una hora. La muestra con el valor más

Tabla 31. Resultados de absorción por capilaridad, penetración y capacidad de agua en dos ejes diferentes con sus anisotropías respectivas.

Muestra	Valor w (kg/[m <sup>2</sup> √h])			Valor b (kg/[m <sup>2</sup> √h])			Capacidad (kg/m <sup>3</sup> )		
	Z	X	A	Z	X	A	Z	X	A
A3-C	12.84	15.00	14.40	0.0375	0.0417	10.00	342.40	359.71	4.81
A4-B	13.27	14.59	9.05	0.0447	0.0496	16.81	296.87	294.15	0.91
A7	6.65	11.39	41.62	0.0195	0.0390	50.00	341.03	292.05	14.36
A8-B	4.79	5.04	4.96	0.0177	0.0205	25.00	270.62	245.85	9.15
A9-D	16.65	19.18	13.19	0.0461	0.0602	41.67	361.17	318.60	11.79
A10-A	12.43	13.44	7.51	0.0408	0.0447	8.73	304.66	300.67	1.31
A11-D	12.42	14.45	14.05	0.0450	0.0461	2.31	276.00	313.45	11.95
A12-C	11.64	12.47	6.66	0.0369	0.0443	4.00	315.45	281.49	10.76

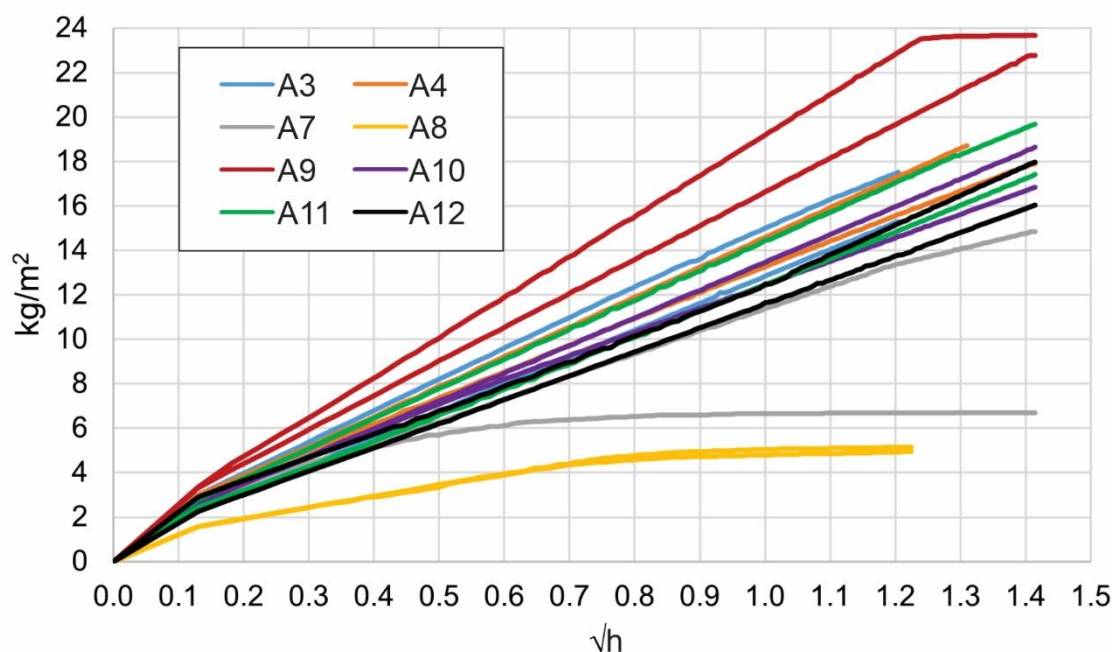


Figura 61. Resultado de la prueba de absorción por capilaridad. Cada muestra tiene dos líneas que representan sus absorciones en dos ejes. Nótese que la muestra A8 tiene una pendiente muy baja, llegando a la hora casi con el mismo valor de absorción. La muestra A7 tiene este comportamiento similar, pero solo para su eje Z.

bajo de absorción por capilaridad es la A8-B con cerca de 5 kg/(m<sup>2</sup>√h). Nuevamente, su coloración naranja podría indicar que la oxidación y precipitación de óxidos en la

matriz causaron que los poros capilares fueran rellenados parcialmente y esto generaría sus valores bajos de absorción. Los valores de absorción para esta coloración coinciden con los de Siegesmund *et al.* (2022), quienes obtuvieron valores de  $1.3\text{-}3.5 \text{ kg}/(\text{m}^2\sqrt{\text{h}})$  y  $2.7\text{-}5.1 \text{ kg}/(\text{m}^2\sqrt{\text{h}})$  para el plano xy y xz respectivamente. Los otros valores más bajos son los de las muestras A7 de color blanco y A12 de color naranja, con lo cual parece que procesos secundarios de meteorización/deterioro modifican la distribución de tamaño de poro. Pötzl *et al.* (2022) encontraron valores de  $7.1\text{-}9.4 \text{ kg}/(\text{m}^2\sqrt{\text{h}})$ , los cuales son relativamente más bajos que los obtenidos aquí.

Los resultados indicarían que, en general, la Ignimbrita Cantera tiene una distribución de poro mayormente de tamaño capilar ( $0.1 \mu\text{m} - 1 \text{ mm}$ ). Concordantemente, González-Sámano (2012) y Pötzl *et al.* (2022) reportaron que los poros capilares representan el 82% de la porosidad, mientras que Siegesmund *et al.* (2022) encontraron valores similares de 59-72% de poros capilares. López-Doncel *et al.* (2015) obtuvieron porcentajes altos para poros de  $0.1 \mu\text{m} - 1 \text{ mm}$ , es decir, tamaños adecuados para que se produzca la absorción por capilaridad.

Otra característica que tienen las muestras es que son bastante homogéneas, por lo que sus anisotropías están en el rango de 5-15% aproximadamente. Esto es cierto excepto para la muestra A7, pero esto se debe a que presenta una fractura que provoca que absorba más agua en el plano yz.

Durante las mismas pruebas se notó que la mayoría de las muestras pudieron absorber una gran cantidad de agua, en ocasiones saturando casi completamente los cubos (Fig. 62). Los valores de penetración representan la velocidad a la que las muestras absorben agua, siendo los más altos los de la muestra A9-D con un valor  $b$  de  $0.0602 \text{ m}/\sqrt{\text{h}}$ , es decir, absorbe cerca de 6 cm durante la primera hora.

El cociente de la absorción y penetración resulta en la capacidad de agua que una roca de construcción puede absorber por unidad de volumen. Los valores máximos (muestra A3-C) son cercanos a  $360 \text{ kg}/\text{m}^3$ , lo que significa que la Ignimbrita Cantera absorberá 360 kg de agua por cada metro cúbico durante la primera hora. Los



Figura 62. Muestra A4-B al finalizar la prueba de absorción de agua por capilaridad donde se nota cómo el agua logra saturar prácticamente todo el cubo.

valores mínimos son de aproximadamente  $245 \text{ kg/m}^3$ , en la muestra A8-B. La anisotropía calculada para la capacidad de agua demuestra una vez más que las muestras son bastante homogéneas y no es necesario acomodar los bloques de reemplazo de una manera en específico siempre que no tengan facturas visibles o un ordenamiento de sus componentes, por ejemplo, pómez.

### **6.2.3. Expansión hídrica y térmica**

Los resultados para la expansión hídrica y térmica, así como los demás parámetros térmicos se proporcionan en la Tabla 32.



Tabla 32. Resultados de expansión hídrica y térmica, coeficiente de expansión térmica, y deformación térmica residual.

Muestra	Coloración	$E_{\text{híd}}$ (mm/m)	$E_{\text{térm}}$ (mm/m)	$\alpha$ ( $10^{-6}\text{K}^{-1}$ )	$\epsilon_{\text{rs}}$ (mm/m)
A3	Rosa claro1	0.03	0.22	6.18	0.0000
A4	Rosa oscuro	0.08	0.40	11.01	0.0017
A8	Naranja1	0.03	0.28	7.80	0.0006
A9	Rosa claro1	0.04	0.31	8.42	0.0012
A10	Rosa claro2	0.00	0.36	10.05	0.0006
A11	Rosa claro2	0.00	0.35	9.74	0.0006
A12	Naranja2	0.10	0.11	3.17	-0.0006

Las muestras con la menor expansión hídrica son las de color rosa claro2, mientras que las que tienen mayor expansión son las de coloración rosa oscuro y naranja2. Valores similares fueron reportados por Pötzl *et al.* (2022) y Siegesmund *et al.* (2022) con valores mínimos de 0.10 mm/m-0.11 mm/m y máximos de 0.28-0.29 mm/m. Cabe destacar que sus valores son el resultado de la medición de la expansión en dos ejes, mientras que en este trabajo solo se hizo en uno solo, con lo cual se podrían haber obtenido valores más altos. Por otra parte, González-Sámano (2012) presentó valores máximos de 0.015 mm/m, los cuales están dentro del rango de los valores obtenidos aquí.

Mediante la difracción de rayos X se identificó la presencia de montmorillonita, con lo cual se explicaría la expansión hídrica, aunque la distribución de tamaño de poro podría también ser importante para provocar la expansión, específicamente microporosidad (Siegesmund & Dürrast, 2014). López-Doncel *et al.* (2015) mencionaron que la presencia de minerales arcillosos expandibles no es significativa en rocas de la Ignimbrita Cantera y Siegesmund *et al.* (2022) solo detectaron caolinita y valores bajos de capacidad de intercambio de cationes (*cation exchange capacity*, CEC), lo cual indica la poca presencia de minerales arcillosos. Al contrario, Pötzl *et al.* (2022) sí mencionan la presencia importante de esmectitas (montmorillonita) y una CEC de 6. Esto parece contradecir sus resultados y los de Siegesmund *et al.* (2022) porque obtuvieron valores prácticamente iguales de expansión hídrica, sin embargo, como se menciona al principio de este párrafo, la

explicación para esto es que esta propiedad no depende solamente de la presencia de minerales expansivos, sino también de la distribución de tamaño de poro.

Con respecto a la expansión térmica en el intervalo de temperatura de 30-90°C (Fig. 63), la muestra A12 de coloración naranja2 presenta los valores más bajos (nótese cómo, al contrario, tiene los valores más altos de expansión hídrica) y también tiene una deformación térmica residual negativa, es decir, se encogió. Según la petrografía y difracción de rayos X, esta muestra es la única que contiene calcita y, como este mineral se expande en un eje y se encoje en otro durante su exposición intervalos de temperatura de 0-85°C (Weiss *et al.*, 2004; Steiger *et al.*, 2014; Martinho & Dionísio, 2020), entonces su deformación térmica residual negativa tendría sentido porque esta muestra es también la única con esta característica. Por otra parte, la muestra A4 de coloración rosa oscuro tiene la mayor expansión térmica con 0.40 mm/m (tiene el segundo valor más alto de expansión hídrica) y también la mayor deformación térmica residual.

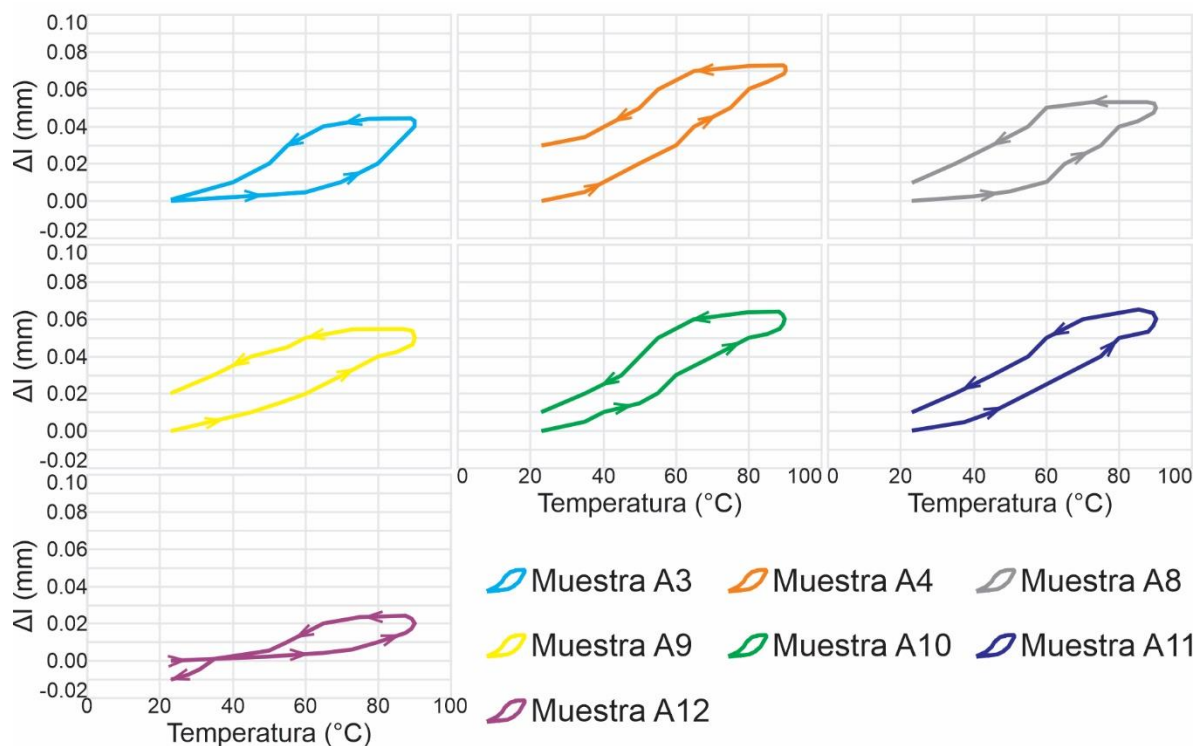


Figura 63. Gráficas de expansión térmica en el intervalo de 30-90-30°C.

Los coeficientes de expansión térmica siguen la misma tendencia que los valores de expansión térmica. Siegesmund *et al.* (2022) reportaron coeficientes de expansión térmica de  $6.0\text{-}9.2 \cdot 10^{-6}\text{K}^{-1}$  que están en el rango de valores encontrados en esta tesis.

#### 6.2.4. Resistencia a la cristalización de sal

Los resultados de la prueba de resistencia a la cristalización de sal por DWL se dan en la Tabla 33. Si bien la DWL se expresa para el ciclo 24, se decidió continuar con el experimento hasta que las muestras estuvieran completamente destruidas, lo cual pasó casi inmediatamente en el ciclo 26. La progresión de esta prueba se da en las Figuras 64 y 65.

Tabla 33. Resultados de la pérdida de peso para el ciclo 24.

Muestra	Coloración	DWL (%)
A3-A	Rosa claro1	66.07
A4-A	Rosa oscuro	92.26
A7	Blanco	96.24
A8-D	Naranja1	51.05
A9-C	Rosa claro1	70.17
A10-B	Rosa claro2	80.77
A11-C	Rosa claro2	66.02
A12-D	Naranja2	93.32

El comportamiento inicial de las muestras es el aumento de peso debido a la entrada de sal al sistema de poros, lo cual se ve representado en el ciclo número 4. Subsecuentemente, el peso sigue una tendencia general de disminución, con algunos aumentos causados por la pérdida de matriz que genera a su vez nuevos poros que son rellenados por la solución.

Es posible reconocer dos estilos de DWL en la Figura 64. El primero es una pérdida de peso constante y el otro es una caída abrupta en el peso. Las muestras que

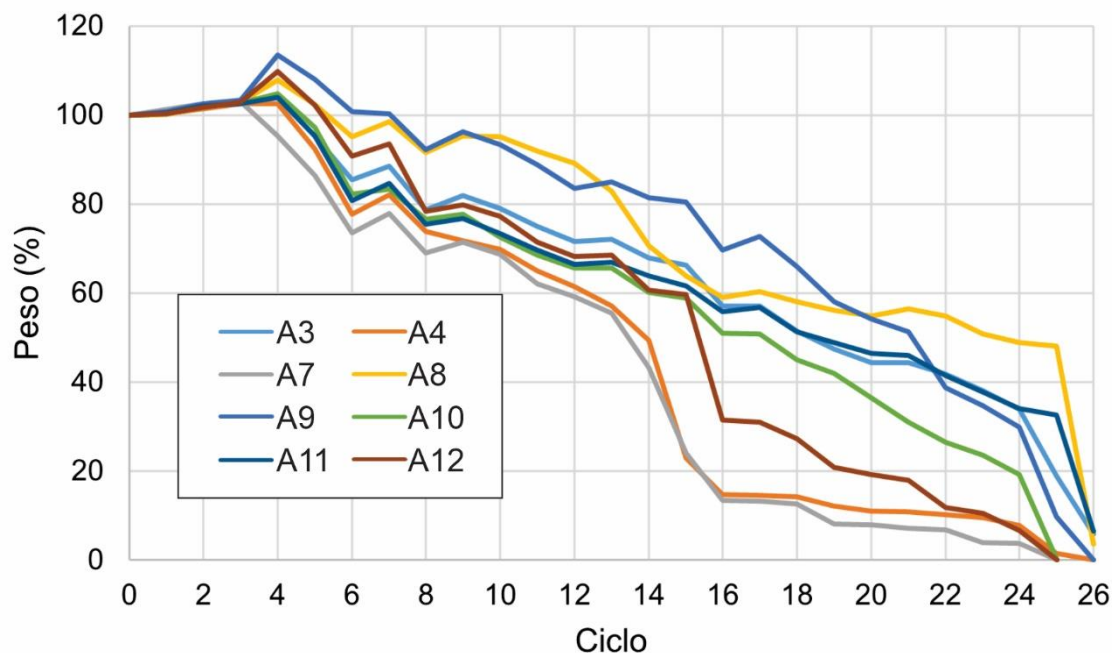


Figura 64. Progresión del experimento de resistencia a la cristalización de sal por DWL hasta que la completa destrucción de las muestras en el ciclo 26.

experimentan este último fenómeno son las A4, A7 y A12 de coloración rosa oscuro, blanco y naranja2 respectivamente, siendo las más susceptibles al daño por sal. Por otra parte, la variante de color naranja1 es más resistente relativamente, perdiendo solo cerca del 50%. Estos resultados indican que la Ignimbrita Cantera es muy susceptible al daño por sal. Esto coincide con lo encontrado en las Cajas del Agua, específicamente en las partes inferiores de la CAS donde la cristalización por sal provocó daños de desprendimiento.

De manera similar, López-Doncel *et al.* (2015) encontraron que la variedad de color blanco y la rosa oscuro son las que menos resistencia tienen a la presión por cristalización de sales. Siegesmund *et al.* (2022), por otra parte, reportan para su variedad de Ignimbrita Cantera que perdió apenas el 30% de su peso en el ciclo 83.



Figura 65. Evolución de las muestras desde el inicio antes de comenzar con la prueba de DWL hasta el ciclo 17.

#### 6.2.5. Índice de empaquetamiento de cationes y peso atómico medio

Si bien se realizaron los análisis petrográficos y de elementos mayores para todas las muestras de los afloramientos (A1-A12), solo se reporta el índice de empaquetamiento de cationes y el peso medio para aquellas muestras en las que sí se pudieron llevar a cabo otras pruebas petrofísicas con la finalidad de poder hacer correlaciones. Los resultados de ambos parámetros se muestran en la Tabla 34. La muestra A12 de coloración naranja2 es la que tiene los valores más altos para ambas propiedades, aunque es probable que esto se deba a la presencia de calcita. Las otras dos muestras que tienen los valores más altos de peso atómico medio son las A4 de color rosa oscuro y A8 de color naranja1. Estos resultados son otra evidencia más de que las coloraciones se deben a procesos de meteorización química que tienen relación con las propiedades físicas de las rocas.

Tabla 34. Resultados para el cálculo del índice de empaquetamiento de cationes y peso atómico medio.

Muestra	Coloración	Índice de empaquetamiento de cationes	Peso atómico medio
A3	Rosa claro1	4.60	20.73
A4	Rosa oscuro	4.58	20.78
A7	Blanco	4.61	20.74
A8	Naranja1	4.61	20.77
A9	Rosa claro1	4.54	20.73
A10	Rosa claro2	4.59	20.75
A11	Rosa claro2	4.64	20.73
A12	Naranja2	4.72	21.21

#### 6.2.6. Correlaciones entre propiedades

Con los resultados de las pruebas anteriores se calcularon los coeficientes de correlación (Tabla 35). Para la absorción por capilaridad, penetración y capacidad se tomaron en cuenta solamente los valores máximos, mientras que la expansión térmica no se correlacionó por ser redundante con el coeficiente de expansión térmica.

Como es de esperarse, la densidad aparente tiene una excelente correlación negativa con la porosidad y también con la absorción de agua tanto en condiciones normales como en vacío porque todas estas propiedades dependen directamente del porcentaje de porosidad. Estas correlaciones fueron reportadas igualmente por Pötzl *et al.* (2022).

Lo anterior se ve reflejado con la excelente correlación de la porosidad con ambos tipos de absorción, pero no con la absorción por capilaridad. Esto se podría explicar porque la porosidad calculada incluye básicamente todo el rango de poros a los que puede acceder el agua, incluyendo aquellos que por sus dimensiones no tienden a absorben agua por capilaridad, de los cuales entonces las rocas de la Ignimbrita Cantera deberían de tener cierto porcentaje importante. De hecho, Pötzl *et al.* (2022) encontraron una distribución bimodal de 82% de poros capilares y 18% de microporos, con un tamaño medio de poro de 0.20  $\mu\text{m}$ .

Tabla 35. Matriz de coeficientes de correlación con las correlaciones más importantes remarcadas: celeste excelente correlación, verde oscuro gran correlación, verde claro muy buena correlación, amarillo buena correlación, naranja claro correlación media.

-	$\rho_{bulk}$	$\rho_{matriz}$	$\phi$	$W_{atm}$	$W_{vac}$	S	Valor w	Valor b	Cap	$E_{hid}$	$\alpha$	$\epsilon_{rs}$	DWL	k	MAW
$\rho_{bulk}$	1.00	-0.61	-0.94	-0.96	-0.97	-0.55	-0.44	-0.39	-0.54	0.20	-0.23	-0.50	0.32	0.69	0.53
$\rho_{matriz}$	-	1.00	0.84	0.66	0.78	0.10	0.19	0.12	0.39	0.20	0.25	0.57	0.05	-0.53	-0.48
$\phi$	-	-	1.00	0.93	0.99	0.38	0.38	0.30	0.52	-0.09	0.28	0.58	-0.25	-0.72	-0.59
$W_{atm}$	-	-	-	1.00	0.94	0.69	0.47	0.43	0.60	-0.21	0.30	0.55	-0.13	-0.66	-0.55
$W_{vac}$	-	-	-	-	1.00	0.42	0.41	0.34	0.52	-0.13	0.30	0.59	-0.28	-0.73	-0.60
S	-	-	-	-	-	1.00	0.46	0.48	0.60	-0.34	0.09	0.08	0.23	-0.20	-0.20
Valor w	-	-	-	-	-	-	1.00	0.97	0.72	0.02	0.16	0.26	0.25	-0.36	-0.13
Valor b	-	-	-	-	-	-	-	1.00	0.60	0.14	0.19	0.31	0.39	-0.29	-0.01
Cap	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	-0.03	-0.25	-0.13	0.16	-0.26	-0.15
$E_{hid}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	-0.49	-0.13	0.64	0.40	0.74
$\alpha$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	0.87	-0.08	-0.68	-0.77
$\epsilon_{rs}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	-0.01	-0.79	-0.65
DWL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	0.25	0.42
k	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	0.83
MAW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00

La absorción y penetración por capilaridad no tienen correlaciones significativas con otras propiedades. Como se describió anteriormente, es probable que las correlaciones mejoraran si se tuvieran los datos de distribución de tamaño de poro.

La expansión hídrica tampoco parece estar relacionada con las demás propiedades, excepto relativamente de forma negativa con la expansión térmica y coeficiente de expansión térmica. Sin embargo, tiene buena correlación positiva con la DWL y el MAW. Esto comprueba que la expansión hídrica depende de la composición mineral y, por lo tanto, química de la roca, específicamente de la distribución de minerales arcillosos expansibles. La correlación con el índice de empaquetamiento de cationes no es significativa, aunque este parámetro refleja el contenido mineral. Esto se debe a que las arcillas no están representadas en el índice de empaquetamiento de cationes porque no se detectaron en la petrografía. Otro aspecto importante para considerar es que la expansión hídrica también podría depender de la distribución de tamaño de poro, particularmente del porcentaje de microporos (López-Doncel *et al.*, 2013; Siegesmund & Dürrast, 2014; Möller *et al.*, 2018).

De manera similar, la expansión térmica, coeficiente de expansión térmica, y deformación térmica residual tienen buenas y muy buenas correlaciones negativas con el índice de empaquetamiento de cationes y peso atómico medio. Debido a que estas propiedades dependen de la composición mineralógica y geoquímica de la roca, no sorprende que estén correlacionadas.

La DWL no se correlaciona significativamente con la porosidad ni con ninguna otra propiedad, lo que concuerda con los resultados de Siegesmund *et al.* (2022) quienes tampoco encontraron correlación entre DWL y valores de porosidad. Como se detalló anteriormente, la DWL solo tiene correlación con la expansión hídrica, lo que puede explicarse por la distribución de tamaño de poro, ya que ambas dependen parcialmente del porcentaje de microporos (López-Doncel *et al.*, 2016; Çelik & Aygün, 2019). Esto mismo encontraron Pötzl *et al.* (2022) y Siegesmund *et al.* (2022), el aumento de la expansión hídrica con una disminución de la resistencia a la cristalización por sal.



El valor k tiene correlación prácticamente con todas las propiedades de densidad, porosidad y absorción. También presenta una buena correlación con las propiedades térmicas, lo cual se puede interpretar como un control mineralógico. Por otra parte, el valor k tiene una gran correlación con el peso atómico medio porque la composición química depende de los minerales presentes. Finalmente, las correlaciones del peso atómico medio son muy similares a las que tiene el valor k.

En resumen, la porosidad es un parámetro importante relacionado con la densidad y las propiedades de absorción de agua, excepto con la absorción capilar, la cual no se correlacionó con ninguna otra propiedad. La DWL solo se relacionó con la expansión hídrica, y esta a su vez con el peso atómico medio. Las propiedades térmicas se relacionan con el índice de empaquetamiento de cationes y con el peso atómico medio. Las propiedades petrográficas y geoquímicas se correlacionan en diferentes grados con todas las demás, excepto con las relacionadas a la absorción capilar.

### **6.3. Formación Chichén Itzá, Zona Arqueológica de Chichén Itzá**

#### **6.3.1. Densidad y porosidad**

Los parámetros usados para los cálculos, así como los resultados de densidad aparente, densidad de matriz, y porosidad se proporcionan en la Tabla 36.

Tabla 36. Parámetros de peso y resultados del cálculo de densidad y porosidad.

Muestra	Peso seco (g)	Peso sumergido (g)	Peso húmedo en vacío (g)	Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad de matriz (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidad (%)
C1	682.37	426.49	712.34	2.39	2.67	10.48
C2	633.38	399.34	671.27	2.33	2.71	13.93
C3	542.78	338.67	608.70	2.01	2.66	24.41

La densidad aparente calculada para las muestras de caliza es de 2.01-2.39 g/cm<sup>3</sup>. López-Torres (2025) reportó valores de 1.95-2.43 g/cm<sup>3</sup> para 20 muestras de calizas recolectadas igualmente en la Zona Arqueológica de Chichén Itzá. Zarate-Barradas *et al.* (2005), en muestras de varias localidades de la Formación Chichén Itzá, encontraron valores de 2.03-2.52 g/cm<sup>3</sup>. Igualmente, Rodríguez-Pérez *et al.* (2021) calcularon valores de 1.76-2.51 g/cm<sup>3</sup>. Todos estos resultados concuerdan con los obtenidos en este trabajo. Maldonado *et al.* (2011) reportaron valores de 2.21-2.5 g/cm<sup>3</sup>, mientras que González-Gómez *et al.* (2015) obtuvieron valores de 1.98-2.36 g/cm<sup>3</sup>, aunque en ninguno de los dos trabajos se especifica la formación ni lugar del muestreo, por lo que sus resultados solo se discuten por motivo de comparación.

Todas las muestras de caliza tienen una densidad de matriz que concuerda con la densidad de la calcita ya que están conformadas principalmente por este mineral. Valores similares para la densidad de la matriz los obtuvo López-Torres (2025) con un promedio de 2.65 cm<sup>3</sup>. Por otra parte, May-Crespo *et al.* (2012) obtuvieron valores más bajos de 2.34-2.55 g/cm<sup>3</sup> para calizas no especificadas de la PY.

Las diferencias entre las muestras se distinguen más bien en los porcentajes de porosidad. La muestra C1 (bindstone) tiene la porosidad más baja y la C3 (bindstone) tiene la porosidad más alta. Esto coincide con lo observado en la petrografía, donde la laminación más gruesa de algas de C1 tiene menor porosidad fenestral que la laminación más delgada de C3 (véase la sección “4.3.3. Petrografía” de los resultados de la Formación Chichén Itzá). La muestra C2 puede representar la porosidad para una caliza homogénea. López-Torres (2025) obtuvo porcentajes de porosidad aproximadamente de 5-25% y Rodríguez-Pérez *et al.* (2021) valores de 2.46-27.82%. May-Crespo *et al.* (2012) reportaron valores muy bajos de 1.16-1.62%, mientras que González-Gómez *et al.* (2015) obtuvieron valores de 4-20%. Todos estos rangos de porcentaje de poros se explican por las diferentes microfacies y sus respectivos tipos de porosidad (Tucker, 2001; Flügel, 2010).

### 6.3.2. Absorción de agua

Los resultados de las pruebas de absorción de agua y propiedades relacionadas se muestran en la Tabla 37.

Tabla 37. Parámetro de peso y resultados de los experimentos de absorción y coeficiente de saturación.

Muestra	Peso húmedo (g)	Absorción en presión normal (%)	Absorción en vacío (%)	Coeficiente de saturación
C1	699.68	2.54	4.39	0.58
C2	656.25	3.61	5.98	0.60
C3	604.20	11.32	12.14	0.93

Ambas propiedades de absorción tienen la misma tendencia: los valores más bajos son los de la muestra C1 y los más altos en la muestra C3. De las dos propiedades, la absorción en condiciones de vacío es mayor que la absorción en condiciones de presión atmosférica normal. López-Torres (2025) reportó porcentajes de absorción al vacío de 2.11-13.12%, mientras que Zarate-Barradas *et al.* (2005) y Rodríguez-Pérez *et al.* (2021) evaluaron la absorción a presión normal logrando valores de 0.86-7.57% y 1.07-14.93% respectivamente. Los resultados de estos autores están en concordancia con el rango de los valores encontrados en este trabajo.

Los valores del coeficiente de saturación son menores a 0.75 para las muestras C1 y C2, lo cual significa que son resistentes al deterioro y a la presión que ejerce el agua al congelarse. La muestra C3 tiene un valor de saturación mayor a 0.90, así que no se considera como resistente. Se debe tomar en cuenta que el coeficiente de saturación no es aplicable si la densidad aparente es mayor a 2.6 g/cm<sup>3</sup> (Siegesmund & Dürrast, 2014), aunque para las calizas de la Formación Chichén Itzá este no es el caso. Además, incluso si el coeficiente de saturación no fuera aplicable para estas rocas, esto no tendría un impacto en su utilización, ya que, por el clima y posición geográfica, las rocas no están expuestas a condiciones de baja temperatura como para que el agua en los poros se congele.

Los resultados de las pruebas relacionadas con la absorción de agua por capilaridad se dan en la Tabla 38. La muestra C1 absorbió una mayor cantidad de agua en el eje Z (paralelo a la laminación) y menos en el eje X (perpendicular a la laminación). Este comportamiento anómalo se debe a que la superficie de absorción que se puso en contacto con agua era esencialmente caliza mudstone (wackestone-packstone) con mayor porosidad que la laminación de algas con porosidad fenestral que se puso en contacto con la superficie del agua para el otro eje. La muestra C2 con un valor similar de porosidad absorbió aproximadamente la misma cantidad de agua. Al contrario de la muestra C1, la muestra C3 absorbió más en el eje X con la laminación de algas en vertical. La diferencia es que la porosidad fenestral de su laminación es mayor que en la muestra C1 y por eso absorbió más. Los valores de penetración siguen las mismas tendencias de absorción. Rodríguez-Pérez *et al.* (2021) también reconocieron que las variaciones en la absorción por capilaridad dependen de la textura y porosidad de las calizas.

Tabla 38. Resultados de absorción capilar, penetración y capacidad de agua en dos diferentes ejes y sus anisotropías respectivas.

Muestra	Valor w (kg/[m <sup>2</sup> √h])			Valor b (kg/[m <sup>2</sup> √h])			Capacidad (kg/m <sup>3</sup> )		
	Z	X	A	Z	X	A	Z	X	A
C1	1.21	1.02	15.70	0.0030	0.0030	0.00	403.33	340.00	15.70
C2	0.83	1.31	36.64	0.0050	0.0040	30.00	166.00	327.50	49.31
C3	2.70	4.62	41.56	0.0093	0.0188	35.31	290.32	245.74	15.35

La capacidad es bastante alta, pero esto se debe a los valores extremadamente bajos de la penetración, así que este resultado parece no ser representativo. Además, los valores de absorción por capilaridad son válidos solamente si tienen pendientes durante la primera hora (Siegesmund & Dürrast, 2014), lo cual no es el caso de las rocas de la Formación Chichén Itzá (Fig. 66), con lo cual parece que la capacidad está sobrevalorada.

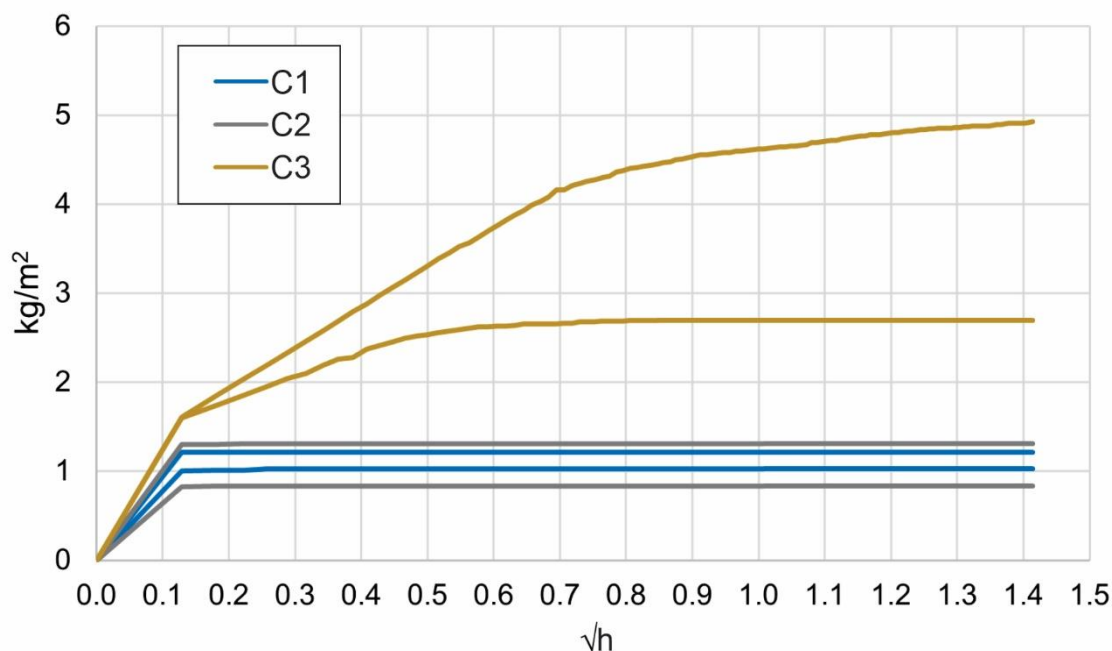


Figura 66. Resultado de la prueba de absorción por capilaridad. Cada muestra tiene dos líneas que representan sus absorciones en dos ejes. Nótese cómo las muestras C1 y C2 no tienen pendiente, por lo que las propiedades calculadas pueden resultar en valores sobreestimados.

### 6.3.3. Resistencia a la cristalización de sal

Los resultados de la DWL son negativos, es decir, no hubo pérdida, sino un aumento en el peso que se debe a la sal que ingresó en los poros (Tabla 39). Ultimadamente, las rocas de la Formación Chichén Itzá son resistentes a la presión que ejercen los cristales de sal, aunque esto se comprobó solo hasta el ciclo 24 (Figs. 67 y 68). Sin

Tabla 39. Resultados de la pérdida de peso para el ciclo 24.

Muestra	Coloración	DWL (%)
C1	Bindstone	-0.78
C2	Mudstone	-1.40
C3	Bindstone	-2.15

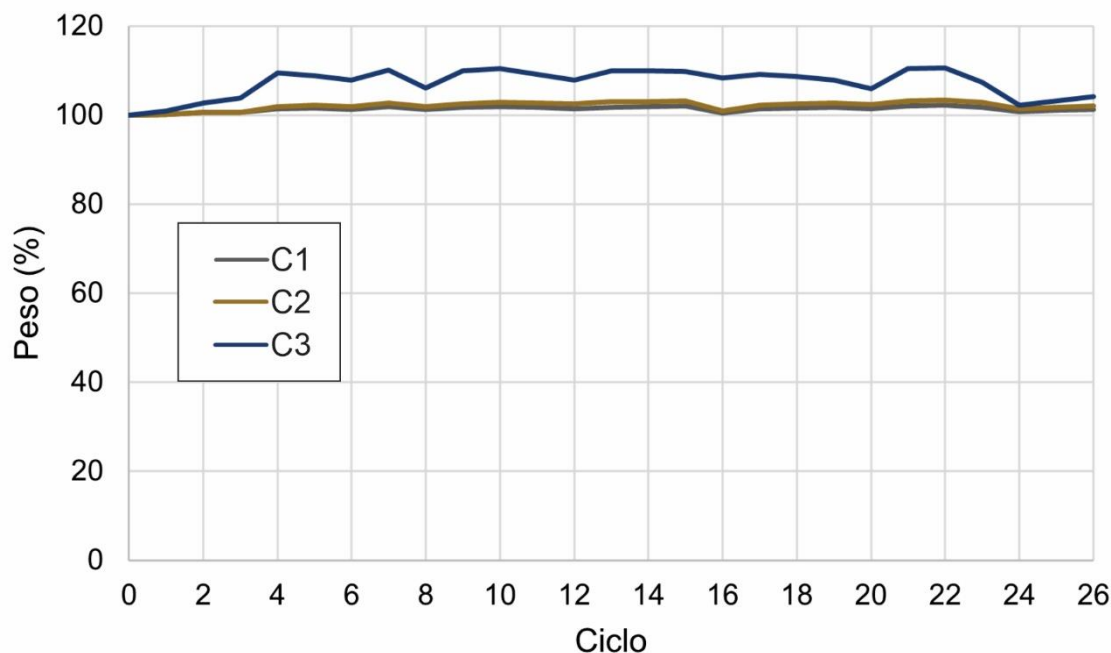


Figura 67. Progresión del experimento de resistencia a la cristalización de sal por DWL hasta el ciclo 26.

embargo, López-Torres (2025) efectuó 100 ciclos y demostró que, efectivamente, esta roca es resistente y no tuvo pérdida de peso, más bien un aumento de 10 g en total.

Si bien no se detectaron eflorescencias en la pared oeste del TN (véase la Figura 24 en la sección “4.3.2. Templo Norte del Gran Juego de Pelota” en el capítulo 4 de resultados litológicos y deterioro), López-Torres (2025) reportó que en algunos alveolos en brechas con erosión sí existe eflorescencia en el TN producto de los morteros de cemento de intervenciones anteriores. La presencia de sal, entonces, parece que no es el mecanismo principal de deterioro en este monumento. Otras estructuras en la Zona Arqueológica de Chichén Itzá si presentan deterioro relacionado con la cristalización de sal, especialmente en otros contextos, como son los elementos pictóricos de la subestructura del Templo de los Guerreros (García-Solís *et al.*, 2025).

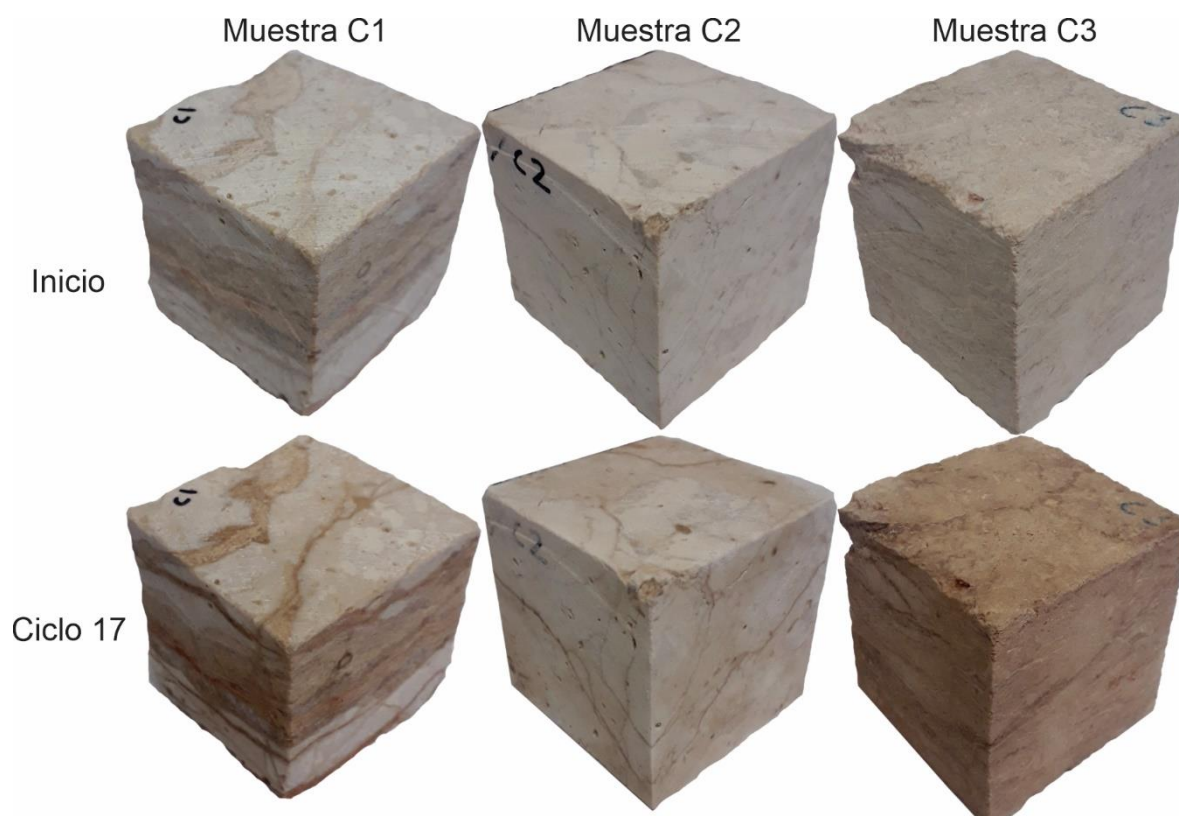


Figura 68. Las muestras de calizas desde el inicio antes de comenzar con la prueba de DWL hasta el ciclo 17 permanecen prácticamente sin cambios perceptibles.

#### 6.3.4. Peso atómico medio

Los resultados del cálculo del peso atómico medio se proporcionan en la Tabla 40. El peso atómico medio esencialmente varía con el contenido de CaO, es decir, calcita. Considerando que la muestra C2 es la más pura, por eso tiene los valores más altos de MAW. La muestra C1 tiene láminas más gruesas de algas, pero en proporción se podría decir que la matriz micrítica abarca un mayor porcentaje, al

Tabla 40. Resultados para el cálculo del peso atómico medio.

Muestra	Clasificación	Peso atómico medio
C1	Bindstone	27.91
C2	Mudstone	27.97
C3	Bindstone	27.78

contrario de la muestra C3, compuesta por laminación fina que representa una mayor proporción, mostrando por lo tanto los valores más bajos de MAW, aunque no significativamente menores que las demás muestras.

### **6.3.5. Correlaciones entre propiedades**

Con los resultados de todas las pruebas se calcularon los coeficientes de correlación que se muestran en la Tabla 41. Para la absorción por capilaridad, penetración y capacidad se tomaron en cuenta los valores máximos.

La densidad aparente, por definición, varía de acuerdo con la porosidad, por lo que tiene una excelente correlación con todas las propiedades que tienen que ver con la absorción, además, tiene una excelente correlación positiva tanto con la DWL y con el MAW. Una excelente correlación entre densidad aparente, porosidad y absorción fue encontrada también por Rodríguez-Pérez *et al.* (2021). Al contrario, aunque la densidad de la matriz se relaciona con estas mismas propiedades, su coeficiente de correlación es menor, excepto para el peso atómico medio, lo cual es de esperarse, ya que el peso atómico medio depende de la geoquímica y mineralogía, en este caso, puramente calcita.

La porosidad, al igual que la densidad aparente, tiene una excelente correlación con todas las demás propiedades. Esto se repite con los diferentes tipos de absorción porque dependen de la porosidad. Rodríguez-Pérez *et al.* (2021) llegaron a la conclusión de que la porosidad controla definitivamente las propiedades de absorción.

La DWL se correlaciona excelentemente con todas las propiedades, excepto con la densidad de la matriz. Específicamente, la pérdida de peso, o en este caso, ganancia de peso, se debe a la incorporación de sal en los poros sin pérdida de matriz, con lo cual la correlación queda explicada.

El MAW indica que la geoquímica de la caliza está correlacionada con sus propiedades, tal y como se pudo interpretar a partir de los resultados petrográficos y en los resultados de la GRS.



Tabla 41. Matriz de coeficientes de correlación con las correlaciones más importantes remarcadas: celeste excelente correlación, verde oscuro gran correlación, verde claro muy buena correlación, amarillo buena correlación, naranja claro correlación media.

	$\rho_{bulk}$	$\rho_{matriz}$	$\phi$	$W_{atm}$	$W_{vac}$	S	Valor w	Valor b	Cap	DWL	MAW
$\rho_{bulk}$	1.00	0.54	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-0.99	-1.00	0.84	0.95	0.90
$\rho_{matriz}$	-	1.00	-0.46	-0.57	-0.50	-0.62	-0.63	-0.56	0.00	0.24	0.86
$\phi$	-	-	1.00	0.99	1.00	0.98	0.98	0.99	-0.89	-0.97	-0.85
$W_{atm}$	-	-	-	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	-0.82	-0.94	-0.91
$W_{vac}$	-	-	-	-	1.00	0.99	0.99	1.00	-0.87	-0.96	-0.87
S	-	-	-	-	-	1.00	1.00	1.00	-0.79	-0.91	-0.93
Valor w	-	-	-	-	-	-	1.00	1.00	-0.77	-0.90	-0.94
Valor b	-	-	-	-	-	-	-	1.00	-0.82	-0.94	-0.91
Cap	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	0.97	0.51
DWL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	0.71
MAW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00

## 7. Propiedades geoquímicas

En este capítulo se describen los resultados de los análisis geoquímicos de elementos mayores, traza y tierras raras de todas las muestras (véase la Tabla 2 en la sección “4.1.3. Muestreo” para la nomenclatura y detalles de cada muestra), así como de los índices de meteorización calculados a partir de las concentraciones de elementos mayores.

Las propiedades geoquímicas de las rocas de construcción son importantes para comprobar la interpretación que se efectuó de la GRS, ya que con estas se puede determinar el grado de meteorización mediante índices de meteorización, además de variaciones en las concentraciones de los elementos y radioelementos causadas por procesos de meteorización.

Debido a que los procesos de meteorización química alteran las propiedades petrofísicas de las rocas (Fookes *et al.*, 1988; Price, 1995; Siegesmund *et al.*, 2002; Přikryl, 2007; Pola *et al.*, 2012; Chiu & Ng, 2014; White & Buss, 2014), por ejemplo, en carbonatos, la disolución causa un aumento en la porosidad, es posible correlacionar las propiedades químicas de las rocas de construcción con sus parámetros físicos y finalmente con los datos obtenidos por GRS.

### 7.1. Materiales y métodos

Para los análisis geoquímicos se utilizaron las porciones trituradas restantes de la difracción de rayos X. Se obtuvo la concentración de elementos mayores en el Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México mediante fluorescencia de rayos X (XRF) con un espectrómetro RIGAKU ZSX Primus II, así como también en los laboratorios de Bureau Veritas en Vancouver, Canadá, por espectroscopia de emisión de plasma acoplado inductivamente (*inductively coupled plasma emission spectroscopy*, ICP-ES).

Los elementos mayores, al reportarse como porcentajes, no son libres de variar infinita ni libremente, sino que solo lo hacen con valores de 0-100% y las variaciones

dependen de las concentraciones de las demás partes, por lo tanto, no se pueden aplicar las mediciones estadísticas comunes (von Eynatten *et al.*, 2003; von Eynatten, 2004; van den Boogaart & Tolosana-Delgado, 2013; Rollinson & Pease, 2021). Por ejemplo, considérese una composición solo con los óxidos SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y K<sub>2</sub>O en una muestra con un peso de 15 g de los cuales 5 g pertenecen a cada elemento, es decir, 33.33% para cada uno. Si se le agregan 5 g más de SiO<sub>2</sub> entonces el peso de la muestra es de 20 g, siendo 10 g del SiO<sub>2</sub> y 5 g aún para el Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y K<sub>2</sub>O, pero cambia el porcentaje de 50% para el primero y 25% para los otros dos óxidos. En realidad, el único elemento que aumentó fue el SiO<sub>2</sub>, pero al estar los datos expresados porcentaje, cambió también la concentración de los otros dos elementos.

Por esta razón, las concentraciones geoquímicas, al ser datos composicionales, deben de ser transformadas. Aitchison (1986) introdujo la transformación cociente logarítmico aditivo (*additive log-ratio transformation*, alr) y la transformación cociente logarítmico centrado (*centered log-ratio transformation*, clr). Posteriormente, Egozcue *et al.* (2003) propusieron la transformación cociente logarítmico isométrico (*isometric log-ratio transformation*, ilr). La alr tiene ciertas limitantes (Egozcue *et al.*, 2003; Egozcue & Pawlowsky-Glahn, 2011; van den Boogaart & Tolosana-Delgado, 2013) por lo que se sugiere emplear cualquiera de las transformaciones clr o ilr dependiendo del objetivo (Rollinson & Pease, 2021). Aquí, la conversión de las concentraciones geoquímicas se realizó por medio de la transformación clr con la siguiente fórmula (Aitchison, 1986):

$$clr = [\ln\left(\frac{SiO_2}{M_{geo}}\right), \ln\left(\frac{Al_2O_3}{M_{geo}}\right), \ln\left(\frac{Fe_2O_3}{M_{geo}}\right) \dots \ln\left(\frac{LOI}{M_{geo}}\right)] \quad (39)$$

donde ln es el logaritmo natural, SiO<sub>2</sub> y los demás óxidos representan las concentraciones ajustadas para cada óxido y pérdida por ignición (*loss on ignition*, LOI), M<sub>geo</sub> es la media geométrica que se calcula como (Egozcue & Pawlowsky-Glahn, 2011):

$$M_{geo} = (\prod_{i=1}^D x_i)^{\frac{1}{D}} = \sqrt[D]{x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot \dots x_D} \quad (40)$$

donde D es el número de componentes, es decir, el número de óxidos,  $x_1, x_2 \dots x_D$  son las concentraciones ajustadas en porcentaje de cada óxido.

Para interpretar los valores transformados se usó el análisis de componentes principales (*principal component analysis*, PCA). Este método permite encontrar dependencias entre las variables, separarlas en componentes no correlacionados y reducir el número de variables y se basa en encontrar vectores propios (*eigenvectors*) de la matriz de covarianza (o de correlación) que son los componentes principales (Everitt & Dunn, 2001; Rollinson & Pease, 2021). El primer componente principal (PC1) explica la mayoría de la varianza, seguido por el segundo componente principal (PC2) y así sucesivamente (Trauth, 2021).

El PCA se llevó a cabo en el programa MATLAB en donde se calculó la matriz de covarianza de los datos transformados por clr y se determinaron los vectores propios de esta matriz. Detalles sobre el análisis de datos composicionales, transformaciones, componentes principales y ejemplos prácticos en MATLAB se pueden encontrar en Aitchison (1986), Egozcue *et al.* (2003), Egozcue & Pawlowsky-Glahn (2011), van den Boogaart & Tolosana-Delgado (2013), y Trauth (2021).

Los elementos mayores también se utilizaron para calcular el peso atómico medio (véase la sección “6.1.2. Cálculo de propiedades petrográficas y químicas relacionadas”), para la clasificación de las ignimbritas en el diagrama TAS (*total alkali-silica*) (Le Bas *et al.*, 1986) y para índices de meteorización química. Debido a que en las muestras de la Ignimbrita Cantera se registró la presencia de carbonatos en la petrografía y difracción de rayos X (véanse las secciones “4.2.4. Petrografía” y “4.2.5. Difracción de rayos X”), fue necesario hacer correcciones para calcular adecuadamente los índices de meteorización, ya que estos requieren emplear solo el CaO en la estructura de silicatos. La corrección se logró con las concentraciones de carbono inorgánico que se obtuvieron en los laboratorios de Bureau Veritas por el método de coulombimetría. Se usó la fórmula de Fedo *et al.* (1995) para separar el CaO de los silicatos, CaO de la calcita y CaO del apatito:

$$CaO^* = CaO - CO_2 - \left(\frac{10}{3} * P_2O_5\right) \quad (41)$$

donde  $CaO^*$  son los moles de calcio pertenecientes a los silicatos,  $CaO$  son los moles del calcio obtenido originalmente,  $CO_2$  son los moles del carbono que representan al calcio perteneciente a la calcita,  $P_2O_5$  son los moles del fósforo que representan al calcio perteneciente al apatito. Entonces, el  $CaO$  perteneciente a los demás minerales no silicatos ( $CaO_{otros}$ ) se calculó de la siguiente manera:

$$CaO_{otros} = CaO - CaO^* \quad (42)$$

Una vez es obtenido el  $CaO^*$ , se calcularon los siguientes índices de meteorización: índice de meteorización WIP (*index of weathering*) de Parker (1970), índice químico de alteración (*chemical index of alteration*, CIA) de Nesbitt & Young (1982), índice químico de meteorización (*chemical index of weathering*, CIW) de Harnois (1988), índice de alteración de plagioclasas (*plagioclase index of alteration*, PIA) de Fedo *et al.* (1995), índice de meteorización MFW (*mafic-felsic-weathering*) de Ohta & Arai (2007), valor químico de alteración (*chemical proxy of alteration*, CPA) de Buggle *et al.* (2011), índice de meteorización robusta MFRW (*mafic-felsic-robust weathering*) de Cho & Ohta (2022), índice AC (*alumina-to-calcium ratio*) de Chen *et al.* (2023).

A continuación, se proporcionan las fórmulas y una breve discusión de cada uno de los índices empleados. Para una evaluación detallada sobre índices de meteorización se sugiere consultar los trabajos de Gupta & Rao (2001), Duzgoren-Aydin *et al.* (2002), Duzgoren-Aydin & Aydin (2003), Price & Velbel (2003) y Fu *et al.* (2023).

El WIP se basa en la movilidad del sodio, magnesio, calcio y potasio por procesos de meteorización con respecto a la fuerza de enlace que tienen con el oxígeno (Parker, 1970). Se calculó con los moles de los óxidos y la fuerza de enlace de la siguiente manera:

$$WIP = \left( \frac{2Na_2O}{0.35} + \frac{MgO}{0.90} + \frac{2K_2O}{0.25} + \frac{CaO^*}{0.70} \right) \times 100 \quad (43)$$

El CIA es una medida del grado de meteorización de feldespatos de potasio y plagioclasas por pérdida de calcio, sodio y potasio con respecto al aluminio que se asume estable (Nesbitt & Young, 1982). Para su cálculo también se usaron moles de los óxidos como sigue:

$$CIA = \left( \frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O} \right) \times 100 \quad (44)$$

El CIW es similar al CIA, pero elimina del cálculo al K<sub>2</sub>O porque el potasio puede estar presente en productos de meteorización (Harnois, 1988). Este índice se calculó empleando moles con la fórmula:

$$CIW = \left( \frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O} \right) \times 100 \quad (45)$$

El PIA es otro intento, al igual que el CIW, de corregir los valores anormales de potasio, pero en este caso por metasomatismo, así que su formulación implica la resta del K<sub>2</sub>O y monitorea entonces solamente la alteración de plagioclasas (Fedó *et al.*, 1995). Se calculó con moles de los óxidos como sigue:

$$PIA = \left( \frac{Al_2O_3 - K_2O}{Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O - K_2O} \right) \times 100 \quad (46)$$

El índice MFW se construyó con una base de datos de rocas no alteradas y sus perfiles de meteorización utilizando la técnica de PCA para evaluar el avance de la meteorización tanto de rocas máficas como félsicas incluyendo más óxidos de los que comúnmente son usados en los índices de meteorización (Ohta & Arai, 2007). Propiamente, el grado de meteorización está dado por el valor W, mientras que los valores M y F indican la composición original de las rocas máficas o félsicas respectivamente (Ohta & Arai, 2007). Las fórmulas son las siguientes y se calcularon, a diferencia de los demás índices, con los óxidos en porcentaje:

$$W = 0.203 \times \ln(SiO_2) + 0.191 \times \ln(TiO_2) + 0.296 \times \ln(Al_2O_3) + 0.215 \times \ln(Fe_2O_3) - 0.002 \times \ln(MgO) - 0.448 \times \ln(CaO^*) - 0.464 \times \ln(Na_2O) + 0.008 \times \ln(K_2O) - 1.374 \quad (47)$$

$$M = -0.395 \times \ln(SiO_2) + 0.206 \times \ln(TiO_2) - 0.316 \times \ln(Al_2O_3) + 0.160 \times \ln(Fe_2O_3) + 0.246 \times \ln(MgO) + 0.368 \times \ln(CaO^*) + 0.073 \times \ln(Na_2O) - 0.342 \times \ln(K_2O) + 2.266 \quad (48)$$

$$F = 0.191 \times \ln(SiO_2) - 0.397 \times \ln(TiO_2) + 0.020 \times \ln(Al_2O_3) - 0.375 \times \ln(Fe_2O_3) - 0.243 \times \ln(MgO) + 0.079 \times \ln(CaO^*) + 0.392 \times \ln(Na_2O) + 0.333 \times \ln(K_2O) - 0.892 \quad (49)$$

El CPA es similar al CIW, pero elimina del cálculo el potasio por las mismas razones que el CIW y el calcio para evitar la posible influencia del calcio que se encuentra en carbonatos (Buggle *et al.*, 2011). Se calculó utilizando moles como aparece a continuación:

$$CPA = 100 \times \left( \frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + Na_2O} \right) \quad (50)$$

El índice MFRW siguió el mismo procedimiento de elaboración que el MFW, pero quitando de sus fórmulas el SiO<sub>2</sub> y CaO porque pueden pertenecer a sedimentos biogénicos (Cho & Ohta, 2022). Sus fórmulas son las siguientes y se emplean los óxidos en porcentaje:

$$RW = 0.152 \times \ln(TiO_2) + 0.198 \times \ln(Al_2O_2) + 0.148 \times \ln(Fe_2O_3) - 0.152 \times \ln(MgO) - 0.503 \times \ln(Na_2O) + 0.156 \times \ln(K_2O) - 0.506 \quad (51)$$

$$M = 0.051 \times \ln(TiO_2) - 0.120 \times \ln(Al_2O_2) + 0.018 \times \ln(Fe_2O_3) + 0.33 \times \ln(MgO) + 0.193 \times \ln(Na_2O) - 0.392 \times \ln(K_2O) + 0.330 \quad (52)$$

$$F = -0.204 \times \ln(TiO_2) - 0.000 \times \ln(Al_2O_2) - 0.166 \times \ln(Fe_2O_3) - 0.177 \times \ln(MgO) + 0.311 \times \ln(Na_2O) + 0.236 \times \ln(K_2O) + 0.176 \quad (53)$$

El índice AC está ideado para evaluar la meteorización de rocas carbonatadas con base la pérdida de calcio en comparación con el aluminio (Chen *et al.*, 2023). Su fórmula es la relación entre ambos óxidos en moles:

$$AC = \frac{Al_2O_3}{CaO} \quad (54)$$

Además de los elementos mayores se obtuvieron las concentraciones de los elementos traza y tierras raras (*rare-earth elements*, REE) en los laboratorios de Bureau Veritas por ICP-ES.

Para evaluar las tendencias de los elementos traza y REE, los valores de las muestras de la Ignimbrita Cantera se normalizaron con valores de la corteza continental superior (*upper continental crust*, UCC) de Rudnick & Gao (2003), mientras que los valores las muestras de la Formación Chichén Itzá se normalizaron con valores de la lutita australiana del post-Arcaico (*post-Archaean Australian shale*,

PAAS) de Taylor & McLennan (1985) y Pourmand *et al.* (2012) como se sugiere para estudios de calizas (Madhavaraju *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2018; Zhao *et al.*, 2022).

## **7.2. Ignimbrita Cantera, San Luis Potosí**

### **7.2.1. Concentraciones de elementos mayores**

Las concentraciones para los elementos mayores se proporcionan en la Tabla 42. Compárense la coincidencia con los resultados obtenidos por Labarthe-Hernández *et al.* (1982).

Las concentraciones originales fueron recalculadas para que resultaran en sumas exactas del 100% (Tabla 43). Si bien es común retirar las concentraciones de LOI, aquí se decidió dejarlas para incluirlas dentro del PCA.

Ya con los valores ajustados, se procedió a calcular el  $\text{CaO}^*$ . Las únicas muestras que tuvieron valores de  $\text{CO}_2$  derivados de los análisis geoquímicos fueron las muestras A1, A12 y CAS1 con 0.13%, 4.63% y 1.93% respectivamente.

En la petrografía sí se detectó efectivamente la presencia de calcita en la muestra A12, pero no en la A1, y no se hicieron láminas delgadas de la muestra CAS1. En el análisis de difracción de rayos X solo se detectó la presencia de calcita en las muestras A12 y CAS1. Sin embargo, los valores de  $\text{CO}_2$  son extremadamente bajos en la muestra A1, por lo que se interpreta que la presencia de calcita es escasa a comparación de las otras dos muestras.

Ya que en todas las demás muestras no se detectó la presencia de carbonatos, solamente se hizo la corrección de  $\text{CaO}^*$  a A1, A12 y CAS1, quedando entonces las concentraciones como aparecen en la Tabla 44.

Sin embargo, hay que hacer una aclaración. La muestra CAS1 obtuvo un valor más alto de  $\text{CaO}^*$  (1.60%) que no corresponde a los valores de las demás muestras de 0.38-0.46%. Esto indicaría que parte del calcio está en otro mineral que no aparece



Tabla 42. Detalles y concentraciones originales de elementos mayores en porcentaje.

Muestra	Coloración	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	LOI	Suma
A1	CRC-CN	73.24	13.03	1.60	0.24	0.62	1.20	5.53	0.10	0.02	0.03	4.20	99.84
A2	CRC	72.75	13.53	1.68	0.23	0.48	1.26	5.76	0.10	0.02	0.03	4.00	99.83
A3	CRC	74.00	12.90	1.64	0.17	0.44	1.24	5.38	0.10	0.02	0.02	3.90	99.86
A4	CRO	72.83	13.56	1.70	0.17	0.41	1.35	5.74	0.11	0.02	0.03	3.90	99.85
A5	CRO	73.20	13.03	1.68	0.23	0.49	1.20	5.63	0.10	0.02	0.03	4.20	99.83
A6	Blanco	74.12	12.99	1.36	0.20	0.44	1.36	5.52	0.08	0.02	0.02	3.70	99.85
A7	Blanco	73.82	13.28	1.41	0.19	0.43	1.36	5.70	0.08	0.01	0.02	3.50	99.84
A8	CN	73.73	12.68	1.80	0.23	0.48	1.20	5.57	0.11	0.02	0.05	3.90	99.83
A9	CRC	73.83	13.07	1.49	0.17	0.43	1.24	5.49	0.10	0.02	0.02	4.00	99.84
A10	CRC	73.24	13.40	1.57	0.17	0.43	1.29	5.63	0.10	0.02	0.02	4.00	99.86
A11	CRC	73.67	13.12	1.57	0.17	0.46	1.25	5.41	0.10	0.02	0.02	4.10	99.85
A12	CN	66.93	10.82	1.54	0.10	6.34	1.29	6.24	0.09	0.02	0.04	6.40	99.86
CAS1	Café	69.13	10.88	2.15	0.38	4.40	1.30	4.61	0.12	0.27	0.09	6.40	99.84

Tabla 43. Valores de elementos mayores ajustados incluyendo LOI.

Muestra	Coloración	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	LOI	Suma
A1	CRC-CN	73.38	13.06	1.60	0.24	0.62	1.20	5.54	0.10	0.02	0.03	4.21	100.00
A2	CRC	72.87	13.55	1.68	0.23	0.48	1.26	5.77	0.10	0.02	0.03	4.01	100.00
A3	CRC	74.14	12.93	1.64	0.17	0.44	1.24	5.39	0.10	0.02	0.02	3.91	100.00
A4	CRO	72.96	13.59	1.70	0.17	0.41	1.35	5.75	0.11	0.02	0.03	3.91	100.00
A5	CRO	73.34	13.06	1.68	0.23	0.49	1.20	5.64	0.10	0.02	0.03	4.21	100.00
A6	Blanco	74.26	13.02	1.36	0.20	0.44	1.36	5.53	0.08	0.02	0.02	3.71	100.00
A7	Blanco	73.97	13.31	1.41	0.19	0.43	1.36	5.71	0.08	0.01	0.02	3.51	100.00
A8	CN	73.90	12.71	1.81	0.23	0.48	1.20	5.58	0.11	0.02	0.05	3.91	100.00
A9	CRC	73.93	13.09	1.49	0.17	0.43	1.24	5.50	0.10	0.02	0.02	4.01	100.00
A10	CRC	73.34	13.42	1.57	0.17	0.43	1.29	5.64	0.10	0.02	0.02	4.00	100.00
A11	CRC	73.75	13.13	1.57	0.17	0.46	1.25	5.42	0.10	0.02	0.02	4.11	100.00
A12	CN	67.06	10.85	1.54	0.10	6.35	1.29	6.25	0.09	0.02	0.04	6.41	100.00
CAS1	Café	69.32	10.91	2.16	0.38	4.41	1.30	4.62	0.12	0.27	0.09	6.42	100.00

Tabla 44. Valores ajustados incluyendo la separación del CaO en silicatos y en minerales no silicatos.

Muestra	Coloración	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO*	CaO <sub>otros</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	LOI	Suma
A1	CRC-CN	73.38	13.06	1.60	0.24	0.43	0.19	1.20	5.54	0.10	0.02	0.03	4.21	100.00
A2	CRC	72.87	13.55	1.68	0.23	0.45	0.03	1.26	5.77	0.10	0.02	0.03	4.01	100.00
A3	CRC	74.14	12.93	1.64	0.17	0.41	0.03	1.24	5.39	0.10	0.02	0.02	3.91	100.00
A4	CRO	72.96	13.59	1.70	0.17	0.38	0.03	1.35	5.75	0.11	0.02	0.03	3.91	100.00
A5	CRO	73.34	13.06	1.68	0.23	0.46	0.03	1.20	5.64	0.10	0.02	0.03	4.21	100.00
A6	Blanco	74.26	13.02	1.36	0.20	0.41	0.03	1.36	5.53	0.08	0.02	0.02	3.71	100.00
A7	Blanco	73.97	13.31	1.41	0.19	0.42	0.01	1.36	5.71	0.08	0.01	0.02	3.51	100.00
A8	CN	73.90	12.71	1.81	0.23	0.45	0.03	1.20	5.58	0.11	0.02	0.05	3.91	100.00
A9	CRC	73.93	13.09	1.49	0.17	0.40	0.03	1.24	5.50	0.10	0.02	0.02	4.01	100.00
A10	CRC	73.34	13.42	1.57	0.17	0.40	0.03	1.29	5.64	0.10	0.02	0.02	4.00	100.00
A11	CRC	73.75	13.13	1.57	0.17	0.43	0.03	1.25	5.42	0.10	0.02	0.02	4.11	100.00
A12	CN	67.06	10.85	1.54	0.10	0.42	5.93	1.29	6.25	0.09	0.02	0.04	6.41	100.00
CAS1	Café	69.32	10.91	2.16	0.38	0.42	3.99	1.30	4.62	0.12	0.27	0.09	6.42	100.00

en las muestras de los afloramientos y que no se considera en la fórmula de corrección del CaO como pudiera ser el yeso/anhidrita. El calcio en las construcciones puede provenir por reparaciones efectuadas con cemento (Honeyborne, 2006; Germinario *et al.*, 2017), mientras que el azufre está presente por depósito de contaminantes atmosféricos (Schiavon *et al.*, 2004; Sabbioni, 2003; McAlister *et al.*, 2006; Charola *et al.*, 2007; Doehne & Price, 2010; Török *et al.*, 2011; Graue *et al.*, 2013; Farkas *et al.*, 2018) o por la disolución de diversos materiales empleados como morteros o en intervenciones (Steiger, 2003; Sanjurjo-Sánchez *et al.*, 2011; Germinario *et al.*, 2017). La presencia de yeso/anhidrita tiene sentido considerando que la concentración de azufre elemental para esta muestra de la CAS es de 0.29%, mientras que todas las demás no lo contienen. Además, Beltrán-Zavala & Roque-Jiménez (2018) encontraron que una muestra deteriorada de la CAS contiene cerca de 1% de azufre, mientras que en otra muestra no deteriorada no se detectó este elemento, con lo cual la interpretación de que el exceso de CaO se debe a la presencia de yeso/anhidrita es muy probable.

Tomando en consideración todo lo anterior, se decidió sustituir el valor de CaO\* de la muestra CAS1 de 1.60% con el promedio de CaO\* de las muestras A1-A12 de 0.42%.

Ya con las concentraciones ajustadas y la separación del óxido de calcio perteneciente a silicatos se hizo la transformación de los datos por clr (Tabla 45).

La interpretación de los valores transformados se llevó a cabo mediante el PCA. En la Tabla 46 se proporcionan los componentes principales y sus varianzas explicadas. Por otra parte, en la Figura 69 se grafican las variables, es decir, los óxidos, y las muestras de acuerdo con los componentes principales.

El PC1 muestra que los óxidos CaO<sub>otros</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y MnO están separados de todos los demás óxidos y LOI. Esto indicaría que el PC1 está controlado por la mineralogía principal tal como se observó en la petrografía, es decir, cuarzo, feldespatos, biotita, óxidos y plagioclasas, mientras que la otra parte contiene a la calcita, apatito y sustitución del calcio en el apatito por manganeso.

Tabla 45. Valores resultantes de la transformación clr para el PCA.

Muestra	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO*	CaO <sub>otros</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	LOI
A1	4.54	2.82	0.72	-1.18	-0.60	-1.41	0.43	1.96	-2.05	-3.66	-3.26	1.69
A2	4.68	3.00	0.91	-1.08	-0.41	-3.11	0.62	2.15	-1.91	-3.52	-3.11	1.78
A3	4.78	3.03	0.97	-1.30	-0.42	-3.03	0.69	2.16	-1.83	-3.44	-3.44	1.83
A4	4.71	3.03	0.95	-1.35	-0.55	-3.09	0.72	2.17	-1.79	-3.49	-3.09	1.78
A5	4.69	2.96	0.91	-1.07	-0.38	-3.11	0.58	2.13	-1.91	-3.52	-3.11	1.83
A6	4.79	3.05	0.79	-1.12	-0.40	-3.02	0.79	2.20	-2.04	-3.42	-3.42	1.80
A7	4.94	3.22	0.98	-1.02	-0.23	-3.97	0.94	2.38	-1.89	-3.97	-3.27	1.89
A8	4.65	2.89	0.94	-1.12	-0.45	-3.16	0.53	2.07	-1.86	-3.56	-2.64	1.71
A9	4.78	3.05	0.88	-1.29	-0.44	-3.03	0.69	2.18	-1.82	-3.43	-3.43	1.86
A10	4.76	3.06	0.92	-1.30	-0.45	-3.04	0.72	2.20	-1.84	-3.44	-3.44	1.85
A11	4.77	3.04	0.92	-1.30	-0.38	-3.04	0.69	2.16	-1.84	-3.45	-3.45	1.88
A12	4.20	2.38	0.43	-2.30	-0.87	1.78	0.25	1.83	-2.41	-3.92	-3.22	1.85
CAS1	3.84	1.99	0.37	-1.36	-1.26	0.99	-0.13	1.13	-2.52	-1.71	-2.80	1.46

Tabla 46. Componentes principales y porcentaje de varianza explicada por cada uno.

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
SiO <sub>2</sub>	-0.1571	-0.1853	-0.1223	0.0505	-0.0268	0.0953
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.1795	-0.2015	-0.1263	0.0451	-0.1472	0.1491
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.1138	-0.0633	0.0578	-0.2066	-0.1437	-0.3347
MgO	-0.1430	0.2417	0.1903	0.7441	-0.4309	0.0216
CaO*	-0.0209	0.2771	-0.0966	0.2736	0.6086	-0.4927
CaO <sub>otros</sub>	0.9128	-0.2379	-0.0338	0.1128	-0.0881	0.0013
Na <sub>2</sub> O	-0.1415	-0.1918	-0.1774	0.0325	0.3154	0.5100
K <sub>2</sub> O	-0.1481	-0.2896	-0.0579	-0.0119	0.0787	0.1963
TiO <sub>2</sub>	-0.1257	-0.0845	0.0067	-0.3757	-0.4456	-0.3459
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.1245	0.7421	-0.3709	-0.3125	-0.1122	0.2791
MnO	0.0338	0.1557	0.8551	-0.2447	0.1988	0.2005
LOI	-0.0414	-0.1628	-0.1240	-0.1080	0.1919	-0.2775
Varianza explicada (%)	87.2704	10.1188	1.6082	0.5924	0.2704	0.0969
Varianza acumulativa (%)	87.2704	97.3892	98.9974	99.5898	99.8602	99.9571

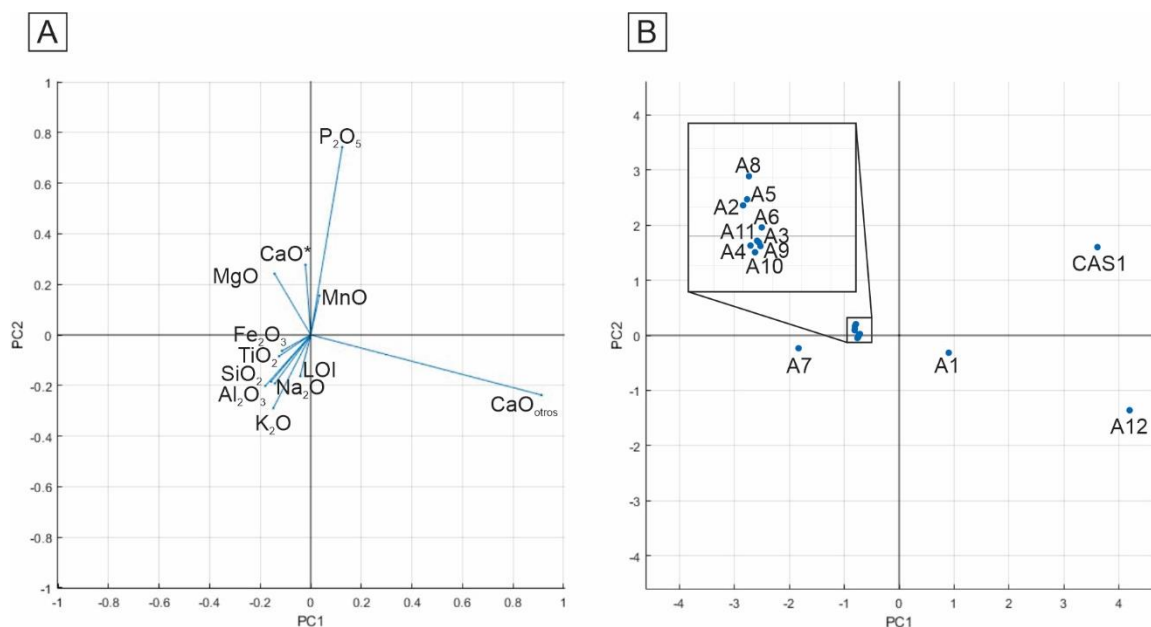


Figura 69. A. Gráfica de los coeficientes de los componentes principales, es decir, los óxidos. B. Gráfica de las muestras en el sistema de coordenadas de componentes principales.

El PC2 muestra que los óxidos  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}^*$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  y  $\text{MnO}$  están separados de los demás óxidos,  $\text{LOI}$  y  $\text{CaO}_{\text{otros}}$ . Esto indicaría que el PC2 está controlado por las variaciones composicionales de los minerales secundarios. Por ejemplo, el  $\text{MgO}$  varía en la biotita dependiendo de la concentración de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , el  $\text{CaO}^*$  varía en el tipo de plagioclasa dependiendo de la concentración de  $\text{Na}_2\text{O}$ , mientras que el  $\text{P}_2\text{O}_5$  está presente en el mineral accesorio apatito y puede tener sustituciones del calcio por manganeso.

Particularmente, en el mismo cuadrante (-1, -1) están asociados  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$  y  $\text{LOI}$ , de lo cual se pueden interpretar las asociaciones de acuerdo con la petrografía y difracción de rayos X:

- $\text{SiO}_2$  representa al cuarzo
- $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  con  $\text{K}_2\text{O}$  y  $\text{Na}_2\text{O}$  representan al sanidino y plagioclasa sódica respectivamente
- $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  con  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  y  $\text{LOI}$  representan la composición de la biotita
- $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , representa a la hematita (aunque no es un silicato está dentro de la composición mineral principal de la Ignimbrita Cantera).

Los óxidos  $\text{P}_2\text{O}_5$  y  $\text{MnO}$  se encuentran en el cuadrante opuesto (1, 1), es decir, tienen una correlación negativa con los óxidos del cuadrante (-1, -1). Tanto el vector del  $\text{P}_2\text{O}_5$  como el del  $\text{MnO}$  tienen la misma dirección, lo cual significa que tienen una excelente correlación y, por lo tanto, se encuentran en la misma fase mineral.

El  $\text{CaO}_{\text{otros}}$  se encuentra separado del resto de óxidos en otro cuadrante (1, -1). Si bien en este parámetro se encuentra el  $\text{CaO}$  que pertenece al apatito, la mayoría se debe a la calcita, por eso no se correlacionó con el  $\text{P}_2\text{O}_5$ .

Los óxidos  $\text{CaO}^*$  y  $\text{MgO}$  están en el cuadrante opuesto (1, 1). A diferencia de lo que sucede con los óxidos  $\text{P}_2\text{O}_5$  y  $\text{MnO}$ , sus vectores no tienen la misma dirección, así que no están en la misma fase mineral: el  $\text{CaO}^*$  estaría en las plagioclasas, mientras que el  $\text{MgO}$  pudiera relacionarse con la biotita.

### 7.2.2. Clasificación por elementos mayores

Previamente, de acuerdo con los porcentajes de minerales encontrados en el análisis petrográfico, se clasificaron las muestras de la Ignimbrita Cantera como una riolita de feldespato alcalino (véase la sección “4.2.4. Petrografía”).

Ahora bien, las rocas volcánicas se pueden clasificar también por medio de las concentraciones de ciertos elementos mayores, en este caso, por la suma de los óxidos  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$  graficados contra el porcentaje de  $\text{SiO}_2$  en el diagrama TAS de Le Bas *et al.* (1986).

Todas las muestras de la Ignimbrita Cantera se posicionan en el campo de la riolita (Fig. 70), lo cual coincide con lo encontrado en el diagrama QAP del análisis petrográfico. Sin embargo, se puede notar que las muestras A12 y CAS1 se separan del conjunto de todas las demás muestras, lo cual es de esperarse considerando la

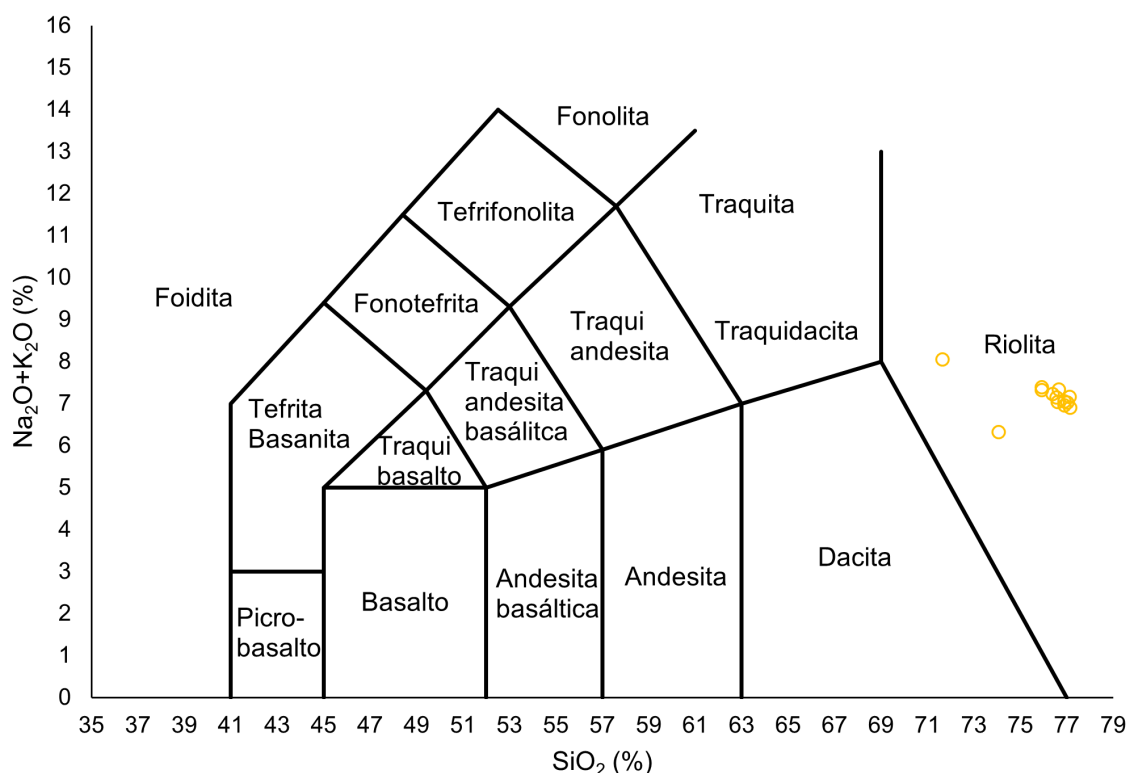


Figura 70. Diagrama TAS con todas las muestras de la Ignimbrita Cantera clasificándose como riolita.

presencia de calcita, aumentando la concentración de CaO y esto viéndose reflejado en porcentajes menores de SiO<sub>2</sub>.

Pötzl *et al.* (2022) clasificaron también muestras de la Ignimbrita Cantera por medio del diagrama TAS y estas cayeron en el campo de la riolita con cerca de 77-78% de SiO<sub>2</sub> y 7-8% de Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O. Sus resultados son prácticamente iguales a los que se obtuvieron aquí.

### 7.2.3. Índices de meteorización

Los resultados de los índices de meteorización calculados se dan en la Tabla 47.

Tabla 47. Índices de meteorización calculados.

Muestra	Coloración	W	RW	AC	WIP	CIA	CIW	PIA	CPA
A1	CRC-CN	18.61	23.48	11.59	59.87	59.87	82.58	71.93	86.87
A2	CRC	19.86	22.91	15.53	62.40	59.73	82.42	71.65	86.73
A3	CRC	19.49	22.31	16.16	58.72	60.00	82.28	71.81	86.37
A4	CRO	25.81	26.13	18.23	62.72	59.80	82.36	71.67	85.95
A5	CRO	25.11	26.97	14.66	60.77	59.43	82.29	71.22	86.87
A6	Blanco	21.02	24.25	16.28	61.10	59.21	81.36	70.22	85.34
A7	Blanco	15.06	19.32	17.03	62.62	59.18	81.60	70.38	85.61
A8	CN	21.87	23.98	14.56	60.23	59.00	81.99	70.49	86.56
A9	CRC	19.51	22.32	16.74	59.63	60.02	82.55	72.06	86.52
A10	CRC	21.04	23.43	17.17	61.28	59.98	82.49	71.97	86.35
A11	CRC	20.40	23.00	15.70	59.12	60.13	82.23	71.90	86.46
A12	CN	15.28	21.14	0.94	66.32	52.93	78.99	58.60	83.64
CAS1	Café	24.90	23.81	1.36	53.34	57.99	78.99	67.06	83.61

El índice MFW refleja que las muestras más meteorizadas son las A4 y A5 de color rosa oscuro. Esto podría indicar que la tonalidad CRO sí se debe a la meteorización de las rocas, pero no queda claro cuál es la progresión, si primero pasan de CRC a CRO y posteriormente a CN o los cambios de coloración son independientes.



La otra muestra con el valor más alto del índice MFW es la CAS1. Efectivamente esto comprueba que las rocas de las construcciones están deterioradas, con lo cual la interpretación obtenida a partir de GRS es aceptable.

Con el índice MFRW se obtuvieron también valores altos para las muestras A4 y A5. Por otra parte, los valores de la muestra CAS1 no son tan altos como en el índice MFW, pero siguen siendo más altos que los de la mayoría. Esta discrepancia puede ser debido a que este índice omite la concentración de  $\text{SiO}_2$ , el cual es un componente importante de las rocas y no pertenece a sedimentos biogénicos.

El WIP reflejó que la muestra CAS1 tiene mayor meteorización que las otras muestras (los valores más bajos representan mayor meteorización), lo cual se ajusta a los resultados de los índices MFW y MFRW. De hecho, Duzgoren-Aydin *et al.* (2002) y Price & Velbel (2003) encontraron que el WIP evalúa adecuadamente la meteorización de las rocas ya que su formulación no asume que el aluminio es inmóvil, al contrario de otros índices que sí lo incluyen en sus fórmulas.

Al contrario de los índices anteriores, el índice AC no mostró buenos resultados ya que la muestra CAS1 tiene valores extremadamente bajos. Esto se debe a que este índice está formulado para evaluar la meteorización de carbonatos, por lo que no resulta adecuado para cuantificar la meteorización de las rocas de la Ignimbrita Cantera.

Los resultados del CIA son bastante homogéneos y la muestra CAS1 tiene un valor un poco más bajo, con lo cual este índice tampoco refleja adecuadamente la meteorización para la Ignimbrita Cantera. Lo mismo sucede con los índices CIW, PIA y CPA. Probablemente estos índices no funcionaron porque se enfocan en la meteorización de plagioclasas, las cuales son minerales escasos en las muestras de la Ignimbrita Cantera, o porque consideran al  $\text{Al}_2\text{O}_3$  como un óxido inmóvil (Price & Velbel, 2003). Es más, por el alto contenido de feldespatos de potasio en las muestras de la Ignimbrita Cantera, el CIW resultó en valores muy altos, lo cual no significa que las rocas estén meteorizadas (Takahashi & Shimaoka, 2012; Fu *et al.*, 2023).

Como se indicó previamente en la sección “6.1.1. Experimentos petrofísicos”, el agua es el agente más importante que está involucrado en el deterioro y su disponibilidad hace posible que sucedan procesos de meteorización química (Nesbitt & Young, 1984; Fookes *et al.*, 1988; Siegesmund *et al.*, 2002; Nesbitt, 2003; Velde & Meunier, 2008; White & Buss, 2014; McAllister *et al.*, 2017). Sin embargo, el clima en San Luis Potosí es semiárido, por lo que los procesos de meteorización química en general no se pueden considerar como altamente efectivos. Esto está evidenciado por los valores bajos de índices de meteorización obtenidos que mostraron buenos resultados, es decir, el MFW, MFRW y WIP. De hecho, López-Doncel *et al.* (2016), con base en la precipitación y temperatura anual promedio, determinaron que en San Luis Potosí la meteorización debería ser muy ligera.

#### **7.2.4. Concentraciones de elementos traza y tierras raras**

Los elementos traza se reportan en la Tabla 48, mientras que el diagrama normalizado a UCC se presenta en la Figura 71. Los resultados indican que las muestras A12 y CAS1 son las que presentan las variaciones más significativas:

- A12: tiene las concentraciones más altas de As, Nb, Sb, y las concentraciones más bajas de Ba, Cs, Ga, Sc, Sn, Ti, Y.
- CAS1: tiene las concentraciones más altas de Ba, Co, Cu, Mo, Ni, Pb, Sr, W, Zn, y las concentraciones más bajas de Be, Hf, Nb, Rb, Ta, Th, U.

La muestra A12 tiene ciertas concentraciones que son diferentes a las demás muestras del afloramiento, específicamente los valores de As y Sb son los que destacan. De acuerdo con los resultados petrográficos y de difracción de rayos X, el único mineral diferente en esta muestra comparada con las demás es la calcita. Además, en el PCA, la muestra A12 se encuentra en un cuadrante diferente junto con la muestra A1, ya que ambas contienen calcita, aunque en proporciones muy desiguales. Todo esto indica que quizás la muestra A12 tuvo algún tipo de alteración posterior al depósito, lo cual pudo causar un enriquecimiento de As y Sb que son móviles y con un comportamiento similar (Álvarez-Ayuso, 2022; Zhang *et al.*, 2022).

Tabla 48. Concentraciones originales de elementos traza en ppm.

Muestra	As	Ba	Be	Cd	Co	Cs	Cu	Ga	Hf	Hg	Mo	Nb	Ni	Pb
A1	10.0	64	7	0.3	0.8	11.3	8.6	29.5	7.8	0.06	0.5	27.3	1.5	5.9
A2	26.9	50	8	0.4	0.6	11.1	2.2	31.2	7.6	0.04	0.6	26.5	3.6	4.2
A3	13.3	43	7	0.6	0.6	12.6	4.6	28.9	7.9	0.02	0.5	25.3	2.2	4.5
A4	18.8	49	7	0.3	0.5	12.7	1.8	31.2	8.3	0.02	0.5	28.1	2.3	5.0
A5	18.6	52	8	0.3	0.6	11.6	4.1	29.6	7.8	0.04	0.6	26.5	2.3	4.6
A6	5.1	37	8	<0.1	1.1	16.5	13.8	29.5	8.3	0.04	0.3	24.8	2.0	2.5
A7	4.9	37	8	<0.1	0.4	15.7	1.3	29.3	7.8	0.03	0.7	24.0	1.4	3.1
A8	10.5	80	8	0.2	0.7	11.5	3.0	28.9	8.2	0.05	0.8	27.1	4.1	5.3
A9	12.3	37	8	0.3	0.4	13.3	1.1	29.7	7.6	0.02	0.5	22.9	1.0	4.3
A10	14.9	41	8	0.4	0.4	13.2	1.2	30.0	8.0	0.02	0.5	23.8	0.9	4.8
A11	17.1	35	8	0.4	0.4	12.9	1.8	29.8	7.8	0.02	0.5	23.8	1.6	4.5
A12	71.9	29	6	0.3	0.5	8.6	2.9	21.4	7.4	0.04	0.6	28.5	2.9	8.7
CAS1	9.8	915	4	0.6	2.1	11.6	17.0	21.9	6.8	0.05	1.3	19.4	8.8	64.4
Muestra	Rb	Sb	Sc	Sn	Sr	Ta	Th	Tl	U	W	Y	Zn	Zr	
A1	436.8	0.1	11	11	22.3	3.3	39.8	0.3	9.2	3.1	74.6	39	192.8	
A2	445.5	0.1	11	8	17.3	3.1	40.1	0.2	9.8	2.5	91.3	38	187.7	
A3	416.1	<0.1	10	6	16.5	3.0	36.5	0.1	8.3	2.6	80.3	19	196.6	
A4	445.2	<0.1	10	4	17.6	3.2	39.2	0.1	9.6	2.3	63.8	24	198.1	
A5	445.5	0.1	11	9	18.9	3.0	40.4	0.2	9.4	2.2	88.7	42	196.0	
A6	445.2	0.1	10	9	17.8	2.8	38.7	0.2	9.9	3.0	71.5	55	209.4	
A7	449.3	<0.1	10	7	16.9	2.8	39.6	0.2	9.9	2.0	68.7	47	184.9	
A8	424.0	0.2	10	9	21.7	2.8	38.4	0.2	9.2	2.5	78.9	45	213.9	
A9	435.4	<0.1	9	8	16.6	2.8	36.0	0.1	8.5	2.4	77.8	29	185.1	
A10	431.6	<0.1	10	7	17.0	2.7	36.5	0.1	8.8	3.0	80.1	31	204.1	
A11	419.9	<0.1	10	6	16.7	2.9	36.5	0.1	8.6	2.4	87.4	28	191.2	
A12	356.4	2.6	6	3	21.3	2.3	32.8	<0.1	6.7	3.2	60.9	35	190.1	
CAS1	282.1	0.4	7	6	101.4	1.6	27.6	0.3	5.5	3.3	74.2	89	199.9	

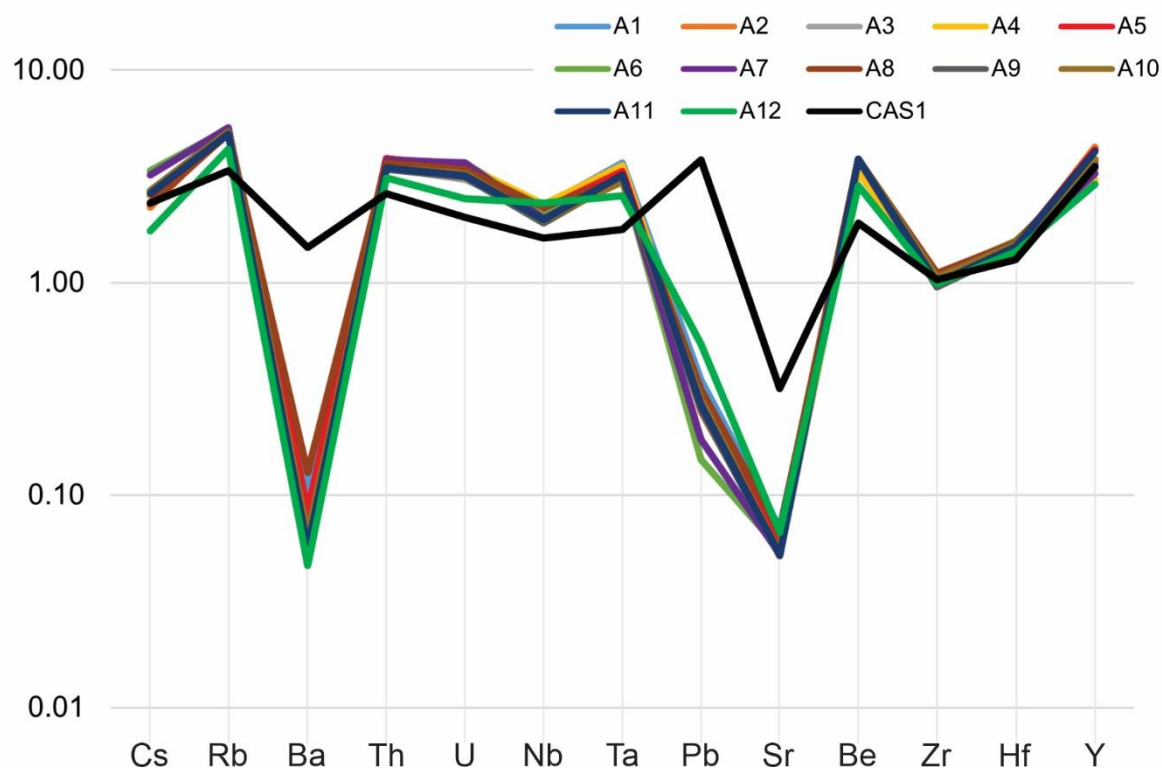


Figura 71. Diagrama de elementos traza normalizados con los valores de UCC de Rudnick & Gao (2003).

El contenido de potasio de esta muestra es mayor al de todas las demás y, en concordancia, sus valores de índices de meteorización son mucho más bajos cuando estos usan potasio en sus fórmulas (CIA y PIA en comparación con CIW y CPA). Se interpreta que los procesos de alteración causan que la muestra A12 tenga comportamientos diferentes a las demás muestras en las propiedades físicas, petrográficas y químicas: expansión hídrica y térmica, índice de empaquetamiento de cationes y peso atómico medio respectivamente (véanse las secciones “6.2.3. Expansión hídrica y térmica”, “6.2.5. Índice de empaquetamiento de cationes y peso atómico medio” y “6.2.6. Correlaciones entre propiedades”).

Se puede interpretar que los valores altos de Ba, Mo, Ni, Pb y Zn en la muestra CAS1 están asociados a la contaminación atmosférica porque todas las demás muestras tienen valores bajos más bajos. Diversos estudios han encontrado enriquecimiento de estos elementos en construcciones en áreas urbanas (Sabbioni,

2003; Schiavon *et al.*, 2004; Bityukova, 2006; McAlister *et al.*, 2006, 2008; Sanjurjo-Sánchez *et al.*, 2011; Török *et al.*, 2011; Graue *et al.*, 2013; Germinario *et al.*, 2017; Farkas *et al.*, 2018). Por otra parte, los valores altos de Sr están asociados con los carbonatos procedentes de los materiales utilizados en reparaciones y no con calcita de origen geológico. Esta interpretación resulta obvia considerando que la muestra A12 sí contiene calcita, pero no tiene valores anormales de Sr. Finalmente, la muestra CAS1 es la única con una cantidad detectable de Se (0.6 ppm), un elemento que está ligado también a la contaminación (Ullah *et al.*, 2023). Tomando todo esto en cuenta, queda claro que la composición química de las rocas de la Ignimbrita Cantera ha experimentado variaciones por la exposición a contaminantes atmosféricos y por ciertos materiales empleados en intervenciones.

En el caso del Rb, la muestra CAS1 tiene los valores más bajos. Considerando su baja concentración y que este elemento se encuentra en feldespatos de potasio (Gu *et al.*, 2002; Singh *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2021; Fu *et al.*, 2023), se puede interpretar que el Rb, al igual que el K, es liberado durante el deterioro. Ahora bien, los resultados que se obtuvieron de uranio y torio con la GRS coinciden con lo encontrado por los análisis geoquímicos de laboratorio. Nótese como la CAS1 tiene las concentraciones más bajas de estos dos radioelementos. Esto confirma la pérdida de uranio y torio por procesos de deterioro tal y como se interpretó a partir de la GRS (véase la sección “5.2.4. Diferencias entre el afloramiento y las Cajas del Agua”). En resumen, las variaciones geoquímicas de la Ignimbrita Cantera en las construcciones se deben a contaminantes, materiales de intervenciones y deterioro de las mismas rocas.

Los REE se reportan en la Tabla 49 y el diagrama de los valores normalizados a UCC se proporciona en la Figura 72. La muestra A12 tiene los valores más bajos de Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, mientras que la muestra CAS1 tiene los valores más altos de La, Ce, Eu y los más bajos de Yb, Lu. Sin embargo, sus patrones se mantienen sin tanta variación al compararse con todas las otras muestras, por lo que se puede considerar que las REE son prácticamente inmóviles durante procesos de meteorización para el caso de las rocas de la Ignimbrita Cantera,

Tabla 49. Concentraciones originales de elementos de las tierras raras en ppm.

Muestra	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
A1	66.8	127.6	19.57	77.3	17.58	0.22	15.81	2.38	13.77	2.71	8.32	1.10	7.31	1.05
A2	68.5	124.4	20.51	82.0	18.67	0.20	17.85	2.75	16.17	3.22	9.70	1.29	8.62	1.20
A3	45.7	107.7	13.76	54.9	13.34	0.17	13.71	2.27	14.34	2.91	8.79	1.22	7.95	1.10
A4	46.6	105.8	13.50	54.1	12.18	0.20	11.98	1.95	12.20	2.47	7.62	1.07	7.07	1.00
A5	67.1	120.9	19.78	79.7	18.14	0.21	17.41	2.68	15.98	3.18	9.55	1.29	8.37	1.15
A6	56.2	110.2	16.48	65.1	14.52	0.18	13.38	2.11	13.01	2.63	8.16	1.14	7.54	1.07
A7	58.9	109.1	17.45	69.2	15.29	0.17	13.74	2.18	13.12	2.63	8.04	1.12	7.42	1.06
A8	66.9	123.6	19.51	78.4	17.78	0.26	16.69	2.54	14.63	2.86	8.57	1.16	7.73	1.04
A9	45.0	103.9	13.75	54.3	13.01	0.17	13.28	2.23	13.81	2.84	8.75	1.21	7.92	1.08
A10	46.5	106.4	14.13	55.5	13.13	0.17	13.38	2.25	14.09	2.89	9.00	1.22	8.07	1.12
A11	46.6	109.0	14.05	55.7	13.35	0.17	14.01	2.36	15.12	3.07	9.46	1.30	8.45	1.17
A12	54.7	124.0	14.68	55.9	12.10	0.12	11.48	1.85	11.23	2.22	6.68	0.92	6.24	0.88
CAS1	79.9	133.4	18.86	72.9	14.68	0.51	13.71	2.06	12.00	2.43	7.27	0.96	6.03	0.85

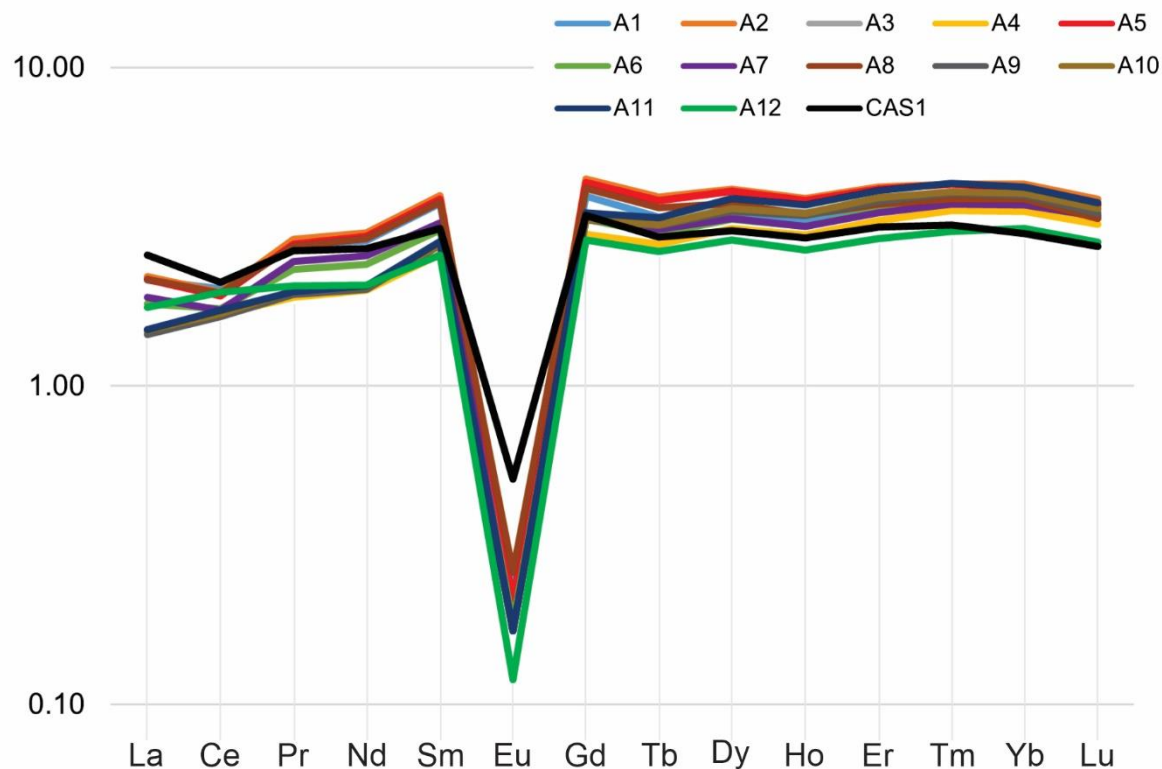


Figura 72. Diagrama de REE normalizados con valores de UCC de Rudnick & Gao (2003). Nótese que las tendencias marcan un ligero enriquecimiento de todos los elementos, excepto por la anomalía negativa de Eu.

aunque de acuerdo con los resultados de los índices, la meteorización química no está en etapas avanzadas por el clima semiárido y quizás por esta razón no se tiene movilidad de los REE como se ha visto en otras regiones (Mehta & Malviya, 2021). La anomalía negativa de Eu indica que las plagioclasas son escasas, lo cual coincide con los resultados petrográficos y de difracción de rayos X.

### 7.3. Formación Chichén Itzá, Zona Arqueológica de Chichén Itzá

#### 7.3.1. Concentraciones de elementos mayores

Las concentraciones para los elementos mayores se proporcionan en la Tabla 50.

Tabla 50. Detalles y concentraciones originales de elementos mayores en porcentaje. Los valores con el símbolo < indican que están por debajo del límite de detección.

Muestra	Clasificación	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	Suma
B1	Floatstone	5.28	0.202	4.01	1.307	0.070	0.577	48.776	<0.003	0.284	0.033	39.19	99.729
B2	Floatstone	3.93	0.172	2.82	1.111	0.172	0.295	51.456	<0.003	0.253	0.026	39.54	99.775
C1	Bindstone	<0.05	0.005	0.13	<0.006	0.004	0.363	57.127	0.005	0.049	0.020	42.15	99.853
C2	Mudstone	<0.05	<0.004	0.02	<0.006	0.004	0.185	58.131	0.004	0.038	0.014	41.32	99.716
C3	Bindstone	<0.05	<0.004	0.19	<0.006	0.003	0.588	56.393	<0.003	0.060	0.020	42.17	99.424
CL1	Bindstone	<0.05	0.005	0.10	<0.006	0.003	0.322	56.998	0.018	0.035	0.022	42.36	99.863
CL2	Bindstone	<0.05	<0.004	0.02	<0.006	0.004	0.228	57.852	0.014	0.033	0.016	41.83	99.997
L1	Grainstone	0.18	0.010	0.41	<0.006	0.005	0.402	56.752	<0.003	0.076	0.018	41.55	99.403
L2	Grainstone	1.08	0.028	0.99	0.218	0.005	0.955	54.805	<0.003	0.112	0.026	41.82	100.039
CIA1	Grainstone	1.15	0.036	1.16	0.132	0.011	0.221	55.679	<0.003	0.103	0.014	41.35	99.856
SAS1	Sascab	0.62	0.005	0.50	<0.006	0.004	0.244	56.842	<0.003	0.108	0.012	41.75	100.085
SUE1	Suelo	43.02	1.029	29.07	7.943	0.086	0.817	1.512	0.024	1.527	0.086	14.61	99.727



Las concentraciones originales fueron ajustadas a sumas exactas del 100% (Tabla 51). Al igual que con los elementos mayores de la Ignimbrita Cantera, se decidió conservar el valor de LOI para el PCA.

Debido a que en la petrografía no se detectó la presencia de cristales de plagioclasas (ni de ningún otro silicato a excepción de cuarzo), entonces se infiere que todo el CaO pertenece a carbonatos, así que el valor de CaO\* es 0%. Con respecto a la muestra de suelo SUE1, se decidió también incluir todo el CaO en carbonatos porque las plagioclasas son de los primeros minerales en alterarse y perder Na y Ca (Nesbitt & Young, 1984; Price, 1995, Duzgoren-Aydin *et al.*, 2002; Duzgoren-Aydin & Aydin, 2003; Nesbitt, 2003; Chiu & Ng, 2014; White & Buss, 2014).

Se procedió entonces a hacer la transformación de las concentraciones por clr (Tabla 52). Sin embargo, esta transformación requiere que ningún valor sea igual a cero, así que los valores por debajo del límite de detección fueron sustituidos. Para el Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, por ejemplo, el límite de detección es 0.04%, así que reemplazó el valor por 0.02%. Todos los demás valores por debajo del límite de detección fueron reemplazados por 0.005. Este tipo de sustitución es aceptable en estos casos (Ohta & Arai, 2007; Cho & Ohta, 2022).

La interpretación de los valores transformados se llevó a cabo mediante el PCA. En la Tabla 53 se proporcionan los componentes principales y sus varianzas explicadas. Por otra parte, en la Figura 73 se grafican las variables, es decir, los óxidos, y las muestras de acuerdo con los componentes principales.

El PC1 muestra que los óxidos K<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> están separados del Na<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, MgO, LOI y CaO. Esto indicaría que el PC1 está controlado por el origen de los componentes minerales: los primeros óxidos pertenecen a la fracción de silicatos con procedencia continental como cuarzo, arcillas y partículas de paleosuelos, mientras que los segundos óxidos pertenecen a la parte con afinidad marina como sales y fosfatos, y principalmente calcita con magnesio o dolomita.

Tabla 51. Elementos mayores ajustados incluyendo LOI. Los valores por debajo del límite de detección fueron sustituidos por concentraciones bajas para no tener valores faltantes (ceros) y poder realizar el PCA.

Muestra	Clasificación	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	Suma
B1	Floatstone	5.294	0.202	4.021	1.311	0.070	0.579	48.908	0.001	0.285	0.033	39.296	100.000
B2	Floatstone	3.939	0.172	2.826	1.113	0.172	0.296	51.571	0.002	0.254	0.026	39.629	100.000
C1	Bindstone	0.025	0.005	0.130	0.003	0.004	0.364	57.195	0.005	0.049	0.020	42.200	100.000
C2	Mudstone	0.025	0.002	0.020	0.003	0.004	0.186	58.279	0.004	0.038	0.014	41.425	100.000
C3	Bindstone	0.025	0.002	0.191	0.003	0.003	0.591	56.702	0.002	0.060	0.020	42.401	100.000
CL1	Bindstone	0.025	0.005	0.100	0.003	0.003	0.323	57.060	0.018	0.035	0.022	42.406	100.000
CL2	Bindstone	0.025	0.002	0.020	0.003	0.004	0.228	57.836	0.014	0.033	0.016	41.819	100.000
L1	Grainstone	0.181	0.010	0.412	0.003	0.005	0.404	57.090	0.002	0.077	0.018	41.798	100.000
L2	Grainstone	1.080	0.028	0.990	0.218	0.005	0.954	54.783	0.001	0.112	0.026	41.803	100.000
CIA1	Grainstone	1.152	0.036	1.162	0.132	0.011	0.221	55.758	0.002	0.103	0.014	41.409	100.000
SAS1	Sascab	0.619	0.005	0.500	0.003	0.004	0.244	56.791	0.001	0.108	0.012	41.713	100.000
SUE1	Suelo	43.138	1.032	29.153	7.965	0.086	0.819	1.516	0.024	1.531	0.086	14.650	100.000

Tabla 52. Valores resultantes de la transformación clr para el PCA.

Muestra	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI
B1	2.17	-1.10	1.89	0.77	-2.16	-0.05	4.39	-6.41	-0.76	-2.91	4.17
B2	1.90	-1.23	1.57	0.64	-1.23	-0.69	4.47	-5.68	-0.84	-3.12	4.21
C1	-1.16	-2.77	0.49	-3.28	-2.99	1.52	6.57	-2.77	-0.49	-1.39	6.27
C2	-0.77	-3.30	-1.00	-2.89	-2.60	1.24	6.98	-2.60	-0.35	-1.35	6.64
C3	-1.06	-3.59	0.97	-3.19	-3.19	2.10	6.66	-3.59	-0.19	-1.29	6.37
CL1	-1.19	-2.80	0.19	-3.32	-3.32	1.36	6.54	-1.52	-0.86	-1.32	6.24
CL2	-0.90	-3.43	-1.13	-3.02	-2.74	1.31	6.85	-1.48	-0.63	-1.35	6.52
L1	0.49	-2.40	1.31	-3.61	-3.10	1.30	6.25	-4.01	-0.36	-1.81	5.94
L2	1.48	-2.18	1.39	-0.12	-3.90	1.35	5.40	-5.51	-0.79	-2.25	5.13
CIA1	1.60	-1.86	1.61	-0.56	-3.05	-0.05	5.49	-4.75	-0.81	-2.81	5.19
SAS1	1.79	-3.02	1.58	-3.54	-3.25	0.86	6.31	-4.63	0.05	-2.15	6.00
SUE1	3.41	-0.33	3.01	1.72	-2.81	-0.56	0.06	-4.09	0.07	-2.81	2.33

Tabla 53. Componentes principales y porcentaje de varianza explicada por cada uno.

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
SiO <sub>2</sub>	0.3893	-0.1915	-0.2663	0.3382	0.6550	0.0583
TiO <sub>2</sub>	0.2540	0.0783	0.0648	0.0781	-0.2236	-0.4383
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.2593	-0.1442	-0.5178	-0.0570	-0.4534	-0.3402
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.4895	0.0712	0.5537	-0.4979	0.1541	0.0124
MnO	0.0620	-0.0049	0.4046	0.5376	-0.4542	0.3614
MgO	-0.2028	-0.0293	-0.2194	-0.5206	-0.0785	0.2866
CaO	-0.4505	-0.5446	0.2683	0.0327	0.1014	-0.3158
Na <sub>2</sub> O	-0.3060	0.7579	0.0058	0.1478	0.2039	-0.3053
K <sub>2</sub> O	0.0025	0.0572	-0.2389	0.1121	0.0194	0.4788
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-0.1716	0.1408	-0.0896	-0.1811	-0.0719	0.2301
LOI	-0.3256	-0.1909	0.0348	0.0101	0.1478	-0.0280
Varianza explicada (%)	79.2248	10.0956	5.5214	2.5052	1.4274	0.8764
Varianza acumulativa (%)	79.2248	89.3204	94.8418	97.3470	98.7744	99.6508

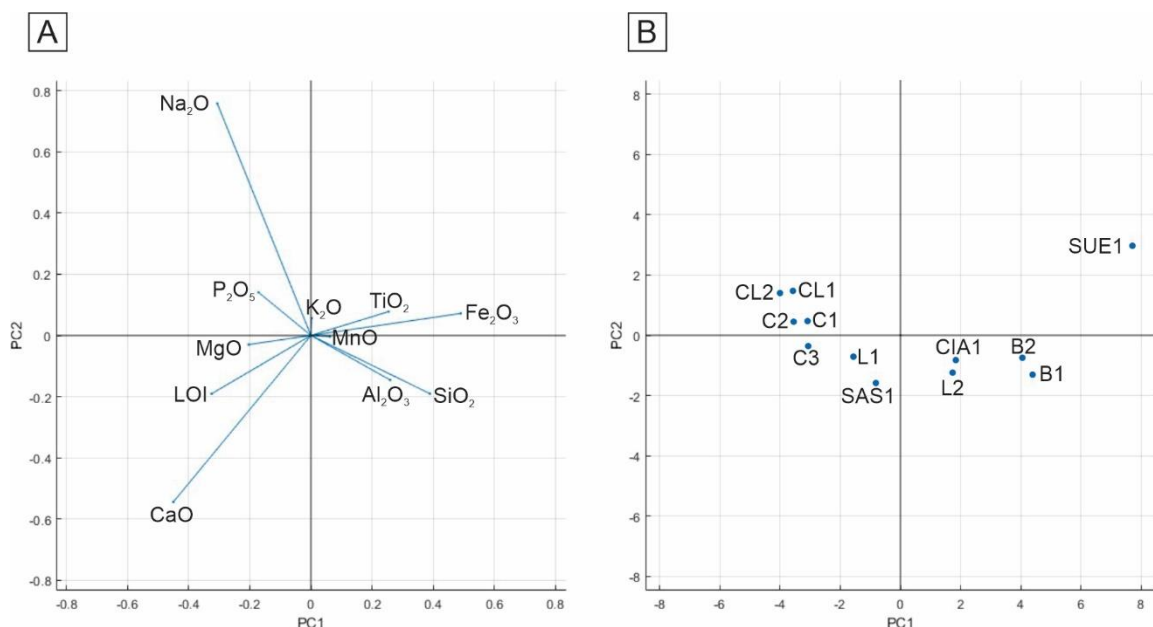


Figura 73. A. Gráfica de los coeficientes de los componentes principales, es decir, los óxidos. B. Gráfica de las muestras en el sistema de coordenadas de componentes principales.

El PC2 muestra que los óxidos Na<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> están separados de los óxidos MgO, LOI, CaO, MnO, SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Esto indicaría que el PC2 está

controlado por las variaciones composicionales, por ejemplo, aquí el potasio no forma parte de las estructuras principales de los silicatos, sino que está adsorbido en la superficie de minerales arcillosos. El  $\text{TiO}_2$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , aunque presentes en los silicatos, no son sus constituyentes principales. Al contrario, el  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  se correlacionan muy bien, con lo cual se puede interpretar que los silicatos están formados por estos elementos, en este caso, por arcillas y, específicamente, como se encontró en la difracción de rayos X, halloysita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ). Los óxidos  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{P}_2\text{O}_5$  representan minerales secundarios, mientras que los óxidos de  $\text{CaO}$  y  $\text{MgO}$  representan los constituyentes principales de los carbonatos.

Particularmente, solo la muestra de suelo (SUE1) se sitúa en un cuadrante (1, 1). Las muestras B1, B2, L2 y CIA1 se grafican todas juntas en otro cuadrante (1, -1). Todas estas muestras tienen una correlación positiva y se asocian con el aporte de partículas de origen terrígeno según se observó en la petrografía (véase la sección “4.3.3. Petrografía” de los resultados de la Formación Chichén Itzá).

Los demás cuadrantes (-1, 1; -1, -1) conjuntan a las muestras en las que no se observó ningún aporte continental (C1, C2, C3, CL1, CL2) y las que tienen poco aporte (L1). Para la muestra de sascab (SAS1), no se pudo comprobar por difracción de rayos X componentes diferentes a la calcita, y tampoco por medio de análisis petrográfico. Sin embargo, el hecho de que se grafique junto con la muestra L1 significa que tendría una composición similar con poco aporte de material terrígeno y, por su definición, podría representar etapas de alteración subaérea.

### **7.3.2. Índices de meteorización**

Los resultados del cálculo de índices de meteorización se dan en la Tabla 54. A pesar de que los índices de meteorización calculados no fueron propuestos para calizas, exceptuando el AC, se encontraron algunos aspectos interesantes.

Los índices MFW, MFRW y CIA reflejan que las muestras más meteorizadas son las B1, B2, L2, CIA1 y SUE1. Estas mismas muestras están en los valores positivos del PC1 (Fig. 73). Considerando que B1 y B2 son brechas con un claro aporte de

Tabla 54. Resultados de índices de meteorización.

Muestra	Clasificación	W	RW	AC	WIP	CIA	CIW	PIA	CPA
B1	Floatstone	99.63	92.93	0.0452	4.03	92.8	99.9	99.9	100.0
B2	Floatstone	99.51	92.97	0.0301	2.99	91.0	99.8	99.8	99.9
C1	Bindstone	32.07	26.00	0.0013	1.47	67.3	92.8	88.5	94.0
C2	Mudstone	18.97	20.45	0.0002	0.87	28.8	70.4	166.0	75.2
C3	Bindstone	52.52	33.98	0.0019	2.16	73.2	97.4	96.1	98.3
CL1	Bindstone	6.91	10.49	0.0010	1.36	59.1	76.1	66.4	77.2
CL2	Bindstone	4.04	8.45	0.0002	1.04	24.8	44.6	-172.2	46.5
L1	Grainstone	77.78	47.89	0.0040	1.79	82.3	98.8	98.5	99.2
L2	Grainstone	96.47	71.53	0.0099	3.59	88.8	99.7	99.6	99.8
CIA1	Grainstone	97.25	79.66	0.0115	1.50	90.9	99.6	99.5	99.7
CISAS	Sascab	79.42	50.09	0.0048	1.60	80.6	99.3	99.1	99.7
CISUE	Suelo	99.66	94.27	10.5770	15.48	94.5	99.9	99.9	99.9

partículas de paleosuelo, L2 y CIA1 contienen peloides con algo de aporte terrígeno y que SUE1 es suelo (con un color rojizo característico), se interpreta que estos índices adecuadamente sitúan a todas estas muestras con altos valores de meteorización porque los suelos representan las etapas finales de este proceso. Estas muestras no están meteorizadas, pero sus componentes terrígenos sí son productos de meteorización. Entonces, los índices de meteorización en calizas pueden ser usados para determinar la historia geológica de sus componentes, más no la meteorización química que experimentan en la actualidad.

En el caso del índice AC, se puede apreciar que sigue la misma tendencia que los índices MFW y MFRW, con los valores más altos para las mismas muestras, así que este índice es adecuado para representar la meteorización en carbonatos. Sin embargo, debido a las marcadas diferencias petrográficas entre todas las muestras, no se puede establecer una relación de cuáles son las más meteorizadas. Para esto se necesitarían contar con análisis geoquímicos de muestras específicamente del TN para hacer comparaciones con rocas de los mismos componentes aloquímicos.

Los índices CIW y CPA, al igual que todos los anteriores, asignan los valores más altos para las muestras B1, B2, L2, CIA1 y SUE1, aunque parece que no distinguen

adecuadamente a las muestras C1, C3, L1 y SAS1 porque las incluyen también en valores altos.

El WIP parece que mostró valores adecuados solamente para la muestra SUE1, mientras que para todas las demás son anormalmente bajos, lo cual indica que están extremadamente meteorizados, pero este no es el caso. El PIA da algunos valores anómalos negativos y mayores a 100% debido a su fórmula y no distingue con precisión a la mayoría de las muestras.

### **7.3.3. Concentraciones de elementos traza y tierras raras**

Los elementos traza se reportan en la Tabla 55, mientras que el diagrama normalizado a PAAS se presenta en la Figura 74. Los resultados indican que las muestras con aporte terrígeno (B1, B2, L2, CIA1) tienen las concentraciones más altas de As, Cd, Cs, Ga, Nb, Ni, Pb, Rb, Th, Y, Zr. Específicamente, los valores más altos de Th y Zr indican sedimentos de origen continental (Taylor & McLennan, 1985; Gu *et al.*, 2002; Singh *et al.*, 2005; Rollinson & Pease, 2021; Zhao *et al.*, 2022) que coinciden con las interpretaciones hechas aquí sobre las partículas rojizas.

Específicamente, las brechas B1 y B2 tienen las concentraciones más altas, además de los elementos ya enlistados, de Ba, Cu, Sc, Zn y concentraciones bajas de Sr. Los patrones de elementos traza son muy similares entre estas muestras. Al contrario, todas las demás muestras, junto con las que tienen algo de aporte terrígeno, no tienen patrones definidos y existe mucha variación. Solamente en algunas muestras se superó el valor de Sr con respecto a PAAS, lo cual se explica por la afinidad del Sr con la estructura de los carbonatos.

Con respecto a las cantidades relativamente altas de S, parece que son propias de las rocas y que no son procedentes de contaminantes atmosféricos considerando que la Zona Arqueológica de Chichén Itzá no es un área urbana. Además, en Mérida, que representa una zona urbana, Maldonado *et al.* (2011) encontraron valores de 2-4 mg de SO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> por día que se considera como una atmósfera limpia. En varias partes de la Península de Yucatán, Maldonado & Veleva (1999) también encontraron concentraciones bajas de SO<sub>2</sub> tanto en zonas urbanas como rurales.

Tabla 55. Concentraciones originales de elementos traza en ppm.

Muestra	As	Ba	Cd	Co	Cs	Cu	Ga	Hf	Hg	Mo	Nb	Ni	Pb
B1	4.8	113	1.2	11.6	1.7	3.3	4.6	1.3	0.04	0.1	3.7	13.1	7.8
B2	3.4	126	1.5	12.4	1.3	3.8	3.6	1.2	0.03	0.3	2.8	15.1	6.8
C1	<0.5	27	0.2	0.5	<0.1	0.8	<0.5	<0.1	0.01	<0.1	0.2	0.9	0.2
C2	<0.5	6	0.2	0.4	<0.1	0.5	<0.5	<0.1	<0.01	0.2	0.2	1.2	0.3
C3	0.9	58	0.3	1.6	0.1	3.1	<0.5	0.1	0.04	<0.1	0.5	1.7	0.3
CL1	<0.5	36	0.3	0.5	<0.1	1.2	<0.5	<0.1	0.03	<0.1	0.3	1.2	0.6
CL2	<0.5	4	0.3	0.4	<0.1	0.4	<0.5	<0.1	<0.01	<0.1	0.2	0.9	0.3
L1	0.8	33	0.3	1.1	0.2	2.3	<0.5	0.2	0.01	<0.1	0.6	1.8	0.6
L2	2.5	29	0.7	1.2	0.4	1.4	0.7	0.3	0.04	0.2	1.1	4.0	1.3
CIA1	1.1	20	0.4	1.6	0.6	1.0	1.2	0.4	0.03	<0.1	1.4	2.7	1.7
SAS1	<0.5	9	0.1	0.4	0.2	0.6	<0.5	0.3	0.01	<0.1	0.7	0.7	1.2
Muestra	Rb	S	Sb	Sc	Sr	Th	Tl	U	W	Y	Zn	Zr	
B1	21.4	600	0.1	3	82.7	3.3	0.2	0.5	0.7	14.5	5	49.9	
B2	17.9	<200	0.1	2	79.4	2.5	0.2	0.6	0.5	9.8	7	45.2	
C1	1.1	600	<0.1	<1	200.6	<0.2	<0.1	0.5	<0.5	0.7	1	2.5	
C2	1.0	<200	<0.1	<1	180.4	<0.2	<0.1	1.0	<0.5	1.1	<1	1.5	
C3	2.0	1100	0.1	<1	209.0	0.4	<0.1	0.2	<0.5	1.5	2	6.3	
CL1	1.1	1300	<0.1	<1	108.2	<0.2	<0.1	0.6	0.7	0.9	1	3.9	
CL2	0.3	<200	<0.1	<1	238.8	<0.2	<0.1	1.2	<0.5	1.1	<1	1.2	
L1	3.6	500	<0.1	<1	128.6	0.4	<0.1	0.5	<0.5	2.2	3	6.9	
L2	6.3	300	<0.1	<1	408.6	0.8	0.2	1.2	<0.5	4.7	3	12.4	
CIA1	7.0	400	<0.1	1	54.0	1.0	<0.1	0.3	10.4	15.6	2	15.4	
SAS1	4.0	<200	<0.1	<1	62.8	0.7	<0.1	<0.1	<0.5	2.1	1	11.3	

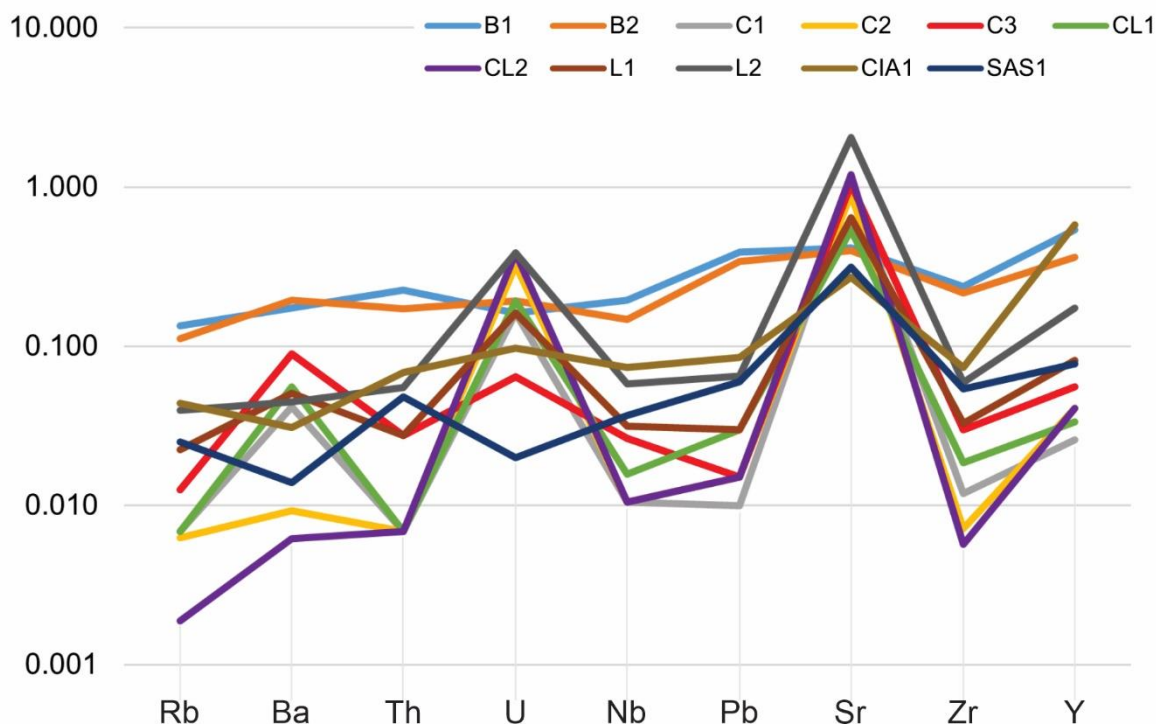


Figura 74. Diagrama de elementos traza normalizados con la PAAS de Taylor & McLennan (1985).

Sobre elementos traza en calizas de la Formación Chichén Itzá se tienen los resultados de López-Torres (2025) por ICP-ES. Sin embargo, no se pudieron realizar comparaciones adecuadas debido a que reporta otros elementos que no se analizaron aquí. Además, realizó análisis por fluorescencia de rayos X con equipo portátil en muestras obtenidas del Templo Norte, pero al parecer el límite de detección de muchos elementos es demasiado bajo como para determinar sus concentraciones. Aun así, es destacable que encontró torio tanto en calizas como en brechas, siendo estas últimas las que tienen la concentración más alta de este elemento.

Los REE se reportan en la Tabla 56 y el diagrama normalizado a PAAS con valores de Pourmand *et al.* (2012) se proporciona en la Figura 75. Como puede observarse, los patrones de todas las muestras son bastante lineales con ciertas anomalías negativas de Ce y Eu que se explican por el depósito en ambientes marinos (Taylor



Tabla 56. Concentraciones originales de elementos de las tierras raras en ppm.

Muestra	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
B1	0.49	0.48	0.42	0.43	0.42	0.45	0.47	0.45	0.43	0.45	0.46	0.42	0.41	0.39
B2	0.41	0.34	0.33	0.32	0.31	0.30	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.27	0.29	0.30
C1	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	<0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	<0.01	0.02	<0.01
C2	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05
C3	0.03	0.02	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.04	0.05	0.07
CL1	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02
CL2	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.02	0.03	0.02
L1	0.06	0.03	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.06	0.07	0.06	0.07	0.06	0.05
L2	0.11	0.06	0.10	0.11	0.11	0.12	0.12	0.13	0.12	0.13	0.14	0.13	0.11	0.11
CIA1	0.28	0.07	0.24	0.27	0.24	0.26	0.29	0.26	0.27	0.29	0.31	0.27	0.27	0.25
SAS1	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.04	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07

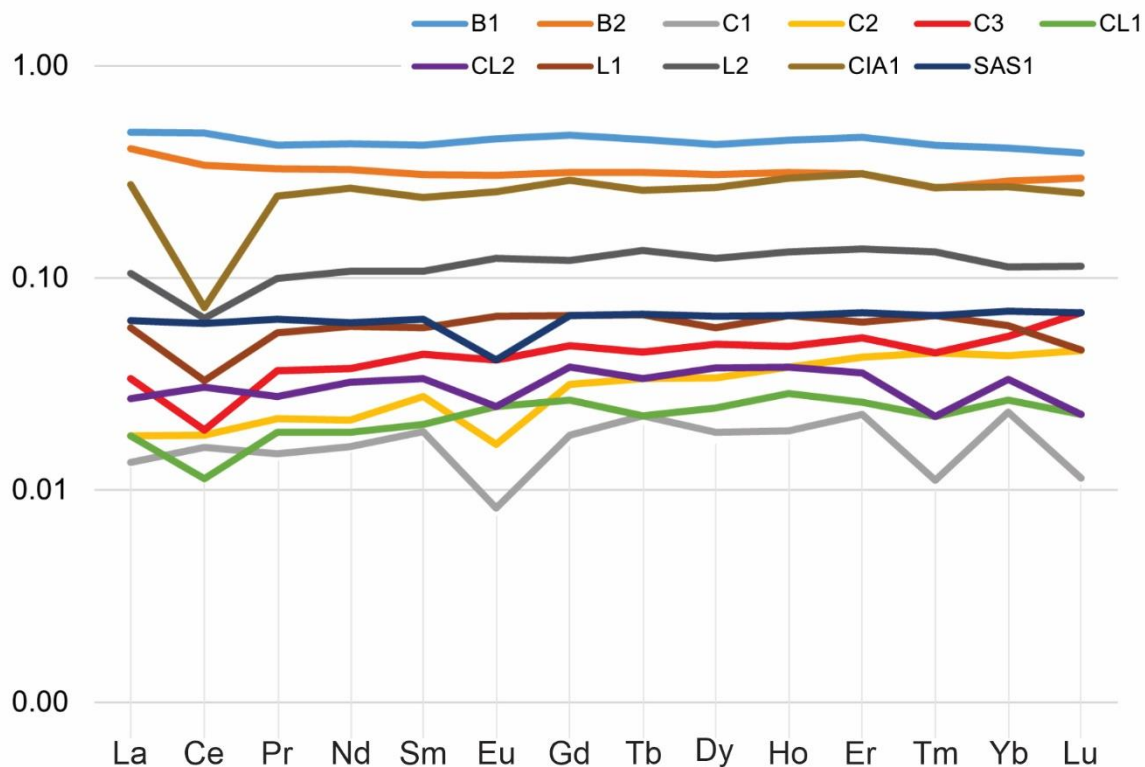


Figura 75. Diagrama de REE normalizados con la PAAS de Pourmand *et al.* (2012).

& McLennan, 1985; Gu *et al.*, 2002; Madhavaraju *et al.*, 2017; Rollinson & Pease, 2021). Resaltan los patrones de las brechas B1 y B2 que prácticamente no tienen anomalías, lo cual es característico del aporte continental en carbonatos (Zhao *et al.*, 2022), además de que la concentración de todos los REE aumenta conforme el aporte terrígeno es mayor: las brechas y las muestras CIA1 y L2 tienen los valores más altos de REE, les siguen las muestras SAS1, L1 y todas las demás calizas.



## 8. Discusión

Típicamente, los datos de GRS se interpretan de acuerdo con el tipo de roca y constituyentes minerales como se detalló en la sección “2.4. Distribución de radioelementos”. Sin embargo, debe considerarse que las rocas y minerales son modificados por procesos de meteorización que producen pérdida de elementos y cambios en sus propiedades físicas, lo cual fue descrito en la sección “3.6. Interpretación de los datos espectrométricos”.

Tomando lo anterior en cuenta, en esta sección se discuten los resultados de la GRS y su interpretación con respecto a las variaciones minerales y litológicas, la atenuación de la radiación por humedad, los patrones de deterioro, las propiedades físicas y químicas de las rocas de construcción. Al final se dan algunas perspectivas con respecto a los alcances y limitaciones de la metodología propuesta.

### 8.1. Metodología propuesta para la corrección de datos espectrométricos en construcciones

Todos los datos espectrométricos que se tomen en configuraciones diferentes a  $2\pi$  tendrán valores anómalos altos o bajos. Es por esta razón que se necesitan plantear correcciones de los datos de GRS obtenidos *in situ* con espectrómetros portátiles. Sin embargo, en los afloramientos no se suelen implementar ni intentar correcciones de datos, ya que solo basta con omitir los valores y tomar otros en condiciones aceptables. Williams-Thorpe *et al.* (2000) propusieron correcciones de los datos de GRS, pero no son aplicables para cualquier construcción, por lo cual se propuso una metodología en este trabajo.

Como se ejemplificó en la CAC (Fig. 34), está clara la influencia de otras superficies o el tipo de superficie en el que se tomaron los datos espectrométricos. La corrección propuesta eliminó efectivamente las variaciones relacionadas con este fenómeno. Un aspecto relevante de dicha corrección es que se hace tomando en cuenta también la humedad, así que se corrigen los dos parámetros al mismo tiempo.

Ahora bien, considérese que se tienen bloques sin humedad, entonces, identificando los bloques con configuraciones diferentes a  $2\pi$ , solamente se necesitaría ajustar los valores para que estén dentro de la desviación estándar de los datos con configuraciones  $2\pi$ , es decir, no se necesitaría calcular una línea de regresión.

Otra condición más compleja relacionada con la geometría  $2\pi$  es que se pueden encontrar bloques cuyas configuraciones pueden anularse, tal es el caso de un bloque en una esquina, pero que su superficie sea convexa: su radiación aumentaría por estar en una esquina, pero sería menor por su superficie convexa a tal grado que es probable que este dato no se necesite descartar. Obviamente es posible tener combinaciones entre varias superficies y la ubicación de los bloques. Por ejemplo, superficies convexas tomadas muy cerca de una esquina, causando valores “normales” porque las cuentas menores registradas en la superficie convexa se compensarían al estar muy cerca de la esquina.

Al final de las correcciones para la interpretación de los datos, los valores son recalculados a una humedad de 0.0% y en concentraciones: potasio en porcentaje y uranio y torio en partes por millón. Es aquí en donde se puede notar la efectividad de la metodología propuesta, ya que los valores obtenidos por los análisis geoquímicos son muy similares a los obtenidos por GRS. Las ligeras diferencias se deben principalmente al volumen que evalúa el espectrómetro portátil, el cual es más grande y general, mientras que en laboratorio se analiza una parte pequeña de una muestra, lo cual significa que el análisis es puntual. Svendsen & Hartley (2001) y Sêco *et al.* (2021) proporcionan una discusión detallada sobre las fuentes de incertidumbre en la GRS con espectrómetros portátiles.

Parte de la metodología general para la adquisición de datos espectrométricos es la corrección por radiación de fondo y, en el caso de los datos con equipo portátil, mayormente esta radiación proviene por el gas radón de la cadena de decaimiento del uranio. Este gas se acumula en el suelo y puede estar asociado con fallas. Este aspecto es importante porque existen numerosas fallas en la ciudad de San Luis Potosí que pasan por el Centro Histórico, además de otras zonas (López-Doncel *et*

*al.*, 2006; Almaguer-Rodríguez *et al.*, 2025; Barboza-Gudiño *et al.*, 2025). El radón puede estar asociado con estas fallas, así que la GRS podría verse afectada, aunque si se siguen las recomendaciones, no debería de haber ningún problema para eliminar la radiación de fondo. Además, indirectamente, la GRS podría ayudar en la detección de anomalías de radón en el modo survey donde registra las cuentas por segundo de la radiación total.

Se consideró que la posible presencia de radón no afectó las mediciones realizadas en esta tesis y que la corrección de radiación de fondo fue adecuada. Lo anterior debido a que, aunque el riesgo de radón es bajo en interiores en la mayor parte de San Luis Potosí (Aguilera-Gaspar, 2018), las concentraciones de radón en la ciudad son más altas que en la Sierra de San Miguelito en donde aflora la Ignimbrita Cantera (García-Chávez, 2015) y entonces los valores en las Cajas del Agua habrían salido siempre más altos en estas construcciones que en los afloramientos si el radón hubiera afectado las mediciones, lo cual no sucedió. Esto significa que el equipo registró y corrigió adecuadamente los valores de los radioelementos y el radón no representa una fuente de error en este estudio.

Con respecto a la radiación natural total en Chichén Itzá, esta es muy baja (30-60 cps) en los suelos superficiales y someros. Sin embargo, en algunas zonas donde existen suelos de color rojizo, la radiación aumenta principalmente por el contenido de potasio y torio que están relacionados con las arcillas. Es importante mencionar este aspecto de la radiación porque se necesitan hacer correcciones por radiación de fondo que en este caso es bastante baja y no afectó las mediciones.

## **8.2. Controles mineralógicos y litológicos en la espectrometría de rayos gamma**

La presencia de los radioelementos potasio, uranio y torio en rocas ígneas está controlada por sus propiedades químicas: fundamentalmente son elementos incompatibles, por lo que no se encuentran en los primeros minerales que cristalizan en el magma, con lo cual se pueden hacer predicciones sobre su distribución en

rocas ígneas. Por ejemplo, en rocas ultrabásicas y básicas, el contenido de potasio, uranio y torio es muy bajo porque los minerales principales no los contienen. Al momento de que cristalizan rocas de composición intermedia, parte de estos elementos se integran en sus minerales, dándoles a estas rocas una radiación baja a media. Cuando se forman las rocas ácidas, entonces estos elementos se incorporan a sus minerales, principalmente feldespatos de potasio, micas y minerales accesorio pesados.

Debido a que la composición de la Ignimbrita Cantera, según lo que se determinó en el análisis petrográfico, difracción de rayos X y clasificación química en el diagrama TAS, es riolítica, entonces los minerales en los que se concentran los radioelementos son sanidino, biotita y minerales accesorio pesados. Sin embargo, se interpretó que parte de la distribución del potasio, uranio y torio se encuentra en la matriz porque, según los datos obtenidos por GRS y análisis geoquímicos, existe una pérdida de los tres radioelementos en la muestra de la CAS en comparación con las de los afloramientos, lo cual no hubiera sido posible si absolutamente todo el uranio y torio se encontraran en minerales pesados que son resistentes a la meteorización.

Sobre la aplicación de la GRS en otras construcciones del Centro Histórico de San Luis Potosí que emplean rocas de la Ignimbrita Cantera, se debe tener especial atención a los cambios de facies, ya que, por ejemplo, en el Quiosco de la Plaza de Armas, las ignimbritas presentan fragmentos grandes de pómez (Montante-Hernández, 2019) y estructuras de *fiamme*, por lo que quizás el contenido de radioelementos en estas rocas sea diferente a la medida en este estudio. Se recomienda, por lo tanto, hacer un inventario exhaustivo sobre las diferentes variedades de la Ignimbrita Cantera en los edificios históricos de San Luis Potosí para poder hacer comparaciones adecuadas.

Se pueden esperar distribuciones similares de radioelementos en las rocas sedimentarias (areniscas y lutita) y metamórficas dependiendo de la roca de la que se hayan originado. Sin embargo, en el caso de las calizas, por estar compuestas

prácticamente de carbonato de calcio, deberían de tener concentraciones muy bajas de radioelementos principalmente como producto de impurezas.

Esto fue lo que se encontró en las rocas de la Formación Chichén Itzá, en donde las brechas calcáreas con componentes terrígenos como cuarzo y partículas de paleosuelos, según se observó en la petrografía, tienen concentraciones más altas de potasio y torio porque estos fueron adsorbidos en la superficie de los minerales arcillosos de los paleosuelos, con lo cual las brechas tienen valores más altos de radiación que las calizas sin aporte de terrígenos. Sin embargo, entre las calizas también hay cierta diferencia, ya que grainstones en ocasiones presentan algo de aporte continental y las bindstone, mudstone, packstone y wackestone generalmente no. Con estas clasificaciones, entonces la GRS se puede interpretar de manera excelente y se pueden reconocer fácilmente las variaciones composicionales. En el caso del uranio, se considera que tiene una afinidad marina, lo cual concuerda con lo encontrado en la GRS y en los análisis geoquímicos, en donde tanto las brechas como las calizas, ambos tipos formados en ambientes marinos someros, contienen valores similares de uranio, además de que se asocia con la materia orgánica.

La GRS demostró ser útil para distinguir entre litologías cuando no se pueden apreciar los componentes en el caso de las brechas y calizas por el grado de deterioro. Tomando esto en cuenta, la GRS podría indicar los bloques más propensos al deterioro, es decir, las brechas, aunque no se puedan distinguir a simple vista, siendo una herramienta extremadamente útil para la evaluación de los procesos de deterioro en los monumentos de la Zona Arqueológica de Chichén Itzá.

En las rocas de la Formación Chichén Itzá, por el análisis petrográfico, se observaron cambios notorios en las composiciones de las brechas y calizas que se ven reflejados en los valores de radiación. Se debería tener cuidado entonces al aplicar la GRS en otros monumentos de la Zona Arqueológica de Chichén Itzá, ya que podrían contener bloques de otras facies o que pertenezcan a otras formaciones especialmente en los edificios del sur de la zona.



### **8.3. Variaciones en la espectrometría de rayos gamma causadas por meteorización química**

La meteorización química cambia la composición mineral de la roca y sus propiedades físicas. En el caso del potasio, debido a que es un elemento móvil, es removido de los minerales como feldespatos alcalinos y micas, lo cual causa que la roca exhiba menos radiación de la que originalmente tendría. El uranio se considera móvil en ciertas condiciones, mientras que el torio es generalmente insoluble, aunque este comportamiento depende de los minerales en los que estén presentes estos elementos, por ejemplo, en minerales accesorio pesados resistentes, difícilmente serán removidos. Por lo tanto, comparando las respuestas de la GRS en los afloramientos y construcciones se puede identificar si existe pérdida de potasio, uranio y torio.

Lo anterior se comprobó para las Cajas del Agua que mostraron concentraciones más bajas de radioelementos comparadas con las del afloramiento según lo obtenido por medio de la GRS. De hecho, los análisis geoquímicos, tanto de elementos mayores y sus índices de meteorización derivados, concretamente MFW, MFRW y WIP, así como las concentraciones de elementos traza, específicamente de uranio y torio, demuestran que la interpretación obtenida a partir de la GRS es correcta, ya que la muestra CAS1 tiene menos potasio, uranio y torio que las muestras de los afloramientos.

Específicamente, en la Ignimbrita Cantera, el potasio forma parte de la estructura del sanidino y biotita que son fácilmente meteorizados, por lo que este elemento se puede considerar móvil, mientras que el uranio y torio que se encuentran en minerales pesados accesorio difícilmente podrían ser removidos por meteorización química, pero de acuerdo con los resultados de la GRS y análisis geoquímicos, sí hubo pérdida de estos dos radioelementos, por lo que se considera que parte de su distribución es en la matriz. Además, la concentración de Zr en la muestra de la construcción (CAS1) es igual que en las muestras del afloramiento, lo que indica que los circones no están meteorizados. Por otra parte, la asociación del uranio y torio con la oxidación y disolución de hematita y biotita explicaría por qué en

ocasiones las rocas CN exhiben una radiación ligeramente más alta que las demás. De hecho, en los análisis de elementos mayores, se nota una concentración más alta de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en la muestra de la CAS1 y la A8 CN (Tabla 42), comportamiento típico en procesos de meteorización (Nesbitt & Markovics, 1997; Price & Velbel, 2003; Ceryan, 2008; Ceryan *et al.*, 2008; Chiu & Ng, 2014; White & Buss, 2014). Esto lleva a la conclusión de que hay una relación entre la alteración de la biotita, disolución de óxidos y su redistribución en la matriz con la radiación, lo cual concuerda con lo observado por Scheepers & Rozendaal (1993), Dickson *et al.* (1996) y Gunn *et al.* (1997).

A diferencia de las muestras CN, parece que el CRO de algunas muestras no está asociado con procesos de oxidación. Casualmente, los valores más bajos de radiación se encuentran en esta variante CRO, pudiendo esta particularidad ser provocada quizás por un mayor tiempo de exposición de las muestras que se traduciría como mayor meteorización. Esta situación es lo que indicó el índice MFV que dio los valores más altos para muestras de CRO. Sin embargo, en las Cajas del Agua predominan bloques CN y no CRO, lo que se puede interpretar que los procesos de disolución de óxidos son más comunes. Resultados similares con respecto a la variedad CRO fueron obtenidos por López-Doncel *et al.* (2015), quienes encontraron que las muestras CRO son las más deterioradas.

Las Cajas del Agua están expuestas a la contaminación atmosférica, lo cual se manifiesta como *soiling*, dándoles un tono café a los bloques. Además de los procesos de meteorización química, se debería de tomar en consideración que muchos de los elementos contaminantes pueden actuar como catalizadores para reacciones químicas (Tecer, 1999; Watt & Hamilton, 2003; McAlister *et al.*, 2008; Goudie & Viles, 2010; Graue *et al.*, 2013), así que sus concentraciones son otro punto importante que podría ligarse en futuros estudios con la atenuación de los rayos gamma en construcciones.

De acuerdo con los análisis petrográficos y difracción de rayos X, en la Ignimbrita Cantera no se detectó la presencia de caolinita, lo que significa que estas rocas no están meteorizadas en gran medida, lo cual coincide con los valores bajos de los

índices de meteorización y es de esperarse porque en la ciudad no se tiene un ambiente tropical que propiciaría la formación de este mineral arcilloso.

Otro aspecto importante encontrado por GRS es que la CAS está más meteorizada que la CAC, aunque ambas se construyeron alrededor del mismo año, 1835. Por otra parte, los resultados de la GRS indican que en una misma construcción no hay diferencias significativas entre la radiación de sus fachadas, lo cual sugiere que los procesos de meteorización no dependen de la orientación de sus fachadas.

En el caso de la Formación Chichén Itzá, se encontró por GRS que los afloramientos en general sí tienen mayor concentración de radioelementos en comparación con el TN. Si bien no se contó con análisis geoquímicos en muestras de construcciones de la Zona Arqueológica de Chichén Itzá para corroborar la interpretación de la GRS, se probó que el método funcionó y, por lo tanto, que efectivamente se puede confiar en la respuesta de la GRS en este caso de estudio.

Las variaciones de potasio y torio en las brechas de la Formación Chichén Itzá están relacionadas con la pérdida de estos elementos por meteorización química porque estos se encuentran adsorbidos en la superficie de minerales arcillosos, así que su remoción es más fácil. Lo mismo sucede en las calizas, aunque sus rangos de concentraciones de radioelementos son más bajos, así como la cantidad de detritos terrígenos. Sin embargo, las concentraciones de potasio y torio pueden disminuir por la disolución de estas rocas, el cual es un importante proceso de meteorización química.

En el caso del uranio, dado que puede sustituir al Ca en la estructura de la calcita, es posible que conforme los procesos de disolución avancen, su concentración vaya disminuyendo, mientras que aumenta la porosidad de la roca. Si este es el caso, se esperarían entonces valores bajos de uranio por GRS, mayor atenuación en general de la atenuación por un posible aumento en el contenido de humedad provocado por el aumento en la porosidad.

Relacionados con los procesos de meteorización química están las reacciones provocadas por los microorganismos que son comunes en las calizas de la Zona Arqueológica de Chichén Itzá. Por ejemplo, González-Gómez *et al.* (2018)

encontraron weddellita y whewellita que interpretaron como productos de actividad de liquen en el Templo Inferior de los Jaguares y Tzompantli. Estos minerales podrían ser clave para determinar procesos de meteorización química-biológica, aunque es imposible reconocerlos mediante la GRS por su composición.

En resumen, considerando la movilidad de los radioelementos interpretada tanto por el método de GRS como por otros análisis, queda claro que la GRS puede ser usada para evaluar la meteorización sin importar en qué mineral, componente, matriz o cemento residan, además del tipo de litología. En su estudio de deterioro por medio de GRS en construcciones, Hernández-Santomé *et al.* (2025) llegaron a la misma conclusión: la GRS sí es una técnica que permite evaluar la meteorización.

#### **8.4. Patrones de deterioro**

En ambas construcciones del Centro Histórico de San Luis Potosí se encontraron los mismos patrones de deterioro, pero en la CAS, el desprendimiento está más desarrollado y hay mayor presencia de sales. La predominancia de sales se debe a la presencia del depósito de agua debajo que estuvo activo hasta años recientes, causando absorción del agua con sales disueltas por acción de la capilaridad. Considerando que las rocas de la Ignimbrita Cantera mostraron altos valores de absorción de agua por capilaridad, es muy probable que el deterioro se relacione con este parámetro. Montante-Hernández (2019), para rocas de la Ignimbrita Cantera en el Quisco del Centro Histórico de San Luis Potosí, identificó daños relacionados con los mismos fenómenos, así que estos patrones de deterioro son comunes y no se encuentran solamente en las Cajas del Agua.

En el afloramiento se demostró que las rocas CN presentaron los valores más altos de radiación y si su superficie se desprende, la radiación es más baja. Este fenómeno de menor radiación después del desprendimiento es probablemente la causa de que la CAS tenga menor radiación que la CAC por la predominancia de este patrón de deterioro en las zonas inferiores. Además, la presencia de sales puede relacionarse a más desprendimiento y atenuación y, por lo tanto, menores cuentas de radiación.

La erosión se refiere a la pérdida de cristales y matriz. Si los minerales erosionados son radioactivos, entonces se puede esperar una disminución en la radiación de la roca. Patrones de erosión existen en ambas Cajas del Agua, sin embargo, no se encontró evidencia de disminución de la radiación en los bloques afectados por este proceso, lo cual podría indicar que la erosión no es importante para la pérdida de radioelementos.

En la mayoría de los bloques de las Cajas del Agua se observó *soiling*, así como menor radiación comparada con los afloramientos. Como se describió apenas en la sección anterior, podría haber una relación entre el *soiling* y la respuesta de la GRS en las construcciones por atenuación de la radiación, específicamente por el caso de los valores muy altos de Pb en la muestra de la CAS.

Los análisis geoquímicos de la muestra de la CAS demostraron que la contaminación ejerce un control en el deterioro de las construcciones del Centro Histórico de San Luis Potosí. Por ejemplo, se encontraron concentraciones altas de Ni, Pb, Zn. Además, revelaron el enriquecimiento de CaO y S, que son producto de la disolución de materiales de intervenciones anteriores. Sin embargo, parece que en realidad estos no contribuyen al deterioro tanto como las sales porque no se encontró evidencia del desarrollo de yeso. Estos resultados coinciden con los de Beltrán-Zavala & Roque-Jiménez (2018), quienes analizaron dos muestras de la CAC por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y químicamente con Energía Dispersiva de Rayos X (EDX). En la muestra sin suciedad encontraron valores normales de elementos como los reportados aquí para las muestras A1-A11, mientras que en la muestra con suciedad (*soiling*) encontraron cantidades altas de Ca, P, S. Comparando sus resultados, parece probable que el uranio lixiviado esté asociado también con fosfatos, dando valores un poco más altos, como sucedió en la CAS.

Considerando que los patrones de deterioro encontrados en el TN se deben principalmente a la presencia e influencia del agua de lluvia (microkarstificación, *pitting*, erosión) y que dependen del tipo de roca, por ejemplo, las brechas son más susceptibles, entonces se debería de dar preferencia al posicionamiento de calizas

en caso de futuras intervenciones. Además, debería considerarse que la bóveda sea completada para que no permita el escurrimiento del agua de lluvia para evitar posibles daños relacionados. La GRS en este caso sería de gran ayuda para identificar rápidamente las brechas para reemplazar por su mayor contenido de componentes terrígenos con potasio y torio.

Con respecto a la presencia de sales, si bien no se observaron en la pared estudiada del TN, López-Torres (2025) sí reporta presencia de sales, aunque básicamente presentes en cantidades pequeñas. De acuerdo con la atenuación de la radiación por humedad, será posible evaluar también el contenido de sal en el resto de los monumentos de la Zona Arqueológica de Chichén Itzá, lo cual requiere especial atención, por ejemplo, en la Subestructura de Guerreros, donde se han encontrado evidencias de cristalización de sal (García-Solís *et al.*, 2025).

Numerosos estudios en otras zonas arqueológicas mayas como Uxmal, Tulum, Río Bec, Dzibanché y Oxpemul construidas con calizas han mostrado que estas rocas experimentan biodeterioro por hongos y bacterias (Videla *et al.*, 2000; Gaylarde *et al.*, 2001; de la Rosa-García *et al.*, 2011; Straulino-Mainou, 2012; Straulino-Mainou *et al.*, 2013; Espinosa-Morales *et al.*, 2020). En la Zona Arqueológica de Chichén Itzá, como se detalló igualmente en la sección anterior, González-Gómez *et al.* (2018) encontraron weddellita y whewellita, es decir, productos de biodeterioro de líquen en el Templo Inferior de los Jaguares y Tzompantli. Esta biomineralización resultante del metabolismo de microorganismos, la cual modifica el sustrato de la roca, puede ser considerada como el primer paso en el proceso de biodeterioro.

Estos estudios indican claramente que las calizas pueden ser deterioradas por colonización biológica. Sin embargo, el buen mantenimiento del interior del TN ha logrado efectivamente mantener una mínima proliferación de organismos, aunque las afectaciones pasadas se pueden observar en la forma de *pitting*, así como una mancha grisácea en la parte no cubierta por la bóveda.

Debe tomarse en cuenta que el deterioro de las rocas de la Formación Chichén Itzá puede ser diferente en las diferentes zonas arqueológicas y en las ciudades, porque en la Zona Arqueológica de Chichén Itzá no se encontró, por ejemplo, *soiling* ni

costras de yeso. Esto se debe a que los niveles de azufre en la atmósfera, así como de contaminación en general, son bajos en la Península de Yucatán (Maldonado & Veleva, 1999; Maldonado *et al.*, 2011).

Los patrones de deterioro que causaron variaciones en las cuentas de rayos gamma fueron el depósito y subflorescencias. Los depósitos (principalmente cemento) que cubren los bloques pueden ocultar los valores reales de humedad por su extremadamente baja porosidad, lo cual no permite la acumulación de agua en la superficie, pero sí que la humedad puede acumularse debajo de esta. Sin embargo, la GRS efectivamente demostró el potencial para detectar estos bloques principalmente por medio de los datos de radiación total. La presencia de subflorescencias aumentará la atenuación de los rayos gamma, por lo cual se pueden esperar valores bajos con este fenómeno.

Específicamente, ciertos patrones de deterioro que no estuvieron muy desarrollados en las construcciones evaluadas en ambas áreas de estudio podrían causar variaciones en los valores de radiación, así que si se aplicará la metodología propuesta se debería poner atención en la alveolización, costras, decoloración, incrustaciones, pátinas y colonización biológica. Las piezas restauradas o reemplazadas deberían de registrarse también por si acaso presentan diferencias en los valores de radiación.

## **8.5. Contenido de humedad y atenuación de los rayos gamma**

Entender el contenido de humedad de una construcción, su distribución y las variaciones temporales es crucial para la predicción del deterioro de la roca (Sass & Viles, 2006). Es bien sabido que el contenido de humedad en las rocas afecta la respuesta de la GRS por atenuación, de hecho, cualquier material entre la fuente, en este caso una roca, y el detector provocará algo de atenuación.

De acuerdo con esto, se pudo observar que la humedad influyó en el registro de la radiación. La medición de humedad *in situ* puede hacerse fácilmente con un medidor de humedad, aunque la mayoría de estos instrumentos miden solamente la parte

superficial, por lo que pueden existir diferencias sustanciales en la superficie y la humedad dentro de los poros en el interior de los bloques. Se puede identificar rápidamente cuales zonas estuvieron influenciadas por una evaporación de la humedad superficial porque se tendrán muchos valores bajos de radiación con humedad cero y una gran desviación estándar. Después de la corrección si la desviación estándar para estos datos sigue siendo elevada y no se encuentra explicación, se considerará que estos datos tienen error en la medición de humedad y podrán corregirse de acuerdo con el modelo de regresión lineal según la predicción de humedad.

Sin embargo, debería de notarse que muchos medidores de humedad solo miden el valor superficial (Phillipson *et al.*, 2007; Siedel & Siegesmund, 2014). Si hay diferencias significativas entre la humedad superficial y la que se encuentra en la parte interna de la roca, entonces el valor medido de humedad no será preciso. A pesar de esto, la GRS mostró que efectivamente detecta estas condiciones, así que la técnica es útil para identificar variaciones en la radiación causadas por la humedad sin importar que tengan cubiertas de cemento, costras impermeables o por pérdida de humedad superficial por evaporación en la superficie de la roca.

Las condiciones de deterioro pueden variar de acuerdo con la ubicación y la posición de las construcciones, por ejemplo, debido a las variaciones de temperatura y humedad por incidencia de la luz solar (Halsey *et al.*, 1998; Feilden, 2003; McAllister *et al.*, 2017; López-Doncel *et al.*, 2018). En la CAC, en su pared norte, prácticamente no es afectada por la luz solar, sino que los rayos solares la alcanzan con ángulos altos, además de que recibe sombra; su cara oeste está expuesta al sol a partir de mediodía, la cara sur está expuesta prácticamente desde la mañana y recibe la mayor parte de la luz solar y su máxima intensidad; la pared este solo recibe rayos solares durante parte de la mañana, además de que la temperatura no es tan elevada a estas horas. En la CAS se tienen casi las mismas condiciones, pero con ciertas variaciones. En la cara norte sí se recibe un poco más de radiación solar; la cara oeste sí recibe sombra durante prácticamente todo el día, y solo es alcanzada por la luz solar por la tarde con ángulos altos; la cara sur sí experimenta el máximo de los rayos solares, solo que por menos tiempo que la misma cara de la CAC



porque recibe sombra de un edificio cercano; la cara este básicamente tiene las mismas condiciones que en la CAC. Es importante conocer estas relaciones espaciales para poder realizar una interpretación correcta de las variables. Mayor exposición a la luz solar podría significar una mayor evaporación de la humedad superficial, como se observó en la cara sur de la CAC. En relación con esto, Montante-Hernández (2019) sí determinó que la cara SE del Quiosco del Centro Histórico de San Luis Potosí está más deteriorada, lo cual relacionó con evaporación y cristalización de sales por estar más tiempo expuesta a la luz solar, mientras que la fachada NW es la menos expuesta y está mejor preservada.

En el caso del TN, específicamente para la pared interna oeste que es donde se hicieron las mediciones, solo tiene expuesta la parte que no está cubierta por la bóveda y recibe algo de luz solar durante el día. Esto indudablemente causó la evaporación de la humedad superficial mientras se realizaban las mediciones, pero cualquier modificación de los valores de humedad se pudieron determinar por medio de las gráficas antes de realizar las correcciones y fueron correctamente corregidos por la metodología propuesta.

Un aspecto interesante es que López-Torres (2025) encontró que las brechas presentan valores más altos de humedad superficial que las calizas en el TN. Debido a que la presencia de humedad depende parcialmente de la capacidad que tenga una roca para almacenar agua, entonces bloques con valores altos de humedad podrían ser más susceptibles al deterioro, lo cual es evidente en las brechas del TN. Considerando esto, entonces la GRS es una herramienta útil no solo para detectar rocas con humedad, sino que los valores más altos de humedad ayudarán a identificar las rocas más deterioradas esta capacidad aumenta con la meteorización (Esaki & Jiang, 2000) y/o cuáles son propensas a deteriorarse en el futuro. Debe mencionarse que Hernández-Santomé *et al.* (2025) encontraron que la GRS no varía con el contenido de humedad, pero su estudio fue en granitos con porosidades extremadamente bajas de alrededor de 2%, por lo que concluyeron que las rocas más bien no contenían humedad, así que no encontraron variaciones en la GRS relacionadas con este fenómeno.

## **8.6. Modificación de propiedades físicas por procesos de deterioro en rocas de construcción**

Los procesos de meteorización generan una disminución de la densidad (Price & Velbel, 2003; Chan *et al.*, 2007; Ceryan, 2008; Chiu & Ng, 2014; Sanjurjo-Sánchez & Alves, 2017). Considerando que los productos de meteorización, por ejemplo, minerales arcillosos, son menos densos que los minerales originales de una roca y que existe pérdida de radioelementos con la meteorización, entonces es posible definir por medio de la GRS zonas con densidad reducida con valores bajos de radioactividad tal como encontró Wilford (2012).

Además de los cambios de densidad con la meteorización, existe un incremento en los valores de porosidad (Esaki & Jiang, 2000; Gupta & Rao, 2001; Chan *et al.*, 2007; Ceryan, 2008; Ceryan *et al.*, 2008; Pola *et al.*, 2012; White & Buss, 2014; Sanjurjo-Sánchez & Alves, 2017). Este aumento del porcentaje de poros permite una mayor entrada de humedad y sales. Ante esta situación, la radiación será atenuada y provocará que se puedan identificar zonas con menores tasas de conteo por GRS. De hecho, Hornung & Aigner (1999) encontraron que valores altos de radiación corresponden a valores de baja porosidad, mientras que valores bajos de radiación corresponden con valores altos de porosidad. Identificaron los mismos patrones entre la radiación y la permeabilidad.

Debido a que las rocas de la Ignimbrita Cantera tienen valores altos de porosidad (aproximadamente 30%), entonces tienen la capacidad de absorber grandes cantidades de agua y sales. Esto se observó en las zonas inferiores de las Cajas del Agua en donde se detectaron tasas de conteo más bajas por medio de la GRS. Por otra parte, para las rocas de la Formación Chichén Itzá, López-Torres (2025) encontró que las brechas son más porosas y, por lo tanto, son más absorbentes que las calizas y también descubrió que las rocas del TN son más porosas y absorbentes que las de los afloramientos, con lo cual queda claro que los procesos de disolución en este monumento condujeron a la pérdida de radioelementos que se interpretó a partir de la GRS en este trabajo. Bautista-Zúñiga *et al.* (2011) y Maldonado *et al.* (2011) encontraron que las calizas rojizas, es decir, con

componentes terrígenos, se disuelven más fácilmente que las calizas blancas. Aunque no indican la formación a la que pertenecen, se puede apreciar una tendencia general en la que la porosidad es mayor en estas calizas rojizas y, por lo tanto, son más propensas a la disolución.

En cualquiera de estos dos casos de estudio evaluados, los bloques con alto contenido de humedad y sales efectivamente reflejaron valores bajos por atenuación en la GRS. Además, si se relaciona la GRS con los resultados petrofísicos, esta técnica tiene el potencial para ser de gran asistencia para la evaluación de la meteorización química.

En resumen, la GRS fue aplicable en rocas con alto contenido de radioelementos y alta capacidad de almacenamiento de agua, en rocas con muy bajo contenido de radioelementos y alta-media capacidad de almacenamiento de agua, así que la técnica debería de tener buenos resultados igualmente en rocas ígneas con alto contenido de radioelementos, como granitos, pero con baja porosidad, y en rocas con muy bajo contenido de radioelementos y baja porosidad, siempre que el deterioro sea pronunciado. Esto explica por qué Hernández-Santomé *et al.* (2025) no encontraron buenos resultados entre la GRS y humedad en granitos, ya que estas rocas tienen valores altos de radioelementos y muy poca porosidad. En ese caso no se tendría que hacer alguna corrección por contenido de humedad, sino que los valores reflejarían solamente la pérdida de radioelementos, pero la porosidad puede aumentar con el deterioro, así que se tendría mayor retención de agua y eso sí se podría ver reflejado en la GRS. Entonces, dependiendo del grado de meteorización, la GRS adecuadamente reflejaría cambios en las propiedades físicas.

En los bloques inferiores de la CAS, la mayoría de la absorción de agua es por capilaridad y, como se encontró en los experimentos petrofísicos, su valor es muy alto. En concordancia, los valores más bajos obtenidos por GRS están en las zonas inferiores por atenuación por humedad y sales. Sin embargo, en estas rocas, la porosidad y la absorción por capilaridad tuvieron un coeficiente de correlación de 0.38 (Tabla 35), así que la porosidad por sí sola no basta para la predicción de la

absorción del agua por capilaridad, sino que este parámetro depende de la distribución de tamaño de poro (Benavente *et al.*, 2001, 2004; Siegesmund & Dürrast, 2014; Dinçer & Bostancı, 2019; Martinho & Dionísio, 2020). De hecho, Pötzl *et al.* (2022) y Siegesmund *et al.* (2022) reportaron valores de poros capilares de hasta 82% y 72% respectivamente, de lo cual se interpreta que no toda la porosidad está ligada con el fenómeno de capilaridad. Al contrario, las calizas de la Formación Chichén Itzá tuvieron un excelente valor de correlación entre su porosidad y absorción por capilaridad. Sin embargo, la distribución de tamaño de poro en estas rocas podría ligarse además a sus microfacies, así que este parámetro sería valioso para correlacionar con los resultados de la GRS.

Otra propiedad que depende de la distribución de tamaño de poro es la DWL (Benavente *et al.*, 2004, 2007; Honeyborne, 2006; Dinçer & Bostancı, 2019). Particularmente, se ha encontrado que los microporos son importantes para el deterioro causado por sal (Yu & Oguchi, 2010a, b; López-Doncel *et al.*, 2016; Çelik & Aygün, 2019; Pötzl *et al.*, 2022; Siegesmund *et al.*, 2022), así que este parámetro sin duda debería de ser evaluado para correlacionarlo con las demás propiedades físicas y la GRS.

La presencia de sales, sumada a la gran absorción por capilaridad de la Ignimbrita Cantera, es uno de los agentes de deterioro que más afecta a las Cajas del Agua, principalmente a la CAS. De hecho, las muestras de la Ignimbrita Cantera son muy poco resistentes a la cristalización de sal según se demostró en los experimentos petrofísicos. Además, como se puede notar en la Tabla 35, la expansión hídrica tiene una buena correlación con la DWL, lo cual encontraron también Pötzl *et al.* (2022) y Siegesmund *et al.* (2022) para tobas incluyendo a la Ignimbrita Cantera. Para la Formación Chichén Itzá, López-Torres (2025) encontró que la brecha es más susceptible al daño por cristalización de sal en comparación con la caliza.

La resistencia a la cristalización de sal está correlacionada positivamente con tres propiedades mecánicas importantes: resistencia a la compresión, resistencia a la tensión y velocidad de onda (Benavente *et al.*, 2004, 2007; Stück *et al.*, 2013). Sin embargo, se debe tener en consideración que la coincidencia no siempre es alta

entre la resistencia a la cristalización de sal y a la tensión, ya que la DWL también depende de la distribución de tamaño de poro (López-Doncel *et al.*, 2016).

Estas tres propiedades mecánicas son importantes para determinar el deterioro en las rocas y todas disminuyen con el incremento de la meteorización (Ceryan *et al.*, 2008). Los valores de resistencia a la compresión tienen una correlación positiva con la densidad (Benavente *et al.*, 2007; Pötzl *et al.*, 2022) y una correlación negativa con la porosidad (Stück *et al.*, 2013; Pötzl *et al.*, 2022). Las mismas correlaciones son ciertas para la resistencia a la tensión y la velocidad de onda (Esaki & Jiang, 2000; Pötzl *et al.*, 2022). Entonces, parece posible relacionar estas propiedades con la GRS, en donde se esperarían tasas altas de conteo para rocas con altos valores de resistencia a la compresión y a la tensión, y velocidad de onda.

González-Sámano (2012) encontró valores de resistencia a la compresión para muestras de la Ignimbrita Cantera de 95.60, 94.30 y 98.04 MPa para los ejes X, Y, Z respectivamente. Para rocas de la Formación Chichén Itzá de la Zona Arqueológica de Chichén Itzá, López-Torres (2025) obtuvo valores de 33.43 y 36.06 MPa para una muestra de caliza y brecha respectivamente, mientras que, en muestras de la Formación Chichén Itzá de otras localidades, Zarate-Barradas *et al.* (2005) encontraron valores de resistencia a la compresión de 40.21-74.63 MPa y Rodríguez-Pérez *et al.* (2021) reportaron valores de 17.31-91.52 y 20.91-88.70 MPa perpendiculares y paralelos a la laminación respectivamente, y encontraron una correlación positiva entre este parámetro y la densidad, además de una correlación negativa con la porosidad. González-Gómez *et al.* (2015) también observaron este comportamiento en otras calizas de la PY.

Con respecto a valores de resistencia a la tensión para rocas de la Ignimbrita Cantera, González-Sámano (2012) reportó valores en muestras secas de 10.56 MPa en el eje X y 9.89 MPa para el eje Z, y López-Doncel *et al.* (2015) obtuvieron valores de 7.05, 4.86 y 4.13 MPa en muestras secas de la variedad CRC para los ejes X, Y, Z respectivamente. Para las variantes CRO, blancas y de tonalidades café, los valores fueron más bajos (máximos de 2.94 MPa en el eje X, 4.16 MPa en el eje Y, 3.93 MPa en el eje Z). Concluyeron que las muestras CRC son las menos

deterioradas de acuerdo con sus propiedades de densidad, porosidad, distribución de tamaño de poro y resistencia a la tensión. Esto concuerda con lo encontrado en esta tesis, que las rocas CRC representan el estado no meteorizado de la Ignimbrita Cantera. Siegesmund *et al.* (2022) encontraron valores de 5.0 y 4.1 MPa para el eje X y Z respectivamente.

Estos son los valores de velocidad de onda P reportados para muestras de la Ignimbrita Cantera obtenidos por González-Sámano (2012): 3.861, 3.840 y 3.823 km/s para los ejes X, Y, Z respectivamente. Pötzl *et al.* (2022) obtuvieron valores de 2.8 km/s en el eje X y 2.6 km/s para el eje Z, mientras que Siegesmund *et al.* (2022) reportaron de 3.1-3.3 km/s y 2.9-3.3 km/s para el eje X y Z respectivamente.

La expansión hídrica depende principalmente del contenido, tipo y localización de minerales arcillosos y en menor medida de la distribución de tamaño de poro que explica la expansión de rocas que prácticamente no presentan minerales arcillosos expansivos (Weiss *et al.*, 2004; Ruedrich *et al.*, 2011; Wedekind *et al.*, 2013; Siegesmund & Dürrast, 2014; Steiger *et al.*, 2014; Möller *et al.*, 2018; Pötzl *et al.*, 2018; Siegesmund *et al.*, 2022).

López-Torres (2025) encontró que solamente las brechas de la Formación Chichén Itzá mostraron cambios de longitud en el experimento de expansión hídrica. Parece que esto tiene que ver con el contenido de componentes terrígenos, aunque no está claro. Si es así, entonces la GRS podría igualmente ser utilizada para encontrar posibles relaciones entre rocas susceptibles a la expansión hídrica como el caso de las brechas o en las variaciones de la Ignimbrita Cantera de CRO que mostraron los valores más altos de este parámetro.

Las rocas en una construcción pueden alcanzar temperaturas cercanas a 50°C o más (Brimblecombe, 2014), así que la evaluación de sus propiedades térmicas es importante. Factores que se deben tomar en cuenta son la luz solar recibida, la orientación de la fachada, y los cambios de temperatura diarios o por temporada que pueden causar fluctuaciones entre la superficie y el interior de las rocas (Halsey *et al.*, 1998; Feilden, 2003; Goudie & Viles, 2010; Steiger *et al.*, 2014; McAllister *et al.*, 2017). Las propiedades térmicas de las rocas dependen de su composición,

textura y anisotropía (Weiss *et al.*, 2004; Siegesmund & Dürrast, 2014; López-Doncel *et al.*, 2018).

De acuerdo con López-Doncel *et al.* (2018), la deformación residual es un parámetro importante que acelera el deterioro de las rocas de construcción y no encontraron una relación entre porosidad y expansión térmica. Efectivamente, para las rocas de la Ignimbrita Cantera, las propiedades térmicas se relacionan con la composición, por ejemplo, la muestra CRO tuvo los valores más altos de expansión, además de que no tiene una correlación importante con la porosidad. López-Torres (2025) encontró que tanto brechas como calizas presentan expansión térmica aproximadamente a partir de los 50°C y, después de dejarlas enfriar desde más de los 100°C, la mayoría mostró deformación residual. Encontró que la insolación produce el calentamiento de los bloques en el TN, así que es posible que se produzcan patrones de deterioro por este fenómeno.

Además de los coeficientes de correlación calculados entre las propiedades de las muestras de la Ignimbrita Cantera (Tabla 35), se compararon estos resultados con los índices de meteorización, específicamente MFW y WIP que demostraron reflejar adecuadamente las rocas más meteorizadas. Se debe recalcar que, de acuerdo con estos índices, la meteorización química no está muy extendida, probablemente debido a que San Luis Potosí es una ciudad con un clima seco.

En el caso del MFW, tiene correlaciones negativas medianamente buenas con el coeficiente de saturación y con el valor k. Esto significa que conforme la meteorización aumenta, el valor k disminuye, efectivamente probando que este parámetro puede ser usado para evaluar el deterioro (Ceryan *et al.*, 2008). Por otra parte, el MFW tiene una gran correlación positiva con las propiedades térmicas como expansión, coeficiente de expansión y deformación térmica residual. Así que aparte de la capilaridad y las sales, parece que las propiedades térmicas ejercen un control en el deterioro químico de la Ignimbrita Cantera.

Para el WIP, se encontraron correlaciones positivas medianamente buenas con la densidad aparente y negativas medianamente buenas con la porosidad y absorción de agua en vacío. Recordando que los valores más bajos del WIP indican mayor

meteorización, entonces estas correlaciones se traducirían como que la meteorización química hace que la densidad aparente disminuya, mientras que la porosidad y la absorción son más altas con el incremento de la meteorización. El WIP tiene una buena correlación positiva con el valor  $k$ , es decir, mientras más meteorizadas las rocas su valor  $k$  disminuye. Esto concuerda con los resultados de Ceryan *et al.* (2008). El WIP tiene muy buena correlación positiva con la expansión hídrica y con la DWL, y una gran correlación positiva con el MAW.

Para las muestras de la Formación Chichén Itzá, además de los coeficientes de correlación calculados entre sus propiedades físicas (Tabla 41), se compararon con el índice de meteorización AC que está diseñado para la disolución de las calizas.

Se encontró que el índice AC tiene correlaciones positivas buenas y muy buenas con la porosidad y con todos los valores absorción de agua. Estos resultados concuerdan en que estos parámetros definen que entre más agua esté almacenada en las calizas, habrá mayor disolución. Los valores de AC tienen correlaciones negativas buenas con la densidad aparente y excelentes correlaciones negativas con la densidad de matriz y MAW. Es evidente entonces que la densidad es afectada por los procesos de disolución y que estos dependen de las microfacies y sus variaciones geoquímicas.

En relación con la evaluación de las propiedades petrofísicas y mecánicas, debe aclararse que la GRS, como cualquier otra NDT, debe ser complementada con otros análisis para tener un mejor entendimiento de los procesos de deterioro. Debido a que algunas propiedades elásticas y velocidad de onda (Fontaine *et al.*, 2015; Fais *et al.*, 2017; Orenday-Tapia *et al.*, 2018) dependen de la densidad del material, una combinación de NDT y GRS pueden ser usadas para comparación, específicamente porque la disolución de las calizas afecta el porcentaje de porosidad y ultimadamente la densidad aparente. Además, el incremento de porosidad puede causar que más agua resida en los bloques de roca, causando atenuación de la radiación. Por lo tanto, las mediciones de humedad (Wilhelm *et al.*, 2016; Hatir *et al.*, 2019; Theodoridou & Török, 2019) y la GRS son NDT que pueden ser bien correlacionadas, como se demuestra en esta tesis. Otra propiedad medible por NDT



es la susceptibilidad magnética. En particular, Williams-Thorpe *et al.* (2000) evaluaron la susceptibilidad magnética y GRS para comparar sus respuestas en granitos de diferentes regiones para determinar su procedencia. Esta NDT puede ofrecer otra herramienta para comparar la respuesta del afloramiento con la de las construcciones para evaluar el deterioro. Similarmente, Monna *et al.* (2008) usaron susceptibilidad magnética para evaluar el *soiling* en fachadas, aunque más estudios sobre esta propiedad y la GRS necesitan ser llevados a cabo.

### **8.7. Consideraciones sobre la espectrometría de rayos gamma en el estudio del patrimonio edificado**

De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio, tanto en rocas carbonatadas como en ignimbritas riolíticas, se verificó que la metodología propuesta de GRS *in situ* en construcciones es aplicable a diferentes rocas, sin importar la concentración de los radioelementos, los diferentes tiempos de exposición de los monumentos y las condiciones ambientales y climáticas en las que se encuentran.

Una de las ventajas de la GRS con un espectrómetro portátil es que es un método no destructivo que permite una rápida evaluación de los radioelementos y de la humedad, aunque no se pueda medir superficialmente, además de que se pueden identificar subflorescencias.

Sin embargo, algunas limitaciones con respecto a la técnica de GRS deben ser detalladas. Debido a la naturaleza aleatoria de la desintegración nuclear de los radioelementos, los valores obtenidos no serán iguales, más bien solo similares (aunque esto se supera fácilmente usando un tiempo de medición sugerido de 2 o más minutos). Además, la GRS puede ser afectada por el radón atmosférico, el cual tiene concentraciones elevadas después de la lluvia, así que las mediciones deberían de tomarse varias horas o días después de la lluvia para permitir que las concentraciones de radón lleguen a valores normales. Esta situación representa

una limitante en áreas o en temporadas con lluvias frecuentes, aunque la GRS puede planearse para llevarse a cabo en temporada seca.

Al igual que cualquier otra NDT, la GRS debería de compararse con otros análisis, por lo que se sugiere que investigaciones futuras se enfoquen en la correlación de datos obtenidos por NDT como propiedades elásticas y de resistividad. Como se describió en la sección “1.7.2. Zona Arqueológica de Chichén Itzá”, diversos estudios han usado tomografía de resistividad eléctrica en la Zona Arqueológica de Chichén Itzá para detectar estructuras sepultadas (Chávez *et al.*, 2018; Tejero-Andrade *et al.*, 2018). Desafortunadamente, la GRS no puede ser aplicada con este propósito porque la humedad del suelo causa la atenuación de la radiación y la máxima profundidad de investigación de la GRS es de 1 m en condiciones especiales y normalmente es de 0.5 m. Sin embargo, existen intentos para el uso de la GRS para reconocer estructuras arqueológicas sepultadas en zonas con una cubierta delgada de suelo (Ruffell *et al.*, 2006; Sanjurjo-Sánchez *et al.*, 2018a). Por otra parte, el uso de resistividad eléctrica para evaluar la solubilidad de sales y humedad (García-Solís *et al.*, 2025) es un ejemplo de una NDT que complementaría los datos de la GRS para evaluar el contenido y distribución de humedad. Finalmente, el equipo portátil de fluorescencia de rayos X, como el utilizado para determinar la composición química de la escultura del Trono del Jaguar Rojo (Juárez-Rodríguez *et al.*, 2018), puede ser útil en algunos materiales porque puede identificar más elementos químicos (Na hasta U) que la GRS (K, U, Th). Sin embargo, considerando que las calizas están compuestas principalmente de carbonato de calcio, este equipo solo sería capaz de detectar sus componentes químicos porque la presencia de otros elementos se vería opacada. Al contrario, la GRS probó ser una herramienta confiable para identificar las distribuciones de los radioelementos en calizas.

Entonces, la GRS puede ser una técnica útil para la evaluación de los patrones de deterioro y sus correlaciones con las propiedades físicas, así como para determinar procesos de meteorización química que cambian sus parámetros mecánicos en cualquier tipo de roca tal como lo demostraron los resultados de esta tesis.



## 9. Conclusiones

La espectrometría de rayos gamma, al ser una prueba no destructiva, se puede utilizar para la evaluación de las rocas de construcción, específicamente para la identificación de bloques con alto contenido de humedad o sales (subflorescencias) en el sistema interno de poros de las rocas, para la caracterización del grado de meteorización o deterioro, y para diferenciar entre litologías aun cuando estas no se puedan distinguir a simple vista.

Todo lo anterior fue posible por la metodología propuesta, la cual consistió en la corrección de los datos espectrométricos debido a la morfología del bloque de roca (plana, irregular, cóncava, convexa) y la influencia de varias superficies (bordes, esquinas, entre otras) que comúnmente se encuentran en las construcciones y que no se recomienda omitir porque se podrían perder datos valiosos. Esta primera corrección efectivamente sirvió para que estos valores recalculados fueran similares a los obtenidos en superficies uniformes planas.

Después de esta corrección se pudieron identificar adecuadamente los bloques con humedad y/o sales, los cuales tuvieron valores anormalmente bajos cuando se graficaron las tasas de conteo contra el contenido de humedad. Esto permitió interpretar también cuáles fueron las rocas más propensas al deterioro relacionado con la presencia de agua porque experimentaron un aumento en la porosidad y, por lo tanto, un aumento en su capacidad para almacenar agua, lo cual causó la atenuación de la radiación gamma.

Los patrones de deterioro pueden influir en la interpretación de la espectrometría de rayos gamma, por ejemplo, cemento, costras de yeso y eflorescencias pueden opacar las lecturas de humedad. A pesar de esto, la técnica demostró que es efectiva aun cuando la humedad superficial no pueda medirse. Con este propósito, la radiación total se mostró más sensible que las concentraciones específicas de potasio, uranio y torio. La misma situación aplica para la identificación de bloques con sal.

Por otra parte, para obtener los valores reales de los radioelementos potasio, uranio y torio, fue necesario recalcular los datos para un contenido de humedad igual al 0.0%. Esto se logró con el segundo paso de la corrección propuesta. Después de este paso se pudieron hacer interpretaciones sobre la pérdida de estos elementos comparando los datos de las construcciones con los de los afloramientos. En concordancia con la hipótesis, se encontró que las construcciones están más deterioradas al haber estado más tiempo expuestas a las condiciones ambientales desde que fueron erigidas. Esto se vio reflejado en la espectrometría por la pérdida principalmente de potasio, y en menor medida de torio, mientras que el uranio también disminuyó, pero tuvo una distribución más irregular.

La metodología se probó y aplicó exitosamente en la Caja del Agua Conservera y la Caja del Agua del Santuario del Centro Histórico de San Luis Potosí, así como en el Templo Norte de la Zona Arqueológica de Chichén Itzá. Esto significa que la espectrometría de rayos gamma *in situ* en construcciones funcionó tanto en la Ignimbrita Cantera que representa una litología con una alta concentración de radioelementos y en la Formación Chichén Itzá para calizas y brechas carbonatadas con una muy baja concentración de potasio, uranio y torio.

Es importante hacer notar que, aparte de los distintos tipos de roca, la técnica de espectrometría de rayos gamma es utilizable en diferentes contextos climáticos: semiárido en el caso de San Luis Potosí y tropical para Yucatán. Además, se tuvieron buenos resultados sin importar el tiempo de exposición de las construcciones, demostrando que el método es sensible para determinar el deterioro en monumentos muy antiguos (alrededor de 800 años para el Templo Norte) y relativamente recientes (casi 200 años para las Cajas del Agua).

En específico para las construcciones del Centro Histórico de San Luis Potosí, la espectrometría de rayos gamma reveló que existe una pérdida de potasio, uranio y torio notable en las Cajas del Agua en comparación con el afloramiento. De estos, la Caja del Agua del Santuario mostró los valores más bajos de radioelementos y se interpretó que se debe a su mayor deterioro que es evidente en las zonas inferiores como desprendimiento superficial. Esta forma de daño se debe a la alta

absorción de capilaridad de la Ignimbrita Cantera y la existencia de un depósito de agua debajo de esta construcción que estuvo activo hasta hace algún tiempo. Todo esto, además del aporte de sales, contribuyó a los valores más bajos en la espectrometría de rayos gamma en esta Caja del Agua.

Sus patrones de deterioro definitivamente se relacionan con las propiedades petrofísicas de la Ignimbrita Cantera que fueron determinadas en laboratorio. Está caracterizada por valores muy altos de porosidad (aproximadamente 33%), gran absorción de agua y poca resistencia a la cristalización de sal, con lo cual se puede concluir que la absorción de agua, mayormente por capilaridad, provocará el mayor deterioro cuando se conjunta con sales solubles.

Un aspecto relevante para las rocas de la Ignimbrita Cantera es su coloración. Se determinó que su coloración original es el rosa claro y se meteoriza hacia unas tonalidades rosas más oscuras y también naranjas según lo observado en los afloramientos y construcciones. Por medio de la espectrometría de rayos gamma se encontró que las rocas de tonalidad naranja tienen una concentración ligeramente más alta a pesar de que están más meteorizadas, pero esto se debe a que parte del potasio, uranio y torio pueden ser retenidos en estas superficies oxidadas que manchan la matriz como se demostró en los análisis petrográficos.

La meteorización de la Cajas del Agua interpretada a partir de la espectrometría de rayos gamma se comprobó con análisis geoquímicos de elementos mayores y traza, los cuales mostraron una disminución del potasio y pérdida de uranio y torio respectivamente. Los índices de meteorización calculados demostraron valores más altos para la Caja del Agua del Santuario. En particular, los resultados del índice MFW indicaron que las rocas de coloración rosa oscuro son las más meteorizadas, lo cual se confirma con la espectrometría de rayos gamma, en donde rocas con esta tonalidad tuvieron los valores más bajos. En efecto, estas rocas presentan la mayor expansión hídrica, pérdida de peso por cristalización de sal, expansión térmica y deformación térmica residual.

Sin embargo, se debe resaltar que la meteorización interpretada por la espectrometría de rayos gamma y por índices de meteorización es relativamente

baja. Esto tiene sentido considerando que el clima de San Luis Potosí es semiárido, así que los procesos de meteorización química no actúan tan predominantemente como lo harían en ambientes húmedos como en Yucatán.

Para las calizas y brechas de la Formación Chichén Itzá, se interpretó a partir de la espectrometría de rayos gamma que existe una pérdida de radioelementos en el Templo Norte con respecto a los afloramientos. En particular, las calizas tuvieron concentraciones muy bajas de elementos radioactivos, mientras que las brechas tuvieron los valores más altos de potasio y torio. Debido al ambiente marino de depósito, la concentración de uranio para ambos tipos de roca es bastante similar.

De acuerdo con los análisis petrográficos y geoquímicos, se interpretó que el potasio y torio de las brechas se debe a la presencia de componentes terrígenos, en este caso, de partículas de suelos muy posiblemente transportados por el viento y depositados como coloides. Estas partículas de minerales arcillosos contienen al potasio y torio adsorbidos en su superficie, por lo que su pérdida por procesos de meteorización es posible. Por otra parte, las calizas tienen muy poco o nada de detritos continentales. El uranio reside en general en la estructura de la calcita, así que su movilidad depende más bien de la disolución.

Estas características ayudaron a diferenciar ambas litologías por medio de la espectrometría de rayos gamma, así que esta técnica, además de identificar bloques con humedad y sales, se puede utilizar para hacer una rápida identificación del tipo de roca aunque esta no se pueda apreciar a simple vista.

Se encontró en los afloramientos que las brechas presentaron los valores más altos de humedad y en el Templo Norte presentan mayor deterioro que las calizas. Considerando que se puede hacer una distinción fácil entre ambos tipos de roca por medio de la espectrometría de rayos gamma por el contenido de radioelementos y por el deterioro, entonces esta técnica es efectiva para identificar los bloques más propensos a experimentar meteorización, es decir, las brechas.

Los patrones de deterioro de los bloques de la Formación Chichén Itzá se relacionan con sus propiedades petrofísicas que dependen de sus microfacies. Estas rocas están caracterizadas en general por valores bajos a medios de porosidad (10-25%),

muy baja absorción por capilaridad y gran resistencia a la cristalización de sal. Por estos motivos no se encontraron daños en las zonas inferiores del Templo Norte y más bien los daños están ligados a la disolución por la escorrentía del agua de lluvia en brechas que tienen más porosidad y en los bloques localizados en el área no cubierta por la bóveda en donde se observó un ligero cambio de coloración y daños posiblemente relacionados con colonización biológica pasada.

Cabe recalcar que la espectrometría de rayos gamma es una técnica no destructiva, así que se puede aplicar para el estudio de monumentos que forman parte del patrimonio cultural de cualquier país.

Los resultados y la interpretación de la espectrometría de rayos gamma se corroboraron con las observaciones de los patrones de deterioro, identificación de la mineralogía, experimentos petrofísicos y análisis geoquímicos de laboratorio. Con esto queda claro que una excelente interpretación se puede realizar a partir de esta técnica sin la necesidad de llevar a cabo análisis costosos y puede derivarse más bien con la información ya disponible de otros estudios.

A pesar de sus buenos resultados, la espectrometría de rayos gamma, como cualquier otra prueba no destructiva, desafortunadamente no provee toda la información necesaria para la caracterización de las rocas y patrones de deterioro, por lo que debería ser complementada con otras pruebas no destructivas. Una combinación de todas estas técnicas permitirá un mejor entendimiento de los procesos pasados y que están sucediendo en el presente para hacer posible la supervisión de las condiciones de las rocas de construcción en el patrimonio edificado y prevenir su deterioro.

En definitiva, el mantenimiento adecuado que se le ha dado actualmente a las construcciones estudiadas ayudar a la conservación y prevención de futuras amenazas de deterioro. Para las Cajas del Agua y en general para cualquier construcción del Centro Histórico de San Luis Potosí en las que se emplee la Ignimbrita Cantera, se debería de buscar que los bloques no absorban agua por capilaridad. En el caso del Templo Norte, una solución para la disolución de las rocas podría ser completar la bóveda podría evitar la escorrentía de agua de lluvia



y en consecuencia la proliferación de organismos. Además, se deberían considerar las afectaciones futuras debidas a contaminantes y cambio climático que podrían llevar al desarrollo de costras de yeso.

Las investigaciones futuras deberán enfocarse en la evaluación por medio de la espectrometría de rayos gamma de otros tipos de roca como areniscas, calizas con un mayor aporte de clásticos, rocas metamórficas e ígneas de diferentes composiciones. Esto debido a que, a pesar de los excelentes resultados presentados, posibles valores más bajos de porosidad de algunas de estas rocas podrían no permitir una gran capacidad de almacenamiento de agua, así que no se encontrarían relaciones entre la radiación y humedad, a menos que las rocas estén en muy deterioradas. Sin embargo, la premisa de la pérdida de radioelementos en estas rocas sí seguiría siendo válida, así que la espectrometría de rayos gamma se podría utilizar para determinar el grado de meteorización.

## Referencias

- Adams, J. A. S., & Gasparini, P. (1970). Gamma-ray spectrometry of rocks. Elsevier Publishing Company.
- Adams, J. A. S., Osmond, J. K., & Rogers, J. J. W. (1959). The geochemistry of thorium and uranium. *Physics and Chemistry of the Earth*, 3(1), 298–348.
- Adams, J. A. S., & Weaver, C. E. (1958). Thorium-to-uranium ratios as indicators of sedimentary processes: example of concept of geochemical facies. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 42(2), 387–430.
- Aguilera-Gaspar, F. (2018). Distribución espacio-temporal de radón en interiores urbanos de San Luis Potosí [Tesis de maestría, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica].
- Aguillón-Robles, A., Aranda-Gómez, J. J., & Solorio-Munguía, J. G. (1994). Geología y tectónica de un conjunto de domos riolíticos del Oligoceno medio en el sur del estado de San Luis Potosí, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 11(1), 29–42.
- Aguillón-Robles, A., Tristán-González, M., Aguirre-Díaz, G., López-Doncel, R. A., Bellon, H., & Martínez-Esparza, G. (2014). Eocene to Quaternary mafic-intermediate volcanism in San Luis Potosí, central Mexico: The transition from Farallon plate subduction to intra-plate continental magmatism. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 276(1), 152–172.
- Aigner, T., Schauer, M., Junghans, W.-D., & Reinhardt, L. (1995). Outcrop gamma-ray logging and its applications: examples from the German Triassic. *Sedimentary Geology*, 100(1-4), 47–61.
- Airo, M.-L., & Loukola-Ruskeeniemi, K. (2004). Characterization of sulfide deposits by airborne magnetic and gamma-ray responses in eastern Finland. *Ore Geology Reviews*, 24(1) 67–84.
- Aitchison, J. (1986). The statistical analysis of compositional data. Chapman and Hall.

Almaguer-Rodríguez, J., Guevara-Betancourt, R. E., Barajas-Araujo, F., & Montero-Pérez, V. (2025). Geofísica en San Luis Potosí. In J. R. Barboza-Gudiño (Ed.), *Geología del estado de San Luis Potosí* (pp. 273–288). Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Álvarez-Ayuso, E. (2022). Stabilization and encapsulation of arsenic-/antimony-bearing mine waste: overview and outlook of existing techniques. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 52(20), 3720–3752.

Aoki, H., & Matsukura, Y. (2007). A new technique for non-destructive field measurement of rock-surface strength: an application of the Equotip hardness tester to weathering studies. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(12), 1759–1769.

Arnold, D. E. (2005). Maya blue and palygorskite a second possible pre-Columbian source. *Ancient Mesoamerica*, 16(1), 51–62.

Artemieva, I. M., Thybo, H., Jakobsen, K., Sørensen, N. K., & Nielsen, L. S. K. (2017). Heat production in granitic rocks: global analysis based on a new data compilation GRANITE2017. *Earth-Science Reviews*, 172(1), 1–26.

Aspin, S. J., & Bierwirth, P. N. (1997). GIS analysis of the effects of forest biomass on gamma radiometric images. In *Proceedings of the third national forum on GIS in the geosciences* (AGSO Record 1997/36, pp. 77–83). Australian Geological Survey Organisation.

Aydin, A., & Basu, A. (2005). The Schmidt hammer in rock material characterization. *Engineering Geology*, 81(1), 1–14.

Barboza-Gudiño, J. R., Borselli, L., López-Doncel, R. A., Mata-Segura, J. L., Sarocchi, D., Saucedo-Girón, R., Almaguer-Rodríguez, J., & Guevara-Betancourt, R. E. (2025). Peligros geológicos. In J. R. Barboza-Gudiño (Ed.), *Geología del estado de San Luis Potosí* (pp. 291–309). Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Basdevant, J.-L., Rich, J., & Spiro, M. (2005). *Fundamentals in nuclear physics: from nuclear structure to cosmology*. Springer.

Basu, A., & Aydin, A. (2004). A method for normalization of Schmidt hammer rebound values. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(7), 1211–1214.

Bataller, F. J., McDougall, N. D., & Moscariello, A. (2022). Reviewing the correlation potential of spectral gamma ray: a case study in Ordovician glacial environments in the Murzuq basin, SW Libya. *Journal of African Earth Sciences*, 188(1), Article 104475.

Batista-Rodríguez, J. A., López-Saucedo, F. J., Almaguer-Carmenates, Y., Motas-Ortíz, J. L., & Nerio-Rocha, J. (2022). Assessment by portable gamma spectrometry of the radiological hazard associated with built environments in northeastern Mexico. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(9), 8645–8660.

Baudez, C.-F. (2004). Una historia de la religión de los antiguos mayas. Centro de estudios mexicanos y centroamericanos.

Baudez, C.-F., & Latsanopoulos, N. (2010). Political structure, military training, and ideology at Chichen Itza. *Ancient Mesoamerica*, 21(1), 1–20.

Bautista-Zúñiga, F., Díaz-Garrido, S., Castillo-González, M., & Zinck, J. A. (2005). Spatial heterogeneity of the soil cover in the Yucatán karst: comparison of Mayan, WRB, and numerical classifications. *Eurasian Soil Science*, 38(1), S81–S88.

Bautista-Zúñiga, F., Estrada-Medina, H., Jiménez-Osornio, J. J. M., & González-Iturbe, J. A. (2004). Relación entre el relieve y unidades de suelo en zonas cársticas de Yucatán. *Terra Latinoamericana*, 22(3), 243–254.

Bautista-Zúñiga, F., Jiménez-Osornio, J. J. M., Navarro-Alberto, J., Manu, A., & Lozano, R. (2003). Microrelieve y color del suelo como propiedades de diagnóstico en leptosoles cársticos. *Terra Latinoamericana*, 21(1), 1–11.

Bautista-Zúñiga, F., Palacio-Aponte, G., Quintana, P., & Zinck, J. A. (2011). Spatial distribution and development of soils in tropical karst areas from the Peninsula of Yucatan, Mexico. *Geomorphology*, 135(3-4), 308–321.

Beach, T. (1998). Soil constraints on northwest Yucatán, Mexico: pedoarchaeology and Maya subsistence at Chunchucmil. *Geoarchaeology*, 13(8), 759–791.

Beltrán-Zavala, J. J., & Roque-Jiménez, V. (2018). Proyecto de conservación y restauración de la Caja de Agua “Conservera y balaustrada asociada” (Reporte no publicado). Unidad de Gestión del Centro Histórico de San Luis Potosí.

Beltrán-Zavala, J. J., Roque-Jiménez, V., & Velázquez-Mireles, A. I. (2015). Proyecto de conservación y restauración de la Caja de Agua Conservera y balaustrada asociada (Reporte no publicado). Unidad de Gestión del Centro Histórico de San Luis Potosí.

Benavente, D., Cueto, N., Martínez-Martínez, J., García del Cura, M. A., & Cañaveras, J. C. (2007). The influence of petrophysical properties on the salt weathering of porous building rocks. *Environmental Geology*, 52(2), 215–224.

Benavente, D., García-del Cura, M. A., Bernabéu, A., & Ordóñez, S. (2001). Quantification of salt weathering in porous stones using an experimental continuous partial immersion method. *Engineering Geology*, 59(3-4), 313–325.

Benavente, D., García-del Cura, M. A., Fort, R., & Ordóñez, S. (2004). Durability estimation of porous building stones from pore structure and strength. *Engineering Geology*, 74(1-2), 113–127.

Bierwirth, P. (1996). Investigation of airborne gamma-ray images as a rapid mapping tool for soil and land degradation - Wagga Wagga, NSW (Technical Report Record 1996/22). Australian Geological Survey Organisation.

Birch, F. (1961). The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars, part 2. *Journal of Geophysical Research*, 66(7), 2199–2224.

Bíró, P., & Pérez de Heredia, E. (2021). Los rituales de entronización de los príncipes “Turbante de Serpiente” de Chichén Itzá y Hunac Ceel de Mayapán. *Latin American Antiquity*, 32(2), 292–309.

Bityukova, L. (2006). Air pollution effect on the decay of carbonate building stones in old town of Tallinn. *Water, Air, & Soil Pollution*, 172(1-4), 239–271.

Bjørlykke, K. (2015). Sedimentary geochemistry. In K. Bjørlykke (Ed.), *Petroleum geoscience: from sedimentary environments to rock physics* (2nd ed., pp. 91–117). Springer.

- Boggs, S. (2009). *Petrology of sedimentary rocks* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Bonet, F., & Butterlin, J. (1979). Reconocimiento geológico de la Península de Yucatán. In *Enciclopedia yucatanense* (Tomo X, pp. 9–31). Gobierno de Yucatán.
- Brimblecombe, P. (2014). Environment and architectural stone. In S. Siegesmund, & R. Snethlage (Eds.), *Stone in architecture: properties, durability* (5th ed., pp. 317–347). Springer.
- Brimblecombe, P., & Camuffo, D. (2003). Long term damage to the built environment. In P. Brimblecombe (Ed.), *The effects of air pollution on the built environment* (Air Pollution Reviews Vol. 2, pp. 1–30). Imperial College Press.
- Buggle, B., Glaser, B., Hambach, U., Gerasimenko, N., & Marković, S. (2011). An evaluation of geochemical weathering indices in loess–paleosol studies. *Quaternary International*, 240(1-2), 12–21.
- Buntebarth, G. (1982). Density and seismic velocity in relation to mineralogical constitution based on an ionic model for minerals. *Earth and Planetary Science Letters*, 57(2), 358–366.
- Butterlin, J. (1958). Reconocimiento geológico preliminar del territorio de Quintana Roo. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 10(5), 531–570.
- Butterlin, J., & Bonet, F. (1960). Microfauna del Eoceno inferior de la Península de Yucatán. *Paleontología Mexicana*, 7(1), 1–18.
- Butterlin, J., & Bonet, F. (1963). Mapas geológicos de la Península de Yucatán. I.- Las formaciones cenozoicas de la parte mexicana de la Península de Yucatán. *Ingeniería Hidráulica en México*, 17(1), 63–71.
- Cabadas-Báez, H. V., Solleiro-Rebolledo, E., Sedov, S., Pi-Puig, T., & Alcalá, J. R. (2010a). The complex genesis of red soils in Peninsula de Yucatán, Mexico: mineralogical, micromorphological and geochemical proxies. *Eurasian Soil Science*, 43(13), 1439–1457.

Cabadas-Báez, H. V., Solleiro-Rebolledo, E., Sedov, S., Pi-Puig, T., & Gama-Castro, J. (2010b). Pedosediments of karstic sinkholes in the eolianites of NE Yucatán: a record of Late Quaternary soil development, geomorphic processes and landscape stability. *Geomorphology*, 122(3-4), 323–337.

Caballero-Miranda, C. I., Torres-Hernández, J. R., & Alva-Valdivia, L. M. (2009). Anisotropy of magnetic susceptibility analysis of the Cantera Ignimbrite, San Luis Potosi, México: flow source recognition. *Earth, Planets and Space*, 61(1), 173–182.

Cardell, C., Benavente, D., & Rodríguez-Gordillo, J. (2008). Weathering of limestone building material by mixed sulfate solutions. Characterization of stone microstructure, reaction products and decay forms. *Materials Characterization*, 59(10), 1371–1385.

Carrier, F., Bourdon, B., Pili, É., Truffert, C., & Wyns, R. (2006). Airborne gamma-ray spectrometry to quantify chemical erosion processes. *Journal of Geochemical Exploration*, 88(1-3), 266–270.

Carroll, T. R. (1981). Airborne soil moisture measurement using natural terrestrial gamma radiation. *Soil Science*, 132(5), 358–366.

Çelik, M. Y., & Aygün, A. (2019). The effect of salt crystallization on degradation of volcanic building stones by sodium sulfates and sodium chlorides. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(5), 3509–3529.

Cerrito, L. (2017). *Radiation and detectors: introduction to the physics of radiation and detection devices*. Springer.

Ceryan, Ş. (2008). New chemical weathering indices for estimating the mechanical properties of rocks: a case study from the Kürtün granodiorite, NE Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 17(1), 187–207.

Ceryan, Ş. (2012). Weathering indices for assessment of weathering effect and classification of weathered rocks: a case study from NE Turkey. In I. A. Dar (Ed.), *Earth sciences* (pp. 19–44). IntechOpen.

Ceryan, Ş., Zorlu, K., Gokceoglu, C., & Temel, A. (2008). The use of cation packing index for characterizing the weathering degree of granitic rocks. *Engineering Geology*, 98(1-2), 60–74.

Chamley, H. (1989). *Clay sedimentology*. Springer.

Chan, L. S., Wong, P. W., & Chen, M. Q. F., (2007). Abundances of radioelements (K, U, Th) in weathered igneous rocks in Hong Kong. *Journal of Geophysics and Engineering*, 4(3), 285–292.

Charola, A. E. (2000). Salts in the deterioration of porous materials: an overview. *Journal of the American Institute for Conservation*, 39(3), 327–343.

Charola, A. E., Pühringer, J., & Steiger, M. (2007). Gypsum: a review of its role in the deterioration of building materials. *Environmental Geology*, 52(2), 339–352.

Chávez, R. E., Tejero-Andrade, A., Cifuentes-Nava, G., Argote-Espino, D. L., & Hernández, J. E. (2015). A special ERT-3D array carried out to investigate the subsoil of the pyramid El Castillo, Chichen Itza, Mexico. In *Near surface geoscience (21st European meeting of environmental and engineering geophysics)*, pp. 651–655). European Association of Geoscientists & Engineers.

Chávez, R. E., Tejero-Andrade, A., Cifuentes-Nava, G., Argote-Espino, D. L., & Hernández-Quintero, E. (2018). Karst detection beneath the pyramid of El Castillo, Chichen Itza, Mexico, by non-invasive ERT-3D methods. *Scientific Reports*, 8(1), Article 15391.

Chen, J., Li, F., Zhao, X., Wang, Y., Zhang, L., Feng, L., Liu, X., Yan, L., & Yu, L. (2023). The weathering process of carbonatite: weathering time. *PeerJ*, 11(7), Article e15793.

Chen, M. Q. F., & Chan, L. S. (2002). In-situ gamma-ray spectrometric study of weathered volcanic rocks in Hong Kong. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27(6), 613–625.

Chen, X., Romaniello, S. J., Herrmann, A. D., Hardisty, D., Gill, B. C., & Anbar, A. D. (2018). Diagenetic effects on uranium isotope fractionation in carbonate sediments from the Bahamas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 237(1), 294–311.



Chiozzi, P., Pasquale, V., Verdoya, M., & De Felice, P. (2000). Practical applicability of field  $\gamma$ -ray scintillation spectrometry in geophysical surveys. *Applied Radiation and Isotopes*, 53(1-2), 215–220.

Chiu, C. F., & Ng, C. W. W. (2014). Relationships between chemical weathering indices and physical and mechanical properties of decomposed granite. *Engineering Geology*, 179(1), 76–89.

Cho, T., & Ohta, T. (2022). A robust chemical weathering index for sediments containing authigenic and biogenic materials. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 608(1), Article 111288.

Cole, D. B., Planavsky, N. J., Longley, M., Böning, P., Wilkes, D., Wang, X., Swanner, E. D., Wittkop, C., Loydell, D. K., Busigny, V., Knudsen, A. C., & Sperling, E. A. (2020). Uranium isotope fractionation in non-sulfidic anoxic settings and the global uranium isotope mass balance. *Global Biogeochemical Cycles*, 34(8), Article e2020GB006649.

Cook, S. E., Corner, R. J., Groves, P. R., & Grealish, G. J. (1996). Use of airborne gamma radiometric data for soil mapping. *Australian Journal of Soil Research*, 34(1), 183–194.

Coulouma, G., Caner, L., Loonstra, E. H., & Lagacherie, P. (2016). Analysing the proximal gamma radiometry in contrasting Mediterranean landscapes: towards a regional prediction of clay content. *Geoderma*, 266(1), 127–135.

Croft, S., & Hutchinson, I. G. (1999). The measurement of U, Th and K concentrations in building materials. *Applied Radiation and Isotopes*, 51(5), 483–492.

Dauth, C. (1997). Airborne magnetic, radiometric and satellite imagery for regolith mapping in the Yilgarn Craton of Western Australia. *Exploration Geophysics*, 28(1-2), 199–203.

Davies, S. J., & Elliott, T. (1996). Spectral gamma ray characterization of high resolution sequence stratigraphy: examples from Upper Carboniferous fluvio-deltaic systems, County Clare, Ireland. In J. A. Howell, & J. F. Aitken (Eds.), *High resolution*

sequence stratigraphy: innovations and applications (Geological Society Special Publication 104, pp. 25–35). The Geological Society.

Davis, J. D., & Guilbert, J. M. (1973). Distribution of the radioelements potassium, uranium, and thorium in selected porphyry copper deposits. *Economic Geology*, 68(2), 145–160.

Day-Stirrat, R. J., Hillier, S., Nikitin, A., Hofmann, R., Mahood, R., & Mertens, G. (2021). Natural gamma-ray spectroscopy (NGS) as a proxy for the distribution of clay minerals and bitumen in the Cretaceous McMurray Formation, Alberta, Canada. *Fuel*, 288(1), Article 119513.

de la Rosa-García, S. C., Ortega-Morales, O., Gaylarde, C. C., Beltrán-García, M., Quintana-Owen, P., & Reyes-Estebanez, M. (2011). Influence of fungi in the weathering of limestone of Mayan monuments. *Revista Mexicana de Micología*, 33(1), 43–51.

de Mello, D. C., Melo-Demattê, J. A., Alcantara-de Oliveira Mello, F., Poppiel, R. R., Quiñonez-Silvero, N. E., Safanelli, J. L., Barros-e Souza, A., Di Loreto-Di Raimo, L. A., Rizzo, R., Bispo-Resende, M. E., & Gonçalves-Reynaud Schaefer, C. E. (2021). Applied gamma-ray spectrometry for evaluating tropical soil processes and attributes. *Geoderma*, 381(1), Article 114736.

de Pablo-Galán, L. (1996). Palygorskite in Eocene-Oligocene lagoonal environment, Yucatán, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 13(1), 94–103.

Deconinck, J.-F., Hesselbo, S. P., Debuisser, N., Averbuch, O., Baudin, F., & Bessa, J. (2003). Environmental controls on clay mineralogy of an Early Jurassic mudrock (Blue Lias Formation, southern England). *International Journal of Earth Sciences*, 92(2), 255–266.

Dickson, B. H., Bailey, R. C., & Grasty, R. L. (1981). Utilizing multi-channel airborne gamma-ray spectra. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18(12), 1793–1801.

Dickson, B. L. (1995). Uranium-series disequilibrium in Australian soils and its effect on aerial gamma-ray surveys. *Journal of Geochemical Exploration*, 54(3) 177–186.

- Dickson, B. L., Fraser, S. J., & Kinsey-Henderson, A. (1996). Interpreting aerial gamma-ray surveys utilising geomorphological and weathering models. *Journal of Geochemical Exploration*, 57(1-3), 75–88.
- Dickson, B. L., & Scott, K. M. (1997). Interpretation of aerial gamma-ray surveys—adding the geochemical factors. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(2), 187–200.
- Dinçer, İ., & Bostancı, M. (2019). Capillary water absorption characteristics of some Cappadocian ignimbrites and the role of capillarity on their deterioration. *Environmental Earth Sciences*, 78(1), Article 7.
- Doehne, E. (2002). Salt weathering: a selective review. In S. Siegesmund, T. Weiss, & A. Vollbrecht (Eds.), *Natural stone, weathering phenomena, conservation strategies and case studies* (Geological Society Special Publication 205, pp. 51–64). The Geological Society.
- Doehne, E., & Price, C. A. (2010). *Stone conservation: an overview of current research* (2nd ed.). The Getty Conservation Institute.
- Doveton, J. H., & Merriam, D. F. (2004). Borehole petrophysical chemostratigraphy of Pennsylvanian black shales in the Kansas subsurface. *Chemical Geology*, 206(3-4), 249–258.
- Dunham, R. J. (1962). Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In W. E. Ham (Ed.), *Classification of carbonate rocks – a symposium* (pp. 108–121). The American Association of Petroleum Geologists.
- Duzgoren-Aydin, N. S., & Aydin, A. (2003). Chemical heterogeneities of weathered igneous profiles: implications for chemical indices. *Environmental & Engineering Geoscience*, 9(4), 363–377.
- Duzgoren-Aydin, N. S., Aydin, A., & Malpas, J. (2002). Re-assessment of chemical weathering indices: case study on pyroclastic rocks of Hong Kong. *Engineering Geology*, 63(1-2), 99–119.

Egozcue, J. J., & Pawlowsky-Glahn, V. (2011). Basic concepts and procedures. In V. Pawlowsky-Glahn, & A. Buccianti (Eds.), *Compositional data analysis: theory and applications* (pp. 12–28). John Wiley & Sons, Ltd.

Egozcue, J. J., Pawlowsky-Glahn, V., Mateu-Figueras, G., & Barceló-Vidal, C. (2003). Isometric logratio transformations for compositional data analysis. *Mathematical Geology*, 35(3), 279–300.

Ellis, D. V., & Singer, J. M. (2008). *Well logging for earth scientists* (2nd ed.). Springer.

Eltom, H., Abdullatif, O., Makkawi, M., & Yasin, M. (2013). Integration of spectral gamma-ray and geochemical analyses for the characterization of the upper Jurassic Arab-D carbonate reservoir: outcrop analogue approach, central Saudi Arabia. *Petroleum Geoscience*, 19(4), 399–415.

Embry, A. F., & Klovan, J. E. (1971). A late Devonian reef tract on northeastern Banks Island, N.W.T. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 19(4), 730–781.

Engerrand, J., & Urbina, F. (1910). Informe acerca de una excursión geológica preliminar en el estado de Yucatán. *Parergones Del Instituto Geológico De México*, 3(7), 371–424.

Esaki, T., & Jiang, K. (2000). Comprehensive study of the weathered condition of welded tuff from a historic stone bridge in Kagoshima, Japan. *Engineering Geology*, 55(1-2), 121–130.

Espinosa-Morales, Y., Alarcón, A. L., Domínguez-Carrasco, M. D. R., Martínez-Miranda, V., Arteaga-Arcos, J. C., Silva-León, I., & Reyes, J. (2020). An approach to identify and understand the main processes of weathering that affect the pre-hispanic stelae located in the Calakmul biosphere reserve in Campeche, Mexico. *Archaeometry*, 63(4), 843–859.

Ettensohn, F. R., Fulton, L. P., & Kepferle, R. C. (1979). Use of scintillometer and gamma-ray logs for correlation and stratigraphy in homogeneous black shales. *Geological Society of America Bulletin*, 90(5), 828–849.

- Evans, S. T. (2008). Postclassic cultures of Mesoamerica. In D. M. Pearsall (Ed.), *Encyclopedia of archaeology* (pp. 209–216). Elsevier.
- Evans, R., Mory, A. J., & Tait, A. M. (2007). An outcrop gamma ray study of the Tumblagooda Sandstone, Western Australia. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 57(1-2), 37–59.
- Everitt, B. S., & Dunn, G. (2001). *Applied multivariate data analysis* (2nd ed.). John Wiley & Sons, Ltd.
- Fais, S., Cuccuru, F., Ligas, P., Casula, G., & Bianchi, M. G. (2017). Integrated ultrasonic, laser scanning and petrographical characterisation of carbonate building materials on an architectural structure of a historic building. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 76(1), 71–84.
- Fall, M., Baratoux, B., Jessell, M., Ndiaye, P. M., Vanderhaeghe, O., Moyen, J. F., Baratoux, L., & Bonzi, W. M.-E. (2020). The redistribution of thorium, uranium, potassium by magmatic and hydrothermal processes versus surface processes in the Saraya Batholith (Eastern Senegal): Insights from airborne radiometrics data and topographic roughness. *Journal of Geochemical Exploration*, 219(1), Article 106633.
- Farkas, O., Siegesmund, S., Licha, T., & Török, Á. (2018). Geochemical and mineralogical composition of black weathering crusts on limestones from seven different European countries. *Environmental Earth Sciences*, 77(5), Article 211.
- Fedo, C. M., Nesbitt, H. W., & Young, G. M. (1995). Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 23(10), 921–924.
- Feilden, B. M. (2003). *Conservation of historic buildings* (3rd ed.). Architectural Press.
- Ferronsky, V. I. (2015). *Nuclear geophysics: applications in hydrology, hydrogeology, engineering geology, agriculture and environmental science*. Springer.
- Flügel, E. (2010). *Microfacies of carbonate rocks: analysis, interpretation and application* (2nd ed.). Springer.

- Folan, W. J. (1978). Coba, Quintana Roo, Mexico: an analysis of a prehispanic and contemporary source of sascab. *American Antiquity*, 43(1), 79–85.
- Folk, R. L. (1980). *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphill Publishing Company.
- Fontaine, L., Hendrickx, R., & De Clercq, H. (2015). Deterioration mechanisms of the compact clay-bearing limestone of Tournai used in the Romanesque portals of the Tournai Cathedral (Belgium). *Environmental Earth Sciences*, 74(4), 3207–3221.
- Fookes, P. G., Gourley, C. S., & Ohikere, C. (1988). Rock weathering in engineering time. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 21(1), 33–57.
- Franzen, C., & Mirwald, P. W. (2004). Moisture content of natural stone: static and dynamic equilibrium with atmospheric humidity. *Environmental Geology*, 46(3-4), 391–401.
- Franzen, C., & Mirwald, P. W. (2009). Moisture sorption behaviour of salt mixtures in porous stone. *Chemie der Erde*, 69(1), 91–98.
- Fu, H., Jian, X., & Pan, H. (2023). Bias in sediment chemical weathering intensity evaluation: a numerical simulation study. *Earth-Science Reviews*, 246(1), Article 104574.
- Galbraith, J. H., & Saunders, D. F. (1983). Rock classification by characteristics of aerial gamma-ray measurements. *Journal of Geochemical Exploration*, 18(1), 49–73.
- García-Chávez, J. (2015). Riesgo por emisiones de radón en el área metropolitana de San Luis Potosí [Tesis de maestría, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica].
- García-Solís, C. A., Jáidar-Benavides, Y., Quintana-Owen, P., Reyes-Trujeque, J., & Escalante-Hernández, M. F. (2025). El deterioro de los elementos pétreos con color de la Subestructura de Guerreros en Chichén Itzá: lineamientos prácticos para el control de sales. En Y. Jáidar-Benavides, V. Magar-Meurs, & M. C. Ruiz-Martín (Eds.), *Criterios de conservación del patrimonio en piedra* (pp. 349–371). Secretaría de Cultura, INAH, UNAM-IIE, ICCROM.

- García-Solís, C. A., Quintana-Owen, P., López-Doncel, R. A., & Illescas-Salinas, J. F. (2023). Microfacial analysis on the building stones of the Maya site of Calakmul. *Environmental Earth Sciences*, 82(12), Article 299.
- Garzanti, E. (2017). The maturity myth in sedimentology and provenance analysis. *Journal of Sedimentary Research*, 87(4), 353–365.
- Gaylarde, P. M., Gaylarde, C. C., Guiamet, P. S., Gomez-de Saravia, S. G., & Videla, H. A. (2001). Biodeterioration of Mayan buildings at Uxmal and Tulum, Mexico. *Biofouling*, 17(1), 4145.
- Germinario, L., Siegesmund, S., Maritan, L., Simon, K., & Mazzoli, C. (2017). Trachyte weathering in the urban built environment related to air quality. *Heritage Science*, 5(1), Article 44.
- Gilmore, G. R. (2008). *Practical gamma-ray spectrometry* (2nd ed.). John Wiley & Sons, Ltd.
- González-Gómez, W. S., Quintana, P., Gómez-Cornelio, S., García-Solis, C. A., Sierra-Fernandez, A., Ortega-Morales, O., & de la Rosa-García, S. C. (2018). Calcium oxalates in biofilms on limestone walls of Maya buildings in Chichén Itzá, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 77(6), Article 230.
- González-Gómez, W. S., Quintana, P., May-Pat, A., Avilés, F., May-Crespo, J., & Alvarado-Gil, J. J. (2015). Thermal effects on the physical properties of limestones from the Yucatan Peninsula. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 75(1), 182–189.
- González-Sámano, P. S. (2012). *La Formación Cantera; su utilización, durabilidad y deterioro como roca natural de construcción. Ejemplos en edificios históricos de la ciudad de San Luis Potosí* [Trabajo recepcional, Universidad Autónoma de San Luis Potosí].
- González-Urriza, J. (2017). *Historia de la infraestructura hidráulica en la capital potosina*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

- Goudie, A. S., & Viles, H. (2010). Weathering hazards. In I. Alcántara-Ayala, & A. S. Goudie (Eds.), *Geomorphological hazards and disaster prevention* (pp. 145–159). Cambridge University Press.
- Grasty, R. L. (1976). Applications of gamma radiation in remote sensing. In E. Schanda (Ed.), *Remote sensing for environmental sciences* (pp. 257–276). Springer-Verlag.
- Grasty, R. L. (1979). Gamma ray spectrometric methods in uranium exploration theory and operational procedures. In P. J. Hood (Ed.), *Geophysics and geochemistry in the search for metallic ores* (Economic Geology Report 31, pp. 147–161). Geological Survey of Canada.
- Grasty, R. L. (1997). Radon emanation and soil moisture effects on airborne gamma-ray measurements. *Geophysics*, 62(5), 1379–1385.
- Grasty, R. L., Holman, P. B., & Blanchard, Y. B. (1991). Transportable calibration pads for ground and airborne gamma-ray spectrometers (Paper 90-23). Geological Survey of Canada.
- Grasty, R. L., & Minty B. R. S. (1995). A guide to the technical specifications for airborne gamma-ray surveys (Technical Report Record 1995/60). Australian Geological Survey Organisation.
- Graue, B., Siegesmund, S., Oyhantcabal, P., Naumann, R., Licha, T., & Simon, K. (2013). The effect of air pollution on stone decay: the decay of the Drachenfels trachyte in industrial, urban, and rural environments—a case study of the Cologne, Altenberg and Xanten cathedrals. *Environmental Earth Sciences*, 69(4), 1095–1124.
- Grossi, C. M., & Murray, M. (1999). Characteristics of carbonate building stones that influence the dry deposition of acidic gases. *Construction and Building Materials*, 13(3), 101–108.
- Grossi, C. M., Murray, M., & Butlin, R. N. (1995). Response of porous building stones to acid deposition. *Water, Air, & Soil Pollution*, 85(4), 2713–2718.



- Gu, X. X., Liu, J. M., Zheng, M. H., Tang, J. X., & Qi, L. (2002). Provenance and tectonic setting of the Proterozoic turbidites in Hunan, south China: geochemical evidence. *Journal of Sedimentary Research*, 72(3), 393–407.
- Gunn, P. J., Minty, B. R. S., & Milligan, P. R. (1997). The airborne gamma-ray spectrometric response over arid Australian terranes. In A. G. Gubins (Ed.), *Proceedings of exploration 97: fourth decennial international conference on mineral exploration* (pp. 733–740). Prospectors and Developers Association of Canada.
- Gupta, A. S., & Rao, K. S. (2001). Weathering indices and their applicability for crystalline rocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 60(3), 201–221.
- Hadley, M. J., Ruffell, A., & Leslie, A. G. (2000). Gamma-ray spectroscopy in structural correlations: an example from the Neoproterozoic Dalradian succession of Donegal (NW Ireland). *Geological Magazine*, 137 (3), 319–333.
- Halsey, D. P., Mitchell, D. J., & Dews, S. J. (1998). Influence of climatically induced cycles in physical weathering. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 31(4), 359–367.
- Hampson, G. J., Davies, W., Davies, S. J., Howell, J. A., & Adamson, K. R. (2005). Use of spectral gamma-ray data to refine subsurface fluvial stratigraphy: late Cretaceous strata in the Book Cliffs, Utah, USA. *Journal of the Geological Society*, 162(4), 603–621.
- Harnois, L. (1988). The CIW index: a new chemical index of weathering. *Sedimentary Geology*, 55(3-4), 319–322.
- Hatır, M. E., Korkanç, M., & Başar, M. E. (2019). Evaluating the deterioration effects of building stones using NDT: the Küçükköy Church, Cappadocia Region, central Turkey. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(5), 3465–3478.
- Heilprin, A. (1891). Geological researches in Yucatan. *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia*, 43(1), 136–158.
- Hendrickx, R. (2013). Using the Karsten tube to estimate water transport parameters of porous building materials. *Materials and Structures*, 46(8), 1309–1320.

Hernández-Santomé, A. C., Sanjurjo-Sánchez, J., & Alves, C. (2025). Use of hand-held gamma-ray spectrometry to assess decay of granite ashlar in historical buildings of NW Spain (Barbanza, Galicia). *Journal of Cultural Heritage*, 71(1), 20–29.

Hesselbo, S. P. (1996). Spectral gamma-ray logs in relation to clay mineralogy and sequence stratigraphy, Cenozoic of the Atlantic margin, offshore New Jersey. In G. S. Mountain, K. G. Miller, P. Blum, C. W. Poag, & D. C. Twichell (Eds.), *Proceedings of the Ocean Drilling Program (Scientific Results 150)*, pp. 411–422). National Science Foundation and Joint Oceanographic Institutions, Inc.

Hesselbo, S. P., Deconinck, J.-F., Huggett, J. M., & Morgans-Bell, H. S. (2009). Late Jurassic palaeoclimatic change from clay mineralogy and gamma-ray spectrometry of the Kimmeridge Clay, Dorset, UK. *Journal of the Geological Society*, 166(6), 1123–1133.

Hildebrand, A. R., Penfield, G. T., Kring, D. A., Pilkington, M., Camargo-Zanoguera, A., Jacobsen, S. B., & Boynton, W. V. (1991). Chicxulub crater: a possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatán Peninsula, Mexico. *Geology*, 19(9), 867–871.

Hladil, J., Bosak, P., Slavik, L., Carew, J. L., Mylroie, J. E., & Gersl, M. (2003). Early diagenetic origin and persistence of gamma-ray and magnetosusceptibility patterns in platform carbonates: comparison of Devonian and Quaternary sections. *Physics and Chemistry of the Earth*, 28 (16-19), 719–727.

Holbrook, W. S., Marcon, V., Bacon, A. R., Brantley, S. L., Carr, B. J., Flinchum, B. A., Richter, D. D., & Riebe, C. S. (2019). Links between physical and chemical weathering inferred from a 65-m-deep borehole through Earth's critical zone. *Scientific Reports*, 9(1), Article 4495.

Honeyborne, D. B. (2006). Weathering and decay of masonry. In J. Ashurst, & F. G. Dimes (Eds.), *Conservation of building and decorative stone* (Vol. 2, 2nd ed., pp. 153–178). Butterworth-Heinemann.

Hornung, J., & Aigner, T. (1999). Reservoir and aquifer characterization of fluvial architectural elements: Stubensandstein, Upper Triassic, southwest Germany. *Sedimentary Geology*, 129(3-4), 215–280.

Hurst, A. (1990). Natural gamma-ray spectrometry in hydrocarbon-bearing sandstones from the Norwegian Continental Shelf. In A. Hurst, M. A. Lovell, & A. C. Morton (Eds.), *Geological applications of wireline logs* (Geological Society Special Publication 48, pp. 211–222). The Geological Society.

IAEA (1979). Gamma-ray surveys in uranium exploration (Technical Reports Series No. 186). IAEA.

IAEA (1991). Airborne gamma ray spectrometer surveying (Technical Reports Series No. 323). IAEA.

IAEA (2003). Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data (IAEA-TECDOC-1363). IAEA.

IAEA (2010). Radioelement mapping (IAEA Nuclear Energy Series Technical Report No. NF-T-1.3). IAEA.

Inkpen, R. (2003). The whole building and patterns of degradation. In P. Brimblecombe (Ed.), *The effects of air pollution on the built environment* (Air Pollution Reviews Vol. 2, pp. 393–422). Imperial College Press.

Isphording, W. C. (1984). The clays of Yucatan, Mexico: a contrast in genesis. In A. Singer, & E. Galan (Eds.), *Palygorskite-sepiolite: occurrence, genesis and uses* (Developments in Sedimentology 37, pp. 59–73). Elsevier Scientific Publishing Co.

Isphording, W. C., & Wilson, E. M. (1974). The relationship of “volcanic ash,” sak lu’um, and palygorskite in northern Yucatan Maya ceramics. *American Antiquity*, 39(3), 483–488.

Ivanov, M. M., Kuzmenkova, N. V., Garankina, E. V., & Tulyakov, E. D. (2019). The <sup>232</sup>Th distribution in modern sediments near radioactive lovchorrite mine, the Khibiny Mountains, Kola Peninsula. *Journal of Geochemical Exploration*, 200(1), 77–83.

Juárez-Rodríguez, O., Argote-Espino, D. L., Santos-Ramírez, M., & López-García, P. (2018). Portable XRF analysis for the identification of raw materials of the Red Jaguar sculpture in Chichén Itzá, Mexico. *Quaternary International*, 483(1), 148–159.

Keeton, G. I., Pranter, M. J., Cole, R. D., & Gustason, E. R. (2015). Stratigraphic architecture of fluvial deposits from borehole images, spectral-gamma-ray response, and outcrop analogs, Piceance Basin, Colorado. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 99(10), 1929–1956.

Keppie, J. D., Dostal, J., Norman, M., Urrutia-Fucugauchi, J., & Grajales-Nishimura, M. (2011). Study of melt and a clast of 546 Ma magmatic arc rocks in the 65 Ma Chicxulub bolide breccia, northern Maya block, Mexico: western limit of Ediacaran arc peripheral to northern Gondwana. *International Geology Review*, 53(10), 1180–1193.

Killeen, P. G. (1979). Gamma ray spectrometric methods in uranium exploration – application and interpretation. In P. J. Hood (Ed.), *Geophysics and geochemistry in the search for metallic ores* (Economic Geology Report 31, pp. 163–229). Geological Survey of Canada.

Knoll, G. F. (2010). *Radiation detection and measurement* (4th ed.). John Wiley & Sons, Inc.

Koch, A., & Siegesmund, S. (2004). The combined effect of moisture and temperature on the anomalous expansion behaviour of marble. *Environmental Geology*, 46(3-4), 350–363.

Koptíková, L., Bábek, O., Hladil, J., Kalvoda, J., & Slavík, L. (2010). Stratigraphic significance and resolution of spectral reflectance logs in Lower Devonian carbonates of the Barrandian area, Czech Republic; a correlation with magnetic susceptibility and gamma-ray logs. *Sedimentary Geology*, 225(3-4), 83–98.

Krassay, A. A. (1998). Outcrop and drill core gamma-ray logging integrated with sequence stratigraphy: examples from Proterozoic sedimentary successions of

northern Australia. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(4), 285–299.

Krekeler, M. P. S., Calkins, C., & Borkiewicz, O. (2010). Mineralogical and hydrogeologic properties of a partially unconsolidated Pleistocene limestone in the east central Yucatán: implications for the development of subsurface flow constructed wetlands (SFCWs) in the region. *Carbonates and Evaporites*, 25(1), 77–86.

Krogh, T. E., Kamo, S. L., Sharpton, V. L., Marin, L. E., & Hildebrand, A. R. (1993). U-Pb ages of single shocked zircons linking distal K/T ejecta to the Chicxulub crater. *Nature*, 366(6457), 731–734.

Kuittinen, R., & Vironmäki, J. (1980). Aircraft gamma-ray spectrometry in snow water equivalent measurement. *Hydrological Sciences Journal*, 25(1), 63–75.

Kumaran, M. K., & Bomberg, M. (1985). A gamma-spectrometer for determination of density distribution and moisture distribution in building materials. In *Proceedings of the International Symposium on Moisture and Humidity* (Washington, D.C., April 15-18, pp 85–90). Instrument Society of America.

Labarthe-Hernández, G., & Jiménez-López, L. S. (1992). Características físicas y estructura de lavas e ignimbritas riolíticas en la Sierra de San Miguelito, S.L.P. (Reporte técnico 114). Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Labarthe-Hernández, G., & Tristán-González, M. (1978). Cartografía geológica Hoja ‘San Luis Potosí’ (Reporte técnico 59). Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M., & Aranda-Gómez, J. (1982). Revisión estratigráfica del Cenozoico de la parte central del edo. de San Luis Potosí (Reporte técnico 85). Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Langmuir, D. (1978). Uranium solution-mineral equilibria at low temperatures with applications to sedimentary ore deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42(6), 547–569.

Langmuir, D., & Herman, J. S. (1980). The mobility of thorium in natural waters at low temperatures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44(11), 1753–1766.

L'Annunziata, M. F. (2020a). The atomic nucleus, nuclear radiation, and the interaction of radiation with matter. In M. F. L'Annunziata (Ed.), *Handbook of radioactivity analysis volume 1: radiation physics and detectors* (4th ed., pp. 1–243). Academic Press.

L'Annunziata, M. F. (2020b). Solid scintillation analysis. In M. F. L'Annunziata (Ed.), *Handbook of radioactivity analysis volume 1: radiation physics and detectors* (4th ed., pp. 899–1045). Academic Press.

Larson, J. (2006). The conservation of stone sculpture in museums. In J. Ashurst, & F. G. Dimes (Eds.), *Conservation of building and decorative stone* (Vol. 2, 2nd ed., pp. 197–207). Butterworth-Heinemann.

Latorre-Correa, C. I., Dávila-Harris, P., Aguillón-Robles, A., & Tristán-González, M. (2023). El complejo volcánico de Ahualulco: geoquímica y evolución temporal del vulcanismo félsico del Oligoceno, en el oriente de la Mesa Central, San Luis Potosí, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 40(2), 152–173.

Laubenstein, M., & Magaldi, D. (2008). Natural radioactivity of some red Mediterranean soils. *Catena*, 76(1), 22–26.

Le Bas, M. J., Le Maitre, R. W., Streckeisen, A., & Zanettin, B. (1986). A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27(3), 745–750.

Le Maitre, R. W. (2002). *Igneous rocks: a classification and glossary of terms: recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks* (2nd ed.). Cambridge University Press.

Lefticariu, M., Perry, E. C., Ward, W. C., & Lefticariu, L. (2006). Post-Chicxulub depositional and diagenetic history of the northwestern Yucatan Peninsula, Mexico. *Sedimentary Geology*, 183(1-2), 51–69.

Liu, W.-J., Liu, C.-Q., Zhao, Z.-Q., Xu, Z.-F., Liang, C.-S., Li, L., & Feng, J.-Y. (2013). Elemental and strontium isotopic geochemistry of the soil profiles developed on limestone and sandstone in karstic terrain on Yunnan-Guizhou Plateau, China:

implications for chemical weathering and parent materials. *Journal of Asian Earth Sciences*, 67-68(1), 138–152.

Livingston, R. A., Evans, L. G., Taylor, T. H., & Trombka, J. I. (1986). Diagnosis of building condition by neutron-gamma ray technique. In G. Davies (Ed.), *Building performance: function, preservation, and rehabilitation* (pp. 165–180). ASTM International.

López-Doncel, R. A., Cardona-Velázquez, N., & Wedekind, W. (2015). El rescate del patrimonio cultural pétreo de San Luis Potosí. *Universitarios Potosinos*, 194(1), 4–10.

López-Doncel, R. A., Mata-Segura, J. L., Cruz-Márquez, J., Arzate-Flores, J., & Pacheco-Martínez, J. (2006). Riesgo geológico para el patrimonio histórico. Ejemplos del centro histórico de la ciudad de San Luis Potosí. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58(2), 259–263.

López-Doncel, R. A., Wedekind, W., Aguillón-Robles, A., Dohrmann, R., Molina-Maldonado, S., Leiser, T., Wittenborn, A., & Siegesmund, S. (2018). Thermal expansion on volcanic tuff rocks used as building stones: examples from Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 77(9), Article 338.

López-Doncel, R. A., Wedekind, W., Dohrmann, R., & Siegesmund, S. (2013). Moisture expansion associated to secondary porosity: an example of the Loseros Tuff of Guanajuato, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 69(4), 1189–1201.

López-Doncel, R. A., Wedekind, W., Leiser, T., Molina-Maldonado, S., Velasco-Sánchez, A., Dohrmann, R., Kral, A., Wittenborn, A., Aguillón-Robles, A., & Siegesmund, S. (2016). Salt bursting tests on volcanic tuff rocks from Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 75(3), Article 212.

López-Loera, H., & Tristán-González, M. (2013). Geología y magnetometría aérea del Graben de Villa de Reyes, San Luis Potosí, Mesa Central de México: implicaciones tectónicas y geohidrológicas. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65(1), 137–156.

López-Ramos, E. (1973). Estudio geológico de la Península de Yucatán. Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, 25(1), 24–76.

López-Torres, M. A. (2025). Mecanismos de descomposición en la roca caliza del Templo Norte, Zona Arqueológica de Chichén Itzá, Yucatán [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de San Luis Potosí].

Løvborg, L. (1984). The calibration of portable and airborne gamma-ray spectrometers – theory, problems, and facilities (Technical Report Risø-M-2456). Risø National Laboratory.

Løvborg, L., Christiansen, E. M., Bøtter-Jensen, L., & Kirkegaard, P. (1981). Pad facility for the calibration of gamma-ray measurements on rocks (Technical Report Risø-R-454). Risø National Laboratory.

Løvborg, L., Wollenberg, H., Sørensen, P., & Hansen, J. (1971). Field determination of uranium and thorium by gamma-ray spectrometry, exemplified by measurements in the Ilímaussaq alkaline intrusion, south Greenland. Economic Geology, 66(3), 368–384.

Lugo-Hubp, J., Aceves-Quesada, J. F., & Espinasa-Pereña, R. (1992). Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán. Revista del Instituto de Geología, 10(2), 143–150.

Luthi, S. M. (2001). Geological well logs: their use in reservoir modeling. Springer.

Madhavaraju, J., Löser, H., Scott, R. W., Sandeep, S., Sial, A. N., & Ramasamy, S. (2017). Petrography, geochemistry and stable isotopes of carbonate rocks, Lower Cretaceous Alisitos Formation, Los Torotes section, Baja California, Mexico. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 34(2), 63–77.

Maldonado, L., & Veleva, L. (1999). Corrosivity category maps of a humid tropical atmosphere: the Yucatán Peninsula, México. Materials and Corrosion, 50(5), 261–266.

Maldonado, L., Veleva, L., & Díaz-Ballote, L. (2011). Characterization of limestones for building in the Yucatan Peninsula, Mexico. Applied Physics A, 103(4), 1105–1110.



Maldonado-Sánchez, G. (1997). Estudio petrográfico de la Ignimbrita Cantera, Campo Volcánico de San Luis Potosí, S.L.P. [Trabajo no recepcional, Universidad Autónoma de San Luis Potosí].

Martin, A., Landesman, C., Lépinay, A., Roux, C., Champion, J., Chardon, P., & Montavon, G. (2019). Flow period influence on uranium and trace elements release in water from the waste rock pile of the former La Commanderie uranium mine (France). *Journal of Environmental Radioactivity*, 208-209(1), Article 106010.

Martinho, E., & Dionísio, A. (2020). Assessment techniques for studying the effects of fire on stone materials: a literature review. *International Journal of Architectural Heritage*, 14(2), 275–299.

Martinius, A. W., Geel, C. R., & Arribas, J. (2002). Lithofacies characterization of fluvial sandstones from outcrop gamma-ray logs (Loranca Basin, Spain): the influence of provenance. *Petroleum Geoscience*, 8(1), 51–62.

Martz, L. W., & de Jong, E. (1990). Natural radionuclides in the soils of a small agricultural basin in the Canadian prairies and their association with topography, soil properties and erosion. *Catena*, 17(1), 85–96.

May-Crespo, J., Martínez-Torres, P., Alvarado-Gil, J. J., Quintana, P., & Vilca-Quispe, L. (2012). Photothermal radiometry characterization of limestone rocks from the Península of Yucatán. *International Journal of Thermophysics*, 33(10-11), 1908–1915.

May-Crespo, J., Martínez-Torres, P., Quintana, P., Alvarado-Gil, J. J., Vilca-Quispe, L., & Camacho, N. (2021). Study of the effects of heating on organic matter and mineral phases in limestones. *Journal of Spectroscopy*, 28(1), Article 9082863.

McAlister, J. J., Smith, B. J., & Török, A. (2006). Element partitioning and potential mobility within surface dusts on buildings in a polluted urban environment, Budapest. *Atmospheric Environment*, 40(35), 6780–6790.

McAlister, J. J., Smith, B. J., & Török, A. (2008). Transition metals and water-soluble ions in deposits on a building and their potential catalysis of stone decay. *Atmospheric Environment*, 42(33), 7657–7668.

- McAllister, D., Warke, P., & McCabe, S. (2017). Stone temperature and moisture variability under temperate environmental conditions: implications for sandstone weathering. *Geomorphology*, 280(1), 137–152.
- McCann, D. M., & Forde, M. C. (2001). Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures. *NDT & E International*, 34(2), 71–84.
- McLennan, S. M., Nance, W. B., & Taylor, S. R. (1980). Rare earth element-thorium correlations in sedimentary rocks, and the composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44(11), 1833–1839.
- Mehta, P., & Malviya, V. P. (2021). Weathering pattern of amphibolites in the different climate zones from Western Dharwar Craton, Southern India. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(22), Article 2435.
- Méndez-Gaona, A. (2014). Aplicación de electrofacies en afloramientos (registros de rayos gamma) para la creación de análogos en secuencias turbidíticas de la Formación Chicontepec [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Nuevo León].
- Méndez-Gaona, A. (2020). Medición de rayos gamma como método para evaluar el deterioro en las rocas de construcción de Real de Catorce, San Luis Potosí [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de San Luis Potosí].
- Méndez-Gaona, A., Yutsis, V., & López-Doncel, R. A. (2025a). In situ gamma-ray spectrometry as a non-destructive test for the assessment of building stones: methodology, application, and interpretation. *Environmental Earth Sciences*, 84(13), Article 380.
- Méndez-Gaona, A., Yutsis, V., López-Doncel, R. A., García-Solís, C. A., & Aguillón-Robles, A. (2025b). Insights into gamma-ray spectrometry of building stones in the North Temple of the Great Ball Court, Archaeological Zone of Chichen Itza, Mexico. *Buildings*, 15(16), Article 2949.
- Menningen, J., Siegesmund, S., Tweeton, D., & Träupmann, M. (2018). Ultrasonic tomography: non-destructive evaluation of the weathering state on a marble obelisk,

considering the effects of structural properties. *Environmental Earth Sciences*, 77(17), Article 601.

Minty, B. R. S., & Brodie, R. C. (1994). Mapping  $^{137}\text{CS}$  at Maralinga nuclear test site, South Australia, using conventional 4-channel airborne gamma-ray spectrometry. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 15(2), 217–222.

Minty, B. R. S., Luyendyk, A. P. J., & Brodie, R. C. (1997). Calibration and data processing for airborne gamma-ray spectrometry. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(2), 51–62.

Moharram, B. M., Suliman, M. N., Zahran, N. F., Shennawy, S. E., & El Sayed, A. R. (2012). External exposure doses due to gamma emitting natural radionuclides in some Egyptian building materials. *Applied Radiation and Isotopes*, 70(1), 241–248.

Möller, M., Buntebarth, G., & Weller, A. (2018). Expansion and shrinkage of sandstones during spontaneous imbibition of fluids. *Environmental Earth Sciences*, 77(16), Article 571.

Monna, F., Puertas, A., Lévêque, F., Losno, R., Fronteau, G., Marin, B., Dominik, J., Petit, C., Forel, B., & Chateau, C. (2008). Geochemical records of limestone façades exposed to urban atmospheric contamination as monitoring tools? *Atmospheric Environment*, 42(5), 999–1011.

Montante-Hernández, G. N. (2019). Estudios geológicos para determinar el intemperismo en las rocas del Quiosco, de la Plaza de Armas, en la ciudad de San Luis Potosí [Trabajo recepcional, Universidad Autónoma de San Luis Potosí].

Moonjun, R., Shrestha, D. P., Jetten, V. G., & van Ruitenbeek, F. J. A. (2017). Application of airborne gamma-ray imagery to assist soil survey: A case study from Thailand. *Geoderma*, 289(1), 196–212.

Mora, M. (2024, 25 de enero). Avanza intervención en “Caja del Agua del Santuario”. *El Sol de San Luis*. <https://oem.com.mx/elsoldesanluis/local/avanza-intervencion-en-caja-del-agua-del-santuario-13387326>

Moskalewicz, D., Dzieduszyńska, D., Elwirski, Ł., Mroczek, P., Petera-Zganiacz, J., Tylmann, K., & Woźniak, P. P. (2022). Recognition of sedimentary environments

using handheld gamma-ray spectrometry in Pleistocene Fennoscandian Ice Sheet glaciogenic basin, northern and central Poland. *Marine and Petroleum Geology*, 140(1), Article 105679.

Myers, K. J. (1989). The origin of the Lower Jurassic Cleveland Ironstone Formation of North-East England: evidence from portable gamma-ray spectrometry. In T. P. Young, & W. E. G. Taylor (Eds.), *Phanerozoic ironstones* (Geological Society Special Publication 46, pp. 221–228). The Geological Society.

Myers, K. J., & Bristow, C. S. (1989). Detailed sedimentology and gamma-ray log characteristics of a Namurian deltaic succession II: gamma-ray logging. In M. K. G. Whateley, & K. T. Pickering (Eds.), *Deltas: sites and traps for fossil fuels* (Geological Society Special Publication 41, pp. 81–88). The Geological Society.

Myers, K. J., & Wignall, P. B. (1987). Understanding Jurassic organic-rich mudrocks – new concepts using gamma-ray spectrometry and palaeoecology: examples from the Kimmeridge Clay of Dorset and the Jet Rock of Yorkshire. In J. K. Leggett, & G. G. Zuffa (Eds.), *Marine clastic sedimentology: concepts and case studies* (pp. 172–189). Graham and Trotman.

Nesbitt, H. W. (2003). Petrogenesis of siliciclastic sediments and sedimentary rocks. In D. R. Lentz (Ed.), *Geochemistry of sediments and sedimentary rocks: evolutionary considerations to mineral deposit-forming environments* (Geological Association of Canada GeoText 4, pp. 39–51). Geological Association of Canada.

Nesbitt, H. W., & Markovics, G. (1997). Weathering of granodioritic crust, long-term storage of elements in weathering profiles, and petrogenesis of siliciclastic sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(8), 1653–1670.

Nesbitt, H. W., & Young, G. M. (1982). Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299 (5885), 715–717.

Nesbitt, H. W., & Young, G. M. (1984). Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(7), 1523–1534.

- Nielsen, B. L., Løvborg, L., Sørensen, P., & Mose, E. (1987). Gamma-ray analysis for U, Th and K on bulk cutting samples from deep wells in the Danish subbasin and the north German basin (Technical Report Risø-M-2646). Risø National Laboratory.
- Nieto-Samaniego, Á. F., Alaniz-Álvarez, S. A., & Camprubí-Cano, A. (2005). La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 285–318.
- Ohta, T., & Arai, H. (2007). Statistical empirical index of chemical weathering in igneous rocks: a new tool for evaluating the degree of weathering. *Chemical Geology*, 240(3-4), 280–297.
- Orenday-Tapia, E. E., Chávez-Cano, M. M., Pacheco-Martínez, J., Rodríguez-Narciso, S., Martínez-Ruiz, G., López-Doncel, R. A., & Padilla-Ceniceros, R. (2021). Relation between the velocity propagation of seismic wave ( $V_p$ ) and density of historical masonry. *Environmental Earth Sciences*, 80(14), Article 464.
- Orenday-Tapia, E. E., Pacheco-Martínez, J., Padilla-Ceniceros, R., & López-Doncel, R. A. (2018). In situ and nondestructive characterization of mechanical properties of heritage stone masonry. *Environmental Earth Sciences*, 77(7), Article 286.
- Özşen, H., Bozdağ, A., & İnce, İ. (2017). Effect of salt crystallization on weathering of pyroclastic rocks from Cappadocia, Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(12), Article 258.
- Padilla-Ceniceros, R., Pacheco-Martínez, J., López-Doncel, R. A., & Orenday-Tapia, E. E. (2017). Rock deterioration in the masonry walls of the Cathedral Basilica of Aguascalientes, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 34(2), 138–149.
- Padilla-y Sánchez, R. J. (2007). Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 59(1), 19–42.
- Papadopoulos, A. (2019).  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$  and  $^{228}\text{Th}/^{228}\text{Ra}$  disequilibrium as weathering indices in beach sand sediments associated with granitoids from Cyclades. Greece. *Applied Geochemistry*, 100(1), 223–233.

- Parker, A. (1970). An index of weathering for silicate rocks. *Geological Magazine*, 107(6), 501–504.
- Parkinson, D. N. (1996). Gamma-ray spectrometry as a tool for stratigraphical interpretation: examples from the western European Lower Jurassic. In S. P. Hesselbo, & D. N. Parkinson (Eds.), *Sequence stratigraphy in British geology* (Geological Society Special Publication 103, pp. 231–255). The Geological Society.
- Perry, E., Marin, L., McClain, J., & Velázquez, G. (1995). Ring of cenotes (sinkholes), northwest Yucatan, Mexico: its hydrogeologic characteristics and possible association with the Chicxulub impact crater. *Geology*, 23(1), 17–20.
- Petersen, H., Wunderlich, T., al Hagrey, S. A., & Rabbel, W. (2012). Characterization of some Middle European soil textures by gamma-spectrometry. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 175(5), 651–660.
- Phillipson, M. C., Baker, P. H., Davies, M., Ye, Z., McNaughtan, A., Galbraith, G. H., & McLean, R. C. (2007). Moisture measurement in building materials: an overview of current methods and new approaches. *Building Services Engineering Research and Technology*, 28(4), 303–316.
- Pickup, G., & Marks, A. (2000). Identifying large-scale erosion and deposition processes from airborne gamma radiometrics and digital elevation models in a weathered landscape. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25(5), 535–557.
- Pitkin, J. A. (1968). Airborne measurements of terrestrial radioactivity as an aid to geologic mapping (Professional Paper 516-F). U.S. Geological Survey.
- Pola, A., Crosta, G., Fusi, N., Barberini, V., & Norini, G. (2012). Influence of alteration on physical properties of volcanic rocks. *Tectonophysics*, 566-567(1), 67–86.
- Pötzl, C., Siegesmund, S., Dohrmann, R., Koning, J. M., & Wedekind, W. (2018). Deterioration of volcanic tuff rocks from Armenia: constraints on salt crystallization and hydric expansion. *Environmental Earth Sciences*, 77(19), Article 660.
- Pötzl, C., Siegesmund, S., López-Doncel, R. A., & Dohrmann, R. (2022). Key parameters of volcanic tuffs used as building stone: a statistical approach. *Environmental Earth Sciences*, 81(1), Article 10.

Pourmand, A., Dauphas, N., & Ireland, T. J. (2012). A novel extraction chromatography and MC-ICP-MS technique for rapid analysis of REE, Sc and Y: revising CI-chondrite and Post-Archean Australian Shale (PAAS) abundances. *Chemical Geology*, 291(1), 38–54.

Pracejus, B., Sundararajan, N., Al-Khirbash, S., Al-Hosni, T., Ebrahimi, A., Al-Bulushi, S., Al-Lazki, A., & Al-Maashani, M. (2018). Aspects of U-Th fractionation in Tertiary limestones and calcretes of Dhofar, southern Oman. *Chemie der Erde*, 78(4), 479–489.

Price, D. G. (1995). Weathering and weathering processes. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 28(3), 243–252.

Price, J. R., & Velbel, M. A. (2003). Chemical weathering indices applied to weathering profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks. *Chemical Geology*, 202(3-4), 397–416.

Přikryl, R. (2007). Understanding the Earth scientist's role in the pre-restoration research of monuments: an overview. In R. Přikryl, & B. J. Smith (Eds.), *Building stone decay: from diagnosis to conservation* (Geological Society Special Publication 271, pp. 9–21). The Geological Society.

Přikryl, R. (2013). Durability assessment of natural stone. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 46(4), 377–390.

Přikryl, R. (2017). Constructional geomaterials: versatile earth resources in the service of humankind—introduction to the thematic set of papers on: challenges to supply and quality of geomaterials used in construction. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 76(1), 1–9.

Přikryl, R., & Török, Á. (2010). Natural stones for monuments: their availability for restoration and evaluation. In R. Přikryl, & Á. Török (Eds.), *Natural stone resources for historical monuments* (Geological Society Special Publication 333, pp. 1–9). The Geological Society.

Radiation Solutions Inc. (2021). RS-125/230 user Manual (revision 1.09 – September 2021). Radiation Solutions Inc.

- Rasbury, E. T., & Cole, J. M. (2009). Directly dating geologic events: U-Pb dating of carbonates. *Reviews of Geophysics*, 47(3), Article 2007RG000246.
- Rawlins, B. G., Marchant, B. P., Smyth, D., Scheib, C., Lark, R. M., & Jordan, C. (2009). Airborne radiometric survey data and a DTM as covariates for regional scale mapping of soil organic carbon across Northern Ireland. *European Journal of Soil Science*, 60(1), 44–54.
- Rider, M. (2002). *The geological interpretation of well logs* (2nd ed.). Rider-French Consulting Ltd.
- Righi, S., & Bruzzi, L. (2006). Natural radioactivity and radon exhalation in building materials used in Italian dwellings. *Journal of Environmental Radioactivity*, 88(2), 158–170.
- Rodrigues, F. A., Bramley, R. G. V., & Gobbett, D. L. (2015). Proximal soil sensing for precision agriculture: simultaneous use of electromagnetic induction and gamma radiometrics in contrasting soils. *Geoderma*, 243-244 (1), 183–195.
- Rodríguez-Pérez, I., Vasconcelos, G., Lourenço, P. B., Quintana, P., García-Solís, C. A., & Dionísio, A. (2021). Physical-mechanical characterization of limestones from Yucatan churches, Mexico. *Journal of Building Engineering*, 44(1), Article 102895.
- Rollinson, H., & Pease, V. (2021). *Using geochemical data to understand geological processes* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Roque-Jiménez, V., Velázquez-Mireles, A. I., & Vázquez-Zepeda, E. (2022). Proyecto de conservación y restauración de la Caja de Agua del Santuario, San Luis Potosí, S.L.P. (Reporte no publicado). Unidad de Gestión del Centro Histórico de San Luis Potosí.
- Rudnick, R. L., & Gao, S. (2003). Composition of the continental crust. In H. D. Holland, & K. K. Turekian (Eds.), *Treatise on Geochemistry* (Volume 3: The crust, pp. 1–64). Elsevier.
- Ruedrich, J., Bartelsen, T., Dohrmann, R., & Siegesmund, S. (2011). Moisture expansion as a deterioration factor for sandstone used in buildings. *Environmental Earth Sciences*, 63(7-8), 1545–1564.



Ruffell, A. (2016). Do spectral gamma ray data really reflect humid–arid palaeoclimates? A test from Palaeogene interbasaltic weathered horizons at the Giant's Causeway, N. Ireland. *Proceedings of the Geologists' Association*, 127(1), 18–28.

Ruffell, A., McKinley, J. M., Lloyd, C. D., & Graham, C. (2006). Th/K and Th/U ratios from spectral gamma-ray surveys improve the mapped definition of subsurface structures. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 11(1), 53–61.

Ruffell, A., & Worden, R. (2000). Palaeoclimate analysis using spectral gamma-ray data from the Aptian (Cretaceous) of southern England and southern France. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 155(3-4), 265–283.

Ruffell, A. H., Worden, R. H., & Evans, R. (2003). Palaeoclimate controls on spectral gamma-ray radiation from sandstones. In R. H. Worden, & S. Morad (Eds.), *Clay mineral cements in sandstones* (International Association of Sedimentologists Special Publication 34, pp. 93–108). Blackwell Publishing.

Sabbioni, C. (2003). Mechanisms of air pollution damage to stone. In P. Brimblecombe (Ed.), *The effects of air pollution on the built environment* (Air Pollution Reviews Vol. 2, pp. 63–106). Imperial College Press.

Salgado-Garrido, H. E., Valera-Fernández, D., Trejo-Pelayo, S., Solleiro-Rebolledo, E., Barragán, R., Yáñez-Mendoza, G., Mejía-Ortíz, L. M., & López-Martínez, R. (2022). The microfacies distribution pattern of Cozumel Island in southeastern Mexico: an atoll-like model led by quaternary glacioeustatic sea-level changes. *Journal of South American Earth Sciences*, 118(1), Article 103933.

Sánchez del Río, M., Suárez, M., & García-Romero, E. (2009). The occurrence of palygorskite in the Yucatán peninsula: ethno-historic and archaeological contexts. *Archaeometry*, 51(2), 214–230.

Sanjurjo-Sánchez, J., & Alves, C. (2017). Geologic materials and gamma radiation in the built environment. *Environmental Chemistry Letters*, 15(4), 561–589.

Sanjurjo-Sánchez, J., Arce-Chamorro, C., Alves, C., Sánchez-Pardo, J. C., Blanco-Rotea, R., & Costa-García, J. M. (2018a). Using in situ gamma ray spectrometry

(GRS) exploration of buried archaeological structures: a case study from NW Spain. *Journal of Cultural Heritage*, 34(1), 247–254.

Sanjurjo-Sánchez, J., Arce-Chamorro, C., Couto, M., & Alves, C. (2018b). Non-destructive assessment of weathering in granite blocks of historical buildings: in situ gamma-ray spectrometry (GRS). In M. Mosquera, & M. L. Almoraima-Gil (Eds.), *Conserving cultural heritage: proceedings of the 3rd international congress on science and technology for the conservation of cultural heritage* (pp. 107–109). CRC Press.

Sanjurjo-Sánchez, J., Vidal-Romaní, J. R., & Alves, C. (2011). Deposition of particles on gypsum-rich coatings of historic buildings in urban and rural environments. *Construction and Building Materials*, 25(2), 813–822.

Sansores-Manzanilla, E. (1959). Breves notas sobre la geología de la Península de Yucatán. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 11(7-8), 485–491.

Sapper, C. (1896). Sobre la geografía física y la geología de la Península de Yucatán. *Boletín del Instituto Geológico de México*, 3(1), 1–57.

Sass, O., & Viles, H. A. (2006). How wet are these walls? Testing a novel technique for measuring moisture in ruined walls. *Journal of Cultural Heritage*, 7(4), 257–263.

Sauck, W. A., Desmond, L. G., & Chávez, R. E. (1998). Preliminary GPR results from four Maya sites, Yucatan, Mexico. In *Proceedings of the seventh international conference on ground penetrating radar* (pp. 101–113). University of Kansas.

Scheepers, R., & Rozendaal, A. (1993). Redistribution and fractionation of U, Th and rare-earth elements during weathering of subalkaline granites in SW Cape Province, South Africa. *Journal of African Earth Sciences*, 17(1), 41–50.

Schiavon, N., Chiavari, G., & Fabbri, D. (2004). Soiling of limestone in an urban environment characterized by heavy vehicular exhaust emissions. *Environmental Geology*, 46(3-4), 448–455.

Schnyder, J., Ruffell, A., Deconinck, J.-F., & Baudin, F. (2006). Conjunctive use of spectral gamma-ray logs and clay mineralogy in defining late Jurassic–early

Cretaceous palaeoclimate change (Dorset, U.K.). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 229(4), 303–320.

Schuler, U., Erbe, P., Zarei, M., Rangubpit, W., Surinkum, A., Stahr, K., & Herrmann, L. (2011). A gamma-ray spectrometry approach to field separation of illuviation-type WRB reference soil groups in northern Thailand. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 174(4), 536–544.

Schuller, M. P. (2003). Nondestructive testing and damage assessment of masonry structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 5(4), 239–251.

Schultz, L. G., Shepard, A. O., Blackmon, P. D., & Starkey, H. C. (1971). Mixed-layer kaolinite – montmorillonite from the Yucatan peninsula, Mexico. *Clays and Clay Minerals*, 19(3), 137–150.

Schwarz, G. F., Klingelé, E. E., & Rybach, L. (1992). How to handle rugged topography in airborne gamma-ray spectrometry surveys. *First Break*, 10(1), 11–17.

Sêco, S. L. R., Pereira, A. J. S. C., Duarte, L. V., & Domingos, F. P. (2021). Sources of uncertainty in field gamma-ray spectrometry: implications for exploration in the Lower-Middle Jurassic sedimentary succession of the Lusitanian Basin (Portugal). *Journal of Geochemical Exploration*, 227(1), Article 106799.

Sedov, S., Solleiro-Rebolledo, E., Fedick, S. L., Pi-Puig, T., Vallejo-Gómez, E., & Flores-Delgadillo, M. L. (2008). Micromorphology of a soil catena in Yucatán: pedogenesis and geomorphological processes in a tropical karst landscape. In S. Kapur, A. Mermut, & G. Stoops (Eds.), *New trends in soil micromorphology* (pp. 19–37).

Selley, R. C. (1985). *Ancient sedimentary environments and their sub-surface diagnosis* (3rd ed.). Springer-Science + Business Media, B.V.

Serra, O. (2008). *The well logging handbook*. Éditions Technip.

SGM (2008, noviembre). Carta geológica-minera. Estado de San Luis Potosí. [https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas\\_Online/geologia/slp.pdf](https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/slp.pdf)

Shang, C., & Tiessen, H. (2003). Soil organic C sequestration and stabilization in karstic soils of Yucatan. *Biogeochemistry*, 62(2), 177–196.

Siedel, H., & Siegesmund, S. (2014). Characterization of stone deterioration on buildings. In S. Siegesmund, & R. Snethlage (Eds.), *Stone in architecture: properties, durability* (5th ed., pp. 349–414). Springer.

Siegesmund, S., & Dürrast, H. (2014). Physical and mechanical properties of rocks. In S. Siegesmund, & R. Snethlage (Eds.), *Stone in architecture: properties, durability* (5th ed., pp. 97–224). Springer.

Siegesmund, S., Pötzl, C., López-Doncel, R. A., Gross, C. J., Dohrmann, R., Ufer, K. (2022). Overview and quality assessment of volcanic tuffs in the Mexican building heritage. *Environmental Earth Sciences*, 81(17), Article 426.

Siegesmund, S., Weiss, T., & Vollbrecht, A. (2002). Natural stone, weathering phenomena, conservation strategies and case studies: introduction. In S. Siegesmund, T. Weiss, & A. Vollbrecht (Eds.), *Natural stone, weathering phenomena, conservation strategies and case studies* (Geological Society Special Publication 205, pp. 1–7). The Geological Society.

Siengsanoh, K., Limkitjaroenporn, P., & Kaewkhao, J. (2021). Porosity investigation of bricks by gamma-ray transmission measurement. *Materials Today: Proceedings*, 43(3), 2612–2617.

Šimíček, D., Bábek, O., & Leichmann, J. (2012). Outcrop gamma-ray logging of siliciclastic turbidites: separating the detrital provenance signal from facies in the foreland-basin turbidites of the Moravo-Silesian basin, Czech Republic. *Sedimentary Geology*, 261-262(1), 50–64.

Singh, M., Sharma, M., & Tobschall, H. J. (2005). Weathering of the Ganga alluvial plain, northern India: implications from fluvial geochemistry of the Gomati River. *Applied Geochemistry*, 20(1), 1–21.

Slatt, R. M., Jordan, D. W., D'Agostino, A. E., & Gillespie, R. H. (1992). Outcrop gamma-ray logging to improve understanding of subsurface well log correlations. In A. Hurst, C. M. Griffiths, & P. F. Worthington (Eds.), *Geological applications of*

wireline logs II (Geological Society Special Publication 65, pp. 3–19). The Geological Society.

Sonkawade, R. G., Kant, K., Muralithar, S., Kumar, R., & Ramola, R. C. (2008). Natural radioactivity in common building construction and radiation shielding materials. *Atmospheric Environment*, 42(9), 2254–2259.

Stanfoca-Casagrande, M. F., Moreira, C. A., Moreira-Furlan, L., & Rosolen, V. (2024). The use of in situ gamma-ray spectrometry to assess the environmental impacts of intensive agriculture in terms of geochemical mobility in soil and waters. *Geofísica Internacional*, 63(2), 851–864.

Steiger, M. (2003). Salts and crusts. In P. Brimblecombe (Ed.), *The effects of air pollution on the built environment* (Air Pollution Reviews Vol. 2, pp. 133–181). Imperial College Press.

Steiger, M., Charola, A. E., & Sterflinger, K. (2014). Weathering and deterioration. In S. Siegesmund, & R. Snethlage (Eds.), *Stone in architecture: properties, durability* (5th ed., pp. 225–316). Springer.

Stinnesbeck, W., Keller, G., Adatte, T., Harting, M., Stüben, D., Istrate, G., & Kramar, U. (2004). Yaxcopoil-1 and the Chicxulub impact. *International Journal of Earth Sciences*, 93(6), 1042–1065.

Straulino-Mainou, L. (2012). El intemperismo de calizas en monumentos prehispánicos mayas. El caso de la cornisa del edificio 5N2, Río Bec. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64(1), 49–60.

Straulino-Mainou, L., Sedov, S., Michelet, D., & Balanzario, S. (2013). Weathering of carbonate materials in ancient Maya constructions (Río Bec and Dzibanché): limestone and stucco deterioration patterns. *Quaternary International*, 315(1), 87–100.

Stück, H., Koch, R., & Siegesmund, S. (2013). Petrographical and petrophysical properties of sandstones: statistical analysis as an approach to predict material behaviour and construction suitability. *Environmental Earth Sciences*, 69(4), 1299–1332.

Svahn, H. (2006). Non-destructive field tests in stone conservation (Final Report for the Research and Development Project 2006:3). Riksantikvarieämbetet. <https://pub.raa.se/dokumentation/83ac2a76-419b-46d3-9128-e71bd55f2e61/original/1>

Svendsen, J. B., & Hartley, N. R. (2001). Comparison between outcrop-spectral gamma ray logging and whole rock geochemistry: implications for quantitative reservoir characterisation in continental sequences. *Marine and Petroleum Geology*, 18(6), 657–670.

Swanson, V. E. (1961). Geology and geochemistry of uranium in marine black shales a review (Geological Survey Professional Paper 356-C). U.S. Atomic Energy Commission.

Taboada, T., Martínez-Cortizas, A., García, C., & García-Rodeja, E. (2006). Uranium and thorium in weathering and pedogenetic profiles developed on granitic rocks from NW Spain. *Science of the Total Environment*, 356(1-3), 192–206.

Takahashi, F., & Shimaoka, T. (2012). The weathering of municipal solid waste incineration bottom ash evaluated by some weathering indices for natural rock. *Waste Management*, 32(12), 2294–2305.

Tappan, H., & Loeblich, A. R. (1968). Lorica composition of modern and fossil tintinnida (ciliate protozoa), systematics, geologic distribution, and some new Tertiary taxa. *Journal of Paleontology*, 42(6), 1378–1394.

Taylor, M. J., Smettem, K., Pracilio, G., & Verboom, W. (2002). Relationships between soil properties and high-resolution radiometrics, central eastern Wheatbelt, Western Australia. *Exploration Geophysics*, 33(1), 95–102.

Taylor, S. R., & McLennan, S. M. (1985). The continental crust: its composition and evolution, an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks. Blackwell Scientific Publications.

Tecer, L. (1999). Laboratory experiments on the investigation of the effects of sulphuric acid on the deterioration of carbonate stones and surface corrosion. *Water, Air, & Soil Pollution*, 114(1-2), 1–12.

Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (2004). *Applied geophysics* (2nd ed.). Cambridge University Press.

Tejedor, B., Lucchi, E., Bienvenido-Huertas, D., & Nardi, I. (2022). Non-destructive techniques (NDT) for the diagnosis of heritage buildings: traditional procedures and futures perspectives. *Energy and Buildings*, 263(1), Article 112029.

Tejero-Andrade, A., Argote-Espino, D. L., Cifuentes-Nava, G., Hernández-Quintero, E., Chávez, R. E., & García-Serrano, A. (2018). 'Illuminating' the interior of Kukulcan's Pyramid, Chichén Itzá, Mexico, by means of a non-conventional ERT geophysical survey. *Journal of Archaeological Science*, 90(1), 1–11.

Theodoridou, M., & Török, Á. (2019). In situ investigation of stone heritage sites for conservation purposes: a case study of the Székesfehérvár Ruin Garden in Hungary. *Progress in Earth and Planetary Science*, 6(1), Article 15.

Tieh, T. T., Ledger, E. B., & Rowe, M. W. (1980). Release of uranium from granitic rocks during in situ weathering and initial erosion (central Texas). *Chemical Geology*, 29(1-4), 227–248.

Tissot, F. L. H., & Dauphas, N. (2015). Uranium isotopic compositions of the crust and ocean: age corrections, U budget and global extent of modern anoxia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 167(15), 113–143.

Török, Á. (2002). Oolitic limestone in a polluted atmospheric environment in Budapest: weathering phenomena and alterations in physical properties. In S. Siegesmund, T. Weiss, & A. Vollbrecht (Eds.), *Natural stone, weathering phenomena, conservation strategies and case studies* (Geological Society Special Publication 205, pp. 363–379). The Geological Society.

Török, Á. (2010). In situ methods of testing stone monuments and the application of nondestructive physical properties testing in masonry diagnosis. In M. Bostenaru-Dan, R. Přikryl, & Á. Török (Eds.), *Materials, technologies and practice in historic heritage structures* (pp. 177–193). Springer.

Török, Á., Licha, T., Simon, K., & Siegesmund, S. (2011). Urban and rural limestone weathering; the contribution of dust to black crust formation. *Environmental Earth Sciences*, 63(4), 675–693.

Török, Á., & Přikryl, R. (2010). Current methods and future trends in testing, durability analyses and provenance studies of natural stones used in historical monuments. *Engineering Geology*, 115(3-4), 139–142.

Torres-Hernández, J. R., Siebe-Grabach, C., Aguillón-Robles, A., & Rodríguez-Ríos, R. (2014). Geocronología y características geoquímicas de un conjunto de domos riolíticos terciarios en el Campo Volcánico de San Luis Potosí, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66(1), 183–197.

Torres-Sánchez, D. (2020). Geoquímica, petrogénesis y geocronología del vulcanismo en el Complejo Volcánico Sierra de San Miguelito, Campo Volcánico de San Luis Potosí, México [Tesis de doctorado, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica].

Torres-Sánchez, D., Verma, S. K., Verma, S. P., Velasco-Tapia, F., Torres-Hernández, J. R. (2019). Petrogenetic and tectonic implications of Oligocene–Miocene volcanic rocks from the Sierra de San Miguelito complex, central Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 95(1), Article 102311.

Trauth, M. H. (2021). MATLAB® recipes for earth sciences (5th ed.). Springer.

Trindade, M. J., Prudêncio, M. I., Burbidge, C. I., Dias, M. I., Cardoso, G., Marques, R., & Rocha, F. (2014). Study of an aplite dyke from the Beira uraniferous province in Fornos de Algodres area (Central Portugal): Trace elements distribution and evaluation of natural radionuclides. *Applied Geochemistry*, 44(1), 111–120.

Tristán-González, M., Aguillón-Robles, A., Barboza-Gudiño, J. R., Torres-Hernández, J. R., Bellon, H., López-Doncel, R. A., Rodríguez-Ríos, R., & Labarthe-Hernández, G. (2009). Geocronología y distribución espacial del vulcanismo en el Campo Volcánico de San Luis Potosí. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 61(3), 287–303.



Tucker, M. E. (2001). Sedimentary petrology: an introduction to the origin of sedimentary rocks (3rd ed.). Blackwell Science.

Ullah, H., Lun, L., Rashid, A., Zada, N., Chen, B., Shahab, A., Li, P., Ali, M. U., Lin, S., & Wong, M. H. (2023). A critical analysis of sources, pollution, and remediation of selenium, an emerging contaminant. *Environmental Geochemistry and Health*, 45(5), 1359–1389.

UNESCO. (1988, October 24). 12COM XIVA – Inscription: Pre-Hispanic City of Chichen-Itza (Mexico). <https://whc.unesco.org/document/541>

UNESCO. (2009, November). Historic Centre of the City of San Luis Potosi scale 1:8843. <https://whc.unesco.org/en/list/1351/maps/>

UNESCO. (2010a, July 25). Advisory Body Evaluation (ICOMOS): Camino Real de Tierra Adentro (Mexico). <https://whc.unesco.org/en/documents/152441>

UNESCO. (2010b, September 3). Report of the decisions adopted by the World Heritage Committee at its 34th session (Brasilia, 2010). <https://whc.unesco.org/document/104960>

van Buchem, F. S. P., Melnyk, D. H., & McCave, I. N. (1992). Chemical cyclicity and correlation of Lower Lias mudstones using gamma ray logs, Yorkshire, UK. *Journal of the Geological Society*, 149(6), 991–1002.

van den Boogaart, K. G., & Tolosana-Delgado, R. (2013). Analyzing compositional data with R. Springer.

Velde, B., & Meunier, A. (2008). The origin of clay minerals in soils and weathered rocks. Springer.

Vergès-Belmin, V. (2011). Illustrated glossary on stone deterioration patterns (J. M. García-de Miguel, Trans.). ICOMOS ISCS. [https://publ.icomos.org/publicomos/jlbSai?html=Bur&base=technica&ref=42927&file=1607.pdf&path=spanish\\_glossary.pdf](https://publ.icomos.org/publicomos/jlbSai?html=Bur&base=technica&ref=42927&file=1607.pdf&path=spanish_glossary.pdf)

- Videla, H. A., Guiamet, P. S., & Gomez-de Saravia, S. G. (2000). Biodeterioration of Mayan archaeological sites in the Yucatan Peninsula, Mexico. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 46(4), 335–341.
- Viniegra-Osorio, F. (1981). Great carbonate bank of Yucatán, southern Mexico. *Journal of Petroleum Geology*, 3(3), 247–278.
- Viscarra-Rossel, R. A., Taylor, H. J., & McBratney, A. B. (2007). Multivariate calibration of hyperspectral  $\gamma$ -ray energy spectra for proximal soil sensing. *European Journal of Soil Science*, 58(1), 343–353.
- von Eynatten, H. (2004). Statistical modelling of compositional trends in sediments. *Sedimentary Geology*, 171(1-4), 79–89.
- von Eynatten, H., Barceló-Vidal, C., & Pawlowsky-Glahn, V. (2003). Modelling compositional change: the example of chemical weathering of granitoid rocks. *Mathematical Geology*, 35(3), 231–251.
- Wang, K., Li, W., Li, S., Tian, Z., Koefoed, P., & Zheng, X.-Y. (2021). Geochemistry and cosmochemistry of potassium stable isotopes. *Geochemistry*, 81(3), Article 125786.
- Ward, D. L. (1978). Construction of calibration pads facility Walker Field, Grand Junction, Colorado (Technical Report GJBX-37(78)). Bendix Field Engineering Corporation.
- Ward, W. C., Keller, G., Stinnesbeck, W., & Adatte, T. (1995). Yucatán subsurface stratigraphy: implications and constraints for the Chicxulub impact. *Geology*, 23(10), 873–876.
- Watt, J., & Hamilton, R. (2003). The soiling of buildings by air pollution. In P. Brimblecombe (Ed.), *The effects of air pollution on the built environment (Air Pollution Reviews Vol. 2, pp. 289–334)*. Imperial College Press.
- Wedekind, W., López-Doncel, R. A., Dohrmann, R., Kocher, M., & Siegesmund, S. (2013). Weathering of volcanic tuff rocks caused by moisture expansion. *Environmental Earth Sciences*, 69(4), 1203–1224.

- Weiss, T., Siegesmund, S., Kirchner, D., & Sippel, J. (2004). Insolation weathering and hygric dilatation: two competitive factors in stone degradation. *Environmental Geology*, 46(3-4), 402–413.
- White, A. F., & Buss, H. L. (2014). Natural weathering rates of silicate minerals. In H. D. Holland, & K. K. Turekian (Eds.), *Treatise on geochemistry* (2nd ed., Volume 7: Surface and groundwater, weathering and soils, pp. 115–155). Elsevier.
- Wilford, J. R. (1992). Regolith mapping using integrated Landsat TM imagery and high resolution gamma-ray spectrometric imagery – Cape York Peninsula (Technical Report Record 1992/78). Australian Geological Survey Organisation.
- Wilford, J. R. (1995). Airborne gamma-ray spectrometry as a tool for assessing relative landscape activity and weathering development of regolith, including soils. *AGSO Research Newsletter*, 22(1), 12–14.
- Wilford, J. R. (2012). A weathering intensity index for the Australian continent using airborne gamma-ray spectrometry and digital terrain analysis. *Geoderma*, 183-184(1), 124–142.
- Wilford, J. R., Bierwirth, P. N., & Craig, M. A. (1997). Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil regolith mapping and applied geomorphology. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(2), 201–216.
- Wilford, J. R., & Minty, B. R. S. (2007). The use of airborne gamma-ray imagery for mapping soils and understanding landscape processes. In P. Lagacherie, A. B. McBratney, & M. Voltz (Eds.), *Digital soil mapping: an introductory perspective* (Developments in soil science volume 31, pp. 207–2018). Elsevier.
- Wilhelm, K., Viles, H., Burke, O., & Mayaud, J. (2016). Surface hardness as a proxy for weathering behaviour of limestone heritage: a case study on dated headstones on the Isle of Portland, UK. *Environmental Earth Sciences*, 75(10), Article 931.
- Williams-Thorpe, O., Webb, P. C., & Thorpe, R. S. (2000). Non-destructive portable gamma ray spectrometry used in provenancing Roman granitoid columns from Leptis Magna, North Africa. *Archaeometry*, 42(1), 77–99.

Wormald, R., & Britch, A. L. (1969). Methods of measuring moisture content applicable to building materials. *Building Science*, 3(3), 135–145.

Yasmin, S., Barua, B. S., Khandaker, M. U., Kamal, M., Rashid, M. A., Sani, S. F. A., Ahmed, H., Nikouravan, B., & Bradley, D. A. (2018). The presence of radioactive materials in soil, sand and sediment samples of Potenga sea beach area, Chittagong, Bangladesh: geological characteristics and environmental implication. *Results in Physics*, 8(1), 1268–1274.

Yu, S., & Oguchi, C. T. (2010a). Is sodium sulphate invariably effective in destroying any type of rock?. In R. Přikryl, & Á. Török (Eds.), *Natural stone resources for historical monuments* (Geological Society Special Publication 333, pp. 43–58). The Geological Society.

Yu, S., & Oguchi, C. T. (2010b). Role of pore size distribution in salt uptake, damage, and predicting salt susceptibility of eight types of Japanese building stones. *Engineering Geology*, 115(3-4), 226–236.

Zarate-Barradas, R. G., Lemus-Bustos, O., Miranda-Huerta, A., & Cureño-Suriano, R. (2005). Carta geológico-minera y geoquímica Mérida F16-10 escala 1:250,000 estados de Yucatán, Campeche y Quintana Roo (Reporte técnico). Servicio Geológico Mexicano.

Zarate-Barradas, R. G., Miranda-Huerta, A., Lemus-Bustos, O., Mendieta-Flores, J. L., & Sánchez-Pérez, J. M. (2006, febrero). Carta geológico-minera. Mérida F16-10. [https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas\\_Online/geologia/116\\_F16-10\\_GM.pdf](https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/116_F16-10_GM.pdf)

Zhang, C., Liu, T., Yang, Z., Wu, P., Zhang, K., & Chen, S. (2022). Study on antimony and arsenic cycling, transformation and contrasting mobility in river-type reservoir. *Applied Geochemistry*, 136(1), Article 105132.

Zhang, Z., Ma, J., Wang, Z., Zhang, L., He, X., Zhu, G., Zeng, T., & Wei, G. (2021). Rubidium isotope fractionation during chemical weathering of granite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 313(1), 99–115.

Zhao, Y., Wei, W., Santosh, M., Hu, J., Wei, H., Yang, J., Liu, S., Zhang, G., Yang, D., & Li, S. (2022). A review of retrieving pristine rare earth element signatures from

carbonates. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 586(1), Article 110765.

# Anexo 1. In situ gamma-ray spectrometry as a non-destructive test for the assessment of building stones: methodology, application, and interpretation

Environmental Earth Sciences (2025) 84:380  
https://doi.org/10.1007/s12665-025-12366-2

## ORIGINAL ARTICLE



### In situ gamma-ray spectrometry as a non-destructive test for the assessment of building stones: methodology, application, and interpretation

Alejandro Méndez-Gaona<sup>1</sup> · Vsevolod Yutis<sup>1</sup> · Rubén Alfonso López-Doncel<sup>2</sup>

Received: 25 September 2024 / Accepted: 6 June 2025  
© The Author(s), under exclusive licence to Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2025

#### Abstract

A methodology was proposed for building stones characterization by means of in situ gamma-ray spectrometry with a portable spectrometer. This methodology involves the right selection of suitable outcrops for comparisons, the correction of anomalous data caused by moisture, and the interpretation according to lithology, mineralogy, weathering/deterioration, and moisture content. This methodology was tested in the Historic Center of San Luis Potosí, Mexico, which was declared a cultural World Heritage Site in 2010. Specifically, it was tested in two constructions, the Caja del Agua Conservera and Caja del Agua del Santuario. Both are composed of stone blocks of rhyolitic ignimbrites of the Cantera Formation that outcrops in the west, south, and southwest of San Luis Potosí. With the gamma-ray spectrometry was demonstrated that both constructions have lower radiation in relation to the outcrop due to weathering processes, mainly loss of potassium and variations of uranium and thorium. Spectrometry proved useful in identifying stone blocks with moisture and salts due to their lower radiation in these conditions caused by attenuation. In addition, it was possible to determine that certain forms of deterioration such as detachment influence radiation variations.

**Keywords** Gamma-ray spectrometry · Non-destructive tests · Building stones · Weathering · Deterioration · Mexico

#### Introduction

Non-destructive tests (NDT) are very important for the assessment of buildings that are part of cultural heritage because they do not cause damage and are not invasive, so they can be used to characterize the materials that compose them, their physical properties, and their relationships with the deterioration patterns. NDT are preferred over other types of evaluation techniques because they do not require sampling, thus aiding in the conservation of monuments.

Commonly, the most used NDT are the Schmidt hammer or duroscope (Siedel and Siegesmund 2014; Theodoridou and Török 2019), Karsten tube (Török 2002;

Padilla-Ceniceros et al. 2017) ultrasonic measurements (Fais et al. 2017; Menningen et al. 2018), moisture meters (Phillipson et al. 2007; Hatur et al. 2019), among others.

Gamma-ray spectrometry (GRS) with a portable spectrometer can also be considered as an NDT. GRS is based on recording gamma-rays generated by potassium and the naturally occurring uranium and thorium decay chains in various minerals. The gamma-rays emitted by these elements have a specific energy that allows them to be recognized, and their concentration calculated. While the use of GRS in geosciences is quite common, for example, in well logging (Rider 2002), in outcrops for reservoir analogs (Evans et al. 2007), in ore exploration (Airo and Loukola-Ruskeeniemi 2004) or to mapping lithology and soils (Taylor et al. 2002; Wilford 2012), for building stones studies its use is not common. Many of the radiometric studies in buildings involve sampling and laboratory analysis (Croft and Hutchinson 1999; Righi and Bruzzi 2006; Sonkawade et al. 2008; Moharram et al. 2012). In other cases, GRS has been used to identify buried structures through radioelement concentrations and their relationships with weathering (Ruffell et al. 2006; Sanjurjo-Sánchez et al. 2018a), to

✉ Rubén Alfonso López-Doncel  
rlopez@uaslp.mx

<sup>1</sup> Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, Camino a la Presa San José 2055, Lomas 4 Sección, 78216 San Luis Potosí, México

<sup>2</sup> Instituto de Geología, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Zona Universitaria, Av. Dr. Manuel Nava 5, 78240 San Luis Potosí, México



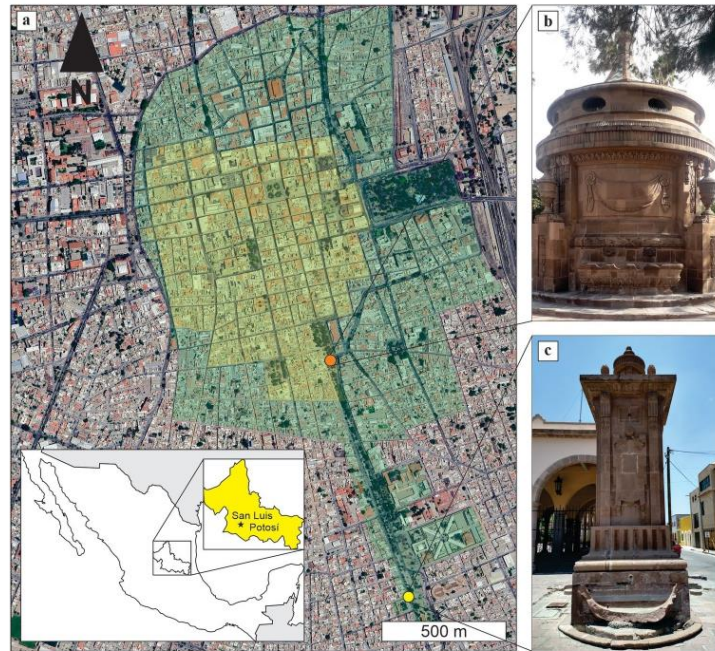
determinate the provenance of building stones compared to quarries with emphasis to data correction for geometry, although these cannot be applied in other settings (Williams-Thorpe et al. 2000). With respect to in situ GRS in buildings and its relation to deterioration, the studies of Sanjurjo-Sánchez et al. (2018b) and Hernández-Santomé et al. (2025) stand out, although the first do not provide methodological bases or data processing and the number of measurements is low.

As noted, the applications of GRS are varied, but its use in situ for the study of monuments is not common. Therefore, the objective of this article is to establish a methodology to perform GRS with a portable spectrometer in buildings. This methodology was tested in a case study and the results obtained illustrate the potential of this technique to detect gamma radiation variations according to moisture content or weathering conditions. It should be noted that the methodology applies to spectrometers that detect natural gamma radiation and not artificial gamma-ray sources, which are used, for example, in well logs to calculate porosity (Rider 2002; Telford et al. 2004) or in buildings to determine moisture content (Wormald and Britch 1969; Kumaran and Bomberg 1985).

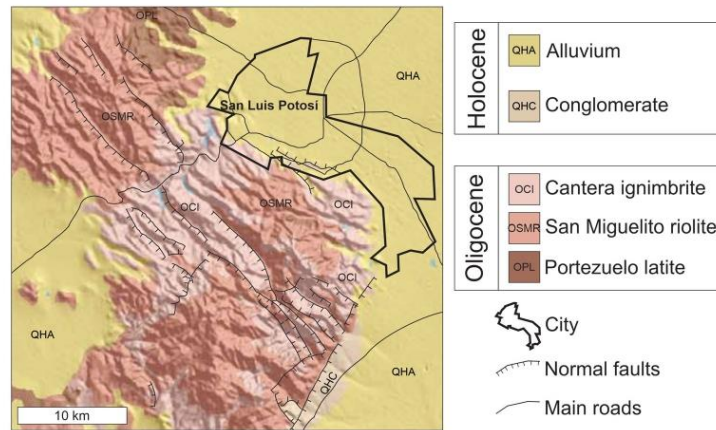
The case study is in the Historic Center of San Luis Potosí (HCSLP), SLP, Mexico (Fig. 1), which was declared a cultural World Heritage Site by the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) in 2010. It is part of the "Camino de Tierra Adentro", a trade route active between the sixteenth and nineteenth centuries that started in present-day Mexico City, passed through several Mexican states, and reached Santa Fe, New Mexico in the United States (UNESCO, 2010a). Specifically, the iconic construction of the city, the Caja del Agua Conservera (CAC), and a similar construction known as Caja del Agua del Santuario (CAS) were selected (Fig. 1).

Most of the buildings of the HCSLP were built with rhyolitic ignimbrites of the Cantera Formation (Oligocene) that outcrops in the Sierra de San Miguelito to the west, southwest, and south of the city (Fig. 2) (Labarthe-Hernández and Tristán-González 1978). This formation is divided into two members, an unwelded grayish-white lower member and an upper member characterized by a light pink color (Labarthe-Hernández and Jiménez-López 1992). Both are composed of variable proportions of quartz, sandine, biotite, plagioclase, oxides, lithics, and pumice in an ash matrix (Caballero-Miranda et al. 2009).

**Fig. 1** a HCSLP with the core zone in yellow and the buffer zone in green as established by UNESCO (2010b). b Caja del Agua Conservera. c Caja del Agua del Santuario



**Fig. 2** Geological map of the Sierra de San Miguelito, San Luis Potosí, where the Cantera Formation outcrops (modified from SGM 2008)



## Theoretical background

### Gamma radiation

Gamma-rays are electromagnetic waves that originate from the decay of potassium and various elements in the uranium and thorium decay chains. Each of these isotopes emits gamma-rays with a defined energy, thus making it possible to identify which element originated the gamma-ray and to calculate its concentration. Potassium 40 ( $K^{40}$ ) when it decays to argon 40 ( $Ar^{40}$ ) emits a gamma-ray with an energy of 1.46 MeV. Uranium 238 ( $U^{238}$ ), which is the important isotope in the GRS, ignoring uranium 235 ( $U^{235}$ ) because of its extremely low abundance, emits gamma-rays of various energies along its decay chain, 1.76 MeV being characteristic of bismuth 214 ( $Bi^{214}$ ). Thorium 232 ( $Th^{232}$ ) emits gamma-rays of various energies, but with the characteristic peak of thallium 208 ( $Tl^{208}$ ) of 2.62 MeV (Telford et al. 2004).

### Interaction of radiation with matter

Gamma-rays emitted by these radioelements propagate, having interactions with matter. There are three main types of these interactions (Ferronsky 2015): the photoelectric effect, Compton scattering, and pair production. In the photoelectric effect, a gamma-ray collides with a particle transferring all its energy to it. In Compton scattering, the collision between a gamma-ray and a particle causes the particle to absorb some of the energy of the gamma-ray, and this is deflected at a certain angle. In pair production, the collision between a gamma-ray and a particle results in the creation of an electron-positron pair.

All these interactions involve energy changes in gamma-rays as they propagate through a medium, which is known as attenuation. The probability of these interactions happening is calculated with the linear absorption coefficient, while the mass absorption coefficient indicates how much radiation can penetrate through a medium (Knoll 2010; Ferronsky 2015).

The mass absorption coefficient depends on the energy of the gamma radiation and the bulk density of the medium, so changes in either of these parameters will cause changes in the coefficient. One of the factors that most affect this coefficient is the moisture content (Ferronsky 2015) because it increases the bulk density of the medium. Other changes in bulk density can be caused by the presence of salts or fluids, or by an increase in porosity due to mineral dissolution.

### Gamma-ray detection and concentration of radioelements

Spectrometers are instruments that detect the intensity of gamma-rays, and their operation is based on the interactions described above. Details of the characteristics of these instruments can be found in Knoll (2010).

The detection of gamma-rays by spectrometers is subject to certain variables, so it is always necessary to correct the recorded data. One of these is the dead time, defined as the time (generally in microseconds) that the system needs to recover after processing the arrival of a gamma-ray, a period during which it cannot record another event (Knoll 2010). Another correction is for background radiation, which can have several sources. The International Atomic Energy Agency (IAEA 2003) suggests that background radiation can be determined over a body of water.



For the calculation of radioelement concentrations, it is assumed that decay chains are in equilibrium and certain energy ranges are assigned to each element (IAEA 2003): total counts 0.40–2.81 MeV, potassium 1.37–1.57 MeV, uranium 1.66–1.86 MeV, and thorium 2.41–2.81 MeV. However, due to the interactions of gamma-rays with matter, a part of the energy of an element can be detected in an energy range that does not correspond to it. This can be corrected with six stripping coefficients ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $y$ ) that are specific to each spectrometer. Typically, the stripping coefficients  $a$ ,  $b$ , and  $y$  are equal to zero (IAEA 2003), although this is not always the case.

Knowing the stripping coefficients and the sensitivity of the spectrometer, i.e., the ability to record counts for each radioelement, the concentrations of potassium, uranium, and thorium can be calculated. These data are usually provided by the equipment manufacturer.

## Materials and methods

### Gamma-ray spectrometry

This section describes the proposed methodology for GRS in situ on buildings stones surfaces starting from the right selection of a suitable outcrop, how the GRS data should be taken, the corrections normally made, new corrections proposed, and the considerations for interpretation.

### Preliminary considerations

Most of the cultural heritage monuments have been exposed for a long time to deterioration processes, so their original radiation has likely changed. On the contrary, an outcrop can have relatively little time of exposure and in this condition should preserve its original radiation values.

Considering the above, to evaluate the radiation of any building, it is necessary to record the radiation of an outcrop for comparison. The building stone blocks must have the same lithology and belong to the same formation or geological unit as the outcrop rocks. The latter should preferably have very low or no weathering.

The methodology proposed here requires a moisture meter to make radiation corrections. To minimize the error in moisture data, it is suggested that rocks do not receive direct sunlight because this can cause changes in moisture by surface evaporation. Measurements should also be avoided after a recent rainfall because atmospheric radon can be trapped by the droplets, penetrating the rocks, and thus having high radiation readings (IAEA 2003).

### Gamma-ray spectrometry in outcrops and buildings

Recording as many details as possible will help in the correction and interpretation of radiometric data. Of vital importance is the lithological and weathering reconnaissance of rocks. In buildings, the extent of decay patterns requires special attention.

Before the survey, it is necessary the calibration of the portable spectrometer and the definition of background radiation of the study area. When measuring, the spectrometer should be in contact with the rock surface, which should be as flat and uniform as possible to have adequate readings. This surface is considered as having a  $2\pi$  geometry (Fig. 3) (Myers and Bristow 1989), i.e., a circle, because the detected radiation comes from all directions, but most of it from the part just below the spectrometer (Ferronsky 2015). Different surfaces affect the detected radiation, as well as the spatial conditions under which it is measured (Fig. 3), so recording these variables helps with the interpretation.

The number of measurements will depend on the outcrop extensions. A network of points can be made with a separation of 30–50 cm to cover most of its surface. In buildings, it is suggested to take at least one reading in each stone block, although several measurements should be taken if its dimensions allow it and if there are several deterioration patterns. On the contrary, if a stone block is smaller than the spectrometer, then it should be discarded because the measured values will be influenced by neighboring stone blocks. The measurement time at each point or stone block should be at least 2 min to reduce the counting error (IAEA 2003).

Moisture should be measured immediately before or just after recording radiation to avoid surface moisture fluctuations related to temperature or evaporation from direct exposure to sunlight. Readings should be taken on the surface where the spectrometer was placed and can be taken as many as possible to be averaged.

### Typical corrections

The readings of total radiation, potassium, uranium, and thorium in counts per minute (cpm) or counts per second (cps) need to be corrected for the dead time of the spectrometer and the background radiation of the study site.

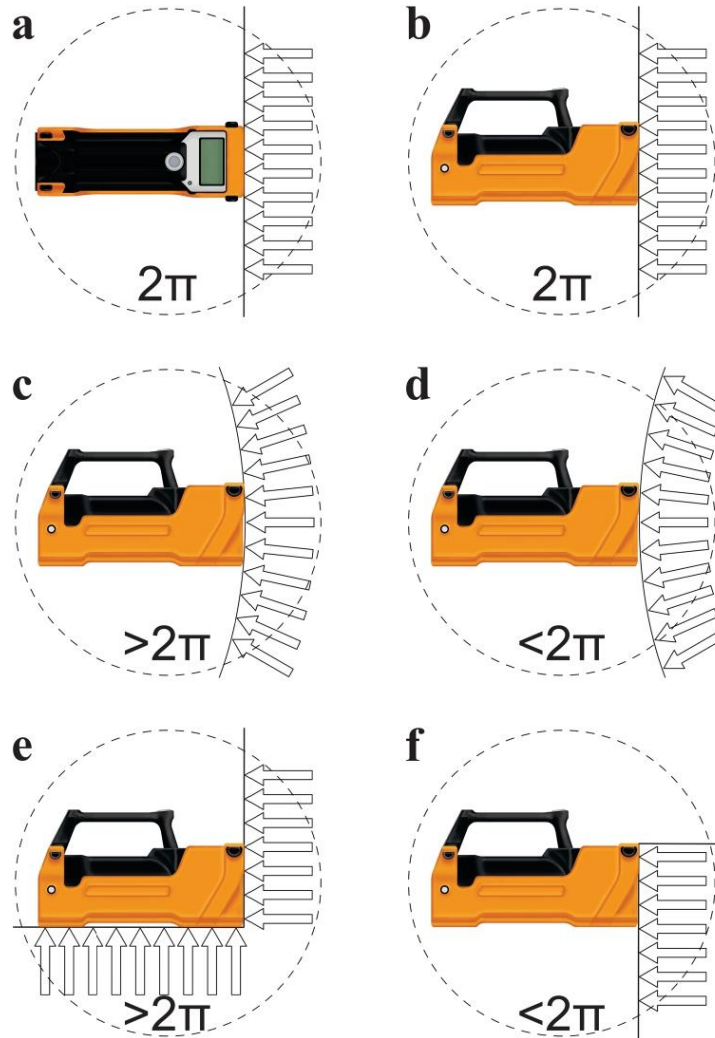
The correction for dead time is performed for each value with the following formula (Knoll 2010):

$$c = \frac{co}{1 - co(\tau)}$$

where  $c$  are the actual counts,  $co$  are the observed counts, and  $\tau$  the spectrometer dead time.

The background radiation correction involves subtracting the background counts from each real count ( $c$ ) for each value.

**Fig. 3** **a, b** On a uniform flat surface, the entire radiation ( $2\pi$ ) is recorded. **c** On a concave surface, more radiation is recorded ( $> 2\pi$ ). **d** On a convex surface, less radiation is recorded ( $< 2\pi$ ). **e** The spectrometer near two or more surfaces (i.e. corners) records higher radiation ( $> 2\pi$ ). **f** On incomplete surfaces (i.e. borders), the spectrometer records less radiation ( $< 2\pi$ ) (modified from Myers & Wignall 1987; Parkinson 1996; Séco et al. 2021)



#### Corrections for moisture content

Considering that moisture content is one of the main factors affecting gamma-ray attenuation, a correction for radiation values with respect to measured surface moisture content is proposed.

The first step is to discard the abnormally high and low radiation values to construct a line using a simple linear

regression model. The discarded values will correspond to geometries different than  $2\pi$ , so discarding them will give more validity to the model. Plotting the data is useful for a quick visual analysis of the values that need to be discarded.

Once the values have been discarded, the simple linear regression model is built with the remaining data. The formula is:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i, i = 1, \dots, n,$$

where  $y_i$  represents the data set of gamma radiation readings (total, potassium, uranium, thorium),  $\beta_0$  is the value where the line intercepts with the ordinate axis,  $\beta_1$  is the slope of the line,  $x_i$  represents the moisture values (%),  $\varepsilon_i$  is the error.

To find the unknowns  $\beta_0$  and  $\beta_1$  the least squares calculation is used:

$$\beta_0 = \bar{y} - \beta_1 \bar{x}$$

$$\beta_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

where  $\bar{x}$  represents the mean of the moisture data set (%) and  $\bar{y}$  represents the mean of the gamma radiation data set.

The standard deviation for the data set is calculated with the following formula:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - (\beta_0 + \beta_1 x_i))^2}{(n - 2)}}$$

Once the regression line is obtained, the data are corrected by the standard deviation. For abnormally high values the following formula is used:

$$y_{corr} = \hat{y}_i + \sqrt{\hat{y}_i + \hat{y}_i}$$

and for abnormally low values the following formula will be used:

$$y_{corr} = \hat{y}_i - \sqrt{\hat{y}_i - y_i}$$

where  $y_{corr}$  is the corrected value for radiation.

It is suggested that only values that exceed the standard deviation (negatively or positively) should be corrected so as not to overestimate or underestimate other processes that are influencing the variation of the data, such as weathering or deterioration patterns.

If GRS was performed on several outcrops and the data sets have the same average, then only one line needs to be made with the linear regression method and with this line correct all outcrop data. The choice of which outcrop to use to model the line will depend on the conditions under which the data were taken, preferably an outcrop whose surface moisture was not modified by high temperatures or by being exposed to direct sunlight. The same case applies to buildings, if there are several faces or facades, only one line can be made and applied to the rest.

Once the data has been corrected, it is recommended to recalculate each radiation value with a zero-value moisture content using the linear regression model to interpret the

variations with lithology. The calculation of the radioelement's concentrations can be done after correction of the data and if the values will be recalculated, the concentrations will be calculated after this step.

### Calculation of concentrations

The calculation for potassium concentrations in percent (%) and uranium and thorium concentrations in parts per million (ppm) is as follows:

$$K(\%) = \frac{K_{ca} - \gamma[cU - \gamma(cK) - a(cTh)] - \beta[cTh - a(cU) - b(cK)]}{S_K}$$

$$U(ppm) = \frac{U_{ca} - \gamma[cK - \gamma(cU) - \beta(cTh)] - a[cTh - a(cU) - b(cK)]}{S_U}$$

$$Th(ppm) = \frac{Th_{ca} - b[cK - \gamma(cU) - \beta(cTh)] - a[cU - \gamma(cK) - a(cTh)]}{S_{Th}}$$

where  $S_K$ ,  $S_U$ , and  $S_{Th}$  are the sensitivities for the detection of potassium, uranium, and thorium, respectively.

### Gamma-ray spectrometry data acquisition

The GRS was performed with a portable RS-125 spectrometer from Radiation Solutions Inc. that records total radiation, dose, potassium concentration (%), and uranium and thorium concentration (ppm). The precision of the equipment is 0.31 %, 1.03 ppm, 2.50 ppm for potassium, uranium and thorium, respectively. The device performs dead time and background radiation corrections automatically. The equipment calibration was done in pads with known concentrations of the radioelements (Table 1), then several measurements were performed in different rocks to compare the equipment response with concentrations from laboratory geochemical analysis (Table 2) and guarantee the proper functioning of the spectrometer.

In the outcrop, measurements were taken every 30 cm and sometimes other readings were taken depending on the coloration of the rock and its weathering conditions for a total of 41 measurements. In the constructions (Fig. 4), mostly several measurements were taken on each stone block due to its size, and a few blocks smaller than the spectrometer were discarded, accounting for 402 measurements at the CAC and 226 at the CAS.

**Table 1** Calibration data and concentration results for the spectrometer RS-125 used in this study

Pad	Acceptable range	Measured
K	7–9.3 (%)	8.2 (%)
U	40–50 (ppm)	47.2 (ppm)
Th	104–129.3 (ppm)	117.9 (ppm)



**Table 2** Comparison between calculated concentrations from GRS obtained with the spectrometer RS-125 and data from laboratory geochemical analysis. ND indicates no data available

Sample	K (%)		U (ppm)		Th (ppm)	
	XRF	GRS	ICP-MS	GRS	ICP-MS	GRS
Rhyolitic ignimbrite1	4.71	4.50	3.42	4.50	22.38	22.70
Rhyolitic ignimbrite2	4.70	4.50	3.35	4.70	26.27	25.30
Rhyolitic ignimbrite3	4.64	4.97	7.55	6.90	43.34	26.20
Rhyolitic ignimbrite4	4.73	5.10	5.75	5.80	50.33	27.50
Rhyolitic ignimbrite5	4.62	4.05	8.07	8.30	49.38	26.50
Rhyolitic ignimbrite6	4.65	4.75	1.25	4.10	20.98	27.80
Rhyolitic ignimbrite7	4.64	4.76	7.08	7.06	31.43	29.60
Rhyolitic ignimbrite8	4.60	5.02	7.97	7.26	31.09	28.70
Rhyolitic ignimbrite9	4.63	5.37	9.40	8.03	52.16	28.10
Calcareous breccia1	0.29	0.50	ND	0.70	ND	1.80
Calcareous breccia2	0.25	0.30	ND	0.30	ND	1.50
Limestone1	0.05	0.10	ND	0.20	ND	0.90
Limestone2	0.04	0.00	ND	1.30	ND	0.30
Limestone3	0.06	0.10	ND	0.10	ND	1.30
Granite1	2.78	3.30	ND	5.00	ND	10.00
Granite2	2.35	2.90	ND	6.50	ND	9.00
Granite3	2.61	3.00	ND	6.60	ND	6.50
Granite4	3.09	3.50	ND	5.70	ND	9.90
Granite5	3.92	4.50	ND	10.90	ND	10.60



**Fig. 4** An example of how GRS measurements were made, in this case, on the Caja del Agua Conservera. Because of the dimensions of most of the blocks, it was possible to take several measurements in each stone block

The spectrum and data obtained from GRS were evaluated using the RSAnalyst software provided by Radiation Solutions Inc.

#### Moisture measurement

Surface moisture was measured with a Duro moisture meter with a percentage scale and an accuracy of 0.05%. This type of instrument represents, like the gamma-ray spectrometer, another NDT useful for the characterization of materials (Phillipson et al. 2007) and allows quick measurements upon contact with the rock surface.

Moisture was measured several times at the same point to average the readings due to small variations in the rock surface, e.g., pumice or cement deposits in constructions.

#### Lithology and deterioration of the Cajas del Agua

A lithological reconnaissance was made, identifying the mineral components and the stones color to elaborate lithological mappings of both constructions.

Damage was identified based on the glossary of García-de Miguel (2011) of the International Council on Monuments and Sites-International Scientific Committee for Stone (ICOMOS-ISCS), which divides the deterioration patterns into five major groups: (1) cracks and deformation, (2) detachment, (3) features induced by material loss, (4) discoloration and

deposit, (5) biological colonization. Based on this, deterioration maps of both constructions were made.

### Sampling, petrography, and X-ray diffraction

Twelve ignimbrite rock samples were taken from the Cantera Formation outcrop for thin section elaboration and X-ray diffraction analysis (XRD). A total of 44 thin sections for petrographic description with an optical microscope and a count of 500–1000 points were made to identify the proportion of the mineral components.

For conservation reasons, no samples were obtained from the constructions, but fragments detached by blistering were collected from the CAS for XRD analysis.

The samples were analyzed with a Bruker D8 Advance X-ray diffractometer at the National Laboratory for Research in Nanosciences and Nanotechnology of the Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT) to determine the composition of clays and other minerals that could not be identified by microscopy.

### Petrophysical properties

Bulk and matrix density were measured in 6 from the 12 samples and were divided into various cubic specimens of 6.5 cm (DIN 52102). The parameters were calculated using hydrostatic weighting with the following equations:

$$\text{Bulk density } (\rho_{\text{bulk}}) = \frac{w_{\text{dry}}}{w_{\text{sat}} - w_{\text{sub}}}$$

$$\text{Matrix density } (\rho_{\text{matrix}}) = \frac{w_{\text{dry}}}{w_{\text{dry}} - w_{\text{sub}}}$$

where  $w_{\text{dry}}$  is the weight of the sample in dry conditions,  $w_{\text{sat}}$  is the weight in saturated conditions, and  $w_{\text{sub}}$  is the submerged weight of the sample. The last two weights were obtained after vacuum conditions and then the pores filled with distilled water.

Forced water absorption in vacuum conditions ( $W_{\text{vac}}$ ) was also calculated with those measured weights:

$$W_{\text{vac}} = \frac{w_{\text{sat}} - w_{\text{dry}}}{w_{\text{dry}}} \cdot 100$$

Porosity was calculated using the obtained densities using the equation:

$$\text{Porosity } (\%) = \frac{\rho_{\text{matrix}} - \rho_{\text{bulk}}}{\rho_{\text{matrix}}} \cdot 100$$

## Results

### Lithological, petrographic, and mineral description

The selected outcrop corresponds to a quarry of the Cantera Formation in SE San Luis Potosi (Fig. 5). The rocks are ignimbrites formed by volcanic ash with quartz and feldspar crystals, as well as biotite, oxides, plagioclases, and pumice, all with a homogeneous distribution. However, color variations were observed in the outcrop: the fresh rock is light pink (LP) and changes to dark pink (DP) and orange (OR) with various shades of brown due to weathering.

In both constructions, the same mineral characteristics and color variations were observed, although a brown shade predominates due to soiling. In some stone blocks with detachment, it was possible to identify how the surface is OR and below it is LP or DP, depending on their location and the orientation of the facade. Lithological mappings are shown in Fig. 6.

In the petrographic analysis quartz, sanidine, biotite, oxides, pumice, plagioclase, and lithics were identified in a fine-grained matrix. The point count revealed that the matrix represents 70–80% and different tonalities such as brown, yellowish brown, and reddish brown are appreciated, which seem to depend on the dissolution of biotite and oxides (Fig. 7). In the XRD, montmorillonite was detected, perhaps a product of matrix alteration.

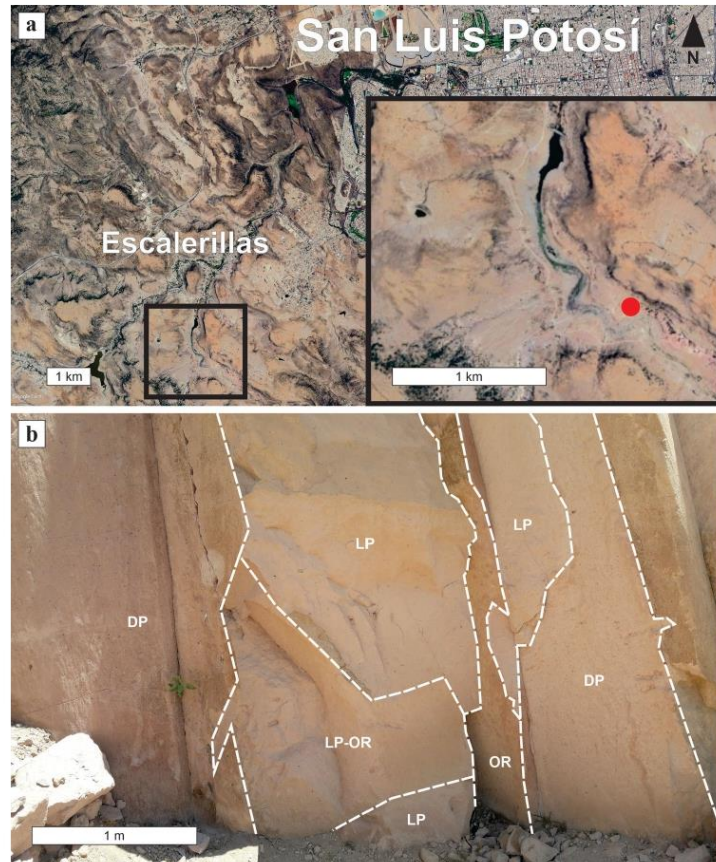
The main constituents are quartz and sanidine, reaching 50–60% and 50–40% respectively of the rock crystals. Both minerals can reach 2 mm, but subhedral phenocrysts of approximately 0.5 mm predominate. They usually have zircon inclusions, although it is also possible to find this mineral in the matrix. Some feldspars are altered in cleavage planes.

In smaller proportions, there are biotite, pumice, and opaque minerals that, according to the XRD, are hematite. Biotite is commonly observed with an oxide alteration rim. Hematite can cause staining of the matrix up to several millimeters (Fig. 7). Pumice fragments are variable in size from about 0.5 mm to several centimeters and may be altered to montmorillonite. Plagioclase represents less than 1% of the crystals.

### Deterioration patterns

The deterioration patterns identified in the CAC were: cracks, detachment (fragmentation, scaling, blistering), erosion, abrasion, glossy aspect, discoloration, staining,

**Fig. 5** **a** Outcrop location (red circle) of the Cantera Formation at Escalerillas, San Luis Potosí. **b** Outcrop division according to color differences: light pink (LP), dark pink (DP), and orange (OR)



soiling, efflorescence, deposits, crusts, and graffiti. The mappings of these damages are shown in Fig. 8.

The cracks are located on the secondary faces and have an extension of several tens of centimeters. Detachment is uncommon: fragmentation occurs on the edges of the stone blocks, occupying little extension; blistering is probably caused by the crystallization of salts transported by the capillarity water uptake since it is more common in the lower areas; scaling is also common in the lower parts.

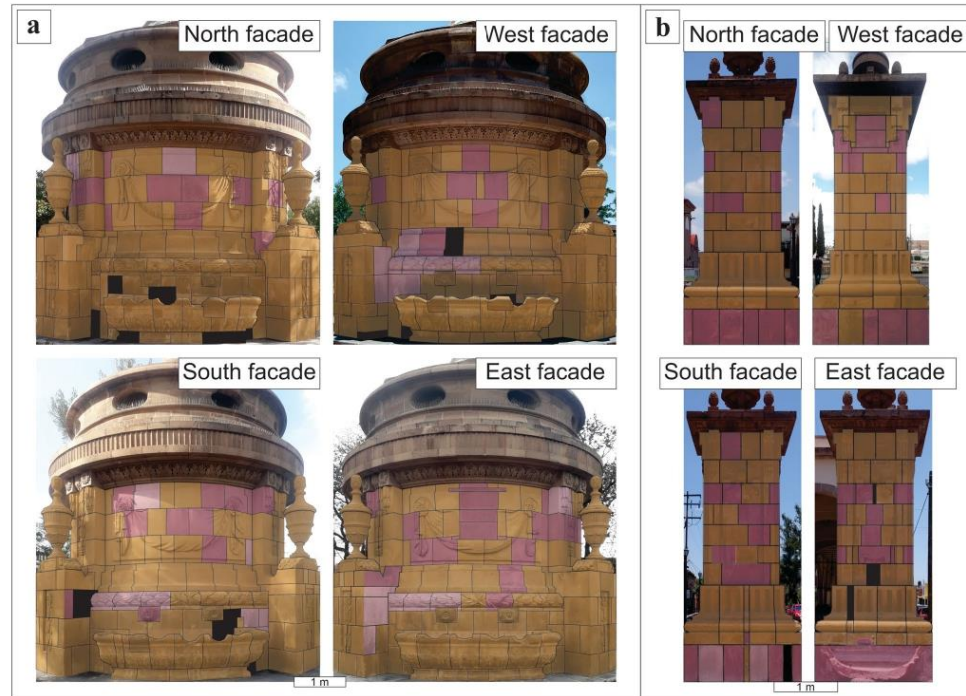
Erosion regularly appears as loss of components (quartz, feldspar, pumice) and matrix, occupying a large surface of the stone block with this type of damage. Abrasion and glossy aspect are related to the parts where people are in contact with the stone blocks that compose the basins where water used to fall.

The discoloration is represented by changes in the color of the stone blocks due to weathering processes. In the upper parts, there is mainly staining of the surface due to water runoff. Small areas with oxide staining were also observed. The soiling is the most extensive deterioration pattern, predominating and having darker shades in the lower parts up to about 2 m in height. Graffiti is rare and are made by scratching the surface of the stone blocks. The deposits are mainly cement.

For the CAS, the following deterioration patterns were identified (Fig. 8): cracks, detachment (fragmentation, scaling, blistering), erosion, perforations, missing part, discoloration, staining, soiling, efflorescence, deposits, crusts, and graffiti.

Detachment is much more frequent in the CAS than in the CAC. For example, blistering and scaling cover more





**Fig. 6** Lithologic mappings separated by facades of the Caja del Agua Conservera (a) and the Caja del Agua del Santuario (b)

area, causing detachment of the surface of many of the stone blocks in the lower parts, where efflorescence and subflorescence were also found. On the east facade, there is a missing part as a result of a vehicular impact.

As in the CAC, there is erosion of components and matrix (although the area of this pattern is smaller), the discoloration of the stone is concentrated in the upper blocks, the soiling has the greatest extension of all the deterioration patterns, and the deposits are mainly cement covers.

#### Gamma-ray spectrometry in outcrops

Following the proposed methodology, anomalous data were discarded to perform the linear regression model for the data set. Subsequently, the discarded data were reintegrated into the data set to correct them together with all other highly dispersed data with respect to the standard deviation calculated (Table 3). Figure 9 shows the results of the correction and the equations of the modeled lines.

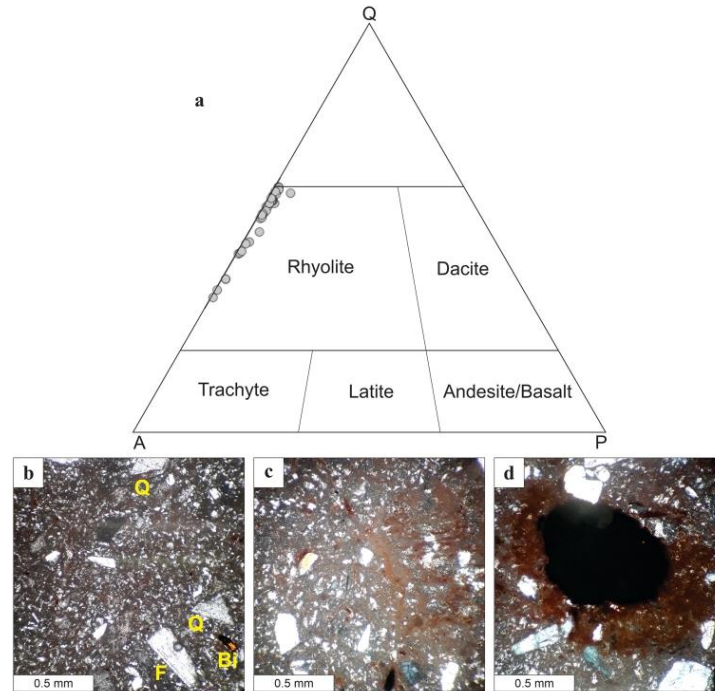
For the interpretation of the corrected data, the line obtained was used to calculate the radiometric values at

0.0% moisture content. Finally, the concentrations for each element were determined. It was found that the OR rocks have the highest total radiation and slightly higher concentrations of all the elements. This suggests a relationship with the dissolution of biotite and iron oxides in the matrix. LP rocks have a slightly lower total radiation and DP rocks have the lowest total radiation.

#### Gamma-ray spectrometry on the Caja del Agua Conservera

The north facade of the CAC is the least affected by sunlight, only receiving it during the latter part of the day, so it was chosen to calculate the regression lines on this facade and apply them to the others (Figs. 10, 11). Following the proposed methodology, the anomalous data taken in geometries and surfaces different than  $2\pi$  were discarded to construct the linear regression model (Table 4), then, with the standard deviation calculated and the proposed equations, all data were corrected and recalculated at 0.0% moisture content for interpretation.

**Fig. 7** **a** Quartz-Alkali feldspar-Plagioclase (QAP) diagram for volcanic rocks in which all samples plot in the rhyolite field. **b** General view of the matrix and main mineral constituents. **c** Matrix with the presence of oxide. **d** Oxide and its alteration rim. All microphotographs were taken at X10 in crossed nicols. Q quartz, F feldspar (sanidine), Bi biotite



A perfect example of different GRS values caused by configurations other than  $2\pi$  occurs in the CAC (Fig. 12). Readings in stone blocks with  $a > 2\pi$  geometry (e.g., near ground) show higher GRS values than readings in a  $2\pi$  geometry, and measurements with a  $< 2\pi$  geometry have lower values. The same applies for stone blocks with surfaces different from  $2\pi$  (i.e., concave and convex) (Fig. 12). The corrections proposed effectively eliminated these variations (Fig. 10), so these are a solid base for the interpretation.

When comparing the outcrop data with those of the CAC (Figs. 9, 10), it is observed that the rocks with the most radiation are those in the outcrop because they have higher cpm of radioelements. This suggests that element loss processes have acted more on the CAC stone blocks.

#### Gamma-ray spectrometry on the Caja del Agua del Santuario

The CAS also has four faces, of which the east facade was chosen to calculate the regression line, and it was used to correct all the other faces (Figs. 13, 14). With the proposed methodology, readings with highly dispersed values were

discarded and the linear regression calculated, along with the standard deviation (Table 5).

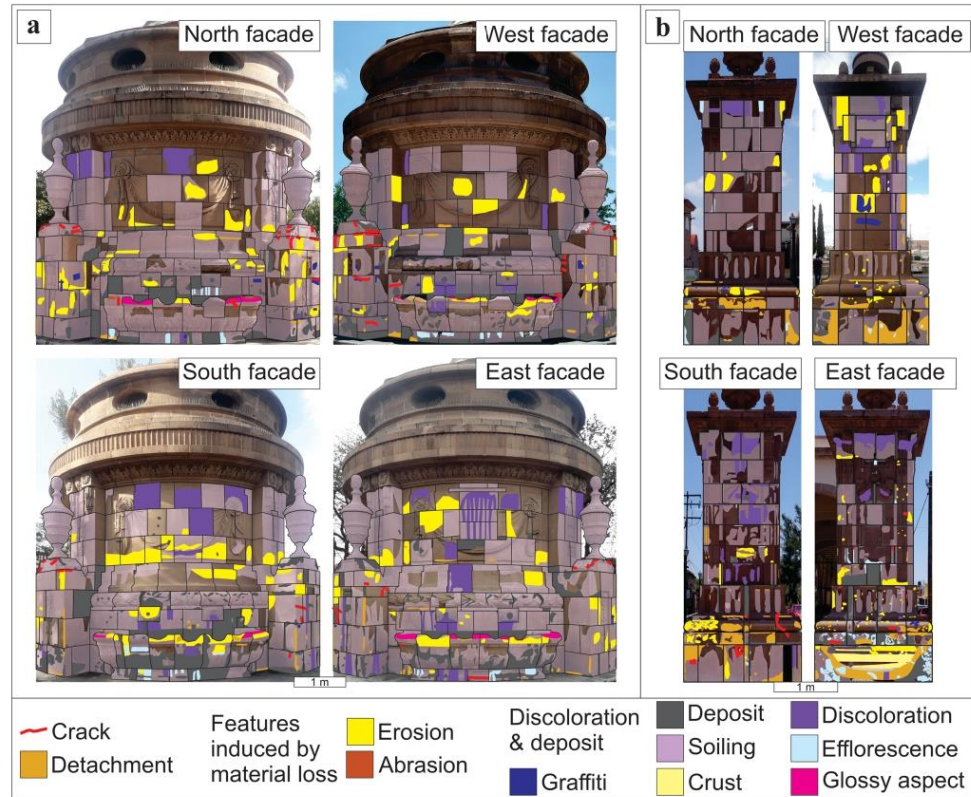
As the CAC GRS data, the CAS GRS data are lower than the outcrop's, suggesting that weathering processes have affected more its stones blocks.

When comparing the regression lines between both constructions (Figs. 10, 13), it can be noted that the slopes are nearly the same for total radiation, uranium, and thorium, while that of the potassium is different, perhaps because it is more affected by weathering processes. On the other hand, the points of intersection of the straight lines with the Y-axis ( $\beta_0$ ) are different in the CAC and CAS, latter with lower values, which would indicate that the CAS has been more affected by weathering processes.

#### Petrophysical properties

Table 6 shows the results of density, porosity and forced water absorption for the samples. Bulk density calculations yielded similar values for all samples, but the A9 specimens have the lowest values. Matrix density also showed similar values for all samples, except for A10 specimens which have the lowest values.





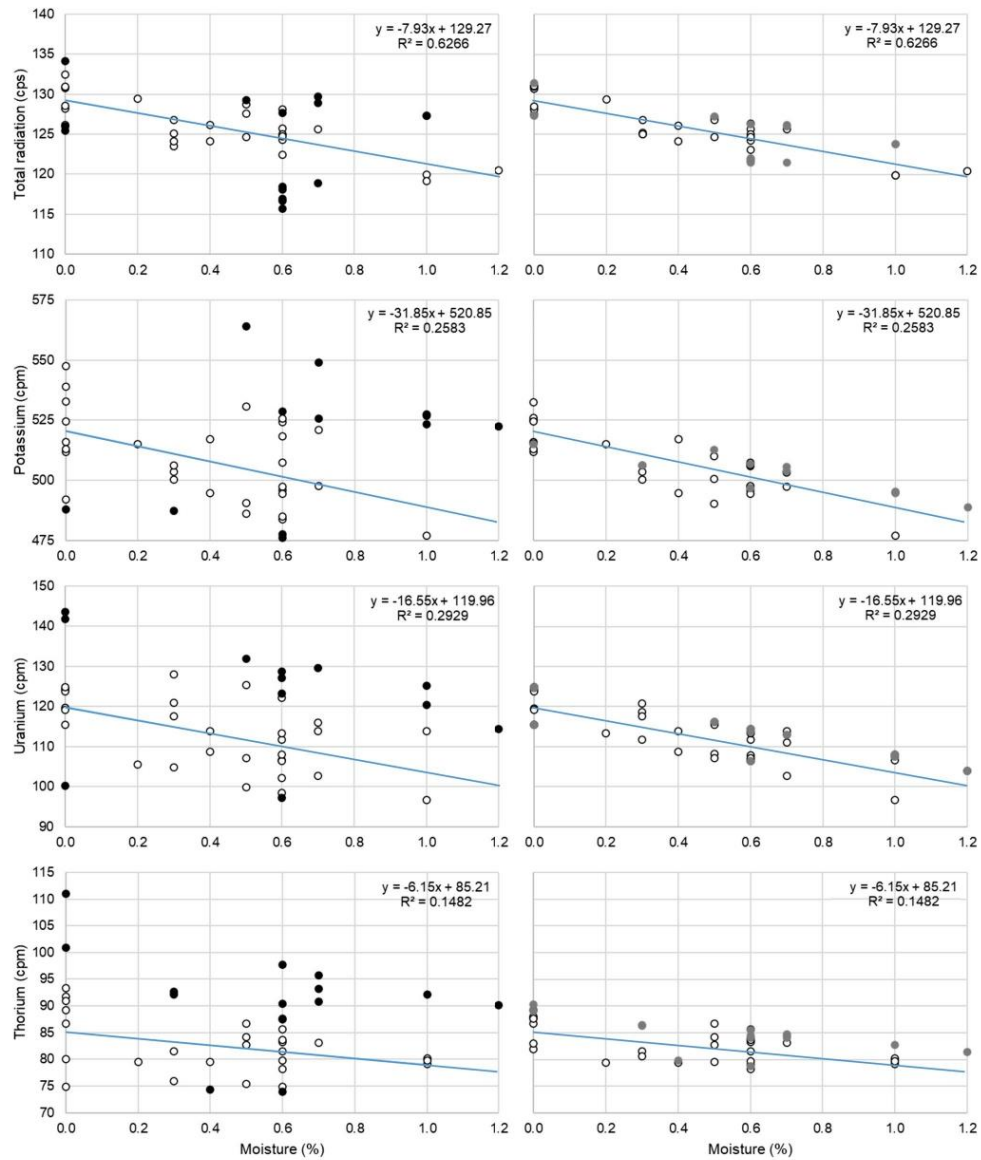
**Fig. 8** Deterioration mappings separated by facades of the Caja del Agua Conservera (a) and the Caja del Agua del Santuario (b)

**Table 3** Calculated equation for linear regression, standard deviation and coefficient of determination for outcrop data

Parameter	Regression line equation	Standard deviation	Coefficient of determination
Total radiation	$y = -7.93x + 129.27$	2.07 cps	$R^2 = 0.6266$
Potassium	$y = -31.85x + 520.85$	15.67 cpm	$R^2 = 0.2583$
Uranium	$y = -16.55x + 119.96$	7.58 cpm	$R^2 = 0.2929$
Thorium	$y = -6.15x + 85.21$	4.83 cpm	$R^2 = 0.1482$

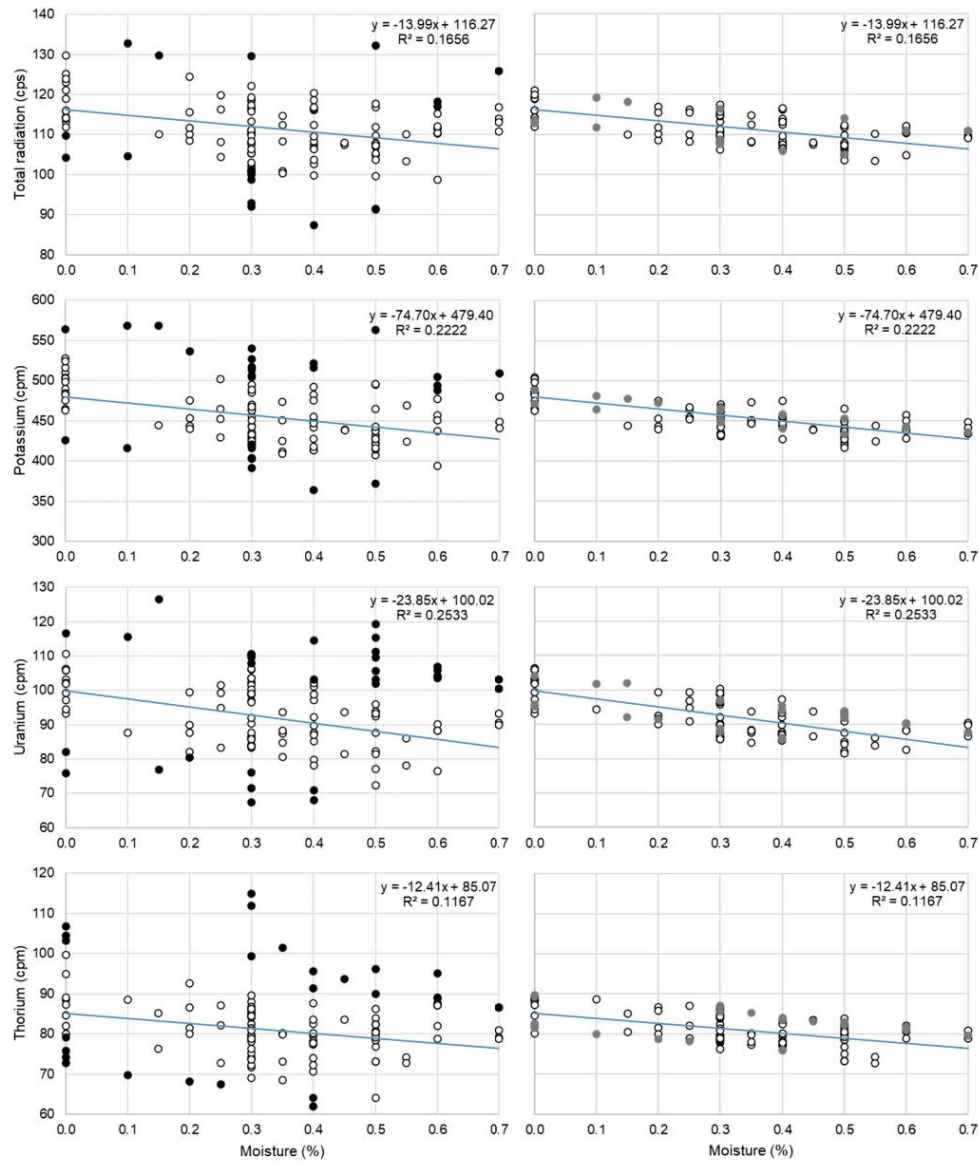
Porosity ranges from approximately 30–37% (mean value of 34.23%). OR samples showed slightly less porosity than LP and DP samples. However, LP samples have more variation: A10 specimens with the lowest values,

and A9 specimens with the highest values.  $W_{vac}$  is directly influenced by porosity, which can be seen in the values calculated, where samples with higher and lower porosity have also higher and lower  $W_{vac}$  values, respectively.

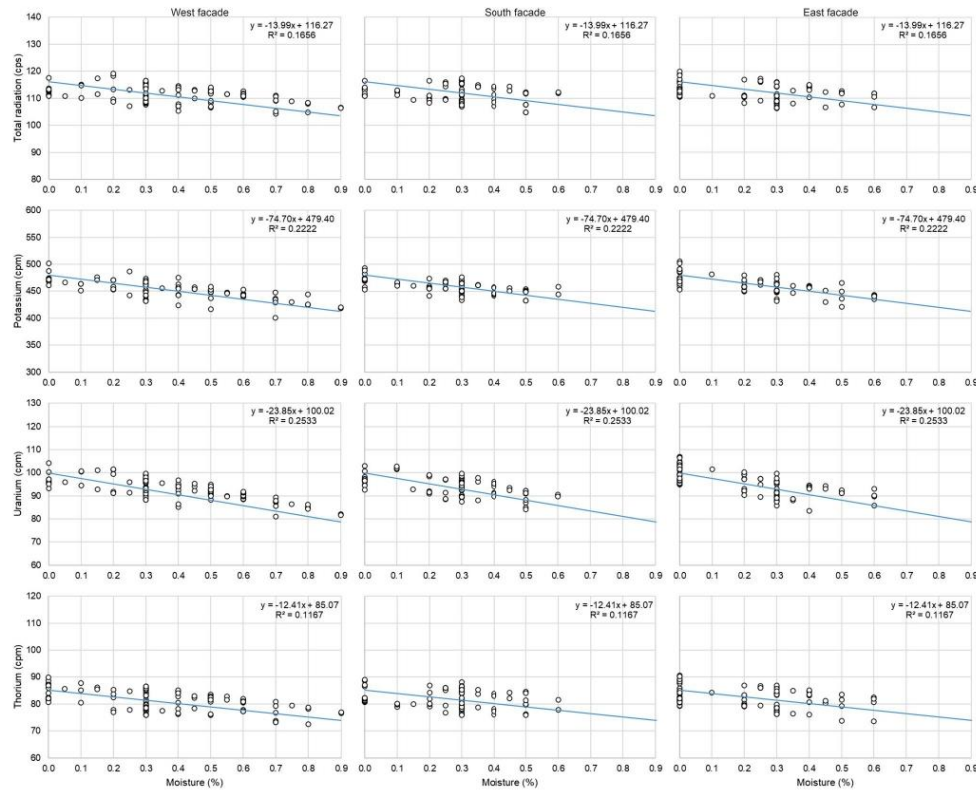


**Fig. 9** The plots on the left represent the original outcrop data. In black are the discarded data and in white are the data used for the linear regression model. The plots on the right show the corrected

values, with gray dots indicating the previously discarded values now corrected according to the line modeled



**Fig. 10** The plots on the left represent the original data from the north facade of the CAC. In black are the discarded data and in white are the data used for the linear regression model. The plots on the right show the corrected values, with gray dots indicating the previously discarded values now corrected according to the line modeled



**Fig. 11** Plots for the GRS data from the west, south, and east facades of the CAC. The line is the same from the regression model obtained from the north façade

**Table 4** Calculated equation for linear regression, standard deviation and coefficient of determination for CAC data

Parameter	Regression line equation	Standard deviation	Coefficient of determination
Total radiation	$y = -13.99x + 116.27$	5.85 cps	$R^2 = 0.1656$
Potassium	$y = -74.70x + 479.40$	26.64 cpm	$R^2 = 0.2222$
Uranium	$y = -23.85x + 100.02$	7.45 cpm	$R^2 = 0.2533$
Thorium	$y = -12.41x + 85.07$	5.80 cpm	$R^2 = 0.1167$

## Discussion

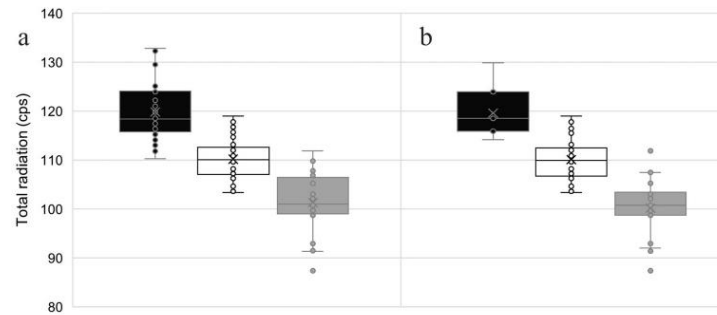
### Gamma-ray spectrometry, lithology, and weathering

GRS can be interpreted according to rock type, mineral constituents, structures, and grain size (in the case of

sandstones) (Rider 2002). It should be considered that rocks and minerals are modified by weathering processes that produce loss of elements, changes in coloration, and in certain physical properties such as porosity and density (Ceryan et al. 2008).

The rocks that commonly have less radiation are limestones, quartzite sandstones, and mafic rocks. Those with higher radiation are lithic and feldspathic sandstones, shales,





**Fig. 12** Plots for the total radiation raw data from the north facade of the CAC. **a** Measurements influenced by the spectrometer position. The black box indicates influence from corners ( $> 2\pi$ ), the white box indicates no influence ( $2\pi$ ), and the gray box indicates measurements

in borders, i.e., incomplete stone blocks ( $< 2\pi$ ). **b** Measurements influenced by the geometry of the stone blocks surface. The black box indicates concave surfaces ( $> 2\pi$ ), the white box indicates flat surfaces ( $2\pi$ ), and the gray box indicates convex surfaces ( $< 2\pi$ )

and felsic igneous rocks (Rider 2002). The radiation of metamorphic rocks will depend on their protolith.

The constructions analyzed were made with rhyolitic ignimbrites, so GRS quality data were obtained. According to petrography and XRD results, it was interpreted that the radiation of the rocks originates from the minerals sanidine, biotite, zircon, and montmorillonite, all with potassium contents, except for zircon which concentrates uranium and thorium.

The rocks show color changes due to weathering processes. In thin section, it could be seen that the OR rocks have a reddish matrix, and the GRS showed that they have the highest radiation. This leads to the conclusion that there is a relationship between the alteration of biotite, dissolution of oxides, their redistribution in the matrix, and radiation, feature also observed by other authors (Scheepers and Rozendaal 1993; Gunn et al. 1997).

Chemical weathering changes the mineral composition of the rock and in its physical properties. In the case of potassium, because it is a mobile element (Ohta and Arai 2007), it is removed from minerals such as alkali feldspars and micas, forming secondary clay minerals. This would cause less radiation in the rock than it would have originally. Uranium is considered mobile in certain environments, while thorium is generally insoluble (Rider 2002). Thus, comparing GRS responses between outcrop and construction rocks can indicate whether there is a loss of potassium, uranium, or thorium.

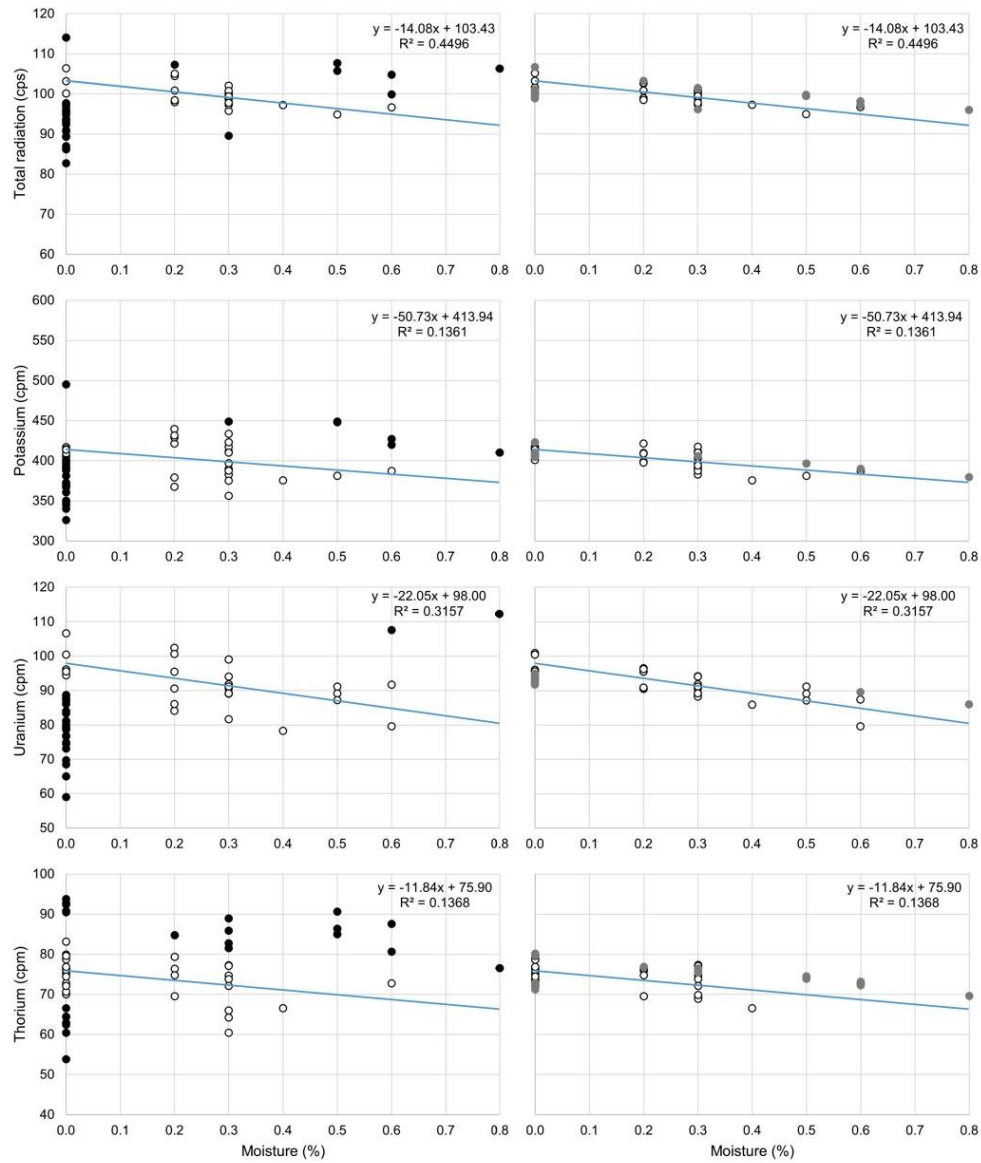
According to the GRS results (Fig. 15), it was interpreted that the outcrop had experienced less weathering than the Cajas del Agua because its total radiation is higher. When comparing the total radiation between the constructions, in the CAC it is higher, which would mean that the CAS

is more weathered, although both were built at the same time, around 1835. In the same construction, no significant differences were found in the radiation of the facade, which suggests that the weathering processes do not depend on the orientation of the facades.

It can be assured that the loss of potassium in the Cajas del Agua (Fig. 15), relative to the outcrops, is due to the alteration of sanidine and biotite. Furthermore, part of the released potassium is likely concentrated in the matrix due to the redistribution of the oxides, making the OR rocks slightly more radioactive. Also, the differences between uranium and thorium may be due to variable concentrations of these elements in zircon or monazite respectively, and like potassium, thorium can be related to oxides, which may be the cause for the little variation between its concentration in the outcrop and the CAC (Fig. 15). To interpret the distribution of the radioelements it is suggested to use the Th/K and Th/U ratios. The Th/K ratio seemed to be a good indicator to recognize the loss of potassium compared to thorium between OR and LP rocks.

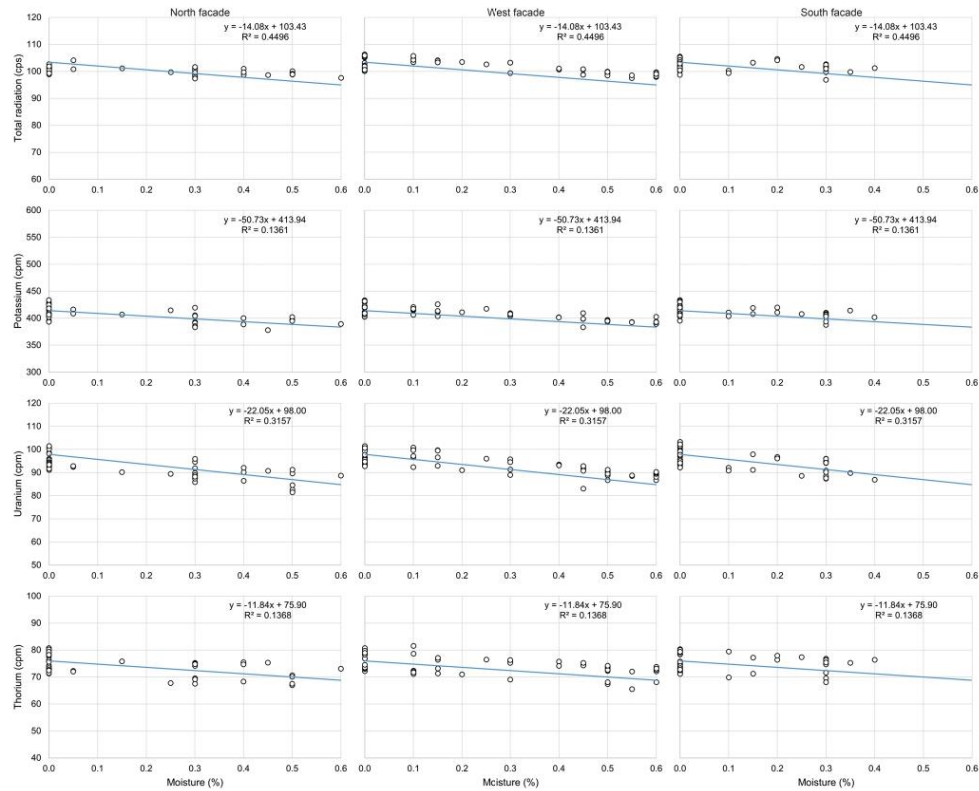
It is important to consider that the concentration obtained from geochemical analysis (ICP-MS) in rocks of the Cantera Formation is 5.98 ppm (with the highest values near 10 ppm) for uranium and 36.37 ppm (with the highest values around 50 ppm). This implies that the concentrations for these radioelements obtained from GRS are accurate and the corrections applied are reliable (Fig. 15).

Physical weathering processes generate fragmentation of the rock, increasing its porosity (Ceryan et al. 2008; Siegesmund and Dürrast 2014), which in turn allows greater entry of moisture and salts. In this situation, bulk density would increase, causing greater gamma-ray



**Fig. 13** The plots on the left represent the original data from the east facade of the CAS. In black are the discarded data and in white are the data used for the linear regression model. The plots on the right

show the corrected values, with gray dots indicating the previously discarded values now corrected according to the line modeled



**Fig. 14** Plots for the GRS data from the north, west, and south facades of the CAS. The line is the same from the regression model obtained from the east façade

**Table 5** Calculated equation for linear regression, standard deviation and coefficient of determination for CAS data

Parameter	Regression line equation	Standard deviation	Coefficient of determination
Total radiation	$y = -14.08x + 103.43$	2.34 cps	$R^2 = 0.4496$
Potassium	$y = -50.73x + 413.94$	20.87 cpm	$R^2 = 0.1361$
Uranium	$y = -22.05x + 98.00$	5.58 cpm	$R^2 = 0.3157$
Thorium	$y = -11.84x + 75.90$	4.99 cpm	$R^2 = 0.1368$

attenuation, which could be identified with the GRS as rocks with lower radiation. Calculated porosity values of about 34% implies that the ignimbrites of the Cantera Formation could experience more radiation attenuation if water were available.

#### Gamma-ray spectrometry, moisture content, and petrophysical properties

Moisture causes variations in radiation due to gamma-ray attenuation (Ferronsky 2015). However, it should be noted

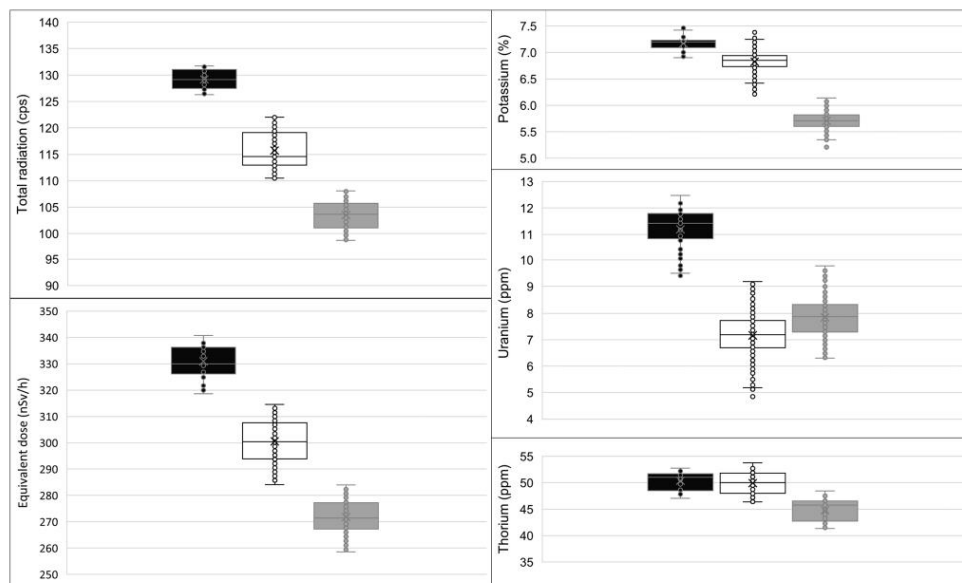
**Table 6** Calculated values of density, porosity, and forced water absorption in vacuum for the samples

Sample	Color	$\rho_{\text{bulk}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{\text{matrix}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	Porosity (%)	Wvac (%)
A3-A	LP	1.68	2.56	34.60	20.65
A3-B	LP	1.70	2.56	33.77	19.91
A3-C	LP	1.68	2.56	34.22	20.32
A4-A	DP	1.70	2.57	33.89	19.97
A4-B	DP	1.69	2.57	34.15	20.18
A7	LP	1.68	2.57	34.49	20.51
A8-A	OR	1.68	2.54	33.83	20.09
A8-B	OR	1.68	2.54	33.62	19.97
A8-C	OR	1.69	2.54	33.48	19.84
A8-D	OR	1.69	2.54	33.45	19.82
A9-A	LP	1.61	2.56	36.99	22.91
A9-B	LP	1.62	2.56	36.70	22.67
A9-C	LP	1.62	2.56	36.80	22.78
A9-D	LP	1.62	2.55	36.40	22.42
A9-E	LP	1.63	2.56	36.13	22.12
A10-A	LP	1.72	2.47	30.45	17.73
A10-B	LP	1.72	2.50	30.94	17.94
A10-C	LP	1.71	2.52	32.14	18.80

that many moisture meters only measure the surface value (Phillipson et al. 2007). If there are significant differences between the surface moisture and the inner part of the rock, then the moisture value measured will be inaccurate. Despite this, GRS showed that it effectively detects these conditions, so the technique is useful for identifying moisture-related variations in radiation regardless of whether there are cement coverings, impermeable crusts, or loss of surface moisture by evaporation at the rock surface.

The above was verified as some stone blocks in contact with the ground yielded abnormally low values despite having  $> 2\pi$  configurations (instead of showing high values). This was interpreted as a high concentration of moisture and/or salts, as they are common in the lower parts of buildings. In other cases, it was found that the radiation readings did not correspond with the moisture readings, because the latter were all 0.0%, which was interpreted as caused by evaporation of surface moisture and can be seen in the original data before correction mainly in the CAS (Fig. 13). It should be noted that the proposed corrections worked well for the data.

Porosity and water availability are two significant parameters for weathering processes (Siegesmund and Dürst 2014). Calculated porosity for all rock samples showed high



**Fig. 15** Plots for the GRS data calculated for 0.0% moisture. There is a clear difference in total radiation and equivalent dose between the outcrop (black boxes), CAC (white boxes), and CAS (gray boxes), being the highest in the outcrop, followed by CAC, and CAS with the

lowest values. Potassium also shows this tendency. The mean value of uranium is higher in the outcrop, while in CAC and CAS it is similar, ranging between 7–8 ppm. The mean value of thorium is higher in the outcrop and CAC, with the lowest value in CAS



values. This implies that these rocks are susceptible to having their radiation attenuated depending on the water content in the pore system and thus causing lower values of GRS to be detected. Pötzl et al. (2022) measured 82% of capillary pores in rocks from the Cantera Formation implying a high capillary water uptake. This would explain the existence of more detachment and salt deterioration in the CAS due to the presence of a water deposit under it.

Assessment of other petrophysical properties is beyond the scope of this work, but these may reveal correlations with GRS, mainly those water-related: drying characteristics, moisture adsorption, water vapor diffusion, and hygric/hyric properties.

### Gamma-ray spectrometry and deterioration patterns

In both constructions, the same deterioration patterns were found, but in the CAS the detachment is more developed and there is more presence of salts. The predominance of this damage is most likely due to the presence of a water deposit underneath it that was active until recent years, causing water uptake by capillarity.

In the outcrops, it was shown that the OR rocks presented the highest radiation and if their surface is detached, the radiation is lower. This phenomenon of lower radiation after detachment is probably the cause of the CAS having lower radiation than the CAC due to the predominance of this pattern. Also, the presence of salts can be related to more detachment, attenuation, and thus lower radiation counts.

In most of the stone blocks of both constructions, soiling was observed, as well as lower radiation compared to the outcrops. This seems to indicate that there is a relationship between the processes of deterioration by air contamination and the response of the GRS in construction.

Deposits (mainly cement) covering stone blocks can mask the moisture readings because of its extremely low porosity, which does not allow the accumulation of water in the surface, but moisture may accumulate beneath it. In several stone blocks with detachment of the cement cover, subflorescences were found, so care must be taken in making interpretations when the original surface of the stone blocks cannot be observed. However, with GRS this feature can be interpreted mainly with total radiation data.

Erosion refers to the loss of crystals and matrix (García-de Miguel 2011). If the detached minerals are radioactive, then a decrease in the radiation of the rock can be expected. Erosion exists in both Cajas del Agua; however, no evidence of decreased radiation was found in the blocks affected by this process, which could mean that it is not an important deterioration pattern for radioelement loss.

Other deterioration patterns that could cause variations in radiation values when applying the methodology proposed in

this article should be considered: alveolization, crusts, discoloration, encrustation, patina, and biological colonization.

### Conclusions

GRS can be a useful technique in the characterization of building stones that are part of cultural heritage because it is not a destructive technique.

It can be said that the proposed methodology, specifically the creation of the regression line and the corrections of the data for configurations other than  $2\pi$  and moisture-related, allowed solid interpretation of the radiation data.

The methodology is expected to be applicable in any construction and rock type, as long as it contains radioactive minerals. Further work should be focused on the assessment of building stones with lower radiation.

The results of GRS and other analyses on the constructions of this study showed that GRS can help identify blocks with moisture and salts due to radiation attenuation, and chemical weathering. All these parameters can be related to physical property data such as porosity and density.

The GRS was effective in detecting stone blocks with moisture even when measurements of this parameter were masked by cement or unidentifiable surfaces. For this, total radiation was shown to be more sensitive than radioelement concentrations. The same is true for identifying blocks with salt, even if the salt is not visible (subflorescence).

As for chemical weathering, it was shown that the rocks with less exposure to weathering, i.e., those in the outcrop (a quarry), have higher radiation and radioelement concentrations than those in the constructions analyzed, thus being able to interpret the latter as more weathered. This is possible to determine with all radiation measurements, although the potassium concentration is better because this element is more mobile, in addition to the Th/K ratio because thorium is considered immobile.

It was found that deterioration patterns can also influence GRS, specifically detachment and the presence of salts. This is because they predominate in the Caja del Agua del Santuario and it has the lowest radiation compared to both the outcrop and the Caja del Agua Conservera.

**Acknowledgements** The first author acknowledges the financial support for PhD studies by the Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT). The authors acknowledge the Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT), and the Instituto de Geología, Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP) for the use of their laboratories and equipment; and the Instituto Nacional de Antropología e Historia, San Luis Potosí for the access to the Cajas del Agua. All authors acknowledge Lidia Miroslava Lerma-Pérez for field assistance, Erasmo Mata-Martínez for laboratory

support, and illustrator Alan J. Méndez-Gaona for Figure 3 editing. Finally, the authors acknowledge the comments and observations to this manuscript made by the editor and the anonymous reviewers.

**Author contribution** 1. Author: study conception, design and methodology, material preparation, data acquisition, processing, interpretation, original draft writing, and editing. 2. Author: methodology, data acquisition, supervision, reviewing, and editing. 3. Author: methodology, data acquisition, supervision, reviewing, and editing. All authors read and approved the final manuscript.

**Data availability** No datasets were generated or analysed during the current study.

## Declarations

**Competing interest** The authors declare no competing interests.

## References

- Airo ML, Loukola-Ruskeeniemi K (2004) Characterization of sulfide deposits by airborne magnetic and gamma-ray responses in eastern Finland. *Ore Geol Rev* 24:67–84. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2003.08.008>
- Caballero-Miranda CI, Torres-Hernández JR, Alva-Valdivia LM (2009) Anisotropy of magnetic susceptibility analysis of the Cantera Ignimbrite, San Luis Potosí, México: flow source recognition. *Earth Planets Space* 61:173–182. <https://doi.org/10.1186/BF03352897>
- Ceryan Ş, Tudes S, Ceryan N (2008) Influence of weathering on the engineering properties of Harsit granitic rocks (NE Turkey). *Bull Eng Geol Environ* 67:97–104. <https://doi.org/10.1007/s10064-007-0115-0>
- Croft S, Hutchinson IG (1999) The measurement of U, Th and K concentrations in building materials. *Appl Radiat Isot* 51:483–492. [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(99\)00064-0](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(99)00064-0)
- Evans R, Mory AJ, Tait AM (2007) An outcrop gamma ray study of the Tumbago Sandstone, Western Australia. *J Pet Sci Eng* 57:37–59. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2006.02.004>
- Fais S, Cuccuru F, Ligas P, Casula G, Bianchi MG (2017) Integrated ultrasonic, laser scanning and petrographical characterisation of carbonate building materials on an architectural structure of a historic building. *Bull Eng Geol Environ* 76:71–84. <https://doi.org/10.1007/s10064-015-0815-9>
- Ferronsky VI (2015) Nuclear geophysics: applications in hydrology, hydrogeology, engineering geology, agriculture and environmental science. Springer, Cham
- García-de Miguel JM (2011) ICOMOS-ISCS: Illustrated glossary on stone deterioration patterns = Glosario ilustrado de formas de deterioro de la piedra. ICOMOS Open Archive. <https://openarchive.icomos.org/id/eprint/2089/>. Accessed 22 February 2024
- Gunn PJ, Minty BRS, Milligan PR (1997) The airborne gamma-ray spectrometric response over arid Australian Terranes. In: Gubins AG (ed) *Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration*. Prospectors and Developers Association of Canada, Canada, pp 733–740
- Hatur ME, Korkanç M, Başar ME (2019) Evaluating the deterioration effects of building stones using NDT: the Küçükköy Church, Cappadocia Region, central Turkey. *Bull Eng Geol Environ* 78:3465–3478. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1339-x>
- Hernández-Santomé AC, Sanjurjo-Sánchez J, Alves C (2025) Use of hand-held gamma-ray spectrometry to assess decay of granite ashlar in historical buildings of NW Spain (Barbanza, Galicia). *J Cult Herit* 71:20–29. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.10.019>
- IAEA (2003) Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. IAEA, Vienna
- Knoll GF (2010) Radiation detection and measurement, 4th edn. John Wiley & Sons Inc, New Jersey
- Kumaran MK, Bomberg M (1985) A gamma-spectrometer for determination of density distribution and moisture distribution in building materials. In: *Proceedings of the International Symposium on Moisture and Humidity*. Instrument Society of America, North Carolina, pp 485–490
- Labarthe-Hernández G, Jiménez-López LS (1992) Características físicas y estructura de lavas e ignimbritas riolíticas en la Sierra de San Miguelito, SLP. Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México
- Labarthe-Hernández G, Tristán-González M (1978) Cartografía geológica Hoja San Luis Potosí. Instituto de Geología y Metalurgia de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México
- Menningen J, Siegesmund S, Tweston D, Träupmann M (2018) Ultrasonic tomography: non-destructive evaluation of the weathering state on a marble obelisk, considering the effects of structural properties. *Environ Earth Sci*. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7776-9>
- Moharram BM, Suliman MN, Zahran NF, Shennawy SE, El Sayed AR (2012) External exposure doses due to gamma emitting natural radionuclides in some Egyptian building materials. *Appl Radiat Isot* 70:241–248. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.07.013>
- Myers KJ, Bristow CS (1989) Detailed sedimentology and gamma-ray log characteristics of a Namurian deltaic succession II: gamma-ray logging. In: Whateley MKG, Pickering KT (eds) *Deltas: sites and traps for fossil fuels*. Geological Society, London, pp 81–88
- Myers KJ, Wignall PB (1987) Understanding Jurassic organic-rich mudrocks - new concepts using gamma-ray spectrometry and palaeoecology: examples from the Kimmeridge Clay of Dorset and the Jet Rock of Yorkshire. In: Leggett JK, Zuffa GG (eds) *Marine clastic sedimentology: concepts and case studies*. Graham & Trotman, London, pp 172–189
- Ohta T, Arai H (2007) Statistical empirical index of chemical weathering in igneous rocks: a new tool for evaluating the degree of weathering. *Chem Geol* 240:280–297. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.02.017>
- Padilla-Ceniceros R, Pacheco-Martínez J, López-Doncel RA, Orenday-Tapia EE (2017) Rock deterioration in the masonry walls of the Cathedral Basilica of Aguascalientes, Mexico. *Rev Mex Cienc Geol* 34: 138–149. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2017.2.466>
- Parkinson DN (1996) Gamma-ray spectrometry as a tool for stratigraphical interpretation: examples from the western European Lower Jurassic. In: Hesselbo SP, Parkinson DN (eds) *Sequence stratigraphy in British geology*. Geological Society, London, pp 231–255
- Phillipson MC, Baker PH, Davies M, Ye Z, McNaughtan A, Galbraith GH, McLean RC (2007) Moisture measurement in building materials: an overview of current methods and new approaches. *Build Serv Eng Res Technol* 28:303–316. <https://doi.org/10.1177/0143624407084184>
- Pötzl C, Siegesmund S, López-Doncel RA, Dohrmann R (2022) Key parameters of volcanic tuffs used as building stone: a statistical approach. *Environ Earth Sci*. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-10114-w>
- Rider MH (2002) The geological interpretation of well logs, 2nd edn. Rider French Consulting Ltd, Scotland
- Righi S, Bruzzi L (2006) Natural radioactivity and radon exhalation in building materials used in Italian dwellings. *J Environ Radioact* 88:158–170. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2006.01.009>



- Ruffell AH, McKinley JM, Lloyd CD, Graham C (2006) Th/K and Th/U ratios from spectral gamma-ray surveys improve the mapped definition of subsurface structures. *J Environ Eng Geophys* 11:53–61. <https://doi.org/10.2113/jeeeg11.1.53>
- Sanjurjo-Sánchez J, Arce-Chamorro C, Alves C, Sánchez-Pardo JC, Blanco-Rotea R, Costa-García JM (2018a) Using in situ gamma ray spectrometry (GRS) exploration of buried archaeological structures: a case study from NW Spain. *J Cult Herit* 34:247–254. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.05.004>
- Sanjurjo-Sánchez J, Arce-Chamorro C, Couto M, Alves C (2018b) Non-destructive assessment of weathering in granite blocks of historical buildings: in situ gamma-ray spectrometry (GRS). In: Mosquera MJ, Almoraima-Gil ML (eds) *Conserving cultural heritage*. CRC Press, London, pp 107–109
- Scheepers R, Rozendaal A (1993) Redistribution and fractionation of U, Th and rare-earth elements during weathering of subalkaline granites in SW Cape Province, South Africa. *J Afr Earth Sci* 17:41–50. [https://doi.org/10.1016/0899-5362\(93\)90021-H](https://doi.org/10.1016/0899-5362(93)90021-H)
- Sêco SLR, Pereira AJSC, Duarte LV, Domingos FP (2021) Sources of uncertainty in field gamma-ray spectrometry: Implications for exploration in the Lower-Middle Jurassic sedimentary succession of the Lusitanian Basin (Portugal). *J Geochem Explor*. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2021.106799>
- SGM (2008) Carta geológico-minera estado de San Luis Potosí. SGM. <https://www.sgm.gob.mx/CartasPdf/GeologicasL.jsp>. Accessed 02 July 2024
- Siedel H, Siegesmund S (2014) Characterization of stone deterioration on buildings. In: Siegesmund S, Snethlage R (eds) *Stone in architecture: properties, durability*, 5th edn. Springer, Berlin, pp 349–414
- Siegesmund S, Dürrast H (2014) Physical and mechanical properties of rocks. In: Siegesmund S, Snethlage R (eds) *Stone in architecture: properties, durability*, 5th edn. Springer, Berlin, pp 97–224
- Sonkawade RG, Kant K, Muralithar S, Kumar R, Ramola RC (2008) Natural radioactivity in common building construction and radiation shielding materials. *Atmos Environ* 42:2254–2259. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.11.037>
- Taylor MJ, Smettem K, Pracilio G, Verboom W (2002) Relationships between soil properties and high-resolution radiometrics, central eastern Wheatbelt, Western Australia. *Explor Geophys* 33:95–102. <https://doi.org/10.1071/EG02095>
- Telford WM, Geldart LP, Sheriff RE (2004) *Applied geophysics*, 2nd edn. Cambridge University Press, Cambridge
- Theodoridou M, Török Á (2019) In situ investigation of stone heritage sites for conservation purposes: a case study of the Székesfehérvár Ruin Garden in Hungary. *Prog Earth Planet Sci*. <https://doi.org/10.1186/s40645-019-0268-z>
- Török Á (2002) Oolitic limestone in a polluted atmospheric environment in Budapest: weathering phenomena and alterations in physical properties. In: Siegesmund S, Weiss T, Vollbrecht A (eds) *Natural stone, weathering phenomena, conservation strategies and case studies*. Geological Society, London, pp 363–379
- UNESCO (2010a) Report of the decisions adopted by the World Heritage Committee at its 34th session (Brasília, 2010). UNESCO World Heritage Convention. <https://whc.unesco.org/en/documents/104960>. Accessed 12 June 2024
- UNESCO (2010b) Camino Real de Tierra Adentro. UNESCO World Heritage Convention. <https://whc.unesco.org/en/list/1351/maps/>. Accessed 12 June 2024
- Wilford J (2012) A weathering intensity index for the Australian continent using airborne gamma-ray spectrometry and digital terrain analysis. *Geoderma* 183–184:124–142. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.12.022>
- Williams-Thorpe O, Webb PC, Thorpe RS (2000) Non-destructive portable gamma ray spectrometry used in provenancing Roman granitoid columns from Leptis Magna, north Africa. *Archaeometry* 42:77–99. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2000.tb00867.x>
- Wormald R, Britch AL (1969) Methods of measuring moisture content applicable to building materials. *Build Sci* 3:135–145. [https://doi.org/10.1016/0007-3628\(69\)90026-7](https://doi.org/10.1016/0007-3628(69)90026-7)

**Publisher's Note** Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Springer Nature or its licensor (e.g. a society or other partner) holds exclusive rights to this article under a publishing agreement with the author(s) or other rightsholder(s); author self-archiving of the accepted manuscript version of this article is solely governed by the terms of such publishing agreement and applicable law.

# Anexo 2. Insights into gamma-ray spectrometry of building stones in the North Temple of the Great Ball Court, Archaeological Zone of Chichen Itza, Mexico



Article

## Insights into Gamma-Ray Spectrometry of Building Stones in the North Temple of the Great Ball Court, Archaeological Zone of Chichen Itza, Mexico

Alejandro Méndez-Gaona <sup>1,\*</sup>, Vsevolod Yutsis <sup>1,\*</sup>, Rubén Alfonso López-Doncel <sup>2</sup>,  
Claudia Araceli García-Solís <sup>3</sup> and Alfredo Aguillón-Robles <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Potosino Institute of Scientific and Technological Research, Camino a la Presa San José 2055, San Luis Potosí 78216, Mexico; alejandro.mendez@ipicyt.edu.mx

<sup>2</sup> Institute of Geology, Autonomous University of San Luis Potosí, Av. Dr. Manuel Nava 5, San Luis Potosí 78290, Mexico; rlopez@uaslp.mx (R.A.L.-D.); aguillonr@uaslp.mx (A.A.-R.)

<sup>3</sup> Center INAH-Yucatán, Calle 10 310-A, Mérida 97119, Mexico; claudia\_garciasl@inah.gob.mx

\* Correspondence: vsevolod.yutsis@ipicyt.edu.mx

### Abstract

Non-destructive tests are especially useful for the assessment of building stones and their deterioration in built cultural heritage. Gamma-ray spectrometry is a non-destructive test that has not been applied extensively in these types of constructions. Therefore, the purpose of this study is to show the results of gamma-ray spectrometry for limestone characterization and deterioration assessment. This study was conducted in the North Temple of the Archaeological Zone of Chichen Itza and several outcrops in the area. Gamma-ray spectrometry data were corrected for attenuation caused by the moisture content in rocks to calculate the real radioelements concentrations using linear regression, with interpretation based on their mobility resulting from chemical weathering processes. The results obtained with gamma-ray spectrometry were corroborated by laboratory analyses, demonstrating that stones from the North Temple are more weathered than rocks from the outcrops, and that some limestones have clasts derived from terrigenous sources, causing them to show slightly higher radiation, which can be distinguished easily with gamma-ray spectrometry, even when lithology cannot be recognized in plain sight. Gamma-ray spectrometry proved to be useful for limestone characterization, and data obtained can be correlated with parameters from other analyses.

**Keywords:** gamma-ray spectrometry; non-destructive tests; building stones; built cultural heritage; deterioration; limestones; Chichen Itza; Mexico



Academic Editor: Antonio Formisano

Received: 26 June 2025

Revised: 8 August 2025

Accepted: 17 August 2025

Published: 20 August 2025

**Citation:** Méndez-Gaona, A.; Yutsis, V.; López-Doncel, R.A.; García-Solís, C.A.; Aguillón-Robles, A. Insights into Gamma-Ray Spectrometry of Building Stones in the North Temple of the Great Ball Court, Archaeological Zone of Chichen Itza, Mexico. *Buildings* **2025**, *15*, 2949. <https://doi.org/10.3390/buildings15162949>

**Copyright:** © 2025 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

### 1. Introduction

The deterioration of building stones is a common phenomenon that can be observed in historical monuments built with stone materials [1–6]. Recognition of deterioration patterns and building stone characterization helps make decisions about the best treatment options for conservation. Generally, sampling is necessary for the assessment of building stone durability, measuring density, porosity, hydric and strength properties in a laboratory [1,5].

However, non-destructive tests (NDTs) have the advantage of allowing for the assessment of stone deterioration and certain properties without sampling, an extremely valuable aspect when studying heritage buildings, where taking samples of original materials is restricted because it would contribute to their loss. NDTs are employed in built heritage

to measure, for example, elastic properties [1,3], moisture [2,5,6], wave velocity [4] and magnetic susceptibility [7,8]. Elastic properties and wave velocity depend mainly on the density of materials, so these parameters can be used to evaluate the degree of deterioration based on changes in mechanical properties [1,3]. Moisture content can be determined by means of electrical resistivity, identifying areas where water accumulates within a building structure [2,5,6]. Magnetic susceptibility depends on the presence of ferromagnetic minerals [7], but also heavy metals, so specific deterioration processes, such as soiling, can be monitored [8]. On the other hand, gamma-ray spectrometry (GRS) is a type of NDT which is based on the detection of natural gamma rays generated by potassium, uranium and thorium radioactive decay. Since each of these radioelements decays with a specific energy or energy spectrum, each can be identified and their concentration determined.

Considering building stone characterization, radiation detection and GRS have been utilized to calculate dose rate from potassium, uranium and thorium distribution [9], although sampling of materials used for construction is more common to determine dose rate in the laboratory [10–13], and is not allowed in most heritage buildings.

Chemical weathering processes are known to alter the distribution of radioelements noticeable with GRS [14–22]. Nevertheless, the application of this technique to characterize building stones and their deterioration has only been used recently. Other studies have limitations: in [23] no methodological bases and data processing are described; in [24] the results are related to total radiation and little to radioelements concentrations; in [25] the amount of GRS data is low; and in [26], although some limitations of the previous studies were resolved, the proposed methodology was only tested in rhyolitic ignimbrites, which are rocks with high levels of radiation.

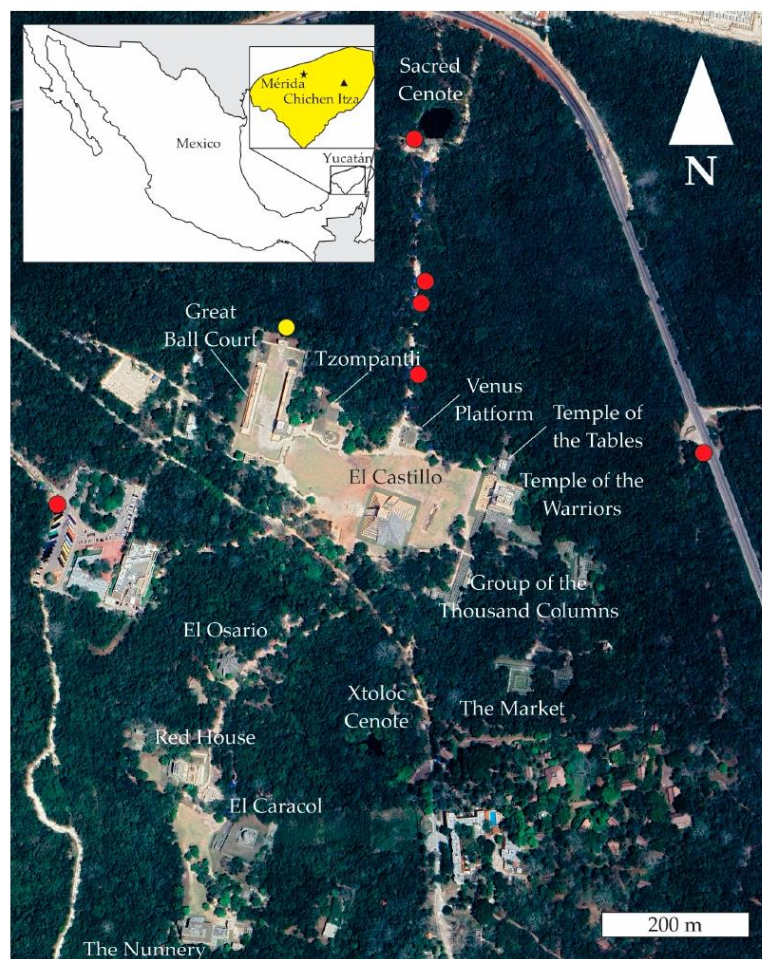
This study aims to demonstrate the effectiveness of GRS in built heritage, with a focus on its application for assessing stone deterioration and characterization, specifically limestones. This type of rock, due to its deposit environment and origin, contains very low radioelements concentrations. On average 0.3% of potassium, 2 ppm of uranium and 1.3 ppm of thorium is found in limestones [27]. Another objective considered was the possibility of correlating the information obtained by GRS with deterioration originating from carbonate dissolution processes, which would be reflected in radioelement loss.

The Archaeological Zone of Chichen Itza, Yucatán, Mexico (Figure 1) was selected as the study area. It should be noted that the Archaeological Zone of Chichen Itza was declared a cultural World Heritage Site by the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) in 1988, highlighting its monumental architecture and carved stone relief [28]. Achieving a better understanding of the deterioration affecting its monuments depends on using adequate analytical techniques to find specific restoration and conservation measures. For this purpose, several studies have been carried out using geophysical methods, such as electrical resistivity tomography to detect structures beneath and in the interior of El Castillo [29,30], electrical resistivity in the polychromatic pillars of the Substructure of the Warriors to identify salts solubility related to moisture [31], and also NDT such as portable X-ray fluorescence equipment to identify the composition of the Throne of the Red Jaguar sculpture in the Substructure of El Castillo [32].

This investigation was focused on the west internal wall of the North Temple of the Great Ball Court of the Archaeological Zone of Chichen Itza, Tinum, Mexico (original name: Templo Norte del Gran Juego de Pelota) (Figure 2), which is an architectonic group composed of several buildings around the ball court, being the biggest in Mesoamerica [33]. Like all other buildings and sculptures in the Archaeological Zone of Chichen Itza, the North Temple was built with limestone and calcareous breccia that outcrop into the construction site of the prehispanic city; some quarries can even be distinguished containing pieces not finished or discarded near the buildings. In these outcrops, GRS data acquisition was



also carried out to compare their radioactivity and radioelements concentrations with the North Temple stone blocks and, therefore, determine if a loss of radioelements exists due to weathering. Information about the historical context of the study area, as well as the geological framework of the region, is presented in the following section.



**Figure 1.** Localization of the Archaeological Zone of Chichen Itza and its main monuments. The yellow circle represents the North Temple of the Great Ball Court. The red circles indicate the studied outcrops.



Figure 2. (a) Main facade of the North Temple; (b) west internal wall where the GRS was performed.

## 2. Historical and Geologic Context of the Study Area

Chichen Itza was an important prehispanic city of the Maya culture established in the north of the Yucatan Peninsula, specifically in the zone denominated as the northern Maya Lowlands, with great influence in the region.

Although there were settlements around Chichen Itza, it was in the Late Classic period (600–900 AD) that the construction of buildings in the style called Maya or Puuc began in the southern part of the site (in what has been called Old Chichen), in addition to the arrival of foreigners [32,34].

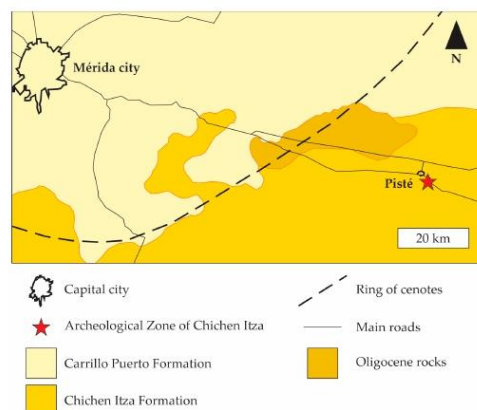
In the Early Postclassic period (900–1200 AD), the construction of monuments increased, which was carried out in the style called ‘toltec’ in the northern part of the site on a great artificial leveling [32,34]. It was in this period when the North Temple was built, being 10 m long and 6 m wide; its façade has only one bay and three accesses separated by two columns (Figure 2a) [35]. It was possibly built to celebrate the enthronement of a new ruler as internal walls and columns decorated with reliefs carving depicting ancestors, festivities and rites can be seen throughout the whole vault [34–36].

At the beginning of the Late Postclassic period (1200–1521 AD), the construction of large buildings ceased and a decrease in the city occurred, although Chichen Itza continued to be a pilgrimage site [34].

As previously indicated, the Archaeological Zone of Chichen Itza was built with limestone and calcareous breccia that can be found in surrounding outcrops, and are part of the carbonate platform of the Yucatan Peninsula, so their use is widespread in Mexican Maya sites, with some sedimentologic and composition variants, as reported in the Uxmal, Tulum, Rio Bec, Dzibanche and Calakmul sites [37–42]. The Yucatan Platform (YP) is characterized by thick calcareous successions deposited during the Cretaceous and Cenozoic periods [43]. It has a karst relief with solution sinkholes locally called cenotes that are more common in the northwest part of the YP, with their distribution forming a ring related to the Chicxulub impact crater near the Cretaceous–Tertiary boundary [44–46].

Specifically, in the Archaeological Zone of Chichen Itza, limestone and calcareous breccia belong to the Chichen Itza Formation (Eocene) (Figure 3) composed of fossiliferous white yellowish limestones, and even reddish by the presence of colloidal iron oxides [43,47,48]. Stratigraphically it is above the carbonated sequence of the Icaiché Formation (Paleocene)

and transitionally passes to bioclastic limestones of the Oligocene or discordantly to the Carrillo Puerto Formation (Miocene–Pliocene) (Figure 3) characterized by fossiliferous limestones deposited in nearshore environments [43,47,48].



**Figure 3.** Regional geologic map of the YP around the study area from Eocene (Chichen Itza Formation) to Miocene–Pliocene (Carrillo Puerto Formation). Modified from [49].

### 3. Materials and Methods

As indicated at the beginning of this study, the objective of this investigation is to demonstrate the usefulness of the in situ GRS for the assessment of the building stones of the North Temple. However, we also decided to acquire GRS data for the outcrops to compare the results and determine possible changes in the radioelements contents due to weathering and deterioration processes. In addition, to support the interpretation of the GRS, it was decided to include other analyses of samples taken from outcrops only. The materials and methodology used are described below.

#### 3.1. Gamma-Ray Spectrometry Data Acquisition

The GRS was performed using a Radiation Solutions Inc. (Mississauga, ON, Canada) RS-125 gamma-ray spectrometer, which records total radiation, dose rate, and concentrations of potassium, uranium and thorium. Using automatic calculations, the equipment corrects for background radiation and dead time, in addition to simultaneously calculating three radioelements' concentrations. The spectrometer was calibrated by the manufacturer, and geochemical data were compared with its response to confirm its calibration. This data can be found in [26]. The calculated error for the concentrations found, with a maximum time of 300 s, is 0.06 for potassium, 0.39 for uranium, and 0.54 for thorium [50].

GRS data acquisition was performed similarly in the North Temple and in outcrops, with the spectrometer placed on the rock surface. Immediately after completing the GRS recording, moisture content was measured using a portable moisture meter (Duro trademark) with a percentage scale and an accuracy of 0.05%. This was performed to correct the data for radiation attenuation according to the procedure proposed by [26]. Another important correction was made for the influence of surfaces near the spectrometer. Under normal conditions, the spectrometer only records the counts from the surface it is in contact with, which is referred to as  $2\pi$  geometry [51,52]. However, if the equipment is placed in proximity to other surfaces, it will record more radiation ( $>2\pi$ ), while the opposite occurs if



the measurement is made at the edges, recording less radiation ( $<2\pi$ ). In the west internal wall of the North Temple, only  $2\pi$  and  $>2\pi$  geometries occur.

Following data correction, the count rates of potassium, uranium and thorium were recalculated for 0.0% moisture content to avoid the effect of attenuation, then the real radioelements concentrations were calculated to interpret data according to geochemical mobility.

In the North Temple, a total of 119 points were measured in the stone blocks large enough to adequately place the spectrometer, and in the outcrops the number of measurements depended on their extension, resulting in a total of 24 points measured in limestone and calcareous breccia. The location of the outcrops can be seen in Figure 1.

### 3.2. Lithologic Description, Deterioration Patterns, and Weathering Conditions

To determine the correlation between the GRS data and the lithology of the North Temple stone blocks, it was necessary to determine the different rock types, which in this case were limestone and calcareous breccia. Lithological mapping was then performed with this data to visualize the results.

Similarly, to compare GRS with stone deterioration, the type and extent of deterioration patterns were recorded according to the illustrated glossary of [53], which aims to standardize the terms used for deterioration.

The lithological characteristics and weathering conditions of the outcrops were also detailed, although care was taken to ensure that they were not highly weathered.

### 3.3. Sampling, Petrography, and X-Ray Diffraction

As mentioned at the beginning of this section, no samples were taken from the North Temple, but only from the outcrops. A total of 12 representative samples were collected according to the lithological differences observed in the outcrops: 2 from calcareous breccia, 8 from limestone, 1 from red soil, and 1 from sascab, a local term for a poorly consolidated calcareous material [39,54,55].

From the 10 samples of calcareous breccia and limestone, 29 thin sections were prepared for petrographic analysis with an optical microscope to characterize their mineralogical composition and components using the classification of [56] modified by [57]. This analysis described the porosity type.

A fraction of all samples was pulverized for analysis by X-ray diffraction (XRD), which was performed with a Bruker D8 Advance X-ray diffractometer at the National Laboratory for Research in Nanosciences and Nanotechnology of the Potosino Institute of Scientific and Technological Research, San Luis Potosí, Mexico to determine the mineralogy of the samples.

### 3.4. Major Elements and Chemical Parameters Calculation

For all samples, major element concentrations were obtained at the National Laboratory of Geochemistry and Mineralogy, Institute of Geology, National Autonomous University of Mexico, Mexico City, Mexico using a wavelength-dispersive X-ray fluorescence spectrometer (model RIGAKU ZSX Primus II) according to the analytical technique proposed by [58]. The mean atomic weight (MAW) [59] was calculated from the major element concentrations to correlate with physical properties and the mafic–felsic–weathering index (MFW) from [60]. Although this index is primarily applied to igneous and clastic sedimentary rocks, it was useful for the assessment of limestone and calcareous breccia.

### 3.5. Petrophysical Tests

Petrophysical tests were conducted at the Institute of Geology of the Autonomous University of San Luis Potosí. Specifically, the matrix and bulk density, porosity, capillary

water absorption (w value), and dry weight loss (DWL) due to salt crystallization were calculated for three limestone samples.

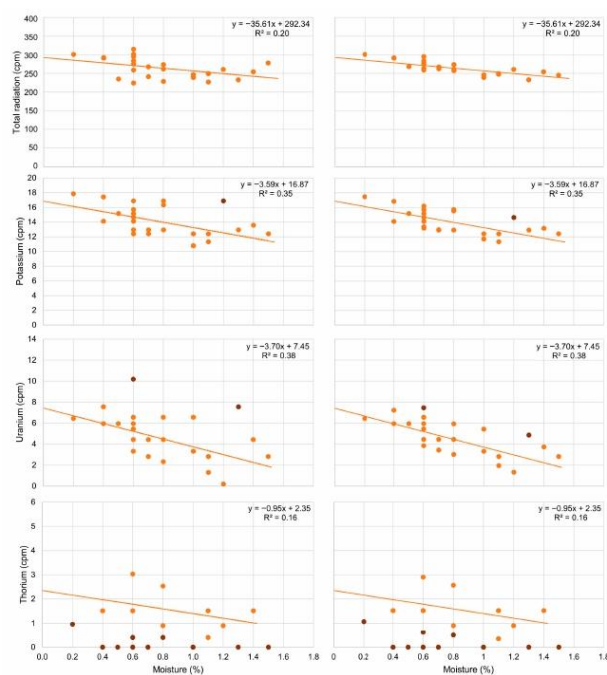
For these tests, the samples were cut into 6.5 cm cubes. Density was determined by weight under dry, saturated, and submerged conditions. Porosity was also calculated using these parameters. Capillary water absorption was measured by placing one face of the cubes in contact with the water surface, allowing capillary absorption to occur. This was performed on the X and Y axes of the samples due to the anisotropic characteristics of the rocks. Details of these tests can be found in [61].

Salt crystallization was measured using the DWL test, in which the cubes were immersed in a 10%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  solution for 4 h and then dried in an oven. This process requires a 24 h cycle, and a total of 24 cycles were performed.

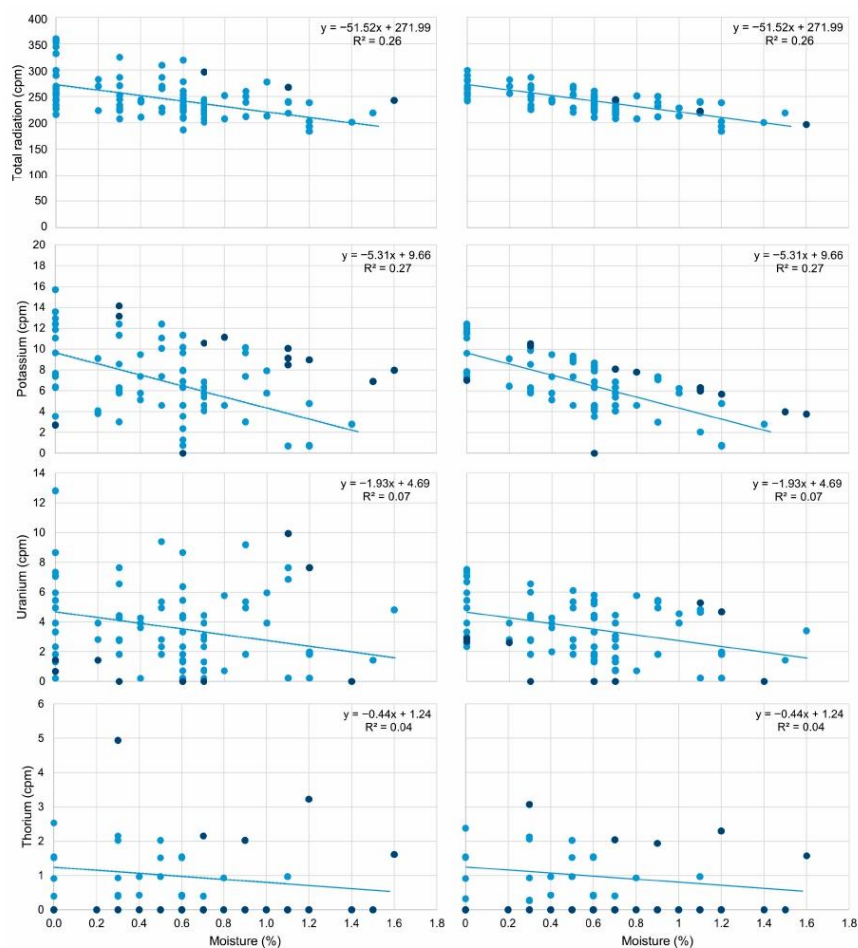
## 4. Results

### 4.1. Gamma-Ray Spectrometry

Since the GRS was conducted in limestone and calcareous breccia, the data were treated separately and are presented in counts per minute (cpm). Following the methodology proposed by [26], anomalous data in the North Temple, i.e., those taken in geometries  $>2\pi$ , were discarded to create a regression line. These discarded data were subsequently corrected with the equation of the modeled line and the calculated standard deviation. Figures 4 and 5 show the correction and equations of the calculated lines for calcareous breccia and limestone, respectively.



**Figure 4.** Plots on the left represent the original calcareous breccia data recorded in the North Temple. The discarded data are in shown dark red and in orange the data used for modeling the regression line are shown in orange. Plots on the right show the corrected data, also including the previously discarded values which were corrected according to the regression line.



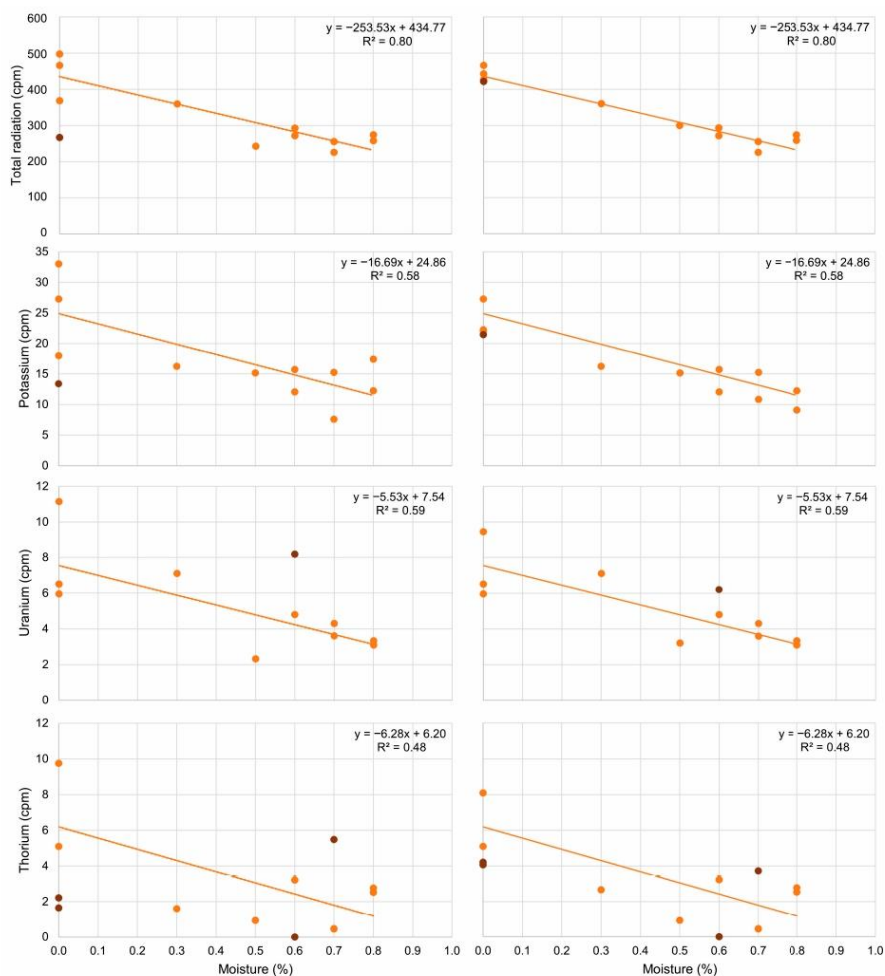
**Figure 5.** Plots on the left represent the original limestone data recorded in the North Temple. In dark blue are the discarded data and in light blue the data used for modeling the regression line. Plots on the right show the corrected data, also including the previously discarded values which were corrected according to the regression line.

To interpret the corrected data and calculate the real radioelement concentrations, the counts were recalculated for a moisture content of 0.0% to avoid the effect of a lower count rate caused by attenuation with higher moisture content. This yielded the concentrations of each radioelement.

According to Figures 4 and 5, the calcareous breccias are slightly more radioactive than the limestones, which is especially evident in the potassium plots, while the uranium is more evenly distributed. Based on these GRS results, the differences between the calcareous breccia and limestone were interpreted as being due to a higher clay and/or iron oxides content in the former, which gives it a reddish color.

For the GRS in the outcrops, the same procedure was followed as for the west internal wall of the North Temple (Figures 6 and 7). Anomalous readings made in geometries other

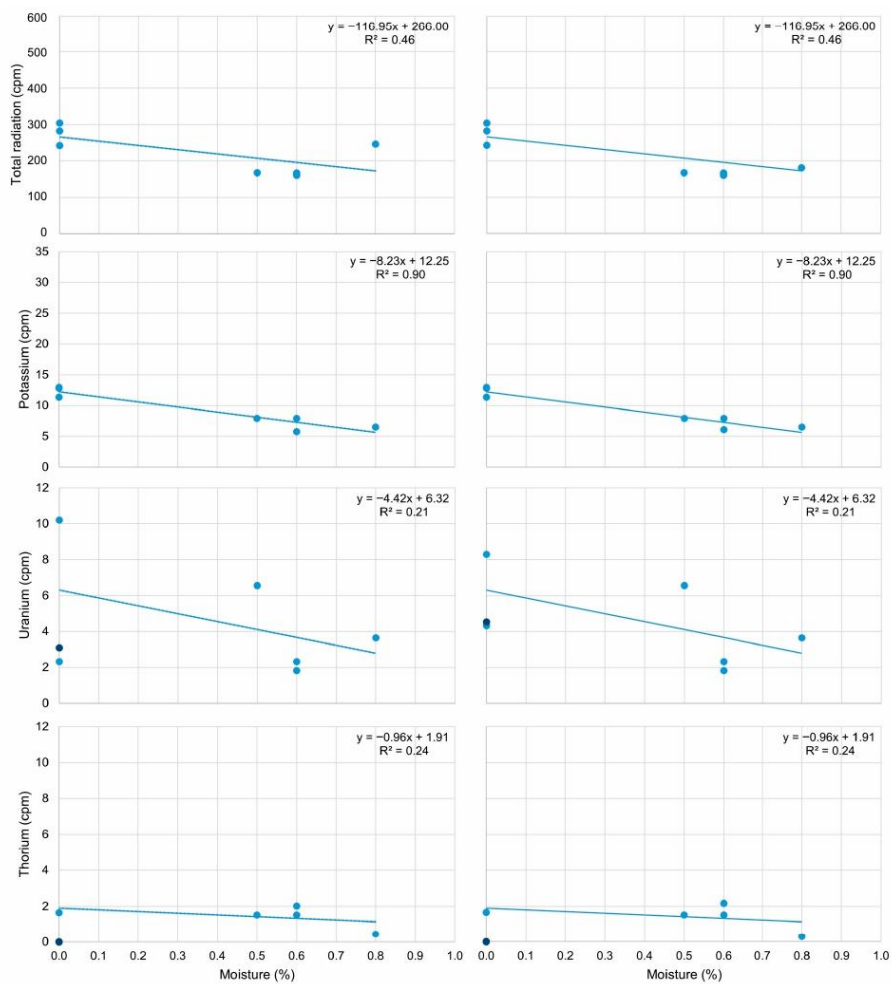
than  $2\sigma$  were discarded to construct the regression line. Once this was completed, the standard deviation and the equation of the line were calculated to correct all the data. The radioelement concentrations were recalculated for a content of 0.0% for clearer interpretation.



**Figure 6.** Plots on the left represent the original calcareous breccia data recorded in the outcrops. The discarded data are shown in dark red and the data used for modeling the regression line are shown in orange. Plots on the right show the corrected data, including also the previously discarded values which were corrected according to the regression line.

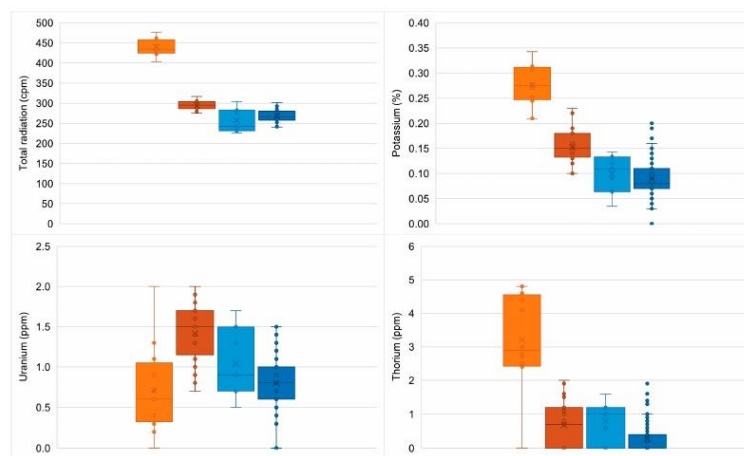
A comparison of the recalculated concentrations for a moisture content of 0.0% between the GRS data from the North Temple and the outcrops shows that the latter exhibit slightly higher radiation than the North Temple stone blocks (Figure 8). This is very clear in the calcareous breccias for total radiation and the concentrations of potassium and thorium, but not for uranium. However, different trends are observed in the limestones: potassium and thorium are higher on average in the outcrops but have a broader distribution in

the North Temple, while uranium is higher in the outcrops. These results suggest that radioelement mobility processes occur more frequently in the North Temple stone blocks than in the outcrops which are less weathered.



**Figure 7.** Plots on the left represent the original limestone data recorded in the outcrops. The discarded data are shown in dark blue and in the data used for modeling the regression line are shown in light blue. Plots on the right show the corrected data, including also the previously discarded values which were corrected according to the regression line.





**Figure 8.** Box plot for GRS data calculated for a moisture content of 0.0%. Outcrop and North Temple calcareous breccia data are shown in orange and dark orange, respectively. Outcrop and North Temple limestone data are shown in light blue and dark blue, respectively. Circles and × indicate all GRS data and mean values, respectively.

#### 4.2. Lithologic Description, Petrography, and Mineralogy

As mentioned above, limestone and calcareous breccias stone blocks were encountered in the North Temple (Figure 9). In some cases, it was difficult to identify the lithology of the rocks because some limestones displayed orange hues like calcareous breccias. However, with the GRS both rock types could be easily differentiated because, as described in the previous section, breccias exhibit slightly higher radiation than limestones. This fact adds another advantage to in situ GRS, as it allows for the recognition of lithology, even when the surface of the stone blocks is not easily distinguished on plain sight.

The same rock types were found in the outcrops: limestone and calcareous breccia. The limestones are generally white, beige, and gray, without stratification, although they may be laminated due to the presence of algae. Some gastropod shells could be distinguished on plain sight. The calcareous matrix of the breccias is white, gray, and orange, with angular orange and reddish clasts measuring on average 3 cm, up to 5 cm. Some other clasts are calcareous of white and gray color.

As detailed in the Materials and Methods section, samples were collected only from outcrops for the petrographic description of thin sections. The results are shown in Table 1.

Petrographic analysis determined that the orange and reddish coloration of the calcareous breccias is due to rounded particles interpreted as colloids of terrigenous origin produced by paleosoils (Figure 10a). According to the classification of [56] modified by [57], the breccias were classified as floatstone with micritic matrix. Some angular crystals of altered quartz with fractures filled with the same reddish material were also identified (Figure 10b). In some portions, the sparite cement is partially dolomitized. The main type of porosity identified in the breccias was fenestral (bird's eyes).

Limestones present more diverse characteristics. Some were classified as bindstone because they are formed by algal laminae that vary in thickness and color. The thickest algal laminae are dark brown (Figure 10c) and can reach several centimeters. Their porosity is generally much lower compared to the micritic matrix. Bindstone thinner laminae are light brown and tend to be millimeters (Figure 10d). Higher laminoid fenestral porosity is observed in this type of bindstone compared to the one with thicker laminae.



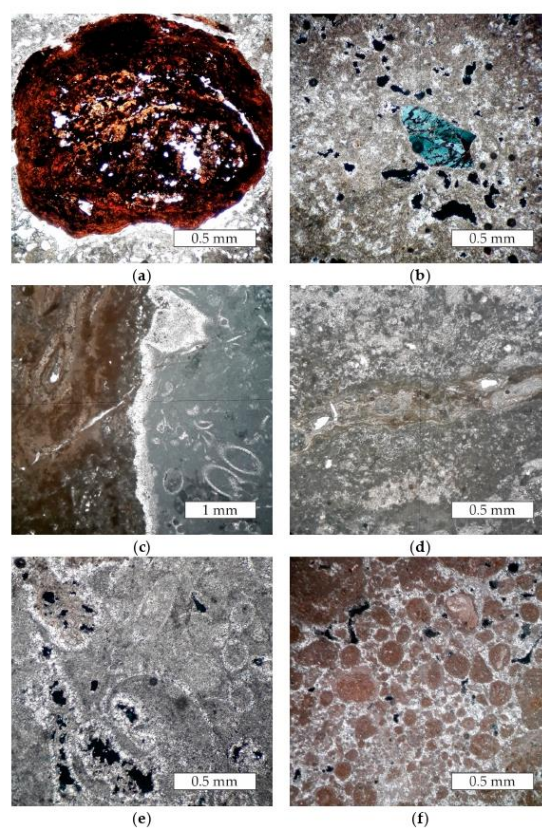
**Figure 9.** Lithological mapping for the west internal wall of the North Temple. Calcareous breccias are represented in orange, and limestones in light blue.

**Table 1.** Results from the petrographic analysis and rock classification.

Sample	Matrix	Allochems	Main Classification	Secondary Classification
B1	Micrite Dolosparite	Clay intraclasts, quartz Peloids	Floatstone	Mudstone– wackestone Grainstone
B2	Micrite Dolosparite	Calcareous and clay intraclasts Peloids	Floatstone	Mudstone Grainstone
C1	Micrite	Coralline and green algae, benthic foraminifera, gastropods	Bindstone	Mudstone– packstone
C2	Micrite	Coralline and green algae, benthic foraminifera, gastropods	Wackestone– packstone	Mudstone
C3	Micrite	Coralline algae	Bindstone	Mudstone
CL1	Micrite Sparite	Coralline algae Peloids, benthic foraminifera	Bindstone	Mudstone Grainstone

Table 1. Cont.

Sample	Matrix	Allochems	Main Classification	Secondary Classification
CL2	Micrite Micrite-sparite	Coralline and green algae, benthic foraminifera, gastropods, peloids	Bindstone	Mudstone– packstone Grainstone
L1	Sparite Micrite	Calcareous intraclasts, peloids Coralline algae, benthic foraminifera	Grainstone Mudstone	Wackestone
L2	Sparite Micrite	Oncoids, peloids Coralline algae	Grainstone	Mudstone
CIAC	Sparite Micrite	Benthic foraminifera, peloids	Grainstone	Mudstone



**Figure 10.** Photomicrographs of the most important petrographic analysis results. All were taken at  $10\times$  magnification and in uncrossed nicols, unless otherwise indicated. (a) Rounded paleosol particle; (b) quartz crystal with fractures and reddish alteration (crossed nicols); (c) boundary between thick algal lamination and micrite matrix ( $5\times$  magnification); (d) example of a thinner algal lamination; (e) microfossils in a micritic matrix. Note the fenestral and intraparticle porosity (crossed nicols); (f) peloids with terrigenous input in sparitic cement. Note the fenestral and interparticle porosity (crossed nicols).

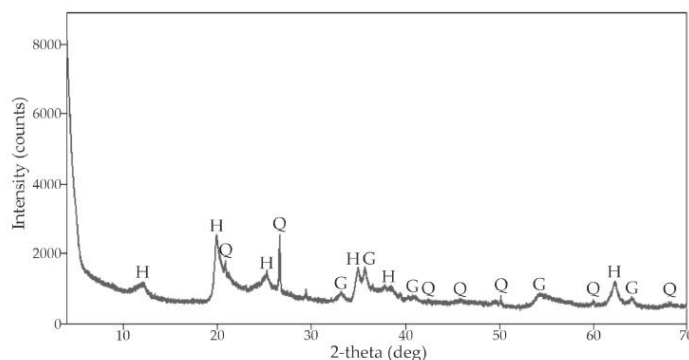


The matrix of most samples is micritic, and can be mainly classified as bindstones, although in some cases they can also be classified as mudstone, wackestone, or packstone (Figure 10e). Microfossils of gastropods, coralline algae, benthic foraminifera, and brachiopod fragments were identified.

Other limestones are characterized by orange bands and were classified as grainstone (Figure 10f). Their coloration is due to their composition of peloids with orange particles that, like breccias, have been interpreted as paleosol particles.

Petrographic analysis and rock classification explain the results obtained using GRS: breccias with terrigenous input (floatstone) have higher concentrations of potassium and thorium, which are associated with this clastic supply, while limestones without terrigenous input (bindstone, mudstone, wackestone, packstone) have lower concentrations of these elements.

According to the XRD of all samples, calcite is the main component. The only exception is the red soil sample, which indicates the presence of halloysite, goethite, and quartz (Figure 11). These results indicate that the reddish particles distinguishable in the floatstone and grainstone can be interpreted as paleosoils.



**Figure 11.** Diffractogram for the red soil sample. Halloysite (H), quartz (Q), goethite (G).

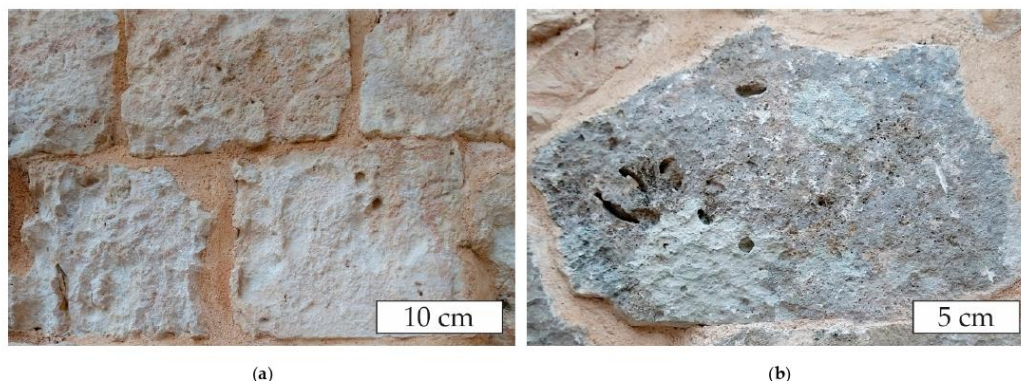
#### 4.3. Stone Deterioration Patterns

As mentioned in the Materials and Methods section, deterioration patterns are named according to [53]. A discussion of these terms can be consulted in [62].

Mainly features induced by material loss were found on the west internal wall of the North Temple (Figure 12): small depressions, cavities, and loss of original surface due to dissolution of the stone exposed to water run-off are the most widespread damages (alveolization, microkarst, and erosion); perforations are common, but their total extent is minimal compared to other damages; and millimetric cavities produced by biological colonization (pitting) are present [63]. Cracks are also found, but only in the stone blocks themselves, i.e., they do not penetrate the wall. Barely perceptible but extensive deterioration is seen in the area not covered by the vault, with a diffuse light gray coloration possibly caused by biological colonization (Figure 2b).

The features induced by material loss are related to carbonate dissolution, so it is expected that the physical properties of the North Temple stone blocks have changed, specifically their porosity and, therefore, their density. Comparing lithological mapping with deterioration patterns, it is observed that mostly breccias show these damages. This is likely due to their higher porosity, which has caused them to further deteriorate. It is also

observed that most of the damage is in the upper and middle sections of the wall, which could indicate that water absorption occurs due to rainfall run off from the vault.



**Figure 12.** (a) Features induced by material loss; (b) millimetric cavities denominated pitting.

The patterns associated with biological colonization demonstrate that stone block surfaces are favorable for the growth of organisms. Since this depends on water availability, rain and high moisture content are the primary agents of deterioration in the North Temple. A detailed description and origin of stone deterioration patterns of the North Temple can be found in [42], and the study of the presence biodeterioration caused by microorganisms in several monuments of the Archaeological Zone of Chichen Itza in [64].

An important detail is that most stone blocks have a surface originating from dissolution and precipitation, which hampered lithological identification. However, as explained above, the GRS allowed for the identification between breccias and limestones, as the former exhibit slightly higher radiation. This is valuable when the stone surface is not recognizable, so the GRS can be used as a tool for predicting stone blocks prone to deterioration.

It is worth mentioning that the Archaeological Zone of Chichen Itza is located far from the main large cities, such as the capital, Mérida, so contamination and deterioration patterns commonly found in limestones in urban areas are not present in the study area, at least in the west internal wall of the North Temple.

#### 4.4. Major Elements and Weathering

The results of the major element concentration analysis by X-ray fluorescence (XRF) as well as the MFW index and the MAW are shown in Table 2.

Major element geochemical analysis revealed that calcareous breccias (samples B1 and B2) contain relatively higher amounts of  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , and  $\text{K}_2\text{O}$  than limestones (samples C1, C2, C3, CL1, and CL2). Furthermore, limestones with peloids with terrigenous influence (L1 and L2) exhibit intermediate values between the first two. These oxides are therefore interpreted as associated with halloysite and goethite of the paleosols observed in the petrography. Magnesium oxide is relatively higher in breccias, supporting the observations in thin sections of portions that were partially dolomitized.

Major element concentrations were used to calculate the MFW index proposed by [60]. As indicated above, this index was constructed for igneous and clastic sedimentary rocks. However, since breccias have a continental component, this index was chosen. One advantage is that it uses eight of the ten major oxides in its calculation. The results indicate that breccias (B1 and B2), grainstones (L1 and L2), and soil (CISUE) exhibit extremely high weathering values. These values are due to the fact that their terrigenous components are

the end products of the weathering process, i.e., soils. This is consistent with the results of other analyses and with the interpretation of the GRS.

**Table 2.** Major elements (wt. %) performance with XRF method, MFW index, and MAW.

Sample	B1	B2	C1	C2	C3	CL1	CL2	L1	L2	CIAC	CISAS	CISUE
SiO <sub>2</sub>	5.28	3.93	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.18	1.08	1.15	0.62	43.02
TiO <sub>2</sub>	0.202	0.172	0.005	<0.004	<0.004	0.005	<0.004	0.010	0.028	0.036	0.005	1.029
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.01	2.82	0.13	0.02	0.19	0.10	0.02	0.41	0.99	1.16	0.50	29.07
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.307	1.111	<0.006	<0.006	<0.006	<0.006	<0.006	<0.006	0.218	0.132	<0.006	7.943
MgO	0.070	0.172	0.004	0.004	0.003	0.003	0.004	0.005	0.005	0.011	0.004	0.086
MnO	0.577	0.295	0.363	0.185	0.588	0.322	0.228	0.402	0.955	0.221	0.244	0.817
CaO	48.776	51.456	57.127	58.131	56.393	56.998	57.852	56.752	54.805	55.679	56.842	1.512
Na <sub>2</sub> O	<0.003	<0.003	0.005	0.004	<0.003	0.018	0.014	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	0.024
K <sub>2</sub> O	0.284	0.253	0.049	0.038	0.060	0.035	0.033	0.076	0.112	0.103	0.108	1.527
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.033	0.026	0.020	0.014	0.020	0.022	0.016	0.018	0.026	0.014	0.012	0.086
LOI	39.19	39.54	42.15	41.32	42.17	42.36	41.83	41.55	41.82	41.35	41.75	14.61
Total	99.729	99.775	99.853	99.716	99.424	99.863	99.997	99.403	100.039	99.856	100.085	99.727
MAW <sup>1</sup>	26.44	26.89	27.94	27.99	27.88	27.95	27.98	27.86	27.50	27.59	27.79	21.22
MFW <sup>2</sup>	99.63	99.51	32.07	18.97	52.52	6.91	4.04	77.78	96.47	97.25	79.42	99.66

<sup>1</sup> Mean atomic weight calculated according to [59]. <sup>2</sup> MFW index calculated according to [60].

MAW is a chemical parameter correlated with rock density [59,61]. In this study, the values of this parameter were compared with the MFW index and a relationship was found between the two: rocks with a greater terrigenous contribution have a lower MAW, which implies a lower matrix density. These results are consistent with those of [42], who found that, in breccias, the matrix density values are lower than those of limestones. These parameters can be used to correlate geochemical and petrophysical properties, along with GRS data.

#### 4.5. Petrophysical and Mechanical Properties

Results from petrophysical tests for density, porosity, capillary water absorption (w value), and DWL are shown in Table 3.

**Table 3.** Petrophysical properties determined in laboratory.

Sample	Matrix Density (g/cm <sup>3</sup> )	Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )	Porosity (%)	W Value X Axis (kg/m <sup>2</sup> t <sup>−1</sup> )	W Value Y Axis (kg/m <sup>2</sup> t <sup>−1</sup> )	Anisotropy (%)	DWL (%)
C1	2.67	2.39	10.48	1.21	1.02	15.70	−0.78
C2	2.71	2.33	13.93	0.83	1.31	36.64	−1.40
C3	2.66	2.01	24.41	2.70	4.62	41.56	−2.15

The matrix densities for all three samples are similar and, compared with the MAW, they have an excellent Pearson correlation of 0.93. Regarding porosity, sample C1 has the lowest value, followed by sample C2, and C3 sample has almost double the porosity of the other two samples. This parameter notably influences the capillary water absorption (w value; Table 3) and the capacity for the salt solution to be absorbed into the pore system (DWL; Table 3).

Capillary water absorption for sample C1 is higher in the X axis than in the Y axis. This can be explained because, as seen in the petrographic analysis, the thicker algal lamination has almost no fenestral porosity compared with the thinner algal lamination of sample C3, which, as expected, absorbed more water through capillarity in the Y axis, the same as sample C2.

Regarding the DWL, none of the three samples lost weight, but gained it according to their porosity: the sample with the highest porosity value (C3) absorbed more salt



solution, and the sample with the lowest porosity value (C1) absorbed less [42]. It was found that limestones do not lose weight with the DWL test, because after 100 cycles there were no changes below the original weight value, but for calcareous breccia the sample experienced weight loss after 40 cycles. An important aspect of salt crystallization is that no efflorescence was observed in the North Temple stone blocks, perhaps because it is present as salt solution, although limestones are less affected due to their low porosity compared to calcareous breccias.

## 5. Discussion

The results obtained using GRS can be interpreted according to rock type and minerals [65]. However, it should be noted that rock properties are modified by weathering processes that ultimately produce geochemical changes, such as loss of certain elements, and petrophysical changes, such as increased porosity [66]. These aspects are discussed below.

Radiation in breccias and limestones of the Archaeological Zone of Chichen Itza is due to the presence of components of continental origin, specifically paleosol particles and quartz. Of these, the former are characterized by the presence of clays and iron oxides that can adsorb potassium and thorium on their surface [67–71]. Uranium, on the other hand, is not associated with a specific mineral in the limestone but has a marine affinity and is associated with organic matter [72]. It is interpreted that, because the limestones formed in shallow marine environments and have an organic component such as algae, uranium is distributed over a wide range in both breccias and limestones.

Therefore, the distinction between breccias and limestone radiation is notable, as the former contain a greater content of terrigenous particles. Petrographic and geochemical analyses support this interpretation. Indeed, *in situ* GRS helped in determining lithology even when it was not distinguishable on plain sight, which will undoubtedly contribute to consolidating its use in the study of historical heritage.

In the case of potassium, it is easily removed from minerals due to its mobility [60]. The same is true for uranium, while thorium is generally considered an immobile element [65], being soluble in certain environments. Therefore, if GRS is performed on unweathered rocks and compared with identical weathered rocks, it will be observed that the radiation in the former is higher. On the other hand, if the outcrops are considered rocks with low weathering, they can serve as a reference for comparison with weathered rocks, as is the case with North Temple blocks. It is important to acknowledge that sometimes outcrops of the same rocks as the used for a building are not always known or accessible, so determining weathering/deterioration with stones only from the building should be interpreted with caution.

The GRS showed that outcrops in the Archaeological Zone of Chichen Itza exhibit relatively higher radiation levels than North Temple stone blocks, which is interpreted as an indicator of more dissolution and, therefore, higher radioelements loss. Potassium and thorium are released from terrigenous components and can be used as a measure of the degree of weathering, but uranium, not being associated with a mineral, is not sufficiently reliable to represent this deterioration process. However, considering that uranium is distributed over a wide range in breccias and limestones, it can certainly be used to specifically determine dissolution-related deterioration. Considering in this case the mobility of radioelements, then GRS can be used to describe weathering/deterioration no matter where they reside (crystal lattices or adsorbed) or lithology as demonstrated in other studies for other type of rocks [23–26].

Furthermore, as shown in Figure 8, breccias vary considerably between their unweathered states in outcrops and their deteriorated states in the North Temple. This is explained by their physical properties, such as their higher porosity than limestones, which reaches up

to 25% [42]. Higher porosity can lead to more water entering the pore system, which in turn leads to greater dissolution. In the case of limestones, also shown in Figure 8, the differences between unweathered outcrops and those in the North Temple are less pronounced.

Physical weathering processes cause rock fragmentation, thereby increasing their porosity [61,66], which in turn allows more water and salts to enter in the pore system, if available. If there is more moisture content in the porous system, this can be determined primarily by total radiation [26]. With the petrophysical data of rocks from the Archaeological Zone of Chichen Itza, it is safe to assume that dissolution increases porosity, and this in turn causes the loss of radioelements. Breccias are the most deteriorated, indicating that they have higher porosity, which increases their capacity to retain water in the pores, causing greater dissolution and loss of material in solution [42]. Likewise, potassium and thorium, in addition to other elements, can be lost or released, which would result in lower radiation. So, GRS is useful to identify moisture content and to interpret weathering/deterioration in stone blocks, providing insights into some of their characteristics and targeting blocks that need conservation techniques.

In relation to this assessment of petrophysical and mechanical properties, it should be clarified that GRS, like any other NDT, must be complemented with other analyses for a better understanding of deterioration processes. Some considerations regarding the NDTs described in the Introduction section and GRS are detailed next. First, since elastic properties and wave velocity [1,3,4] depend on material density, a combination of NDTs and GRS can be used for comparison, specifically because dissolution of limestones affects the percentage of porosity and ultimately the bulk density. Moreover, the increased porosity can cause more water to reside in the stone blocks, causing radiation attenuation. Therefore, moisture measurements [2,5,6,26] and GRS are NDTs that can be well correlated, as demonstrated in this study. Another property measurable by means of NDTs is magnetic susceptibility; in particular, ref. [7] evaluated magnetic susceptibility and GRS to compare their responses in granites from different regions to determine provenance. This NDT can offer another tool to compare outcrop response with that of buildings to assess deterioration. Similarly, ref. [8] used magnetic susceptibility to assess soiling in facades, although further studies about this property and GRS should be carried out.

Since limestones with the same terrigenous input described here have been found in other buildings in the area [73], GRS may offer good results if this methodology is widely applied. It is also possible to compare the regression lines of the outcrops with those of the other monuments in the Archaeological Zone of Chichen Itza, since they were built with the same rock type. With these, their moisture content could be determined by relating it to lower radiation, which will also be related to porosity. Furthermore, considering that the breccias have higher porosity and are more deteriorated, the GRS could be used as an indicator of possible future damage when radiation readings are high, i.e., in breccias.

As described earlier, several studies carried out in the Archaeological Zone of Chichen Itza used electrical resistivity tomography to detect buried structures [29,30]. Unfortunately, GRS cannot be applied for this purpose because soil moisture causes radiation attenuation, and the maximum depth of investigation of GRS is approximately 1 m in special conditions, and 0.5 m normally [27]. However, there have been attempts to use GRS for buried structures recognition in zones with a thin soil cover [71,74]. On the other hand, the use of electrical resistivity to evaluate salt solubility and moisture [31] is an example of an NDT that would complement GRS data to assess moisture content and distribution. Finally, portable X-ray fluorescence equipment, such as that utilized to determine the chemical composition of the Throne of the Red Jaguar sculpture [32], may be useful in some materials because can it identify more chemical elements (Na to U) than GRS (K, U Th). However, considering that limestones are composed mainly of calcium carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ), portable

X-ray fluorescence equipment would be capable only of detecting its chemical components as the presence of other elements would be obscured. Inversely, GRS proved to be a reliable tool to identify the radioelements distributions in limestones.

According to the results obtained in this study and comparing them with those of [26] in volcanic tuff, it was verified that the in situ GRS methodology in buildings is applicable for different rocks, regardless of the concentration of radioelements, and monuments with different exposure times and in different environmental and climatic conditions. Nevertheless, some limitations regarding GRS should be pointed out. Because of the random nature of the nuclear disintegration of radioelements, the values obtained will never be exactly the same, but they will be similar (although this is easily overcome using the suggested measurement time between 2 and 3 min). Also, GRS can be affected by atmospheric radon, which has elevated concentrations after rain [27], so measurements must be taken hours or days later, allowing radon concentrations to reach normal levels. This situation represents a limitation in areas with frequent rain, although GRS could be planned during the dry season. Like any other NDT, the GRS should be compared with other analysis, and in the Archaeological Zone of Chichen Itza, the following investigations should be focused on correlating data from NDTs and GRS, particularly the ones providing resistivity and elastic properties data.

## 6. Conclusions

The gamma-ray spectrometry was successfully applied to assess the limestone and calcareous breccia used in the North Temple. By applying the methodology for in situ gamma ray spectrometry, it was found that radiation and radioelement concentrations are lower in the North Temple stone blocks than in the outcrops, meaning that gamma-ray spectrometry can be used to determine weathering. Potassium and thorium are the two most reliable elements for this purpose, as their loss can be related to clasts of terrigenous origin containing clay and iron oxides. Uranium, on the other hand, is only reliable in terms of general dissolution, as its concentration is not related to any mineral, but is distributed throughout the matrix and associated with organic matter. Considering these results, and as previous studies have shown, gamma-ray spectrometry can be used for building stone assessment in different types of rocks.

By means of the in situ gamma-ray spectrometry, it was possible to identify differences between breccias with terrigenous particles, which causes them to have higher radiation than limestones without the terrigenous particles. This allowed us to distinguish between the two rock types, although this is not easy to do on plain sight. This differentiation showed that the breccias are more deteriorated because they have lost more radioelements due to their greater porosity. Therefore, gamma-ray spectrometry allowed us to assess the relationship between porosity and deterioration in the stones from the Archaeological Zone of Chichen Itza and can be used in other Maya sites built with limestones. Furthermore, deterioration and the results of gamma-ray spectrometry can be compared to limestones in cities like Mérida, capital city of Yucatán to assess differences in radioelements mobility due to industrialization.

The advantage of in situ gamma-ray spectrometry is that it is a non-destructive test, and this article demonstrates that it has great potential to become a routine test for assessing building stones, even when their radioelement concentration is very low. Also, considering the results obtained in this research, gamma-ray spectrometry can be applied in different conditions, in this case, a hot and tropical climate.

Gamma-ray spectrometry, like any other non-destructive test, should be complemented with laboratory analysis and compared to data from non-destructive tests, since no technique alone can assess all building stone properties or deterioration processes. A



combination of all these tests permits a better understanding of past and ongoing deterioration processes to make it possible to supervise the conditions of building stones in cultural heritage and prevent their decay.

**Author Contributions:** Conceptualization, methodology, A.M.-G. and V.Y.; validation, A.M.-G., V.Y., R.A.L.-D., C.A.G.-S. and A.A.-R.; formal analysis, A.M.-G.; investigation, A.M.-G. and V.Y.; resources, V.Y., R.A.L.-D., C.A.G.-S. and A.A.-R.; data curation, A.M.-G.; writing—original draft preparation, A.M.-G.; writing—review and editing, visualization, A.M.-G., V.Y., R.A.L.-D., C.A.G.-S. and A.A.-R.; supervision, V.Y., R.A.L.-D., C.A.G.-S. and A.A.-R.; project administration, V.Y. and R.A.L.-D.; funding acquisition, V.Y., R.A.L.-D., C.A.G.-S. and A.A.-R. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** The APC was partially funded by the Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. The first author acknowledges the financial support for PhD studies (CVU 926119) by the Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación.

**Data Availability Statement:** Data sets generated during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

**Acknowledgments:** The authors acknowledge the Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, and the Instituto de Geología, Universidad Autónoma de San Luis Potosí for the use of their laboratories and equipment; and the National Institute of Anthropology and History for allowing these studies at Chichén Itzá. The authors acknowledge Lidia Miroslava Lerma-Pérez for field assistance, and Erasmo Mata-Martínez for laboratory support. The authors acknowledge the four anonymous reviewers for the valuable observations that allowed the improvement of this manuscript.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflicts of interest. The authors certify that they have no affiliations with or involvement in any organization or entity with any financial interest (such as honoraria; educational grants; participation in speakers' bureaus; membership, employment, consultancies, stock ownership, or other equity interest; and expert testimony or patent-licensing arrangements), or non-financial interest (such as personal or professional relationships, affiliations, knowledge or beliefs) in the subject matter or materials discussed in this manuscript.

## Abbreviations

The following abbreviations are used in this manuscript:

NDT	Non-destructive test
GRS	Gamma-ray spectrometry
YP	Yucatan Platform
XRD	X-ray diffraction
MAW	Mean atomic weight
MFW	Mafic-felsic-weathering
DWL	Dry weight loss
cpm	Counts per minute
XRF	X-ray fluorescence

## References

1. Fontaine, L.; Hendrickx, R.; De Clercq, H. Deterioration mechanisms of the compact clay-bearing limestone of Tournai used in the Romanesque portals of the Tournai Cathedral (Belgium). *Environ. Earth Sci.* **2015**, *74*, 3207–3221. [[CrossRef](#)]
2. Wilhelm, K.; Viles, H.; Burke, O.; Mayaud, J. Surface hardness as a proxy for weathering behaviour of limestone heritage: A case study on dated headstones on the Isle of Portland, UK. *Environ. Earth Sci.* **2016**, *75*, 931. [[CrossRef](#)]
3. Fais, S.; Cuccuru, F.; Ligas, P.; Casula, G.; Bianchi, M.G. Integrated ultrasonic, laser scanning and petrographical characterisation of carbonate building materials on an architectural structure of a historic building. *Bull. Eng. Geol. Environ.* **2017**, *76*, 71–84. [[CrossRef](#)]

4. Orenday-Tapia, E.E.; Pacheco-Martínez, J.; Padilla-Ceniceros, R.; López-Doncel, R.A. In situ and nondestructive characterization of mechanical properties of heritage stone masonry. *Environ. Earth Sci.* **2018**, *77*, 286. [CrossRef]
5. Hatur, M.E.; Korkanç, M.; Başar, M.E. Evaluating the deterioration effects of building stones using NDT: The Küçükköy Church, Cappadocia Region, central Turkey. *Bull. Eng. Geol. Environ.* **2019**, *78*, 3465–3478. [CrossRef]
6. Theodoridou, M.; Török, Á. In situ investigation of stone heritage sites for conservation purposes: A case study of the Székesfehérvár Ruin Garden in Hungary. *Prog. Earth Planet. Sci.* **2019**, *6*, 15. [CrossRef]
7. Williams-Thorpe, O.; Webb, P.C.; Thorpe, R.S. Non-destructive portable gamma ray spectrometry used in provenancing Roman granitoid columns from Leptis Magna, North Africa. *Archaeometry* **2000**, *42*, 77–99. [CrossRef]
8. Monna, F.; Puertas, A.; Lévêque, F.; Losno, R.; Fronteau, G.; Marin, B.; Dominik, J.; Petit, C.; Forel, B.; Chateau, C. Geochemical records of limestone façades exposed to urban atmospheric contamination as monitoring tools? *Atmos. Environ.* **2008**, *42*, 999–1011. [CrossRef]
9. Batista-Rodríguez, J.A.; López-Saucedo, F.J.; Almaguer-Carmenates, Y.; Motas-Ortiz, J.L.; Nerio-Rocha, J. Assessment by portable gamma spectrometry of the radiological hazard associated with built environments in northeastern Mexico. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* **2022**, *19*, 8645–8660. [CrossRef]
10. Righi, S.; Bruzzi, L. Natural radioactivity and radon exhalation in building materials used in Italian dwellings. *J. Environ. Radioact.* **2006**, *88*, 158–170. [CrossRef]
11. Sonkawade, R.G.; Kant, K.; Muralithar, S.; Kumar, R.; Ramola, R.C. Natural radioactivity in common building construction and radiation shielding materials. *Atmos. Environ.* **2008**, *42*, 2254–2259. [CrossRef]
12. Moharram, B.M.; Suliman, M.N.; Zahran, N.F.; Shennawy, S.E.; El Sayed, A.R. External exposure doses due to gamma emitting natural radionuclides in some Egyptian building materials. *Appl. Radiat. Isot.* **2012**, *70*, 241–248. [CrossRef] [PubMed]
13. El-Nahal, M.A.; Alawy, M.K.; Elsafi, M. Evaluation of radiological hazards associated with some Egyptian marble and granite rocks. *Sci. Rep.* **2024**, *14*, 28838. [CrossRef]
14. Ruffell, A.; Worden, R. Palaeoclimate analysis using spectral gamma-ray data from the Aptian (Cretaceous) of southern England and southern France. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* **2000**, *155*, 265–283. [CrossRef]
15. Chen, M.Q.F.; Chan, L.S. In-situ gamma-ray spectrometric study of weathered volcanic rocks in Hong Kong. *Earth Surf. Process. Landf.* **2002**, *27*, 613–625. [CrossRef]
16. Carrier, F.; Bourdon, B.; Pili, É.; Truffert, C.; Wyns, R. Airborne gamma-ray spectrometry to quantify chemical erosion processes. *J. Geochem. Explor.* **2006**, *88*, 266–270. [CrossRef]
17. Schnyder, J.; Ruffell, A.; Deconinck, J.-F.; Baudin, F. Conjunctive use of spectral gamma-ray logs and clay mineralogy in defining late Jurassic–early Cretaceous palaeoclimate change (Dorset, U.K.). *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* **2006**, *229*, 303–320. [CrossRef]
18. Chan, L.S.; Wong, P.W.; Chen, Q.F. Abundances of radioelements (K, U, Th) in weathered igneous rocks in Hong Kong. *J. Geophys. Eng.* **2007**, *4*, 285–292. [CrossRef]
19. Wilford, J. A weathering intensity index for the Australian continent using airborne gamma-ray spectrometry and digital terrain analysis. *Geoderma* **2012**, *183–184*, 124–142. [CrossRef]
20. Ruffell, A. Do spectral gamma ray data really reflect humid–arid palaeoclimates? A test from Palaeogene interbasaltic weathered horizons at the Giant’s Causeway, N. Ireland. *Proc. Geol. Assoc.* **2016**, *127*, 18–28. [CrossRef]
21. Holbrook, W.S.; Marcon, V.; Bacon, A.R.; Brantley, S.L.; Carr, B.J.; Flinchum, B.A.; Richter, D.D.; Riebe, C.S. Links between physical and chemical weathering inferred from a 65-m-deep borehole through Earth’s critical zone. *Sci. Rep.* **2019**, *9*, 4495. [CrossRef]
22. Papadopoulos, A.  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$  and  $^{228}\text{Th}/^{228}\text{Ra}$  disequilibrium as weathering indices in beach sand sediments associated with granitoids from Cyclades, Greece. *Appl. Geochem.* **2019**, *100*, 223–233. [CrossRef]
23. Sanjurjo-Sánchez, J.; Arce-Chamorro, C.; Couto, M.; Alves, C. Non-destructive assessment of weathering in granite blocks of historical buildings: In situ gamma-ray spectrometry (GRS). In *Conserving Cultural Heritage*, 1st ed.; Mosquera, M.J., Almoraima-Gil, M.L., Eds.; CRC Press: London, UK, 2018; pp. 107–109.
24. Méndez-Gaona, A. Medición de Rayos Gamma como Método para Evaluar el Deterioro en las Rocas de Construcción de Real de Catorce, San Luis Potosí. Master’s Thesis, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México, 2020.
25. Hernández-Santomé, A.C.; Sanjurjo-Sánchez, J.; Alves, C. Use of hand-held gamma-ray spectrometry to assess decay of granite ashlar in historical buildings of NW Spain (Barbanza, Galicia). *J. Cult. Herit.* **2025**, *71*, 20–29. [CrossRef]
26. Méndez-Gaona, A.; Yutis, V.; López-Doncel, R.A. In situ gamma-ray spectrometry as a non-destructive test for the assessment of building stones: Methodology, application, and interpretation. *Environ. Earth Sci.* **2025**, *84*, 380. [CrossRef]
27. IAEA. *Guidelines for Radioelement Mapping Using Gamma Ray Spectrometry Data*; International Atomic Energy Agency: Vienna, Austria, 2003; pp. 114–136.
28. UNESCO. World Heritage Convention. Available online: <https://whc.unesco.org/document/541> (accessed on 17 June 2025).
29. Chávez, R.E.; Tejedo-Andrade, A.; Cifuentes-Nava, G.; Argote-Espino, D.L.; Hernández-Quintero, E. Karst detection beneath the pyramid of El Castillo, Chichen Itza, Mexico, by non-invasive ERT-3D methods. *Sci. Rep.* **2018**, *8*, 15391. [CrossRef]



30. Tejero-Andrade, A.; Argote-Espino, D.L.; Cifuentes-Nava, G.; Hernández-Quintero, E.; Chávez, R.E.; García-Serrano, A. 'Illuminating' the interior of Kukulkan's Pyramid, Chichén Itzá, Mexico, by means of a non-conventional ERT geophysical survey. *J. Archaeol. Sci.* **2018**, *90*, 1–11. [\[CrossRef\]](#)
31. García-Solís, C.A.; Jáidar-Benavides, Y.; Quintana-Owen, P.; Reyes-Trujeque, J.; Escalante-Hernández, M.F. El deterioro de los elementos pétreos con color de la Subestructura de Guerreros en Chichén Itzá: Lineamientos prácticos para el control de sales. In *Criterios de Conservación del Patrimonio en Piedra*, 1st ed.; Jáidar-Benavides, Y., Magar-Meurs, V., Ruiz-Martín, M.C., Eds.; Secretaría de Cultura, INAH, UNAM-III, ICCROM: Ciudad de México, Mexico, 2025; pp. 349–371.
32. Juárez-Rodríguez, O.; Argote-Espino, D.L.; Santos-Ramírez, M.; López-García, P. Portable XRF analysis for the identification of raw materials of the Red Jaguar sculpture in Chichén Itzá, Mexico. *Quat. Int.* **2018**, *483*, 148–159. [\[CrossRef\]](#)
33. Evans, S.T. Postclassic cultures of Mesoamerica. In *Encyclopedia of Archaeology*, 1st ed.; Pearsall, D.M., Ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2008; pp. 209–216.
34. Baudez, C.-F. *Una Historia de la Religión de los Antiguos Mayas*; Centro de Estudios Mexicanos y Centroamericanos: Ciudad de México, Mexico, 2004; pp. 63–292.
35. Bíró, P.; Pérez de Heredia, E. Los rituales de entronización de los príncipes “Turbante de Serpiente” de Chichén Itzá y Hunuc Ceel de Mayapán. *Lat. Am. Antiq.* **2021**, *32*, 292–309. [\[CrossRef\]](#)
36. Baudez, C.-F.; Latsanopoulos, N. Political structure, military training, and ideology at Chichen Itza. *Anc. Mesoam.* **2010**, *21*, 1–20. [\[CrossRef\]](#)
37. Videla, H.A.; Guimet, P.S.; Gómez de Saravia, S. Biodeterioration of Mayan archaeological sites in the Yucatan Peninsula, Mexico. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* **2000**, *46*, 335–341. [\[CrossRef\]](#)
38. Straulino-Mainou, L.; Sedov, S.; Michelet, D.; Balanzario-Granados, S. Weathering of carbonate materials in ancient Maya constructions (Río Bec and Dzibanché): Limestone and stucco deterioration patterns. *Quat. Int.* **2013**, *315*, 87–100. [\[CrossRef\]](#)
39. Straulino Mainou, L.; Sedov, S.; Soler Arechalde, A.M.; Pi Puig, T.; Villa, G.; Balanzario Granados, S.; Doménech-Carbó, M.-T.; Osete-Cortina, L.; Leonard, D. Maya lime mortars—Relationship between archaeomagnetic dating, manufacturing technique, and architectural function—The Dzibanché case. *Geosciences* **2016**, *6*, 49. [\[CrossRef\]](#)
40. Espinosa-Morales, Y.; Alarcón, A.L.; Domínguez-Carrasco, M.d.R.; Martínez-Miranda, V.; Arteaga-Arcos, J.C.; Silva-León, I.; Reyes, J. An approach to identify and understand the main processes of weathering that affect the pre-Hispanic stelae located in the Calakmul biosphere reserve in Campeche, Mexico. *Archaeometry* **2021**, *63*, 843–859. [\[CrossRef\]](#)
41. García-Solís, C.A.; Quintana-Owen, P.; López-Doncel, R.A.; Illescas-Salinas, J.F. Microfacial analysis on the building stones of the Maya site of Calakmul. *Environ. Earth Sci.* **2023**, *82*, 299. [\[CrossRef\]](#)
42. López-Torres, M.A. Mecanismos de Descomposición en la Roca Caliza del Templo Norte, Zona Arqueológica de Chichén Itzá, Yucatán. Master's Thesis, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, Mexico, 2025.
43. López-Ramos, E. Estudio geológico de la Península de Yucatán. *Bol. Asoc. Mex. Geol. Pet.* **1973**, *25*, 23–75.
44. Ward, W.C.; Keller, G.; Stinnesbeck, W.; Adatte, T. Yucatán subsurface stratigraphy: Implications and constraints for the Chicxulub impact. *Geology* **1995**, *23*, 873–876. [\[CrossRef\]](#)
45. Stinnesbeck, W.; Keller, G.; Adatte, T.; Harting, M.; Stüben, D.; Istrate, G.; Kramar, U. Yaxcopoil-1 and the Chicxulub impact. *Int. J. Earth Sci.* **2004**, *93*, 1042–1065. [\[CrossRef\]](#)
46. Urrutia-Fucugauchi, J.; Arellano-Catalán, O.; Pérez-Cruz, L.; Romero-Galindo, I.A. Chicxulub crater joint gravity and magnetic anomaly analysis: Structure, asymmetries, impact trajectory and target structures. *Pure Appl. Geophys.* **2022**, *179*, 2735–2756. [\[CrossRef\]](#)
47. Cardoso-Vázquez, E.A.; Sánchez-Garrido, E.; Rafael-Hernández, J.A. *Carta Geológica-Minera Campeche E15-3 Escala 1:250,000 Estado de Campeche*; Consejo de Recursos Minerales: Ciudad de México, Mexico, 2004; pp. 7–34.
48. Zarate-Barradas, R.G.; Lemus-Bustos, O.; Miranda-Huerta, A.; Cureño-Suriano, R. *Carta Geológico-Minera y Geoquímica Mérida F16-10 Escala 1:250,000 Estados de Yucatán, Campeche y Quintana Roo*; Servicio Geológico Mexicano: Ciudad de México, Mexico, 2005; pp. 6–21.
49. Servicio Geológico Mexicano. Available online: [https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas\\_Online/geologia/116\\_F16-10\\_GM.pdf](https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/116_F16-10_GM.pdf) (accessed on 25 June 2025).
50. Radiation Solutions Inc. *RS-125/230 User Manual*; Radiation Solutions Inc.: Mississauga, ON, Canada, 2021; pp. 71–73.
51. Lovborg, L.; Wollenberg, H.; Sørensen, P.; Hansen, J. Field determination of uranium and thorium by gamma-ray spectrometry, exemplified by measurements in the Ilímaussaq Alkaline Intrusion, South Greenland. *Econ. Geol.* **1971**, *66*, 368–384. [\[CrossRef\]](#)
52. Myers, K.J.; Bristow, C.S. Detailed sedimentology and gamma-ray log characteristics of a Namurian deltaic succession II: Gamma-ray logging. In *Deltas: Sites and Traps for Fossil Fuels*; Whateley, M.K.G., Pickering, K.T., Eds.; Geological Society: London, UK, 1989; pp. 81–88.
53. ICOMOS Open Archive. Available online: <https://publ.icomos.org/publicomos/jlbSai?html=Pag&page=Pml/Not&base=technica&ref=CD7029A4212268603ABA998F3F471703> (accessed on 25 June 2025).

54. Beach, T. Soil constraints on northwest Yucatán, Mexico: Pedoarchaeology and Maya subsistence at Chunchucmil. *Geoarchaeology* **1998**, *13*, 759–791. [\[CrossRef\]](#)
55. Arnold, D.E. Maya blue and palygorskite: A second possible preColumbian source. *Anc. Mesoam.* **2005**, *16*, 51–62. [\[CrossRef\]](#)
56. Dunham, R.J. Classification of carbonate rocks according to depositional textures. In *Classification of Carbonate Rocks*; Ham, W.E., Ed.; American Association of Petroleum Geologists (AAPG): Tulsa, OK, USA, 1962; pp. 108–121.
57. Embry, A.F.; Klován, J.E. A Late Devonian reef tract on northeastern Banks Island, N.W.T. *Bull. Can. Pet. Geol.* **1971**, *19*, 730–781.
58. Lozano, R.; Bernal, J.P. Characterization of a new set of eight geochemical reference materials for XRF major and trace element analysis. *Rev. Mex. Cienc. Geol.* **2005**, *22*, 329–344.
59. Birch, F. The velocity of compressional waves in rocks to 10 Kilobars: 2. *J. Geophys. Res.* **1961**, *66*, 2199–2224. [\[CrossRef\]](#)
60. Ohta, T.; Arai, H. Statistical empirical index of chemical weathering in igneous rocks: A new tool for evaluating the degree of weathering. *Chem. Geol.* **2007**, *240*, 280–297. [\[CrossRef\]](#)
61. Siegesmund, S.; Dürrast, H. Physical and mechanical properties of rocks. In *Stone in Architecture: Properties, Durability*, 5th ed.; Siegesmund, S., Snethlage, R., Eds.; Springer: Berlin, Germany, 2014; pp. 97–224.
62. Siedel, H.; Siegesmund, S. Characterization of stone deterioration on buildings. In *Stone in Architecture: Properties, Durability*, 5th ed.; Siegesmund, S., Snethlage, R., Eds.; Springer: Berlin, Germany, 2014; pp. 349–414.
63. Steiger, M.; Charola, A.E.; Sterflinger, K. Weathering and deterioration. In *Stone in Architecture: Properties, Durability*, 5th ed.; Siegesmund, S., Snethlage, R., Eds.; Springer: Berlin, Germany, 2014; pp. 225–316.
64. González-Gómez, W.S.; Quintana, P.; Gómez-Cornelio, S.; García-Solis, C.A.; Sierra-Fernández, A.; Ortega-Morales, O.; De la Rosa-García, S.C. Calcium oxalates in biofilms on limestone walls of Maya buildings in Chichén Itzá, Mexico. *Environ. Earth Sci.* **2018**, *77*, 230. [\[CrossRef\]](#)
65. Rider, M.H. *The Geological Interpretation of Well Logs*, 2nd ed.; Rider-French Consulting Ltd.: Sutherland, UK, 2002; pp. 67–90.
66. Ceryan, Ş.; Tudes, S.; Ceryan, N. Influence of weathering on the engineering properties of Harsit granitic rocks (NE Turkey). *Bull. Eng. Geol. Environ.* **2008**, *67*, 97–104. [\[CrossRef\]](#)
67. Langmuir, D.; Herman, J.S. The mobility of thorium in natural waters at low temperatures. *Geochim. Cosmochim. Acta* **1980**, *44*, 1753–1766. [\[CrossRef\]](#)
68. Scheepers, R.; Rozendaal, A. Redistribution and fractionation of U, Th and rare-earth elements during weathering of subalkaline granites in SW Cape Province, South Africa. *J. Afr. Earth Sci.* **1993**, *17*, 41–50. [\[CrossRef\]](#)
69. Gunn, P.J.; Minty, B.R.S.; Milligan, P.R. The airborne gamma-ray spectrometric response over arid Australian Terranes. In *Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration*; Gubins, A.G., Ed.; Prospectors and Developers Association of Canada: Toronto, ON, Canada, 1997; pp. 733–740.
70. Bauluz, B.; Mayayo, M.J.; Fernández-Nieto, C.; González-López, J.M. Geochemistry of Precambrian and Paleozoic siliciclastic rocks from the Iberian Range (NE Spain): Implications for source-area weathering, sorting, provenance, and tectonic setting. *Chem. Geol.* **2000**, *168*, 135–150. [\[CrossRef\]](#)
71. Ruffell, A.; McKinley, J.M.; Lloyd, C.D.; Graham, C. Th/K and Th/U ratios from spectral gamma-ray surveys improve the mapped definition of subsurface structures. *J. Environ. Eng. Geophys.* **2006**, *11*, 53–61. [\[CrossRef\]](#)
72. Serra, O. *Fundamentals of Well-Log Interpretation 2 the Interpretation of Logging Data*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 1986; pp. 61–107.
73. Rodríguez Pérez, I.; Vasconcelos, G.; Lourenço, P.B.; Quintana, P.; García-Solis, C.A.; Dionísio, A. Physical-mechanical characterization of limestones from Yucatan churches, Mexico. *J. Build. Eng.* **2021**, *44*, 102895. [\[CrossRef\]](#)
74. Sanjurjo-Sánchez, J.; Arce-Chamorro, C.; Alves, C.; Sánchez-Pardo, J.C.; Blanco-Rotea, R.; Costa-García, J.M. Using in situ gamma ray spectrometry (GRS) exploration of buried archaeological structures: A case study from NW Spain. *J. Cult. Herit.* **2018**, *34*, 247–254. [\[CrossRef\]](#)

**Disclaimer/Publisher's Note:** The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.



### Anexo 3. Litología y deterioro de la Caja del Agua Conservera

Bloque	Coloración	Patrones de deterioro
N1	Indistinguible	Depósito
N2	Naranja	Soiling, fragmentación
N3	Naranja	Soiling, eflorescencia, fragmentación
N4	Indistinguible	Soiling, depósito
N5	Naranja	Soiling, eflorescencia
N6	Naranja	Soiling, depósito, grafiti, tinción
N7	Indistinguible	Depósito
N8	Indistinguible	Soiling, depósito, eflorescencia
N9	Indistinguible	Soiling, depósito
N10	Naranja	Soiling, depósito
N11	Naranja	Soiling
N12	Naranja	Soiling, depósito
N13	Naranja	Soiling, grieta, abrasión
N14	Naranja	Soiling, brillo superficial
N15	Naranja	Soiling, erosión
N16	Naranja	Soiling, erosión
N17	Naranja	Soiling, grieta, brillo superficial
N18	Naranja	Soiling, brillo superficial, abrasión
N19	Naranja	Soiling
N20	Naranja	Soiling
N21	Indistinguible	Depósito
N22	Naranja	Soiling, depósito
N23	Naranja	Depósito
N24	Indistinguible	Depósito
N25	Naranja	Soiling, depósito
N26	Naranja	Soiling, depósito
N27	Naranja	Depósito
N28	Naranja	Soiling, depósito, eflorescencia
N29	Naranja	Soiling
N30	Naranja	Soiling
N31	Naranja	Soiling, depósito, grafiti
N32	Naranja	Soiling, depósito, erosión
N33	Naranja	Soiling, depósito
N34	Naranja	Soiling, erosión
N35	Naranja	Soiling, erosión
N36	Naranja	Soiling
N37	Naranja	Soiling
N38	Naranja	Soiling, depósito
N39	Naranja	Soiling, depósito
N40	Naranja	Soiling
N41	Naranja	Soiling, depósito, erosión
N42	Naranja	Soiling, erosión
N43	Naranja	Soiling

N44	Naranja	Soiling, erosión
N45	Naranja	Soiling, depósito, erosión
N46	Naranja	Soiling
N47	Naranja	Soiling
N48	Naranja	Soiling, erosión
N49	Naranja	Soiling, fragmentación
N50	Naranja	Soiling, erosión
N51	Rosa oscuro	Soiling
N52	Naranja	Depósito, erosión
N53	Naranja	Depósito, erosión
N54	Naranja	Depósito, erosión
N55	Rosa oscuro	Soiling
N56	Naranja	Soiling, grieta, abrasión
N57	Naranja	Depósito, erosión
N58	Naranja	Soiling, erosión
N59	Naranja	Soiling, depósito
N60	Naranja	-
N61	Rosa oscuro	Soiling
N62	Rosa oscuro	Soiling, depósito, erosión
N63	Naranja	-
N64	Rosa oscuro	Soiling
N65	Rosa oscuro	Decoloración
N66	Naranja	Depósito
N67	Naranja	Depósito
N68	Rosa claro	Depósito, decoloración
N69	Naranja	Erosión
N70	Naranja	-
N71	Naranja	-
N72	Naranja	-
NW1	Naranja	Soiling, depósito, blistering
NW2	Naranja	Soiling, depósito, blistering
NW3	Naranja	Soiling, depósito
NW4	Naranja	Soiling, depósito, tinción
NW5	Naranja	Soiling, depósito, erosión
NW6	Naranja	Soiling, erosión
NW7	Naranja	Soiling, depósito
NW8	Naranja	Soiling, depósito, erosión
NW9	Rosa oscuro	Soiling
NW10	Naranja	Soiling, depósito, erosión, grieta
NW11	Indistinguible	Depósito
NW12	Naranja	Soiling, depósito, fragmentación, grieta, blistering
NW13	Naranja	Soiling, depósito, erosión, fragmentación, grafiti
NW14	Naranja	Soiling
NW15	Naranja	Soiling, grieta, grafiti
NW16	Rosa claro	Soiling, depósito, grafiti
NW17	Naranja	Soiling, grafiti
NW18	Rosa claro	Soiling, depósito, erosión, grafiti
NW19	Naranja	Soiling
NW20	Naranja	Soiling, depósito, erosión, blistering

NW21	Naranja	Soiling, depósito, grieta
NW22	Naranja	Soiling, erosión
NW23	Naranja	Soiling
NW24	Naranja	Soiling
NW25	Rosa oscuro	Soiling, depósito
NW26	Naranja	Soiling, erosión
NW27	Naranja	Soiling
NW28	Naranja	Soiling
NW29	Naranja	Soiling
NW30	Naranja	Soiling
NW31	Naranja	Soiling
NW32	Naranja	Soiling
W1	Naranja	Soiling, depósito, descamación
W2	Indistinguible	Depósito
W3	Naranja	Soiling, depósito, descamación, eflorescencia
W4	Naranja	Soiling, depósito, eflorescencia
W5	Naranja	Soiling, depósito, eflorescencia
W6	Naranja	Soiling, depósito, eflorescencia
W7	Naranja	Soiling, depósito, eflorescencia
W8	Naranja	Soiling
W9	Naranja	Soiling, depósito
W10	Naranja	Soiling, depósito, descamación, brillo superficial, abrasión
W11	Naranja	Soiling, depósito, descamación
W12	Naranja	Soiling, tinción
W13	Naranja	Soiling, erosión, brillo superficial, abrasión
W14	Naranja	Soiling, depósito, erosión
W15	Naranja	Soiling
W16	Naranja	Soiling, depósito, erosión, brillo superficial
W17	Naranja	Soiling, depósito, erosión, brillo superficial, abrasión
W18	Naranja	Soiling, depósito, descamación, grieta
W19	Rosa claro	Soiling, depósito, descamación, grieta, grafiti
W21	Naranja	Soiling, depósito, erosión, tinción
W22	Naranja	Soiling, depósito, tinción
W24	Naranja	Soiling, depósito, tinción
W26	Naranja	Soiling, depósito
W27	Indistinguible	Depósito
W28	Naranja	Soiling, depósito, tinción
W29	Naranja	Soiling, depósito, erosión, tinción
W30	Indistinguible	Depósito
W32	Naranja	Soiling, depósito
W33	Naranja	Soiling
W34	Rosa claro	Soiling
W35	Rosa claro	Soiling, erosión
W36	Rosa claro	Soiling
W37	Rosa claro	Soiling, depósito
W38	Naranja	Soiling, depósito
W39	Naranja	Soiling, depósito
W40	Naranja	Soiling
W41	Naranja	Soiling

W42	Rosa claro	Soiling, fragmentación
W43	Rosa oscuro	Soiling, fragmentación
W44	Indistinguible	Depósito
W45	Naranja	Soiling, erosión
W46	Naranja	Soiling
W47	Naranja	Soiling, depósito
W48	Naranja	Soiling
W49	Naranja	Erosión, decoloración
W50	Naranja	Grafiti
W51	Naranja	Depósito, blistering
W52	Naranja	Depósito
W53	Rosa oscuro	Erosión
W54	Naranja	-
W55	Naranja	-
W56	Rosa oscuro	Decoloración
W57	Naranja	-
W58	Naranja	Depósito
W59	Rosa oscuro	Depósito, erosión
W60	Naranja	-
W61	Rosa oscuro	Soiling
W62	Naranja	Erosión
W63	Naranja	-
W64	Naranja	Decoloración
W65	Naranja	Soiling
W66	Naranja	Soiling
W67	Naranja	-
W68	Rosa oscuro	Soiling
W69	Naranja	Soiling
W70	Naranja	-
W71	Naranja	-
WS1	Naranja	Soiling, depósito, descamación
WS2	Naranja	Soiling, depósito, erosión, tinción
WS3	Naranja	Soiling, depósito, erosión, fragmentación
WS4	Naranja	Soiling, depósito, erosión
WS5	Naranja	Soiling, depósito, grieta
WS6	Naranja	Soiling, erosión, fragmentación, grafiti
WS7	Naranja	Soiling, depósito
WS8	Naranja	Soiling, depósito
WS9	Naranja	Soiling, depósito, fragmentación
WS10	Naranja	Soiling, depósito
WS11	Naranja	Soiling, depósito, fragmentación
WS12F	Naranja	Soiling, depósito, fragmentación
WS12L	Rosa oscuro	Soiling, fragmentación
WS13	Indistinguible	Depósito
WS14	Naranja	Soiling, depósito, erosión, grieta
WS15	Naranja	Soiling, depósito
WS16	Naranja	Soiling
WS17	Naranja	Soiling, depósito, grieta, tinción
WS18	Naranja	Soiling

WS19	Naranja	Soiling, depósito
WS20	Naranja	Soiling, erosión
WS21	Naranja	Soiling
WS22	Naranja	Soiling
WS23	Naranja	-
WS24	Naranja	Soiling
WS25	Naranja	Soiling
WS26	Naranja	Soiling
S1	Naranja	Soiling, depósito
S2	Naranja	Soiling, depósito
S3	Naranja	Soiling, depósito, descamación
S4	Naranja	Soiling, depósito, erosión, eflorescencia, tinción
S5	Naranja	Soiling, depósito, eflorescencia
S6	Naranja	Soiling, depósito, eflorescencia
S7	Indistinguible	Soiling, depósito
S8	Naranja	Soiling, depósito, descamación
S9	Naranja	Soiling
S10	Naranja	Soiling, erosión, abrasión, brillo superficial
S11	Naranja	Soiling, depósito, erosión
S12	Naranja	Soiling, depósito, erosión, eflorescencia
S13	Naranja	Soiling, depósito, eflorescencia
S14	Naranja	Soiling, depósito, erosión
S15	Naranja	Soiling, depósito, erosión, descamación, decoloración
S16	Naranja	Soiling, depósito, erosión, eflorescencia
S17	Naranja	Soiling, depósito, erosión, descamación, fragmentación, brillo superficial
S18	Naranja	Soiling, depósito, erosión, brillo superficial
S19	Rosa claro	Soiling, depósito
S20	Naranja	Soiling, depósito, erosión, tinción
S21	Naranja	Soiling, depósito, tinción
S22	Naranja	Soiling, depósito, descamación, tinción
S23	Indistinguible	Soiling, depósito
S24	Naranja	Soiling, depósito
S25	Rosa claro	Soiling, depósito, erosión
S26	Rosa claro	Soiling, depósito
S27	Naranja	Soiling, depósito
S28	Rosa oscuro	Soiling, depósito, erosión
S29	Naranja	Soiling, tinción
S30	Rosa claro	Soiling, depósito
S31	Rosa claro	Soiling, depósito
S32	Rosa claro	Soiling, depósito
S33	Naranja	Soiling, depósito
S34	Naranja	Soiling, depósito
S35	Naranja	Soiling, depósito
S36	Naranja	Soiling, depósito
S37	Naranja	Soiling
S38	Naranja	Soiling
S39	Naranja	Soiling, depósito
S40	Naranja	-



S41	Naranja	Soiling, erosión
S42	Naranja	Erosión
S43	Naranja	Soiling, erosión
S44	Naranja	Soiling, erosión
S45	Naranja	Erosión
S46	Naranja	Erosión
S47	Naranja	Soiling, depósito, erosión
S48	Naranja	Soiling, erosión, tinción
S49	Rosa oscuro	Soiling, depósito, erosión
S50	Naranja	Soiling
S51	Rosa claro	Soiling, erosión
S52	Naranja	-
S53	Rosa oscuro	Soiling
S54	Naranja	Depósito
S55	Rosa oscuro	Soiling, erosión
S56	Rosa oscuro	Decoloración
S57	Naranja	-
S58	Naranja	-
S59	Naranja	Soiling
S60	Rosa oscuro	-
S61	Rosa claro	Decoloración
S62	Naranja	-
S63	Naranja	Decoloración
S64	Rosa oscuro	Soiling
S65	Rosa oscuro	Soiling, decoloración
S66	Rosa oscuro	Soiling
SE1	Naranja	Soiling, depósito, fragmentación, grieta
SE2	Naranja	Soiling, depósito, fragmentación, tinción
SE3	Naranja	Soiling, depósito
SE4	Naranja	Soiling, depósito, fragmentación, tinción, grafiti
SE5	Naranja	Soiling, depósito, erosión, grieta
SE6	Naranja	Soiling, depósito, tinción, grieta
SE7	Naranja	Soiling, depósito, erosión
SE8	Naranja	Depósito, fragmentación
SE9	Naranja	Soiling, erosión
SE10	Naranja	Depósito
SE11	Naranja	Soiling
SE12	Naranja	Soiling, depósito, tinción
SE13F	Naranja	Soiling, depósito, fragmentación
SE13L	Rosa claro	Soiling, depósito, fragmentación, blistering
SE14	Naranja	Soiling, depósito
SE15F	Naranja	Soiling, depósito, fragmentación
SE15L	Rosa claro	Soiling, depósito, fragmentación
SE16F	Naranja	Soiling, depósito
SE16L	Rosa claro	Soiling, depósito, grieta
SE17F	Naranja	Soiling
SE17L	Rosa oscuro	Soiling, erosión, grieta
SE18	Naranja	Soiling
SE19	Naranja	Soiling

SE20	Naranja	Soiling, depósito
SE21	Naranja	Soiling, erosión
SE22	Naranja	Soiling, erosión
SE23	Naranja	Soiling
SE24	Naranja	Soiling, depósito
SE25	Rosa oscuro	Soiling
SE26	Naranja	Soiling
SE27	Naranja	Soiling
SE28	Naranja	Soiling
SE29	Naranja	Soiling
SE30	Naranja	Soiling
E1	Naranja	Soiling, depósito, blistering
E2	Naranja	Soiling, depósito, blistering
E3	Naranja	Soiling, depósito, grieta, blistering, brillo superficial
E4	Naranja	Soiling, depósito
E5	Naranja	Soiling, erosión
E6	Naranja	Soiling, depósito
E7	Naranja	Soiling, depósito, tinción
E8	Naranja	Soiling, depósito, erosión, fragmentación, tinción
E9	Naranja	Soiling, depósito, erosión, tinción
E10	Naranja	Soiling, depósito
E11	Naranja	Soiling, depósito, tinción
E12	Naranja	Soiling, depósito, tinción
E13	Naranja	Soiling
E14	Naranja	Soiling, depósito
E15	Naranja	Soiling
E16	Naranja	Soiling, depósito, blistering
E17	Naranja	Soiling, depósito
E19	Naranja	Soiling, depósito, blistering, fragmentación, eflorescencia
E20	Naranja	Soiling, depósito, eflorescencia
E21	Naranja	Soiling, depósito, grieta
E22	Naranja	Soiling, depósito, tinción
E23	Naranja	Soiling, depósito, erosión, eflorescencia
E25	Naranja	Soiling, depósito, erosión
E26	Naranja	Soiling, depósito, fragmentación, brillo superficial
E27	Naranja	Soiling, depósito, erosión, brillo superficial
E28	Naranja	Soiling, depósito, erosión, abrasión
E29	Naranja	Soiling, depósito, erosión, brillo superficial
E30	Rosa claro	Soiling, depósito
E31	Rosa claro	Soiling, depósito, fragmentación
E32	Rosa claro	Soiling, depósito
E33	Naranja	Soiling, depósito
E34	Rosa oscuro	Soiling, depósito
E35	Naranja	Soiling, depósito
E36	Naranja	Soiling, depósito
E37	Naranja	Soiling
E38	Naranja	Soiling
E39	Naranja	Soiling, decoloración
E40	Naranja	Soiling

E41	Rosa oscuro	Soiling
E42	Naranja	Soiling, erosión
E43	Naranja	Soiling
E44	Naranja	Erosión, blistering
E45	Rosa oscuro	Soiling, depósito
E46	Rosa oscuro	Fragmentación, tinción
E47	Naranja	Depósito
E48	Naranja	Soiling, fragmentación
E49	Rosa oscuro	Soiling
E50	Naranja	Soiling, erosión
E51	Rosa oscuro	-
E52	Naranja	Erosión
E53	Naranja	Soiling
E54	Rosa oscuro	Soiling, tinción
E55	Rosa oscuro	Soiling, tinción
E56	Naranja	-
E57	Naranja	Depósito, erosión
E58	Rosa oscuro	-
E59	Naranja	Erosión
E60	Naranja	Tinción
E61	Naranja	Erosión
E62	Rosa oscuro	Soiling, tinción
E63	Naranja	Decoloración
E64	Naranja	-
E65	Rosa oscuro	-
E66	Rosa oscuro	Soiling
E67	Rosa oscuro	Soiling
E68	Naranja	Soiling
E69	Rosa oscuro	-
E70	Rosa oscuro	Depósito
EN1	Naranja	Soiling
EN2	Naranja	Soiling, depósito
EN3	Naranja	Soiling, depósito, erosión, grafiti
EN4	Naranja	Soiling, depósito, erosión
EN5	Naranja	Soiling, erosión
EN6	Naranja	Soiling, erosión, grafiti
EN7	Naranja	-
EN8	Naranja	Soiling
EN9	Naranja	-
EN10	Naranja	Soiling, depósito
EN11	Naranja	Soiling, depósito, descamación, fragmentación
EN12	Naranja	Soiling
EN13	Naranja	Soiling, erosión
EN14	Naranja	Soiling, erosión
EN15	Naranja	Soiling, depósito
EN16	Naranja	Soiling, depósito
EN17	Naranja	Soiling, depósito, grieta
EN18	Naranja	Soiling, erosión
EN19	Naranja	Soiling

EN20	Naranja	Soiling, depósito
EN21	Rosa oscuro	Soiling
EN22	Rosa oscuro	Soiling
EN23	Rosa oscuro	Soiling
EN24	Rosa claro	Soiling, decoloración
EN25	Naranja	Soiling, decoloración
EN26	Naranja	Soiling
EN27	Naranja	Soiling
EN28	Naranja	Soiling



## Anexo 4. Litología y deterioro de la Caja del Agua del Santuario

Bloque	Coloración	Patrones de deterioro
N1	Rosa oscuro	Depósito, eflorescencia
N2	Rosa oscuro	Soiling, depósito
N3	Rosa oscuro	Soiling, depósito, blistering, fragmentación
N4	Rosa oscuro	Soiling, blistering
N5	Rosa oscuro	Soiling, blistering
N6	Rosa oscuro	Soiling, depósito, descamación, eflorescencia
N7	Naranja	Soiling, depósito, grafiti, erosión, fragmentación, blistering, descamación, eflorescencia
N8	Naranja	Soiling, depósito, grafiti, erosión, fragmentación, blistering, descamación
N9	Naranja	Soiling, depósito, erosión, fragmentación, blistering, descamación
N10	Naranja	Soiling, fragmentación
N11	Naranja	Soiling
N12	Naranja	Soiling, depósito
N13	Naranja	Soiling
N14	Naranja	Soiling, depósito
N15	Naranja	Soiling, depósito, eflorescencia
N16	Rosa oscuro	Soiling
N17	Rosa oscuro	Soiling, depósito, eflorescencia
N18	Rosa oscuro	Soiling, depósito, eflorescencia
N19	Naranja	Soiling
N20	Naranja	Soiling, depósito, erosión
N21	Naranja	Soiling, depósito
N22	Rosa oscuro	Soiling, depósito
N23	Rosa oscuro	Soiling, depósito
N24	Naranja	Soiling, depósito, erosión
N25	Naranja	Soiling, depósito, erosión
N26	Naranja	Soiling
N27	Naranja	Soiling, depósito
N28	Naranja	Soiling
N29	Rosa oscuro	Soiling, depósito
N30	Rosa oscuro	Soiling, depósito, decoloración
N31	Naranja	Soiling, depósito, decoloración
N32	Naranja	Soiling, depósito, decoloración
N33	Naranja	Soiling, erosión
W1	Rosa oscuro	Soiling, depósito, descamación
W2	Naranja	Soiling, perforación, tinción
W3	Rosa oscuro	Soiling, depósito, descamación, perforación, erosión, tinción, eflorescencia
W4	Rosa oscuro	Soiling, depósito, descamación, eflorescencia
W5	Rosa oscuro	Soiling, depósito, descamación, eflorescencia
W6	Naranja	Soiling, grafiti, fragmentación

W7	Naranja	Soiling, blistering, descamación, perforación, erosión
W8	Naranja	Soiling, grafiti, fragmentación, erosión
W9	Naranja	Soiling, depósito, fragmentación, perforación, erosión, tinción
W10	Naranja	Soiling, depósito, descamación, fragmentación, erosión
W11	Naranja	Soiling
W12	Naranja	Soiling
W13	Naranja	Soiling, decoloración
W14	Naranja	Soiling, fragmentación
W15	Naranja	Soiling, grafiti
W16	Naranja	Soiling, depósito, grafiti, fragmentación, decoloración
W17	Naranja	Soiling
W18	Naranja	Soiling, grieta, grafiti, erosión
W19	Rosa oscuro	Soiling
W20	Naranja	Soiling, decoloración
W21	Naranja	Soiling, fragmentación, decoloración
W22	Naranja	Soiling, decoloración
W23	Naranja	Depósito, erosión, decoloración
W24	Naranja	Soiling, depósito, decoloración, eflorescencia
W25	Naranja	Soiling, fragmentación
W26	Rosa oscuro	Soiling, depósito, decoloración
W27	Naranja	Soiling, depósito, erosión, decoloración
W28	Rosa oscuro	Soiling, fragmentación, decoloración
W29	Rosa oscuro	Decoloración
W30	Rosa oscuro	Decoloración
W31	Rosa oscuro	Depósito, fragmentación, decoloración
W32	Naranja	Soiling, erosión
W33	Naranja	Soiling, depósito, erosión
W34	Rosa oscuro	Soiling, depósito, decoloración
W35	Rosa oscuro	Soiling, depósito, decoloración
W36	Naranja	Soiling, depósito, erosión
W37	Naranja	Soiling, depósito, decoloración
W38	Naranja	Soiling, erosión
W39	Naranja	Depósito
W40	Naranja	Depósito
S1	Rosa oscuro	Soiling, fragmentación, descamación, blistering, grieta
S2	Rosa claro	Soiling, depósito, descamación
S3	Rosa oscuro	Soiling, depósito, fragmentación, descamación, erosión, blistering, grieta
S4	Naranja	Soiling, depósito, descamación, erosión, eflorescencia
S5	Rosa claro	Soiling, depósito, fragmentación, descamación, eflorescencia
S6	Rosa oscuro	Soiling, fragmentación, descamación
S7	Rosa oscuro	Soiling, depósito, fragmentación, tinción
S8	Naranja	Soiling, depósito, fragmentación, descamación, erosión
S9	Naranja	Soiling, depósito, fragmentación, descamación, blistering
S10	Rosa oscuro	Soiling, depósito, descamación
S11	Naranja	Soiling, depósito, descamación, blistering, grieta
S12	Naranja	Soiling, depósito, fragmentación, descamación, blistering, grafiti
S13	Naranja	Soiling, depósito, fragmentación, grieta
S14	Naranja	Soiling, erosión

S15	Rosa oscuro	Decoloración
S16	Naranja	Soiling, depósito, fragmentación
S17	Naranja	Soiling, fragmentación
S18	Rosa oscuro, naranja	Soiling, depósito, erosión, decoloración
S19	Naranja	Soiling, fragmentación, erosión, eflorescencia
S20	Naranja	Soiling, fragmentación, eflorescencia
S21	Rosa oscuro	Soiling
S22	Naranja	Soiling, fragmentación
S23	Naranja	Soiling, depósito
S24	Naranja	Soiling
S25	Rosa oscuro	Soiling, decoloración
S26	Rosa oscuro	Soiling, depósito
S27	Rosa oscuro	Soiling, depósito, decoloración
S28	Naranja	Soiling, depósito, decoloración
S29	Rosa oscuro	Soiling, depósito
S30	Naranja	Soiling
S31	Naranja	Soiling, decoloración
S32	Naranja	Soiling, depósito
S33	Naranja	Soiling, decoloración
S34	Rosa oscuro	Soiling, depósito, decoloración
S35	Naranja	Soiling, decoloración
S36	Naranja	Soiling
E1	Rosa oscuro	Soiling, depósito, erosión, costra, fragmentación, eflorescencia, faltante, decoloración, descamación, tinción
E2	Naranja	Soiling, depósito, erosión, grieta, fragmentación, eflorescencia, descamación, grafiti
E3	Naranja, rosa oscuro	Soiling, depósito, eflorescencia, descamación
E4	Naranja	Soiling, depósito, grieta, eflorescencia, descamación, blistering
E5	Naranja	Soiling, depósito, erosión, grieta, fragmentación, descamación, grafiti, blistering
E6	Naranja	Soiling, depósito
E7	Indistinguible	Soiling, depósito
E8	Naranja	Soiling, depósito, erosión, fragmentación, grafiti
E9	Naranja	Soiling, depósito, erosión, grieta, fragmentación, eflorescencia, descamación, tinción
E10	Naranja	Soiling, depósito, erosión, fragmentación, eflorescencia, blistering
E11	Indistinguible	Depósito
E12	Naranja	Soiling, depósito, erosión, eflorescencia
E13	Rosa oscuro	Fragmentación, eflorescencia
E14	Naranja	Depósito, erosión, eflorescencia
E15	Naranja	Soiling, depósito, grieta, eflorescencia
E16	Rosa oscuro	Soiling, depósito, eflorescencia
E17	Rosa oscuro	Soiling, depósito, grieta
E18	Naranja	Soiling, depósito, blistering
E19	Rosa oscuro	Soiling, fragmentación



E20	Naranja	Soiling, depósito, erosión
E21	Rosa oscuro	Depósito
E22	Naranja	Soiling, depósito, erosión
E23	Rosa oscuro	Soiling, depósito, erosión
E24	Naranja	Soiling, depósito, erosión
E25	Rosa oscuro	Soiling, depósito
E26	Naranja	Soiling, depósito
E27	Naranja	Soiling, erosión, grieta
E28	Rosa oscuro	Soiling, depósito, erosión
E29	Rosa oscuro	Depósito, decoloración
E30	Indistinguible	Depósito
E31	Naranja	Depósito, decoloración
E32	Rosa oscuro	Soiling, depósito, erosión, eflorescencia
E33	Naranja	-
E34	Naranja	Depósito, tinción
E35	Naranja	Depósito, erosión, eflorescencia
E36	Naranja	Soiling
E37	Naranja	Soiling, erosión, decoloración
E38	Naranja	Soiling, depósito, erosión, decoloración
E39	Naranja	Soiling, depósito, decoloración
E40	Naranja	Soiling, depósito, decoloración

## Anexo 5. Litología y deterioro del Templo Norte

Bloque	Litología	Patrones de deterioro
1	Caliza	Grietas, colonización biológica
2	Caliza	Colonización biológica
3	Caliza	Perforaciones, colonización biológica
4	Caliza	Colonización biológica
5	Caliza	Colonización biológica
6	Caliza	Colonización biológica
7	Caliza	-
8	Caliza	-
9	Caliza	-
10	Caliza	-
11	Caliza	Perforaciones
12	Caliza	Grietas, colonización biológica, pitting, microkarstificación
13	Caliza	Colonización biológica
14	Caliza	Perforaciones, colonización biológica
15	Caliza	Perforaciones, colonización biológica
16	Caliza	Colonización biológica
17	Caliza	Perforaciones
18	Caliza	-
19	Caliza	-
20	Caliza	Perforaciones
21	Caliza	-
22	Caliza	-
23	Caliza	Perforaciones
24	Caliza	Perforaciones, colonización biológica
25	Caliza	Colonización biológica
26	Caliza	Colonización biológica
27	Caliza	-
28	Caliza	-
29	Caliza	-
30	Caliza	Grietas
31	Caliza	-
32	Caliza	Microkarstificación
33	Caliza	Pitting, microkarstificación, colonización biológica
34	Caliza	Perforaciones, pitting, microkarstificación
35	Caliza	Colonización biológica
36	Caliza	Colonización biológica
37	Caliza	-
38	Caliza	Grietas, perforaciones, erosión
39	Caliza	Grietas
40	Caliza	Grietas
41	Caliza	-
42	Caliza	-
43	Caliza	-
44	Caliza	Microkarstificación, colonización biológica
45	Caliza	Microkarstificación, colonización biológica

46	Caliza	Colonización biológica
47	Caliza	Colonización biológica
48	Caliza	-
49	Caliza	-
50	Caliza	-
51	Caliza	-
52	Caliza	-
53	Caliza	Colonización biológica
54	Caliza	Pitting, microkarstificación, colonización biológica
55	Caliza	Colonización biológica
56	Caliza	-
57	Caliza	Erosión
58	Brecha	Perforaciones, microkarstificación
59	Brecha	Microkarstificación
60	Brecha	Perforaciones
61	Brecha	Colonización biológica
62	Caliza	Erosión, colonización biológica
63	Caliza	Colonización biológica
64	Brecha	Erosión, colonización biológica
65	Brecha	Colonización biológica
66	Brecha	-
67	Brecha	-
68	Brecha	-
69	Brecha	Microkarstificación
70	Caliza	Microkarstificación
71	Caliza	Pitting, colonización biológica
72	Caliza	Colonización biológica
73	Caliza	Pitting, microkarstificación, colonización biológica
74	Caliza	Colonización biológica
75	Caliza	Pitting, microkarstificación, colonización biológica
76	Brecha	Perforaciones
77	Brecha	-
78	Caliza	-
79	Caliza	Erosión
80	Caliza	Microkarstificación, colonización biológica
81	Caliza	Perforaciones, pitting, colonización biológica
82	Caliza	Perforaciones, pitting, microkarstificación, colonización biológica
83	Caliza	Perforaciones, microkarstificación, colonización biológica
84	Caliza	Microkarstificación
85	Brecha	Microkarstificación
86	Caliza	Microkarstificación
87	Brecha	Microkarstificación
88	Caliza	Microkarstificación
89	Caliza	Perforaciones, microkarstificación, colonización biológica
90	Brecha	Perforaciones, microkarstificación, colonización biológica
91	Brecha	Microkarstificación, colonización biológica
92	Brecha	Microkarstificación
93	Caliza	Perforaciones, microkarstificación

94	Brecha	Perforaciones, microkarstificación
95	Brecha	Microkarstificación
96	Caliza	Microkarstificación
97	Caliza	Colonización biológica
98	Brecha	Colonización biológica
99	Caliza	Colonización biológica
100	Caliza	Colonización biológica
101	Caliza	Perforaciones, microkarstificación, colonización biológica
102	Brecha	Microkarstificación
103	Caliza	Grietas
104	Caliza	-
105	Caliza	Perforaciones, microkarstificación
106	Caliza	Colonización biológica
107	Brecha	Microkarstificación, colonización biológica
108	Caliza	Colonización biológica
109	Caliza	Pitting, colonización biológica
110	Caliza	Colonización biológica
111	Brecha	Perforaciones, colonización biológica
112	Caliza	Microkarstificación, colonización biológica
113	Brecha	Perforaciones, microkarstificación, colonización biológica
114	Brecha	-
115	Caliza	Grietas
116	Brecha	-
117	Caliza	-
118	Caliza	-
119	Brecha	Microkarstificación
120	Caliza	Perforaciones, colonización biológica
121	Caliza	Microkarstificación, colonización biológica
122	Caliza	Microkarstificación, colonización biológica
123	Caliza	Microkarstificación, colonización biológica
124	Caliza	Colonización biológica
125	Caliza	-
126	Caliza	-



## Anexo 6. Espectrometría de rayos gamma en el afloramiento de la Ignimbrita Cantera

Punto	Datos originales					Coloración	Configuración	Datos corregidos a 0.0% de humedad						
	Total [cps]	K [cpm]	U [cpm]	Th [cpm]	Humedad [%]			Total [cps]	K [cpm]	K [%]	U [cpm]	U [ppm]	Th [cpm]	Th [ppm]
P1DAR1	128.72	486.22	107.11	86.74	0.5000	Rosa claro-rosa oscuro	Normal	131.12	516.53	7.2	115.39	9.5	89.82	52.5
P1DAR2	124.66	490.40	99.77	75.33	0.5000	Rosa claro-rosa oscuro	Normal	128.63	506.33	7.0	116.51	10.9	82.61	48.2
P1DM3	126.14	494.59	108.70	79.46	0.4000	Rosa oscuro	Normal	129.31	507.33	7.0	115.32	10.8	81.92	47.8
P1DM4	127.54	530.80	125.39	84.18	0.5000	Rosa oscuro	Normal	130.77	525.94	7.2	123.67	11.6	87.26	50.9
P1DAb5	128.06	518.23	122.21	81.52	0.6000	Rosa oscuro	Normal	131.16	524.91	7.2	123.45	11.9	85.21	49.7
P1DAb6	125.65	521.03	115.97	93.13	0.7000	Rosa oscuro	Piso	131.20	525.60	7.2	122.72	11.2	88.71	51.8
P1IAR1	128.53	492.00	115.45	90.88	0.0000	Rosa claro	Normal	128.53	515.48	7.2	115.45	9.9	87.59	51.2
P1IAR2	126.18	516.03	119.62	74.84	0.0000	Rosa claro	Normal	127.51	516.03	7.1	119.62	11.7	81.99	47.8
P1IM3	127.63	507.33	127.11	90.37	0.6000	Rosa claro	Esquina	131.04	526.44	7.2	124.09	11.6	88.18	51.5
P1IAb4	128.91	548.94	129.63	90.81	0.7000	Rosa claro	Esquina	131.55	527.95	7.2	124.58	11.7	88.36	51.6
P1IAb5	127.28	526.72	120.33	92.13	1.0000	Rosa claro-rosa oscuro	Esquina, piso	131.71	526.99	7.2	124.07	11.5	88.83	51.9
P2AR1	129.26	564.08	131.98	82.74	0.5000	Naranja	Esquina	131.26	528.55	7.2	124.47	12.0	85.82	50.1
P2M2	123.52	503.49	120.84	92.61	0.3000	Rosa claro	Esquina	127.43	513.05	6.9	125.81	11.9	88.26	51.6
P2M3	124.73	528.73	113.33	97.68	0.6000	Naranja	Esquina	129.49	526.05	7.2	123.26	11.2	89.23	52.1
P2Ab4	129.72	525.72	102.74	95.67	0.7000	Naranja	Esquina	131.72	526.07	7.4	114.33	9.4	89.06	52.0
P2Ab5	127.32	527.33	125.10	80.20	1.0000	Naranja	Esquina, piso	131.72	527.04	7.2	124.62	12.0	86.35	50.4
P3DAR1	134.09	539.04	143.53	91.79	0.0000	Rosa claro	Esquina	131.46	525.11	7.2	124.81	11.8	87.78	51.3
P3DAR2	130.74	547.56	124.30	80.05	0.0000	Rosa claro	Normal	130.74	526.02	7.2	124.30	12.5	82.94	48.4
P3DM3	129.41	515.14	105.52	79.46	0.2000	Rosa claro-naranja	Normal	131.00	521.51	7.3	116.62	11.2	80.69	47.1
P3DM4	126.77	506.16	127.98	81.52	0.3000	Rosa claro-naranja	Normal	129.15	515.72	7.0	123.57	12.3	83.37	48.6
P3DAb5	124.25	497.28	106.61	74.84	0.6000	Rosa claro	Borde, piso	129.01	516.39	7.2	116.54	10.9	82.63	48.2
P3IAR1	130.95	532.63	123.74	110.99	0.0000	Rosa claro	Esquina	130.95	532.63	7.3	123.74	11.2	90.29	52.7
P3IAR2	128.16	511.90	119.21	89.18	0.0000	Rosa claro	Esquina	128.16	511.90	7.0	119.21	10.4	89.18	52.1
P3IM3	125.46	487.93	141.82	93.33	0.0000	Rosa claro-naranja	Borde	127.32	515.11	7.0	124.64	11.7	88.06	51.4

P3IM4	124.09	500.28	117.54	75.92	0.3000	Rosa claro-naranja	Normal	127.60	509.84	6.9	122.51	12.2	82.49	48.1
P3IAb5	125.69	524.13	123.19	87.54	0.6000	Rosa claro	Piso	130.45	525.58	7.2	123.59	11.6	87.66	51.2
P3EI1	125.95	513.03	100.11	100.86	0.0000	Rosa claro-café	Borde	127.45	513.03	7.1	115.50	9.6	89.17	52.1
P4IAr1	125.05	487.16	104.78	92.13	0.3000	Rosa oscuro	Esquina	127.43	515.94	7.2	116.77	10.1	88.18	51.5
P4IAr2	125.00	525.52	111.70	83.21	0.6000	Rosa oscuro	Esquina	129.76	525.73	7.3	121.63	11.3	86.90	50.7
P4IM3	115.65	477.55	98.35	73.87	0.6000	Rosa oscuro	Esquina	126.30	515.93	7.2	116.54	10.9	82.44	48.1
P4IM4	116.94	495.88	97.23	78.24	0.6000	Rosa oscuro-café	Esquina	126.52	514.99	7.2	116.38	11.0	81.93	47.8
P4IAb5	118.43	483.86	106.41	83.68	0.6000	Rosa oscuro	Esquina	126.81	516.62	7.2	116.34	10.1	87.37	51.0
P4IAb6	118.92	497.48	113.83	83.12	0.7000	Rosa oscuro-café	Esquina, piso	127.08	519.78	7.1	125.42	12.0	87.43	51.0
P4DAr1	132.42	524.51	124.89	86.74	0.0000	Rosa oscuro	Normal	131.04	524.51	7.2	124.89	12.0	86.74	50.6
P5Ar1	124.13	517.11	113.83	74.33	0.4000	Rosa oscuro	Esquina	127.31	529.85	7.4	120.45	11.8	82.31	48.0
P5Ar2	122.43	494.47	128.74	85.67	0.6000	Rosa oscuro	Esquina	127.83	513.58	7.0	124.29	11.4	89.36	52.2
P5Ar3	118.11	484.86	107.93	79.73	0.6000	Rosa oscuro	Esquina	126.74	516.74	7.2	117.86	11.1	83.42	48.7
P5M4	116.64	475.94	102.13	87.66	0.6000	Rosa oscuro	Esquina	126.47	515.77	7.2	117.15	10.2	87.69	51.2
P5M5	119.92	523.32	96.72	79.17	1.0000	Rosa oscuro-café	Esquina	127.85	526.71	7.5	113.27	9.8	85.32	49.8
P5Ab6	120.45	522.32	114.44	90.13	1.2000	Rosa oscuro-café	Esquina	129.96	527.15	7.2	123.75	11.4	88.72	51.8
P5Ab7	119.16	477.04	113.83	79.73	1.0000	Rosa oscuro-café	Esquina, piso	127.79	508.89	6.9	123.19	11.8	85.88	50.1

## Anexo 7. Espectrometría de rayos gamma en la Caja del Agua Conservera

Bloque	Datos originales					Superficie	Configuración	Datos corregidos a 0.0% de humedad						
	Total [cps]	K [cpm]	U [cpm]	Th [cpm]	Humedad [%]			Total [cps]	K [cpm]	K [%]	U [cpm]	U [ppm]	Th [cpm]	Th [ppm]
N1Ab	119.78	502.19	101.52	82.17	0.2500	Uniforme	Piso, esquina	118.92	485.84	6.92	102.75	7.60	85.27	49.87
N1Ar	114.27	489.37	102.03	79.17	0.0000	Uniforme	Esquina	114.27	489.37	7.00	102.03	7.88	82.64	48.30
N2Ab	119.29	527.03	106.30	86.13	0.3000	Uniforme	Piso	118.96	487.77	6.93	103.69	7.04	89.85	52.59
N2Ar	118.51	475.45	101.00	82.51	0.4000	Uniforme	Normal	119.07	505.33	7.27	103.26	7.35	87.47	51.16
N3	117.42	506.79	109.56	79.64	0.3000	Uniforme	Piso, esquina	121.62	486.46	6.90	104.11	8.19	83.36	48.73
N4FAB	115.95	527.60	99.32	74.26	0.0000	Uniforme	Piso, borde	115.95	486.34	7.00	99.32	7.45	81.78	47.80
N4FAR	116.11	482.11	97.25	95.59	0.4000	Cóncava	Piso, borde	121.71	485.11	6.81	106.79	7.83	89.00	52.08
N4LAB	124.52	536.94	99.37	92.61	0.2000	Uniforme	Piso, esquina	119.60	487.91	6.92	104.14	7.40	88.23	51.63
N4LAR	129.84	563.79	116.54	103.29	0.0000	Cóncava	Piso, esquina	119.95	488.59	6.94	104.08	7.21	89.34	52.29
N5Ab	113.22	485.06	107.93	88.04	0.3000	Uniforme	Piso	117.42	484.70	6.87	103.91	7.45	87.65	51.29
N5Ar	118.48	495.19	102.32	111.89	0.3000	Cóncava	Piso	118.80	485.58	6.90	103.10	6.80	90.59	53.04
N6Ab	114.05	484.06	106.31	80.11	0.0000	Uniforme	Piso	114.05	484.06	6.81	106.31	9.18	80.11	46.79
N6Ar	115.89	475.32	94.42	106.85	0.0000	Cóncava	Piso	115.89	475.32	6.90	94.42	5.12	89.74	52.57
N7Ab	113.01	465.12	105.80	75.72	0.0000	Uniforme	Piso	113.01	465.12	6.46	105.80	8.76	82.01	47.95
N7Ar	114.14	504.08	97.25	99.71	0.0000	Cóncava	Piso	114.14	504.08	7.38	97.25	5.86	88.90	52.03
N8FAB	118.98	502.57	105.92	94.93	0.0000	Uniforme	Piso, borde	118.98	502.57	7.16	105.92	7.78	88.21	51.59
N8FAR	118.66	517.26	103.51	99.34	0.3000	Cóncava	Piso, borde	118.84	487.16	6.93	103.29	7.05	89.31	52.28
N8LAB	121.00	498.48	102.13	89.08	0.0000	Uniforme	Piso, esquina	121.00	498.48	7.17	102.13	6.85	89.08	52.13
N8LAR	123.92	523.75	101.89	104.44	0.0000	Cóncava	Piso, esquina	119.04	486.06	6.94	101.89	6.73	89.47	52.37
N9	132.82	568.68	115.46	88.61	0.1000	Uniforme	Piso, esquina	120.51	489.24	6.94	104.25	7.16	89.85	52.59
N10Ab	125.09	509.70	103.15	88.61	0.0000	Uniforme	Piso, esquina	119.24	484.90	6.89	103.15	7.13	88.61	51.86
N10Ar	123.09	515.81	110.68	84.63	0.0000	Uniforme	Esquina	118.88	485.43	6.90	103.28	7.81	84.63	49.49
N11	116.34	513.50	103.66	79.64	0.3000	Uniforme	Esquina	120.54	486.92	6.93	103.31	8.02	83.36	48.73
N12Ab	104.20	425.42	75.81	81.92	0.0000	Uniforme	Normal	112.80	472.05	6.82	95.10	6.54	81.92	47.92
N12Ar	110.16	439.57	89.93	79.95	0.2000	Uniforme	Normal	112.96	454.51	6.50	94.70	6.37	82.43	48.24
N13	129.49	540.24	110.68	114.88	0.3000	Uniforme	Esquina	120.45	488.52	6.93	104.25	6.99	90.86	53.19
N13FAB	107.80	437.74	111.18	78.51	0.5000	Irregular	Borde	114.80	475.09	6.67	104.83	8.12	84.72	49.55
N13FAR	92.02	402.68	87.57	72.21	0.3000	Convexa	Borde, borde	111.79	472.03	6.83	94.73	6.45	82.04	47.99
N13FM	106.87	422.61	103.08	80.71	0.5000	Uniforme	Borde	113.87	459.96	6.40	103.90	7.56	86.92	50.88
N13LAB	122.19	504.39	101.52	89.65	0.3000	Irregular	Esquina	119.45	486.28	6.92	102.97	7.20	87.95	51.47
N13LAR	111.85	482.52	93.16	87.32	0.0000	Convexa	Esquina, borde	111.85	482.52	7.06	93.16	5.26	87.32	51.12
N13LM	129.84	568.08	126.62	85.19	0.1500	Uniforme	Esquina	120.23	489.40	6.92	105.52	7.88	87.05	50.92
N14Ab	105.23	420.41	109.49	82.30	0.5000	Irregular	Normal	112.23	457.76	6.34	104.65	7.46	88.51	51.83
N14Ar	91.38	371.60	77.12	79.22	0.5000	Convexa	Borde	112.04	471.01	6.77	96.71	6.31	85.43	50.00
N14M	103.62	416.45	72.45	73.18	0.5000	Uniforme	Normal	110.62	453.80	6.46	96.07	7.16	79.39	46.43
N15Ab	111.13	462.79	99.10	86.16	0.3000	Irregular	Normal	115.33	485.20	6.82	106.26	7.57	89.88	52.61
N15Ar	98.70	393.65	88.31	88.85	0.6000	Convexa	Borde	113.24	473.00	6.67	102.62	7.05	88.42	51.76
N15M	108.01	438.47	81.51	83.49	0.4500	Uniforme	Normal	114.31	472.09	6.77	97.23	5.82	89.07	52.17
N16Ab	106.28	420.32	110.41	84.42	0.3000	Irregular	Normal	110.48	473.34	6.65	104.21	7.43	88.14	51.59



N16Ar	99.69	442.86	93.85	83.90	0.5000	Convexa	Borde	113.18	480.21	6.74	105.78	7.43	90.11	52.75
N16M	104.86	432.19	81.51	76.81	0.5000	Uniforme	Normal	111.86	469.54	6.81	93.44	6.02	83.02	48.58
N17Ab	107.86	414.73	105.67	82.30	0.5000	Irregular	Normal	114.86	474.17	6.66	104.22	7.37	88.51	51.81
N17Ar	92.92	391.46	96.97	75.30	0.3000	Convexa	Borde	111.90	471.30	6.61	104.13	8.31	82.61	48.30
N17M	103.40	424.32	78.08	74.26	0.5500	Uniforme	Normal	111.09	465.41	6.66	97.05	7.09	81.09	47.42
N18	132.29	563.37	119.21	96.15	0.5000	Uniforme	Esquina	121.07	490.41	6.94	105.60	7.54	89.23	52.21
N18FAb	108.34	449.29	114.43	91.31	0.4000	Irregular	Borde	113.94	479.17	6.74	104.91	7.53	88.41	51.74
N18FAr	87.37	364.00	79.74	78.23	0.4000	Convexa	Borde, borde	111.45	470.15	6.75	96.74	6.68	83.19	48.67
N18FM	109.78	437.84	115.32	86.29	0.5000	Uniforme	Borde	116.78	475.19	6.66	105.24	7.70	87.80	51.38
N18LAb	111.79	465.12	102.00	90.03	0.5000	Irregular	Esquina	118.79	502.47	7.21	103.75	7.29	88.42	51.72
N18LAr	99.90	416.28	85.76	79.43	0.3000	Convexa	Esquina, borde	112.78	473.02	6.89	92.92	5.89	83.15	48.66
N18LM	120.39	515.81	103.15	80.20	0.4000	Uniforme	Esquina	119.39	487.54	6.93	103.58	7.79	85.16	49.80
N19Ab	106.33	446.84	78.08	77.79	0.4000	Uniforme	Normal	111.93	476.72	6.88	96.50	6.70	82.75	48.40
N19Ar	91.50	407.12	82.22	80.01	0.5000	Convexa	Borde	112.06	473.49	6.87	94.15	5.64	86.22	50.47
N20	110.25	494.47	90.16	89.08	0.6000	Uniforme	Esquina	118.64	487.14	6.90	104.47	7.43	88.46	51.76
N21D	104.66	415.96	87.60	69.66	0.1000	Uniforme	Normal	113.08	471.92	6.78	96.86	7.01	81.30	47.54
N21I	109.74	462.59	82.05	72.69	0.0000	Uniforme	Normal	113.71	462.59	6.63	95.78	6.74	81.55	47.71
N22D	106.56	418.15	87.06	61.96	0.4000	Uniforme	Normal	112.16	473.80	6.82	96.60	7.04	80.81	47.25
N22I	109.69	450.53	92.05	80.93	0.3000	Uniforme	Normal	113.89	472.94	6.75	99.21	6.95	84.65	49.53
N23	115.49	475.35	80.44	81.52	0.2000	Uniforme	Normal	118.29	490.29	7.15	96.17	6.43	84.00	49.13
N24D	108.21	429.40	83.23	72.79	0.2500	Uniforme	Normal	111.71	473.81	6.82	96.73	6.87	82.04	47.98
N24I	108.46	443.25	87.70	86.64	0.2000	Uniforme	Normal	111.26	458.19	6.51	97.27	5.82	89.12	52.21
N24M	108.02	428.61	83.76	82.51	0.3000	Uniforme	Normal	112.22	474.07	6.82	97.01	6.24	86.23	50.48
N25	105.25	430.60	99.32	81.42	0.3000	Uniforme	Normal	113.66	453.01	6.21	106.48	8.39	85.14	49.82
N26Ab	111.75	453.32	82.05	68.09	0.2000	Uniforme	Normal	114.55	468.26	6.72	96.39	6.92	81.26	47.53
N26Ar	107.58	464.08	83.23	69.07	0.3000	Uniforme	Normal	111.78	486.49	7.06	96.92	6.98	81.56	47.68
N26M	109.60	449.53	92.16	64.00	0.4000	Uniforme	Normal	115.20	479.41	6.82	101.70	8.07	81.05	47.37
N27D	116.22	464.88	99.32	87.13	0.2500	Uniforme	Normal	119.72	483.56	6.81	105.28	7.31	90.23	52.82
N27I	110.01	444.35	77.00	76.32	0.1500	Uniforme	Normal	112.11	455.56	6.50	95.61	6.56	82.44	48.25
N28D	110.04	469.37	86.00	72.69	0.5500	Uniforme	Normal	117.73	484.98	6.98	99.12	7.78	79.52	46.46
N28I	104.43	452.02	94.80	67.51	0.2500	Uniforme	Normal	113.38	470.70	6.67	100.76	7.83	81.27	47.52
N29D	112.43	473.55	88.23	73.18	0.3500	Uniforme	Normal	117.33	499.70	7.32	96.58	6.79	82.32	48.12
N29I	108.26	409.28	93.74	68.58	0.3500	Uniforme	Normal	113.16	472.77	6.68	102.09	8.06	81.58	47.69
N30	112.42	454.71	87.70	70.63	0.4000	Uniforme	Normal	118.02	484.59	7.01	97.24	6.98	81.99	47.94
N31Ab	117.00	488.03	105.76	82.06	0.6000	Uniforme	Esquina	119.29	486.71	6.89	104.50	7.27	89.51	52.39
N31D	116.80	521.42	98.86	83.59	0.4000	Uniforme	Esquina	118.75	487.88	6.95	102.91	7.09	88.55	51.82
N31I	116.43	492.50	102.05	72.20	0.4000	Uniforme	Normal	122.03	485.96	6.91	103.42	8.23	82.25	48.07
N32	100.79	435.30	86.63	84.81	0.3000	Convexa, irregular	Normal	112.91	457.71	6.58	93.79	5.18	88.53	51.87
N33	98.78	421.63	106.00	78.61	0.3000	Convexa, irregular	Normal	112.63	473.45	6.66	103.65	8.26	82.33	48.14
N34	110.42	443.65	90.28	84.61	0.3000	Convexa, irregular	Esquina	114.62	466.06	6.66	97.44	5.98	88.33	51.73
N35	107.48	439.36	93.70	93.62	0.4500	Convexa, irregular	Normal	113.78	472.98	6.63	104.43	7.36	88.83	52.00

N36	103.62	413.68	68.04	77.36	0.4000	Convexa, irregular	Normal	113.62	473.41	6.85	95.28	6.52	82.32	48.16
N37D	103.03	433.96	100.29	84.61	0.3000	Convexa, irregular	Normal	113.27	456.37	6.25	107.45	8.07	88.33	51.72
N37I	102.58	441.35	85.22	87.66	0.4000	Convexa, irregular	Normal	113.43	471.23	6.81	94.76	5.51	87.81	51.43
N37M	102.10	425.67	84.04	74.11	0.3000	Convexa, irregular	Normal	113.11	473.80	6.81	97.05	6.87	82.38	48.18
N38D	100.76	404.09	85.76	73.65	0.3000	Convexa, irregular	Normal	112.91	472.13	6.87	92.92	6.03	82.29	48.15
N38I	100.82	425.07	80.68	80.24	0.3500	Convexa, irregular	Normal	113.02	474.10	6.83	96.71	6.44	84.58	49.50
N39D	100.28	411.98	87.49	79.84	0.3500	Convexa, irregular	Normal	112.94	472.98	6.82	95.84	6.33	84.18	49.26
N39I	99.87	412.98	70.92	74.03	0.4000	Convexa, irregular	Normal	112.99	473.36	6.84	95.60	6.54	82.60	48.32
N40D	105.28	432.96	76.10	78.15	0.3000	Convexa, irregular	Normal	113.67	455.37	6.49	95.93	6.72	81.87	47.91
N40I	101.18	425.07	67.37	85.45	0.3000	Convexa, irregular	Normal	112.97	473.75	6.85	94.98	5.33	89.17	52.23
N41D	107.46	427.37	89.74	79.43	0.4000	Convexa, irregular	Normal	113.06	457.25	6.45	99.28	7.01	84.39	49.39
N41I	105.31	419.37	71.48	86.81	0.3000	Convexa, irregular	Normal	113.67	473.27	6.84	95.40	5.20	90.53	53.04
N42	114.68	450.95	84.68	101.53	0.3500	Convexa, irregular	Esquina	119.58	477.10	6.96	93.03	4.85	89.63	52.51
N43	115.22	457.21	106.81	87.09	0.6000	Uniforme	Esquina	118.98	502.03	7.18	104.61	7.52	88.15	51.56
N44	115.67	470.46	96.59	78.87	0.3000	Uniforme	Normal	119.87	492.87	7.03	103.75	8.24	82.59	48.27
N45	110.00	442.26	98.80	71.71	0.3000	Uniforme	Normal	114.20	464.67	6.45	105.96	8.80	81.96	47.92
N49	110.93	455.71	86.00	73.77	0.3000	Uniforme	Normal	115.13	478.12	6.98	93.16	6.08	82.31	48.15
N50	116.77	494.57	92.42	78.70	0.5000	Uniforme	Esquina	119.01	486.65	6.90	104.35	7.99	84.91	49.65
N51	116.72	488.76	98.86	84.06	0.3000	Uniforme	Esquina	120.92	485.04	6.83	106.02	7.87	87.78	51.36
N52	113.12	480.05	89.89	86.66	0.7000	Irregular	Normal	118.84	486.68	6.85	106.59	7.90	88.28	51.65
N53	111.45	477.14	76.46	78.87	0.6000	Uniforme	Normal	119.84	485.92	7.04	96.98	6.22	86.32	50.51
N55Ar	108.39	467.07	83.76	76.32	0.3000	Uniforme	Normal	112.59	489.48	7.11	97.01	7.25	80.04	46.77
N56	110.41	450.53	88.23	87.63	0.6000	Uniforme	Normal	118.80	495.35	7.10	102.54	7.07	88.24	51.63
N58	118.27	504.59	103.66	87.09	0.6000	Uniforme	Esquina	119.49	487.77	6.92	104.26	7.44	88.15	51.58
N60D	111.99	437.66	104.22	95.12	0.6000	Irregular	Normal	120.38	482.48	6.82	104.32	7.27	89.26	52.24
N61	107.24	427.51	93.21	64.00	0.5000	Uniforme	Normal	114.24	464.86	6.47	105.14	8.75	81.22	47.48
N62	105.07	427.91	87.60	73.18	0.5000	Uniforme	Normal	112.07	465.26	6.60	99.53	7.88	79.39	46.40
N63I	110.86	441.25	100.44	86.57	0.7000	Irregular	Normal	120.65	493.54	7.03	104.16	7.40	88.26	51.64
N65	125.87	509.00	103.15	79.17	0.7000	Uniforme	Esquina, techo	120.67	488.45	6.93	104.48	7.53	87.86	51.40
N67	116.73	479.44	93.21	80.93	0.7000	Uniforme	Normal	119.47	486.63	6.92	103.17	6.97	89.62	52.46
N68	117.78	495.59	95.96	80.44	0.5000	Uniforme	Normal	119.19	486.72	6.93	102.83	7.39	86.65	50.69
N69	113.92	449.03	90.46	78.87	0.7000	Uniforme	Normal	119.00	501.32	7.11	107.16	8.14	87.56	51.20
W1Ab	128.58	545.55	101.11	89.65	0.3000	Uniforme	Piso, esquina	120.34	488.81	6.97	102.90	7.19	87.95	51.46

W1Ar	121.93	501.69	107.93	83.12	0.3000	Uniforme	Esquina	119.41	486.09	6.89	103.91	7.58	86.84	50.80
W1M	126.34	520.21	110.17	95.19	0.3000	Uniforme	Esquina	120.05	487.35	6.91	104.19	7.32	88.79	51.96
W2	119.19	508.00	99.37	83.68	0.2000	Uniforme	Piso, esquina	121.99	486.00	6.89	104.14	7.74	86.16	50.40
W3FD	117.71	530.34	95.51	99.34	0.5500	Cóncava	Piso	119.29	489.00	6.97	102.96	6.92	89.67	52.48
W3FI	118.93	524.15	94.96	101.26	0.5000	Cóncava	Piso, borde	119.38	488.46	6.87	106.89	7.72	89.81	52.56
W3L	130.93	561.80	119.83	108.59	0.3000	Cóncava	Piso, esquina	120.62	489.64	6.93	105.22	7.29	90.29	52.85
W4	114.07	514.56	96.70	104.83	0.4000	Cóncava	Piso	119.67	487.46	6.87	106.24	7.54	90.04	52.70
W5	118.18	479.52	96.70	94.17	0.5000	Cóncava	Piso	119.26	485.52	6.90	102.96	7.03	88.99	52.08
W6	115.97	497.79	99.52	100.89	0.3000	Cóncava	Piso	120.17	485.79	6.83	106.68	7.72	89.49	52.37
W7F	116.61	482.11	104.05	96.00	0.4000	Cóncava	Piso, borde	118.71	485.11	6.88	103.70	7.17	89.05	52.12
W7L	123.78	530.04	101.89	97.83	0.3000	Cóncava	Piso, esquina	119.69	487.95	6.95	103.03	7.02	89.13	52.17
W8	128.93	522.42	112.31	102.20	0.3000	Uniforme	Piso, esquina	120.38	487.49	6.91	104.43	7.23	89.63	52.46
W9Ab	124.22	532.83	118.10	86.14	0.1500	Uniforme	Piso, esquina	119.44	487.44	6.90	104.68	7.55	88.00	51.49
W9Ar	125.27	515.63	116.89	96.92	0.3000	Uniforme	Esquina	119.91	487.06	6.89	104.93	7.44	89.01	52.09
W9M	126.34	528.23	127.11	109.04	0.3000	Uniforme	Esquina	120.05	487.84	6.88	105.88	7.42	90.33	52.87
W10	126.23	551.16	117.59	91.65	0.0000	Uniforme	Esquina	119.43	487.87	6.92	104.21	7.51	87.64	51.28
W10FAb	108.41	416.44	96.10	98.73	0.5000	Irregular	Borde	115.41	453.79	6.30	102.85	6.91	89.53	52.44
W10FAr	96.47	410.06	85.13	78.23	0.4000	Convexa	Borde, borde	112.51	473.12	6.85	94.67	6.25	83.19	48.68
W10FM	112.64	458.75	109.35	85.90	0.5000	Uniforme	Borde	119.64	496.10	7.07	104.64	7.59	87.73	51.32
W10LAb	127.53	549.76	102.13	99.22	0.5000	Irregular	Esquina	120.55	489.78	6.97	103.77	7.10	89.59	52.43
W10LAr	118.34	509.01	105.99	89.97	0.5000	Convexa	Esquina, borde	119.29	487.58	6.91	104.26	7.40	88.41	51.73
W10LM	131.84	559.27	124.59	92.13	0.5000	Uniforme	Esquina	121.03	490.23	6.92	106.07	7.72	88.72	51.91
W11Ab	109.88	428.79	104.22	78.95	0.3000	Irregular	Normal	114.08	474.09	6.68	103.39	8.15	82.67	48.34
W11Ar	92.75	397.74	87.25	73.27	0.1000	Convexa	Borde	111.57	470.79	6.76	96.80	6.91	81.82	47.85
W11M	108.73	450.03	93.92	66.53	0.3000	Uniforme	Normal	112.93	472.44	6.70	101.08	7.91	81.22	47.48
W12Ab	109.58	429.60	83.05	82.51	0.2000	Uniforme	Normal	112.38	473.50	6.82	96.53	6.34	84.99	49.74
W12Ar	91.47	356.44	78.66	77.05	0.2000	Convexa	Borde	111.58	469.01	6.75	95.95	7.11	79.53	46.50
W13Ab	111.24	467.98	104.76	77.32	0.3000	Irregular	Normal	115.44	490.39	6.99	103.47	8.44	81.04	47.35
W13Ar	91.69	398.24	81.16	75.63	0.0000	Convexa	Borde	111.31	470.39	6.78	95.68	6.65	82.00	47.96
W13M	108.20	434.29	95.51	70.63	0.3000	Uniforme	Normal	112.40	456.70	6.37	102.67	8.14	81.79	47.84
W14Ab	111.94	442.45	108.03	85.74	0.3000	Irregular	Normal	116.14	464.86	6.49	103.92	7.15	89.46	52.39
W14Ar	89.65	348.56	78.66	76.30	0.0000	Convexa	Borde	111.11	467.96	6.74	95.40	6.57	82.11	48.03
W14M	113.26	462.69	108.50	84.08	0.4000	Uniforme	Normal	118.86	492.57	7.01	104.26	7.29	89.04	52.11
W15	97.30	400.44	89.28	75.96	0.3000	Convexa	Borde	112.43	471.88	6.79	96.44	7.19	79.68	46.58
W16Ab	113.26	453.42	101.42	89.69	0.2000	Irregular	Normal	116.06	468.36	6.51	106.19	7.91	87.73	51.35
W16Ar	99.61	433.37	88.31	78.16	0.3000	Convexa	Borde	112.74	455.78	6.51	95.47	6.62	81.88	47.91
W16M	107.62	431.69	93.43	79.36	0.3000	Uniforme	Normal	111.82	454.10	6.36	100.59	7.50	83.08	48.61
W17	130.37	544.95	111.70	93.18	0.6000	Uniforme	Esquina	121.01	489.91	6.94	105.12	7.48	89.02	52.09
W17FAb	113.63	473.39	107.10	83.07	0.3000	Irregular	Borde	117.83	495.80	7.08	103.80	7.57	86.79	50.76
W17FAr	93.25	391.71	90.58	85.62	0.0500	Convexa	Borde, borde	111.55	470.24	6.74	97.15	6.27	86.24	50.48
W17FM	114.68	450.98	107.10	98.73	0.1000	Uniforme	Borde	116.08	458.45	6.39	103.10	7.06	88.93	52.08
W17LAb	116.49	493.17	102.03	79.64	0.3000	Irregular	Esquina	120.69	485.42	6.90	103.05	7.97	83.36	48.74
W17LAr	105.40	423.67	86.41	87.74	0.4000	Convexa	Esquina, borde	111.00	453.55	6.45	95.95	5.75	87.83	51.46
W17LM	118.01	509.40	125.00	92.13	0.4500	Uniforme	Esquina	119.11	487.38	6.87	105.99	7.72	88.62	51.86
W18	119.99	507.90	112.72	87.09	0.4500	Uniforme	Esquina	119.44	487.29	6.90	104.86	7.62	87.82	51.38

W19DAr	110.32	428.11	102.25	75.24	0.3000	Uniforme	Normal	114.52	474.03	6.69	103.09	8.10	82.60	48.30
W19DM	114.12	440.76	99.67	77.39	0.3000	Uniforme	Normal	118.32	463.17	6.40	106.83	9.12	81.11	47.41
W19IAb	115.52	487.86	102.03	90.60	0.5000	Uniforme	Esquina	118.77	486.17	6.90	103.76	7.28	88.50	51.79
W19IAr	115.87	496.28	93.44	85.57	0.6000	Uniforme	Esquina	119.09	487.25	6.94	102.80	7.18	87.89	51.43
W19IM	116.94	493.17	94.57	89.56	0.5500	Uniforme	Esquina	119.16	486.81	6.93	102.79	7.09	88.44	51.75
W21Ab	118.12	469.17	91.95	81.52	0.3000	Uniforme	Normal	118.73	491.58	7.10	99.11	6.84	85.24	49.86
W21Ar	113.06	486.71	91.35	77.89	0.2500	Uniforme	Normal	116.56	505.39	7.41	97.31	7.16	80.99	47.32
W21M	113.95	491.00	91.35	79.46	0.3000	Uniforme	Normal	118.15	485.23	7.00	98.51	7.05	83.18	48.64
W22	102.22	414.35	92.56	85.21	0.5000	Convexa, irregular	Normal	113.62	474.14	6.65	104.49	7.58	87.59	51.26
W24Ab	114.63	474.85	111.68	68.09	0.4000	Uniforme	Normal	120.23	504.73	7.24	104.62	8.59	81.60	47.66
W24Ar	109.87	457.31	97.59	78.38	0.4500	Uniforme	Normal	116.17	490.93	7.01	102.90	7.84	83.96	49.09
W24M	112.72	452.72	88.29	80.93	0.5000	Uniforme	Normal	119.72	490.07	7.05	100.22	6.76	87.14	50.98
W26Ar	106.96	448.44	102.74	72.20	0.5000	Uniforme	Normal	113.96	485.79	6.89	103.85	8.28	82.49	48.21
W26M	109.12	451.13	89.87	70.15	0.5000	Uniforme	Normal	116.12	488.48	6.99	101.80	7.91	82.12	47.99
W27D	112.73	455.91	105.92	70.15	0.3500	Uniforme	Normal	117.63	482.06	6.82	103.80	8.38	81.81	47.82
W27I	111.03	449.13	88.29	80.93	0.3000	Uniforme	Normal	115.23	471.54	6.81	95.45	6.17	84.65	49.54
W28D	111.25	487.21	92.44	80.44	0.4000	Uniforme	Normal	116.85	485.54	6.93	101.98	7.41	85.40	49.95
W28I	102.88	409.18	101.16	76.32	0.4000	Uniforme	Normal	113.48	473.05	6.66	103.29	8.36	81.28	47.51
W29	98.38	398.09	91.05	84.81	0.4000	Convexa, irregular	Normal	112.77	472.23	6.70	100.59	6.40	89.77	52.58
W30	118.30	506.76	101.26	77.89	0.2000	Uniforme	Normal	121.10	485.90	6.85	106.03	9.08	80.37	46.95
W32D	110.14	485.62	92.44	76.32	0.3000	Uniforme	Normal	114.34	484.75	6.97	99.60	7.79	80.04	46.77
W32IAb	114.40	497.68	102.84	79.95	0.3000	Uniforme	Normal	118.60	485.78	6.91	103.18	7.95	83.67	48.92
W32IAr	108.47	447.34	90.86	71.12	0.3000	Uniforme	Normal	112.67	469.75	6.72	98.02	7.16	81.87	47.88
W32M	108.74	458.30	92.93	73.77	0.3000	Uniforme	Normal	112.94	480.71	6.88	100.09	7.52	82.31	48.13
W33D	115.07	464.12	105.19	85.10	0.1000	Uniforme	Esquina	116.47	471.59	6.64	102.77	7.42	86.34	50.53
W33I	110.91	450.63	91.85	72.69	0.0000	Uniforme	Normal	110.91	474.04	6.82	97.16	7.04	81.55	47.69
W34	118.95	470.03	93.16	100.63	0.3000	Convexa, irregular	Esquina	118.90	492.44	7.09	100.32	6.40	89.46	52.37
W35	111.55	470.43	83.60	85.45	0.1500	Convexa, irregular	Normal	113.65	481.64	6.97	96.44	5.94	87.31	51.11
W36D	103.64	422.47	85.22	84.11	0.3000	Convexa, irregular	Normal	113.37	473.52	6.80	97.26	6.03	87.83	51.43
W36I	107.20	442.45	95.93	89.97	0.2500	Convexa, irregular	Normal	110.70	461.13	6.46	101.89	6.98	87.90	51.47
W37	105.76	419.87	100.29	86.81	0.0000	Convexa, irregular	Normal	113.03	471.68	6.70	100.29	6.83	86.81	50.81
W38	101.91	424.57	95.30	80.65	0.0000	Convexa, irregular	Normal	112.48	472.00	6.82	95.30	6.79	80.65	47.16
W39D	105.55	440.45	81.22	78.15	0.0000	Convexa, irregular	Normal	113.00	473.16	6.83	95.68	6.58	82.44	48.22
W39D	105.75	435.16	75.00	84.11	0.0000	Convexa, irregular	Normal	113.03	472.75	6.84	95.02	6.17	84.11	49.22
W39I	103.62	420.97	77.19	76.89	0.0000	Convexa, irregular	Normal	112.71	471.76	6.82	95.24	6.53	82.21	48.09

W39I	101.22	419.87	80.13	88.60	0.0000	Convexa, irregular	Normal	112.39	471.68	6.80	95.56	5.55	88.60	51.89
W39I	103.52	442.95	86.95	89.89	0.0000	Convexa, irregular	Normal	112.70	473.36	6.82	96.40	5.51	89.89	52.66
W40D	113.67	469.43	95.93	85.96	0.0000	Convexa, irregular	Normal	113.67	469.43	6.75	95.93	6.06	85.96	50.32
W40I	107.15	461.34	91.45	76.10	0.0000	Convexa, irregular	Normal	113.25	461.34	6.58	97.09	6.93	82.08	48.02
W41	117.58	501.91	93.16	87.32	0.0000	Convexa, irregular	Esquina	117.58	501.91	7.43	93.16	5.26	87.32	51.10
W42	117.78	512.50	116.98	87.56	0.5000	Uniforme	Esquina	119.19	487.79	6.89	105.40	7.70	88.02	51.50
W43	113.41	431.79	96.60	75.82	0.3000	Uniforme	Normal	117.61	454.20	6.30	103.76	8.74	79.54	46.50
W47	111.38	466.18	100.17	80.93	0.6000	Uniforme	Normal	119.77	485.02	6.87	103.82	7.31	88.38	51.72
W48	116.49	507.65	94.52	77.89	0.6000	Uniforme	Normal	119.20	487.95	6.95	102.99	7.64	85.34	49.91
W49	116.40	502.99	91.80	88.04	0.6000	Uniforme	Esquina	119.19	487.67	6.88	106.11	7.80	88.30	51.66
W50	113.56	447.14	97.23	78.17	0.8000	Irregular	Normal	119.18	484.64	6.86	104.06	7.41	88.10	51.55
W51	111.28	473.05	88.78	83.00	0.9000	Uniforme	Normal	119.03	487.20	6.93	103.22	7.23	88.09	51.55
W53Ar	104.30	400.82	85.62	69.56	0.7000	Uniforme	Normal	114.09	453.11	6.31	102.32	7.96	82.46	48.24
W54	113.15	476.74	100.76	85.06	0.7000	Uniforme	Normal	118.85	486.45	6.89	104.20	7.45	88.02	51.50
W55	114.96	452.92	117.23	77.32	0.6000	Irregular	Normal	118.93	497.74	7.08	105.63	8.28	84.77	49.55
W56	121.30	525.72	95.59	93.56	0.5000	Uniforme	Esquina	119.74	488.55	6.96	102.76	7.00	88.91	52.03
W57D	115.61	444.04	108.58	87.50	0.8000	Irregular	Normal	119.51	503.80	7.20	105.28	7.58	88.59	51.82
W58D	114.99	466.98	100.44	89.27	0.7500	Irregular	Normal	119.30	486.01	6.88	104.30	7.35	88.75	51.94
W59	111.75	444.75	95.01	81.92	0.6000	Uniforme	Normal	120.14	489.57	6.98	103.07	6.99	89.37	52.30
W60	104.88	452.52	92.34	68.58	0.8000	Uniforme	Normal	116.07	485.13	6.89	103.40	8.18	82.51	48.23
W61	105.13	429.50	80.98	67.02	0.7000	Uniforme	Normal	114.92	481.79	6.95	97.68	7.07	82.01	47.95
W62I	112.16	448.63	91.18	81.49	0.9000	Irregular	Normal	119.18	485.44	6.89	103.58	7.35	87.83	51.39
W64	122.89	518.41	109.05	89.08	0.6000	Uniforme	Esquina, techo	120.14	488.56	6.92	104.85	7.51	88.46	51.76
W66	117.22	485.72	102.35	77.39	0.6000	Uniforme	Normal	119.32	486.55	6.90	104.10	7.95	84.84	49.61
W67	114.40	448.04	104.33	66.53	0.7000	Uniforme	Normal	119.08	500.33	7.15	104.61	8.53	81.93	47.86
W68	111.50	473.55	105.92	77.30	0.6000	Uniforme	Normal	119.89	485.64	6.87	104.52	8.05	84.75	49.55
W69	110.95	481.93	98.08	76.81	0.7000	Uniforme	Normal	120.74	486.80	6.91	103.87	7.79	85.50	50.00
W71	123.69	508.40	120.23	97.10	0.7000	Uniforme	Esquina, techo	120.42	488.42	6.89	106.10	7.58	89.63	52.45
S1Ab	124.21	523.82	88.11	89.08	0.3500	Uniforme	Piso, esquina	119.86	487.81	7.09	96.46	5.84	87.96	51.49
S1Ar	118.07	522.52	105.29	79.64	0.5000	Uniforme	Esquina	119.24	488.37	6.93	104.17	7.80	85.85	50.21
S1M	119.01	508.50	112.21	78.70	0.3500	Uniforme	Esquina	119.04	486.84	6.90	104.55	8.34	83.04	48.54
S2	123.72	504.39	113.33	88.13	0.4000	Uniforme	Piso, esquina	119.89	486.81	6.89	104.80	7.59	87.90	51.43
S3F	117.32	535.03	101.79	100.07	0.3000	Cóncava	Piso, borde	121.52	488.23	6.95	103.01	6.97	89.39	52.32
S3L	133.24	587.47	117.60	126.64	0.3000	Cóncava	Piso, esquina	120.87	490.82	6.96	105.00	7.00	91.80	53.75
S4	117.66	450.67	99.52	102.84	0.4500	Cóncava	Piso	119.05	484.29	6.87	103.22	6.94	89.90	52.63
S5	117.37	498.29	86.98	109.39	0.5000	Cóncava	Piso	119.12	486.90	7.02	98.91	5.92	90.60	53.05
S6FD	119.49	500.48	88.74	98.55	0.2500	Cóncava	Piso, borde	118.86	485.71	7.09	94.70	5.28	89.14	52.20
S6FI	119.02	514.96	97.79	102.01	0.3500	Cóncava	Piso	119.04	487.26	6.87	106.14	7.58	89.68	52.49
S6FM	115.58	459.55	87.53	102.01	0.3000	Cóncava	Piso	119.78	481.96	7.02	94.69	5.20	89.61	52.49
S6L	122.27	541.52	109.73	101.71	0.2000	Cóncava	Piso, esquina	119.24	488.18	6.93	103.82	7.14	89.44	52.35

S8Ab	125.42	531.23	100.49	89.65	0.3000	Uniforme	Piso, esquina	119.93	488.02	6.95	102.79	7.16	87.95	51.47
S8Ar	120.92	502.33	126.54	86.66	0.3000	Uniforme	Esquina	119.25	486.13	6.85	105.83	7.40	90.38	52.91
S8M	124.45	508.73	115.41	92.68	0.3000	Uniforme	Esquina	119.79	486.59	6.88	104.77	7.50	88.43	51.75
S9	118.60	516.31	94.06	78.24	0.4000	Uniforme	Esquina	119.09	487.57	6.93	103.60	8.11	83.20	48.64
S10	127.53	521.82	102.64	92.61	0.6000	Uniforme	Esquina	120.70	488.74	6.94	104.13	7.28	88.94	52.05
S10FAb	111.41	388.79	110.74	88.33	0.4000	Irregular	Borde	117.01	471.61	6.61	104.52	7.53	87.93	51.47
S10FAr	96.75	381.34	93.98	76.30	0.3000	Convexa	Borde, borde	112.36	470.70	6.67	101.14	8.11	80.02	46.77
S10FM	116.77	453.57	99.55	85.90	0.3000	Uniforme	Borde	120.97	475.98	6.64	106.71	7.71	89.62	52.46
S10LAb	123.53	516.01	121.85	94.61	0.4000	Irregular	Esquina	119.86	487.55	6.88	105.62	7.61	88.87	52.01
S10LAr	112.24	440.05	107.04	87.74	0.3000	Convexa	Esquina, borde	116.44	462.46	6.45	103.79	7.43	87.60	51.29
S10LM	130.10	543.95	105.90	86.14	0.4500	Uniforme	Esquina	120.76	489.31	6.95	104.09	7.49	87.65	51.28
S11Ab	110.92	433.47	92.57	87.08	0.0000	Irregular	Normal	110.92	472.62	6.89	92.57	5.17	87.08	51.00
S11Ar	89.80	362.13	78.08	80.01	0.5000	Convexa	Borde	111.86	470.46	6.75	96.86	6.21	86.22	50.47
S12Ab	112.35	446.64	96.70	81.89	0.3000	Irregular	Normal	116.55	469.05	6.57	103.86	7.77	85.61	50.09
S12I	89.59	346.97	72.15	75.96	0.5000	Convexa	Borde	111.84	469.65	6.76	96.03	6.70	82.17	48.06
S13Ab	109.81	427.51	103.83	76.81	0.2500	Uniforme	Normal	113.31	473.64	6.68	103.14	8.55	79.91	46.70
S13Ar	90.91	401.34	83.67	73.27	0.1500	Convexa	Borde	111.45	471.23	6.78	96.45	6.83	81.92	47.91
S14Ab	107.42	401.58	105.21	81.89	0.2000	Irregular	Normal	113.81	471.47	6.63	103.18	7.83	84.37	49.35
S14Ar	95.22	378.89	84.25	76.71	0.2000	Convexa	Borde	112.00	470.15	6.75	96.70	6.76	82.64	48.34
S14M	108.61	446.34	89.77	77.30	0.4000	Uniforme	Normal	114.21	476.22	6.81	99.31	7.37	82.26	48.10
S15Ab	108.61	450.23	98.12	86.57	0.0000	Irregular	Normal	113.50	474.00	6.79	98.12	6.41	86.57	50.67
S15Ar	95.08	408.22	85.22	88.45	0.3000	Convexa	Borde	112.15	472.42	6.78	97.26	6.04	87.73	51.37
S15M	105.43	442.16	89.27	69.66	0.3000	Uniforme	Normal	113.70	464.57	6.65	96.43	6.86	81.65	47.76
S16Ab	107.58	451.22	96.26	85.33	0.5000	Irregular	Normal	114.58	488.57	6.96	102.88	7.24	87.62	51.26
S16Ar	95.91	401.44	81.16	80.38	0.3000	Convexa	Borde	112.25	471.95	6.79	96.60	6.50	84.10	49.21
S16M	107.73	454.22	88.29	72.20	0.5000	Uniforme	Normal	114.73	491.57	7.08	100.22	7.52	82.49	48.21
S17Ab	107.47	415.63	102.77	82.30	0.3000	Irregular	Normal	111.67	472.97	6.66	103.17	7.56	86.02	50.33
S17Ar	93.74	382.58	81.16	74.91	0.3000	Convexa	Borde	111.99	470.77	6.77	96.60	6.76	82.53	48.28
S17M	107.04	418.05	90.86	64.49	0.4000	Uniforme	Normal	112.64	473.79	6.74	100.40	7.78	81.11	47.42
S18	123.77	512.20	100.49	86.61	0.3000	Uniforme	Esquina	119.69	486.83	6.93	102.79	6.77	90.33	52.88
S18FAb	108.71	413.26	103.50	79.63	0.3000	Irregular	Borde	112.91	472.79	6.66	103.29	8.02	83.35	48.74
S18FAr	88.87	368.68	85.13	72.89	0.0000	Convexa	Borde, borde	111.04	468.88	6.74	96.16	6.82	81.58	47.72
S18FM	109.33	449.29	106.58	81.15	0.3000	Uniforme	Borde	113.53	471.70	6.63	103.73	7.86	84.87	49.65
S18LAb	109.96	454.60	98.76	79.17	0.2000	Irregular	Esquina	112.76	469.54	6.59	103.53	8.35	81.65	47.74
S18LAr	106.09	457.14	94.76	88.60	0.0000	Convexa	Esquina, borde	113.08	457.14	6.54	94.76	5.38	88.60	51.91
S18LM	114.29	463.02	104.17	92.03	0.2500	Uniforme	Esquina	117.79	481.70	6.83	103.20	7.20	88.24	51.64
S19	116.42	505.69	94.06	86.61	0.3000	Uniforme	Esquina	120.62	486.38	6.96	101.22	6.45	90.33	52.89
S20Ab	116.43	493.19	88.29	74.26	0.0000	Uniforme	Normal	116.43	493.19	7.19	96.59	6.88	81.78	47.80
S20Ar	110.79	435.38	90.86	75.82	0.2000	Uniforme	Normal	113.59	474.01	6.85	95.63	6.56	82.47	48.24
S20M	112.92	460.59	102.84	70.15	0.1000	Uniforme	Normal	114.32	468.06	6.53	105.23	8.75	81.37	47.56
S21DAb	111.08	469.47	89.87	68.09	0.0000	Uniforme	Normal	111.08	469.47	6.74	96.83	7.06	80.95	47.34
S21DAr	108.21	453.12	100.66	69.66	0.0000	Uniforme	Normal	113.43	453.12	6.34	100.66	7.83	81.14	47.46
S21DM	107.16	440.66	92.44	71.71	0.3000	Uniforme	Normal	111.36	463.07	6.55	99.60	7.47	81.96	47.94
S21IAb	113.49	432.99	94.52	75.82	0.0000	Uniforme	Normal	113.49	472.59	6.85	94.52	6.41	82.03	47.98
S21IAr	109.59	447.44	91.35	74.26	0.4000	Uniforme	Normal	115.19	477.32	6.80	100.89	7.63	82.65	48.33

S22Ab	111.04	470.46	94.02	84.08	0.3000	Uniforme	Normal	115.24	492.87	7.08	101.18	6.85	87.80	51.38
S22Ar	105.82	454.12	93.43	78.38	0.3000	Uniforme	Normal	113.77	476.53	6.79	100.59	7.66	82.10	48.00
S23Ab	113.13	482.03	92.44	71.22	0.0000	Uniforme	Normal	113.13	482.03	6.97	97.27	7.09	81.35	47.56
S23Ar	105.10	417.05	91.35	77.30	0.0000	Uniforme	Normal	112.93	471.50	6.77	97.08	6.90	82.28	48.13
S23M	108.68	448.44	88.78	75.24	0.0000	Uniforme	Normal	113.52	473.84	6.82	96.67	6.87	81.93	47.92
S25Ab	109.31	439.07	94.52	75.82	0.3000	Uniforme	Normal	113.51	461.48	6.48	101.68	8.30	79.54	46.50
S25Ar	106.97	422.73	90.26	71.12	0.3000	Uniforme	Normal	111.17	473.55	6.80	97.42	7.04	81.87	47.88
S26	113.94	488.76	103.04	89.08	0.0000	Uniforme	Esquina	113.94	488.76	6.96	103.04	7.03	89.08	52.14
S27D	109.23	436.98	90.36	66.05	0.0000	Uniforme	Normal	113.62	472.89	6.80	96.91	7.12	80.71	47.19
S27I	115.89	497.78	102.03	97.58	0.2500	Uniforme	Esquina	119.39	485.49	6.90	102.84	7.00	89.02	52.11
S27M	108.98	416.65	112.17	78.87	0.1000	Uniforme	Normal	113.84	471.97	6.63	103.84	8.66	80.11	46.81
S28	100.72	441.49	101.98	79.83	0.1000	Convexa, irregular	Normal	112.51	473.88	6.66	104.37	8.62	81.07	47.38
S29	95.62	404.87	87.57	82.25	0.0000	Convexa, irregular	Normal	111.73	470.77	6.77	96.49	6.78	82.25	48.11
S30	113.28	465.34	92.63	85.03	0.3000	Convexa, irregular	Esquina	117.48	487.75	7.02	99.79	6.41	88.75	51.95
S31	108.35	441.45	82.41	84.19	0.2000	Convexa, irregular	Normal	111.15	456.39	6.49	96.44	6.04	86.67	50.76
S32	99.45	397.89	80.68	74.49	0.3000	Convexa, irregular	Normal	112.72	471.71	6.79	96.53	6.75	82.45	48.23
S33	100.72	415.68	83.50	78.95	0.3000	Convexa, irregular	Normal	112.90	472.97	6.80	96.96	6.81	82.67	48.36
S34	101.12	429.86	88.56	79.43	0.2500	Convexa, irregular	Normal	112.86	473.85	6.87	94.52	6.32	82.53	48.28
S35	102.58	434.06	85.22	76.89	0.3000	Convexa, irregular	Normal	113.19	456.47	6.48	97.26	7.20	80.61	47.15
S36	109.73	470.33	86.41	94.06	0.2500	Convexa, irregular	Esquina	113.23	489.01	7.09	97.25	5.91	88.55	51.84
S37	115.51	500.28	104.68	84.63	0.5000	Uniforme	Esquina	118.77	487.03	6.91	104.10	6.97	90.84	53.18
S38	116.24	481.53	97.09	84.08	0.5000	Uniforme	Normal	118.91	485.68	6.90	103.02	6.83	90.29	52.86
S42	111.95	458.40	108.50	77.89	0.6000	Uniforme	Normal	120.34	503.22	7.20	104.79	8.01	85.34	49.88
S43	111.35	476.23	95.56	96.83	0.3000	Uniforme	Esquina	115.55	498.64	7.16	102.72	6.98	89.00	52.08
E1Ab	128.15	544.45	105.29	86.14	0.3000	Uniforme	Piso, esquina	120.28	466.34	6.95	96.39	7.01	86.14	52.60
E1Ar	125.53	501.19	120.23	100.66	0.2000	Uniforme	Esquina	119.74	470.52	6.86	100.25	7.41	86.84	52.28
E2	123.79	555.87	105.29	98.64	0.2500	Uniforme	Piso, esquina	112.66	470.48	6.98	97.41	6.50	86.05	48.31
E23L	134.37	559.70	105.34	104.90	0.2500	Côncava	Piso, esquina	120.92	470.67	6.97	97.42	6.98	86.76	52.60
E23F	116.47	505.67	89.83	112.79	0.0000	Côncava	Piso, borde	116.47	505.67	7.42	96.83	5.54	90.33	52.88
E22	113.87	470.53	97.25	96.00	0.0000	Côncava	Piso	113.87	470.53	6.74	97.25	5.94	88.38	51.76
E21	112.91	460.55	88.08	98.19	0.3500	Côncava	Piso	117.81	460.55	7.07	88.08	5.63	84.90	52.25
E20	115.89	491.00	90.93	102.01	0.0000	Côncava	Piso	115.89	491.00	7.14	97.00	5.75	89.19	52.22
E19F	116.46	504.58	94.96	98.55	0.2500	Côncava	Piso, borde	119.96	467.35	6.96	94.96	6.58	86.04	52.18
E19L	123.03	528.34	96.70	112.79	0.0000	Côncava	Piso, esquina	118.87	486.40	7.06	96.70	5.50	90.33	52.90
E17	130.12	534.44	111.19	90.60	0.0000	Uniforme	Piso, esquina	119.99	486.82	6.92	103.36	6.85	90.60	53.04
E16Ab	125.45	535.44	105.90	80.67	0.4000	Uniforme	Piso, esquina	120.12	458.79	6.94	94.41	7.79	80.67	50.08

E16Ar	121.39	526.42	93.55	89.08	0.4000	Uniforme	Esquina	119.55	458.29	6.95	93.55	7.21	83.10	51.53
E4I	115.61	501.49	97.23	99.12	0.0000	Uniforme	Esquina	115.61	501.49	7.05	97.23	7.52	88.82	49.20
E4I	117.17	491.47	101.52	84.15	0.0000	Uniforme	Esquina	117.17	491.47	7.33	101.52	5.87	84.15	51.98
E4D	111.13	485.16	99.37	81.61	0.0000	Uniforme	Esquina	114.20	485.16	6.98	99.37	7.49	81.61	47.70
E4D	114.20	466.12	97.23	73.77	0.2000	Uniforme	Esquina	113.93	466.12	6.84	97.23	7.96	79.62	47.99
E3	126.68	540.14	104.78	88.61	0.3000	Uniforme	Esquina	120.09	466.11	6.95	96.32	7.34	84.04	51.35
E3LAb	128.21	553.96	105.90	84.63	0.4000	Irregular	Esquina	120.46	459.74	6.96	94.41	7.14	84.63	52.44
E3LM	129.40	545.55	101.62	104.71	0.4000	Uniforme	Esquina	120.60	459.32	6.96	93.82	6.94	85.07	52.70
E3LAr	110.56	453.74	84.14	89.11	0.0000	Convexa	Esquina, borde	110.56	453.74	6.45	96.04	5.56	89.11	52.22
E3FAB	109.69	445.61	104.87	81.88	0.0000	Irregular	Borde	113.70	473.59	6.64	104.87	8.59	81.88	47.86
E3FM	109.59	463.93	102.15	83.83	0.0000	Uniforme	Borde	113.69	463.93	6.51	102.15	7.70	83.83	49.04
E3FAR	88.40	379.65	80.20	72.21	0.0000	Convexa	Borde, borde	110.99	469.41	6.76	95.57	6.71	81.48	47.66
E25IAb	108.43	425.60	84.54	85.74	0.0000	Irregular	Normal	113.47	472.07	6.80	96.09	6.13	85.74	50.19
E25IM	107.51	463.09	84.13	73.77	0.0000	Uniforme	Normal	113.31	463.09	6.63	96.03	6.77	81.71	47.80
E25IAR	90.46	366.82	78.66	81.56	0.0000	Convexa	Borde	111.19	468.79	6.76	95.40	6.67	81.56	47.71
E25DAB	106.43	417.22	97.14	92.43	0.0000	Irregular	Normal	113.13	471.51	6.77	97.14	6.01	87.78	51.40
E25DM	105.78	448.93	103.34	77.79	0.0000	Uniforme	Normal	113.03	473.88	6.68	103.34	8.19	82.37	48.16
E25DAR	87.83	373.10	76.64	72.02	0.0000	Convexa	Borde	110.94	469.09	6.77	95.19	6.64	81.46	47.65
E26Ab	109.37	468.48	102.77	80.61	0.0000	Irregular	Normal	113.64	468.48	6.59	102.77	8.36	80.61	47.12
E26M	109.72	469.37	83.05	77.89	0.0000	Uniforme	Normal	113.71	469.37	6.76	95.90	6.63	82.39	48.20
E26Ar	90.44	380.38	84.73	76.71	0.0000	Convexa	Borde	111.19	469.45	6.75	96.11	6.71	82.18	48.07
E27Ab	105.94	443.45	103.76	85.74	0.0000	Irregular	Normal	110.57	473.40	6.66	103.76	7.73	85.74	50.16
E27Ab	110.57	411.94	86.31	80.21	0.2000	Irregular	Normal	113.53	457.21	6.78	92.26	6.82	80.21	48.37
E27M	110.06	440.06	99.67	64.97	0.0000	Uniforme	Normal	113.78	473.13	6.74	99.67	7.72	80.59	47.11
E27M	108.79	464.08	106.91	87.63	0.0000	Uniforme	Normal	113.54	464.08	6.41	106.91	8.07	87.63	51.29
E27Ar	86.77	343.78	74.63	74.27	0.0000	Convexa	Borde	110.84	467.75	6.74	94.98	6.54	81.78	47.84
E27Ar	95.04	375.20	95.90	78.16	0.0000	Convexa	Borde	111.66	469.19	6.75	95.90	6.63	82.44	48.23
E28IAb	106.05	397.29	104.22	80.61	0.0000	Irregular	Normal	113.07	470.34	6.59	104.22	8.66	80.61	47.11
E28IM	103.37	449.43	76.84	64.00	0.0000	Uniforme	Normal	112.68	473.93	6.86	95.21	6.80	80.48	47.06
E28IAR	91.45	367.41	79.14	84.74	0.0000	Convexa	Borde	111.29	468.82	6.75	95.45	6.16	84.74	49.60
E28DAB	107.40	419.82	98.56	84.83	0.0000	Irregular	Normal	113.29	471.68	6.74	98.56	6.79	84.83	49.64
E28DM	105.67	426.41	97.09	66.53	0.0000	Uniforme	Normal	113.01	472.12	6.78	97.09	7.15	80.76	47.22
E28DAR	84.86	353.15	83.19	73.96	0.0000	Convexa	Borde	110.67	468.16	6.73	95.92	6.74	81.74	47.81
E29FAB	106.85	434.66	97.32	81.51	0.2000	Irregular	Borde	113.70	459.00	6.71	97.32	7.66	81.51	49.13
E29FM	111.03	481.66	113.02	84.28	0.1000	Uniforme	Borde	112.43	481.66	6.95	101.56	7.80	84.28	50.01
E29FAR	88.44	387.92	79.28	71.88	0.0000	Convexa	Borde, borde	110.99	469.84	6.77	95.47	6.70	81.44	47.63
E29LAb	106.30	450.89	89.65	76.19	0.3000	Irregular	Esquina	110.50	450.89	6.81	89.65	7.23	76.19	46.72
E29LM	107.87	431.45	91.80	83.59	0.3000	Uniforme	Esquina	112.07	431.45	6.39	91.80	6.46	83.59	51.14
E29LAR	88.06	377.41	65.58	65.67	0.3000	Convexa	Esquina, borde	111.37	448.07	6.80	87.64	6.61	77.39	47.44
E29	123.17	490.17	102.64	86.61	0.6000	Uniforme	Esquina	120.18	442.04	6.90	89.82	7.43	80.62	51.53
E15Ab	115.85	473.14	102.53	81.14	0.4500	Uniforme	Esquina	118.70	451.01	6.87	92.93	7.55	81.14	50.74
E15Ar	107.82	465.62	97.23	73.77	0.5000	Uniforme	Esquina	114.82	465.62	7.24	91.12	8.53	73.77	46.70
E5	111.59	473.04	107.93	78.70	0.0000	Uniforme	Esquina	111.59	473.04	6.67	102.83	8.06	82.55	48.27
E5	113.75	488.76	101.00	74.24	0.0000	Uniforme	Esquina	113.75	488.76	7.01	101.00	7.80	81.78	47.80
E6I	109.67	419.24	87.20	72.20	0.0000	Uniforme	Normal	113.70	471.64	6.79	96.44	6.90	81.48	47.65



E6I	108.32	432.79	96.00	79.36	0.0000	Uniforme	Normal	113.45	472.57	6.82	96.00	7.15	79.36	46.39
E6D	106.75	424.92	99.17	77.79	0.0000	Uniforme	Normal	113.18	472.02	6.73	99.17	7.32	82.37	48.17
E6D	111.03	451.62	106.91	70.63	0.0000	Uniforme	Normal	111.03	474.13	6.60	106.91	9.12	81.27	47.49
E7Ab	113.05	475.35	101.26	74.75	0.0000	Uniforme	Normal	113.05	475.35	6.75	101.26	7.84	81.86	47.86
E7M	111.36	490.40	92.93	78.87	0.3000	Uniforme	Normal	115.56	462.77	6.96	92.93	7.48	78.87	48.29
E7Ar	109.16	462.09	72.70	75.82	0.2500	Uniforme	Normal	112.66	462.09	6.98	89.44	6.50	79.49	48.31
E9Ab	114.27	463.78	88.29	79.46	0.0000	Uniforme	Normal	114.27	463.78	6.64	96.59	7.26	79.46	46.46
E9M	111.13	449.63	101.26	74.75	0.3000	Uniforme	Normal	115.33	449.63	6.65	95.76	8.08	78.78	48.24
E9Ar	104.35	425.92	90.36	79.36	0.2000	Uniforme	Normal	113.25	458.25	6.84	90.36	6.56	79.36	47.87
E10Ab	110.60	479.44	99.17	70.15	0.2000	Uniforme	Normal	113.40	479.44	7.05	99.17	8.46	79.06	47.64
E10M	107.59	417.65	99.17	83.00	0.2000	Uniforme	Normal	113.85	457.62	6.64	99.17	7.81	83.00	50.01
E10Ar	106.01	449.43	92.93	71.71	0.2000	Uniforme	Normal	113.54	449.43	6.62	92.93	7.11	79.29	47.83
E12Ab	110.72	491.50	95.01	69.66	0.3000	Uniforme	Normal	114.92	462.86	6.92	95.01	8.07	77.93	47.72
E12Ar	108.72	453.22	97.59	75.82	0.0000	Uniforme	Normal	113.52	453.22	6.41	97.59	7.04	82.03	48.00
E12D	106.96	438.47	96.50	68.58	0.0000	Uniforme	Normal	113.22	473.00	6.81	96.50	6.99	81.01	47.37
E13I	106.57	435.38	88.29	74.26	0.3000	Uniforme	Normal	110.77	435.38	6.55	88.29	6.53	78.68	48.22
E13D	109.93	452.12	99.67	74.75	0.3000	Uniforme	Normal	114.13	452.12	6.61	99.67	8.90	78.78	48.23
E14	106.66	430.12	113.85	80.27	0.4500	Uniforme	Esquina	112.96	430.12	6.45	94.24	7.96	80.27	50.24
E8	99.92	414.35	90.58	83.92	0.3000	Convexa, irregular	Normal	112.79	450.46	6.78	90.58	6.16	83.92	51.31
E11	97.63	399.09	95.97	79.83	0.3000	Convexa, irregular	Normal	112.47	449.38	6.64	95.97	7.95	79.83	48.87
E30	118.62	540.89	104.30	83.78	0.0000	Convexa, irregular	Esquina	118.62	487.24	6.91	104.30	8.16	83.78	48.98
E31I	109.28	459.34	81.33	74.49	0.0000	Convexa, irregular	Normal	113.63	459.34	6.57	95.70	6.68	81.82	47.87
E31D	102.30	428.76	83.50	85.03	0.0000	Convexa, irregular	Normal	112.53	472.28	6.81	95.96	6.21	85.03	49.77
E32I	104.22	450.35	80.68	86.81	0.3000	Convexa, irregular	Normal	113.47	450.35	6.80	89.37	5.43	86.81	53.04
E32D	101.49	413.08	85.76	78.55	0.3000	Convexa, irregular	Normal	113.02	450.36	6.89	85.76	6.03	78.55	48.13
E33	102.96	406.28	64.46	83.28	0.3000	Convexa, irregular	Normal	113.25	449.87	6.83	87.53	5.63	83.28	50.94
E34	100.35	407.88	82.41	76.49	0.3500	Convexa, irregular	Normal	112.95	446.52	6.79	88.63	7.11	76.49	47.26
E35I	99.65	414.08	82.31	77.28	0.0000	Convexa, irregular	Normal	112.19	471.32	6.79	95.81	6.63	82.28	48.13
E35D	107.37	441.95	76.10	98.66	0.0000	Convexa, irregular	Normal	113.29	473.28	6.84	95.13	5.43	88.76	51.99
E36	108.30	451.45	84.14	83.28	0.2000	Convexa, irregular	Esquina	111.10	451.45	6.68	91.92	6.25	83.28	50.21
E37	116.90	498.78	92.93	83.59	0.4000	Uniforme	Esquina	118.77	456.54	6.93	92.93	7.00	83.59	51.83
E38	111.67	480.83	97.59	76.32	0.3000	Uniforme	Normal	115.87	480.83	7.21	97.59	8.87	76.32	46.73
E41	110.49	458.90	83.54	64.00	0.4000	Uniforme	Normal	116.09	458.90	7.19	83.54	6.27	76.09	47.39
E42	112.77	464.08	106.41	76.32	0.0000	Uniforme	Normal	112.77	464.08	6.42	106.41	8.87	82.11	48.01

E43	114.27	486.06	91.29	85.57	0.3000	Uniforme	Esquina	118.47	462.38	6.99	91.29	6.04	85.57	52.28
E44	118.44	473.64	89.14	92.61	0.3000	Uniforme	Esquina	118.80	473.64	7.25	89.14	5.73	84.70	51.76
E45	112.75	421.51	104.76	85.74	0.5000	Irregular	Normal	119.75	421.51	6.37	92.18	7.48	81.49	51.34
E46	110.96	463.09	91.35	62.45	0.3000	Uniforme	Normal	115.16	463.09	7.00	91.35	7.45	77.00	47.18
E47	106.66	435.78	105.32	73.67	0.6000	Uniforme	Normal	115.05	435.78	6.78	90.14	8.63	73.67	47.40
E51	116.49	501.39	92.42	83.59	0.5000	Uniforme	Esquina	118.96	449.75	6.90	92.42	7.19	83.59	52.56
E52	111.81	436.57	98.12	79.34	0.5000	Irregular	Normal	118.81	436.57	6.68	91.26	7.64	79.34	50.05
E59	123.98	512.60	92.93	100.66	0.6000	Uniforme	Esquina, techo	120.28	443.41	6.86	92.93	7.78	82.42	52.59
E61	115.61	476.24	85.72	82.01	0.6000	Uniforme	Normal	119.05	441.03	6.97	85.72	6.34	82.01	52.37



## Anexo 8. Espectrometría de rayos gamma en la Caja del Agua del Santuario

Bloque	Datos originales					Superficie	Configuración	Datos corregidos a 0.0% de humedad						
	Total [cps]	K [cpm]	U [cpm]	Th [cpm]	Humedad [%]			Total [cps]	K [cpm]	K [%]	U [cpm]	U [ppm]	Th [cpm]	Th [ppm]
E1a	95.79	356.13	89.29	88.92	0.3000	Uniforme	Borde	101.58	407.41	5.58	95.91	7.02	79.97	46.83
E1b	99.80	411.43	99.07	74.68	0.3000	Uniforme	Piso, borde	104.02	426.65	5.84	100.79	8.33	78.23	45.76
E1c	98.77	389.65	91.19	64.21	0.3000	Uniforme	Piso	102.99	404.87	5.49	97.81	8.55	73.05	42.71
E1d	97.25	375.54	78.31	66.53	0.4000	Uniforme	Normal	102.88	395.83	5.39	94.71	8.19	71.27	41.67
E1e	100.37	448.99	89.04	81.52	0.3000	Uniforme	Piso	104.59	421.03	5.85	95.66	7.14	78.93	46.20
E1f	100.08	405.40	80.98	66.53	0.0000	Uniforme	Normal	101.60	405.40	5.59	93.88	7.76	72.84	42.60
E1g	106.37	409.18	94.42	76.32	0.0000	Uniforme	Normal	105.14	409.18	5.65	94.42	7.31	76.32	44.66
E1h	102.03	417.52	90.68	73.77	0.3000	Uniforme	Piso	105.11	432.74	6.03	97.30	7.75	77.32	45.22
E1i	100.78	423.13	91.85	60.41	0.3000	Uniforme	Normal	105.00	418.88	5.75	98.47	8.79	72.44	42.33
E1j	107.29	439.47	84.13	79.36	0.2000	Uniforme	Normal	106.02	419.92	5.84	94.93	7.09	78.32	45.84
E1k	107.72	448.09	89.14	85.00	0.5000	Uniforme	Piso	106.80	421.66	5.76	100.17	7.94	79.78	46.69
E1l	104.15	433.69	91.85	77.30	0.3000	Uniforme	Normal	105.65	419.85	5.76	98.47	7.41	80.85	47.33
E1m	104.43	421.62	102.45	84.74	0.2000	Uniforme	Piso	105.39	431.77	5.93	100.98	8.20	79.25	46.36
E1n	89.59	382.88	81.64	85.91	0.3000	Irregular	Borde	100.33	398.10	5.43	94.89	6.87	79.58	46.61
E1o	96.69	426.99	79.62	87.57	0.6000	Irregular	Borde	105.14	420.54	5.90	92.85	6.34	80.23	46.98
E1p	105.75	449.03	91.18	90.63	0.5000	Irregular	Piso, borde	106.49	421.72	5.71	102.21	8.26	80.44	47.07
E1q	106.36	410.35	112.34	76.56	0.8000	Irregular	Piso, borde	107.19	420.02	5.65	103.66	8.78	79.08	46.26
E1r	104.82	387.33	107.58	80.61	0.6000	Irregular	Piso, borde	106.57	417.77	5.63	102.78	8.56	79.33	46.42
E1s	94.90	381.04	87.18	86.37	0.5000	Uniforme	Borde	101.94	406.41	5.51	98.21	7.50	79.95	46.81
E1t	97.92	379.15	95.47	76.39	0.2000	Uniforme	Piso, borde	101.79	408.98	5.52	99.88	8.05	78.76	46.10
E1u	114.06	495.08	96.10	78.70	0.0000	Uniforme	Piso	106.69	422.95	5.87	96.10	7.27	78.70	46.06
E1v	99.89	420.03	91.70	72.76	0.6000	Uniforme	Esquina	105.65	419.99	5.72	100.64	8.03	79.86	46.74
E1w	97.47	410.11	91.19	77.12	0.3000	Uniforme	Esquina	101.69	425.33	5.88	97.81	7.30	80.67	47.22
E2I	90.86	350.33	95.61	79.92	0.0000	Uniforme	Borde	99.88	405.96	5.56	95.61	6.96	79.92	46.80
E2D	95.42	369.37	78.91	53.85	0.0000	Uniforme	Normal	100.60	407.26	5.63	93.64	7.98	71.20	41.62
E2RedI	86.35	340.06	69.70	72.83	0.0000	Convexa	Borde	99.30	405.34	5.62	92.69	7.51	72.83	42.59
E2RedD	87.01	368.82	65.02	72.09	0.0000	Convexa	Normal	99.38	407.22	5.66	92.27	7.55	72.09	42.15
E2Col	97.68	394.05	106.64	83.13	0.0000	Cóncava, irregular	Borde	101.03	409.48	5.51	100.95	8.30	78.59	45.99
E3I	94.91	381.31	86.11	70.05	0.0000	Uniforme	Normal	100.51	408.23	5.63	94.56	7.80	73.48	42.97
E3D	89.30	345.20	79.89	60.41	0.0000	Uniforme	Normal	99.67	405.65	5.60	93.75	7.88	71.96	42.07
E4I	95.76	417.25	88.68	64.49	0.0000	Uniforme	Normal	100.66	417.25	5.79	94.96	8.04	72.52	42.39
E4D	97.31	398.53	80.98	62.45	0.0000	Uniforme	Normal	100.96	410.01	5.68	93.88	7.86	72.23	42.23
E5I	97.57	414.16	76.84	70.63	0.0000	Uniforme	Normal	101.01	414.16	5.77	93.41	7.54	73.60	43.04
E5D	90.73	360.76	87.77	79.56	0.0000	Uniforme	Borde	99.87	406.65	5.59	94.81	6.86	79.56	46.59
E5RedI	89.31	370.42	68.48	64.40	0.0000	Convexa	Normal	99.67	407.34	5.66	92.58	7.54	72.51	42.40
E5RedD	82.70	325.88	59.02	75.25	0.0000	Convexa	Borde	98.88	404.56	5.62	91.77	6.93	75.25	44.04
E5Col	89.44	367.21	81.16	76.64	0.0000	Cóncava, irregular	Borde	99.69	407.10	5.62	93.91	7.15	76.64	44.85

E6	86.21	348.45	83.39	76.49	0.0000	Convexa	Normal	99.28	405.85	5.59	94.19	7.23	76.49	44.77
E7	94.86	390.50	100.49	90.46	0.0000	Cóncava, irregular	Normal	100.50	409.10	5.51	100.49	8.02	79.72	46.67
E8Red	92.37	397.69	74.89	76.03	0.0000	Convexa	Normal	100.10	409.91	5.69	93.20	7.10	76.03	44.49
E8ColAb	93.76	414.55	79.21	93.77	0.0000	Cóncava, irregular	Normal	100.32	414.55	5.77	93.67	6.53	80.13	46.92
E8ColAr	92.86	372.75	74.49	90.77	0.0000	Cóncava, irregular	Normal	100.18	407.52	5.64	93.16	6.48	79.76	46.71
E9RedI	93.40	400.79	76.64	76.89	0.0000	Convexa	Normal	100.26	400.79	5.51	93.39	7.00	76.89	45.01
E9RedD	90.93	372.52	73.13	74.41	0.0000	Convexa	Normal	99.89	407.50	5.65	93.02	7.33	74.41	43.53
E9ColI	97.05	390.50	74.49	92.40	0.0000	Cóncava, irregular	Normal	100.90	409.10	5.67	93.16	6.45	79.96	46.83
E9ColD	95.35	399.88	78.65	92.72	0.0000	Cóncava, irregular	Normal	100.59	410.19	5.68	93.61	6.53	80.00	46.85
E10I	96.08	388.08	87.10	62.93	0.0000	Uniforme	Normal	100.72	408.85	5.64	94.71	8.02	72.30	42.27
E11	103.19	413.76	84.04	72.10	0.0000	Uniforme	Normal	103.19	413.76	5.74	94.27	7.97	72.10	42.14
E12D	100.83	429.30	100.66	69.56	0.2000	Uniforme	Normal	103.65	418.99	5.70	100.67	9.33	71.93	42.02
E13	98.43	367.54	90.61	84.74	0.2000	Uniforme	Borde	101.25	407.92	5.61	95.02	6.95	79.25	46.40
E14	97.33	387.58	89.18	65.95	0.3000	Uniforme	Normal	101.55	402.80	5.50	95.80	8.07	73.37	42.91
E16	105.04	431.50	86.11	74.75	0.2000	Uniforme	Normal	105.54	419.21	5.82	95.27	7.35	77.12	45.12
E18	99.41	396.94	99.08	72.10	0.3000	Uniforme	Normal	103.63	412.16	5.57	100.79	8.74	75.65	44.24
E19	97.75	375.38	94.11	82.76	0.3000	Uniforme	Borde	101.97	409.11	5.51	100.73	8.16	79.12	46.31
N1Ab	94.19	385.80	95.90	82.76	0.0000	Uniforme	Piso, borde	100.39	408.64	5.61	95.90	7.25	78.52	45.97
N1Ar	93.97	369.90	88.88	81.56	0.0000	Uniforme	Borde	100.35	407.30	5.60	94.99	7.10	78.28	45.83
N2IAb	96.56	407.90	91.19	77.58	0.0000	Uniforme	Piso	100.81	407.90	5.60	95.40	7.30	77.58	45.41
N2IM	97.33	379.50	86.60	66.53	0.0000	Uniforme	Normal	100.96	408.07	5.63	94.63	7.92	72.84	42.59
N2IAr	97.20	363.80	98.58	69.07	0.0000	Uniforme	Normal	100.93	406.86	5.52	98.58	8.67	73.29	42.85
N2DAb	101.65	428.40	100.90	81.98	0.0000	Uniforme	Piso	101.65	428.40	5.87	100.90	8.33	78.37	45.84
N2DM	101.54	426.30	82.56	64.49	0.0000	Uniforme	Normal	101.54	426.30	5.98	94.08	7.86	72.52	42.38
N2DAr	97.91	358.60	100.17	68.00	0.0000	Uniforme	Normal	101.08	406.50	5.47	100.17	9.03	73.09	42.72
N3IAb	101.70	430.00	85.85	74.13	0.3000	Uniforme	Piso	105.01	419.53	5.89	92.47	6.68	77.68	45.46
N3IM	102.64	442.50	101.75	67.51	0.3000	Uniforme	Normal	105.28	420.56	5.72	101.23	9.59	71.06	41.50
N3IAr	98.70	433.50	81.47	62.93	0.4000	Uniforme	Normal	104.33	420.25	5.84	95.23	8.02	73.03	42.68
N3DAb	101.15	407.00	90.16	75.84	0.1500	Uniforme	Piso	103.26	414.61	5.77	93.47	6.90	77.62	45.43
N3DM	100.42	392.70	89.77	63.42	0.3000	Uniforme	Normal	104.64	407.92	5.58	96.39	8.27	72.91	42.63
N3DAr	99.30	391.10	91.85	69.56	0.3000	Uniforme	Normal	103.52	406.32	5.51	98.47	8.67	73.11	42.74
N3DAr	97.98	419.40	75.26	75.24	0.3000	Uniforme	Normal	102.20	434.62	6.14	94.00	6.82	78.79	46.10
N4Ab	101.10	449.40	101.41	73.24	0.0000	Uniforme	Piso	101.10	419.89	5.70	101.41	9.27	73.24	42.79
N4M	100.66	391.10	83.54	68.09	0.0000	Uniforme	Normal	101.77	409.16	5.66	94.21	7.79	73.11	42.75
N4Ar	100.24	407.90	89.77	67.51	0.0000	Uniforme	Normal	101.65	407.90	5.61	95.14	8.00	73.00	42.68
N5IAb	100.61	433.70	86.88	79.77	0.0000	Uniforme	Piso	101.75	433.70	6.11	94.67	6.80	79.77	46.68
N5IM	104.11	433.20	76.84	66.05	0.0500	Uniforme	Normal	104.81	418.61	5.85	93.53	7.69	72.85	42.59
N5IAr	99.66	414.70	83.05	46.31	0.2500	Uniforme	Normal	103.18	427.38	5.99	94.93	8.33	70.74	41.32
N5DAb	100.22	440.50	89.65	86.57	0.0000	Uniforme	Piso	101.64	419.09	5.82	95.12	6.99	79.17	46.34
N5DM	101.83	414.80	93.43	80.93	0.0000	Uniforme	Normal	101.83	414.80	5.78	93.43	6.80	78.14	45.74

N5DAr	100.68	393.80	94.42	74.16	0.0000	Uniforme	Normal	101.77	393.80	5.36	94.42	7.66	74.16	43.39
N6Ab	107.66	436.30	90.22	89.61	0.4000	Uniforme	Piso, borde	106.57	420.47	5.76	99.04	7.64	80.20	46.94
N6M	101.45	388.50	97.32	74.66	0.4000	Uniforme	Borde	105.34	408.79	5.50	100.86	8.15	79.40	46.47
N6Ar	99.55	378.00	95.21	75.29	0.4500	Uniforme	Borde	105.00	400.83	5.35	100.68	7.91	80.62	47.21
N7I	89.77	347.40	86.21	83.00	0.0000	Uniforme	Borde	99.73	405.78	5.58	94.57	6.97	78.56	46.00
N7D	99.23	403.70	73.19	62.93	0.0000	Uniforme	Normal	101.38	403.70	5.58	93.03	7.67	72.30	42.28
N7RedI	82.49	317.00	66.70	68.33	0.0000	Convexa	Borde	98.85	404.09	5.60	92.41	7.40	73.15	42.79
N7RedD	92.89	375.80	82.31	68.00	0.0000	Convexa	Normal	100.18	407.76	5.63	94.05	7.76	73.09	42.74
N7ColAb	93.95	424.50	84.15	73.96	0.0000	Côncava, irregular	Borde	100.35	424.50	5.94	94.29	7.67	73.96	43.24
N7ColAr	88.93	358.40	90.74	76.30	0.0000	Côncava, irregular	Borde	99.62	406.49	5.58	95.31	7.49	76.30	44.65
N8I	98.04	406.30	92.84	54.81	0.0000	Uniforme	Normal	101.11	406.30	5.63	92.84	7.80	71.31	41.69
N8D	99.01	408.40	80.48	64.49	0.0500	Uniforme	Normal	101.50	410.94	5.69	93.95	7.82	72.61	42.45
N8RedI	90.39	372.20	72.58	73.28	0.0000	Convexa	Normal	99.82	407.48	5.65	92.97	7.50	73.28	42.86
N8RedD	91.77	384.80	50.56	78.15	0.0000	Convexa	Normal	100.02	408.54	5.71	91.12	6.32	78.15	45.76
N8ColAb	100.04	394.90	82.77	92.78	0.0000	Côncava, irregular	Normal	101.59	394.90	5.38	94.11	6.63	80.01	46.87
N8ColAr	97.66	405.30	93.66	92.40	0.0000	Côncava, irregular	Normal	101.03	405.30	5.59	93.66	6.55	79.96	46.83
N9	96.33	393.20	85.12	56.35	0.0000	Uniforme	Normal	100.77	393.20	5.35	94.42	8.09	71.48	41.80
N9Red	96.66	409.40	84.04	80.24	0.0000	Convexa	Normal	100.83	409.40	5.65	94.27	6.63	80.24	46.99
N9ColAb	102.63	401.70	85.65	99.27	0.0000	Côncava, irregular	Normal	102.63	401.70	5.50	94.49	6.60	80.73	47.29
N9ColAr	99.21	415.80	69.83	94.84	0.0000	Côncava, irregular	Normal	101.38	415.80	5.81	92.70	6.30	80.25	47.00
N10I	99.61	402.10	84.04	65.46	0.0000	Uniforme	Normal	101.48	402.10	5.52	94.27	7.87	72.67	42.50
N10D	97.27	377.90	98.15	75.68	0.0000	Uniforme	Borde	100.95	407.94	5.54	98.15	8.19	75.68	44.27
N10RedI	94.61	388.90	80.68	79.35	0.0000	Convexa	Normal	100.46	408.94	5.66	93.85	6.69	79.35	46.47
N10RedD	86.43	356.90	57.30	72.46	0.0000	Convexa	Borde	99.31	406.39	5.66	91.63	7.35	72.46	42.37
N10Col	100.91	418.30	93.36	81.19	0.0000	Côncava, irregular	Borde	101.84	418.30	5.84	93.36	6.78	78.20	45.77
N11	98.68	385.20	89.78	75.00	0.3000	Uniforme	Borde	102.90	400.42	5.44	96.40	7.35	78.55	45.99
N12	108.38	442.10	93.92	70.15	0.5000	Uniforme	Normal	106.89	421.26	5.74	100.65	8.65	76.07	44.48
N13	110.07	464.10	104.83	70.63	0.5000	Uniforme	Normal	107.13	422.64	5.73	102.24	8.90	76.55	44.76
N14	99.55	404.60	85.02	61.86	0.3000	Uniforme	Normal	103.77	419.82	5.83	95.49	8.13	72.66	42.47
N15I	103.96	437.30	82.56	60.89	0.5000	Uniforme	Normal	106.18	420.93	5.89	93.59	7.70	72.89	42.61
N15D	102.32	402.10	81.47	67.51	0.5000	Uniforme	Normal	105.87	427.47	6.04	92.50	7.38	73.43	42.92
N16	101.65	417.70	99.93	86.85	0.6000	Uniforme	Borde	106.01	419.79	5.68	101.90	8.24	80.14	46.90
N17	97.32	383.00	95.90	75.00	0.3000	Uniforme	Borde	101.54	398.22	5.26	102.52	8.63	78.55	45.98
N18D	104.91	426.20	88.19	78.28	0.3000	Uniforme	Normal	105.81	419.18	5.83	94.81	7.06	78.33	45.85
N19I	102.69	427.80	84.53	70.05	0.5000	Uniforme	Normal	105.94	420.21	5.83	95.56	7.60	75.97	44.44
W11Ab	99.98	409.35	83.07	85.98	0.4500	Uniforme	Piso, borde	105.13	432.18	6.11	92.99	6.44	79.83	46.73
W11Ar	99.67	383.32	100.89	87.64	0.4500	Uniforme	Borde	105.04	406.15	5.43	101.59	8.20	80.03	46.85
W1MAb	99.00	429.92	92.79	72.05	0.5500	Uniforme	Piso	105.25	420.56	5.73	100.64	8.24	78.56	45.96

W1MAr	103.75	425.32	88.78	65.46	0.5500	Uniforme	Normal	106.27	420.21	5.72	100.91	9.37	71.97	42.04
W1DAb	103.76	415.32	108.56	81.55	0.6000	Uniforme	Piso	106.39	419.58	5.66	102.89	8.56	79.47	46.50
W1DAr	105.82	402.41	86.70	79.85	0.6000	Uniforme	Normal	106.72	432.85	5.98	99.93	7.99	79.22	46.34
W1HorAbl	99.38	426.32	85.62	61.38	0.3000	Uniforme	Piso, borde	103.60	419.19	5.82	95.61	8.17	72.59	42.43
W1HorAbD	109.66	481.85	100.39	88.51	0.6000	Uniforme	Piso	107.26	423.86	5.76	101.96	8.22	80.34	47.02
W2IAb	105.26	446.59	79.37	80.11	0.0000	Uniforme	Piso	105.26	419.65	5.86	93.69	6.54	80.11	46.91
W2IM	108.27	425.92	92.93	73.18	0.1500	Uniforme	Normal	106.06	433.53	6.07	96.24	7.91	74.96	43.81
W2IAr	106.52	429.60	96.50	72.20	0.0000	Uniforme	Normal	105.19	429.60	5.99	96.50	8.42	72.20	42.18
W2DAb	107.73	437.67	96.61	78.61	0.1000	Uniforme	Piso	105.82	419.30	5.74	98.82	7.66	79.79	46.70
W2DM	107.35	421.14	100.17	78.38	0.0000	Uniforme	Normal	105.41	421.14	5.75	100.17	8.17	78.38	45.86
W2DAr	107.79	419.14	103.83	73.67	0.0000	Uniforme	Normal	105.52	419.14	5.71	100.42	8.99	73.67	43.05
W3Ab	105.72	463.92	95.59	84.06	0.6000	Uniforme	Piso	106.71	422.91	5.76	101.30	8.17	79.80	46.70
W3M	109.68	443.25	110.09	74.26	0.4500	Uniforme	Normal	106.98	421.16	5.69	102.70	8.50	79.59	46.57
W3Ar	108.26	426.51	90.36	75.24	0.5000	Uniforme	Normal	106.88	420.10	5.70	101.39	8.46	78.19	45.74
W4IAb	105.86	460.21	93.44	75.72	0.4000	Uniforme	Piso	106.27	422.10	5.72	102.26	8.27	80.46	47.08
W4IM	109.00	437.47	96.60	79.36	0.1500	Uniforme	Normal	106.20	419.52	5.72	99.91	8.15	78.19	45.74
W4IAr	108.74	453.12	87.20	67.02	0.2000	Uniforme	Normal	106.28	420.97	5.85	95.48	8.02	73.35	42.87
W4DAb	108.57	453.40	104.68	79.64	0.4000	Uniforme	Piso	106.71	421.67	5.72	101.95	8.47	78.82	46.11
W4DM	110.89	454.22	95.01	75.24	0.4500	Uniforme	Normal	107.15	421.89	5.75	100.64	7.91	80.57	47.16
W4DAr	108.99	448.44	88.78	83.98	0.5000	Uniforme	Normal	106.98	421.68	5.77	99.81	7.89	79.64	46.61
W5IAb	106.32	442.12	108.56	81.12	0.0000	Uniforme	Piso	105.13	419.25	5.69	101.26	8.43	78.19	45.74
W5IAr	108.10	457.80	99.67	66.05	0.1500	Uniforme	Normal	106.03	421.11	5.69	102.98	9.63	73.06	42.68
W5DAb	106.95	417.30	104.57	85.20	0.2500	Uniforme	Piso, borde	106.08	429.98	5.89	101.48	8.28	79.40	46.45
W5DAr	103.31	403.68	117.31	82.83	0.1500	Uniforme	Borde	105.42	411.29	5.50	102.77	8.64	78.85	46.14
W6I	96.76	356.19	96.42	87.07	0.0000	Uniforme	Borde	100.85	406.34	5.55	96.42	7.24	79.24	46.40
W6D	108.83	433.19	100.17	78.38	0.0000	Uniforme	Normal	105.75	433.19	5.98	100.17	8.17	78.38	45.84
W6Red	91.93	375.72	77.19	76.89	0.0000	Convexa	Borde	100.04	407.76	5.64	93.45	7.01	76.89	45.00
W6Col	107.33	484.29	95.90	84.36	0.0000	Cóncava, irregular	Borde	105.40	422.33	5.86	95.90	7.21	78.81	46.12
W7I	103.15	411.27	95.51	67.51	0.0000	Uniforme	Normal	103.15	411.27	5.67	95.51	8.08	73.00	42.68
W7D	103.42	420.74	100.17	69.07	0.1000	Uniforme	Normal	104.83	425.81	5.79	102.38	9.43	73.52	42.95
W10RedI	98.90	402.49	93.59	68.74	0.0000	Convexa	Normal	101.30	402.49	5.54	93.59	7.64	73.22	42.83
W10RedD	102.18	431.46	84.68	81.14	0.0000	Convexa	Normal	102.18	431.46	6.07	94.36	6.99	78.19	45.75
W10ColI	107.53	444.08	99.16	92.78	0.0000	Cóncava, irregular	Normal	105.45	419.43	5.74	99.16	7.69	80.01	46.83
W10ColD	107.60	446.18	87.14	99.27	0.0000	Cóncava, irregular	Normal	105.47	419.62	5.84	94.71	6.65	80.73	47.27
W8I	107.94	452.52	92.34	68.09	0.1000	Uniforme	Normal	105.87	420.54	5.86	94.55	7.82	73.32	42.86
W8RedI	98.14	403.09	83.50	76.89	0.0000	Convexa	Normal	101.13	403.09	5.54	94.20	7.17	76.89	45.01
W8RedD	100.82	409.38	101.45	81.55	0.0000	Convexa	Normal	101.82	409.38	5.50	101.45	8.45	78.28	45.81
W8ColI	111.35	490.70	97.66	90.46	0.0000	Cóncava, irregular	Normal	106.24	422.70	5.83	97.66	7.43	79.72	46.66
W8ColD	108.50	455.06	100.76	121.48	0.1000	Cóncava, irregular	Normal	105.98	420.73	5.68	102.97	8.04	82.73	48.44
W9I	104.26	406.00	99.67	71.12	0.1000	Uniforme	Normal	105.67	411.07	5.52	101.88	9.52	72.30	42.25

W9D	92.91	365.53	94.72	70.45	0.0000	Uniforme	Borde	100.19	406.98	5.60	94.72	7.82	73.56	43.02
W9Red	95.10	389.90	69.70	74.49	0.0000	Convexa	Borde	100.54	409.04	5.69	92.69	7.24	74.49	43.58
W9Col	109.46	453.34	104.69	85.13	0.0000	Cóncava, irregular	Borde	105.89	420.22	5.72	100.59	8.17	78.94	46.19
W11	105.77	416.10	94.62	84.35	0.5000	Uniforme	Borde	106.49	419.19	5.70	100.78	8.08	79.69	46.64
W12	116.73	480.43	105.92	73.77	0.6000	Uniforme	Normal	108.10	423.79	5.74	102.61	8.27	80.87	47.33
W13	115.18	510.25	110.09	83.00	0.3000	Uniforme	Normal	107.42	424.50	5.76	102.34	8.50	79.16	46.31
W14	106.44	434.40	100.02	78.95	0.5000	Uniforme	Borde	106.60	420.71	5.71	101.63	8.39	78.89	46.16
W15I	104.42	456.61	86.70	62.93	0.5000	Uniforme	Normal	106.26	422.19	5.83	97.73	8.50	73.25	42.81
W15D	115.51	466.28	100.76	80.93	0.3000	Uniforme	Normal	107.46	422.16	5.75	101.08	8.29	78.83	46.12
W16I	115.51	479.83	97.09	65.56	0.1000	Uniforme	Normal	107.10	422.36	5.79	99.30	8.89	72.87	42.58
W16D	106.11	442.56	93.92	68.09	0.5000	Uniforme	Normal	106.55	421.29	5.74	100.65	8.99	74.01	43.25
W17	100.73	395.24	92.85	76.79	0.5000	Uniforme	Borde	105.51	420.61	5.73	100.44	8.21	78.51	45.93
W18	115.57	482.43	91.35	76.32	0.3000	Uniforme	Normal	107.47	423.09	5.83	97.97	7.47	79.87	46.75
W19	115.46	482.43	110.58	73.18	0.6000	Uniforme	Normal	107.96	423.89	5.74	103.09	8.47	80.28	46.98
W20	111.07	469.76	90.26	68.09	0.6000	Uniforme	Normal	107.44	423.23	5.72	103.49	9.39	75.19	43.95
W21	107.91	429.23	105.01	87.64	0.5000	Uniforme	Borde	106.82	420.32	5.69	102.26	8.33	80.10	46.87
S1Ab	103.71	395.34	116.31	82.01	0.0000	Uniforme	Piso, borde	103.71	395.34	5.21	102.29	8.61	78.37	45.87
S1Ar	105.04	407.86	105.01	83.21	0.1500	Uniforme	Borde	105.36	415.47	5.62	101.22	8.30	78.92	46.18
S2IAb	101.25	406.81	106.21	71.57	0.0000	Uniforme	Piso	101.25	406.81	5.47	100.87	9.43	71.57	41.82
S2IAr	104.67	421.63	78.41	75.73	0.0000	Uniforme	Normal	104.67	421.63	5.90	93.58	7.23	75.73	44.30
S2DAb	101.93	421.52	109.47	78.42	0.0000	Uniforme	Piso	101.93	421.52	5.73	101.40	8.42	78.42	45.87
S2DAr	107.75	457.21	103.24	74.75	0.0000	Uniforme	Normal	105.51	420.52	5.67	103.24	9.41	74.75	43.69
S3Ab	102.25	409.20	99.78	71.38	0.0000	Uniforme	Piso	102.25	409.20	5.53	99.78	9.23	71.38	41.70
S3M	104.84	419.04	82.06	65.56	0.1500	Uniforme	Normal	105.30	426.65	5.98	94.46	7.86	72.98	42.65
S3Ar	105.74	439.47	90.86	69.56	0.3000	Uniforme	Normal	105.98	420.32	5.80	97.48	8.47	73.11	42.73
S4Ab	101.73	447.72	97.75	83.79	0.0000	Uniforme	Piso	101.73	419.75	5.78	97.75	7.61	78.71	46.06
S4Ar	104.58	421.04	94.42	69.07	0.0000	Uniforme	Normal	104.58	421.04	5.88	94.42	7.80	73.29	42.84
S5Ab	107.32	433.36	84.21	67.00	0.0000	Uniforme	Piso	105.40	433.36	6.11	94.29	7.84	72.92	42.61
S5M	106.45	415.96	101.26	72.20	0.0000	Uniforme	Normal	105.17	415.96	5.63	101.26	9.41	72.20	42.18
S5Ar	104.84	424.22	99.67	65.46	0.0000	Uniforme	Normal	104.84	424.22	5.82	99.67	9.00	72.67	42.45
S5Ar	105.08	438.37	95.51	75.73	0.0000	Uniforme	Normal	105.08	418.88	5.81	95.51	7.63	75.73	44.29
S6Ab	105.37	431.85	109.97	82.55	0.0000	Uniforme	Piso	105.37	431.85	5.92	101.47	8.43	78.48	45.90
S6M	105.20	407.59	80.98	68.09	0.0000	Uniforme	Normal	105.20	407.59	5.63	93.88	7.72	73.11	42.75
S6Ar	102.82	436.78	98.08	71.12	0.0000	Uniforme	Normal	102.82	418.72	5.75	98.08	8.92	71.12	41.54
S7Ab	100.90	405.67	97.26	85.98	0.0000	Uniforme	Piso, borde	101.84	405.67	5.52	97.26	7.45	79.08	46.30
S7Ar	98.36	382.73	91.93	79.66	0.0000	Uniforme	Borde	101.18	408.35	5.61	95.55	6.99	79.66	46.65
S8I	99.71	432.37	103.00	76.33	0.3000	Uniforme	Borde	103.93	419.74	5.69	101.42	8.19	79.88	46.75
S8D	100.33	387.68	96.99	64.49	0.0000	Uniforme	Normal	101.67	408.82	5.59	96.99	8.46	72.52	42.39
S8RedI	93.81	387.80	74.89	75.64	0.3000	Convexa	Borde	101.10	403.02	5.54	93.95	6.74	79.19	46.38
S8RedD	96.66	383.11	99.23	72.90	0.0000	Convexa	Normal	100.83	408.39	5.53	99.23	8.87	72.90	42.61
S8ColAb	104.69	434.47	102.04	91.86	0.3000	Cóncava, irregular	Borde	105.77	419.92	5.70	101.28	8.08	80.32	47.01
S8ColAr	99.74	414.01	89.77	83.90	0.3500	Cóncava, irregular	Borde	104.67	431.77	6.01	97.49	7.45	79.38	46.45



S9I	107.29	438.97	83.05	71.61	0.3000	Unifome	Normal	106.27	420.29	5.85	95.13	7.64	75.16	43.96
S9D	103.44	410.08	76.84	79.85	0.3000	Unifome	Normal	105.48	425.30	5.96	94.20	6.88	78.64	46.02
S9RedI	100.27	410.48	81.76	69.86	0.1000	Convexa	Normal	101.68	415.55	5.78	94.27	8.14	71.04	41.51
S9RedD	95.01	383.11	71.48	79.43	0.1000	Convexa	Normal	100.78	408.86	5.67	93.08	6.32	80.61	47.22
S9ColAb	109.46	458.85	86.87	98.19	0.4000	Côncava, irregular	Normal	106.84	422.01	5.86	95.69	6.79	81.10	47.48
S9ColAr	102.67	442.98	76.97	92.46	0.2500	Côncava, irregular	Normal	105.09	420.40	5.87	94.07	6.58	80.32	47.03
S10	103.18	403.91	94.42	67.51	0.0000	Unifome	Normal	103.18	403.91	5.55	94.42	7.85	73.00	42.69
S11Red	91.91	376.81	83.50	75.64	0.0000	Convexa	Normal	100.04	407.85	5.63	94.20	7.37	75.64	44.26
S11Col	105.33	429.91	95.51	90.46	0.0000	Côncava, irregular	Normal	105.33	429.91	6.02	95.51	6.98	79.72	46.66
S12I	103.20	418.05	97.59	67.51	0.0000	Unifome	Normal	103.20	418.05	5.75	97.59	8.51	73.00	42.66
S12D	103.55	422.63	102.25	70.15	0.0000	Unifome	Normal	103.55	422.63	5.73	102.25	9.40	73.50	42.94
S12RedI	99.20	411.98	85.76	74.03	0.0000	Convexa	Normal	101.37	411.98	5.70	94.51	7.70	74.03	43.29
S12RedD	93.25	403.49	78.94	72.90	0.0000	Convexa	Normal	100.24	403.49	5.56	93.64	7.70	72.90	42.63
S12ColAb	106.37	448.37	93.22	95.25	0.0000	Côncava, irregular	Normal	105.15	419.81	5.87	93.22	6.41	80.30	47.02
S12ColAr	104.19	455.06	82.77	93.44	0.0000	Côncava, irregular	Normal	104.19	420.35	5.87	94.11	6.63	80.09	46.89
S13I	103.45	416.45	95.01	66.53	0.0000	Unifome	Normal	103.45	416.45	5.78	95.01	8.00	72.84	42.58
S13D	93.73	359.77	97.73	72.72	0.0000	Unifome	Borde	100.32	406.58	5.53	97.73	8.59	72.72	42.51
S13RedI	94.13	376.32	76.64	73.28	0.0000	Convexa	Normal	100.38	407.81	5.65	93.39	7.59	73.28	42.86
S13RedD	81.22	342.56	63.78	65.98	0.0000	Convexa	Borde	98.72	405.49	5.63	92.16	7.42	72.75	42.55
S13Col	102.89	446.95	82.70	87.65	0.0000	Côncava, irregular	Borde	102.89	419.69	5.85	94.10	6.75	79.33	46.44
S14	106.36	432.59	99.08	71.61	0.3000	Unifome	Normal	106.10	419.76	5.71	100.79	8.83	75.16	43.94
S15	116.32	451.13	103.34	81.42	0.2000	Unifome	Normal	107.40	420.82	5.72	101.13	8.32	78.71	46.05
S16	99.81	374.39	94.62	88.52	0.3000	Unifome	Borde	104.03	409.01	5.49	101.24	8.14	79.92	46.78
S17	103.36	409.35	94.62	79.30	0.3000	Unifome	Borde	105.46	424.57	5.79	101.24	8.37	78.53	45.94
S18	112.92	419.74	99.67	77.89	0.2000	Unifome	Normal	106.94	429.89	5.91	100.47	7.93	80.26	46.96
S19	102.07	426.81	96.00	68.09	0.3000	Unifome	Normal	105.12	419.24	5.66	102.62	9.78	71.64	41.84
S20D	111.19	475.55	112.17	76.32	0.3000	Unifome	Normal	106.89	422.71	5.73	102.57	8.43	79.87	46.73
S21I	109.63	450.93	99.17	77.79	0.3000	Unifome	Normal	106.66	421.17	5.74	100.80	8.33	78.23	45.77
S22	102.35	421.77	90.19	81.63	0.3000	Unifome	Borde	105.20	418.74	5.78	96.81	7.37	78.95	46.21

## Anexo 9. Espectrometría de rayos gamma en los afloramientos de la Formación Chichén Itzá

Punto	Datos originales					Litología	Configuración	Datos corregidos a 0.0% de humedad						
	Total [cpm]	K [cpm]	U [cpm]	Th [cpm]	Humedad [%]			Total [cpm]	K [cpm]	K [%]	U [cpm]	U [ppm]	Th [cpm]	Th [ppm]
AF1T	1153.20	49.80	18.15	14.65	-	Suelo	Normal	1153.20	49.80	0.5	18.15	1.4	14.65	8.6
AF2T	1434.00	77.15	23.40	15.77	-	Suelo	Normal	1434.00	77.15	0.9	23.40	2.3	15.77	9.2
AF1P1	160.80	7.91	2.32	1.52	0.6000	Caliza	Normal	230.97	12.85	0.1	4.97	0.7	2.10	1.2
AF1P2	166.20	5.77	1.82	2.02	0.6000	Caliza	Normal	236.37	11.01	0.1	4.47	0.5	2.74	1.6
AF1P3	167.40	7.91	6.56	1.52	0.5000	Caliza	Normal	225.88	12.03	0.0	8.77	1.5	2.00	1.2
AF1P4	293.40	15.74	4.80	3.22	0.6000	Brecha	Piso	445.52	25.75	0.3	8.12	0.6	6.99	4.1
AF1P5	255.60	15.25	3.60	5.48	0.7000	Brecha	Piso	433.07	26.93	0.3	7.47	0.2	8.12	4.8
AF1P6	271.80	12.06	8.19	0.00	0.6000	Brecha	Piso	423.92	22.07	0.2	9.53	2.0	0.00	0.0
AF2P1	243.00	15.17	2.32	0.91	0.5000	Brecha	Normal	426.71	23.52	0.3	5.98	0.6	4.05	2.4
AF2P2	282.60	12.80	3.09	1.66	0.0000	Caliza	Borde	282.60	12.80	0.1	4.52	0.7	1.66	1.0
AF2P3	226.20	7.61	4.30	0.44	0.7000	Brecha	Borde	403.67	22.50	0.2	8.17	0.9	4.84	2.8
AF2P4	274.20	17.42	3.33	2.53	0.8000	Brecha	Normal	477.02	22.43	0.3	7.75	0.4	7.55	4.4
AF3P1	360.00	16.24	7.10	1.61	0.3000	Brecha	Piso	436.06	21.25	0.2	8.76	1.1	4.55	2.7
AF3P2	368.40	17.99	6.51	2.22	0.0000	Brecha	Borde	426.62	22.24	0.3	6.51	0.7	4.21	2.5
AF4P1	242.40	12.93	10.19	0.00	0.0000	Caliza	Normal	242.40	12.93	0.1	8.29	1.7	0.00	0.0
AF4P2	246.00	6.51	3.64	0.44	0.8000	Caliza	Borde	274.58	13.09	0.1	7.18	1.3	1.07	0.6
AF4P3	258.60	12.25	3.09	2.77	0.8000	Brecha	Borde	461.42	25.60	0.3	7.51	0.3	7.79	4.6
AF5TRP	3166.80	186.26	51.86	47.01	-	Suelo rojo	Esquina, piso	3166.80	186.26	2.4	51.86	3.2	47.01	27.6
AF5TR	2103.00	151.95	28.14	27.39	-	Suelo rojo	Normal	2103.00	151.95	2.3	28.14	1.4	27.39	16.0
AFEP1	497.40	33.00	6.51	9.76	0.0000	Brecha	Borde	442.68	22.01	0.3	6.51	0.0	8.09	4.8
AFEP2	466.20	27.26	11.15	1.66	0.0000	Brecha	Borde	466.20	27.26	0.3	9.44	1.3	4.07	2.4
AFEP3	267.60	13.35	5.96	5.10	0.0000	Brecha	Borde	421.84	21.47	0.3	5.96	0.4	5.10	3.0
AFCP1	304.20	11.33	2.32	0.00	0.0000	Caliza	Normal	304.20	11.33	0.1	4.32	0.9	0.00	0.0
AFCP2	396.00	17.42	7.56	3.03	1.7000	Suelo rojo	Normal	396.00	17.42	0.2	7.56	1.1	3.03	1.8



## Anexo 10. Espectrometría de rayos gamma en el Templo Norte

Bloque	Datos originales					Litología	Configuración	Datos corregidos a 0.0% de humedad						
	Total [cpm]	K [cpm]	U [cpm]	Th [cpm]	Humedad [%]			Total [cpm]	K [cpm]	K [%]	U [cpm]	U [ppm]	Th [cpm]	Th [ppm]
1	269.4	6.38	7.10	0.00	0.0000	Caliza	Esquina, piso	269.40	7.85	0.00	7.10	1.5	0.00	0.0
2	243.6	7.37	4.26	0.97	0.4000	Caliza	Piso	264.21	9.49	0.07	5.03	0.9	1.15	0.7
3	244.2	5.88	4.26	0.43	0.3000	Caliza	Piso	259.66	7.47	0.04	4.84	0.9	0.41	0.2
5	240.0	9.47	3.60	0.43	0.4000	Caliza	Piso	260.61	11.59	0.12	4.37	0.8	0.61	0.3
6	309.0	11.06	9.39	0.97	0.5000	Caliza	Piso	279.91	11.68	0.07	7.08	1.3	1.19	0.7
6	269.4	10.06	5.35	0.00	0.5000	Caliza	Piso	295.16	11.41	0.08	6.32	1.3	0.00	0.0
7	232.2	6.88	1.42	0.43	0.6000	Caliza	Piso	263.11	10.07	0.13	2.58	0.4	0.69	0.4
8	240.6	7.97	4.26	0.43	0.6000	Caliza	Piso	271.51	11.16	0.09	5.42	1.0	0.69	0.4
9	259.8	7.37	5.35	0.00	0.9000	Caliza	Piso	277.84	12.15	0.08	7.09	1.5	0.00	0.0
10	230.4	6.38	0.22	0.00	0.6000	Caliza	Piso	261.31	9.57	0.12	2.87	0.6	0.00	0.0
11	238.8	0.70	0.22	0.00	1.1000	Caliza	Esquina, piso	295.47	7.89	0.10	2.34	0.5	0.00	0.0
12	223.2	3.79	1.42	0.00	0.2000	Caliza	Esquina	265.78	7.47	0.08	3.00	0.6	0.00	0.0
13	223.2	6.30	2.82	0.00	0.3000	Caliza	Normal	266.22	7.89	0.08	3.40	0.7	0.00	0.0
14	255.6	3.53	3.93	0.40	0.0000	Caliza	Normal	255.60	7.18	0.05	3.93	0.8	0.32	0.2
15	244.8	6.30	1.82	0.00	0.0000	Caliza	Normal	244.80	7.83	0.08	3.00	0.6	0.00	0.0
16	252.0	5.77	2.82	0.40	0.3000	Caliza	Normal	267.46	7.36	0.06	3.40	0.6	0.40	0.2
17	225.0	6.30	4.44	0.00	0.7000	Caliza	Normal	261.06	10.02	0.06	5.79	1.2	0.00	0.0
18	226.2	4.06	2.82	0.00	0.7000	Caliza	Normal	262.26	7.78	0.06	4.17	0.9	0.00	0.0
19	234.0	4.59	0.00	0.00	0.6000	Caliza	Normal	264.91	7.78	0.15	0.00	0.0	0.00	0.0
20	230.4	4.59	0.20	0.00	0.6000	Caliza	Normal	261.31	7.78	0.08	2.87	0.6	0.00	0.0
21	253.2	6.30	2.32	0.00	0.6000	Caliza	Normal	284.11	9.49	0.10	3.48	0.7	0.00	0.0
22	218.4	6.84	0.20	0.00	0.7000	Caliza	Normal	254.46	10.56	0.14	2.92	0.6	0.00	0.0
23	239.4	5.38	0.76	0.00	0.7000	Caliza	Esquina	275.46	9.10	0.13	2.11	0.4	0.00	0.0
24	227.4	11.33	1.82	0.00	0.3000	Caliza	Normal	242.86	11.46	0.16	2.40	0.5	0.00	0.0
25	210.6	5.77	0.20	0.00	0.4000	Caliza	Normal	265.61	7.89	0.09	2.76	0.6	0.00	0.0
26	239.4	5.13	3.93	0.00	0.4000	Caliza	Normal	260.01	7.25	0.03	4.70	1.0	0.00	0.0
27	210.6	2.35	1.82	0.00	0.6000	Caliza	Normal	241.51	7.63	0.08	2.98	0.6	0.00	0.0
28	240.0	4.59	3.93	0.00	0.7000	Caliza	Normal	276.06	8.31	0.04	5.28	1.1	0.00	0.0
29	216.0	6.30	0.71	0.00	0.7000	Caliza	Normal	252.06	10.02	0.14	2.06	0.4	0.00	0.0
30	208.8	0.00	0.00	0.00	0.6000	Caliza	Normal	266.31	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.0
31	232.2	4.06	1.31	0.00	0.7000	Caliza	Normal	268.26	7.78	0.09	2.66	0.6	0.00	0.0
32	219.0	6.88	1.42	0.00	1.5000	Caliza	Esquina	296.28	11.94	0.13	4.32	0.9	0.00	0.0

33	228.0	4.59	2.32	0.00	0.5000	Caliza	Normal	253.76	7.25	0.07	3.29	0.7	0.00	0.0
34	215.4	7.37	1.31	0.00	0.0000	Caliza	Normal	264.47	7.37	0.08	2.85	0.6	0.00	0.0
35	225.6	4.59	0.20	0.00	0.6000	Caliza	Normal	256.51	7.78	0.08	2.87	0.6	0.00	0.0
36	220.2	7.37	2.82	0.00	0.5000	Caliza	Normal	245.96	10.03	0.11	3.79	0.8	0.00	0.0
37	221.4	0.75	0.71	0.00	0.6000	Caliza	Normal	252.31	7.27	0.07	3.01	0.6	0.00	0.0
38	223.2	2.35	0.20	0.00	0.6000	Caliza	Normal	254.11	7.63	0.08	2.87	0.6	0.00	0.0
39	208.2	6.84	0.00	0.00	0.7000	Caliza	Normal	244.26	10.56	0.20	0.00	0.0	0.00	0.0
40	225.0	6.30	0.71	0.00	0.6000	Caliza	Normal	255.91	9.49	0.11	3.01	0.6	0.00	0.0
41	186.6	1.28	0.00	0.00	0.6000	Caliza	Normal	264.61	7.38	0.14	0.00	0.0	0.00	0.0
42	201.0	4.59	0.71	0.40	0.7000	Caliza	Normal	266.08	8.31	0.11	2.06	0.3	0.71	0.4
43	201.0	2.79	0.00	0.00	1.4000	Caliza	Esquina	273.13	10.22	0.19	0.00	0.0	0.00	0.0
44	266.4	11.06	1.42	0.00	0.0000	Caliza	Esquina	266.40	11.06	0.15	2.88	0.6	0.00	0.0
45	241.8	7.37	2.32	0.00	0.0000	Caliza	Normal	241.80	7.37	0.09	2.32	0.5	0.00	0.0
46	207.6	2.99	0.00	0.40	0.3000	Caliza	Normal	265.00	7.40	0.14	0.00	0.0	0.40	0.2
47	225.0	6.30	1.82	0.00	0.3000	Caliza	Normal	240.46	7.89	0.10	2.40	0.5	0.00	0.0
48	207.6	4.59	0.71	0.00	0.8000	Caliza	Normal	248.82	8.84	0.12	2.25	0.5	0.00	0.0
49	211.8	2.99	1.82	0.00	0.9000	Caliza	Normal	258.17	7.77	0.07	3.56	0.7	0.00	0.0
50	213.0	5.77	3.93	0.00	1.0000	Caliza	Normal	264.52	11.08	0.08	5.86	1.2	0.00	0.0
51	184.2	0.75	1.82	0.00	1.2000	Caliza	Normal	246.02	7.12	0.04	4.14	0.9	0.00	0.0
52	193.2	0.70	0.22	0.00	1.2000	Caliza	Esquina	255.02	7.07	0.08	2.54	0.5	0.00	0.0
53	226.8	2.69	0.68	0.00	0.0000	Caliza	Esquina	265.27	7.02	0.07	2.69	0.6	0.00	0.0
54	263.4	13.57	3.33	0.00	0.0000	Caliza	Normal	263.40	11.64	0.15	3.33	0.7	0.00	0.0
55	256.2	6.30	0.20	0.00	0.0000	Caliza	Normal	256.20	7.83	0.09	2.57	0.5	0.00	0.0
56	240.0	3.53	0.71	0.00	0.6000	Caliza	Normal	270.91	6.72	0.06	3.01	0.6	0.00	0.0
57	216.0	5.77	2.32	0.00	0.7000	Caliza	Normal	252.06	9.49	0.10	3.67	0.8	0.00	0.0
61	301.2	17.84	6.44	0.97	0.2000	Brecha	Esquina	308.32	18.17	0.19	7.18	1.3	1.26	0.7
62	318.6	11.33	4.44	1.52	0.6000	Caliza	Normal	280.79	11.87	0.10	5.60	0.9	1.78	1.0
63	286.2	12.40	4.44	0.40	0.3000	Caliza	Normal	301.66	11.74	0.11	5.02	1.0	0.40	0.2
64	292.2	17.42	5.95	0.00	0.4000	Brecha	Normal	306.44	18.28	0.18	7.43	1.6	0.00	0.0
65	283.8	15.17	5.95	0.40	0.6000	Brecha	Normal	305.17	17.32	0.15	8.17	1.5	1.18	0.7
66	261.0	16.88	0.20	0.91	1.2000	Brecha	Normal	303.73	18.95	0.23	5.77	0.9	2.05	1.2
67	273.6	16.88	2.32	2.53	0.8000	Brecha	Normal	302.09	18.57	0.22	5.98	0.7	3.32	1.9
68	267.6	12.40	4.44	0.00	0.7000	Brecha	Normal	292.53	15.47	0.14	7.03	1.5	0.00	0.0
69	261.6	16.35	6.56	0.40	0.8000	Brecha	Normal	290.09	18.40	0.15	8.89	1.7	1.26	0.7
70	238.2	8.97	7.64	3.22	1.2000	Caliza	Esquina	300.02	12.04	0.07	6.99	1.0	2.83	1.6
72	324.0	13.15	7.64	4.94	0.3000	Caliza	Esquina	280.21	11.91	0.08	6.57	0.9	3.20	1.9
73	352.8	12.40	12.81	0.91	0.0000	Caliza	Normal	280.98	12.40	0.07	7.54	1.4	0.91	0.5

74	343.8	12.40	8.67	0.00	0.0000	Caliza	Normal	280.46	12.40	0.09	6.68	1.4	0.00	0.0
75	282.0	4.06	2.82	0.00	0.2000	Caliza	Normal	292.30	7.53	0.07	3.21	0.7	0.00	0.0
76	241.2	12.93	2.82	0.00	0.7000	Brecha	Normal	287.22	15.44	0.16	6.02	1.3	0.00	0.0
77	249.6	12.40	1.31	0.40	1.1000	Brecha	Normal	288.77	16.35	0.18	6.01	1.0	1.40	0.8
78	277.2	7.91	5.95	0.00	1.0000	Caliza	Normal	279.52	11.55	0.08	6.48	1.4	0.00	0.0
79	202.8	4.78	1.97	0.00	1.2000	Caliza	Esquina	264.62	11.15	0.12	4.29	0.9	0.00	0.0
80	267.0	9.11	6.85	0.00	1.1000	Caliza	Esquina	279.18	11.96	0.08	6.76	1.4	0.00	0.0
81	357.6	12.93	5.45	0.00	0.0000	Caliza	Normal	281.24	11.47	0.10	5.45	1.1	0.00	0.0
82	269.4	9.08	3.93	0.00	0.2000	Caliza	Normal	279.70	10.14	0.10	4.32	0.9	0.00	0.0
83	246.0	4.59	3.33	0.00	0.6000	Caliza	Normal	276.91	7.78	0.05	4.49	0.9	0.00	0.0
84	221.4	4.59	2.82	0.00	0.7000	Caliza	Normal	257.46	8.31	0.07	4.17	0.9	0.00	0.0
85	239.4	10.79	3.33	0.00	1.0000	Brecha	Normal	275.01	15.29	0.14	7.03	1.5	0.00	0.0
86	250.2	9.62	9.18	0.00	0.9000	Caliza	Normal	296.57	11.84	0.07	7.19	1.5	0.00	0.0
87	246.6	12.40	6.56	0.00	1.0000	Brecha	Normal	282.21	15.99	0.10	9.13	1.9	0.00	0.0
88	218.4	10.06	9.94	0.00	1.1000	Caliza	Esquina	275.07	12.16	0.07	7.40	1.5	0.00	0.0
89	286.2	12.40	4.94	2.02	0.5000	Caliza	Normal	278.31	11.99	0.10	5.91	0.9	2.24	1.3
90	301.8	16.88	5.45	1.52	0.6000	Brecha	Normal	297.90	18.34	0.18	7.67	1.3	2.09	1.2
91	259.2	14.11	6.56	0.00	0.6000	Brecha	Normal	280.57	16.26	0.12	8.78	1.8	0.00	0.0
92	228.6	12.93	4.44	0.91	0.8000	Brecha	Normal	286.40	15.80	0.14	7.40	1.3	1.67	1.0
93	222.0	9.62	5.45	0.00	0.6000	Caliza	Normal	252.91	11.44	0.07	6.61	1.4	0.00	0.0
94	232.8	12.93	7.56	0.00	1.3000	Brecha	Normal	279.09	17.60	0.12	9.67	2.0	0.00	0.0
95	277.8	12.40	2.82	0.00	1.5000	Brecha	Normal	298.58	17.79	0.15	8.37	1.8	0.00	0.0
96	242.4	7.97	4.80	1.61	1.6000	Caliza	Esquina	279.26	12.27	0.09	6.48	1.0	2.27	1.3
97	296.4	10.56	3.06	2.15	0.7000	Caliza	Esquina	279.76	11.81	0.13	4.41	0.5	2.35	1.4
98	295.2	15.71	10.19	1.52	0.6000	Brecha	Normal	316.57	17.86	0.13	9.68	1.7	2.09	1.2
100	277.8	7.91	8.67	1.52	0.6000	Caliza	Normal	278.05	11.10	0.06	6.96	1.2	1.78	1.0
101	233.4	8.55	6.56	2.02	0.3000	Caliza	Normal	248.86	10.14	0.03	7.14	1.1	2.19	1.3
102	226.8	11.33	2.82	1.52	1.1000	Brecha	Normal	287.20	15.28	0.14	6.89	1.0	2.57	1.5
103	238.8	10.15	4.94	2.02	0.9000	Caliza	Normal	285.17	11.96	0.08	6.68	1.0	2.33	1.4
105	240.6	8.47	7.64	0.97	1.1000	Caliza	Esquina	297.27	11.82	0.07	6.94	1.2	1.45	0.8
106	270.6	6.14	2.74	0.93	0.3000	Caliza	Esquina	286.06	7.73	0.07	3.32	0.5	1.06	0.6
107	315.0	12.93	4.44	3.03	0.6000	Brecha	Normal	298.98	15.53	0.15	6.66	0.8	3.47	2.0
108	299.4	15.71	5.95	1.52	0.0000	Caliza	Normal	299.40	12.12	0.10	5.95	1.0	1.52	0.9
109	264.6	12.40	1.82	1.52	0.5000	Caliza	Normal	290.36	11.99	0.17	2.79	0.3	1.74	1.0
110	289.8	13.57	8.67	1.52	0.0000	Caliza	Normal	289.80	11.64	0.07	6.68	1.1	1.52	0.9
111	291.6	14.11	7.56	1.52	0.4000	Brecha	Normal	305.84	15.55	0.10	8.71	1.5	1.90	1.1
112	234.0	9.62	4.94	0.00	0.0000	Caliza	Normal	265.83	9.62	0.07	4.94	1.0	0.00	0.0

113	235.2	15.17	5.95	0.00	0.5000	Brecha	Normal	286.07	16.97	0.15	7.80	1.6	0.00	0.0
114	275.4	12.40	6.56	0.00	0.6000	Brecha	Normal	296.77	15.34	0.10	8.78	1.8	0.00	0.0
115	228.6	11.33	1.31	0.40	0.6000	Caliza	Normal	259.51	11.87	0.17	2.47	0.4	0.66	0.4
116	224.4	14.64	3.33	0.40	0.6000	Brecha	Normal	285.52	16.79	0.18	6.07	1.1	1.18	0.7
117	251.4	14.15	4.26	2.15	0.3000	Caliza	Esquina	266.86	12.12	0.12	4.84	0.6	2.26	1.3
118	244.2	6.30	1.31	0.00	0.7000	Caliza	Normal	280.26	10.02	0.13	2.66	0.6	0.00	0.0
119	254.4	13.57	4.44	1.52	1.4000	Brecha	Normal	304.25	18.19	0.15	8.92	1.4	2.85	1.6
120	252.0	12.93	7.06	0.91	0.0000	Caliza	Normal	252.00	11.47	0.06	7.06	1.3	0.91	0.5
121	358.8	12.40	5.45	0.00	0.0000	Caliza	Normal	281.31	12.40	0.12	5.45	1.1	0.00	0.0
122	331.2	11.86	8.67	2.53	0.0000	Caliza	Normal	279.68	11.86	0.08	6.68	1.0	2.38	1.4
123	257.4	7.67	7.34	1.55	0.0000	Caliza	Techo	257.40	7.67	0.00	7.34	1.3	1.55	0.9
125	260.4	10.17	6.36	1.55	0.6000	Caliza	Techo	291.31	11.59	0.08	6.37	1.0	1.81	1.0
126	251.4	11.13	5.77	0.93	0.8000	Caliza	Esquina, techo	292.62	12.05	0.07	7.31	1.3	1.28	0.7