

DIAGNÓSTICO DEL ESTADO DE CONSERVACIÓN COMPLEJO ARQUEOLÓGICO INGAPIRCA



2013-2015

Contenido

INTRODUCCIÓN	8
1. LEVANTAMIENTO GRÁFICO	9
1.1. Fotografías aéreas.....	10
1.2. Levantamiento topográfico 3D	10
2. PATOLOGÍAS	15
2.1. Alteraciones material pétreo que implican pérdida de material	16
2.2. Alteración por acumulación de materia sobre la superficie pétreo	18
Pared Este.....	20
Pared Oeste	20
Pared Norte	22
Pared sur.....	23
3. CARACTERIZACIÓN PETROGRÁFICA Y FÍSICO-QUÍMICA DE LA PIEDRA ..	24
3.1. Análisis de resistencia a la compresión simple	25
3.2. Análisis de porosimetría.....	27
3.3. Propiedades Hídricas	31
Absorción de agua: Velocidad de absorción	31
Desorción de agua: Velocidad de evaporación	34
Capilaridad	35
3.4. Análisis granulométrico.....	38
3.5. Análisis petrográfico	41
Características de los minerales:.....	41
3.6. Análisis mineralógico por difracción de rayos X	43
Muestras lomillos y morteros:	43
Muestras Canteras:	44
Muestras Ingapirca:	45
3.7. Análisis de sales solubles e insolubles	49

3.8.	Análisis de residuos de compuestos orgánicos (hidrofugantes)	50
3.9.	Evaluación del comportamiento frente a los factores patógenos - Durabilidad	
	51	
	Heladicidad	51
4.	ORIGEN DE LAS PATOLOGÍAS	54
4.1.	Agentes Antrópicos.....	55
-	Transformación del sistema del desagüe original	55
-	Raspado con cepillos de acero (1967-1968).....	57
-	Reconstrucción de la pared sur (1967-1968)	57
-	Construcción de una loseta de cemento e impermeabilización de la superficie de la elipse.	58
-	Reconstrucción de la pared sur y consolidación del barranco con pórticos de hormigón (1994)	59
-	Deficiente conducción de las aguas lluvias en la caminería de la pared norte	
	61	
4.2.	Contexto geológico y estructural de la elipse	61
6.3.	Condiciones ambientales.....	69
-	Acción del agua	74
	Crecimiento cristalino por precipitación de sales.....	76
	Alternancia de humectación y desecación	77
	Hidrólisis	78
	Carbonatación	79
	Oxidación.....	80
	Acción de la temperatura	80
	Expansión y contracción térmica (insolación)	81
	Crecimiento cristalino – gelifracción (congelamiento del agua)	83
	Acción del viento.....	84
5.	RECOMENDACIONES.....	92
	BIBLIOGRAFÍA.....	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de análisis a la resistencia a la compresión simple.....	25
Tabla 2. Resultados de porosimetría	29
Tabla 3. Velocidad de absorción de agua	32
Tabla 4. Capilaridad.....	36
Tabla 5. Resumen de capilaridad	37
Tabla 6. Resultados de granulometría	39
Tabla 7. Resultados del análisis de sales solubles	50
Tabla 8. Resultados Componentes de hidrofugantes encontrados.	51
Tabla 9. Resultados del ensayo de heladicidad de dos muestras	52
Tabla 10. Resultados de heladicidad	53
Tabla 11. Humedad absoluta	76
Tabla 12. Registro de temperatura ambiente	81
Tabla 13. Resumen de factores y mecanismos de deterioro, acciones y plazos para actuar sobre las patologías	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fotografía aérea. Facilitada por la Universidad de Cuenca.....	10
Figura 2. Fotografía aérea. Facilitada por la Universidad de Cuenca.....	10
Figura 3. Levantamiento gráfico 3D de Ingapirca (Swieciochowski, 2014).....	11
Figura 4. Levantamiento topográfico (Vásquez, 2013).....	12
Figura 5. Fachada sur (Swieciochowski, 2014).....	13
Figura 6. Fachada Norte - barranco (Swieciochowski, 2014).....	13
Figura 7. Fachada oeste (Swieciochowski, 2014).....	14
Figura 8. Fachada este (Swieciochowski, 2014).....	14
Figura 9. Exfoliación gruesa o desplazamiento.....	16
Figura 10. Exfoliación fina.....	17
Figura 11. Exfoliación laminar múltiple.....	17
Figura 12. Disgregación de inclusiones.....	17
Figura 13. Desprendimientos y fisuras.....	18
Figura 14. Depósitos de sales solubles e insolubles.....	18
Figura 15. Depósitos de material arcilloso.....	19
Figura 16. Biopátina.....	19
Figura 17. Cartografía de patologías - Fachada este.....	20
Figura 18. Cartografía de patologías - Fachada oeste.....	21
Figura 19. Cartografía de patologías - Fachada norte.....	22
Figura 20. Cartografía de patologías - Fachada sur.....	23
Figura 21. Resistencia a la compresión fachadas oeste y sur oeste.....	26
Figura 22. Resistencia a la compresión fachada sur.....	27
Figura 23. Resistencia a la compresión fachada norte.....	27
Figura 24. Porosimetría, absorción de agua y densidad aparente.....	30
Figura 25. Velocidad de absorción.....	33

Figura 26. Velocidad de desorción.....	34
Figura 27. Relación absorción versus desorción de agua	35
Figura 28. Capilaridad.....	36
Figura 29. Relación entre porosimetría y capilaridad	38
Figura 30. Bloque de andesita tallado del muro chapado de la elipse.....	41
Figura 31. Micro fotografía <i>Izquierda</i> : Luz polarizada <i>Derecha</i> : Luz Natural	42
Figura 32. Composición mineralógica de morteros y lomillos.....	44
Figura 33. Composición mineralógica de rocas de cantera	45
Figura 34. Composición mineralógica de muestras de Ingapirca	47
Figura 35. Composición mineralógica a diferentes profundidades	48
Figura 36. Composición mineralógica de muestras de los sondeos.....	49
Figura 37. Sistema de desagüe actual (Swieciochowski, 2014)	55
Figura 38. Sistema de desagüe actual poco eficiente (Swieciochowski, 2014)	56
Figura 39. Elipse de Ingapirca	56
Figura 40. Cartografías de patologías (Espinoza, 2015) y de autenticidad (Swieciochowski, 2014)	57
Figura 41. Materiales, técnica de construcción (Espinoza, 2015).....	59
Figura 42. Consolidación del barranco con pórticos de hormigón (Swieciochowski, 2014)	60
Figura 43. Construcción de 2 columnas de hormigón en 2009 (Swieciochowski, 2014)	60
Figura 44. Fotos termográficas	61
Figura 45. Mapa geológico	62
Figura 46. Mapa de riesgo volcánico	63
Figura 47. Mapa sísmico del Ecuador.....	64
Figura 48. Aperturas o fisuras en la pared este.....	65
Figura 49. Localización de aperturas o fisuras en la pared oeste.....	66

Figura 50. Disposición de los fisurómetros.....	67
Figura 51. Modelo de Dovelas. Plano de deslizamiento más probable sin sismo (izquierda) con sismo (derecha).....	68
Figura 52. Modelo de elementos finitos	68
Figura 53. Zona de riesgo ante sismos	68
Figura 54. Comportamiento en un sismo	69
Figura 55. Esquema de deformación en caso de sismo.....	69
Figura 56. Registro de temperatura y humedad relativa, estación meteorológica	70
Figura 57. Temperatura del punto de rocío y del aire.....	71
Figura 58. Neblina en las horas de la tarde.....	71
Figura 59. Neblina en las primeras horas de la mañana	72
Figura 60. Precipitación fluvial	73
Figura 61. Dirección de los vientos.	73
Figura 62. Rosa de vientos para Ingapirca (Slawomir, 2014)	74
Figura 63. Exfoliación fina (izquierda) y desplazado (derecha)	77
Figura 64. Productos de oxidación: limonita (cristales amarillos) y hematites (cristales rojos)	80
Figura 65. Exfoliación catafilar	81
Figura 66. Imágenes termográficas.....	82
Figura 67. Patología de desplazamiento o exfoliación laminar gruesa	82
Figura 68. Rosa de vientos (Swieciochowski, 2014)	85

INTRODUCCIÓN

El Complejo Arqueológico Ingapirca, es uno de los vestigios incaicos más importante del Ecuador, reconocido a nivel nacional e internacional. Mereció la atención de varios viajeros y estudiosos desde 1739 y la elaboración de los primeros planos por Charles-Marie de la Condamine de la misión geodésica francesa y por Jorge Juan y Antonio de Ulloa de la misión española. En 1803 el monumento fue visitado por Alexander von Humboldt y luego por toda una pléyade de viajeros y científicos sudamericanos. A pesar de los trabajos de limpieza y de consolidación emprendidos por la primera vez en los finales de los años 1960 por el arqueólogo norteamericano Gordon Hadden, así como por un especialista ecuatoriano Tcnl. Ángel Bedoya Maruri, seguidos en los principios de los años 70s por trabajos de restauración realizados por Jose Alcina Franch, así como diferentes campañas de trabajos emprendidas durante las décadas siguientes. Ingapirca siempre ha suscitado y sigue suscitando inquietudes profundas a causa de problemas de deterioro que se manifiestan bajo la forma de deformaciones y agrietamientos de sus estructuras y de manera más particular de diferentes patologías del material lítico. Estas inquietudes llegaron a su máximo nivel en 1994 y en 2009, cuando por consecuencia de las lluvias intensas, derrumbes y deslizamientos del terreno parecieron amenazar directamente la estabilidad de las estructuras.

Sin embargo, de igual modo que las investigaciones arqueológicas conducidas generalmente de manera relativamente puntual, nunca se realizó un estudio de diagnóstico y proyecto de conservación y de restauración global, tomando en cuenta todos los aspectos técnicos, pero también históricos, arquitectónicos, arqueológicos y también sociales, que permitirían intervenciones objetivas y adecuadas según un orden lógico. Tales fueron, entre otros, las conclusiones del grupo de expertos nacionales e internacionales que se reunió en 2009 con el objetivo de evaluar el estado de conservación del sitio de Ingapirca y de plantear una estrategia para su conservación sostenible.

Por ello, y dada la complejidad que presenta la conservación de un monumento histórico, el Instituto Nacional de Patrimonio Cultural del Ecuador emprendió una investigación que tiene un carácter precursor, ya que por la primera vez, se integra información proveniente del estudio histórico e iconográfico y se estudia el efecto de los factores de deterioro sobre el estado de conservación del monumento y el desarrollo de sus patologías, sin olvidar una dimensión muy importante, que es la relación de este excepcional monumento con su ambiente natural y humano.

1. LEVANTAMIENTO GRÁFICO

Ing. Alfredo Vásquez. MsC. Consultora GEO & GEO

Arq. Slawomir Swieciochowski PhD, Investigador Prometeo – Secretaria Superior de Educación Superior, Ciencia y Tecnología

1.1. Fotografías aéreas

En primer lugar se recopilaron las fotografías aéreas de la Universidad e Cuenca que se habían realizado en años anteriores (figuras 1 y 2).



Figura 1. Fotografía aérea. Facilitada por la Universidad de Cuenca



Figura 2. Fotografía aérea. Facilitada por la Universidad de Cuenca

1.2. Levantamiento topográfico 3D

Los trabajos para el levantamiento topográfico en 3D fueron realizados a través de la consultoría “Estudios Estructurales y de Riesgo Sísmico en Ingapirca” con la empresa GEO&GEO, para lo cual se empleó un escáner láser FARO FOCUS 3D el cual permite

la captura de miles de datos con alta precisión, para el levantamiento de la información de cada uno de los elementos que forman parte de la Elipse y de la casa del Inca. El procesamiento suplementario de la nube de puntos obtenidos a partir del escaneo 3D se lo realizó con programas específicos (POINTTOOLS y 3D RESHAPER).

Este levantamiento 3D se combinó con la elaboración de orto fotoplanos. Todo ello condujo a la elaboración de planos de precisión, de alzados de fachadas detalladas piedra por piedra, de cortes, así como de un modelo en tres dimensiones (ilustración 3).

El levantamiento en tres dimensiones así obtenido permitió, por un parte, generar planos, cortes y fachadas y por otra parte, se utilizó el modelo virtual para el cálculo con el método de elementos finitos, o para simulaciones o/y reconstrucciones virtuales (figuras 4, 5, 6, 7, 8).

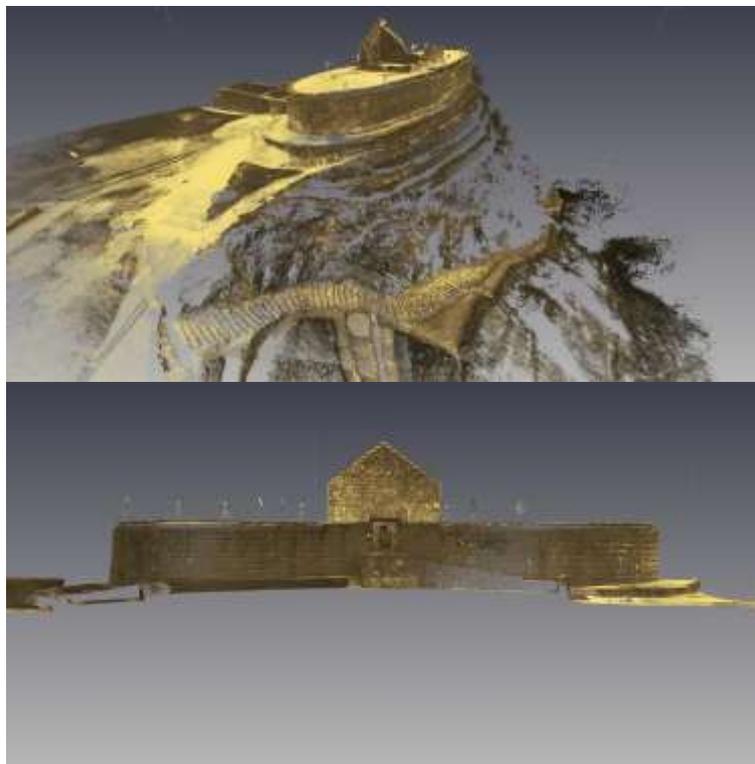


Figura 3. Levantamiento gráfico 3D de Ingapirca (Swieciochowski, 2014)

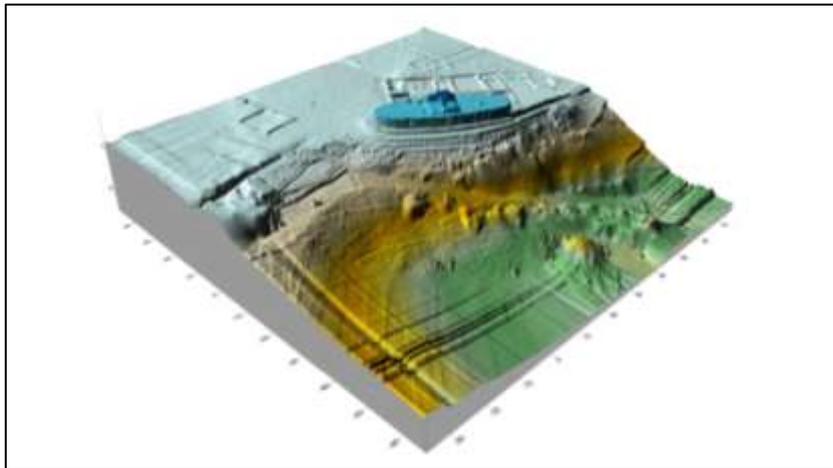
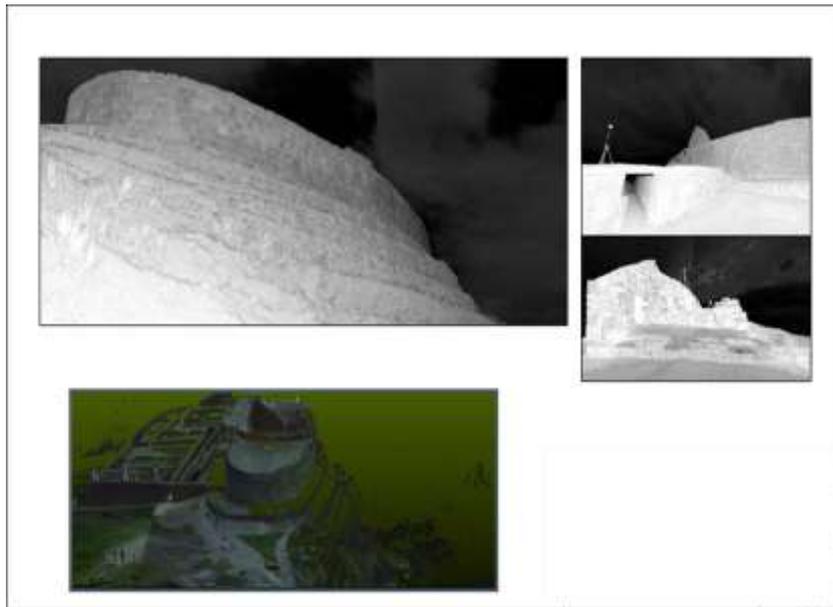


Figura 4. Levantamiento topográfico (Vásquez, 2013)

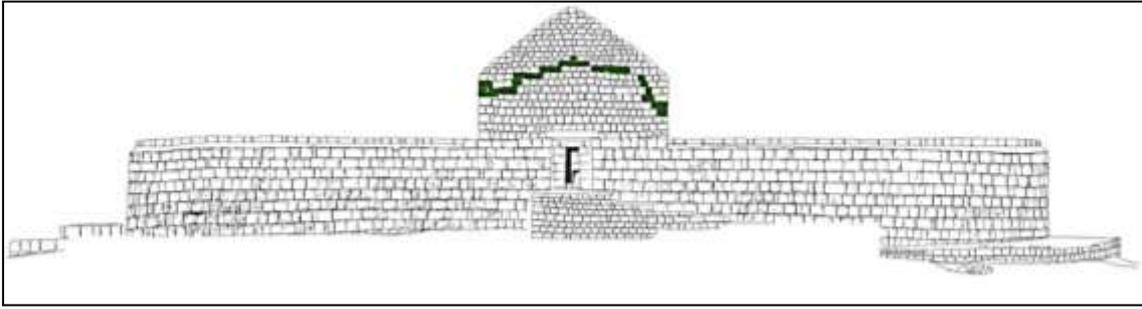


Figura 5. Fachada sur (Swieciochowski, 2014)

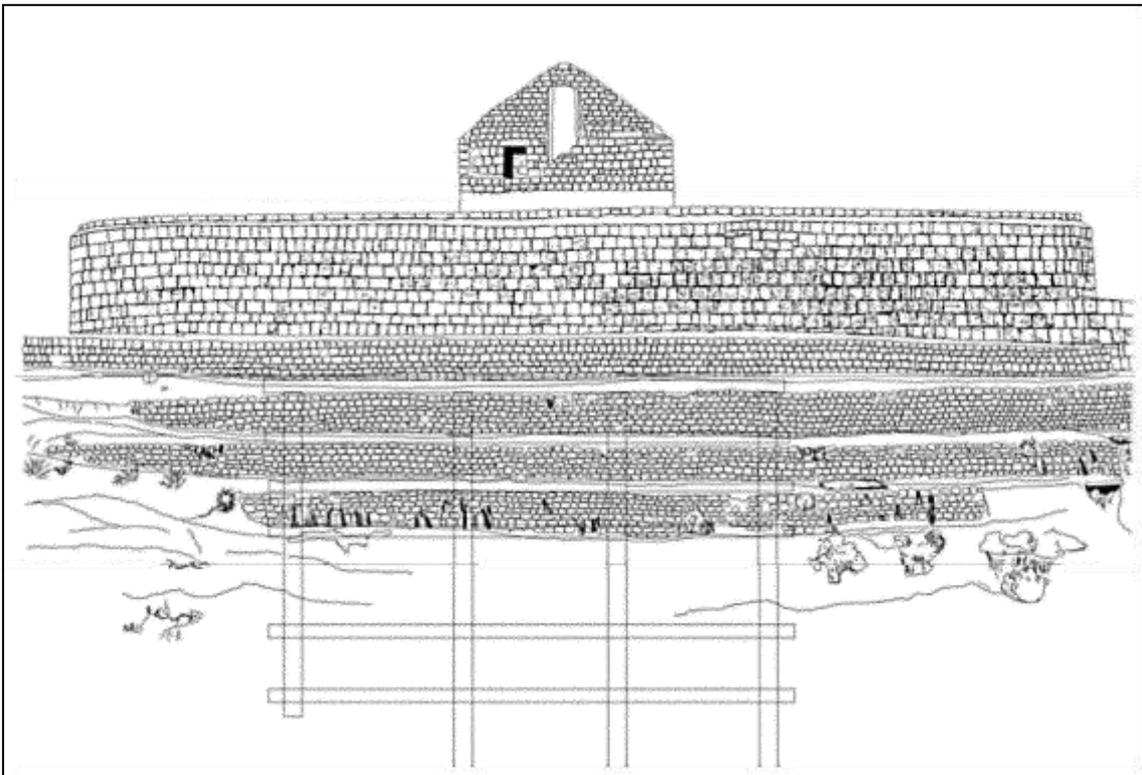


Figura 6. Fachada Norte - barranco (Swieciochowski, 2014)

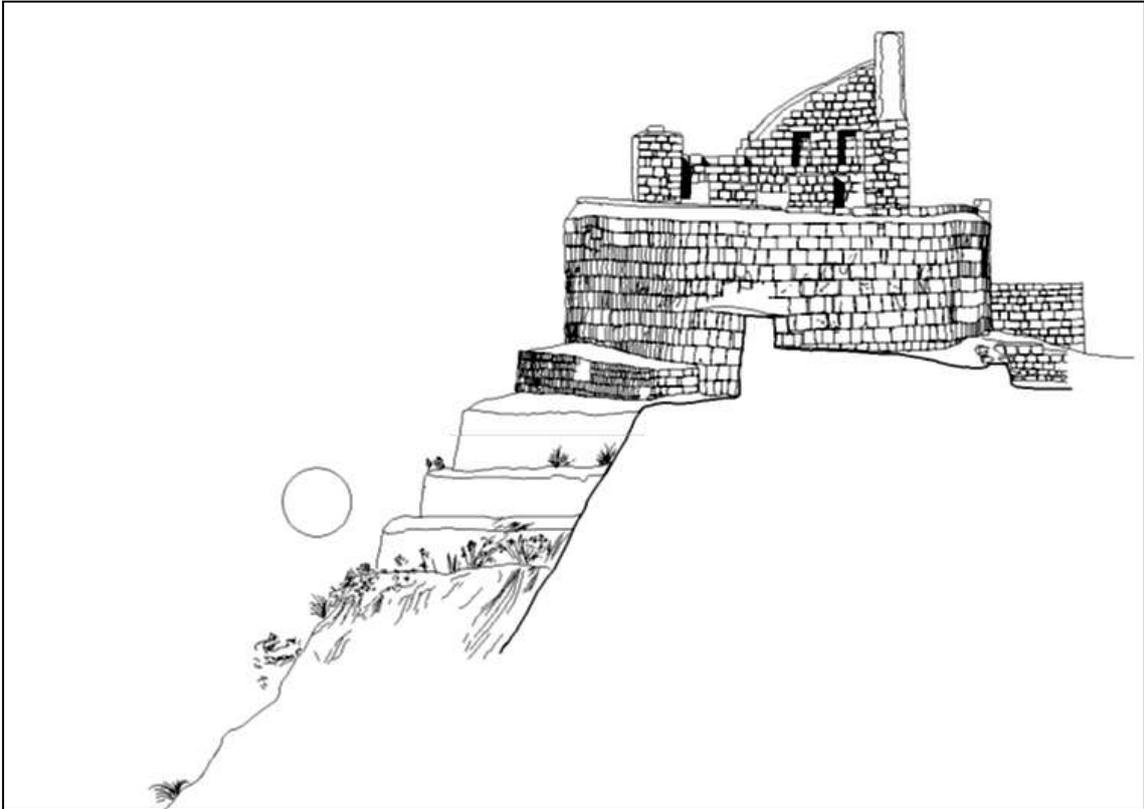


Figura 7. Fachada oeste (Swieciochowski, 2014)

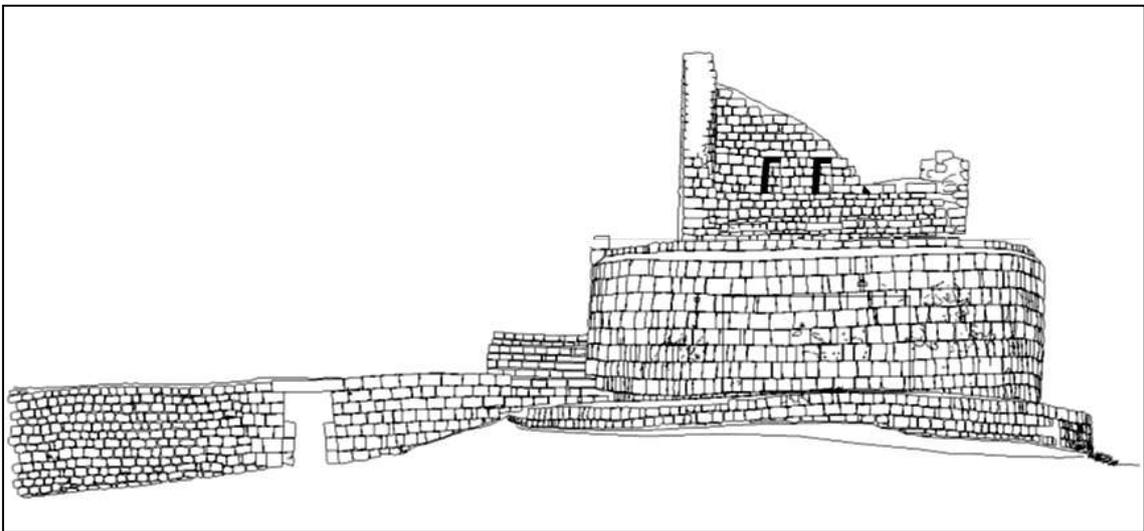


Figura 8. Fachada este (Swieciochowski, 2014)

2. PATOLOGÍAS

Dra. Martha Romero, Investigadora química del INPC

Lcdo. Fernando Espinoza, Investigador conservador del INPC

Arq. Slawomir Swieciochowski PhD, Investigador Prometeo – Secretaria Superior de Educación Superior, Ciencia y Tecnología

Con los datos recogidos del tipo e intensidad de patologías de cada piedra que conforma la elipse de Ingapirca, se han identificado tres tipos generales de lesiones generales; las primeras que implican pérdida de materia, produciendo una regresión de la superficie expuesta y una reducción de volumen; así como la pérdida de la superficie trabajada. Y otras, que involucran acumulación de materia sobre la superficie pétreo, que incluye depósitos superficiales o productos de alteración, ajenos a la piedra, de origen diverso, espesor variable, baja cohesión y poca adhesión al sustrato pétreo; y las roturas producidas por efecto de tensiones generadas ya sea por causas naturales o estructurales.

2.1. Alteraciones material pétreo que implican pérdida de material

- Desplacación por desprendimiento y luego la caída de placas del material lítico superficial de espesor constante, en torno a 1 a 2.5 cm, paralelas a la superficie plana de los paramentos (figura 9).



Figura 9. Exfoliación gruesa o desplazamiento

- Exfoliación fina, por hojas delgadas manifestándose el desprendimiento y caída del material lítico superficial, de espesor menor a 4 milímetros. Se trata de un fenómeno activo (presencia del material suelto en el piso). En algunos casos esta patología provoca una erosión de varios milímetros de profundidad en la superficie del material pétreo, en forma de hojas con la presencia de sales y de material arcilloso. En otros casos, debido a la estructura interna de la piedra misma, esta patología conduce a la aparición de “falsas grietas” por exfoliación de las caras de las juntas verticales de los bloques (figura 10).



Figura 10. Exfoliación fina

- Exfoliación catafilar o por capas, que se presenta por desprendimiento de múltiples capas concéntricas de espesor constante (figura 11).



Figura 11. Exfoliación laminar múltiple

- Alveolización o erosión alveolar que se distingue por la presencia de pequeñas cavidades redondeadas en la superficie del material, de forma y tamaño variable (figura 12).



Figura 12. Disgregación de inclusiones

- Desprendimientos de fragmentos por fracturas de los bloques pétreos, relacionados con la distribución heterogénea de las cargas puntuales (figura 13).



Figura 13. Desprendimientos y fisuras

2.2. Alteración por acumulación de materia sobre la superficie pétreo

En el conjunto de patologías que tienen en común la acumulación de materia sobre la superficie de los sillares, se incluyen:

- Eflorescencias, que se caracterizan por la formación de depósitos de color blanco, cristalinos, débilmente adheridos a la superficie de los sillares y entre las exoliaciones, compuestas por una mezcla de sales solubles e insolubles como carbonatos cloruros, nitritos, nitratos y sulfatos en bajas concentraciones en todas las paredes, a excepción de las primeras filas de los formatos pétreos en la pared norte donde se tiene una concentración mucho mayor de sulfatos (figura 14).



Figura 14. Depósitos de sales solubles e insolubles

- Otra patología son los depósitos de material arcilloso muy fino (montmorillonita, illita y caolinita), de color ocre, que forman películas delgadas fuertemente adheridas al sustrato pétreo, así como también se depositan entre las exfoliaciones y desplacados (figura 15).



Figura 15. Depósitos de material arcilloso

- Finalmente, se tiene las biopátinas o pátinas que se desarrollan a modo de manchas redondeadas, de color blanco, negro, amarillo y café, producidas por colonización biológica (figura 16).



Figura 16. Biopátina

Una vez que se identificaron las patologías y se cuenta con las ortofotos, se procedió a elaborar la cartografía de patologías, que permitió comprender más claramente, como están distribuidas las afecciones de la piedra en Ingapirca.

Pared Este

Hay presencia de biopatina, principalmente en el extremo superior de la pared y del muro. Hay pérdida de material por desplazados, alveolización y grietas. La patología con mayor presencia es biopátina (cobertura vegetal), sin embargo, la patología más activa es el Desplacado (figura 17).

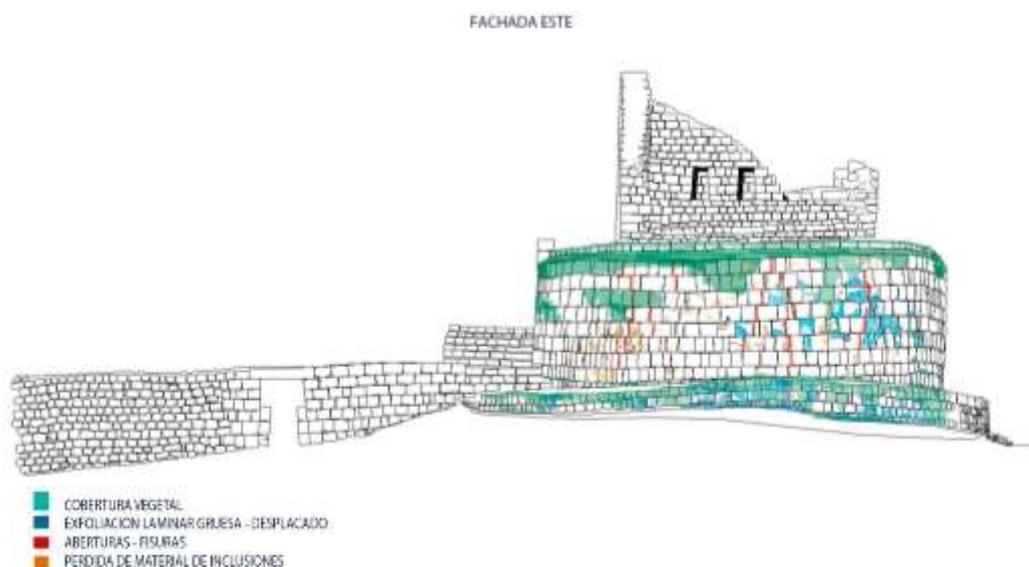


Figura 17. Cartografía de patologías - Fachada este

Pared Oeste

Se tiene las siguientes patologías: Presencia de biopátina (cobertura vegetal) en la pared, relacionada con las huellas de escorrentías y transporte de material, que se generan desde la superficie de la elipse. Pérdida de material por desplazado, exfoliación fina y alveolización. Además, se tiene grietas entre los módulos de la pared. La patología que se presenta con mayor frecuencia es la biopatina, sin embargo, son la exfoliación fina y los desplazados, las patologías más activas (figura 18).

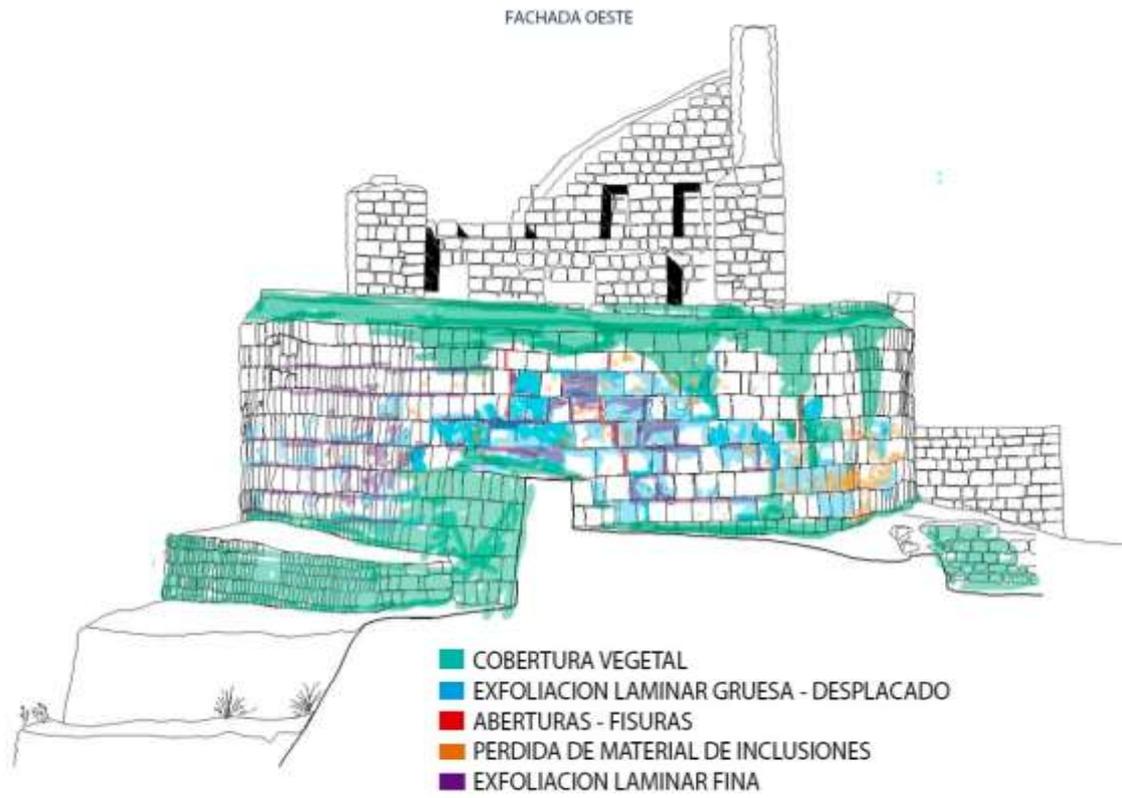


Figura 18. Cartografía de patologías - Fachada oeste

Pared Norte

Se tiene las siguientes patologías: Presencia de abundante biopátina (cobertura vegetal) en la parte superior de la pared. Pérdida de material por desplazado y exfoliación laminar fina en algunas rocas, así como también, la pérdida de material de inclusiones que deja alveolos. También están presentes grietas entre los módulos pétreos de la pared. La patología que se presentan con mayor frecuencia es el desplazado y las patologías más activas respectivamente son la exfoliación fina y el desplazado (figura 19).

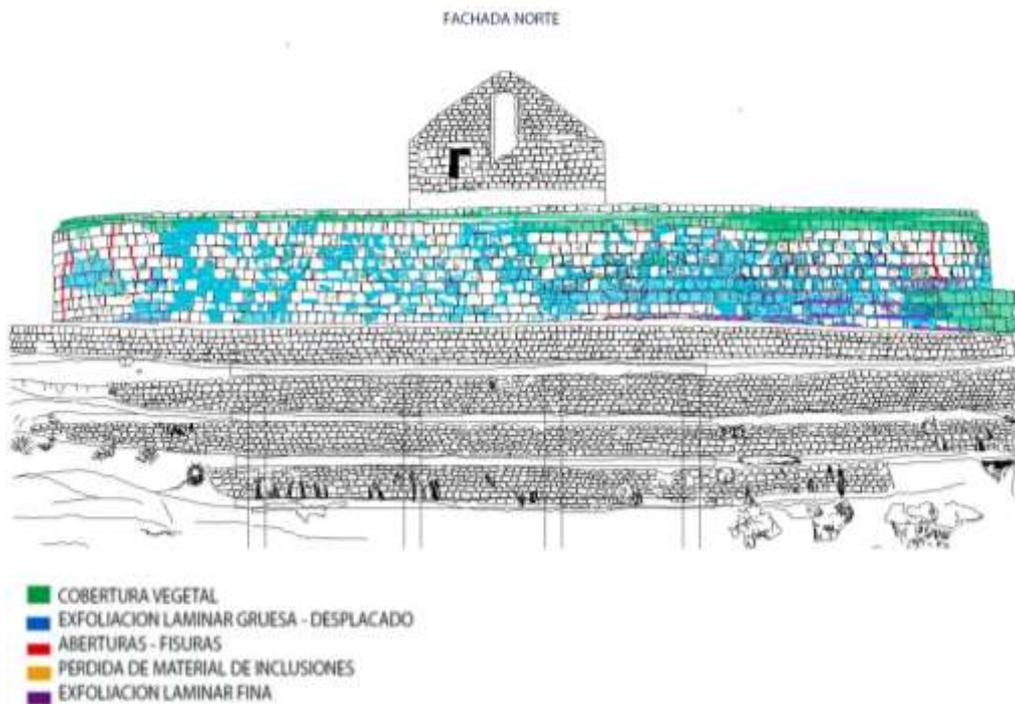


Figura 19. Cartografía de patologías - Fachada norte

Pared sur

Las patologías de la pared sur son: Presencia de abundante biopátina (cobertura vegetal) en la parte superior de la pared. Pérdida de material por desplazado, exfoliación laminar fina y alveolización; y grietas de la pared. Las patologías que se presentan con mayor frecuencia son, la cobertura vegetal, los desplazados, la exfoliación fina y la alveolización, sin embargo, son los desplazados y la exfoliación fina, las patologías más activas respectivamente (figura 20).

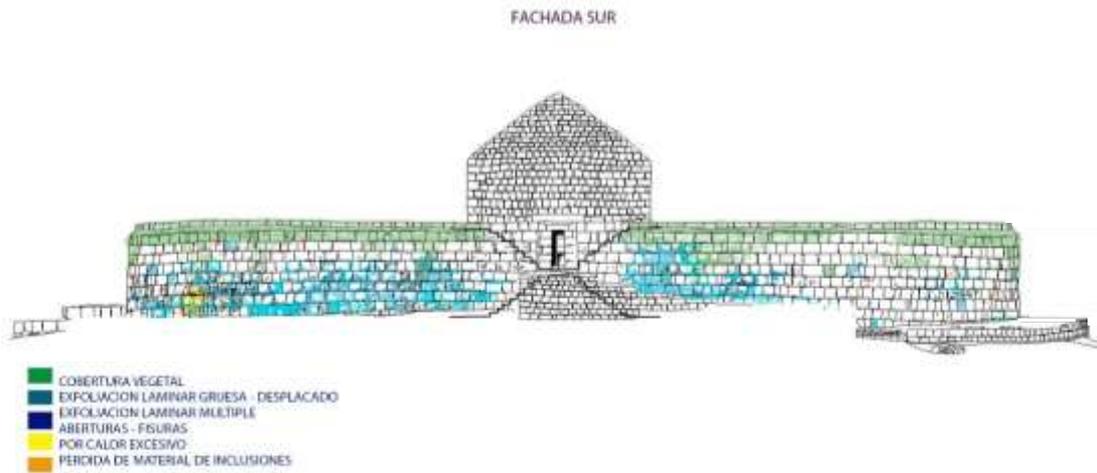


Figura 20. Cartografía de patologías - Fachada sur

3. CARACTERIZACIÓN PETROGRÁFICA Y FÍSICO-QUÍMICA DE LA PIEDRA

Dra. Martha Romero. Investigadora química del INPC

Quim. Ana Yáñez, Investigador químico del INPC

QA. Alejandro Pinto, Investigador químico del INPC

Quim. Carlos Vásquez, Investigador químico del INPC

Quím José Guachamín, Investigador químico del INPC

Ing. Francisco Viter. MsC. Facultad de Ingeniería Ambiental, Geología, Minas y Petróleos de la Universidad Central del Ecuador

3.1. Análisis de resistencia a la compresión simple

La resistencia a la compresión simple, se define como la fuerza por unidad de área requerida para romper una muestra, que está sometida a esfuerzo uní axial (no confinado) y viene expresado en unidades de fuerza sobre el área. Para la determinación de la resistencia, se toma como referencia la clasificación hecha por Deere y Miler (Benavente, 2016).

Con la finalidad de tener una aproximación a la resistencia a la compresión simple de las rocas, se realizaron ensayos “in situ” con el esclerómetro en las rocas de la estructura de la elipse.

Tomando como referencia la clasificación hecha por Deere y Miler, se ha determinado que las rocas de la elipse de Ingapirca tienen una resistencia a la compresión que oscila entre baja a media, únicamente en dos muestras que muestran datos de resistencia a la compresión muy baja.

Los valores más bajos de resistencia a la compresión simple fueron 159.62 Kg/cm² y 232.10 Kg/cm² en rocas de las fachadas sur-oeste y norte de la elipse. En cambio, el valor más alto de resistencia a la compresión fue de 776.82 Kg/cm² y 747,77 Kg/cm² en rocas de las fachadas mor-oeste y sur respectivamente. La diferencia entre los valores de resistencia a la compresión simple muestra una distribución e intensidad variable de las patologías en la elipse (tabla 1) (figuras 21, 22, 23).

Tabla 1. Resultados de análisis a la resistencia a la compresión simple

CÓDIGO DE ENSAYO	LUGAR DE MUESTREO	VALOR PROMEDIO KG/CM ²
E1	E1 Fachada Oeste	646,28
E2	E2 Fachada Oeste	559,91
E3	E3 Fachada Sur-oeste	422,38
E4	E4 Fachada Sur-oeste	455,63
E5	E5 Fachada Sur-oeste	529,01
E6	E6 Fachada Sur-oeste	159,62
E7	E7 Fachada Sur	488,38
E8	E8 Fachada Sur	568,88
E9	E9 Fachada Sur	436,56
E11	E11 Fachada Sur	480,88
E12	E12 Fachada Sur	522,53
E13	E13 Fachada Sur	360,56
E43	E43 Fachada Sur	606,44
E14	E14 Fachada Sur	447,06
E15	E15 Fachada Sur	545,47

CÓDIGO DE ENSAYO	LUGAR DE MUESTREO	VALOR PROMEDIO KG/CM ²
E16	E16 Fachada Sur	747,77
E35	E35 Fachada Sur	652,23
E36	E36 Fachada Sur	445,96
E37	E37 Fachada Sur	440,93
E38	E38 Fachada Sur	638,97
E39	E39 Fachada Sur	323,52
E42	E40 Fachada Sur	529,01
E45	E45 Fachada Sur	651,59
E10	E10 Fachada Sur	635,27
E40	E40 Fachada Sur	535,12
E41	E 41 Fachada Sur	545,23
E44	E44 Fachada Sur	396,15
E46	E46 Fachada Sur-este	489,56
E48	E48 Fachada este	296,34
E49	E49 Fachada este	445,05
E50	E50 Fachada Nor este	776,82
E47	E47 Fachada Sur-este	546,57
E51	E51 Fachada Norte	618,30
E52	E52 Fachada Norte	485,12
E54	E54 Fachada Norte	607,27
E55	E55 Fachada Norte	405,03
E53	E53 Fachada Norte	232,11
E56	E56 Fachada Norte	458,32

Elaborado por: Alfredo Vásquez y Alejandro Pinto, 2013

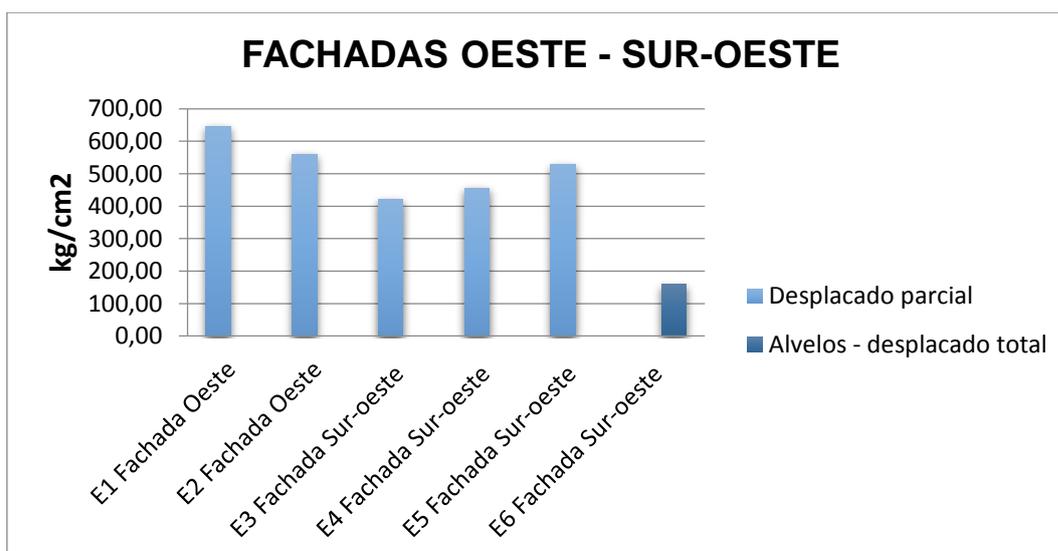


Figura 21. Resistencia a la compresión fachadas oeste y sur oeste

Elaborado por Alejandro Pinto, 2016

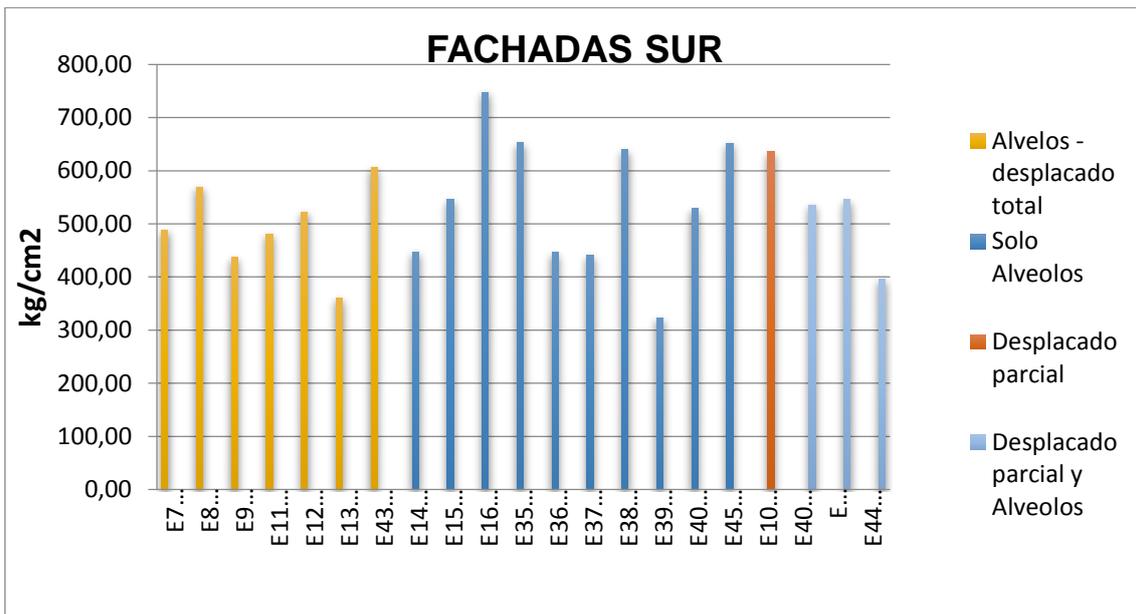


Figura 22. Resistencia a la compresión fachada sur

Elaborado por Alejandro Pinto, 2016

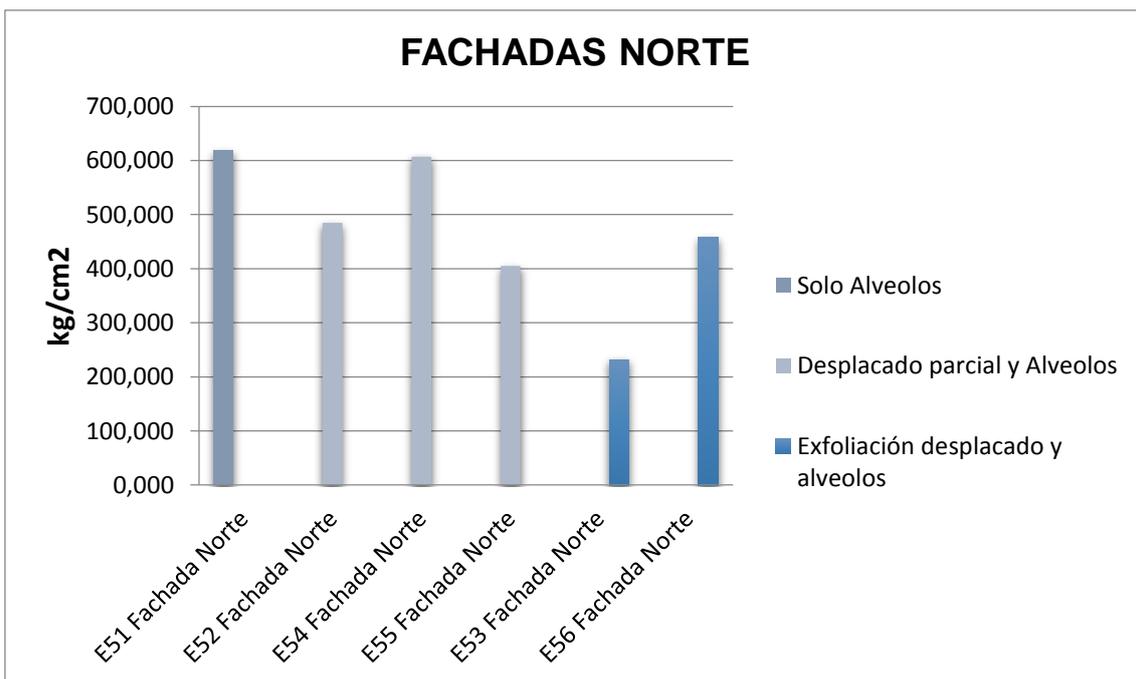


Figura 23. Resistencia a la compresión fachada norte

Elaborado por Alejandro Pinto, 2016

3.2. Análisis de porosimetría

La porosidad de un material pétreo es un parámetro de conjunto que se define como la relación entre el volumen total de los poros y el volumen total de la roca. La porosidad de la roca se puede clasificar dependiendo del grado de interconexión con el exterior

(ambiente). Se define la porosidad abierta, conectada o efectiva de la roca, como el volumen de poros comunicados entre sí y el exterior, de forma que un fluido puede ser transportado a su través. Por el contrario la porosidad cerrada, aislada o no comunicada, es aquel volumen de poros de una roca que no tiene comunicación con el exterior. Se expresa como un porcentaje del volumen total de la muestra (Da Silva, 2013).

En particular la porosidad abierta juega un papel determinante en el deterioro de los materiales pétreos debido a la conexión con el exterior de la roca. Está relacionada directamente con la durabilidad de la roca frente a la acción de los agentes externos. Se halla directamente relacionada con las propiedades hídricas; de allí su importancia para el conocimiento del movimiento del agua al interior de la roca. Por ello, al ser el agua uno de los principales agentes que influyen en el deterioro de las rocas, la porosidad abierta puede considerarse como una primera aproximación de la alterabilidad de aquellas (Benavente, 2016).

Se analizaron muestras de rocas de canteras y de Ingapirca, los resultados se observan en la tabla 1 y son consistentes con los datos bibliográficos de porosimetría para las rocas andesitas. En las rocas de Cajón Tambo, Hato de la Virgen y el Lapidario de Ingapirca se observa que la porosidad abierta que no sobrepasa el 11% y el contenido de agua de saturación no sobrepasa el 5%, sin embargo, se puede observar que hay dos muestras de canteras y una de Ingapirca que tienen valores superiores de porosidad abierta y contenido de agua de saturación, esto significa que han sufrido procesos de deterioro que han cambiado la estructura del sistema de poros de las rocas, razón por la cual estos valores se ven incrementado (tabla 2, figura 24).

Tabla 2. Resultados de porosimetría

Muestras	Lugar de Muestreo	Porosidad Total %	Porosidad Abierta%	Porosidad Cerrada %	Absorción de Agua %	Contenido en agua en saturación (%)	Densidad aparente (g/cc)	Densidad aparente en el agua (g/cc)
13-54-1	Cajón Tambo	4,717	5,6116	-0,8946	2,2613	2,2113	2,4815	2,6291
13-54-2	Cajón Tambo	9,8153	10,662	-0,8467	4,5221	4,3264	2,3578	2,6392
13-54-4	Cajón Tambo	6,645	7,5215	-0,8765	3,1179	3,0236	2,4124	2,6086
13-54-7	Cajón Tambo	10,4859	11,3263	-0,8404	5,1236	4,8739	2,2106	2,493
13-54-9	Cajón Tambo	7,2992	8,1695	-0,8703	3,5337	3,4131	2,3119	2,5176
13-54-26	Lapidario Ingapirca	10,1173	10,9612	-0,8439	4,7358	4,5217	2,3145	2,5995
13-54-28	Lapidario Ingapirca	11,5999	12,4299	-0,83	5,4488	5,1673	2,2812	2,605
13-54-57	Cajón Tambo	9,8619	10,7082	-0,8463	4,2214	4,0504	2,5366	2,8409
13-54-58	Cajón Tambo	7,1464	8,0181	-0,8718	3,5773	3,4537	2,2414	2,4368
13-54-59	Cajón Tambo	7,1038	7,976	-0,8722	3,5414	3,4203	2,2522	2,4474
13-54-60	Cajón Tambo	8,3691	9,2294	-0,8603	4,0645	3,9058	2,2707	2,5016
13-54-61	Cajón Tambo	11,2294	12,0628	-0,8334	5,5254	5,2361	2,1832	2,4826
13-54-62	Cajón Tambo	9,2281	10,0804	-0,8522	4,4984	4,3047	2,2409	2,4921
SN (Slawomir Swieciochowski, 1991)	Ingapirca		14.34				2.15	

Elaborada por: Carlos Vásquez, 2015

Debido a la relación existente entre la porosidad, generalmente el contenido de agua de saturación y la densidad de las rocas, se observa que a mayor porosidad abierta hay mayor absorción de agua, debido a que se tiene un mayor volumen de espacios vacíos al interior de la roca, susceptibles de ser llenados con agua.

Sin embargo de esto, no siempre la roca que presenta valores mayores de porosidad abierta es la que alcanza valores de absorción más altos, pues la totuosidad de la configuración del sistema poroso va a determinar una mayor o menor dificultad de relleno de los espacios vacíos por agua. Cuanto más lenta sea la absorción, menores serán los espacios vacíos y más tortuosa será su conexión. La falta de conectividad entre los poros obviamente reduce la porosidad abierta (12). Otro aspecto a tomar en cuenta es el hecho de que las rocas que presentan un grado alto de meteorización con la consiguiente formación de minerales arcillosos, que rellenan las fisuras y poros, limitando la circulación de agua. (figura 24).

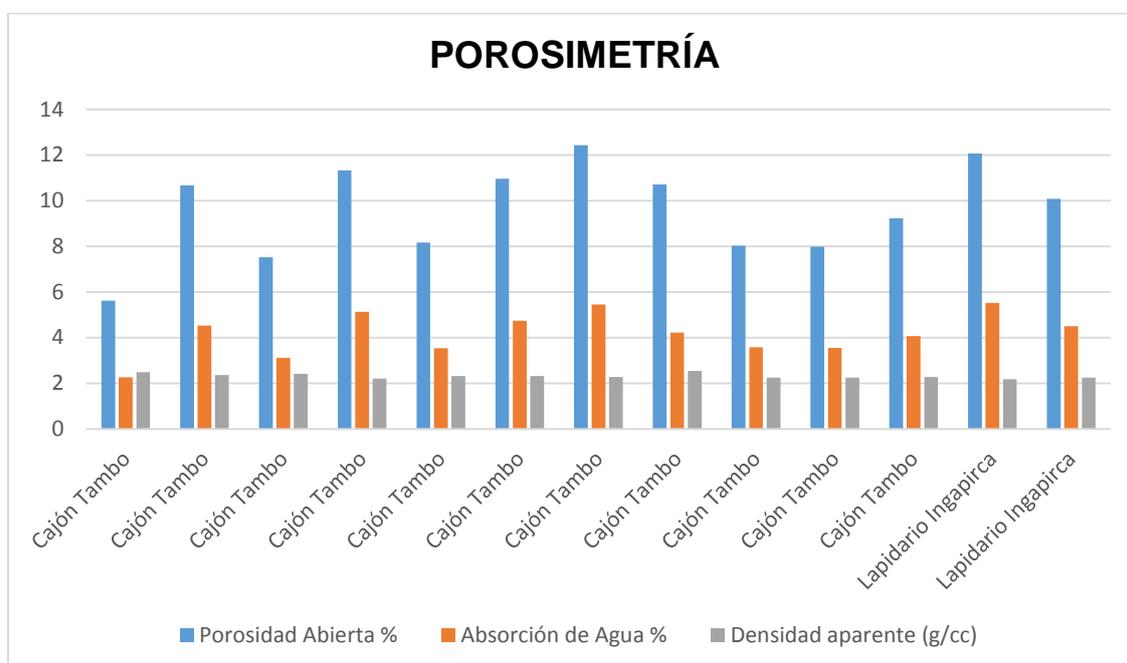


Figura 24. Porosimetría, absorción de agua y densidad aparente

Elaborado por: Carlos Vásquez, 2015

A analizar la información generada del análisis de las rocas de canteras y de Ingapirca y compararlas con los datos obtenidos en 1991 del análisis de rocas de Ingapirca, se puede deducir que la piedra de Ingapirca tiene una porosidad baja debido a que presenta poros de tamaño muy pequeño. De igual forma se ha definido que, la porosidad abierta aumenta a medida que aumenta la meteorización, salvo casos excepcionales que estos micro poros están tapados por arcillas. En las rocas de Ingapirca se observa que tienen mayor porosidad abierta y absorción de agua, respecto a las muestras de canteras, este incremento en la porosidad abierta disminuye considerablemente la resistencia mecánica de las rocas, esta particularidad se observa.

3.3. Propiedades Hídricas

Las propiedades físicas que describen el movimiento del agua, tanto en fase líquido como en vapor, en las rocas se denominan propiedades hídricas. El agua es uno de los agentes de deterioro más importantes de los materiales pétreos. Por un lado, la cantidad de agua en el interior de la roca va a condicionar fuertemente la degradación química (disolución, cristalización, hidrólisis, oxidación, carbonatación, etc.); física (presión de cristales de sales y del hielo, hinchamiento de arcillas); y biológica, e incluso disminuye las propiedades mecánicas de la roca. Por otro lado, el movimiento del agua, tanto en estado líquido como en vapor, define la cantidad de agua en la roca en equilibrio con el ambiente y es uno de los mecanismos más importantes de contaminantes (iones, aerosoles, etc.) en el interior de la roca. Por tanto el conocimiento de las propiedades hídricas es básico para entender y predecir la durabilidad del material. (Benavente, 2016)

La cantidad máxima de agua en el interior de la roca está determinada por su porosidad conectada, siempre que se desprece el agua que puedan albergar fases hidratadas o algunas arcillas presentes en la roca. Esta porosidad es independiente del sistema poroso de la roca y del tipo de movimiento del agua en su interior. (Fort R. , 1996)

En estado líquido, el movimiento del agua está controlado por diferentes fuerzas según el tamaño de los poros por los que se discurre (Fort R. , 1996). Se pueden destacar como mecanismos de movimiento del agua la absorción, desorción y la capilaridad.

Estos ensayos permiten conocer la evolución en el tiempo, del contenido de agua de una roca para unas condiciones dadas y fueron realizados en muestras de rocas de canteras y de Ingapirca.

Absorción de agua: Velocidad de absorción

La absorción de agua por inmersión suministra una buena información del grado de saturación máximo de la roca cuando esté bajo la acción de la lluvia, de la escorrentía superficial o de la ascensión capilar. Además el estudio de la cinética de absorción proporciona información sobre la interconectividad y tortuosidad de los espacios vacíos, factor importante a la hora absorber agua. (Aires-Barros, 2001)

La absorción inicial, más rápida, está relacionada con la entrada de agua en los espacios vacíos mayores y bien interconectados, mientras que la absorción lenta, característica del final del ensayo corresponde a la entrada de agua en los espacios vacíos más pequeños y de difícil acceso. (Sousa, 2000)

Los resultados se reflejan en la tabla 3.

Tabla 3. Velocidad de absorción de agua

TIEMPO EN HORAS															
Punto de Muestreo	0	0,25	0,50	1	2	3	4	5	6	24	25	120	168	216	240
Porcentaje															
Cajón Tambo M2 AB	0,00	2,71	3,01	3,06	2,99	3,01	3,03	3,06	3,07	3,13	3,21	3,37	3,44	3,51	3,51
Cajón Tambo M4 AB	0,00	1,18	1,55	1,64	1,73	1,83	1,94	1,87	1,90	1,98	1,96	2,12	2,21	2,19	2,21
Cajón Tambo M5 AB	0,00	2,26	3,34	4,22	4,82	5,35	5,87	5,94	6,17	7,09	7,12	7,37	7,46	7,48	7,57
Hato de la virgen M6 AB	0,00	1,78	2,43	2,96	3,35	3,55	3,75	3,79	3,89	4,45	4,50	4,75	4,82	4,86	4,88
Hato de la virgen M7 AB	0,00	2,25	3,11	3,73	4,11	4,46	4,81	4,82	4,86	5,28	5,32	5,49	5,54	5,55	5,59
Cajón Tambo M9 AB	0,00	1,28	1,84	2,36	2,70	3,01	3,31	3,36	3,53	4,70	4,79	5,45	5,48	5,50	5,56

Elaborado por: Alejandro Pinto, 2015

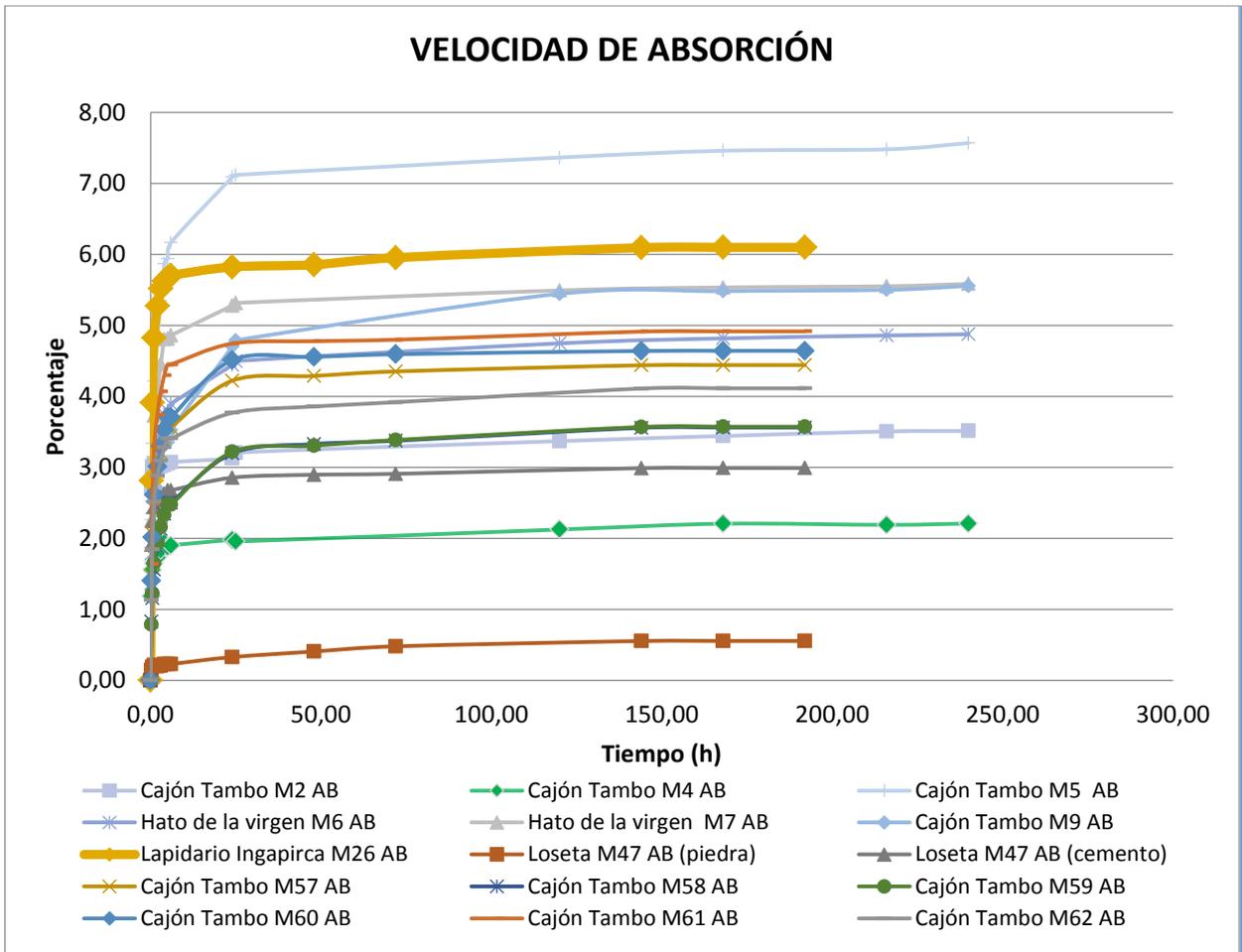


Figura 25. Velocidad de absorción

Elaborado por: Alejandro Pinto, 2015

Al graficar los resultados obtenidos se puede observar que la etapa de absorción rápida de agua, corresponde a los primeros 15 minutos de inmersión. La etapa de transición entre la absorción rápida y la lenta (curva casi horizontal) se alcanza a las 24 horas para la mayoría de las muestras, a excepción de algunas muestras donde la curva no se estabiliza capacidad de absorción de agua por inmersión es baja y que la velocidad de absorción es rápida, alcanzándose aproximadamente el 50% de agua absorbida al primer cuarto de hora, y el 90% a las 8 horas (figura 25)

Desorción de agua: Velocidad de evaporación

Los daños producidos por el agua en las piedras son debidos en gran parte, tanto a la absorción de agua como a su posterior secado (evaporación), sobre todo si éste lleva aparejada la cristalización de sales solubles (Prada, 2016).

El secado de las piedras porosas es un proceso complejo, en el que intervienen múltiples factores como temperatura, humedad, etc., además de las características petrográficas del material (Prada, 2016).

En la figura se representa la cinética de evaporación de agua, pudiendo observarse que en periodos de tiempo no muy largos (2 días) se puede conseguir el máximo secado a las condiciones ambientales, lo cual indica que, en desorción libre, este material presenta poca retención de agua (figura 26).

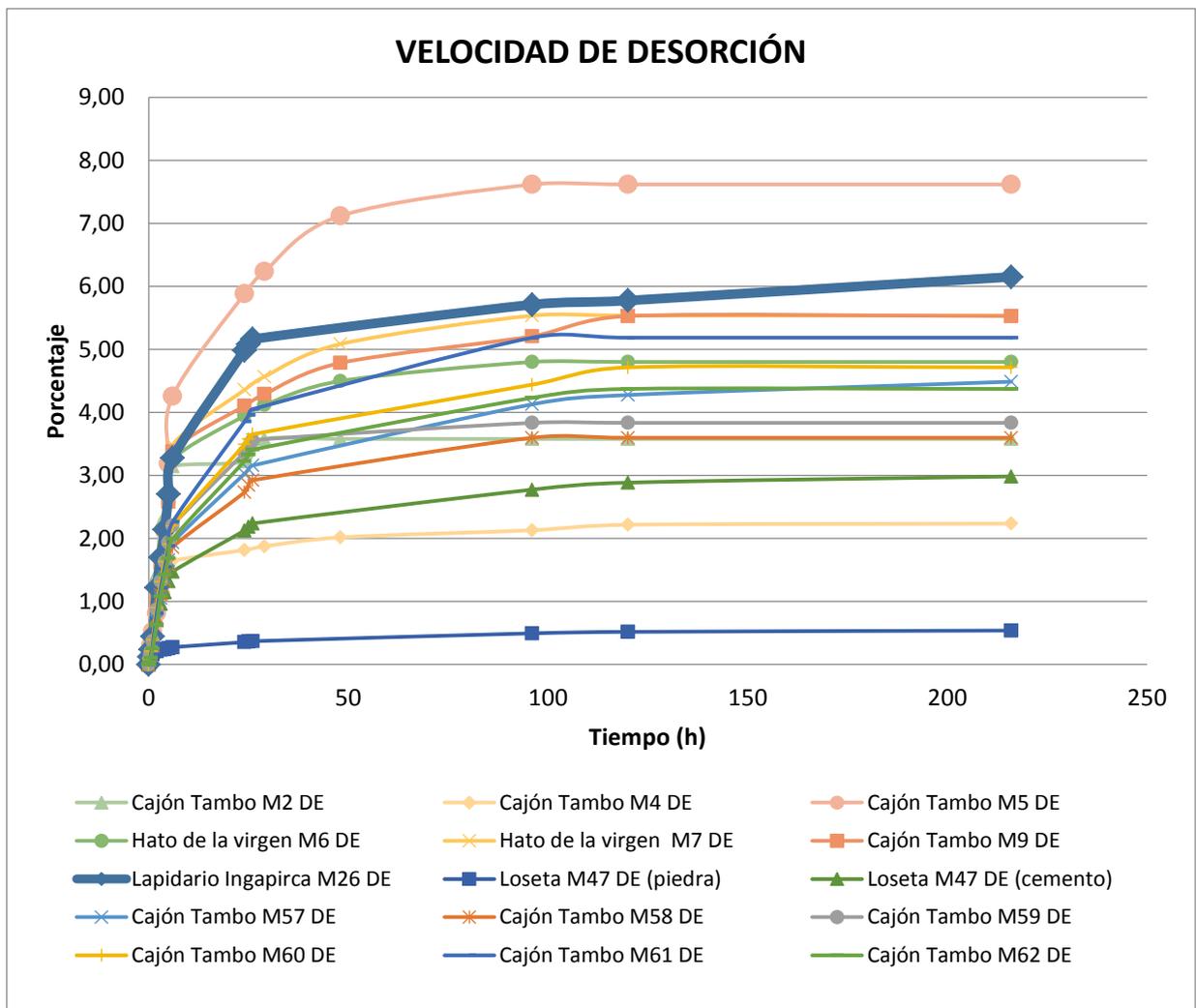


Figura 26. Velocidad de desorción

Elaborado por: Alejandro Pinto, 2015

Al graficar la cinética de absorción y desorción del agua, se observa que la velocidad de desorción del agua (evaporación) es menor que la de absorción. Es decir que, la velocidad de evaporación del agua es dos veces más lenta que la absorción (figura 27).

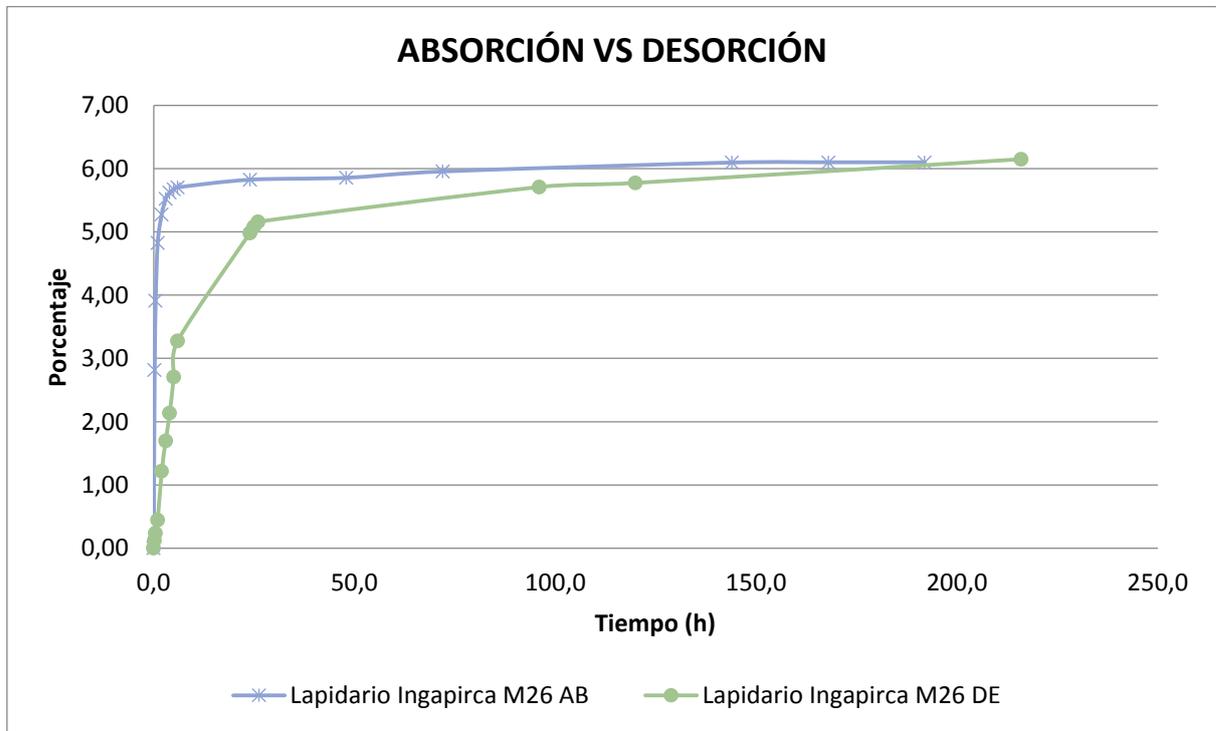


Figura 27. Relación absorción versus desorción de agua

Elaborado por: Alejandro Pinto, 2015

Capilaridad

Al realizar las determinaciones de capilaridad y contrastando éstos datos con la porosimetría se puede observar que las rocas de cantera y del lapidario de Ingapirca tienen un coeficiente de penetración capilar bajo de 0.13 -0.38 y un coeficiente de absorción capilar también bajo de 0.38 – 1.15. Estos datos son consistentes con los datos de porosimetría, donde ya se definió que se trata de rocas con una porosidad abiertas muy pequeña, con valores entre 5.6% -12.42% (tabla 4).

Tabla 4. Capilaridad

Punto de Muestreo	Tiempo (min)	0	60	120	180	240	300	360	1440
	$\sqrt{\text{Tiempo (h)}}$	0,00	1,00	1,41	1,73	2,00	2,24	2,45	4,90
	Distancia	cm							
13-054-01	Cajón Tambo	0,30	1,0	1,00	1,50	1,70	1,70	1,70	2,05
13-054-02	Cajón Tambo	0,30	2,5	3,00	---	---	----	----	----
13-054-04	Cajón Tambo	0,30	2,0	2,50	2,70	2,90	3,00	----	2,25
13-054-07	Cajón Tambo	0,30	2,0	2,70	3,00	---	----	----	3,00
13-054-09	Cajón Tambo	0,30	0,5	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	1,00
13-054-26	Lapidario Ingapirca	0,30	1,0	2,10	2,30	2,50	2,60	2,60	2,25
13-054-28	Lapidario Ingapirca	0,30	1,7	2,00	2,50	2,70	2,70	2,70	2,25

Elaborado por Alejandro Pinto, 2015

A partir de los resultados de la tabla 5, se puede decir que, por lo general, el agua puede penetrar fácilmente hasta 3 cm del interior de la roca; y el vapor a mayor profundidad, donde sufre el proceso de condensación capilar (figura 28).

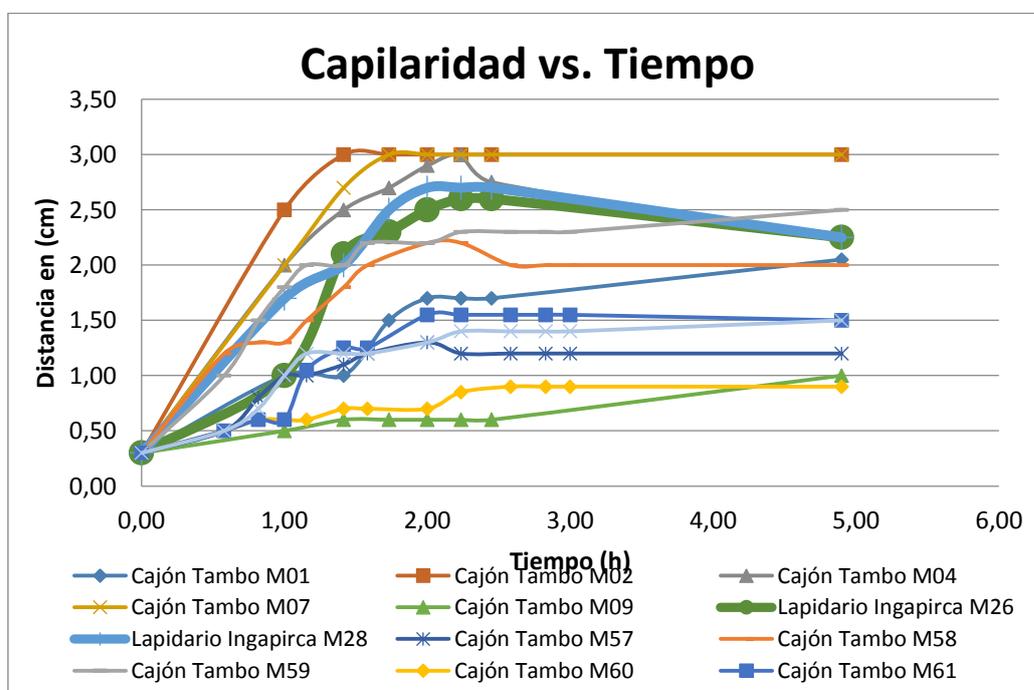


Figura 28. Capilaridad

Elaborado por: Alejandro Pinto, 2015

A partir de los resultados de la tabla 5 se calculó los coeficientes de penetración y absorción capilar. Se observa que las piedras de Ingapirca presenten coeficientes de penetración y absorción capilar mayores que las rocas de las canteras que están poco alteradas. El aumento tanto en los valores de los coeficientes con en la porosidad, se debe a los procesos de meteorización que se están dando en las rocas, disminuyendo de esta forma la resistencia mecánica de las rocas (figura 29).

Tabla 5. Resumen de capilaridad

Punto de Muestreo		Capilaridad		
		Coefficiente de penetración capilar (A)	Coefficiente de Absorción Capilar (C)	Coefficiente de correlación
13-054-01	Cajón Tambo	0,35	1,04	0,76
13-054-02	Cajón Tambo	1,96	5,89	0,99
13-054-04	Cajón Tambo	0,29	0,88	0,23
13-054-07	Cajón Tambo	0,43	1,28	0,48
13-054-09	Cajón Tambo	0,13	0,40	0,95
13-054-26	Lapidario Ingapirca	0,38	1,15	0,41
13-054-28	Lapidario Ingapirca	0,34	1,02	0,35
13-054-57	Cajón Tambo	0,17	0,51	0,50
13-054-58	Cajón Tambo	0,30	0,91	0,52
13-054-59	Cajón Tambo	0,38	1,15	0,61
13-054-60	Cajón Tambo	0,13	0,38	0,76
13-054-61	Cajón Tambo	0,30	0,89	0,64
13-054-62	Cajón Tambo	0,24	0,73	0,67

Elaborado por: Ana Yañez, Alejandro Pinto, 2015

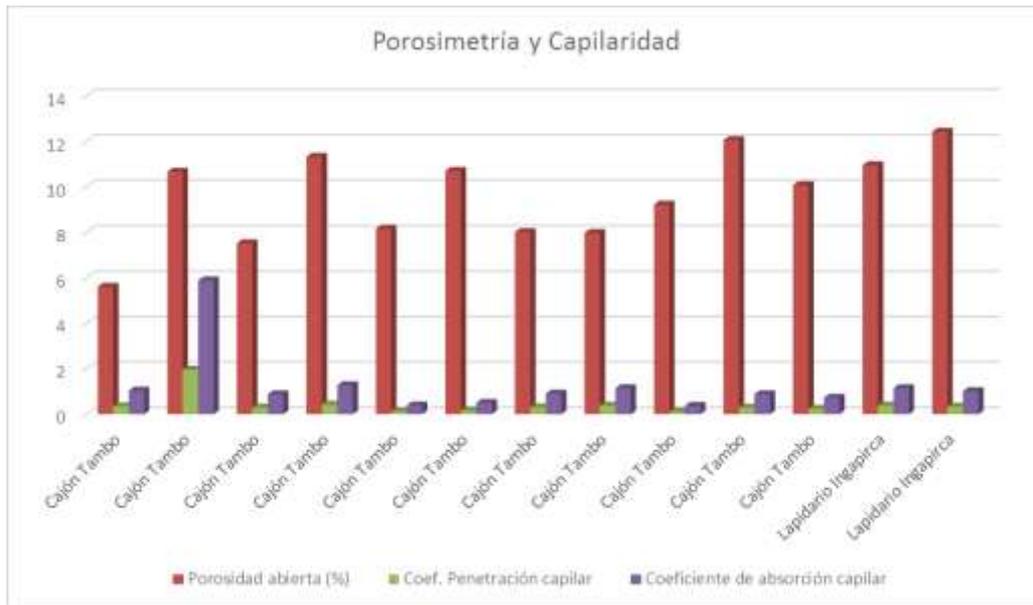


Figura 29. Relación entre porosimetría y capilaridad

Elaborado por: Ana Yañez, 2015

3.4. Análisis granulométrico

Se realizó el análisis granulométrico de muestras de morteros y materiales de los sondeos realizados en el monumento (tabla 6).

Tabla 6. Resultados de granulometría

MUESTRA	SIITO DE MUESTREO	Porcentaje de Recuperación (%)					
		Malla 40	Malla 60	Malla 100	Malla 200	Residuo	TOTAL
		>0.38 mm	>0.23 mm	>0.14 mm	>0.0737 mm	< 0.0737 mm	%
13-054-16	Mortero Cuerpo de guardia	49,2807	12,3265	9,9894	11,5491	7,94	91,0858
13-054-17	Mortero Cuerpo de guardia	33,0776	14,5677	15,0119	22,9166	11,6819	97,2556
13-054-34	Capa nivelación Pared sur-oeste	69,739	4,7398	3,5485	3,4577	3,1539	84,6389
13-054-35	Asiento de muro Pared sur-oeste	2,6854	9,2373	35,2077	31,6743	13,3542	92,1589
13-054-36	Asiento de muro Pared sur-oeste	36,9845	5,7241	13,3966	23,8908	11,2962	91,2922
13-054-37	Material juntas de cimientos Pared sur-oeste	50,8455	8,9193	6,7942	9,9591	7,2126	83,7307
13-054-38	Asiento de nivelación Pared sur-oeste	53,1119	11,4785	7,4302	7,516	5,98	85,5166
13-054-39	Asiento de muro Pared norte	38,5442	8,8688	9,9036	18,2474	17,9879	93,552
13-054-40	Capa de nivelación Pared norte	44,5308	10,3377	8,0713	11,4028	10,9105	85,253
13-054-41	Material de juntas Pared norte	33,5016	18,3837	12,064	13,336	10,5735	87,8588
13-054-42	Nivelación sobre chova Elipse oeste	61,4356	12,5991	8,7073	8,8638	4,6718	96,2774
13-054-43	Nivelación sobre chova Elipse oeste	7,5413	8,6417	8,5912	12,9928	6,9261	44,693
13-054-44	Nivelación contacto son chova Elipse oeste	31,432	12,1347	12,5385	19,2721	11,8868	87,2642

MUESTRA	SIITO DE MUESTREO	Porcentaje de Recuperación (%)					
		Malla 40	Malla 60	Malla 100	Malla 200	Residuo	TOTAL
		>0.38 mm	>0.23 mm	>0.14 mm	>0.0737 mm	< 0.0737 mm	%
13-054-45	Nivelación bajo chova Elipse oeste	48,0137	10,4689	10,0348	12,9524	10,7434	92,2133
13-054-48	Material de relleno Elipse oeste	18,6159	13,4168	27,5453	21,0943	13,3274	93,9997
13-054-49	Material después de cemento Elipse oeste	21,2912	22,0029	12,8414	18,9592	11,8919	86,9865
13-054-52	Material entre juntas Pared norte	39,9425	11,8318	11,953	11,3977	5,8543	80,9792

Elaborado por: Carlos Vásquez, 2015

3.5. Análisis petrográfico

Análisis macroscópico: Roca gris verdosa, matriz y fenocristales, se observa plagioclasas y pocos clastos de otras rocas, el tamaño de grano varía desde los primeros milímetros hasta 3mm, dureza media, poco disgregable en sus vértices, finos fenocristales de minerales producto de alteración, en secciones con hidróxidos de hierro por meteorización (figura 30).

Análisis microscópico: Textura porfiritica, con cristales de diferente tamaño, en zonas se observa concentraciones de plagioclasas y en secciones ferro-magnesianos (piroxenos y anfíboles). Estos minerales tienen sus bordes alterados a clorita.



Figura 30. Bloque de andesita tallado del muro chapado de la elipse.

Características de los minerales:

Plagioclasas: Pocos minerales están alterados, se ha identificado estos minerales por su maclado polisintéticos, son de formas bien desarrolladas, sus bordes estas ligeramente corroídos con zonas de minerales fino-granulares. El relieve es moderado algunos cristales presentan un ángulo extinción inclinado. Se observa plagioclasas zonadas característico de rocas extrusivas.

Ferro magnesianos: Los micro-cristales de piroxenos tienen características de augitas y están ligeramente alterados a clorita, por sus propiedades ópticas, colores de birrefringencia de segundo orden (colores fuertes) y por su relieve alto se los ha identificado como augitas, los anfíboles (hornblendas) por su clivaje característico bajo el microscopio son de color café claro y verdoso en luz natural, presentan relieve moderado - alto, y la mayoría de los crista se presenta en concentraciones.

Minerales de alteración: se observa clorita asociados a ferro magnesianos (hornblenda y augitas). Tiene muy pocos minerales opacos (metálicos) que por su característica podrían ser sulfuros.

Nombre de la roca: volcano-clástica de composición andesítica con hornblenda.

En las Microfotografías (figura 31) se puede Observar:

Fotografía izquierda: Fenocristales de plagioclasas en su gran mayoría característicos de rocas intermedias, los minerales son de formas bien desarrolladas, los ferro-magnesianos se observan en concentraciones y ligeramente alterados de tinte verdoso amarillento de clorita, en la parte central se puede identificar concentraciones de maclas de plagioclasas.

Fotografía derecha: Microfotografía en Luz natural: Con relieve alto son los ferro-magnesianos (anfíboles y pocos piroxenos) parte superior derecha algunos con tinte amarillo-verdoso de clorita, asociados a las plagioclasas y anfíboles (hornblendas). Los opacos (metálicos) de color negro en las dos fotografías se encuentran aislados. Magnificación X20. (Viteri, 2014)

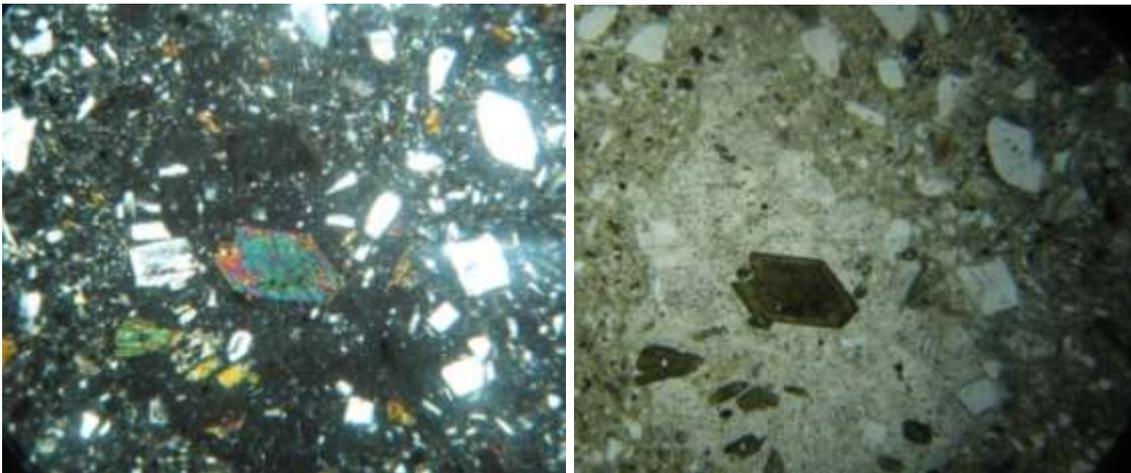


Figura 31. Micro fotografía *Izquierda:* Luz polarizada *Derecha:* Luz Natural

Se analizaron también las rocas de las canteras, con los siguientes resultados:

Rocas verdes: Son rocas masivas, compactas, baja porosidad, de grano fino a medio, moderadamente permeable, alta meteorización, bajo magnetismo, moderada selección, matriz soportada, cementación de sílice y óxidos, clastos angulosos menores a 4mm de plagioclasas y otras rocas. Presentan textura porfiritica / clástica, con cristales de diferente tamaño, en zonas se observa concentraciones de plagioclasas (andesinas), los ferro magnesianos (augitas y hornblendas) tienen sus bordes alterados y meteorizados a clorita. Como minerales de alteración se observan cloritas y minerales opacos que podrían ser sulfuros. Se trata de rocas volcano clástica cloritizada/aglomerada de grano fino.

Rocas cafés: Son poco compactas disgregables, con alta porosidad, de grano grueso, altamente permeable, alta meteorización, leve magnetismo, mal seleccionado, clasto soportado, poca cementación de óxidos, clastos angulosos menores a 6mm. Textura clástica, algunos detritos tienen textura porfirítica, la matriz está rellena los poros con material volcánico suelto. Como minerales de alteración se observa trazas de sílice. El cuarzo secundario y zonas de vesículas con vidrio devitrificado. En la matriz se observa minerales opacos con características de sulfuros. Se trata de un aglomerado volcánico/grava.

3.6. Análisis mineralógico por difracción de rayos X

Muestras lomillos y morteros:

Se analizaron varias muestras del material arcilloso de los morteros y lomillos del cuerpo de guardia y la casa del inca. De los resultados se concluye que los minerales arcillosos son caolinita, montmorillonita y illita; mezclados con fragmentos de rocas meteorizadas (feldespatos de potasio, plagioclasas, hornblendas) y un alto contenido de carbonatos. La presencia de caolinita es un indicativo de que un grado muy avanzado de meteorización de los feldespatos (figura 32).

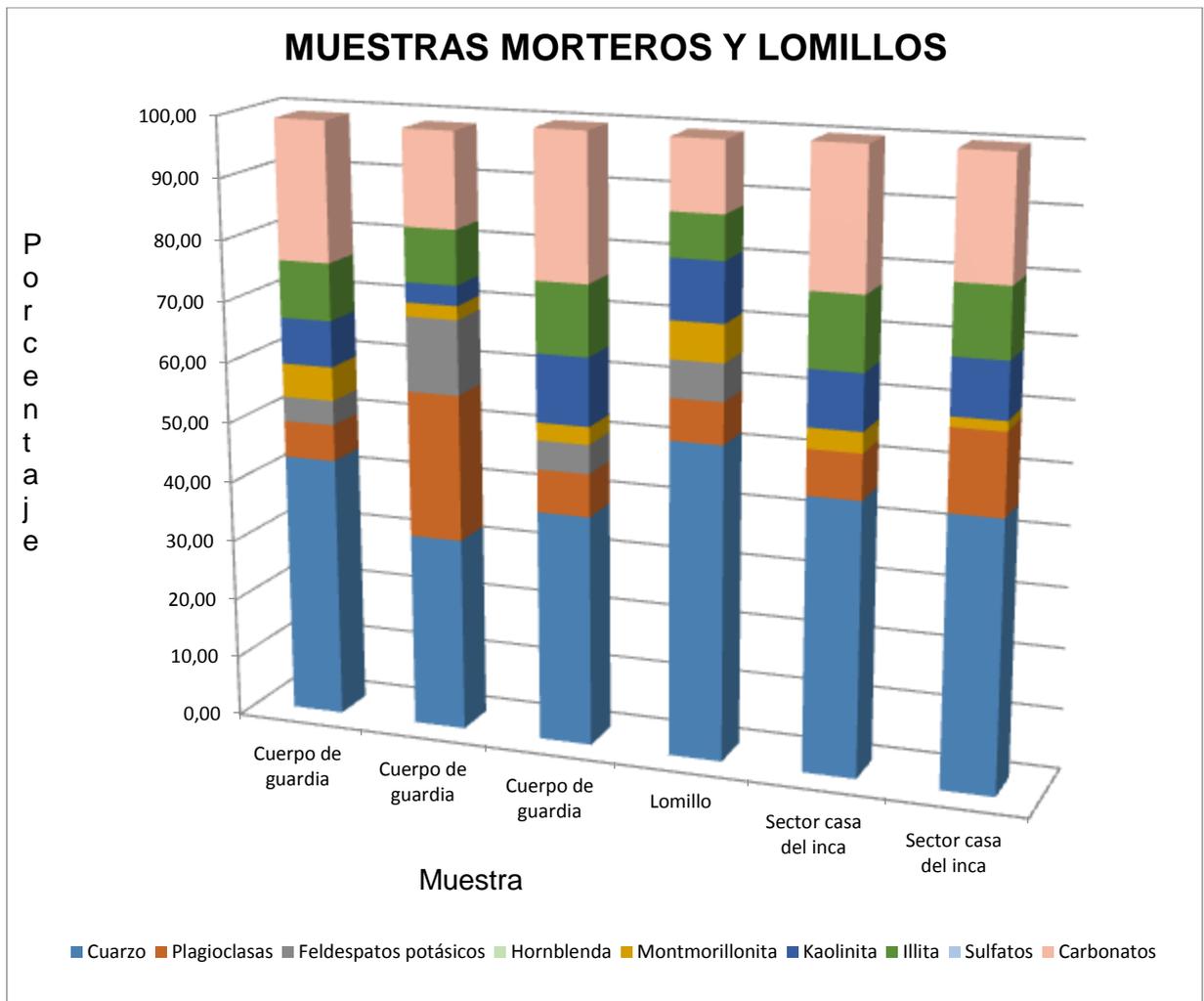


Figura 32. Composición mineralógica de morteros y lomillos

Elaborado por José Guachamín, 2015

Muestras Canteras:

Se analizaron muestras de las canteras Cajón Tambo y Hato de la Virgen, las cuales presentaban diferentes estados de meteorización, esto con el objeto de identificar las fases y los procesos de meteorización. De los resultados se observa que las rocas que visiblemente se encuentran en buen estado, su matriz silíceica está formada por cuarzo, plagioclasa y feldespato casi en su totalidad. En cambio, en las muestras meteorizadas se observa que la matriz silíceica de la roca está transformada, hay una disminución del contenido de plagioclasas y feldespatos de potasio; y la aparición de nuevas fases cristalinas producto de la meteorización como la illita y en algunas muestras caolinita (arcillas), cuarzo libre y los carbonatos de calcio y magnesio (figura 33).

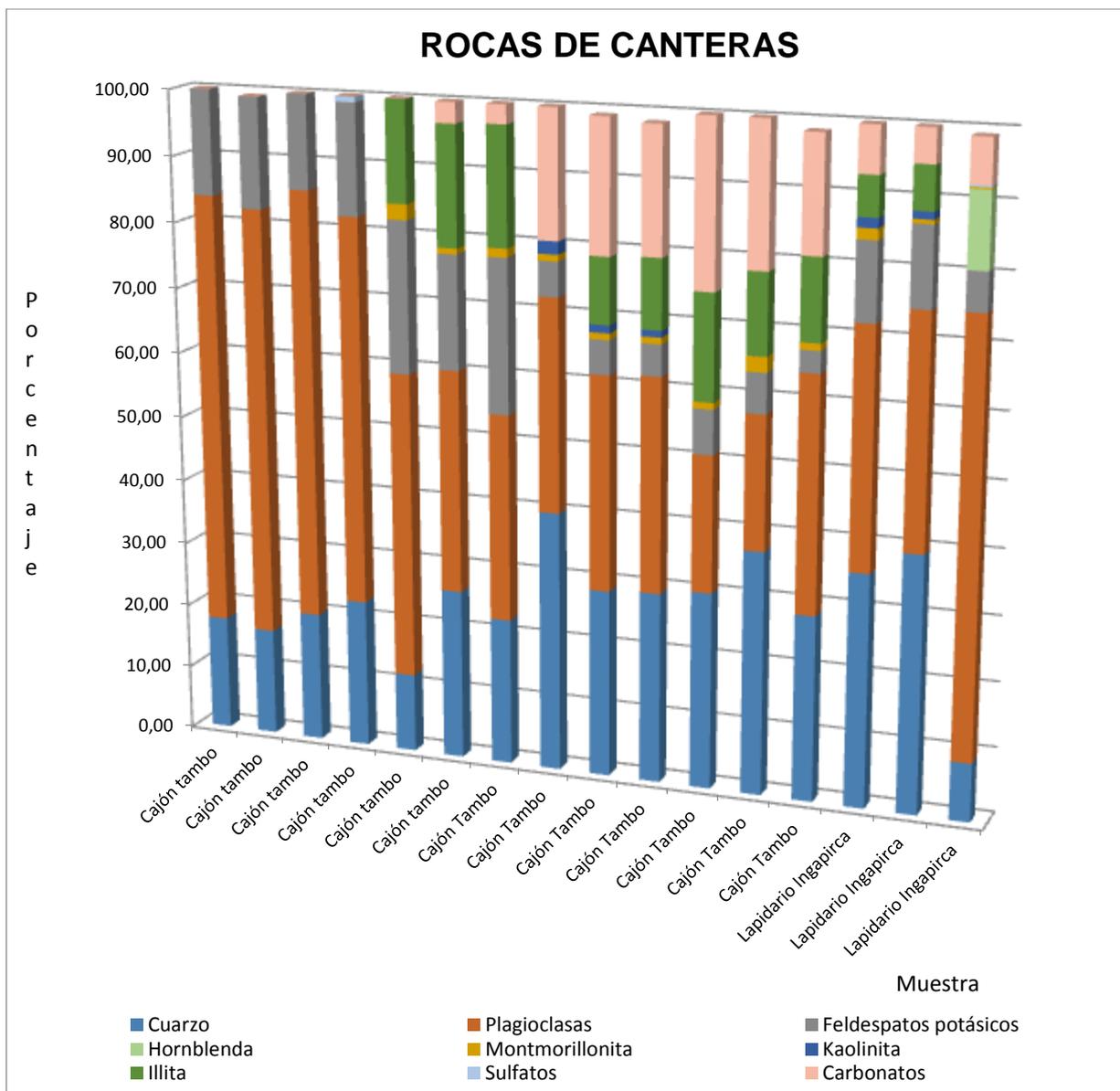


Figura 33. Composición mineralógica de rocas de cantera

Elaborado por José Guachamín, 2015

Muestras Ingapirca:

A partir del análisis comparativo de la composición mineralógica de las rocas de las canteras (Cajón Tambo y Hato de la Virgen) e Ingapirca (piedra sueltas y elipse) se ha definido el grado de meteorización de las muestras de Ingapirca (figura 34).

Cuerpo de guardia y pared oeste: Las rocas muestran un elevado contenido de carbonatos, montmorillonita, illita y kaolinita, de alrededor del 50%. Esto indica un alto grado de meteorización.

Pared oeste: Las rocas presentan un bajo contenido de productos de meteorización (carbonatos, montmorillonita, illita y kaolinita) alrededor del 20%, lo que revela que un menor de grado de meteorización.

Pared norte: De este sector se tomó un número mayor de muestras debido a que es visible el avanzado estado de deterioro. Todas las rocas muestran un contenido de productos de meteorización (carbonatos, montmorillonita, illita) variable del 20% - 50%. En las muestras que se localizan en parte inferior de la pared norte, también se ha identificado la presencia de sulfatos. Cabe resaltar que en la mayoría de las muestras de la pared norte se ha encontrado la mayor cantidad de carbonatos, que en algunos casos supera el 30%. Únicamente en una muestra hay presencia de kaolinita.

Pared sur: Las rocas muestran un alto contenido de productos de meteorización (carbonatos, montmorillonita, illita) de alrededor del 30%. No hay presencia de kaolinita.

Pared este: Las muestras de esta zona presentan un contenido de productos de meteorización (carbonatos, montmorillonita, illita y kaolinita) alrededor del 20%.

Se analizó también una muestra del afloramiento rocoso sobre el que descansa la elipse (roca madre), la cual presenta un porcentaje importante de productos de meteorización (carbonatos, montmorillonita, illita y caolinita) de alrededor del 30%.

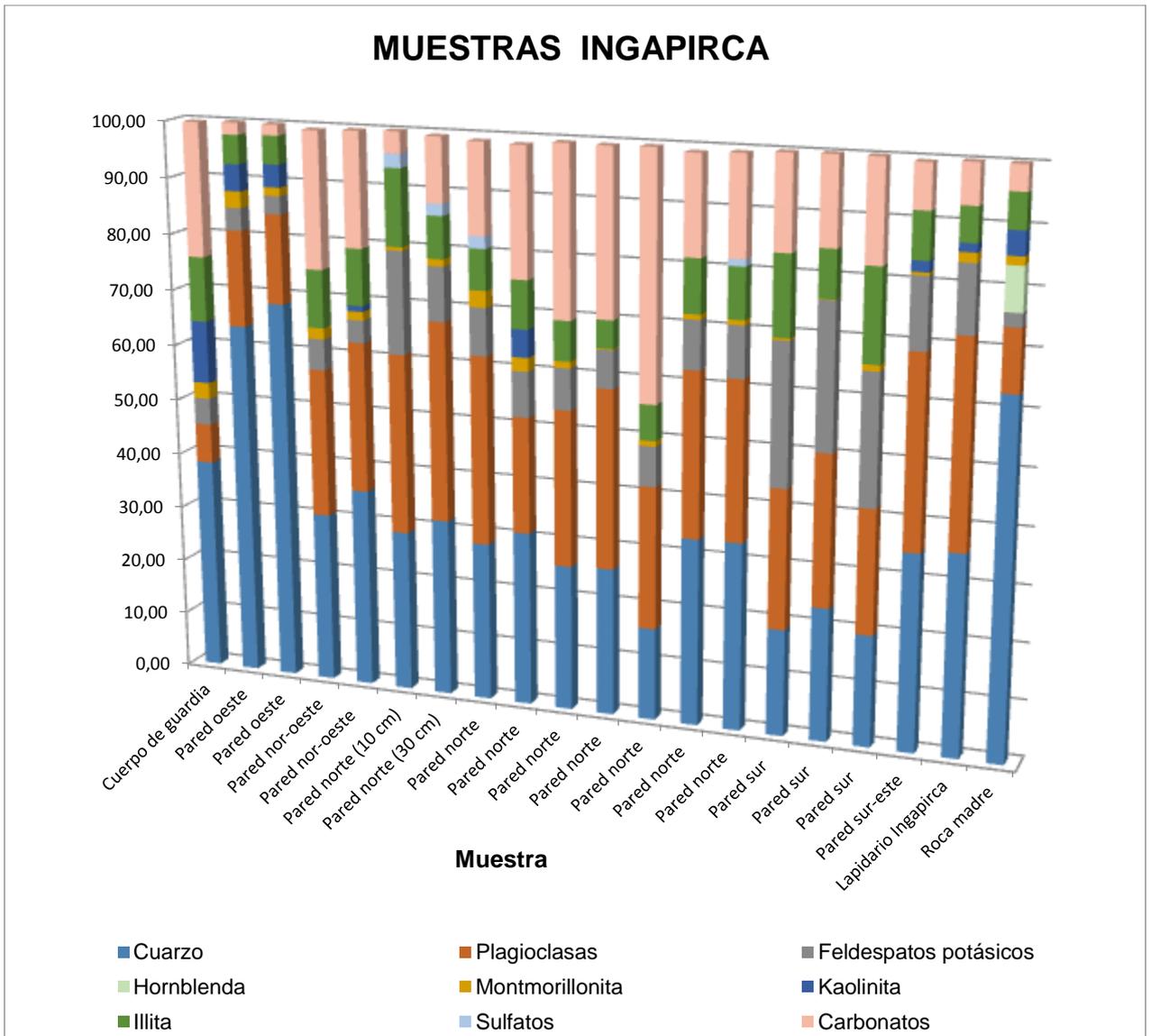


Figura 34. Composición mineralógica de muestras de Ingapirca

Elaborado por José Guachamín, 2015

Debido a que en muchos lugares la roca presenta exfoliaciones finas y gruesas, se tomaron muestras a diferentes profundidades. De los resultados se puede observar que el contenido de los productos de meteorización se incrementa a mayor profundidad en las exfoliaciones.

MUESTRAS METEORIZADAS A DISTINTA PROFUNDIDAD

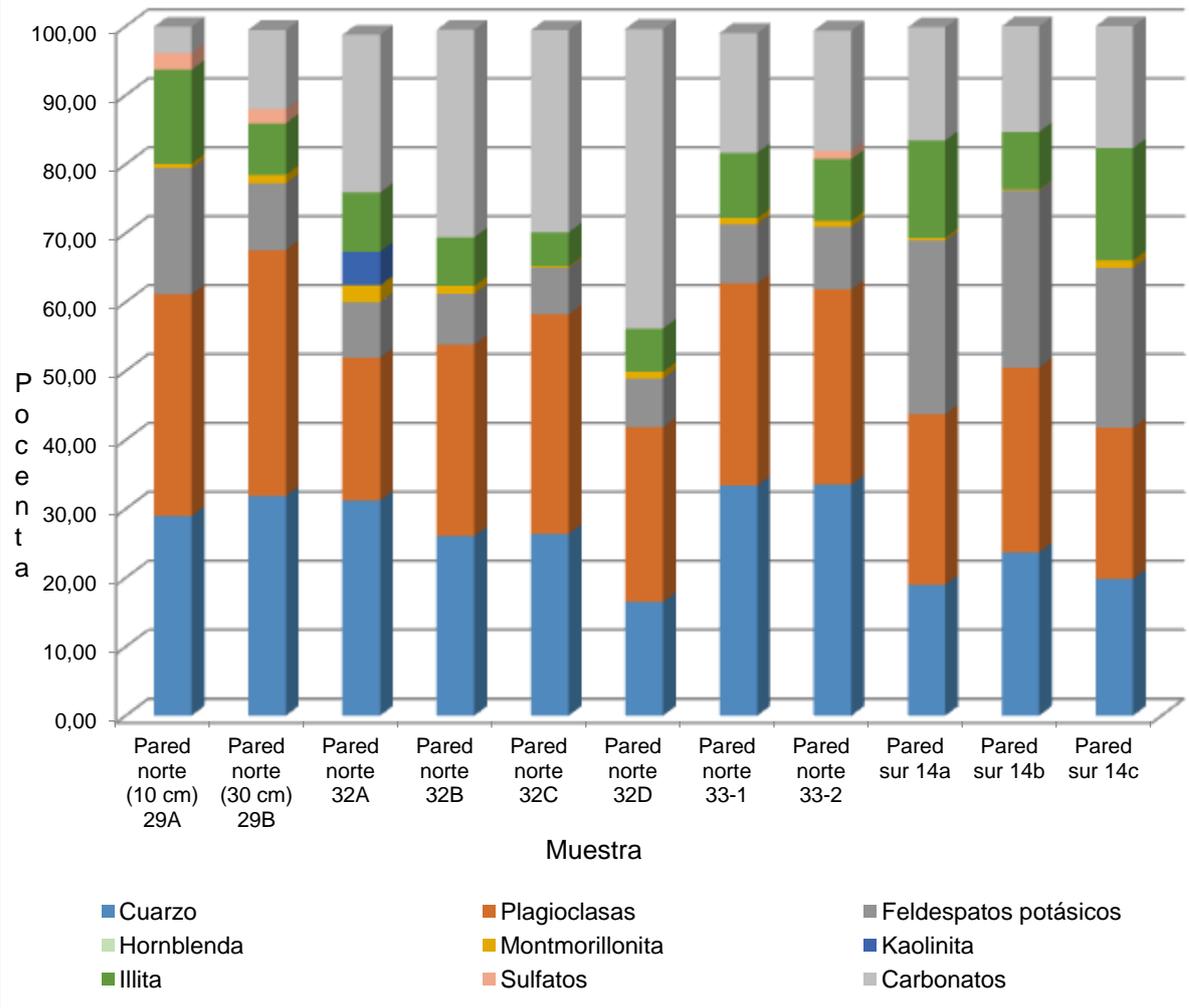


Figura 35. Composición mineralógica a diferentes profundidades

Elaborado por José Guachamín, 2015

Muestras sondeo elipse: Cuando se realizaron los sondeos en la elipse se tomaron muestras de cada uno de los estratos identificados. De los resultados se puede definir que el material empleado en la cimentación de la elipse y en los estratos de la parte superior, mineralógicamente son similares a los materiales de la roca madre (afloramiento rocoso). Todas las muestras presentan productos de meteorización (carbonatos, illita, caolinita y montmorillonita) de alrededor del 30% (figura 36).

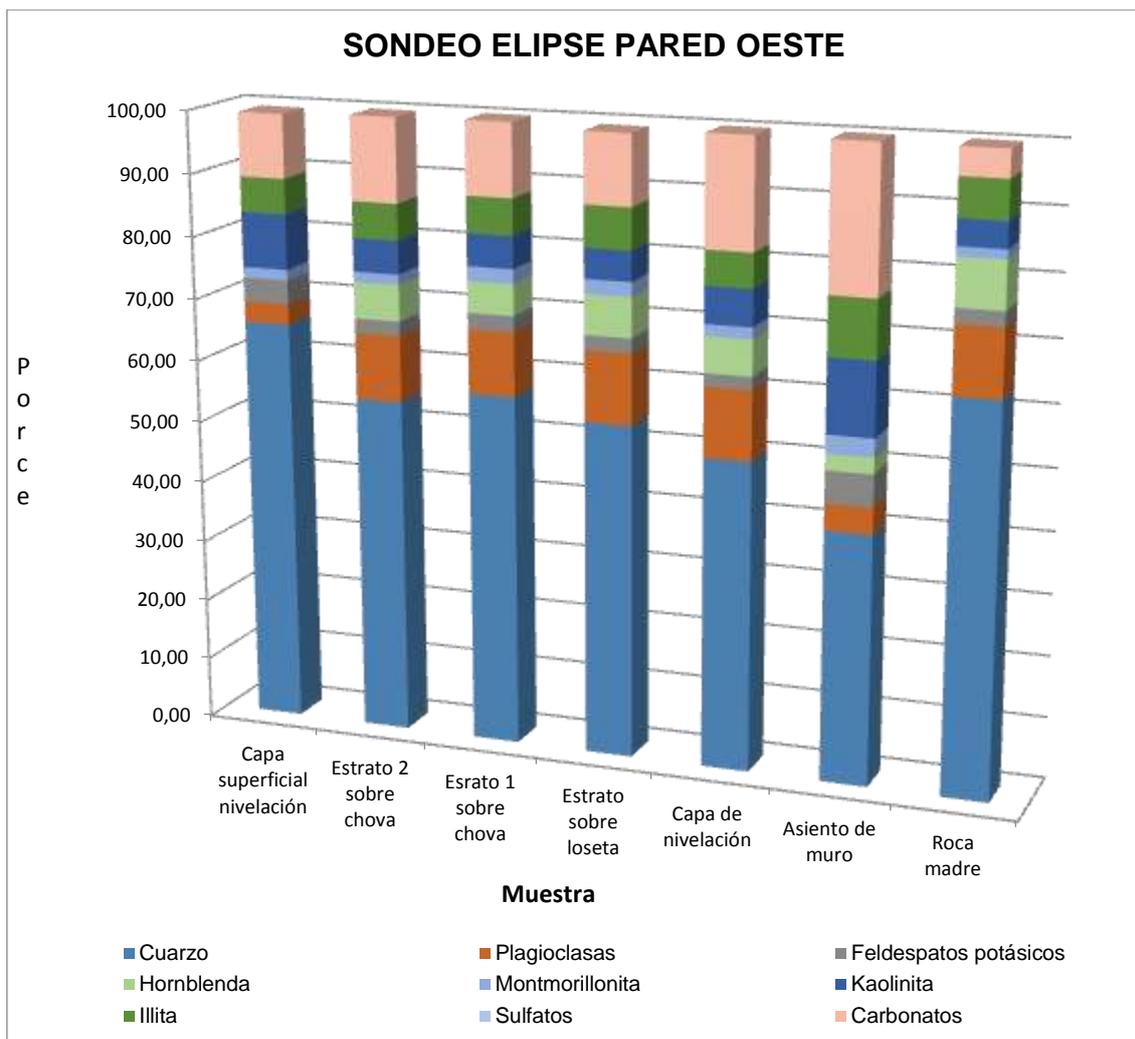


Figura 36. Composición mineralógica de muestras de los sondeos

Elaborado por José Guachamín, 2015

3.7. Análisis de sales solubles e insolubles

Se tomaron muestras de diferentes zonas de la elipse. De los resultados se desprende que hay presencia de sales como: sulfatos, cloruros, nitratos y nitritos en concentraciones bajas. Mientras que la concentración de carbonatos supera en 30% en algunos sitios (tabla 7).

Tabla 7. Resultados del análisis de sales solubles

Muestra #	Sulfatos	Nitratos	Cloruros	Potasio	Calcio	Magnesio
	mg/cm2 Muestra	mg/cm2 Muestra	mg/cm2 Muestra	mg/cm2 Muestra	mg/cm2 Muestra	mg/cm2 Muestra
13-054-14-1	0,08	0,32	0,37	0,0040	0,0171	0,0014
13-054-14-2	0,14	0,18	0,37	0,0048	0,0254	0,0014
13-054-20-1	0,05	0,44	0,24	0,0038	0,0128	0,0014
13-054-20-2	0,18	0,19	0,19	0,0034	0,0115	0,0014
13-054-24	0,50	0,44	0,02	0,0262	0,1301	0,0014
13-054-32-1	0,0892	0,0719	0,05	0,0970	0,0450	0,0100
13-054-32-2	0,0250	0,0749	0,02	0,0580	0,0062	0,0048
13-054-51-1	0,8705	1,0096	0,99	0,2120	2,9760	0,1500
13-054-51-2	1,7305	0,7529	0,39	0,1600	9,8930	0,0960
13-054-52	0,021	0,021	0,054	0,0290	0,0180	0,0015
13-054-65-1	0,0330	0,0046	0,24	55,85x10-4	3,98x10-3	6,38x10-4
13-054-65-2	0,0287	0,0108	0,26	54,14x10-4	7,84x10-3	8,40x10-4
13-054-66-1	0,1596	0,0067	0,12	8,46x10-4	2,04x10-3	1,79x10-4
13-054-66-2	0,0114	0,0048	0,13	46,71x10-4	61,20x10-3	23,63x10-4
13-054-70-1	0,03	0,01	0,07	0,0117	0,1152	0,0014
13-054-70-2	0,04	0,02	0,07	0,0069	0,0171	0,0014
13-054-72-1	0,57	0,02	0,15	0,0013	0,0060	0,0014
13-054-72-2	0,09	0,07	0,13	0,0014	0,0050	0,0014

Elaborado por: Alejandro Pinto, 2015

3.8. Análisis de residuos de compuestos orgánicos (hidrofugantes)

Se tomaron varias muestras para hacer análisis de compuestos orgánicos por espectrometría infrarroja, con la finalidad de identificar residuos de hidrofugantes que se hayan utilizado en el pasado. Como se puede apreciar hay presencia de hidrofugantes únicamente en las muestras de la pared oeste de la junta, cuarta fila, corresponde al hidrofugante dip etnanch (resina siloxano) (tabla 8).

Tabla 8. Resultados Componentes de hidrofugantes encontrados.

LUGARES	MUESTRA	COMPOSICIÓN QUÍMICA APROXIMADA
Estándar 1	Hidrofugante Hidromur	Resinas silícicas Aldehídos Cetonas Aminas Alcoholes
Estándar 2	Hidrofugante Dip étacnch	Resinas silícicas Aldehídos Cetonas Aminas Alcoholes
Pared sur-oeste	13-54-20	No existe presencia de hidrofugantes
Pared oeste	13-54-21-1	No existe presencia de hidrofugantes
	13-54-21-2	No existe presencia de hidrofugantes
	13-54-21-3	Hidrofugante dip etnanch (resina siloxano) y a los solventes de extracción.
	13-54-21-4	Hidrofugante dip etnanch (resina siloxano) y a los solventes de extracción.
	13-54-21-5	Hidrofugante dip etnanch (resina siloxano) y a los solventes de extracción.
Pared norte	13-54-29	No existe presencia de hidrofugantes
Pared norte	13-54-32	No existe presencia de hidrofugantes
Pared norte	13-54-33-1	No existe presencia de hidrofugantes
	13-54-33-2	No existe presencia de hidrofugantes

Elaborado por: Carlos Vásquez, 2015

3.9. Evaluación del comportamiento frente a los factores patógenos - Durabilidad

Heladicidad

Para este ensayo se sometieron a congelamiento a los fragmentos de rocas en un congelador y descongelamiento de los mismos en agua destilada por varios períodos continuos de mínimo un día de duración. Se realizó el ensayo en 9 muestras de cantera y dos del lapidario.

Se llevaron a cabo 118 períodos de congelamiento y descongelamiento, observándose que no se producían cambios significativos en ninguno de los fragmentos estudiados hasta el período N° 13. En este se dieron cambios fácilmente observables en tres muestras. En la muestra de la cantera de Cajón Tambo (13-54-05), se observa una fractura a lo ancho de su superficie que aumentó su longitud y profundidad desde el período mencionado hasta el período final (118) en el cual quedó ya totalmente degradado.

En la muestra de la roca del lapidario de Ingapirca (13-54-26) se observa que la fractura y fragmentación es mucho más evidente que en cualquier otra roca analizada, siendo fácilmente observables los fragmentos que podrían desprenderse en los ciclos subsecuentes. Es así que este fue el fragmento que más rápido se degradó, proceso que duró hasta el ciclo No 63).

En la muestra la cantera de Cajón Tambo (13-54-62) no tuvo mayor cambio hasta el ciclo No 33 pero a partir del mismo empezó a verse una fractura poco evidente que fue creciendo poco a poco en longitud y profundidad, aunque no se vio desprendimiento de fragmentos de la muestra. Este proceso duró hasta el ciclo final, el 118, en el cual se desprendió el fragmento delimitado por la fractura antes mencionada.

En el resto de muestras no se observan cambios significativos en ninguno de los períodos pasados, ni hasta el final del experimento (ciclo 118).

En la tabla 9 se exponen los resultados de dos de las muestras que sufrieron cambios importantes durante el ensayo.

Tabla 9. Resultados del ensayo de heladicidad de dos muestras

Período	Mes	Marzo			Abril
	Día	15-17	19 – 20	21 - 24	25 - 28
	Nº	13	16	18	27
Muestra	Roca cantera				
	Roca lapidario				

Elaborado por: José Guachamín, 2015

La pérdida de masa experimentada por estas rocas en este ensayo es importante como se observa en la tabla 10.

Tabla 10. Resultados de heladicidad

Muestra	Sitio de muestreo	Ciclo	Porcentaje final fragmentación
13-54-05	Cajón Tambo	68	42,08
13-54-26	Lapidario	63	84,69
13-54-62	Cajón Tambo	51	4,93

Elaborado por: José Guachamín, 2015

De los resultados se puede observar que el producto de este proceso de gelifracción son fragmentos de rocas, normalmente siguiendo las estructuras de formación de las rocas, muy semejantes a los procesos de desplazado que se observan en la elipse de Ingapirca.

4. ORIGEN DE LAS PATOLOGÍAS

Dra. Martha Romero Bastidas. Investigador químico del INPC

Lcdo. Fernando Espinoza, Investigador conservador del INPC

Ing. Alfredo Vásquez. MsC. Consultora GEO & GEO

Las patologías identificadas en Ingapirca están relacionadas fundamentalmente con los siguientes agentes de deterioro:

4.1. Agentes Antrópicos

Las intervenciones no técnicas realizadas en Ingapirca se constituyen en el principal agente de deterioro, que en interacción con factores naturales aporta en gran medida para la generación de diferentes patologías. A continuación se detalla algunas de ellas, aquellas que mayor impacto han tenido a lo largo del tiempo.

- Transformación del sistema del desagüe original

Actualmente este sistema tiene un diseño diferente al original, se observa la existencia de dos sumideros en la parte superior de la elipse que conducen el agua por canalizaciones ubicadas hacia el sur de la elipse (figura 37).

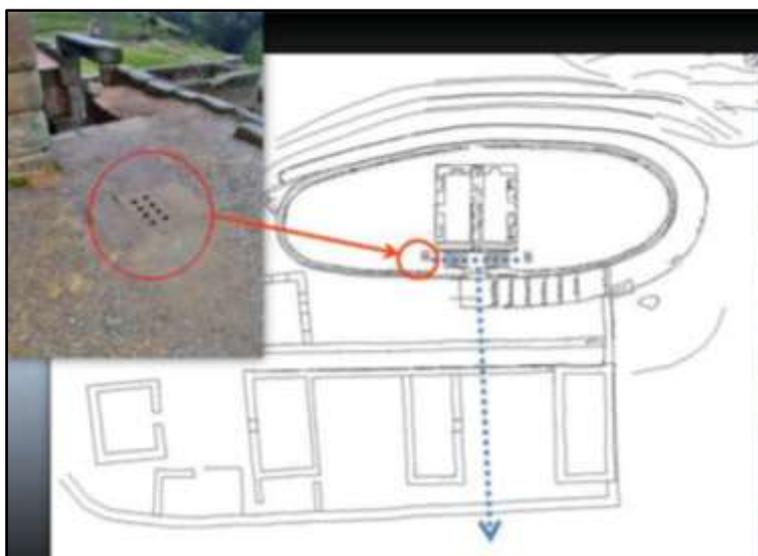


Figura 37. Sistema de desagüe actual (Swieciochowski, 2014)

La eficiencia del sistema actual de recolección de aguas lluvias de la superficie de la elipse no se ha podido conocer en la presente investigación, sin embargo, se ha constatado su poca eficiencia por falta de niveles adecuados de declive de los planos en la superficie, para lograr una conducción de las aguas hacia los sumideros. Esto ocasiona que el agua lluvia empozada en la superficie de la elipse, se filtre o desborde hacia las paredes llevando consigo la quillucaca, que se encuentra como protección de los lomillos y como material de nivelación. De los análisis químicos de la quillucaca, se conoce que está compuesta principalmente por arcillas (montmorillonita, illita y caolinita), calcita, magnesita y dolomita. La presencia de las arcillas y los carbonatos favorecen los procesos físicos y químicos de meteorización, dando como resultado el desplazamiento o exfoliación gruesa y la exfoliación fina (figura 38).

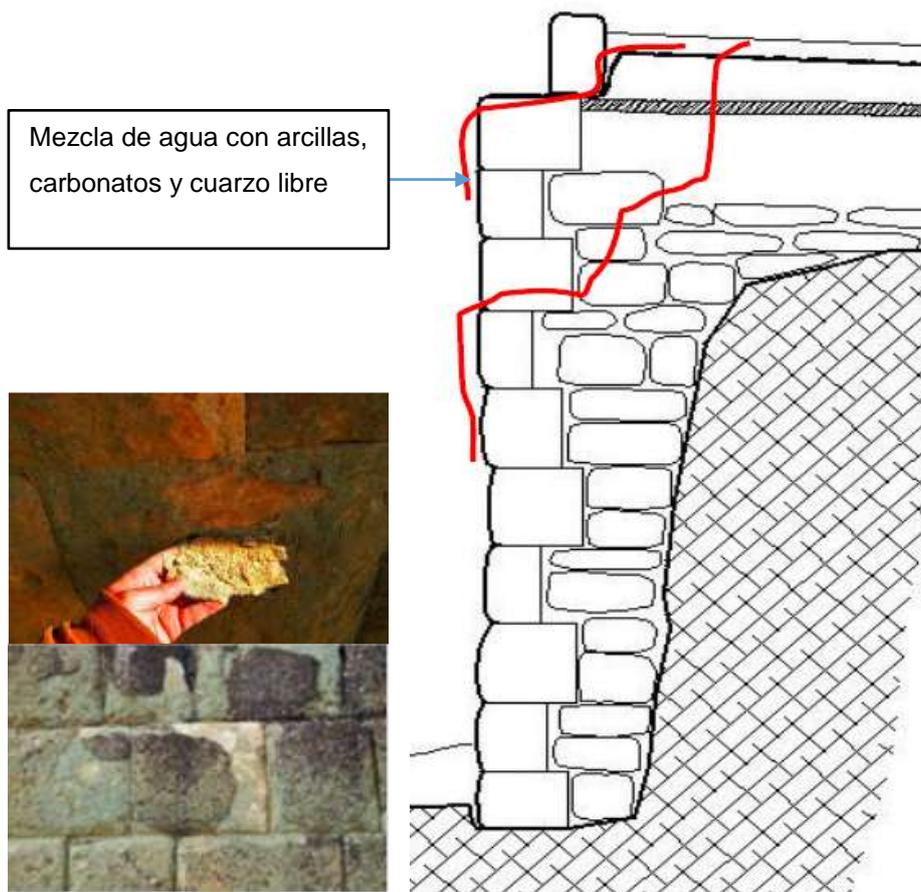


Figura 38. Sistema de desague actual poco eficiente (Swieciochowski, 2014)

Debido al desbordamiento del agua acumulada en la superficie de la elipse se acarrea minerales arcillosos y sales, los cuales además de manchar de color ocre las paredes afectando su estética, son materiales minerales arcillosos y sales que se convierten en un sustrato apto para el crecimiento de micro flora (figura 39).



Figura 39. Elipse de Ingapirca

- **Raspado con cepillos de acero (1967-1968)**

La limpieza de la piedra realizada con cepillos metálicos ocasionó la pérdida de la capa superficial (pátina) y de la textura del almohadillado, cambiando la resistencia del agua al deslizarse por la superficie. Además este proceso mecánico agresivo eliminó parte del material de inclusión que se muestra con una dureza menor al material general de los módulos pétreos, dejando la superficie de la roca totalmente expuesta al ataque de los agentes ambientales, físico y químicos favoreciendo a la meteorización.

- **Reconstrucción de la pared sur (1967-1968)**

De la relación entre las cartografías de las intervenciones y las patologías, se puede deducir que la reconstrucción de la pared sur de la elipse no está relacionada con una mayor presencia de patologías. Y que, al contrario es la zona original de la pared sur la que presenta mayores problemas de meteorización (figura 40).

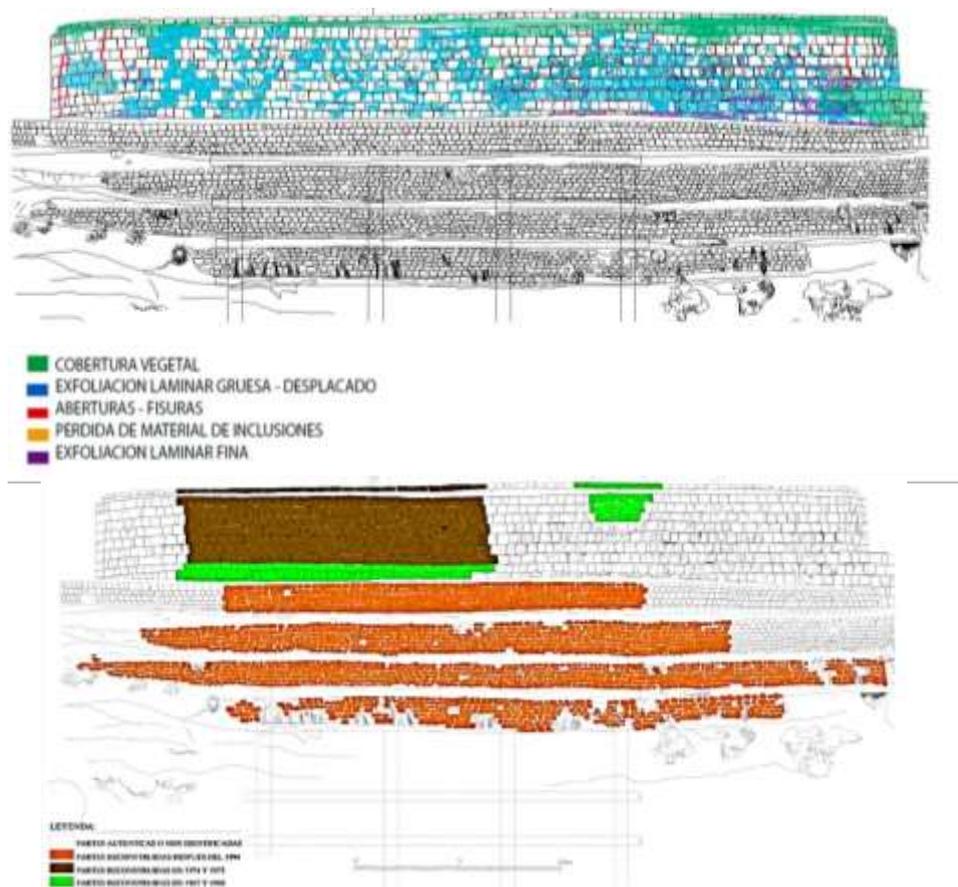


Figura 40. Cartografías de patologías (Espinoza, 2015) y de autenticidad (Swieciochowski, 2014)

- **Construcción de una loseta de cemento e impermeabilización de la superficie de la elipse.**

Los trabajos realizados en los años 1974-1975 modificaron la estructura interna de la elipse, con la colocación de material de relleno, la construcción de una loseta de cemento que tiene un espesor promedio de 12 cm y se ubica a 28 cm desde la superficie actual de la elipse hacia abajo, además de la ubicación de una membrana de chova y material arcilloso que sirve de nivelación. Estos trabajos tuvieron la finalidad de impermeabilizar la superficie de la elipse y así proteger del agua el interior de la estructura.

La loseta de cemento tiene un comportamiento mecánico diferente a la naturaleza de la arquitectónica original, siendo este elemento rígido emplazado horizontalmente al interior de la elipse que puede actuar como cuña y desplazar los formatos pétreos de las paredes, en caso de producirse movimientos telúricos.

Respecto a la membrana asfáltica (chova), a partir de las prospecciones realizadas se ha evidenciado que cumple con su función como elemento impermeabilizante, ya que no hay infiltraciones importantes de agua al interior de la elipse, sin embargo ésta membrana no ayuda a conducir el agua lluvia a los sumideros, lo que ocasiona empozamientos y el consecuente escurrimientos y desborde del agua sobre las paredes laterales.

Tanto la presencia de la chova como de la loseta de cemento, significan un riesgo inminente para la elipse. Debido a la cristalización de los materiales componentes de la chova por el tiempo transcurrido desde su colocación (1974-1975), se corre el riesgo de producirse roturas que posibiliten el ingreso de agua y su mayor permanencia al interior de la elipse, que posibilitaría en gran medida en contacto del agua con los materiales de la loseta, provocando la producción de grandes cantidades de sales insolubles (especialmente sulfatos y carbonatos de calcio) que buscaran salir al exterior ya sea entre los formatos pétreos o a través de la roca, ocasionando graves daños estructurales al interior y superficie de la roca por efecto de la cristalización y re cristalización de las sales.

Por otra parte, la chova al ser un impermeabilizante unidireccional genera un micro ambiente completamente sellado al interior de la elipse, sin permitir la transpiración de los materiales constructivos hacia el exterior, lo cual impide una interacción y estabilización adecuada de los mismos (figura 41).

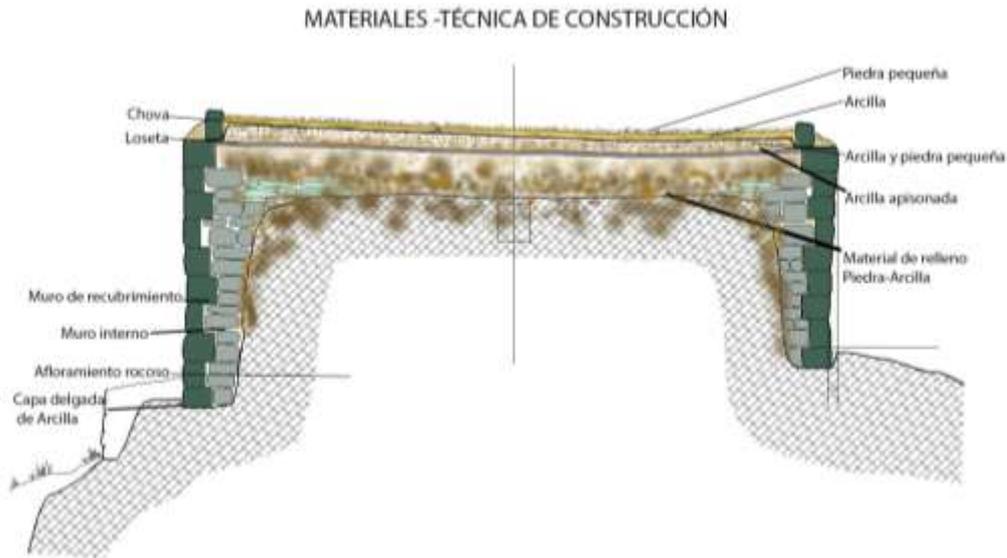


Figura 41. Materiales, técnica de construcción (Espinoza, 2015)

- **Reconstrucción de la pared sur y consolidación del barranco con pórticos de hormigón (1994)**

Luego de los derrumbes ocurridos enseguida de las lluvias intensas en 1994 se procedió a la consolidación en la pared Norte del barranco con pórticos de hormigón armado, en esta intervención también se produjo el desmonte total de los muros de contención y su posterior reconstrucción sobre vigas de hormigón sin respetar el trazado original. En el 2009 se construyó dos columnas más, pero esta vez sin alterar las estructuras antiguas (figura 42).

Los estudios con fotos térmicas de este sector, revelan un comportamiento diferente de los elementos de hormigón en relación a los materiales circundantes por su diferente naturaleza, en sectores se observa expuesta la superficie de los elementos consolidantes (Pórticos) y el material constitutivo del talud (figuras 43 y 44).

El desprendimiento de la capa de cobertura vegetal, posibilita el desarrollo de un acelerado proceso de erosión en la superficie del talud, por diferentes factores: a) la naturaleza de las lutitas que constituyen el barranco que produce caídas de piedras, clastos y material fino, debido a los procesos de erosión con la formación de oquedades o cárcavas, b) condiciones ambientales, c) un inadecuado sistema de evacuación de aguas lluvias y d) por la falta de acciones de mantenimiento de la capa de cobertura vegetal.

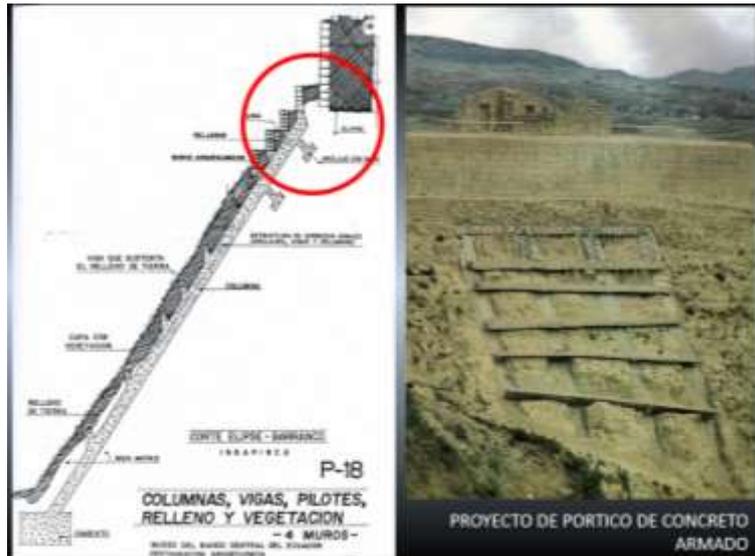


Figura 42. Consolidación del barranco con pórticos de hormigón (Swieciochowski, 2014)



Figura 43. Construcción de 2 columnas de hormigón en 2009 (Swieciochowski, 2014)

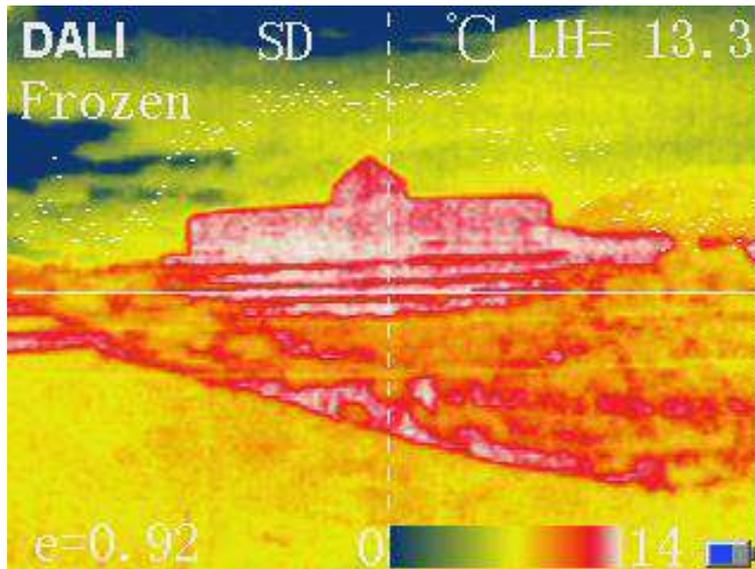


Figura 44. Fotos termográficas

- **Deficiente conducción de las aguas lluvias en la caminería de la pared norte**

En la caminería de la pared norte por falta de una correcta conducción de aguas lluvia y por la existencia de una lámina de chova en este sector, se producen empozamientos de aguas lluvias que permanecen por mayor tiempo en contacto con los muros de la elipse potencializando los procesos de meteorización.

De igual forma, la deficiencia en el sistema de conducción de aguas lluvias en el sector del barranco ha provocado caóticas escorrentías, que por el flujo van erosionando, debilita la superficie, lo cual compromete la estructura del talud.

De igual forma, la deficiencia en el sistema de conducción de aguas lluvias ha provocado la creación muchas lugares de conducción de las aguas hacia abajo del barranco, lo que debilita su estructura.

4.2. Contexto geológico y estructural de la elipse

De los resultados de la caracterización geotécnica y mecánica de la zona de estudio y la estructura de la elipse realizada por GEO&GEO (2013), se conoce lo siguiente:

En el área de estudio aflora la Formación Mangán de Edad Terciaria y depósitos de Pie de Monte (Quilluca). La Formación Mangán está representada por una secuencia sedimentaria de origen aluvial constituida por lutitas (arenas finas, limos, arcillas) erosivas, areniscas (arenas y limos), conglomerados y micro conglomerados (con una matriz areno - limosa o areno - arcillosa), son de color amarillento, rojizo, crema, habano (figura 45).

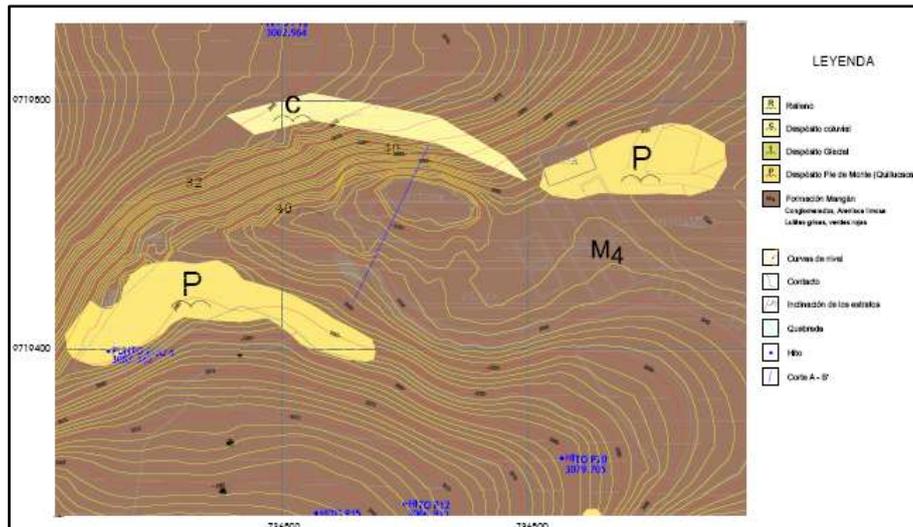


Figura 45. Mapa geológico

El macizo rocoso que aflora en el escarpe (Barranco), sobre el cual se halla La Elipse, es de clase IV (mala calidad) en relación a la orientación de la discontinuidad $321^{\circ}/73^{\circ}$ y V (muy mala) con respecto a la discontinuidad $17^{\circ}/53^{\circ}$.

Las condiciones geológicas y estructurales del área han dado lugar a los siguientes tipos de fenómenos geodinámicos (inestabilidades): caída de bloques columnares (conglomerados y areniscas); desprendimiento de lajas de rocas por disección (conglomerados y areniscas); y formación de cárcavas, socavaciones, oquedades en los estratos de lutitas. Las acciones geológicas externas (agua, desecación, viento, etc.), reducen constantemente las características geomecánicas del macizo rocoso.

En los alrededores del complejo Arqueológico existen los depósitos de quillucaca (Pie de Monte), que ha sido utilizado como protección del Barranco para evitar la erosión.

De la investigación geofísica mediante tomografía eléctrica realizada en el contorno de la elipse, podemos inferir que en el extremo oeste de la misma, el subsuelo está constituido por material fino tipo arcilloso que podría ser el causante del asentamiento de esta parte de la elipse.

Los materiales que conforman el escarpe (Barranco) sobre el cual se halla la elipse está constituido por conglomerados, areniscas y lutitas, de hasta 100 m. de altura al norte del área de estudio, a la litología deleznable y erosionable (areniscas, lutitas, conglomerados) y a la presencia de diaclasas y planos de estratificación, han dado lugar a movimientos geodinámicos como la caída de bloques, clastos y material fino, poniendo en riesgo la estructura de la elipse.

De igual forma se realizó la evaluación del riesgo sísmico con los siguientes resultados:

La zona de estudio no sería afectada por el vulcanismo activo (flujos, piroclásticos, lahares) en relación a la información contenida en el Mapa de Amenazas Volcánicas Potenciales, publicado por INFOPLAN ejecutados en base a los planos del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, por tanto el Complejo Arqueológico de

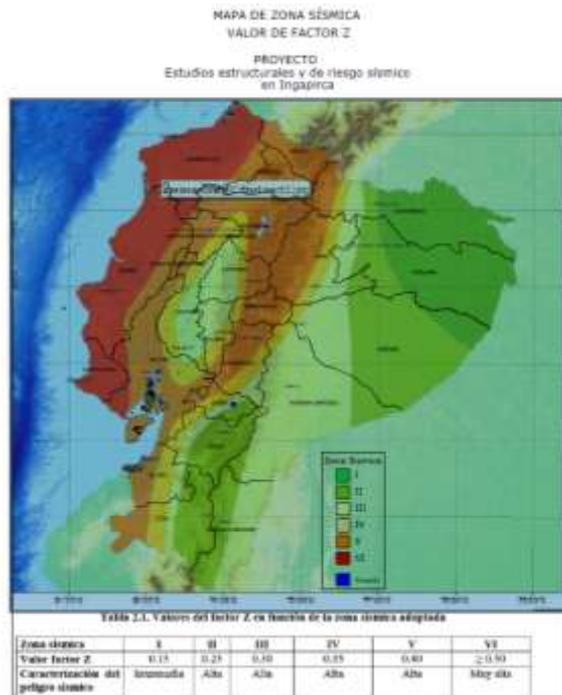


Figura 47. Mapa sísmico del Ecuador

Debido a la presencia de grietas o fisuras que consisten en la separación de los bloques de piedra de la estructura en varios sitios, se realizó el análisis estructural para conocer su condición actual.

En referencia a las grietas principalmente se encuentran al oeste y este de la elipse (figura 48 y 49). Este tipo de abertura en las paredes de la elipse produce una disminución en la rigidez de la estructura. Podrían estar relacionadas con la presencia de material fino (arcilla – limo meteorizado correspondiente al estrato de lutitas de la formación Mangán) que se identificó a través de la tomografía eléctrica, lo cual ha generado asentamientos en esta zona.

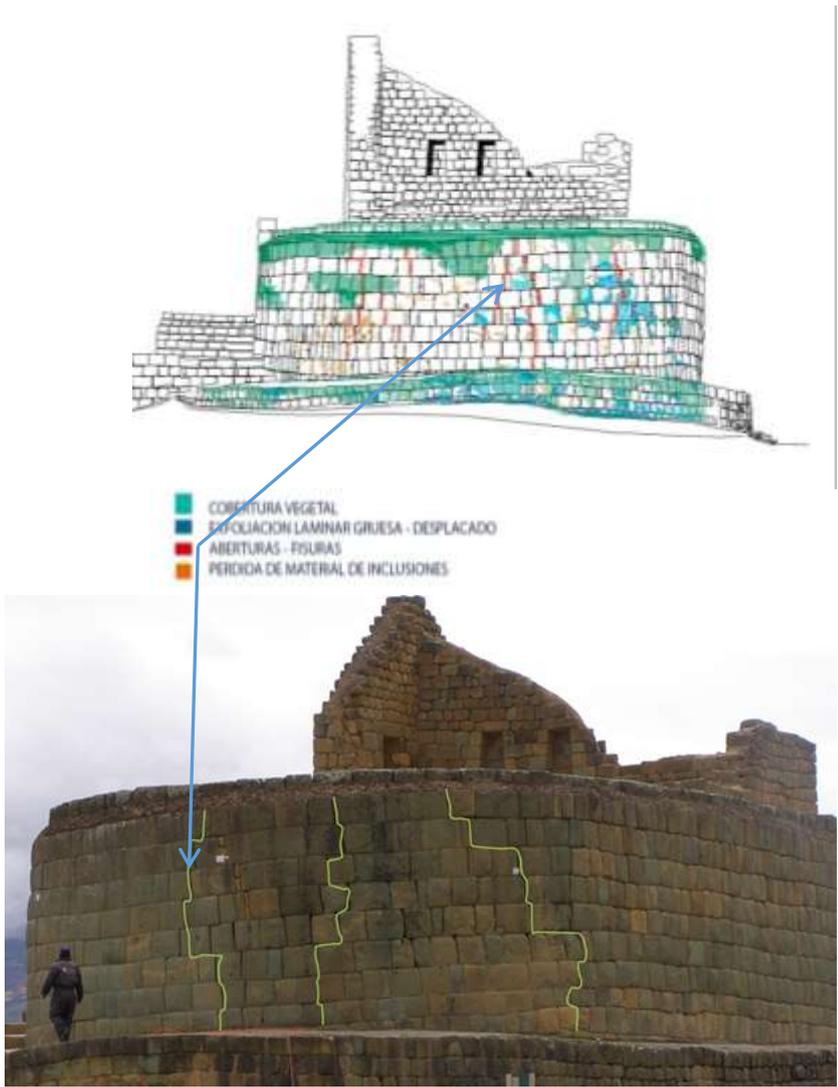


Figura 48. Aperturas o fisuras en la pared este

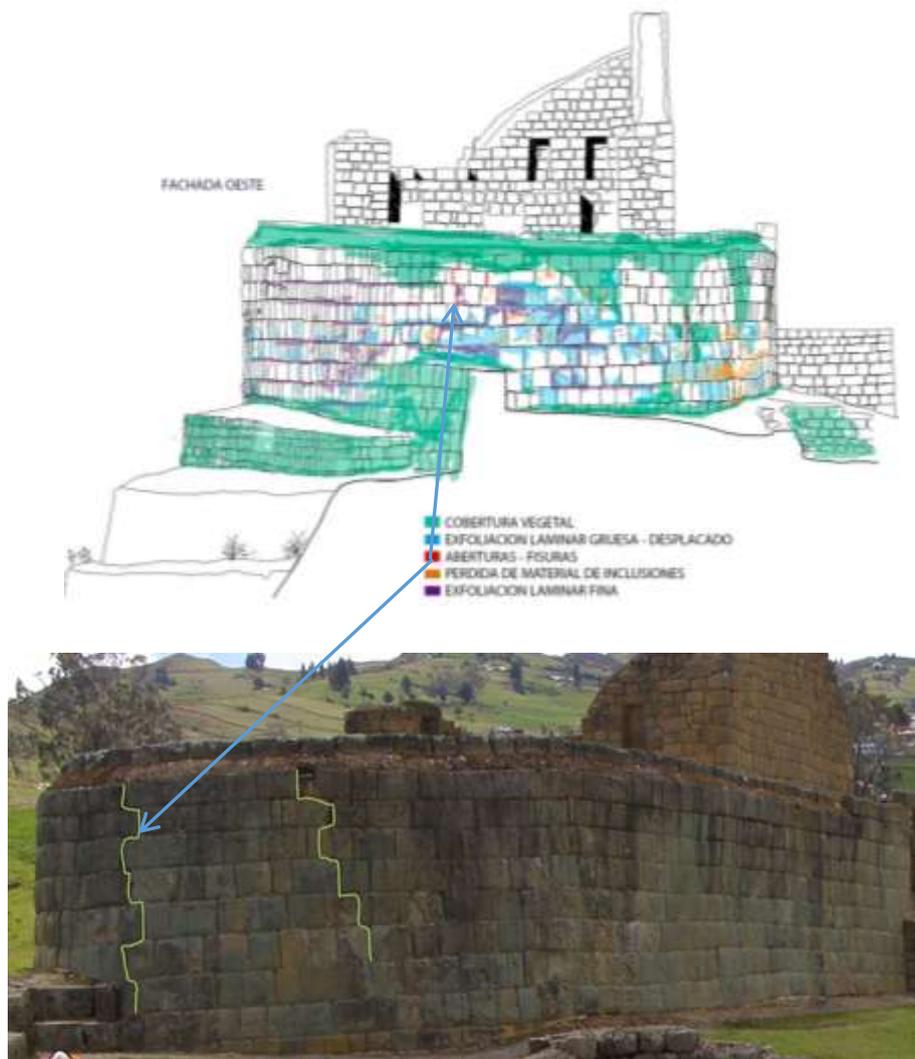


Figura 49. Localización de aberturas o fisuras en la pared oeste

Con la finalidad de evaluar el comportamiento de las aberturas en las paredes de la elipse se instalaron fisurometros, los cuales permitieron conocer que actualmente no hay movimientos de las rocas y que las aberturas se encuentran estables sin cambios.

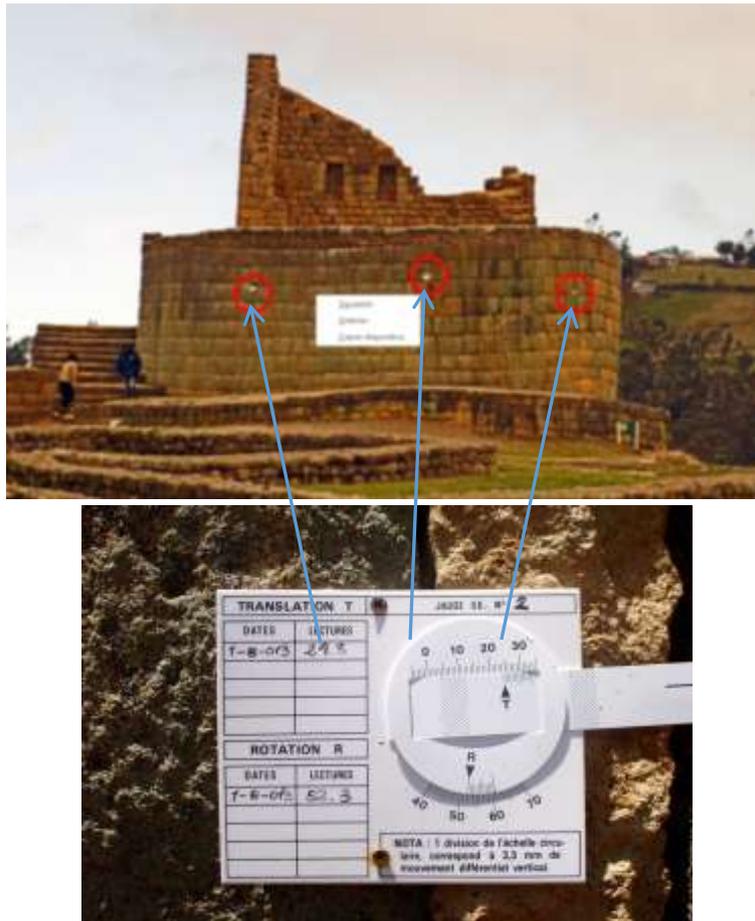


Figura 50. Disposición de los fisurómetros

Con el objeto de evaluar la estabilidad del sitio, se ha elaborado un modelo de terreno, en base a: geología de detalle, datos proporcionados por la prospección geofísica, resultados de laboratorio de mecánica de suelos y estudios complementarios que proporcionen el modelo más cercano a la realidad.

En el modelo se ha incorporado una capa superficial de hasta 2 m de profundidad, en base a la sísmica de refracción y que corresponde a la meteorización de las areniscas, lutitas y conglomerados.

Este modelo ha sido analizado por dos métodos: elementos finitos y de dovelas mediante Bishop simplificado, Morgenstern- Price; Jambu y Spenser.

En el modelo de Dovelas podemos apreciar el perfil geotécnico con el plano de deslizamiento más desfavorable. El factor de seguridad calculado es de 1.510, considerando únicamente la acción del peso propio de la estructura y del macizo rocoso, lo que nos indica que bajo condiciones normales, el sitio se presenta estable a deslizamiento. Con la aplicación de la carga sísmica, el factor de seguridad FS es de 1.072, es decir estaría en un equilibrio incipiente, se mantendría estable ante un sismo con nivel de aceleración máxima de 0.3g (figura 51).

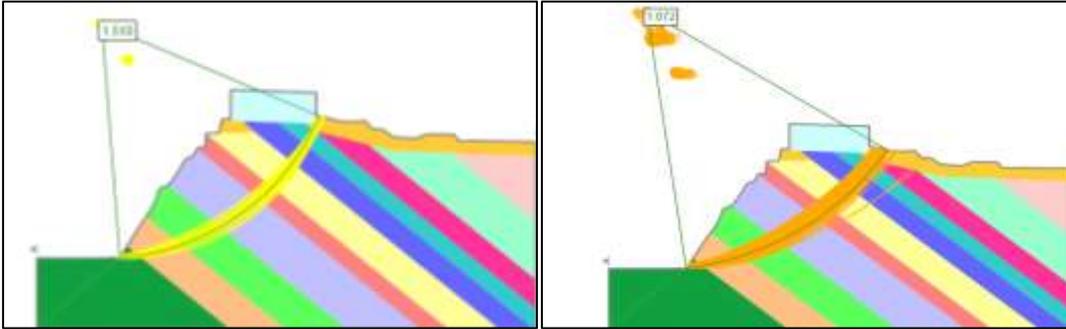


Figura 51. Modelo de Dovelas. Plano de deslizamiento más probable sin sismo (izquierda) con sismo (derecha)

El modelo elaborado en elementos finitos está constituido por una malla con 3902 y 2071 nodos. Se ha discretizado en según los elementos que se analizan, por lo que la estructura de la elipse tiene mayor concentración de elementos por unidad de perfil analizado (figura 52).

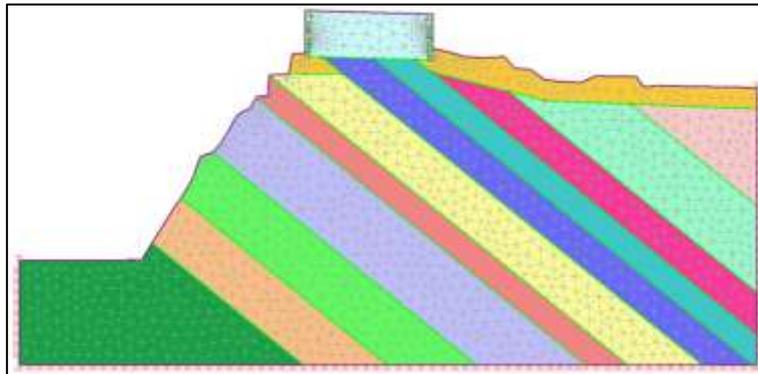


Figura 52. Modelo de elementos finitos

Los resultados de los cálculos nos indican una zona de riesgo ante sismo de la estructura en conjunto con el sitio, y está representada por una franja de color entre rojo, verde y cian (figura 53).

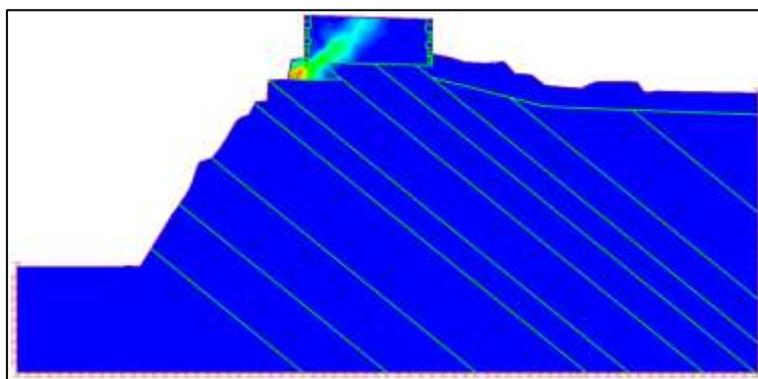


Figura 53. Zona de riesgo ante sismos

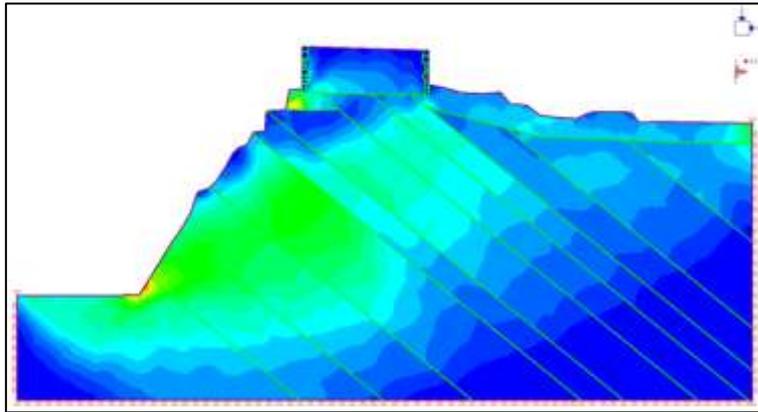


Figura 54. Comportamiento en un sismo

Los resultados de los dos métodos nos indican la distribución de esfuerzos que el sitio presenta ante la acción del peso propio de los materiales y sismo. Este método permite identificar a detalle el comportamiento de los diferentes estratos que constituye el macizo rocoso sobre el cual está asentada la Elipse.

Un esquema de la deformación que se produciría, amplificando su valor, se presenta en la figura 55).

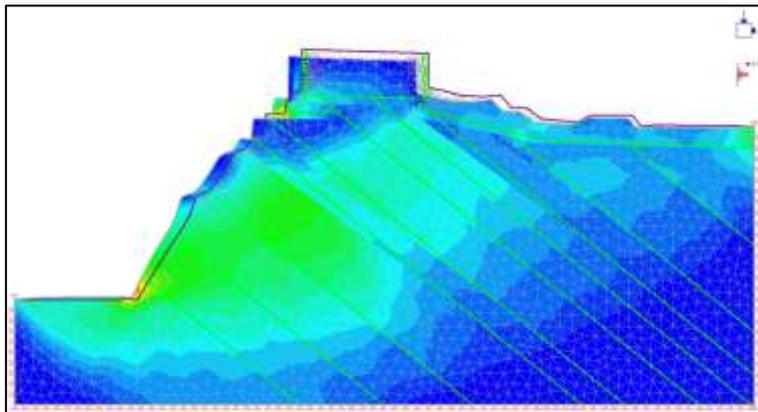


Figura 55. Esquema de deformación en caso de sismo

En resumen, del análisis realizado a la estructura mediante la modelación por elementos finitos nos indica que la estructura tiene la capacidad de carga suficiente para soportar los esfuerzos generados, sin embargo, la deformación que se producen por la acción sísmica, ocasionaría la caída de algunos tramos de los muros de la elipse. De igual forma, que ha identificado que los componentes de mayor riesgo para la elipse, corresponden a la erosión del talud.

6.3. Condiciones ambientales

Las condiciones ambientales en las que se encuentra un monumento arquitectónico van a influir en la degradación de sus materiales pétreos. Pero más que la climatología general de la zona, van a influir los microclimas reinantes en cada una de las partes de

la edificación, es por tal razón que no se degradan igual los materiales pétreos situados en las diferentes fachadas (Herráez, 1999).

Estas condiciones microclimáticas van a controlar parámetros tan importantes como las variaciones térmicas y de humedad, las precipitaciones de agua, las direcciones de viento predominantes, etc.

Para conocer las condiciones ambientales en las que se encuentra la elipse de Ingapirca se instaló una estación meteorológica y se cuenta con datos desde diciembre del 2013. Es importante anotar que aún no se tienen datos suficientes como para conocer con exactitud las condiciones meteorológicas del sector y relacionarlas con el comportamiento de los materiales en asociación a las patologías.

Sin embargo a lo anterior, los datos obtenidos hasta el momento han permitido hacer aproximaciones de comportamiento de las condiciones de humedad relativa, temperatura, dirección y velocidad de los vientos y el punto de rocío.

En este gráfico se puede observar las variaciones de la temperatura en rojo y el porcentaje de humedad relativa en turquesa. Para el caso de la temperatura hasta la fecha de elaboración de este informe se ha registrado como temperatura máxima 22,6 °C y temperatura mínima 2,2 °C, siendo la temperatura promedio 12,3°C. Mientras que el rango de temperatura de mayor permanencia está entre 9 y 15 °C. También se ha podido conocer que las temperaturas más bajas se registran en la madrugada y en los meses de septiembre, octubre y noviembre(figura 56).

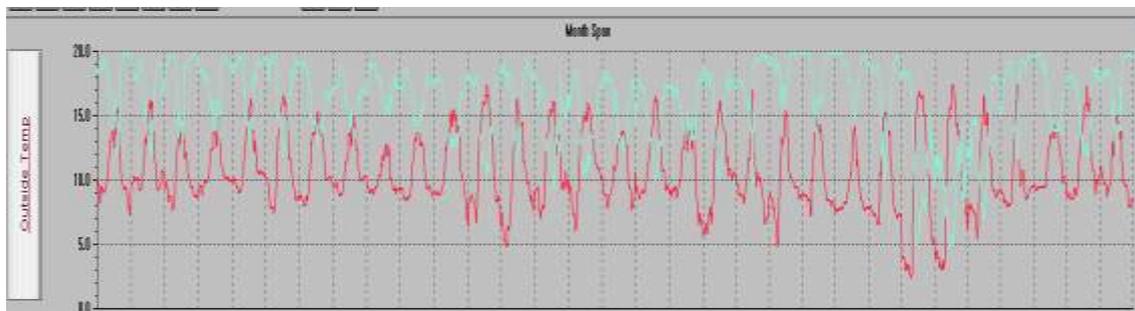


Figura 56. Registro de temperatura y humedad relativa, estación meteorológica

Para el caso de la humedad relativa, se observa que varía a lo largo del día, el valor máximo registrado hasta ahora es de 77% y el mínimo es de 11%. Esto significa que por cada 100 gramos de aire hay 77 gramos de vapor de agua u 11 gramos de vapor de agua respectivamente. Además se observa que conforme disminuye la temperatura aumenta la humedad relativa.

Cuando se relaciona estas dos variables se puede calcular el punto de rocío, que es la temperatura a la cual el vapor de agua se condensa y produce rocío, neblina o escarcha. Es posible llegar al punto de rocío cuando la temperatura del aire disminuye de tal forma que llega hasta la temperatura del punto de rocío.

En verde se grafica la temperatura del punto de rocío, se puede observar que durante el día en algunas ocasiones la temperatura del aire (rojo) es similar a la temperatura del punto de rocío (verde oscuro), lo que sugiere decir que en ese momento hay presencia de neblina, rocío o escarcha. Se ha podido observar que durante el día se produce este fenómeno especialmente en la tarde y en algunas ocasiones en las primeras horas de la mañana (figuras 57, 58, 59).

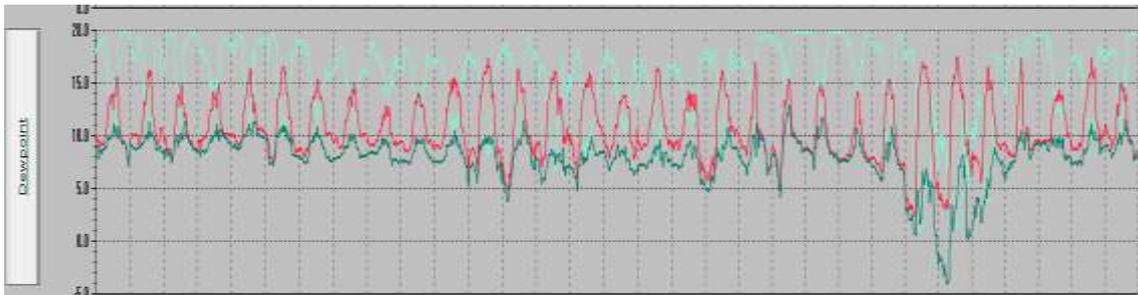


Figura 57. Temperatura del punto de rocío y del aire



Figura 58. Neblina en las horas de la tarde



Figura 59. Neblina en las primeras horas de la mañana

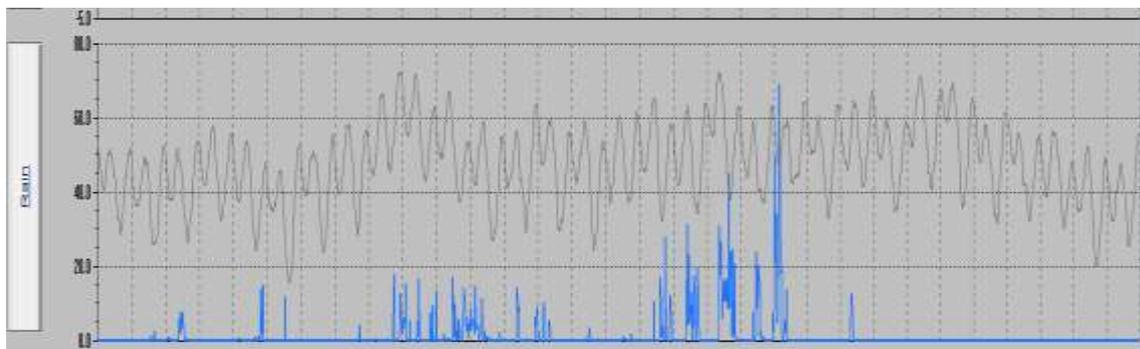


Ilustración 1. Precipitación fluvial

Otro parámetro que ha estado siendo monitoreado es la cantidad de lluvia en la zona, en azul se puede observar las variaciones de la cantidad de agua lluvia que cae sobre la zona de Ingapirca. Hasta el momento se conoce que en los meses de agosto, septiembre, noviembre y febrero se han registrado datos que indica poca pluviosidad. También se ha registrado el mes de mayo del 2014 hubo la lluvia con mayor cantidad de agua depositada sobre el suelo 643 mm (figura 60).

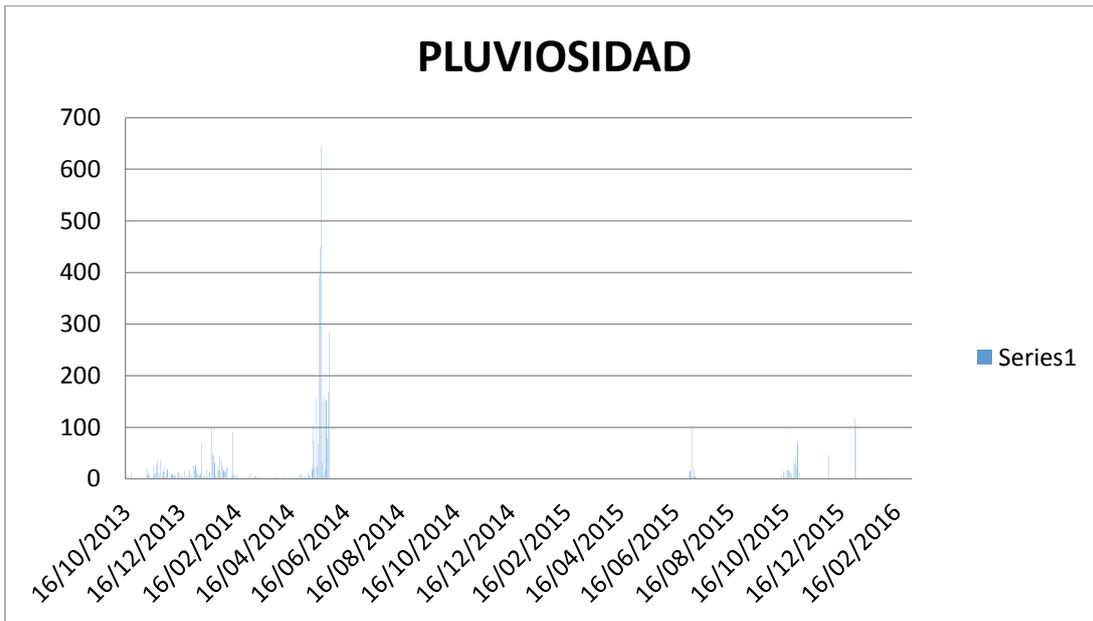


Figura 60. Precipitación fluvial

Elaborado por: Alejandro Pinto, 2016

En cuanto a la dirección de los vientos (color rosado) se conoce que principalmente están en dirección Nor-este y Nor-noreste. A partir de esta información se elaboró la rosa de vientos, donde se observa los puntos de mayor incidencia del viento (figura 61 y 62).

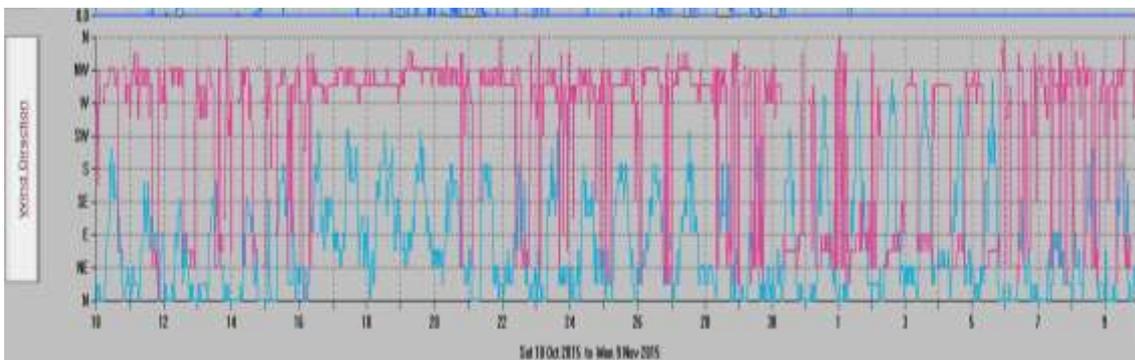


Figura 61. Dirección de los vientos.

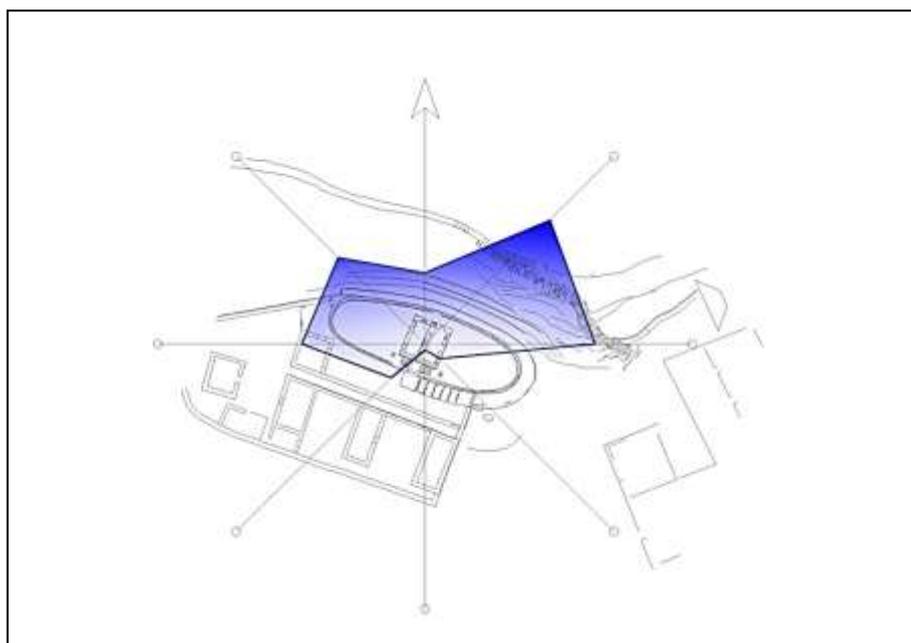


Figura 62. Rosa de vientos para Ingapirca (Slawomir, 2014)

A continuación vamos a relacionar los agentes ambientales con los procesos de deterioro en la elipse de Ingapirca.

- **Acción del agua**

La humedad es uno de los agentes más importantes de degradación de los materiales pétreos. La presencia de humedades altas en la piedra, disminuye su calidad mecánica, es propensa a la colonización de microorganismos, facilita la descomposición química al favorecer los procesos de hidrólisis, hidratación, oxidación, etc., y su degradación física por los procesos de cristalización de hielo. Además el agua es el agente de transporte de otros agentes degradantes de la piedra, como son las sales disueltas en agua que son transportadas por el interior de la roca y que por evaporación cristalizan. Las partículas contaminantes de polución (dióxido de carbono, monóxido de carbono, óxidos nitrosos, óxidos sulfurosos, entre otros) se disuelven en el agua y favorecen el aumento de la acidez del agua y con ello aumentan su agresividad química (carbonatación) (Fort R. , 1996).

La cantidad de agua que se puede retener en una roca y su movilidad depende de su porosidad, tipo de porosidad, tamaño de poros, distribución del tamaño de poros e indudablemente de la composición física y química del agua; y está relacionada a su vez con la composición mineralógica, textura, estructura y grado de alteración de la roca (Fort R. , 1996) .

El agua penetra en la roca bien en estado gaseoso o líquido. En el primer caso tienen incidencia los fenómenos de condensación del agua y en el segundo la capilaridad.

La cantidad de humedad que se encuentra en una roca en condiciones de equilibrio se denomina humedad higroscópica. La humedad higroscópica está relacionada con la presión parcial de vapor de agua del aire que le rodea. Si un material seco se encuentra en contacto con una atmósfera húmeda, la humedad del aire rápidamente se difunde hacia el material, hasta alcanzar el equilibrio (Fort R. , 1996).

La cantidad de agua que puede absorber una roca procedente de la humedad ambiental dependerá de la humedad relativa y del sistema poroso de la misma, principalmente de su permeabilidad al vapor de agua. La velocidad de absorción del agua puede ser afectada por la presencia de sales higroscópicas y de minerales de arcilla. Esto puede provocar importantes tensiones en el interior de la roca debido a la dilatación hídrica de estos componentes (Fort R. , 1996).

Esta condensación puede quedar en la superficie de la piedra, si es poco porosa (condensación superficial), o bien condensarse en la superficie y ser trasladada hacia el interior por absorción capilar, o también puede condensarse en el interior (condensación intersticial) si el gradiente de la temperatura de la piedra alcanza el punto de rocío del aire, condensándose a una profundidad determinada. Esto da lugar a un deterioro superficial o a un deterioro en zonas internas de la piedra. La degradación de la piedra por efecto de la condensación intersticial es muy alta, debido a que esta puede penetrar a una mayor profundidad que el agua líquida (Fort R. , 1996).

Para el caso de Ingapirca se tiene humedades relativas altas que alcanzan el 77% de humedad relativa %, esto significa que en determinados momentos por cada 100 gramos de aire hay 77 gramos de vapor de agua, la cual por una disminución de la temperatura ambiental puede condensarse y formar neblina, rocío o escarcha.

El agua en estado líquido provoca deterioros producidos por el ascenso capilar que están relacionados con los procesos de cristalización de sales y de agua al interior de los poros capilares, así como por la acción de la hidrólisis, hidrataciones, oxidaciones, etc., de los componentes minerales de la piedra. La absorción capilar es el método fundamentalmente de transporte de sales hacia el interior de la roca. El movimiento de los líquidos a través de un sólido poroso se realiza en el sentido de menor densidad o concentración de sales. Es en las zonas de frente de avance y retroceso del agua capilar donde se produce un mayor deterioro, tanto por las variaciones de humedad-sequedad como por la precipitación de sales.

Afortunadamente en las prospecciones arqueológicas efectuadas en Ingapirca se pudo determinar los niveles de humedad absoluta en los diferentes estratos, que indican que no hay ingreso de agua desde la superficie de la elipse. Los valores determinan un ambiente relativamente seco, con un valor máximo de 21.1 % en sectores con presencia de material arcilloso y 14.1% en la roca expuesta al ambiente (tabla 11).

Tabla 11. Humedad absoluta

Referencia	% Humedad Absoluta Máxima	% Humedad Absoluta Mínima
Rocas pared expuesta	14.1	14.0
Rocas pared enterrada	27.3	27.5
Material de relleno	21.0	7.0
Material de relleno	30.0	7.3

Elaborado por: Fernando Espinoza, 2015

A continuación se detallan los procesos de deterioro que se han identificado para Ingapirca donde el agua tiene un papel fundamental.

Crecimiento cristalino por precipitación de sales

Las sales cuando están en contacto con el agua se disuelven e ingresan, ya sea en poros naturales o en fracturas anteriores de la roca, posteriormente al evaporarse el agua en el interior de una masa rocosa estas sales cristalizan o precipitan. A este comportamiento se le llama crecimiento cristalino, el cual puede causar incremento de la presión en el interior de la roca y puede llegar a ocasionar su ruptura o ampliar una fractura existente (Benavente, 2016).

Teóricamente, se conoce que la cristalización de sales produce cambios volumétricos entre el 1 y 5%, este proceso ocurre más eficientemente en condiciones áridas y cálidas, pero también sucede en regiones frías como es el caso de Ingapirca (Benavente, 2016).

Para el caso de Ingapirca, del análisis cuantitativo de sales realizado en el laboratorio se conoce que son principalmente los carbonatos el tipo de sales que predomina en las rocas de Ingapirca, las cuales se pueden observar a simple vista (cristales de color blanco). También hay presencia de sulfatos, nitratos y cloruros en concentraciones bajas.

Adicionalmente a esto, conocemos que las rocas de Ingapirca se caracterizan por ser compactas, con poros muy pequeños y capilaridad limitada, entonces podemos entender que este proceso de crecimiento cristalino se da en los primeros centímetros en la superficie de la roca, ocasionando los desplazamientos y favoreciendo la formación de micro lascas (figura 63).



Figura 63. Exfoliación fina (izquierda) y desplazado (derecha)

Para el caso de las rocas de Ingapirca, por sus características porosimétricas y de absorción capilar, se conoce que si bien existe la absorción de agua por capilaridad, esta es baja, sin embargo tiene un efecto negativo en la movilización de las sales al interior de la roca y posterior cristalización. No hay que olvidar que el agua que ingresa ya sea higroscopía o por capilaridad principalmente está siendo nociva al solubilidad el dióxido de carbono del aire y transformarse en una solución altamente corrosiva que está reaccionando en forma activa con los componentes minerales de la roca (proceso de carbonatación).

Específicamente en las primeras filas inferiores de la pared norte se ha identificado presencia de sulfatos que, con el conocimiento previo de que la cominería de esta pared tiene en su interior una lámina de chova se tiene como hipótesis a comprobar, que los sulfatos provienen del material de deterioro que se deposita en la superficie de la cominería, el cual por sus características deberá tener altos contenidos de sales como sulfatos. Estos sulfatos al contacto con el agua que se empoza en la caminería (debido a la presencia de la chova y por falta de nivel que facilite la conducción de las aguas lluvias) por capilaridad estarán movilizándose hasta las rocas de las primeras filas y por cristalización favoreciendo a la formación de exfoliación laminar fina. Esta parte de la elipse, es donde hay mayor presencia de esta patología.

Alternancia de humectación y desecación

Existen en la naturaleza algunos minerales en especial las arcillas que son capaces de incorporar agua en su estructura, produciendo un incremento en su volumen.

Las arcillas son filossilicatos y, por tanto, tienen una estructura laminar, la cual puede experimentar una expansión por hinchamiento cuando el agua, u otro líquido polar, interactúa con ella. El tipo e intensidad del hinchamiento que pueden experimentar una roca por efecto de las arcillas, depende de varios factores, el tipo y cantidad de arcillas, su distribución en el interior de la roca, la porosidad de la roca y la disponibilidad de soluciones que percolan a través de la roca (Alonso, 2010).

El papel perjudicial de las arcillas deriva de su capacidad para inducir deformaciones en el interior de la roca. Cuando esta deformación está espacialmente restringida, los componentes arcillosos dan lugar tensiones internas que pueden llegar a causar roturas.

Teóricamente se ha determinado que las presiones por hinchamiento de las arcillas expansivas como las esmectitas están alrededor de los 20MPa, sin embargo, cuando se trata de las arcillas no expansivas, si bien sus presiones de hinchamiento son alcanzan valores muy altos, pero la repetición de ciclos de hinchamiento y contracción, como consecuencia de las condiciones alternantes de humedad, pueden conducir a la rotura por un mecanismo de fatiga progresiva de la masa rocosa (Alonso, 2010).

Para el caso de Ingapirca se ha identificado tres arcillas, montmorillonita (esmectita), illita y kaolinita. La illita y kaolinita son las arcillas que se encuentra en mayor cantidad. Tanto la illita como la kaolinita son arcillas no expansivas y la montmorillonita es expansiva. Por tanto, las tres arcillas están incidiendo negativamente en el comportamiento de las rocas, especialmente cuando entran en contacto con fuentes de humedad.

El origen de estas tres arcillas está en los procesos de meteorización química por hidrólisis de los feldespatos, componentes principales de la matriz pétreo. De igual forma, el mecanismo de reacción se explicará más adelante.

Hidrólisis

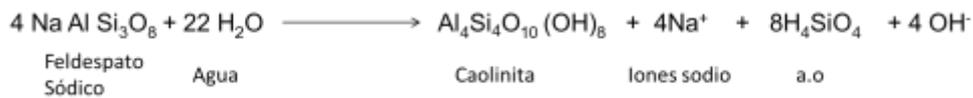
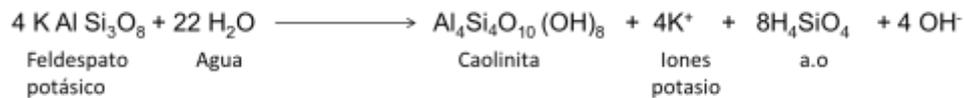
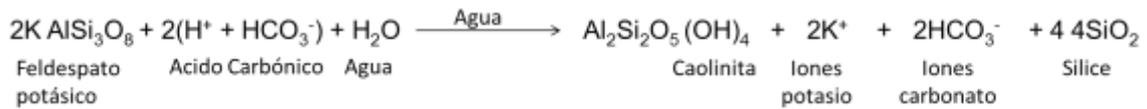
Se trata de uno de los procesos más importantes de descomposición de las rocas para el caso de Ingapirca. El agua, en forma ionizada (H^+ OH^-), muy activa químicamente, ataca minerales como los feldespatos y otros silicatos disolviéndolos. Los iones de hidrógeno H^+ reemplazan los cationes metálicos en la red cristalina y los iones OH^- se combinan con estos cationes desplazándose para formar carbonatos y bicarbonatos, que son evacuados en disolución en el proceso de lixiviación. El carácter de los productos resultantes depende del ambiente de la meteorización, en particular de la facilidad con que son removidos los cationes (Alonso, 2010).

Los iones calcio y sodio se movilizan muy fácilmente en tanto que el magnesio y el potasio pueden llegar a quedar en el formando nuevos minerales. Por su parte la sílica se moviliza muy poco. La movilidad del hierro y el aluminio es de mucha importancia, el hierro en estado ferroso puede normalmente se combina con el oxígeno y pasa a estado férrico.

En realidad los cationes de movilidad alta se drenan muy poco; los de movilidad intermedia permanecen un tiempo en solución aunque el drenaje sea abundante y se vuelvan a depositar para formar nuevos minerales principalmente arcillosos del tipo illita (potásica) y montmorillonita (K, Mg, Fe). Por su parte, en el aluminio y el hierro permanecen en el sitio formando arcillas de tipo caolinita (Al), el hidróxido de hierro $Al(OH)_3$ conocido como Gibsita y el hidróxido de hierro $FeO(OH)$ llamado Limonita (Alonso, 2010).

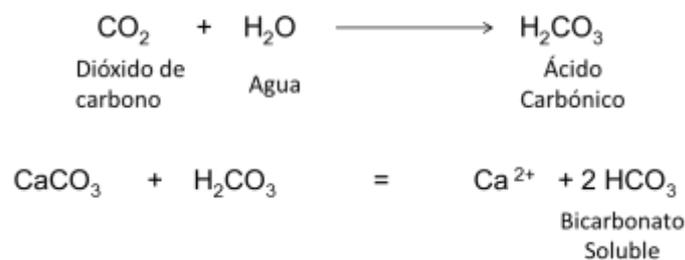
Es decir en ambientes pocos drenados como las rocas de Ingapirca se encuentra montmorillonita, acompañada por lo general de illita y clorita, y en ambientes bien drenados como la roca la formación rocosa (pie de monte – “roca madre”) se encuentra caolinita.

Algunas reacciones que pueden darse en el proceso de hidrólisis son las siguientes (Alonso, 2010):



Carbonatación

La carbonatación es uno de los procesos más activos de meteorización química, se produce cuando el anhídrido CO₂ de la atmósfera se disuelve en el agua lluvia y forma un ácido débil llamado ácido carbónico (H₂CO₃) en cual reacciona con los carbonatos para formar bicarbonato en solución, que puede ser redepositado o arrastrado por el agua (Alonso, 2010).



El agua carbonatada (carácter corrosivo) reacciona con rocas cuyos minerales predominantes sean silicatos de calcio, magnesio, sodio o potasio (feldespatos y plagioclasas), dando lugar a los carbonatos y bicarbonatos, esta transformación de la matriz silíceas produce la reducción de propiedades mecánicas de la piedra, su resistencia a la compresión, a la flexión y a la tracción (Alonso, 2010).

Por otra parte los depósitos de carbonatos existentes en las rocas de Ingapirca se disuelven fácilmente por estos procesos y forman cavidades de tamaño pequeño, por donde se infiltra el agua superficial para formar poros artificiales al interior de la roca.

Es uno de los procesos más activos de meteorización química, a tal punto que los carbonatos producidos por este proceso se los observa a simple vista depositados sobre la superficie de las rocas (cristales blancos pulverulentos).

Oxidación

Las rocas de Ingapirca que contiene minerales ricos en hierro como las augitas y hornblendas, son atacados por el agua portadora de oxígeno en solución, dando lugar a minerales como la limonita y hematita (óxidos de hierro), de color amarillento y rojizo respectivamente (Alonso, 2010) (figura 64).

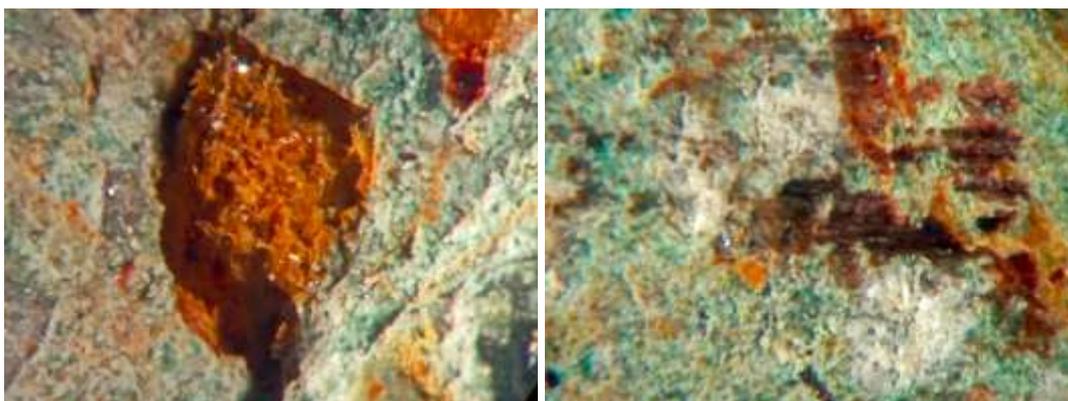
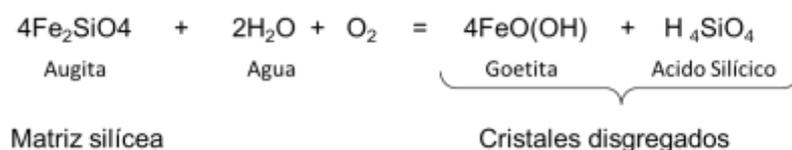


Figura 64. Productos de oxidación: limonita (cristales amarillos) y hematites (cristales rojos)

Acción de la temperatura

La temperatura del medio ambiente y de la piedra va a influir directamente en su degradación, puesto que van a permitir la condensación del agua en su interior y van a favorecer los procesos de humedad-sequedad y de heladicidad de la piedra. También las variaciones de temperatura a lo largo de los tiempos y en ciclos muy cortos producen estrés, puesto que los diferentes minerales que constituyen la roca tienen distintos coeficientes de dilatación térmica, lo que genera tensiones internas diferenciales que favorecen la degradación de la roca.

Los procesos de deterioro relacionados con la acción de la temperatura que están actuando en Ingapirca son:

Expansión y contracción térmica (insolación)

Teóricamente se conoce que las rocas son muy pobres conductoras de calor, por lo que la superficie expuesta se expande más que en el interior al ser calentadas por el sol. La diferencia térmica día – noche, hace que durante el día, al calentarse la roca se dilata; y por la noche, al enfriarse se contrae. La sistemática repetición de este fenómeno genera un stress que conduce obviamente a la ruptura debido a que los coeficientes de dilatación y contracción de los minerales difieren mucho de un mineral a otro.

El resultado es una exfoliación que puede ser catafilar o descamación concéntrica (similar a la de las sucesivas capas que forman la cebolla). A partir de los resultados obtenidos se puede inferir que la insolación contribuye al deterioro por exfoliación catafilar (figura 65).



Figura 65. Exfoliación catafilar

Del estudio termográfico realizado por seis meses constitutivos se conoce que para el caso de Ingapirca, la piedra está expuesta a los cambios cíclicos de temperatura durante el día, que pueden variar entre 10°C y 36°C; mientras que la temperatura ambiental se encuentra entre 2.2 °C y 22.6 °C (tabla 12).

Tabla 12. Registro de temperatura ambiente

ESTUDIO TERMOGRÁFICO / METEREOLÓGICO		
REGISTRO	MÁXIMA	MÍNIMA
TEMPERATURA DE LA ROCA	36 °C	10 °C
TEMPERATURA AMBIENTE	22,6 °C	2,2 °C

Elaborado por: Martha Romero, 2015

De las imágenes termográficas se ha podido definir que la temperatura de las rocas no es uniforme, es así que se observa que las paredes este y oeste pueden alcanzar

temperaturas mayores con respecto a las otras paredes, dependiendo de la hora del día, pues en determinadas zonas alcanzan mayores temperaturas debido a la orientación de los rayos solares, lo cual genera una distribución no homogénea de la temperatura en la superficie de la roca, generándose diferencias en los movimientos de dilatación y contracción de los minerales compositivos (figura 66).

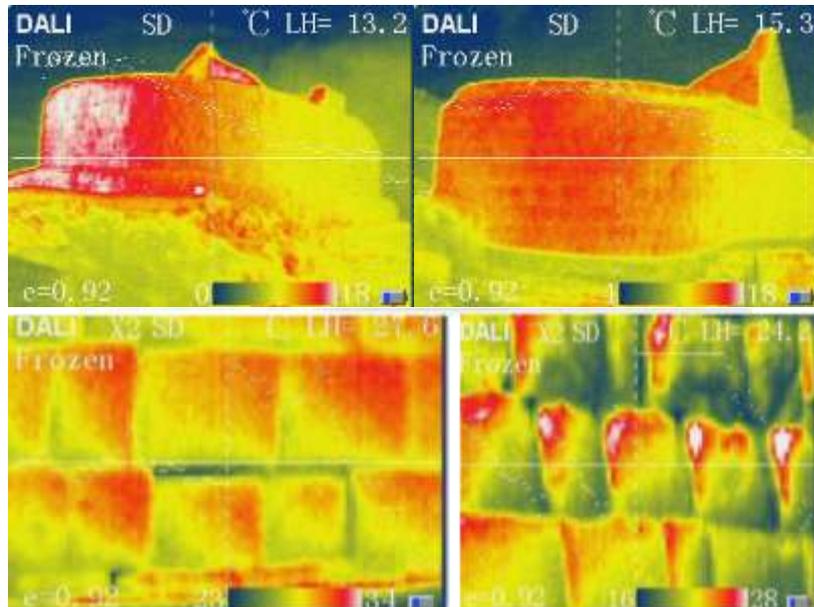


Figura 66. Imágenes termográficas

Este calentamiento diferencial en los formatos pétreos es consistente con el indicador de deterioro que lo hemos denominado desplazamiento o exfoliación gruesa, lo que muestra el efecto nocivo del calentamiento diferencial y de los procesos cíclicos de calentamiento-enfriamiento, en relación a la orientación solar y al grado de inclinación de los rayos solares (figura 67).



Figura 67. Patología de desplazamiento o exfoliación laminar gruesa

Por su parte, los minerales también poseen distinto grado de expansión y contracción con respecto a las variaciones de temperatura, ya que los minerales oscuros se dilatan más que los claros. Esto también favorece también a la desintegración a lo largo de los contactos entre las diferentes fases cristalinas.

Para el caso de Ingapirca, las rocas tienen minerales oscuros como las augitas y las hornblendas, las cuales al microscopio se evidencia que sus bordes se encuentran desintegrados, es decir son áreas activas que facilitan la desintegración y transformación de la matriz silícea. Estos minerales oscuros están presentes en las inclusiones de la roca y se observa que en algunos casos están ya desintegrados o en procesos de descomposición (oxidación).

Crecimiento cristalino – gelifracción (congelamiento del agua)

El agua contenida en la piedra hiela en los poros. Es importante subrayar que el agua no ocupa todo el espacio que es disponible. Sin embargo existe un contenido “crítico” más allá del cual el espacio libre esta insuficiente para que el hielo aumente de volumen libremente.

Esto es particularmente valido para las piedras cuyo sistema poroso es particularmente fino. Cuando varia la temperatura exterior un efecto de esfuerzo se desarrolla según la línea del frente de la isoterma de la solidificación del agua. Este frente de equilibrio entre el agua y el hielo es bastante complejo porque el agua esta generalmente fuertemente cargada en iones de todas especies. Es útil recordar que para hacer desaparecer la fase de hielo se puede depositar encima la sal. El hielo va a desaparecer pero en el mismo tiempo la temperatura va a bajar considerablemente.

De la misma manera la piedra contiene varias zonas de “refrigeración” y durante las variaciones de temperatura se desarrolla una importante heterogeneidad de temperaturas a escala microscópica. Según un dicho bien conocido “la piedra hiela siempre dos veces”, en realidad la piedra hiela inclusive varias veces. En la primera etapa ella genera interiormente una reserva de frio la cual, durante el calentamiento diurno, provoca nuevos hielos incluso si la temperatura exterior no es suficientemente baja. Este proceso se repite hasta el agotamiento de la reserva del frio.

Las tensiones mecánicas debidas al hielo (la cual se dilata con un aumento de volumen de circa 9% del volumen inicial del agua) provocan rupturas, primero microscópicas y luego macroscópicas. La repetición de las secuencias hielo-deshielo resulta en un cansancio del material cuya cohesión disminuye progresivamente.

Cuando el agua penetra en las rocas ya sea por gravedad o por tensión superficial y se congela en un espacio confinado ejerce fuertes y continuas presiones de expansión sobre las paredes, actuando como una verdadera cuña dentro de la roca que ensanchan las aberturas y después de muchos ciclos de congelación y deshielo producen fracturas en la roca, lo que hace más enérgica la meteorización.

Teóricamente se conoce que el agua en estado líquido pasa a hielo implica un aumento de volumen de 9 % - 10%, originando presiones de expansión de aproximadamente 200 Mpa, muy superiores a la resistencia de las rocas a la tensión.

Como consecuencia las rocas se fracturan dando lugar a placas angulares, sobre todo cuando se alcanzan temperaturas inferiores a $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, en áreas montañosas como es el caso de Ingapirca. Experimentalmente, se ha comprobado el efecto de la gelifracción en las rocas de Ingapirca por tanto se puede inferir que la gelifracción contribuye al deterioro por de desplacado (formación y separación de placas gruesas en la superficie de la roca).

Para el caso de Ingapirca, la temperatura mínima registrada es $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Temperatura a la cual el agua líquida pasa ha estado sólido. De los ensayos de gelifracción realizados en el laboratorio en muestras de Ingapirca, se ha podido evidenciar que luego de 51 ciclos de congelamiento – descongelamiento del agua se producen rupturas en la roca muy similares a los desplacados.

Este comportamiento también está relacionado con la porosidad y capilaridad de las rocas de Ingapirca, ya que depende directamente del comportamiento de las rocas frente al agua. Además hay que anotar que se ha determinado que a estas rocas les toma mucho más tiempo evaporar el agua que absorberla, lo que quiere decir que el agua permanece en el interior de la roca por algún tiempo, en el cual sucede el fenómeno de la gelifracción.

Acción del viento

Tanto la velocidad del viento como su dirección van a favorecer la degradación de la piedra puesto que aumenta la evaporación, distribuye los agentes contaminantes de la atmósfera, aporta sales en forma de aerosoles y favorece la penetración del agua lluvia, así como la erosión de la superficie de las rocas por impacto de partículas transportadas por el viento.

A partir de los datos de las condiciones ambientales de la estación meteorológica instalada en Ingapirca, se elaboró una rosa de vientos para el periodo de mediciones. Se observa que las paredes norte (barranco) y oeste de la elipse reciben mayor impacto del viento por la falta de barreras física que la proteja, el viento impacta en los planos de los módulos pétreos que constituyen las paredes con movimientos en diferentes direcciones y velocidad. El fenómeno puede estar relacionado con la mayor presencia de las exfoliaciones laminares delgada y gruesas en las paredes norte y oeste de la elipse. Este factor puede ser uno de los aspectos que explique el grado de deterioro diferencial de los paramentos (figura 68).

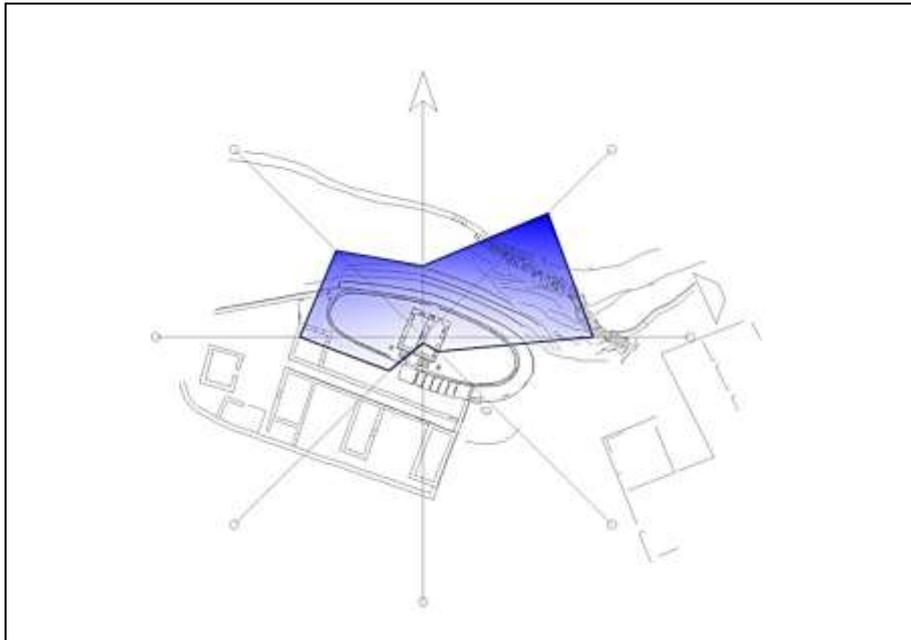


Figura 68. Rosa de vientos (Swieciochowski, 2014)

Con base al análisis del origen de las patologías y los mecanismos de deterioro que están actuando en la elipse de Ingapirca, se ha elaborado una matriz donde se diferencian claramente los factores, mecanismos e indicadores de deterioro, las acciones a tomar y los plazos establecidos a manera de recomendaciones.

Tabla 13. Resumen de factores y mecanismos de deterioro, acciones y plazos para actuar sobre las patologías

FACTOR DE DETERIORO	MECANISMOS DE DETERIORO	INDICADORES DE DETERIORO	ACCIONES	PLAZO
Transformación del sistema de desagüe produciendo empozamiento y desborde del agua hacia las paredes de la elipse.	Cristalización de sales (principalmente carbonatos) Carbonatación Expansión – contracción de arcillas Hidrólisis de la matriz silícea de la roca	Concentraciones de carbonatos y otras sales en fisuras de las rocas Escorrentías Paredes cubiertas de una fina capa de arcillas. Crecimiento de líquenes Material disgregado en el suelo	Corrección del ángulo de declive de la superficie de la elipse para favorecer la conducción de aguas lluvias a los desagües. Control en el desarrollo de bio crecimientos.	URGENTE Factor precursor de deterioro
Uso de materiales arcillosos meteorizados como material de protección en los lomillos y de nivelación en la superficie de la elipse	Cristalización de sales (principalmente carbonatos) Carbonatación Expansión – contracción de arcillas Hidrólisis de la matriz silícea de la roca	Presencia del material arcilloso en la superficie de las paredes de la elipse	Reemplazo de la quillucaca como material de protección en los lomillos y de nivelación en la superficie de la elipse	URGENTE Factor potencializador de meteorización
Impermeabilización de la superficie de la elipse con chova que esta cristalizada Nota: este factor se relaciona con el anterior	Ho hay intercambio desde el interior de la elipse al exterior, micro ambiente completamente sellado Riesgo de ruptura por cristalización de la chova e ingreso del agua al interior de la elipse	Chova ha perdido sus propiedades de flexibilidad	Cambio de la chova a una membrana impermeabilizante unidireccional	URGENTE Está en asociación con el factor uno y es un riesgo muy alto

FACTOR DE DETERIORO	MECANISMOS DE DETERIORO	INDICADORES DE DETERIORO	ACCIONES	PLAZO
Construcción de la loseta	Esfuerzos por comportamientos mecánicos de la loseta y el resto de materiales de la elipse tiende a desplazar los formatos pétreos Riesgo de producción masiva de sales en contacto con el agua, que se mueven y se cristalizan.		Eliminación de la loseta, previo complementación de estudios y con las respectivas medidas de seguridad para evitar la generación de alteraciones	A MEDIANO PLAZO Si se soluciona el riesgo de ingreso de agua
Estructuras de hormigón armado en el barranco	Esfuerzos por comportamiento mecánico diferentes de los pórticos de hormigón armado y los materiales del barranco	Comportamiento térmico diferente Pérdida de la capa superficial de cobertura vegetal Caigas de tierra del barranco	Colocación de geo membrana y recuperación de la cobertura vegetal Plan de mantenimiento	URGENTE Las inestabilidades del barranco ponen en riesgo la estabilidad de la elipse
Sistema de conducción de aguas lluvias deficiente en la caminería de la pared norte	Movilidad de sales provenientes de los productos de meteorización desde la caminería hacia la pared norte Cristalización de sales	Empozamientos de aguas lluvias Exfoliación laminar fina en las primeras filas inferiores de la pared Inestabilidades en el barranco por escorrentías desordenadas	Mejorar el sistema de conducción de aguas lluvias Retirar los productos de meteorización que se depositan en la caminería (Plan de mantenimiento)	URGENTE La cristalización es un proceso cíclico que actúa permanentemente potencializando la meteorización
Inestabilidades del escarpe del barranco	Malas características geo mecánicas del macizo rocoso debido a los materiales del escarpe del barranco (conglomerados, areniscas y lutitas) son de litología deleznable y erosionable.	Caída de bloque columnares, desprendimiento de lajas de rocas por disecación, formación de cárcavas, socavaciones, oquedades en estratos de lutitas	Recuperación de la cobertura vegetal	URGENTE Las inestabilidades del barranco ponen en riesgo la estabilidad de la elipse

FACTOR DE DETERIORO	MECANISMOS DE DETERIORO	INDICADORES DE DETERIORO	ACCIONES	PLAZO
Asentamientos en las zonas oeste y este de la elipse	Presencia de material fino (arcilla-limo meteorizados provenientes del estrato de lutitas)	Aberturas de los formatos pétreos de las paredes de la elipse	Ninguna, se ha comprobado que estas aperturas están estables. El análisis estructural indica que no hay riesgo estructural	PERMANENTE Continuar con el monitoreo de los fisurómetros
Acción del agua (humedad relativa-aguas lluvias)	Crecimiento cristalino por precipitación de sales	Formación de exfoliaciones finas y gruesas	Eliminar todas las fuentes de humedades que no sean ambientales Eliminación mecánica de sales y exfoliaciones finas Eliminación mecánica de las sales, sellado de bordes y consolidaciones de bordes puntuales (piedra por piedra)	URGENTE Potencializa la meteorización con pérdida de material superficial A MEDIANO PLAZO Se necesita profundizar en el procedimiento y estabilización de la piedra

FACTOR DE DETERIORO	MECANISMOS DE DETERIORO	INDICADORES DE DETERIORO	ACCIONES	PLAZO
Acción del agua (humedad relativa-aguas lluvias)	Alternancia de humectación y desecación de las arcillas (montmorillonita, illita y caolinita)	Formación de exfoliaciones finas y gruesas	Eliminación de las escorrentías que transportan materiales arcillosos desde la superficie hasta las paredes de la elipse Eliminación mecánica de las arcillas y sales de las paredes de la elipse	URGENTE Potencializa la meteorización con pérdida de material A MEDIANO PLAZO Se necesita profundizar en el procedimiento y estabilización de la piedra, mediante ensayos de comportamiento de materiales a usar en la intervención
Acción del agua (humedad relativa-aguas lluvias)	Hidrólisis de la matriz silíceas de la roca	Exfoliaciones finas y formación de productos pulverulentos de descomposición	Eliminación de todas las fuentes de humedades que no sean ambientales Eliminación mecánica de los productos de meteorización	URGENTE Potencializa la meteorización con pérdida de material A MEDIANO PLAZO Se necesita profundizar en el procedimiento y estabilización de la piedra.

FACTOR DE DETERIORO	MECANISMOS DE DETERIORO	INDICADORES DE DETERIORO	ACCIONES	PLAZO
Acción del agua (humedad relativa-aguas lluvias)	Carbonatación	Formación de carbonatos y bicarbonatos (sales que cristalizan al interior de la piedra) Formación de agua carbonatada de carácter corrosivo que reacciona con los minerales de la roca descomponiéndolos	Eliminación de todas las fuentes de humedades que no sean ambientales y del transporte de materiales arcillosos Eliminación mecánica de los carbonatos y bicarbonatos	URGENTE Potencializa la meteorización con pérdida de material A MEDIANO PLAZO Se necesita profundizar en el procedimiento y estabilización de la piedra.
Acción del agua (humedad relativa-aguas lluvias)	Oxidación de algunos minerales de la roca	Disgregación de inclusiones de la roca (ferromagnesianos) que reaccionan con el oxígeno y el agua formando productos disgregados	Por definir	Por definir una vez que se haya profundizado en el tema
Acción de la temperatura	Expansión y contracción térmica	Exfoliación laminar múltiple	Sellado de bordes y consolidaciones puntuales	A MEDIANO PLAZO Se necesita profundizar en el procedimiento y estabilización de la piedra

FACTOR DE DETERIORO	MECANISMOS DE DETERIORO	INDICADORES DE DETERIORO	ACCIONES	PLAZO
Acción de la temperatura y el agua	Crecimiento cristalino del agua por gelifración (congelamiento del agua)	Exfoliación laminar gruesa	Eliminación de todas las fuentes de humedades que no sean ambientales Sellado de bordes y consolidaciones puntuales	A MEDIANO PLAZO Se necesita profundizar en el procedimiento y estabilización de la piedra, mediante ensayos de comportamiento de materiales a usar en la intervención
Acción del viento	Efectos de la intensidad y la dirección de los vientos	Exfoliación laminar fina y gruesa	Sellado de bordes y consolidaciones puntuales	A MEDIANO PLAZO Analizar la posibilidad de la colocación de barreras para impedir el impacto directo del viento en los muros

5. RECOMENDACIONES

Toda intervención en la elipse de Ingapirca deberá basarse en los estudios realizados en la presente investigación.

La elaboración y aplicación de un plan de mantenimiento del sitio.

Implementar el laboratorio de lítica donde se pueda realizar los ensayos de comportamiento de materiales para ser empleados en las intervenciones futuras.

Complementar y mantener actualizado el expediente del monumento de Ingapirca que se generó a partir de esta investigación.

BIBLIOGRAFÍA

(2009). *Informe del taller de evaluación del estado de conservación de la piedra de Ingapirca*. Cuenca - Ecuador.

Aires-Barros, L. (2001). *As rochas dos monumentos portugueses, tipologias e patologias*. Lisboa: Instituto Português do Património Arquitectónico.

Alonso, A. M. (2010). Petrología sedimentaria. Procesos en ambientes exógenos I: Meteorización. *Reduca*, 17-32.

Benavente, D. (2003). *Modelización y estimación de la durabilidad de materiales petreos porosos frente a la cristalización de sales*. <http://www.cervantesvirtual.com/FichaObra.html?Ref=12011>: Biblioteca Miguel de Servantes. Obtenido de <http://www.cervantesvirtual.com/FichaObra.html?Ref=12011>

Benavente, D. (20 de 02 de 2016). Obtenido de <http://web.ua.es/es/lpa/documentos/david-benavente/sem.pdf>

Cuenca, U. d. (s.f.). *Fotografías aéreas*. Cuenca.

Da Silva, M. (12 de Diciembre de 2013). *Análisis de las relaciones porosidad y permeabilidad en consolidados*. Obtenido de Universidad Simón Bolívar: <http://www.gc.usb.ve/geocoordweb/tesis/Pre/Melia%Da%20Silva.pdf>

Fort, R. (1996). El agua en los materiales pétreos: comportamiento. En *Degradación* (págs. 237-248). Madrid: Ediciones Complutense.

Fort, R. (1996). El agua en los materiales pétreos: comportamiento hídricos. En F. M. Martín, *Degradación y conservación del patrimonio arquitectónico*. Madrid: Editorial Complutense.

- GEO, G. Y. (2013). *Informe de prospección geofísica y análisis estructural de la elipse de Ingapirca*. Cuenca - Ecuador: INPC.
- Herráez, J. A. (1999). *Técnicas y procedimientos de conservación preventiva. Medidas de control de los factores del medio: temperatura, humedad relativa, luz, calidad de aire*. Madrid: IPCE.
- Prada, J. V. (12 de 02 de 2016). *Procesos de alteración de materiales pétreos*. Obtenido de <http://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwinsdSx08PLAhVB1x4KHdefATAQFggaMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.raco.cat%2Findex.php%2FActaGeologica%2Farticle%2Fdownload%2F75491%2F98390&usq=AFQjCNFISGMJCS1OxVs7ssG3xeRuVSkw>
- Salazar, J. y. (2007). Una propuesta para la restauración del Castillod e Ingapirca. En M. LeNela, *Memorias de los Encuentros Nacionales III de Arqueología IV de Antropología* (págs. 259-277). Cañar: Casa de la Cultura Ecuatoriana Benjamín Carrión Núcleo del Cañar.
- Slawomir Swieciochowski, S. (1991). *Problemas de conservación de monumentos arqueológicos de piedra en el Perú y Ecuador*. Torun.
- Slawomir, S. (2014). *Estudio histórico, diagnóstico y proyecto de conservación de la elipse del complejo arqueológico de Ingapirca*. Quito: INPC-PROMETEO.
- Sousa, M. (2000). *“Estudo da fracturação e das características físico-mecânicas de granitos da região de Trás-os-Montes com vista*. Vila Real: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.
- Swieciochowski, S. (2014). *Informe final*. Quito-Ecuador: Prometeo, SENESCYT.
- Vásquez, A. (2013). *Informe de los estudios estructurales y de riesgo sísmico de Ingapirca*. Cuenca: Instituto Nacional de Patrimonio Cultural.