

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

ESCUELA DE CIENCIAS QUÍMICAS

Título de disertación:

"Estudio del grado de deterioro por envejecimiento en materiales de construcción
(adobe, ladrillos y tejas) del Centro Histórico de Quito"

**Disertación previa a la obtención del título de Licenciado(a) en Ciencias
Químicas con Mención en Química Analítica**

Nombre del estudiante: Bruna Salgado Gaspar

Quito, 2020

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo de disertación, posterior a la obtención del título de Licenciatura en Ciencias Químicas con Mención en Química Analítica, de la estudiante Bruna Salgado Gaspar ha sido concluido de conformidad con las normas establecidas; por lo tanto, puede ser presentado para el proceso de calificación correspondiente.

Dr. José Luis Piñeiros Mendoza

Director de la disertación

Quito, 2020

AGRADECIMIENTO

A mi hermano Alejandro, por ser mi familia, mi mejor amigo, mi soporte, mi apoyo y la persona más importante en mi vida. Gracias por protegerme y ayudarme a crecer cada día.

A mis papas por criarme, forjarme y enseñarme a jamás resignarme ante las adversidades de la vida.

A mi abuela, mis tíos y mis primos por tanto cariño y cuidado en todo momento.

A ti Pedro por todo lo que hemos vivido juntos y por tanto amor. De igual manera a tu familia, por siempre recibirme con brazos abiertos.

A mis amigos Valeria, Daniela, María Emilia, Martin, Mateo y José por ser mi felicidad y por compartir tanto conmigo.

A mis compañeros Karen y Bryan por haber atravesado este camino juntos, por el apoyo mutuo y por siempre creer en mí.

A mi director de tesis José Luis Piñeiros, y mis lectores Pablito y David por brindarme su conocimiento y amistad.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del procedimiento experimental para la determinación de sulfatos.....	37
Figura 2. Esquema del procedimiento experimental para la determinación de silicatos.....	38
Figura 3. Esquema del procedimiento experimental para la determinación del óxido de hierro.....	38
Figura 4. Esquema del procedimiento experimental para la determinación del óxido de calcio.....	39
Figura 5. Esquema del procedimiento experimental para la determinación del óxido de magnesio.	40
Figura 6. Esquema del procedimiento experimental para la determinación de humedad.	41
Figura 7. Esquema del procedimiento experimental para la determinación de la materia orgánica.....	42
Figura 8. Esquema del procedimiento experimental para la determinación de carbonatos y bicarbonatos.	43
Figura 9. Esquema del procedimiento experimental para la determinación de cloruros.....	44
Figura 10. Esquema de la preparación de muestras para Absorción Atómica.	45
Figura 11. Esquema de la preparación del óxido de lantano para el análisis de calcio y magnesio.....	45
Figura 12. Esquema de la preparación del cloruro de cesio para el análisis de sodio.....	46

Figura 13. Líneas de tendencia sobre el contenido de humedad en los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito, en función del tiempo de envejecimiento.	49
Figura 14. Líneas de tendencia sobre el contenido de materia orgánica en los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito, en función del tiempo de envejecimiento	50
Figura 15. Líneas de tendencia sobre el contenido de cloruros (Cl^-) en los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito, en función del tiempo de envejecimiento.	51
Figura 16. Líneas de tendencia sobre el contenido de carbonatos (CO_3^{2-}) en los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito, en función del tiempo de envejecimiento.	52
Figura 17. Líneas de tendencia sobre el contenido de bicarbonatos (HCO_3^-) en los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito, en función del tiempo de envejecimiento.	53
Figura 18. Líneas de tendencia sobre el contenido de sulfatos (SO_4^{2-}) en los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito, en función del tiempo de envejecimiento.	54
Figura 19. Líneas de tendencia sobre el contenido de silicatos (SiO_4^{4-} , $\text{Si}_2\text{O}_7^{6-}$) en los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito, en función del tiempo de envejecimiento.....	55
Figura 20. Líneas de tendencia sobre el contenido de óxido de hierro (Fe_2O_3) en los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito, en función del tiempo de envejecimiento.....	56

Figura 21. Líneas de tendencia sobre el contenido de óxido de calcio (CaO) en los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito, en función del tiempo de envejecimiento.	57
Figura 22. Líneas de tendencia sobre el contenido de óxido de magnesio (MgO) en los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito, en función del tiempo de envejecimiento.....	58
Figura 23. Curvas de calibración para la determinación de Hierro, Sodio, Calcio y Magnesio por Absorción Atómica.....	59
Figura 24. Líneas de tendencia sobre la concentración de hierro (Fe^{+2} , Fe^{+3}) en los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito en función del tiempo de envejecimiento.	60
Figura 25. Líneas de tendencia sobre la concentración de sodio (Na^{+}) en los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito en función del tiempo de envejecimiento.	61
Figura 26. Líneas de tendencia sobre la concentración de calcio (Ca^{2+}) en los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito en función del tiempo de envejecimiento.	62
Figura 27. Líneas de tendencia sobre la concentración de magnesio (Mg^{2+}) en los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito en función del tiempo de envejecimiento.	63

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Correspondencia entre el número de días que han permanecido las muestras de materiales dentro de la cámara y el número de años al que equivale su envejecimiento.....	36
Tabla 2. Concentración de los estándares para las curvas de calibración de hierro, sodio, calcio y magnesio.	47
Tabla 3. Condiciones instrumentales de operación en los análisis por Absorción Atómica.	47
Tabla 4. Contenido de humedad en las muestras de los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito tras 0, 5, 10, 15 y 20 años de envejecimiento.	48
Tabla 5. Contenido de materia orgánica en las muestras de los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito tras 0, 5, 10, 15 y 20 años de envejecimiento.	49
Tabla 6. Contenido de cloruros (Cl^-) en las muestras de los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito tras 0, 5, 10, 15 y 20 años de envejecimiento.	50
Tabla 7. Contenido de carbonatos (CO_3^{2-}) en las muestras de los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito tras 0, 5, 10, 15 y 20 años de envejecimiento.	51
Tabla 8. Contenido de bicarbonatos (HCO_3^-) en las muestras de los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito tras 0, 5, 10, 15 y 20 años de envejecimiento.	52

Tabla 9. Contenido de sulfatos (SO_4^{2-}) en las muestras de los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito tras 0, 5, 10, 15 y 20 años de envejecimiento.	53
Tabla 10. Contenido de silicatos (SiO_4^{4-} , $\text{Si}_2\text{O}_7^{6-}$) en las muestras de los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito tras 0, 5, 10, 15 y 20 años de envejecimiento.	54
Tabla 11. Contenido de óxido de hierro (Fe_2O_3) en las muestras de los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito tras 0, 5, 10, 15 y 20 años de envejecimiento.	55
Tabla 12. Contenido de óxido de calcio (CaO) en las muestras de los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito tras 0, 5, 10, 15 y 20 años de envejecimiento.	56
Tabla 13. Contenido de óxido de magnesio (MgO) en las muestras de los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito tras 0, 5, 10, 15 y 20 años de envejecimiento.....	57
Tabla 14. Curvas de Calibración para la determinación de: Hierro, Sodio, Calcio y Magnesio por Absorción Atómica.....	58
Tabla 15. Concentración de hierro (Fe^{+2} , Fe^{+3}) en las muestras de los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito tras 0, 5, 10, 15 y 20 años de envejecimiento.	59
Tabla 16. Concentración de sodio (Na^+) en las muestras de los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito tras 0, 5, 10, 15 y 20 años de envejecimiento.	60

Tabla 17. Concentración de calcio (Ca^{2+}) en las muestras de los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito tras 0, 5, 10, 15 y 20 años de envejecimiento.	61
Tabla 18. Concentración de magnesio (Mg^{2+}) en las muestras de los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito tras 0, 5, 10, 15 y 20 años de envejecimiento.	62
Tabla 19. Parámetros de desempeño de los métodos analíticos empleados en cada material: teja, ladrillo de adobe y recubrimiento.	64
Tabla 20. Fórmulas matemáticas empleadas para desarrollar las pruebas de hipótesis ANOVA (Análisis de varianza de un factor).....	65
Tabla 21. Análisis de varianzas ANOVA para determinar la existencia o ausencia de cambios significativos en la concentración de los componentes presentes en la Teja en función de su tiempo de envejecimiento.....	66
Tabla 22. Análisis de varianzas ANOVA para determinar la existencia o ausencia de cambios significativos en la concentración de los componentes presentes en el Ladrillo del Adobe en función de su tiempo de envejecimiento.	67
Tabla 23. Análisis de varianzas ANOVA para determinar la existencia o ausencia de cambios significativos en la concentración de los componentes presentes en el Recubrimiento en función de su tiempo de envejecimiento.	67

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Zona de muestreo (Google Maps).....	96
Anexo 2. Equipo de envejecimiento artificial, marca BIOBASE, modelo BJPX-A450.....	96
Anexo 3. Humidificador ultrasónico, marca YADU.	97
Anexo 4. Balanza analítica Mettler Toledo, ML 204. Precisión 0,0001 g.....	97
Anexo 5. Espectrofotómetro de absorción atómica, marca Perkin Elmer, AAnalyst 400	98
Anexo 6. Mufla de calentamiento para calcinación.....	98
Anexo 7. Horno de estufa para el secado de las muestras marca Memmert Modelo SM 200.	99
Anexo 8. Plancha de calentamiento MS 100 (HP 100).....	99
Anexo 9. Pipeta 10-100 µL, marca CAPP.	100
Anexo 10. Certificado de calibración de la pipeta 10-100 µL, marca CAPP.....	100
Anexo 11. Pipeta 100-1000µL, marca Pipette.	101
Anexo 12. Certificado de calidad de la pipeta 100-1000µL, marca Pipette.	101
Anexo 13. Pipeta 1-5 mL, marca CAPP.	102
Anexo 14. Certificado de calibración de la pipeta 1-5 mL, marca CAPP.....	102
Anexo 15. Taladro 420 W marca narex.	103
Anexo 16. Estándar de calcio 1000 µg/mL en 2-5% HNO ₃ , marca AccuStandard, Inc.	104
Anexo 17. Estándar de hierro 1000 µg/mL en 2-5% HNO ₃ , marca AccuStandard, Inc.	105

Anexo 18. Estándar de magnesio 1000 µg/mL en 2-5% HNO ₃ , marca AccuStandard, Inc.....	106
Anexo 19. Estándar de sodio 1000 µg/mL en 2-5% HNO ₃ , marca AccuStandard, Inc.	107
Anexo 20. De izquierda a derecha: muestras ejemplo de teja, ladrillo de adobe, recubrimiento.....	108
Anexo 21. Muestras pulverizadas y almacenadas en bolsas plásticas con cierre hermético de los años 0, 5, 10, 15 y 20.....	108

TABLA DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTO.....	4
1. INTRODUCCIÓN	19
1.1 EL CENTRO HISTÓRICO DE QUITO	19
1.2 LOS MATERIALES DEL CENTRO HISTÓRICO DE QUITO	19
1.2.1 ADOBE	19
1.2.2 LADRILLO	20
1.2.3 TEJAS.....	20
1.3 ENVEJECIMIENTO DE LOS MATERIALES	21
1.3.1 ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL ACELERADO	21
1.4 EL CLIMA EN LA CIUDAD DE QUITO	22
1.5 EL CAMBIO CLIMÁTICO Y SU EFECTO SOBRE LAS EDIFICACIONES ..	22
1.6 VARIABLES CLIMÁTICAS Y SU INFLUENCIA EN EL ENVEJECIMIENTO DE LOS MATERIALES	23
1.6.1 RADIACIÓN SOLAR.....	23
1.6.2 TEMPERATURA.....	23
1.6.3 HUMEDAD.....	24
1.7 COMPOSICIÓN DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN	24
1.7.1 CATIONES	25
1.7.1.1 CALCIO (Ca^{2+}).....	25
1.7.1.2 MAGNESIO (Mg^{2+})	25
1.7.1.3 SODIO (Na^+).....	25
1.7.1.4 HIERRO (Fe^{+2} , Fe^{+3}).....	26
1.7.2 ANIONES.....	26
1.7.2.1 CARBONATOS Y BICARBONATOS (CO_3^{2-} y HCO_3^-).....	26

1.7.2.2 SULFATOS (SO_4^{2-})	26
1.7.2.3 CLORUROS (Cl^-)	27
1.7.2.4 SILICATOS (SiO_4^{4-} , $\text{Si}_2\text{O}_7^{6-}$).....	27
1.7.2.5 ÓXIDOS METÁLICOS (M_2O_n)	28
1.7.2.5.1 ÓXIDO DE HIERRO (Fe_2O_3).....	28
1.7.2.5.2 ÓXIDO DE CALCIO (CaO).....	28
1.7.2.5.3 ÓXIDO DE MAGNESIO (MgO)	29
1.7.2.5.4 ÓXIDO DE SODIO (Na_2O)	29
1.7.3 CONTENIDO DE HUMEDAD	29
1.7.4 MATERIA ORGÁNICA.....	29
1.8 ESTUDIO DE MATERIALES ANTIGUOS.....	30
1.9 PROPUESTA DE ANÁLISIS Y ENFOQUE	30
1.10 OBJETIVOS	31
1.10.1 OBJETIVO GENERAL.....	31
1.10.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	31
2. MATERIALES Y MÉTODOS	32
2.1 MUESTREO.....	32
2.2 EQUIPOS.....	32
2.3 MATERIALES	33
2.4 REACTIVOS	34
2.5 ENVEJECIMIENTO DE LOS MATERIALES	35
2.6 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS	36
2.7 ANÁLISIS GRAVIMÉTRICOS.....	36
2.7.1 SULFATOS.....	37
2.7.2 SILICATOS	37
2.7.3 ÓXIDO DE HIERRO	38

2.7.4 ÓXIDO DE CALCIO	39
2.7.5 ÓXIDO DE MAGNESIO	40
2.7.6 HUMEDAD.....	41
2.7.7 PÉRDIDA POR CALCINACIÓN (MATERIA ORGÁNICA)	41
2.8 ANÁLISIS VOLUMÉTRICOS	42
2.8.1 CARBONATOS Y BICARBONATOS	42
2.8.2 CLORUROS	44
2.9 DETERMINACIÓN DE CATIONES MEDIANTE ESPECTROFOTOMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA	45
3. RESULTADOS.....	48
3.1 RESULTADOS DE HUMEDAD.....	48
3.2 RESULTADOS DE MATERIA ORGÁNICA.....	49
3.3 RESULTADOS DE ANIONES.....	50
3.4 RESULTADOS DE ÓXIDOS	55
3.5 RESULTADOS DE CATIONES.....	58
3.6 PARÁMETROS DE DESEMPEÑO DE LOS MÉTODOS ANALÍTICOS.....	63
3.7 RESULTADOS ESTADÍSTICOS.....	65
4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	68
4.1 HUMEDAD.....	68
4.2 MATERIA ORGÁNICA	69
4.3 CLORUROS.....	70
4.4 CARBONATOS Y BICARBONATOS	71
4.5 SULFATOS	73
4.6 SILICATOS	74
4.6 ÓXIDO DE HIERRO.....	75
4.7 ÓXIDO DE CALCIO	76

4.8 ÓXIDO DE MAGNESIO	77
4.9 CATIONES.....	78
4.10 INFLUENCIA DE UNOS COMPONENTES SOBRE OTROS	80
4.11 RELACIÓN CON ESTUDIOS SIMILARES	81
4.12 CONSIDERACIONES FINALES	83
5. CONCLUSIONES.....	85
6. RECOMENDACIONES	86
7. BIBLIOGRAFÍA	87
8. ANEXOS	96

RESUMEN

Dada la importancia de las edificaciones del centro histórico de Quito, declarado Patrimonio Mundial de la UNESCO, en los ámbitos cultural, social y económico de la ciudad, se estudió el envejecimiento de tres de sus materiales de construcción: tejas, ladrillos de adobe y recubrimientos. Para esto, se expusieron muestras de dichos materiales a determinadas condiciones de humedad, temperatura y radiación ultravioleta dentro de una cámara de control climático, tomando en cuenta que: 19,25 días equivale a 5 años. Los parámetros analizados; como la humedad, materia orgánica, óxidos, cationes y aniones fueron determinados mediante técnicas gravimétricas, volumétricas y espectrofométricas. Los resultados obtenidos para los años 0, 5, 10, 15 y 20 fueron tabulados y graficados para verificar la presencia de alguna tendencia. Y para comprobar la existencia de diferencias significativas entre las varianzas, se aplicó la prueba estadística de hipótesis ANOVA. Cabe mencionar algunos parámetros que presentaron variaciones importantes como: la humedad, ya que tras disminuir por evaporación, se volvió a introducir en los materiales por el crecimiento de sus poros, el equilibrio carbonato-bicarbonatos que se desplazó implicando un cambio de pH en el medio, y los óxidos de hierro que disminuyeron significativamente siendo perjudicial para los materiales por la resistencia que estos proporcionan. En fin, se confirmó que los factores climáticos sí influyen en la composición química de los materiales a medida que pasa el tiempo. Dichos cambios sugieren que se presentaran consecuencias negativas a futuro si no se empiezan a tomar medidas ambientales y de restauración en el presente.

ABSTRACT

Taking into account the importance of the buildings of the Historic Center of Quito, UNESCO's World Heritage, in cultural, social and economic aspects, the aging of three of its building materials was studied: tiles, adobe bricks and coatings. To accomplish this, samples of these materials were exposed to certain conditions of humidity, temperature and ultraviolet radiation inside a climate control chamber, considering that: 19.25 days is equivalent to 5 years. The parameters analyzed; as moisture, organic matter, oxides, cations and anions were determined by gravimetric, volumetric and spectrophotometric techniques. The results obtained for years 0, 5, 10, 15 and 20 were tabulated and plotted to verify the presence of any trend. To prove the existence of significant differences between the variances, the statistical test of ANOVA hypothesis was applied. It is worth mentioning some parameters that presented important variations like: the humidity that after diminishing by evaporation was reintroduced into the materials by the growth of its pores, the carbonate-bicarbonate equilibrium that shifted implying a change of pH in the environment, and the iron oxides which decreased hardly, affecting the resistance of this materials. In conclusion, it was confirmed that climatic factors have an influence over the chemical composition of materials over time. And the vast majority of these changes will present negative consequences in the future if environmental and restoration measures are not implemented now.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 EL CENTRO HISTÓRICO DE QUITO

Es uno de los sitios coloniales más grandes de América Latina y contribuye considerablemente a la economía de la ciudad debido a la gran actividad turística (Córdova, 2014). Su elevada popularidad se debe principalmente a su historia y patrimonio que se encuentran expresados en la magnífica arquitectura colonial de las iglesias, catedrales, museos, conventos y calles (Middleton, 2003). La ciudad de Quito fue fundada en 1534 y proclamada patrimonio mundial de la UNESCO en 1978. Su centro histórico es el mejor conservado de todas las capitales latinoamericanas. Sin embargo, sus estructuras se encuentran amenazadas por el deterioro físico y social, lo cual hace urgente algún tipo de intervención (Zaaijer, 1991). Para preservar las construcciones del centro histórico, y sus beneficios económicos, es necesario estudiar el deterioro físico y químico de sus materiales causado por factores climáticos y antropogénicos.

1.2 LOS MATERIALES DEL CENTRO HISTÓRICO DE QUITO

1.2.1 ADOBE

Son bloques de barro ampliamente utilizados ya que pueden obtenerse a partir de materias primas presentes en el suelo. Han sido empleados desde la antigüedad y se considera que es uno de los primeros materiales creados por el hombre (Kogel, 2006). Para su fabricación, generalmente se emplea un 70% de arena, 23,5% de arcilla y 6,5% de cemento. Se ha demostrado que la proporción entre agua y material seco define su estabilidad (Schroder, 2010). El adobe también tiende a contener piedras pequeñas o grava que influyen en su granulometría y porosidad. Para producir este material, no se necesitan fuentes de energía adicionales. Es totalmente reciclable y tiene una gran versatilidad de usos (Illampas, 2009 y DeCastrillo, 2017). Sin embargo, trabajar con adobe también tiene algunos inconvenientes: requiere de constante mantenimiento, durante sismos puede colapsar; y sus propiedades mecánicas de resistencia y tensión son relativamente pobres en comparación con otros materiales (Cividini, 2017).

1.2.2 LADRILLO

Fabricar ladrillos requiere de un recurso energético adicional para el proceso de horneado o tostado. También se producen a partir de los materiales del suelo, en donde se remueven las piedras gruesas para aumentar la composición de arcilla. Después de mezclar con agua, se le da forma, se seca y se calienta a temperaturas que exceden los 600 °C. Se ha determinado que durante este calentamiento ocurren varios cambios en la naturaleza química y mineralógica del material (Sağın, 2013). Suelen ser difíciles de caracterizar debido a la gran diversidad de materias primas y procesos de fabricación. Sus propiedades físicas, mecánicas y químicas exhiben una significativa variabilidad pero por lo general, sus agregados están compuestos por cuarzos, feldespatos y calcita (Oguz, 2014). Las propiedades hidráulicas, permeabilidad y porosidad dependen de la temperatura de tostado y de la actividad puzolánica, un parámetro definido por la composición en cationes de calcio Ca^{2+} y minerales de sílice (Douglas-Jones, 2016). Se ha descubierto que la contaminación, los depósitos orgánicos y las variaciones climáticas han modificado el equilibrio dinámico de los ladrillos por su entorno cambiante (López-Arce, 2003).

1.2.3 TEJAS

Se utilizan como materiales para recubrir techos y son generalmente de barro cocido combinado con cemento, cenizas y residuos de construcción o demolición (Batista, 2019). No son reforzadas porque su objetivo no es cargar peso pero deben resistir a los efectos del clima como las lluvias y la radiación solar. Su durabilidad depende principalmente de dicha resistencia (Rajeev, 2016). Otros factores que determinan el desempeño de las tejas son su comportamiento frente a la acidez o alcalinidad, y la cristalización de sales dentro de sus poros. La firmeza del material depende de la mezcla de materia prima y de la temperatura de tostado. Un estudio ha demostrado que añadir un 25% de cerámica mejora considerablemente la resistencia a condiciones extremas de pH y temperatura (Subashi, 2018). Además, se debe tomar en cuenta la actividad puzolánica para definir su permeabilidad (Lavati, 2009).

1.3 ENVEJECIMIENTO DE LOS MATERIALES

Se refiere al deterioro físico o químico de un material en función del tiempo debido a efectos antropológicos y climáticos (Pazos, 2018). El envejecimiento se expresa de distintas maneras dependiendo del material. Por ejemplo, en los recubrimientos metálicos ocurre corrosión, en los materiales cerámicos puede haber quiebre o decoloración, y los materiales arcillosos sufren disgregación (Pancorbo, 2011).

1.3.1 ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL ACELERADO

El envejecimiento artificial consiste en reproducir el ambiente de una zona afectada por el clima, en condiciones controladas, para analizar lo que le sucede a un material en función del tiempo (Íñigo, 2000). Por su lado, el envejecimiento acelerado busca maximizar las condiciones climáticas para obtener resultados de días, semanas o años en intervalos de tiempo más cortos. Pocos trabajos han sido desarrollados empleando cámaras de control climático para el envejecimiento de materiales dada la complejidad que implica definir las condiciones de cada ciclo. Además, para esto se requiere contar con datos climáticos de la zona a ser imitada, obtenidos con varios años de anterioridad. En 1992, investigadores españoles estudiaron el efecto del envejecimiento acelerado en pastas de cemento reforzadas con fibras de vidrio. Sin embargo, debido a una ausencia de datos meteorológicos recolectados en la zona, tuvieron que aplicar una correlación de temperatura, radiación y humedad característica al clima de Inglaterra. Descubrieron que el refuerzo con fibras de vidrio proporcionaba una mayor resistencia a la cristalización de sales y a los ciclos de congelado y descongelado (Sanchez, 1992). En la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, el Ing. José Alarcón desarrolló un programa *Solver* empleando modelos matemáticos. Este programa permite resolver ecuaciones que involucran variables climáticas para así poder realizar las predicciones. La base de datos fue construida mediante la información proporcionada por tres estaciones meteorológicas de la ciudad: Carapungo, Belisario y El Camal (Alarcón, 2017). El programa fue implementado con éxito por el Ing. Cristian Pazos para el

envejecimiento acelerado en muestras de hormigón simple, armado, madera, mortero, policarbonato y perfiles metálicos. Esto le permitió predecir en porcentaje, la pérdida de resistencia a la compresión en 5, 10, 15 y 20 años a futuro (Pazos, 2018). Los mismos ciclos climáticos y la misma cámara fue empleada para el desarrollo de este trabajo.

1.4 EL CLIMA EN LA CIUDAD DE QUITO

En Quito, el clima es característico de la región andina: templado tipo ecuatorial, mesotérmico y semi-humedo. La temperatura se sitúa entre 10 y 20 °C durante todo el año. La humedad relativa varía entre el 65 y el 85% siendo que entre noviembre y mayo es más lluvioso. Los niveles de radiación solar y la intensidad de luz son elevados a consecuencia de la altura (Peralta, 2007).

1.5 EL CAMBIO CLIMÁTICO Y SU EFECTO SOBRE LAS EDIFICACIONES

En la actualidad, el cambio climático más reciente y drástico es el calentamiento global. El aumento de temperatura observado se caracteriza por un incremento mucho más rápido que el atestiguado por el planeta durante los últimos cien siglos. Los productos gaseosos de la civilización y de la actividad industrial han contribuido en gran parte a este proceso (Bretti, 1999).

Los efectos del calentamiento global sobre las estructuras dependen de la región donde se encuentran construidas. En la costa, el aumento en el nivel del mar puede generar cristales de sal dentro de los materiales porosos. En zonas de montaña, donde ocurren deshielos importantes, aumenta el nivel de los ríos produciendo daños a puentes, carreteras y edificaciones cercanas. Las fuertes precipitaciones características del cambio climático afectan severamente a las redes de alcantarillado y a los tejados de los edificios. Los desastres naturales como los terremotos, tsunamis, tormentas y avalanchas pueden causar el colapso de miles de obras civiles (Pazos, 2018). El aumento drástico de temperatura produce efectos de tensión, generando fisuras y grietas sobre los materiales. De igual manera, la variación en la humedad es responsable de acelerar el proceso de oxidación y corrosión superficial. En la madera u otros materiales orgánicos, la humedad también puede provocar pudrición y propagación de hongos (Pazos,

2018). Así, cada clima impacta de diferente manera a cada material y además, al maximizar ciertos factores climáticos, se acelera el deterioro de los mismos (Dey, 2018). Los elevados niveles de polución en el aire, cerca de sitios industriales, aceleran el envejecimiento de los edificios. Esto ocurre porque los gases resultantes de la quema de combustibles interactúan con la mampostería disminuyendo la resistencia de los materiales en general (López-Arce, 2005).

1.6 VARIABLES CLIMÁTICAS Y SU INFLUENCIA EN EL ENVEJECIMIENTO DE LOS MATERIALES

Las variables meteorológicas que influyen en el envejecimiento son: la radiación solar, la temperatura, la humedad atmosférica, la presión atmosférica, el viento, la precipitación, las masas de aire y los frentes. Las tres primeras variables mencionadas son las que se tomarán en cuenta en la experimentación porque son las que pueden simularse dentro de una cámara de control climático.

1.6.1 RADIACIÓN SOLAR

Es un tipo de energía que llega a la Tierra en forma de ondas electromagnéticas que son capaces de desplazarse por el espacio en cualquier dirección y sin soporte. Se descompone en rayos infrarrojos, luz visible, rayos ultravioleta, entre otros. La cantidad de radiación que recibe determinado lugar en determinado momento depende de la latitud, época del año y de la presencia o ausencia de nubes (Martínez, 2017). Este factor da lugar a grandes diferencias de temperatura entre las superficies expuestas y no expuestas lo cual introduce tensiones internas en el material. En un estudio sobre tejas de concreto, se determinó que el ancho de las grietas se ve significativamente afectado por dicha diferencia de temperatura entre las superficies (Rajeev, 2016).

1.6.2 TEMPERATURA

Es una magnitud que mide la cantidad de energía térmica presente en un cuerpo. Al incrementarse la temperatura, se le proporciona energía cinética a las partículas y su cantidad movimiento aumenta. Dicho movimiento produce

choques y así las partículas se recombinan en otras formas químicas (Domínguez, 2007). A muy bajas temperaturas, en materiales porosos, el punto de congelación del agua proveniente de la humedad disminuye por la presión capilar. Cuando los poros se saturan de hielo, el punto de congelación de todo el material se asemeja al del agua (0 °C). Por eso, se ha demostrado que la ocurrencia de varios ciclos de congelación y descongelación pueden causar un grave deterioro, tal como fue comprobado en un estudio comparativo del comportamiento de las tejas entre el invierno y las demás estaciones climáticas (Iba, 2015). En la ciudad de Quito, el clima tiene fluctuaciones bruscas en cortos periodos de tiempo. Esto produce sucesivas expansiones y contracciones en los materiales de construcción. Por esto, a medida que avanza el cambio climático también se aceleran los procesos de envejecimiento (Moropoulou, 2003).

1.6.3 HUMEDAD

Es la cantidad de agua en estado gaseoso presente en el aire. Cuando la humedad de la atmósfera es muy baja, el tamaño de los poros en un material aumenta produciéndose rupturas. Pero cuando es muy elevada, también se ven perjudicadas las propiedades físicas del material (Joisel, 1981). La humedad creciente, la lluvia impulsada por el viento y la difusión de vapor, provocan cambios micro estructurales y mineralógicos en los materiales. Un alto nivel de humedad combinado con la contaminación del aire y alguna condición extrema de presión o temperatura puede generar un ambiente realmente hostil para los materiales de construcción. López-Arce lo comprobó mediante una comparación entre ladrillos expuestos y ladrillos enterrados bajo suelo, ambos antiguos y provenientes de la ciudad de Toledo en España (López-Arce, 2005).

1.7 COMPOSICIÓN DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

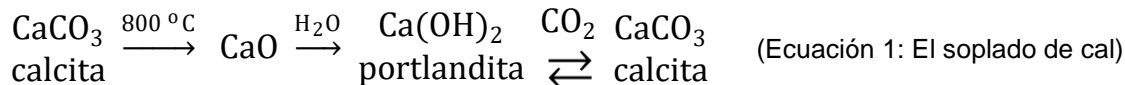
Los materiales de construcción como el adobe, las tejas o los ladrillos pueden ser caracterizados en función de su composición mineralógica, es decir, determinando las estructuras cristalinas o identidades físicas de las especies químicas. O también, pueden caracterizarse en función de su composición química. Aplicando las directrices de la química analítica cuantitativa, se puede

determinar la cantidad de especies iónicas (cationes y aniones), de humedad y de materia orgánica presente en cada muestra.

1.7.1 CATIONES

1.7.1.1 CALCIO (Ca²⁺)

Puede encontrarse en forma de óxido (CaO), hidróxido (Ca(OH)₂), carbonatos, bicarbonatos, sulfatos y silicatos hidratados. Las propiedades químicas y físicas de un material, se encuentran íntimamente ligadas como se puede describir por la conexión entre los compuestos de calcio (II) y la porosidad. A temperaturas alrededor de los 800 °C, los ladrillos producidos a partir de arcillas ricas en calcio como la calcita (CaCO₃) se descomponen en óxido de calcio (CaO). En presencia de humedad, el óxido de calcio reacciona para formar la portlandita (Ca(OH)₂) y ésta puede revertir a calcita por interacción con CO₂. Estas reacciones generan un considerable aumento en el volumen de fisuras y porosidades lo cual se conoce como el soplado de cal (Sağın, 2013).



1.7.1.2 MAGNESIO (Mg²⁺)

Tiene un comportamiento similar al calcio (II) aunque por lo general se encuentra en menor proporción. Suele hallarse como óxido (MgO) y su presencia se atribuye a los minerales de las arcillas (DeCastrillo, 2017). Pruebas mineralógicas realizadas mediante difracción de rayos X han determinado que también puede presentarse combinado con aluminosilicatos en los ladrillos (López-Arce, 2003).

1.7.1.3 SODIO (Na⁺)

Es un componente que suele presentarse en bajos porcentajes, generalmente en forma de óxidos (Na₂O). También se ha encontrado sodio a manera de feldespatos (NaAlSi₃O₈) en muestras de ladrillos antiguos (Böke, 2006). Cuando se presenta en forma de NaCl se puede sospechar que han ocurrido fugas de

aguas cloradas domésticas. Ciertas formas del sodio contribuyen a un mayor crecimiento bacteriano. Esto puede acelerar el proceso de degradación de un material ya que ocurre el consumo de los compuestos químicos existentes y la contaminación por los productos metabólicos (López-Arce, 2005).

1.7.1.4 HIERRO (Fe^{+2} , Fe^{+3})

El estudio del hierro en cualquiera de sus formas aporta información relativa al color, la técnica de cocción y la tecnología de fabricación de un material. Pero, por lo general, se encuentra como óxido en estado de oxidación III (Fe_2O_3) (Adorni, 2013). Mientras más óxidos de hierro se encuentren en una arcilla, mejores serán las propiedades de sinterización del material terminado. Sin embargo, el peso también resultará más elevado (Böke, 2006).

1.7.2 ANIONES

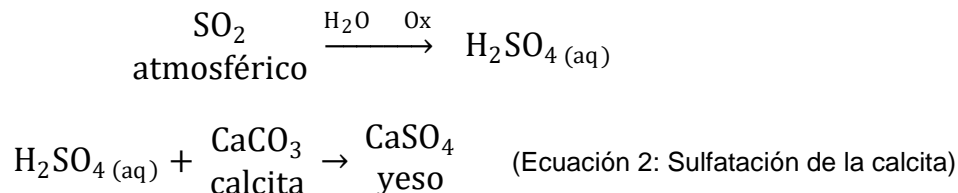
1.7.2.1 CARBONATOS Y BICARBONATOS (CO_3^{2-} y HCO_3^-)

Dentro de un material, los carbonatos y bicarbonatos mantienen un equilibrio cambiante que se desplaza de acuerdo a la acidez o alcalinidad del medio. La porosidad se puede ver afectada cuando ocurren varios desplazamientos sucesivos. Este problema es menos recurrente en los materiales tostados ya que los carbonatos y bicarbonatos sufren descomposición en CO_2 a elevadas temperaturas (Sağın, 2013). Los cationes que generalmente se asocian a los carbonatos y bicarbonatos son el calcio (II) y el magnesio (II). Incluso pueden hallarse asociados a ambos simultáneamente como en el caso de la Dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), un mineral de alta abundancia en la piedra caliza (Oguz, 2014).

1.7.2.2 SULFATOS (SO_4^{2-})

La presencia de sulfatos en materiales de construcción puede darse por varios motivos. Uno de ellos involucra la adición intencional de sulfato de calcio (CaSO_4) a manera de Yeso (di hidratado) en las pre-mezclas (López-Arce, 2003). Otro de los motivos se explica a partir de procesos ambientales. El dióxido de azufre es un contaminante gaseoso muy reactivo y corrosivo que en presencia de agua y

agentes oxidantes puede formar ácido sulfúrico. Dicho ácido puede atacar a los compuestos de calcio en cualquier material formando sulfatos de calcio.



Dado que los cristales de Yeso resultantes son menos resistentes que la calcita, este proceso es un ejemplo del deterioro que puede producir la contaminación atmosférica en los materiales de construcción (López-Arce, 2005).

1.7.2.3 CLORUROS (Cl⁻)

La presencia de iones cloruro se relaciona con la humedad e intemperie salina del medio. Por esto, se han encontrado mayores concentraciones en materiales de construcción provenientes de zonas costeras o ambientes marinos (İpekog̃lu, 2007). El cloro es un elemento bastante electronegativo que conlleva a la corrosión mediante procesos de óxido-reducción. La resistencia y durabilidad se ven afectadas por lo que no es deseable (Yépez, 2016). En la actualidad, se están investigando métodos electroquímicos o nuevos aditivos que permitan permeabilizar los materiales contra la acción de los cloruros. Usualmente se encuentran asociados al sodio (NaCl) y al potasio (KCl).

1.7.2.4 SILICATOS (SiO₄⁴⁻, Si₂O₇⁶⁻)

Son diversos compuestos que contienen iones metálicos y moléculas complejas de silicio-oxígeno. Por lo general, son el resultado de varios grupos SiO₄ distribuidos espacialmente en cadenas largas, hojas o estructuras tridimensionales. Puede producirse una sustitución parcial de átomos de silicio por átomos de aluminio o boro. En conjunto, los silicatos y aluminosilicatos forman el 92% de la corteza terrestre dando forma a una infinidad de piedras, arenas y otros materiales (Lorenz, 2012). En las construcciones, la presencia de silicatos es atribuida a los cuarzos (SiO₂) y feldespatos [(K, Na, Ca, Ba, NH₄)(Si,Al)₄O₈] que provienen de los materiales de partida. Cabe mencionar que

aumentan la calidad y estabilidad en ladrillos y cementos (DeCastrillo, M. 2017). Se pueden hallar más aluminosilicatos cuando los suelos son ricos en caolinitas $[Al_2 Si_2 O_5(OH)_4]$. Y cuando existe humedad, dichos aluminosilicatos pueden reaccionar con portlanditas para formar silicatos y aluminatos hidratados de calcio que mejoran las propiedades hidráulicas de los morteros y yesos (Böke, 2006).

1.7.2.5 ÓXIDOS METÁLICOS (M_2O_n)

El oxígeno en su forma de O^{2-} actúa como un anión para los óxidos metálicos que provienen de los minerales arcillosos en el suelo. Se clasifican por su carácter básico, como el de calcio (CaO), o por su carácter ácido, como los de hierro y aluminio (Fe_2O_3 , Al_2O_3). Los óxidos de sodio, potasio y magnesio entran en una categoría de secundarios por tener características nocivas (Fonseca, 2015).

1.7.2.5.1 ÓXIDO DE HIERRO (Fe_2O_3)

El contenido de Fe_2O_3 resulta del empleo de arcillas ricas en minerales como la hematita o la magnetita. A veces, se agrega en la producción de materiales de construcción porque sirve de soporte y es resistente a factores climáticos como la temperatura, la humedad y la presión (Lavati, 2009). También puede presentarse en materiales expuestos a la lluvia donde los cristales de piroxeno se disuelven y recristalizan dentro de las grietas (Moropoulou, 2003).

1.7.2.5.2 ÓXIDO DE CALCIO (CaO)

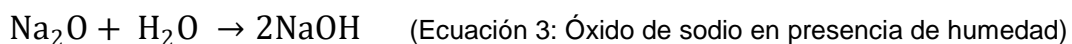
Suele estar presente en los materiales tostados como producto del carbonato al calor. Sin embargo, por ser una sustancia altamente higroscópica puede rehidratarse produciendo hidróxido y afectando de esta manera a los materiales por los cambios de forma química. La presencia de sílice o alúmina en la preparación de los materiales puede prevenir dichos cambios ya que se forman silicatos o aluminatos de calcio más estables y no extraños a la matriz. Esto se ha tomado en cuenta para explicar la gran duración de los materiales presentes en las antiguas estructuras del imperio Otomano (Sağın, 2013).

1.7.2.5.3 ÓXIDO DE MAGNESIO (MgO)

Se encuentra en pequeñas proporciones y proviene principalmente de la dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) en la piedra caliza. La hidratación de este óxido tiene un efecto negativo en los materiales debido a que se expande, causando la desintegración de adobes, ladrillos e incluso concretos (Fonseca, 2015).

1.7.2.5.4 ÓXIDO DE SODIO (Na_2O)

Al ser extremadamente higroscópico, el óxido de sodio es capaz de absorber el agua del aire lo cual desencadena una reacción violenta que resulta en hidróxido de sodio. Dicha reacción es tan fuerte que genera presiones internas conllevando así a la ruptura del material. Por otro lado, es importante considerar que el óxido de sodio puede disminuir la temperatura a la que funde la sílice (Fonseca, 2015).



1.7.3 CONTENIDO DE HUMEDAD

Se refiere al contenido de agua total que se encuentra en equilibrio con la atmósfera. Se subdivide en tres categorías: agua esencial, no esencial y ocluida. El agua esencial forma una parte integral de un compuesto en su estado sólido. Las moléculas de agua de cristalización en un hidrato sólido estable pueden ser un claro ejemplo de esto. Por otro lado, el agua no esencial es aquella que se retiene en un material a consecuencia de fuerzas físicas como la adsorción. A diferencia del agua esencial, no guarda ninguna relación estequiométrica con los componentes de la muestra. Finalmente, el agua ocluida se refiere a aquella que retiene se en los huecos microscópicos situados irregularmente a través de los cristales del sólido en su forma líquida (Skoog, 1997).

1.7.4 MATERIA ORGÁNICA

Es la porción de masa que se pierde por la calcinación de la muestra. Corresponde a la materia orgánica que a elevadas temperaturas se descompone en dióxido de carbono y vapor de agua. En los materiales de construcción como el adobe, la materia orgánica proviene del suelo que se utiliza como materia

prima, la cual contiene: pequeñas raíces de plantas, hongos y otros macro organismos o micro organismos (Lozano, 2018).

1.8 ESTUDIO DE MATERIALES ANTIGUOS

Los materiales históricos pueden ser muy variados y sus parámetros de análisis más relevantes aún no se encuentran especificados. Por este motivo, en cada estudio se han aplicado distintas técnicas y metodologías. En el 2017, investigadores dinamarqueses realizaron una simulación hidrotérmica en una pared de ladrillos antiguos y propusieron que los cinco parámetros más relevantes son: densidad, porosidad, humedad relativa, coeficiente de absorción de agua y conductividad (Hansen, 2017). Al igual que en dicho estudio y en la mayoría de trabajos sobre materiales históricos, los análisis químicos no han sido tomados en cuenta con tanta insistencia como los análisis físicos.

1.9 PROPUESTA DE ANÁLISIS Y ENFOQUE

Las edificaciones del centro histórico de Quito continúan siendo soportadas por materiales bastante antiguos. Y se debe tomar en cuenta que debido al cambio climático, las condiciones se están volviendo más agresivas. Por eso, es importante anticiparse al deterioro que puede ocurrir los próximos años en la dimensión química de dichos materiales. Dada la complejidad y calidad de cada uno, no se pueden aplicar las mismas técnicas de restauración. Por este motivo, es necesario estudiar la composición química específica de cada uno.

En varios países, se ha tomado la iniciativa de estudiar la composición de sus materiales pertenecientes a sitios históricos, o en general a obras patrimoniales. Sin embargo, en el Ecuador, y específicamente en la ciudad de Quito se han encontrado muy pocos trabajos parecidos, donde los pocos estudios prestan mayor atención a las propiedades físicas que las químicas. Sin embargo, cabe recordar que ambas se encuentran íntimamente ligadas y relacionadas entre sí. Introducir la tecnología del envejecimiento artificial acelerado en este ámbito, puede ayudar a predecir la duración de las estructuras de una manera innovadora y efectiva.

1.10 OBJETIVOS

1.10.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar el efecto del clima en la composición química de los materiales de construcción del centro histórico de Quito (ladrillo de adobe, tejas, recubrimientos) en función del tiempo, mediante la exposición de dichos materiales a una cámara de envejecimiento acelerado para determinar la variación de sus propiedades químicas y físicas.

1.10.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Simular el envejecimiento de los materiales de construcción del centro histórico de Quito mediante la exposición a variables climáticas como radiación ultravioleta, humedad y temperatura dentro de una cámara de control climático.

Determinar la composición química de las muestras en cuanto a cationes (hierro, sodio, calcio y magnesio), aniones (carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos y silicatos) y óxidos (hierro, calcio y magnesio) mediante espectrofotometría, gravimetría y volumetría.

Comparar los resultados de los análisis químicos obtenidos después de simular el envejecimiento en 5, 10, 15 y 20 años para establecer la influencia del tiempo en el deterioro.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo del procedimiento experimental en este trabajo se divide en: muestreo, envejecimiento de los materiales, preparación de las muestras, análisis gravimétricos, análisis volumétricos, análisis espectrofotométricos y finalmente el estudio estadístico de los resultados obtenidos.

2.1 MUESTREO

Las muestras de los materiales de construcción fueron tomadas del centro histórico de Quito y fueron proporcionadas por integrantes de la Facultad de Arquitectura de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador dentro del proyecto: "Impactos en la infraestructura patrimonial del Centro Histórico de la Ciudad de Quito ocasionado por actividades antropogénicas".

- Se recibieron 6 ladrillos de adobe de 40x40x10 cm, 4 tejas y varios pedazos de recubrimientos heterogéneos y de distintos tamaños.
- La antigüedad de los materiales es previa al periodo republicano.
- La zona de muestreo se encuentra sobre la avenida Simón Bolívar entre las calles García Moreno y Sebastián de Benalcazar. Edificio de Ferrocarriles Chimbacalle antiguamente conocido como Estación Tulcán
- Coordenadas: 0°13'17.9"S 78°30'53.0"W

(Anexo 1)

2.2 EQUIPOS

- Equipo de envejecimiento artificial, marca BIOBASE, modelo BJPX-A450 (Anexo 2)
- Humidificador ultrasónico, marca YADU (Anexo 3)
- Balanza analítica Mettler Toledo, ML 204. Precisión 0,0001 g (Anexo 4)
- Espectrofotómetro de absorción atómica, marca Perkin Elmer, AAnalyst 400 (Anexo 5)
- Mufla (Anexo 6)

- Horno de estufa para el secado de las muestras marca Memmert Modelo SM 200 (Anexo 7).
- Plancha de calentamiento MS 100 (HP 100) (Anexo 8)
- Pipeta 10-100 μL , marca CAPP (Anexo 9)
- Pipeta 100-1000 μL , marca Pipette (Anexo 11)
- Pipeta 1-5 mL, marca CAPP (Anexo 13)
- Taladro 420 W marca narex. (Anexo 15)

2.3 MATERIALES

- Vasos de precipitación de 50 mL, 100 mL, 250 mL y 400 mL
- Matraces Erlenmeyer de 150 mL, 350 mL y 500 mL
- Bureta de 50 mL
- Bureta ámbar de 50 mL
- Probetas de 10 mL, 25 mL y 50 mL
- Pipetas volumétricas de 1 mL, 2 mL, 5 mL y 10 mL
- Pipetas graduadas de 10 mL
- Balones de 25 mL, 50 mL, 100 mL y 250 mL
- Peras de succión
- Agitadores de vidrio
- Vidrios de reloj
- Piceta
- Pipetas Pasteur
- Desecador con sílica gel
- Papel filtro cualitativo (poro medio)
- Papel filtro cuantitativo (poro fino, sin cenizas)
- Embudos de decantación
- Triángulos de porcelana
- Trípodes
- Soportes universales
- Anillos metálicos

- Espátula metálica
- Cápsulas de porcelana
- Crisoles de porcelana con tapa
- Pinza para bureta
- Bolsas plásticas con cierre hermético
- Lima de metal
- Guantes de nitrilo
- Mascarilla

2.4 REACTIVOS

- Ácido clorhídrico grado reactivo marca Merck concentrado y en concentraciones de 1:99, 1:2, 1:4, 0,1 M y 1 M
- Ácido nítrico concentrado grado reactivo y libre de metales marca J.T. Baker
- Agua desionizada conductividad 0,055 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
- Agua destilada
- Aire 99,9 puro marca Linde
- Acetileno 99,9 puro marca Linde
- Anaranjado de metilo marca BDH al 0,1% p/v
- Carbonato de calcio grado reactivo marca Fisher Scientific en concentración de 0,1 M
- Cloruro de amonio sólido grado reactivo marca Loba Chemie
- Cloruro de bario grado reactivo marca Sigma-Aldrich al 10% p/v
- Cloruro de cesio grado reactivo marca Sigma-Aldrich al 2% p/v
- Cloruro de sodio grado reactivo marca AMP en concentración de 0,1 N
- Dicromato de potasio marca Baker Analyzed en concentración de 0,2 M
- Estándar de calcio 1000 $\mu\text{g}/\text{mL}$ en 2-5% HNO_3 , marca AccuStandard, Inc. (Anexo 16)
- Estándar de hierro 1000 $\mu\text{g}/\text{mL}$ en 2-5% HNO_3 , marca AccuStandard, Inc. (Anexo 17)

- Estándar de magnesio 1000 µg/mL en 2-5% HNO₃, marca AccuStandard, Inc. (Anexo 18)
- Estándar de sodio 1000 µg/mL en 2-5% HNO₃, marca AccuStandard, Inc. (Anexo 19)
- Fenolftaleína marca BDH en solución etanólica al 1% p/v
- Fosfato dibásico de amonio grado reactivo marca Panreac al 10% p/v
- Hidróxido de amonio concentrado grado reactivo marca Merck concentrado y en concentraciones de 1:1 y 1:20
- Nitrato de amonio grado reactivo marca Merck al 1% p/v
- Nitrato de plata grado reactivo marca Merck en concentración de 0,1 N
- Oxalato de amonio marca BDH al 4% p/v
- Óxido de lantano sólido grado reactivo marca Merck
- Rojo de metilo marca BDH en solución etanólica al 0,1% p/v

2.5 ENVEJECIMIENTO DE LOS MATERIALES

Para el envejecimiento de los materiales, se colocaron las muestras dentro de la cámara de envejecimiento acelerado (Anexo 2) donde se han podido controlar los niveles de humedad, temperatura y radiación ultravioleta a manera de ciclos. Las condiciones y el tiempo de cada ciclo han sido determinados mediante el software Solver, desarrollado por el Ing. José Alarcón en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador (Alarcón, 2017). El programa ha permitido la deducción de cada ecuación y se han empleado los mismo ciclos de trabajo utilizados por el Ing. Cristian Pazos en el envejecimiento de hormigón. Cada ciclo se encuentra conformado por tres partes. En el primer subciclo, la cámara se mantiene a una temperatura de 25 °C con una humedad relativa del 70% durante 1200 minutos. A continuación, la temperatura aumenta a 35 °C y la humedad disminuye a 50% manteniéndose por 800 minutos. Y finalmente, el ciclo termina con 20 °C y una humedad de 50% por 1250 minutos (Pazos, 2018). La carga de radiación que reciben las muestras depende de varios componentes: la radiación emitida por las 6 lámparas (4050 W/m²), la temperatura dentro de la cámara, y las condiciones de heliofanía, es decir, el periodo de exposición a la radiación directa y sin

nubosidad (Cárdenas, 2010). Tomando esto en consideración, se ha determinado que un periodo de 19,25 días equivale a 5 años, lo cual se encuentra detallado en la Tabla 1.

Tabla 1. Correspondencia entre el número de días que han permanecido las muestras de materiales dentro de la cámara y el número de años al que equivale su envejecimiento.

Número de días dentro de la cámara	Número de años de envejecimiento
0,00	0
19,25	5
38,50	10
57,75	15
77,00	20

2.6 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Dado que todas las matrices trabajadas eran sólidas, tras retirarlas de la cámara de envejecimiento se procedió a pulverizar, homogenizar y almacenar las muestras. Reducir el tamaño de partícula promedio en una muestra permite muestrear el mismo número de partículas con una masa combinada más pequeña y manejable. Homogenizar la muestra es importante para poder obtener resultados representativos y repetitivos (Harvey, 2000). Almacenar las mismas en lugares frescos y secos puede prevenir la absorción o desorción de agua. Cualquier pérdida o ganancia de humedad cambia la composición química de un sólido por lo que es recomendable analizar los materiales enseguida de su muestreo o secarlos justo antes de comenzar un análisis (Skoog, 2014). Para este fin, se las conservó en bolsas plásticas con cierre hermético.

2.7 ANÁLISIS GRAVIMÉTRICOS

Mediante gravimetría se han determinado los siguientes parámetros: sulfatos, silicatos, óxido de hierro, óxido de calcio, óxido de magnesio, humedad y pérdida

por calcinación. Todos estos análisis se han desarrollado por triplicado en base a los procedimientos estandarizados especificados por la norma ASTM a excepción de la humedad. Sin embargo, se han realizado pequeñas modificaciones para optimizar recursos, así como cantidades y volúmenes.

2.7.1 SULFATOS

(ASTM C114-07-15 Sulfur Tetraoxide): En este método, los sulfatos son precipitados como sulfato de bario (BaSO_4) mediante la adición de cloruro de bario (BaCl_2) en solución ácida. El precipitado se calina y se pesa. Finalmente, se calcula estequiométricamente el equivalente de (SO_4^{2-}).

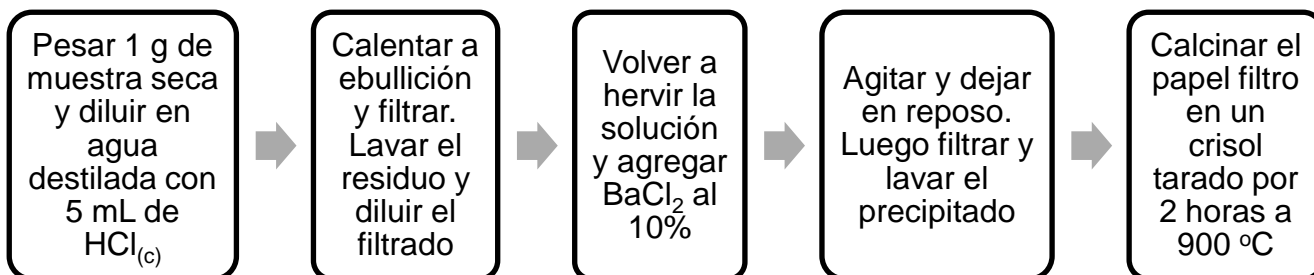
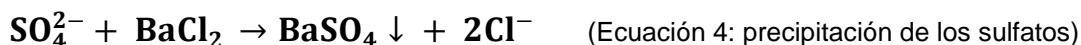


Figura 1. Esquema del procedimiento experimental para la determinación de sulfatos.



$$\% \text{SO}_4^{2-} = \frac{(\text{Peso crisol con residuo} - \text{Peso crisol}) \times \text{Peso molecular } \text{SO}_4^{2-}}{\text{Peso molecular } \text{BaSO}_4 \times \text{Peso muestra}} \times 100$$

(Ecuación 5: Cálculo gravimétrico de sulfatos expresado en porcentaje)

2.7.2 SILICATOS

(ASTM C144-07-06 silicon dioxide): Para la determinación de silicatos a manera de dióxido de silicio (SiO_2), la muestra se trata con ácido clorhídrico concentrado para solubilizar las posibles interferencias (sales de aluminio, hierro, metales alcalinos y alcalinotérreos, entre otros). Tras realizar una filtración, el residuo resultante que no se ha solubilizado es tratado térmicamente y pesado como SiO_2 .

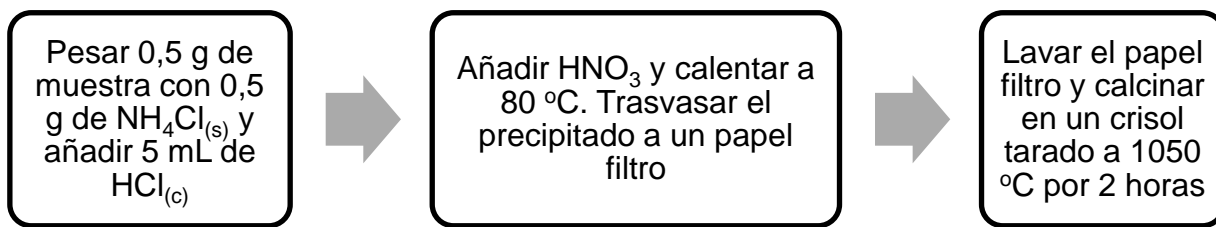


Figura 2. Esquema del procedimiento experimental para la determinación de silicatos.

$$\%SiO_4^{4-} = \frac{(\text{Peso crisol con residuo} - \text{Peso crisol})}{\text{Peso muestra}} \times 100$$

(Ecuación 6: gravimétrico de los silicatos expresado en porcentaje)

2.7.3 ÓXIDO DE HIERRO

(ASTM C114-07-08 ferric oxide): Para la determinación gravimétrica del óxido férrico, el hierro debe estar completamente oxidado a Fe^{3+} ya que su K_{ps} al estado de $Fe(OH)_3$ (10^{-36}) es mucho menor que el del Fe^{2+} . Se añade hidróxido de amonio concentrado como agente precipitante hasta alcalinidad. Dado que el $Fe(OH)_3$ precipita como un coloide gelatinoso, su filtración puede llegar a ser lenta y difícil. Cuando se observa turbidez coloidal, es necesario disolver y repetir el procedimiento. Es recomendable lavar varias veces el precipitado con nitrato de amonio ya que así se evita la peptización.

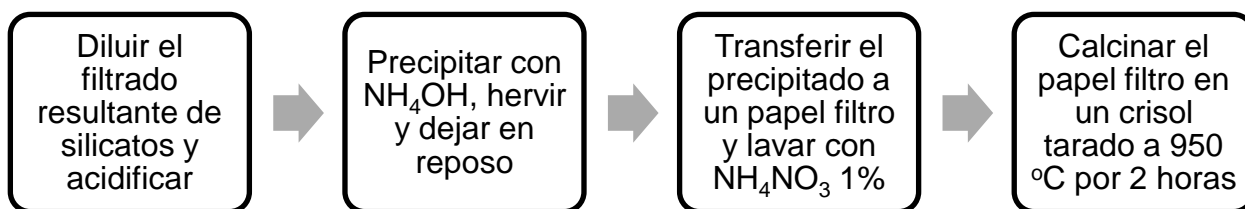
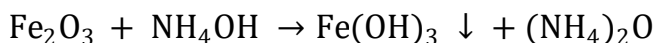


Figura 3. Esquema del procedimiento experimental para la determinación del óxido de hierro.



(Ecuación 7: Precipitación del hidróxido de hierro)

$$\%Fe_2O_3 = \frac{(\text{Peso crisol con residuo} - \text{Peso crisol})}{\text{Peso muestra}} \times 100$$

(Ecuación 8: Cálculo gravimétrico de los óxidos de hierro expresado en porcentaje)

$$\%Fe = \frac{(\text{Peso crisol con residuo} - \text{Peso crisol}) \times \text{Peso molecular Fe} \times 100}{\text{Peso molecular } Fe_2O_3 \times \text{Peso muestra}}$$

(Ecuación 9: Cálculo gravimétrico del hierro expresado en porcentaje)

2.7.4 ÓXIDO DE CALCIO

(ASTM C114-07-13): En este método, se añade a la muestra oxalato de amonio que en medio ácido se introduce como ácido oxálico, incapaz de precipitar el Ca^{2+} . Al adicionar hidróxido de amonio, la solución ácida se neutraliza y los iones de oxalato vuelven a precipitar con el calcio formando $CaC_2O_4 \cdot H_2O$. Se utiliza el indicador ácido-base rojo de metilo para señalar que la precipitación ha sido completada. Cuando el $CaC_2O_4 \cdot H_2O$ es sometido al calor de la mufla, se descompone a óxido de calcio anhidro (CaO).

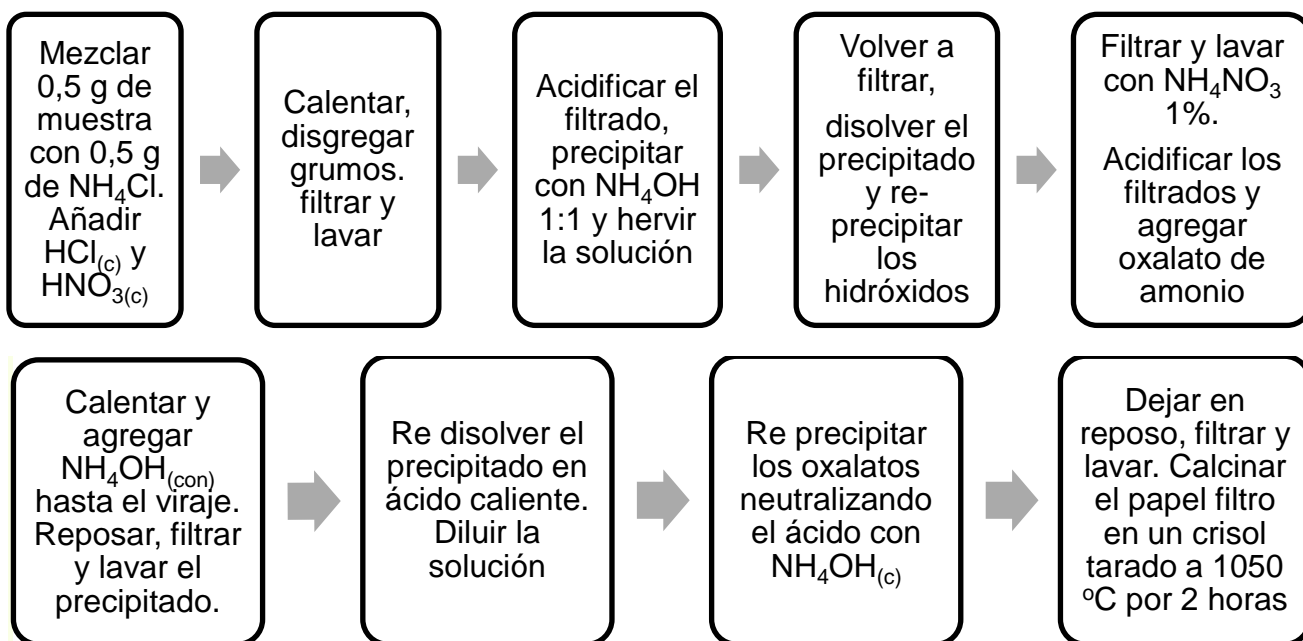
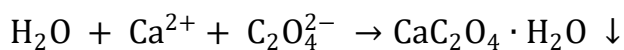


Figura 4. Esquema del procedimiento experimental para la determinación del óxido de calcio.



(Ecuación 10: precipitación del oxalato de calcio)

$$\% \text{CaO} = \frac{(\text{Peso crisol con residuo} - \text{Peso crisol})}{\text{Peso muestra}} \times 100$$

(Ecuación 11: Cálculo gravimétrico del óxido de calcio expresado en porcentaje)

$$\% \text{Ca} = \frac{(\text{Peso crisol con residuo} - \text{Peso crisol}) \times \text{Peso molecular Ca} \times 100}{\text{Peso molecular CaO} \times \text{Peso muestra}}$$

(Ecuación 12: Cálculo gravimétrico del calcio expresado en porcentaje)

2.7.5 ÓXIDO DE MAGNESIO

(ASTM-C114-07-14 magnesium oxide): En este método de análisis, se toma el filtrado proveniente de la remoción de calcio y se hace precipitar al magnesio como fosfato de magnesio y amonio. El precipitado es tratado térmicamente y se pesa como pirofosfato de magnesio ($\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$). Finalmente, se calcula estequiométricamente el equivalente de MgO.

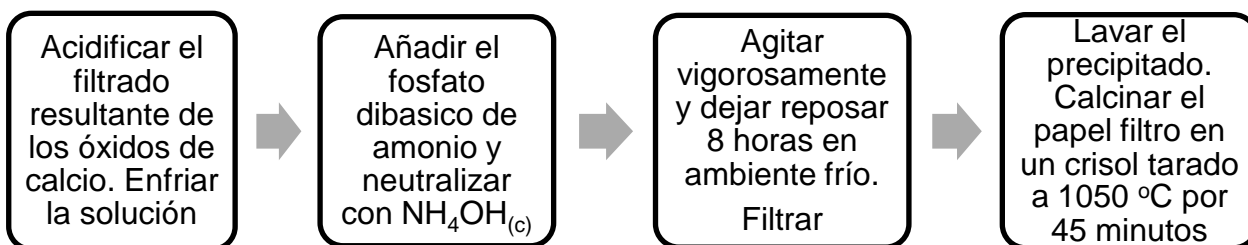


Figura 5. Esquema del procedimiento experimental para la determinación del óxido de magnesio.

$$\% \text{MgO} = \frac{(\text{Peso crisol con residuo} - \text{Peso crisol}) \times 2 \times \text{Peso molecular MgO}}{\text{Peso molecular Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7 \times \text{Peso muestra}} \times 100$$

(Ecuación 13: Cálculo gravimétrico del óxido de magnesio expresado en porcentaje)

$$\% \text{Mg} = \frac{(\text{Peso crisol con residuo} - \text{Peso crisol}) \times 2 \times \text{Peso molecular MgO} \times \text{Peso molecular Mg} \times 100}{\text{Peso molecular MgO} \times \text{Peso molecular Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7 \times \text{Peso muestra}}$$

(Ecuación 14: Cálculo gravimétrico del magnesio expresado en porcentaje)

2.7.6 HUMEDAD

(Método tradicional de secado en estufa): El secado en estufa es un método empleado para la determinación de humedad en muestras como suelos, alimentos o materiales. Se debe fijar la temperatura sobre el punto de evaporación del agua (100 °C) pero no tanto para evitar la volatilización o descomposición de otros componentes. El método gravimétrico es el más preciso para medir el contenido de humedad de un material. Los errores de medición más significativos ocurren en la toma de la muestra, en la conservación de la misma antes de pesar y durante el propio pesaje. La desventaja más significativa del método es que su procedimiento de medición es lento en comparación con los métodos indirectos.

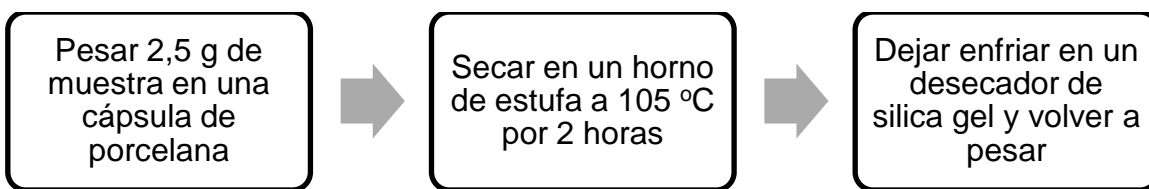


Figura 6. Esquema del procedimiento experimental para la determinación de humedad.

$$\% \text{Humedad} = \frac{(\text{Peso muestra} - (\text{Peso residuo en cápsula} - \text{Peso cápsula}))}{\text{Peso muestra}} \times 100$$

(Ecuación 15: Cálculo gravimétrico de la humedad total expresada en porcentaje)

2.7.7 PÉRDIDA POR CALCINACIÓN (MATERIA ORGÁNICA)

(ASTM C114-07-16 loss on ignition): Al igual que la humedad, la materia orgánica se determina mediante un análisis termo gravimétrico indirecto. Mediante la calcinación de la muestra a elevadas temperaturas y en presencia de comburente O₂ (oxígeno), el carbono y el hidrógeno que constituyen la materia orgánica se convierten cuantitativamente en CO₂ (dióxido de carbono) y H₂O (agua) respectivamente. El residuo que permanece tras la calcinación representa el contenido de cenizas inorgánicas. La cantidad de materia orgánica se puede

determinar mediante la diferencia entre el peso inicial de la muestra, y el residuo inorgánico final (Harvey, 2000).

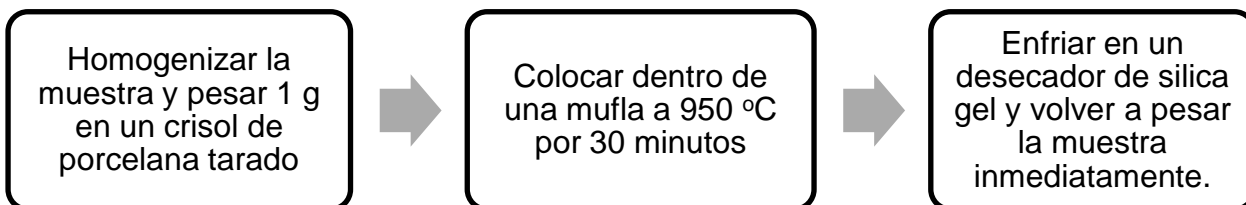


Figura 7. Esquema del procedimiento experimental para la determinación de la materia orgánica.

$$\%MO = \frac{(\text{Peso muestra} - (\text{Peso residuo en el crisol} - \text{Peso crisol}))}{\text{Peso muestra}} \times 100$$

(Ecuación 16: Cálculo gravimétrico de la materia orgánica (MO) expresada en porcentaje)

2.8 ANÁLISIS VOLUMÉTRICOS

Mediante volumetría, se determinaron los siguientes parámetros: cloruros, carbonatos y bicarbonatos. Para el análisis de cloruros, se siguió un proceso similar al especificado por la norma estándar ASTM (Método de Mohr). En cambio, para los carbonatos y bicarbonatos se aplicaron titulaciones ácido-base con HCl como agente valorante. Para esto, se requirió el uso de dos indicadores: fenolftaleína y anaranjado de metilo. Dicho método fue descrito en 2006 por Mendham, J. en la página 299 de la quinta edición del libro: "*Vogels textbook of quantitative chemical analysis*" perteneciente a la editorial de Pearson Education.

2.8.1 CARBONATOS Y BICARBONATOS

Estos aniones son solubilizados en agua destilada de donde las interferencias se remueven por filtración. Para empezar, se determina la alcalinidad total de la muestra mediante una titulación ácido-base con ácido clorhídrico como agente valorante y anaranjado de metilo como indicador. A continuación, se toma otra porción de la muestra a la cual se le añade una solución concentrada de cloruro de bario. Todos los carbonatos son removidos ya que precipitan como carbonato

de bario. Los bicarbonatos son determinados mediante otra titulación ácido-base con ácido clorhídrico como agente valorante y fenolftaleína como indicador. El contenido de carbonatos puede ser calculado por la diferencia entre la alcalinidad total y los bicarbonatos.

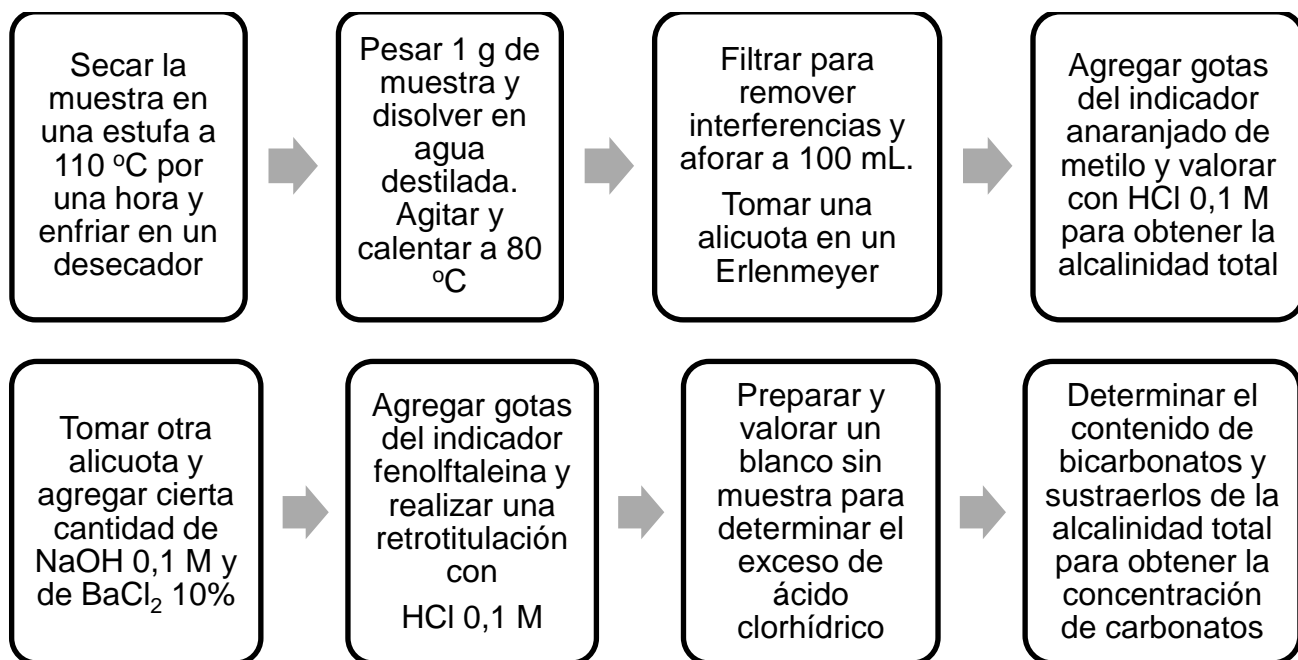
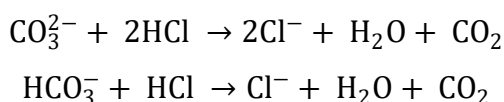
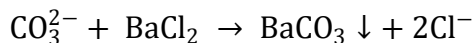


Figura 8. Esquema del procedimiento experimental para la determinación de carbonatos y bicarbonatos.



(Ecuación 17: Reacciones del carbonato y bicarbonato con el ácido clorhídrico)



(Ecuación 18: Precipitación y anulación del carbonato)

$$\% \text{ AT} = \frac{\text{Concentración HCl} \times \text{Factor de corrección} \times \text{Vol HCl} \times 2 \times \text{PM CO}_3^{2-} \times \text{Vol aforo}}{1000 \times \text{Vol alícuota} \times \text{Peso de la muestra}} \times 100$$

(Ecuación 19: Cálculo volumétrico de la alcalinidad total (AT) expresada en porcentaje)

$$V_{\text{HClT}} = \text{Vol HCl empleado por la muestra} - \text{Vol HCl empleado por el blanco}$$

$$\% \text{HCO}_3^- = \frac{\text{Concentración HCl} \times \text{Factor de corrección} \times V_{\text{HClT}} \times \text{PM HCO}_3^- \times \text{Vol aforo}}{1000 \times \text{Vol alicuota} \times \text{Peso de la muestra}} \times 100$$

(Ecuación 20: Cálculo volumétrico del contenido de bicarbonatos expresado en porcentaje)

$$\% \text{CO}_3^{2-} = \% \text{Alcalinidad Total} - \% \text{Bicarbonatos}$$

(Ecuación 21: Cálculo volumétrico del contenido de carbonatos expresado en porcentaje)

2.8.2 CLORUROS

(ASTM-C144-07-19 chloride): Para la determinación volumétrica de cloruros, también conocida como el método de Mohr, estos aniones son solubilizados en agua caliente y filtrados para evitar interferencias. A continuación, se titula empleando una solución valorada de nitrato de plata y una sal de cromato como indicador. Dicho indicador produce una solución amarilla pero cuando la precipitación del cloruro termina, el primer exceso del catión Ag^+ reacciona con el indicador dando un precipitado color café rojizo de cromato de plata que pone en evidencia el punto final de la titulación.

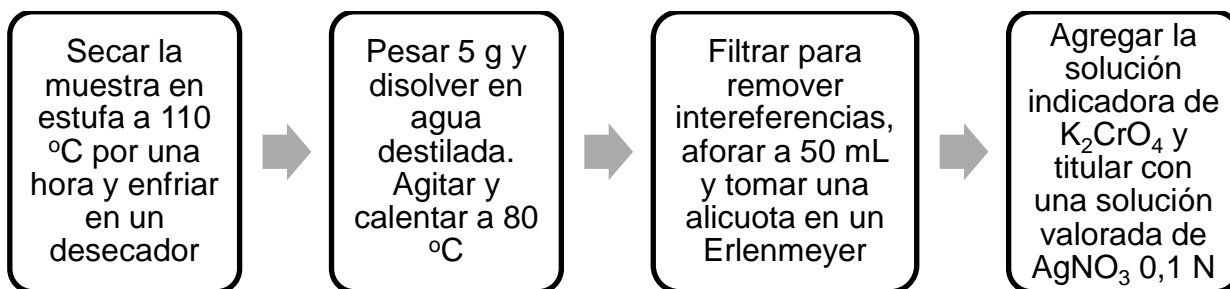
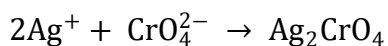
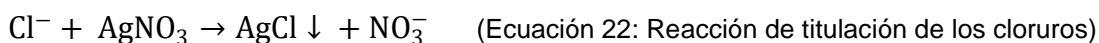


Figura 9. Esquema del procedimiento experimental para la determinación de cloruros.



(Ecuación 23: Reacción del indicador en el punto de equivalencia. Amarillo \rightarrow Café rojizo).

$$\%Cl^{-} = \frac{C. AgNO_3 \times \text{Factordecorrección} \times \text{Vol AgNO}_3 \times \text{PesoMolecular Cl}^{-} \times \text{Vol Aforo}}{1000 \times \text{Vol Alicuota} \times \text{Peso de la Muestra}} \times 100$$

(Ecuación 24: Cálculo volumétrico del contenido de cloruros expresado en porcentaje)

2.9 DETERMINACIÓN DE CATIONES MEDIANTE ESPECTROFOTOMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA

Empleando un equipo de Absorción Atómica se identificaron y cuantificaron los iones de calcio, magnesio, hierro y sodio presentes en las muestras. Para el aseguramiento de los resultados, se prepararon las muestras por triplicado y se obtuvieron desviaciones estándar y coeficientes de variación. Se empleó el método validado (adaptación de: Standard Methods, Ed. 12, 2012, 3111 B. EPA 3051) por el laboratorio CESAQ-PUCE para matrices como suelos y afines. Bajo las directrices de esta metodología, se preparó las muestras, estándares, curvas y se emplearon las condiciones instrumentales recomendadas. Toda esta sección del trabajo fue realizada bajo la supervisión y asesoría de los investigadores del CESAQ (Centro de Estudios Aplicados en Química).

Preparación de las muestras

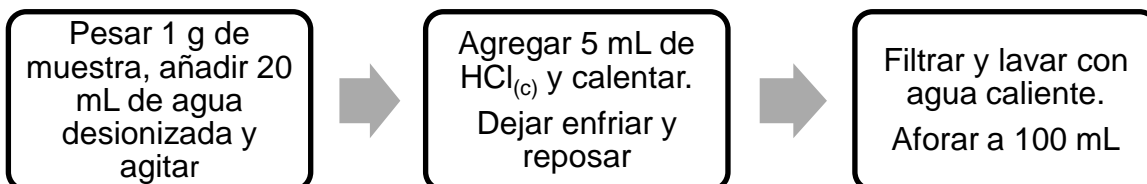


Figura 10. Esquema de la preparación de muestras para Absorción Atómica.

Preparación del óxido de lantano

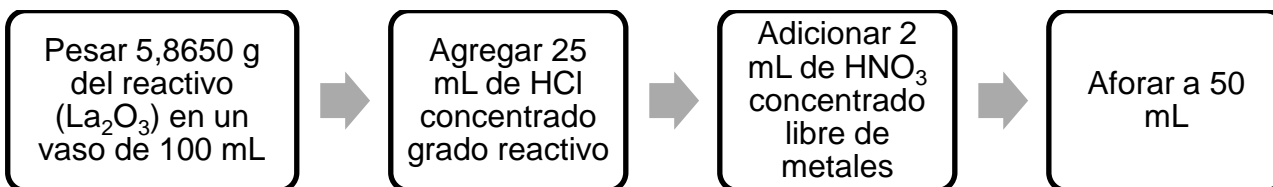


Figura 11. Esquema de la preparación del óxido de lantano para el análisis de calcio y magnesio.

Preparación del cloruro de cesio

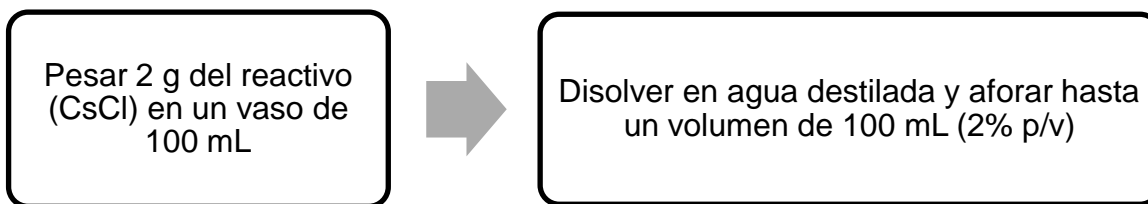


Figura 12. Esquema de la preparación del cloruro de cesio para el análisis de sodio.

- Para la determinación de hierro, se pueden diluir las muestras y medir directamente en el equipo de Absorción Atómica.
- Para la determinación de calcio y magnesio, las diluciones se deben realizar en balones de 50 mL incorporando 5 mL de la solución de óxido de lantano y 2 mL adicionales de ácido nítrico concentrado libre de metales.
- Para la determinación de sodio, las diluciones se deben realizar en balones de 50 mL incorporando 2,5 mL de la solución de cloruro de cesio y 2 mL adicionales de ácido nítrico libre de metales.
- A los estándares de calcio y magnesio también se les añadió la solución de óxido de lantano y a los estándares de sodio también se les agregó la solución de cloruro de cesio.

$$C \left(\frac{\text{mg}}{\text{g}} \right) = \frac{C \text{ leída } \left(\frac{\text{mg}}{\text{g}} \right) \times \text{factor de dilución} \times \text{vol de aforo (mL)} \times \text{peso muestra (g)}}{1000 \text{ mL} \times 1 \text{ g}}$$

(Ecuación 25: Cálculo de la concentración expresada en miligramos por gramo)

Curvas de calibración

Para preparar las curvas de calibración, se emplearon patrones 1000 µg/mL de calcio, magnesio, hierro y sodio; aplicando la siguiente fórmula:

$$C \text{ patrón } \left(\frac{\mu\text{g}}{\text{mL}} \right) \times \text{Vol a tomarse (mL)} = C \text{ estándar } \left(\frac{\mu\text{g}}{\text{mL}} \right) \times \text{Vol de aforo (mL)}$$

(Ecuación 26: Fórmula para el cálculo del volumen de patrón a tomarse en la preparación de los estándares de calibración)

Tabla 2. Concentración de los estándares para las curvas de calibración de hierro, sodio, calcio y magnesio.

Analito	Concentración del estándar (µg/mL)			
	1	2	3	4
Hierro	0,300	1,00	3,00	5,00
Sodio	0,100	0,125	0,250	0,500
Calcio	0,500	1,000	2,000	4,000
Magnesio	0,250	0,500	0,750	1,000

Tabla 3. Condiciones instrumentales de operación en los análisis por Absorción Atómica.

Metal	Hierro	Sodio	Calcio	Magnesio
Longitud de onda λ (nm)	302,60	202,58	422,67	589,00
Energía de la lámpara	80	21	66	79
Comburente / Combustible	Aire/Acetileno	Aire/Acetileno	Aire/Acetileno	Aire/Acetileno

3. RESULTADOS

A continuación, se encuentran presentes los valores obtenidos en cada parámetro analizado. Se hallan organizados de la siguiente manera: humedad, materia orgánica, aniones y cationes. Los datos de concentración, sean en porcentaje o en mg/g, representan un promedio ya que todos los ensayos fueron realizados por triplicado, en cada matriz, y en cada año. También se encuentran las desviaciones estándar entre los resultados triplicados.

En las tablas, se pueden observar los valores encontrados tras 0, 5, 10, 15 y 20 años de envejecimiento. Además, existe una separación entre cada matriz trabajada: teja, adobe y recubrimiento. Las tablas vienen acompañadas por líneas de tendencia que permiten visualizar de mejor manera lo que sucede con cada componente en función del tiempo. Y, dichas figuras también facilitan la comparación entre los tres materiales estudiados. Finalmente, se encuentran registrados los parámetros de desempeño y los análisis estadísticos.

3.1 RESULTADOS DE HUMEDAD

Tabla 4. Contenido de humedad en las muestras de los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito tras 0, 5, 10, 15 y 20 años de envejecimiento.

Teja					
Año	0	5	10	15	20
Humedad (%)	0,74	0,33	0,18	0,16	0,25
SD (%)	0,008	0,119	0,074	0,013	0,040
Adobe					
Año	0	5	10	15	20
Humedad (%)	1,50	1,09	0,88	1,13	2,66
SD (%)	0,355	0,128	0,096	0,076	0,133
Recubrimiento					
Año	0	5	10	15	20
Humedad (%)	1,47	1,10	0,93	1,45	2,22
SD (%)	0,111	0,094	0,054	0,042	0,036

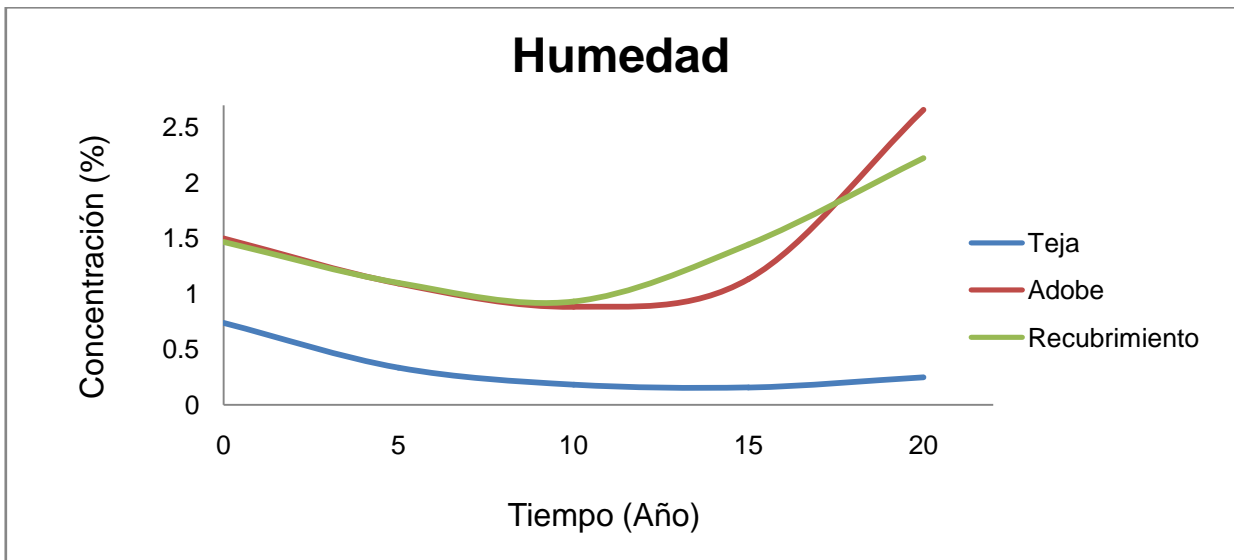


Figura 13. Líneas de tendencia sobre el contenido de humedad en los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito, en función del tiempo de envejecimiento.

3.2 RESULTADOS DE MATERIA ORGÁNICA

Tabla 5. Contenido de materia orgánica en las muestras de los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito tras 0, 5, 10, 15 y 20 años de envejecimiento.

Teja					
Año	0	5	10	15	20
Materia Orgánica (%)	1,85	0,59	0,64	0,45	0,37
SD (%)	0,029	0,107	0,055	0,058	0,015
Adobe					
Año	0	5	10	15	20
Materia Orgánica (%)	4,45	4,34	4,47	4,35	4,02
SD (%)	0,267	0,066	0,101	0,207	0,663
Recubrimiento					
Año	0	5	10	15	20
Materia Orgánica (%)	4,75	4,60	4,59	4,38	4,15
SD (%)	0,097	0,062	0,100	0,133	0,152

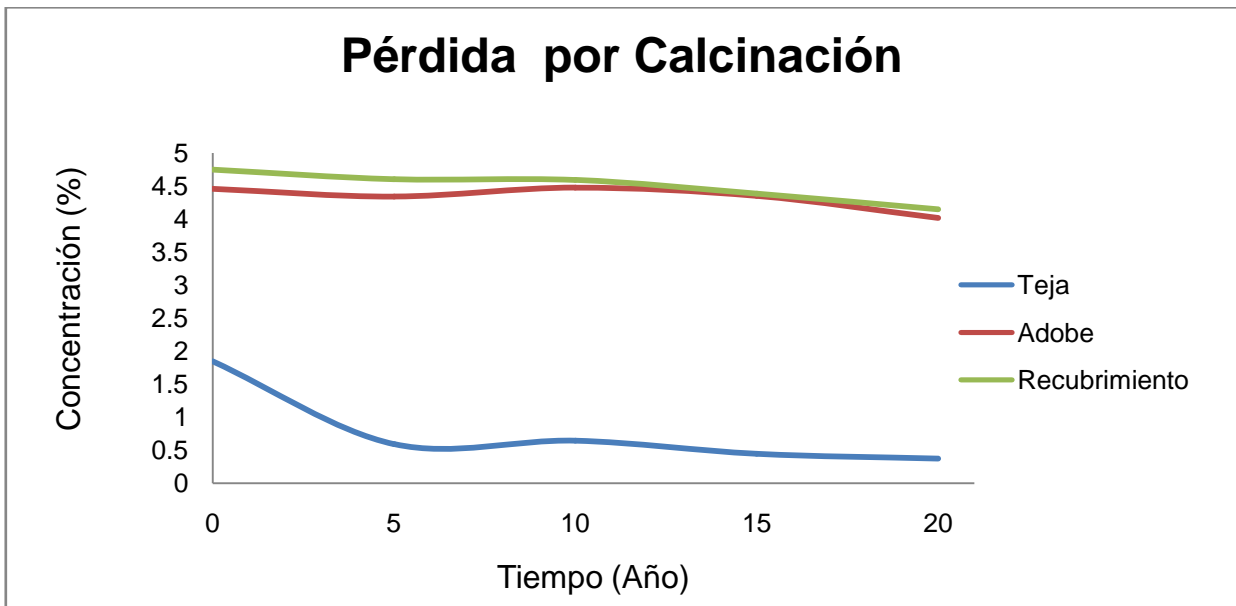


Figura 14. Líneas de tendencia sobre el contenido de materia orgánica en los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito, en función del tiempo de envejecimiento

3.3 RESULTADOS DE ANIONES

Tabla 6. Contenido de cloruros (Cl^-) en las muestras de los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito tras 0, 5, 10, 15 y 20 años de envejecimiento.

Teja					
Año	0	5	10	15	20
Cloruros (%)	0,42	0,39	0,34	0,36	0,31
SD (%)	0,058	0,036	0,027	0,046	0,017
Adobe					
Año	0	5	10	15	20
Cloruros (%)	0,24	0,24	0,12	0,15	0,12
SD (%)	0,025	0,030	0,007	0,012	0,035
Recubrimiento					
Año	0	5	10	15	20
Cloruros (%)	0,14	0,14	0,17	0,16	0,16
SD (%)	0,024	0,027	0,035	0,017	0,035

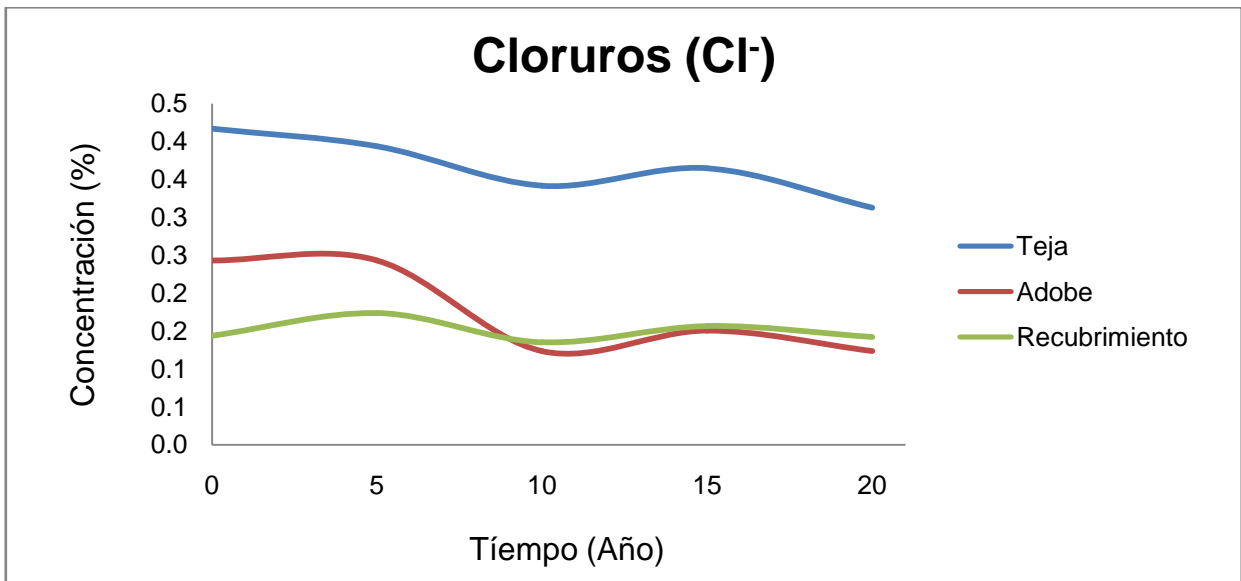


Figura 15. Líneas de tendencia sobre el contenido de cloruros (Cl^-) en los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito, en función del tiempo de envejecimiento.

Tabla 7. Contenido de carbonatos (CO_3^{2-}) en las muestras de los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito tras 0, 5, 10, 15 y 20 años de envejecimiento.

Teja					
Año	0	5	10	15	20
Carbonatos (%)	0,27	0,18	0,17	0,15	0,13
SD (%)	0,001	0,069	0,053	0,045	0,026
Adobe					
Año	0	5	10	15	20
Carbonatos (%)	0,86	0,75	0,73	0,72	0,67
SD (%)	0,236	0,069	0,050	0,026	0,026
Recubrimiento					
Año	0	5	10	15	20
Carbonatos (%)	1,22	1,16	1,14	1,13	1,10
SD (%)	0,236	0,026	0,027	0,079	0,052

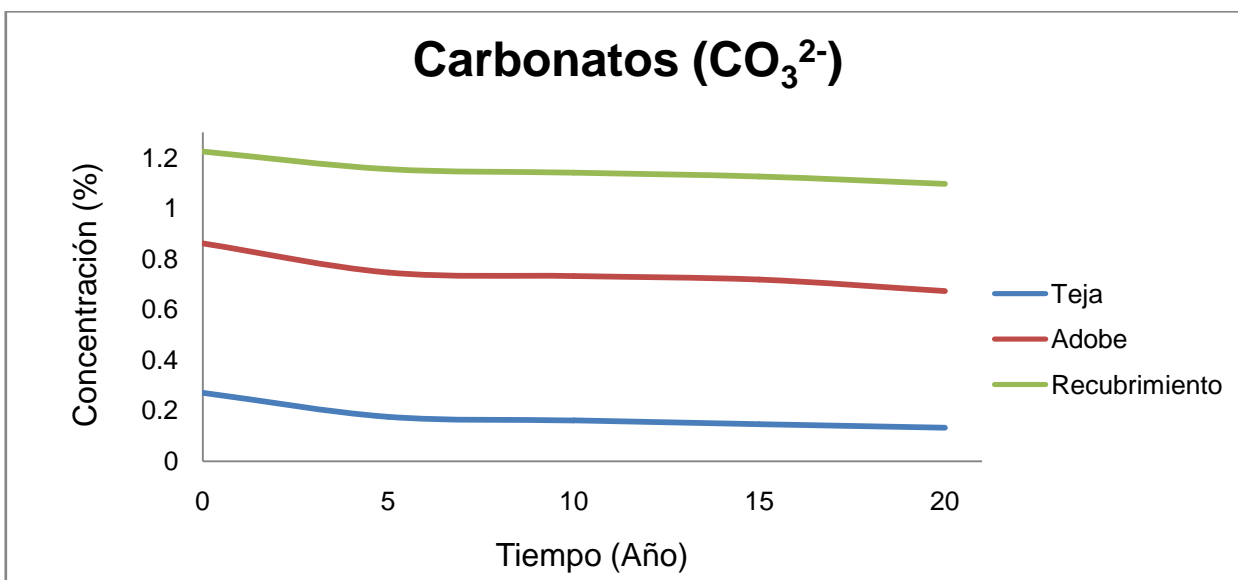


Figura 16. Líneas de tendencia sobre el contenido de carbonatos (CO_3^{2-}) en los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito, en función del tiempo de envejecimiento.

Tabla 8. Contenido de bicarbonatos (HCO_3^-) en las muestras de los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito tras 0, 5, 10, 15 y 20 años de envejecimiento.

Teja					
Año	0	5	10	15	20
Bicarbonatos (%)	0,96	1,29	1,32	1,35	1,43
SD (%)	0,0004	0,104	0,052	0,0003	0,089
Adobe					
Año	0	5	10	15	20
Bicarbonatos (%)	0,64	1,05	1,17	1,20	1,26
SD (%)	0,553	0,052	0,089	0,052	0,179
Recubrimiento					
Año	0	5	10	15	20
Bicarbonatos (%)	0,96	1,34	1,38	1,41	1,49
SD (%)	0,0001	0,090	0,052	0,053	0,051

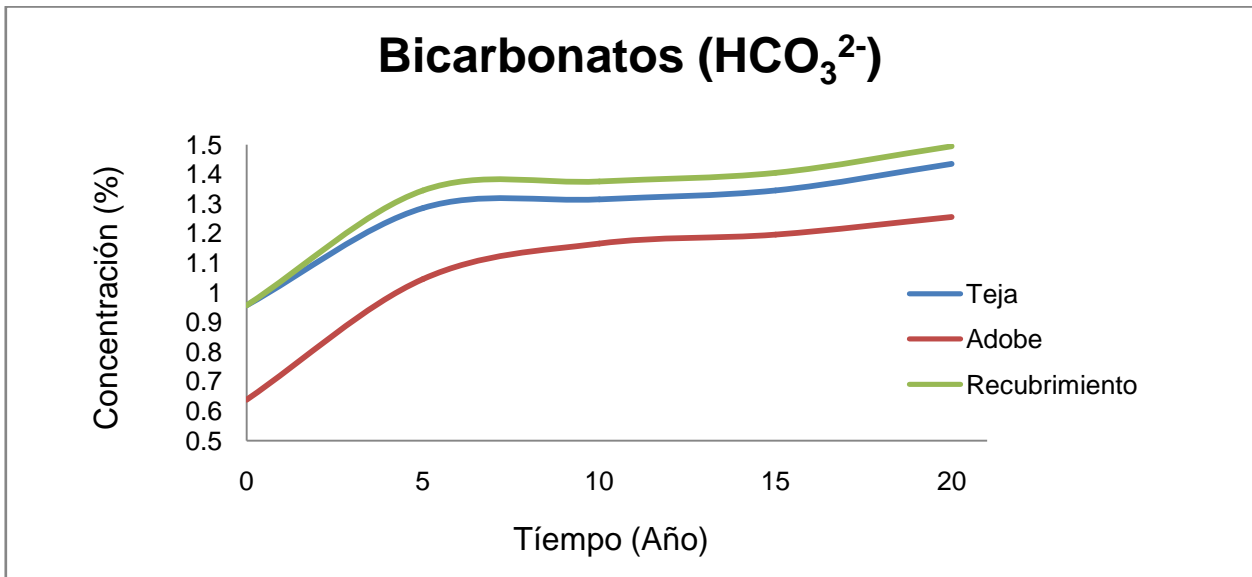


Figura 17. Líneas de tendencia sobre el contenido de bicarbonatos (HCO_3^-) en los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito, en función del tiempo de envejecimiento.

Tabla 9. Contenido de sulfatos (SO_4^{2-}) en las muestras de los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito tras 0, 5, 10, 15 y 20 años de envejecimiento.

Teja					
Año	0	5	10	15	20
Sulfatos (%)	0,16	0,20	0,45	0,63	0,71
SD (%)	0,049	0,041	0,011	0,033	0,010
Adobe					
Año	0	5	10	15	20
Sulfatos (%)	0,17	0,19	0,37	0,41	0,42
SD (%)	0,077	0,011	0,021	0,006	0,011
Recubrimiento					
Año	0	5	10	15	20
Sulfatos (%)	0,12	0,16	0,30	0,32	0,39
SD (%)	0,061	0,027	0,010	0,006	0,010

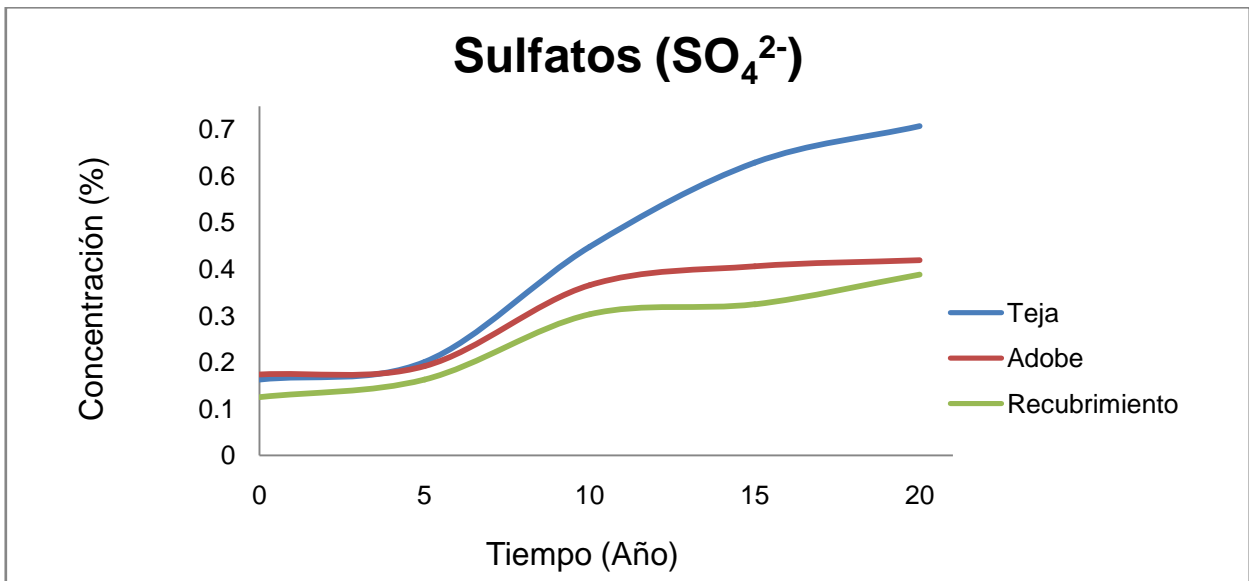


Figura 18. Líneas de tendencia sobre el contenido de sulfatos (SO_4^{2-}) en los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito, en función del tiempo de envejecimiento.

Tabla 10. Contenido de silicatos (SiO_4^{4-} , $\text{Si}_2\text{O}_7^{6-}$) en las muestras de los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito tras 0, 5, 10, 15 y 20 años de envejecimiento.

Teja					
Año	0	5	10	15	20
Silicatos (%)	96,06	96,09	96,49	96,46	96,40
SD (%)	0,159	0,070	0,030	0,098	0,091
Adobe					
Año	0	5	10	15	20
Silicatos (%)	87,25	87,95	88,13	87,86	85,28
SD (%)	0,970	0,365	0,036	0,029	0,047
Recubrimiento					
Año	0	5	10	15	20
Silicatos (%)	86,24	86,91	87,12	86,75	85,12
SD (%)	0,284	0,312	0,072	0,196	0,008

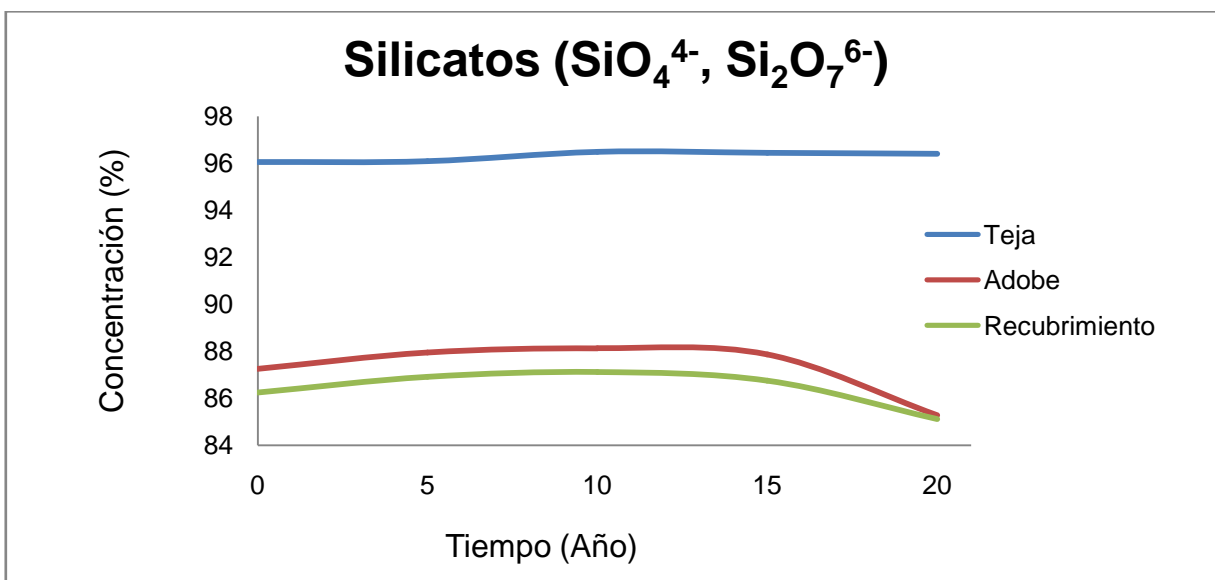


Figura 19. Líneas de tendencia sobre el contenido de silicatos (SiO_4^{4-} , $\text{Si}_2\text{O}_7^{6-}$) en los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito, en función del tiempo de envejecimiento.

3.4 RESULTADOS DE ÓXIDOS

Tabla 11. Contenido de óxido de hierro (Fe_2O_3) en las muestras de los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito tras 0, 5, 10, 15 y 20 años de envejecimiento.

Teja					
Año	0	5	10	15	20
Óxido de hierro (%)	4,33	1,89	1,89	1,87	1,82
SD (%)	0,023	0,207	0,080	0,011	0,040
Adobe					
Año	0	5	10	15	20
Óxido de hierro (%)	6,90	5,39	4,43	4,42	4,27
SD (%)	0,040	0,758	0,159	0,060	0,041
Recubrimiento					
Año	0	5	10	15	20
Óxido de hierro (%)	9,19	5,15	4,11	4,07	4,05
SD (%)	2,000	0,470	0,051	0,029	0,133

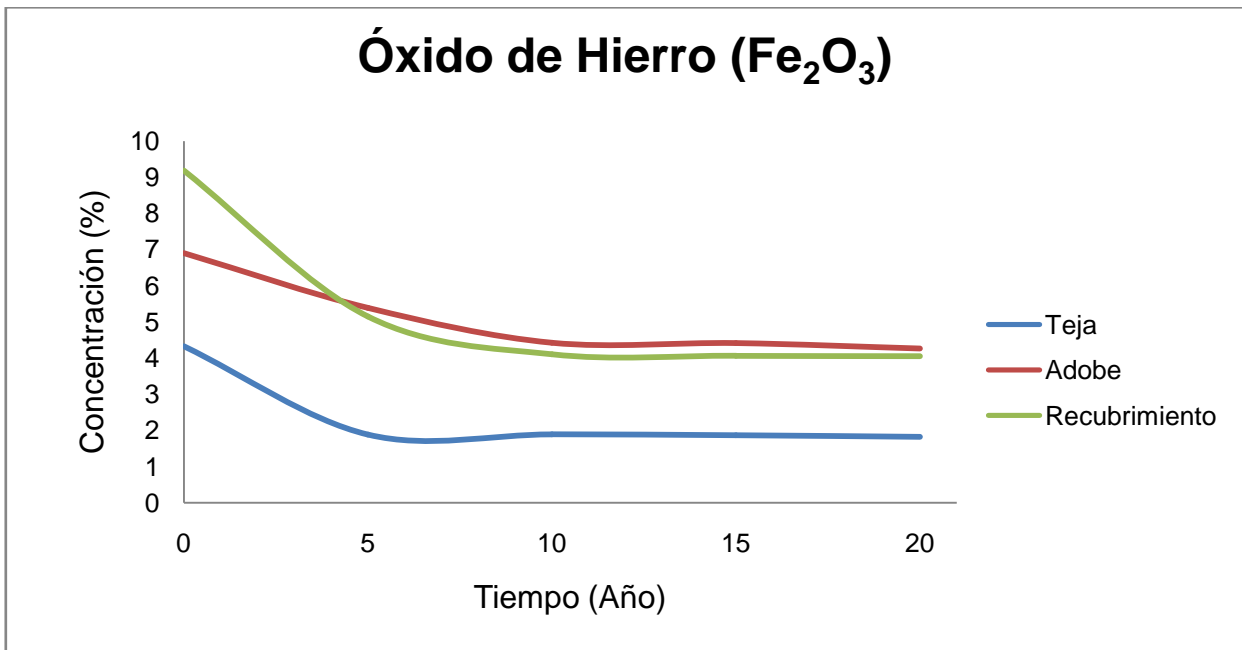


Figura 20. Líneas de tendencia sobre el contenido de óxido de hierro (Fe_2O_3) en los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito, en función del tiempo de envejecimiento.

Tabla 12. Contenido de óxido de calcio (CaO) en las muestras de los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito tras 0, 5, 10, 15 y 20 años de envejecimiento.

Teja					
Año	0	5	10	15	20
Óxido de Calcio (%)	0,61	0,35	0,32	0,28	0,26
SD (%)	0,012	0,042	0,023	0,020	0,020
Adobe					
Año	0	5	10	15	20
Óxido de Calcio (%)	0,46	0,27	0,28	0,25	0,28
SD (%)	0,052	0,031	0,012	0,030	0,173
Recubrimiento					
Año	0	5	10	15	20
Óxido de Calcio (%)	1,74	1,46	1,39	1,02	0,98
SD (%)	0,040	0,086	0,012	0,042	0,030

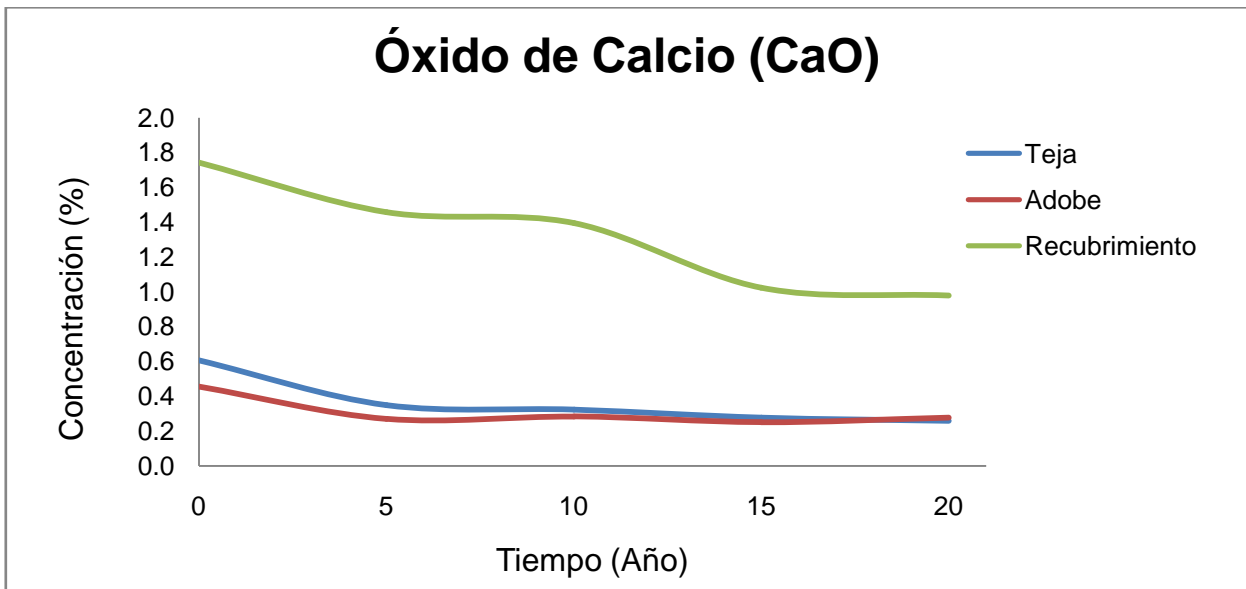


Figura 21. Líneas de tendencia sobre el contenido de óxido de calcio (CaO) en los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito, en función del tiempo de envejecimiento.

Tabla 13. Contenido de óxido de magnesio (MgO) en las muestras de los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito tras 0, 5, 10, 15 y 20 años de envejecimiento.

Teja					
Año	0	5	10	15	20
Óxido de Magnesio (%)	0,15	0,2	0,23	0,18	0,16
SD (%)	0,007	0,137	0,022	0,011	0,007
Adobe					
Año	0	5	10	15	20
Óxido de Magnesio (%)	0,36	0,74	0,41	0,44	0,37
SD (%)	0,133	0,124	0,081	0,018	0,026
Recubrimiento					
Año	0	5	10	15	20
Óxido de Magnesio (%)	0,69	0,76	0,72	0,49	0,64
SD (%)	0,015	0,082	0,025	0,014	0,012

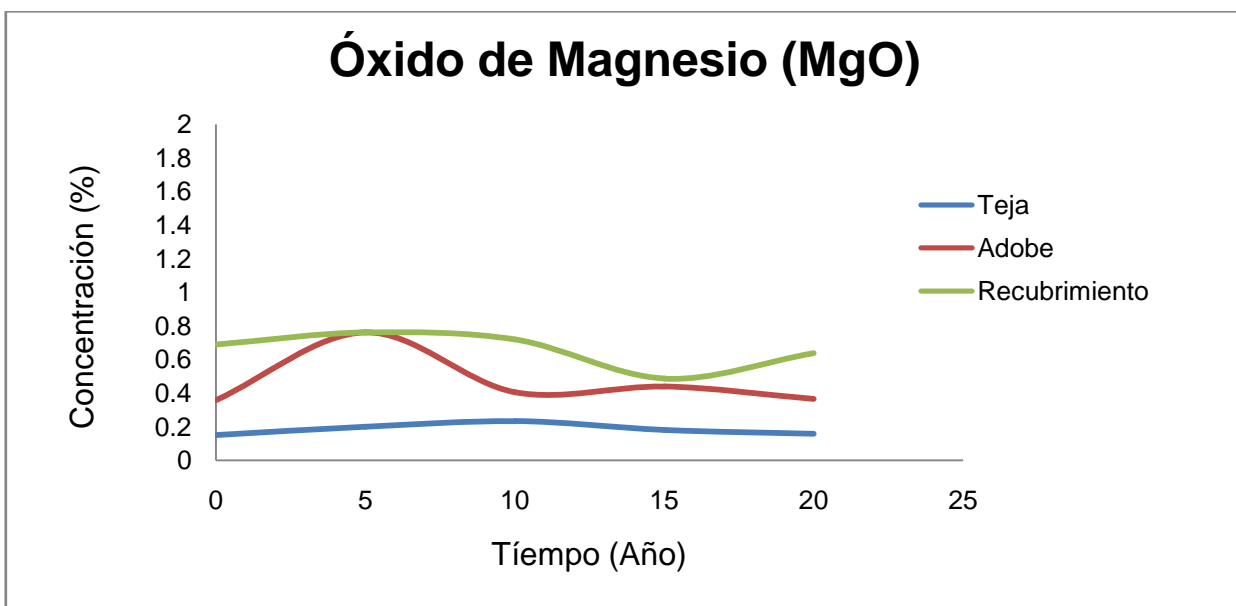


Figura 22. Líneas de tendencia sobre el contenido de óxido de magnesio (MgO) en los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito, en función del tiempo de envejecimiento.

3.5 RESULTADOS DE CATIONES

Los análisis de hierro, sodio, calcio y magnesio fueron realizados mediante Espectrofotometría de Absorción Atómica. Por este motivo, también se han incluido las curvas de calibración en esta sección.

Tabla 14. Curvas de Calibración para la determinación de: Hierro, Sodio, Calcio y Magnesio por Absorción Atómica.

Hierro		Sodio		Calcio		Magnesio	
Estándar (µg/mL)	Absorbancia (A)	Estándar (µg/mL)	Absorbancia (A)	Estándar (µg/mL)	Absorbancia (A)	Estándar (µg/mL)	Absorbancia (A)
0,250	0,004	0,100	0,086	0,500	0,086	0,250	0,011
1,000	0,015	0,125	0,099	1,000	0,099	0,500	0,043
3,000	0,042	0,250	0,194	2,000	0,194	0,750	0,069
5,000	0,072	0,500	0,355	4,000	0,355	1,000	0,121

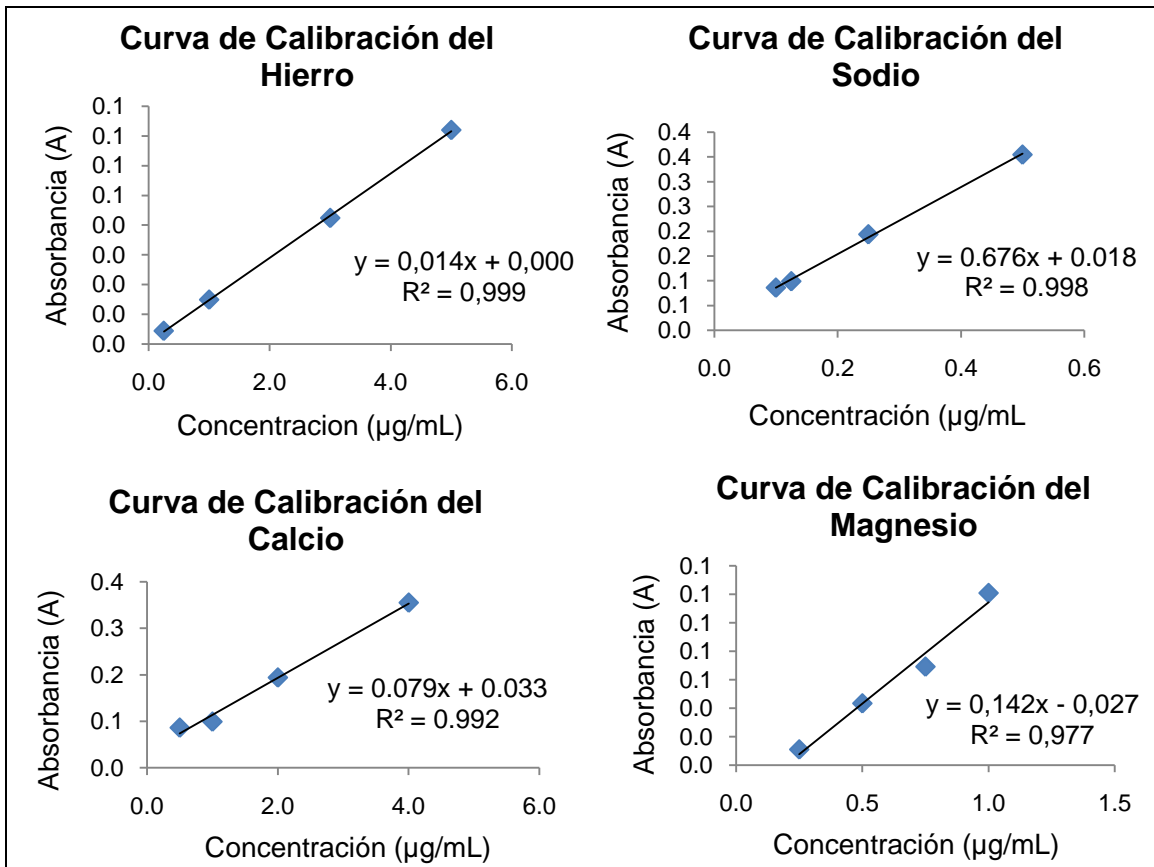


Figura 23. Curvas de calibración para la determinación de Hierro, Sodio, Calcio y Magnesio por Absorción Atómica.

Tabla 15. Concentración de hierro (Fe^{+2} , Fe^{+3}) en las muestras de los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito tras 0, 5, 10, 15 y 20 años de envejecimiento.

Teja					
Año	0	5	10	15	20
Hierro (mg/g)	17,67	6,44	6,56	6,51	6,38
SD (mg/g)	0,384	0,047	0,351	0,044	0,208
Adobe					
Año	0	5	10	15	20
Hierro (mg/g)	27,20	20,13	17,85	17,68	17,55
SD (mg/g)	0,120	0,087	0,397	0,035	1,567
Recubrimiento					
Año	0	5	10	15	20
Hierro (mg/g)	34,23	19,58	17,78	17,75	17,26
SD (mg/g)	0,309	0,626	0,192	0,066	0,146

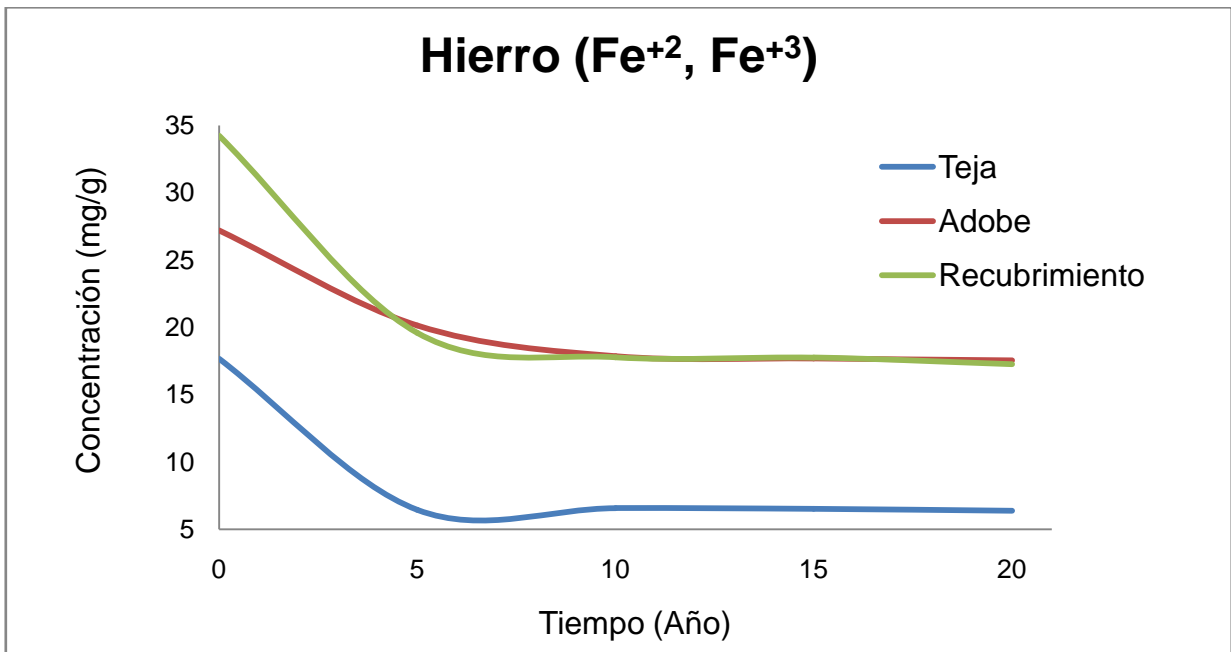


Figura 24. Líneas de tendencia sobre la concentración de hierro (Fe^{+2} , Fe^{+3}) en los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito en función del tiempo de envejecimiento.

Tabla 16. Concentración de sodio (Na^+) en las muestras de los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito tras 0, 5, 10, 15 y 20 años de envejecimiento.

Teja					
Año	0	5	10	15	20
Sodio (mg/g)	2,51	2,32	2,03	1,98	1,94
SD (mg/g)	0,010	0,221	0,035	0,038	0,052
Adobe					
Año	0	5	10	15	20
Sodio (mg/g)	2,44	2,34	1,16	1,06	1,03
SD (mg/g)	0,068	0,028	0,060	0,006	0,019
Recubrimiento					
Año	0	5	10	15	20
Sodio (mg/g)	2,32	2,15	1,50	1,47	1,42
SD (mg/g)	0,043	0,040	0,028	0,033	0,052

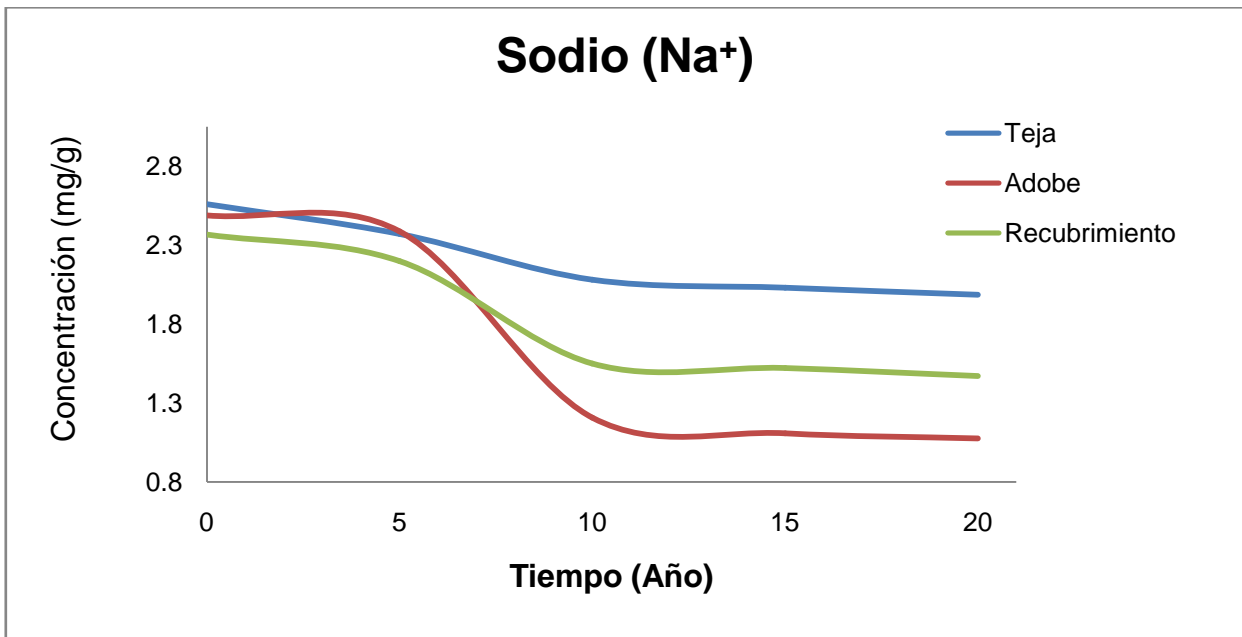


Figura 25. Líneas de tendencia sobre la concentración de sodio (Na^+) en los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito en función del tiempo de envejecimiento.

Tabla 17. Concentración de calcio (Ca^{2+}) en las muestras de los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito tras 0, 5, 10, 15 y 20 años de envejecimiento.

Teja					
Año	0	5	10	15	20
Calcio (mg/g)	4,35	2,55	2,45	2,09	2,23
SD (mg/g)	0,003	0,025	0,007	0,011	0,015
Adobe					
Año	0	5	10	15	20
Calcio (mg/g)	3,66	2,21	2,51	2,31	2,38
SD (mg/g)	0,035	0,174	0,029	0,018	0,025
Recubrimiento					
Año	0	5	10	15	20
Calcio (mg/g)	13,33	10,13	9,45	7,64	7,41
SD (mg/g)	0,805	0,739	0,062	0,300	0,070

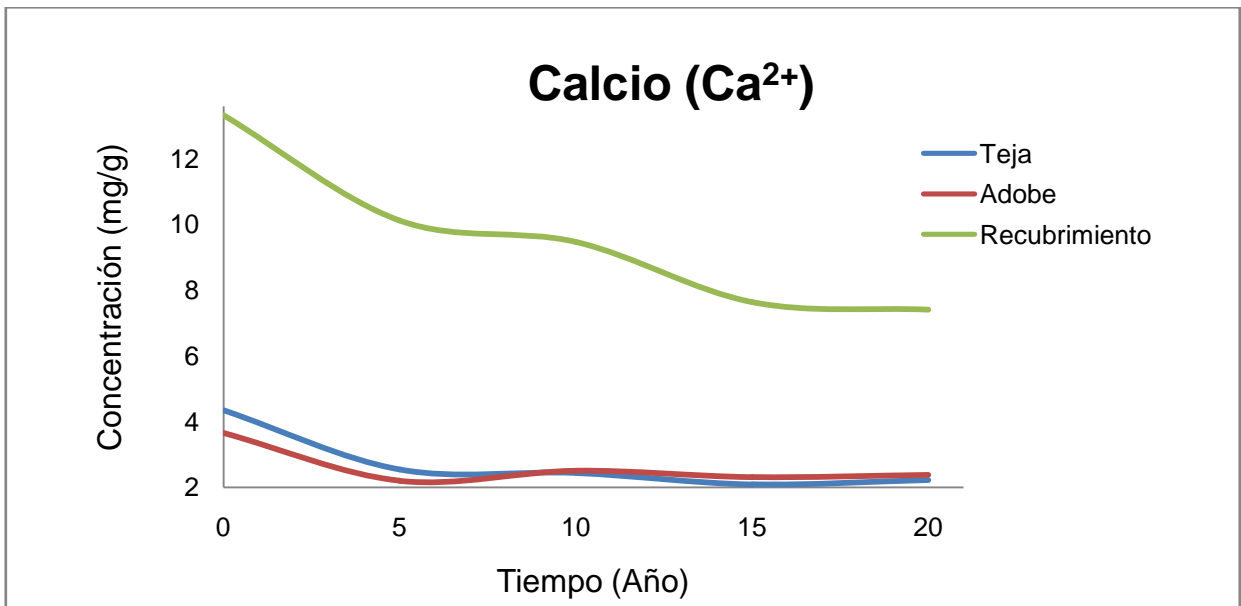


Figura 26. Líneas de tendencia sobre la concentración de calcio (Ca^{2+}) en los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito en función del tiempo de envejecimiento.

Tabla 18. Concentración de magnesio (Mg^{2+}) en las muestras de los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito tras 0, 5, 10, 15 y 20 años de envejecimiento.

Teja					
Año	0	5	10	15	20
Magnesio (mg/g)	0,86	1,48	1,75	1,05	0,98
SD (mg/g)	0,111	0,332	0,255	0,051	0,028
Adobe					
Año	0	5	10	15	20
Magnesio (mg/g)	2,27	1,13	2,69	2,86	1,28
SD (mg/g)	0,371	0,318	0,758	0,250	0,098
Recubrimiento					
Año	0	5	10	15	20
Magnesio (mg/g)	4,37	4,80	4,11	2,00	3,98
SD (mg/g)	3,879	0,361	0,643	1,375	0,928

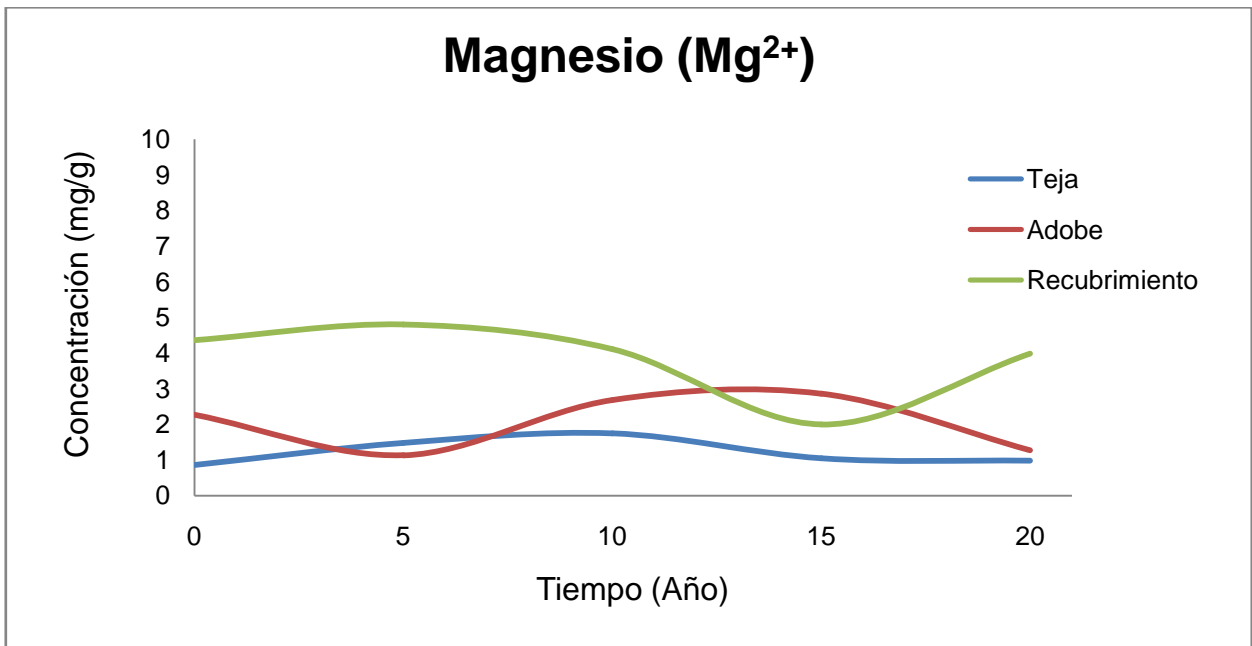


Figura 27. Líneas de tendencia sobre la concentración de magnesio (Mg^{2+}) en los materiales de construcción del Centro Histórico de Quito en función del tiempo de envejecimiento.

3.6 PARÁMETROS DE DESEMPEÑO DE LOS MÉTODOS ANALÍTICOS

Dado que todos los análisis fueron realizados por triplicado para cada año y para cada matriz, fue posible determinar 2 parámetros de desempeño que expresan la precisión: desviación estándar y coeficiente de variación. La precisión describe la reproducibilidad de los resultados y puede definirse como la concordancia entre 2 o más valores numéricos o mediciones (Fernandez, 2001). En ciertos casos, fue posible determinar la exactitud, es decir, la proximidad de las medidas a su valor real (Fernandez, 2001). Esto, en función del error relativo. Para estos casos, se analizaron muestras de control donde el analito tenía una concentración conocida.

Tabla 19. Parámetros de desempeño de los métodos analíticos empleados en cada material: teja, ladrillo de adobe y recubrimiento.

Componente	Parámetros de desempeño								
	Desviación Estándar			Coeficiente de Variación (%)			Error Relativo (%)		
Matriz	Teja	Adobe	Rec	Teja	Adobe	Rec	Teja	Adobe	Rec
Humedad (%)	0,05	0,16	0,07	20,3	11,6	5,3	-	-	-
Materia orgánica (%)	0,05	0,26	0,11	9,1	6,2	2,5	-	-	-
Cloruros (%)	0,04	0,02	0,03	9,8	12,9	16,7	2,80	2,80	2,80
Carbonatos (%)	0,04	0,08	0,08	24,6	10,1	7,1	-	-	-
Bicarbonatos (%)	0,05	0,19	0,05	3,7	23,6	3,5	-	-	-
Sulfatos	0,03	0,03	0,02	12,0	12,0	14,6	1,35	1,35	1,35
Silicatos (%)	0,09	0,29	0,17	0,1	0,3	0,2	-	-	-
Óxido de hierro (%)	0,07	0,21	0,54	4,6	4,1	7,2	3,85	3,85	3,85
Óxido de calcio (%)	0,02	0,06	0,04	7,1	20,2	2,7	6,84	6,84	6,84
Óxido de magnesio (%)	0,04	0,08	0,03	18,6	17,0	4,3	9,26	9,26	9,26
Hierro (mg/g)	0,21	0,44	0,27	2,4	2,4	1,3	0,51	0,51	0,51
Sodio (mg/g)	0,07	0,04	0,04	3,2	2,3	2,3	0,77	0,77	0,77
Calcio (mg/g)	0,01	0,06	0,40	0,51	2,4	3,8	0,94	0,94	0,94
Magnesio (mg/g)	0,15	0,36	1,44	11,5	17,8	40,8	4,47	4,47	4,47

3.7 RESULTADOS ESTADÍSTICOS

Se decidió emplear la prueba de hipótesis ANOVA como una herramienta estadística para determinar si existen diferencias significativas entre los promedios de concentración de cada componente en cada material y en los diferentes tiempos de envejecimiento. La hipótesis nula establece que todas las medias de la población son iguales mientras que la hipótesis alternativa establece que al menos una es significativamente distinta. La variación puede estimarse bajo 2 aspectos: dentro de la muestra y entre las muestras (Echeverria, 2017).

Tabla 20. Fórmulas matemáticas empleadas para desarrollar las pruebas de hipótesis ANOVA (Análisis de varianza de un factor)

Fórmula	Definición
$SCT = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ij} - \bar{x})^2$ Grados de libertad (g.l.) = $n - 1$	Variación de los datos respecto a la media total, Suma de Cuadrados Total
$SCTR = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (\bar{x}_j - \bar{x})^2$ Grados de libertad (g.l.) = $k - 1$	Variación entre medias de diferentes tratamientos, Suma del Cuadrado de los Tratamientos.
$SCE = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ij} - \bar{x}_j)^2$ Grados de libertad (g.l.) = $n - k$	Variación aleatoria de los datos dentro de cada tratamiento respecto a su media, Suma del Cuadrado de Error
$SCE = SCT - SCTR$	Relación entre las Sumas de Cuadrados
$g.l. SCT = g.l. SCTR + g.l. SCE$	Relación entre los Grados de Libertad
$CMT = \frac{SCT}{N - 1}$	Cuadrado Medio Total
$CMTR = \frac{SCTR}{k - 1}$	Cuadrado Medio de los Tratamientos
$CME = \frac{SCE}{n - k}$	Cuadrado Medio del Error
$F = \frac{CMTR}{CME}$	F calculado, el valor crítico se obtiene de la distribución de Fischer

Para efectuar los cálculos, se empleó el programa *Microsoft Excel 2007* y para realizar las pruebas de hipótesis se tomó en cuenta lo siguiente:

- Hipótesis nula: El promedio de concentración de determinado componente no varía significativamente con el paso del tiempo.
- Hipótesis alternativa: El promedio de concentración de determinado componente se ve afectado por el paso del tiempo.
- Cuando el estadístico F crítico es mayor que el estadístico F calculado, se acepta la hipótesis nula.

Tabla 21. Análisis de varianzas ANOVA para determinar la existencia o ausencia de cambios significativos en la concentración de los componentes presentes en la Teja en función de su tiempo de envejecimiento.

Componente	Nivel de significancia	Fcrítico	Fcalculado	Diferencia Significativa
Humedad	5%	3,48	39,28	Sí
Materia Orgánica	5%	3,48	291,07	Sí
Cloruros	5%	3,48	3,25	No
Carbonatos	5%	3,48	4,31	Sí
Bicarbonatos	5%	3,48	23,28	Sí
Sulfatos	5%	3,48	166,53	Sí
Silicatos	5%	3,48	13,51	Sí
Óxido de hierro	5%	3,48	353,27	Sí
Óxido de calcio	5%	3,48	94,45	Sí
Óxido de magnesio	5%	3,48	0,89	No
Hierro	5%	3,48	1183,25	Sí
Sodio	5%	3,48	17,11	Sí
Calcio	5%	3,48	12536,61	Sí
Magnesio	5%	3,48	11,08	Sí

Tabla 22. Análisis de varianzas ANOVA para determinar la existencia o ausencia de cambios significativos en la concentración de los componentes presentes en el Ladrillo del Adobe en función de su tiempo de envejecimiento.

Componente	Nivel de significancia	Fcrítico	Fcalculado	Diferencia Significativa
Humedad	5%	3,48	43,14	Sí
Materia Orgánica	5%	3,48	0,98	No
Cloruros	5%	3,48	23,68	Sí
Carbonatos	5%	3,48	1,16	No
Bicarbonatos	5%	3,48	2,63	No
Sulfatos	5%	3,48	32,24	Sí
Silicatos	5%	3,48	19,20	Sí
Óxido de hierro	5%	3,48	7,90	Sí
Óxido de calcio	5%	3,48	3,03	No
Óxido de magnesio	5%	3,48	9,44	Sí
Hierro	5%	3,48	103,21	Sí
Sodio	5%	3,48	821,77	Sí
Calcio	5%	3,48	159,60	Sí
Magnesio	5%	3,48	10,78	Sí

Tabla 23. Análisis de varianzas ANOVA para determinar la existencia o ausencia de cambios significativos en la concentración de los componentes presentes en el Recubrimiento en función de su tiempo de envejecimiento.

Componente	Nivel de significancia	Fcrítico	Fcalculado	Diferencia Significativa
Humedad	5%	3,48	137,12	Sí
Materia Orgánica	5%	3,48	12,82	Sí
Cloruros	5%	3,48	0,81	No
Carbonatos	5%	3,48	0,51	No
Bicarbonatos	5%	3,48	39,76	Sí
Sulfatos	5%	3,48	40,10	Sí
Silicatos	5%	3,48	43,48	Sí
Óxido de hierro	5%	3,48	17,36	Sí
Óxido de calcio	5%	3,48	131,84	Sí
Óxido de magnesio	5%	3,48	21,58	Sí
Hierro	5%	3,48	1442,26	Sí
Sodio	5%	3,48	338,66	Sí
Calcio	5%	3,48	66,18	Sí
Magnesio	5%	3,48	0,96	No

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para comprender los fenómenos por los cuales atravesó cada material durante el envejecimiento, es importante analizar uno por uno las tendencias de variación en cada componente.

4.1 HUMEDAD

Uno de los parámetros más importantes en el comportamiento de los materiales de construcción es la humedad, cuyos resultados se encuentran expresados en la Tabla 4. Dentro de la cámara de control climático fluía constantemente agua en estado de vapor gracias a un humidificador ultrasónico. Por este motivo, se esperaba un incremento en el porcentaje de agua dentro de las muestras. Sin embargo, la tendencia en la Figura 13 demuestra que en los tres materiales ocurrió primero un decrecimiento seguido de un aumento en este porcentaje. Lo ocurrido puede ser explicado de la siguiente manera; al inicio, en los primeros 10 años, la elevada temperatura y radiación solar provocaron la evaporación del agua adsorbida y ocluida dentro de los materiales. Pero dicha pérdida de agua debe haber resultado en el crecimiento de poros y rupturas (Joisel, 1981). Cuanto más poroso sea un material, mayor cantidad de humedad puede contener (Biseniece, 2017). Por este motivo, en los próximos años, el agua se reintroduce en las muestras con una tendencia creciente. Y se puede predecir que este crecimiento va a continuar dado que cualquier material hidrofílico poroso almacena agua por succión capilar hasta alcanzar un nivel de saturación (Straube, 2006). Dicho impacto fue menor en el caso de la teja ya que por ser un material tostado presenta una mayor resistencia ante las condiciones climáticas del simulador. En Quito, la mayor parte de la humedad atmosférica proviene de las lluvias. Por esta razón, se debe tener cuidado con el adobe ya que en contacto con el agua puede revertir a su forma original lodosa y colapsar. Cabe mencionar otras posibles consecuencias a futuro como por ejemplo: el biodeterioro por crecimiento de moho, la oxidación, la disolución de algunos componentes y la pérdida de firmeza. En fin, evitar el acceso de humedad en las

construcciones antiguas es la mejor manera de prevenir su deterioro por envejecimiento (Íñigo, 2000).

La humedad fue determinada mediante el método gravimétrico tradicional de secado en estufa. La precisión varía debido a la tara de cápsulas, volatilización de otros componentes, falta de homogeneidad en las muestras y tiempo de conservación de las mismas antes del pesaje. Es por esto que se observan coeficientes de variación elevados en la Tabla 19, siendo de 20,34% para la teja y de 11,57% para el adobe. De acuerdo con el análisis estadístico, expresado en las Tablas 21, 22 y 23, sí hubo diferencia significativa en el porcentaje de humedad de los tres materiales de construcción con el pasar del tiempo.

4.2 MATERIA ORGÁNICA

A continuación, se evalúa las tendencias que presentaron los materiales respecto a su contenido de materia orgánica. Como se observa en la Tabla 5, los porcentajes de materia orgánica presentes en el adobe y en el recubrimiento (entre 4,02% y 4,75%) son bastante superiores al de las tejas (entre 0,37% y 1,85%), ya que sus materiales de partida provienen de suelos ricos en residuos de plantas, animales y hongos. Además, intencionalmente se solía agregar pajas para aumentar la resistencia a la tensión, y estiércol para mejorar las condiciones del suelo (Cardona, 2014). En el caso de las tejas, todas estas estructuras se descomponen en el proceso de tostado. Las tres tendencias, expresadas en la Figura 14 presentan una variación que concluye en la disminución de materia orgánica. Esto indica que dicho componente, bajo las condiciones climáticas establecidas sufre degradación, es decir, descomposición en CO₂ (dióxido de carbono) y H₂O (agua). Investigadores han descubierto que la radiación ultravioleta puede incrementar la degradación de la materia orgánica. Esto se conoce como foto-degradación y se debe a que la radiación solar en presencia de oxígeno atmosférico crea un medio oxidante bastante poderoso (Oro, 1979). En este sentido, cabe recordar que los niveles de radiación UV en la ciudad de Quito son bastante elevados en comparación con la media global. Se puede apreciar que la tendencia de disminución es más pronunciada en el caso de las tejas. Esto

puede deberse a que una de las finalidades del material como tal es absorber radiación solar para proteger a las edificaciones. Así, al absorber una mayor cantidad de radiación, de existir materia orgánica aumenta su degradación. La humedad es otro factor que influye en la descomposición, ya que propicia condiciones ideales para que los microorganismos se propaguen alimentándose de los residuos orgánicos (Arguello, 1991). Sin embargo, al ser Quito una zona templada y no tropical, la tasa de biodegradación no es tan alta como se ve reflejado en los resultados obtenidos. Principalmente en el adobe, cuyo análisis de varianzas estimó que no hay diferencias significativas en el porcentaje de materia orgánica con el pasar de los años (Tabla 22).

Para estas determinaciones, se empleó un análisis termo-gravimétrico indirecto. Y dado que los coeficientes de variación arrojaron valores por debajo del 10%, se puede concluir que la precisión es adecuada (Tabla 19). Este método se ve sujeto a error por la volatilización de otros componentes en las altas temperaturas. Sin embargo, las interferencias por humedad sí pudieron ser reducidas mediante el pre-secado de las muestras en estufa.

4.3 CLORUROS

Los siguientes componentes analizados fueron los aniones, comenzando por el ión cloruro (Cl^-). El porcentaje de cloruros en los tres materiales fue inferior al 0,5 % durante todo el proceso de envejecimiento (Tabla 6). Dicho anión está asociado a la intemperie salina del medio por lo que se encuentra con mayor abundancia en los materiales de las construcciones en zonas costeras, lo cual no es el caso de la ciudad de Quito (İpekog̃lu, 2007). En la Figura 15, se observa que la concentración de cloruros oscila dentro de un rango con el paso del tiempo en los tres materiales de construcción. Dada la afinidad de estos aniones por el agua, su contenido puede variar en función de la humedad. Esto coincide con la disminución pronunciada al año 10, que fue el año donde se observó también una mayor caída de humedad. Al final de la línea de tendencia el anión vuelve a disminuir. Esto se debe a que la humedad ambiental de la cámara; fuera del material, también es lo suficientemente elevada como para extraerlo y

suspenderlo en microgotas (Pancorbo, 2011). Como las edificaciones del centro histórico de Quito se encuentran alejados de la costa, no hay que preocuparse por los inconvenientes que producen los iones cloruro como la corrosión u oxidación. Por ese mismo motivo, en dos de los materiales (Tejas y Recubrimientos) no se evidenció diferencias significativas a lo largo del envejecimiento (Tablas 21 y 23).

Los cloruros fueron determinados mediante el método de Mohr. Se obtuvieron coeficientes de variación entre 9,82% y 16,71% en la Tabla 19. La exactitud se determinó mediante un estándar de cloruro de sodio presentando un error relativo de 2,80%. Lo cual indica que la afección en los resultados puede haber sido causada por efectos de la matriz.

4.4 CARBONATOS Y BICARBONATOS

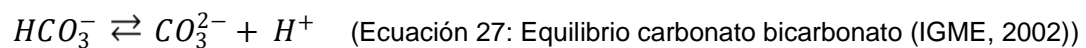
Otros aniones de interés fueron los carbonatos y bicarbonatos (CO_3^{2-} y HCO_3^-). Es importante analizarlos en conjunto ya que ambos se encuentran en equilibrio. Esto quiere que decir que la presencia de uno influye en el otro y viceversa. A pesar de que sus porcentajes no fueron tan elevados en comparación con los demás componentes (<1,5% → Tablas 7 y 8), su comportamiento y el desplazamiento del equilibrio puede proporcionar información significativa sobre lo que ocurrió en el envejecimiento. La presencia de carbonatos y bicarbonatos en el recubrimiento fue mayor que en los demás materiales de construcción. Esto se debe a su estructura que por encima de su fina capa de adobe se encuentra recubierta por pintura blanca. En las pinturas de color blanco suelen agregarse pequeñas cantidades de albayalde (carbonato básico de plomo), un pigmento mineral (Laubsch, 1979). Se considera importante en un futuro estudio retirar por completo la pintura del recubrimiento para analizar ambas superficies por separado y corregir el aporte de carbonatos y bicarbonatos que otorga el albayalde de la pintura.

Para estas determinaciones, se empleó un método cuantitativo desarrollado por Vogel que consiste en valorar la alcalinidad total y la cantidad de bicarbonatos por separado. El contenido de carbonatos se obtiene por la diferencia entre ambos. El

problema de esta metodología es que asume que toda la alcalinidad de la muestra proviene de dichas especies, lo cual puede no ser cierto (También puede provenir de los hidróxidos de sodio, calcio y magnesio). Por eso, la exactitud se vio afectada, así como también los parámetros de precisión de la teja y el adobe (Tabla 19).

Al analizar las líneas de tendencia para ambos aniones en las Figuras 16 y 17, se observa que tuvieron comportamientos opuestos. Los carbonatos parecen disminuir significativamente en los primeros 5 años. Después de eso, continúan disminuyendo pero de una manera casi imperceptible. Es por este motivo que el análisis ANOVA no considera que hayan diferencias importantes con el pasar de los años en las muestras de adobe y recubrimiento (Tablas 22 y 23). Por otro lado, los bicarbonatos aumentan dentro de los primeros 5 años de una manera apreciable, pero a continuación el incremento se vuelve más gradual y lento. Solo en el caso del adobe, la diferencia entre los años no demostró ser significativa (Tabla 22).

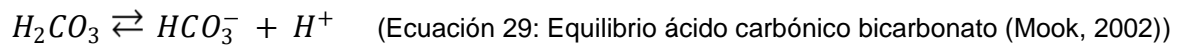
Considerando que:



La pérdida de carbonatos y el aumento de bicarbonatos asume una disminución en el pH del medio. Una posible forma de que los iones hidronio (H^+) hayan ingresado al material es por la absorción del CO_2 , que puede haber provenido de la descomposición de materia orgánica. Al combinarse con la humedad dentro de las muestras puede solubilizarse formando H_2CO_3 , un ácido débil;



Dicho ácido, a su vez, se descompone liberando iones hidronio (H^+) e iones bicarbonato. Explicando así la disminución de los carbonatos que reaccionaron con dichos iones formando más bicarbonatos.



Sin embargo, para poder aceptar esta teoría, debe tomarse en cuenta la solubilidad del dióxido de carbono en el agua. Entre los 30 y 40 °C a los que se encuentra la cámara de envejecimiento, la solubilidad es de 1-1,2 g/L. Lo cual quiere decir que las elevadas temperaturas no favorecen dicha solubilización (Mook, 2002). Además, se desconoce si el CO₂ infiltrado y el producido por la degradación de materia orgánica fue suficiente.

4.5 SULFATOS

Los sulfatos (SO₄²⁻) fueron determinados por gravimetría de precipitación con cloruro de bario como agente precipitante. Dicho método se ve sujeto a varias fuentes de error como por ejemplo, precipitaciones incompletas, errores en el pesaje, fallas en la filtración y en la remoción de interferencias. También, puede verse afectado por la incorrecta tara de los crisoles, que lleva a considerar un peso muerto adicional como parte del residuo. Sin embargo, mediante la adición de reactivo en exceso para asegurar precipitación completa y mediante doble o triple tara de crisoles se pudo obtener una buena exactitud en el método. El estándar empleado fue de sulfato cúprico pentahidratado y el error relativo obtenido fue de 1,35% (Tabla 19).

Como se puede observar en la Figura 18 y en la Tabla 9, el porcentaje de sulfatos para los tres materiales parece mantenerse constante hasta el año 5. A continuación, ocurre un crecimiento significativo hasta el año 10. Mientras que en el adobe y en el recubrimiento la tendencia parece volver a estabilizarse, en el caso de la teja el crecimiento permanece. Dado que dentro de la cámara de control climático es muy difícil el ingreso de SO₂ atmosférico, no es muy posible que este sea el motivo por el que incrementan los porcentajes de ión sulfato. Por esta razón, es importante tomar en consideración otro fenómeno. Los sulfatos tienden a atacar los materiales de construcción que llevan poros en su interior. Mientras más poroso sea el material, mayor será la penetración de los sulfatos y también su capacidad de ataque químico. En combinación con la humedad, los

iones sulfato pueden sufrir varias cristalizaciones sucesivas que conllevan a la ampliación de poros y rupturas dentro del material (Larosche, 2009). Entonces, el aumento en el porcentaje de sulfatos se relaciona con la toma de muestras. En los primeros años, los sulfatos se encontraban distribuidos en las superficies y bordes de los materiales, por este motivo había menos probabilidad que se encuentren dentro de los pedazos muestreados. Con el pasar de los años, fue aumentando su penetración hacia dentro de las estructuras por lo que aumentó también su probabilidad de ubicarse en las zonas muestreadas. Así, este análisis de sulfatos arrojó resultados que pueden interpretarse como un aumento en la penetración de los sulfatos en el material, más que en el contenido de los mismos. Así, las Tablas 21, 22 y 23 confirmaron la presencia de diferencias significativas. En el caso de la tejas, la tendencia no deja de crecer, aún siendo un material menos poroso que los demás. Esto ocurre porque su morfología es mucho más delgada, facilitando así la expansión del sulfato por todo el material.

4.6 SILICATOS

Por último, dentro de los aniones queda por analizar los silicatos (SiO_4^{4-} , $\text{Si}_2\text{O}_7^{6-}$). Los porcentajes de la Tabla 10 demuestran que este es el componente más abundante en los tres materiales de construcción (85-97%). El método gravimétrico por remoción de interferencias resultó ser altamente preciso puesto que los parámetros de variación dieron valores muy pequeños. Los coeficientes de variación fueron de 0,09% para la teja, 0,33% para el adobe y 0,20% para el recubrimiento (Tabla 19). En la Figura 19, se puede apreciar que en este componente casi no se presenta ninguna variación. Parece mantenerse constante durante casi todo el periodo de envejecimiento. Esto se debe a que los silicatos presentan una gran resistencia, incluso ante condiciones climáticas extremas. Mientras que su distribución espacial y sus ligandos pueden variar, la estructura básica de los mismos permanece estable. El porcentaje de este componente solo varía en función del aumento o disminución de los porcentajes de los demás componentes. Siendo la humedad el integrante con un mayor impacto (Joisel, 1981). Por ejemplo, en el caso del adobe y del recubrimiento se observa un leve

crecimiento hacia el año 10, seguido de una disminución hacia el final del envejecimiento. Dicha tendencia es opuesta a la de la humedad. Por otro lado, en la teja, la variación es casi imperceptible, de la misma manera que sucedió con su propia línea de humedad. Dado su gran impacto en la composición de todas las muestras, pequeñas variaciones pueden afectar de manera importante al porcentaje de los demás componentes. Es por este motivo, que en los resultados estadísticos de ANOVA (Tablas 21, 22 y 23), para todos los casos, se afirma la existencia de diferencias significativas a través del envejecimiento.

4.6 ÓXIDO DE HIERRO

Cuando el oxígeno actúa como un anión y algún metal como un catión, dichos compuestos se conocen como óxidos. En este trabajo de investigación se analizaron varios de ellos. Para empezar, se estudiaron los óxidos de Hierro (FeO , Fe_2O_3). Su presencia es significativa en los materiales cuya materia prima proviene de suelos arcillosos ricos en minerales de este tipo. Se empleó un método gravimétrico en donde el hierro se oxida completamente a Fe^{3+} para luego precipitar como hidróxido por la adición de amoníaco. Uno de los inconvenientes en este método es que el precipitado formado es del tipo gelatinoso coloidal. La filtración es muy complicada y se corre riesgo de re-precipitación. Es por este motivo, que en muchos de los casos se tuvo que re-disolver y repetir la precipitación. Y en estos pasos adicionales suelen ocurrir pérdidas. Otro problema en la determinación de Fe_2O_3 son las interferencias ya que su procedimiento también conlleva la precipitación de óxido de aluminio y dióxido de manganeso. La presencia de estos compuestos acarrea consigo una sobre-estimación del analito. Pero a pesar de todos estos factores de error, los coeficientes de variación permanecieron debajo del 10% y el error relativo fue de 3,85% (Tabla 19). Éste parámetro de exactitud se pudo obtener mediante una determinación con cloruro férrico como estándar.

Mientras que durante los primeros 5 años ocurrió una gran pérdida de óxidos de hierro, en los años subsiguientes el porcentaje pareció estabilizarse en los tres materiales de construcción (Figura 20). Hay que tomar en cuenta que dicha

pérdida es considerable, incluso resultó en diferencias significativas para los tres casos (Tablas 21, 22 y 23). Por ejemplo, en la Tabla 11, se puede observar que el porcentaje inicial de óxido de hierro en la teja (4,33%) fue reducido a menos de la mitad al final de su envejecimiento (1,81%). Considerando que los óxidos de hierro son bastante resistentes a factores climáticos como la temperatura, la humedad y la radiación UV, no se esperaba que haya mayor disminución. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que el óxido férrico en su estado natural puede encontrarse como polvo. Esto quiere decir que sus partículas tienen un diámetro menor o igual a los 500 micrómetros. Al ser tan pequeñas y livianas, dichas partículas tienden a dispersarse con facilidad (Kozicki, 2019). Las muestras del año cero no ingresaron a la cámara de control climático. Sin embargo, a partir del año 5 las muestras ingresaron y salieron de la cámara recibiendo mucha más manipulación lo cual puede haber conllevado a la caída de estos polvos o a la dispersión de los mismos en el aire. Esta misma pérdida por dispersión es el motivo por el cual en la industria de materiales moderna se suele granular o peletizar los óxidos antes de ingresarlos a las mezclas (Kozicki, 2019). Puede considerarse a la pérdida de este componente como perjudicial ya que se pierde la resistencia que los óxidos de hierro proporcionan.

4.7 ÓXIDO DE CALCIO

Otro tipo de óxido determinado fue el de calcio (CaO). Los óxidos de calcio y de magnesio también provienen de los minerales del suelo. En este caso, se empleó otro método gravimétrico donde el calcio precipita como oxalato en medio básico. Como se puede observar en la Figura 21, el porcentaje de óxidos de calcio en el adobe y la teja disminuye gradualmente pero manteniéndose constante durante casi todo el proceso de envejecimiento. La disminución en el adobe fue tan sutil que no se consideraron diferencias significativas (Tabla 22). La pérdida puede deberse de igual manera a su estructura física de polvo que facilita la dispersión con el aire. Y, a pesar de que el óxido de calcio y sus demás compuestos comunes (CaCO₃, Ca(OH)) tienen fuerzas de cohesión elevadas, la presencia de humedad disminuye las fuerzas electrostáticas (Lumay, 2012). En el caso del

recubrimiento, se puede apreciar que el decrecimiento es más pronunciado. La Tabla 12 indica que desde un promedio de 1,74% bajó hasta 0,98% de óxido de calcio. Esto se debe a que la mayor parte de su contenido de calcio se encontraba en la pintura, y con el pasar de los años la pintura se iba desprendiendo de las muestras hasta casi dejar descubierto al adobe. El calcio suele añadirse a las pinturas en su forma de carbonato como un agente matificante y blanqueador (Tegethoff, 2001).

Los óxidos de hierro pueden interferir en este análisis si no son removidos correctamente. En las precipitaciones también pueden ocurrir fallas experimentales si el pH no es el adecuado. Por este motivo, se hizo uso del rojo de metilo como indicador ácido-base. Sin embargo, la precisión igual se vio afectada y el error relativo supero al 5% (Tabla 19).

4.8 ÓXIDO DE MAGNESIO

Para finalizar con los óxidos, se estudió el óxido de magnesio (MgO). En este caso, la precipitación ocurre a manera de pirofosfato y el equivalente de óxido se determina mediante un cálculo estequiométrico. Al pertenecer a los metales alcalinotérreos como el calcio, se esperaba que el óxido de magnesio tenga un comportamiento similar. Sin embargo, con este compuesto no se obtuvieron tendencias claras. Los porcentajes subieron y bajaron de una manera que parece casi aleatoria (Tabla 13 y Figura 22). El óxido de magnesio es muy poco resistente al agua. En presencia de humedad tiende a reaccionar formando hidróxido de magnesio. Y a su vez, el hidróxido tiende a absorber dióxido de carbono. Tales transformaciones pueden haber influido en el aumento y disminución del porcentaje (Gravit, 2017). Además, al encontrarse en tantas formas químicas distintas, la precipitación en el procedimiento experimental puede haberse visto afectada. También se debe tomar en cuenta que para este análisis una incorrecta remoción de interferencias, como los óxidos de hierro y calcio, puede haber afectado a los resultados. Por este motivo, se puede afirmar que parte de la variación en las líneas de tendencia se debe a errores experimentales. Esto puede argumentarse, de igual manera, mediante los

parámetros de precisión y exactitud en la Tabla 19. En el caso de la teja y el recubrimiento, los coeficientes de variación superaron al 10% con valores de 18,56% y 16,99% respectivamente. Además, mediante el análisis de nitrato de magnesio como estándar se determinó un error relativo de casi 10%.

En la Figura 22, la teja parece haber demostrado menor variación a través del tiempo. Incluso se negó la existencia de diferencias significativas mediante el análisis de ANOVA (Tabla 21). Para esto, es importante tomar en cuenta que la teja también presentó mayor resistencia que los demás al factor de humedad. Evitando así, la interconversión del magnesio a otras formas químicas. Estos cambios conllevan a la expansión de poros y rupturas lo cual tendrá un efecto negativo en los materiales a largo plazo.

4.9 CATIONES

A continuación se estudiaron los cationes, cuya determinación se realizó mediante espectrofotometría de absorción atómica. Éste método resultó ser sin duda el más exacto como lo demuestran los pequeños errores relativos de las Tabla 19: 0,51% para el hierro, 0,77% para el sodio, 0,94% para el calcio y 4,47% para el magnesio. Dichos valores fueron obtenidos mediante determinaciones con estándares certificados de alta confiabilidad. La exactitud fue menor en el caso del magnesio debido a su inestabilidad. A pesar de que se adicionó óxido de lantano para evitar este problema, igual pueden haber ocurrido interconversiones entre estado ionizado y fundamental durante el análisis. En los demás casos sí se pudo evitar las interferencias por ionización de manera exitosa. La correspondencia entre los estándares preparados y los valores de absorbancia obtenidos se encuentran expresados en la Tabla 14. Y las curvas de calibración se hallan graficadas en la Figura 23.

Sin intercepción en 0, se obtuvieron coeficientes de correlación próximos a 1 (0,999, 0,998 y 0,992 para el hierro, sodio y calcio respectivamente). En estos casos se pudo comprobar el cumplimiento de la Ley de Lambert Beer ya que la absorbancia se mostró directamente proporcional a la concentración de las muestras. Al obtenerse las funciones lineales, fue posible determinar la

concentración de los analitos en las muestras digestadas. El coeficiente de correlación para el magnesio no fue tan cercano a 1 (0,977), lo cual puede deberse a errores en la preparación de los estándares o a las interferencias de ionización mencionadas previamente.

En los análisis de hierro, calcio y magnesio se obtuvieron líneas de tendencia similares a las de sus óxidos, que fueron determinados previamente mediante gravimetría (Figuras 24, 26 y 27). Esto se debe a que dichos cationes pueden haberse encontrado mayormente en forma de óxidos, es decir, vinculados al oxígeno (O^{2-}) como anión. Por este motivo, las tendencias se explican de la misma manera. El hierro como óxido se fue desprendiendo a manera de polvo, y tanto el calcio como el magnesio sufrieron conversiones a otras formas lo cual provocó su disminución o variación. Sin embargo, el sodio fue determinado apenas mediante absorción atómica, por lo que es importante analizar su tendencia por separado (Tabla 16 y Figura 25). En los primeros 5 años, la concentración del ión permaneció constante. A continuación, entre los años 5 y 10 hubo una disminución importante pero que permaneció estable hasta el final del envejecimiento. Considerando que el sodio puede haberse encontrado a manera de óxido (Na_2O) o asociado al cloruro ($NaCl$), ambos compuestos son sensibles al agua. Es por este motivo que cuando inició el envejecimiento y la humedad de la cámara era baja no hubo ningún cambio apreciable. Sin embargo, en la siguiente etapa de envejecimiento la humedad creciente en el ambiente pudo haber sido capaz de extraer los iones para suspenderlos en microgotas como ocurrió con el cloruro. Dicha pérdida se consideró significativa en todos los casos (Tablas 21, 22 y 23) pero este hecho no es perjudicial. El sodio es un ión que puede contribuir a la biodegradación de un material porque sirve de alimento en el crecimiento bacteriano (López-Arce, 2005). Por esta razón, su pérdida se considera favorable para los materiales de construcción.

4.10 INFLUENCIA DE UNOS COMPONENTES SOBRE OTROS

Una vez que se analizó individualmente lo que ocurrió con cada parámetro en función del tiempo, se procede a destacar aquellas situaciones en que un parámetro influyó sobre otro. En este caso, la humedad resultó ser uno de los parámetros más determinantes en el comportamiento de los materiales de construcción. El vapor de agua dentro de la cámara fue capaz de transportar especies iónicas como calcio, magnesio y sodio desde la superficie hacia el interior de los poros en los materiales. La penetración de dichas especies y su interacción con el ion hidroxilo provocó el aumento de grietas existentes. De esta manera, se evidenció que los materiales como el adobe y el recubrimiento se volvieron cada vez más quebradizos (Dey, 2018). Los materiales con menor contenido de sílice (Figura 19) y mayor cantidad de especies iónicas (adobe y recubrimiento) presentaron un aumento en la absorción de humedad hacia la saturación al final del experimento (Yépez, 2016). En presencia de la elevada radiación, se favoreció a la fotólisis del agua, es decir, la generación de radicales oxidantes hidroxilo OH^\cdot (Oro, 1979), que participan en el soplado de cal (Ecuación 1) y en otros procesos como la disolución de los minerales. Esta disolución perjudica a la cohesión y conlleva al rompimiento por las re cristalizaciones sucesivas de sulfatos y otras especies (DeCastrillo, 2017).

Como ya se ha discutido previamente, los carbonatos y bicarbonatos influyeron uno sobre el otro debido al equilibrio (Figuras 16 y 17). Sin embargo, cabe mencionar que el desplazamiento de dicho equilibrio también afectó a los demás componentes. El aumento en los bicarbonatos como consecuencia de la carbonación implicó una disminución en el pH. Por eso, los compuestos que se ven favorecidos por valores de pH elevados como los hidróxidos de calcio, magnesio y sodio pueden haber revertido a otras formas químicas, impactando aún más al crecimiento de los poros (Subashi, 2018).

En el adobe y en el recubrimiento hubo una ligera pérdida de silicatos al final del envejecimiento (Figura 19). Dicha pérdida perjudicó a los demás componentes porque los silicatos disminuyen su solubilidad y sensibilidad a los cambios de pH (Íñigo, 2000). Además, ciertos cristales de sílice pueden albergar a los óxidos de

hierro dentro de su estructura evitando que se desprendan (Adorni, 2013), lo cual no se pudo evitar en los tres materiales de la Figura 20.

Al encontrarse el calcio y el magnesio a manera de óxidos, aumentó la incompatibilidad del material con la humedad porque se generaron hidróxidos. Sin embargo, al encontrarse como carbonatos, aumentó su sensibilidad a la carbonación mediante la interacción con el dióxido de carbono proveniente de la descomposición de materia orgánica (Sağın, 2013).

Finalmente, cabe mencionar el impacto de los cloruros sobre los demás componentes. En general, la presencia de cloruros en un ambiente húmedo genera condiciones corrosivas que aceleran los procesos de oxidación. Además, los cloruros pueden extraer a los iones de sodio presentes en los feldespatos, explicando así su reducción en la Figura 25.

4.11 RELACIÓN CON ESTUDIOS SIMILARES

Se han encontrado varios trabajos sobre la caracterización física o química de materiales históricos con la finalidad de hallar formas de restauración adecuadas, o de investigar los procesos de construcción que se utilizaban en el pasado. En relación al centro histórico de Quito, se realizó un estudio sobre los materiales correspondientes a una de sus mayores atracciones turísticas: la iglesia monasterio San Francisco de Quito. Muestras de adobe, ladrillo, piedra y morteros fueron analizadas por difracción de rayos X y microscopía. Dichas técnicas analíticas, a diferencia de la gravimetría y volumetría, permiten analizar la composición mineralógica y la estructura física de cada material. Mediante la obtención de coeficientes de absorción, los investigadores determinaron un aumento en la percolación de agua, lo cual coincide con el aumento en el porcentaje de humedad de los materiales obtenido en este estudio. En los materiales del monasterio se obtuvieron cantidades de carbonato (CaCO_3) entre 8 y 13%; más elevados que los encontrados en este presente trabajo: entre 0,13 y 0,22% (Tabla 7). Sin embargo, los autores atribuyen dicha cantidad además a los materiales que se han añadido en intentos de restauración previos, como por

ejemplo, pinturas y recubrimientos. A pesar de los contrastes, dicho trabajo concluye de manera similar, afirmando que la humedad proveniente de la lluvia, la fluctuación de la temperatura y las emisiones gaseosas, están generando un ambiente hostil para los materiales de construcción antiguos del centro histórico de Quito (Moropoulou, 2003).

En cuestiones de envejecimiento artificial, no se han encontrado trabajos similares en el país. Esto se debe a que reproducir y acelerar las condiciones climáticas de determinada zona requiere de softwares que relacionen matemáticamente cada variable y de una gran recolección de datos meteorológicos obtenidos desde varios años en el pasado. Sin embargo, en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, esto fue posible mediante la contribución de datos por parte de tres estaciones meteorológicas: Carapungo, Belisario y El Camal, y mediante el desarrollo del software *Solver* por parte del Ing. José Alarcón. El programa ya fue implementado con éxito previamente por el Ing. Cristian Pazos para el envejecimiento acelerado en muestras de hormigón simple, armado, madera, mortero, policarbonato y perfiles metálicos. Esto le permitió predecir en porcentaje, la pérdida de resistencia a la compresión en 5, 10, 15 y 20 años a futuro (Pazos, 2018). Los mismos ciclos climáticos y la misma cámara fue empleada para el desarrollo de este trabajo.

Al igual que en el trabajo del Ing. Cristian Pazos, pruebas de envejecimiento acelerado han sido realizadas para ver los efectos de degradación en concretos reforzados con varios tipos de fibras. En uno de estos trabajos, se estudió el crecimiento de las grietas mediante microscopía electrónica de barrido y se determinó que la adición de recubrimientos poliméricos mejoran la unión entre fibra y matriz (Alves, 2016). Al igual que en aquella investigación, la mayoría se enfoca en determinar los cambios físicos que ocurren en los materiales. Por este motivo, se consideró importante introducir los análisis químicos al estudio de envejecimiento acelerado ya que muchos de los deterioros físicos pueden ser consecuencia de los procesos químicos.

En la ciudad de Madrid, se realizó una investigación sobre los efectos del envejecimiento acelerado en pastas de cemento reforzadas con fibras de vidrio. Sin embargo, debido a la ausencia de datos climáticos recolectados en la zona, tuvieron que aplicar una correlación de temperatura, radiación y humedad característica al clima de Inglaterra. A diferencia de dicha investigación, en este trabajo se utilizó el software desarrollado con datos climáticos del mismo país y la misma ciudad de donde se obtuvieron las muestras. Es por este motivo que se espera que los resultados obtenidos sean mucho más exactos. Sin embargo, cabe mencionar que los investigadores españoles lograron comprobar que el refuerzo con fibras de vidrio proporcionaba una mayor resistencia a la cristalización de sales y a los ciclos de congelado y descongelado (Sanchez, 1992). Otro estudio realizado en España, tuvo por objetivo simular el envejecimiento acelerado en materiales graníticos pertenecientes a edificios de interés histórico-artístico. De igual forma, por ausencia de software y datos, emplearon un modelo climático característico a zonas de tendencia continental. Esto no se hubiera podido realizar en Quito porque a pesar de pertenecer a la región andina, el clima de la ciudad tiene fluctuaciones poco predecibles y comparables con otras zonas. Por otro lado, dichos investigadores obtuvieron una conclusión similar a este trabajo en donde afirman que evitar el acceso de humedad por cualquier vía es la forma más efectiva de prevenir el deterioro en las estructuras (Íñigo, 2000).

4.12 CONSIDERACIONES FINALES

Los procesos de deterioro físico en materiales de construcción, como por ejemplo, el aumento en la porosidad, la pérdida de resistencia y el quiebre pueden ser consecuencia de la interacción entre sus componentes químicos ante el efecto de las condiciones climáticas. Es por este motivo, que introducir análisis químicos cuantitativos en estudios de envejecimiento contribuye a una mejor comprensión del deterioro en general.

Pocos trabajos de investigación se han realizado en cuestiones de envejecimiento artificial acelerado. Sin embargo, mediante la colaboración de investigadores

formados en diversas áreas científicas se han superado barreras y ha sido posible desarrollar este tipo de estudio. Se ha logrado demostrar que las condiciones climáticas sí tienen un impacto en la composición química de los materiales lo cual puede ser perjudicial. Por eso, medidas de restauración y refuerzo deben empezar a ser consideradas para la protección de las estructuras históricas y su valor cultural.

5. CONCLUSIONES

Se confirmó que los factores climáticos de humedad, radiación UV y temperatura afectan a la composición química de los tres materiales de construcción del centro histórico de Quito: ladrillo de adobe, tejas y recubrimientos. Esto se logró mediante la exposición de los mismos a una cámara de envejecimiento acelerado y a su análisis químico cuantitativo el pasar de los años. Entre las alteraciones químicas encontradas cabe resaltar: la fluctuación en el porcentaje de humedad, el desplazamiento del equilibrio carbonato-bicarbonato, y la pérdida considerable de óxidos de hierro para todos los casos.

Mediante la aplicación de los ciclos climáticos, se logró simular el envejecimiento artificial de los materiales de construcción del centro histórico de Quito desde 5 hasta 20 años a futuro. El envejecimiento provocó un deterioro visualmente perceptible que se explica mediante los diversos cambios químicos.

La composición química de las muestras fue determinada en cuanto a cationes, aniones, óxidos, humedad y materia orgánica mediante gravimetría, volumetría y espectrofotometría de absorción atómica. Éste último método resultó ser el más efectivo en cuestiones de exactitud y precisión.

Mediante líneas de tendencia se observaron las fluctuaciones y variaciones que tuvieron todos los parámetros estudiados y con ayuda del análisis estadístico ANOVA se confirmó la presencia o ausencia de diferencias significativas entre las medias de los resultados a través de los años. El tiempo de envejecimiento influyó de manera distinta en cada caso, demostrando que las tejas son más resistentes que el ladrillo de adobe y los recubrimientos. Además, la capa de pintura en la superficie del recubrimiento no proporciona ningún tipo de protección contra el deterioro.

6. RECOMENDACIONES

Se recomienda aplicar métodos de restauración y reforzado en las edificaciones del centro histórico de Quito. La información obtenida en este trabajo puede ser tomada en cuenta para que dichos métodos sean compatibles químicamente.

Se obtendría una mayor comprensión sobre lo que ocurre con los materiales de construcción del centro histórico de Quito al analizar la variación en su composición mineralógica. Para esto, se podrían emplear técnicas como la difracción o fluorescencia de rayos X.

Al comparar los fenómenos químicos con los fenómenos físicos se pueden establecer conexiones entre ambos para adquirir mayor conocimiento sobre cómo prevenir el deterioro por envejecimiento de una manera más completa.

Es importante que se empiecen a tomar medidas de restauración en las edificaciones del centro histórico de Quito para poder conservar este patrimonio. En el caso del adobe y los recubrimientos se pueden considerar métodos de impermeabilización o reforzado y en el caso de las tejas, que son más resistentes, se pueden reemplazar las unidades afectadas por unidades nuevas que no interfieran con la estética tradicional de las construcciones.

7. BIBLIOGRAFÍA

Adorni, E., Coisson, E. & Ferrieti, D. (2013). In situ characterization of archaeological adobe bricks. *Construction and building materials*, Volumen (40), Pp. 1-9, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.004>

Aguilar, R., Noel, M., Ramos, L. (2019). Integration of reverse engineering and non linear numerical analysis for the seismic assessment of historical adobe buildings. *Automation in Construction*, Volumen (98), Pp. 1-5, doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.010>

Alarcón, J. (2017). Análisis, diseño y desarrollo de un Solver para variables climáticas. Pontifica Universidad Católica del Ecuador. Disertación de grado previa a la obtención del título de ingeniero de sistemas y computación. Quito-Ecuador, repositorio:

<http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/14549/Tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Alves, M., Dias, R., de Andrade, F., Metchtcherine, V., Butler, M. & Hempel, S. (2016). The effect of accelerated aging on the interface of jute textile reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*. Volumen (74), Pp. 7-15, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.09.002>

Arguello, H. (1991). La Descomposición de la Materia Orgánica Y Su Relación Con Algunos Factores Climáticos y Microclimáticos. *Agronomía Colombiana*, Volumen (8), Número (2), Pp. 384-388, repositorio:

<https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/21129/22095>

Batista, E., Arrieta, J., Lundgren, J., dos Santos, R. (2019). Effects of porosity, dry unit weight, cement content and void/cement ratio on unconfined compressive strength of roof tile waste-silty soil mixtures. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Volumen (11), Pp. 369-378, doi:

<https://doi.org/10.1016/j.irmge.2018.04.015>

Biseniece, E., Zogla, G., Kamenders, A., Purvins, R., Kass, K., Vanaga, R. & Blumberga, A. (2017). Thermal performance of internally insulated historic brick building in cold climate: A long term case study. *Energy and buildings*, Volumen (152), Número (1), Pp. 577-586, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.082>

Böke, H., Akkurt, S., İpekoğlu, B., & Uğurlu, E. (2006). Characteristics of brick used as aggregate in historic brick-lime mortars and plasters. *Cement and Concrete Research*. Volumen (36), Número (6), Pp. 1115-1122, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.011>

Cardenas, D. (2010). Diseño, construcción e implementación de un mecanismo localizador solar automático, montado en un sistema fotovoltaico para mantener la carga de una batería automotriz. Universidad Internacional del Ecuador. Tesis de grado para la obtención del título de ingeniero en mecánica automotriz. Quito, Ecuador, repositorio:

<https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/713>

Cardona, O., Yamín, L., Phillips, C., Reyes, J., Rivero, S. & Arias, R. (2014). *Manual para la rehabilitación de viviendas construidas en adobe y tapia pisada*. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica AIS, Colombia, Pp. 2-3, https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/98/Adobe_sistema_constructivo.pdf

Christian, G. D. (2009). *“Química Analítica”*, McGraw Hill, Sexta edición, pp. 287-289

Daintith, J. (2000). *Diccionario de Química*, Grupo editorial norma & Grupo El Comercio C. A. , Segunda edición, Quito-Ecuador, Pp. 29

Cividini, A. (2017). Geomechanical characterization of some adobe materials. *Procedia Structural Integrity*, Volumen (5), Pp. 1072-1077, doi:

<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.07.079>

Córdova, J., Merchán, D. & Torres, S. (2014). Redesigning a Retail Distribution Network in Restricted Urban Areas: A Case Study on Beverage Distribution in the Historic Center of Quito. *Journal of Applied Research and Technology*, Volumen (12), Pp. 850-859, doi: [https://doi.org/10.1016/S1665-6423\(14\)70591-7](https://doi.org/10.1016/S1665-6423(14)70591-7)

De Castrillo, M. C., Philokyrou, M., & Ioannou, I. (2017). Comparison of adobes from pre-history to-date. *Journal of Archaeological Science: Reports*, Volumen (12), Pp. 437-448, doi:

<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.02.00>

Dey, V. & Mobasher, B. (2018). Quantitative characterization of accelerated aging in cement composites using flexural inverse analysis. *Cement and Concrete Composites*, Volumen (89), Pp. 181-191, doi:

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.02.019>

Domínguez, J.M. (2007). *Calor y Temperatura*. Ediciones Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe - Argentina, Pp. 119-130

Douglas-Jones, R., Hughes, J., Jones, S. & Yarrow, T. (2016). Science, value and material decay in the conservation of historic environments. *Journal of Cultural Heritage*, Volumen (21), Pp. 823-833, doi:

<https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.03.007>

Echeverría, C. (2017). *Probabilidad y Estadística*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito-Ecuador, Pp. 110-118

Fernández, J. (2001). *La Estadística en Química Analítica*. Universidad de Navarra, Pamplona-España, Pp. 1-2

Fonseca, E. (2015) "Aplicación de un método espectrofotométrico de absorción atómica para el análisis de: hierro, calcio, magnesio, potasio, y sodio en cemento portland." Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Disertación previa a la obtención del título de Licenciado en Ciencias Químicas, con mención en Química Analítica, repositorio:

[http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/8636/TESIS%20SEBASTI%
c3%81N%20FONSECA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/8636/TESIS%20SEBASTI%C3%81N%20FONSECA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Hansen, T., Haanele, R., Moller, E., Bjarlov, S. & Odgaard, T. (2017). Material Characterization Models and Test Methods for Historic Building Materials. *Energy Procedia*, Volumen (132), Pp. 315-320, doi:

<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.738>

Harvey, D. (2000). *Modern Analytical Chemistry*. McGraw-Hill Higher Education, Primera Edición, U.S.A, Pp. 198, 259

Heveldop, J., Pardo, J., Quirós, S. & Espinoza, L. (1986). *Agroclimatología Tropical*. Editorial Universidad Estatal a Distancia. San José - Costa Rica, Pp. 7-8

Iba, C., Ueda, A. & Hokoi, S. (2015). Frost Damage of Roof Tiles: A Study on Moisture Boundary Conditions, *Energy Procedia*, Volumen (78), Pp. 2530-2535, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.263>

Illampas, R., Iannou, I. & Charmpis, D. (2009). Adobe: an environmentally friendly construction material. *Sustainable Development and Planning*, Volumen (120), Número (1), Pp. 245-256, doi: [10.2495/SDP090241](https://doi.org/10.2495/SDP090241)

Íñigo, A., Vicente, M. & Rives, V. (2000). Reproducción en cámara climática de las formas de alteración más frecuentes detectadas en materiales graníticos, en clima de tendencia continental. *Materiales de Construcción*, Volumen (50), Número (257), Pp. 57-60, doi: [10.3989/mc.2000.v50.i257.418](https://doi.org/10.3989/mc.2000.v50.i257.418)

İpekog˘lu, B., Bke, H., & izer, . (2007). Assessment of material use in relation to climate in historical buildings. *Building and environment*, Volumen (42), Número (2), Pp. 970-978, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.10.029>

Joisel, A. (1981). Fisuras y grietas en morteros y hormigones: sus causas y remedios. Editores Técnicos Asociados, S. A. Quinta Edición. Barcelona - España, Pp. 87

Kogel, J. E., Trivedi, N. C., Barker, J. M., & Krukowski, S. T. (Eds.). (2006). *Industrial minerals & rocks: commodities, markets, and uses*. Society for Mining, Metallurgy and exploration, Inc. Sptima edición. Colorado - Estados Unidos, Pp. 1095-1097

Kozicki, C. & Carlson, C. (2019). Granulating Iron Oxide Pigments For Use in Concrete. FEECO INTERNATIONAL, Recuperado de: <https://feeco.com/granulating-iron-oxide-pigments-for-use-in-concrete/>

Larosche, C. (2009). *Types and causes of cracking in concrete structures*. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, Primera Edición. Pp 57-83

Lattes, A. E., Zuloaga, N. G., & Donati, J. M. (2010). *Dinámica de una ciudad: Buenos Aires, 1810-2010*. Dirección General de Estadística y Censos, Primera Edición. Buenos Aires - Argentina, Pp. 64-66

Laubsch, H. (1979). *Con la brocha y la pintura*. Reverté. Pp. 21

Lavat, A., Trezza, M. & Poggi, M. (2009). Characterization of ceramic roof tile wastes as pozzolanic admixture. *Waste Management*, Volumen (29), Pp. 1666-1674, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.10.019>

López-Arce, P., Garcia-Guinea, J., Gracia, M., & Obis, J. (2003). Bricks in historical buildings of Toledo City: characterisation and restoration. *Materials Characterization*, Volumen (50), Número (1), Pp. 59-68, doi:

[10.1016/S1044-5803\(03\)00101-3](https://doi.org/10.1016/S1044-5803(03)00101-3)

López-Arce, P., Garcia-Guinea, J. (2005). Weathering traces in ancient bricks from historic buildings. *Building and Environment*, Volumen (40), Pp. 929-941, doi:

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.08.027>

Lorenz, M., Ferré, R. & Ferreiro, R. (2012). *Diccionario Esencial Química*, Ediciones Larousse, S. A., Primera edición, México D. F., Pp. 36, 92, 337

Lozano, W. (2018). *Suelos: Guía de prácticas simplificadas en campo y laboratorio*, Universidad Piloto de Colombia, Primera edición, Bogota-España, Pp.

11

Lumay, G., Boschini, F., Traina, K., Bontempi, J., Remy, C., Cloots, R. & Vandewall, N. (2012). Measuring the flowing properties of powders and grains, *Powder Technology*, Volumen (224), Pp. 19-27, doi:

<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.02.015>

Martinez, A. (2017). *Replanteo y funcionamiento de las instalaciones solares fotovoltaicas*. Editorial Elearning. Quinta edición. España, Pp. 20-22

Mendham, J., Jeffery, G., Basset, J. & Denney, R. (2006). *Vogels textbook of quantitative chemical analysis*. Pearson Education India, Quinta edición, New York-USA, Pp. 299

Middleton, A. (2003). Informal traders and planners in the regeneration of historic city centres: the case of Quito, Ecuador, *Progress in Planning*, Volumen (59), Pp.

71-123, doi: [https://doi.org/10.1016/S0305-9006\(02\)00061-2](https://doi.org/10.1016/S0305-9006(02)00061-2)

Mook, W. (2002). *Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico*. Instituto Geológico y Minero de España, Primera edición. Madrid-España, Pp. 101-111

Moropoulou, A., Polikretu, K., Ruf, V. & Deodatis, G. (2003). San Francisco Monastery, Quito, Ecuador: characterisation of building materials, damage assessment and conservation considerations. *Journal of Cultural Heritage*, Volumen (4), Pp. 101-108, doi: [https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(03\)00021-9](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(03)00021-9)

Oguz, C., Turker, F. & Ugur, N. (2014). Construction Materials Used in the Historical Roman Era Bath in Myra. *The Scientific World Journal*, Volumen del 2014, 9 páginas, doi: [10.1155/2014/536105](https://doi.org/10.1155/2014/536105)

Oro, J. & Holzer, G. (1979). The Effects of Ultraviolet Light on the Degradation of Organic Compounds: A Possible Explanation for the Absence of Organic Matter on Mars. *Life Sciences and Space Research*. Proceedings of the Open Meeting of the Working Group on Space Biology of the Twenty-First Plenary Meeting of COSPAR, Innsbruck, Austria, 29 May–10 June 1978. Pp. 77-86, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-023416-8.50013-1>

Pancorbo, F. (2011). *Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación*. Marcombo ediciones técnicas. Primera edición. Barcelona-España, Pp. 1, 81

Pazos, C. (2018). Determinación del grado de deterioro producido por la acción del clima en diferentes materiales de construcción utilizados en edificaciones de la ciudad de Quito. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Tesis de pre grado. Quito - Ecuador, repositorio: <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/15429>

Peralta, E. & Moya, R. (2007). *Guía Arquitectónica de Quito*. Ediciones Trama. Primera edición. Quito - Ecuador, Pp. 17-18

Bretti, J. (1999). Punto Ambiental Argentina. *Cambio climático global*. Recuperado de: https://www.puntoambiental.com/informes/cambio_climatico_global.pdf

Rajeev, P., Sanjayan, J. G., & Seenuth, S. S. (2016). Assessment of thermal cracking in concrete roof tiles. *Revista Materials & Design*, Volumen (107), Pp. 470-477, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.06.072>

Reinis, P., Biseniece, E. & Blumberga, A. (2017). Laboratory investigation of Latvian historic brick and measurements of water movement in historic masonry walls. *Energy Procedia*, Volumen (113), Pp.327-332, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.04.073>

Robinson, J. W. (2014). *Undergraduate Instrumental Analysis*, , CRC Press, Séptima edición Boca Ratón – Florida, Pp. 73-76, 441-505

Sanchez, M., Aguila, A. (1992). El envejecimiento de las pastas de cemento reforzadas con fibras de vidrio. *Materiales de Construcción*, Volumen (42), Número (226), Pp. 65-71, doi: [10.3989/mc.1992.v42.i226.712](https://doi.org/10.3989/mc.1992.v42.i226.712)

Sağın, E. U., & Böke, H. (2013). Characteristics of bricks used in the domes of some historic bath buildings. *Revista Journal of Cultural Heritage*, Volumen (14), Número (3), Pp. e73-e76, doi: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.11.030>

Schroder, L., & Ogletree, V. (2010). *Adobe homes for all climates: simple, affordable, and earthquake-resistant natural building techniques*. Chelsea Green Publishing. Primera edición. Estados Unidos, Pp. 56-67

Skoog, D., West, D. & Holler, F. (1997). *Fundamentos de Química Analítica*. Editorial Reverté S. A., Cuarta edición, Barcelona-España, Pp. 756

Skoog, D., West, D., Holler, F. & Crouch, S. (2014). *Fundamentals of Analytical Chemistry*, Brooks/Cole Cengage Learning, Novena edición, Belmont-USA, Pp. 7, 172, 280-281

Straube, J. (2006). BSD-138: Moisture and Materials. *Building Science Corporation*, Recuperado de:
<https://www.buildingscience.com/documents/digests/bsd-138-moisture-and-materials>

Subashi, G. & Mallwattha, M. (2018). Strength, durability, thermal and run-off properties of fired clay roof tiles incorporated with ceramic sludge. *Construction and Building Materials*, Volumen (179), Pp. 390-399, doi:
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.187>

Tegethoff, W. (2001) *Calcium Carbonate: From the Cretaceous Period into the 21st Century*, Springer Basel AG, Biberist - Suiza, Pp. 270

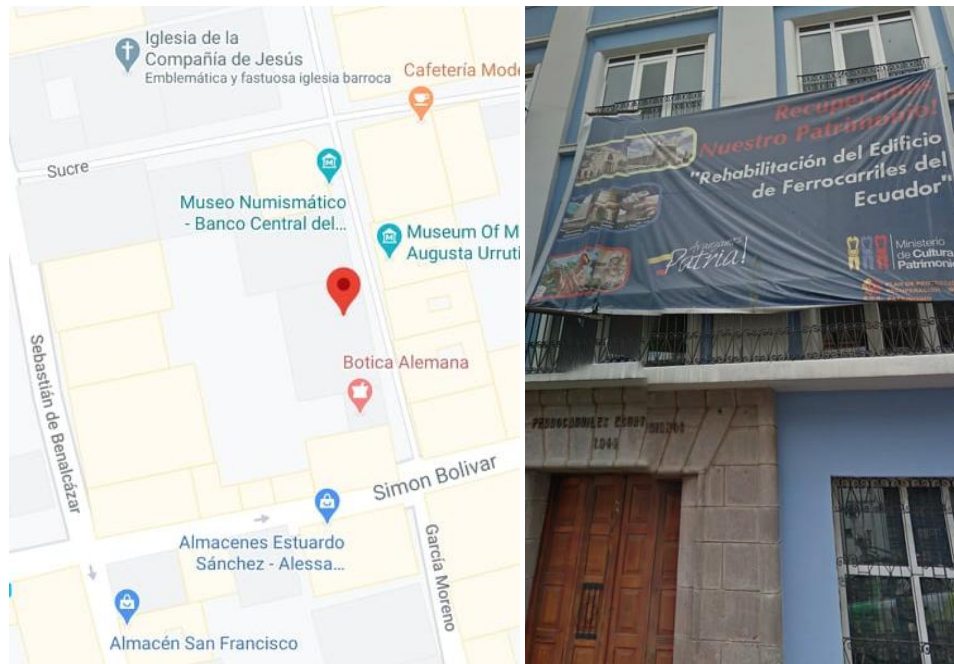
Useros, J. (2013). El Cambio Climático: Sus Causas Y Efectos Medioambientales. *Anales de la Real Academia de Medicina y Cirugía de Valladolid*. Volumen (50). Pp. 71-98, repositorio: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4817473>

Willard H, Merritt L., Dean J. & Settle F. (1990). *Métodos Instrumentales de Análisis*, Continental S.A. Primera edición, México.

Yépez, F. & Yépez, O. (2016) Role of construction materials in the collapse of R/C buildings after Mw 7.8 Pedernales – Ecuador earthquake, April 2016. *Case Studies in Structural Engineering*, Volumen (7), Pp. 24-31, doi:
<https://doi.org/10.1016/j.csse.2016.12.001>

Zaaijer, M. (1991). Quito. *Cities: the international journal of urban policy and planning*, Volumen (8), Número (2), Pp. 87-92

8. ANEXOS



Anexo 1. Zona de muestreo (Google Maps).



Anexo 2. Equipo de envejecimiento artificial, marca BIOBASE, modelo BJPX-A450.



Anexo 3. Humidificador ultrasónico, marca YADU.



Anexo 4. Balanza analítica Mettler Toledo, ML 204. Precisión 0,0001 g



Anexo 5. Espectrofotómetro de absorción atómica, marca Perkin Elmer, AAAnalyst
400



Anexo 6. Mufla de calentamiento para calcinación.



Anexo 7. Horno de estufa para el secado de las muestras marca Memmert
Modelo SM 200.



Anexo 8. Plancha de calentamiento MS 100 (HP 100).



Anexo 9. Pipeta 10-100 µL, marca CAPP.

CAPP [®] DENMARK		CALIBRATION CERTIFICATE		
Pipette Model:	B100-1	10.0 ul		100.0 ul
Serial Number:	ME11677	10.01		99.75
		10.02		99.89
		10.03		100.05
		10.08		99.70
	Calibration result: Pass			
Temperature (C):	23.5	Mean (ul)	10.07	100.21
Relative humidity (%):	58.0	Precision (ul)	0.03	0.16
Bar. Pressure (mbar):	1013	CV (%)	0.31	0.16
Z-Factor:	1.003600	Accuracy (ul)	9.75 - 10.25	99.30 - 100.70
Evaporation Rate (mg):	0.0000			
Equipment:	Station 10, CP225D	Precision (ul)	< 0.10	< 0.20
		CV (%)	< 1.00	< 0.20
				Calibration date:
				May 27, 2017 06:40 AM
				Calibrated by:
				R T
The Pass result indicates that this pipette is in conformity to manufacturer's specifications. The test is performed in accordance to ISO8655				

Anexo 10. Certificado de calibración de la pipeta 10-100 µL, marca CAPP.



Anexo 11. Pipeta 100-1000 μ L, marca Pipette.

QUALITY CONTROL CERTIFICATE

Serial Number:	11J83233
Pipette:	100-1000 μ l
Volume:	500 μ l
Mean:	500.4 μ l
Inacc%	(\pm 1.5)
Impr%	(\leq 0.5)
	PASSED
2016-12-04	
Date/Datum/Data/Fecha/Data:	
According to/Nach/Selon/Segun/In base a: DIN 12650; CEISO 9001/13485	

Anexo 12. Certificado de calidad de la pipeta 100-1000 μ L, marca Pipette.



Anexo 13. Pipeta 1-5 mL, marca CAPP.

CAPP [®] DENMARK		CALIBRATION CERTIFICATE			
Pipette Model:	B5000-1	<u>1000.0 ul</u>		<u>5000.0 ul</u>	
Serial Number:	JG10922	997.2		4977.7	
		998.5		4984.8	
		996.0		4988.6	
		997.6		4992.4	
	Calibration result: Pass				
Temperature (C):	24.5	Mean (ul)	1001.22	5005.32	
Relative humidity (%):	57.0	Precision (ul)	1.04	6.27	
Bar. Pressure (mbar):	1013	CV (%)	0.10	0.13	Calibration date:
Z-Factor:	1.003900	Accuracy (ul)	988.00 -	4970.00 -	July 14, 2014
Evaporation Rate (mg):	0.0000		1012.00	5030.00	
Equipment:	Station 13, AX200	Precision (ul)	< 3.00	< 7.50	Calibrated by:
		CV (%)	< 0.30	< 0.15	J R
The Pass result indicates that this pipette is in conformity to manufacturer's specifications. The test is performed in accordance to ISO8655					

Anexo 14. Certificado de calibración de la pipeta 1-5 mL, marca CAPP.



Anexo 15. Taladro 420 W marca narex.

125 Market Street
New Haven, CT 06513
USA



AccuStandard® Inc.

Tel (203)786-5290
Fax (203)786-5287
www.AccuStandard.com

CERTIFICATE OF ANALYSIS

AccuTrace Reference Standard

Catalog No: AA09N-1
Description: Calcium AA Standard
Element: Calcium (Ca)
SRM: 3109a
Lot: 216075005
Matrix: 2-5% Nitric acid
Hazards: **CORROSIVE** - Refer to SDS for safety info

Date Certified: Jul 11, 2016
Expiration: Jul 11, 2021
Concentration: 1000 µg/mL

Sample Size: 100 mL
Components: 1
Storage Condition: Ambient (>5 °C)

Included on ISO/IEC 17025 Scope of Accreditation: Yes
Included on ISO Guide 34 Scope of Accreditation: Yes



Danger 1

Component	SRM #	Prepared Concentration (µg/mL)
Ca Calcium	3109a	1000

The gravimetric uncertainty for this product is ±0.2%. See reverse side for details.

In order to verify the concentration(s), the final solution was checked by plasma emission spectroscopy (ICP) against material traceable to the above listed NIST SRM(s).

This standard was prepared using ACS grade or better starting materials, high purity acids and ASTM Type I 18 megohm deionized water.

All glassware used in preparation is Class A and calibrated regularly.

All weights are traceable through NIST, Test No. 822-275872-11

Use good laboratory procedure when diluting this product. Shake bottle prior to use and do not pipette directly out of the bottle. Use only cleaned Class A volumetric glassware.

We certify the accuracy of this standard to be ±0.5% of the stated value until its expiration date provided it is kept tightly capped and stored under the conditions stated above.

Certified By:
Meigan O'Leary, Inorganic QC Manager

Page 1 of 1

For use in routine laboratory analysis.

AccuStandard is accredited to ISO Guide 34, ISO/IEC 17025 and certified to ISO 9001

OR-ORG/INO-001
Rev. 7/11

Anexo 16. Estándar de calcio 1000 µg/mL en 2-5% HNO₃, marca AccuStandard, Inc.

125 Market Street
New Haven, CT 06513
USA



AccuStandard®, Inc.

Tel (203)786-5290
Fax (203)786-5287
www.AccuStandard.com

CERTIFICATE OF ANALYSIS

AccuTrace™ Reference Standard

Catalog No: AA27N-1
Description: Iron AA Standard
Element: Iron (Fe)
SRM: 3126a
Lot: 218015009

Matrix: 2-5% Nitric acid

Hazards: Refer to SDS for complete safety information



Signal Word: Danger

Date Certified: Jan 12, 2018

Expiration: Jan 12, 2023

Sample Size: 100 mL

Components: 1

Storage Condition: Ambient (>5 °C)

Included on ISO/IEC 17025 Scope of Accreditation: Yes

Included on ISO Guide 34 Scope of Accreditation: Yes

Component	SRM #	Prepared Concentration (µg/mL)
Fe Iron	3126a	1000

The gravimetric uncertainty for this product is $\pm 0.24\%$.

In order to verify the concentration(s), the final solution was checked by plasma emission spectroscopy (ICP) against material traceable to the above listed NIST SRM(s).

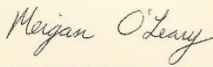
This standard was prepared using ACS grade or better starting materials, high purity acids and ASTM Type I 18 megohm deionized water.

All glassware used in preparation is Class A and calibrated regularly.

All weights are traceable through NIST, Test No. 822-275872-11

Shake bottle prior to use and do not pipette directly out of the bottle. Use only cleaned Class A volumetric glassware.

We certify the accuracy of this standard to be $\pm 0.5\%$ of the stated value until its expiration date provided it is kept tightly capped and stored under the conditions stated above.

Certified By: 
Meigan O'Leary, Inorganic QC Manager

Page 1 of 1

For use in routine laboratory analysis.

AccuStandard is accredited to ISO Guide 34, ISO/IEC 17025 and certified to ISO 9001:2015

QR-ORG/INO-001
Rev. 4/17

Anexo 17. Estándar de hierro 1000 µg/mL en 2-5% HNO₃, marca AccuStandard, Inc.

125 Market Street
New Haven, CT 06513
USA



AccuStandard[®], Inc.

Tel (203)766-5290
Fax (203)766-5287
www.AccuStandard.com

CERTIFICATE OF ANALYSIS

AccuTrace™ Reference Standard

Catalog No: AA32N-1
Description: Magnesium AA Standard
Element: Magnesium (Mg)
SRM: 3131a
Lot: 215025028-01
Matrix: 2-5% Nitric acid
Hazards: Refer to SDS for complete safety information


Date Certified: Feb 20, 2017
Expiration: Feb 20, 2022
Sample Size: 100 mL
Components: 1
Storage Condition: Ambient (>5 °C)
Included on ISO/IEC 17025 Scope of Accreditation: Yes
Included on ISO Guide 34 Scope of Accreditation: Yes



Signal Word: Danger

Component	SRM #	Prepared Concentration (µg/mL)
Mg Magnesium	3131a	1000

The gravimetric uncertainty for this product is $\pm 0.2\%$. See reverse side for details.
In order to verify the concentration(s), the final solution was checked by plasma emission spectroscopy (ICP) against material traceable to the above listed NIST SRM(s).
This standard was prepared using ACS grade or better starting materials, high purity acids and ASTM Type 1 18 megohm deionized water.
All glassware used in preparation is Class A and calibrated regularly.
All weights are traceable through NIST, Test No. 822-275872-11
Shake bottle prior to use and do not pipette directly out of the bottle. Use only cleaned Class A volumetric glassware.
We certify the accuracy of this standard to be $\pm 0.5\%$ of the stated value until its expiration date provided it is kept tightly capped and stored under the conditions stated above.

Certified By: 
Meigan O'Leary, Inorganic QC Manager

Page 1 of 1

For use in routine laboratory analysis.

AccuStandard is accredited to ISO Guide 34, ISO/IEC 17025 and certified to ISO 9001:2015

QR-ORG-INO-001
Rev. 4/17

Anexo 18. Estándar de magnesio 1000 µg/mL en 2-5% HNO₃, marca
AccuStandard, Inc.

125 Market Street
New Haven, CT 06513
USA



AccuStandard® Inc.

Tel (203)786-5290
Fax (203)786-5287
www.AccuStandard.com

CERTIFICATE OF ANALYSIS

AccuTrace™ Reference Standard

Catalog No: AA54N-1
Description: Sodium AA Standard
Element: Sodium (Na)
SRM: 3152a
Lot: 217125066
Matrix: 2-5% Nitric acid
Hazards: Refer to SDS for complete safety information

Date Certified: Dec 13, 2017
Expiration: Dec 13, 2022
Sample Size: 100 mL
Components: 1
Storage Condition: Ambient (>5 °C)

Included on ISO/IEC 17025 Scope of Accreditation: Yes
Included on ISO Guide 34 Scope of Accreditation: Yes



Signal Word: Danger

Component	SRM #	Prepared Concentration (µg/mL)
Na Sodium	3152a	1000

The gravimetric uncertainty for this product is $\pm 0.24\%$.

In order to verify the concentration(s), the final solution was checked by plasma emission spectroscopy (ICP) against material traceable to the above listed NIST SRM(s).

This standard was prepared using ACS grade or better starting materials, high purity acids and ASTM Type I 18 megohm deionized water.

All glassware used in preparation is Class A and calibrated regularly.

All weights are traceable through NIST, Test No. 822-275872-11

Shake bottle prior to use and do not pipette directly out of the bottle. Use only cleaned Class A volumetric glassware.

We certify the accuracy of this standard to be $\pm 0.5\%$ of the stated value until its expiration date provided it is kept tightly capped and stored under the conditions stated above.

Certified By:

Meigan O'Leary, Inorganic QC Manager

Page 1 of 1

For use in routine laboratory analysis.

AccuStandard is accredited to ISO Guide 34, ISO/IEC 17025 and certified to ISO 9001:2015

QR-ORG/INO-001
Rev. 4/17

Anexo 19. Estándar de sodio 1000 µg/mL en 2-5% HNO₃, marca AccuStandard, Inc.



Anexo 20. De izquierda a derecha: muestras ejemplo de teja, ladrillo de adobe, recubrimiento.



Anexo 21. Muestras pulverizadas y almacenadas en bolsas plásticas con cierre hermético de los años 0, 5, 10, 15 y 20.