



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES**

**CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y ESTRUCTURAS**

TESIS

**"PROPUESTA Y EVALUACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA LA
DETERMINACIÓN DEL PESO PROPIO EN ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS Y
ORNAMENTALES DE EDIFICIOS PATRIMONIALES EMPLEANDO
FOTOGRAMETRÍA DIGITAL DE CORTO RANGO"**

PRESENTA:

Arq. Isaías Edén Vizcaíno Hernández

**Para obtener el grado de Maestro en Ingeniería civil con
especialidad en construcción**

TUTOR:

Dr. Miguel Ángel Soto Zamora

COMITÉ TUTORAL

Dr. Jesús Pacheco Martínez

Dr. Raudel Padilla Cenicerros

Aguascalientes, Ags. Septiembre de 2018

Dra. María del Carmen Martínez Serna
Dirección General de Investigación y Posgrado
PRESENTE

Por medio de este conducto informo que el documento final de tesis titulado: "PROPUESTA Y EVALUACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DEL PESO PROPIO EN ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS Y ORNAMENTALES DE EDIFICIOS PATRIMONIALES EMPLEANDO FOTOGRAMETRÍA DIGITAL DE CORTO RANGO". Presentado por el sustentante: **Isaías Edén Vizcaíno Hernández** con ID: 220803, egresado de la Maestría en Ingeniería Civil cumple las normas y lineamientos establecidos institucionalmente. Cabe mencionar que el autor cuenta con el voto aprobatorio correspondiente.

Para efecto de los trámites que al interesado convengan, se extiende el presente, reiterándole las consideraciones que el caso amerite.

ATENTAMENTE
Aguascalientes, Ags., 31 de agosto de 2018
"SE LUMEN PROFERRE"


M. en Fil. Omar Vázquez Gloria
Decano del Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción

c.c.p. - Dr. Ricardo Arturo López León – Secretario de Investigación y Posgrado del CCDC.
c.c.p. - Dr. Miguel Ángel Soto Zamora – Secretario Técnico de la Maestría en Ingeniería Civil y Tutor de tesis.
~~c.c.p. - Ing. Isaías Edén Vizcaíno Hernández – Egresado de la Maestría en Ingeniería Civil.~~
c.c.p. - Lic. Delfa Guadalupe López Muñoz – Jefe Sección de Certificados y Títulos.
c.c.p. - Archivo

OVG/tbv



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES
FORMATO DE CARTA DE VOTO APROBATORIO

MAESTRO EN FILOSOFÍA OMAR VÁZQUEZ GLORIA
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
P R E S E N T E

Por medio del presente como Tutor designado del estudiante **ISAÍAS EDÉN VIZCAÍNO HERNÁNDEZ** con ID **220803** quien realizó **LA TESIS** titulada: **PROPUESTA Y EVALUACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DEL PESO PROPIO EN ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS Y ORNAMENTALES DE EDIFICIOS PATRIMONIALES EMPLEANDO FOTOGRAMETRÍA DIGITAL DE CORTO RANGO**, y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla, y así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"
Aguascalientes, Ags., a 30 de Agosto de 2018.

Dr. Miguel Ángel Soto Zamora
Tutor de tesis

Dr. Jesús Pacheco Martínez
Asesor

Dr. Raudel Padilla Ceniceros
Asesor

- c.c.p.- Interesado
- c.c.p.- Secretaría de Investigación y Posgrado
- c.c.p.- Jefatura del Depto. de Construcción y estructuras
- c.c.p.- Consejero Académico
- c.c.p.- Minuta Secretario Técnico

AGRADECIMIENTOS

Principalmente agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo económico, con lo cual logre desarrollar esta investigación y al mismo tiempo concluir mis estudios de grado, consiguiendo una de mis metas académicas y mejorar mi formación como profesionista.

De la misma manera, al Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción, como prioridad al Consejo Académico de la Maestría en Ingeniería Civil. En donde resalta la labor del Dr. Miguel Ángel Soto Zamora, quien no solamente me orientó para ingresar al sistema de posgrados y dirigir mi investigación de tesis, sino que también fue el apoyo en aquellos momentos complicados dentro y fuera de la universidad.

Por otro lado, agradezco a todas aquellas personas que con su apoyo contribuyeron a hacer posible este objetivo, desde los compañeros de aula hasta los profesores, quienes estuvieron allí para mejorar mi formación académica compartiendo sus experiencias profesionales.

DEDICATORIAS

Dedico esta tesis a todos aquellos docentes que con su dedicación dieron forma a lo que es hoy mi carácter académico y profesional, como símbolo de que su labor no ha caído en el olvido y una muestra de que su trabajo y dedicación han rendido frutos en alguien que quizás hoy no recuerden.

De la misma manera la dedico a mis familiares y amigos quienes estuvieron brindándome su apoyo desde la lejanía del hogar, por su esencia siempre presente y cercana en los momentos difíciles para un estudiante foráneo.



ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL 1

ÍNDICE DE TABLAS 3

ACRÓNIMOS 7

RESUMEN 8

ABSTRACT 9

1.INTRODUCCIÓN 11

 1.1. Prólogo..... 11

 1.2. Objetivo General..... 13

 1.3. Objetivos Particulares 13

 1.4. Alcances..... 14

 1.5. Justificación 15

 1.6. Hipótesis 16

 1.7. Metodología 16

2. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO 19

 2.1. La relación del peso propio y densidad de los materiales 19

 2.2. La geometría dentro del análisis estructural 23

 2.3. La aceleración del deterioro en rocas 28

 2.4. Modelación 3D, replanteo de objetos frágiles 31

 2.5. La fotogrametría como un método de replanteo..... 33

 2.6. Evaluación de las técnicas contemporáneas..... 38

3. MARCO TEÓRICO 40

 3.1. Determinación del volumen y la densidad de las muestras 40

 3.2. El volumen y la estructuración tridimensional por movimiento 42

 3.3. Cristalización de sales en las piedras 45

4. METODOLOGÍA..... 47

 4.1. Revisión de los valores de la densidad 47

 4.2. Selección de probetas 48

 4.3. Selección del método destructivo 49

 4.4. Elaboración del estudio fotográfico y sistema de captura 50

 4.5. Registro del estado original de las muestras 51

| | |
|--|-----|
| 4.6. Registro periódico método convencional en laboratorio | 52 |
| 4.7. Registro periódico por fotogrametría..... | 53 |
| 4.8. Comparación y análisis de resultados | 54 |
| 4.9. Resumen de metodología experimental: | 54 |
| 5. RESULTADOS | 58 |
| 5.1. Probetas, selección y densidad teórica | 58 |
| 5.2. Características físicas originales de las muestras | 63 |
| 5.3. Cristalización de Sales en roca | 64 |
| 5.4. El estudio fotográfico y sistema de captura | 66 |
| 5.5. Registro periódico por método convencional | 88 |
| 5.6. Registro periódico método indirecto | 90 |
| 5.7. Comparativa de métodos..... | 93 |
| 6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 99 |
| 6.1. La estandarización del proceso | 99 |
| 6.2. Alteraciones en los ciclos de envejecimiento | 101 |
| 6.3. El cambio de la densidad de las muestras | 103 |
| 6.4. Comparación de los resultados obtenidos | 104 |
| 7. CONCLUSIONES | 107 |
| 7.1. Conclusión general..... | 107 |
| 7.2. Conclusiones particulares..... | 108 |
| 7.3. Nichos de investigación | 111 |
| GLOSARIO..... | 112 |
| FUENTES DE CONSULTA | 113 |
| ANEXOS..... | 114 |

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Peso específico para piedras según ASTM (ASTM, 2015)20

Tabla 2 Peso específico para piedras (Euroimportadora, 2016)20

Tabla 3 Peso específico para piedras (Universidad de Granada, 2017)20

Tabla 4 Familias de rocas, extracto de (Yam, y otros, 2006)21

Tabla 5 Densidad variable de piedras caliza (Salomón, y otros, 2003).....22

Tabla 6 Tabla de fórmulas para obtener volumen de cuerpos regulares40

Tabla 7 Materiales y equipo para revisión de valores47

Tabla 8 Materiales y equipo para Seleccionar probetas.....48

Tabla 9 Materiales y quipo para definir método destructivo49

Tabla 10 Materiales y equipo para desarrollar estudio fotográfico50

Tabla 11 Materiales y equipo para el registro original.....51

Tabla 12 Materiales y equipo para el registro periódico convencional52

Tabla 13 Materiales y equipo para registros por fotogrametría.....53

Tabla 14 Materiales y equipo para comparativas54

Tabla 15 Densidad aproximada para las muestras, fuentes convencionales.62

Tabla 16 Densidad aproximada para las muestras, fuentes científicas.....62

Tabla 17 Estudio Fotográfico, puntos de apoyo.....71

Tabla 18 Registro convencional del peso seco tras los ciclos88

Tabla 19 Registro convencional tras el primer periodo de registro88

Tabla 20 Registro convencional tras el segundo periodo de registro88

Tabla 21 Registro convencional tras el tercer periodo de registro89

Tabla 22 Registro convencional tras el cuarto periodo de registro89

Tabla 23 Registro indirecto tras el tercer ciclo de cristalización.....90

Tabla 24 Registro indirecto tras primer periodo de registro90

Tabla 25 Registro indirecto tras sexto ciclo de cristalización90

Tabla 26 Registro indirecto tras segundo periodo de registro91

Tabla 27 Registro indirecto tras el noveno ciclo de cristalización91

Tabla 28 Registro indirecto tras tercer periodo de registro91

Tabla 29 Registro indirecto tras el decimosegundo ciclo de cristalización.....92

Tabla 30 Registro indirecto tras cuarto periodo de registro92

ÍNDICE DE GRÁFICOS E ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Diagrama de la metodología general 17

Ilustración 2 Densidad relativa 19

Ilustración 3 Texturas que caracterizan a las rocas ígneas 21

Ilustración 4 Torre del Homenaje modelo del exterior y sistema interior. 23

Ilustración 5 Situación tensional de la torre, vista en sección 24

Ilustración 6 Muros deteriorados sin considera en el análisis de la torre 24

Ilustración 7 Deformación de la cúpula idealizada del templo San Antonio 25

Ilustración 8 Estado real de la cúpula del Templo San Antonio 25

Ilustración 9 Columnas decadentes de la antigua cisterna en Turquía 26

Ilustración 10 Análisis estructural, columna modelada mediante escáner laser..... 26

Ilustración 11 El decaimiento de las piedras según temperatura y saturación 28

Ilustración 12 Decaimiento de las piedras tras los ciclos de cristalización. 29

Ilustración 14 Alteración volumétrica de una piedra por eflorescencia 30

Ilustración 15 Digitalización del Miguel Ángel 31

Ilustración 16 El potencial del escáner laser..... 32

Ilustración 17 Interpretación tridimensional por estereoscopia..... 33

Ilustración 18 Proyección óptica por Da Vinci / Visualizador de pares estereoscópicos..... 34

Ilustración 19 Par estereoscópico de imágenes de Nueva York 34

Ilustración 20 Normalización del mallado, interior del Baptisterio Arriano 35

Ilustración 21 Normalizacion de imagen del asfalto 36

Ilustración 22 Registro del volumen por software según 36

Ilustración 23 Levantamiento de fachada por fotogrametría. 37

Ilustración 24 Topografía extrema modelada por fotogrametría..... 37

Ilustración 25 Fragmentación de un cuerpo, para simplificarlo a tetraedros..... 42

Ilustración 26 Elemento de alta complejidad definido por tetraedros 43

Ilustración 27 Triangulación de puntos comunes en escena 43

Ilustración 28 Secuencia de captura para fachadas 44

Ilustración 29 Proceso de captura de fotografías para elemento aislado 50

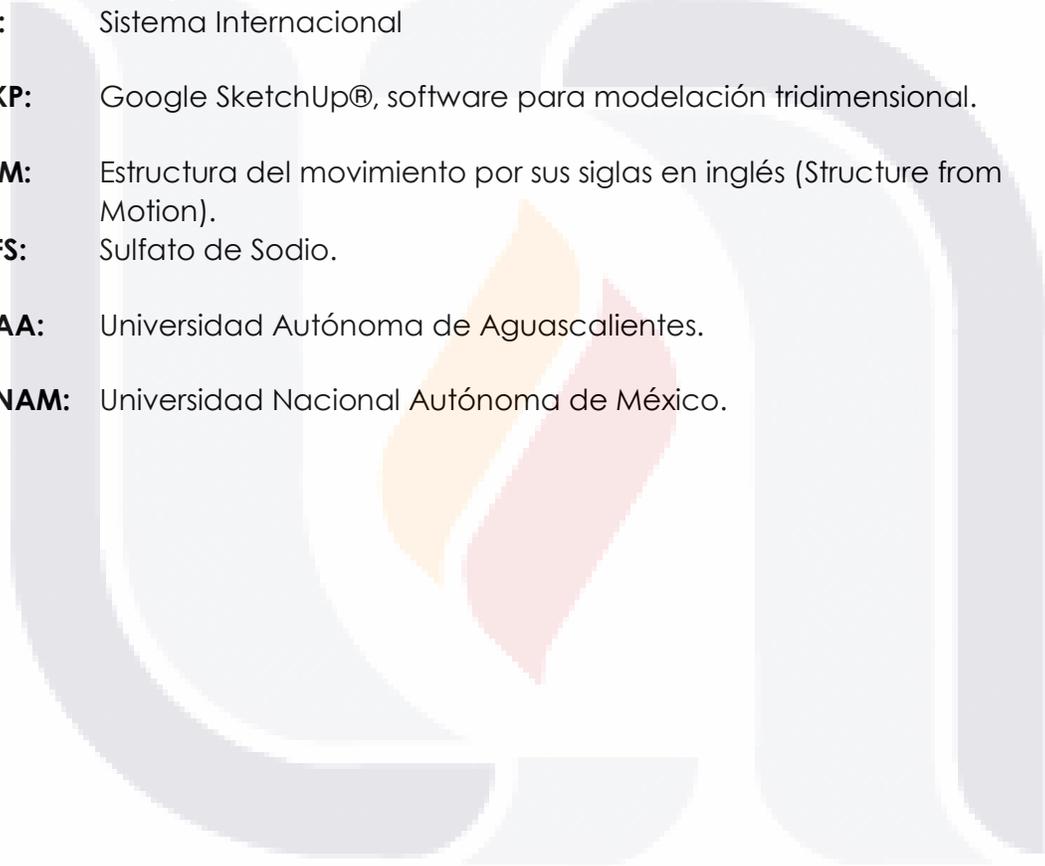
Ilustración 30 Ciclo para cristalización de SFS..... 54

| | |
|--|----|
| Ilustración 31 Tres ciclos de cristalización para un periodo de registro | 56 |
| Ilustración 32 Propuesta original de probeta | 58 |
| Ilustración 33 Prueba piloto, águila para modelación | 59 |
| Ilustración 34 Comparativa de modelación por ambo software | 60 |
| Ilustración 35 Color y textura de las cinco probetas..... | 61 |
| Ilustración 36 Registro del estado original de cada muestra | 63 |
| Ilustración 37 Gráfica ilustrativa cronología del deterioro acelerado | 65 |
| Ilustración 38 Estudio fotográfico completo..... | 66 |
| Ilustración 39 Estudio Fotográfico, número de piezas..... | 67 |
| Ilustración 40 Estudio Fotográfico, armado 1 | 68 |
| Ilustración 41 Estudio Fotográfico, armado 2 | 69 |
| Ilustración 42 Estudio Fotográfico, armado 3 | 70 |
| Ilustración 43 Estudio Fotográfico, ubicación de puntos de apoyo..... | 71 |
| Ilustración 44 Estudio Fotográfico, puntos de apoyo..... | 71 |
| Ilustración 45 Estudio Fotográfico, giro del objeto | 72 |
| Ilustración 46 Estudio Fotográfico, altura de cámaras | 73 |
| Ilustración 47 Flujo de foto-modelación según..... | 74 |
| Ilustración 48 Prueba piloto de foto-modelación..... | 74 |
| Ilustración 49 Flujo de Foto-modelación y escalado, propuesto | 75 |
| Ilustración 50 Foto- modelación, paso 1 | 76 |
| Ilustración 51 Foto- modelación, paso 2..... | 77 |
| Ilustración 52 Foto- modelación, paso 3..... | 78 |
| Ilustración 53 Foto-modelación, paso 4..... | 79 |
| Ilustración 54 Foto-modelación, paso 5..... | 80 |
| Ilustración 55 Foto-modelación, paso 6..... | 81 |
| Ilustración 56 Foto-modelación, paso 7 | 82 |
| Ilustración 57 Foto-modelación, paso 8..... | 83 |
| Ilustración 58 Foto-modelación, paso 9..... | 84 |
| Ilustración 59 Foto-modelación, paso 10..... | 85 |
| Ilustración 60 Foto-modelación, paso 11 | 86 |
| Ilustración 61 Foto-modelación, paso 12..... | 87 |

| | |
|---|-----|
| Ilustración 62 Aspecto final de las muestras..... | 92 |
| Ilustración 63 Comparación de volumen por periodos: piedras, probeta 1..... | 93 |
| Ilustración 64 Comparación de volumen por periodos: piedras, probeta 2..... | 93 |
| Ilustración 65 Comparación de volumen por periodos: piedras, probeta 3..... | 94 |
| Ilustración 66 Comparación de volumen por periodos: piedras, probeta 4..... | 94 |
| Ilustración 67 Comparación de volumen por periodos: piedras, probeta 5..... | 94 |
| Ilustración 68 Comparativa del peso obtenido por las técnicas, probeta 2..... | 95 |
| Ilustración 69 Comparativa del peso obtenido por las técnicas, probeta 1..... | 95 |
| Ilustración 70 Comparativa del peso obtenido por las técnicas, probeta 4..... | 96 |
| Ilustración 71 Comparativa del peso obtenido por las técnicas, probeta 5..... | 96 |
| Ilustración 72 Comparativa del peso obtenido por las técnicas, probeta 3..... | 96 |
| Ilustración 73 Captura de pantalla, modelación por APS..... | 99 |
| Ilustración 74 Problemática con tipología y aberturas del mallado..... | 100 |
| Ilustración 75 Reparación de malla automática por APS..... | 100 |
| Ilustración 76 Monitoreo del volumen de las piedras por etapas..... | 101 |
| Ilustración 77 Seguimiento del peso de las piedras por etapas..... | 102 |
| Ilustración 78 El cambio de la densidad en las muestras..... | 103 |
| Ilustración 79 Diferencia volumétrica porcentual entre metodologías..... | 104 |
| Ilustración 80 Error del peso propio estimado por fuentes consultadas..... | 105 |

ACRÓNIMOS

- ASTM:** Sociedad Americana para Pruebas y Materiales, por sus siglas en inglés American Society for Testing and Materials.
- APS:** Agisoft PhotoScan®, software de modelación mediante fotogrametría.
- ARM:** Autodesk Remake®, software de modelación mediante fotogrametría.
- EN:** Norma Europea estandarizada para la resistencia del envejecimiento acelerado en piedras EN 12370 standard.
- SI:** Sistema Internacional
- SKP:** Google SketchUp®, software para modelación tridimensional.
- SfM:** Estructura del movimiento por sus siglas en inglés (Structure from Motion).
- SFS:** Sulfato de Sodio.
- UAA:** Universidad Autónoma de Aguascalientes.
- UNAM:** Universidad Nacional Autónoma de México.



RESUMEN

Con el fin de medir el peso propio de elementos constructivos de piedra cuya configuración volumétrica es prácticamente imposible de registrar por métodos convencionales, se plantea utilizar una técnica de digitalización tridimensional mediante fotogrametría de corto rango, complementándola con fuentes teóricas del peso específico para los diferentes tipos de piedras, obteniendo por métodos indirectos, el valor del peso propio.

Para ello, se compara la metodología propuesta contra métodos convencionales de medición en laboratorio, consiguiendo una comparativa para la validación. Para desarrollarlo se utiliza un conjunto de muestras de piedra, cuyo relieve se modifica gradualmente para analizar la certeza de la técnica.

Para llevar a cabo la experimentación se requiere de diversos procesos. Por un lado, está la técnica de medición convencional, que se basa en el principio de Arquímedes para calcular el volumen y la densidad, mediante el registro del peso seco, peso saturado y peso sumergido. Que se contrapone a la técnica de fotogrametría que consta de la captura de 48 imágenes y un procesamiento virtual para la medición del volumen.

Para analizar la certeza de la metodología, se implementa un proceso de deterioro acelerado sobre las muestras de piedra, el cual consiste en la cristalización de sales a una concentración del 12%, generando una degradación controlada que produce superficies de forma libre.

Como resultado se demuestra que la fotogrametría tiene una precisión aceptable para los registros de volumen, mientras que los datos teóricos para el peso específico no cuentan con la caracterización suficiente, que diferencie la densidad de las múltiples rocas que están delimitadas como tobas, por lo cual la medición indirecta utilizando la metodología aquí propuesta, presenta diferencias considerables respecto a las reales.

Palabras clave: Peso propio, fotogrametría, densidad, piedra, edificios patrimoniales.

ABSTRACT

In order to quantify the own weight of stone construction elements whose volumetric configuration is practically impossible to register by conventional methods, it is proposed to use a three-dimensional digitalization technique using short-range photogrammetry and complement it with theoretical sources of specific weight for the different types of stones, obtaining by indirect methods, the value of own weight.

For this, the proposed methodology is compared against conventional methods of laboratory measurement, obtaining by this way a comparison for validation. To develop it, it's necessary to use a set of stone samples; the relief is gradually modified to analyze the certainty of the indirect technique.

To carry out the experimentation requires several processes. On the other hand, there is a conventional measurement technique, which is based on Archimedes' principle for the quantification of volume and density, by recording dry weight, dry saturated surface weight and submerged weight. That is opposed to the technique of photogrammetry that consists of the capture of 48 images and a virtual processing for volume quantification.

To analyze the accuracy of the methodology, an accelerated deterioration process is implemented on the stone samples, which consists in the crystallization of salts at a concentration of 12%, achieving a controlled degradation that generates free-form surfaces.

As a result, it is demonstrated that photogrammetry has an acceptable precision for the quantification of volume, while the theoretical data for the specific weight do not count with enough characterization, which differentiates the density of the multiple rocks that are delimited as tuff, for which reason the indirect measurement using the methodology proposed here, presents considerable differences with respect to the real ones.

Key words: Own weight, photogrammetry, density, stone, heritage buildings.

CAPÍTULO

1

INTRODUCCIÓN

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Prólogo

El cálculo del peso propio de elementos constructivos se obtiene mediante fórmulas geométricas, considerando el volumen del objeto y la masa del elemento de estudio se obtiene dicho valor, en base a muestras del material o fuentes teóricas que pueden ser tablas de peso específico o densidad.

Para identificar el peso propio de un elemento constructivo se deberá conocer el tipo de piedra con el cual fue fabricado. Las piedras están diferenciadas en tres grandes familias: ígneas, sedimentarias y metamórficas (Yam, Solís, Rómel, & Moreno, 2006), que a su vez cuentan con distintas subcategorías por su color y composición. Una vez identificada la piedra se podrá consultar su densidad o determinarla mediante análisis experimentales de campo y así al multiplicarla por el volumen del elemento se obtendrá el peso de éste.

El problema de los elementos constructivos estructurales u ornamentales, fabricados en piedra, radica en la complejidad de su geometría, pues dichos elementos por su naturaleza, intención del diseño y/o desgastes por intemperismo no presentan formas geométricas regulares, generando el problema de medición directa, para lo cual la física general sugiere que: para un sólido de forma irregular, su volumen puede ser obtenido calculando el volumen de líquido desalojado por el cuerpo en un recipiente graduado, siempre y cuando el cuerpo no se disuelva y tenga una densidad mayor a la del líquido en el cual se sumerge (El Cid, 2014). La metodología anterior, no es opción viable para elementos fijos, frágiles o de grandes dimensiones. Por lo que en esta tesis se evalúa una metodología que emplea la fotogrametría como posible solución al problema planteado.

La fotogrametría comprende diversas aplicaciones, las cuales dependen de la captura de fotografías, independientemente del proceso mediante el cual se obtengan o la cantidad de las mismas, la finalidad es siempre obtener medidas

partiendo de la información que la fotografía presenta, relacionándola con una escala determinada.

La modelación mediante fotogrametría digital es una opción a considerar para llevar a cabo el proceso de la obtención del volumen, dado que “ahora se puede considerar como una tecnología alternativa competitiva debido a la evolución de vanguardia en su automatización en la última década” (Janvier, Brunetaud, Beck, Janvier, & Mukhtar, 2016), además una de las ventajas de utilizar este método es la representación completa de los objetos, al obtener información objetiva, instantánea, cómoda y económica, dado que para su aplicación no se requiere emplear aparatos especializados (Figueroa & Pacheco, 2016).

Por lo tanto la finalidad de este trabajo es proponer una metodología que sea capaz tanto de proporcionar el volumen de elementos constructivos y ornamentales, de configuraciones geométricas complejas, que no pueden someterse a mediciones directas para su análisis; y a la vez que este proceso sea de utilidad para definir el peso propio de los elementos, identificando de entre la documentación teórica y práctica cual es la densidad correspondiente a algunas de las rocas del estado de Aguascalientes. Con la finalidad de que los resultados se aproximen a la realidad, se llevarán a cabo comparativas mediante métodos convencionales en probetas y/o esculturas que pueden ser manipuladas fácilmente, sometiéndolas a desgastes graduales mediante soluciones salinas, para con ello registrar la capacidad y precisión del método.

De manera paralela al desarrollo de esta metodología propuesta, se evalúa el comportamiento de la densidad de las piedras, pues al ser sometidas al desgaste por procesos químicos, lo cual representa una forma de acelerar el proceso de intemperización en las piedras, según (Angeli, Hébert, Menéndez, David, & Bigas, 2010) “Las sales, y particularmente sulfato de sodio (SFS), son conocidos por ser algunos de los agentes más destructivos de piedras porosas, hormigón o ladrillo a la intemperie”. Dicho proceso modifica la composición volumétrica de las rocas porosas, al infiltrarse sulfatos y reaccionar dentro de ellas, lo cual a pequeña escala supone una alteración significativa a los resultados obtenidos.

1.2. Objetivo General.

Proponer y evaluar una metodología para determinar el peso propio de los elementos constructivos y ornamentales en edificios patrimoniales, empleando fotogrametría digital de corto rango. Mediante un estudio experimental utilizando muestras de piedra a una escala manipulable que permita estandarizar el proceso y así identificar fácilmente los parámetros que afectan la modelación y cálculo del peso propio del elemento.

1.3. Objetivos Particulares

- A. Buscar y documentar las técnicas y conocimiento existentes al contexto temporal en que se desarrolla esta tesis.
- B. Definir un proceso estandarizado para medir el volumen de elementos de piedra delimitados por formas libres e irregulares implementando fotogrametría de corto rango.
- C. Identificar distintas fuentes documentales y experimentales para determinar la densidad de las piedras, comúnmente utilizadas en la construcción, para de ellas definir cuál presenta los datos más certeros respecto al peso real de las piedras implementadas en esta investigación.
- D. Identificar el margen de error que proporciona la metodología propuesta, comparándola con procesos tradicionales en laboratorio.
- E. Comparar la densidad de piedras deterioradas por procesos físico-químicos, contra la de piedras sanas.
- F. Evaluar la presencia de alteraciones en la densidad de las piedras expuestas al proceso de intemperismo acelerado mediante soluciones salinas.

1.4. Alcances

Utilizando el método de fotogrametría mediante aplicaciones Structure from Motion (SfM), se plantea una técnica para obtener el volumen de elementos constructivos y ornamentales fabricados en piedra con formas libres o irregulares, el cual sea de utilidad para calcular el peso propio del elemento, utilizando el peso específico de la piedra que los compone, según fuentes bibliográficas o pesos obtenidos de manera directa en laboratorio. Con la finalidad de comparar ambos procesos y evaluar cual conduce a un resultado más certero del peso total del elemento a estudiar, con el objetivo de calcular las cargas muertas de elementos constructivos y ornamentales fabricados en piedra de configuraciones irregulares o relieves de forma libre.

Se experimenta con piedras procedentes de bancos y talleres propios del estado de Aguascalientes, México. Todos los ensayos se realizan en el laboratorio de la Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA), los resultados están sujetos a la calidad de los modelos que genera actualmente el software que lleva a cabo la fotogrametría, evaluando así la metodología propuesta en el contexto temporal en que se desarrolla esta investigación experimental.

Se observa también el comportamiento de la densidad de las muestras, tras someter a las piedras al desgaste con procesos químicos, con la finalidad de identificar si este método de aceleración del deterioro de la piedra afecta los resultados obtenidos.

1.5. Justificación

El patrimonio arquitectónico debe conservarse y transmitirse a futuras generaciones, por la necesidad de conservar los valores culturales e históricos que identifican a un pueblo o a un conjunto social. Son los monumentos y los bienes culturales en general los que mejor identifican a una sociedad, explican su trayectoria histórica y hacen progresar a dicha sociedad o civilización. La conservación del patrimonio arquitectónico es cuestión de identidad social, aun así en ocasiones no consigue el valor que debería tener ante las autoridades gubernamentales, lo cual conlleva a conflictos de interés que pone en peligro la integridad de los bienes inmuebles (Consejo Vasco de Cultura, 2016).

La integridad del patrimonio arquitectónico depende en gran medida de su comportamiento estructural que le da estabilidad y lo mantiene en pie a lo largo de su existencia, sin embargo el patrimonio arquitectónico por su naturaleza antigua, presenta modificaciones ocasionadas por el paso del tiempo, estas modificaciones en su geometría pueden darse por efecto de la gravedad y vibración, además de otros factores naturales que deterioran las construcciones y de igual manera son acumulativos como los generados por "viento, lluvia, exposición al sol, humedad, discontinuidades en el terreno, sismos, entre otros, podrían contribuir en la degradación y pérdida de propiedades de los materiales de la construcción, lo que podría poner en riesgo su estabilidad estructural" (Navarro & Pacheco, 2013).

Dado que en la actualidad los métodos para calcular las cargas muertas en edificaciones patrimoniales, sobre todo en los cuerpos de formas irregulares como son las esculturas y la ornamentación propia de elementos constructivos son ineficientes, por lo que es necesario encontrar una alternativa o una metodología que ayude a estimar las cargas para dichos elementos, es por ello que en este trabajo se desarrolla una propuesta de metodología la cual es evaluada para medir su precisión.

1.6. Hipótesis

Es posible calcular el volumen de elementos ornamentales de forma libres fabricados en piedra a través de la fotogrametría de corto rango, con lo cual podrá calcularse el peso propio de dicho elemento, identificando de entre la documentación teórica y práctica cual es la densidad correspondiente a algunas de las rocas del estado de Aguascalientes. Verificando su margen de error mediante la modelación del desgaste controlado por soluciones químicas que aceleran la intemperización en la piedra y simulan el deterioro que se genera en los elementos expuestos al medio ambiente.

1.7. Metodología

Para el desarrollo general de esta investigación, se plantea una serie de pasos con los cuales se cubren la totalidad de esta investigación:

- A. Tras el planteamiento del problema, que delimita los objetivos y alcances de la investigación, se desarrolla esta metodología con la finalidad de poner a prueba las hipótesis.
- B. Para identificar la situación contextual al estado del conocimiento, referente a las técnicas relacionadas y de utilidad, para desarrollar la medición indirecta que aquí se propone, se recurre a libros, artículos científicos, ponencias y medios electrónicos.
- C. Al evaluar los resultados que aportan dichas investigaciones, se justifica la intervención para esta investigación, así como la factibilidad técnica de su desarrollo.
- D. Estas fuentes consultadas requieren la delimitación de algunos principios conceptuales, los cuales permiten comprender las bases y fundamentos teóricos que de igual manera dan fundamento a esta experimentación.
- E. El desarrollo de esta, se basa en la recopilación y delimitación de los datos originales de las probetas, así como el monitoreo periódico de algunas cualidades físicas tras la aplicación del método destructivo.

- F. Para llevar a cabo dicho monitoreo se establece un ciclo de trabajo, basado en el principio de Arquímedes, complementado por fotogrametría, que esta última requiere de un estudio fotográfico.
- G. La recopilación de los resultados, conforman la metodología de medición indirecta aquí planteada, así como los datos que permiten evaluar la certeza de esta misma.
- H. Realizando la comparativa de los resultados obtenidos por las dos técnicas utilizadas en la experimentación, se realiza la discusión de resultados, donde se aprecian las variaciones relativas entre ellas.
- I. De esta manera, se llega a las conclusiones que delimitan la validación de las hipótesis planteadas.

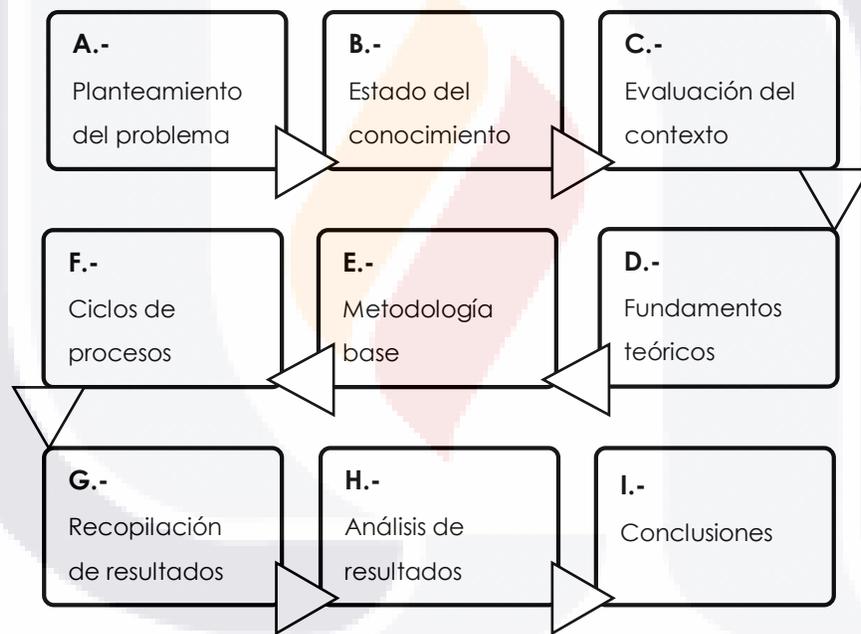


Ilustración 1 Diagrama de la metodología general

CAPÍTULO

2

ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

2. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

2.1. La relación del peso propio y densidad de los materiales

La asignación o estimación del peso propio de elementos de piedra, como el de cualquier otro material, está relacionado con su densidad, que puede obtenerse de la siguiente manera: para objetos sólidos cuya densidad es mayor a la del agua, se determina primero su masa, en una balanza que esta graduada en gramos (g) para el SI, posteriormente su volumen; éste se puede obtener a través del cálculo para objetos de forma geométrica regular u ortogonal, el otro método es sumergirlo en un recipiente con agua calibrado y midiendo la diferencia de altura que alcanza el líquido. La densidad es el resultado de dividir la masa (kg) por el volumen (m³) (El Cid, 2014).

Para simplificar el proceso de medición de la densidad suele implementarse una referencia en base a la densidad del agua, empleando “otra unidad de medida el gramo por centímetro cúbico (g/cm³). Todo lo que tenga una densidad mayor que 1 (uno) se hundirá en el agua, y lo que tenga densidad menor que uno (es decir cero coma...) flotará” (El Cid, 2014). Esto se conoce como “densidad relativa que es la relación entre la densidad de un cuerpo y la densidad del agua a 4 °C, que se toma como unidad. La densidad relativa de la sustancia equivale numéricamente a su densidad expresada en gramos por centímetro cúbico.

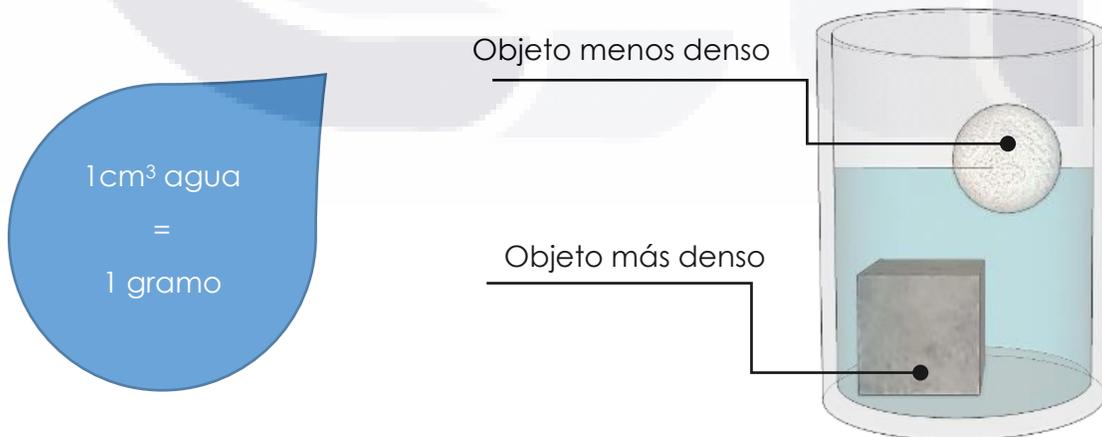


Ilustración 2 Densidad relativa

En cuanto a las edificaciones antiguas se refiere, existen diferentes materiales o componentes constructivos (ej. muro de ladrillo y juntas de mortero) que están catalogados y registrados en tablas donde se representan como materiales constantes u homogéneos, datos que pueden ser aplicables para ese material en cualquier sitio. Por ejemplo, un caso de estudio estructural, presenta una tabla de propiedades mecánicas, donde se hace referencia a un peso volumétrico para un enladrillado de 2200 Kg/m³, para la cantera 1800 Kg/m³ (Navarro & Pacheco, 2013).

Tratándose de rocas naturales, existen datos basados en normativas, por ejemplo la ASTM (ASTM, 2015), donde se especifica la densidad para cada tipo de piedra en particular, así como también fuentes que se dedican a la comercialización de productos mineros no metálicos (Euroimportadora, 2016) y universidades que utilizan esta forma de cuantificar la masa volumétrica para distintos fines (Universidad de Granada, 2017):

Tabla 1 Peso específico para piedras según ASTM (ASTM, 2015)

| MATERIAL | DENSIDAD lb/ft³ | DENSIDAD KG/M³ |
|-----------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| ARENISCA | 145 | 2,323 |
| CALIZA | 155 | 2,483 |
| PIZARRA | 170 | 2,723 |
| GRANITO | 180 | 2,883 |

Tabla 3 Peso específico para piedras (Euroimportadora, 2016)

| MATERIAL | DENSIDAD KG/DM³ | DENSIDAD KG/M³ |
|---------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| ARENISCA NATURAL | 2.65 | 2,650 |
| ARENISCA ARTIFICIAL | 2.8 | 2,800 |
| BASALTO | 2.98 | 2,890 |
| CALIZA | 2.85 | 2,850 |

Tabla 2 Peso específico para piedras (Universidad de Granada, 2017)

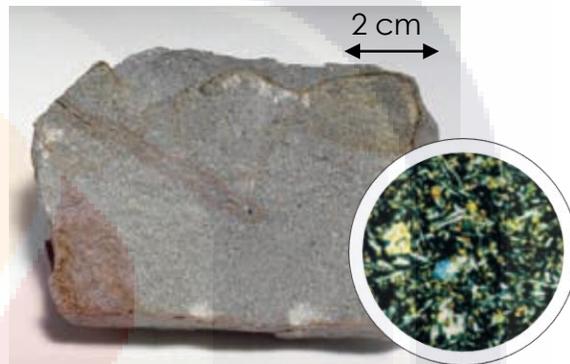
| ROCA | POROSIDAD | DENSIDAD KG/M³ |
|-------------|------------------|----------------------------------|
| GRANITO | 0.15-1.5 | 2600-2800 |
| RIOLITA | 4.0-6.0 | 2400-2600 |
| ARENISCA | 5.0-25.0 | 2000-2600 |
| LUTITA | 10.0-30.0 | 2000-2400 |
| CALIZA | 5.0-20.0 | 2200-2600 |
| LADRILLO | | 1600-1800 |

Ahora bien, para identificar las piedras es necesario conocer su origen y para ello las diferentes clasificaciones que existen y como identificarlas, se puede tomar de referencia una tabla donde se presentan las familias de roca, origen, nombre, textura y estructuración, aspectos visuales que ayudan a diferenciarlas (Tabla 4).

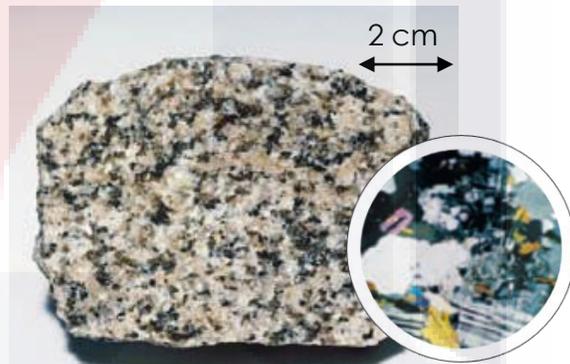
Tabla 4 Familias de rocas, extracto de (Yam, y otros, 2006)

| Familia | Tipo y origen | Nombre | Textura | Estructura |
|--------------|---------------|----------|----------------------|-----------------|
| Ígneas | Volcánica | Tobas | Afanítica, porfídica | Estratificación |
| | | Riolita | Afanítica, porfídica | Domos |
| | | Andesita | Afanítica, porfídica | Derrames |
| Sedimentaria | Clástica | Arenisca | Grano ≤ 2 mm | Estratos |
| | No Clástica | Lutita | Grano ≤ 0.2 mm | Laminas |
| | | Caliza | Cristalina | Estratos |

Textura afanítica se caracteriza por sus granos finos, los cristales que la componen son tan pequeños que no se distinguen sus minerales



Textura fenerítica compuesta por cristales o granos de gran tamaño, aproximadamente del mismo diámetro, que hacen notar los diferentes minerales.



Textura porfídica, cuenta con diferentes tamaños de granos o cristales, en ocasiones los más finos pueden denominarse como la pasta que soporta los mayores.

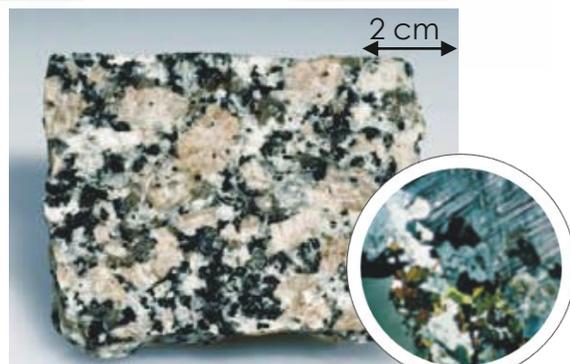


Ilustración 3 Texturas que caracterizan a las rocas ígneas (Tarbuck & Lutgens, 2005)

No obstante, se debe considerar que las rocas por su naturaleza orgánica presentan diferentes densidades, incluso para una misma región donde se haya formado el material (Salomón, Lauro, & Espinosa, 2003), un ejemplo claro está representado en los registros derivados de una investigación desarrollada por Salomón en Yucatán, México. En la (Tabla 5) se presenta un fragmento del análisis realizado a una población de 122 piedras calizas.

Tabla 5 Densidad variable de piedras caliza (Salomón, y otros, 2003)

| n=122 | Peso Volumétrico g/cm³ | Absorción % |
|---------------------|--|--------------------|
| media | 2.11 | 7.11 |
| mediana | 2.29 | 3.58 |
| moda | 2.44 | 2.4 |
| Desviación Standard | 0.377 | 7.03 |
| Varianza | 0.14 | 49.36 |

Por lo tanto, es factible identificar los diferentes tipos de rocas mediante su apariencia, con lo cual es posible consultar en fuentes teóricas un peso volumétrico para las piedras que conforman los elementos constructivos del patrimonio arquitectónico y así asignar las cargas muertas correspondientes a las geometrías que se sometan al análisis del comportamiento estructural.

2.2. La geometría dentro del análisis estructural

Los análisis estructurales sobre el patrimonio arquitectónico actualmente se caracterizan por utilizar formas geométricas regulares de fácil modelación dentro de los software especializados de análisis por elemento finito, como es Sap 2000 o SolidWorks. Estos métodos de modelación estructural son implementados en algunos casos de estudio como por ejemplo:

David Villegas Cerrado quien en 2012 en su tesis para obtener el grado de maestro en estructuras realizo el análisis estructural del patrimonio histórico en la torre del homenaje de la alhambra. Donde se muestra el replanteo de la construcción a estudiar utilizando formas geométricas regulares omitiendo en su totalidad la existencia de elementos ornamentales y/o desgastados propios del edificio (Cerrado & Montes, 2012).



Ilustración 4 Torre del Homenaje modelo del exterior y sistema interior (Cerrado & Montes, 2012).

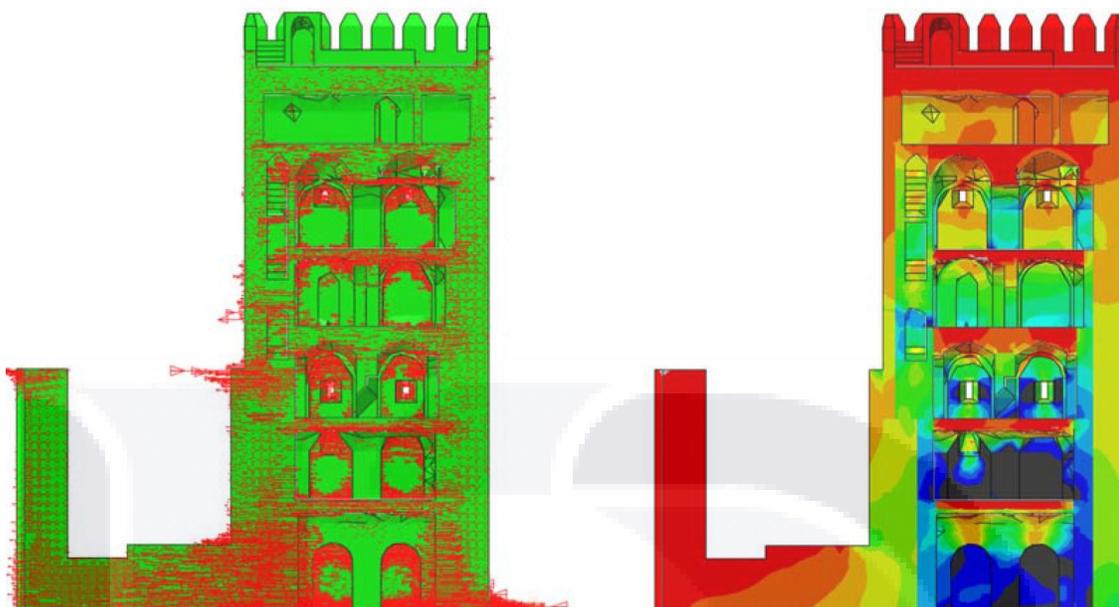


Ilustración 5 Situación tensional de la torre, vista en sección (Cerrodo & Montes, 2012)

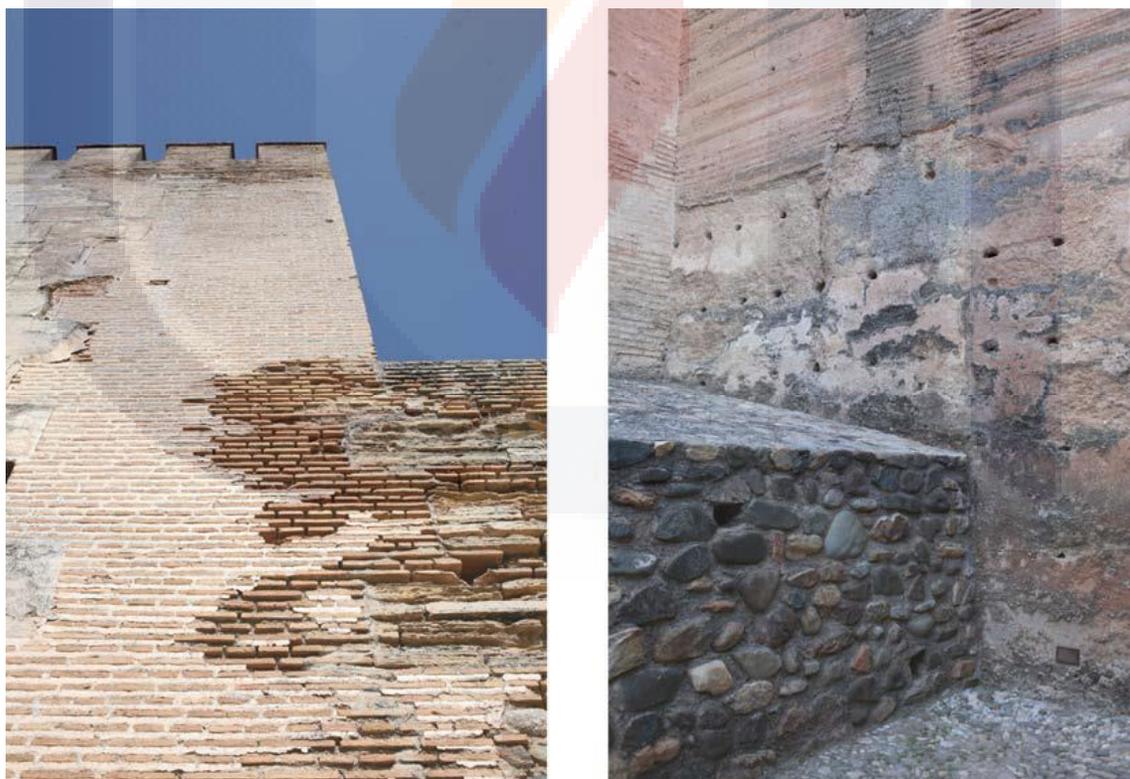


Ilustración 6 Muros deteriorados sin considera en el análisis de la torre (Cerrodo & Montes, 2012)

En 2013, Marisol Navarro Hernández presenta un caso de estudio para obtener el grado de maestra en Ingeniería civil en el área de estructuras, con el título “Levantamiento geométrico y de daños del templo de San Antonio y análisis estructural de la situación actual”, donde es apreciable la modelación geométrica de los elementos estructurales así como del edificio en conjunto, dejando de lado la decoración, ornamentas y elementos esculturales que representan cargas muertas y en conjunto pueden llegar a ser representativas para el análisis estructural (Navarro & Pacheco, 2013).

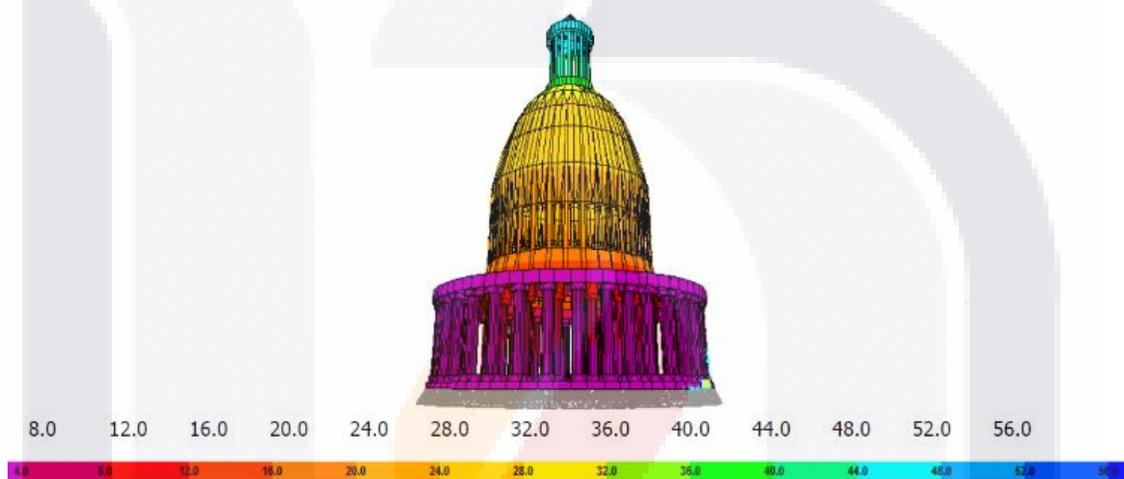


Ilustración 7 Deformación de la cúpula idealizada del templo San Antonio (Hernández, 2013)



Ilustración 8 Estado real de la cúpula del Templo San Antonio (Hernández, 2013)

Para el año 2018 se tiene un análisis estructural, que utiliza la técnica del escáner laser, obteniendo una geometría minuciosa respecto al estado actual de las columnas que soportan una antigua cisterna, dicho caso de estudio está presentado en un artículo por (Almac, Pekmezci, & Ahunbay, 2018).



Ilustración 9 Columnas decadentes de la antigua cisterna en Turquía (Umut Almac, 2018)

Los resultados obtenidos por el autor sobre el conjunto de columnas deterioradas, demuestran que existe una diferencia importante entre los pares de modelos obtenidos mediante diferentes técnicas, pues “el esfuerzo máximo en compresión aumentó notablemente en las columnas en comparación con los modelos geoméricamente idealizados” (Almac, Pekmezci, & Ahunbay, 2018).

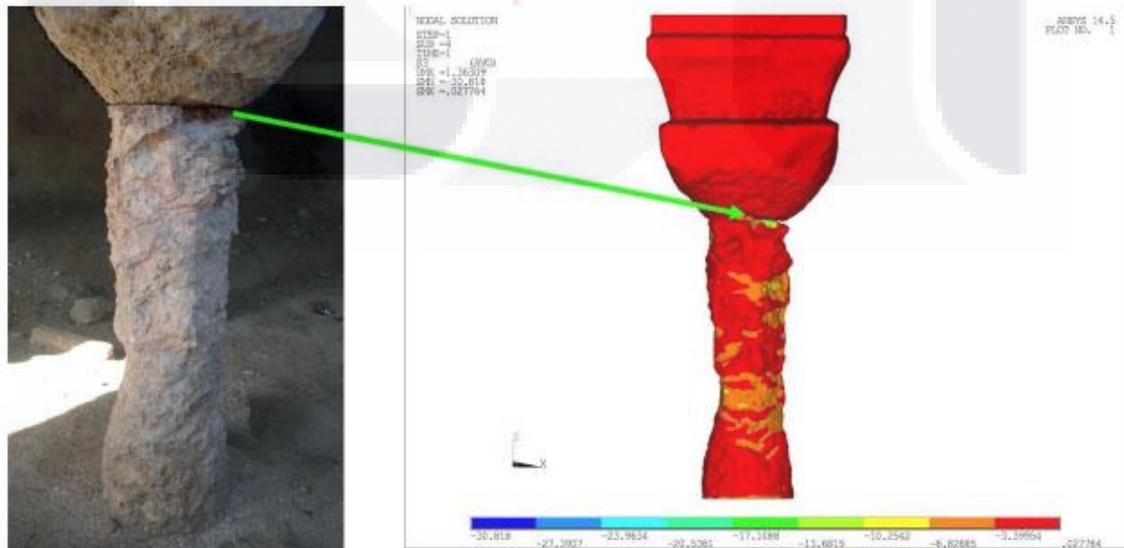


Ilustración 10 Análisis estructural, columna modelada mediante escáner laser (Almac, y otros, 2018)

Ahora bien, en los primeros casos de estudio se muestran modelos idealizados, con los cuales se llevan a cabo los análisis del comportamiento estructural de las edificaciones, sin embargo, el caso de estudio realizado para las columnas de la cisterna, demuestra que existen verdaderas diferencias al utilizar la geometría correspondiente al estado real de los objetos. Es por ello que en esta investigación se utiliza un deterioro acelerado en piedras y así simular estos relieves complejos, que se asemejan al deterioro que pueden presentar los elementos constructivos hechos de piedra.



2.3. La aceleración del deterioro en rocas

Los procesos para simular el deterioro o intemperización de las rocas pueden ser diversos: entre ellos puede implementarse impactos físicos, erosión acelerada por fluidos a presión (agua o arenas); así como también procesos químicos, que pueden ser regulados y acelerar el decaimiento de las piedras de una manera controlada, y así evitar pérdidas significativas de las muestras.

Se sabe que las sales, y particularmente el sulfato sódico, están entre los agentes más destructivos en piedras porosas, hormigón o ladrillos. El daño depende de la cantidad de sal en la piedra y las características de la red porosa, así como las condiciones ambientales (por ejemplo, temperatura y humedad), si la temperatura es elevada la concentración de sales puede representar un daño indistinto, mientras que a baja temperatura una leve concentración de sal puede devastar grandes proporciones en las muestras de roca (Angeli, y otros, 2010).

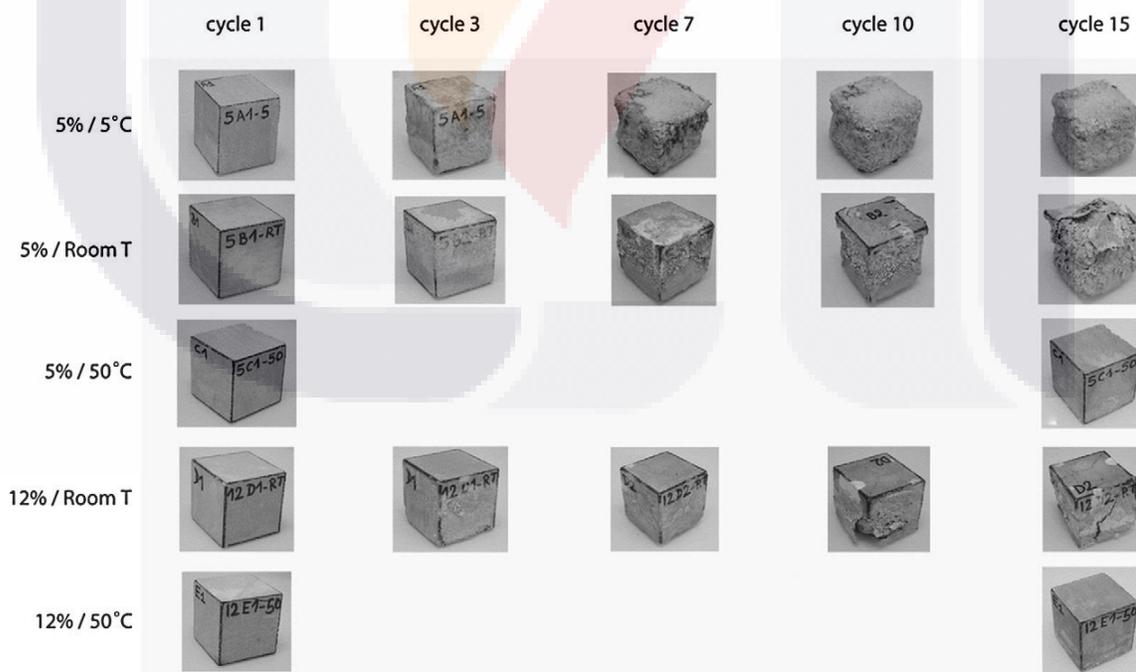


Ilustración 11 El decaimiento de las piedras según temperatura y saturación (Angeli, y otros, 2010)

Esta misma técnica para acelerar el deterioro en las piedras, fue aplicada por (Padilla, Pacheco, López, & Orenday, 2017) sobre la Catedral Basílica de Aguascalientes, entre algunas otras caracterizaciones se encuentra el análisis para la resistencia de los muros de piedra ante los ciclos de cristalización, con lo cual obtuvieron un conjunto de gráficos que demuestran como este envejecimiento acelerado ocasiona variaciones en el peso de las piedras en el transcurso de los ciclos.

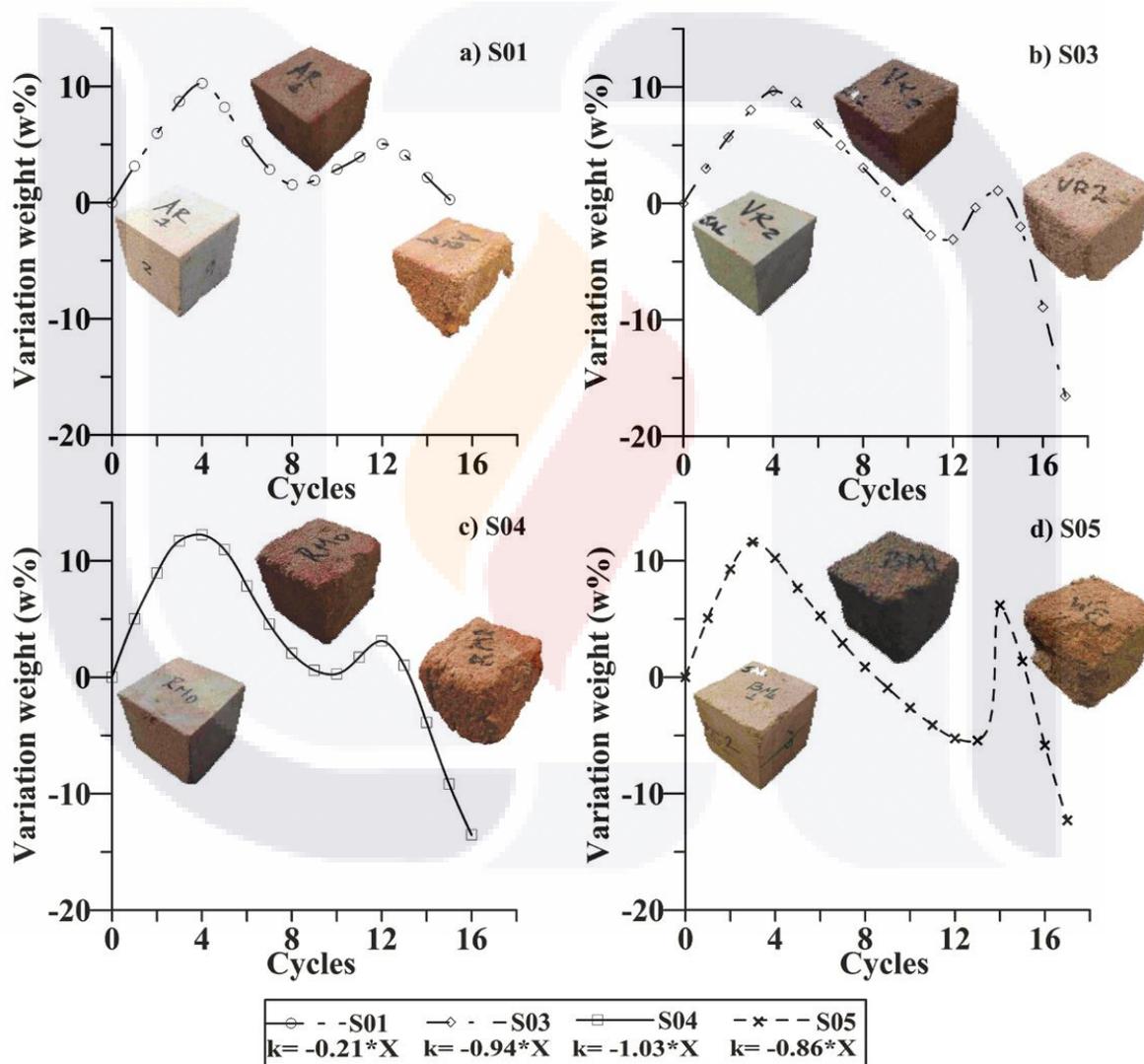


Ilustración 12 Decaimiento de las piedras tras los ciclos de cristalización (Padilla, y otros, 2017).

Algunos casos de estudio implementan “soluciones salinas para recrear ciclos de deterioro sobre piedra caliza “tuffeau”, que es de color blanco, suave y muy porosa ampliamente utilizada en la construcción de castillos en el valle del Loira, Francia. Posteriormente aplican un secado a 105°C dentro de un horno durante una semana” (Janvier, y otros, 2016). Tras diez ciclos del deterioro acelerado las muestras generaron eflorescencia, dicho fenómeno se aprecia en la parte superior de las mismas en forma de cristalizaciones de sal y polvo afectando las dimensiones volumétricas aparentes al formar elevaciones en forma de escamas o crestas sobre la roca.

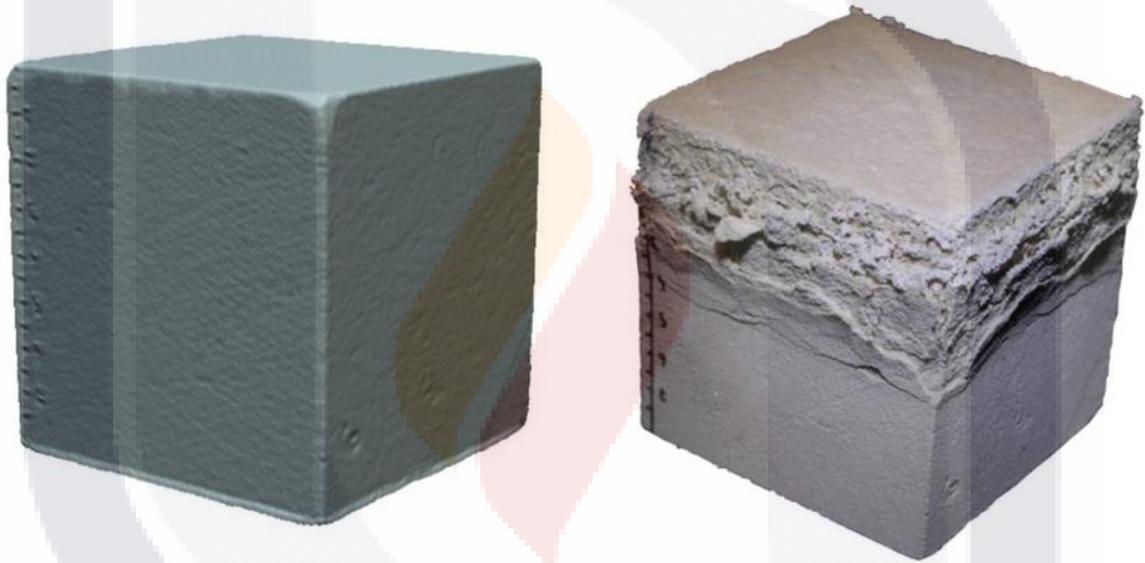


Ilustración 13 Alteración volumétrica de una piedra por eflorescencia (Janvier, y otros, 2016)

Dada la complejidad de las formas que genera el deterioro de las piedras, es prácticamente imposible medir dicho volumen por métodos convencionales en campo, para ello se requieren de técnicas indirectas como lo son las tecnologías de escáner laser o la implementación de fotogrametría de corto rango la cual podría resultar útil dado su bajo costo y facilidad de aplicación.

2.4. Modelación 3D, replanteo de objetos frágiles

Con el objetivo de no dañar elementos frágiles que no están en condiciones para su análisis en laboratorio, sea cualquier tipo de material, se llevan a cabo prácticas de modelación virtual buscando minimizar los daños que la medición directa pueda ocasionar sobre los elementos. A continuación se presentan algunos ejemplos en diferentes entornos:

Desde el año 2000 se registran alternativas para la modelación virtual de elementos frágiles, por ejemplo: El Proyecto Digital Michelangelo: Escaneo 3D de Estatuas Grandes, donde se describe un sistema complejo de hardware y software para digitalizar la forma y color de grandes objetos frágiles. "El sistema emplea telémetros de triangulación láser, láser telemétricos de tiempo de vuelo, cámaras digitales, y una compilación de software para el procesamiento (alineación, fusión y visualización de datos escaneados)" (Levoy, Ginsberg, Shade, y otros, 2015), así como también un amplio grupo de colaboradores de 50 personas conocedoras del proceso durante cinco meses. Los resultados aunque de alta precisión necesitaron una fuerte inversión y un espacio de almacenamiento de 32 Gb.

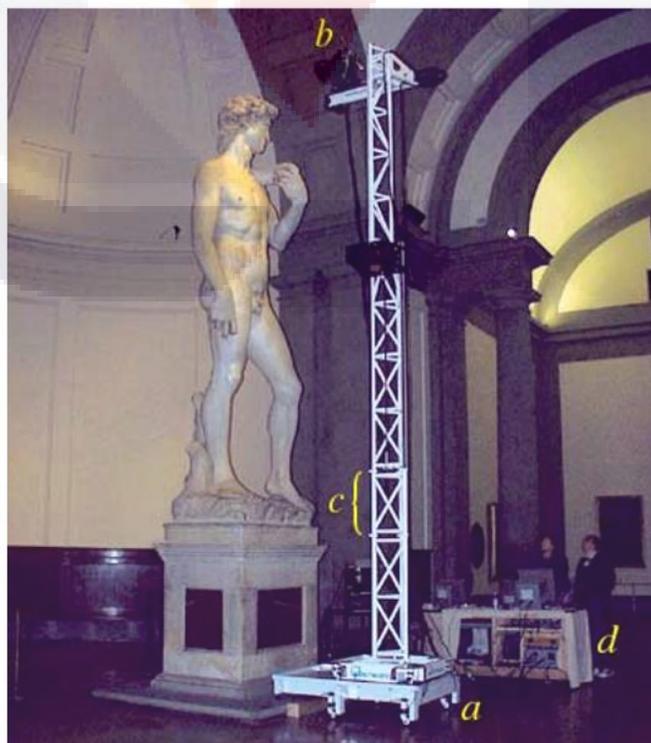


Ilustración 14 Digitalización del Miguel Ángel (Levoy, y otros, 2015)

Aun en probetas de laboratorio hay situaciones en las que el objeto en estudio no puede ser sometido al replanteo directo o con métodos convencionales, de acuerdo con (Janvier, Brunetaud, Beck, Janvier, & Mukhtar, 2016) en su trabajo titulado El potencial de la digitalización laser para describir la degradación de piedra, donde “el uso de modelos 3D realistas permite la descripción de la arquitectura compleja; pero un importante valor añadido a este modelado es que puede ser calculado para extraer características cuantitativas” (Janvier, y otros, 2016), con la finalidad de registrar las elevaciones que genera la fluorescencia en forma de escamas delicadas adheridas en la superficie de la piedra.

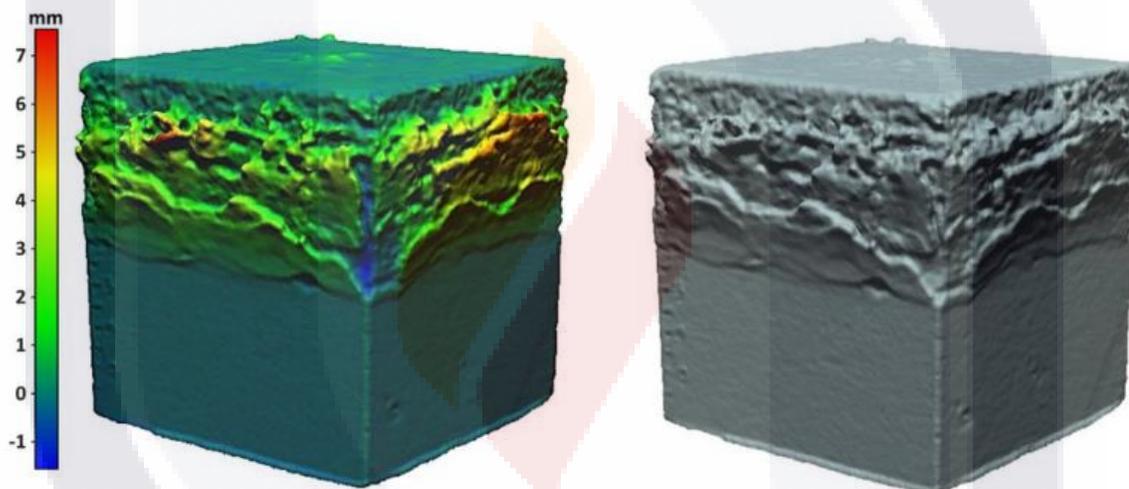


Ilustración 15 El potencial del escáner laser (Janvier, 2016)

Con ello se evidencia la precisión milimétrica que el escáner laser representa, no obstante es una técnica que a la fecha tiene un impacto económico representativo, por lo cual se puede optar por recurrir a alternativas más económicas y simples de procesamiento, pues incluso quienes han implementado el escáner laser “consideran la fotogrametría actual como una tecnología alternativa competitiva debido a la evolución de vanguardia en su automatización en la última década (Janvier, y otros, 2016).

2.5. La fotogrametría como un método de replanteo

El concepto parte de un término denominado estereoscopia o algunos autores lo definen mediante sus siglas en inglés SfM (Structure from Motion), que describe el mecanismo visual de los seres vivos para estimar el entorno tridimensional mediante la superposición de un par de imágenes bidimensionales captadas por ambos ojos, también es posible generarla con una secuencia de imágenes cuyo objeto o receptor están en movimiento. Estos dos factores en conjunto o independientes pueden hacer que comprendamos la tridimensionalidad del mundo que nos rodea, principio que es fundamental para el desarrollo de dicho método.

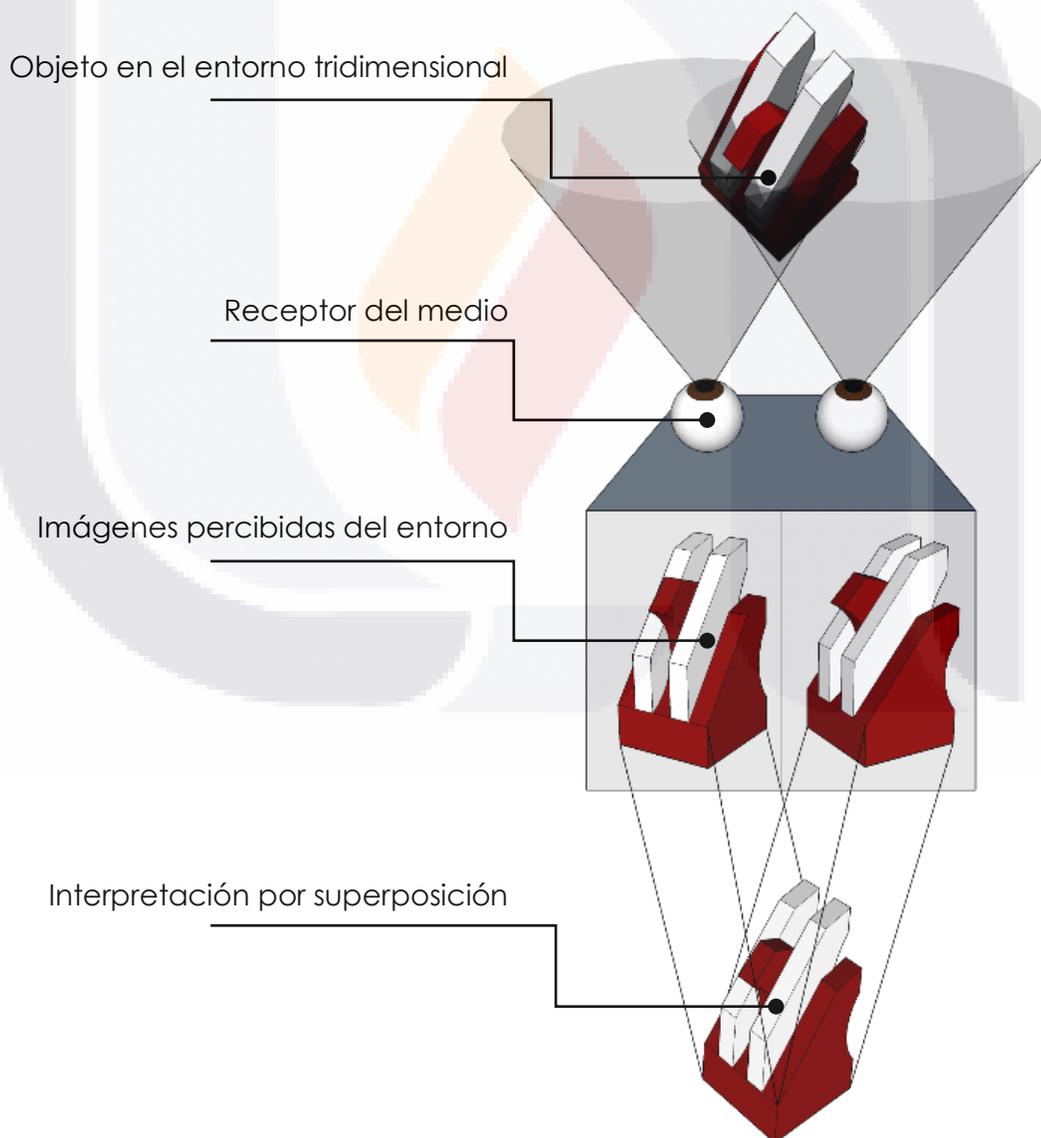


Ilustración 16 Interpretación tridimensional por estereoscopia

La técnica ha evolucionado a lo largo de la historia, sus orígenes inician en 1492 cuando "Leonardo Da Vinci demostró los principios de la proyección óptica, efectuando el bruñido y pulido de lentes, y ya en el siglo XVI existen documentos que muestran la utilización de la llamada cámara oscura. En este mismo siglo Albert Dürer construyó aparatos para dibujar perspectivas y dibujos estereoscópicos, término que fue definido por primera vez como tal en 1600 por Kepler. En este mismo año, Jacopo Chimani realizó a mano el primer par estereoscópico conocido" (Rodríguez & Núñez, 2007).

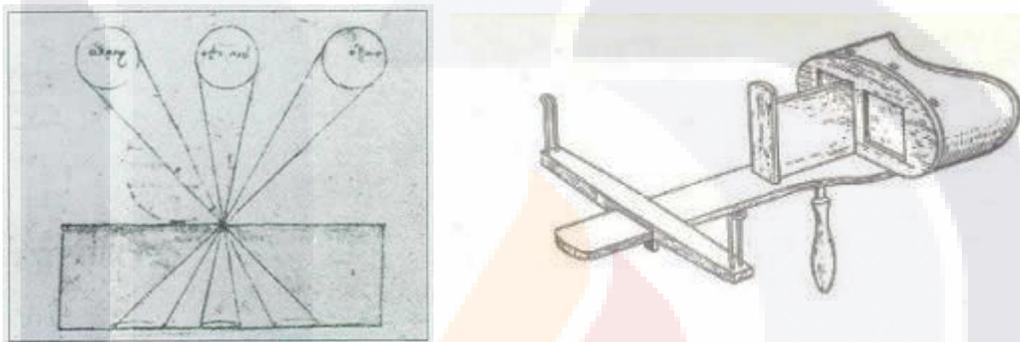


Ilustración 17 Proyección óptica por Da Vinci / Visualizador de pares estereoscópicos

Ya consolidado el término fotogrametría se debe al arquitecto alemán Meydenbauer que a finales del siglo XIX utilizó perspectivas fotográficas para efectuar alzados arquitectónicos. El campo básico de la fotogrametría es la determinación cuantitativa de dimensiones geométricas, dejando la evaluación cualitativa a la fotointerpretación, también conocida como teledetección (Remote Sensing). "El poder trabajar con la visión estereoscópica posibilita que se pueda observar dicho modelo y medir de una forma exacta las líneas, superficies y volúmenes del elemento a levantar" (Rodríguez & Núñez, 2007).



Ilustración 18 Par estereoscópico de imágenes de Nueva York (Monolito, 2018)

Según Lewis Falkingham en 2012, el procedimiento de la fotogrametría automatizada digital, consiste en encontrar los puntos homólogos en todas las fotografías y con ello lograr localizar las posiciones del modelo el cual logra definir la superficie de la cual se trató el modelo. Logrando así hallar la profundidad y sus diferentes características (Figuera & Pacheco, 2016).

Ya en 2013 hacer fotogrametría terrestre se consideraba una herramienta útil para el registro de las características geométricas de objetos de formas complejas. Implementando cámaras digitales de buena calidad de fácil acceso en el mercado, las cuales pueden ser utilizadas junto al software fotogramétrico de calibración y compilación para obtener una apropiada representación geométrica del objeto fotografiado (Jauregui, Jauregui, Chacón, & Vílchez, 2013).

Para el 2015 el avance de los algoritmos en el sector de la "Computer Vision", ha permitido conseguir modelos digitales completos con la textura del color aparente, generalmente de buena calidad en un tiempo razonable. Cabe destacar como "el modelo presenta una gran cantidad de errores geométricos, es decir triángulos más pequeños con respecto a los demás" (Cipriani, Fantini, & Bertacchi, 2015).

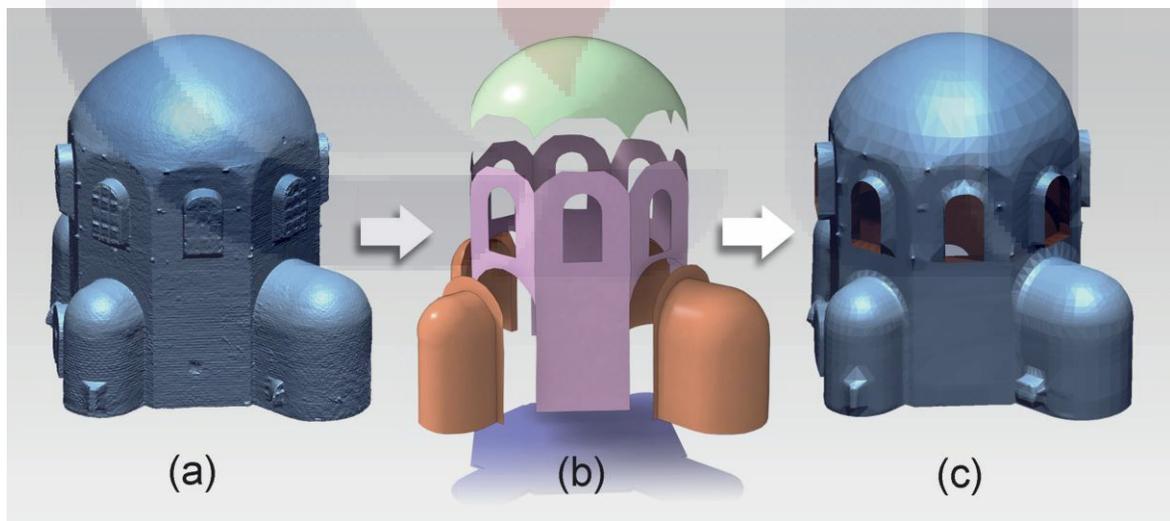


Ilustración 19 Normalización del mallado, interior del Baptisterio Arriano (Cipriani, y otros, 2015)

En este mismo periodo, (Sarsam, Daham, & Ali, 2015) propone utilizar la técnica de fotogrametría de corto rango para registrar y evaluar el deterioro de superficies de asfalto en carreteras, para ello lleva a cabo dicha evaluación por métodos convencionales directos y en campo, para comparar los resultados obtenidos con los proporcionados por la fotogrametría, encontrando con ello un coeficiente de aproximación del 99 y 98 por ciento.

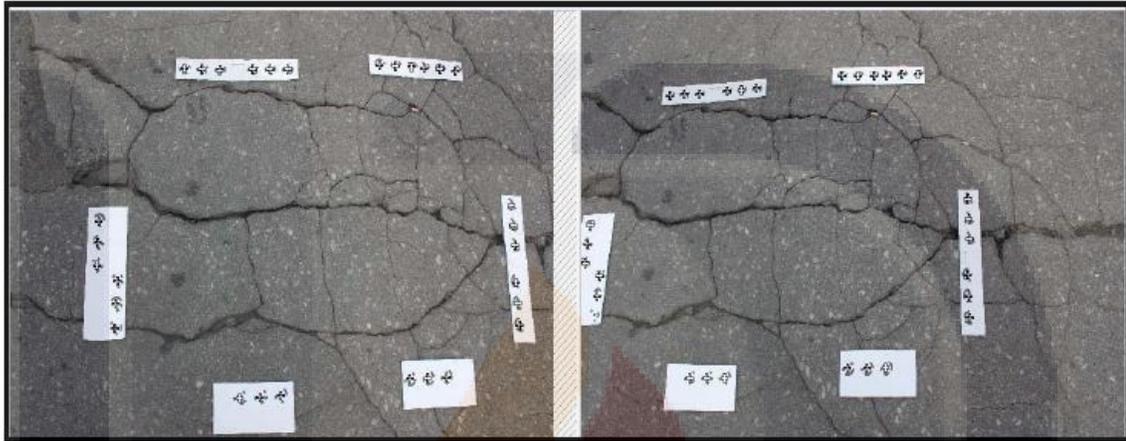


Ilustración 20 Normalización de imagen del asfalto (Sarsam, Daham, & Ali, 2015)

Para el 2016 la Arquitecta Miriam Alejandra Figueroa propone una metodología mediante la utilización de fotogrametría para recrear la superficie de cuerpos sólidos físicos a un entorno virtual, donde cerrando el mallado generado por software especializado es posible obtener el volumen de dichos elementos. Solo es necesario obtener una referencia o escala directa del objeto a modelar (Figueroa & Pacheco, 2016).

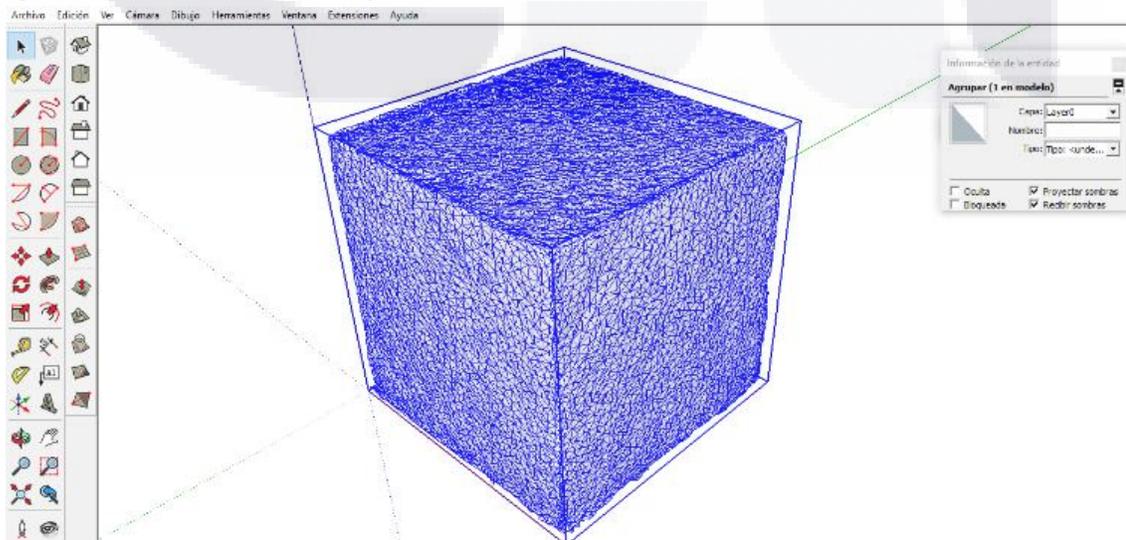


Ilustración 21 Registro del volumen por software según (Figueroa & Pacheco, 2016)

Al siguiente año, (Napolitano & Glisic, 2017) propone un método para minimizar las diferencias de representación que generan los programas por fotogrametría, como resultado de un mismo levantamiento fotográfico. Para ello se auxilia de la estadística, estableciendo un procedimiento de escala que arroja mejores resultados sobre un mismo modelo, demostrando como es que las referencias externas deben asignar las acotaciones más distantes, en el sentido de dos ejes.

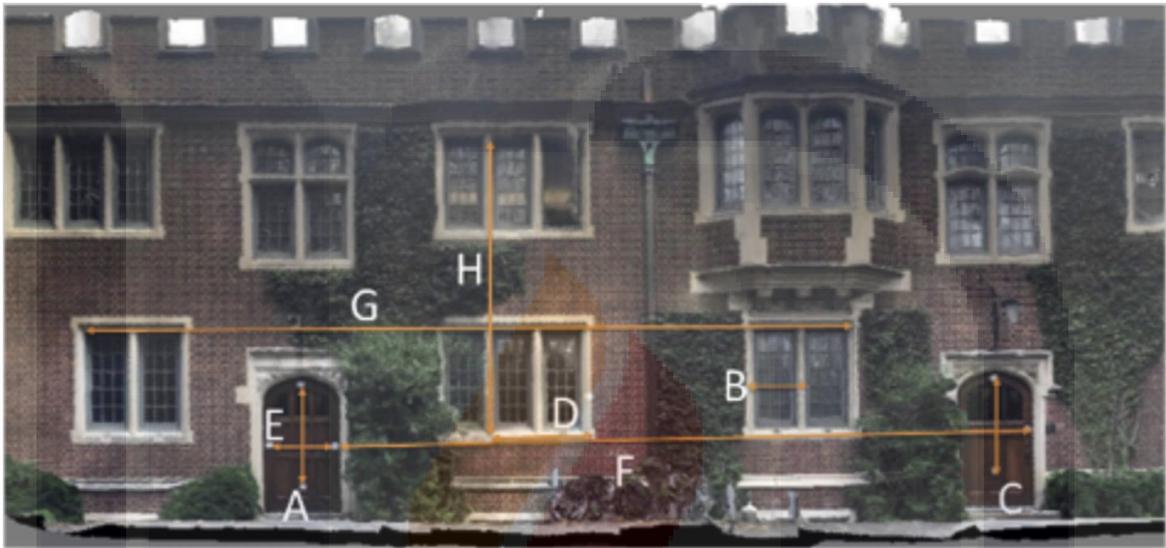


Ilustración 22 Levantamiento de fachada por fotogrametría (Napolitano & Glisic, 2017).

Para (Agüera, y otros, 2018) la topografía extrema resulta de interés, dada la complejidad y la ineficiencia de los equipos topográficos convencionales para llevar a cabo el levantamiento en estos entornos. Por lo cual implementa una combinación de técnicas, utilizando un equipo topográfico terrestre y un equipo aéreo no tripulado para la captura de fotografías, consigue una nube de puntos a escala que le permite obtener la configuración del terreno y las respectivas curvas de nivel del acantilado rocoso.

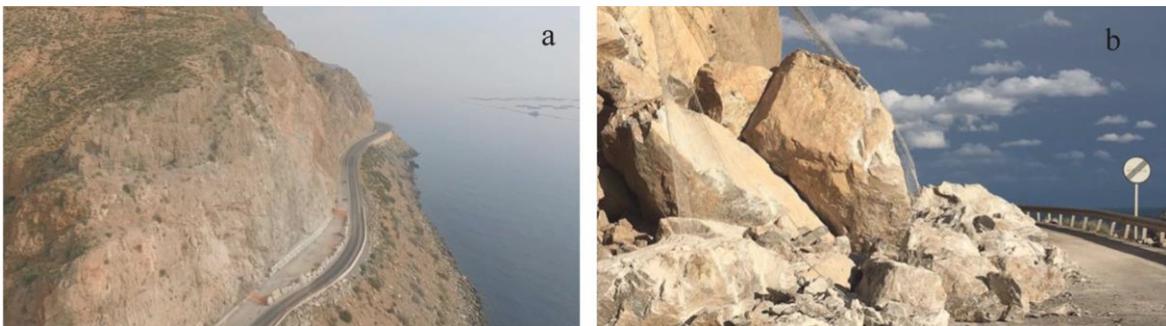


Ilustración 23 Topografía extrema modelada por fotogrametría (Agüera, y otros, 2018)

2.6. Evaluación de las técnicas contemporáneas

Las cargas muertas son idealizadas para algunos casos de estudio estructurales, implementando la masa contenida en los elementos de manera uniforme, al omitir las formas libres cambia el estado real en que interactúan los diferentes elementos constructivos del patrimonio arquitectónico.

Los procesos para desgastar la roca mediante métodos de impacto físico pueden representar una pérdida considerable e incontrolable para el tamaño de las probetas consideradas para la experimentación. Es por ello que se opta por implementar la degradación mediante procesos químicos, con el inconveniente de que representa una alteración en la densidad, modificando así las propiedades volumétricas y posiblemente de densidad. Factor que llama la atención y es analizado en este trabajo para identificar si representa o no una alteración significativa.

La modelación tridimensional mediante métodos indirectos puede ser de gran precisión como es el caso del escáner laser, sin embargo representa una inversión elevada en cuanto a recursos materiales, económicos y humanos. Dejando como alternativa aceptable la modelación mediante fotogrametría que de igual manera es un método considerablemente preciso con la ventaja de requerir de una inversión relativamente baja con respecto a los recursos de tiempo y costos.

Reuniendo los diferentes temas mostrados, se puede inferir que en el contexto temporal de esta investigación es posible determinar el volumen de manera precisa de cuerpos de forma libre mediante la fotogrametría, resultado que puede ser utilizado para calcular el peso total de elementos constructivos y ornamentales de edificios patrimoniales, que por lo general están elaborados en piedra y en su entorno han sufrido desgaste por intemperización, que de igual manera puede ser reproducida mediante procesos químicos, evaluando así la precisión que puede conseguirse mediante la metodología aquí propuesta.

CAPÍTULO

3

MARCO TEÓRICO

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Determinación del volumen y la densidad de las muestras

El volumen es la magnitud física que indica la porción de espacio que ocupa un objeto, expresando la extensión de un cuerpo en tres dimensiones: largo, ancho y alto. Su unidad se expresa en unidades cúbicas, en el Sistema Internacional (SI) es el metro cúbico (m³) (El Cid, 2014).

Para calcularlo, la geometría parte de diferentes fórmulas que aplican para cuerpos regulares, tales como:

Tabla 6 Tabla de fórmulas para obtener volumen de cuerpos regulares

| cuerpo | Fórmula | variables |
|-------------------|---------------------------|-------------------|
| Cubo | $V = l^3$ | V = Volumen |
| Prismas regulares | $V = A * h$ | l = lado |
| Esfera | $V = \frac{4}{3} \pi r^3$ | h = altura |
| Pirámide | $V = \frac{1}{3} A * h$ | A = área de base |
| | | r = radio |
| | | π = número pi |

Mientras que para objetos con mayor complejidad se requiere acudir a otros métodos que involucran distintas variables, como lo es el principio de Arquímedes, el cual establece que cuando un objeto se sumerge total o parcialmente en un líquido, éste experimenta un empuje hacia arriba igual al peso del líquido desalojado, con dicha afirmación se ha establecido una relación entre el peso del agua y del objeto, que permite calcular tanto la densidad como el volumen, de aquellos materiales que tengan una densidad superior a la del agua (1g/cm³):

$$dp = \frac{m * dw}{wa - ws}$$

dp= densidad

m= masa

dw= densidad agua

wa= peso saturado

ws= peso sumergido

Para comprender dicha fórmula, primero se requiere describir tres estados en los que se mide la masa de las piedras.

- A. Peso Seco: Estado que se consigue al desalojar el agua que puede existir dentro de los poros de una piedra, para ello se calienta en horno durante 24 horas (ASTM, 2015).
- B. Peso Saturado Superficialmente Seco: por sus siglas en ingles SSD, es el estado en que los poros de la piedra están saturados de agua, pero la superficie de la misma está seca, para ello se sumerge en agua durante 24 horas y al momento de la medición se hace un secado superficial (ASTM, 2015).
- C. Peso Sumergido: Esto es una situación en la que se mide la masa de una piedra saturada, que se mantiene en suspensión dentro del agua (López, Wedekind, Aguillón, & Siegesmund, 2018).

Con dicho proceso se obtiene la Densidad aparente, que pertenece al material sólido sin incluir el espacio poroso que es accesible al agua (ASTM, 2015), (López, y otros, 2018). Que si bien, la densidad de forma directa resulta del cociente de la masa sobre el volumen, este último valor se obtiene por relación inversa, de la siguiente forma:

$$dp = \frac{m}{V}$$

$$V = \frac{m}{dp}$$

dp= densidad

m= masa

V= volumen

No obstante existen objetos que por su contexto de ocupación o situación frágil, resulta imposible llevar a cabo la medición de volumen y masa mediante estos métodos convencionales, para ello, existen ecuaciones matemáticas que permiten obtener el volumen de cuerpos con gran complejidad, que en la actualidad están contenidas en software, los cuales permiten realizar dicho proceso de manera automática.

3.2. El volumen y la estructuración tridimensional por movimiento

Según las matemáticas es posible obtener el volumen de cualquier cuerpo dentro del espacio euclídeo, sin importar su complejidad, mediante la integración triple siguiendo esta fórmula:

$$Vol (R) = \int_R dV = \int_R dx dy dz = \int_{R^3} XR(x, y, z) dx dy dz$$

Donde XR es la función de región R:

$$XR(x, y, z) = \begin{cases} 1 & (x, y, z) \in R \\ 0 & (x, y, z) \notin R \end{cases}$$

Dicho cálculo conlleva un análisis mediante la fragmentación del objeto en tantos tetraedros como sea posible, ocupando la totalidad del interior de la figura inicial, para así, utilizando las coordenadas de los vértices de cada uno de los tetraedros resultantes, obtener el volumen mediante la suma de todos los fragmentos.

Es así, como los programas de modelación tridimensional definen de manera automática las magnitudes de espacio dentro de su interfaz, indistintamente de la complejidad que representen los cuerpos dentro del software, la solución parte del mismo algoritmo matemático.

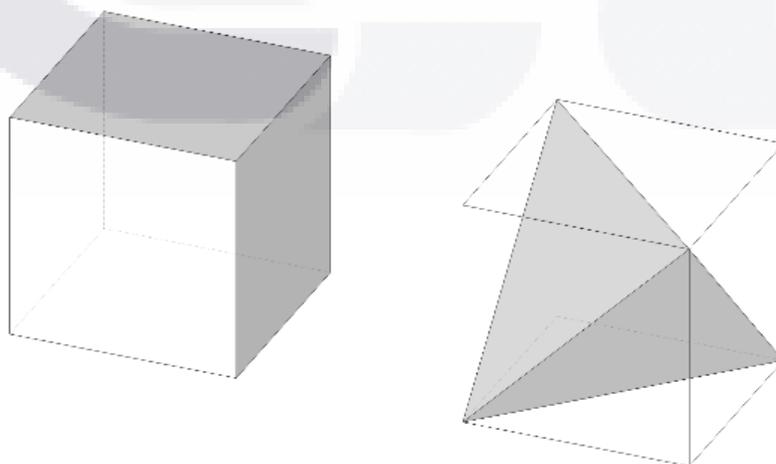


Ilustración 24 Fragmentación de un cuerpo, para simplificarlo a tetraedros.

Así que, para analizar figuras regulares o compuestas, solo basta con introducir un modelo a cualquier programa tridimensional, de entre las múltiples opciones que existen en la actualidad. No obstante, las formas que puedan ser estudiadas mediante software, dependen de la habilidad humana para representar los objetos, esto es un inconveniente al momento de estudiar elementos que presentan tal complejidad que resulta prácticamente imposible digitalizarlos manualmente.

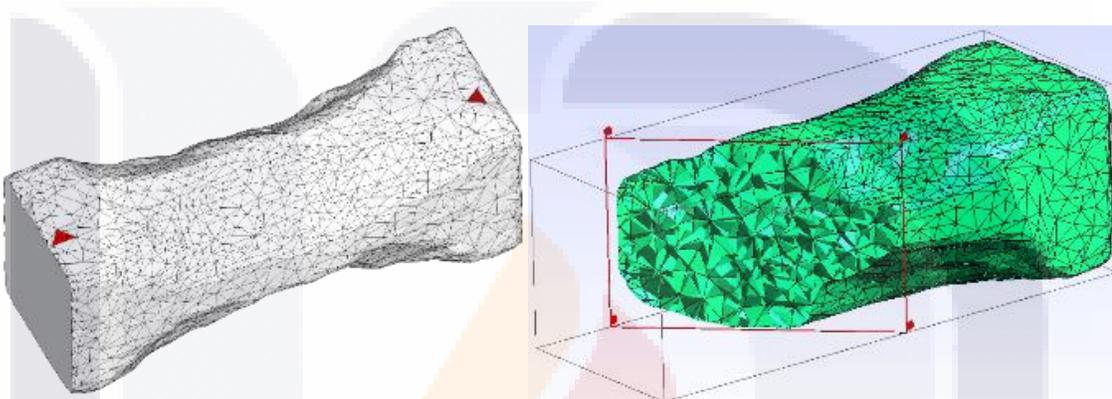


Ilustración 25 Elemento de alta complejidad definido por tetraedros

Para ello existe la estructura desde movimiento por sus siglas en ingles SfM, que si bien se da naturalmente en los seres vivos al sobreponer un par de imágenes capturadas por cada ojo, generando así la noción de profundidad del entorno tridimensional. Este concepto es utilizado para la programación virtual, que permite conseguir la visión por computadora, el proceso de estimación de estructura tridimensional se calcula en la escena, mediante la triangulación de puntos comunes dentro de un conjunto de imágenes bidimensionales (Alex, Michal, & Luc, 2018), (The MathWorks, 2018).

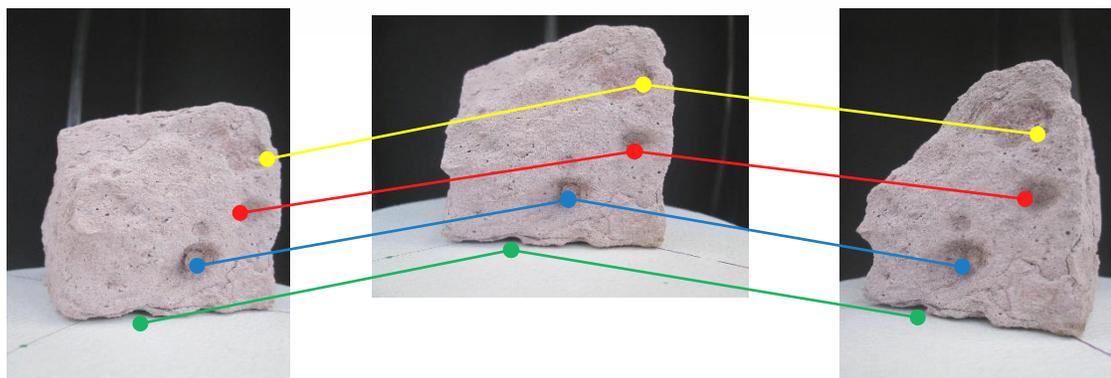


Ilustración 26 Triangulación de puntos comunes en escena

El campo de (SfM) se ocupa de la calibración de una secuencia fotográfica y la recreación de la configuración tridimensional de la escena. Los métodos acostumbrados generalmente se diseñan como algoritmos de procesamiento por lotes, donde la adquisición de imágenes y el procesamiento de las mismas se separan en dos pasos independientes (Alex, Michal, & Luc, 2018).

Esta secuencia hace referencia a un patrón de captura para llevar a cabo un levantamiento fotográfico, el cual consiste en la forma ideal en la que las imágenes deben ser obtenidas, considerando ángulo, dirección y traslapes entre ellas. La secuencia depende del objeto u entorno a digitalizar, se identifican tres elementos base: elemento aislado, elementos de fachada o alzado e interiores (Agisoft, 2016).

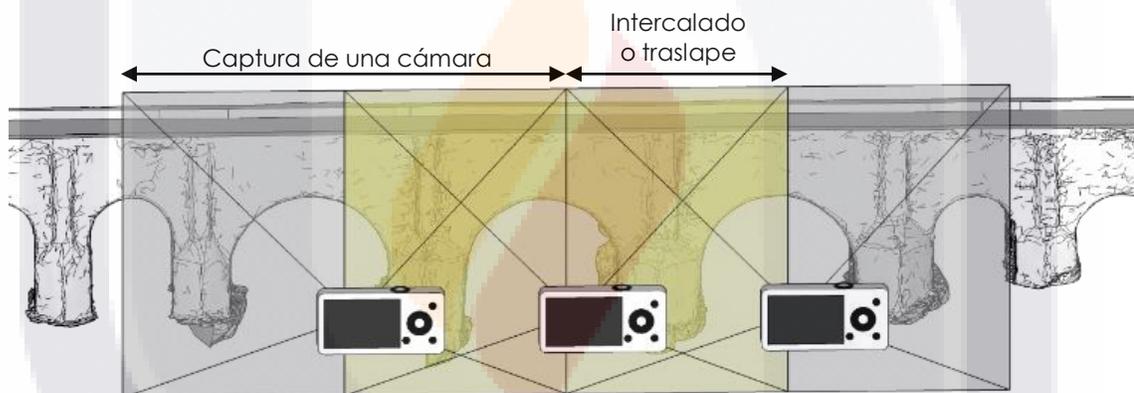


Ilustración 27 Secuencia de captura para fachadas

Si bien mediante la estructura por movimiento, es posible modelar para entornos virtuales objetos reales de forma libre, para recrear el intemperismo en laboratorio y así obtener elementos deteriorados que tengan dicha complejidad, se puede recurrir a diversos métodos, desde los impactos mecánicos hasta la degradación por métodos químicos, como es el caso de los ciclos de cristalización de sulfato de sodio que permiten simular un envejecimiento acelerado en las piedras.

3.3. Cristalización de sales en las piedras

Para acelerar el deterioro de las piedras se utilizan ciclos de cristalización de sales, esto en base a la norma Europea EN 12370 standard, la cual tiene como objetivo estudiar la resistencia que tienen las piedras ante estos ciclos de cristalización. Dicho proceso consta de los siguientes pasos:

- A. Saturación de las muestras de piedra durante dos horas utilizando una salmuera que cuenta con una concentración de SFS al 10% respecto al peso del agua destilada en gramos (Yam, y otros, 2006).
- B. Secado en horno durante al menos 16 horas a una temperatura de 100 °C para garantizar el secado de todas las muestras (Janvier, y otros, 2016).
- C. Enfriamiento de las muestras dejando por lo menos dos horas a temperatura ambiente tiempo que puede utilizarse en preparar la siguiente solución (Janvier, y otros, 2016).

Para garantizar que las muestras estén sumergidas en la solución de SFS es necesario conocer su absorción, que es una propiedad hidromecánica de las piedras la cual se expresa en porcentaje, y resulta de dividir la diferencia entre el peso seco y el saturado sobre el peso seco (López, y otros, 2018), de la siguiente manera:

$$abs = \frac{ps - ssd}{ps}$$

abs= absorción

ps= peso seco

ssd= saturado

Este dato es un auxiliar que permite estimar la cantidad de agua que absorben las piedras al momento de saturarlas en el proceso.

CAPÍTULO

4

METODOLOGÍA

4. METODOLOGÍA

La propuesta consiste en evaluar una metodología que permita la cuantificación confiable del peso propio de elementos constructivos y ornamentales en edificaciones, para lo cual se experimenta con muestras geométricas de piedra con una escala manipulable en laboratorio de la siguiente manera:

4.1. Revisión de los valores de la densidad

Tabla 7 Materiales y equipo para revisión de valores

| MATERIALES: | SOFTWARE: | EQUIPO: |
|----------------------|--------------------------|------------------------|
| - Tablas de densidad | - Microsoft Excel 2013 ® | - Computadora personal |

1. Se investigó y recopiló en distintas fuentes bibliográficas el valor teórico de la densidad de las rocas que se utilizaron en la campaña experimental.
2. Se identificaron las propiedades físicas reales de las piedras que se utilizaron como muestras para la experimentación.
3. Al transferir la información, se crearon tablas Excel que concentran las principales características físicas de interés: nombre de la piedra, color, textura, y los valores necesarios para la densidad expresada en Kg/cm³.
4. De la información teórica, se eligió aquellos datos que se aproximan a los valores reales, obtenidos de manera directa.

4.2. Selección de probetas

Tabla 8 Materiales y equipo para Seleccionar probetas

| MATERIALES: | SOFTWARE: | EQUIPO: |
|---|---|--|
| <ul style="list-style-type: none">- Muestras de piedras en diferentes colores- Papel Batería- Pegamento<ul style="list-style-type: none">- Cúter- Lápiz - borrador | <ul style="list-style-type: none">- Google SketchUp ®- Agisoft Photoscan ®<ul style="list-style-type: none">- A-Remake ® | <ul style="list-style-type: none">- Computadora personal- Cámara fotográfica<ul style="list-style-type: none">- Cuaderno- Juego geométrico Prof. |

1. Se diseñó una forma que es fácil de modelar mediante software de fotogrametría, Agisoft Photoscan (APS) o Autodesk Remake (ARM), para su reproducción en piedra, el objeto se representó por distintos medios, inicialmente a mano y para su presentación final mediante Google SketchUp (SKP).
2. Utilizando juego geométrico se elaboró una maqueta del diseño propuesto, en papel batería a una escala de 1:1 (escala real).
3. Con la cámara fotográfica se captaron las imágenes necesarias del objeto, siguiendo el patrón de captura establecido por los desarrolladores del software APS y ARM, con lo que se procesó el modelo.
4. Al digitalizar el diseño planteado utilizando tanto Agisoft como A-Remake, en la calidad media según cada programa, se encontró una modelación ideal para el objeto.
5. El modelo digital 3D obtenido por ambos software permitió establecer cual programa presenta mayores beneficios para la modelación, así como también identificar los errores que se obtienen por modelar la figura creada. Con lo cual se replanteo la forma ideal para las muestras.
6. Al concluir estos procesos se definió la geometría ideal para las muestras que aparecen en la experimentación principal.

4.3. Selección del método destructivo

Tabla 9 Materiales y quipo para definir método destructivo

| MATERIALES: | SOFTWARE: | EQUIPO: |
|---|--------------------------|---|
| - Muestras de piedras - Lápiz - borrador - Sulfato de sodio | - Microsoft Excel 2013 ® | - Computadora personal - Cuaderno - Instrumentos laboratorio - Horno de Secado |

1. Se definió el tipo de deterioro que mejor conviene para la experimentación, teniendo en cuenta que se podrían implementar métodos físicos: impactos, erosión por fluidos (agua o arena); o métodos químicos: sales concentradas (Al seleccionarlo se definieron los siguientes pasos de este apartado).
2. Dado que los desgastes físicos en las muestras a pequeña escala pueden producir pérdidas representativas en su geometría (perder la forma o grandes segmentos), se optó por utilizar el desgaste por cristalización de sales. Dicho proceso está basado en la medición estándar de la resistencia a la cristalización de sales en piedra con el uso de sulfato de sodio (Na_2SO_4), con la norma europea EN 12370 standard, dicho proceso consta de tres etapas que corresponden a los siguientes pasos (3-5):
3. Saturación de las muestras de piedra durante dos horas (12:00-2:00) utilizando una salmuera que cuenta con una concentración de SFS al 12% respecto al peso del agua destilada en gramos.
4. Secado en horno durante al menos 16 horas (2:00-10:00) a una temperatura de 100 °C para garantizar el secado de todas las muestras.
5. Enfriamiento de las muestras dejando por lo menos dos horas (10:00-12:00) a temperatura ambiente tiempo que puede utilizarse en preparar la siguiente solución.
6. El proceso No. 3, 4 y 5 se repitieron hasta perder la integridad de las piedras o un máximo de 15 ciclos, con lo cual se generaron las gráficas presentadas en resultados.

4.4. Elaboración del estudio fotográfico y sistema de captura

Tabla 10 Materiales y equipo para desarrollar estudio fotográfico

| MATERIALES: | SOFTWARE: | EQUIPO: |
|---|----------------------------------|---|
| - Hojas de dibujo - Lápiz, borrador - Madera prensada | - Google SketchUp® - AutoCAD® | - Computadora personal - Cortadora laser |

Comprendida la metodología para desarrollar la digitalización de elementos por fotogrametría, se entiende la necesidad para el desarrollo de un estudio fotográfico, el cual permitio fotografiar cada muestra desde los ángulos que se requiere, aislar el objeto del fondo y tener puntos de apoyo que sirven para escalar los objetos una vez digitalizados. Para ello se desarrollaron los siguientes pasos con los cuales se generó dicho estudio fotográfico, el cual se utilizó en el transcurso de la experimentación.

1. Se elaboraron diferentes propuestas mediante bocetos a mano alzada, eligiendo de entre ellos el más viable de construir y de manipular.
2. De entre las propuestas, se representó en software tridimensional (SKP) la mejor de ellas, para analizar su funcionalidad en un entorno virtual, previo a su fabricación.
3. Para la fabricación del mismo se vectorizó el modelo mediante CAD, con lo que se generaron los planos para el corte laser en madera prensada de 3 y 6 milímetros.

La captura fotográfica se llevó a cabo como lo plantea la guía del usuario del software APS para elementos aislados.

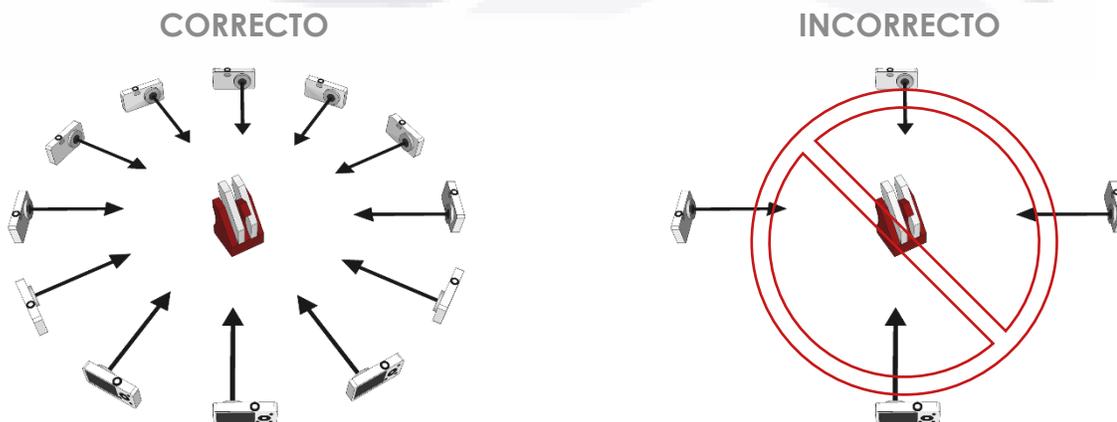


Ilustración 28 Proceso de captura de fotografías para elemento aislado (Agisoft, 2016)

4.5. Registro del estado original de las muestras

Tabla 11 Materiales y equipo para el registro original

| MATERIALES: | SOFTWARE: | EQUIPO: |
|---|--|--|
| - Muestras de piedras - Lápiz - borrador | - Microsoft Excel 2013 ® - Agisoft Photoscan ® - A-Remake ® - Google SketchUp ® | - Computadora personal - Cuaderno - Instrumentos laboratorio - Báscula de sumergido |

1. Ya definidas y fabricadas las muestras, se capturaron sus cualidades físicas originales en un cuaderno, esto permitió tener el valor de origen, la partida como punto de comparación del resto de resultados.
2. Se registró la masa de las muestras mediante una balanza de platillo que permite una precisión de centésimas, considerando como unidad el gramo (g). Para ello se sometieron a un proceso de secado durante 24 horas a 100 °C.
3. Para el cálculo de la densidad se utilizó el principio de Arquímedes que

establece la siguiente fórmula: $dp = \frac{m \cdot dw}{wa - ws}$ dónde:

dp= densidad

m= masa

dw= densidad agua

wa= peso saturado

ws= peso sumergido

Para definir cada valor se procede a: sumergir durante 24 horas las muestras en agua para con ello obtener el peso saturado y posteriormente obtener el peso sumergido mediante una báscula de sumergido, para identificar la densidad del agua es necesario tener en cuenta las variaciones que la temperatura representa.

4. Cada muestra de piedra se modela utilizando el método de fotogrametría por APS, para obtener por primera vez la configuración geométrica de las muestras de piedra por un método indirecto.
5. Los modelos obtenidos en el paso No. 4 son trasladados a la plataforma tridimensional de SKP, programa que permite cuantificar el volumen de sólidos virtuales.

6. Los resultados se ingresan a un documento de Excel, donde anteriormente se habían registrado los valores teóricos para el mismo tipo de piedra en cuestión.

4.6. Registro periódico método convencional en laboratorio

Tabla 12 Materiales y equipo para el registro periódico convencional

| MATERIALES: | SOFTWARE: | EQUIPO: |
|--|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - Muestras de piedras - Lápiz - borrador - Cepillo cerdas plástico | <ul style="list-style-type: none"> - Microsoft Excel 2013 ® | <ul style="list-style-type: none"> - Computadora personal - Cuaderno - Instrumentos laboratorio - Báscula de sumergido |

1. Posterior a cada ciclo de intemperización acelerada producto de la cristalización del sulfato en las piedras, se limpiaron las muestras garantizando que no existieran elementos frágiles que puedan desprenderse en los procesos siguientes.
2. La masa se registró en el estado seco de la muestra, mediante una báscula de platillo que permite una precisión de dos decimales en la escala de gramos.
3. La densidad se calculó mediante el principio de Arquímedes que establece la siguiente formula $dp = \frac{m \cdot dw}{wa - ws}$ ya mencionada con anterioridad. Una vez registrado el peso en los tres estados requeridos, se puede calcular el volumen de cada elemento mediante la relación que mantiene la densidad con el peso y el volumen (V= peso/densidad).
4. Los resultados se ingresaron a un documento de Excel, mismo dónde se habían registrado los valores teóricos para el mismo tipo de piedra en cuestión.
5. Este proceso se repitió tantas veces como el del proceso destructivo definido en el apartado 4.3 "Selección del método destructivo".

4.7. Registro periódico por fotogrametría

Tabla 13 Materiales y equipo para registros por fotogrametría

| MATERIALES: | SOFTWARE: | EQUIPO: |
|-----------------------|--|--|
| - Muestras de piedras | - Agisoft Photoscan ® - Microsoft Excel 2013 ® - Google SketchUp ® - Rinoceros v5 ® | - Computadora personal - Cámara fotográfica - Estudio de fotografía. |

1. Después del registro periódico por medios convencionales, pero antes de la próxima degradación por métodos químicos, se realizó la modelación por fotogrametría.
2. Para garantizar que la modelación digital en 3D de cada etapa y muestra mediante fotogrametría se obtuvieran con buenos resultados, se siguió el patrón de captura fotográfica que establecen los desarrolladores del software. Para seguir dicha secuencia fotográfica, se utilizó un estudio fotográfico en el cual se colocan las muestras de piedra, y este equipo permite llevar un control del ángulo entre capturas, además elimina considerablemente el ruido que puede generar el fondo de las imágenes mediante una envolvente de color sólido oscuro.
3. Con el estudio fotográfico se obtuvieron 48 capturas por muestra, suficientes para que el software de APS generara los modelos digitales en 3D. En el mismo programa se escalaron y repararon fallos de los modelos generados, así como recortes de elementos ajenos a las muestras.
4. Los modelos digitalizados de cada etapa y cada muestra fueron importados en un programa de modelación 3D que permite cuantificar volúmenes de sólidos, para este caso se utilizó SKP.
5. Del levantamiento por fotogrametría solo es de interés la cuantificación del volumen por lo cual los procesos de modelación se delimitaron por la etapa de crear malla como proceso final, dicho valor de volumen se registró en tablas.
6. Este proceso se repitió tantas veces como el del proceso destructivo del apartado 4.3, "Selección del método destructivo".

4.8. Comparación y análisis de resultados

Tabla 14 Materiales y equipo para comparativas

| MATERIALES: | SOFTWARE: | EQUIPO: |
|--------------------|--------------------------|------------------------|
| Apuntes previos | - Microsoft Excel 2013 ® | - Computadora personal |

Para concluir la etapa experimental se elaboraron distintas tablas que contienen los datos obtenidos mediante las mediciones convencionales y los obtenidos por fotogrametría, con lo que se elaboró distintas gráficas que demuestran visualmente la diferencia entre un método y otro, permitiendo así la comparación de la información que permite evaluar la factibilidad de desarrollar el proceso mediante fotogrametría y definir a la vez la coherencia de los valores teóricos en función con las rocas propias del estado de Aguascalientes.

4.9. Resumen de metodología experimental:

Tomando como base la norma "EN 12370" que es una prueba para la resistencia de las rocas ante la cristalización de sales, se rescataron los siguientes pasos:

1. Saturación de las muestras de piedra durante dos horas, utilizando una salmuera que cuenta con una concentración de Sulfato de Sodio (SFS) al 12% respecto al peso del agua destilada en gramos.
2. Secado en horno durante al menos 16 horas a una temperatura de 100°C para garantizar el secado de todas las muestras.
3. Enfriamiento de las muestras dejando por lo menos dos horas a temperatura ambiente antes de iniciar el nuevo ciclo.



Ilustración 29 Ciclo para cristalización de SFS

Para esta experimentación el conjunto de los tres pasos de la norma comprendieron un “ciclo” y repetirlos por tres ocasiones corresponderá a un “periodo” de registro en el cual se incluyó la medición por fotogrametría y principio de Arquímedes procesos que se describen a continuación:

4. Tras el último secado en horno posterior a los tres ciclos, inmediatamente se procede a cuantificar el peso seco de las muestras por separado, para evitar alteraciones por humedad ambiental.
5. Posteriormente se capturan 16 fotografías a cada $\sim 22.5^\circ$, siguiendo una circunferencia por el contorno de cada muestra a tres alturas diferentes, consiguiendo un total de 48 imágenes como si se tratara de un domo que cubre la pieza.
6. Una vez modelada cada muestra, se procede a saturar las piedras en agua durante 24 H, proceso que generara una alteración al desalinizar las muestras, pero que es necesario para cuantificar el volumen.
7. Utilizando una báscula eléctrica con precisión de centésimas de gramo se registra el peso completamente saturado, el peso sumergido y nuevamente se deberán secar en horno por un día para así registrar el peso seco.
8. Al finalizar, nuevamente se elabora un modelo digital utilizando la fotogrametría como lo explica el paso 5.

El conjunto de los ciclos y periodos proporciono datos suficientes para elaborar tablas y gráficas necesarias para la comparación de ambos métodos y evaluar la técnica aquí propuesta.



CAPÍTULO 5

RESULTADOS

5. RESULTADOS

5.1. Probetas, selección y densidad teórica

Como propuesta inicial de probeta, se planteó la elaboración de una escultura (águila estilizada) de formas regulares y cortes fáciles de recrear en piedra, la cual tendría una base cuadrangular fácil de manipular en el software de modelación 3D, mientras que tendría un cuerpo de formas complejas para mejorar el procesamiento mediante fotogrametría.

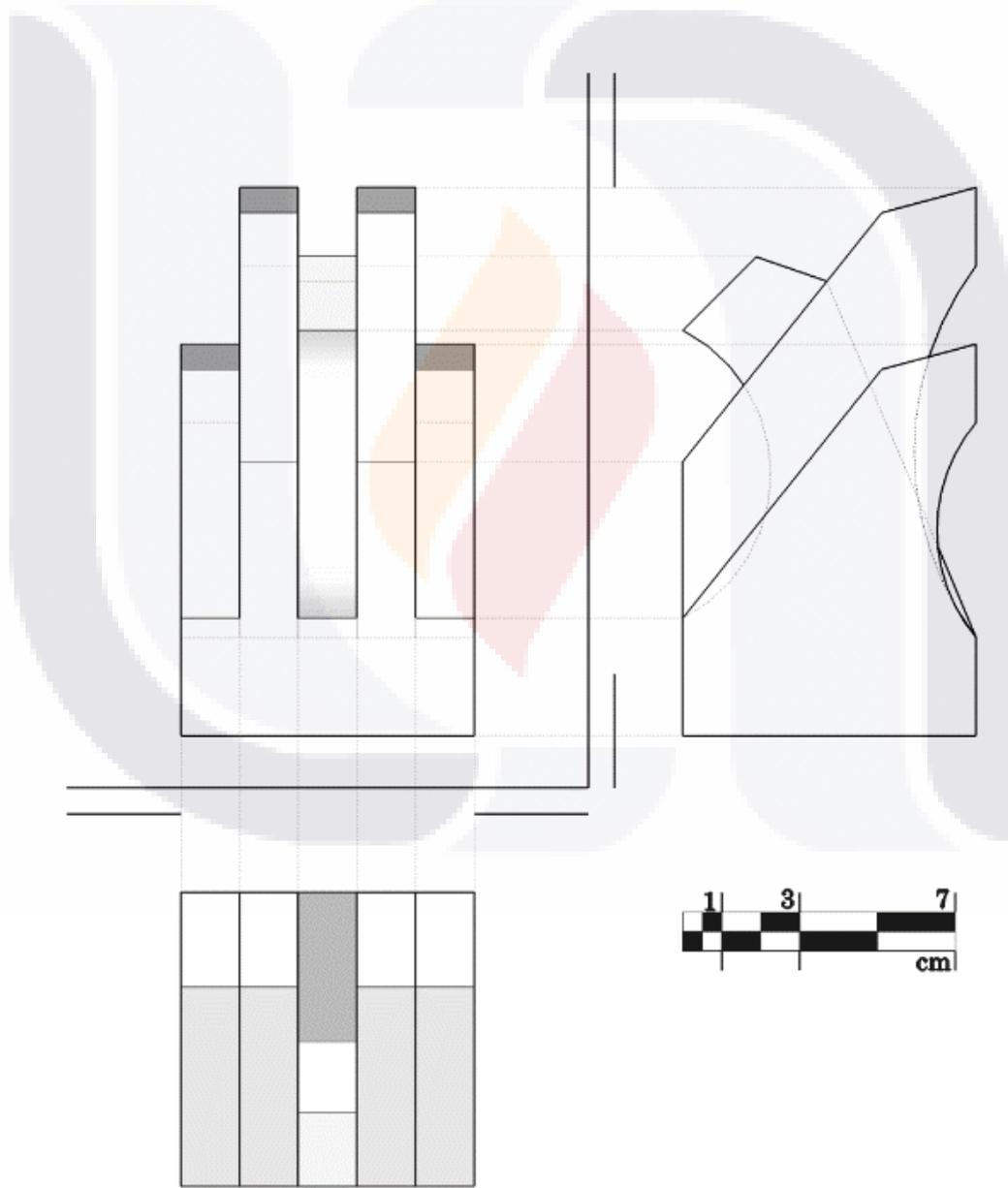


Ilustración 31 Propuesta original de probeta

Después de fabricar el prototipo en papel batería se derivó a recrear los procesos de modelación virtual 3D y así evaluar la factibilidad de llevar a cabo la creación de las probetas de piedra con esta forma.

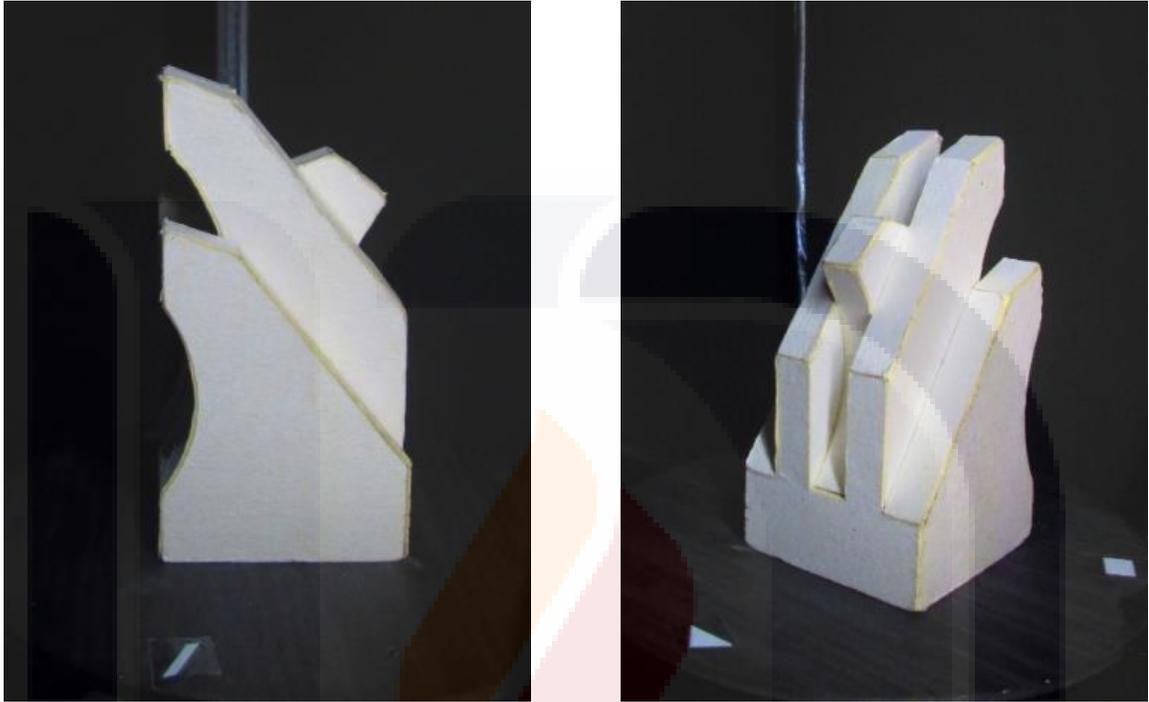


Ilustración 32 Prueba piloto, águila para modelación

Para llevar a cabo el levantamiento del águila por fotogrametría se utilizó un estudio fotográfico que permite obtener fotografías limpias (se consigue aislar el objeto utilizando un fondo de color sólido, negro por ejemplo), controlar los ángulos entre capturas, definir el orden y número de fotos que se esperan obtener, consiguiendo así un proceso de captura estándar para la posterior experimentación.

Tras la modelación utilizando ambos software (ARM y APS) se consiguieron modelos similares en cuanto al procesamiento y su calidad, cuyos resultados se presentan a continuación:

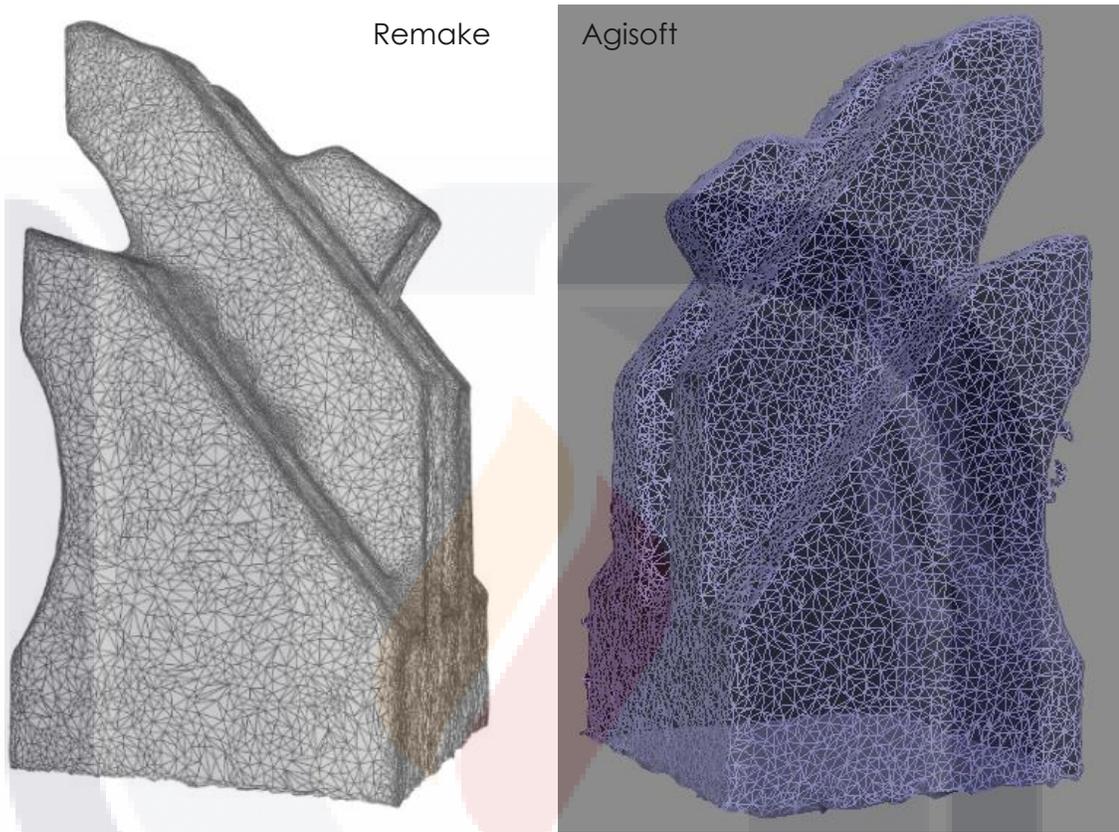


Ilustración 33 Comparativa de modelación por ambo software

Las imágenes muestran el mallado que se puede conseguir con ambos programas de modelación mediante fotogrametría, considerando un mismo número de fotografías para este caso 54. Aun con resultados tan similares se optó por utilizar el software de Agisoft Photoscan para continuar con la campaña experimental, por la precisión que este presenta al momento de escalar los modelos mediante coordenadas. En cuanto a la probeta se descartó su utilización, al ser un modelo costoso de reproducir en piedra y contar con oquedades que por su dimensión han sido difíciles de modelar mediante la técnica, lo cual traería consigo alteraciones en la medición volumétrica.

Una vez definida la forma se estableció un número de muestras que representen las canteras que comúnmente se comercializan en Aguascalientes, como resultado se tienen 5 muestras prismáticas regulares, las dimensiones para cada muestra son de 6.50 cm por lado, cada muestra presenta texturas y colores particulares, los cuales ayudan a identificar su tipo:

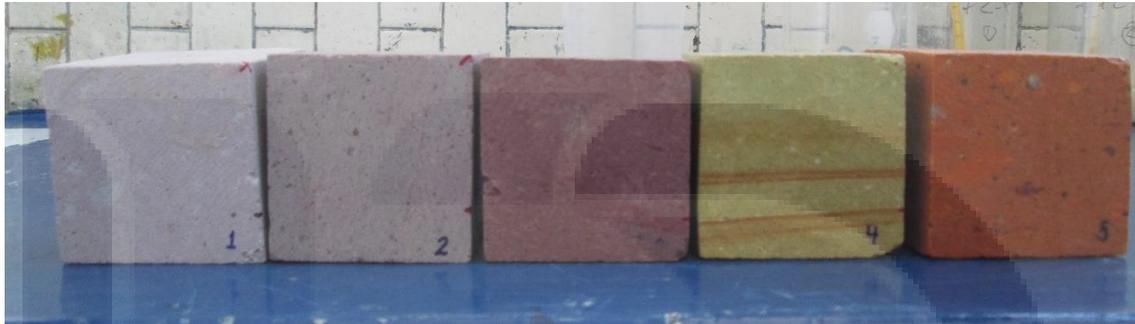


Ilustración 34 Color y textura de las cinco probetas

Según el geólogo Dr. Rubén Alfonso López Doncel, quien ha realizado estudios sobre las piedras que conforman diversos edificios en la Cd. de Aguascalientes, estas cinco piedras por su origen volcánico pueden identificarse como "TOBAS" (Padilla, y otros, 2017), (López, y otros, 2018). Descripción que coincide con el libro de Geología y Ciencias Afines, donde se describen las tobas como un material que resulta de la consolidación de cenizas volcánicas, que consisten en partículas diminutas las cuales se depositan como si de una roca sedimentaria se tratase, pero su origen es completamente ígneo (Heller & de Sola, 1967).

Según la geóloga Norma González Cervantes, las probetas utilizadas pueden ser clasificadas como ignimbritas, por ser producto de la solidificación de material piroclástico, asignando esta clasificación debido a que se aprecian clastos de piedra pómez en las muestras, lo cual las diferenciaría de las tobas.

Por lo que se consideró que tanto la descripción de Ignimbrita o Toba son aceptables para asignar el peso específico para la totalidad de las muestras, debido a que las fuentes bibliográficas para clasificar rocas no cuentan con alguna de las dos descripciones.

No obstante, en las fuentes de consulta convencionales no se llega a una clasificación que incluya este tipo de piedra, otras fuentes generalizan las canteras como si de una misma piedra se tratase, en algunos casos se denomina al mismo tipo de piedra con nombres regionales.

Tabla 15 Densidad aproximada para las muestras, fuentes convencionales.

| DENSIDAD APROXIMADA PARA TOBAS: SEGÚN FUENTES TEÓRICAS | | | |
|---|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| ROCA | Rocks (g/cm ³) | UNAM (g/cm ³) | U.D. Granada |
| CHILUCA IGNIMBRITA | 1.00 - 1.80 | 1.75 – 2.45 | |
| PIROCLÁSTICA | | | 2.40-2.60 g/cm ³ |

Obtenido de: (comparenature, 2017), (Noriega, 2008) y (Universidad de Granada, 2017)

Con la evidente ineficiencia que presentan las fuentes convencionales consultadas al asignar rangos mínimo y máximo del peso volumétrico, se optó por complementar los valores teóricos utilizando fuentes con mayor rigor científico, como lo son artículos de revista, que tratan con piedras de la misma clasificación y origen que las aquí utilizadas.

Tabla 16 Densidad aproximada para las muestras, fuentes científicas.

| DENSIDAD APROXIMADA PARA TOBAS: SEGÚN ARTÍCULOS CIENTÍFICOS | | | |
|--|------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| ROCA | Navarro (g/cm ³) | Padilla (g/cm ³) | López (g/cm ³) |
| IGNIMBRITA I. amarilla | 1.80 | | |
| TOBA T. anaranjada | | 1.63 | |
| T. gris | | | 1.67 |
| T. blanca/rosa | | | 1.67 |
| T. rosa | | | 1.95 |
| T. roja | | | 1.85 |

Obtenido de: (Navarro & Pacheco, 2013), (Padilla, y otros, 2017) y (López, y otros, 2018)

5.2. Características físicas originales de las muestras

El registro del estado original de cada muestra contempla algunas cualidades físicas tales como: masa, volumen, densidad, textura y color para cada una. De estos datos el color y la textura fueron utilizados en el capítulo 5.1 para identificar el tipo de roca al que pertenecen, mientras que la masa, volumen y densidad se muestran en tablas a continuación:

Tabla 5-2 Registro de las muestras originales

| Registro características físicas originales | | | | | | |
|--|-----------|---------------|----------------|----------------------------|-------------------------|---------------|
| Muestra | Peso seco | Peso saturado | Peso sumergido | Densidad g/cm ³ | Volumen cm ³ | Volumen (APS) |
| 1 | 452.53 g | 537.22 g | 263.31 g | 1.649 | 274.46 | 278.61 |
| 2 | 452.60 g | 521.41 g | 241.54 g | 1.614 | 280.43 | 274.21 |
| 3 | 517.25 g | 553.74 g | 281.94 g | 1.899 | 272.34 | 272.15 |
| 4 | 469.60 g | 539.97 g | 268.58 g | 1.727 | 271.93 | 269.19 |
| 5 | 433.69 g | 494.52 g | 214.15 g | 1.544 | 280.93 | 275.73 |

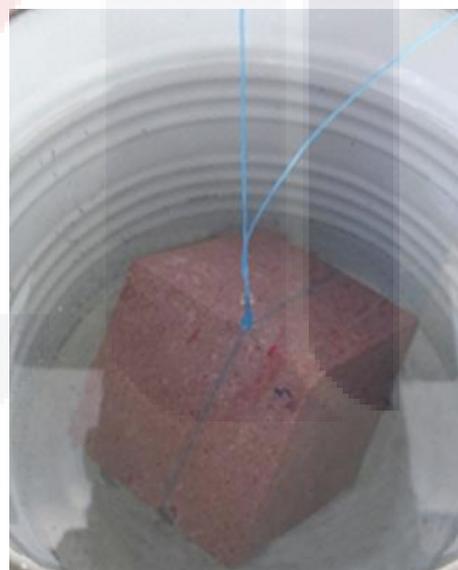


Ilustración 35 Registro del estado original de cada muestra

5.3. Cristalización de Sales en roca

La aceleración del deterioro por procesos químicos, se realizó mediante cristalización de sales (sulfato de sodio), dado que según fuentes bibliográficas no presenta daños representativos entre un ciclo y otro (Angeli, y otros, 2010) (Padilla, y otros, 2017), se prefirió desarrollar ciclos consecutivos de tres, dado que la fotogrametría no podría representar daños mínimos como supone cada uno.

Durante la experimentación, se satura cada muestra durante dos horas utilizando una salmuera al 12% en peso, posteriormente el secado a 100 °C durante 16 horas, para reiniciar ciclo se enfrían durante 2 horas. Tras aplicar este proceso tres veces consecutivas se aprecia como algunas muestras ya presentan daños considerables (Muestra 1 y 4), mientras otras aparentemente se encuentran intactas con cambios en su coloración (Muestra 2, 3 y 5).

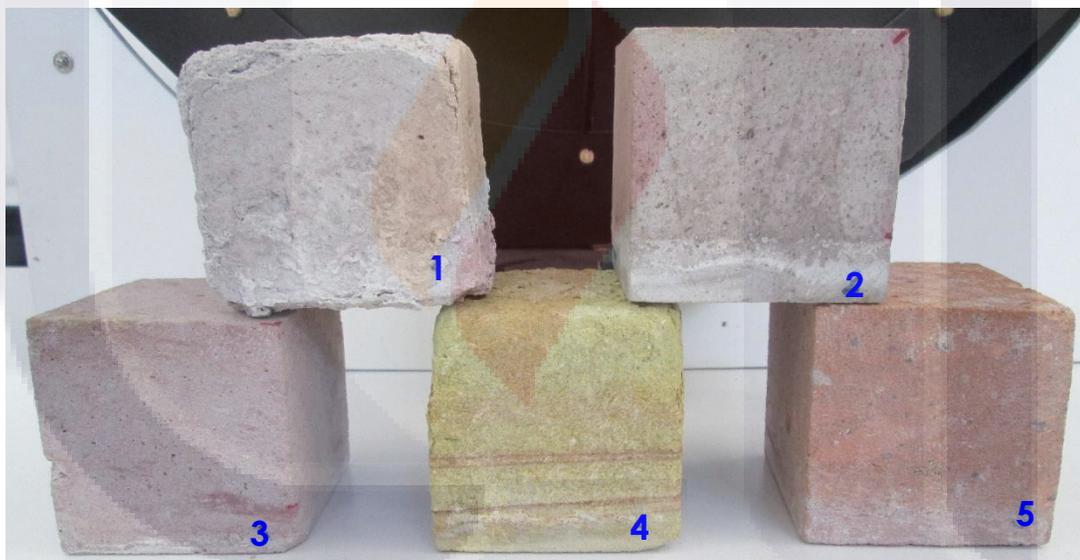


Ilustración 5-4 Deterioro a tres ciclos de cristalización

En esta primer etapa cada muestra ha conseguido incrementar su peso independientemente del volumen que han perdido, este evento se explica por la ocupación de los poros por cristales de SFS, que va en relación a la porosidad y absorción de las piedras pues mientras más altos sean estos factores obtendrán una ocupación mayor de cristales en su interior.

La siguiente tabla contiene una colección de imágenes que muestran la apariencia de cada muestra en el transcurso de los ciclos:

| | ORIGEN | CICLO 3 | PERIODO 1 | CICLO 6 | PERIODO 2 | CICLO 9 | PERIODO 3 | CICLO 12 | PERIODO 4 |
|-------------|--------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|----------|-----------|
| BLANCA #1 | | | | | | | | | |
| GRIS #2 | | | | | | | | | |
| ROSA #3 | | | | | | | | | |
| AMARILLA #4 | | | | | | | | | |
| NARANJA #5 | | | | | | | | | |

Ilustración 36 Gráfica ilustrativa cronología del deterioro acelerado

5.4. El estudio fotográfico y sistema de captura

Como resultado de las propuestas para el estudio fotográfico se tiene un modelo que permite girar los objetos en 360°, controlando los ángulos de captura siguiendo los bastidores que sujetan una membrana elástica negra en el fondo, así como una base para las muestras que cuenta con tres puntos de referencia con dimensiones registradas en sistema de coordenadas.



Ilustración 37 Estudio fotográfico completo

El estudio fotográfico cuenta con nueve piezas diferentes, las cuales se presentan a continuación nombrando a cada una de ellas con una letra e indicando cuantas veces deben repetirse para completarlo.

| PIEZA: | A | B | C | D | E | F | G | H | J |
|-----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CANTIDAD: | 5 | 4 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 |

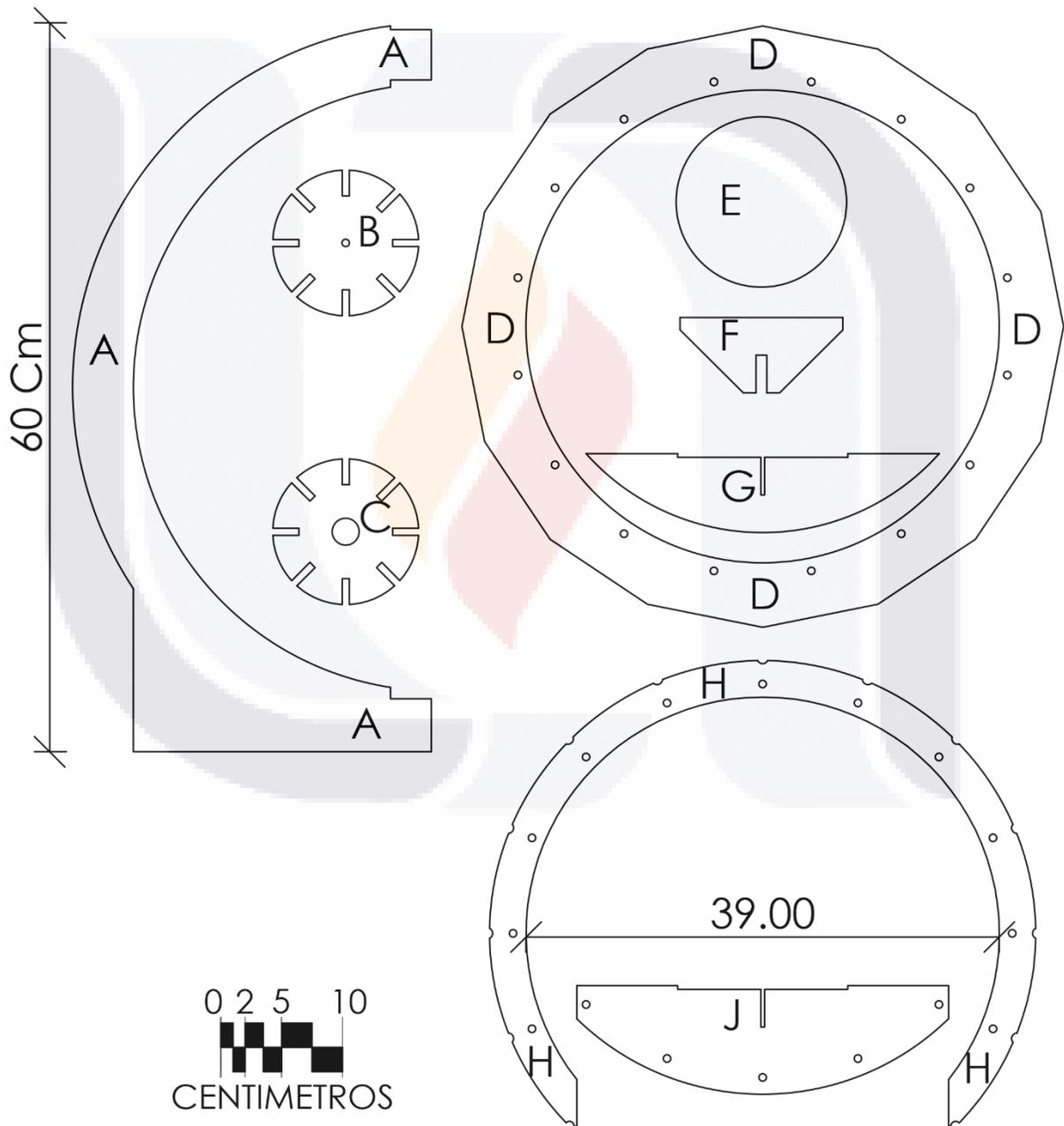


Ilustración 38 Estudio Fotográfico, número de piezas

Una vez se cuenta con las piezas necesarias se presenta el procedimiento del armado del mismo, mediante ilustraciones:

1. En primer lugar se sobreponen los aros (D, H) uniéndolos con pegamento para madera, por separado se pegan con el mismo adhesivo los arcos (J, G) los cuales son intersectados de forma libre por la pieza F. Conformando así la base giratoria que soportara los objetos.

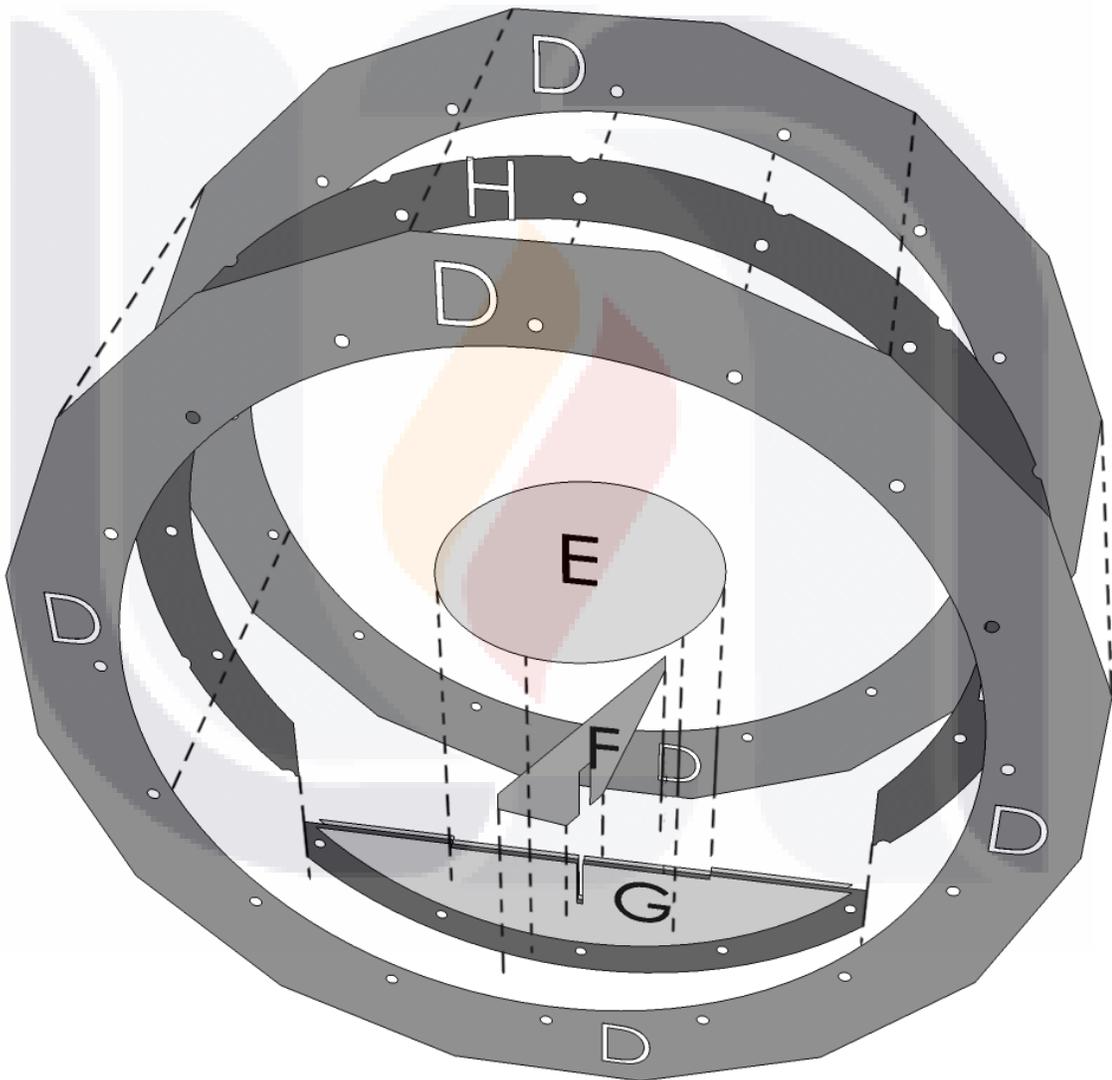


Ilustración 39 Estudio Fotográfico, armado 1

2. En segundo lugar se monta la base fija, para ello se debe pegar 3 círculos ($2C + 1B$), los cuales se colocan en la parte inferior, por separado otros dos círculos "B" los cuales se fijan en la parte superior. Los bastidores "A" se insertan a presión en las muescas de estos círculos.

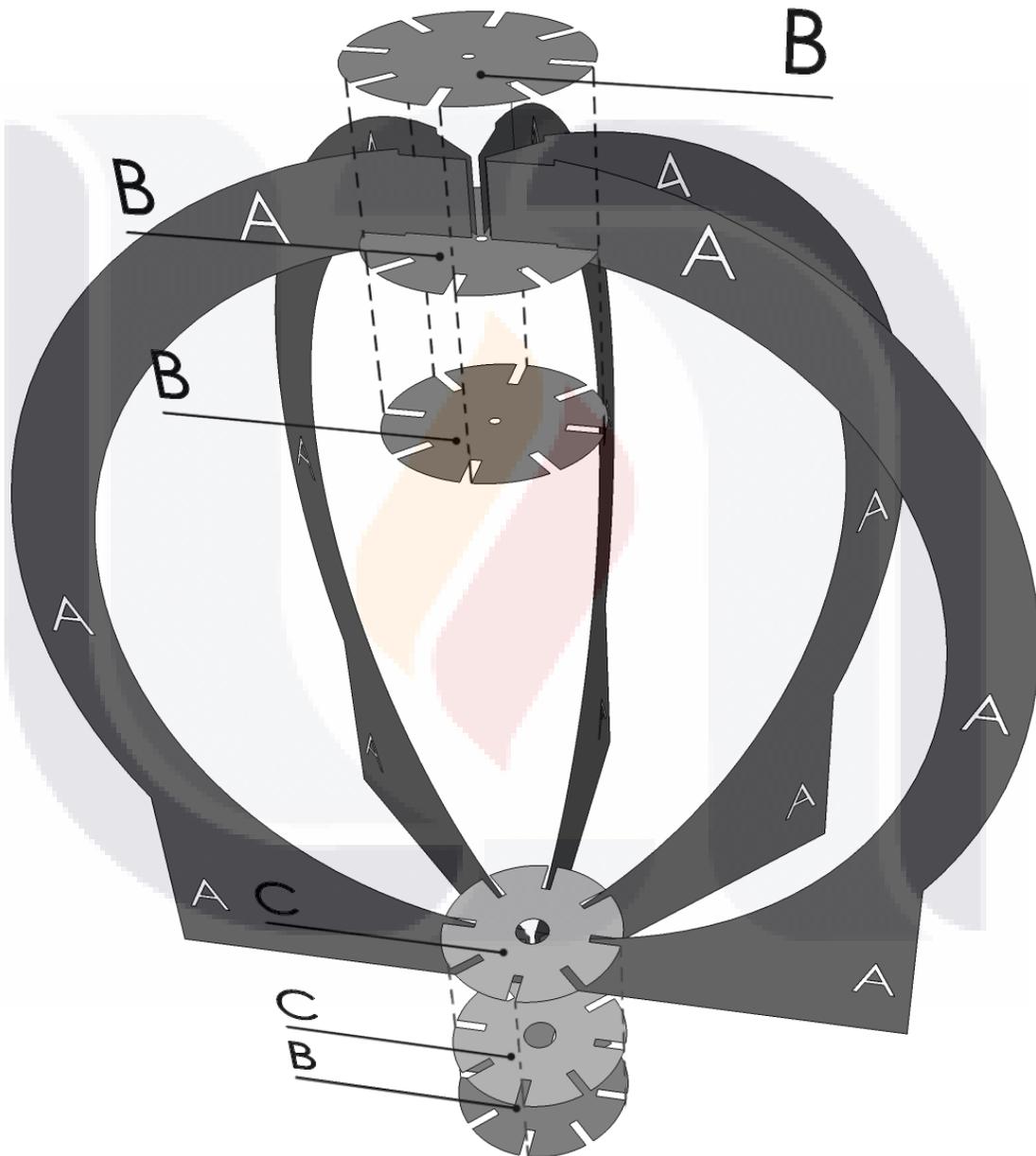


Ilustración 40 Estudio Fotográfico, armado 2

- Para sujetar el aro central giratorio se utilizan: en la base un balero de 22 mm de diámetro que lleva incrustado un redondo de madera de 2.7cm de longitud, en el sujetador superior un redondo de madera de 7.3 cm de longitud, estos maderos de puntas redondeadas coinciden con las muescas internas del aro compuesto (D-H-D), dejándolo en suspensión para facilitar los giros.

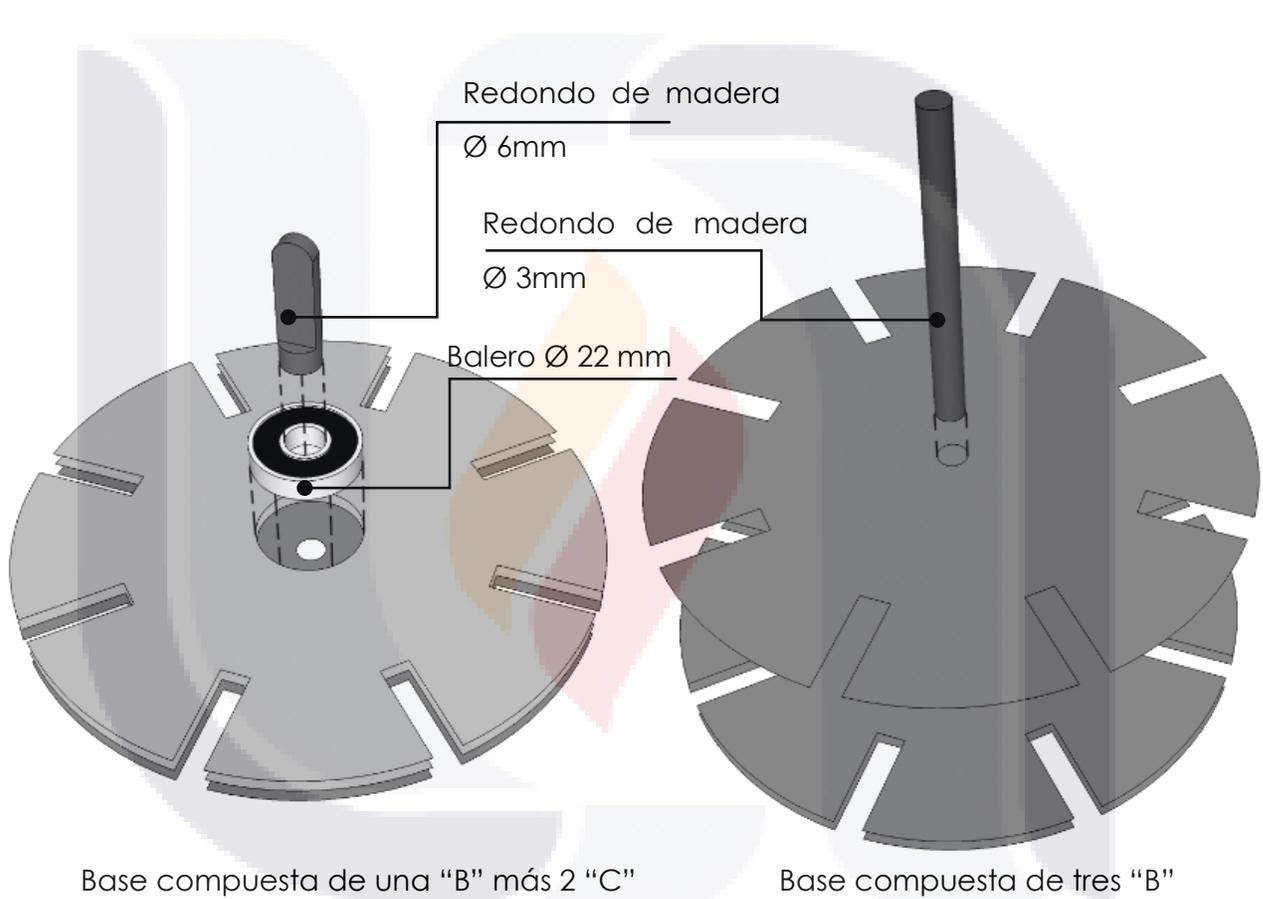


Ilustración 41 Estudio Fotográfico, armado 3

Una vez se tiene el estudio fotográfico armado se sigue por establecer el orden y número de capturas fotográficas y para ello se describe el funcionamiento del estudio:

1. Se marcan por lo menos tres puntos de apoyo en la pieza "E", cuya localización se ha establecido en sistema de coordenadas. Siguiendo un patrón para cada punto, asignar nombre y tres valores localizados en X, Y, Z separando cada dirección por tabulación:

Tabla 17 Estudio Fotográfico, puntos de apoyo

ARCHIVO EN FORMATO TXT

| NOMBRE | EJE "X" | EJE "Y" | EJE "Z" |
|---------|---------|---------|---------|
| Point 1 | 0 | 0 | 0 |
| Point 2 | 0 | 7.78 | 0 |
| Point 3 | 7.78 | 7.78 | 0 |

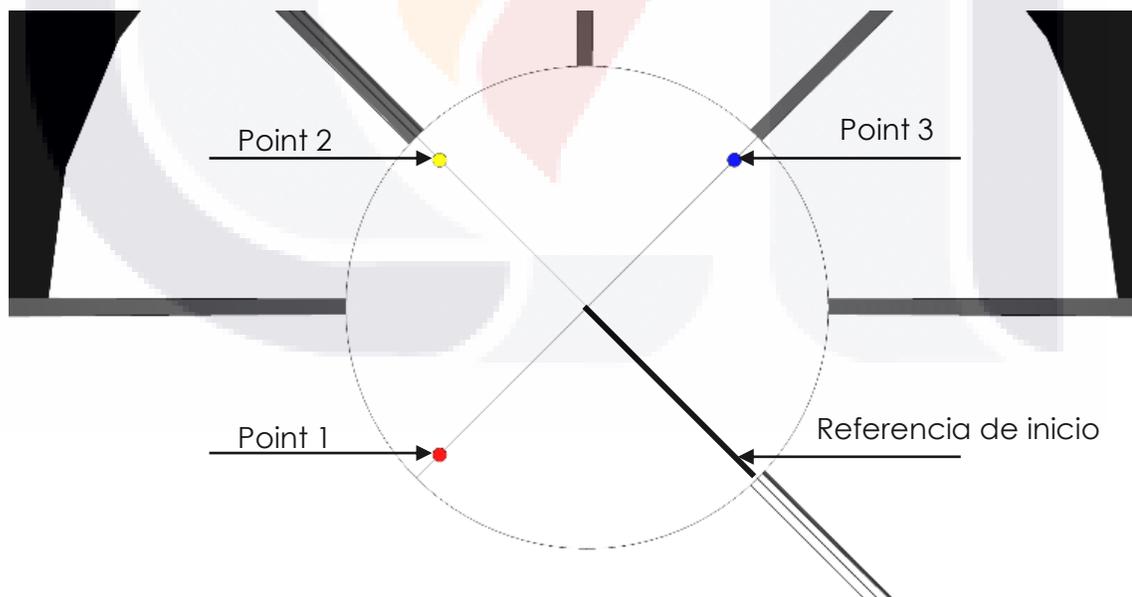


Ilustración 42 Estudio Fotográfico, ubicación de puntos de apoyo

- Al colocar el objeto dentro del disco giratorio sin obstruir los puntos de apoyo, se obtiene una captura desde la parte más baja del elemento a modelar, al hacer girar el objeto utilizando el disco y en referencia a los barrotes se pueden generar cambios de posición que van a cada $\pm 22.5^\circ$ y así obtener un total de 16 fotografías para completar un giro de 360° .

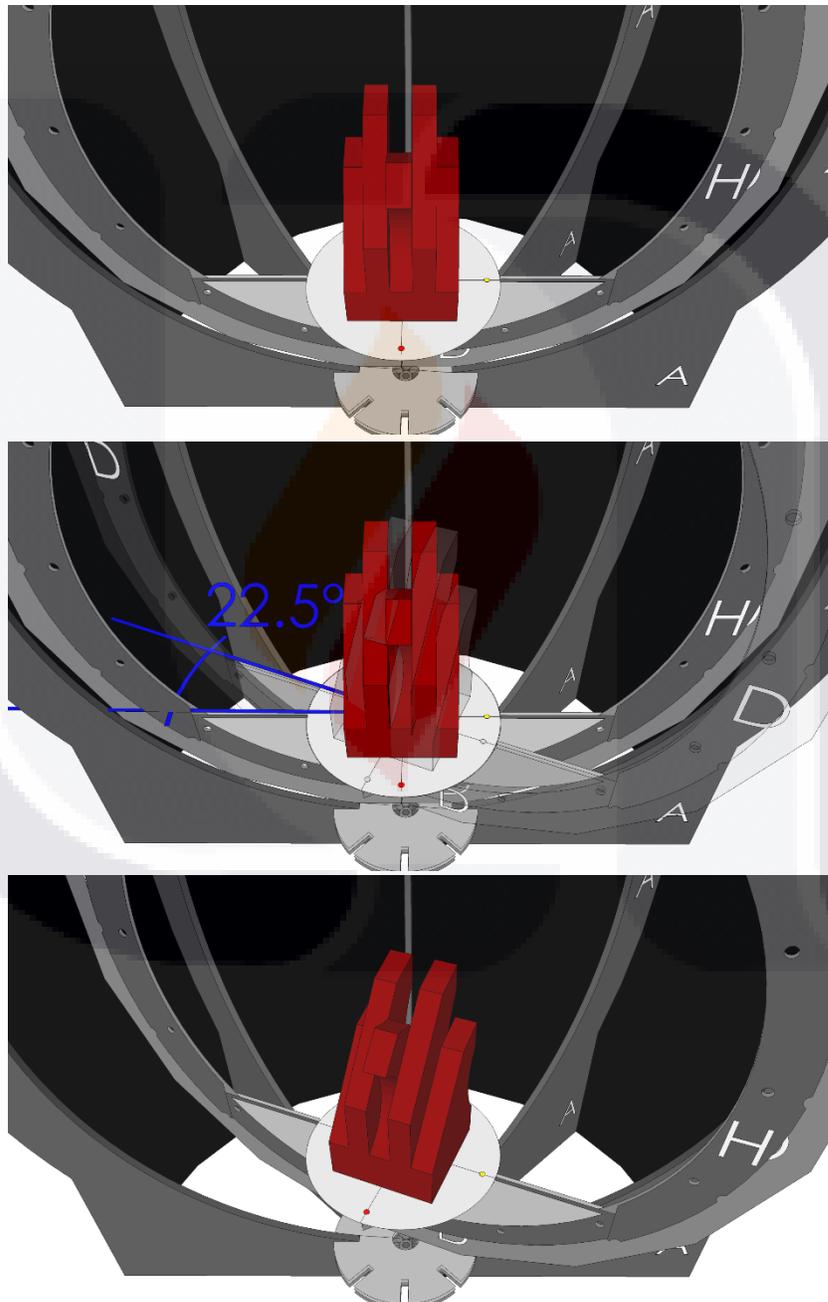


Ilustración 44 Estudio Fotográfico, giro del objeto

3. Con el paso anterior se consiguen 16 fotografías en la altura inferior del objeto a modelar, para completar la cobertura del levantamiento se debe realizar ese proceso a tres alturas diferentes, así que se debe repetir el paso 2, cambiando la posición de la cámara fotográfica a cada 30° girando hacia arriba.

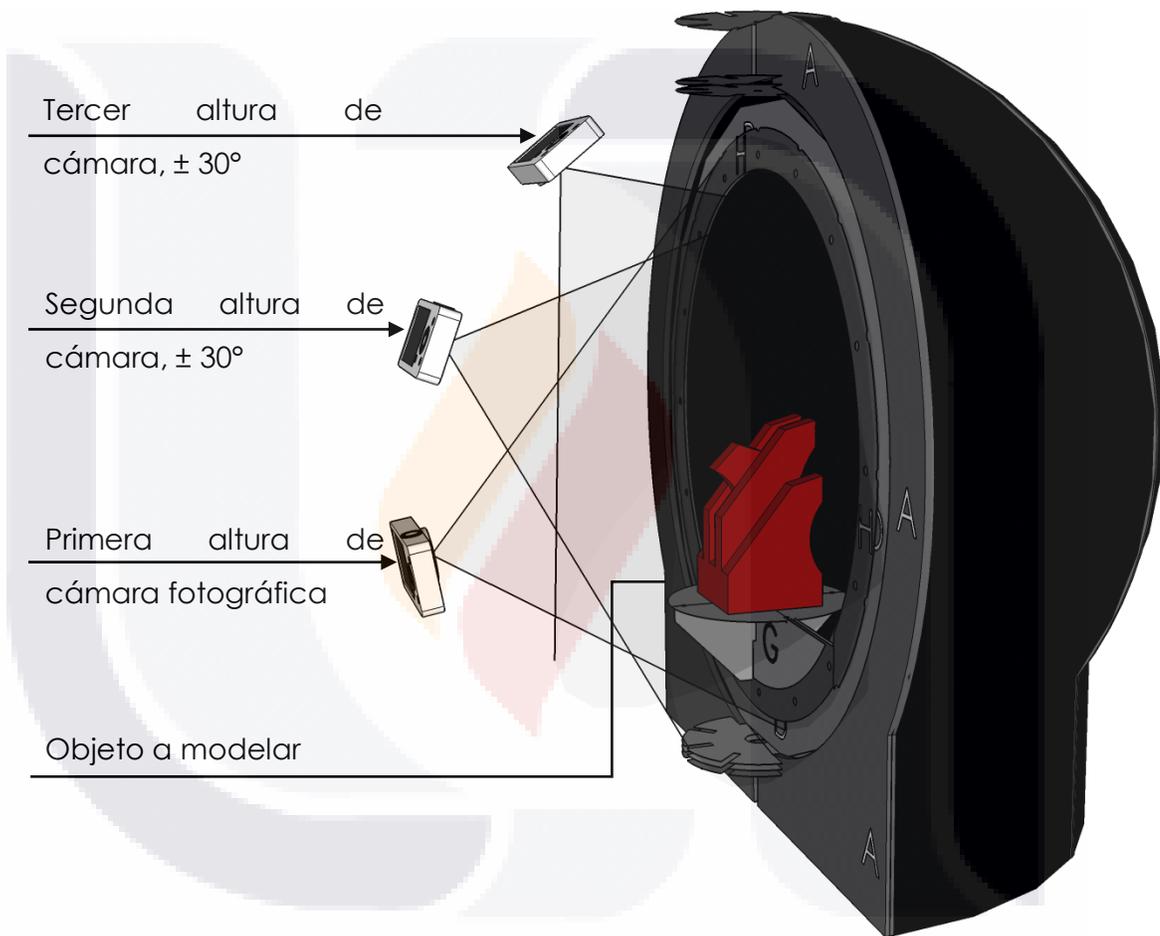


Ilustración 45 Estudio Fotográfico, altura de cámaras

Para la foto-modelación por fotogrametría se toma como punto de partida una secuencia planteada por Miguel Ángel Soto Zamora en 2016, presentada en sus ponencias y cursos del mismo tema, mismo procedimiento que aparece en investigaciones previas (Figueroa & Pacheco, 2016):

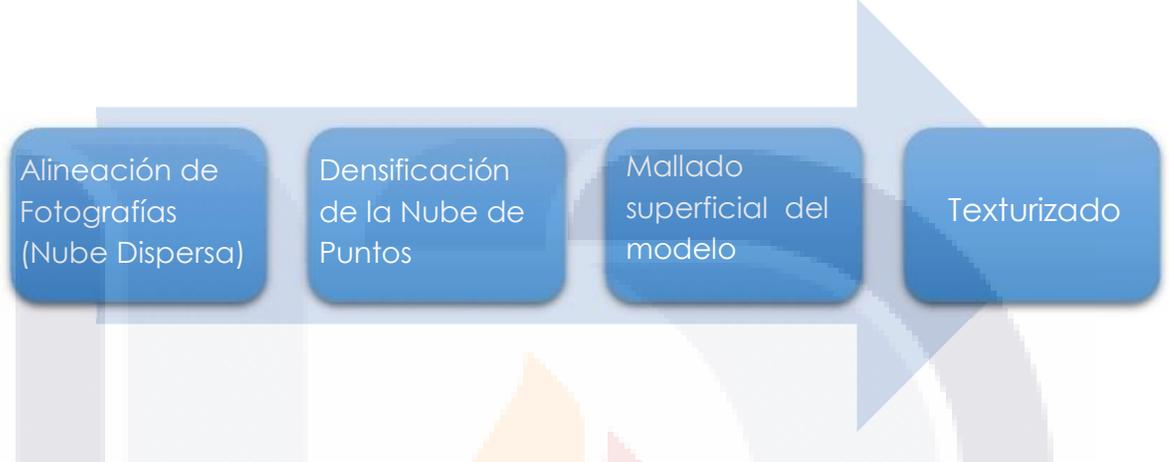


Ilustración 46 Flujo de foto-modelación según (Soto, 2016)

Esta secuencia de trabajo se utiliza en pruebas piloto de la técnica, utilizando el estudio fotográfico previamente fabricado, junto a la figurilla del águila creada en papel batería como modelo a tratar.

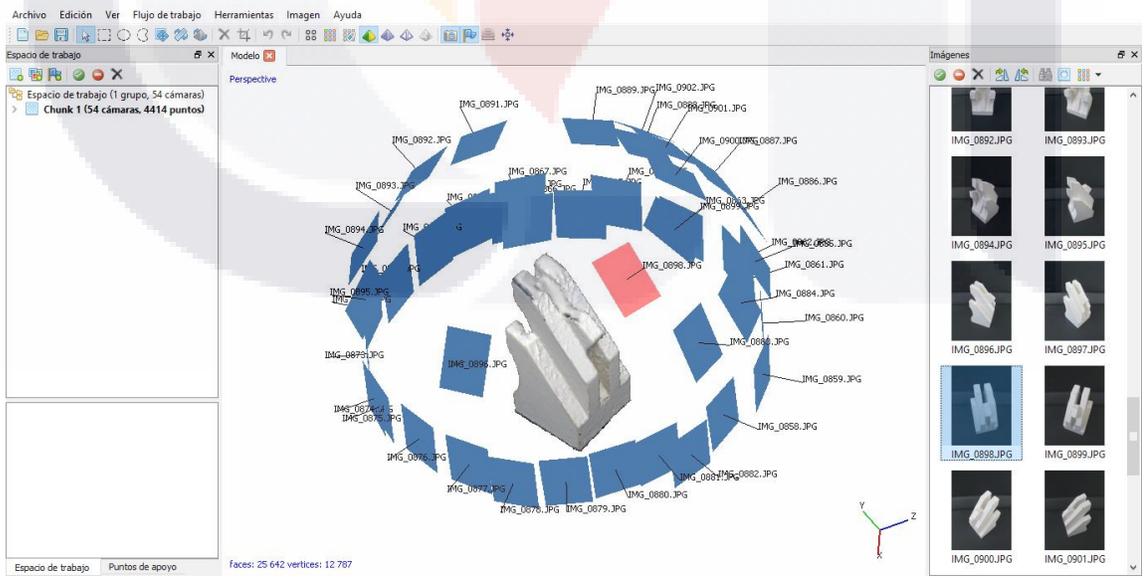


Ilustración 47 Prueba piloto de foto-modelación

Como resultado de la experimentación se plantea una línea de procesamiento diferente que especifica algunas actividades intermedias a cada uno de estos procesos antes mencionados, formulando una nueva propuesta estandarizada de modelación que se utiliza en esta campaña:

Para comprender el proceso se describen a continuación cada uno de los pasos agregando capturas de pantalla del software para especificar aún mejor el proceso.

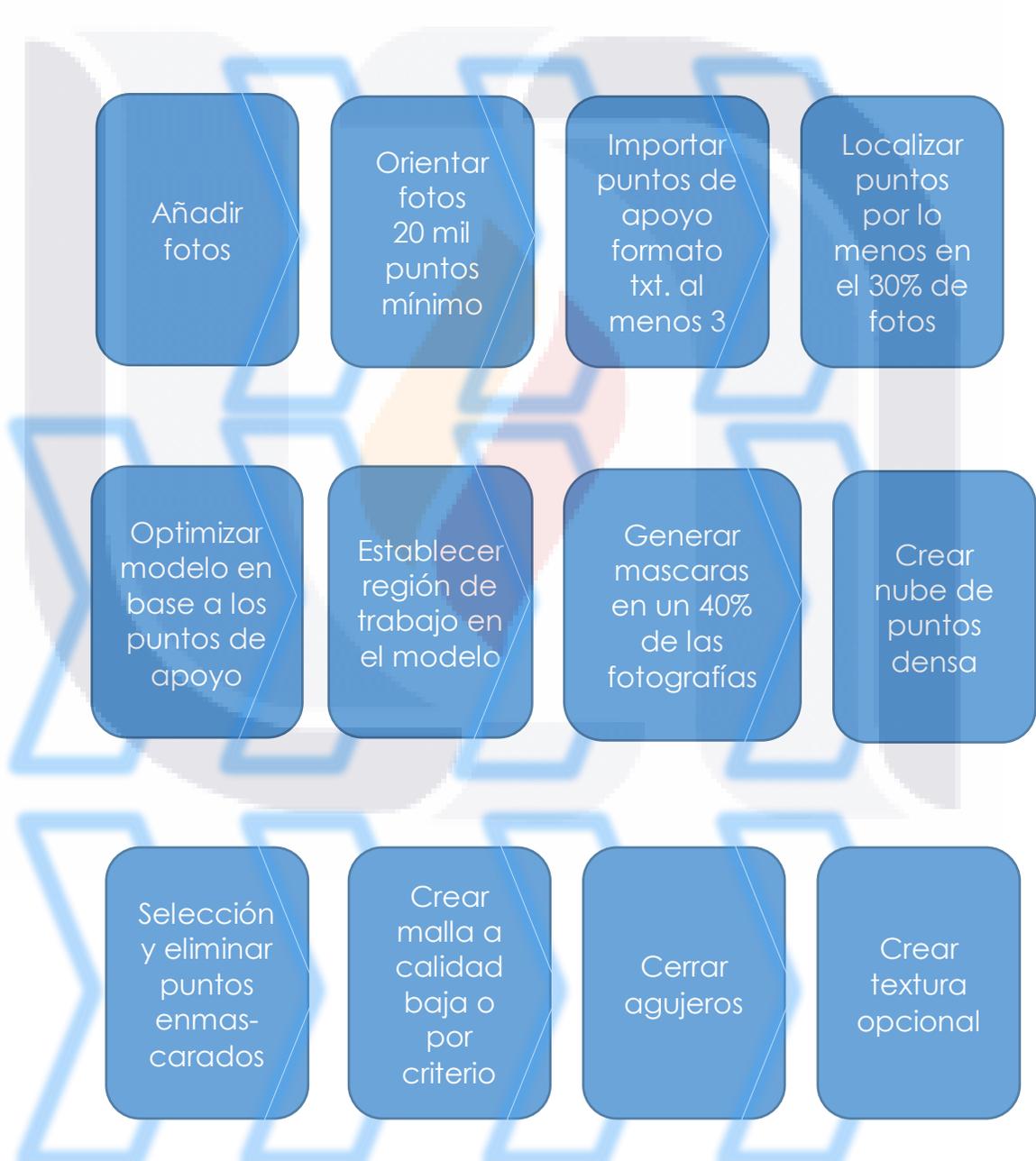
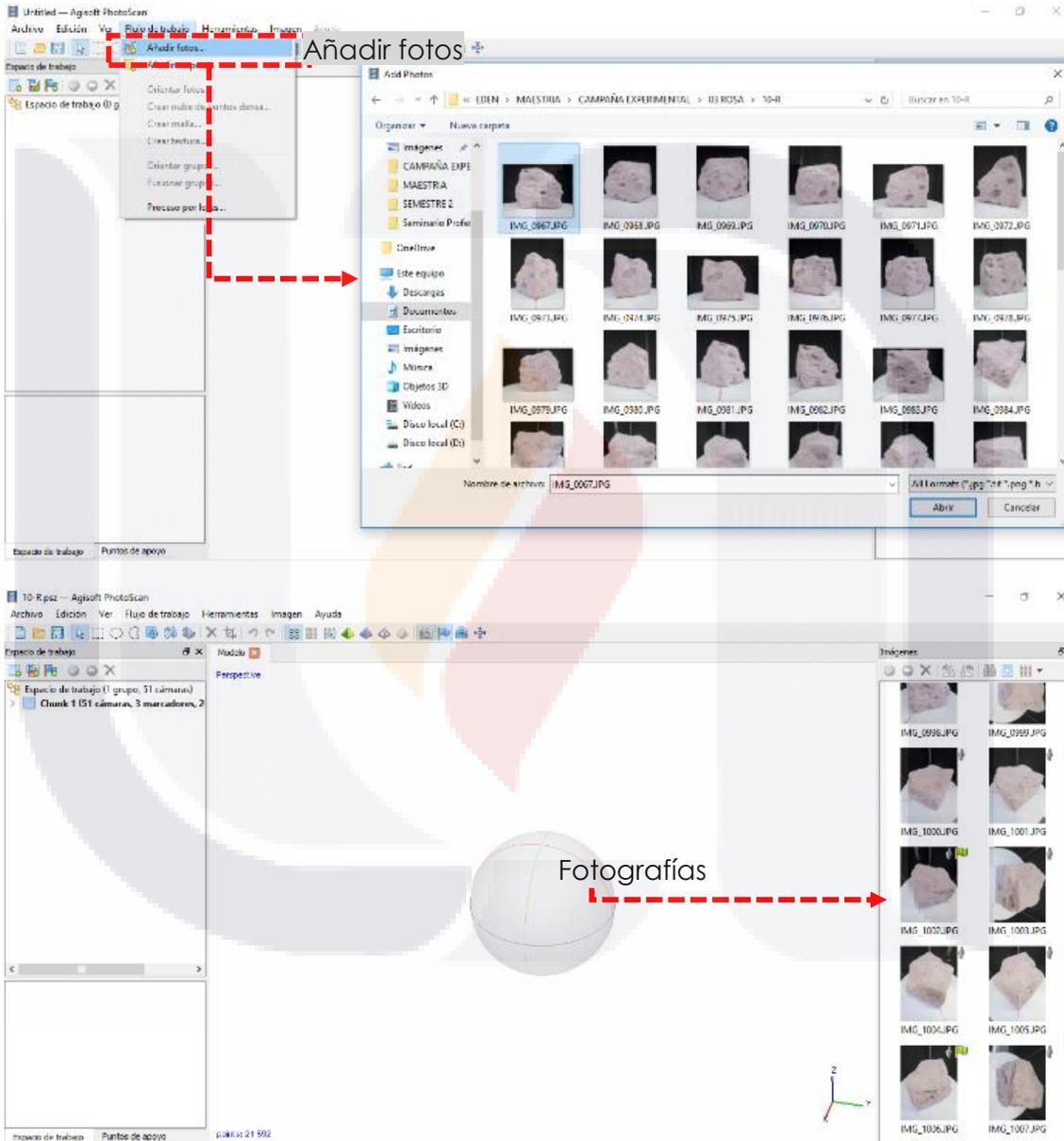


Ilustración 48 Flujo de Foto-modelación y escalado, propuesto

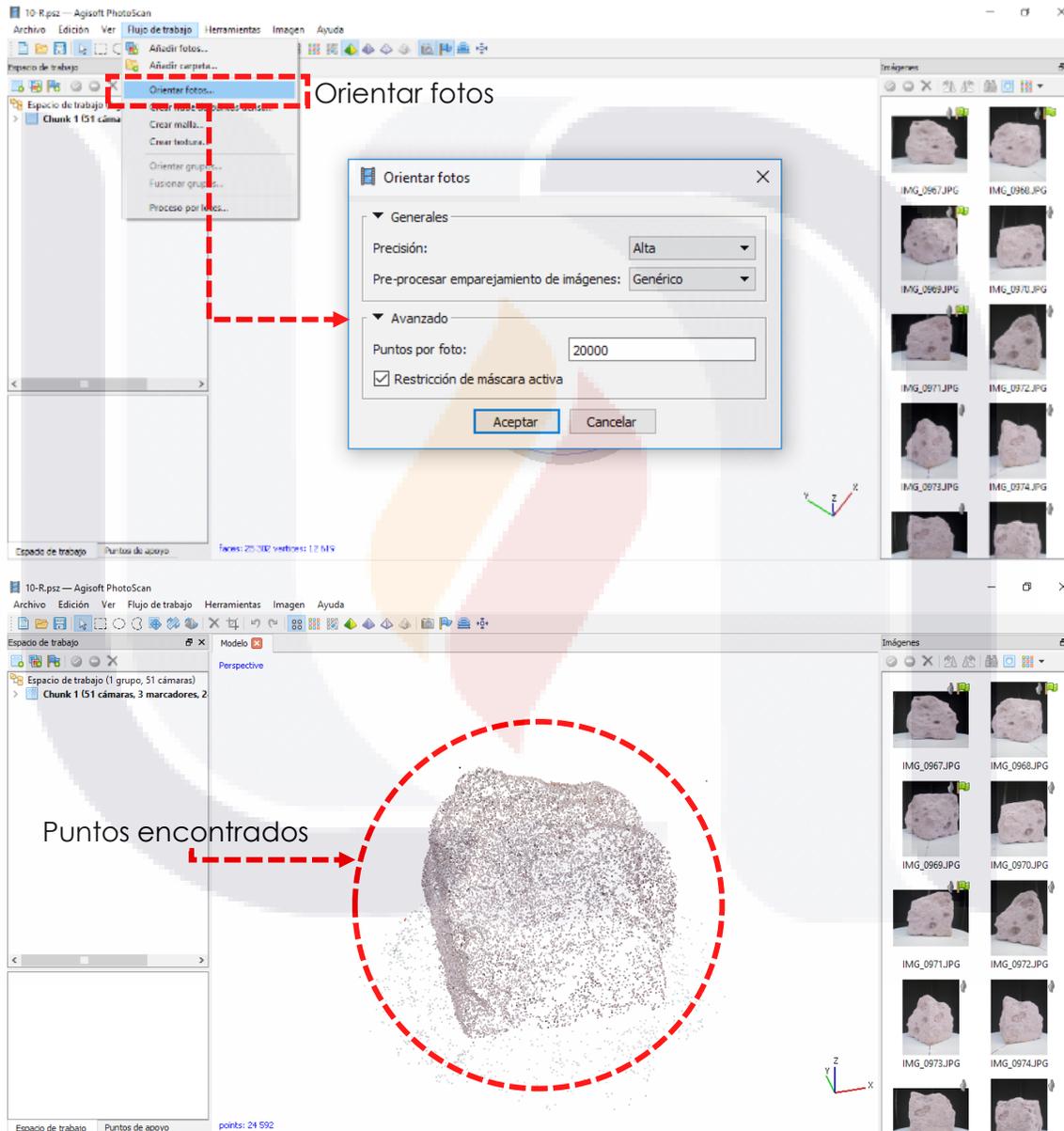
1. AÑADIR FOTOS

Con las 48 fotografías capturadas siguiendo el orden establecido anteriormente, se agregan las fotografías a la plataforma del programa, mediante la pestaña “flujo de trabajo”.



2. ORIENTAR FOTOS

Al cargar las imágenes, se desbloquea en el software el siguiente paso dentro del flujo de trabajo, que es "Orientar fotos" lo cual se realiza de manera automática, como sugerencia se presentan los parámetros aquí utilizados: (Precisión = Alta, Pre-proceso = Genérico, Puntos por foto = 20,000).



3. IMPORTAR PUNTOS

Los puntos registrados y guardados en un archivo con formato “txt.”, se importan a la plataforma en la sección de “puntos de apoyo” de la siguiente manera:

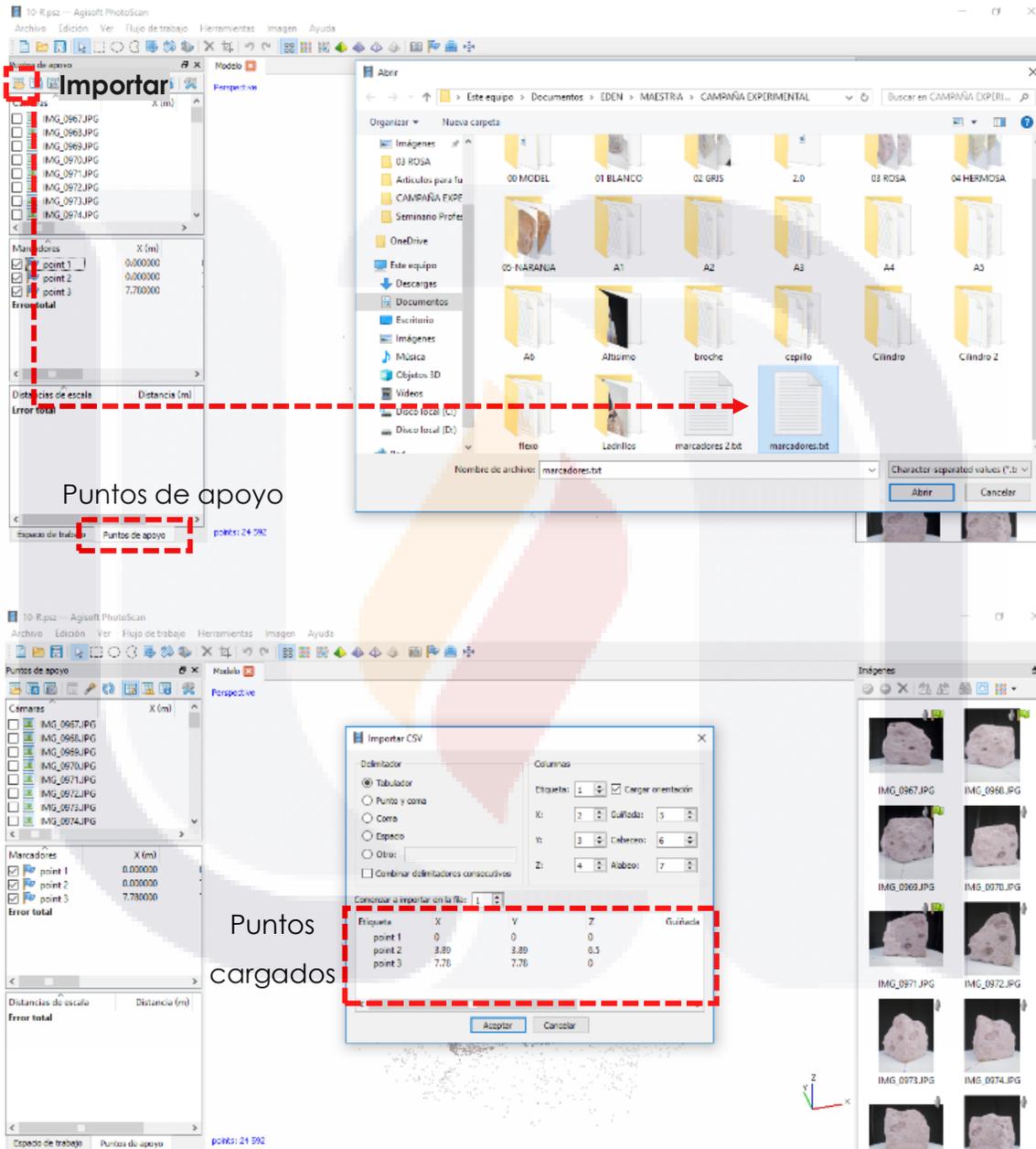
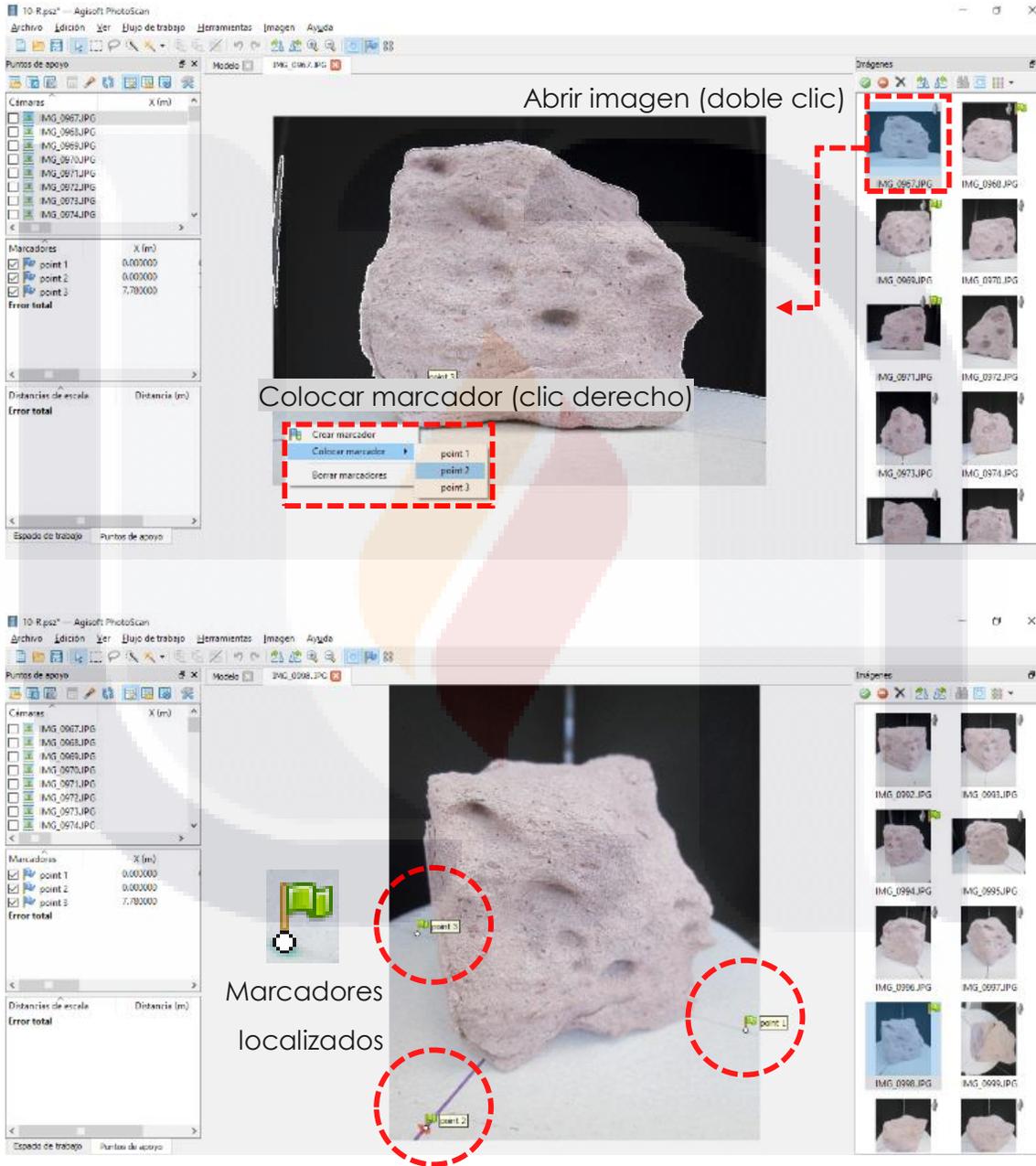


Ilustración 51 Foto- modelación, paso 3

4. LOCALIZAR PUNTOS

La localización de puntos se hace en algunas fotos, al situar el punto correspondiente a las coordenadas según la imagen, por lo menos en un 30% de las fotografías.



5. OPTIMIZAR MODELO

Ya localizados los puntos de apoyo en una porción significativa del total de fotografías, es posible optimizar el modelo hasta ahora generado, utilizando las coordenadas que estos proporcionan, de la siguiente manera:

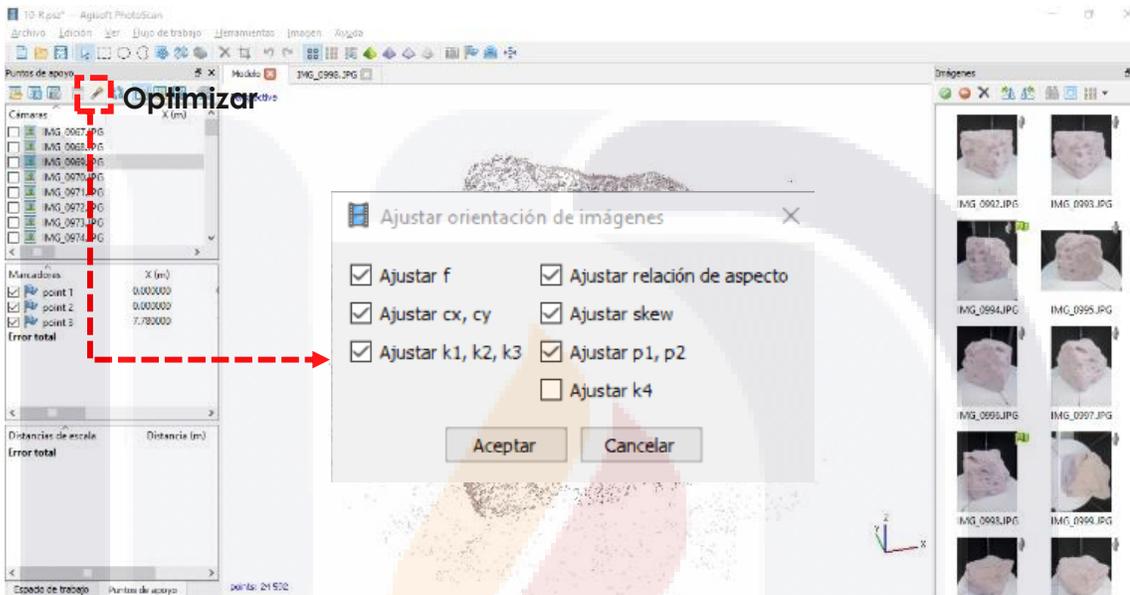
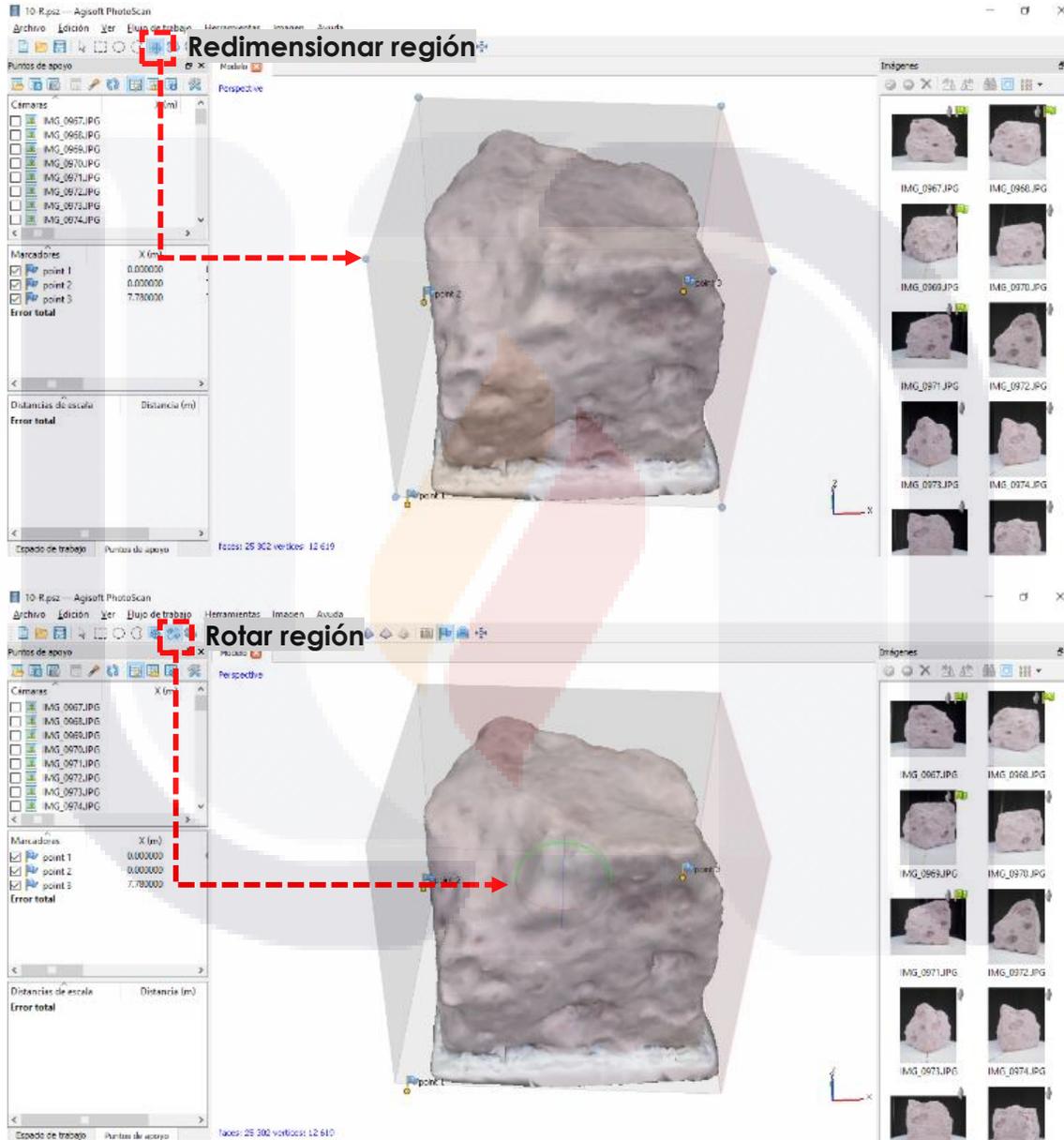


Ilustración 53 Foto-modelación, paso 5

El resultado de la optimización es el conjunto de puntos dispersos con una escala y orientación referenciadas con los puntos de apoyo que se han cargado en él, y una re organización de fotografías para rectificar la orientación automática.

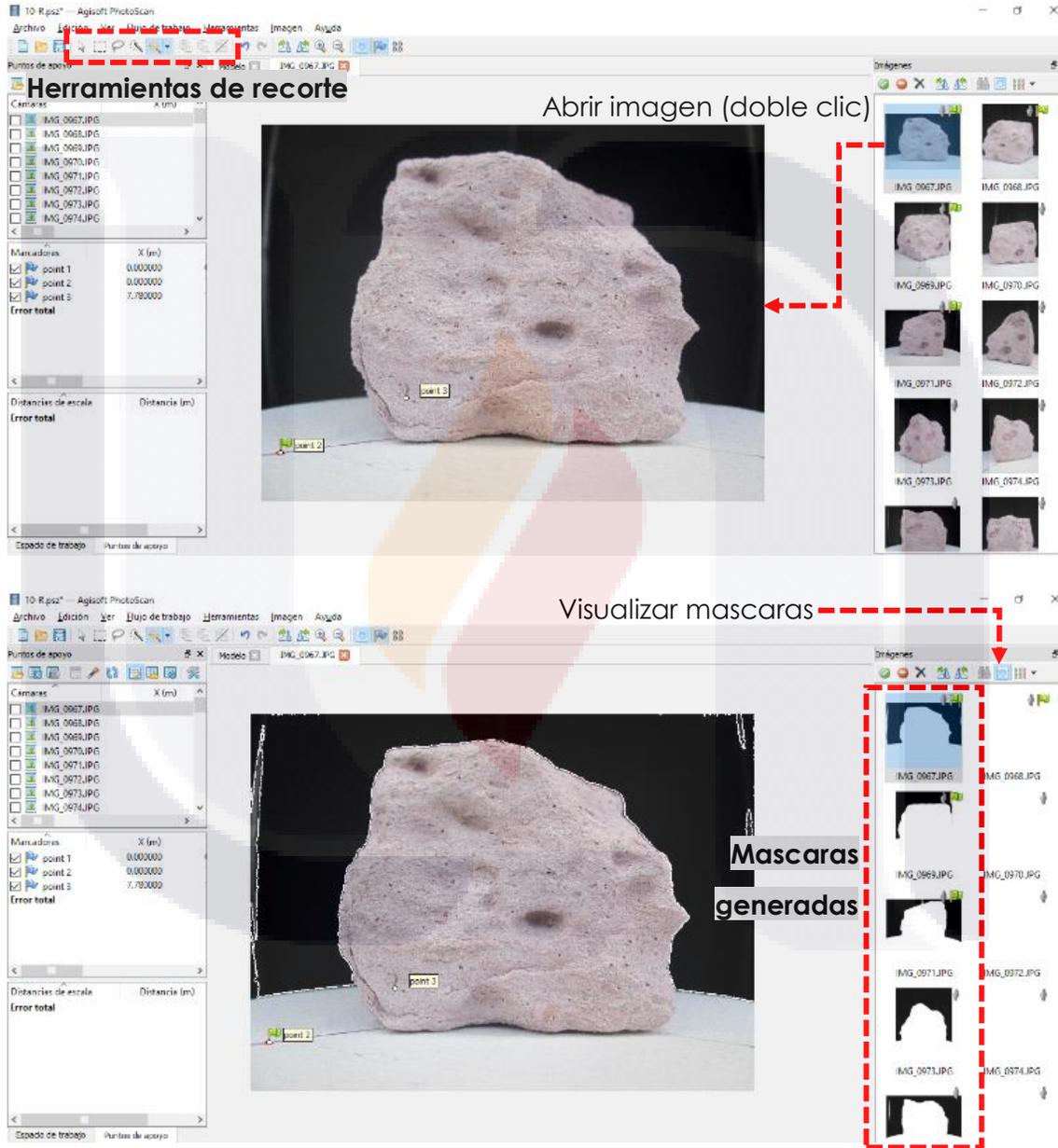
6. ESTABLECER REGIÓN

La región de trabajo se establece y orienta para optimizar los procesos consecuentes, así como garantizar que el modelo se trabaja por completo y no han quedado elementos fuera de foco.



7. GENERAR MASCARAS

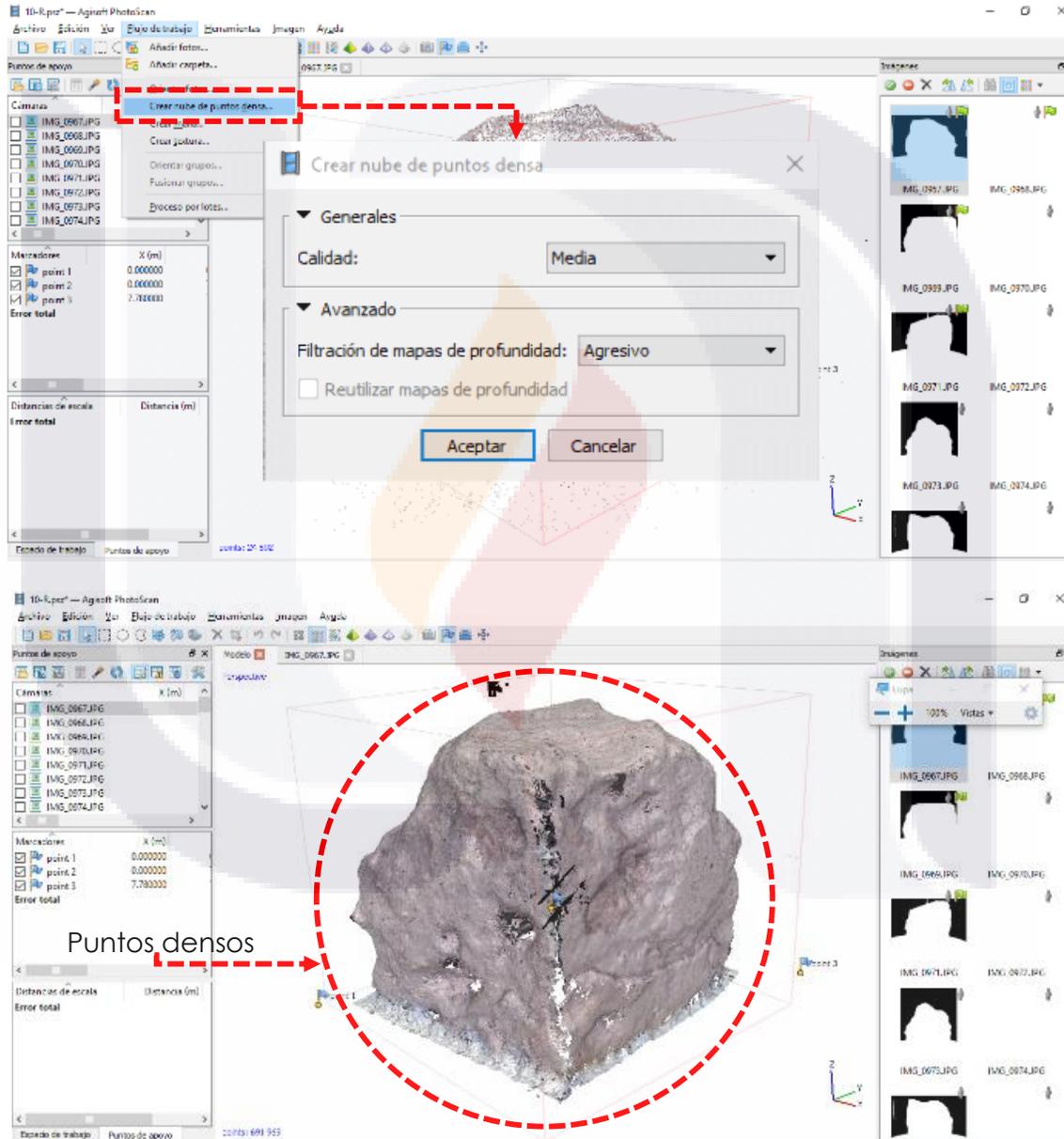
Con el beneficio del fondo solido de un solo color en este caso fondo negro, se tiene la facilidad de recortar o generar las máscaras mediante una herramienta que permite seleccionar regiones por color.



8. CREAR NUBE PUNTOS DENSA

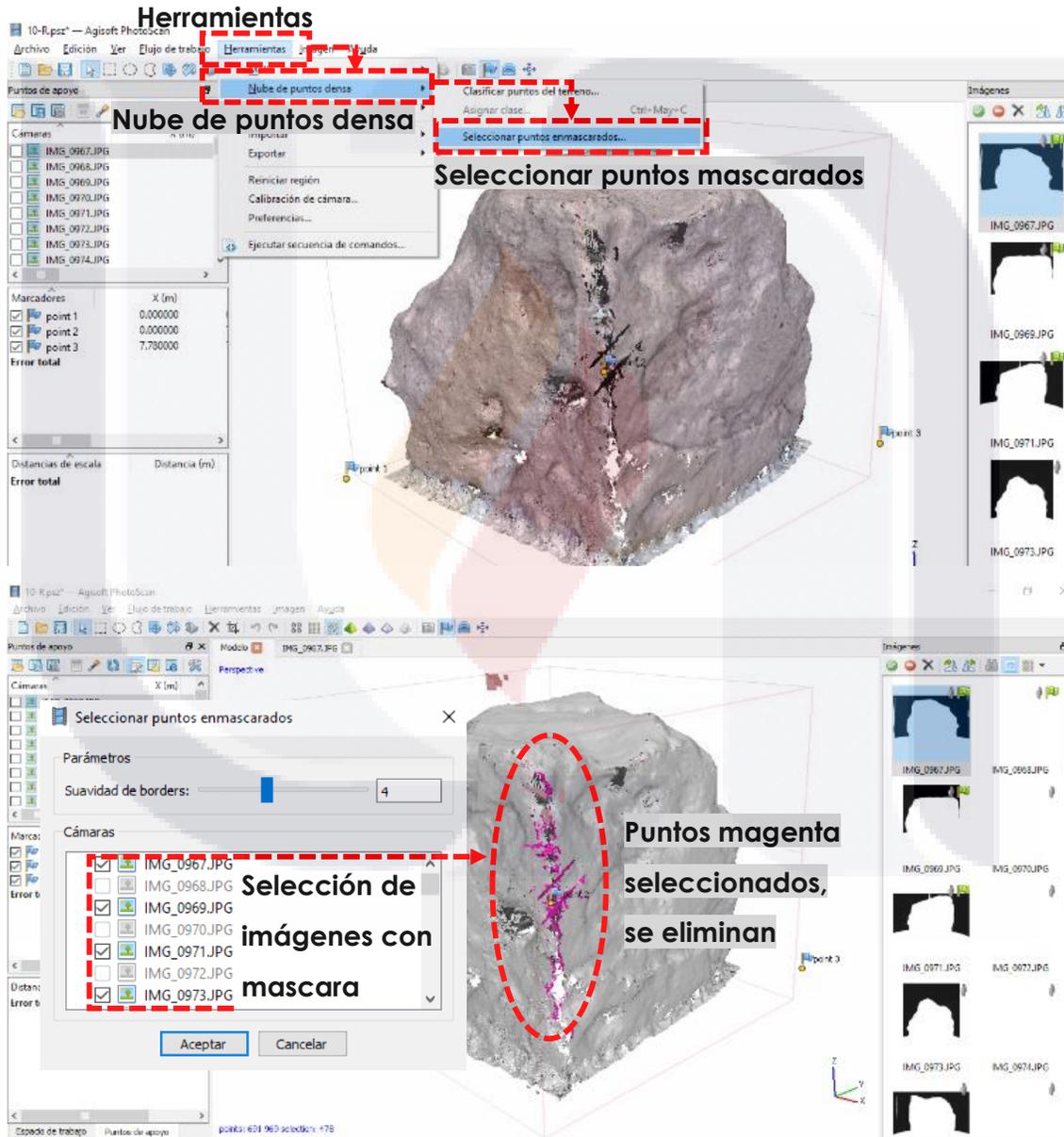
Con las preparaciones previas se puede continuar con el flujo de trabajo, que corresponde a la creación de "nube de puntos densa", con las especificaciones sugeridas que se señalan en la imagen:

(Calidad = media, Filtración de profundidad = Agresivo).



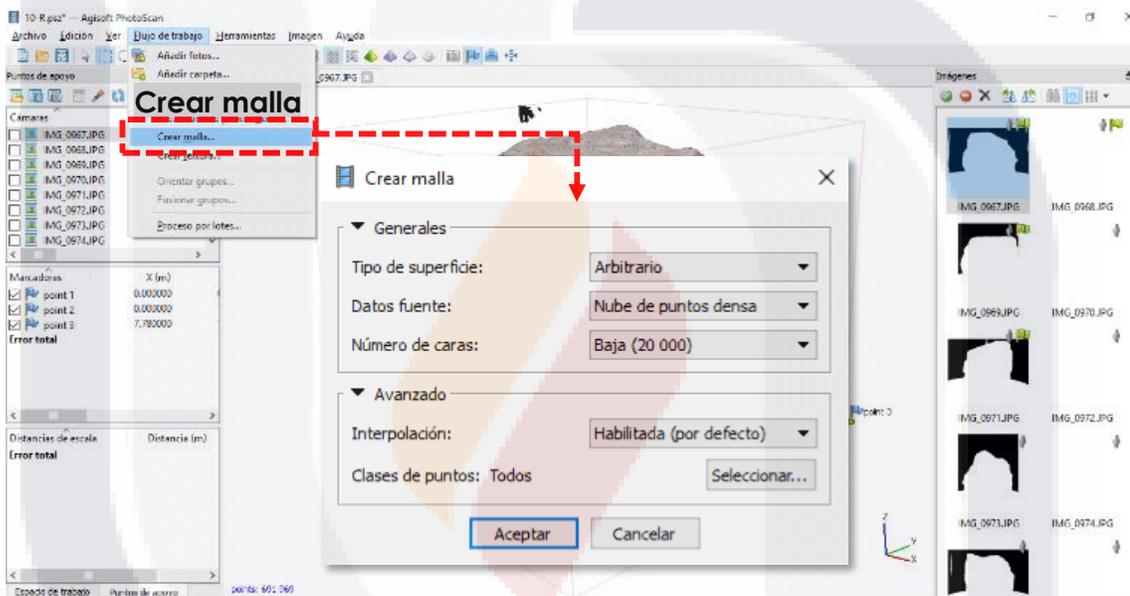
9. SELECCIÓN Y ELIMINACIÓN DE PUNTOS ENMASCARADOS

Las máscaras generadas en el paso 8 se utilizan para seleccionar puntos que no corresponden al modelo, mediante los colores y regiones enmascaradas, esta selección de puntos permite eliminar el ruido que el entorno genera en la fotomodelación.



10. CREAR MALLA DE TRIANGULACIÓN

Con la eliminación de puntos que no corresponden al objeto a modelar, se crea una malla de triangulación, que se basa en la nube de puntos densa para generar una aproximación a la superficie real del elemento en estudio, esta malla es generada con un número de caras a criterio, considerando la superficie y la complejidad del objeto en estudio, para esta experimentación se generan los modelos con la siguiente especificación: Tipo de Superficie = Arbitrario, Datos Fuente = Nube densa, No. Caras = 20,000, Interpolación = por defecto).



11. CERRAR ABERTURAS

Con el modelo terminado se tiene una superficie conformada por triángulos, lo cual no tiene características volumétricas, si no, que es una simple lamina envolvente cuyas unidades son los metros cuadrados, para resolverlo se deben cerrar las oquedades y con ello el software podrá dimensionar el espacio que envuelve dicha superficie en metros cúbicos.

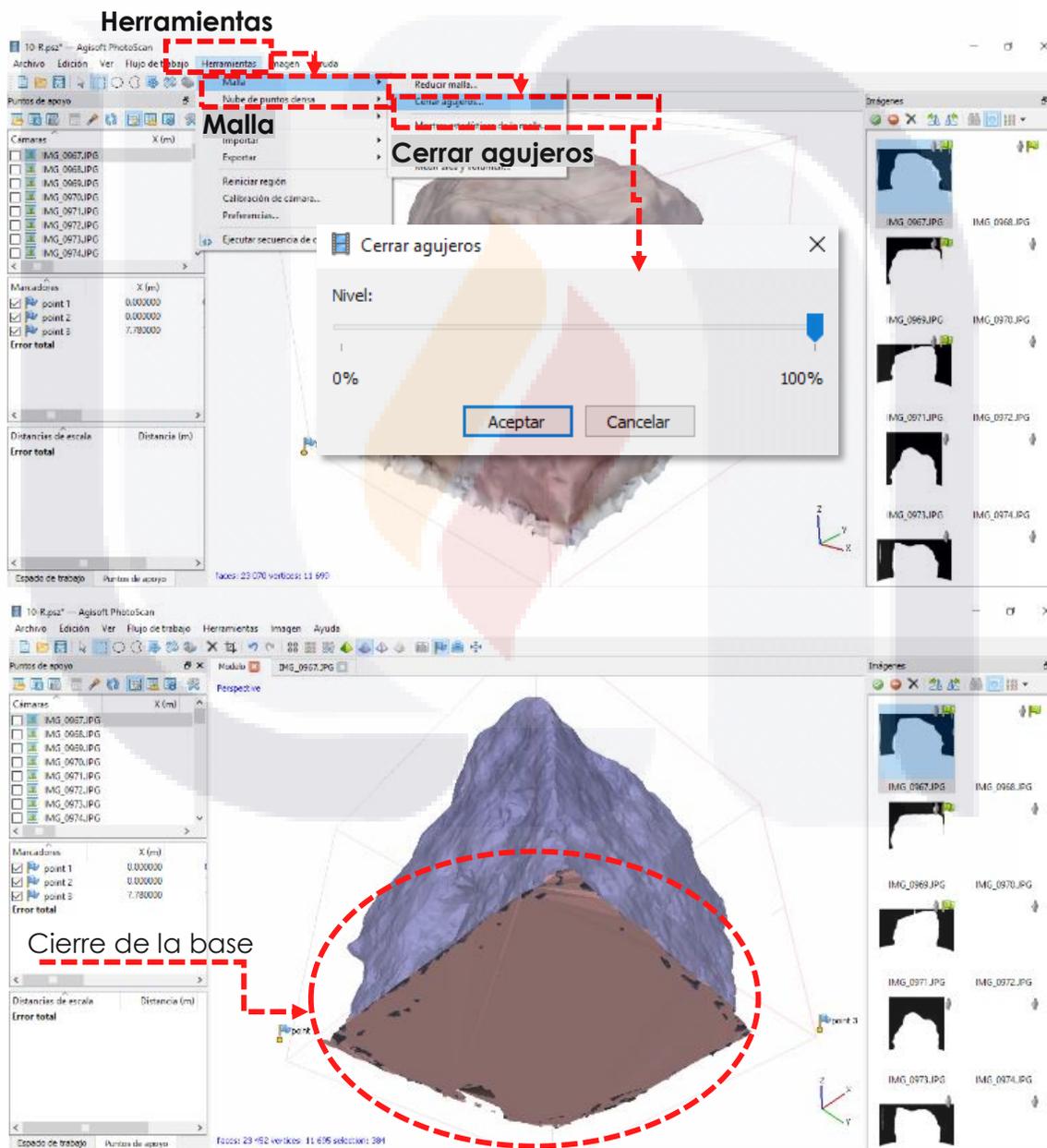


Ilustración 59 Foto-modelación, paso 11

12. CREAR TEXTURA

La textura no es requerida para la medición volumétrica, pero de igual manera puede generarse con este programa para obtener una representación realista de los objetos. Los parámetros para generarla dependen de la complejidad y calidad que se requiere.

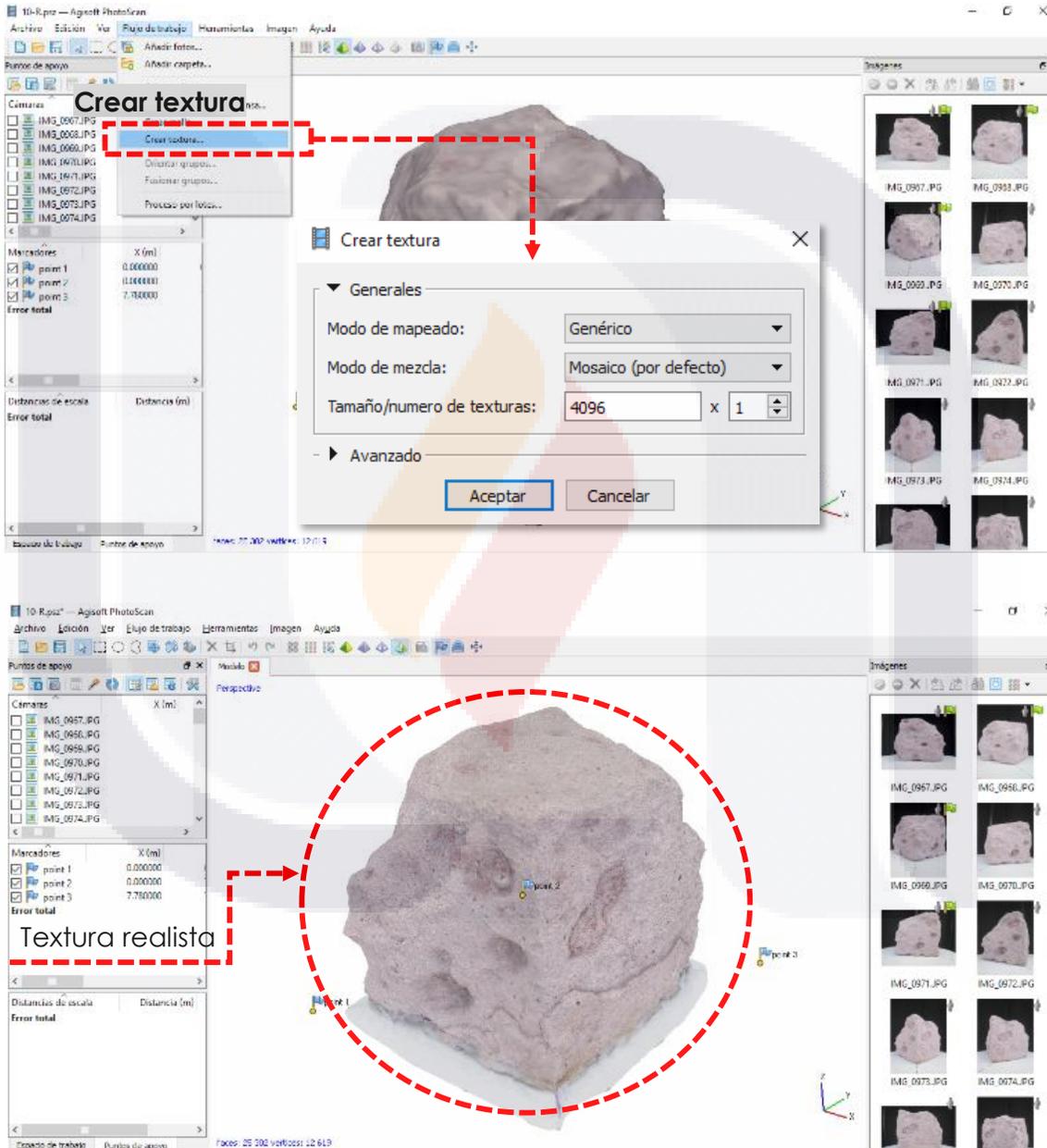


Ilustración 60 Foto-modelación, paso 12

5.5. Registro periódico por método convencional

Para recordar, cada tres ciclos se han registrado los resultados del deterioro acelerado y posteriormente para la medición volumétrica se ha capturan los datos nuevamente tras sumergir las muestras en agua durante 24 horas denominando a esto periodos.

Tabla 18 Registro convencional del peso seco tras los ciclos

Registro convencional del peso seco tras los ciclos de cristalización:

| Muestra | C - 3 | C - 6 | C - 9 | C - 12 |
|---------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 452.53 g | 108.58 g | --- | --- |
| 2 | 452.60 g | 437.06 g | --- | --- |
| 3 | 517.25 g | 497.80 g | 450.85 g | 382.78 g |
| 4 | 469.60 g | --- | --- | --- |
| 5 | 433.69 g | 432.88 g | 388.65 g | 382.78 g |

Tabla 19 Registro convencional tras el primer periodo de registro

Registro convencional periodo de registro 1 (P - 1)

| Muestra | Peso seco | Peso saturado | Peso sumergido | Densidad (g/cm ³) | Volumen (cm ³) |
|---------|--------------|---------------|----------------|-------------------------------|----------------------------|
| 1 | 452.53 g | 537.22 g | 263.31 g | 1.649 | 274.46 |
| 2 | 452.60 g | 521.41 g | 241.54 g | 1.614 | 280.43 |
| 3 | 517.25 g | 553.74 g | 281.94 g | 1.899 | 272.34 |
| 4 | DESINTEGRADA | --- | --- | --- | --- |
| 5 | 433.69 g | 494.52 g | 214.15 g | 1.544 | 280.93 |

Tabla 20 Registro convencional tras el segundo periodo de registro

Registro convencional periodo de registro 2 (P - 2)

| Muestra | Peso seco | Peso saturado | Peso sumergido | Densidad (g/cm ³) | Volumen (cm ³) |
|---------|-------------|---------------|----------------|-------------------------------|----------------------------|
| 1 | DECAIMIENTO | --- | --- | --- | --- |
| 2 | 458.85 g | 458.85 g | 217.86 g | 1.625 | 241.091 |
| 3 | 525.07 g | 525.07 g | 259.42 g | 1.858 | 265.762 |
| 4 | --- | --- | --- | --- | --- |
| 5 | 449.09 g | 449.09 g | 194.27 g | 1.547 | 254.927 |

Tabla 21 Registro convencional tras el tercer periodo de registro

Registro convencional periodo de registro 3 (P - 3)

| Muestra | Peso seco | Peso saturado | Peso sumergido | Densidad (g/cm ³) | Volumen (cm ³) |
|---------|-----------|---------------|----------------|-------------------------------|----------------------------|
| 1 | --- | --- | --- | --- | --- |
| 2 | --- | --- | --- | --- | --- |
| 3 | 373.50 g | 396.72 g | 198.02 g | 1.878 | 198.927 |
| 4 | --- | --- | --- | --- | --- |
| 5 | 354.25 g | 405.40 g | 176.72 g | 1.547 | 228.941 |

Tabla 22 Registro convencional tras el cuarto periodo de registro

Registro convencional periodo de registro 4 (P - 4)

| Muestra | Peso seco | Peso saturado | Peso sumergido | Densidad (g/cm ³) | Volumen (cm ³) |
|---------|--------------|---------------|----------------|-------------------------------|----------------------------|
| 1 | DECAIMIENTO | --- | --- | --- | --- |
| 2 | FRAGMENTOS | --- | --- | --- | --- |
| 3 | 346.99 g | 369.07 g | 184.01 g | 1.871 | 185.431 |
| 4 | DESINTEGRADA | --- | --- | --- | --- |
| 5 | 309.87 g | 355.71 g | 156.54 g | 1.553 | 199.569 |

5.6. Registro periódico método indirecto

A continuación se presentan los resultados de la medición volumétrica por fotogrametría así como el peso que resulta del cálculo utilizando los valores teóricos del peso específico, para cada muestra.

Tabla 23 Registro indirecto tras el tercer ciclo de cristalización

| Muestra | Densidad teórica (g/cm ³) | | Volumen APS (cm ³) | Peso propio (g) | |
|---------|---------------------------------------|------------|--------------------------------|-----------------|------------|
| | Práctica | Científica | | Práctico | Científico |
| | 1 | 1.75 | | 1.67 | 283.540 |
| 2 | 1.75 | 1.67 | 278.720 | 487.76 | 465.46 |
| 3 | 1.75 | 1.95 | 273.430 | 478.50 | 533.19 |
| 4 | 1.75 | 1.80 | 269.960 | 472.43 | 485.93 |
| 5 | 1.75 | 1.65 | 283.240 | 495.67 | 467.35 |

Tabla 24 Registro indirecto tras primer periodo de registro

| Muestra | Densidad teórica (g/cm ³) | | Volumen APS (cm ³) | Peso propio (g) | |
|---------|---------------------------------------|------------|--------------------------------|-----------------|------------|
| | Práctica | Científica | | Práctico | Científico |
| | 1 | 1.75 | | 1.67 | 191.250 |
| 2 | 1.75 | 1.67 | 265.500 | 464.63 | 443.39 |
| 3 | 1.75 | 1.95 | 268.030 | 469.05 | 522.66 |
| 4 | DESINTEGRACIÓN | | -- -- | --- | --- |
| 5 | 1.75 | 1.65 | 269.020 | 470.79 | 443.88 |

Tabla 25 Registro indirecto tras sexto ciclo de cristalización

| Muestra | Densidad teórica (g/cm ³) | | Volumen APS (cm ³) | Peso propio (g) | |
|---------|---------------------------------------|------------|--------------------------------|-----------------|------------|
| | Práctica | Científica | | Práctico | Científico |
| | 1 | 1.75 | | 1.67 | 73.180 |
| 2 | 1.75 | 1.67 | 256.560 | 448.98 | 428.46 |
| 3 | 1.75 | 1.95 | 257.130 | 449.98 | 501.40 |
| 4 | -- -- | -- -- | -- -- | --- | --- |
| 5 | 1.75 | 1.65 | 269.740 | 472.05 | 445.07 |

Tabla 26 Registro indirecto tras segundo periodo de registro

Registro indirecto del periodo 2 (P - 2)

| Muestra | Densidad teórica (g/cm ³) | | Volumen APS (cm ³) | Peso propio (g) | |
|---------|---------------------------------------|------------|--------------------------------|-----------------|------------|
| | Práctica | Científica | | Práctico | Científico |
| 1 | DECAIMIENTO | | --- | --- | --- |
| 2 | 1.75 | 1.67 | 248.580 | 435.02 | 415.13 |
| 3 | 1.75 | 1.95 | 265.130 | 463.98 | 517.00 |
| 4 | --- | --- | --- | --- | --- |
| 5 | 1.75 | 1.65 | 253.630 | 443.85 | 418.49 |

Tabla 27 Registro indirecto tras el noveno ciclo de cristalización

Registro indirecto del ciclo 9 (C - 9)

| Muestra | Densidad teórica (g/cm ³) | | Volumen APS (cm ³) | Peso propio (g) | |
|---------|---------------------------------------|------------|--------------------------------|-----------------|------------|
| | Práctica | Científica | | Práctico | Científico |
| 1 | --- | --- | --- | --- | --- |
| 2 | FRAGMENTACIÓN | | --- | --- | --- |
| 3 | 1.75 | 1.95 | 233.730 | 409.03 | 455.77 |
| 4 | --- | --- | --- | --- | --- |
| 5 | 1.75 | 1.65 | 244.140 | 427.25 | 402.83 |

Tabla 28 Registro indirecto tras tercer periodo de registro

Registro indirecto del periodo 3 (P - 3)

| Muestra | Densidad teórica (g/cm ³) | | Volumen APS (cm ³) | Peso propio (g) | |
|---------|---------------------------------------|------------|--------------------------------|-----------------|------------|
| | Práctica | Científica | | Práctico | Científico |
| 1 | --- | --- | --- | --- | --- |
| 2 | --- | --- | --- | --- | --- |
| 3 | 1.75 | 1.95 | 200.560 | 350.98 | 391.09 |
| 4 | --- | --- | --- | --- | --- |
| 5 | 1.75 | 1.65 | 228.430 | 399.75 | 376.91 |

Tabla 29 Registro indirecto tras el decimosegundo ciclo de cristalización

Registro indirecto del ciclo 12 (C - 12)

| Muestra | Densidad teórica (g/cm ³) | | Volumen APS (cm ³) | Peso propio (g) | |
|---------|---------------------------------------|------------|--------------------------------|-----------------|------------|
| | Práctica | Científica | | Práctico | Científico |
| 1 | --- | --- | --- | --- | --- |
| 2 | --- | --- | --- | --- | --- |
| 3 | 1.75 | 1.95 | 197.840 | 346.22 | 385.79 |
| 4 | --- | --- | --- | --- | --- |
| 5 | 1.75 | 1.65 | 228.770 | 400.35 | 377.47 |

Tabla 30 Registro indirecto tras cuarto periodo de registro

Registro indirecto del periodo 4 (P - 4)

| Muestra | Densidad teórica (g/cm ³) | | Volumen APS (cm ³) | Peso propio (g) | |
|---------|---------------------------------------|------------|--------------------------------|-----------------|------------|
| | Práctica | Científica | | Práctico | Científico |
| 1 | DECAIMIENTO | | --- | --- | --- |
| 2 | FRAGMENTACIÓN | | --- | --- | --- |
| 3 | 1.75 | 1.95 | 185.450 | 324.54 | 361.63 |
| 4 | DESINTEGRACIÓN | | --- | --- | --- |
| 5 | 1.75 | 1.65 | 200.260 | 350.46 | 330.43 |



Ilustración 61 Aspecto final de las muestras

5.7. Comparativa de métodos

Con la finalidad de demostrar las diferencias entre la metodología convencional de medición llevada en laboratorio, contra la técnica aquí propuesta que se basa en mediciones indirectas, se presenta un conjunto de gráficas que resumen los resultados. A continuación se muestra la comparativa respecto al volumen obtenido:

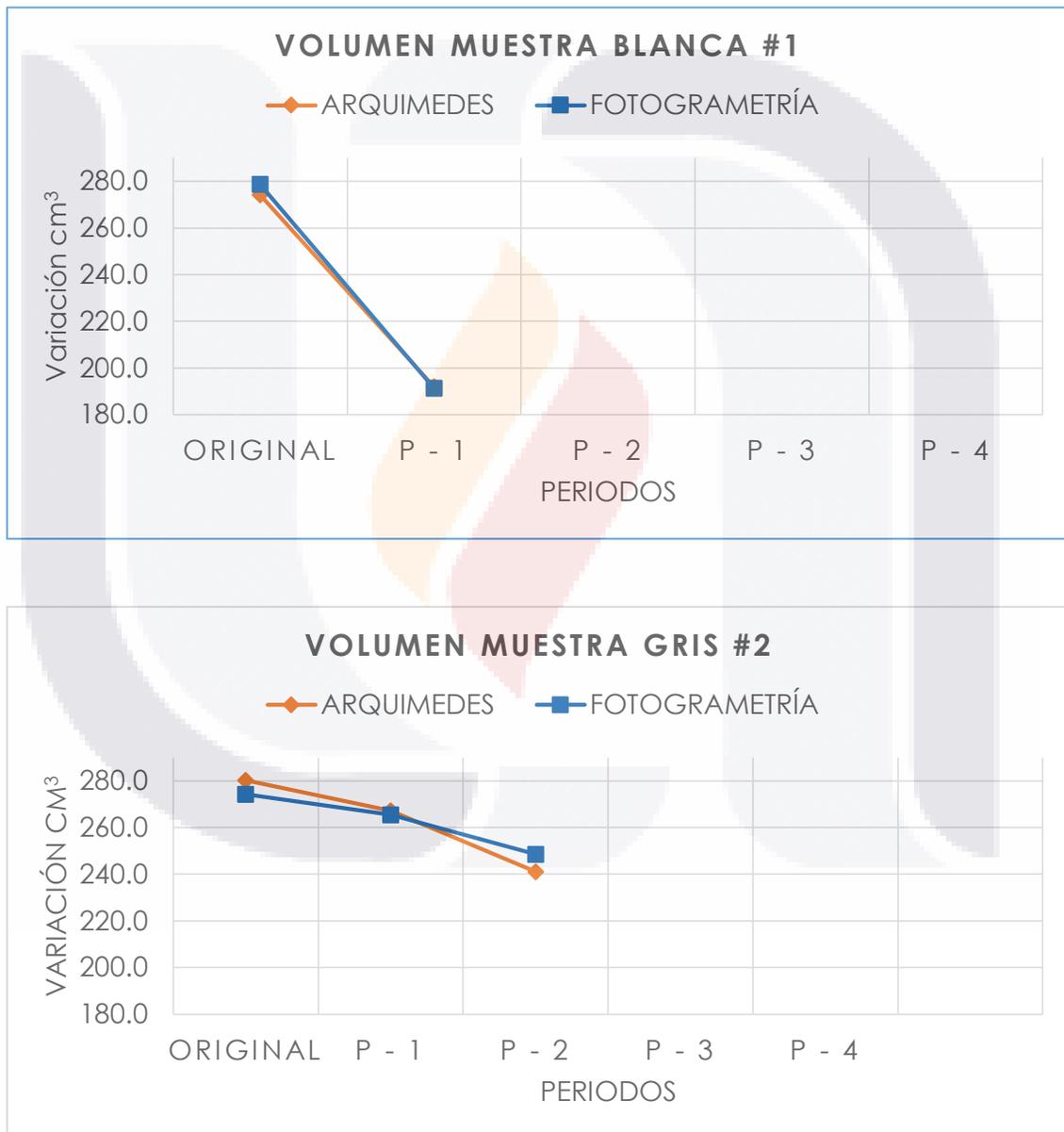


Ilustración 63 Comparación de volumen por periodos: piedras, probeta 2

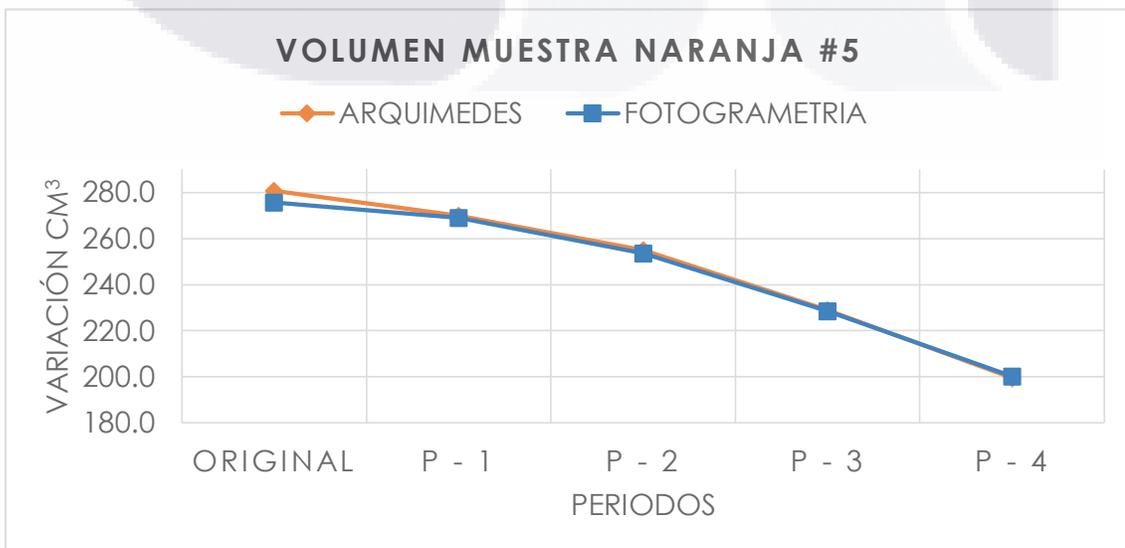
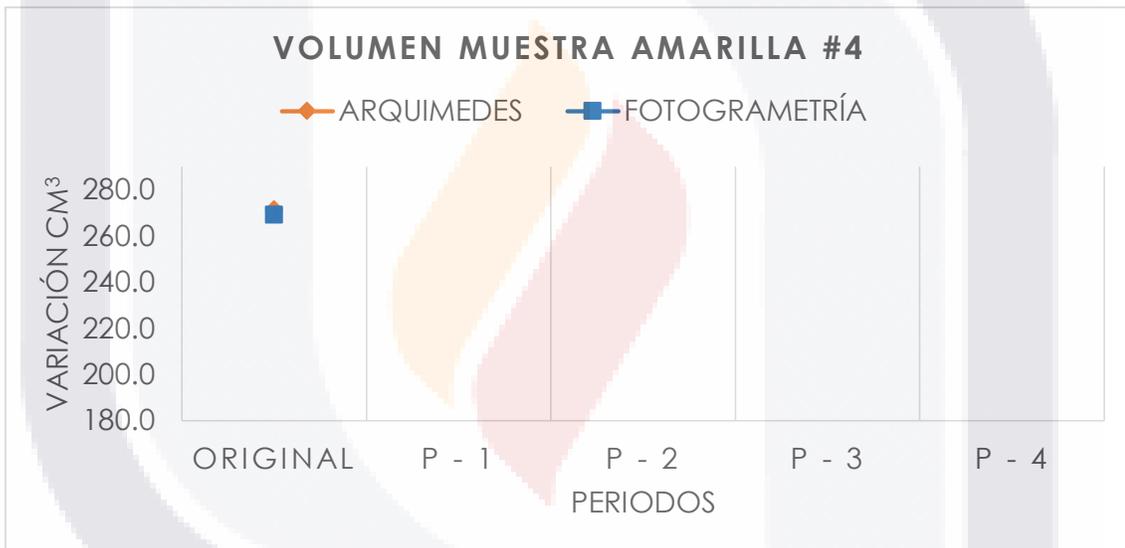
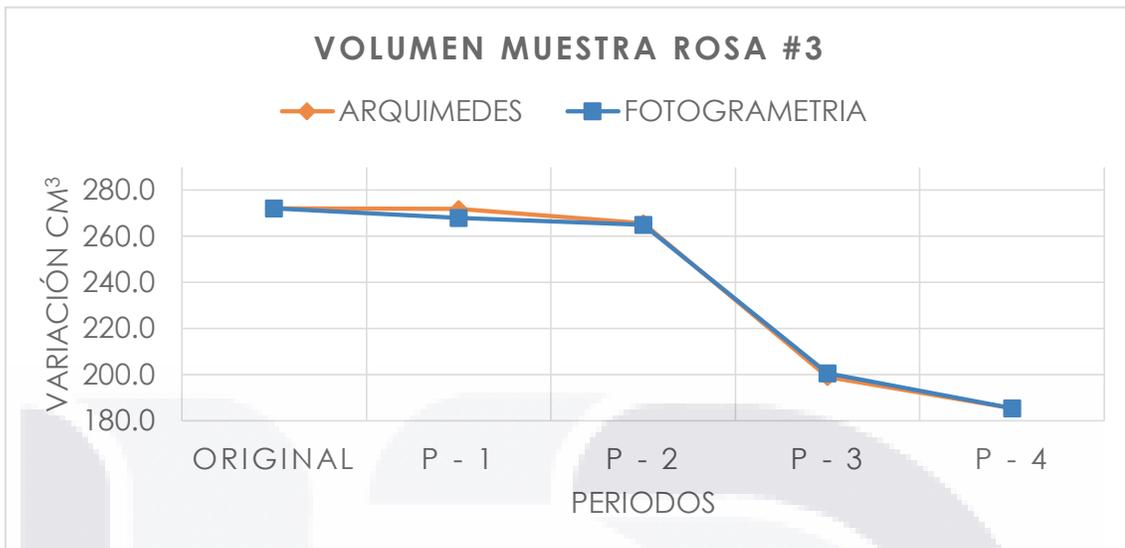


Ilustración 66 Comparación de volumen por periodos: piedras, probeta 5

En cuanto al peso de cada piedra, se tiene el registro periódico convencional para cada una de ellas, lo cual se compara con los valores que se obtienen mediante el método indirecto, utilizando la densidad próxima encontrada entre las fuentes teóricas convencionales y científicas, multiplicándolo con el volumen fotogramétrico:

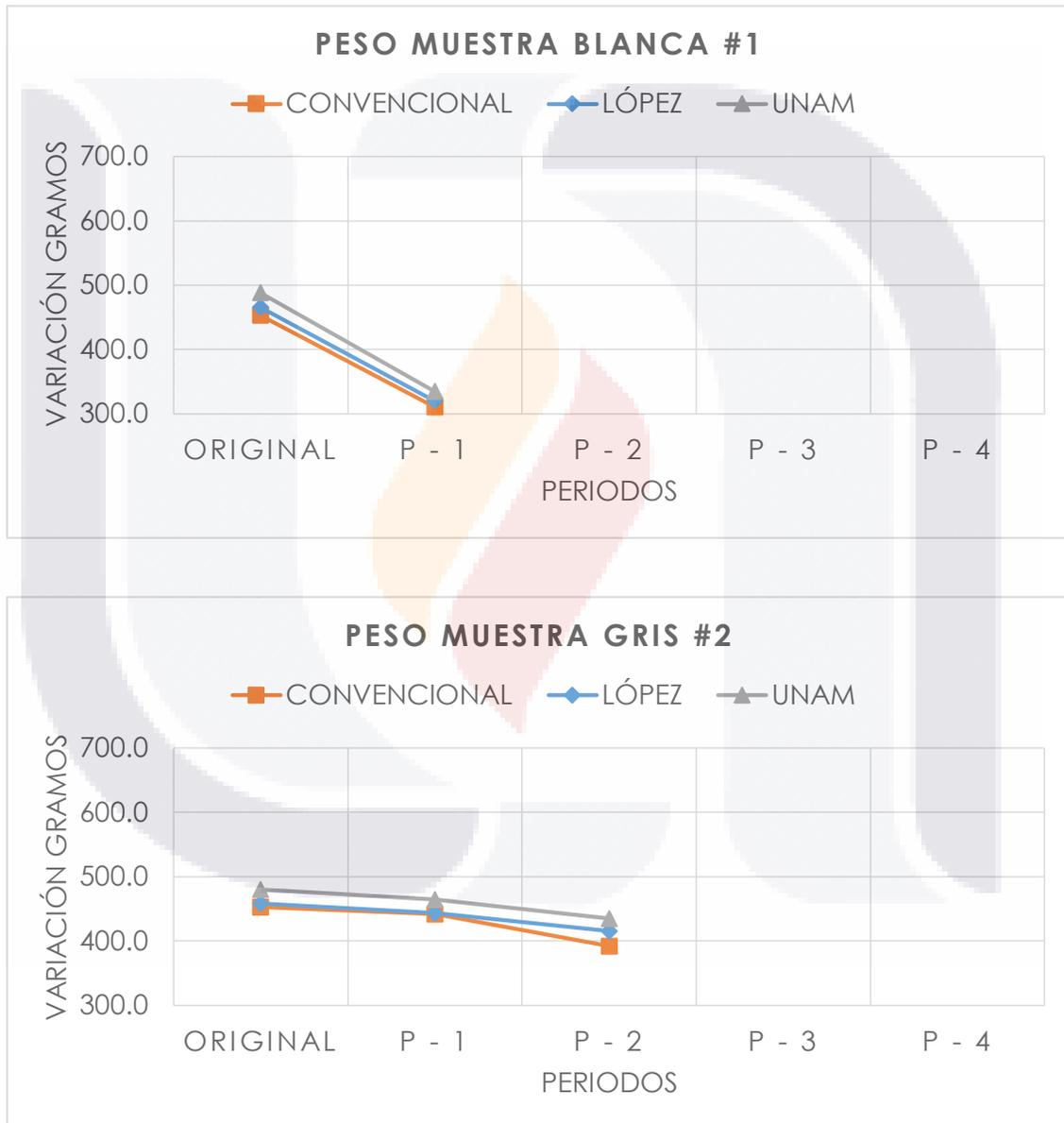


Ilustración 67 Comparativa del peso obtenido por las técnicas, probeta 2

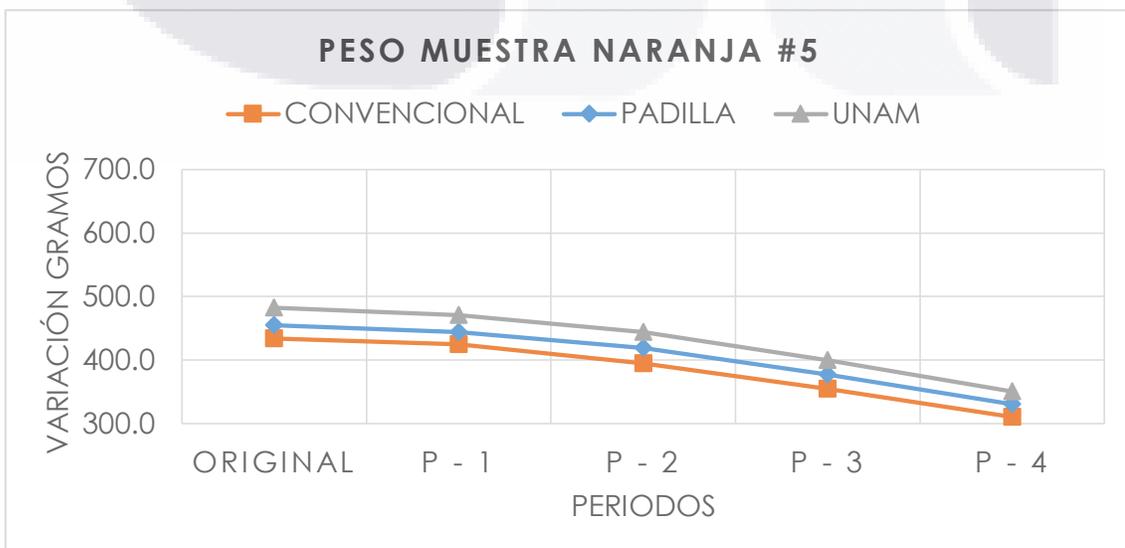
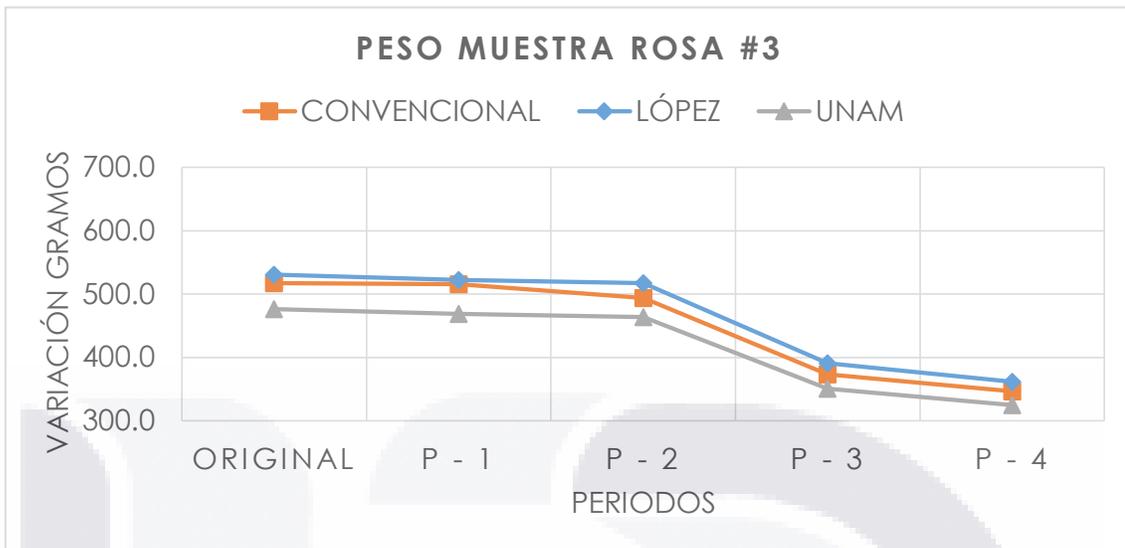


Ilustración 70 Comparativa del peso obtenido por las técnicas, probeta 5

Según las gráficas anteriores, la cuantificación de volumen por fotogrametría de las piedras es cada vez más exacta conforme las muestras se van deteriorando y pierden sus caras planas. Donde mejor se puede apreciar esto, es en la gráfica de volumen de la piedra Naranja #5, pues conforme avanzan los periodos, la medición por fotogrametría se va acercando cada vez más a las mediciones realizadas mediante el método convencional. Caso contrario a la muestra Gris #2 en donde se alcanza la mayor diferencia entre los dos métodos tras la degradación total de la piedra, el motivo es la forma en que se deterioró en el último ensayo, pues las fracturas generan huecos internos, lo cual es imposible de medir por esta técnica, que solo representa superficies virtualmente.

En cuanto al cálculo del peso propio de las piedras por método indirecto, se aprecia como los valores de la densidad obtenidos de fuentes científicas están siempre próximas al valor real, mientras que utilizando las fuentes convencionales o de fácil acceso, se obtienen valores que pueden estar tanto por encima del real como por debajo, consiguiendo solo un acierto en la piedra Amarilla # 4

CAPÍTULO 6

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. La estandarización del proceso

La definición del método estandarizado que se ha establecido aquí, el cual consta de 48 imágenes, resulta de las orientaciones que se pueden asignar fácilmente utilizando el foto-estudio desarrollado y utilizado aquí mismo. Dicho número de fotografías ha permitido de una manera fácil y aceptable la digitalización de las muestras, en todos los casos y periodos durante la experimentación.

Mientras que los tres puntos de referencia propuestos, entiéndase que son los mínimos para generar una orientación y escala de los modelos realizados por fotogrametría, puesto que tres puntos en un espacio tridimensional basado en los ejes de coordenadas "X, Y, Z" son los mínimos para generar un plano. Pues bien podrían agregarse una mayor cantidad de puntos si el modelo lo requiriera.

En cuanto al proceso de enmascarado para la eliminación de puntos basura, se consigue una limpieza sobre la envoltente delimitando los modelos virtuales, consiguiendo así mejorar la aproximación a la superficie real de las muestras, esto sin la necesidad de enmascarar todas las imágenes.

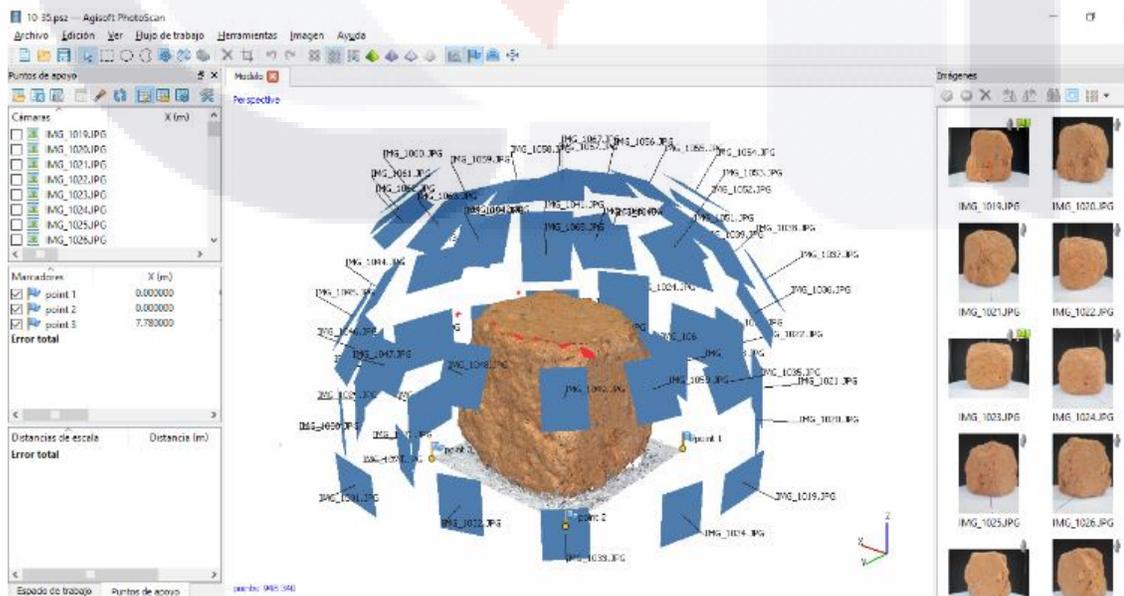


Ilustración 72 Captura de pantalla, modelación por APS.

Por último la herramienta propia del software APS, que permite cerrar y corregir el mallado ofrece una gran ventaja ahorrando tiempo en el proceso, puesto que en otras investigaciones se plantea utilizar programas externos para detectar y corregir manualmente estos errores que proporciona directamente la fotogrametría, como lo es la extensión para SKP, salid inspector2 (Figueroa & Pacheco, 2016).

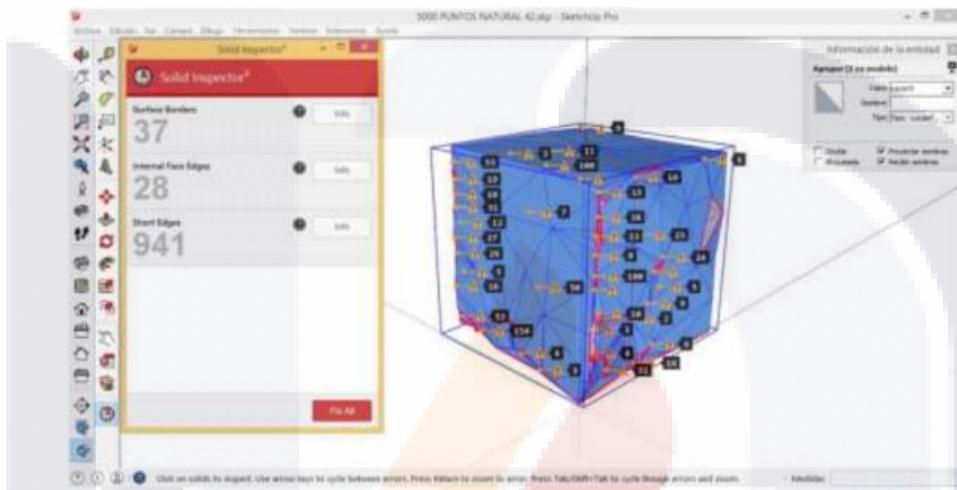


Ilustración 73 Problemática con tipología y aberturas del mallado (Figueroa & Pacheco, 2016)

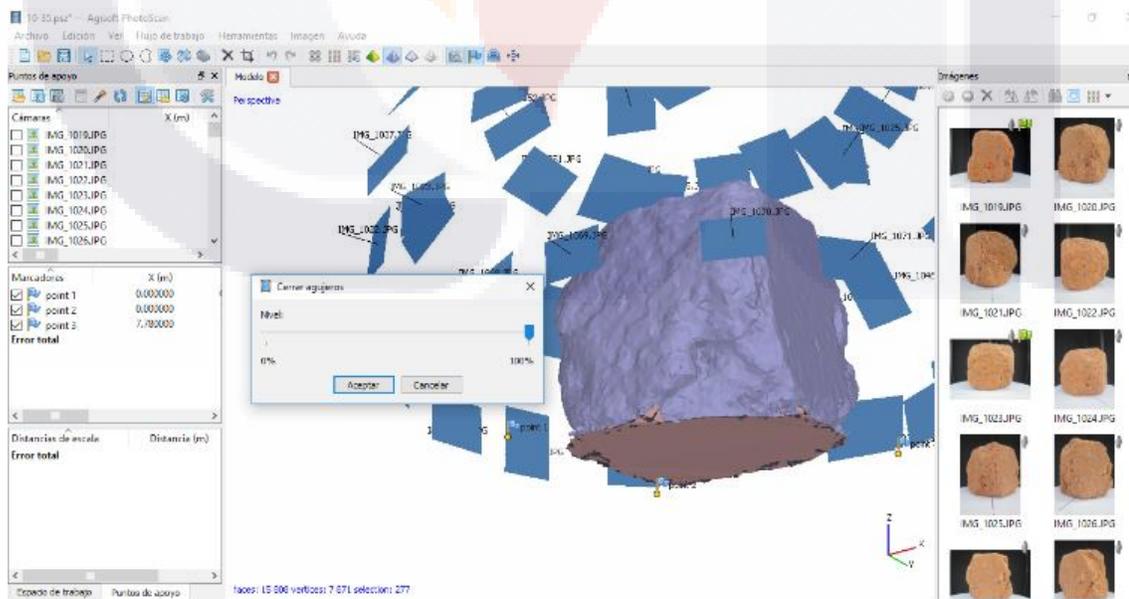


Ilustración 74 Reparación de malla automática por APS

6.2. Alteraciones en los ciclos de envejecimiento

El proceso de saturación en agua convencional requerido para registrar el volumen y la densidad por peso sumergido, ha conseguido acelerar aún más el proceso de decaimiento establecido en la EN, dicho decaimiento puede apreciarse en la gráfica siguiente donde se representa el monitoreo del volumen de cada muestra.

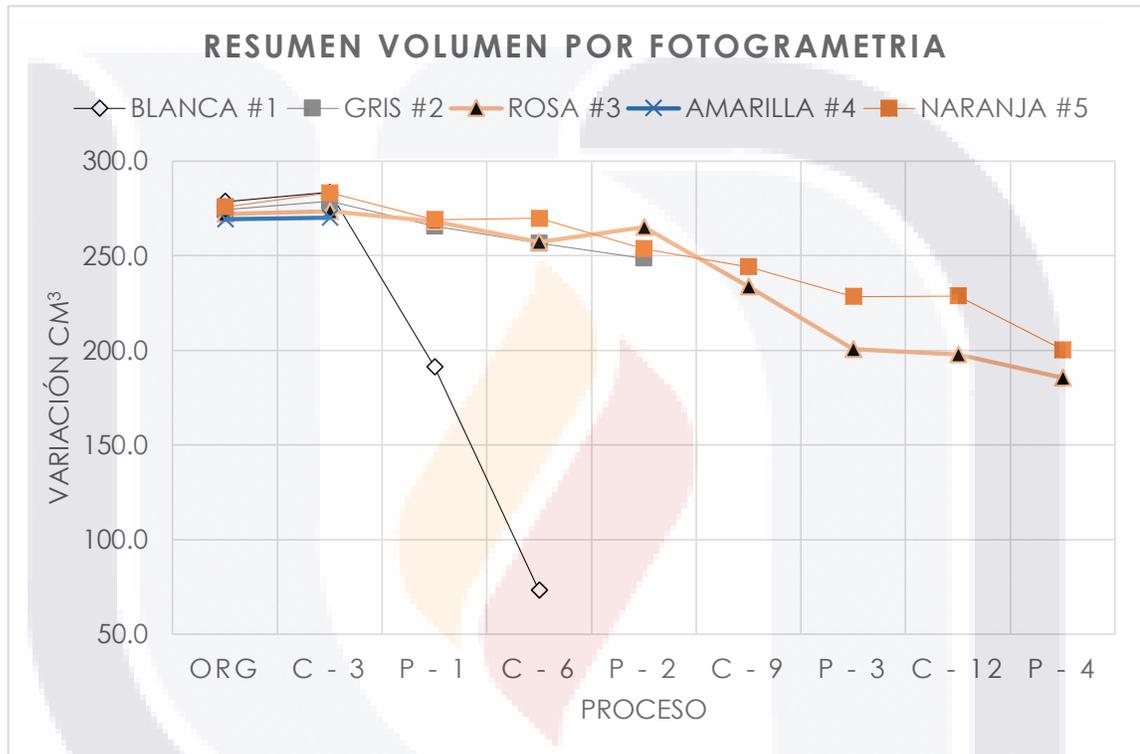


Ilustración 75 Monitoreo del volumen de las piedras por etapas

Con la información de la gráfica se aprecia como las piedras son afectadas en mayor grado por los procesos requeridos para la medición por principio de Arquímedes, con lo cual se evidencia una alteración en la degradación establecida por la EN, cuyos efectos no se consideraban al principio de la experimentación. Si bien existen incrementos de volumen, esto se debe al cambio superficial generado por las fluorescencias que generan escamas exteriores e incluso abultamiento de clastos por oquedades internas.

Otra manera de analizar los cambios que sufren las piedras por el envejecimiento acelerado es el seguimiento del peso, cuyo valor se espera incremente durante los primeros ciclos y posteriormente decaiga.

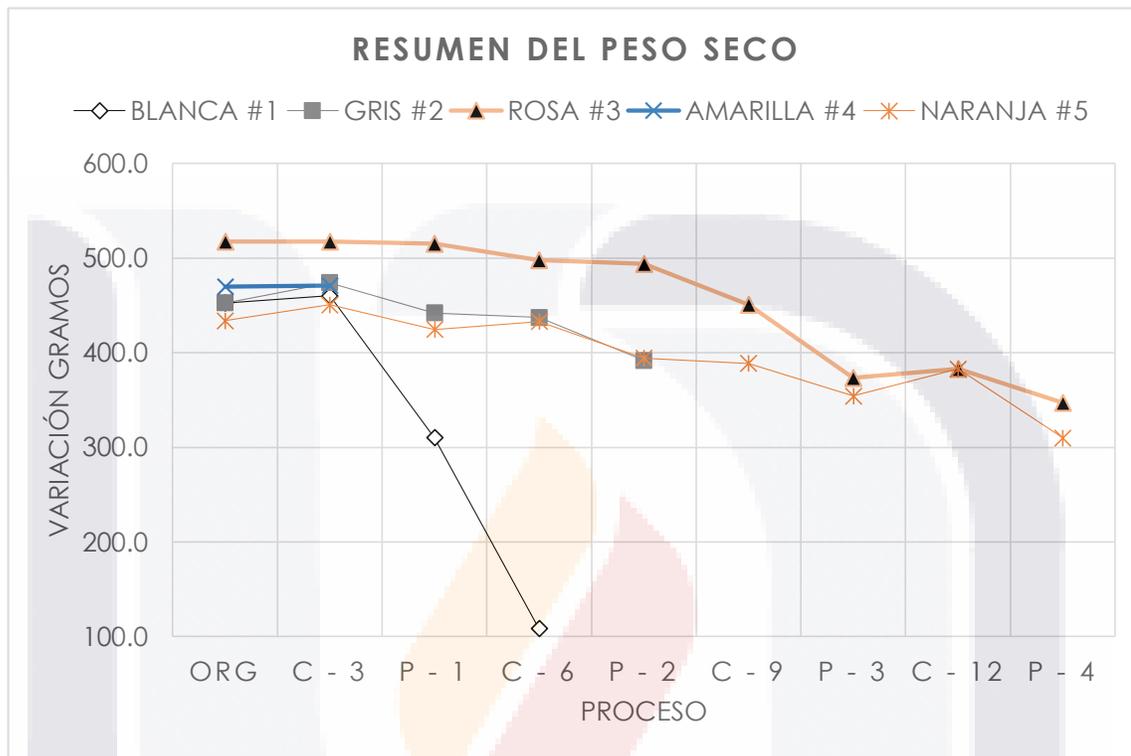


Ilustración 76 Seguimiento del peso de las piedras por etapas

En los primeros tres ciclos de cristalización de SFS se ha conseguido un incremento esperado en el peso de las piedras, y posteriormente se tiene nuevamente una variación que si bien no llega a representar un incremento de peso en todos los periodos, se evidencia nuevamente como es que la saturación en agua por el método convencional ocasiona un mayor decaimiento en las piedras.

6.3. El cambio de la densidad de las muestras

La densidad se muestra con alteraciones principalmente por el cambio de peso de las piedras, este evento puede apreciarse en la siguiente gráfica que plasma los registros a lo largo de la experimentación:

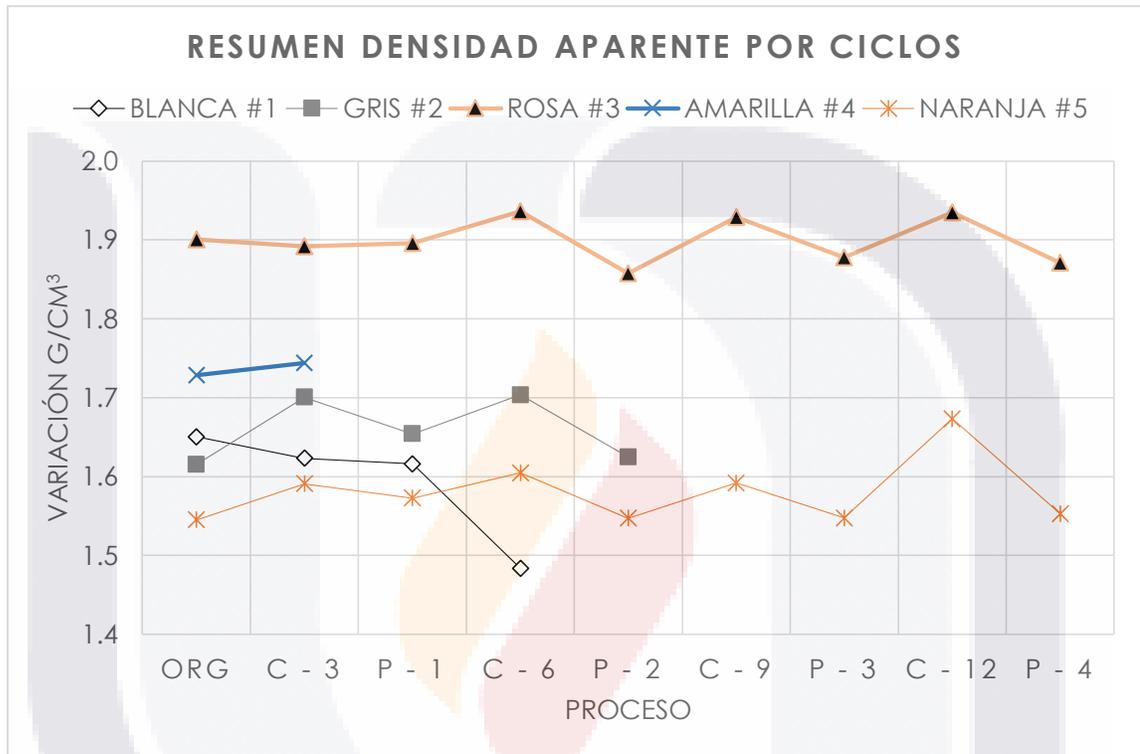


Ilustración 77 El cambio de la densidad en las muestras

La densidad se muestra creciente tras los ciclos de cristalización, mientras que posterior al saturado en agua convencional, muestra un decremento e incluso puede llegar a ser inferior a la densidad original de las piedras (Ver anexo para el registro de datos).

6.4. Comparación de los resultados obtenidos

Al comparar en gráficas los resultados obtenidos por el método indirecto y el convencional, se puede apreciar que existe una diferencia mínima e incluso decreciente entre los registros de volumen, mientras que por otro lado para la cuantificación del peso se tienen diferencias considerables, entre los valores del peso propio real de las muestras, respecto al peso teórico que resulta al utilizar las distintas fuentes:

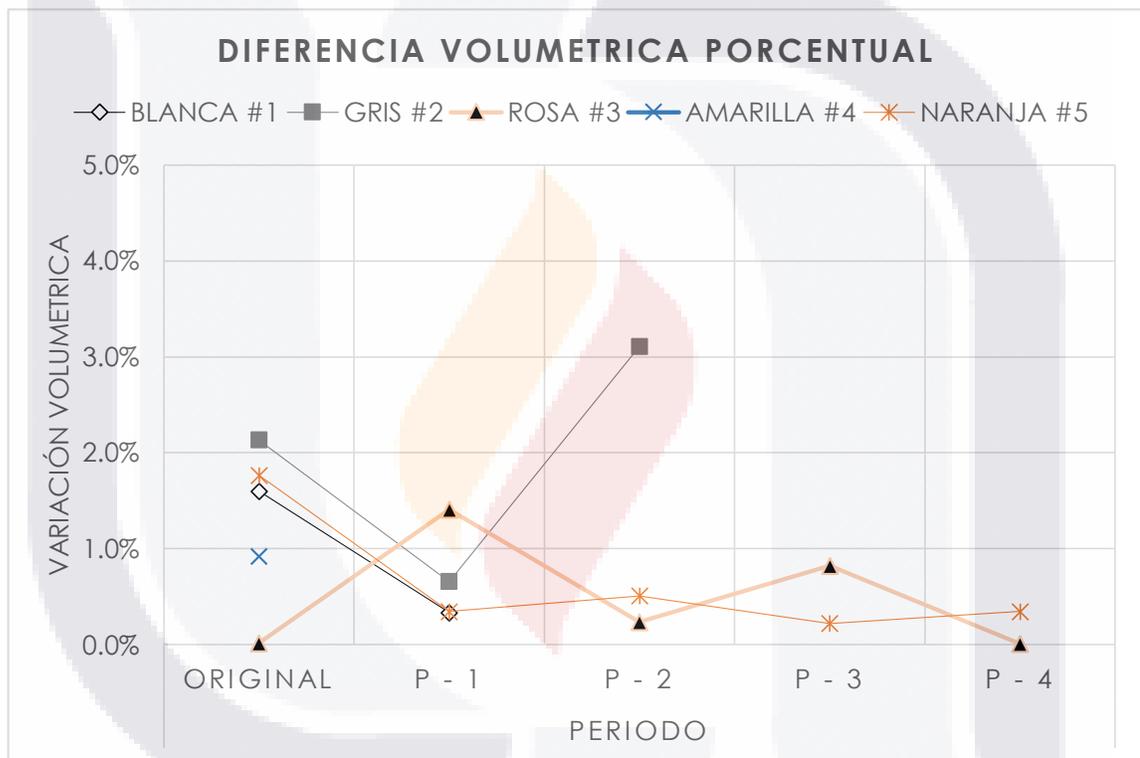


Ilustración 78 Diferencia volumétrica porcentual entre metodologías

Los resultados de la medición volumétrica demuestran un error mínimo, inferior al cinco por ciento, aun así, la tendencia apunta hacia una desviación por debajo del 1% conforme las piedras son degradadas y obtienen una mayor complejidad superficial.

Para identificar cuál de las fuentes de consulta es mejor utilizar al momento de asignar el peso volumétrico de los elementos de piedra, se registra la diferencia en gramos que existe entre el valor real y el obtenido por las diferentes fuentes para las cinco probetas de piedra.

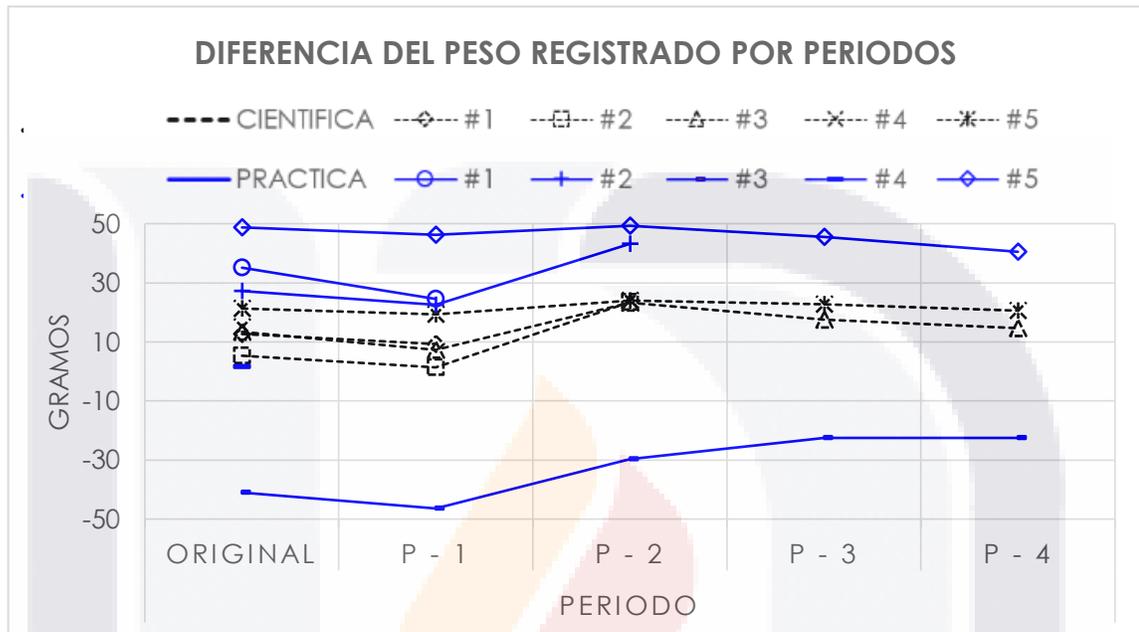


Ilustración 79 Error del peso propio estimado por fuentes consultadas

En esta gráfica, se aprecia cómo es que las fuentes científicas consultadas por el hecho de contar con valores que se adaptan a cada tipo de piedra, arrojan resultados próximos, con una diferencia inferior a los 30 gramos para el conjunto de muestras, mientras que las fuentes convencionales o de fácil acceso, al no contar con una especificación del tipo de roca que se trata, presentan resultados con una gran dispersión que se encuentra entre los ± 50 gramos.

CAPÍTULO

7

CONCLUSIONES

7. CONCLUSIONES

7.1. Conclusión general

Como se ha demostrado con la experimentación realizada en esta investigación, la metodología planteada puede considerarse como una alternativa para la determinación del peso propio de elementos de piedra con formas libres, siempre y cuando se utilicen al menos fuentes científicas para la asignación del peso volumétrico.

Si bien los resultados obtenidos tienen divergencia contra los valores reales de las piedras en estudio, cabe mencionar algunos puntos a considerar: primero, que la volumetría obtenida para las piedras cuando adoptan una forma libre, es realmente apegada a la realidad, y que aun en el peor de los casos cuando las formas son regulares, se obtiene la peor de las variaciones que corresponde al 3%, pero incluso esta aproximación supera las mediciones que pudieran realizarse en campo con las técnicas convencionales; segundo, si bien el método planteado para asignar el peso volumétrico no es totalmente certero, se ha conseguido demostrar cómo es que las fuentes de consulta científica pueden ser de mayor utilidad comparadas con las fuentes comerciales y de fácil acceso, lo cual deberá ser considerado para aquellos casos de estudio al patrimonio arquitectónico que por su estado frágil o inaccesible, genere dificultades en la realización de mediciones directas; por último, el conjunto de la metodología planteada puede representar una mejora en el análisis estructural de elementos aislados con formas libres y combinándose con otras técnicas podría reducir el margen de error obtenido.

7.2. Conclusiones particulares

- A. Tras la búsqueda de diferentes técnicas que permiten digitalizar objetos mediante la estructura de movimiento, se identifica el escáner laser y la fotogrametría, que gracias a los avances que han tenido después del año 2000, hoy se presentan como una solución fácil para la representación digital de objetos tridimensionales.

Con esta recopilación de investigaciones científicas aquí presentadas, se aprecia como ambas técnicas para digitalización de objetos reales, que si bien han sido analizadas por diferentes autores, demostrando tener una precisión y funcionalidad aceptables, aún hace falta abundar en el tema de las aplicaciones que estas podrían tener, con la finalidad de desarrollar nuevas actividades o mejorar procesos que actualmente se llevan a cabo de manera distinta.

- B. La técnica de fotogrametría de corto rango se ve realmente beneficiada al establecer un patrón de captura, puntos de apoyo y un orden de procesamiento, puesto que la experiencia partiendo de las pruebas piloto e investigaciones desarrolladas por otros autores, muestran una digitalización azarosa en cuanto a la obtención de los resultados esperados, cabe mencionar que la totalidad de modelos aquí obtenidos son resultado de 48 fotografías, capturadas en una sola sesión.

Demostrando con ello las ventajas que representa utilizar el foto-estudio, puesto que su fondo de color solido permite digitalizar los objetos incluso rotándolos en su propio eje, al mismo tiempo separando y delimitándolos, con lo cual se puede eliminar los puntos no deseados dentro de la nube densa creada por el software de modelación.

- C. De entre las fuentes consultadas para la asignación del peso volumétrico de las piedras aquí estudiadas, se tiene que: aquellos datos que provienen de fuentes con rigor científico, son de mayor utilidad al momento de asignar teóricamente los valores del peso propio de una piedra específica, esto al contar con fotografías de las muestras que están caracterizando, con lo que se facilita y delimita el tipo de roca a tratar

Contrario a lo que sucede con las fuentes teóricas convencionales o de fácil acceso, partiendo del hecho que generalizan comúnmente los diferentes tipos de piedras, tienen el inconveniente de establecer rangos de peso mínimo y máximo, que si bien puede delimitar las múltiples variaciones entre las canteras, esto puede representar un inconveniente al momento de realizar estudios de comportamiento estructural que requieren mayor detalle.

D. El margen de error encontrado

Gracias a la comparación que se puede realizar entre el método convencional llevado en laboratorio, contra la metodología propuesta, se demuestra una variación entre los resultados delimitando con ello el margen de error que se consigue al utilizarla.

Dicho error de medición correspondiente a un máximo del 3% en cuanto a la volumetría se trata, es realmente despreciable, considerando la complejidad de las formas que se pueden representar con esta técnica, comparable con la digitalización realizada por escáner laser. Pues en situaciones de campo, es técnicamente imposible registrar el estado actual de objetos con forma libre mediante otros procesos.

Mientras que la asignación del peso propio para las piedras ha tenido un aproximado al 12%. Por lo que es necesario considerar la mejorar dicho proceso, puesto que, aun con los datos más próximos encontrados en fuentes científicas, se tiene esta considerable diferencia.

E. El comportamiento de la densidad en las piedras

En cuanto al comportamiento de la densidad de las piedras en el transcurso de la experimentación por deterioro acelerado utilizando sulfato de sodio, se ha encontrado una leve tendencia a perder masa, disminuyendo con ello la densidad. Con el conocimiento previo de otras investigaciones, se intuye que este fenómeno de variación en la densidad se debe al desprendimiento de partículas internas por la cristalización de sales en la red porosa de las piedras, y posteriormente son arrastradas al exterior por la migración de sales (Angeli, y otros, 2010), (Padilla, y otros 2017) que en esta experimentación sucede en mayor grado durante la saturación en agua destilada.

No obstante se desconoce si esta alteración es únicamente en las capas superficiales de las muestras o es un proceso que ocurre en todo el espesor de ellas.

7.3. Nichos de investigación

Como posibles temas para futuras investigaciones que permitan desarrollar y mejorar la metodología aquí propuesta, se debería considerar la inclusión de otras técnicas no destructivas, que permitan identificar la densidad de un material en sitio, como es la utilización de geófonos que, mediante la medición de velocidades de onda dentro de los materiales, permite definir algunas características físico-mecánicas.

Con la utilización de los puntos referenciados en coordenadas como aquí se han utilizado y explicado, bien podría utilizarse la fotogrametría no solo en objetos aislados, sino que, con estas referencias podría representarse los espesores de muros de antiguas construcciones, cotejando las caras externas e internas mediante las coordenadas.

Ya comprobada la precisión de la fotogrametría, podría considerarse la inclusión de dicho proceso dentro de programas de análisis estructural, si bien pueda resultar una labor compleja desarrollar el software desde cero, existen las alternativas de crear extensiones que funcionan sobre la interfaz de otros ya existentes, con lo que se podría crear modelos del estado actual directamente en la plataforma de programas de análisis por elemento finito.

En cuanto a las piedras como bien se ha demostrado, existe una baja caracterización de las distintas tobas, o bien dicha caracterización se encuentra dispersa dentro de la red científica. Dicho material al poseer tan variados colores, texturas y granulometrías, requiere de una caracterización propia que facilite a las empresas de construcción, restauración y demás afines, el acceso a las características físico-mecánicas de estas piedras.

GLOSARIO

Chiluca: Denominación que suele utilizarse para las canteras de origen ígneo y colores grisáceos, en el centro de la república mexicana.

Estandarizar: Adaptación de un método o proceso a un modelo tipo

Intemperismo: Efecto del medio ambiente sobre un objeto.

Ornamental: Elemento cuya función principal o única es la de adornar.

Sulfato de sodio Es un tipo de sal que consta de Sodio, Azufre y Oxígeno, en las proporciones moleculares que indica su nomenclatura: Na_2SO_4 . Sustancia incolora, cristalina y soluble en agua.

Tapial: Sistema constructivo para muros de tierra arcillosa mediante la compactación y un molde o cimbra de madera.

Tetraedro: Cuerpo geométrico compuesto por cuatro caras triangulares.

Vectorizar: Interpretación y conversión de un objeto a líneas rectas sobre un plano (vectores).

FUENTES DE CONSULTA

- Agisoft. (2016). Agisoft PhotoScan User Manual: Standard Edition, Version 1.2.
- Agüera, F., Carvajal, F., Martínez, P., Sánchez, J., Mesa, F., García, A., & Pérez, F. (2018). Reconstruction of extreme topography from UAV structure from motion. *Measurement*, 127-138.
- Alex, L., Michal, H., & Luc, V. (2018). Progressive Structure from Motion.
- Almac, U., Pekmezci, P., & Ahunbay, M. (2018). Numerical Analysis of Historic Structural Elements Using 3D Point Cloud Data. *The Open Construction & Building Technology Journal*.
- Angeli, M., Hébert, R., Menéndez, B., David, C., & Bigas, J. (2010). Influence of temperature and salt concentration on the salt weathering of a sedimentary stone with sodium sulphate. *Engineering Geology*, 7.
- ASTM. (Abril de 2015). *flooring.about.com*. Obtenido de <http://flooring.about.com/od/flooring-product-reviews/fl/ASTM-Standards-For-Natural-Stone-Flooring.htm>
- ASTM. (2015). *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. West Conshohocken: ASTM International. doi:10.1520/C0128-15
- Cerredo, D. V., & Montes, E. H. (2012). *Análisis estructural del patrimonio histórico torre del homenaje de la alhambra*. Granada, España: Universidad de Granada.
- Cipriani, L., Fantini, F., & Bertacchi, S. (2015). The colour of stones and mosaics in ravenna: new images of ancient monuments using the latest generation of unconventional photogrammetry. *Expresion gráfica arquitectónica*, 190-201. doi:10.4995/ega.2015.4052
- comparenature. (11 de 2017). *Compare Rocks*. Obtenido de <http://rocks.comparenature.com/es/riolita-vs-andesita/comparison-16-21-0>
- Consejo Vasco de Cultura. (10 de 2016). *euskadi.eus*. Obtenido de <http://www.kultura.ejgv.euskadi.eus/r46-6513/es/>
- El Cid. (2014). *Fisica General*. Córdoba, Argentina: El Cid. Obtenido de site.ebrary.com
- Euroimportadora. (11 de 2016). *the blue way*. Obtenido de http://www.euroimportadora.com.mx/SYS_user/tips_tecnicos/es/Peso_Especifico_de_Materiales.pdf

- Figueroa, M., & Pacheco, J. (2016). *Evaluación y calibración de las técnicas de fotogrametría digital aplicadas a la caracterización geométrica de obras patrimoniales*. Aguascalientes: UAA.
- Heller, R., & de Sola, O. (1967). *Geología y ciencias afines*. Washington, D.C.: American Geological Institute.
- Janvier, R., Brunetaud, X., Beck, K., Janvier, S., & Mukhtar, M. (2016). The potential of laser scanning to describe stone degradation. *Science and Art: A Future for Stone*, 353-360.
- Jauregui, M., Jauregui, L., Chacón, L., & Vílchez, J. (2013). *Modelado y visualización tridimensional de la estatua de María Lionza*. Mérida, Venezuela: Universidad de Los Andes.
- Levoy, M., Ginsberg, J., Shade, J., Fulk, D., Pulli, K., Curless, B., . . . Davis, J. (27 de Marzo de 2015). *The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues*. (M. Levoy, Editor, & Universidad de Stanford)
- López, R., Wedekind, W., Aguillón, A., & Siegesmund, S. (2018). Thermal expansion on volcanic tuffea. *Environmental Earth Sciences*, 77-89. doi:10.1007/s12665-018-7533-0
- Monolito. (05 de 2018). *Monolito Nimbus*. Obtenido de <https://www.monolitonimbus.com.br/como-funciona-o-cinema-3d/>
- Napolitano, R., & Glisic, B. (2017). Minimizing the adverse effects of bias and low repeatability precision. *Journal of Cultural Heritage*, 46-52.
- Navarro, M., & Pacheco, J. (2013). *Levantamiento geométrico y de daños del templo de San Antonio y análisis estructural de la situación actual*. Aguascalientes: UAA.
- Noriega, R. (2008). *Propiedades físicas de los materiales*. Universidad Autónoma de Mexico.
- Padilla, R., Pacheco, J., López, R., & Orenday, E. (2017). Rock deterioration in the masonry walls of the Cathedral Basilica of Aguascalientes, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 138-149. doi:10.22201/cgeo.20072902e.2017.2.466
- Rodríguez, J., & Núñez, A. M. (2007). *Fotogrametría arquitectónica*. Barcelona, España: Universitat Politècnica de Catalunya. Obtenido de <http://site.ebrary.com.dibpxy.uaa.mx/lib/univeraguascalientessp/reader.action?docID=11046855&ppg=24>

- Salomón, A., Lauro, A., & Espinosa, L. (2003). *Estudio de las propiedades de la roca caliza de Yucatán* (Vol. 1). Merida, Yucatan, Mexico: Universidad Autonoma de Yucatan. Obtenido de site.ebrary.com
- Sarsam, S., Daham, A., & Ali, A. (2015). Implementation of Close Range Photogrammetry to Evaluate Distresses at Asphalt Pavement Surface. *International Journal of Transportation Engineering and Traffic System*, 31-44.
- Soto, M. (2016). Aplicación de la fotogrametría digital en la integración del patrimonio edificado al tejido urbano de las ciudades modernas. (pág. 35). Aguascalientes: Universidad Autonoma de Aguascalientes.
- Tarback, E., & Lutgens, F. (2005). *Ciencias de la tierra: Una introducción a la geología física*. Madrid: Pearson Educación. Obtenido de www.librosite.net/tarback
- The MathWorks. (2018). *mathworks*. Obtenido de Structure from Motion: <https://www.mathworks.com/help/vision/ug/structure-from-motion.html>
- Universidad de Granada. (11 de 2017). *ugr.es*. Obtenido de <http://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/teoria/TEMA05.htm>
- Yam, C., Solís, J. L., Rómel, C., & Moreno, É. (2006). *Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto*. México, D.F.: Red Ingeniería Revista Académica.

TESIS

TESIS

TESIS

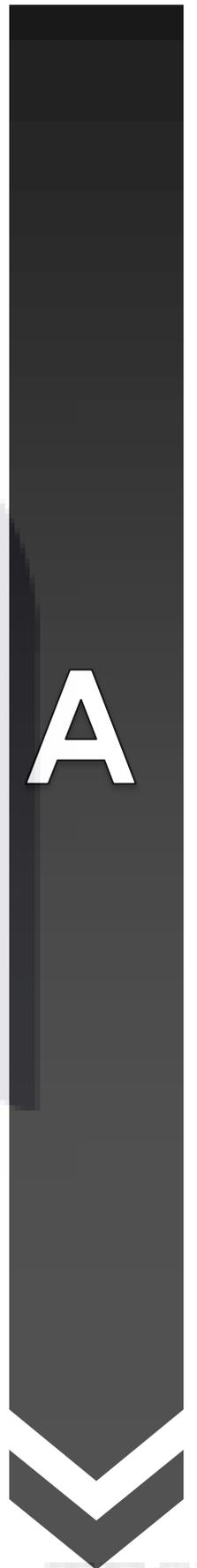
TESIS

TESIS



ANEXOS

A



TESIS

TESIS

TESIS

TESIS

TESIS

CICLOS DE CRISTALIZACION (SULFATO DE SODIO 12%, 2H SUMERGIDO, 18H SECADO)

| MUESTRA | ORIGINAL, 17° | CICLO 3 | PERIODO 1 | CICLO 6 | PERIODO 2 | CICLO 9 | PERIODO 3 | CICLO 12 | PERIODO 4 |
|--|---------------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|----------|-----------|
| BLANCA #1 | SSD | 537.22 | SSD | 379.53 | SSD | - | - | - | - |
| | PS | 263.31 | PS | 187.82 | PS | - | - | - | - |
| | PD | 452.53 | PD | 310.10 | PD | 108.58 | - | - | - |
| | VS | 278.61 | VS | 191.25 | VS | 73.18 | - | - | - |
| ALTO VOLUMEN PERDIDO, SE ESTIMA PERDIDA TOTAL AL SATURARLA DE NUEVSO | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | |
|--|-----|--------|-----|--------|-----|--------|---|---|---|
| GRIS #2 | SSD | 521.41 | SSD | 508.74 | SSD | 458.85 | - | - | - |
| | PS | 241.54 | PS | 241.74 | PS | 217.86 | - | - | - |
| | PD | 452.6 | PD | 442.03 | PD | 391.72 | - | - | - |
| | VS | 274.21 | VS | 265.50 | VS | 248.58 | - | - | - |
| FRAGMENTACION SUBITA GRANDES PORCIONES | | | | | | | | | |

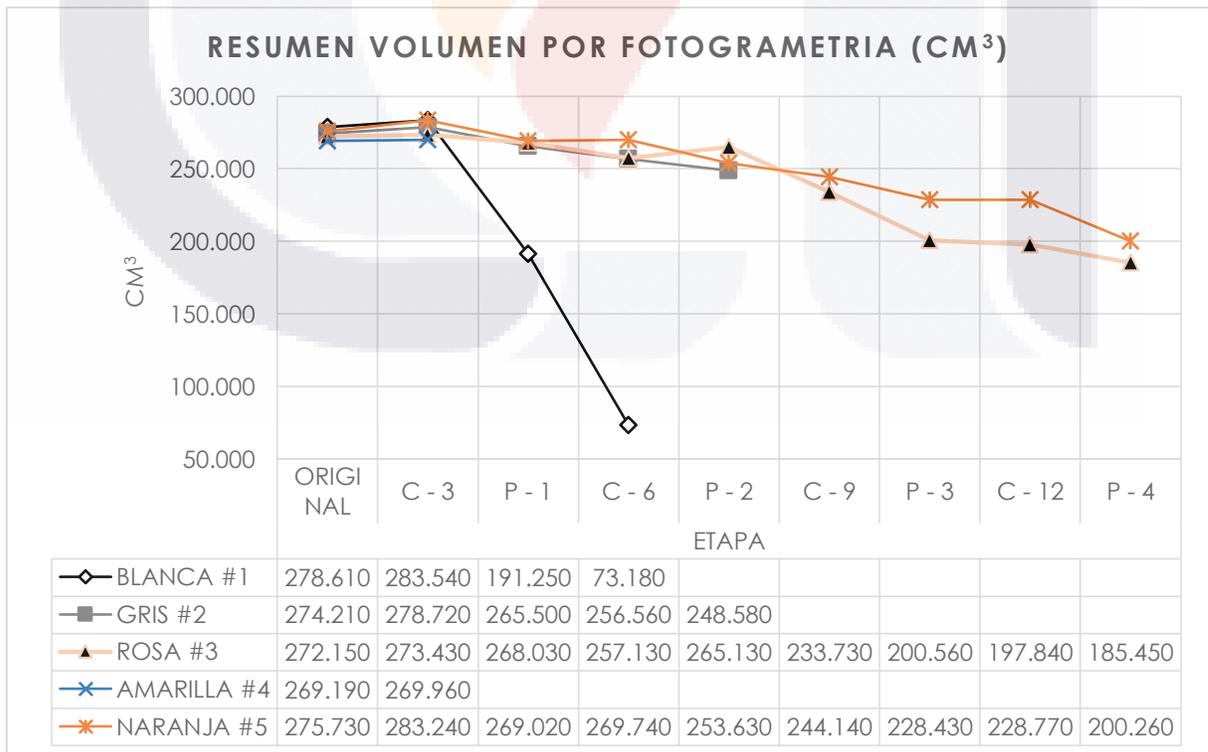
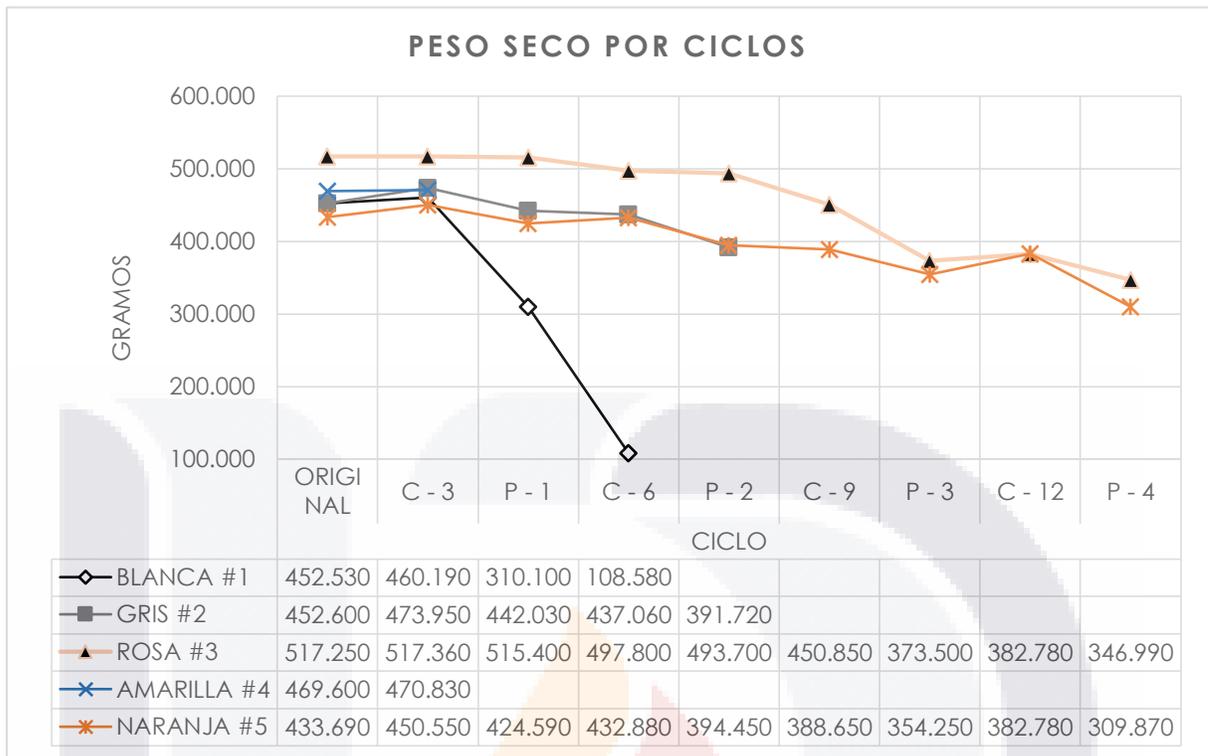
| | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|--------|--------|----|--------|----|--------|--------|--------|
| ROSA #3 | SSD | 553.74 | SSD | 546.86 | SSD | 525.07 | 396.72 | SSD | - | SSD | - | SSD | 369.07 | |
| | PS | 281.94 | PS | 275.26 | PS | 259.42 | PS | 198.02 | PS | - | PS | - | PS | 184.01 |
| | PD | 517.25 | PD | 515.40 | PD | 493.70 | PD | 373.50 | PD | 450.85 | PD | 382.78 | PD | 346.99 |
| | VS | 272.15 | VS | 268.03 | VS | 265.13 | VS | 200.56 | VS | 233.73 | VS | 197.84 | VS | 185.45 |

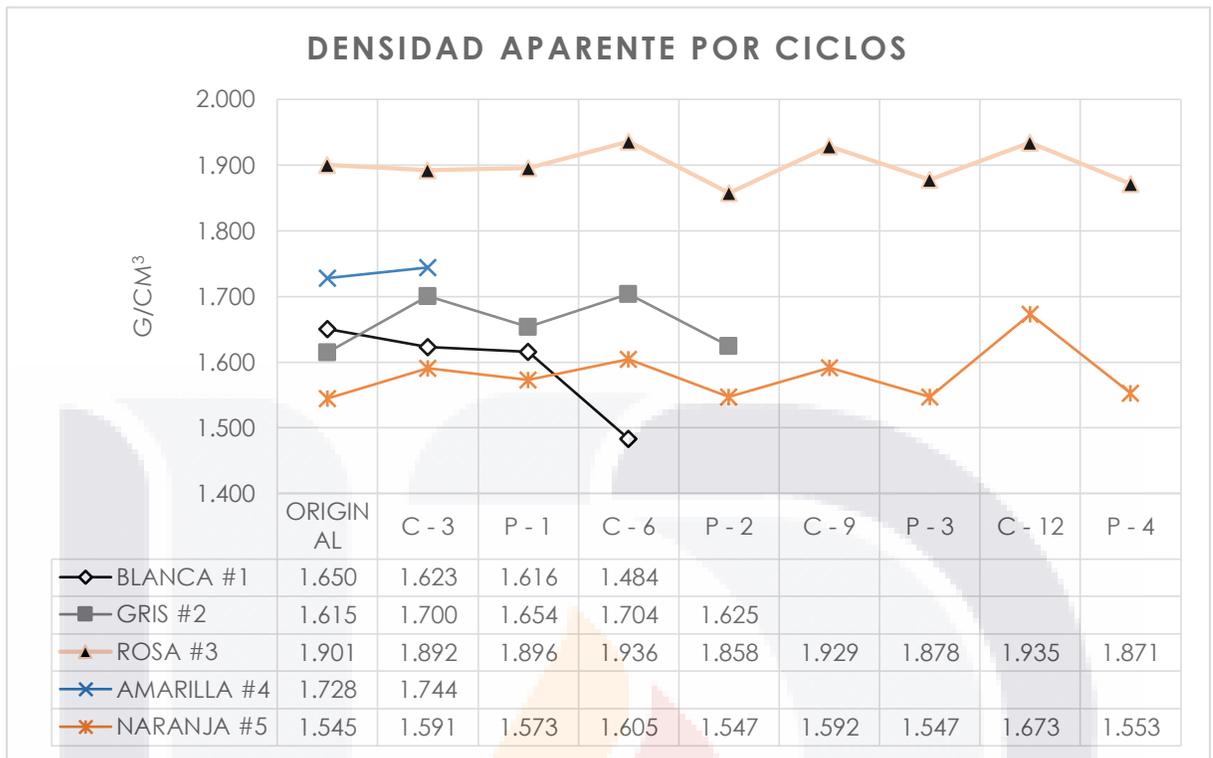
| | | | | | | | | | | | | | |
|---|-----|--------|-----|--------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| AMARILLA #4 | SSD | 539.97 | SSD | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | PS | 268.58 | PS | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | PD | 469.6 | PD | 470.83 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | VS | 269.19 | VS | 269.96 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| PIERDE COHESIVIDAD FORMANDO UN CUMULO DE GRANOS | | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|--------|--------|----|--------|----|--------|--------|--------|
| NARANJA #5 | SSD | 494.52 | SSD | 480.13 | SSD | 449.09 | 405.40 | SSD | - | SSD | - | SSD | 355.71 | |
| | PS | 214.15 | PS | 210.44 | PS | 194.27 | PS | 176.72 | PS | - | PS | - | PS | 156.54 |
| | PD | 433.69 | PD | 424.59 | PD | 394.45 | PD | 354.25 | PD | 388.65 | PD | 382.78 | PD | 309.87 |
| | VS | 275.73 | VS | 269.02 | VS | 253.63 | VS | 228.43 | VS | 244.14 | VS | 228.77 | VS | 200.26 |

$$dp = \frac{m \cdot Dw}{wa \cdot ws}$$

- SSD Saturado Superficialmente Seco
- PS Peso Sumergido
- PD Peso Seco
- VS Volumen por Software





Fragmento para clasificar piedras por (Yam, y otros, 2006).

| Tipo y origen | Nombre | Componentes minerales | Textura | Estructura | |
|---------------|--------------------------|-----------------------|--|-------------------------------------|--|
| Ígneas | Plutónicas | Granito | Cuarzo, feldespatos, mica, plagioclase. | Fenerítica | Batolitos, cuerpos intrusivos |
| | | Diorita | Plagioclase y mica | Fenerítica | cuerpos intrusivos |
| | | Gabro | Plagioclase y mica | Fenerítica | cuerpos intrusivos |
| | Volcánicas piroclásticas | Riolita | Cuarzo, feldespato, plagioclase, vidrio y mica | Afanítica porfídica | |
| | | Andesita | Plagioclase, vidrio y mica | Afanítica porfídica | Derrames de lava |
| | | Basalto | Plagioclase, vidrio y mica | Afanítica vesicular | Derrames de lava |
| | | Tobas | Variable | Porfídica | Según mineralogía son reactivas y algunas deleznales |
| Sedimentarias | Clásticas | Conglomerado | Fragmento de roca y matriz | Fragmentos redondos 2mm de diámetro | Estratificación gruesa, lentes rellenos de causas |
| | | Arenisca | Cuarzo, plagioclase, y fragmento de roca | Fragmentos entre 2 y 1/6 mm | Estratificación masiva, lentes |
| | | Lutita | Materiales arcillosos | Fragmentos de 1/6 mm de diámetro | Laminaciones masivas |
| | No clásticas | Caliza | Calcita | Cristalina | Altamente soluble |
| | | Marga | Calcita y minerales arcillosos | Cristalina | Puede hidratarse fácilmente |
| | | Dolomita | Calcita y dolomita | Cristalina | Puede provocar la reacción álcali-carbonato |
| | | Yeso | Yeso anhidrita | Cristalina | Ligero, baja resistencia a la abrasión |
| | | Carbón | Carbón | Cripto-cristalina | Ligero deleznable y frágil |