



CCADET

CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Estudios y desarrollos preliminares para la restauración y conservación del Tláloc de Coatlinchán

EDITORES

Gerardo Antonio Ruiz Botello
Benjamín Valera Orozco

AUTORES

Gerardo Antonio Ruiz Botello
Benjamín Valera Orozco
Sergio Padilla Olvera
Sergio González García
Leticia Araceli Alba Aldave
José Ocotlán Flores Flores
María Esther Mata Zamora
José Manuel Saniger Blesa
Alfonso Gastélum Strozzi
Jorge Alberto Márquez Flores
José Sánchez Vizcaíno

Enero 2017

Tipo de proyecto: Vinculación multidisciplinario

CCADET UNAM

Financiamiento interno

Estudios y desarrollos preliminares para la restauración y conservación del Tlaloc de Coatlinchan

¹Gerardo Antonio Ruiz Botello, ¹Benjamín Valera Orozco, ¹Sergio Padilla Olvera ²Sergio González García, ³Leticia Araceli Alba Aldave, ¹José Ocotlán Flores Flores, ¹María Esther Mata Zamora, ¹José Manuel Saniger Blesa, ¹Alfonso Gastélum Strozzi, ¹Jorge Alberto Márquez Flores, ¹José Sánchez Vizcaíno

¹Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, Universidad Nacional Autónoma de México
Circuito Exterior S/N, Ciudad Universitaria AP 70-186, C.P. 04510, Ciudad de México. México

²Laboratorio de Conservación, Museo Nacional de Antropología
Av. Paseo de la Reforma y Calzada Gandhi S/N, C.P. 11560, Ciudad de México, México

³Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México
Investigación Científica S/N, Ciudad Universitaria AP 70-186, C.P. 04510, Ciudad de México. México

Resumen

El Monolito de Tláloc, al ser una pieza arqueológica de gran tamaño (7 metros de altura y 168 toneladas) y monumento emblemático del Museo Nacional de Antropología (MNA), en el año 2011 la dirección del museo realizó un dictamen acerca de su estado de conservación. Del dictamen surgieron seis aspectos de interés a partir de los cuales se propone trabajar en colaboración entre el MNA y la UNAM al integrar un grupo de trabajo multidisciplinario para proponer soluciones y, en la medida de lo posible, implementarlas directamente sobre el Monolito. En este informe se recaban las propuestas elaboradas por el grupo de trabajo que abordan los problemas de deterioro y estabilidad estructural, que a grandes rasgos representan los seis aspectos planteados en el dictamen. Las propuestas surgen de muy diversas áreas del conocimiento y contemplan principalmente arqueología, instrumentación electrónica, estudio de materiales, procesamiento de imágenes y modelado tridimensional.

Indice

Introducción	4
Definición del problema	4
Entorno actual	4
Descripción del problema a resolver y motivación	4
Relevancia y limitaciones	4
Laboratorios e Instituciones participantes	5
Método	5
Objetivos y resultados esperados	5
Organización del informe	5
1 Propuesta de restauración y conservación	7
Sergio González García	
1.1 Identificación del bien cultural	7
1.2 Objetivos del proyecto	7
1.3 Antecedentes históricos	8
1.4 Marco contextual	10
1.5 Descripción del bien cultural	11
1.6 Material constitutivo y técnica de manufactura	11
1.7 Intervenciones anteriores	11
1.8 Diagnóstico	11
1.9 Propuesta de intervención de conservación	19
1.10 Justificación de las propuestas	27
2 Monitoreo de posición en tres ejes	28
Benjamín Valera Orozco, Gerardo Antonio Ruíz Botello, Sergio Padilla Olvera	
2.1 Inclinómetro triaxial inalámbrico	28
2.2 Radio base transmisora	29
2.2.1 Interface de comunicaciones	30
2.2.2 Estimación de la duración de las baterías	31
2.2.3 Código fuente	31
2.3 Radio base receptora	38
2.4 Resultados	38
2.5 Cumplimientos	39
3 Análisis de muestras de la andesita	41
Leticia Araceli Alba Aldave	
3.1 Análisis por DRX	41
3.2 Análisis por espectroscopía micro-Raman	45
3.3 Análisis por espectroscopía Raman	50
3.4 Observaciones	53
4 Fabricación de pasta para restauración	54
José Ocotlán Flores Flores, María Esther Mata Zamora, José Manuel Saniger Blesa	
4.1 Hidrólisis del TEOS	54
4.2 Procedimiento experimental	55
4.2.1 Sustancias y materiales	55
4.2.2 Preparación de muestras	55
4.3 Resultados y discusión	56
4.4 Cumplimientos	58

Agradecimientos	58
5 Estudios de volumen Alfonso Gastélum Strozzi	59
5.1 Nube de puntos	59
5.2 Método de puntos a malla	60
5.3 Normales de la nube de puntos	60
5.4 Reducción de la densidad de la nube	61
5.5 Reconstrucción de la malla triangular	61
5.6 Reconstrucción de volumen representación por voxels	63
6 Estudio de las texturas en superficies del monolito de Tláloc: pruebas y observaciones Jorge Alberto Márquez Flores	64
6.1 Nomenclatura	64
6.2 Introducción y antecedentes	65
6.3 Morfología y texturas	67
6.4 Definición de superficies de referencia	68
6.5 Partición y voxelización	77
6.6 Rasgos texturales: Descriptores a partir de la estadística a primer orden	78
6.7 Rasgos texturales: Descriptores a partir de estadísticas a segundo orden	79
6.8 Observaciones y conclusiones	84
7 Desarrollo de herramientas de medición para registro y monitoreo de joyas arqueológicas José Sánchez Vizcaíno	86
7.1 Recursos de digitalización	86
7.1.1 Reconstrucción tridimensional	86
7.1.2 Obtención de información vectorial	87
7.2 Recursos de monitoreo dimensional	88
7.3 Evaluación de recursos por estereometría	91
Conclusiones	93
Agradecimientos	94
Referencias Bibliográficas	95

Introducción

El Monolito de Tláloc de Coatlinchán se ha constituido como una pieza monumental de gran importancia para el Museo Nacional de Antropología (MNA) y patrimonio cultural de todos los mexicanos. Además de ser un reto, es un compromiso establecer y apoyar programas dirigidos a su mantenimiento preventivo y eventuales actividades de mantenimiento correctivo con el fin de heredar este bien a nuestras futuras generaciones. El presente trabajo contiene los esfuerzos realizados recientemente por el MNA y la UNAM, instituciones que han asumido este reto de preservación, utilizando tecnologías desarrolladas exprofeso para el mantenimiento estructural y artístico de este monumento.

Definición del problema

El Monolito de Tláloc data de la época prehispánica (anterior a 1521). De ese tiempo a la fecha, no existen registros que documenten labores de restauración al Monolito y en la actualidad es evidente que presenta algunos deterioros ocasionados por su condición de estar expuesto a la intemperie. Con el fin de evaluar el estado actual del Monolito y como parte del 50 aniversario del MNA, en el año de 2014 se elaboró un documento que contiene un dictamen acerca de las acciones recomendadas para su restauración integral.

Entorno actual

La propuesta de restauración integral elaborada en el 2014 contempla los siguientes seis fenómenos que deben atenderse por especialistas en cada área:

1. Fisuras y exfoliación en la piedra.
2. Aguas residuales que ocasionan deterioro en la piedra.
3. Agentes biológicos que deterioran el monumento.
4. Manchas en la superficie del monolito.
5. Presencia ajena de sales en la piedra.
6. Estabilidad mecánica de su soporte.

Descripción del problema a resolver y motivación

En un primer planteamiento el problema a resolver consiste en realizar estudios de caracterización acerca de los materiales base que conforman el material o piedra del Monolito. Con estos estudios entonces es posible orientar el desarrollo de materiales de recubrimiento que permitan la conservación del Monolito para que resista las inclemencias medio ambientales. Con estos dos estudios entonces es posible enfrentar los fenómenos 1 a 5 del apartado anterior. Otro aspecto a desarrollar es un análisis volumétrico del Monolito e instrumentación electrónica que proporcione datos concretos acerca de su estabilidad mecánica, correspondiente al fenómeno 6 del apartado anterior.

La motivación que contagia al grupo de especialistas del MNA y UNAM es el rescate y conservación de una parte importante del patrimonio nacional que representa en la actualidad una valiosa herencia que será el legado de las generaciones futuras de mexicanos. Un símbolo de parentesco con nuestros antepasados prehispánicos y de identidad nacional como lo es el Monolito de Tláloc de Coatlichan debe ser exhibido orgullosamente en condiciones óptimas a los miles de visitantes nacionales y extranjeros que cada año acuden a uno de los museos más importantes del mundo como lo es el MNA.

Relevancia y limitaciones

La relevancia del presente trabajo radica principalmente en proponer y desarrollar técnicas que permitan mantener la exposición del Monolito a las condiciones ambientales externas en la Ciudad de México, y con ello, que el Monolito siga siendo el elemento emblemático que da la bienvenida a todos los visitantes del MNA.

La principal limitación radica en el estrecho margen de maniobra que ofrece una obra artística y cultural de la magnitud del Tláloc de Coatlichán, ya que es inaceptable cualquier alteración física que modifique su estética original.

Laboratorios e Instituciones participantes

Los laboratorios que participan en el presente proyecto son: Por parte del MNA el Laboratorio de Conservación; por parte del CCADET UNAM los Laboratorios de Ingeniería de Precisión y Metrología, Materiales y Nanotecnología y Unidad de Investigación y Desarrollo Tecnológico en el Hospital General; y por parte del Instituto de Geología UNAM el Departamento de Geoquímica.

Método

De acuerdo con los grupos de trabajo y laboratorios participantes, la metodología se dividió en las siguientes áreas:

En el Laboratorio de Conservación se realizan los estudios antropológicos que conducen a la elaboración de la propuesta general para la conservación del Tláloc.

En el Laboratorio de Ingeniería de Precisión y Metrología se desarrolla un sistema electrónico inalámbrico para la medición tri-axial de inclinación del Monolito.

En el Departamento de Geoquímica se analizan muestras de andesita del Tláloc utilizando técnicas como microscopio petrográfico, por difracción de rayos X (DRX), por espectroscopía micro-Raman y por microscopía electrónica.

En el Laboratorio de Materiales y Nanotecnología se desarrolla una pasta formada por mineral andesita consolidada con tetraetoxisilano (TEOS) hidrolizado en medio ácido, la cual, sirve para consolidar materiales pétreos con posibilidades de utilizarse en la restauración del Tlaloc.

En la Unidad de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Hospital General se realiza el estudio del volumen a partir de puntos en la nube de datos digitalizados y la creación de mallados tridimensionales para el análisis de fuerzas en elemento finito.

Objetivos y resultados esperados

Se espera que el presente documento sirva como un acopio de los esfuerzos tecnológicos y de investigación aplicados a la restauración y conservación del Monolito de Tláloc de Coatlichán y base para futuras implementaciones o desarrollos perfeccionados.

Organización del informe

En la primera sección se presenta un estudio arqueológico enfocado a establecer un diagnóstico del Monolito y una propuesta de trabajo inter-institucional para trabajar en las recomendaciones derivadas del diagnóstico. En la segunda sección se describe el desarrollo de un instrumento inalámbrico de inclinación en tres ejes que se construyó con el propósito de monitorear la estabilidad del Monolito a largo plazo. En la sección tres se reportan los estudios que se realizaron para determinar la composición del material con el cual está construido el Monolito, utilizando diversas técnicas de estudio de materiales. En la sección cuatro se reporta la técnica utilizada para fabricar una pasta de recubrimiento que eventualmente puede ser aplicada al Monolito con el propósito de aminorar el deterioro que ocasiona su exposición a la intemperie. En la sección cinco se presenta un estudio de volumen utilizando técnicas de procesamiento de datos para la elaboración de un mallado tridimensional que eventualmente puede ser utilizado para realizar simulaciones estructurales con técnicas de elemento finito. En la sección seis se

presenta una metodología conteniendo diversas herramientas que se pueden desarrollar para analizar la textura de la roca a partir de procesamiento de imágenes. En la sección siete se presenta una herramienta de análisis de imágenes para registro y monitoreo del estado de la superficie del monolito. Debido a la gran diversidad en las áreas de trabajo recopiladas en éste informe, se incluyen resultados y observaciones particulares al final de cada sección. En las conclusiones se expone el trabajo realizado en este proyecto. En las referencias, se lista la bibliografía usada para la elaboración de este trabajo.

1 Propuesta de restauración y conservación

Sergio González García

El monolito conocido como “Tláloc de Coatlinchán” es la pieza que recibe a los visitantes al Museo Nacional de Antropología y debido a esto es que se ha convertido en uno de los monumentos emblemáticos de este recinto. Se trata de una escultura de grandes dimensiones tallada en una sola roca que representa a una deidad relacionada con el agua. Existen noticias de su existencia desde épocas coloniales, aunque no hay certeza ni de la deidad que representa (algunos afirman que se trata de Tláloc mientras otros afirman que es Chalchihuitlicue) ni de la cultura que la creó. Dado el parecido con otro monolito que resguarda el MNA procedente de Teotihuacán, también de grandes dimensiones y elaborado de un material similar (andesita), se cree que fue hecha por los teotihuacanos pero al parecer quedó inconclusa. Hasta 1964 la escultura permaneció en posición horizontal y en época de lluvias se formaba un pequeño estanque que la rodeaba.

Fue trasladado de su lugar de origen, cerca del pueblo de Coatlinchán, Estado de México, en 1964 para la inauguración del nuevo museo en Chapultepec. Para su movimiento fue necesario diseñar una plataforma especial, la construcción de caminos y el trabajo de técnicos especializados, ya que se trata de uno de los monolitos más grandes y pesados no solo de México, sino de todo el mundo. También fue necesario *convencer* a los lugareños para que permitieran que su “ídolo de los tecomates” fuera llevado a la capital, donde lo podrían apreciar todos los visitantes al Museo Nacional de Antropología. Se colocó verticalmente pues se piensa que esa era la posición para la que fue creado.

Desde que se ubicó en su nueva sede no se ha realizado ninguna intervención de restauración en el monolito, o por lo menos no existen registros al respecto, pese a que se han notado algunos deterioros relacionados con su nueva posición, principalmente causados por su condición de obra expuesta a la intemperie. De cara al cumplimiento del 50 aniversario del Museo Nacional de Antropología en septiembre del 2014, se solicitó al Laboratorio de Conservación del MNA realizar el dictamen y restauración del monolito. La presente sección es el resultado del trabajo en equipo para este fin.

1.1 Identificación del bien cultural

Nombre: “Tlaloc de Coatlinchan”.

Tipo de bien: Escultura tallada en una sola piedra.

Cultura: Atribuida a los teotihuacanos.

Época: Prehispánica.

Dimensiones: 7.1 m de alto, 3.8 m de ancho, 4 m profundidad, con un volumen aproximado de 81 m³ (Heizer & Williams, 1965).

Peso: 164 toneladas (Heizer & Williams, 1965), aunque hay diferentes cálculos que van de las 90 a las 217 toneladas.

Número de inventario: 10-627008.

Ubicación: El monolito está posicionado sobre un espejo de agua al lado sur de la entrada principal del Museo Nacional de Antropología en la esquina de Paseo de la Reforma y calzada Gandhi.

Material constitutivo: Se trata de una piedra volcánica, específicamente andesita, cuya matriz contiene limo, arena y grava (Heizer & Williams, 1965).

Observaciones: Desde que se manufacturó el monolito hasta la actualidad se ha visto expuesto a la intemperie. Hasta 1964 se encontraba en posición horizontal. A partir de ese año se exhibe de forma vertical.

1.2 Objetivos del proyecto

- Realizar procesos de restauración y conservación en el monolito conocido como “Tláloc de Coatlinchán” que resguarda el Museo Nacional de Antropología para estabilizar su superficie, devolverle su unidad visual y detener o aminorar las causas de deterioro identificadas en el diagnóstico de estado de conservación realizado por el Laboratorio de Conservación del MNA de cara al cumplimiento del 50 aniversario del museo.

- Iniciar estudios con apoyos institucionales para determinar específicamente la estructura, composición y comportamiento del monolito expuesto a la intemperie y monitorear su estabilidad a largo plazo.

1.3 Antecedentes históricos

Originalmente el monolito se encontraba semienterrado en un predio perteneciente al ejido de San Miguel Coatlinchan (Figura 1.1), cercano al cauce del arroyo de Santa Clara, en terrenos de la Hacienda de Tepetitlán, Texcoco. Fue reportado en el siglo XIX por el historiador Alfredo Chavero y documentado por José Ma. Velasco a través de un dibujo artístico que no presenta las proporciones correctas (Figura 1.2). A principios del siglo XX, el monolito se encontraba en posición horizontal, casi cubierto por tierra, recostado sobre la espalda y únicamente la cara superior era visible. Fue Leopoldo Batres quien, en 1903, realizó las primeras excavaciones alrededor del monolito, descubriendo sus caras laterales y delimitando la parte posterior de la escultura (Figura 1.3). Así permaneció durante los siguientes sesenta años. En la época de lluvias se formaba una laguna alrededor de la escultura y el agua sólo dejaba descubierta la cara superior de la pieza (Figura 1.4).

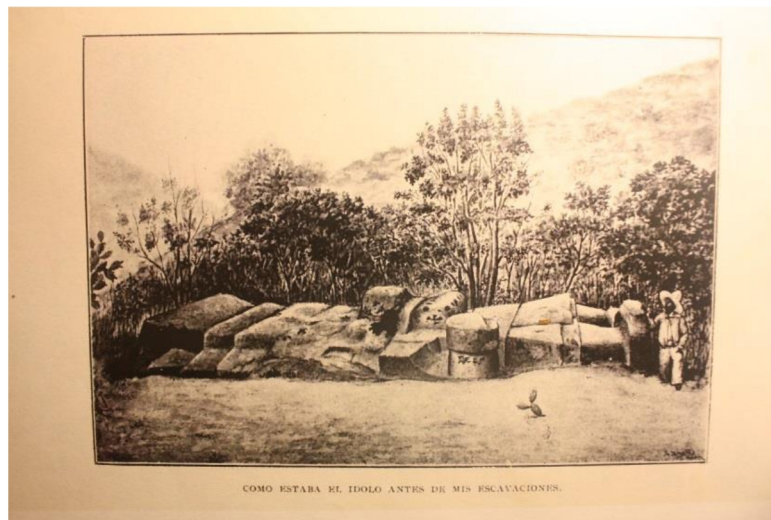


Figura 1.1. Aspecto del monolito antes de las excavaciones realizadas por Leopoldo Batres en 1903.



Figura 1.2. Dibujo hecho por José María Velasco antes de las exploraciones de Batres en 1903.



Figura 1.3. En época de lluvias se formaba un estanque alrededor del monolito.



Figura 1.4. En época de lluvias se formaba un estanque alrededor del monolito

En la década de los 60's, durante la planeación para el nuevo edificio del Museo Nacional de Antropología en el Bosque de Chapultepec, se propuso el traslado del monolito con el fin de ubicarlo en el patio central del museo, frente a la Sala Mexica, o en la entrada principal del recinto (Figura 1.5). El tipo de piedra con el que está manufacturada la escultura es una roca de origen volcánico, específicamente andesita según los estudios de (Heizer y Williams 1965), por lo que se consideró que dicha composición permitía su exhibición al aire libre.

En el año de 1964, con la autorización de la Presidencia de la República, se promovió su traslado a la Ciudad de México. Estos trabajos fueron supervisados por el director del proyecto de construcción del nuevo museo, el arquitecto Pedro Ramírez Vázquez; los ingenieros Cué y Valle Prieto, así como los arqueólogos Luis Avellyra y Ricardo de la Robina (Figura 1.5). La escultura llegó al museo en abril de 1964 (Figura 1.6). Para su colocación en la esquina de Paseo de la Reforma y Gandhi se construyó un pedestal de concreto armado y una fuente que formaría un espejo de agua a los pies del monolito y que escurriría permanentemente por sus paredes inclinadas. Desde aquel momento se convirtió en un punto focal del paisaje urbano de la zona del bosque de Chapultepec y en símbolo de la grandeza de las culturas precolombinas.

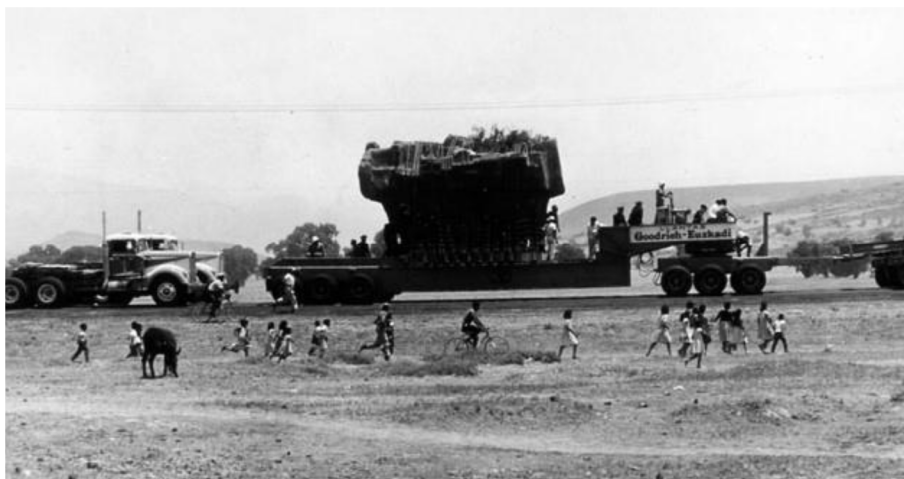


Figura 1.5. Traslado del monolito en 1964.



Figura 1.6. Colocación del monolito en su nueva posición en el Museo Nacional de Antropología en 1964.

1.4 Marco contextual

Partiendo del hecho de que el monolito conocido como “Tláloc de Coatlinchan” forma parte del patrimonio cultural prehispánico que resguarda el Museo Nacional de Antropología, que se exhibe desde hace casi 50 años en las condiciones actuales y que se notan alteraciones negativas en su superficie, es obligación del MNA realizar un proyecto de conservación del monolito que parta del diagnóstico preliminar y justifique plenamente cada tratamiento a realizar.

El monolito se encuentra exhibido a la intemperie cerca de una de las avenidas más transitadas y contaminadas de la Ciudad de México. Los cambios de temperatura y humedad cotidianos promueven reacciones en la superficie de la roca y en época de lluvias se forman acumulaciones de aguas residuales que mantienen zonas húmedas y causan erosión por el escurrimiento en la superficie y fisuras de la roca. En algunas áreas del monolito, sobre todo en la parte alta, ha proliferado microflora identificada como Biofritas (hepáticas y musgo) y líquenes (crustoso y folioso). La fuente forma un espejo de agua que está en contacto permanente con la parte baja del monolito. Todos estos elementos, aunados a las deyecciones de aves y nidos de insectos, forman un conjunto de causales de deterioro que poco a poco van alterando la roca a partir de la que está hecho el monolito, y son las condiciones a las que se ve expuesta por encontrarse a la intemperie.

A petición del curador de la sala Teotihuacán del MNA, arqueólogo Enrique Soruco, el Laboratorio de Conservación realizó en 2011 un dictamen de estado de conservación con el fin de elaborar una propuesta de restauración para el monolito y la fuente que lo circunda.

Con el objetivo de enriquecer la propuesta de conservación del monolito la dirección del Museo Nacional de Antropología convocó a dos reuniones con expertos del INAH en conservación y exhibición de monumentos a la intemperie, arqueólogos y restauradores, quienes expusieron diferentes experiencias, ideas y visiones relacionadas con el tema. Pese a que la recomendación “*ideal*” para la conservación de esta escultura es colocarlo bajo techo (ya sea moviéndolo dentro del museo o colocándole una cubierta) lo cierto es que para efectos de la restauración para el 50 aniversario del MNA a celebrarse en septiembre del 2014 no es una opción viable. Este medio siglo del Tláloc en Chapultepec es un buen momento para iniciar un dialogo profundo de la estabilidad estructural del monolito versus su simbolismo popular y urbano en el emplazamiento actual y de ahí realizar una propuesta de conservación a largo

plazo. Es necesario, en todo caso, ampliar la discusión de lo que implica mover o cubrir este gran monolito y lograr un amplio consenso acerca del futuro del “Tlálloc” del Museo Nacional de Antropología.

No obstante continuar con la discusión acerca de la conservación del monolito a largo plazo, su movimiento o su techado, se hace necesario aplicar tratamientos de restauración y conservación en las condiciones en que se encuentra actualmente, sobre todo en lo referente a su limpieza superficial, identificación y eliminación de sales, tratamiento de fisuras y eliminación de aguas residuales.

1.5 Descripción del bien cultural

Escultura monumental (7.5 x 3.8 x 4.0 m), antropomorfa-mítica, de pie, piernas cortas con forma trapezoidal invertida, faldellín, faja o pectoral rectangular, brazos cilíndricos al frente. Cabeza: perforaciones cilíndricas a la altura de la boca, nariz cilíndrica al frente y tocado hueco en la parte superior con adornos a los lados. El mayor deterioro de la escultura está en donde irían los ojos. No se ha podido hacer una identificación concluyente acerca de la deidad que representa ni de la cultura o época en que se creó, aunque hay consenso en que se trata de una deidad relacionada con el agua.

1.6 Material constitutivo y técnica de manufactura

De acuerdo a la identificación petrográfica realizada por Robert F. Heizer y Howel Williams en el Departamento de Antropología de la Universidad de California publicado en septiembre de 1965, la roca a partir de la que se manufacturó el monolito es andesita con una matriz de sedimentos de arena y grava. La zona mejor conservada es la que se encuentra entre las piernas de la escultura, por ser la más protegida del intemperismo, y es donde mejor se observa el color rosáceo y tamaño de los cristales de la roca.

La técnica de manufactura es tallado en bulto por corte, desgaste y perforado.

No se observan restos de algún acabado de superficie ni estuco o pigmentos.

1.7 Intervenciones anteriores

Aunque no existen informes de intervenciones anteriores, de manera verbal se nos ha comunicado que se realizó una limpieza superficial hace más de 10 años. En algún momento se hizo un molde del monolito con el fin de elaborar una copia fiel de tamaño real para ser colocada en el centro del pueblo de Coatlinchan. No se encontraron reportes de otras intervenciones, pero en el año 2005 la restauradora Frida Montes de Oca realizó un dictamen de estado de conservación y propuesta de restauración del monolito donde propone una serie de análisis con apoyo interinstitucional y pruebas de limpieza con rayos laser. No obstante el planteamiento de la problemática y la necesidad de la restauración del monolito, este proyecto no se llevó a cabo.

1.8 Diagnóstico

En el año 2011 la dirección del museo encargó al Laboratorio de Conservación realizar un dictamen de estado de conservación del monolito con el fin de elaborar una propuesta de restauración integral. El diagnóstico o dictamen de estado de conservación del monolito lo hemos separado en seis aspectos:

- a) Fisuras y exfoliación de la piedra.
- b) Aguas residuales.
- c) Agentes biológicos.
- d) Manchas en superficie.
- e) Sales.
- f) Soporte.

En general consideramos que el monolito se encuentra estructuralmente estable, a pesar de que se observan algunas fisuras en la cara frontal y la presencia de ciertos agentes de deterioro como algas o

líquenes y nidos de insectos que pueden promover el desprendimiento de la superficie donde se anclan. La apariencia del material constitutivo se ha transformado a través del tiempo por acción del intemperismo, virando de un color rosáceo (Heizer & Williams, 1965) al actual que es más café. No obstante lo anterior, consideramos que no se pone en riesgo inminente la estabilidad estructural del monolito.

a) Fisuras y exfoliación en la piedra

Las fisuras son hendiduras con un patrón lineal o ramificado que divide al material constitutivo pero de menor profundidad que una grieta. Se pueden observar fisuras en la cara frontal y hacia ambos costados. Existe más de un mecanismo que puede ser el origen de dicho deterioro:

Técnica de manufactura: existe la versión de que la escultura está inconclusa (Heizer & Williams, 1965) y que los faltantes observados en ella se deben a fracturas relacionadas con defectos naturales en la piedra, motivo por el cual fue abandonada con faltantes en el anverso y poco trabajada en el reverso. Las fisuras que se localizaron en el dictamen no tienen apariencia de ser recientes, ni de estar activas, es decir que no se observan movimientos en ella que pudieran ocasionar que la fisura se abra más como para convertirse en grieta, de tal manera que algunas de estas alteraciones pudieron haber tenido su origen desde el momento de la manufactura (Figura 1.7). Se realizó una revisión de las fisuras más evidentes y se determinó que la que se encuentra a la altura de los huecos que corresponden a la que sería la boca es la que se encuentra en mayor riesgo estructural por encontrarse extraplomada (Figura 1.8).

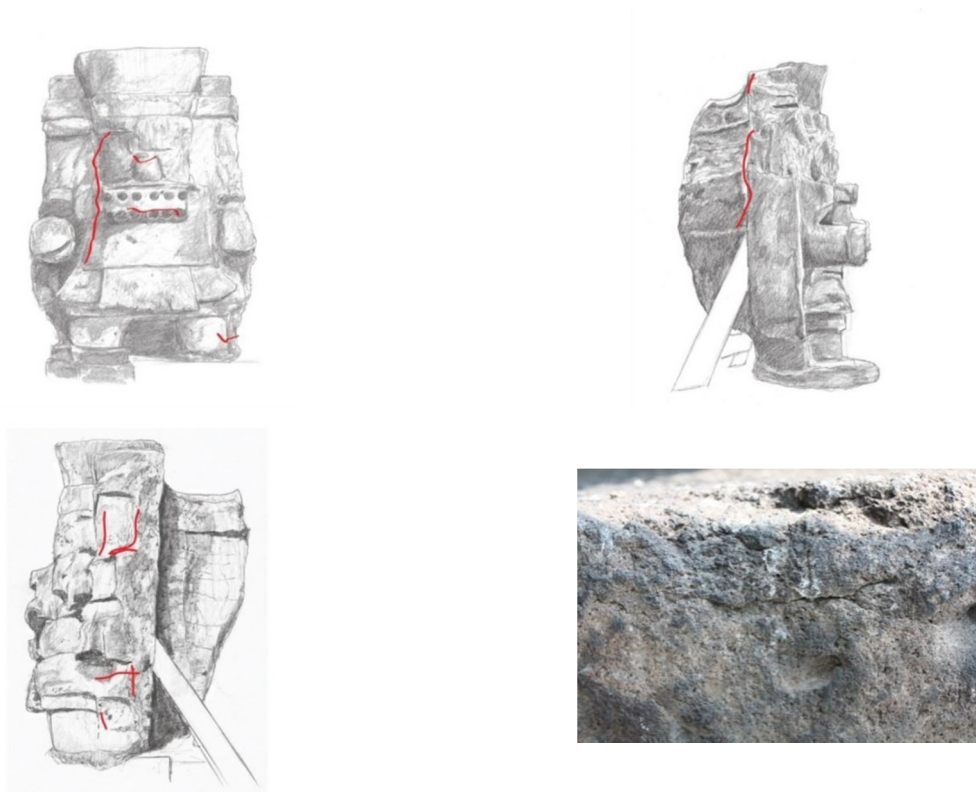


Figura 1.7. Esquema de las principales fisuras detectadas a simple vista.



Figura 1.8. Fisura con mayor riesgo estructural.

Esgrafiado. En algunas zonas del monolito se alcanzan a ver letras esgrafiadas en la roca obra de vandalismo que datan de antes de llegar a la ciudad, según se observa en diferentes fotografías. Hasta ahora no se ha identificado ningún acto vandálico irreversible ocasionado al monolito recientemente a pesar de su condición de obra expuesta a la intemperie.

b) Aguas residuales

El problema de las aguas residuales constituye uno de los principales factores de deterioro que se identificaron en el dictamen de estado de conservación del monolito (Figura 1.9). Las aguas residuales traen consigo mecanismos de deterioro como disgregación del material constitutivo de la roca ya sea por creación de escurrimientos y arrastre de partículas o por absorción por capilaridad, migración de sales y creación de condiciones propicias para la proliferación de microflora (musgos y líquenes). En este sentido se pueden distinguir dos orígenes de las aguas residuales: lluvia y espejo de agua.



Figura 1. 9. Principal zona de escurrimiento de agua de lluvia cuando se llena la tina de la parte superior del tocado.

Encharcamiento de agua en cavidades de manufactura

En la parte inferior, el pie derecho de la escultura tiene una inclinación que ocasiona el encharcamiento de agua de lluvia (Figura 1.10). En esa zona también se encontraron fisuras y frentes de secado que afectan a la piedra.

Otra cavidad de manufactura donde se acumula el agua de lluvia es en el área de la “boca” de la escultura (Figuras 1.11 y 1.12).



Figura1.10. Agua estancada en la parte superior del pie derecho.



Figura1.11. A causa de los encharcamientos y escurrimientos hay zonas del monolito que retienen humedad.



Figura 1.12. Frentes de secado en las cavidades de la “boca” de la escultura que denotan la acumulación de agua de lluvia.

Contacto permanente con el agua de la fuente

El contacto permanente del agua de la fuente con el monolito constituye otro factor de deterioro (Figuras 1.13 y 1.14) pues propicia la absorción de agua por capilaridad y la migración de sales que pueden causar alteraciones a la piedra, principalmente cloruros presentes en el agua.



Figura 1.13. Contacto permanente con agua.



Figura 1.14. Detalle.

c) Agentes biológicos

La porosidad de la piedra, así como el contenido de humedad en de la superficie de la piedra favorece la aparición de musgo, líquenes y algas, especialmente en la cara que da al este porque es por donde escurre el agua (Figura 1.15).



Figura 1.15. Organismos biológicos sobre el monolito.

La forma escultórica presenta varias cavidades de manufactura que son parte de la obra. Esto y la porosidad del material constitutivo han permitido que animales e insectos encuentren condiciones óptimas para su anidación permanente (avispa) o estancia transitoria (aves) (Figuras 1.16 y 1.17).



Figura 1.16. Nidos.



Figura 1.17. Deyección de ave en el pie derecho.

El daño relacionado con el crecimiento de microflora y la construcción de nidos de insectos se refleja en la piedra como pérdida de resistencia superficial, pues tal actividad implica un proceso de anclaje en el que la composición pétreo termina por disgregarse, además de modificar visualmente al objeto al crear manchas e impedir la libre contemplación de tales áreas (Figura 1.18).

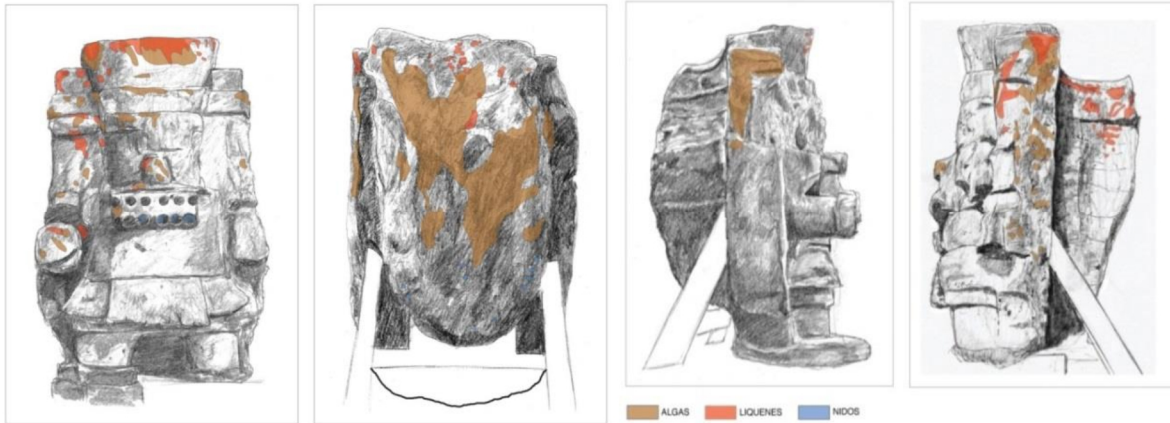


Figura 1.18. Tipos de organismos.

d) Manchas en superficie

La Avenida Paseo de la Reforma es una de las arterias vehiculares más transitadas de la Ciudad de México, así que la afluencia de automóviles es posiblemente la causa principal de las partículas que dan la apariencia de manchas oscuras en la superficie. (Figura 1.19).



Figura 1.19. Monolito sobre la avenida.

Concreciones de otro tipo:

Los trabajos de mantenimiento en la fuente han generado depósitos accidentales de materiales diversos, como silicón, impermeabilizante y pintura (Figuras 1.20 y 1.21), especialmente en áreas cercanas al pedestal. Su interacción con la piedra puede ser inocua pero en todos los casos afectan visualmente a la obra.



Figura1.20. Restos de Pintura azul sobre el material constitutivo del monumento.



Figura1.21. Restos de silicón en superficie.

e) Sales

Presencia de sales

A fin de detectar la posible presencia de sales en superficie se realizó una identificación de sales solubles (sulfatos, nitratos y cloruros) y sales insolubles (sulfatos y carbonatos) (Figura 1.22). Se observó una importante presencia de nitratos, aún en la parte superior de la escultura. En segundo término se encuentra la presencia de cloruros, especialmente en el pie derecho. Los sulfatos tienen presencia importante en las zonas altas del monolito (Figura 1.23).

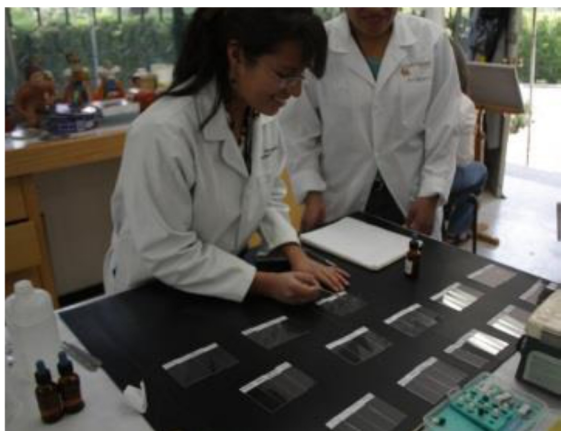


Figura 1. 22. Análisis a la gota realizados por restauradores del Laboratorio de Conservación en el MNA.

Tabla2. Resultados de los análisis a la gota
Las celdas marcadas con "X" tuvieron resultados positivos para esa sal

Muestra Núm.	Carbonatos	Sulfatos solubles	Sulfatos insolubles	Nitratos	Cloruros	Observaciones
1	-	X	-	X	-	
2	X	-	-	X	-	
3	-	-	-	X	-	
4	-	-	-	X	-	
5						Muestra insuficiente
6						Muestra insuficiente
7	-	-	-	X	X	
8	-	-	-	X	X	
9	-	-	-	X	X	
10	-	-	X	X	X	
11						Muestra insuficiente
12	-	-	-	X	X	
13	-	-	-	X	X	
14	X	X	-	X	-	
15	-	-	-	X	-	
15-A	-	-	-	X	-	
16	-	-	-	X	X	
17	X	X	-	X	-	
18	-	X	X	X	-	
19	-	X	X	X	X	
20	X	X	X	-	X	
21	-	X	X	X	-	
22						Muestra insuficiente
23						Muestra insuficiente
24						Muestra insuficiente
25						Muestra insuficiente
26						Muestra insuficiente



Figura 1.23. Localización de sales sobre el monolito.

f) Soporte auxiliar

El soporte auxiliar es una estructura metálica de placas soldadas colocada en la parte posterior del monolito. Posee cierta inclinación y está reforzada con un travesaño que sirve como un soporte de seguridad (Figura 1.24).

Actualmente se encuentra cubierto con una pintura gris, probablemente de origen vinílico. En algunas zonas la pintura ha dejado de cumplir su función, pues se observan puntos de corrosión debajo de la pintura (Figura 1. 25). Se hicieron pruebas de limpieza para observar el nivel de metal sano y al parecer hasta ahora es corrosión superficial.



Figura 1.24. Soporte.



Figura 1.25. Detalle de corrosión activa en el soporte auxiliar ubicado en el reverso del monolito.

1.9 Propuesta de intervención de conservación

El monolito conocido como “Tláloc de Coatlinchán” es una pieza muy importante para el imaginario del mexicano por la presencia que tiene a la entrada del Museo Nacional de Antropología (Figura 1. 26) y porque el público lo identifica con la grandeza del pasado prehispánico. Las historias y leyendas sobre su manufactura, su traslado a la Ciudad de México y su emplazamiento a la entrada del museo lo hacen una de las piezas más emblemáticas del arte prehispánico en Mesoamérica.



Figura 1.26. Vista general del monolito en la entrada del museo.

A pesar de tratarse de un monolito de grandes dimensiones, elaborado a partir de una roca bastante resistente como lo es la andesita, que se encontraba a la intemperie en donde fue elaborada y que lleva 49 años exhibida a la intemperie en una de las ciudades más contaminadas del mundo, los efectos de las alteraciones se manifiestan en la roca como degradación estética y estructural a diferente nivel. En el Laboratorio de Conservación del MNA pensamos que la conservación de este monolito es una tarea indispensable para restaurar tanto su aspecto estético como para detener los procesos de alteración que lenta pero inexorablemente atacan la roca a la intemperie: lluvia ácida, escurrimientos, acumulación de aguas residuales, fisuras preexistentes, proliferación de líquenes y musgos y otros organismos, etc. Muchos de los deterioros detectados en este monumento están relacionados con su emplazamiento. El

hecho de que se encuentre a la intemperie es un factor de deterioro determinante para esta pieza, como también lo es su presencia a la vista de los transeúntes. Es por esto que pensamos que la mejor alternativa de conservación a largo plazo es construirle una techumbre que lo proteja de la lluvia, el sol y, en lo posible, los contaminantes. Sin embargo esta decisión debe partir de un amplio consenso académico y social.

No obstante que la protección bajo techo es la mejor solución para la conservación del monolito, hay otros procesos que pueden ayudar a mejorar su estado de conservación y que deben ser atendidos desde ahora.

Monolito

Para realizar cualquier tratamiento de limpieza profunda y consolidación de la roca es necesario realizar algunas pruebas que nos ayuden a seleccionar el método más adecuado de restauración, que no reaccione con la roca y que no la degrade visualmente. Los materiales utilizados deben ser estables y compatibles con el sustrato y los procesos utilizados deben procurar la retratabilidad de la escultura en posibles futuras intervenciones. Consideramos que, paralelamente al tratamiento superficial de la escultura, es importante realizar una visita a la zona donde se encontraba el monolito en Coatlinchán con el fin de recolectar fragmentos de la misma roca y poder hacer las pruebas destructivas necesarias para determinar futuras intervenciones, sobre todo relativas a la limpieza profunda, consolidación y posible aplicación de hidrofugantes con biocidas.

Tratamiento de fisuras

El monolito presenta varias fisuras en diferentes zonas, pero la única que se observó que pone en riesgo un fragmento del monolito es la que se encuentra en los orificios de la “boca” del Tláloc. (Figura 1.27) Es importante **fijar este fragmento** antes de que se caiga, considerando que es un fragmento extraplomado. Para la consolidación de esta fisura se propone utilizar un adhesivo sintético como resina acrílica muy diluida para que penetre entre los elementos separados por la fractura.



Figura 1.27. Fisura activa localizada en los orificios de la “boca” del Tláloc.

Las demás fisuras detectadas aparentemente no representan riesgos de separaciones de material (Figura 1.28). Dependiendo del resultado de las pruebas de adhesividad, permeabilidad, fluidez del adhesivo y reacciones ante el intemperismo se propondrá un proceso de consolidación de fisuras apropiado para este fin. Consideramos que si se eliminan las aguas residuales los problemas de absorción por capilaridad disminuirán o se eliminarán, y con él también muchos problemas de exfoliación de la roca.



Figura 1.28. Fisuras relacionadas con áreas de escurrimiento, evaporación y acumulación de agua de lluvia.

Acumulación de aguas residuales

El objetivo es eliminar la acumulación de agua encharcada en contacto con la piedra ya que implica fuentes de humedad, escurrimientos, migración de sales, activación de reacciones químicas, proliferación de organismos, frentes de evaporación, erosión y arrastre de partículas constitutivas de la materia prima y erosión de la roca (Figura 1.29). Entre las causas de la creación de depósitos de agua en contacto con la roca encontramos los siguientes:



Figura 1.29. Marcas por escurrimientos de agua.

- Espejo de agua de la fuente. Se debe **bajar el nivel del espejo de agua 7.0 cm** para evitar que el agua de la fuente este en contacto permanente con el monolito (Figura 1.30) y la migración de sales como nitratos y cloruros.



Figura 1.30. Espejo de agua en contacto con el pie derecho del monolito.

El depósito que se encuentra tallado en el tocado de la escultura es la causa de que en época de lluvias haya acumulación de agua y filtraciones por poros, grietas y fisuras de la roca (Figura 1.31). El principal escurrimiento de este depósito es por la parte frontal de la escultura, lo que causa manchas oscuras y puede erosionar la roca.



Figura 1.31. Tina tallada en el tocado de la escultura.

Se propone tapar este depósito con una tapa removible, que no sea visible desde abajo y que tenga un declive que promueva que el agua de lluvia se escurra hacia atrás de la escultura.

- Sobre el pie derecho de la escultura se crea un charco en época de lluvias debido a la inclinación de este elemento (Figura 1.32). **Se propone rellenar esta oquedad con un material reversible, estable y compatible con el sustrato** como puede ser un mortero de cal y polvo de mármol o un relleno sintético. Este relleno debe tener un declive para que el agua escurra a la fuente.



Figura 1.32. Encharcamiento de agua en el pie derecho de la escultura.

- En los huecos superiores de la “boca” del Tlaloc también existe acumulación de agua de lluvia (Figura 1.33), lo que crea una zona húmeda. Se propone **rellenar estos huecos con un material estable, compatible y removible** que evite la acumulación de agua. Este relleno puede hacerse de cal y polvo de mármol o bien de un material sintético adherido con una resina reversible.



Figura 1.33. Huecos en el monolito.

Fuente

Es necesario colocar testigos físicos en la fuente, soporte y escultura del Tlaloc que permitan un monitoreo a futuro de la posible inclinación de estos elementos. Es necesario bajar el nivel del espejo de

agua para evitar que este en contacto con la roca. Esta tarea la realizará el departamento de Servicios Generales del MNA.

Limpieza superficial

El monolito conocido como Tláloc de Coatlinchán desde que fue creado hasta 1964 permaneció en posición horizontal, con el relieve hacia arriba y rodeado por agua en tiempo de lluvias. En tiempo de secas era parte del paisaje y muy seguramente la gente caminaba sobre él y dejó algunas marcas de su paso. Aunque estuvo expuesto a la abrasión y a la erosión natural por muchos años es un hecho que el ambiente en el que se encontraba era más limpio que el actual. El hecho de ponerlo de pie, a la intemperie y en un ambiente sumamente contaminado puede haberle causado más daños en superficie en los últimos 49 años que en todos los anteriores.

Aunque se considera que no es una obra concluida y que no se han detectado restos de estuco ni de pigmentos, su textura y color original se han visto afectados por la deposición de contaminantes y zonas de escurrimientos y almacenamiento de agua (Figura 1.34).



Figura 1.34. Proliferación de microflora.

El problema de la suciedad depositada en la superficie del monolito así como la proliferación de líquenes es un factor de deterioro importante a considerar tanto por la afectación visual que representa como por la lenta pero implacable degradación de la superficie de la roca que pueden causar las raicillas de los líquenes y otros organismos. El asunto de limpieza debe verse como un proceso de eliminación de agentes extraños a la materia prima depositados en superficie que limitan la apreciación visual de la obra y crean depósitos propicios para la activación de reacciones químicas o proliferación de agentes biológicos, evitando en todo momento la abrasión o exfoliación, así sea mínima, de la roca constitutiva. Es importante tener esto en consideración ya que existen nódulos en la roca con diferente densidad y composición que se pueden disgregar con la acción desmedida de un cepillo. También es importante considerar que el intemperismo ha creado una finísima capa “natural” de protección o delicada “piel” de la roca en los últimos 50 años y que es importante conservarla tanto por su historicidad como por la protección que procura a la roca “cruda”.

No obstante lo anterior existen subproductos y deposiciones de superficie que si se pueden y se deben eliminar. El continuo contacto con contaminantes provenientes de la avenida Paseo de la Reforma han ennegrecido ciertas áreas de la escultura y los escurrimientos de agua de lluvia han arrastrado contaminantes y otras partículas que han manchado al monolito, afectándolo visualmente y pueden coadyuvar a la migración de sales en superficie y ambientes ácidos con la presencia de agua. La limpieza de esta escultura es un proceso necesario tanto para recuperar su esplendor como para eliminar restos

de contaminantes depositados en superficie. Este proceso de limpieza debe eliminar también organismos vivos que han proliferado en superficie, nidos de avispa que hay en los orificios que corresponden a la “boca” del Tláloc y otras concreciones como pintura y silicón (Figura 1.35).



Figura 1.35. Concreciones y manchas en superficie.

Se propone realizar la limpieza general superficial de la escultura con agua y un tesoactivo no iónico (canasol). Se realizará la acción de limpieza con cepillos de raíz y cepillos de plástico de diversos tamaños y durezas a una presión moderada. Se debe realizar un enjuague final con agua destilada para lo que proponemos utilizar una bomba de agua y aspersores. Este tipo de limpieza tradicional no causa daños químicos al objeto y el cepillado debe ser controlado para evitar la abrasión superficial y lograr un nivel similar en toda la escultura. Para la eliminación de restos de pintura y restos de silicón será necesario utilizar disolventes orgánicos puntualmente con ayuda de herramienta adecuada.

Para la limpieza de líquenes y musgos se propone realizar pruebas con dos métodos recomendados por dar buenos resultados en la práctica para la eliminación de estos organismos en materiales pétreos a la intemperie. Los métodos recomendados son los siguientes:

- Aplicar sobre el liquen una mezcla de bórax, alcohol etílico y canasol. Dejarlo secar y retirarlo mecánicamente. Enjuagar finalmente con agua destilada.
- Aplicar una solución de alcohol isopropílico y esencia de clavo. Dejar secar y retirar mecánicamente.

Para la eliminación de sales solubles proponemos la aplicación de papetas con agua destilada y con agentes secuestrantes de sales en áreas específicas donde se detectaron estos compuestos.

Soporte

Se ha observado que la fuente presenta un ligero declive hacia el sur que ha provocado que el agua escurra en mayor cantidad hacia esa zona, pero no hay evidencia de que haya sucedido lo mismo con la base de concreto ni de alguna inclinación del monolito. Es necesario colocar testigos tanto en la fuente como en el monolito que puedan monitorearse a futuro para determinar si sucede este fenómeno y corregirlo de ser el caso.

El soporte metálico es un elemento estructural que debe estar en óptimas condiciones para evitar que se oxide y se debilite (Figura 1.36), lo que podría resultar peligroso para la estabilidad del monolito. Después de realizar la dictaminación superficial de este elemento se concluyó que se encuentra en buen estado, salvo por algunos puntos de óxido que habría que tratar.



Figura 1.36. Soporte del monolito.

Para el caso específico del soporte proponemos lo siguiente:

- Depintar el soporte metálico.
- Eliminar zonas con herrumbre y pasivar el metal.
- Aplicar pintura especial para proteger el metal bajo el agua.

Esta tarea está a cargo de la Subdirección de Servicios Generales del MNA.

Tratamientos de restauración a futuro

Los tratamientos propuestos en este proyecto pretenden atender algunas causas, mecanismos y efectos de deterioro detectados en el dictamen realizado por el Laboratorio de Conservación del MNA de cara al cumplimiento del 50 aniversario del museo a celebrarse en septiembre de 2014. Sin embargo consideramos que es necesario establecer un plan de mantenimiento a largo plazo que atienda las necesidades de conservación del monolito, así como una serie de análisis con apoyo interinstitucional que permitan una intervención de restauración profunda del monolito que implique la consolidación de la roca, su estabilización y su protección a futuro.

Algunas de las pruebas no destructivas necesarias que se pueden realizar con apoyo del INAH y el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) de la UNAM son las siguientes:

- Realizar un escaneo tridimensional del monolito con el fin de elaborar un modelo como sólido.
- Realizar un ultrasonido para determinar la profundidad de las fisuras.

- Determinar la porosidad de la roca, la velocidad de absorción de agua y la repartición de pesos monolito seco y húmedo
- Realizar una termografía para determinar el movimiento de la humedad dentro del monolito.
- Realizar una espectroscopía y ecografía para determinar las diferencias de estado de solidez de la roca en diferentes zonas del monolito.
- Pruebas de consolidantes, hidrofugantes y biocidas en muestras de roca similar a la del monolito.

Todas estas pruebas permitirán conocer y medir el estado de conservación de la roca y la posible aplicación de productos para la conservación del monolito y brindarán elementos y datos objetivos para determinar la necesidad y factibilidad de proteger bajo techo la escultura.

1.10 Justificación de las propuestas

Los procesos de deterioro del monolito Tláloc de Coatlinchán están asociados tanto a la naturaleza de su materia prima, su técnica de manufactura y a su ubicación y su entorno. Muchos de los factores de deterioro que lo afectan son evitables solo mediante la colocación de un techo o cobertizo que lo proteja de la insolación, la lluvia y un poco los contaminantes. Sin embargo esta solución se aleja de los alcances del proyecto que aquí se presenta, y lo dejamos como una propuesta a considerar para el futuro. Consideramos que hay tratamientos de restauración y conservación aplicables a la situación actual del monolito que no impiden futuros tratamientos y que son necesarios, como la consolidación de fisuras activas, la limpieza superficial y la eliminación de aguas residuales.

La limpieza del monolito conocido como Tláloc de Coatlinchán es un proceso de restauración necesario tanto por la apreciación visual del monolito por parte de los espectadores como por la estabilidad física de la superficie del monolito. La eliminación de charcos de agua es un proceso necesario para evitar mayores deterioros de la roca. La consolidación de fisuras activas es también un proceso necesario pero que debe realizarse con mucho cuidado en la selección del material consolidante, ya que se trata de una obra que se encuentra a la intemperie y cualquier material agregado tendrá que permanecer estable y compatible con el sustrato y ante las inclemencias ambientales de esta zona de la Ciudad de México.

Es necesario acordar un plan de conservación permanente para darle mantenimiento anual y evitar la acumulación de suciedad como la que existe actualmente.

2 Monitoreo de posición en tres ejes

Benjamín Valera Orozco, Gerardo Antonio Ruiz Botello, Sergio Padilla Olvera

El desarrollo de la instrumentación para el monitoreo de las condiciones de posición de equilibrio y los desplazamientos que puedan sufrir piezas monumentales del patrimonio arqueológico de México, como el Tláloc de Coatlinchán, está enfocado a su preservación y mantenimiento. Esta escultura de gran tamaño, conocida popularmente también como “Monolito de Tláloc”, por estar labrada en una sola pieza de andesita, está localizada actualmente en las afueras del Museo Nacional de Antropología de México, y se encuentra sometida a diversos efectos producidos por agentes antropogénicos y medioambientales, como vibraciones, sismos, cambios en las condiciones del suelo, lluvia ácida, microorganismos, fauna silvestre y nociva, radiación solar, etc. Los arqueólogos y restauradores encargados de su preservación y mantenimiento han identificado diversas variables estructurales de las cuales es necesario mantener registros, ya que de ello dependen los programas de mantenimiento correctivo y preventivo para asegurar la estabilidad de la pieza. El Monolito de Tláloc, al ser una pieza de gran tamaño (7 metros de altura y 168 toneladas), -que es exhibida desde 1964 en posición vertical, diferente a la posición en la cual fue encontrada (horizontal)-, requiere un constante monitoreo de su inclinación en tres ejes ortogonales (o su rotación alrededor de dos de ellos) que permita conocer la evolución de su posición a lo largo de los años, con el fin de prevenir el riesgo de alguna eventual inestabilidad.

En este trabajo se describe el desarrollo de un instrumento para la medición del ángulo de inclinación en tres ejes conocido como inclinómetro, el cual será utilizado para monitorear la posición del Monolito de Tláloc (Wong et al, 2013). El instrumento tiene la capacidad de medir los ángulos estandarizados de gravedad, elevación y alabeo (conocidos en inglés como gravity, pitch y roll) para los acelerómetros. Estos ángulos corresponden a un sistema de coordenadas solidario al Monolito, con respecto a un sistema fijo de coordenadas.

2.1 Inclinómetro triaxial inalámbrico

El instrumento está compuesto por una radio base transmisora de los ángulos de navegación colocada en la parte superior del Monolito y una radio base receptora que es colocada en un local en el interior del Museo Nacional de Antropología. La radio base transmisora es un circuito electrónico construido sobre la base de los siguientes dispositivos: un microcontrolador, un circuito de radio frecuencia y un sensor del tipo Sistema MicroElectroMecánico, MEMS, por sus siglas en inglés. El algoritmo de medición en el microcontrolador ejecuta la adquisición de las siguientes variables de interés para la aplicación: los tres ángulos de navegación, el voltaje de su fuente de alimentación suministrado por baterías AA y la temperatura del sensor. Los datos son enviados en tiempo real de manera inalámbrica a la radio base receptora. En forma adicional el microcontrolador implementa un algoritmo de optimización del uso de la energía que permite operar la radio base transmisora hasta por cinco meses con una carga de dos baterías AA. Por otra parte, la radio base receptora es un circuito electrónico de comunicación serie asíncrona que le permite a una computadora recibir, almacenar y desplegar en forma tabular y gráfica la información generada por el sensor en la radio base transmisora. La figura 2.1 muestra el arreglo experimental descrito.



Figura 2.1. Arreglo experimental en la instrumentación del Monolito de Tláloc.

2.2 Radio base transmisora

La radio base es un sistema electrónico que por estar instalada en el Monolito de Tláloc deberá contemplar una cubierta a prueba de la intemperie. La figura 2.2 muestra el diagrama a bloques de la radio base transmisora.

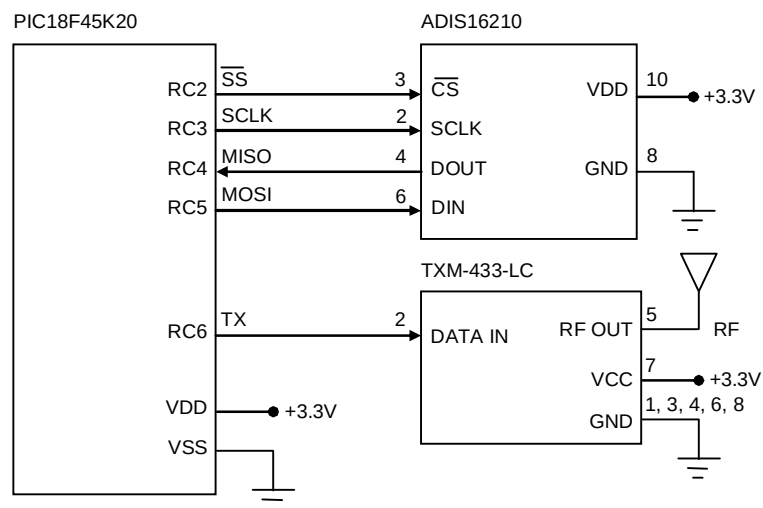


Figura 2.2. Radio base transmisora.

En la figura 2 el PIC18F45K20 (Microchip, 2010) es un microcontrolador contenido en la placa de desarrollo que se distribuye con el módulo de programación PICKit3 (Microchip, 2009.a). Es el encargado de ejecutar los algoritmos de comunicación SPI con el ADIS16210 y serie asíncrona con el TXM-433-LC. Adicionalmente, genera las señales de control para que tanto él mismo como los dispositivos periféricos operen en estado de hibernación o bajo consumo de energía. En este sentido, el algoritmo está diseñado para operar en estado de hibernación durante 70 s y en estado de consumo nominal de potencia durante

0.42 s, obteniéndose una tasa de operación de un paquete de información cada 70 s aproximadamente. El paquete de información lo obtiene el PIC18F45K20 al comunicarse vía SPI con el sensor MEMS de inclinación ADIS16210 (Analog Devices, 2011) y consta de los datos que se muestran en la tabla 2.1.

Dato	Registro SPI	Descripción	Rango
ID	PROD_ID	Identificador del dispositivo	3f52 (fijo)
X	XINCL_OUT	Ángulo de alabeo	$\pm 180^\circ$
Y	YINCL_OUT	Ángulo de elevación	$\pm 180^\circ$
Z	Z_INCL_OUT	Orientación con el eje de gravedad	$\pm 90^\circ$
VCC	SUPPLY_OUT	Voltaje de suministro (dos baterías AA)	3.0V a 3.6V
TEM	TEMP_OUT	Temperatura interior	-40° a 125°

Tabla 2.1. Paquete de información.

El ADIS16210 es un sistema autónomo que no requiere inicialización. Su interface serie SPI de 16 bits soporta comunicación “Full dúplex” bidireccional. El valor actual de los datos se obtiene al leer los registros SPI de la tabla 2.1 desde el microcontrolador. Una vez formado el paquete de información con datos actuales, el microcontrolador los envía al circuito transmisor de radio frecuencia TXM-433-LC (Linx, 2000.a) mediante la interface serie asíncrona. El circuito TXM-433-LC modula los datos con una frecuencia portadora de 433MHz utilizando el esquema de “portadora-presente portadora-ausente”.

2.2.1 Interface de comunicaciones

El microcontrolador se comunica con los periféricos de la figura 2.2 utilizando los siguientes dos esquemas:

- Interface serie asíncrona con el TXM-433-LC. El paquete de información es transferido por el puerto RC6 utilizando 8 bits de datos, sin paridad, un bit de parada y 4800 bits por segundo. Con un nivel bajo en la entrada de datos del TXM se obtiene su estado de hibernación. Estos datos se propagan en forma serial por el medio ambiente como una onda electromagnética de 433MHz y se reciben de la misma forma serial en la estación receptora.
- Interface serie SPI con el ADIS16210. El paquete de información se obtiene al leer los registros SPI de la tabla 2.1. Para una operación de lectura de un registro sencillo, se requieren dos ciclos SPI. En el primer ciclo se solicita el contenido del registro en cuestión al escribir en RC5 sus 8 bits de dirección más 8 bits de datos que solo son importantes en las operaciones de escritura. En el segundo ciclo se puede iniciar otra solicitud de lectura en RC5 y a la vez se puede encuestar el resultado del primer ciclo de escritura en RC4. La figura 2.3 muestra el diagrama de tiempos de un ciclo SPI de 16 bits conteniendo las señales del protocolo SPI de escritura en RC5, lectura en RC4 y control en RC2 y RC3. A partir del diagrama de tiempos de la figura 2.3, en cada ciclo del reloj del microcontrolador se generan la señales de salida en RC2, RC3 y RC5 con una instrucción “output bit” y se lee el contenido de RC4 con una instrucción “input bit” como se muestra en la tabla 2.2.

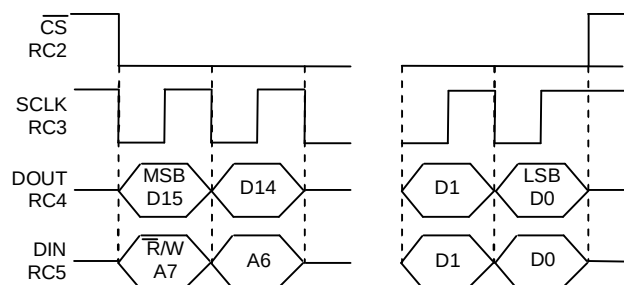


Figura 2.3. Ciclo SPI de 16 bits.

Ciclo	*	0	1	...	14	15	*
RC2	1	0 0	0 0	...	0 0	0 0	1
RC3	1	0 1	0 1	...	0 1	0 1	1
RC4	*	* L	* L	...	* L	* L	*
RC5	*	R/W R/W	A6 A6	...	D1 D1	D0 D0	*

Tabla 2.2. Señales de control SPI.

En donde:

* = No importa

L = Input bit

0 = Output bit "0"

1 = Output bit "1"

R = Bit de control que indica que el registro se lee

W = Bit de control que indica que el registro se escribe

2.2.2 Estimación de la duración de las baterías

Para la estimación de la duración de las baterías se mide el tiempo y el consumo de corriente de la estación transmisora de la figura 2.2 bajo condiciones de operación nominal y estado de hibernación, lo que proporciona los datos de la tabla 2.3.

Estado	Corriente (mA)	Tiempo (s)	Consumo (mAs)
Hibernación	0.74	70	51.8
Operación	25	0.42	10.5
Total		70.42	62.3

Tabla 2.3. Consumo de corriente y tiempo de operación de la estación transmisora.

De la tabla 2.3 se puede calcular la corriente promedio (Microchip, 2009.b)

$$I_{prom} = \frac{62.3\text{mAs}}{70.42\text{s}} = 0.885\text{mA}$$

Con esta corriente promedio y los datos estándar de capacidad de las baterías más comunes en el mercado, se obtiene la duración de estas baterías como se muestra en la tabla 2.4.

Batería	Capacidad (mAh)	Duración		
		Horas	Días	Meses
CR2032	220	248.6	10.4	0.34
AA	2890	3265.5	136	4.5

Tabla 2.4. Duración de las baterías en la estación transmisora.

2.2.3 Código fuente

El microcontrolador ejecuta el algoritmo de medición, comunicaciones y control descrito en las secciones anteriores mediante el siguiente código de programación desarrollado en lenguaje C para PIC.

```
// Ejecutar MPLabIDE como administrador para usar Pickit 3
//
// Entradas:
```

```

//          RC4 MISO      <- De J1, 4 ADIS16210
// Salidas:
//          RC2 SS        -> Al J1, 3  ADIS16210
//          RC3 SCLK      -> Al J1, 2  AIDS16210
//          RC5 MOSI      -> Al J1, 6  AIDS16210
//          RC6 TX        -> Al 10  TXM433
//
#include <18f45k20.h>
#fuses INTRC_IO,WDT2048,NOPROTECT,NOLVP,NOBROWNOUT // 10s
//#fuses INTRC_IO,WDT4096,NOPROTECT,NOLVP,NOBROWNOUT // 17s
//#fuses INTRC_IO,WDT16384,NOPROTECT,NOLVP,NOBROWNOUT // 66s
#use delay (clock=8000000)
//#use rs232(baud=2400,parity=N,xmit=PIN_C6,rcv=PIN_C7,bits=8) //Usar en el receptor
4800-8-N-1
//#use rs232(baud=1200,parity=N,xmit=PIN_C6,rcv=PIN_C7,bits=8) //Usar en el receptor
2400-8-N-1
#use rs232(baud=600,parity=N,xmit=PIN_C6,rcv=PIN_C7,bits=8) //Usar en el receptor 1200-
8-N-1
#use fixed_io(c_outputs=PIN_C2, PIN_C3, PIN_C5)

signed int16 decimal(unsigned int16 dato)
{
    signed int16 resultado;
    if((dato>=0)&(dato<=32767))
    {
        resultado=dato;
    }
    if((dato>=32768)&(dato<=65535))
    {
        resultado=dato-65536;
    }
    return resultado;
}

float angulo(unsigned int16 dato)
{
    signed int16 resultado;
    float retorno;
    if((dato>=0)&(dato<=32767))
    {
        resultado=dato;
    }
    if((dato>=32768)&(dato<=65535))
    {
        resultado=dato-65536;
    }
    retorno=resultado*0.0054931640625;    //(180/32,768) pagina 9 del data sheet
ADIS16210
    return retorno;
}

float temperatura(unsigned int16 dato)
{
    signed int16 resultado;
    float retorno;
    if((dato>=0)&(dato<=32767))
    {
        resultado=dato;
    }
    if((dato>=32768)&(dato<=65535))
    {
        resultado=dato-65536;
    }
}

```



```

        retorno=((float)(resultado-1278)*(-0.47))+25.0;    //pagina 11 del data sheet
ADIS16210
        return retorno;
}

float voltaje(unsigned int16 dato)
{
    signed int16 resultado;
    float retorno;
    if((dato>=0)&(dato<=32767))
    {
        resultado=dato;
    }
    if((dato>=32768)&(dato<=65535))
    {
        resultado=dato-65536;
    }
    retorno=(float)(resultado*5.0)/32768.0;    //pagina 11 del data sheet ADIS16210
    return retorno;
}

int16 spi_tx(int16 dato)
{
    int aux;
    int16 resultado;
    resultado=0xffff;
    output_bit(PIN_C2,1);
    output_bit(PIN_C3,1);

    output_bit(PIN_C2,0);
    output_bit(PIN_C3,0);
    aux=input_c()&0x10;
    if(aux) resultado=resultado&0xffff;
    else resultado=resultado&0x7fff;
    output_bit(PIN_C5,dato&0x8000);
    output_bit(PIN_C2,0);
    output_bit(PIN_C3,1);
    aux=input_c()&0x10;
    if(aux) resultado=resultado&0xffff;
    else resultado=resultado&0x7fff;
    output_bit(PIN_C5,dato&0x8000);

    output_bit(PIN_C2,0);
    output_bit(PIN_C3,0);
    aux=input_c()&0x10;
    if(aux) resultado=resultado&0xffff;
    else resultado=resultado&0xbfff;
    output_bit(PIN_C5,dato&0x4000);
    output_bit(PIN_C2,0);
    output_bit(PIN_C3,1);
    aux=input_c()&0x10;
    if(aux) resultado=resultado&0xffff;
    else resultado=resultado&0xbfff;
    output_bit(PIN_C5,dato&0x4000);

    output_bit(PIN_C2,0);
    output_bit(PIN_C3,0);
    aux=input_c()&0x10;
    if(aux) resultado=resultado&0xffff;
    else resultado=resultado&0xdfff;
    output_bit(PIN_C5,dato&0x2000);
    output_bit(PIN_C2,0);
    output_bit(PIN_C3,1);

```

```

aux=input_c()&0x10;
if(aux) resultado=resultado&0xffff;
else resultado=resultado&0xdfff;
output_bit(PIN_C5,dato&0x2000);

output_bit(PIN_C2,0);
output_bit(PIN_C3,0);
aux=input_c()&0x10;
if(aux) resultado=resultado&0xffff;
else resultado=resultado&0xefff;
output_bit(PIN_C5,dato&0x1000);
output_bit(PIN_C2,0);
output_bit(PIN_C3,1);
aux=input_c()&0x10;
if(aux) resultado=resultado&0xffff;
else resultado=resultado&0xefff;
output_bit(PIN_C5,dato&0x1000);

output_bit(PIN_C2,0);
output_bit(PIN_C3,0);
aux=input_c()&0x10;
if(aux) resultado=resultado&0xffff;
else resultado=resultado&0xf7ff;
output_bit(PIN_C5,dato&0x0800);
output_bit(PIN_C2,0);
output_bit(PIN_C3,1);
aux=input_c()&0x10;
if(aux) resultado=resultado&0xffff;
else resultado=resultado&0xf7ff;
output_bit(PIN_C5,dato&0x0800);

output_bit(PIN_C2,0);
output_bit(PIN_C3,0);
aux=input_c()&0x10;
if(aux) resultado=resultado&0xffff;
else resultado=resultado&0xfbff;
output_bit(PIN_C5,dato&0x0400);
output_bit(PIN_C2,0);
output_bit(PIN_C3,1);
aux=input_c()&0x10;
if(aux) resultado=resultado&0xffff;
else resultado=resultado&0xfbff;
output_bit(PIN_C5,dato&0x0400);

output_bit(PIN_C2,0);
output_bit(PIN_C3,0);
aux=input_c()&0x10;
if(aux) resultado=resultado&0xffff;
else resultado=resultado&0xfdff;
output_bit(PIN_C5,dato&0x0200);
output_bit(PIN_C2,0);
output_bit(PIN_C3,1);
aux=input_c()&0x10;
if(aux) resultado=resultado&0xffff;
else resultado=resultado&0xfdff;
output_bit(PIN_C5,dato&0x0200);

output_bit(PIN_C2,0);
output_bit(PIN_C3,0);
aux=input_c()&0x10;
if(aux) resultado=resultado&0xffff;
else resultado=resultado&0xfeff;
output_bit(PIN_C5,dato&0x0100);

```

```

output_bit(PIN_C2,0);
output_bit(PIN_C3,1);
aux=input_c()&0x10;
if(aux) resultado=resultado&0xffff;
else resultado=resultado&0xfeff;
output_bit(PIN_C5,dato&0x0100);

output_bit(PIN_C2,0);
output_bit(PIN_C3,0);
aux=input_c()&0x10;
if(aux) resultado=resultado&0xffff;
else resultado=resultado&0xff7f;
output_bit(PIN_C5,dato&0x0080);
output_bit(PIN_C2,0);
output_bit(PIN_C3,1);
aux=input_c()&0x10;
if(aux) resultado=resultado&0xffff;
else resultado=resultado&0xff7f;
output_bit(PIN_C5,dato&0x0080);

output_bit(PIN_C2,0);
output_bit(PIN_C3,0);
aux=input_c()&0x10;
if(aux) resultado=resultado&0xffff;
else resultado=resultado&0xffbf;
output_bit(PIN_C5,dato&0x0040);
output_bit(PIN_C2,0);
output_bit(PIN_C3,1);
aux=input_c()&0x10;
if(aux) resultado=resultado&0xffff;
else resultado=resultado&0xffbf;
output_bit(PIN_C5,dato&0x0040);

output_bit(PIN_C2,0);
output_bit(PIN_C3,0);
aux=input_c()&0x10;
if(aux) resultado=resultado&0xffff;
else resultado=resultado&0xffdf;
output_bit(PIN_C5,dato&0x0020);
output_bit(PIN_C2,0);
output_bit(PIN_C3,1);
aux=input_c()&0x10;
if(aux) resultado=resultado&0xffff;
else resultado=resultado&0xffdf;
output_bit(PIN_C5,dato&0x0020);

output_bit(PIN_C2,0);
output_bit(PIN_C3,0);
aux=input_c()&0x10;
if(aux) resultado=resultado&0xffff;
else resultado=resultado&0xffef;
output_bit(PIN_C5,dato&0x0010);
output_bit(PIN_C2,0);
output_bit(PIN_C3,1);
aux=input_c()&0x10;
if(aux) resultado=resultado&0xffff;
else resultado=resultado&0xffef;
output_bit(PIN_C5,dato&0x0010);

output_bit(PIN_C2,0);
output_bit(PIN_C3,0);
aux=input_c()&0x10;
if(aux) resultado=resultado&0xffff;

```

```

        else resultado=resultado&0xffff7;
        output_bit(PIN_C5,dato&0x0008);
        output_bit(PIN_C2,0);
        output_bit(PIN_C3,1);
        aux=input_c()&0x10;
        if(aux) resultado=resultado&0xffff;
        else resultado=resultado&0xffff7;
        output_bit(PIN_C5,dato&0x0008);

        output_bit(PIN_C2,0);
        output_bit(PIN_C3,0);
        aux=input_c()&0x10;
        if(aux) resultado=resultado&0xffff;
        else resultado=resultado&0xffffb;
        output_bit(PIN_C5,dato&0x00040);
        output_bit(PIN_C2,0);
        output_bit(PIN_C3,1);
        aux=input_c()&0x10;
        if(aux) resultado=resultado&0xffff;
        else resultado=resultado&0xffffb;
        output_bit(PIN_C5,dato&0x0004);

        output_bit(PIN_C2,0);
        output_bit(PIN_C3,0);
        aux=input_c()&0x10;
        if(aux) resultado=resultado&0xffff;
        else resultado=resultado&0xffffd;
        output_bit(PIN_C5,dato&0x0002);
        output_bit(PIN_C2,0);
        output_bit(PIN_C3,1);
        aux=input_c()&0x10;
        if(aux) resultado=resultado&0xffff;
        else resultado=resultado&0xffffd;
        output_bit(PIN_C5,dato&0x0002);

        output_bit(PIN_C2,0);
        output_bit(PIN_C3,0);
        aux=input_c()&0x10;
        if(aux) resultado=resultado&0xffff;
        else resultado=resultado&0xffffe;
        output_bit(PIN_C5,dato&0x0001);
        output_bit(PIN_C2,0);
        output_bit(PIN_C3,1);
        aux=input_c()&0x10;
        if(aux) resultado=resultado&0xffff;
        else resultado=resultado&0xffffe;
        output_bit(PIN_C5,dato&0x0001);

        output_bit(PIN_C2,1);
        output_bit(PIN_C3,1);
        return resultado;
}

void main ()
{
    unsigned int16 datoli, prod_id, xincl_out, yincl_out, zincl_out, supply_out,
temp_out;
    float ang_x, ang_y, ang_z, vcc, temp;
    int16 i;

    set_tris_c(0x90);
    output_bit(PIN_C2,1);
    output_bit(PIN_C3,1);

```

```

output_bit(PIN_C5,1);
output_bit(PIN_B1,1);
for(i=1; i<=20; i++) delay_ms(100); //20*(100ms/2)=1s

while(1)
{
    output_bit(PIN_C2,1);
    output_bit(PIN_C3,1);
    output_bit(PIN_C5,1);
    output_bit(PIN_B1,1);
    for(i=1; i<=5; i++) delay_ms(100); //5*(100ms/2)=0.25s

    datoli=spi_tx(0x5600);
    delay_ms(1);
    prod_id=spi_tx(0x0c00);
    delay_ms(1);
    xincl_out=spi_tx(0x0e00);
    delay_ms(1);
    yincl_out=spi_tx(0x1000);
    delay_ms(1);
    zincl_out=spi_tx(0x0200);
    delay_ms(1);
    supply_out=spi_tx(0x0a00);
    delay_ms(1);
    temp_out=spi_tx(0x0560);

    ang_x=angulo(xincl_out);
    ang_y=angulo(yincl_out);
    ang_z=angulo(zincl_out);
    vcc=voltaje(supply_out);
    temp=temperatura(temp_out);

    setup_uart(1);
    printf("ID %lx, X %8.4f, Y %8.4f, Z %8.4f, VCC %8.4f, TEM %8.4f\r",
prod_id, ang_x, ang_y, ang_z, vcc, temp);

    delay_ms(18);
    datoli=spi_tx(0xba00);
    delay_ms(8);
    datoli=spi_tx(0xbe02);
    delay_ms(8);
    datoli=spi_tx(0xba00);
    delay_ms(8);
    datoli=spi_tx(0xbe02);
    delay_ms(8);

    output_bit(PIN_C3,0);
    output_bit(PIN_C5,0);
    output_bit(PIN_B1,0);
    setup_uart(0);

    setup_wdt(WDT_ON);
    sleep();
    setup_wdt(WDT_OFF);

    output_bit(PIN_C2,0);
    for(i=1; i<=8; i++) delay_ms(100); //8*(100ms/2)=0.4s
    output_bit(PIN_C2,1);
    for(i=1; i<=8; i++) delay_ms(100); //8*(100ms/2)=0.4s
}
}

```


2.3 Radio base receptora

La radio base receptora se construye con base en el circuito de radio frecuencia complementario al transmisor TXM433-LC, es decir el RXM-433-LC (Linx, 2000.b). El circuito electrónico implementado es en esencia un convertidor de RF a datos seriales RS232, como se muestra en la figura 2.4.

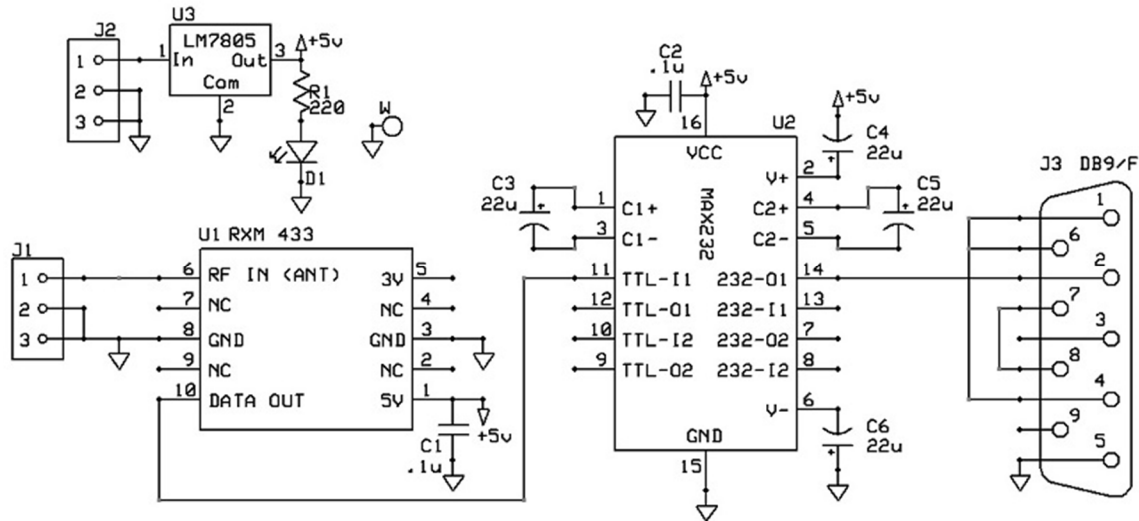


Figura 2.4. Circuito electrónico de la radio base receptora.

El módulo receptor RXM-433 recibe la señal de radio frecuencia de 433MHz y la convierte a niveles lógicos TTL. Posteriormente un circuito desplazador de nivel, MAX232 (Texas, 2014), convierte los niveles lógicos TTL a una señal RS232 compatible con el puerto serie DB9 de una computadora personal. El circuito de la figura 2.4 es alimentado con 5 VDC.

2.4 Resultados

Las figuras 2.5 y 2.6 muestran respectivamente la implementación de las radio bases.

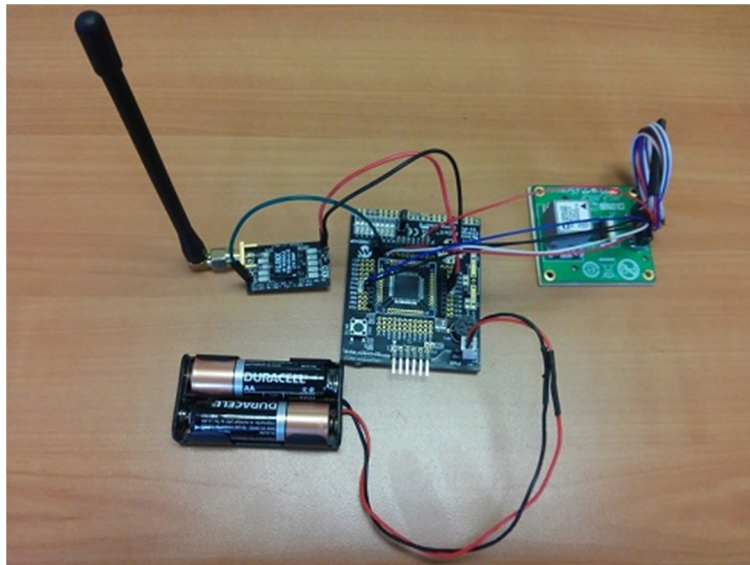


Figura 2.5. Radio base transmisora.

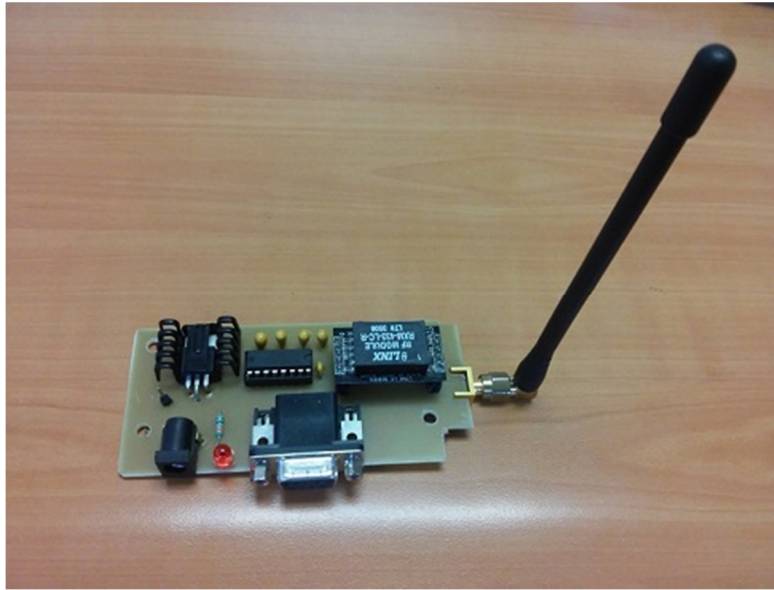


Figura 2.6. Radio base receptora.

La figura 2.7 muestra una captura de la pantalla del programa Hyper Terminal de Windows XP en donde se pueden visualizar los datos recibidos por la estación receptora. En pruebas de operación, el alcance del arreglo experimental fue de 20m, longitud que teóricamente existe entre el Monolito de Tláloc y el local más cercano en el interior del Museo Nacional de Antropología.

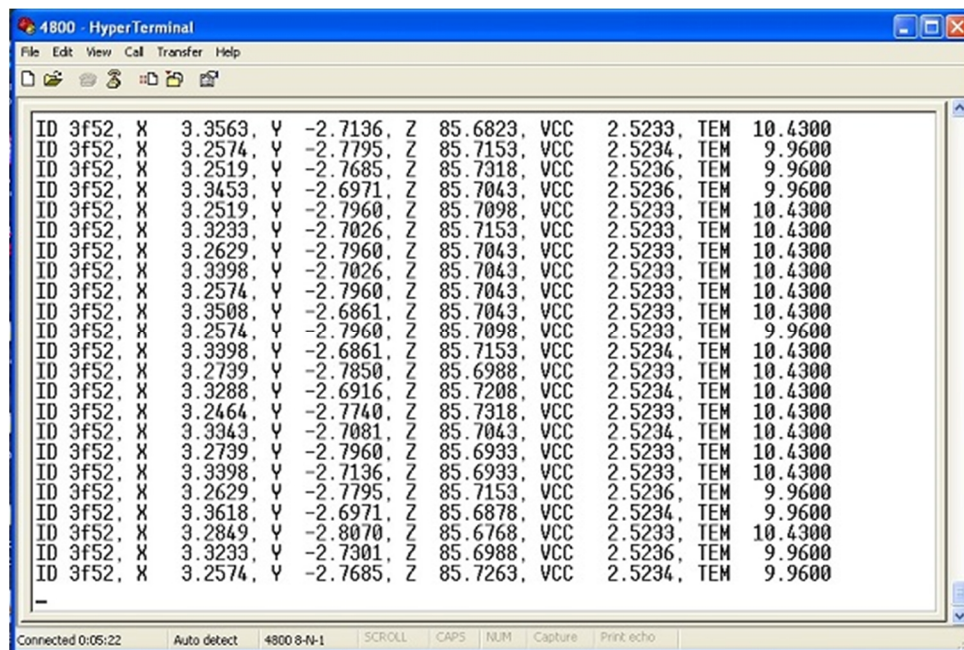


Figura 2.7. Captura de pantalla del programa Hyper Terminal.

2.5 Cumplimientos

Se diseñó y construyó un inclinómetro triaxial inalámbrico con el propósito específico de monitorear la evolución en posición del Monolito de Tláloc. El sistema consiste de una radio base transmisora y una

receptora. Los circuitos electrónicos de las radio bases fueron desarrollados a partir de herramientas de desarrollo básicas, tanto hardware como software, lo cual facilita su eventual transferencia tecnológica. Se realizaron pruebas de operación verificando el correcto funcionamiento del dispositivo MEMS sensor de inclinación a una distancia de 20m entre bases transmisora y receptora. La distancia obtenida cubre justamente la especificación inicial del proyecto. No obstante, como trabajo a futuro se plantea incrementar el alcance del enlace inalámbrico para prever futuras modificaciones en la posición de las radio bases.

3 Análisis de muestras de la andesita

Leticia Araceli Alba Aldave

En un primer estudio se analizaron las andesitas Tláloc 1, andesita rojiza perteneciente un yacimiento de cercano al pueblo de Coatlinchán, Tláloc 2, andesita del mismo sitio pero más alterada y Tláloc Museo, proveniente de la parte posterior del monolito de Tláloc. Se analizaron por microscopio petrográfico, por difracción de rayos X (DRX), por espectroscopía micro-Raman y por microscopía electrónica. El propósito de los estudios reportados en esta sección es determinar la composición del Tláloc para posteriormente tener registros y poder utilizarlos para futuros estudios enfocados a su preservación. Los resultados comparativos de diferentes muestras son útiles como muestras de referencia con las cuales se puede establecer una composición mineralógica para saber su evolución en el tiempo.

3.1 Análisis por DRX

Se molió una pequeña cantidad de cada muestra y se identificaron los minerales presentes en ellas mediante Difracción de Rayos X (DRX). Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 3.1 a 3.5.

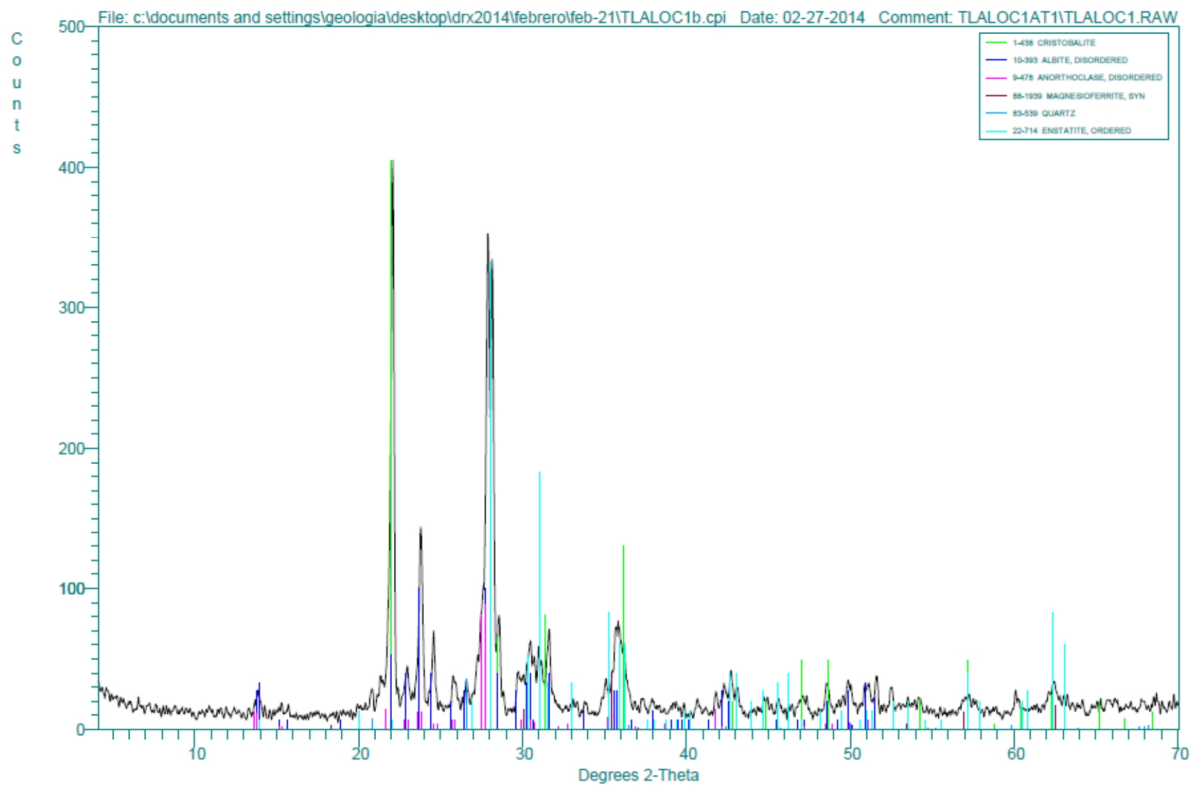


Figura 3.1. Tláloc 1 Cristobalita, albita, anortoclasa, magnesio-ferrita, cuarzo y enstatita.

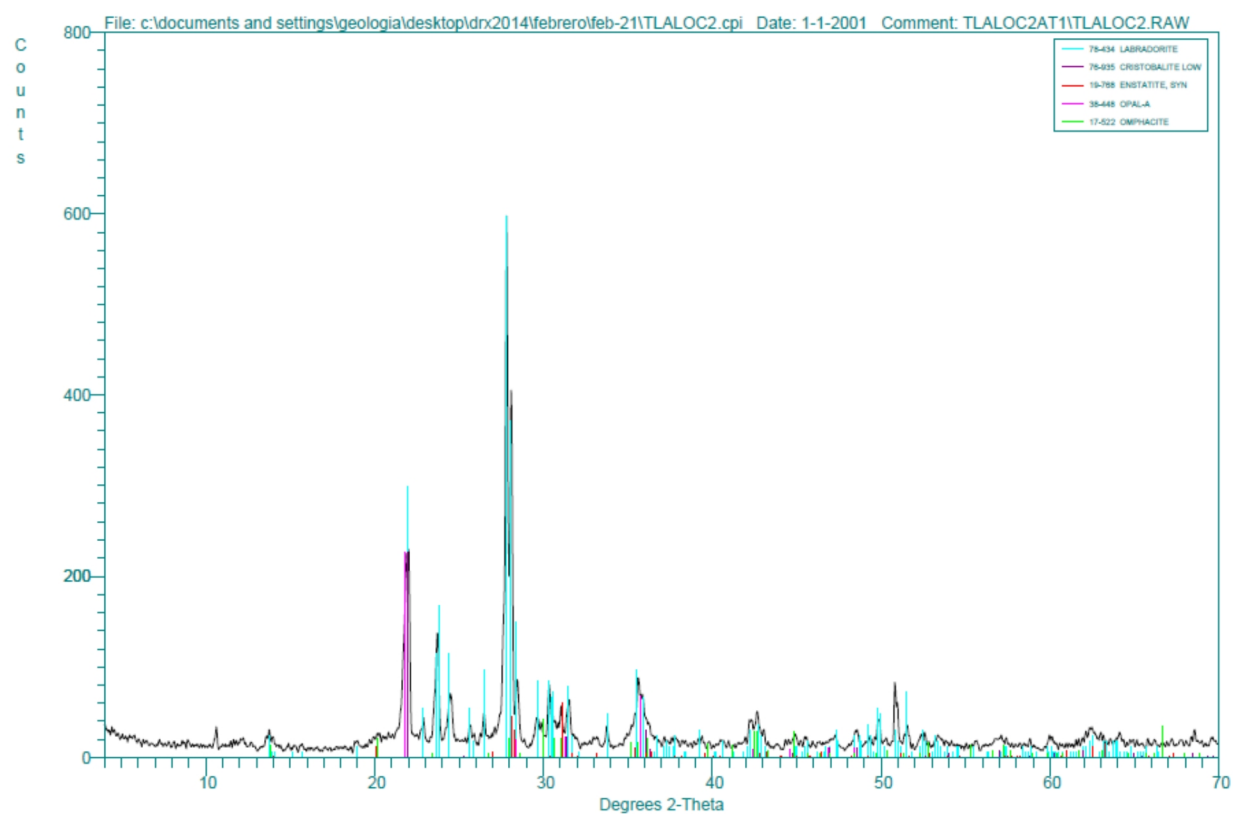


Figura 3.2. Tlálóc 2: Labradorita, cristobalita (bajo), enstatita, ópalo-A y omfacita.

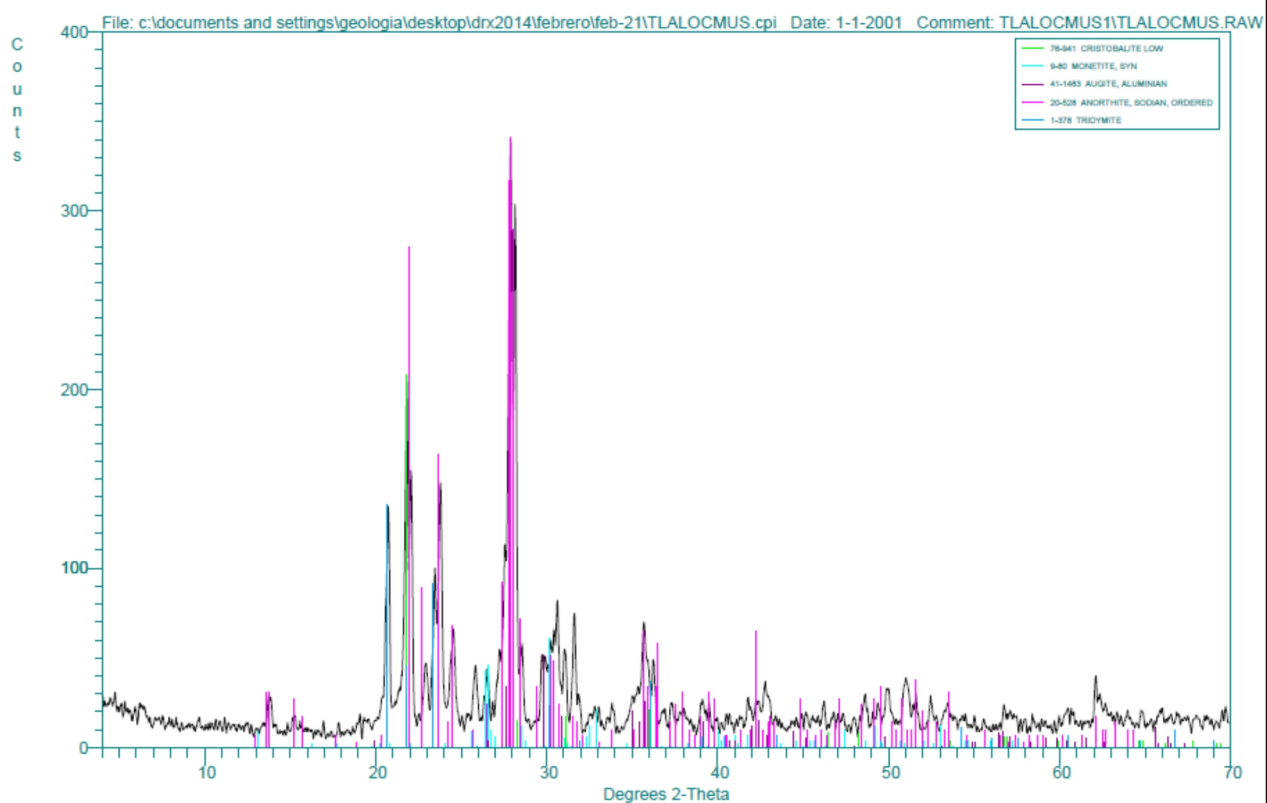


Figura 3.3. Tlálóc museo: Cristobalita (bajo), monetita, Al-augita, anortita sódica, tridimita.

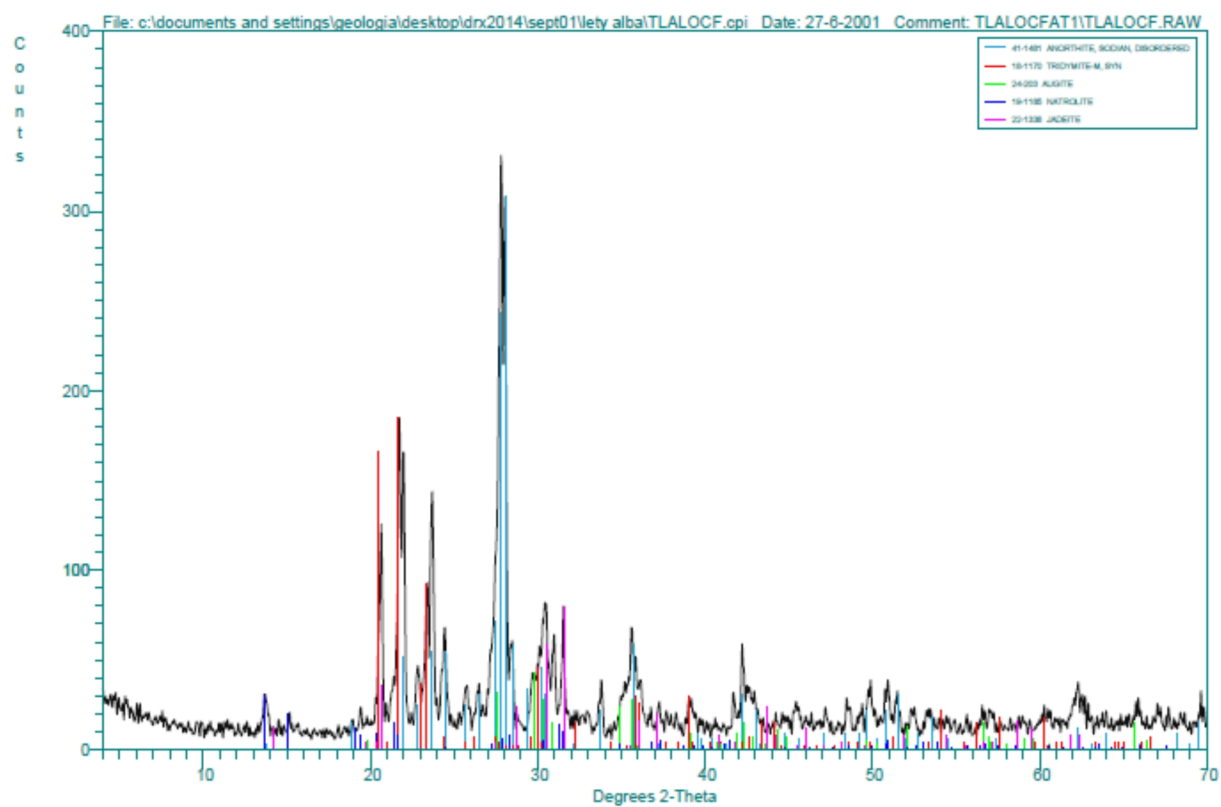


Figura 3.4. Tlálloc M8 Fragmento: anortita sódica, tridimita, Al-augita, natrolita, jadeíta.

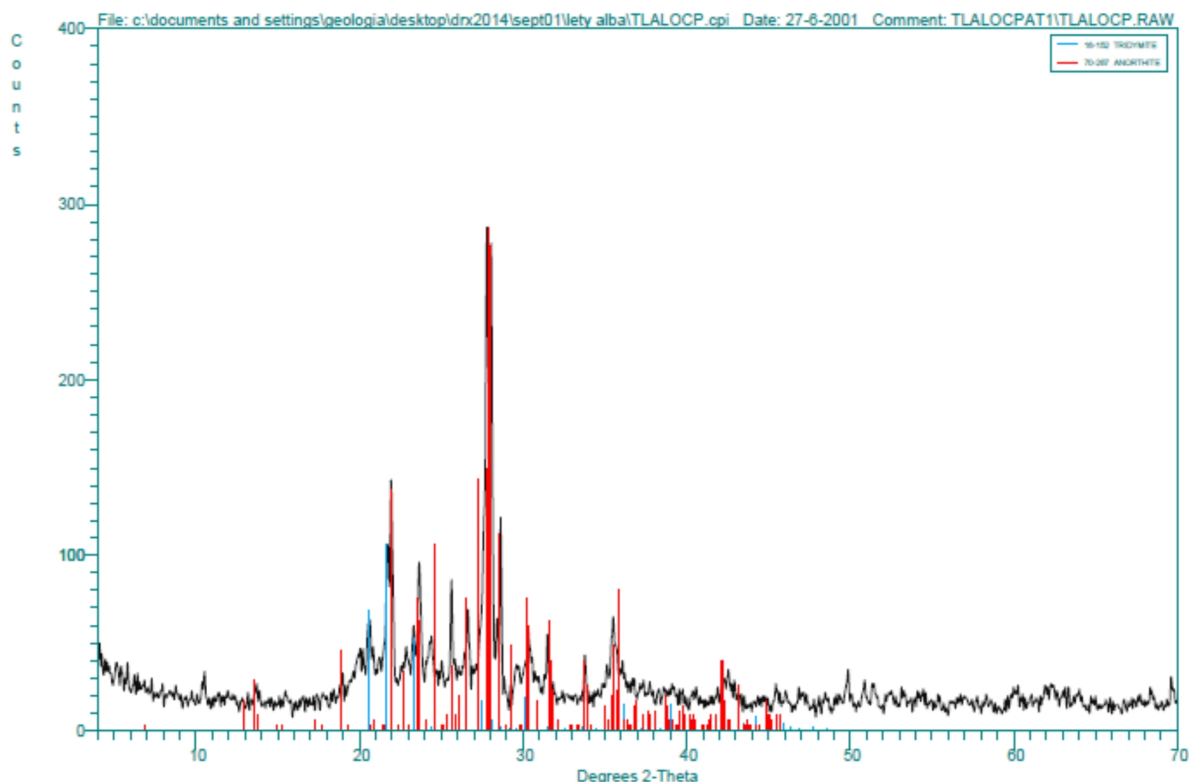


Figura 3.5. Tlálóc Mu8 polvo: **tridimita**, **anortita sódica**.

Los minerales que se pudieron identificar en cada muestra no son los mismos. Esto se puede deber a la alteración que sufrieron y/o a que la porción molida era poca y no era representativa.

Los resultados de los análisis químico cuantitativo por Fluorescencia de Rayos X (FRX) de la composición total de las muestras Tlálóc 1, Tlálóc 2 y Tlálóc Museo se muestran en la tabla 3.1.

Muestra	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	P X C
Tlaloc 1	63.373	0.842	15.457	5.353	0.109	3.419	4.546	4.099	2.231	0.188	0.48
Tlaloc 2	59.53	0.95	18.012	5.964	0.1	3.296	4.907	4.139	1.167	0.149	1.7
Tlaloc Museo	64.176	0.831	15.878	5.096	0.085	2.581	4.238	4.14	2.144	0.167	0.74

Tabla 3.1. Análisis químico cuantitativo FRX.

Los análisis de FRX se realizaron en un espectrómetro secuencial SRS-3000 de Siemens y los de DRX se llevaron a cabo en un difractómetro Siemens D-5000. Ambos análisis fueron realizados por la Quim. Patricia Girón.

3.2 Análisis por espectroscopía micro-Raman

Los análisis se llevaron a cabo en un espectroscopio micro Raman modelo Almega XR, equipado con un microscopio Olympus BX 51 en el Laboratorio de Materiales del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la UNAM. Los espectros Raman se obtuvieron con un láser de 532 nm de

Nd:YVO₄. Se utilizó un objetivo de 100x para enfocar el láser en la muestra. El método de espectroscopía Raman permite realizar análisis no-invasivos y no-destructivos de la muestra. Se utilizó un CCD (charge coupled device), enfriado termoelectricamente a -50° C, como detector para coleccionar la señal en una geometría de 180°.

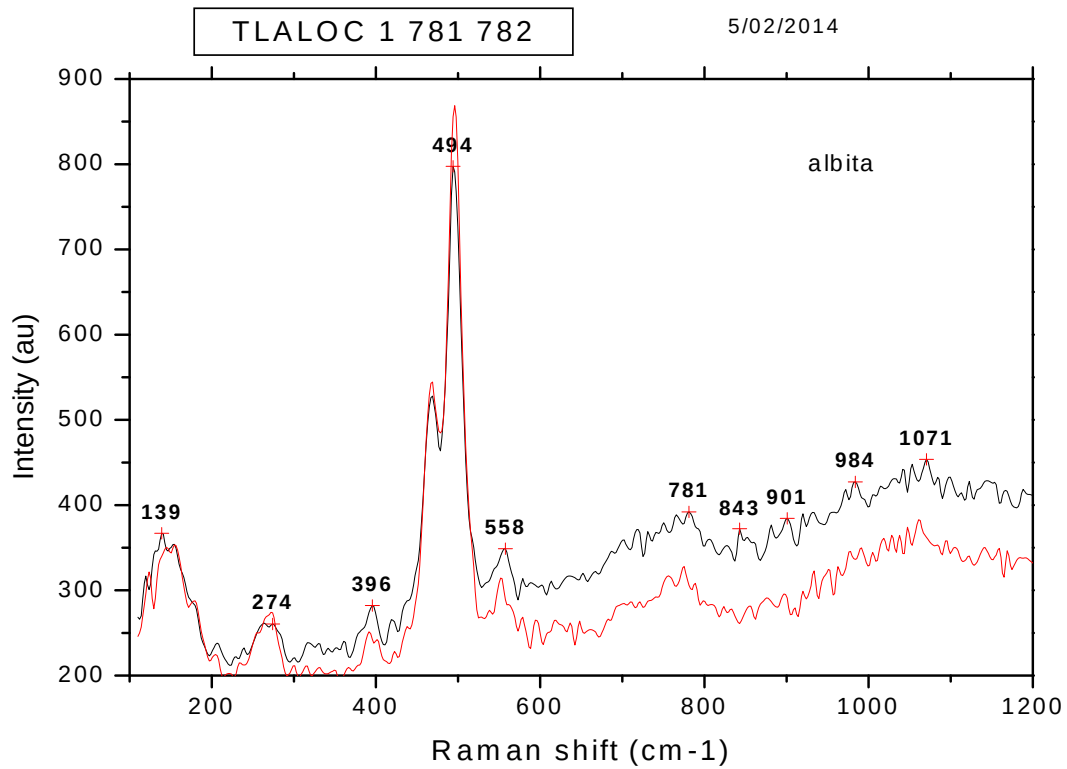


Figura 3.6. Espectros Raman de plagioclasa (albita) en la muestra Tlálóc 1.

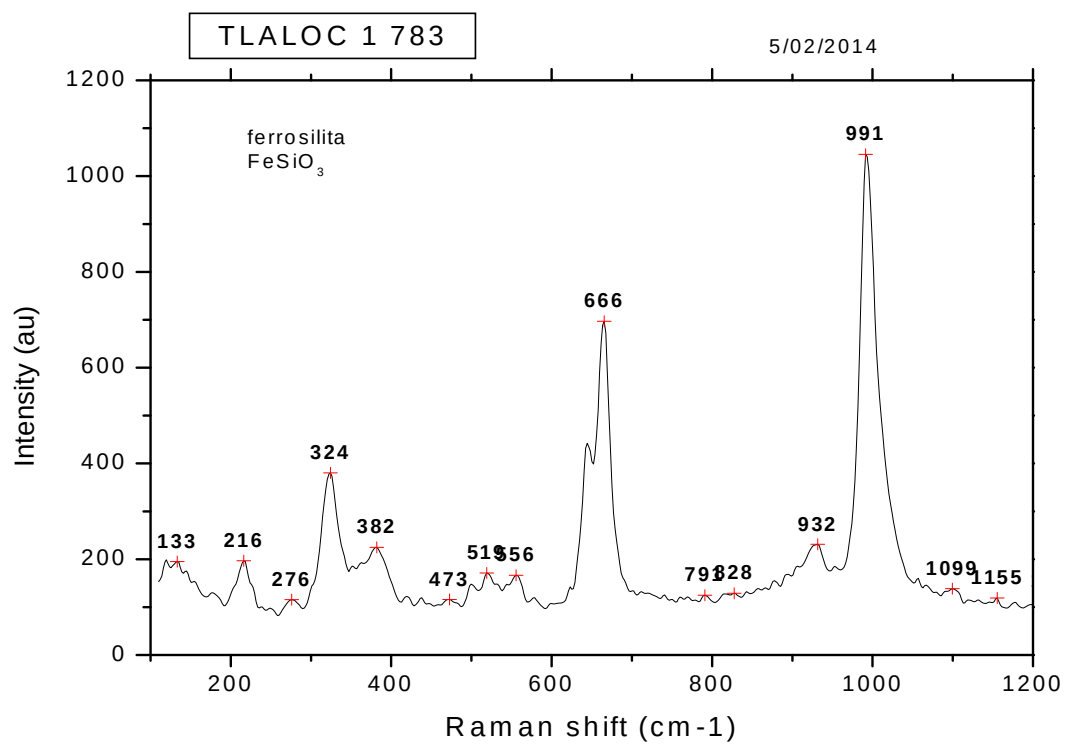


Figura 3.7. Espectro Raman de piroxeno (ferrosilita) en Tlálloc 1.

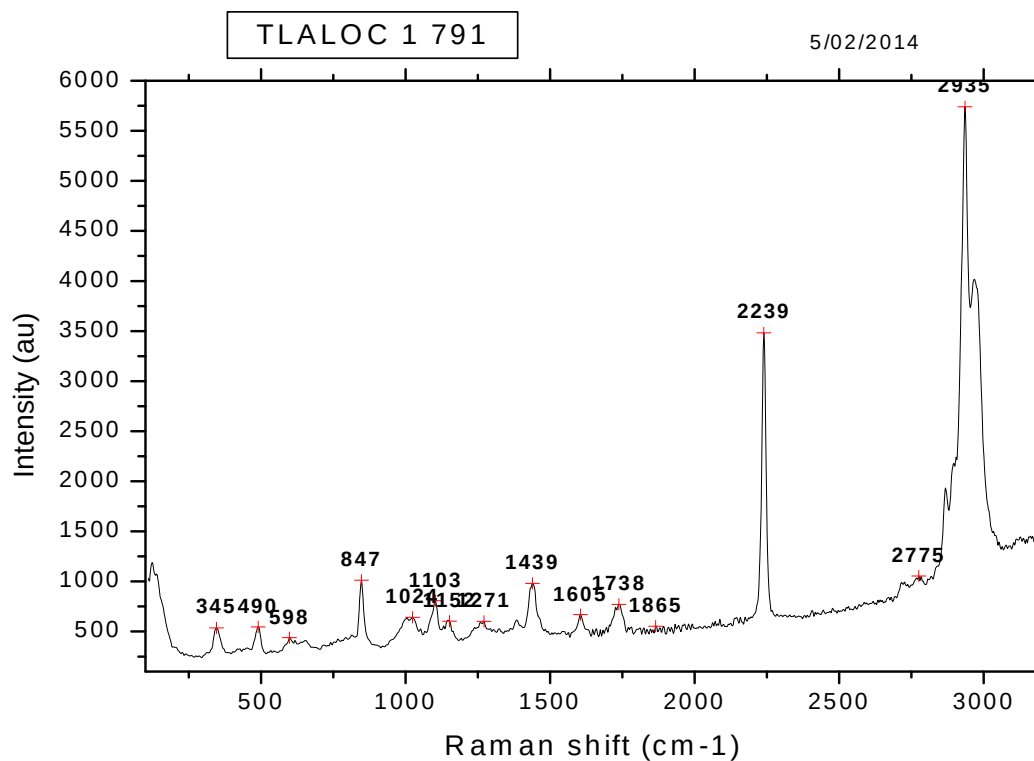


Figura 3.8. Espectro Raman.

En un microscopio electrónico, marca Jeol modelo 6300 del Instituto de Geología, se analizaron por EDS, semi-cuantitativamente, la composición de los minerales pertenecientes a la muestra Tlálloc Museo. Con esta composición se pudieron determinar que la muestra contenía anfíboles (anf), piroxenos (px), plagioclasas (plg), ilmenitas (ilm). Estos análisis se hicieron en colaboración con la Dra. Margarita Reyes y se muestran en la tabla 3.2.

	anf1	anf2	Enst (px)	Espin	Fe Ti	anf3	anf4	ilm1
Na2O	0.11	0.08	3.42	0.03	0.22	0.26	0.06	0.1
Al2O3	6.34	2.49	14.9	5.95	2.45	2.43	1.99	0.24
SiO2	17.34	43.61	70.12	0.37	1.6	39.75	42	0.73
K2O	0.08	0.13	3.98	0.07	0.14	0	0.19	0.04
CaO	3.9	2.12	3.14	0.18	0.12	0.69	0.94	0
Fe2O3	63.26	32.49	2.96	53.34	87.15	43.27	41.59	57.53
TiO2	5.84	0.29	0.82	39.29	8.04	0	0.33	40.48
P2O6	0.1	0.22	0.41	0	0	0.06	0.21	0
MgO	3.04	18.57	0.26	0.76	0.29	13.55	12.69	0.89

	plg1	plg2	anf5	px2	roca total	ilm2	vidrio	feldes- pato
Na2O	4.75	5.76	1.86	0.16	2.65	0.06	3.42	1.86
Al2O3	25.03	23.61	10.25	1.59	17.03	0.2	14.9	10.25
SiO2	57.81	59.79	46	39.4	62.11	0.29	70.12	46
K2O	0.76	0.56	6.94	0.03	2.1	0.01	3.98	6.94
CaO	10.65	8.97	0.67	0.7	6.29	0.13	3.14	0.67
Fe2O3	0.73	0.53	11.64	43.72	7.44	52.27	2.96	11.64
TiO2	0	0.38	0.47	0.24	1.26	45.96	0.82	0.47
P2O6	0.12	0.33	0.22	0.05	0.26	0	0.41	0.22
MgO	0.14	0.08	21.95	14.1	0.85	1.08	0.26	21.95

Tabla 3.2. Composición química por EDS de los minerales observados en la muestra Tlálloc Museo.

Posteriormente me entregaron 4 muestras provenientes del monolito de Tlálloc a las que nombraron Tlálloc Mu1 (parte inferior trasera), Tlálloc Mu2 (tina en la parte superior), Tlálloc Mu3 (parte posterior) y Mu 8 (parte superior posterior).

Se analizaron por EDS, semi-cuantitativamente, la composición de los minerales pertenecientes a la muestra Tlálloc Museo. Con esta composición se pudieron determinar que la muestra contenía anfíboles (anf), piroxenos (px), plagioclasas (plg), ilmenitas (ilm) como se muestra en las tablas 3.3 a 3.5.

TLALOC	Mu1								
	análisis general	plg1	matriz	anf1	px	plg2	plg3	ma- triz 2	anf2
Na2O	3.89	6.3	3.49	2.59	0.34	6.15	5.09	3.1	2.48
Al2O3	23.45	29.65	23	18.76	6.65	29.02	30.06	19.89	17.72
SiO2	59.69	55.23	57.53	47.41	48.05	55.39	54.61	63.05	53.84
K2O	2.11	0.58	2.18	1.3	0	0.29	0.87	1.71	1.16
CaO	4.6	5.93	7.16	7.21	1.36	6.91	6.48	3.23	5.64
Fe2O3	2.56	0.58	1.61	8.95	24.8	0.05	0.38	4.11	9.84
TiO2	0.48	0.07	0.34	1.47	0.24	0.25	0	1.71	1.16
P2O6	2.09	1.31	4.28	4.31	0.84	1.13	1.74	1.97	1.79
MgO	1.12	0.34	0.32	7.54	17.28	0	0.4	2.03	6.17
MnO	0	0	0	0.47	0.44	0	0.37	0.67	0.19

Tabla 3.3. Composición química por EDS de los minerales observados en la muestra Tlálloc Mu1.

TLALOC	Mu2												
	análisis general	cpx 1	vidrio	cpx 2	Zr	cpx3	plg1	plg2	plg3	plg4	plg5	matriz	opx
Na2O	3.96	0.24	3.05	0.53	0.37	0.59	5.2	4.7	4.14	5.74	5.16	2.71	0.44
Al2O3	22.74	4.74	21.93	8.22	2.94	7.96	32.88	19.56	21.96	27.87	29.06	19.11	3.24
SiO2	60.51	50.56	61.29	51.46	29.31	48.51	51.5	67.98	64.64	56.53	54.39	65.59	49.92
K2O	2.44	0	2.62	0.3	0	0.02	0.53	2.15	1.85	0.85	0.54	2.23	0
CaO	4.91	21	3.83	5.04	0.76	16.94	6.12	2.26	3.3	6.14	7.19	2.69	1.1
Fe2O3	3.35	8.45	2.74	18.43	0.68	11.01	0.98	0.79	1.12	0	0.72	3.7	24.43
TiO2	0.16	0.78	0.15	0.51	0.13	0.32	0.75	0	0.44	0.49	0.41	0.44	0.25
MgO	1.56	13.92	1.74	14.49	0	13.37	0	0	0.06	0.1	0.33	1.55	19.24
SO3	0.38	0.3	1.63	0.91	0.74	0.11	0.47	0	0.4	0.77	0.47	0	0.08
MnO	0	0	1.01	0.1	0.37	0	0.15	0.75	0	0.05	0.07	0.32	0.48
ZrO2					64.09								

Tabla 3.4. Composición química por EDS de los minerales observados en la muestra Tlálóc Mu2.

TLALOC	Mu3								
	análisis general	plg1	plg2	plg3	plg4	plg5	plg6	plg7	matriz
Na2O	3.63	5.85	5.05	5.57	5.74	3.87	3.25	4.59	5.03
Al2O3	18.8	26.69	24.84	26.59	27.03	21.84	16.17	20.92	34.18
SiO2	62.37	57.45	57.68	57.53	57.34	61.65	70.75	62.71	49.49
K2O	2.33	0.38	0.92	0.85	0.52	1.38	2.21	1.8	1.02
CaO	3.83	6.67	6.92	7.41	6.9	5.79	2.24	5.29	7.46
Fe2O3	2.69	1.28	1.61	0.41	0.3	2.02	1.54	1.86	1.44
TiO2	0.91	0	0.34	0.21	0.36	0.5	1.63	0.39	0.27
P2O6	2.65	1.52	1.95	1	1.21	1.86	1.75	1.9	1.11
MgO	1.9	0.17	0.69	0.29	0.17	1.02	0.26	0.46	0
MnO	0.88	0	0	0.13	0.44	0.07	0	0	0

Tabla 3.5. Composición química por EDS de los minerales observados en la muestra Tlálóc Mu3.

Como se puede observar en las tablas anteriores, en Tlálóc Mu1 se pueden distinguir plagioclasas, piroxenos y anfíboles, en Tlálóc Mu2 se observan piroxenos (orto y clino), plagioclasas, vidrio y zircón, mientras que en Tlálóc Mu3 sólo se observaron plagioclasas. Se presenta la composición de la roca total y de la matriz.

3.3 Análisis por espectroscopía Raman

Cuando se entregaron estas muestras, el Laboratorio Universitario de Caracterización Espectroscópica del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la UNAM (LUCE-CCADET) ya contaba con un nuevo equipo Raman, por lo que los análisis se llevaron a cabo en un Espectroscopio confocal micro-Raman WiTec AlphaSNOM. Este equipo cuenta con un microscopio CRM200 con una trayectoria del haz Köhler para la iluminación con luz blanca, una mesa de escaneo piezoeléctrica y un revolver con 4 objetivos (10x, 20x, 50x y 100x). Tiene 2 fuentes de la ser, uno de color verde de 532 nm de longitud de onda y otra de laser infrarrojo de 780 nm. Las muestras se analizaron usando el objetivo de 10x y se usó el láser de color verde de 532 nm de longitud de onda que viaja en fibra óptica de la fuente al microscopio. Se usó una rejilla de difracción de 600 g/mm que permite analizar las muestras en el rango de 0 a 4000 cm⁻¹.

Los Espectros Raman se muestran en las figuras 3.9 a 3.13.

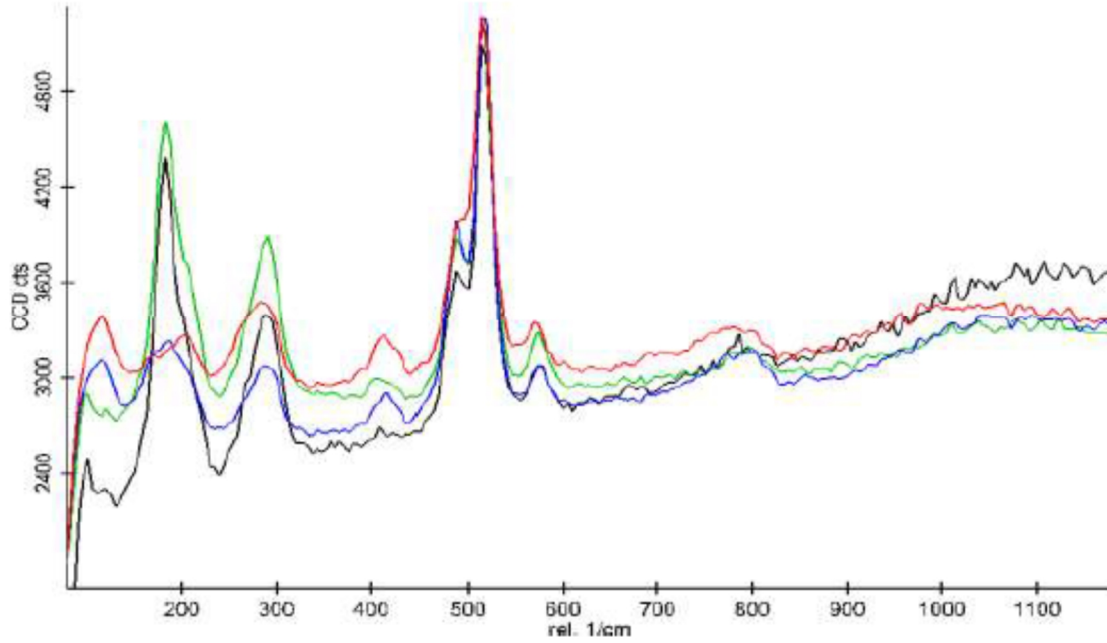


Figura 3.9. Espectros Raman de plagioclase (labradorita) en muestra Tlaloc Mu1.

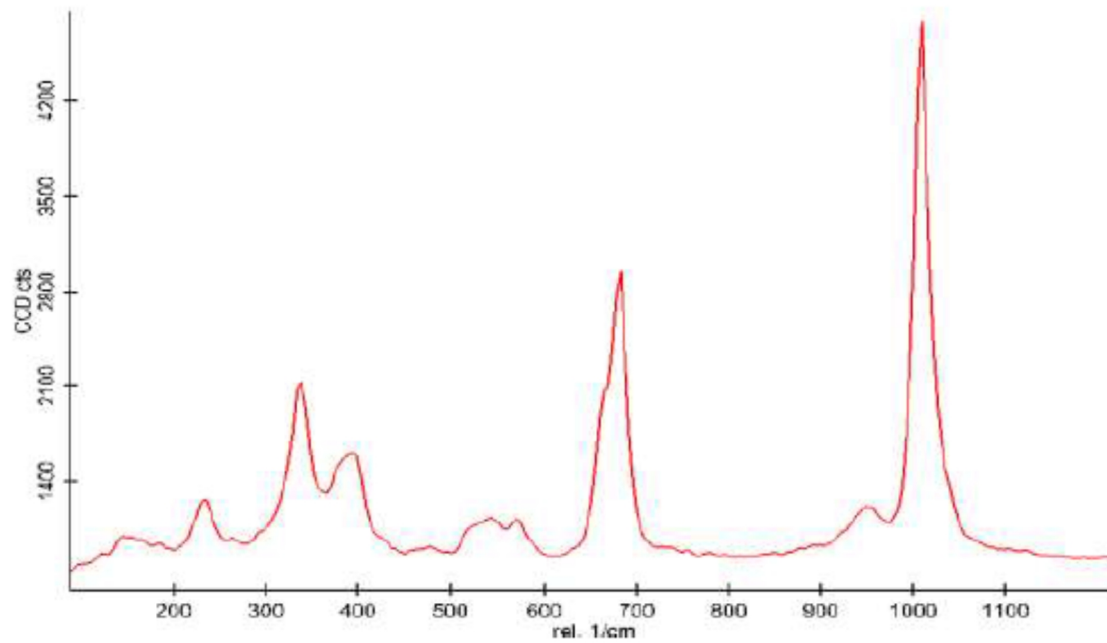


Figura 3.10. Espectro Raman de piroxeno (augita) en la muestra Tlaloc Mu1.

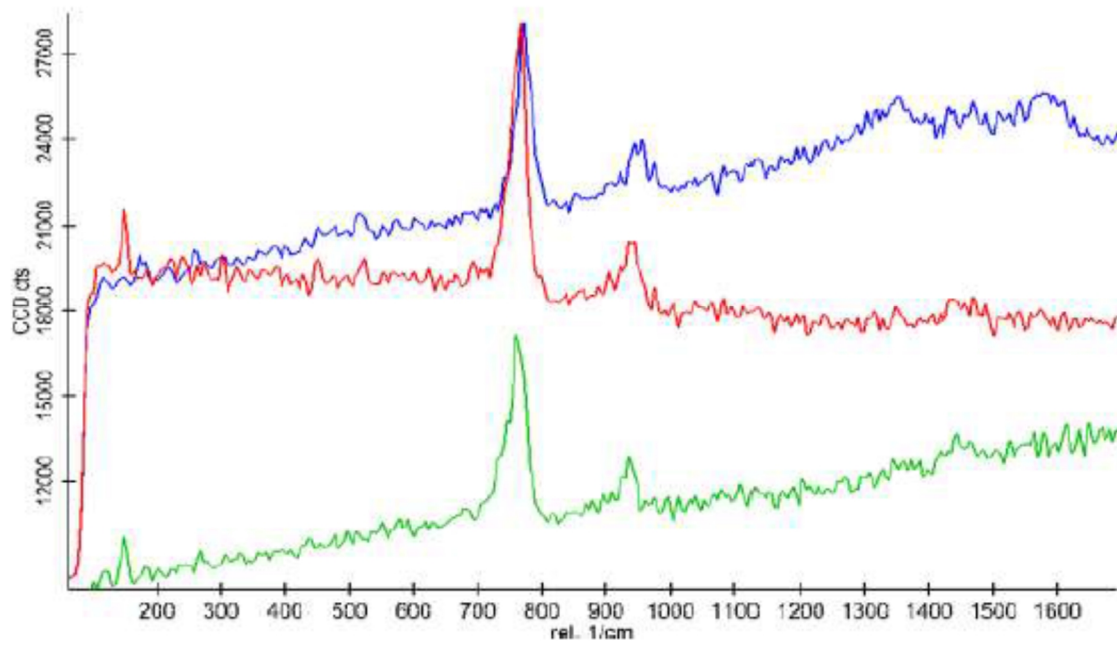


Figura 3.11. Espectros Raman de piroxeno en muestra Tlaloc Mu1.

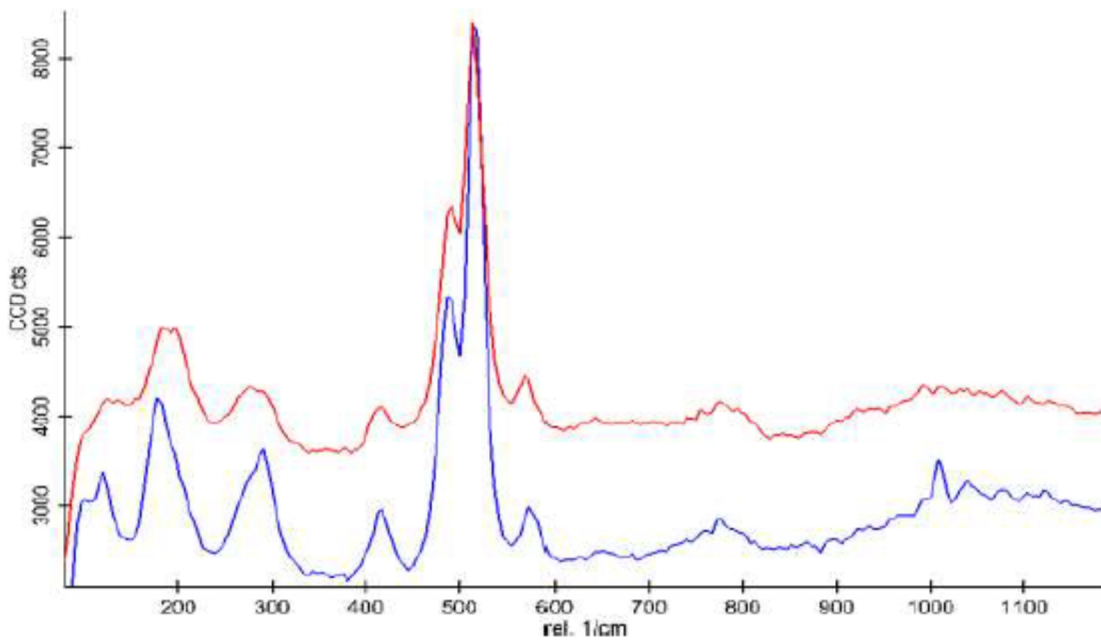


Figura 3.12. Espectros Raman de plagioclase (labradorita) en la muestra Tlaloc Mu2.

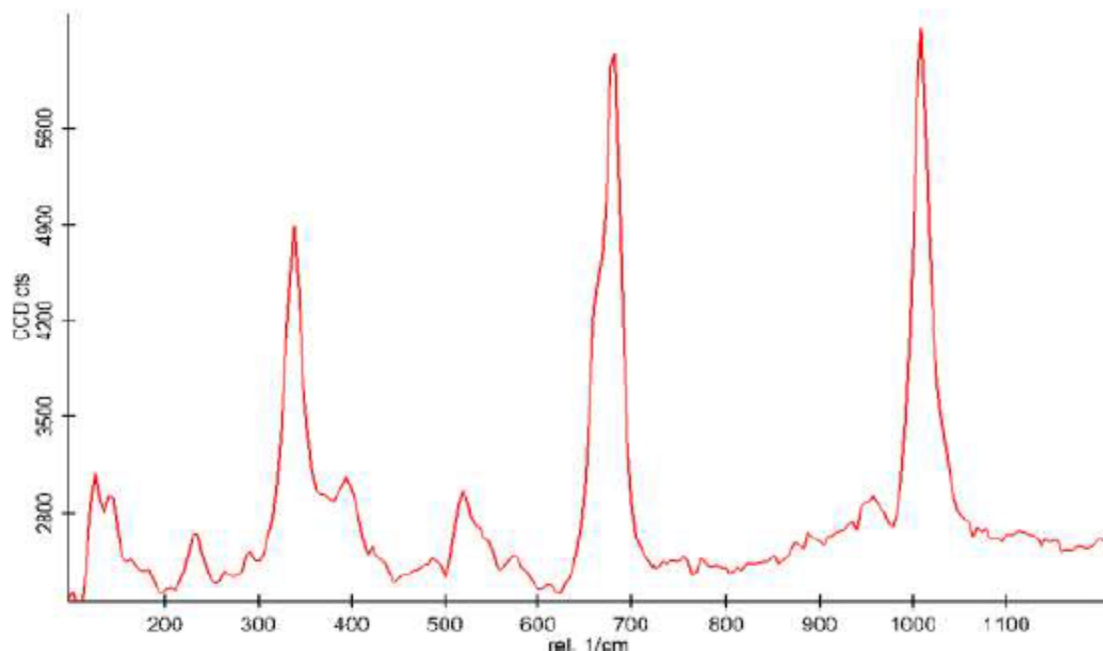


Figura 3.13. Espectros Raman de plagioclase (labradorite) en la muestra Tlaloc Mu3.

3.4 Observaciones

Las gráficas presentadas en esta sección muestran los resultados del análisis de materiales para los tres tipos de muestra a saber: andesita rojiza perteneciente un yacimiento de cercano al pueblo de Coatlinchán, andesita del mismo sitio pero más alterada y andesita proveniente de la parte posterior del monolito de Tlálloc. Los resultados comparativos proporcionan elementos para poder trabajar en futuros estudios con materiales de prueba, que no sean propios del Tlálloc, y determinar la validez de los estudios así como su efectividad en el momento de aplicarlos al Monolito.

4 Fabricación de pasta para restauración

José Ocotlán Flores Flores, María Esther Mata Zamora, José Manuel Saniger Blesa

La escultura de Tláloc de Coatlinchán, quinto monolito más grande del mundo, construido de roca andesita, cumplió 50 años de estar ubicado sobre la Avenida Reforma 2014. Por este motivo, se está desarrollando un proyecto de restauración en conjunto con el Laboratorio de Conservación del Museo Nacional de Antropología (MNA) con el objetivo, de impactar y reducir el efecto de los diferentes factores que son causa del deterioro de la escultura. En esta sección, se presenta la metodología de fabricación de una pasta formada por mineral andesita consolidada con tetraetoxisilano (TEOS) hidrolizado en medio ácido, la cual, sirve para consolidar materiales pétreos con posibilidades de utilizarse en la restauración de Tláloc u otros(as) esculturas o estructuras pétreas. Los resultados, muestran que una combinación de andesita molida tamizada con diferentes tamaños de partícula, la cantidad de TEOS hidrolizado con variaciones molares controladas y su grado de condensación, afectan el aspecto físico de la consolidación. Para la presente sección se utilizará la nomenclatura indicada en la tabla 4.1.

TEOS	Tetraetóxido de silicio
MNA	Museo Nacional de Antropología
Andesita	Roca ígnea volcánica
R⁺	Grupo etilo
H⁺	protón
SiO₂	Óxido de silicio
TEOS-72 horas	TEOS hidrolizado y pre-polimerizado 72 horas
TEOS-48 horas	TEOS hidrolizado y pre-polimerizado 48 horas

Tabla 4.1. Nomenclatura.

4.1 Hidrólisis del TEOS

El mecanismo de consolidación del TEOS para formar dióxido de silicio a través de puentes de oxígeno (Brinker et. al., 1990) es esencialmente el mismo que podría ocurrir en la reacción de consolidación entre el TEOS hidrolizado y el mineral andesita. En la figura 4.1, se presenta la fórmula molecular del TEOS desarrollada y condensada, en donde R representa un grupo etilo –CH₂CH₃.

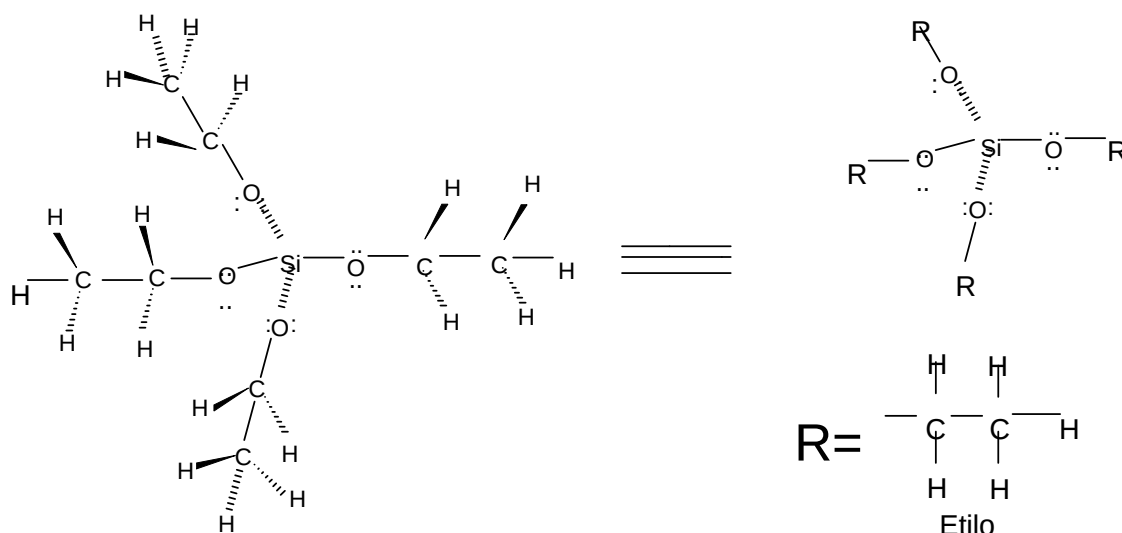


Figura 4.1. Molécula de TEOS, fórmula desarrollada y condensada.

Cuando el TEOS se hace reaccionar con agua en un medio ácido (H⁺), todos los grupos etóxido (-OCH₂CH₃) se sustituyen por un grupo -OH, a esta reacción, se le conoce como hidrólisis del TEOS, con

la consecuente generación de 4 grupos silanoles y 4 moléculas de alcohol en el medio de reacción, figura 4.2.

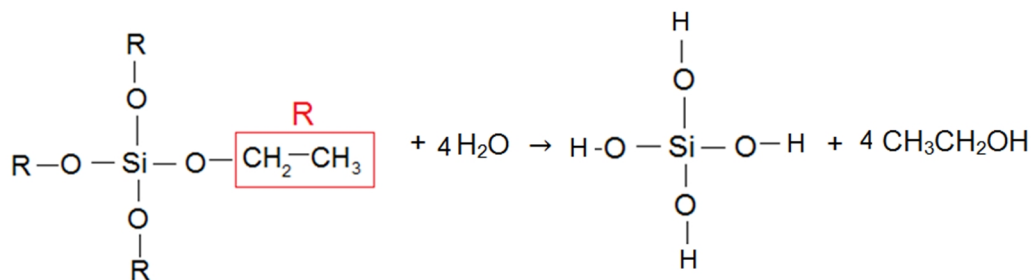


Figura 4.2. Hidrólisis total del TEOS.

A partir de la formación de los grupos silanoles en la molécula del TEOS, se produce a continuación una reacción llamada **condensación**, que tiene lugar cuando, dos grupos silanoles interaccionan entre sí o bien un grupo silanol con un grupo etóxido, para generar un puente de oxígeno entre dos átomos de silicio (**Si**) y una molécula de agua (H_2O) o etanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$).

El resultado de las reacciones anteriores es, en ambos casos, la formación de un puente de oxígeno, sin embargo, el producto secundario puede ser agua o un alcohol, en este caso etanol. Así, la reacción de condensación conduce a la formación de SiO_2 , conocida como proceso sol-gel de formación de SiO_2 a partir de precursores alcóxidos y la reacción global de condensación, luego del balance de la reacción, se puede expresar como:



Las reacciones de consolidación, consisten en la combinación del líquido consolidante a base tetraetóxido de silicio (TEOS) hidrolizado con el mineral andesita, unidos químicamente a través de puentes de oxígeno (Klein, L. C., 1988). La reacción de consolidación entre el mineral andesita y el TEOS hidrolizado, se lleva a cabo de manera similar, al proceso de condensación que anteriormente fue mencionado y que da lugar a la formación de SiO_2 , pero en este caso, el TEOS hidrolizado, consolida al mineral andesita a través de las reacciones químicas de condensación con los grupos silanoles (OH) terminales de los átomos de silicio del mineral y de esta manera, es posible consolidar el mineral andesita con el TEOS hidrolizado.

4.2 Procedimiento experimental

4.2.1 Sustancias y materiales

- * Tetraetóxido de silicio (TEOS) Sigma-Aldrich, 99.0% CAS 78-10-4
- * Agua desionizada.
- * HNO_3 25% Fluka, CAS 7697-37-2
- * Andesita (piezas del mineral de Santa Clara, en la comunidad de Coatlinchán, Estado de México)

4.2.2 Preparación de muestras

Para la preparación de las muestras, primero se molió y se tamizó la andesita con mallas de 0.09, 0.17 y 0.25 mm. Con esto se prepararon por duplicado muestras de 2g donde se mezclaron diferentes tamaños de grano con las proporciones que se muestran en la tabla 4.2.

Mezcla	0.09mm	0.17mm	0.25mm
Mezcla 1	10%	45%	45%
Mezcla 2	20%	40%	40%
Mezcla 3	30%	35%	35%

Tabla 4.2. Composición de las mezclas de polvo de andesita preparadas con las diferentes granulometrías.

Posteriormente, se llevaron a cabo las reacciones de hidrólisis y condensación del TEOS. Para esto, se mezclaron en un frasco de vidrio 10ml de TEOS al 99% y 10 ml de agua desionizada, los cuales conformaron dos fases, por ser inmiscibles entre sí. Posteriormente, se agregó 0.05 ml de HNO_3 al 25% para acelerar la reacción de hidrólisis del TEOS. La mezcla se mantiene con agitación magnética alrededor de 25 min, tiempo durante el cual, se forma una emulsión blanquecina que desaparece posteriormente para formar una disolución transparente y homogénea con un aumento perceptible de su temperatura.

Para la preparación de las pruebas de consolidación, las muestras de andesita se colocan sobre moldes de teflón y se agrega el TEOS hidrolizado. Las muestras se dejan secar durante tres días, tiempo durante el cual, se observa un secado homogéneo.

4.3 Resultados y discusión

A continuación, se presentan los resultados experimentales de ensayos realizados.

A las muestras de mezclas de andesita que se presentaron en la tabla 4.2, se les agrega a cada una 2 ml de TEOS hidrolizado. Todas las muestras fueron realizadas por duplicado.

En la figura 4.3, se presenta el montaje de las mezclas de andesita, sobre el molde de teflón antes de la aplicación de TEOS hidrolizado, mientras que, en la figura 4.4, se presenta el arreglo experimental después de agregar 2 ml de TEOS hidrolizado.



Figura 4.3. Ensayo 1 antes de la aplicación de TEOS.

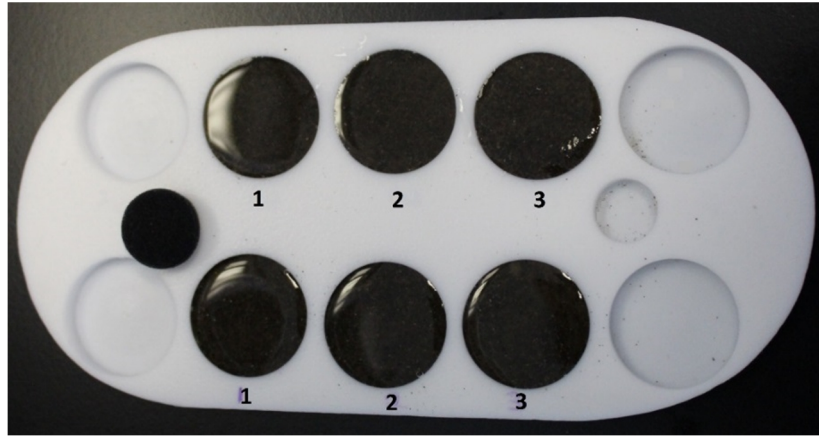


Figura 4.4. Ensayo 1 después de añadir 2 ml de TEOS.

Al concluir el proceso de secado por 72 horas, las muestras presentaron el aspecto de las imágenes de la figura 4.5.



Figura 5. Andesita consolidada con 2 ml TEOS.

Finalmente, se realizaron varios ensayos para probar la consolidación de la andesita, retirando las muestras del molde de teflón y volteándolas.

En la imagen de la figura 4.6, se presenta el aspecto de éstas muestras, todas ellas presentan un muy buen estado de consolidación, después del proceso de secado de 72 horas, las vistas frontal y posterior.

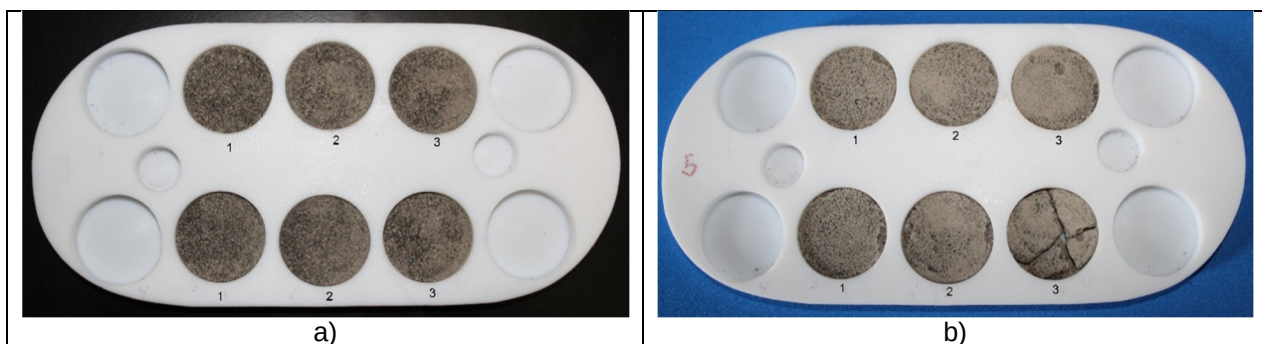


Figura 4.6. Imágenes de las muestras secas después de la aplicación de TEOS vistas a) frontal y b) posterior.

Como puede observarse en la figura 4.6.a, las muestras ya no presentan una fase vítrea de SiO_2 ni cuarteaduras, como en los ensayos previos. Sin embargo, al voltearse, las muestras a las que no se les aplicó 1 ml extra de TEOS hidrolizado, sufrieron desgranamiento y se fracturaron, figura 4.6.b.

4.4 Cumplimientos

Se determinó experimentalmente que la proporción óptima de TEOS hidrolizado durante 72 horas, por cada 2g de muestra es de 1.5 ml.

Adicionalmente, no se observa la formación de ninguna fase vítrea de SiO_2 en la superficie, y al condensarse no genera tensiones en ninguna sección, por lo que no provoca cuarteaduras en las muestras, siendo estas las mejores condiciones de consolidación.

5 Estudios de volumen

Alfonso Gastélum Strozzi

El estudio del volumen adquirido requiere de un grupo de herramientas capaces de analizar las relaciones entre los puntos de la nube y la creación de mallados que permitan el estudio estructural del volumen.

Presentamos los pasos iniciales en el evaluó de la nube de puntos del Tláloc y la construcción de la malla tridimensional.

La malla se utiliza como base de la construcción del sistema de tetraedros necesarios para el análisis de fuerzas en elemento finito.

En esta sección se presenta un resumen de los puntos desarrollados para el estudio de la nube de puntos del monolito.

- Propiedades de la nube de puntos
- Métodos de medición y análisis de la nube de puntos
- Construcción del mallado
- Métodos de medición y análisis de la malla generada
- Estudio de tetraedros preliminar

5.1 Nube de puntos

La nube de puntos inicial está dada en formato pts, formato ASCII con una estructura por punto definida por:

- Tripleta de coordenadas (x, y, z) Float o Double
- Intensidad (I) , $I \in \{-2047, \dots, 2048\}$ Float o Double
- Tripleta de color (r, g, b) 8-bit

La caja englobante alineada a los ejes tiene un tamaño dado por:

- Dimensión de la caja en X: 15.4078
- Dimensión de la caja en Y: 14.8508
- Dimensión de la caja en Z: 8.26565

Esta caja contiene al monolito y a la fuente. El escaneo original contiene 383,645,774 puntos los cuales serán procesados para obtener la malla del monolito.

Esto requiere en algoritmos donde se opere sobre la malla de alrededor de 7 – 8 gigas de memoria RAM al cargar la malla, sin tomar en cuenta el costo de las operaciones.

El costo de memoria se debe a que por un lado es necesario cargar la información de la malla dos tripletas más el valor de intensidad y por otro es necesario utilizar métodos para cálculos de vecindades (por ejemplo, el método de Octree).

El monolito separado por si solo tiene una dimensión de caja englobante de:

- Dimensión de la caja en X: 4.54156
- Dimensión de la caja en Y: 4.25324
- Dimensión de la caja en Z: 7.85033

5.2 Método de puntos a malla

En la figura 5.1 se describen esquemáticamente los pasos seguidos para la construcción de la malla triangular, la malla tetraédrica y la representación del monolito por voxeles.

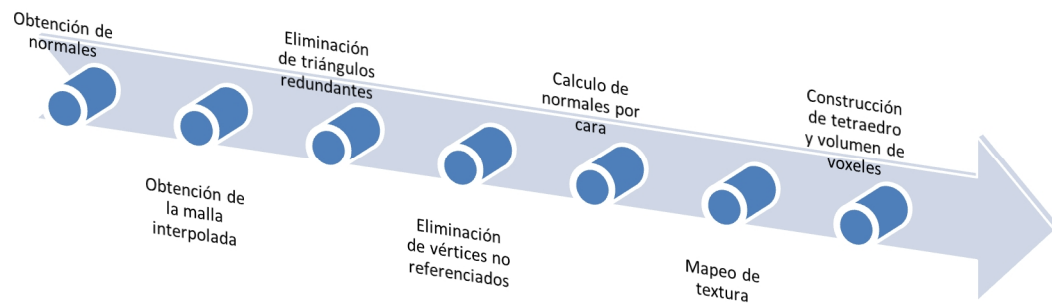


Figura 5.1. Esquema de trabajo para la construcción de las representaciones tridimensionales del monolito.

5.3 Normales de la nube de puntos

La nube de puntos no contiene normales por cada elemento, esta propiedad es necesaria para poder calcular la malla triangular a partir de una nube de puntos.

El cálculo de las normales en nube de puntos se realiza por vecindades de la figura 5.2 utilizando el método provisto por el programa MeshLab. Este método utiliza la distribución de vértices dentro de la vecindad para calcular la normal del elemento de interés.

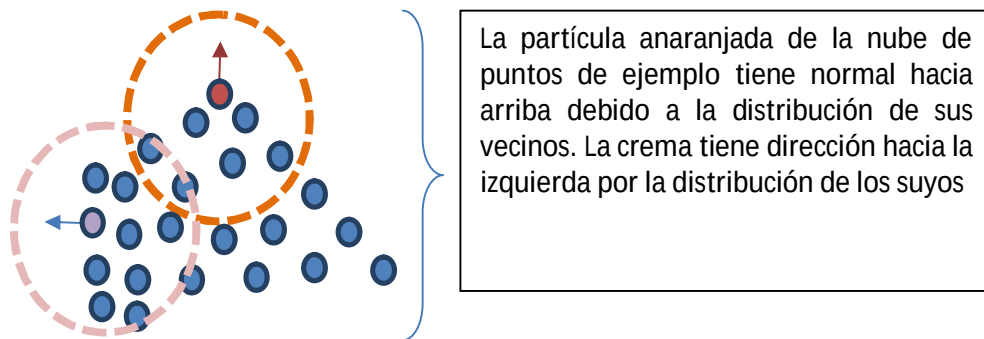


Figura 5.2. Cálculo de normales por el método de vecindades. Con este método se estiman las normales de las nubes de puntos que fueron adquiridas sin ellas.

El resultado de aplicar el método sobre la malla se muestra en la figura 5.3.

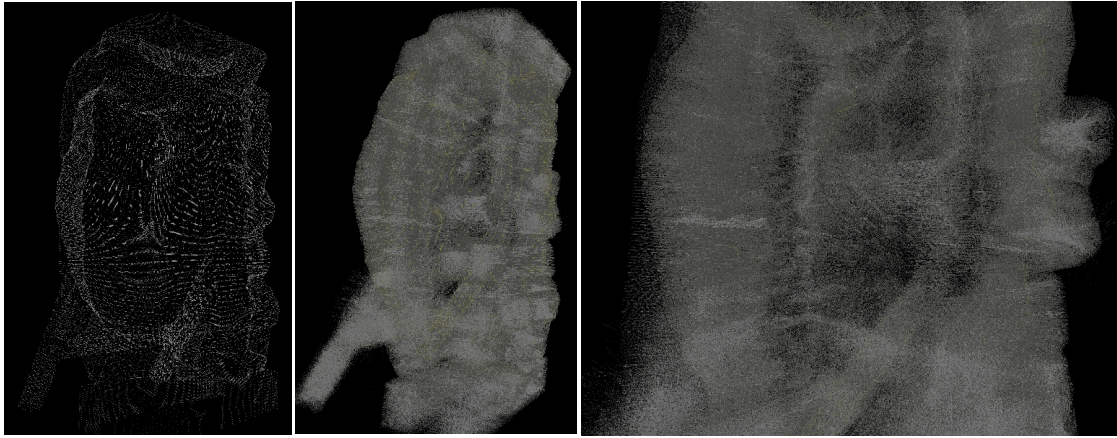


Figura 5.3. Izquierda) Nube de puntos del monolito. Centro) Nube de puntos con normales. Derecha) Acercamiento a una zona del monolito.

5.4 Reducción de la densidad de la nube

Debido a las limitaciones en capacidad de cómputo y memoria RAM con la que se cuenta actualmente se redujo la resolución. Las dimensiones del monolito se mantienen, pero la resolución en los detalles es reducida para hacer posible trabajar con la nube de puntos, como se muestra en la tabla 5.1. La reducción se hace con respecto a la resolución por vecindad dando esperada por zona. Los resultados se muestran en la figura 5.4.

Dato	Original	MD = 0.005	MD = 0.01
Número de puntos	383,645,774	15,908,819	3, 526, 403

Tabla 5.1. Reducción de la resolución.

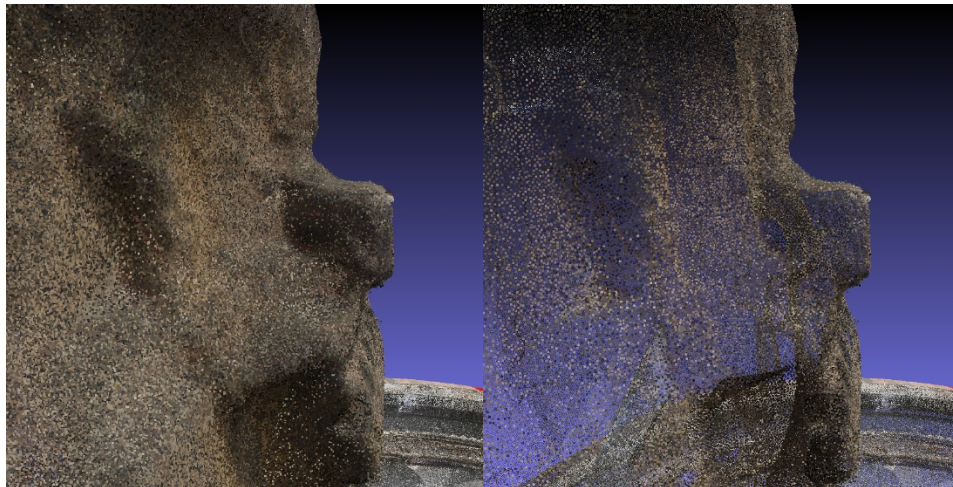


Figura 5.4. Izquierda) Nube de puntos del monolito a una resolución de 0.005. Derecha) Nube de puntos del monolito a una resolución de 0.01.

5.5 Reconstrucción de la malla triangular

La nube de puntos a una resolución de 0.01 se utilizó para reconstruir la malla triangular utilizando el método de reconstrucción de superficies de Poisson. La malla después de ser procesada y eliminado los triángulos redundantes y errores de reconstrucción se muestra en la figura 5.5.

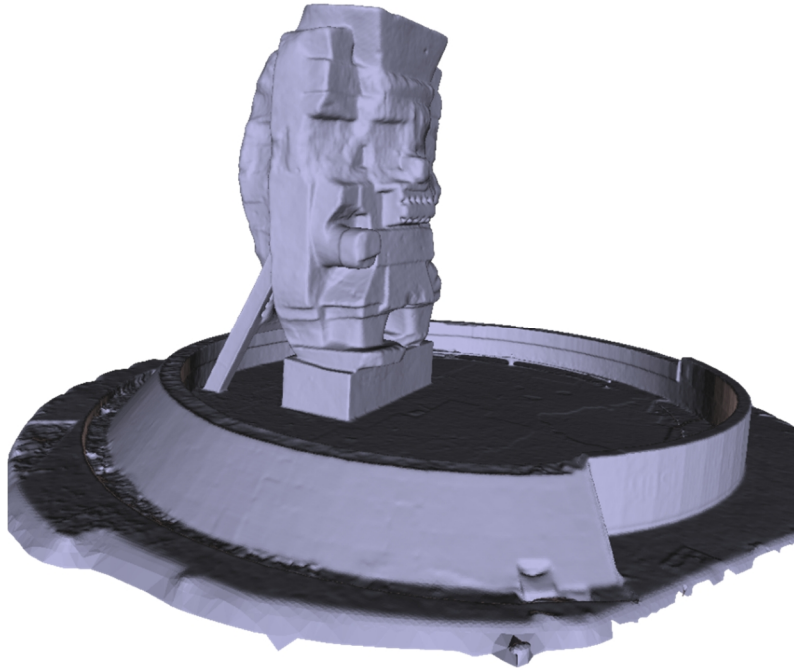


Figura 5.5. Malla del monolito y fuente a una resolución de 0.01. La malla está formada por 1,240,353 vértices y 2,470,836 caras triangulares.

Esta malla se utilizó para segmentar manualmente el monolito y obtener la malla final con la representación del volumen de interés, los soportes se dejaron en el modelo para que puedan ser utilizados en cálculos de esfuerzos. Los resultados se muestran en la figura 5.6.



Figura 5.6. Malla del monolito a una resolución de 0.01. La malla está formada por 468,939 vértices y 937,891 caras triangulares.

5.6 Reconstrucción de volumen representación por voxeles

EL volumen interno del monolito se reconstruyo aproximando una malla tetraédrica construida a partir de la malla triangular descrita en la sección anterior. Para construir la malla tetraédrica se utilizó el programa Tetgen. La malla tetraédrica provee un objeto tridimensional con volumen lleno (a partir de la malla triangular que es una superficie) esta se puede utilizar posteriormente para hacer cálculos de elemento finito sobre el monolito.

La representación por voxeles se obtiene encontrando la intersección de cada elemento de la malla tetraédrica con una matriz en $\mathbb{R}^3$ a una resolución dada, en este caso la resolución por voxel se deja de 0.01 para coincidir con la resolución de la malla de entrada.

El volumen obtenido forma una matriz con dimensiones [701 701 1001], la caja englobante alineada a los ejes que contiene a la representación por voxeles del monolito.

El número de voxeles con información del monolito es igual a 74765560 a una resolución de 0.01 nos daría que el volumen de cada elemento es de $0.01*0.01*0.01 = 0.000001$, así a esta resolución el volumen total de los voxeles sería de 74.76556 en centímetros cúbicos sería de 74765560 considerando una densidad de 2.3 gr/cm³ tendríamos una masa de 171960788 gr.

6 Estudio de las texturas en superficies del monolito de Tlálóc: pruebas y observaciones

Jorge Alberto Márquez Flores

Describimos los métodos que estamos utilizando para recuperar y estudiar la información de textura táctil de las superficies del Monolito de Tlálóc de Coatlinchán, a partir de la nube de puntos coordinados que no poseen ninguna estructura y que fueron digitalizados por la Unidad de Apoyo Tecnológico para Monumentos Históricos de la Coordinación Nacional de Monumentos Históricos del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH-Conaculta). Aunque se han construido mallados triangulares que ajustan a los datos, juzgamos conveniente estudiar la textura superficial directamente de las nubes de puntos muestra, y aplicar el *Enfoque Estadístico* en análisis textural, para poder ignorar los huecos debidos al muestreo irregular debido al relieve y los ángulos de adquisición. Esto evita además analizar la textura artificial introducida por el propio mallado (aristas y vértices de triángulos), excluyendo además los hoyos (donde no hay información) debidos a oclusión y submuestreo, o zonas enteras que no interesan. En un reporte técnico aparte detallamos métodos para estimar una superficie geodésica de referencia respecto a la cuál es posible, localmente, construir imágenes de textura táctil. En este trabajo resumimos las pruebas realizadas hasta ahora; presentamos cómo se visualizan descriptores texturales locales, mediante imágenes paramétricas, su posible interpretación y la construcción de mapas paramétricos sobre el monolito que permitan evaluar, por ejemplo, efectos de erosión, y con el tiempo, lograr un seguimiento de su degradación así como la efectividad a mediano y largo plazo de las técnicas de conservación que otros grupos académicos del CCADET aplicarán. Se proporcionan observaciones sobre los datos actuales, las técnicas propuestas y la participación que deseáramos establecer por parte de los interesados, en la interpretación y mejor definición del estudio que proponemos realizar, cuando se aplique a los datos de máxima resolución y en zonas escogidas que sean de particular interés.

6.1 Nomenclatura

Símbolo , acrónimo o tecnicismo	Significado
1D, 2D, 3D	En una, dos o tres dimensiones; uni-, bi- o tri-dimensional.
$\text{card } W$	Cardinalidad (número de elementos) del conjunto W
CNMH	Coordinación Nacional de Monumentos Históricos
EDT	Euclidean Distance Transform (Transformada de Distancia Euclidiana), mapa o campo de distancia euclidiana.
Euclidiano(a)	Siguiendo superficies planas, al contrario del modo <i>geodésico</i> , siguiendo trayectorias estrictamente rectas; la distancia más corta entre dos puntos en 3D se define como $\ \mathbf{p} - \mathbf{q}\ = \sqrt{(p_x - q_x)^2 + (p_y - q_y)^2 + (p_z - q_z)^2}$.
∂V	Frontera o contorno de un objeto V binario, o de un conjunto de puntos
Geodésico(a)	Siguiendo la curvatura de una superficie frontera ∂V de un objeto binario tridimensional V , en vez de alturas se utilizan distancias.
GLCM	Gray-Level Co-occurrence Matrix (ces), matriz(ces) de co-ocurrencia (CM) de niveles de gris; para cualquier atributo, las CM son histogramas 2D que aproximan una distribución probabilística conjunta (Marquez, 2017).
INAH	Instituto Nacional de Antropología e Historia
$\text{Level}_{\mathbf{p}(u)}(I(x, y, z))$	Operador de isonivel o umbralaje, con $\mathbf{P}(u)$ un predicado sobre el atributo u , y la imagen 3D $u = I(x, y, z)$; por ejemplo, $\mathbf{P}(u) := (50 < u \leq 100)$
MNA	Museo Nacional de Antropología
RMS	Root Mean Square (raíz (cuadrada) de la media cuadrática)
ROI	Region of Interest (región de interés)

6.2 Introducción y antecedentes

En una colaboración con el Museo Nacional de Antropología (MNA) y el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH-Conaculta), académicos del CCADET-UNAM y del Instituto de Geología participan en un proyecto de restauración y estudio del Monolito de Tláloc de Coatlinchán que se encuentra en el MNA (figura 6.1). Para esto se cuenta actualmente con datos de su superficie en la forma de nubes de puntos coordinados, adquiridos con un escáner láser por la Unidad de Apoyo Tecnológico para Monumentos Históricos de la Coordinación Nacional de Monumentos Históricos (CNMH) del INAH.



Figura 6.1. Fotografía del Monolito de Tláloc de Coatlinchán (abril 2008, antes de los trabajos de "restauración"), afuera del Museo Nacional de Antropología, CDMX. Es notable la erosión sufrida en los rasgos principales y la complejidad de la superficie 3D de la pieza. (Fuente: Wikipedia, Francia).

En la sección 5 "*Estudios preliminares del volumen tridimensional de Tláloc*", (Gastelum, 2016) se describen características de los datos digitales (simplificación de las nubes de puntos coordinados de las superficies del monolito, métodos de análisis, la construcción del mallado triangular y su análisis, así como detalles del formato digital y dimensiones precisas (incluyendo la fuente). En el presente trabajo se utiliza exclusivamente una de las nubes de puntos procesada para separar de la fuente el monolito.

En el reporte técnico "*Extracción y Análisis de Texturas Geodésicas en Piezas Arqueológicas*", (Marquez, 2017b) se detallará la teoría, metodología y resultados preliminares para la definición de superficies de referencia y la extracción de información textural de las superficies de piezas arqueológicas en general, así como su estudio en el caso específico del Monolito de Tláloc de Coatlinchán. En el presente informe se resumen algunas de tales técnicas, simplificando o dispensando mucho del detalle técnico, así como definiciones secundarias, las pruebas obtenidas hasta ahora, y hacemos una serie de observaciones sobre los datos con que se cuenta, sus limitaciones y la necesidad de interacción interdisciplinaria para definir mejor el análisis realizar, así como la interpretación de la información que se obtendrá.

Como parte de los trabajos de limpieza y restauración, sabemos que los solicitantes del proyecto están interesados en estudiar el monolito mediante técnicas cuantitativas para:

- (1) Comprender el proceso de su deterioro y poder tomar decisiones para su conservación, tener elementos cuantitativos para observar y evaluar la evolución del deterioro y validar con el paso del tiempo las técnicas empleadas para proteger al monolito.
- (2) Ayudar a caracterizar la obra desde los puntos de vista arqueológico, artístico, antropológico e histórico.
- (3) Desarrollar criterios de evaluación en los aspectos mencionados y para comparación con otras obras, períodos, técnicas de trabajo y lograr obtener evidencias científicas que permitan intercambiar experiencias con expertos de diversas áreas y de grupos, inclusive internacionales.

Para lo anterior el CCADET, el Instituto de Geología de la UNAM y otros grupos han discutido diferentes técnicas de análisis, desde las características geofísicas de la piedra, su composición y origen, el musgo, elementos bioquímicos, etc. La forma general (geometría) será abordada por otros colegas y en el presente trabajo nos concentramos en resumir una propuesta de **análisis de las texturas** presentes en la superficies del monolito, para poderlas aplicar en las nubes de puntos de mayor resolución. Tales texturas se relacionan con los procesos de erosión, la rugosidad natural de la piedra, cualquier trabajo de bajorrelieve, grafiti, desprendimientos, etc.

Hasta donde hemos investigado en la literatura, no existen estudios de la *textura táctil* o *superficial* (adelante, en Morfología y Textura se definirá) en relieves de piezas arqueológicas; esto es probablemente por lo reciente de las técnicas de adquisición 3D en Arqueología, de las cuáles sí abundan trabajos. Un problema durante búsquedas bibliográficas es que el término *textura* se refiere a nociones diferentes, inclusive en una misma disciplina, y en particular es posible hallar trabajos que utilizan ciertos mapas gráficos donde la textura se refiere a diferencias locales de color (textura de imagen, no de relieve) para asistir el uso de escáneres 3D; por ejemplo (Earl *et al*, 2010) describe una técnica para la adquisición y procesamiento de imágenes y en todo caso se refiere a la captura y representación de detalles superficiales en sitios arqueológicos, pero no se analiza la textura que nos interesa. Hay estudios sobre clasificación de materiales metálicos y cerámicos en piezas arqueológicas, clasificando su origen o analizando su elaboración, por ejemplo (Artioli, 2007) reporta un estudio de textura cristalográfica en metales arqueológicos, mediante microscopía óptica y técnicas de difracción con rayos X; pero este tipo de estudio está muy lejos de ser aplicable a piezas mayores que un jarrón. Por otro lado, los libros y *handbooks* sobre textura *per se*, como (Petrou y García, 2006), suelen limitarse a técnicas y métodos clásicos, sin aplicaciones; otros tratan aplicaciones del análisis textural en percepción remota como (De Jong and van Der Meer, 2004), o en cristalografía (Engler y Randle, 2009), ciencia de materiales (Bunge, 2013), rugosidad y perfilometría en la industria (Leach, 2016), o bien son selecciones de artículos sobre descriptores texturales, como (Mirmehdi y Xie, 2008).

En cambio, abunda la bibliografía sobre el estudio de la textura visual en rocas; por ejemplo los trabajos de (Lepistö *et al.*, 2003), (Gonçalves y Leta, 2010), (Heilbronner y Barrett, 2014), (Yardley *et al.*, 1996), (Lepistö *et al.*, 2003b), (Lepistö, 2003), presentan técnicas de clasificación textural (visual) en rocas, algunas monolíticas, y cierta caracterización textural y cromática, siempre a partir de fotografías. A pesar de tratar sobre textura visual estas y otras referencias, justifican nuestra propuesta para el estudio de texturas de superficie en el monolito de Tláloc, limitando las técnicas de análisis a aquellas que en particular han tenido mayor éxito: los descriptores estadísticos extraídos de matrices de co-ocurrencia de

variaciones en atributos (altura, distancia, niveles de gris, etc., en inglés GLCM, *Gray-Level Co-occurrence Matrix*), introducidos en su versión más simple por (Haralick, 1979).

Otros trabajos se refieren a variaciones macroscópicas (edificios, sitios industriales, lagos, ríos, relieves montañosos, bosques, sembradíos, etc.) que en imágenes satélites y de radar, se analizan mediante descriptores texturales, mezclando la textura de relieve y aquella de color e intensidad luminosa, albedo, y bandas del espectro electromagnético no visible.

En las siguientes secciones presentamos algunas definiciones, resumimos cómo aplicar técnicas de análisis textural en superficies de objetos tridimensionales, cómo construir superficies de referencia, los descriptores texturales propuestos y los problemas de su interpretación, así como estudios preliminares en muestras de la superficie del monolito del Tláloc.

6.3 Morfología y texturas

La Morfología, en Arqueología, ciencias e industria, está definida en los diccionarios simplemente como "estudio de la forma". Con el tiempo esta definición ha resultado vaga, al ser de interés diversos aspectos afines, sobre todo a diferentes escalas y considerando los enfoques y su posible complejidad y atributos.

Otros rasgos de interés, en particular los detalles, tienen relaciones afines con rasgos de forma tradicionales. Las texturas habían sido un tema aparte, en particular por la dificultad de formular definiciones satisfactorias a la fecha, dada su extrema variedad que ha dado lugar a identificar interminables rasgos posibles. El análisis textural, *per se*, lo abordamos en (Marquez, 2017); en (Marquez, 2016b) detallamos la implementación de una familia particular de descriptores, y en el presente trabajo mencionaremos aquello relevante a la aplicación en piezas arqueológicas. La teoría, los detalles técnicos, algoritmos y pruebas más completas serán abordados en (Marquez, 2017b).

Una manera de articular todo lo anterior, es desglosando la morfología en los siguientes aspectos (notar que son disciplinas o subconjuntos de disciplinas matemáticas) que se interrelacionan y son del mayor interés en muchas disciplinas (Marquez, 2016a):

Morfología: "forma en general"; en Arqueología puede además describir estilos, periodos, rituales, culturas, etc. **Morfometría:** medición de rasgos morfológicos mediante descriptores de forma, ya sea *globales, regionales, locales (o vecinales) y puntuales*, o en subconjuntos de interés. La Morfología comprende los siguientes componentes analíticos, que son tópicos o disciplinas *per se*; sólo detallamos aquellas que podría abordar nuestro grupo en particular.

- (1). **Geometría.**
- (2). **Topología.**
- (3). **Estructura, patrones y configuraciones espaciales**
- (4). **Rasgos salientes y puntos o líneas de interés (en inglés: *landmarks*).**
- (5). **Textura táctil (superficial o de superficie) y de relieves 3D.** Correspondiente a la noción perceptual del tacto. No se limita a estudiar una gama suave-rugosa; se puede decir que tiene muchas dimensiones. No depende de las condiciones de iluminación, pero es difícil de registrar, pues debe especificarse como muestras 3D. Cuando se extrae de fotografías, se confunde con la textura visual y entonces sí depende de la iluminación.
- (6). **Textura visual (atributos de intensidad).** Variaciones en atributo de intensidad a menor escala que un patrón simple o una forma. Gran afinidad con inciso anterior (observaciones semejantes). Se combina con la textura táctil (ver figura 6.2) y puede ser difícil o imposible separarlas o identificarlas. Depende de las condiciones de iluminación, sobre todo si se combina con (5) al existir sombras arrojadas y oclusión.

- (7). **Color y textura visual policromática.** Podría estudiarse en canales independientes; aparte del color tradicional, puede comprender atributos como canales espectrales (ultravioleta, infrarrojo, y de otras formas de energía).

Para objetos tridimensionales (3D), las propiedades superficiales pueden ser *euclidianas* (hay un plano de referencia aproximado) o *geodésicas* (la superficie de referencia es curvada), ya sea *locales* (en una vecindad de cada punto), *regionales* (una ROI o región de interés) o *globales* (como si la superficie de referencia fuese ortogonal al vector normal local). Pero en el último caso suele dividirse el objeto en componentes (bloques) virtuales manejables.



Figura 6.2. La fotografía muestra zonas de interés donde hay textura de la piedra, manchas, variaciones de color, erosión, desprendimientos y al mismo tiempo motivos de altorrelieve. Hay dependencia de la iluminación y la fotografía bidimensional sólo muestra proyecciones y sombras de las variaciones tridimensionales, sin información espacial explícita, por lo que no es útil para estudiar a textura de superficie. Al escanear la superficie, hubo zonas "ciegas" o de oclusión, como en la hendidura alrededor de la protuberancia en la extrema izquierda inferior.

6.4 Definición de superficies de referencia

Aunque todas las subdisciplinas o aspectos (1)-(7) que integran la [Morfología](#) son de interés en el estudio y conservación de piezas y monumentos arqueológicos, los datos digitales de la superficie externa, con que actualmente contamos, más pequeñas muestras físicas, son adecuados para los aspectos (1)-(4) dado que los demás componentes analíticos requieren de condiciones de adquisición controladas, tales como la iluminación, eliminación de oclusiones y una mayor resolución (al menos $\times 10$). De hecho la textura táctil parece actualmente muestreada de manera deficiente (baja resolución), pudiendo confundirse con ruido. En la nueva versión de la nube de puntos a mayor resolución es posible incluir el estudio de (5), que es sobre el que trata el presente informe.

El aspecto (5), textura táctil y de relieves puede en ocasiones ser transformada a (6), la textura visual, cuando el atributo de distancia a una superficie de referencia (altura de relieve) se representa como un nivel de intensidad en blanco y negro (eventualmente puede haber mapas de color para mejor apreciación). En tal caso se está realizando una transformación de superficie a imagen y los descriptores usados en texturas visuales son los mismos para aquellas táctiles. La transformación contraria, de imagen a superficie suele también ser útil y rasgos de intensidad son interpretados como relieve. La figuras 6.3 ilustra ambas interpretaciones.



Figura 6.3. Textura en dos zonas de una roca muy semejante a la del Monolito de Tláloc; aunque aparentan ser muy diferentes, se tomaron con distintas ampliaciones en un día con sol y otro nublado (los fotógrafos no anotaron la distancia o el factor de zoom usado, ni la exposición). En ambos casos hay una combinación de textura visual pura (manchas y zonas más o menos claras) y los efectos de sombra arrojada (zonas negras) de la textura táctil (relieve, pero se desconoce la gama de profundidades. Al inspeccionar en persona el monolito de Tláloc, las variaciones se pudieron estimar en aproximadamente 1 cm, en promedio, con hoyos más profundos y salientes de hasta 3 cm, aparte de los rasgos no texturizados). En la izquierda se aprecian brillos parciales de luz solar.

En el caso de crear una superficie a partir de una imagen, la intensidad interpretada como altura forma un relieve conocido como “*imagen de 2.5 dimensiones*” (terminología obsoleta), o como “*mapa de elevación*” o “*superficie de intensidad*” (terminología moderna). La figura 6.4 podría corresponder a un corte transversal, o sea un perfil, distinguiendo la textura del fondo. La equivalencia entre intensidad y relieve puede formularse como:

$$\underbrace{h}_{\text{altura o distancia}} \Leftrightarrow \underbrace{u}_{\text{intensidad}} = \underbrace{f(x, y)}_{\text{imagen 2D o señal 2D}} \quad (1)$$

Donde la distancia puede ser altura o profundidad positiva o negativa, pero la intensidad luminosa en un despliegue visual debe ser siempre positiva. La función, señal o imagen $f(x, y)$ debe ser univaluada, sin embargo los relieves naturales rara vez lo son, existiendo “balcones” (*overhangs*) y cuevas. Sin embargo como estos mismos causan oclusión (ocultamiento), en un sistema de escaneado de una sola pasada (e inclusive en varias), no quedan registrados, apareciendo como discontinuidades abruptas, con hoyos o

"paredes" artificiales que conforman el llamado *artefacto de oclusión*. Por su naturaleza, puede detectarse, indicando información faltante (posibles "balcones", poros abiertos y "cuevas").

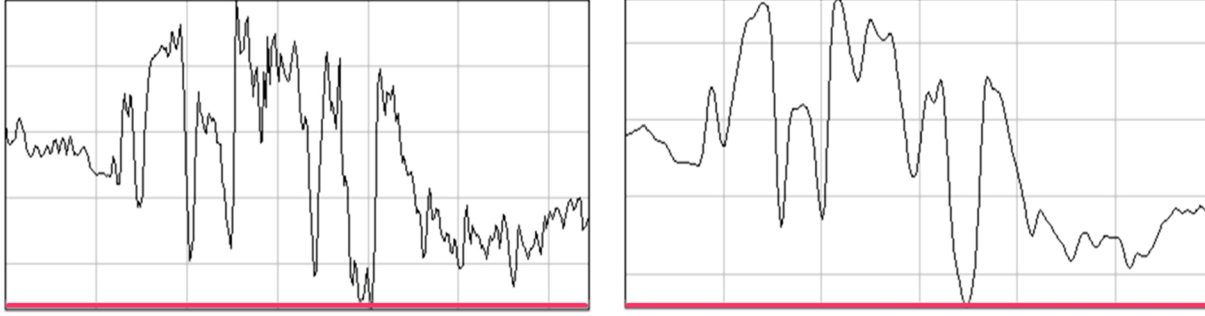


Figura 6.4. Derecha: perfil de una imagen o relieve, por ejemplo $h = f(x)$; los detalles (altas frecuencias, pequeñas variaciones) conforman la textura. Izquierda: el fondo $f_{\text{fondo}}(x)$ (bajas frecuencias, forma general de $f(x)$), que al ser sustraído de $f(x)$ da lugar a la textura. El valor "cero" de referencia para ambas componentes son las líneas horizontales rojas. El fondo se vuelve la nueva referencia o base "cero", respecto a la cual se miden las variaciones.

Aunque en procesamiento y análisis de imágenes se asume que la referencia del atributo u es cero, también ocurre que al considerar variaciones "lentas" (bajas frecuencias espaciales), conviene definir un "fondo", resultado de aplicar un filtro pasa-bajas (o suavizado) a $f(x, y)$, de la forma:

$$f_{\text{referencia}}(x, y) \Leftrightarrow f_{\text{fondo}}(x, y) = f(x, y) * G_{\sigma}(x, y), \quad (2)$$

Donde $G_{\sigma}(x, y)$ es por ejemplo el *núcleo* o *kernel* gaussiano en 2D, con desviación estándar σ :

$$G_{\sigma}(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} \quad (3)$$

Siendo $*$ la operación de convolución en 2D (interpretada como un suavizado en el presente caso) y el parámetro sigma σ es el valor de escala, respecto al cuál se pueden separar detalles o variaciones que constituyen la textura relativa a la forma geométrica, y es posible tomar la separación implicada (ver ecuación (4)) como una **definición operacional de textura**, que depende de la escala. La igualdad numérica entre intensidad y altura (profundidad, o distancia), se da con un cambio entre unidades físicas.

De manera equivalente a la convolución espacial $f * G_{\sigma}$, en dominio de frecuencia espacial (entre otros posibles), se puede establecer una ventana en dominio de frecuencias espaciales, definida por la transformada de Fourier de $G_{\sigma}(x, y)$ que modula a la transformada de Fourier de $f(x, y)$, para definir y separar las frecuencias armónicas del fondo (la forma) de las frecuencias armónicas de la textura, medidas por ejemplo en líneas por cm. En general, podemos considerar que las variaciones de altura h a analizar, deben ser relativas a una superficie de referencia $f_{\text{referencia}}(x, y)$ que no es constante ni cero, lo cual permite incluir objetos con cierta forma (por ejemplo, casquetes esféricos), sobre los cuales se desean estudiar variaciones de altura (o de radio, en tal caso); la ecuación (1) se puede reformular como:

$$\underbrace{h}_{\substack{\text{distancia} \\ \text{relativa}}} \Leftrightarrow \underbrace{u}_{\substack{\text{intensidad} \\ \text{relativa}}} = \underbrace{f(x,y) - f_{\text{referencia}}(x,y) + u_{\text{offset}}}_{\substack{\text{|| detalles ||} < \sigma}} \quad (4)$$

$f_{\text{textura}}(x,y)$

Donde la una constante u_{offset} evita intensidades negativas en un despliegue visual.



Figura 6.5. Cualquier imagen (izquierda) puede interpretarse como textura o más probablemente como un conjunto de regiones con diferentes texturas, como puede apreciarse en el mapa de elevación o superficie de intensidad $h = f(x,y)$ (derecha), donde aún pequeños cambios en nivel de gris pueden notarse como picos y montículos (bumps). Es necesario sin embargo retirar el fondo.

Las Figuras 6.5 y 6.6 ilustran los conceptos y definiciones anteriores, en la imagen estándar “Lena”, usada para pruebas en la comunidad de Procesamiento de Imágenes. Las texturas tanto visual como táctil queda definida por la escala de estudio, definida por el parámetro σ del filtrado en (2); en el Monolito de Tláloc este valor puede establecerse aproximadamente entre 2 y 10 mm y debería ser al menos dos veces inferior al muestreo en la nube de puntos, de acuerdo al *Criterio de Nyquist Shannon* (Marquez, 2016a), sin embargo este resulta ser variable, entre 2 y 15 mm (mas varios huecos de mayor dimensión), limitando el estudio a la rugosidad de mayor grano. En la nube de mayor resolución que recientemente se logró preparar, es casi dos órdenes de magnitud más fina,

Es claro que todo lo anterior sólo es válido localmente y sólo cuando el dominio de f es un plano; para el caso general, *geodésico* (sobre superficies que pueden curvarse), las coordenadas (x,y) deben generalizarse ya sea a coordenadas geodésicas (locales), o simplemente a coordenadas 3D, coincidiendo con la nube de puntos; la “altura” entonces debe generalizarse a una distancia Euclidiana en 3D y el fondo o superficie de referencia (o sea, el dominio) es la forma geométrica, sin detalles, del objeto binario (sólido) tridimensional V , bajo estudio.

Una forma intuitiva de ver lo anterior sería modelando la forma de V , incluyendo detalles, mediante, por ejemplo, armónicos esféricos; a partir de ciertas frecuencias ν , definidas por $\nu \propto 1/\sigma$, el modelo

entonces representará la textura geodésica. La figura 6.6 ejemplifica lo anterior para un corte transversal (o también, para una forma bidimensional). Tras estudiar en la literatura trabajos con estos modelos, se concluyó que no permitían un estudio correcto de la textura textil por la forma prismática del monolito; el problema es el fenómeno de Gibbs para esféricos armónicos (Gelb, 1997). Por ello consideramos constituir la superficie de referencia lo más directamente posible de la nube de puntos, trasladando la definición de la ecuación (2) al caso geodésico.

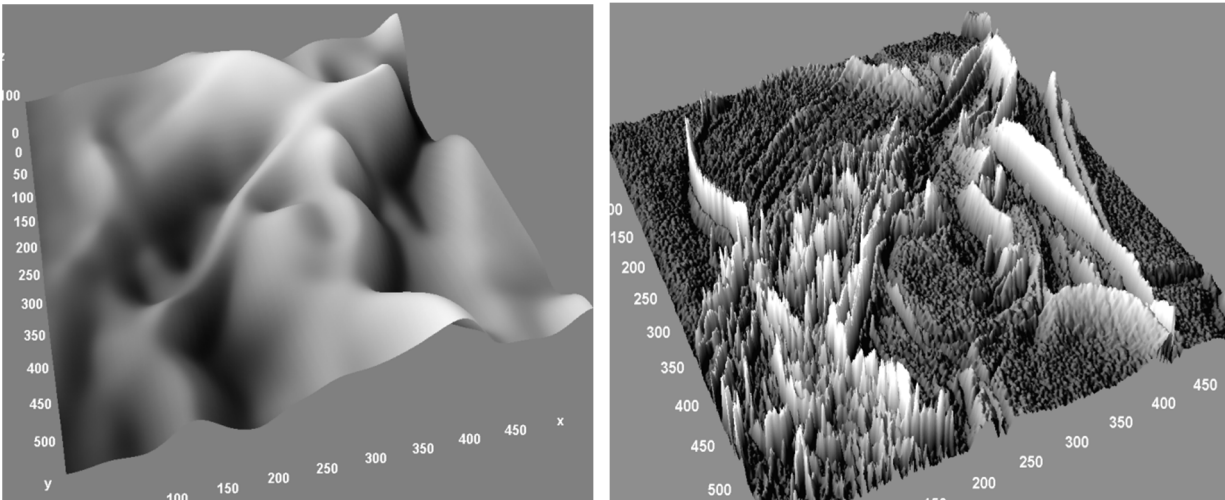


Figura 6.6. La imagen $f_{\text{fondo}}(x, y)$ de la izquierda (visualizada como mapa de elevación h) es el fondo de la figura 6.5-derecha, respecto al cual se define la textura de la imagen (derecha), al substraerlo del original (figura 6.5-izquierda) más un offset u_{offset} para evitar los valores negativos. Como la imagen original sólo contiene información bidimensional y de intensidad, la textura no es tridimensional, aunque su representación visual como mapa de elevación lo parezca.

En ciencias de materiales e industria, la textura suele analizarse mediante perfiles y se descompone en dos escalas: textura fina o rugosidad (*roughness* o *rugosity*) y textura media o gruesa: ondulaciones u *ondulacidad* (*waviness*) que es un fondo relativo y comprende concavidades y protuberancias menores o montículos (*bumps*). Ambas componentes pueden definirse y separarse mediante un segundo filtro tipo "pasa-banda" para la ondulacidad o rugosidad de grano grueso; es decir que todas las frecuencias de variación en un perfil o textura de superficie se descomponen en tres bandas: altas, medias y bajas frecuencias, en (Marquez, 2017b) examinamos la pertinencia de esta descomposición en el caso de piezas arqueológicas; nuestra conclusión preliminar es que es mínima en las superficies examinadas, por lo que se puede ignorar por ahora.

Para determinar la pertinencia de introducir dos escalas y analizar rugosidad fina y rugosidad gruesa (*ondulacidad*) en el monolito de Tláloc, se hicieron pruebas de separación con diversos valores en tres áreas de muestra de 30×30 cm, y observando el espectro de potencia (dominio de frecuencia espacial) se determinó que la ondulacidad es prácticamente nula, o sea que puede conjuntarse con la textura y simplificar el análisis con una sola escala σ para definir el fondo y la textura.

Las figuras 6.7-6.9 ilustran las etapas para extraer la textura superficial geodésica, a partir de la nube de puntos coordinados que muestrean la superficie geodésica ∂V . Por simplicidad se muestra el caso en 2D, equivalente a estudiar un corte transversal de un objeto 3D (la figura en verde). No describimos aquí algunos pasos intermedios (filtrado adaptivo, por ejemplo).

La figura 6.9 ilustra el mapa (en 2D) o campo escalar (en 3D) de distancia euclidiana, o también conocidos como *transformada de distancia euclidiana* (EDT), para el objeto V en verde de la figura 6.7-

izquierda. Para el campo de distancia con signo se usa el interior geométrico de $\partial V_{referencia}$ que denominamos $V_{referencia}$, una versión suavizada del objeto original V , en verde. No es necesario que $\partial V_{referencia}$ sea una superficie cerrada y basta con aprovechar que divide el espacio en dos regiones, una exterior y otra interior. Se puede definir en valor absoluto, o con un signo que puede ser negativo para puntos en el interior de $V_{referencia}$ y positivo para puntos externos.

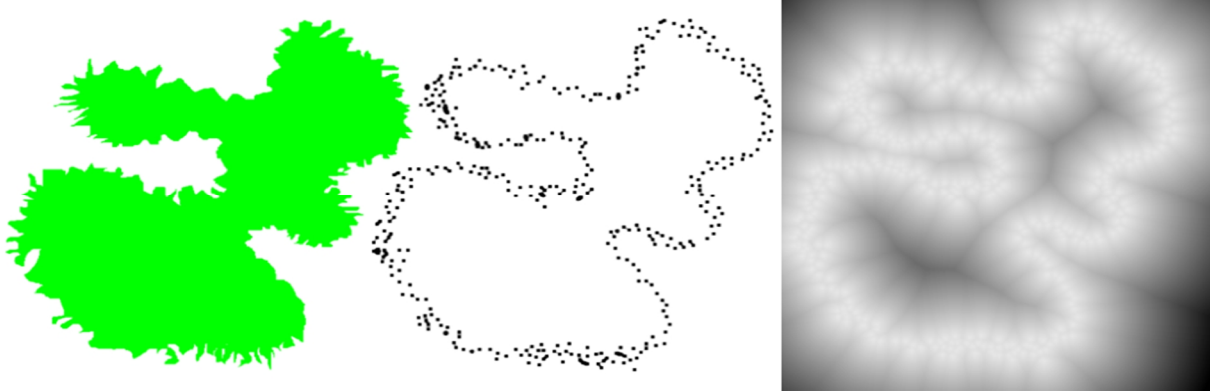


Figura 6.7. Para un objeto V en 2D o 3D (izquierda en verde, podría ser un corte transversal), se tiene una nube de puntos coordenados (centro) muestreando su contorno o superficie ∂V . Para definir una frontera de referencia $\partial V_{referencia}$, equivalente al fondo en la ecuación (2), se obtiene primero el campo de distancia (derecha) $EDT(\partial V)$ de la nube de puntos. Blanco es la máxima cercanía o distancia "0".

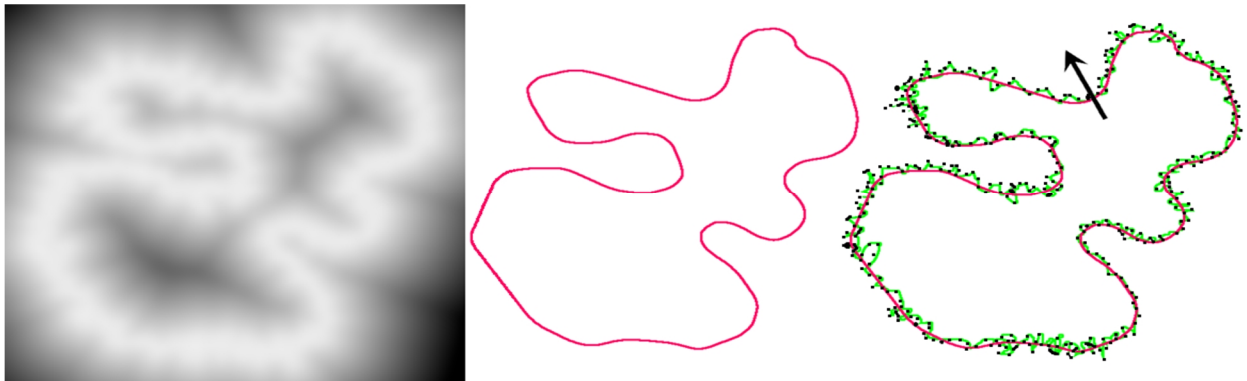


Figura 6.8. (Izquierda) Resultado de la operación $EDT(\partial V) * G_\sigma$ que suaviza el campo de distancia de la nube de puntos, para extraer (umbral 0="blanco") el contorno o superficie de referencia $\partial V_{referencia}$ (en rojo, bajas frecuencias espaciales geodésicas), respecto a la cual se mide la distancia más corta, o alternatively, aquella en dirección del vector normal local (flecha negra) para definir una textura de contorno o superficial. El contorno verde es el continuo, muestreado por la nube de puntos negros.

En (Marquez, 2017b) se detallarán las definiciones y métodos aquí esbozados y cómo es calculado $V_{referencia}$ a partir de la nube de puntos coordenados, sin pasar por un mallado triangular, el cual introduciría la textura artificial e irregular de los bordes y aristas de los triángulos. Aunque el voxelizado

introduce el artefacto de escalonamiento, este es regular, los atributos de distancia son de alta precisión y el voxelizado es más fino que un mallado.

En los puntos donde el EDT tiene un valor de cero, se encuentra la frontera $\partial V_{referencia}$, que en la figura 6.9-izquierda aparece en rojo. Para poder visualizar valores negativos, se agrega un valor de gris de offset (128, en imágenes de 8 bits), de modo que el valor cero corresponde a este nivel de gris (figura 6.9-derecha), el máximo valor negativo es negro y el máximo valor positivo es blanco. La textura queda definida por el conjunto de puntos muestra de la superficie ∂V del monolito, asignándoles el atributo de distancia mínima a la frontera de referencia; tal distancia se puede “leer” directamente del campo EDT de $V_{referencia}$ (absoluto o con signo) en ese punto muestra:

$$d(x_n, y_n, z_n) = \left[EDT(V_{referencia}) \right](x_n, y_n, z_n) \quad (5)$$

Donde $n = 1, \dots, N$, con N es el total de puntos (global o en una ROI). Esta es una lista no estructurada con atributo de distancia y su densidad supera el doble del parámetro de suavizado σ .

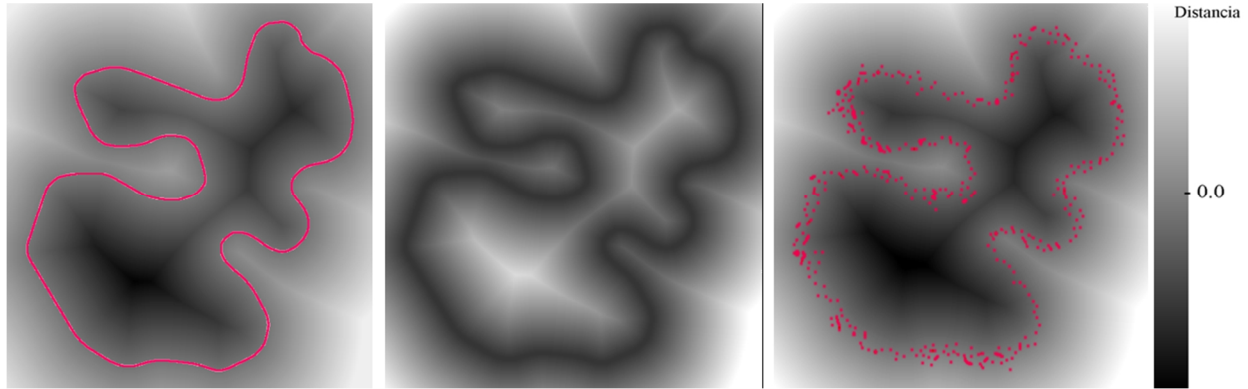


Figura 6.9. Campo escalar de distancia (EDT) del interior de la frontera de referencia $\partial V_{referencia}$ suavizada de la figura 8 (en rojo); El contorno rojo tiene el valor de distancia igual a cero. Centro: distancia absoluta; el atributo en cualquier punto de la imagen es la distancia al contorno en rojo. Derecha: EDT con signo de $V_{referencia}$, más un offset de nivel=128 para poder visualizar los valores negativos del interior. Los puntos de ∂V en rojo tienen como atributo el valor de $EDT(V_{referencia})$, formando una textura geodésica. La escala de grises marca la distancia en unidades de pixel o voxel, siendo blanco y negro las distancias máximas.

Para extraer descriptores texturales es necesario estructurar un dominio como arreglo 3D, es decir *voxelizar* la lista de puntos. Una voxelización fina fue realizada, localmente, para construir los campos de distancia y puede aprovecharse. Como se aprecia en la figura 6.9-derecha, un problema es que hay muchos voxels vacíos y otros conteniendo dos o más puntos, pues dada la textura, los puntos se distribuyen de forma inhomogénea, aunque el barrido del escáner láser es regular, si se muestrea una superficie perfectamente plana. Como además se trata de una superficie que va cambiando (curvándose o doblando bordes y esquinas a 90°), no es posible establecer una imagen exacta regional, para un análisis de textura clásico; es posible sin embargo proyectar a un plano local, definido por el promedio de vectores normales a ∂V en la zona de interés. Un ejemplo de tal zona se visualiza en la figura 6.11 (puntos amarillos). De todos modos existirán pixeles vacíos y otros con uno o más puntos de la nube, como se muestra en la figura 6.12-izquierda. En la voxelización exacta, hay más voxels vacíos (no es proyección); como se ve en la figura 6.12-derecha, pero muchos no son visibles. En cualquier caso, se debe ya sea interpolar un valor de atributo a partir de sitios vecinos, o usar el enfoque estadístico del

análisis textural, en que no es necesario contar con todos los píxeles o voxeles, sino basta una muestra representativa.

La figura 6.10 muestra mallados triangulares muy simplificados, sin textura (ver sección 5); y aproximan la superficie de referencia $\partial V_{referencia}$, pero introducen los artefactos del mallado adaptivo y cambian si se cambian los criterios de reconstrucción. Escogimos mejor estimar $\partial V_{referencia}$ a partir de la nube de puntos escaneados, por diversas ventajas (ver detalles en Jorge, 2017b).

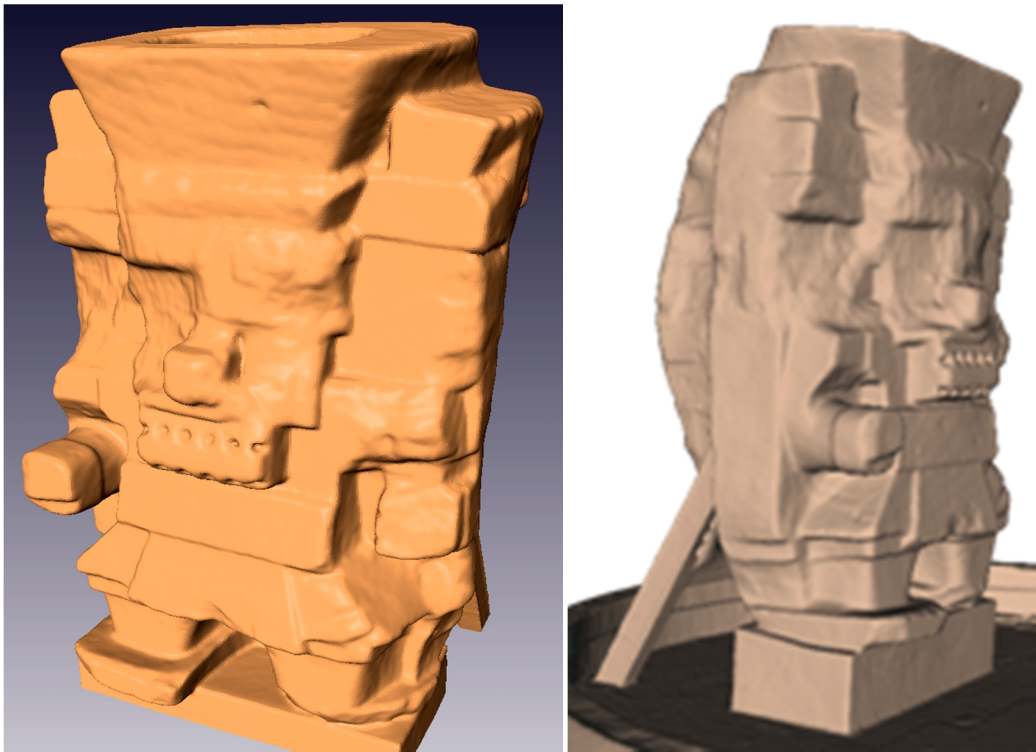


Figura 6.10. Se muestran renderizados 3D del mallado suavizado y muy simplificado, reconstruido a partir de la nube de puntos (ver sección 5). Esta superficie es una aproximación de la superficie geodésica de referencia de alta resolución $\partial V_{referencia}$ extraída de la nube de puntos. La información textural se obtiene como el atributo de distancia euclidiana entre cada punto (x_n, y_n, z_n) de la nube y la frontera $\partial V_{referencia}$ aquí aproximada por el mallado.

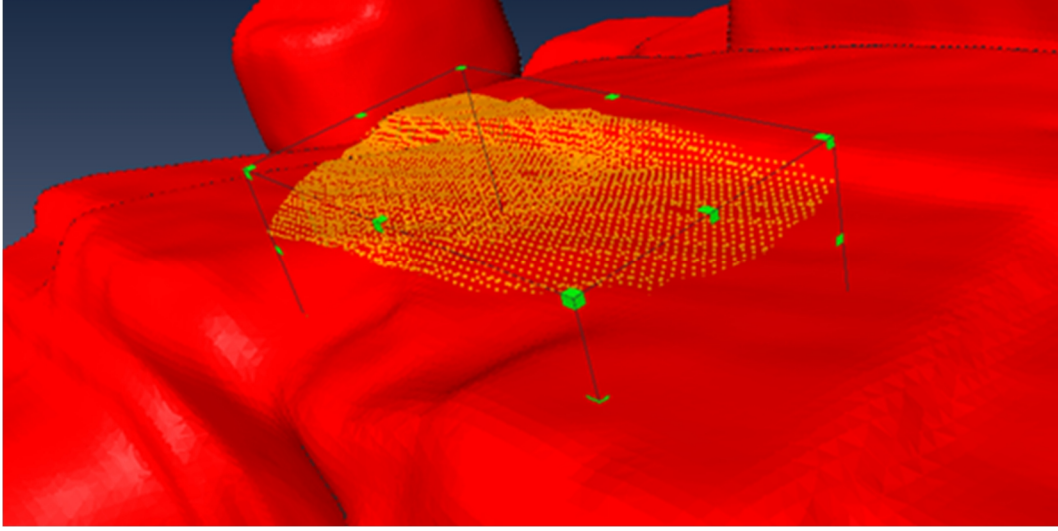


Figura 6.11. La superficie en color rojo es el mallado triangular a baja resolución del monolito. Se muestra sólo como referencia para apreciar la zona elegida de estudio (en amarillo) de muestras de puntos coordenados de la superficie texturizada. En las mediciones la superficie de referencia es definida a partir de la nube de puntos, independientemente del mallado.

Finalmente, la superficie de referencia geodésica $\partial V_{referencia}$ en tres dimensiones, se obtiene de la nube de puntos mediante las siguientes operaciones concatenadas:

$$\partial V_{referencia}(x, y, z) = Level_{d=0} \left(\left[EDT(\partial V) \right] (x, y, z) * G_{\sigma}(x, y, z) \right) \quad (6)$$

donde ∂V se aproxima por el conjunto de puntos escaneados $\{(x_n, y_n, z_n)\}_{n=1}^{n=N}$; las coordenadas x, y, z corresponden a una voxelización de resolución arbitraria y $Level_{d=0}$ es un operador *de nivel*, o de *umbralaje* que evalúa el campo EDT suavizado en el valor de atributo (distancia) $d=0$; la ecuación (6) equivale a la ecuación (2), para la generalización geodésica a objetos 3D.

Una ventaja de nuestro método, es que los cálculos pueden hacerse sobre una partición en sub-volúmenes adecuada de la nube de puntos, con un traslape entre las piezas que permita tener en cuenta los efectos de bordes entre regiones de la partición; calculamos que para tener voxelizaciones finas, en volúmenes de tamaño manejable en una estación de trabajo PC con 16 GB de memoria, las regiones serían volúmenes de dimensiones variables, por ejemplo de $1000 \times 1000 \times 300$, requiriendo una partición de unos 750 volúmenes, con un traslape del orden de $2\sigma \approx 40$ voxeles. El diagrama de la figura 6.13 resume las etapas propuestas de procesamiento y análisis, a partir de la nube de puntos coordenados, para definir una representación de la textura superficial geodésica, de la que se extrae descriptores estadísticos a 1er y 2o. orden, se visualiza su distribución en el monolito y se espera llegar a obtener interpretaciones útiles para los especialistas en conservación y arqueología.

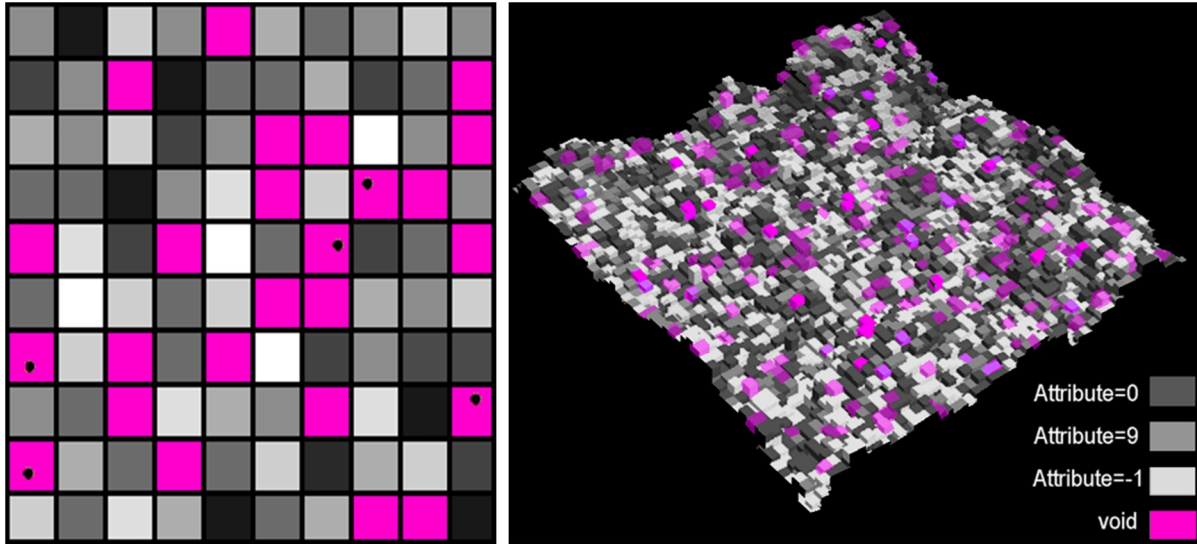


Figura 6.12. Definición de un dominio discreto para los datos no estructurados de la nube de puntos coordenados. (Izquierda) Imagen de una textura euclidiana: el nivel de gris es el valor del atributo (altura, profundidad o distancia a $\partial V_{referencia}$); los pixeles magenta no contienen información (no hay allí puntos de la nube), o sólo hay puntos outliers (en negro). (Derecha) visualización de un bloque 3D de textura geodésica voxelizada; las muestras no se encuentran en un plano, sino que ocupan una región prismática de cierto espesor, que va cambiando de orientación a lo largo de ∂V . También están vacíos los voxels encima y debajo de la superficie visible; los marcados en magenta (derecha) tienen vecinos ocupados a lo largo de la superficie.

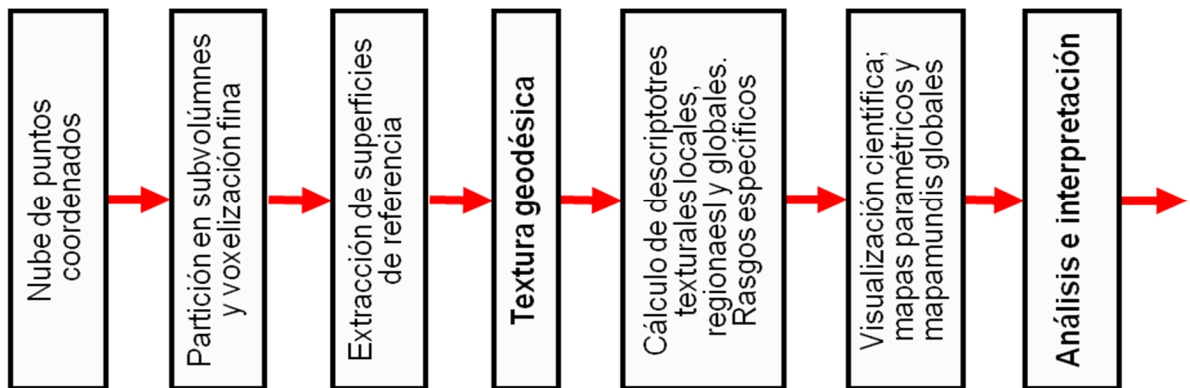


Figura 6.13. Diagrama de bloques principales del estudio de la textura en superficies del monolito del Tlaloc. Se omitieron ciertas etapas intermedias y en la mayoría es necesario establecer parámetros y criterios tales como escalas, vecindades, normalización, etc.

6.5 Partición y voxelización

La nube completa de puntos $\{(x_n, y_n, z_n)\}_{n=1}^{n=N}$ comprende $N=383,645,774$ tripletas en punto flotante y la caja englobante del monolito tiene dimensiones $X \times Y \times Z = 4.54156 \times 4.25324 \times 7.85033 \text{ m}^3$ (sección 5 Gastelum, 2016). Para su procesamiento y análisis este volumen debe manejarse mediante una *partición* en bloques volumétricos adecuados que contengan al final secciones de ∂V . Por ahora se calcularon unos $M=750$ bloques con un traslape proporcional al parámetro de escala para la reconstrucción de textura geodésica. Los detalles del procedimiento se reportarán en (Marquez, 2017b) y la idea se ilustra

resumida en la figura 6.14; el método propuesto, permite leer archivos de tamaño arbitrario para formar supervoxeles y luego bloques sólo a lo largo de la superficie del objeto a analizar.

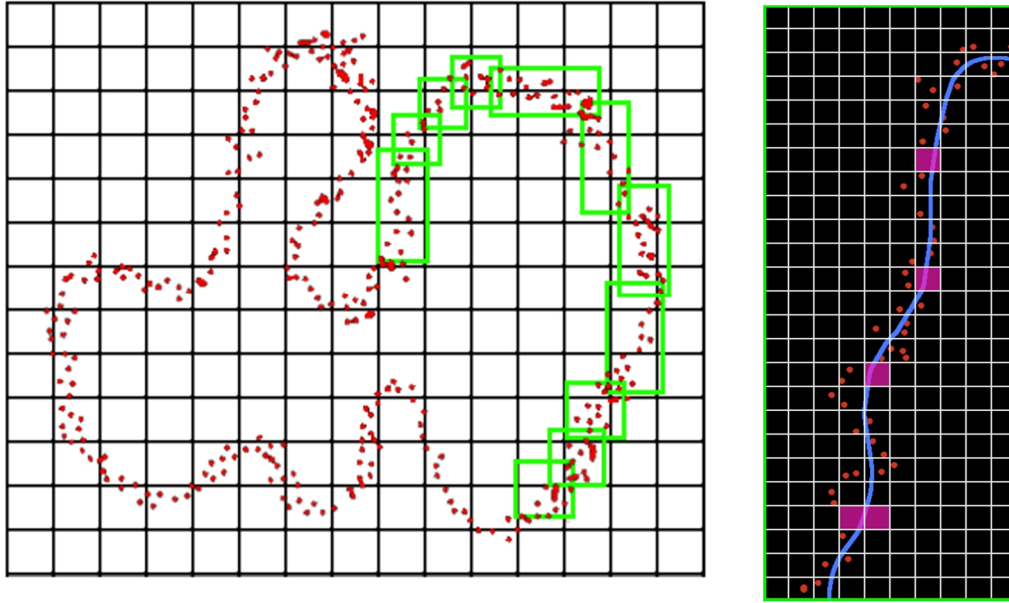


Figura 6.14. (Izquierda) Ejemplo en 2D de superpixelización (retícula regular en negro) de una nube de puntos coordenados (en rojo, muy amplificados, y submuestreados); cada superpixel $S_v(x', y')$ puede apuntar a uno o más bloques (en verde) que recubren la nube de puntos que aproxima la superficie ∂V ; en verde aparecen algunos bloques de dimensiones variables, con traslape y cuyos pixeles finos contienen de cero a unos pocos puntos de la nube. (Derecha) Ampliación de un bloque, con pixelización fina (retícula en blanco); en rojo aparecen los puntos de la nube pixelizados y en azul el contorno $\partial V_{referencia}$. En magenta, pixeles vacíos que pasan por $\partial V_{referencia}$. Dos o más superpixeles pueden apuntar al mismo bloque. Un bloque en 3D se muestra en la figura 6.12-derecha, donde además, el atributo en nivel de gris es la distancia más corta a $\partial V_{referencia}$. El contorno $\partial V_{referencia}$ (azul) se muestra a una tercera resolución temporal (cada voxel son $100 \times 100 \times 100$ subvoxeles) para cálculos precisos, pero la textura se estudia en la resolución de la retícula blanca.

Por otro lado contamos con nubes en tres resoluciones, una de las cuales es con la que se hizo el presente estudio, siendo insuficiente para analizar la textura; un problema grave es que aparentemente los puntos no fueron submuestreados, sino recalculados promediando cientos de puntos, perdiendo toda información textural, aunque fuese submuestreada. El problema con las otras dos resoluciones, de 0.005 y de 0.01 cm, había sido el formato y el tamaño del archivo, pero diseñamos una solución que permite ir leyendo punto a punto el archivo, de más de 7GB, gracias a la partición en bloques. De la voxelización fina se realizan las etapas ya descritas para consolidar al final todas las mediciones para el monolito entero, en forma global, regional o local.

6.6 Rasgos texturales: Descriptores a partir de la estadística a primer orden

Los descriptores texturales más sencillos son la estadística a 1er. orden: el valor medio del atributo y su varianza; esta última recibe, para texturas geodésicas, el nombre de **rugosidad RMS geodésica**, definida en una ventana[†] geodésica local $W_{x_n, y_n, z_n} \subset \partial V$ alrededor de cada punto $(x_n, y_n, z_n) \in \partial V$, como:

[†] En la práctica se toma la intersección de ∂V (ya voxelizada) con una esfera discreta, de radio $r \geq \sigma$.

$$\rho_{W_{x,y,z},RMS} = \frac{1}{\text{card } W} \sum_{x',y',z' \in W} \underbrace{\left(h(x_n - x', y_n - y', z_n - z') - \langle h(x_n, y_n, z_n) \rangle_W \right)^2}_{\text{altura relativa}} \quad (7)$$

donde el **valor medio local geodésico**, en la ventana W es:

$$\langle h(x, y, z) \rangle_W = \frac{1}{\text{card } W} \sum_{x',y',z' \in W} h(x_n - x', y_n - y', z_n - z') \quad (8)$$

y las alturas son respecto la superficie de referencia $\partial V_{\text{referencia}}$. El tamaño de las ventanas o vecindades $W_{x,y,z}$ es equivalente al parámetro σ usado para extraer la superficie de referencia en el caso euclideo (ecuación (2)). Muchos autores también consideran la rugosidad absoluta, definida localmente como:

$$\rho_{W_{x,y,z},ABS} = \frac{1}{\text{card } W} \sum_{x',y',z' \in W} \underbrace{\left| h(x_n - x', y_n - y', z_n - z') - \langle h(x_n, y_n, z_n) \rangle_W \right|}_{\text{altura relativa absoluta}} \quad (9)$$

la cuál, a diferencia de la rugosidad RMS, pondera las diferencias (alturas relativas) por igual y en ciertas aplicaciones industriales es un descriptor más adecuado. En el estudio del monolito, necesitaríamos analizar cuál es mejor y en qué sentido.

Las anteriores son definiciones clásicas (Leach, 2016) extrapolables al caso geodésico, pero como en el caso de la definición de textura, existe una definición más natural, a partir del campo EDT , en vez de la distancia a la media local $\langle h(x, y, z) \rangle_W$. El promedio cuadrático de la ecuación (7) también se puede definir tomando directamente las distancias o alturas relativas de la ecuación (4), que es como suele aparecer en la literatura, para el caso euclideo. De allí que para una nube de puntos coordinados, la *rugosidad geodésica* regional (ROI) o local (en la vecindad $W_{x_n, y_n, z_n} \subset \partial V$ de cada punto de la nube) se defina, de la ecuación (5) como:

$$\gamma_{W_{x_n, y_n, z_n}, RMS} = \frac{1}{\text{card}(W_{x_n, y_n, z_n})} \sum_{(u, v, w) \in W_{x_n, y_n, z_n}} \left(\left[EDT(V_{\text{referencia}}) \right](u, v, w) \right)^2 \quad (10)$$

Con u, v, w coordenadas enteras en una voxelización de resolución arbitraria. Análogamente se define $\gamma_{W_{x_n, y_n, z_n}, ABS}$. Una discusión más amplia y pruebas preliminares de cálculo de rugosidad RMS sobre las superficies del monolito de Tláloc se presentarán en (Márquez, 2017b).

Otros descriptores de primer orden que hemos propuesto y utilizado en microscopia biomédica (Corkidi et al., 1998), son aquellos derivados de la *razón media ancho/altura* y del *ancho neto a media altura* (Marquez, 2017).

6.7 Rasgos texturales: Descriptores a partir de estadísticas a segundo orden

La naturaleza textural de objetos tridimensionales contiene motivos en las direcciones laterales (o sea, correlaciones entre puntos vecinos), a lo largo de la superficie, combinados con las variaciones en la dirección normal a la superficie local. Como con texturas visuales, resulta más informativa la estadística a segundo orden que considera probabilidades conjuntas de que dos puntos seleccionados tengan valores de atributos iguales a i, j respetivamente; se dice que este es un "evento" cuya frecuencia de ocurrencia conjunta sigue cierta *distribución probabilística conjunta*, que puede aproximarse y visualizarse con

histogramas bidimensionales (Marquez, 2017). Usando pocas clases de eventos conjuntos, usualmente entre 4 y 16, se obtienen las llamadas matrices de ocurrencia de niveles de gris (GLCM), una por cada configuración posible de parejas de puntos (píxeles, o en el caso de texturas geodésicas, voxeles), separados una cierta distancia, a un cierto ángulo. Los descriptores son diversas estadísticas de segundo orden, tales como *covarianza*, *entropía conjunta*, *energía conjunta*, *homogeneidad*, etc.

Para caracterizar la textura superficial euclidiana (en proyecciones planas) y en el caso geodésico, se escogieron los siguiente descriptores extraídos de matrices de dependencia espacial y co-ocurrencia de atributo (GLCM), que suele ser el nivel de gris en una textura visual, o bien una altura o distancia, en el caso de las texturas superficiales geodésicas.

Descriptor	Interpretación
Varianza o Rugosidad	También llamada rugosidad RMS conjunta , es el promedio de diferencias cuadráticas entre parejas, respecto a la superficie de referencia, tomada como un valor medio. Mide a segundo orden justamente lo rugoso o suave de la textura.
Contraste	Mide las variaciones locales más grandes; sirve como medida relativa entre distintas texturas (mayor o menor contraste).
Correlación	Mide la probabilidad conjunta de ocurrencia de la pareja de píxeles, de modo que mide el grado de dependencia de los atributos-píxel; esto permite medir la regularidad y estructuración local.
Energía	También: uniformidad o segundo momento angular, es un descriptor de la “intensidad” textural, o sea del grado de variación tanto espacial como en atributo.
Entropía	Mide la aleatoriedad y la cantidad de información contribuida por las parejas de píxeles; se relaciona con la presencia de orden (baja entropía) o desorden (alta) introducida por configuraciones de parejas de píxeles. Puede indicar la diferencia entre la importancia del ruido y aquella de la textura.
Disimilaridad	Como es la suma absoluta de las diferencias, mide que tan disimilares son los píxeles; un valor cero ocurre para un área constante (sin textura).
Homogeneidad	Prácticamente lo contrario a la disimilaridad; es elevada entre regiones diferentes y baja en los bordes o donde hay variaciones importantes.

Tabla 6.1. Interpretación técnica de una selección de los descriptores más usados en la literatura (salvo los tres últimos que hemos estudiado en particular, por su aportación descriptiva).

$$\begin{array}{c}
 \text{Total de niveles de atributo} \\
 \downarrow \\
 \text{Valores de atributo} = i, j \quad \text{Probabilidad conjunta del evento:} \\
 \begin{array}{l}
 \downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow \\
 \text{(valor del atributo de voxel A) = } i, \text{ y} \\
 \text{(valor del atributo de voxel B) = } j
 \end{array}
 \end{array}$$

$$\text{contraste} = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L (i - j)^2 p_{ij}$$

Figura 6.15. Definición matemática del descriptor contraste; su valor aumenta con muchas parejas de voxeles con valores de atributo muy diferentes. Nótese que es el valor esperado de $(i - j)^2$.

En este reporte omitimos incluir las expresiones matemáticas y su re-formulación para texturas geodésicas 3D. Sólo daremos algunos ejemplos y cómo se calculan de la nube de puntos coordenados. Para entender su relación con las frecuencias de ocurrencia, mostramos en la figura 6.15 la definición para el descriptor denominado **contraste**. Se han propuesto y probado en la literatura unos 30 descriptores estadísticos de las GLCMs y la forma general del doble sumando es una función $g(i, j, p_{ij})$, siendo (i, j) los niveles de atributo de la pareja de voxeles analizada. Los descriptores estadísticos de 1er y 2o. orden en principio no contienen información del dominio espacial (coordenadas).

Para otros descriptores texturales GLCM, la interpretación no es muy clara o difícil de explicar en forma sencilla. Inclusive en las interpretaciones anteriores (tabla 6.1) es notable el parecido entre algunas descripciones y la alta correlación entre descriptores como energía y entropía. Al medirlos en forma local (ventana o vecindad W_{x_n, y_n, z_n} de radio r), se obtienen **imágenes paramétricas**, donde el valor del descriptor varía a lo largo de una textura no muy homogénea. Las figuras 6.16 y 6.17 ejemplifican la distribución local de algunos descriptores. Las paletas o mapas de color permiten distinguir mejor variaciones poco visibles si el atributo se visualiza en escalas de gris, y se ha agregado una escala cuantitativa, siguiendo ciertos criterios de normalización. Estas imágenes paramétricas son apenas el punto de partida para un estudio donde la interpretación en términos físicos queda por establecer, inicialmente de forma empírica, con participación de los interesados. Lo más difícil es establecer una conexión entre combinaciones adecuadas de los descriptores y los rasgos físicos, lo cual puede considerarse una interpretación o diagnóstico del deterioro o estado de conservación, conforme se realiza un estudio longitudinal (a lo largo de varios años). Establecer tal correspondencia (tabla 6.2) es un problema poco obvio y que no es abordado en la literatura, salvo escasas excepciones, como en aplicaciones industriales (Leach, 2016).

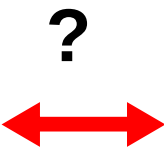
Descriptor textural	Correspondencia con rasgos físicos, interpretación/diagnóstico	
Contraste		Erosión, degradación, ataques químicos
Homogeneidad		Grietas, hoyos, desprendimientos
Energía		Material exógeno (líquen, plantas)
Entropía		Manchas, polvo, resanado
Disimilaridad		Desmineralización, porosidad
Varianza		Evolución (análisis comparativo o longitudinal)
Rugosidad		. . .

Tabla 6.2. La columna de la extrema izquierda enlista rasgos físicos correspondientes a condiciones de deterioro, daño, etc. que son observables y cuantificables de forma aproximada y suponen corresponder con diversas texturas y por lo tanto con combinaciones adecuadas de los descriptores de la columna derecha. Tales correspondencias no han sido todavía establecidas (columna central).

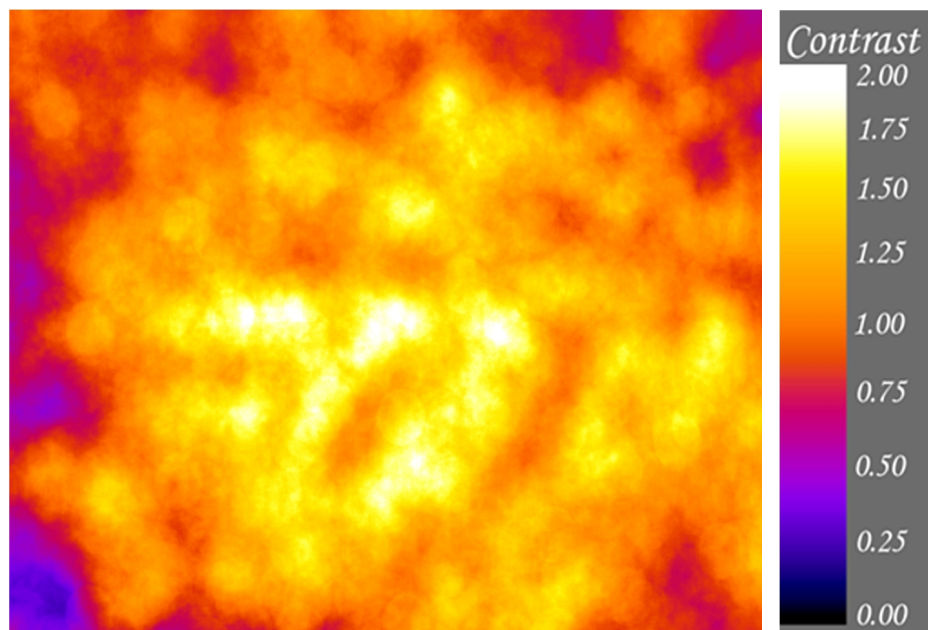
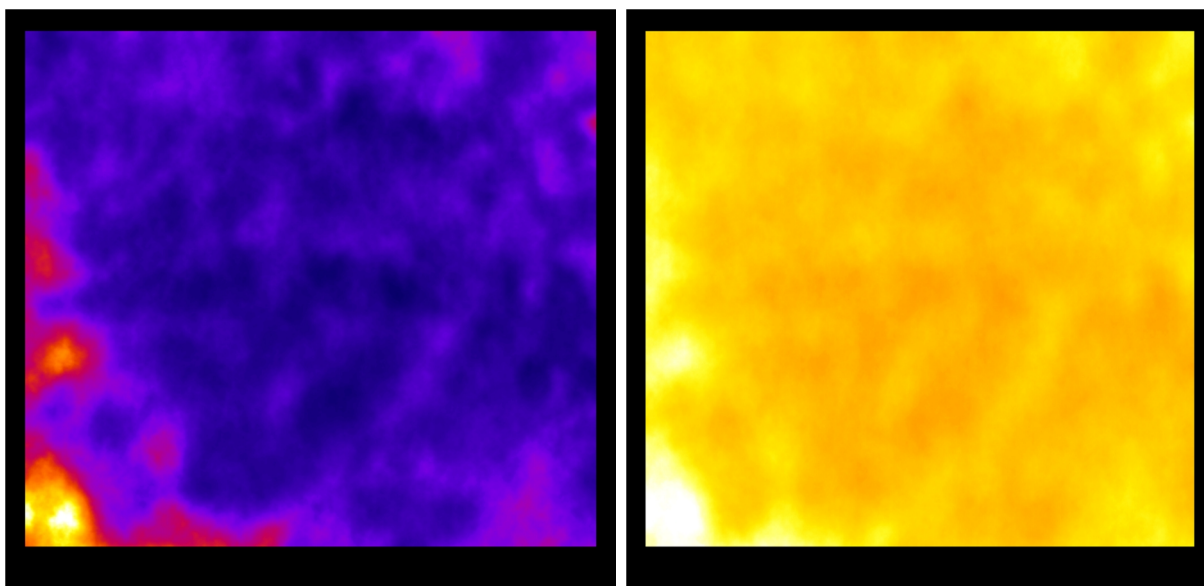


Figura 6.16. Una de las imágenes paramétricas obtenidas, visualizando la distribución local del descriptor de Contraste, definido en la tabla 6.1, analizando ventanas de un radio de 5 píxeles. Las unidades se establecen con una normalización especial, siendo el despliegue escalado para fines de visualización. La paleta de color fue elegida por sus características de discriminación visual.



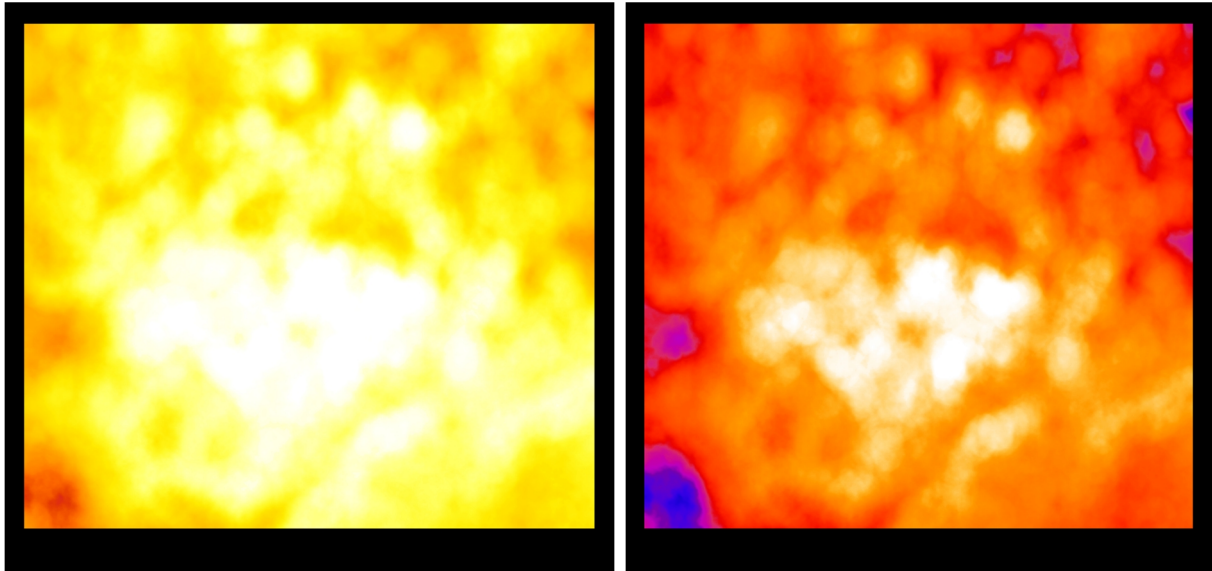


Figura 6.17. Imágenes paramétricas del valor local de Energía, Entropía, Homogeneidad, Covarianza (radio =10 voxeles, orientación media de 0°, separación de 5 voxeles).

La *visualización científica* de combinaciones de descriptores, de manera regional o local permitiría estudiar la distribución de diferentes texturas a lo largo de toda la superficie del monolito al consolidar las mediciones sobre el conjunto-partición de los volúmenes que cubren ∂V . Esto equivale a un "mapamundi", el cual se aproximó proyectando en un prisma las superficies principales, aunque a muy baja resolución y estudiando sólo texturas euclidianas. Tal tipo de visualización, con parámetros que deben refinarse, se ilustra en las figuras 6.18 y 6.19. La idea es poder apreciar de forma global diferencias texturales en relación con rasgos del monolito y zonas de interés, en particular cuando se combinen distribuciones de descriptores poco correlacionados, según un análisis de componentes principales, por ejemplo, efectuado sobre K descriptores.

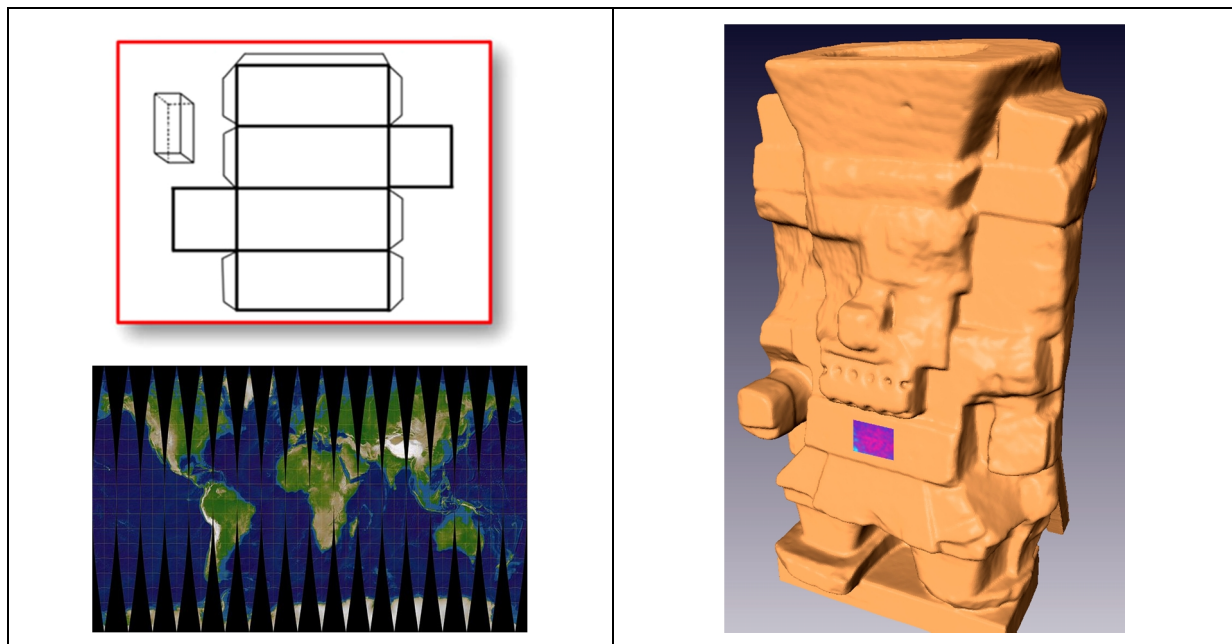


Figura 6.18. "Mapamundi" de un descriptor textural en la zona indicada a la izquierda, sobre el monolito.

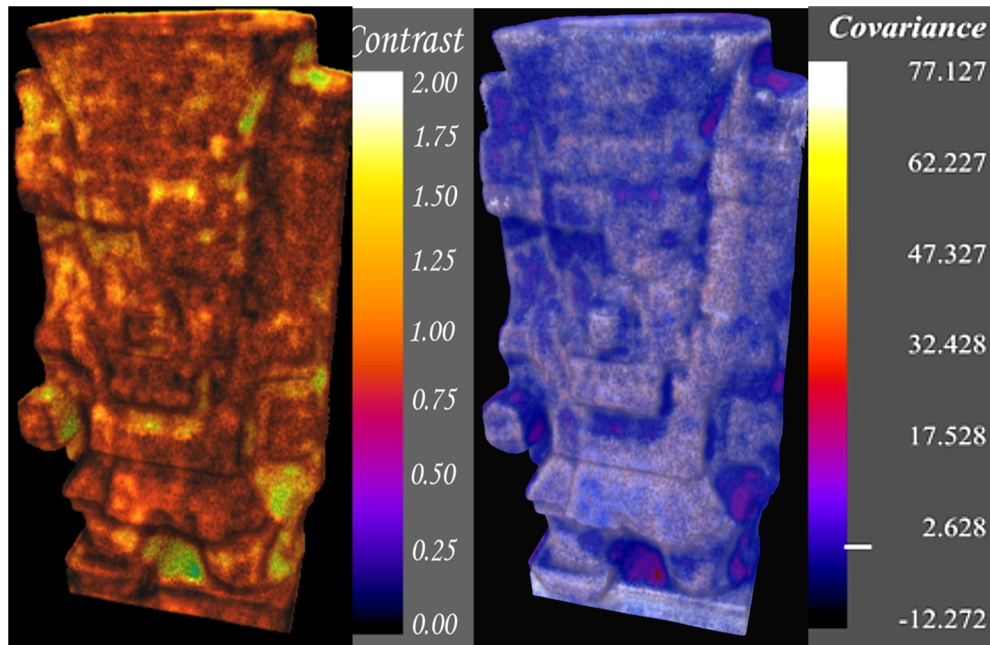


Figura 6.19. La idea ilustrada es visualizar la distribución local de diversos descriptores texturales en todo el monolito y eventualmente hallar aquellas combinaciones que permitan ser interpretadas como cierto tipo de erosión, o condición de interés en conservación o en arqueología.

6.8 Observaciones y conclusiones

- Al haber definido operacionalmente *textura* como las variaciones en atributo que queda al sustraer un fondo, definido por un parámetro σ de escala (ecuaciones (2)-(4)), se puede hacer un estudio focalizado en ciertos detalles o zonas de interés, siempre que la escala de los detalles sea dos veces mayor a la resolución espacial de la nube de puntos coordinados.
- Las texturas táctiles y relieves en las superficies del monolito de Tláloc se encuentran representadas en las nubes de puntos del escáner en forma de alturas respecto a planos o superficies que deben estimarse, en base al tamaño de los detalles de interés. En general, en vez de alturas se miden distancias euclidianas a la superficie de referencia, definida por la ecuación (2) y generalizada al caso geodésico en 3D por la ecuación (5), tras obtener la superficie $\partial V_{\text{referencia}}$ de la nube de puntos coordinados adquiridos por la CNMH del INAH, sin necesidad de pasar por mallados triangulares.
- Las texturas visuales (color) podrían estudiarse a partir de fotografías digitales adecuadas; la información incompleta proviene de oclusión y sombras; la iluminación actual no es uniforme, ni en espacio ni en tiempo, o sea que no fue controlada (hora del día, insolación, etc.), por lo que cualquier estudio con las fotos actuales no sería reproducible ni comparable entre diversas regiones o respecto otras fotografías. Es posible sin embargo un estudio estadístico, buscando eliminar mediante promedios y otros descriptores de las distribuciones de niveles (distancias) a 1^{er} y 2^o. orden, las variaciones extrínsecas.
- Se proponen métodos estadísticos en que es posible trabajar con muestras (imágenes “con hoyos”) en ambas texturas (visual y táctil). Las pruebas realizadas permiten asegurar que, dadas nubes de puntos coordinados de mayor resolución, sería posible un análisis textural reproducible y detallado, usando los métodos propuestos y descritos en (Marquez, 2017b), resumidos abajo e ilustrados como diagrama bloques en la figura 6.13.
- Las superficies de referencia en un objeto tridimensional no son planas, se denominan *geodésicas* y es posible obtenerlas a partir del procesamiento de los campos de distancia

euclidiana de las nubes de puntos del monolito, sin requerir del mallado triangular, el cual introduciría el artefacto de discretización triangular; las distancias mínimas a tales superficies forman proyecciones locales de textura táctil en imágenes cuyo atributo es la distancia, visualizado como intensidad en niveles de gris. Aparecen hoyos donde la densidad de muestras es baja, ausente o existe oclusión. Una alternativa más precisa es una voxelización, donde también existen huecos, pero el análisis preserve el dominio 3D original.

- Para soslayar el problema de los huecos, el estudio se realiza mediante el enfoque estadístico de texturas: no es necesario contar con “todos” los píxeles o voxels del dominio discreto, sino con un porcentaje que puede ser de hasta 25% en el peor de los casos, sin menoscabo significativo en el análisis. Los descriptores estadísticos que hemos elegido son usualmente valores esperados de funciones sobre los atributos, y por tanto se asemejan a obtener un promedio en una muestra poblacional. Para cada descriptor es posible obtener una desviación estándar.
- Métodos estadísticos propuestos para analizar texturas “con hoyos” debidos al muestreo:
 - o A 1^{er} orden: estadística de histogramas locales de intensidades, en particular la *rugosidad local RMS* y absoluta, el factor de rugosidad (Marquez 2017b), y los parámetros derivados de la *razón media ancho/altura* y del *ancho neto a media altura*.
 - o A 2^o orden: los descriptores de matrices de ocurrencia GLCM (Haralick, 1979) y otros derivados de la *GLMC* local, pero en vez de niveles de gris el atributo es una distancia euclidiana 3D. La combinación de descriptores podría tener interpretaciones útiles.
 - o El carácter “local” lo define (como mínimo), un radio de vecindad determinado por *la mitad del tamaño de los rasgos texturales de interés* (criterio de muestreo de Nyquist Shannon).
 - o La visualización de imágenes paramétricas de los descriptores texturales permitirá una apreciación cualitativa de las texturas en forma local y global. La combinación de diversos parámetros poco correlacionados podría tener correspondencia con rasgos del material (piedra del monolito) o de interés en labores de conservación, evaluación de deterioro o con interpretación arqueológica.
- **Problema:** establecer correspondencias entre descriptores o combinaciones de los mismos y rasgos físicos (tipo de erosión, manchas, desmineralización, etc). esto implica una colaboración interdisciplinaria y un estudio inicialmente empírico de casos representativos de un deterioro específico u otra condición de interés.

7 Desarrollo de herramientas de medición para registro y monitoreo de joyas arqueológicas

José Sánchez Vizcaíno

El Dr. Sergio González García, responsable del programa de conservación de joyas arqueológicas del Instituto Nacional de Antropología e Historia, invitó al CCADET-UNAM a proponer proyectos para preservar, y en su caso restaurar la joya arqueológica “Tlaloc de Coachintlán”, que actualmente se exhibe en los accesos del Museo Nacional de Antropología e Historia.

Características particulares de este ícono son: (a) es una pieza monolítica de más de 10 toneladas; (b) está colocado en una fuente y pedestal para exhibición pública, recargado sobre vigas de acero, con restricciones para su observación desde las partes posterior y superior; (c) posee una cavidad en la parte superior que se supone debía contener agua; (d) presenta corrosión y daños superficiales en aumento, que se estima son ocasionados por: lluvia, humedad variaciones de temperatura, polvo, microorganismos, contaminantes atmosféricos y vibraciones; (e) presenta grietas de profundidad desconocida y cavidades de algunos milímetros de diámetro, de forma y distribución irregular.

Previamente a esta iniciativa obran en poder del INA archivos de digitalización tridimensional de su superficie por modelos punto a punto, con información vectorial de: posición, orientación, color, información que ha compartido con el Grupo Académico de Procesamiento de Imágenes del CCADET. Esta digitalización tiene densidad suficiente para establecerse como respaldo digital, e incluye grietas, cavidades, colores, textura; demanda sistemas de cómputo y memoria de muy alta capacidad, instrumentación de escaneo láser de muy alto costo, y de tiempos prolongados de realización.

El Grupo Académico Ingeniería de Precisión y Metrología del CCADET, propuso: (f) explorar alternativas de digitalización de bajo costo; (g) registrar su superficie por modelos matemáticos, que ahorrarían capacidad de cómputo, instrumentación y tiempo, permitiendo además crear modelos sólidos para análisis por elementos finitos, y descubrir posibles regiones de alto estrés; (h) desarrollar herramientas de verificación de estabilidad dimensional y referenciado cercano, como complemento a tareas de evaluación de estrés y relocalización.

7.1 Recursos de digitalización

Los recursos de digitalización plana por fotografía, poseen cualidades intrínsecas de alto valor al registrar de forma continua superficies con color y posición 2D. Desde esta perspectiva puede asegurarse que compite enormemente con la digitalización por escaneo láser, en el registro continuo y en costo.

7.1.1 Reconstrucción tridimensional

Para propósitos de medición tridimensional, desde la década de 80's en el siglo pasado, se han refinado técnicas que ofrecen cada vez mayor exactitud, y que se basan en el mapeo de imágenes entre sí, tomadas desde diferentes puntos de vista. Esta técnica recibe también el nombre de Estereofotografía.

El grupo académico de Ingeniería de Precisión y Metrología del CCADET trabaja en este campo desde 1997 y recientemente identificó y adquirió cámaras, cómputo y software complementario. A la invitación del Dr. González destinó recursos humanos e infraestructura para evaluar su bondad en el apoyo a proyectos de valor histórico o urbano, identificando entre otras las posibilidades siguientes:

- Registro por imágenes planas, Apareamiento múltiple de imágenes para ubicar los puntos digitalizados en sistemas tridimensionales. Ver figura 7.1.

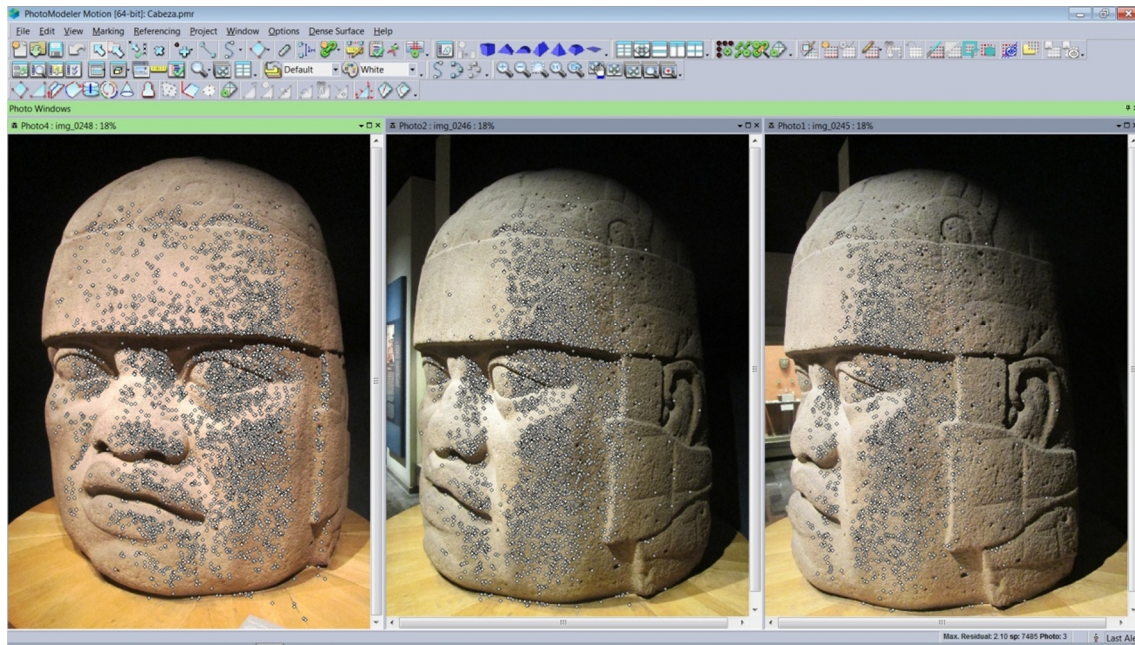


Figura 7.1. Software de medición y conversión tridimensional, luciendo la Cabeza Olmeca del Museo Nacional de Antropología e Historia, tomada desde tres ángulos, mostrando a la vez: el continuo de su superficie y puntos de apareamiento para exportación vectorial.

- Por el mapeo entre imágenes es posible la obtención de superficies tridimensionales continuas, en todo el intervalo donde existan puntos objeto en más de una imagen. Ver figura 7.2.



Figura 7.2. La reconstrucción tridimensional cesa sólo cuando existen fuertes discontinuidades o información ambigua.

7.1.2 Obtención de información vectorial

Mediante el señalamiento de puntos apareados sobre superficies, es posible la obtención de posiciones o distancias, o la generación de trazos CAD. Ver figura 7.3.

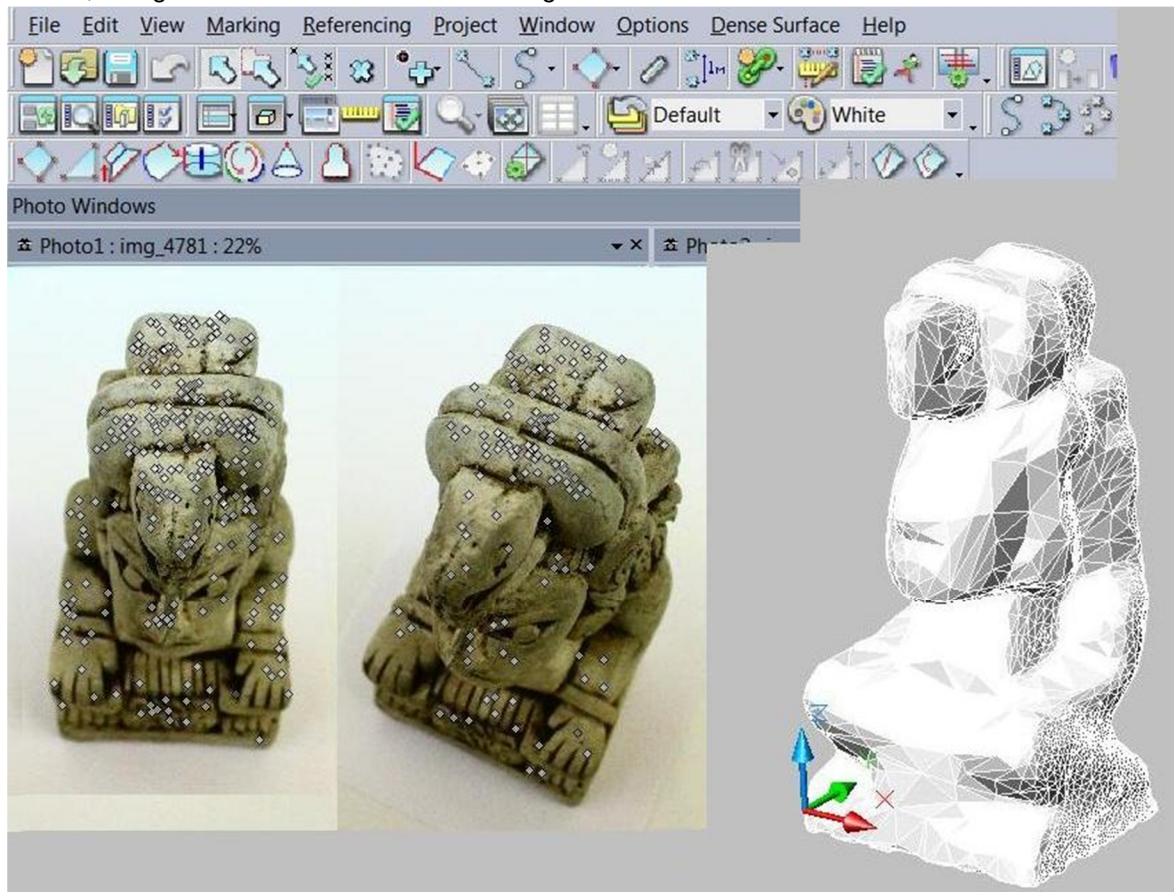


Figura 7.3. Obtención de información vectorial por el sembrado de marcas, caso bastidores de alambre para importarse desde modeladores CAD.

7.2 Recursos de monitoreo dimensional

Los recursos de reconstrucción tridimensional presentados, no garantizan por si mismos su habilidad para determinar pequeñas distorsiones o deslizamientos, para ello deben establecerse estrategias de evaluación.

Previamente para este campo de aplicaciones el grupo académico de Ingeniería de Precisión y Metrología ha desarrollado: Patrones viajeros, Software de calibración de cámaras; Software de reconstrucción tridimensional por imagen punto a punto, y de aristas y contornos; Software de medición 3D que incluye: generación de de formas planas, sólidos, formas libres, creación de sistemas locales de referencia, relaciones geométricas entre objetos, generación de objetos CAD; Software de edición de formas libres. Ver figuras 7.4 a 7.11.

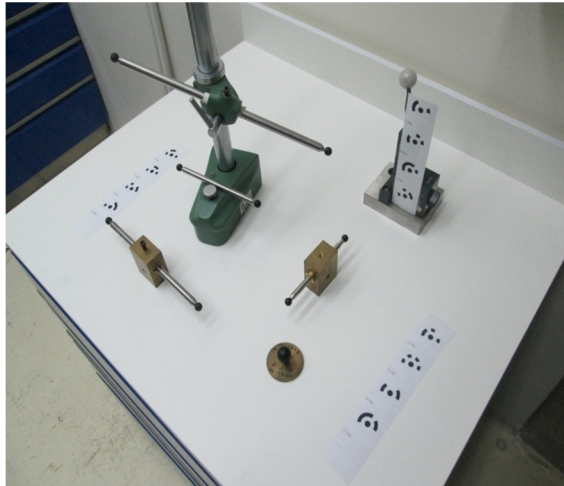


Figura 7.4. Patrones viajeros que se siembran junto al objeto por evaluar dimensionalmente (edificios, monumentos), lo que permitirá aplicar correcciones o verificar la exactitud de métodos en aplicaciones particulares.



Figura 7.5. Segmento de la Interfaz de medición Str_Img que muestra: cubo u objeto a medir, vernier de verificación, comandos, selección de regiones (punto en esquina central), sub-imagen filtrada por contraste.

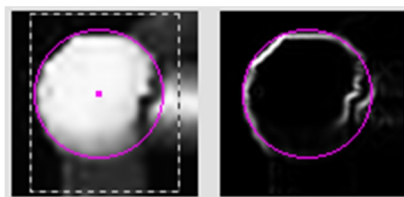


Figura 7.6. Procesamiento de círculos circunscritos en círculos degradados. Permite recuperar posición de centros y contornos en oquedades referencia

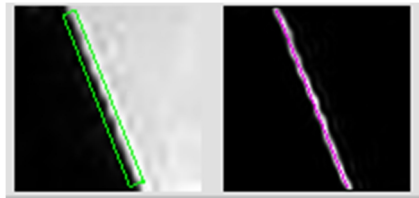


Figura 7.7. Señalamiento de aristas y obtención rectas para determinación de aristas 3D. La determinación de aristas en objetos arqueológicos permite editarlos, o definir posiciones de referencia para localización, o para evaluación de desgaste.

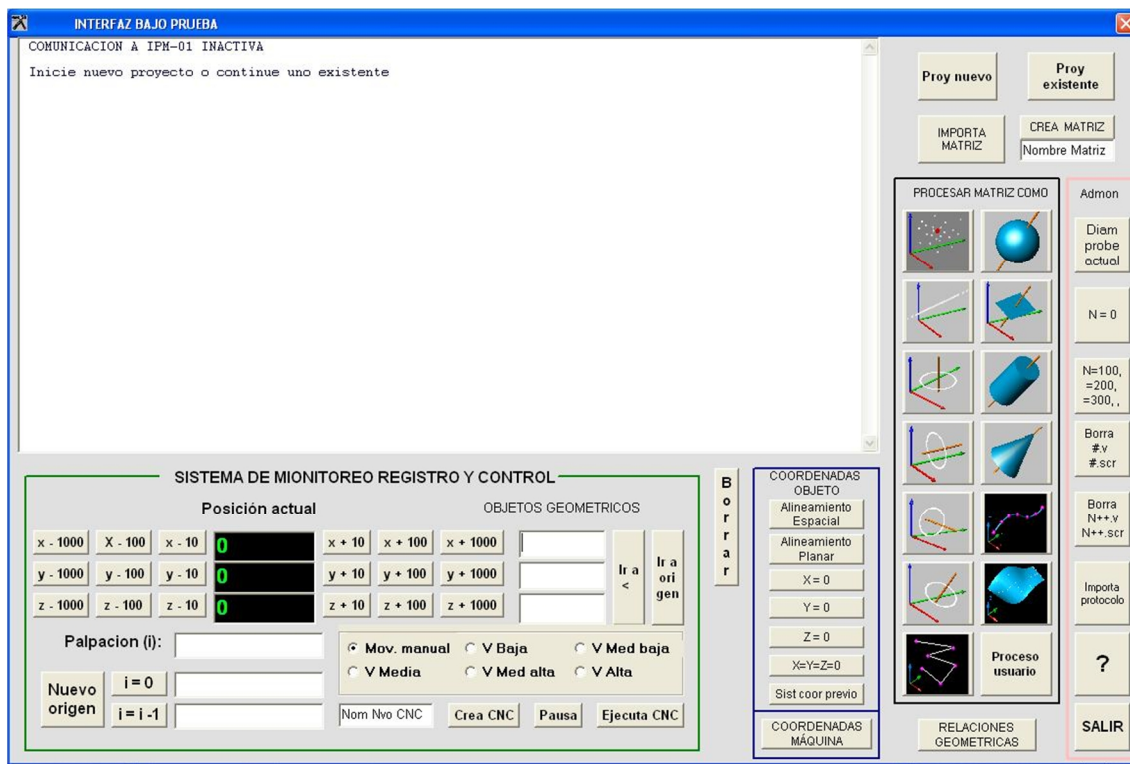


Figura 7.8. Interfaz de medición Met-3D de procesamiento geométrico. Permite procesar formas libres (frente, mejilla, labios, .) a partir de vectores 3D, ubicarla respecto de objetos referencia o establecer relaciones geométricas.

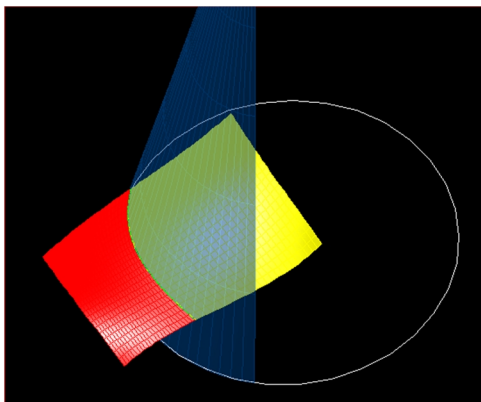


Figura 7.9. Intersección y segmentación de forma libre con cono. Permite seleccionar regiones interiores de formas más extensas, y obtener información de curvatura, diseño de cubiertas o guardas, comparación de regiones.

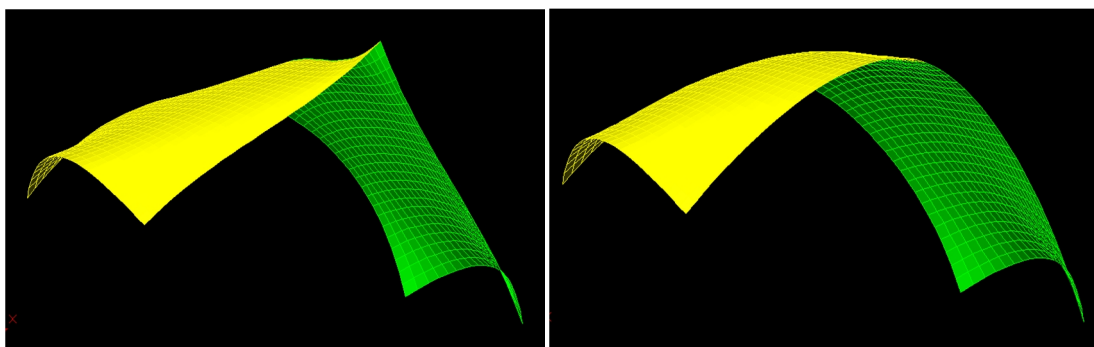


Figura 7.10. Edición de segmentos de formas libres para continuidad y tangencia. Permitirían ensamblar segmentos de forma libre pertenecientes a regiones adjuntas, por ejemplo labios y mentón.

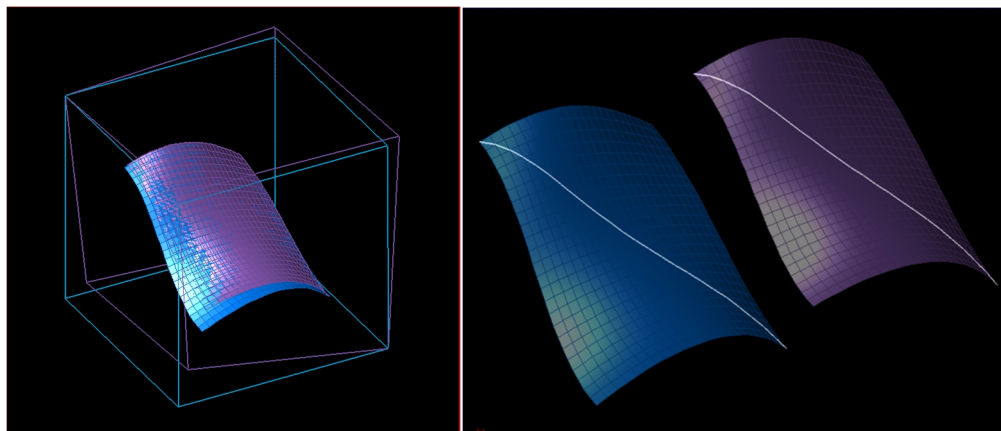


Figura 7.11. Distorsión simulada de un parche de forma libre. Permitiría evaluar semejanza entre segmentos de piezas arqueológicas originales y réplicas.

7.3 Evaluación de recursos por estereometría

Como epílogo de este resumen técnico de los recursos de estéreo-fotografía para fines arqueológicos, se pueden señalar:

- Son recursos de muy bajo costo, de fácil manejo, y exactitud comparable a la de escaneadores laser.
- Permite el trabajo en paralelo y complementario para registro de objetos arqueológicos, por estudiantes de nivel bachillerato, o licenciatura, o por personal con capacitación técnica básica.
- El tema y los avances tecnológicos mostrados, son estimulantes para la realización de tesis de investigación sobre el desarrollo de nuevas herramientas y aplicaciones, tanto para posgrados en ciencias exactas como en humanidades.

Conclusiones

A partir del dictamen realizado por el MNA en el 2011 sobre el estado de conservación que guardaba el Monolito de Tláloc de Coatlinchán, surgieron seis aspectos de interés relacionados con:

1. Fisuras y exfoliación de la piedra.
2. Aguas residuales.
3. Agentes biológicos.
4. Manchas en superficie.
5. Sales.
6. Soporte.

A partir de los cuales se propuso trabajar conjuntamente entre el MNA y la UNAM integrando un grupo de trabajo multidisciplinario para proponer soluciones, desarrollar metodologías de análisis de imágenes y materiales, instrumentación electrónica, reconstrucción 3D y caracterización y desarrollo de materiales compuestos para, en la medida de lo posible, implementarlas directamente sobre el Monolito.

En estos desarrollos trabajaron académicos del Museo Nacional de Antropología (MNA) y de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) de manera coordinada y multidisciplinaria con el objetivo de resolver un problema complejo dado el poco margen de maniobra que ofrece una obra escultórica que es patrimonio de la nación.

Se elaboraron diversos experimentos y caracterizaciones con el objetivo de verificar el desempeño de los desarrollos alcanzados y se verificó su viabilidad y confiabilidad para implementar las técnicas empleadas directamente sobre el monolito sin que éste presente alteraciones estéticas o estructurales.

Se utilizaron técnicas y equipos propiedad del UNAM y del MNA lo cual demuestra la utilidad de estos desarrollos utilizando sus capacidades e infraestructura propias.

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración de la Dra. María Soledad Córdova Aguilar del Grupo de Ingeniería de Procesos por la obtención de las curvas de viscosidad de la sección 4 del presente informe. También agradecen la colaboración de la estudiante de licenciatura de la Fac. de Química de la UNAM, Mariana García Ruiz por su amplia participación en la sección 4 de este informe.

Referencias Bibliográficas

Analog Devices (2015) Precision Triaxial Inclinator and Accelerometer with SPI. Analog Devices Inc.

Artoli G. (2007) Crystallographic texture analysis of archaeological metals: interpretation of manufacturing techniques, **Appl. Phys. A 89, Materials Science & Processing**, pp 899–908.

Beyerer J., Puente León F. (2016) Frese Christian. Texture Analysis. Chap. 13, in **Machine Vision**. Springer-Verlag Berlin. pp 649-683.

Brinker C. J., Scherer G. W. (1990) Academic Press, Inc. **SOL-GEL SCIENCE: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing**. United States of America.

Bunge, H. J. (2013) Texture Analysis in Materials Science: Mathematical Methods. Butterworth-Heinemann; 2nd edition.

Corkidi G., Vega L., Márquez J., Rojas E., Ostrovsky-Wegman P. (1998) Roughness Feature of Metaphase Chromosome Spreads and Nuclei for Automated Cell Proliferation Analysis. **Medical and Biological Engineering and Computing**. Vol. 36 (6), pp. 679-685.

De Jong Steven M and van Der Meer Freek D. (editors) (2004). Remote Sensing and Digital Image Processing, Springer.

Earl G., Martinez K., Malzbender T. (2010) Archaeological applications of polynomial texture mapping: analysis, conservation and representation. **Journal of Archaeological Science**, Volume 37, Issue 8, Pages 2040–2050.

Engler O. y Randle V. (2009) Introduction to Texture Analysis: Macrotexture, Microtexture, and Orientation Mapping, Second Edition.

Flores J. O. (2008) Obtención de sonogel de SiO₂ en ausencia de catalizadores. Tesis doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México.

Gelb A. (1997) The Resolution of the Gibbs Phenomenon for Spherical Harmonics. **Mathematics of Computation**, Vol. 66, Num. 218, pp. 699-717.

Gonçalves L. B. y Leta F. R. (2010) Macroscopic Rock Texture Image Classification Using a Hierarchical Neuro-Fuzzy Class Method. **Mathematical Problems in Engineering**. Volume 2010, Article ID 163635, pp 1-23.

Haralick R. (1979) Statistical and structural approaches to texture, **Proceedings of the IEEE**. 67(5), 786–804.

Heilbronner R. y Barrett S. (2014) Image Analysis in Earth Sciences: Microstructures and Textures of Earth Materials, Lecture Notes in Earth Sciences (Book 129) Springer.

Heizer, R. F. & Williams, H. (1965) Stones Used for Colossal Sculpture at or Near Teotihuacan, **Contributions of the University of California Archaeological Research Facility**, septiembre, Sources of Stones Used in Prehistoric Mesoamerican Sites (1), pp. 55-70.

Klein, L. C., Noyes Publications (1988) Sol-gel technology for thin films, fibers, preforms, electronics, and special shapes, 1st Edition, New Jersey, USA.

Leach R. (Editor) (2016). Characterisation of Areal Surface Texture, Springer.

Lepistö L., Kunttu I., Autio J., y Visa A. (2003) Rock Image Classification Using Non-Homogenous Textures and Spectral Imaging. In **proceedings: WSCG**, February 3-7, Czech Republic.

Lepistö L., Kunttu I., Autio J., y Visa A. (2003) Data mining on non-homogenous textures, Data Mining and Knowledge Discovery: Theory, Tools, and Technology V, **Proceedings of SPIE**, Vol. 5098, pp. 1-9, Orlando, Florida, USA, Apr. 21.-22.

Lepistö L. (2006), Colour and Texture Based Classification of Rock Images Using Classifier Combinations, PhD Thesis, Tampere University of Technology, Publication 593.

Linx Technologies (2000a) LC series transmitter module data guide. Linx Technologies.

Linx Technologies (2000b) LC series receiver module data guide. Linx Technologies.

Marquez J., (2016a). Procesamiento y Análisis Avanzados de Imágenes en 2D y 3D. Notas de curso semestral en el Posgrado en Ciencias e Ingeniería de la Computación, UNAM.

Marquez J. (2016b) Análisis Textural en 2D Global, Local y Adaptivo: Descriptores de Matrices de Co-ocurrencia. Informe Técnico Interno. En preparación.

Marquez J. (2017a) Texture Characterization and Analysis. Tutorial I - version 3.5. Image Analysis and Visualization Laboratory. En: CCADET-UNAM.

Marquez J. (2017b). Extracción y Análisis de Texturas Geodésicas en Piezas Arqueológicas. Caso de Estudio: el Monolito de Tláloc de Coatlinchán. Resultados Preliminares. Reporte Técnico. En preparación.

Microchip (2010) PIC18F23K20/24K20/25K20/26K20/43K20/44K20/45K20/46K20 Data Sheet. Microchip Technology.

Microchip (2009a) PICkit™ 3 Debug Express PIC18F45K20 – MPLAB® C Lessons. Microchip Technology.

Microchip (2009b) PIC Microcontroller Low PowerTips 'n Tricks. Microchip Technology.

Mirmehdi M. y Xie X. (2008) Handbook of Texture Analysis. Oct 28, ICP.

Petrou M., Garcia S. P. (2006). Image Processing: Dealing With Texture 1st Ed, Wiley.

Texas Instruments (2014) MAX232x Dual EIA-232 Drivers/Receivers. Texas Instruments.

Trasatfi S. y Parsons R. (1986) Interphases in systems of conducting phases (Recommendations 1985), **Pure & Appl. Chem.**, Vol. 58, No. 3, on page 437-454.

Woong D. H., Seon H. P., Woon S. C. et al. (2013) A Wireless MEMS-Based Inclinometer Sensor Node for Structural Health Monitoring. **Sensors**; 13: 16090-16104.

Yardley B. W., MacKenzie W. S., Guilford C. (1996) Atlas of Metamorphic Rocks and Their Textures 1st Edition, Longman Scientific & Technical; 1 edition.