
GENERACIÓN DE MODELOS TRIDIMENSIONALES DE PIEZAS ARQUEOLÓGICAS PARA EL MUSEO VIRTUAL DE ARQUEOLOGÍA SUBACUÁTICA (MAS)

Flor de María Trejo Rivera

INTRODUCCIÓN

El patrimonio cultural sumergido, es decir, los vestigios materiales localizados bajo el agua o asociados a cuerpos de agua, no ha sido valorado como el vehículo que nos permite reconocer un pasado íntimamente vinculado con los entornos acuáticos. Posiblemente, el mayor obstáculo sea la manera en que se visualizan los hallazgos de restos de embarcaciones hundidas. La imagen del tesoro pervive anclada en lo más profundo del imaginario colectivo y, como consecuencia, los rastros de aquellas épocas de navegación a vela evocan historias de piratas, tragedias y riquezas, dejando enterrada la posibilidad de reconocer también nuestra historia marítima. En ese tenor surgió el proyecto de hacer una plataforma en línea para compartir el conocimiento sobre el patrimonio cultural sumergido. El proyecto Museo Virtual de Arqueología Subacuática (MAS) pretende acercar tanto al público no especializado como a investigadores a la disciplina que estudia este tipo de patrimonio y sensibilizar sobre su importancia y protección, con el fin de añadir el elemento acuático a nuestra historia e identidad. En esencia, se trata de seducir e invitar a navegar, a través de un espacio virtual, el mundo de la arqueología subacuática (figura 1).

Una de las herramientas que se emplearán en el MAS es la posibilidad de ver las piezas en 3D. A través del Laboratorio de Imagen y Análisis Dimensional (LIAD) de la Coordinación Nacional de Monumentos Históricos del Instituto Nacional de Antropología e Historia (CNMH-INAH), se digitalizaron las 70 piezas que forman parte de la colección del museo virtual. En este trabajo se expondrá la experiencia en la digitalización del patrimonio cultural sumergido y su potencial para explorar detalles y facilitar su conocimiento.



Figura 1. Balas de mosquete en el pecio Carron, Cayo Nuevo, Sonda de Campeche, México, INAH-SAS, Jerónimo Avilés Olguín.



ARQUEOLOGÍA SUBACUÁTICA: LA RELACIÓN DEL HOMBRE CON EL AGUA

Las grandes superficies de agua, como los mares, lagos, ríos y cenotes, han resguardado en sus profundidades vestigios materiales de las actividades del hombre asociadas con prácticas comerciales, rituales o de carácter tecnológico. En otras palabras, diversos grupos sociales en su quehacer cotidiano, como proveerse del vital líquido, transportarse o mantener un nexo con ciertas deidades vinculadas con el medio acuático, dejaron una huella material que permite estudiar, desde la disciplina de la arqueología subacuática, la manera en que el hombre, en diferentes momentos y lugares enfrentó el reto de cruzar grandes extensiones de agua e integró este elemento a su cosmovisión.

La arqueología subacuática es una especialidad relativamente reciente. El simple hecho de estudiar objetos sumergidos o asociados a cuerpos de agua la relaciona estrechamente con el desarrollo del buceo autónomo. El ambiente líquido no ha representado un obstáculo infranqueable para obtener recursos para la alimentación, como peces y moluscos, o para efectos ornamentales, como la recuperación de perlas y corales. También el rescate de restos de embarcaciones accidentadas era una práctica posible durante los siglos XVI al XVIII, siempre que los restos estuvieran a una profundidad no mayor a 10 m aproximadamente (figura 2). Así, las inmersiones submarinas desde siempre han tenido alicientes suficientemente poderosos, con lo cual la exploración subacuática es remota en el tiempo. Sin embargo, fue a partir de la invención y uso del equipo de buceo autónomo como surgió la plataforma tecnológica para abrir el mundo subacuático a la exploración sistemática.¹

La especialidad para hacer arqueología bajo el agua se instauró en el INAH en 1980, detonada por la recuperación de una pieza de artillería del siglo XVI temprano en Cayo Nuevo, Sonda de Campeche.² Desde entonces, y a lo largo de 35 años, se ha investigado la presencia de restos culturales sumergidos en diferentes clases de cuerpos de agua, donde es evidente la riqueza de nuestro país en este tipo de patrimonio.³ México posee abundantes recursos acuáticos,

1 El equipo de buceo autónomo, conocido como SCUBA por sus siglas en inglés, inició prácticamente después de la Segunda Guerra Mundial con la invención del equipo *Aqua Lung*, diseñado por Cousteau y Gagnan, con el cual el buzo podía sumergirse con mayor facilidad y sin dificultades respiratorias. Juan Ivars Perelló, Tomás Rodríguez Cuevas, *Historia del buceo. Su desarrollo en España*, Murcia, Ediciones Mediterráneo, 1987, pp. 137-139.

2 "Proyecto de creación del Departamento de Arqueología Subacuática 1979", Instituto Nacional de Antropología e Historia, en Archivo Técnico de la SAS; Pilar Luna Erreguerena, "Pasado, presente y futuro de la arqueología subacuática en México", en P. Luna Erreguerena, Rosamaría Roffiel (coords.), *Memorias del Congreso Científico de Arqueología Subacuática*, ICOMOS, México, Instituto Nacional de Antropología e Historia, 2001, pp. 39-49.

3 Pilar Luna Erreguerena, "The submerged cultural heritage in Mexico", en Margaret E. Leshikar-Denton y P. Luna Erreguerena (eds.), *Underwater and Maritime Archaeology in Latin American and the Caribbean*, Walnut Creek, Left Coast Press, 2008, pp. 55-65.

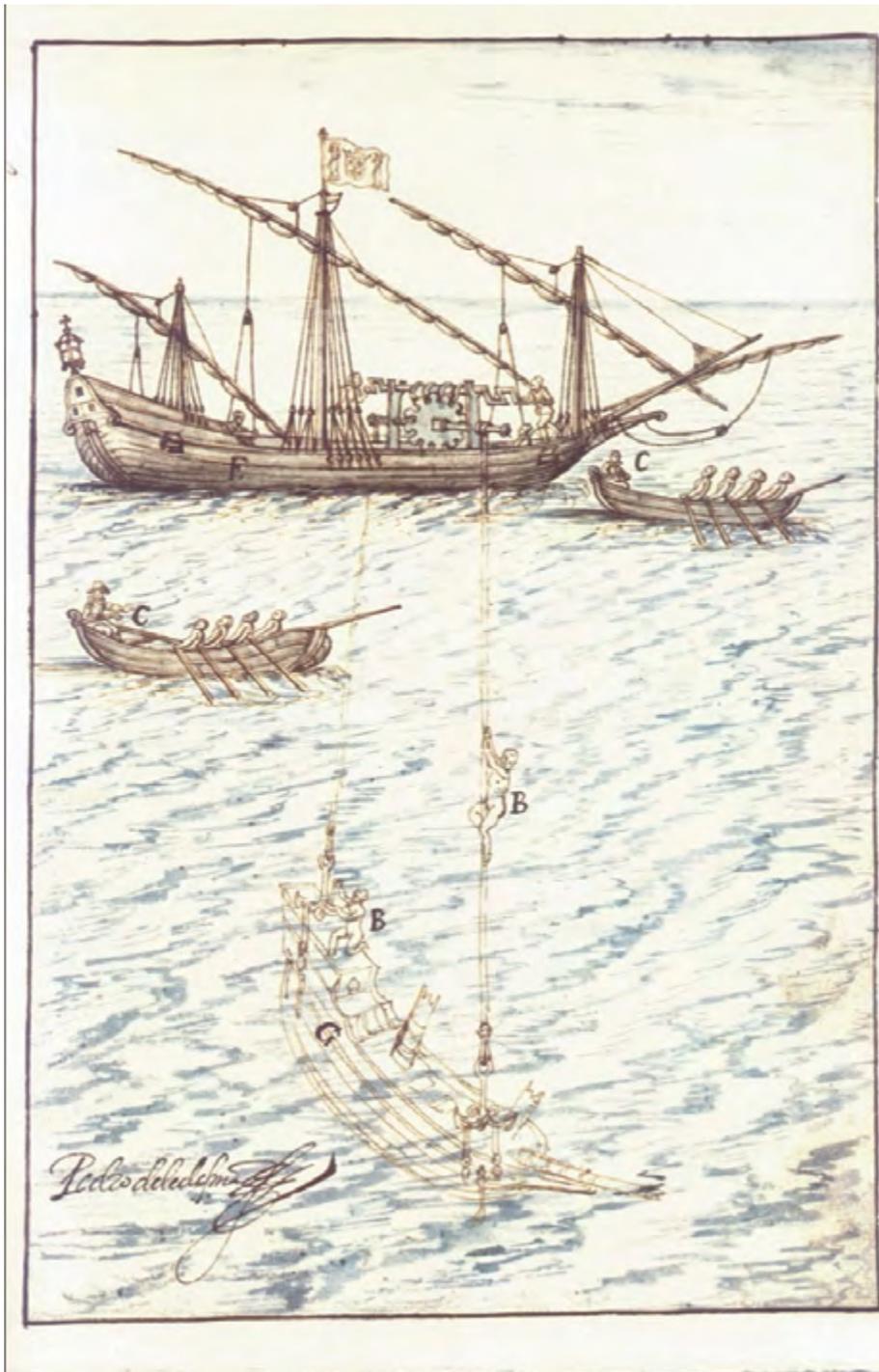


Figura 2. Ilustración sobre la recuperación de un barco hundido en el siglo xvii. Pesca de perlas y busca de galeones (1623).



los cuales se dividen para su estudio en aguas epicontinentales, subterráneas y marinas. Desde el interés arqueológico, estos tres grandes contextos acuáticos son áreas potenciales de estudio, pues representan tanto un recurso indispensable para la subsistencia, como es la obtención del líquido para beber y otras necesidades tanto agrícolas como de la vida cotidiana, como un entorno con significado sagrado y una frontera que puede ser traspasada con el uso de vehículos diseñados para flotar. En ese sentido, al ser un ámbito donde el hombre siempre ha realizado actividades, es evidente que bajo el agua se encontrarán vestigios de diferentes acontecimientos sociales. Así, la arqueología bajo el agua, aunque persigue los mismos propósitos que la que se hace en tierra, debe aplicar metodologías de prospección, registro y conservación particulares, adaptadas a un medio donde el principal reto por resolver es la obtención continua de aire para respirar, en el caso de las actividades arqueológicas efectuadas mediante buceo.⁴

Las aguas epicontinentales, es decir, aquellas que se encuentran sobre la superficie, como son los ríos, lagos, lagunas, presas y algunos tipos de cenotes, por lo general son espacios potenciales de ritualidad, en particular, los lagos, lagunas y cenotes. Como muestra del tipo de patrimonio cultural y su significado en relación con estos cuerpos de agua, los casos del manantial de la Media Luna en San Luis Potosí y el Nevado de Toluca en el estado de México son ejemplos del significado simbólico del agua en Mesoamérica. Como resultado de las investigaciones realizadas en la Media Luna en los años ochenta del siglo pasado, se obtuvo material paleontológico y arqueológico. En lo concerniente a los vestigios prehispánicos, se registraron ofrendas con figurillas antropomorfas de cerámica, posiblemente relacionadas con los sitios de El Tajín y Teotihuacan, y restos óseos de dos infantes.⁵ En lo que toca a los lagos en las montañas del Nevado de Toluca, los materiales hallados, como copal, puntas de maguey y madera en forma serpentina, son muestra de la compleja relación entre las montañas y el agua en la cosmovisión prehispánica.⁶

4 Flor Trejo Rivera, *Arqueología bajo el agua*, México, Fundación Cultural Armella Spitalier, 2009.

5 Pilar Luna y Juan Rique, "Reporte del proyecto de prospección y muestreo de superficie y subacuático en el área del Manantial de la Media Luna, S. L. P., Temporada 1981", mecanoscrito, Archivo Técnico de la SAS, 1982.

6 Roberto Junco, Silvina Vigliani, "Informe del proyecto Arqueología subacuática en el Nevado de Toluca", SAS-Instituto Nacional de Antropología e Historia, 2010, Archivo Técnico de la SAS; Margarita Loera Chávez y Peniche, "Introducción", en M. Loera Chávez y Peniche *et al.* (coords.), *América, tierra de montañas y volcanes*, México, Instituto Nacional de Antropología e Historia, 2012, pp. 7-11.

Por lo que respecta a los vestigios localizados en el mar, todos corresponden a restos de embarcaciones accidentadas, desde el siglo *xvi*, hasta el siglo *xx*. Aunque durante el periodo prehispánico se hacía navegación, por desgracia, al ser las canoas de un material perecedero: madera, no se han encontrado restos bajo el agua. Sin embargo, en algunas excavaciones terrestres se han recuperado desde canoas completas hasta fragmentos de este tipo de vehículos, lo cual ha permitido abundar en el conocimiento de la tecnología náutica de este periodo tanto en el mar como en lagos y ríos.⁷ Así, para el Museo virtual de Arqueología Subacuática se escogieron piezas de diversos proyectos de arqueología marítima efectuados en el Golfo de México, Veracruz, el Caribe mexicano y el Pacífico, en Baja California. En el estudio del patrimonio cultural sumergido resulta interesante la distinción entre los vestigios prehispánicos, de carácter ritual en su mayoría, y los restos del periodo colonial recuperados del mar. Las anclas, cañones, fragmentos de embarcaciones, piezas de instrumentos náuticos, vestigios de la carga y mercancía dan cuenta del gran paso tecnológico en el diseño de las embarcaciones para las travesías de larga duración en medio de grandes extensiones de agua y sin ver tierra durante un tiempo prolongado. Por ejemplo, mientras que en Baja California se encuentran los restos de un galeón de Manila del siglo *xvi*, cuyo estudio nos permite abundar sobre los contactos comerciales tempranos entre la Nueva España y Filipinas, en la otra vertiente, en la cara del Golfo de México y el Caribe, los numerosos restos de accidentes navales, ocurridos a lo largo de más de tres siglos, evidencian un intenso proceso de navegación y redes tanto portuarias como comerciales, un flujo constante de personas y, por lo tanto, un intercambio cultural reflejado en la cultura material a bordo de las embarcaciones (figura 3).

7 Como ejemplo, véanse los trabajos de Alfredo Delgado Calderón, "La navegación en el México Antiguo", en Daniel Maawad (ed.), *México y su mar*, México, Coordinación General de Puertos y Marina Mercante, 2009, pp. 25-61.



Figura 3. Registro arqueológico en el pecio *Ginger Soul*, Banco Chinchorro, México, INAH-SAS (Fotografía: Patricia Carrillo Medrano).



NAVEGANDO EN UNA PLATAFORMA VIRTUAL

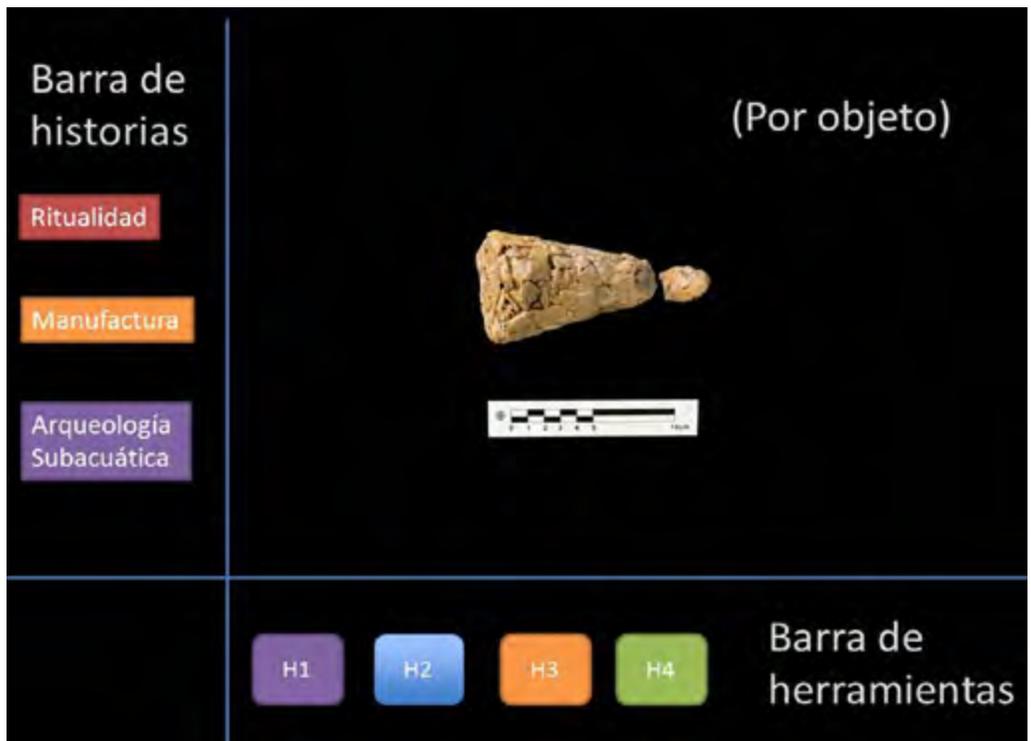
La arqueología subacuática es una disciplina fascinante, y la atracción se extiende hacia las historias que puede contar a través de los objetos rescatados bajo el agua. Como se ha mencionado, hacer arqueología subacuática requiere en principio de conocimientos de buceo, técnicas de registro en condiciones de corrientes, de poca visibilidad y, en ocasiones, de profundidades significativas. A ello se le suma que, por cuestiones de conservación y estabilidad de los objetos, e incluso por falta de presupuesto, como es el caso de algunos restos de naufragios, estos se conservan *in situ*, con lo cual el acceso a este tipo de patrimonio se reduce prácticamente a unos cuantos privilegiados.

Con la finalidad de acercar a un público más amplio, e incluso a otros especialistas en disciplinas afines, a los resultados de las investigaciones efectuadas, se diseñó un proyecto para hacer una plataforma virtual y tener un espacio donde compartir de manera didáctica el conocimiento generado a lo largo de tres decenios por la Subdirección de Arqueología Subacuática. Con esta premisa se inició el proyecto Museo virtual de Arqueología Subacuática (MAS) con los siguientes objetivos:⁸

- 1) Compartir la colección de patrimonio cultural sumergido.
- 2) Facilitar el conocimiento del patrimonio cultural sumergido para su valoración y protección.
- 3) Enriquecer la identidad nacional reconociendo y considerando lo inmaterial del patrimonio cultural sumergido.

El reto para generar el concepto de la plataforma se enfocó en las ventajas del medio en el cual se iba a desarrollar, es decir, lo virtual. Al no tener la limitación del espacio físico ni la restricción de un recorrido guiado a lo largo de salas, diseñamos una interfaz donde el visitante puede acceder a la información, ya sea por historias o por objeto, como puede apreciarse en las figuras 4 y 5.

8 Flor Trejo Rivera, Gabriel Gaytán-Ariza, "Museo Virtual de Arqueología Subacuática", en *Memorias del Primer Congreso Internacional el Patrimonio Cultural y las Nuevas Tecnologías. Una Visión Contemporánea*, documento electrónico disponible en < www.pcnt.inah.gob.mx/pag/index.php>, consultado en agosto del 2016.



Figuras 4 y 5. Ejemplo de interfaz conceptual donde el acceso es posible a través de historias o por objeto, INAH-SAS, Flor Trejo y Gabriel Gaytán.



Es decir, el visitante puede crear su propio recorrido de acuerdo con el incentivo generado en la aplicación de las diversas herramientas con que cuenta la interfaz. El itinerario a partir de historias está diseñado inicialmente en cuatro salas: ritualidad, manufactura, navegación y arqueología subacuática. La selección temática se concibió en correspondencia con los objetos que conforman la colección del MAS, es decir, con el tipo de información que estos podrían proporcionar, donde la mayoría de los datos fueran representativos en áreas específicas. Se buscó que todos los objetos pudieran ser actores, en la medida de lo posible, en todas las salas, con el fin de poder construir una historia a diferentes voces. Como se verá con mayor detalle en párrafos posteriores, los mismos objetos fueron los que dieron la pauta para constituir las áreas temáticas de estudio. Las salas de manufactura y arqueología subacuática tienen la característica de contener a todos los objetos, ya que, evidentemente, son temas que atraviesan toda la cultura material de la plataforma diseñada. Por otro lado, las áreas de ritualidad y navegación no abrigan la posibilidad de incluir a todos los objetos, pues son ejes que no es posible hacer coincidir, al menos desde las piezas que se han recuperado en las investigaciones de la Subdirección de Arqueología Subacuática. Así, la misma división temática permite comprender que, en términos de cultura material, las piezas prehispánicas asociadas con cuerpos de agua están vinculadas con aspectos de cosmovisión y en un diálogo con las deidades acuáticas, mientras que el patrimonio cultural sumergido recuperado en el mar representa fragmentos de la relación del hombre con el mar en su fase tecnológica, es decir, el barco.

RITUALIDAD

En esta categoría se agruparon los objetos que por su uso concernieran a prácticas asociadas con rituales de agradecimiento o petición a dioses del agua, así como piezas localizadas en cuerpos de agua, como lagos y cenotes, donde la presencia de estos restos culturales estuviera vinculada con el significado e importancia del agua para las sociedades que produjeron dicho objeto. Por lo tanto, vestigios del lago de la Luna del Nevado de Toluca, la laguna de la Media Luna y de cenotes de la península de Yucatán fueron concentrados en esta sala, para contar historias sobre cómo en la época prehispánica existía un vínculo fuerte con las deidades de la lluvia, reflejado en las ofrendas depositadas en estos cuerpos de agua⁹ (figura 6).

9 Élodie Dupey, "Ritualidad entre las sociedades nahuas", texto introductorio para la sala de Ritualidad que estará en el Museo de Arqueología Subacuática, inédito, Archivo Técnico de la SAS.



Figura 6. Madera en forma serpentina extraída del lago de la Luna en el Nevado de Toluca, estado de México, INAH-SAS (Fotografía: Patricia Carrillo Medrano).

▲

MANUFACTURA

Resulta muy enriquecedora la reflexión en torno del tema de cómo fueron elaborados los objetos de culturas pasadas. En los museos físicos las cédulas de las piezas en ocasiones proporcionan información acerca de la técnica de manufactura del objeto en exhibición, sin embargo, la mayoría de las veces resulta un dato desperdiciado, ya que el visitante solo puede darse una idea vaga del proceso mencionado en la cédula si los términos le resultan conocidos. Aprender con mayor detalle cómo se hacía un objeto en cierta época, qué materiales se empleaban, cómo se obtenían y las técnicas para su elaboración permiten generar en el usuario de la plataforma un conocimiento indispensable para que aprecie y valore en una dimensión más amplia el objeto que observa. Esa valoración, por consecuencia, deriva en la apropiación del objeto como parte de su patrimonio cultural, con lo cual se enriquece la experiencia del visitante. Esta sala contendrá materiales cerámicos, de madera, metálicos y de roca, y, en conjunto con ello, se podrán conocer aspectos de la historia de la tecnología en la cultura material (figura 7).



Figura 7. Vaso cerámico proveniente del cenote Izah, Yucatán, INAH-SAS.

▲

NAVEGACIÓN

El barco fue aun hasta antes del avión la maquinaria más compleja diseñada para el transporte. Cada pieza que lo compone representa un segmento de un rompecabezas de madera y metal que para su reconstrucción se requieren años de estudio e investigación. En la sociedad actual, donde el avión sustituyó el vehículo cotidiano para las largas travesías, la navegación resulta un tema bastante alejado de nuestra manera de concebir el espacio, el tiempo y la tecnología. En esta sala, fragmentos de embarcaciones, producto de accidentes navales, así como restos de instrumentos náuticos y material bélico, darán cuenta de la historia de la relación del hombre con el mar, el naufragio y el barco como la prolongación en el mar de una sociedad en expansión (figura 8).



Figura 8. Balancín de brújula proveniente de un naufragio de galeón de Manila, siglo XVI, INAH-SAS (Fotografía: Patricia Carrillo Medrano).

▲

ARQUEOLOGÍA SUBACUÁTICA

¿Cómo se accede a los restos que yacen bajo el agua? ¿Se aplican ahí las mismas técnicas de registro y excavación que en tierra? ¿Es posible identificar un objeto rodeado del coral? La arqueología subacuática, al ser una especialización relativamente nueva, despierta cierta curiosidad por saber cómo trabaja un arqueólogo bajo el agua, tema que, al igual que la sala de manufactura, abre una ventana para que el visitante, en inmersión con el investigador, valore el patrimonio cultural sumergido como un vestigio producto de nuestro pasado y no como un tesoro con valor comercial. La riqueza de la sala de arqueología subacuática consiste, además, en poder apreciar diferentes contextos subacuáticos y, por

consecuencia, las distintas técnicas que se deben aplicar en diversos cuerpos de agua como los mencionados: cenotes, lagos y lagunas, ríos y el mar a variadas profundidades. Es necesario señalar que esta sala temática se extiende más allá de las técnicas de prospección y registro subacuático, abarcando también otras disciplinas que participan en el estudio de la relación del hombre con el agua, como son la historia, la antropología, la geografía, la geofísica y la oceanografía, entre otras.

Las herramientas concebidas para promover el acercamiento, comprensión y valoración del patrimonio cultural sumergido comprenden desde la posibilidad de compartir la información técnica de la pieza, hasta aquellas que permitan generar conocimiento a partir de las propias inquietudes y necesidades de los visitantes.

Como puede apreciarse en el cuadro 1, las herramientas son estrategias para involucrar al visitante en el significado del objeto, más allá de su valor estético. Se pretende crear la sensación de entrar en el laboratorio del especialista y seguir de cerca los numerosos pasos que conlleva una investigación, con el fin de comprender el contexto arqueológico de donde proviene la pieza, las diversas disciplinas que participan en la interpretación y, gracias a ello, la importancia de la interdisciplinariedad, su valor como patrimonio cultural y, en un sentido más amplio, su significado dentro de una cultura vinculada íntimamente con el agua.

Dentro del paquete de herramientas, la digitalización 3D de las piezas es un dispositivo con mucho potencial, como se explicará a continuación.

COMPARTIR EL CONOCIMIENTO Y VALORAR EL PATRIMONIO CULTURAL: DIGITALIZACIÓN 3D

El registro gráfico del patrimonio cultural es una preocupación añeja de la arqueología, la conservación y la restauración. La fotografía y el video resultaron medios que, aunque no desplazaron el dibujo arqueológico, verdaderamente se volvieron herramientas indispensables —más rápidas y fieles— para la anotación y la interpretación de los vestigios. Sin embargo, eran imágenes bidimensionales, por lo cual el empleo de escáneres láseres a finales de los años noventa del siglo pasado potencializó y ofreció grandes ventajas para el estudio y conservación del patrimonio cultural, ya que permitían modelos con coordenadas x , y , z , es decir, tridimensionales, contruidos a partir de una nube de puntos y un registro fidedigno con precisiones de décimas de milímetro.¹⁰ Como suele suceder con

10 Juan Gabriel Jiménez *et al.*, "Digitalización 3D y difusión en web del patrimonio de las universidades andaluzas mediante X3D y WebGL", *Virtual Archaeology Review*, vol. 3, núm. 7, diciembre de 2012, pp. 55-56; J. C. Torres *et al.*, "Aplicaciones de la digitalización 3D del patrimonio", *Virtual Archaeology Review*, vol. 1, núm. 1, 2010, pp. 51-53.

HERRAMIENTA	OBJETIVO	FUNCIÓN
Ficha técnica	Informar datos técnicos del objeto	Proporcionar información tanto a especialistas como a público neófito
Zoom	Mostrar detalles de la pieza a un nivel que es imposible en un museo físico	Generar la sensación de que se puede tocar el objeto
Glosario	Explicar términos y conceptos propios de un vocabulario especializado	Incrementar el universo de palabras del visitante
Contextualización <ul style="list-style-type: none"> • Sonido • Ubicación espacial • Literatura 	Incrementar conocimiento sobre el objeto a partir de los sentidos	Crear la sensación —con cada objeto será diferente— de una caja de sorpresas. En esta herramienta puede haber sonidos, mapas, textos literarios, etc.
Video	Informar al visitante sobre otros aspectos del objeto	Mostrar técnicas de registro, de conservación, datos antropológicos, históricos, arqueológicos o iconográficos del objeto y su significado social
Documentos relacionados	Proporcionar información académica	Facilitar textos con rigor académico que puedan ser empleados para investigaciones afines o trabajos escolares
Objetos similares	Llevar al visitante a otros recintos culturales	Presentar otros objetos relacionados con el objeto mostrado: pueden ser objetos asociados por su función y significado social u objetos similares en otros museos
Comparación	Distinguir similitudes y diferencias entre dos objetos	Comparar dos objetos de la colección
Objetos relacionados	Facilitar la exploración de objetos cercanos y parecidos en la colección	Mostrar qué objetos de la colección están cercanos o son parecidos al objeto explorado
Digitalización 3D	Mostrar el objeto en 3D	Permitir la exploración del objeto en tres dimensiones
Impresión 3D	Imprimir el objeto	Permitir la impresión del objeto
Escala	Comprender cuánto mide el objeto	Facilitar la comprensión del tamaño del objeto, comparándolo con uno cotidiano
Línea de tiempo	Ubicar temporalmente al objeto	Mostrar una línea de tiempo que permita ubicar al objeto en relación con otros objetos y acontecimientos
Ubicación	Indicar la localización geográfica del objeto	Mostrar en un mapa la ubicación del objeto
Peso	Comprender cuánto pesa el objeto	Permitir la comprensión del peso del objeto, comparándolo con objetos de peso más familiar y cotidiano

Cuadro 1. Herramientas para enriquecer el conocimiento.



la tecnología, en un principio el escáner láser era un aparato costoso y la información obtenida resultaba difícil de compartir si se carecía de computadoras potentes, debido a los millones de puntos que se registraban. No obstante, las ventajas del empleo de este sistema en el patrimonio cultural eran evidentes, por lo que, conforme se mejoraba la tecnología y el procesamiento de los datos, cada vez más proyectos arqueológicos adoptaron su uso. En el caso particular de México y el INAH, la Coordinación Nacional de Monumentos Históricos, a través del Laboratorio de Imagen y Análisis Dimensional (LIAD), inició en el año 2009 una base de datos de monumentos históricos y arqueológicos emblemáticos del país con modelos digitales tridimensionales.¹¹ El manejo de la tecnología láser en los levantamientos arquitectónicos por parte del LIAD permitió adquirir experiencia en el tema y llevar a cabo proyectos diversos en beneficio de las investigaciones del instituto.¹²

Sin embargo, como ya se mencionó, el escáner láser genera una nube de puntos, por lo cual no resulta adecuado para el registro de objetos pequeños: al efectuar un acercamiento, la imagen se distorsiona y solo pueden observarse los puntos que conforman el objeto. Por ello, para el caso de requerir modelos tridimensionales de objetos arqueológicos se recurre a la fotogrametría digital. Para generar una fotogrametría de un sitio arqueológico, como un pecio, o de un artefacto arqueológico, se requiere efectuar una sesión fotográfica que cubra todo el sitio o el objeto por registrar. Se marcan los puntos de control, que permiten georreferenciar el modelo, y, posteriormente, a través de un *software*, se conectan los puntos comunes de las fotografías tomadas, generando la imagen 3D.¹³ Es decir, la fotogrametría digital es una técnica para generar y procesar de manera semiautomática modelos tridimensionales a partir de fotografías digitales por medio de un *software*. Con ello se pueden obtener las propiedades geométricas del objeto, con lo cual la fotogrametría digital se convierte en una gran herramienta de registro para el arqueólogo.¹⁴

11 Ángel Mora Flores, "El escáner láser, una herramienta tecnológica aplicada al patrimonio arquitectónico", *Boletín de Monumentos Históricos*, tercera época, núm. 24, 2012, p. 171.

12 Por ejemplo, se escanearon las 17 huellas fosilizadas ubicadas en el desierto de Cuatro Ciénegas, Coahuila; el monolito de Tlaltecuhltli, Templo Mayor, Ciudad de México, y el Fuerte de San Juan de Ulúa en Veracruz. Vid. Ángel Mora Flores, *op. cit.*, p. 173.

13 Bruno Parés, "La fotogrametría digital aplicada al patrimonio", *Auriga*, núm. 77, pp. 4-8.

14 Jorge Martínez Huerta, "Fotogrametría digital: un complemento en el registro arqueológico dentro del Proyecto Arqueológico La Quemada (2013-2014)", en *Memorias del Primer Congreso Internacional El Patrimonio Cultural y las Nuevas Tecnologías. Una Visión Contemporánea*, pp. 1-3, documento electrónico disponible en <www.pcnt.inah.gob.mx/pag/index.php>, consultado en agosto del 2016.

Además de la fotogrametría, otra técnica para la obtención de modelos tridimensionales es el empleo de un escáner de luz blanca. En este caso, la medición de la forma del objeto se obtiene a través del análisis de la luz reflejada por la superficie del objeto.¹⁵

En el 2014, a través del programa “Apoyo al fortalecimiento y desarrollo de la infraestructura científica y tecnológica” del Consejo Nacional para la Ciencia y la Tecnología (Conacyt), se inició el proyecto Tecnología 3D por barrido láser aplicada al estudio, protección, conservación, restauración y difusión del patrimonio cultural de México,¹⁶ donde el LIAD pudo actualizar su equipo y adquirir un escáner portátil para la digitalización de piezas arqueológicas. Dentro de los proyectos del INAH beneficiados con el apoyo del Conacyt, el MAS participó en el empleo de un escáner portátil para la generación de modelos tridimensionales de material arqueológico. Por primera vez se abría la oportunidad de digitalizar patrimonio cultural sumergido y de obtener experiencia en el escaneo de piezas provenientes de contextos acuáticos aplicado a la divulgación.

El número inicial de piezas pertenecientes a la colección del MAS se estableció a partir de una selección de diversos entornos subacuáticos, cronologías y temáticas. Se eligieron 70 objetos de procedencia prehispánica, colonial y del siglo XIX, producto de proyectos arqueológicos en lagos, manantiales, cenotes, el Golfo de México, el mar Caribe y el Pacífico, es decir, un universo representativo de diferentes expresiones culturales relacionadas con el agua. Las piezas son de materiales diversos, como hueso, madera, roca, metal y vidrio, con un tamaño que varía desde unos cuantos centímetros, como las balas de mosquete, hasta los 30 cm, como es el caso de una escultura de piedra.

El escáner empleado fue un Go!SCAN 20 portátil (930 g, 154 X 178 X 235 mm) de luz blanca (LED), con una velocidad de medición de 550 000 mediciones por segundo, precisión de 0.100 mm y métodos de posicionamiento a través de geometría, color y objetivos, además de visualización en tiempo real. Sin embargo, a pesar de que el manual del escáner empleado anuncia que cualquiera puede utilizar el aparato sin grandes complicaciones y sin necesidad de experiencia ni conocimientos previos en el tema, al momento de su uso fue evidente que el patrimonio cultural representa un reto para este tipo de registro, pues el escáner empleado fue diseñado para reproducir piezas de maquinaria industrial, es decir, objetos de metal y de figuras geométricas. Básicamente, surgieron tres tipos de dificultades: el tipo de material de la pieza, sus dimensiones y su diseño (figuras 9 y 10).

15 José Antonio Reyes Solís y Diego Jiménez Badillo, “Técnicas para el modelado tridimensional de artefactos arqueológicos”, Primer Congreso Virtual de Arqueología “El Arqueólogo Frente a la Sociedad”, 2011, *Red Mexicana de Arqueología*, documento electrónico disponible en <<http://remarq.ning.com/page/tecnicas-para-el-modelado-tridimensional-de-artefactos-arqueologi>>, consultado en agosto del 2016.

16 Proyecto Conacyt 255635.



Figuras 9 y 10. Escáner Go!SCAN 20 y figurilla antropomorfa extraída del manantial de la Media Luna, S. L. P., INAH-CNMH (Fotografía: Cuauhtémoc Martínez Huerta).



En lo concerniente al tipo de material, la cerámica, la piedra y el metal no presentaron problema alguno para su registro, pues la porosidad y opacidad permitían la adquisición de datos sin ningún conflicto. Sin embargo, el vidrio, por su característica natural de refracción, y los objetos de madera con cierto tratamiento de conservación, provocaban un reflejo en los rayos de luz que emitía el aparato, impidiendo así el flujo de datos. Por ejemplo, las maderas en forma serpentina, extraídas del lago de la Luna del Nevado de Toluca, y tratadas con polietilenglicol para su conservación, tuvieron que ser descartadas para el registro con escáner y fue necesario recurrir a la fotogrametría digital. No obstante esta solución al problema del reflejo, al momento de emplear la técnica de fotogrametría digital se requirió mucha habilidad en la toma fotográfica, debido a que las piezas son demasiado delgadas y, por ende, el foco de la cámara reconocía con dificultad el punto por enfocar (figura 11).



Figura 11. Modelo tridimensional a partir del levantamiento con Go!SCAN 20 generado mediante triangulación de puntos, INAH-CNMH-LIAD, Ángel Mora.



En cuestión de tamaño, en las monedas (reales de a ocho), unos alfileres provenientes de un naufragio del siglo XVIII y algunas balas pequeñas de mosquete fue impracticable la digitalización debido al poco volumen en su figura.

Por otro lado, en cuanto a las piezas con diseño esférico, como las balas de dimensiones pequeñas, o tubular, como las botellas de vidrio, o cinchos metálicos, como el balancín de una brújula del siglo XVI, a causa de su trazo curvo, impedían al escáner el reconocimiento de la figura total. Para lograr la digitalización fue necesario colocarles aleatoriamente guías de posicionamiento (*targets*), con lo que el escáner lograba calcular y crear sistemas de referencia en el espacio (figura 12).

Como puede apreciarse en el cuadro 2, los materiales arqueológicos que presentaron más dificultades para generar un modelo tridimensional fueron los objetos demasiado pequeños y, en el caso del balancín de brújula o el cráneo de infante, se juntaron en ambos varias características adversas, como el tamaño y el diseño curvo. En el balancín de brújula, por lo delgado de sus cinchos, no fue posible el escaneo ni la fotogrametría digital, mientras que el cráneo se logró con bastantes dificultades y le quedó un poco de geometría basura que será necesario eliminar, así como rellenar algunas partes huecas donde la luz del escáner no pudo llegar.

Es evidente que, a pesar de los avances tecnológicos en la digitalización 3D, en lo concerniente al patrimonio cultural los problemas surgidos para la obtención de los datos ha generado un conocimiento especializado y una experiencia muy valiosa. El alto consumo de tiempo en la solución de las dificultades que cada pieza presentaba resulta, a la larga, una inversión correcta hacia la especialización del registro digital del patrimonio cultural. Sin embargo, esta técnica como tal no es el fin, sino el medio para obtener conocimiento. Es decir, nos permite resolver cuestiones en el ámbito de la cultura material y diseñar aplicaciones tanto para resolver temas de nuestra investigación como para compartir el saber sobre este patrimonio.

Inicialmente, el objeto de ofrecer la herramienta de una imagen 3D de las piezas de la colección del MAS estaba orientado a su visualización en tres dimensiones. Es decir, que el visitante virtual pudiera acceder a varias caras de las piezas, girarlo en diferentes ángulos y, con ello, producir una sensación de realidad. No obstante, conforme fue avanzando el proceso de digitalización, pudimos apreciar otras ventajas de esta herramienta. Por ejemplo, el ofrecer la posibilidad de visualizar el entramado de la malla y, de esta manera, valorar aspectos de la manufactura de la pieza, lo cual es imposible a través de una fotografía o durante la misma revisión física del objeto por parte del investigador. Pero, además de ello, al compartir con los arquitectos del laboratorio de imagen el proceso con sus tropiezos y soluciones, decidimos incluir una sección de cápsulas de video con entrevistas donde el visitante virtual puede dimensionar el valor de las herramientas tecnológicas para incrementar su conocimiento no solo sobre una



Figura 12. Modelo tridimensional de una figurilla localizada en el Nevado de Toluca. Pueden apreciarse en la malla elementos de su manufactura. INAH-CNMH-LIAD, Ángel Mora.



PROBLEMA	OBJETO	MATERIAL	SOLUCIÓN
Reflexión de la luz: Objetos hechos de material reflectante	Botellas	Vidrio	No hay solución
	Vasos	Cerámica	Colocación de targets
	Figuras serpentina	Madera tratada con polietilenglicol	Fotogrametría
Tamaño del objeto: Cuando son piezas pequeñas, el escáner no puede hacer la triangulación y se crea geometría basura	Balas de mosquete	Plomo	Colocar otros objetos al lado de las piezas pequeñas para que el escáner reconozca la figura
	Monedas	Plata	No hay solución
	Alfileres	Metal	No hay solución
	Balancín de brújula	Metal	Demasiado delgado. No hay solución
	Cráneo de infante	Hueso	Corregir donde se genera la geometría basura
Diseño esférico: El trazo curvo del diseño del objeto impide que el escáner reconozca la totalidad de la figura	Balas de mosquete	Plomo	Escanear en lote
	Botellas	Vidrio	No hay solución
	Balancín de brújula	Metal	No hay solución
	Vasos	Cerámica	Colocación de targets

Cuadro 2. Problemáticas presentadas en la generación de modelos tridimensionales del PCS.



pieza arqueológica sino también sobre la aplicación de la tecnología a la generación del conocimiento y la importancia del trabajo interdisciplinario. El visitante terminará con una experiencia enriquecida que le hará valorar su pasado a través del patrimonio cultural sumergido y protegerlo.

REFLEXIONES FINALES

Como se pudo observar a lo largo del artículo, la tecnología resulta una aliada poderosa tanto para las investigaciones especializadas como para compartir el conocimiento con sectores de la sociedad ajenos a la especialidad de la arqueología subacuática y a las novedades como la digitalización en 3D. En el caso específico del Museo Virtual de Arqueología Subacuática, la digitalización del patrimonio cultural sumergido se realizó con el objeto de tener una herramienta

de gran tecnología para visualizar las piezas que conforman la colección del MAS y generar en el visitante virtual la sensación de que se acerca a ellas, similar a la del arqueólogo cuando las analiza, pero también para despertar interés y, por consecuencia, motivación para conocer más sobre la pieza visualizada. En ese sentido, la digitalización del patrimonio cultural sumergido es un acto no solo tecnológico sino que se extiende a un producto que permite generar conciencia sobre el valor del patrimonio cultural y, en ese sentido, incrementar la importancia del objeto, al poder reconocer en él, por ejemplo, detalles de su manufactura o las huellas del paso del tiempo.

Por otro lado, al generar por primera vez modelos tridimensionales del patrimonio cultural sumergido, tanto los integrantes del Laboratorio de Imagen y Análisis Dimensional encargados de la virtualización de las piezas como los investigadores de la Subdirección de Arqueología Subacuática pudieron reconocer en el proceso el valor de esta herramienta para el estudio y el análisis de los objetos arqueológicos, pues a partir de los datos generados por el escáner de luz blanca es posible tomar decisiones de restauración, apreciar detalles del material con que fue fabricada la pieza, armar de manera virtual los fragmentos de un objeto fraccionado o comparar diferentes objetos con la finalidad de reconocer semejanzas en diseño y estructura.

Como se mencionó en el artículo, la generación *per se* de modelos tridimensionales no tiene ningún valor si no se persigue crear conocimiento. En el caso de su aplicación para una plataforma digital, como es el Museo virtual de Arqueología Subacuática, la posibilidad de acercar al visitante a esta disciplina y enriquecer su experiencia acerca del patrimonio cultural sumergido resulta una herramienta con mucho potencial para la difusión y puesta en valor de nuestro pasado asociado con cuerpos de agua.

AGRADECIMIENTOS

A la Coordinación Nacional de Monumentos Históricos, Valeria Valero, Jessica Ramírez, Ángel Mora y al equipo del Laboratorio de Imagen y Análisis Dimensional: Gilberto García, Celedonio Rodríguez, Fernanda López-Armenta, Cuauhtémoc Martínez Huerta, Nancy Ambrocio Ángeles, Juan Carlos García, Belém Rodríguez Medina, por su compromiso con el proyecto del MAS y por generar una herramienta tan valiosa como la digitalización 3D del patrimonio cultural sumergido.

BIBLIOGRAFÍA

Delgado Calderón, Alfredo, "La navegación en el México Antiguo", en Daniel Maawad (ed.), *México y su mar*, México, Coordinación General de Puertos y Marina Mercante, 2009, pp. 25-61.

Dupey, Élodie, "Ritualidad entre las sociedades nahuas", texto introductorio para la sala de ritualidad que estará en el MAS, texto inédito, Archivo Técnico de la SAS.

Ivars Perelló, Juan y Tomás Rodríguez Cuevas, *Historia del buceo. Su desarrollo en España*, Murcia, Ediciones Mediterráneo, 1987.

Jiménez, Juan Gabriel, et al., "Digitalización 3D y difusión en web del patrimonio de las universidades andaluzas mediante X3D y Web GL", *Virtual Archaeology Review*, vol. 3, núm. 7, diciembre de 2012, pp. 55-56.

Junco, Roberto y Silvina Vigliani, "Informe del proyecto Arqueología subacuática en el Nevado de Toluca", SAS-Instituto Nacional de Antropología e Historia, 2010, Archivo Técnico de la SAS.

Loera Chávez y Peniche, Margarita, "Introducción", en M, Loera Chávez y Peniche et al. (coords.), *América, tierra de montañas y volcanes*, México, Instituto Nacional de Antropología e Historia, 2012, pp. 7-11.

Luna Erreguerena, Pilar y Juan Rique, "Reporte del Proyecto de prospección y muestreo de superficie y subacuático en el área del Manantial de la Media Luna, S. L. P. Temporada 1981", mecanoscrito, Archivo Técnico de la SAS, 1982.

—, "Pasado, presente y futuro de la arqueología subacuática en México", en P. Luna Erreguerena, Rosamaría Roffiel (coords.), *Memorias del Congreso Científico de Arqueología Subacuática ICOMOS*, México, Instituto Nacional de Antropología e Historia, 2001, pp. 39-49.

—, "The submerged cultural heritage in Mexico", en Margaret E. Leshikar-Denton y P. Luna Erreguerena (eds.), *Underwater and Maritime Archaeology in Latin American and the Caribbean*, Walnut Creek, Left Coast Press, 2008, pp. 55-65.

Martínez Huerta, Jorge, "Fotogrametría digital: un complemento en el registro arqueológico dentro del Proyecto arqueológico La Quemada (2013-2014)", en *Memorias del Primer Congreso Internacional El Patrimonio Cultural y las Nuevas Tecnologías. Una Visión Contemporánea*, documento electrónico disponible en <www.pcnt.inah.gob.mx/pag/index.php>, consultado en marzo del 2017.

Mora Flores, Ángel, "El escáner láser, una herramienta tecnológica aplicada al patrimonio arquitectónico", *Boletín de Monumentos Históricos*, tercera época, núm. 24, 2012, pp. 171-177.

Parés, Bruno, "La fotogrametría digital aplicada al patrimonio", *Auriga*, núm. 77, pp. 4-8.

"Proyecto de creación del Departamento de Arqueología Subacuática 1979", Instituto Nacional de Antropología e Historia, Archivo Técnico de la SAS.

Reyes Solís, José Antonio y Diego Jiménez Badillo, "Técnicas para el modelado tridimensional de artefactos arqueológicos", Primer Congreso Virtual de Arqueología "El Arqueólogo Frente a la Sociedad", 2011, *Red Mexicana de Arqueología*, documento electrónico disponible en <<http://remarq.ning.com/page/tecnicas-para-el-modelado-tridimensional-de-artefactos-arqueologi>>, consultado en marzo del 2017.

Torres, J. C., et al., "Aplicaciones de la digitalización 3D del patrimonio", *Virtual Archaeology Review*, vol. 1, núm. 1, 2010, pp. 51-53.

Trejo Rivera, Flor y Gabriel Gaytán-Ariza, "Museo virtual de Arqueología Subacuática", en *Memorias del Primer Congreso Internacional el Patrimonio Cultural y las Nuevas Tecnologías. Una Visión Contemporánea*, documento electrónico disponible en <www.pcnt.inah.gob.mx/pag/index.php>, consultado en marzo del 2017.

———, *Arqueología bajo el agua*, México, Fundación Cultural Armella Spitalier, 2009.