

La explotación de recursos líticos en el entorno geológico del sitio prehispánico de Sihó (Yucatán) a través del análisis fisicoquímico de los metates de caliza

Lithic Resources Catchment on Pre-Hispanic Sihó (Yucatan) Site Geological Environment through the Limestone Metates Physicochemical Analysis

LLORENÇ PUJOL PIZÀ

Programa de Becas Posdoctorales, Centro Peninsular en Humanidades
y Ciencias Sociales, Universidad Nacional Autónoma de México¹

RESUMEN: En el yacimiento arqueológico de Sihó, localizado en las Tierras Bajas Mayas del Norte, se han documentado metates ápodos elaborados con calizas autóctonas de la península de Yucatán que presentan características litológicas (físicas y químicas) que pueden ser sintomáticas de un determinado origen geológico. El tratamiento estadístico de datos extraídos por fluorescencia de rayos X nos da la posibilidad de discernir materiales calcáreos de distintas formaciones geológicas, a partir de su proporción de silicio (Si) y/o calcio (Ca). Esto permite proponer una vinculación entre las calizas de los metates de Sihó con las rocas de la formación Carrillo Puerto de la península de Yucatán. Por otro lado, la comparación petrográfica mediante láminas delgadas, entre materiales de referencia y arqueológicos, ha sido útil para caracterizar e identificar rocas usadas en la fabricación de estos instrumentos. La complementariedad entre ambas técnicas arqueométricas, cotejando con documentación etnográfica, histórica y arqueológica, nos aporta información que sugiere una apropiación inmediata al asentamiento de las rocas calcáreas utilizadas para fabricar los metates y nos aproxima a un mejor conocimiento de las estrategias de explotación de recursos líticos por los antiguos mayas de Sihó.

¹ La discusión planteada en este artículo forma parte de mi proyecto posdoctoral, titulado “Rocas, martillos y sascaberas. La cantería maya prehispánica en el occidente de Yucatán”, asesorado por el Dr. Adam Temple Sellen.

PALABRAS CLAVE: Sihó; metates de caliza; silicio; calcio; técnicas arqueométricas; captación de recursos líticos.

ABSTRACT: Siho is an archaeological site located in the Northern Maya Lowlands, where a number of grinding tools have been documented, mostly metates made with local limestone that has petrological characteristics (physical and chemical) which may indicate a particular geological origin. The statistical treatment of data extracted by X-ray fluorescence allows us to discern limestone materials from different geological formations, based on the quantity of silicon (Si) and/or calcium (Ca) in the sample. This data shows a link between the limestone of the Sihó metates and the rocks from the geological formation known as Carrillo Puerto located in the Yucatan peninsula. Furthermore, the comparison by mean thin sections between geological and archaeological materials has been useful to characterise and identify lithic materials used to fabricate the metates. The complementarity between both archaeometrical techniques, together with ethnographic, historical and archaeological documentation, provide us with information that suggests an immediate exploitation of the limestone rocks used to make the metates and brings us closer to a better understanding of the quarrying strategies practiced by the ancient Mayans of Sihó.

KEYWORDS: Siho; limestone metates; siliceous; calcium; archaeometrical techniques; lithic resources catchment.

RECEPCIÓN: 12 de noviembre de 2020.

ACEPTACIÓN: 20 de diciembre de 2020.

doi: <https://doi.org/10.19130/iifl.ecm.59.22X873>

Introducción

Con el uso complementario de técnicas de fluorescencia de rayos X y petrografía, el presente artículo tiene como objetivo determinar las posibles fuentes de recursos líticos con los que se fabricaron los metates de Sihó. Asimismo, con la información aportada por los datos físicos y químicos obtenidos y usando documentación de índole etnográfica, experimental y arqueológica, tratar de explicar cómo los mayas que habitaron el sitio seleccionaron y explotaron estos recursos geológicos.

En el espacio físico se pueden encontrar distintos tipos de depósitos geológicos, primarios o secundarios, que pueden determinar diferentes estrategias de explotación por parte de las comunidades humanas (Risch, 1995; 1998). Los depósitos secundarios se han formado por la acción de agentes naturales como cauces fluviales, aluviales o glaciales, por la acción marina y por fenómenos de meteorización ambiental. En estos procesos tiene lugar la fragmentación, transporte y erosión superficial de las rocas, que van redondeando, puliendo y modificando su morfometría en función de lo constantes y prolongados que sean dichos fenó-

menos. Tal circunstancia facilita, en términos económicos, la apropiación social de los recursos geológicos, ya que los depósitos secundarios suelen presentar características de más asequible explotación en cuanto a medios instrumentales y tiempos de trabajo necesarios. Este sistema de explotación se documenta en el sitio arqueológico de La Libertad, en Chiapas, donde la obtención de cantos rodados fluviales para la fabricación de instrumentos de molienda fue una práctica recurrente (Clark, 1988). También tiene paralelos etnográficos en las Tierras Altas Mayas de Guatemala (Hayden, 1987) o en las Sierra de los Tuxtlas en Veracruz (Madrid, 2013), con procesos de trabajo para elaborar herramientas de molienda de basalto, desde la obtención y formateo inicial de los clastos en los lechos de los ríos hasta su acabado en el taller del asentamiento.

Contrariamente, en los depósitos geológicos primarios puros las rocas no han sufrido estos procesos de erosión y traslado, y para su extracción sí que se requiere de tecnología relativamente especializada con resultados materiales más estandarizados, conllevando otras formas de organización de los procesos de trabajo. En distintos sitios arqueológicos como Calakmul (Gallegos, 1994), Nakbé (Titmus y Woods, 2002) o Tikal (Ruiz, 1986), se han reportado canteras estandarizadas para la extracción de lajas de caliza con las que se fabricaron estelas, acompañadas de instrumentos cortantes de pedernal, obsidiana o diorita (hachas y azuelas pulimentadas, bifaces, cinceles, lascas o navajas). Herramientas similares para los trabajos de cantería se documentan también en Uaxactún (Kidder, 1947), Dzibilchaltún o Muna (Andrews y Rovner, 1973); incluso grandes mazas con ranura como las encontradas en Chichén Itzá (Proskouriakoff, 1962) o Dzibilchaltún (Santiago, 2004).

Otra forma plausible de trabajo es la explotación de depósitos geológicos primarios con distintos grados de meteorización natural (raíces, cambios de temperatura, efecto del agua, etcétera) de la roca, que presenta características volumétricas y físicas apropiadas para la elaboración de los resultados buscados. Como en los demás depósitos geológicos, esta forma de explotación puede haberse realizado alejada, próxima o en los mismos asentamientos, según la disponibilidad y la selección social de los materiales. Para la fabricación de artefactos de índole arquitectónica en el sitio de Cobá, Folan (1983) considera la posible extracción de materiales calcáreos de las *sascaberas*, de donde se obtenían áridos para la construcción. Dahlin *et al.* (2011) reportan percutores, cinceles y desechos de roca muy silicificada en *sascaberas* de Chunchucmil, que contienen estos mismos materiales en forma de nódulos naturales muy silificados, insertados en los estratos calcáreos blandos.

Casos etnográficos, arqueológicos u experimentales (Tabla 1) han reportado tiempos de trabajo alrededor de una jornada, incluso por encima, para la obtención de clastos y su transformación en herramientas de molienda (Delgado, 2008; Risch, 1995). La duración de los trabajos podría variar en función del tipo de depósito geológico, de la roca, de las herramientas empleadas, del grado de elaboración del artefacto o del número de personas interventoras, etcétera. Sin em-

bargo, valorando hipotéticos tiempos destinados exclusivamente a la obtención de los clastos del medio geológico, éstos serían inferiores a la jornada de trabajo, al tratarse habitualmente de depósitos de recursos líticos cercanos a los sitios.

Casos	Tipo	Roca	Artefacto	Herramientas	Tiempos	Bibliografía
Kanuri (Nigeria)	Etngr.	Granito	Metate/ mano	Líticas	1 - 2 jornadas	Gronenborn (1995)
Oaxaca (Méjico)	Etngr.	¿Basalto/granito?	Metate/ mano	Metálicas	17:75 horas	Cook (1982)
Tierras Altas Mayas	Etngr.	Basalto	Metate/ mano	Líticas	5 – 14 horas	Hayden (1987)
Argar	Exp.	Conglomerado/ esquisto psamítico y/o granatífero	Metate	Líticas	1 jornada	Risch (1995)
Neolítico (Turquía)	Exp.	-	Metate	Líticas	9:50 horas	Hersh (1982)
Heládico griego	Exp.	-	Metate	Líticas	2:20 horas	Runnels (1981)
Sihó (Yucatán)*	Exp.	Caliza	-	-	2h	Pujol (2018)
Neolítico (Francia)*	Exp.	-	-	-	2h – 1j	Pétrequin y Jeunesse (1995)
Neolítico (Alemania)*	Exp.	-	-	-	2h – 1j	De Groot (1994)

Tabla 1. Tiempos de trabajo para la obtención de los clastos y fabricación de los implementos de molienda. Nota: (*) Solo alude a la obtención de materia prima. Etngr.: etnográfico; Exp.: arqueología experimental. Modificado de Delgado (2008).

El grado de asequibilidad de los recursos líticos depende de las características físicas de los contextos geológicos explotados y de los medios técnicos y humanos organizados, necesarios para la selección y apropiación social de dichos recursos (Risch, 1995; 1998; Risch y Martínez, 2008). En consecuencia, la selección de las rocas tiene que ver con la búsqueda de determinadas propiedades intrínsecas (resistencia y rugosidad), que aporten efectividad funcional² (durabilidad, capacidad de abrasión, manejabilidad, etcétera) al instrumento durante su vida útil y por su disponibilidad en el medio geológico (Horsfall, 1987; Nelson y Lippmeier, 1993; Risch, 1995; 1998; Risch y Martínez, 2008).

² Al hablar de la efectividad de los instrumentos nos referimos a la capacidad de realizar distintas acciones de transformación de la materia, *ergo* del medio ambiente, en función de una “rentabilidad” en aportes o costes energéticos para la sociedad. De acuerdo con Pie i Batlle y Vila i Mitjà (1991: 272), “la caracterización del sistema económico de *una sociedad* implica una evaluación de la rentabilidad de los procesos de trabajo” (las cursivas son nuestras).

Hay modelos de captación que pueden ser útiles para ilustrar formas de organización espacial de prácticas extractivas de recursos geológicos, vinculando asentamientos y productividad económica del territorio (Ruiz y Burillo, 1998) a variables temporales relacionadas con distancias geográficas. Por ejemplo, Pétrequin y Jeunesse (1995) o De Groot (1994), para el Neolítico francés o el renano, o Risch (1995) y Delgado (2008) para el Bronce ibérico del Argar, basándose en estimaciones arqueológicas y experimentales, han usado ratios espacio-temporales concéntricos desde los sitios donde tiene lugar la transformación de las materias primas, a las zonas donde se encuentran los recursos naturales. De la aplicación de este modelo se sustrae una premisa compartida: que las comunidades humanas asentadas en un territorio explotan y usan materiales naturales disponibles en su entorno, aunque su selección social se da siempre y cuando aporten propiedades funcionales (mecánicas) intrínsecas, determinadas por sus características físico-químicas.

1. Materiales y métodos técnicos de análisis

El análisis cerámico del sitio de Sihó sugiere una cronología relativa de ocupación desde el Preclásico Medio hasta el Clásico Terminal (Jiménez, 2007; Jiménez *et al.*, 2006). Sin embargo, el uso de la mayoría de metates contextualizados habría sido durante el Clásico Tardío, cuando tiene lugar el apogeo y máximo desarrollo de las estructuras visibles del sitio en la actualidad (Fernández, 2010; Jiménez *et al.*, 2006; Jiménez, 2007; Pat, 2006). Por lo general se trata de metates ápodos tipo batea (Clark, 1988) de gran tamaño, con un deficiente estado de conservación superficial por acción del intemperismo ambiental (Figura 1).



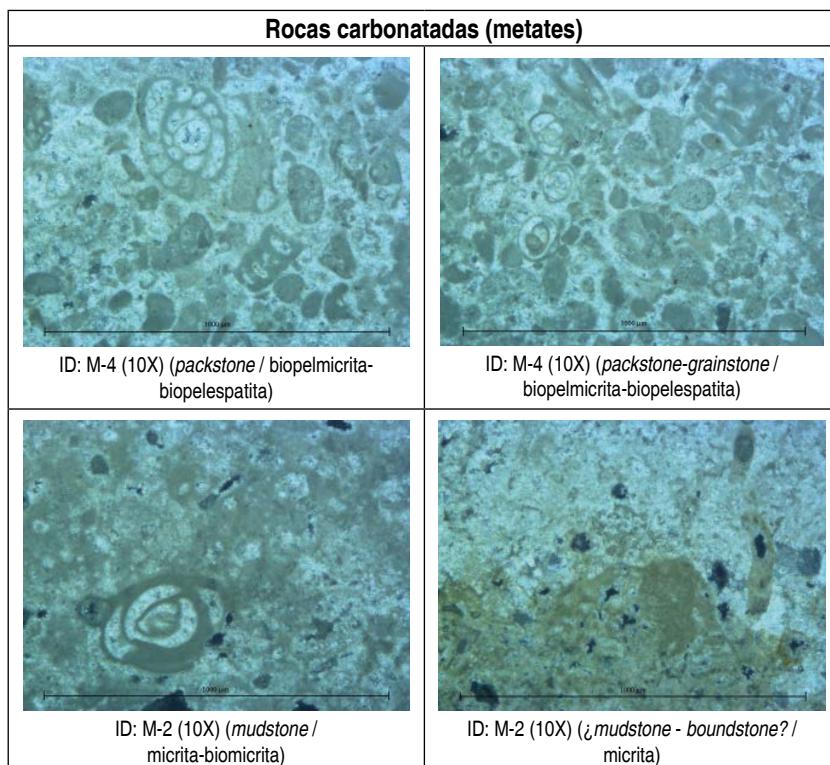
Figura 1. Ejemplos de metates ápodos de caliza de Sihó. Nota: metate izquierdo (M-4); metate derecho (M-17) (Fotografías del autor).

Las muestras arqueológicas para su análisis por fluorescencia de rayos X se trajeron de ocho metates (Tabla 2) del sitio, en apariencia fabricados con el

mismo tipo de caliza. Como complemento petrográfico mediante microscopía se elaboraron láminas delgadas de cuatro de los metates (Figura 2).

ID	Al-Ka	Si-Ka	S-Ka	Cl-Ka	K-Ka	Ca-Ka	Ti-Ka	Cr-Ka	Mn-Ka	Fe-Ka	Ni-Ka	Cu-Ka	Zn-Ka	Rb-Ka	Sr-Ka
M-2	0,8762	2,7140	0,3552	0,0006	0,0041	57,7400	0,0057	0,0113	0,0135	0,0191	0,0014	0,0014	0,0030	0,0008	0,0229
M-3	1,0360	1,8850	0,3055	0,0008	0,0051	56,9100	0,0057	0,0164	0,0197	0,0351	0,0009	0,0009	0,0032	0,0007	0,0398
M-4	1,1320	4,3720	0,3293	0,0004	0,0056	57,2300	0,0057	0,0155	0,0186	0,0634	0,0008	0,0008	0,0028	0,0007	0,0283
M-5	1,3290	2,2760	0,3153	0,0008	0,0049	57,2700	0,0057	0,0123	0,0147	0,0186	0,0004	0,0004	0,0025	0,0005	0,0351
M-8	1,1600	3,5930	0,4189	0,0008	0,0049	57,5800	0,0057	0,0141	0,0169	0,0290	0,0009	0,0009	0,0024	0,0005	0,0269
M-11	1,1280	8,4810	0,3760	0,0008	0,0083	54,2600	0,1259	0,0172	0,0207	0,3343	0,0024	0,0025	0,0161	0,0005	0,0132
M-17	0,9526	2,4080	0,3608	0,0008	0,0050	57,0200	0,0057	0,0166	0,0200	0,0647	0,0003	0,0003	0,0035	0,0005	0,0360
M-18	0,9239	2,1590	0,3120	0,0009	0,0040	57,5700	0,0057	0,0162	0,0195	0,0229	0,0008	0,0008	0,0029	0,0007	0,0286

Tabla 2. Porcentajes de elementos traza de la muestra arqueológica de metates.



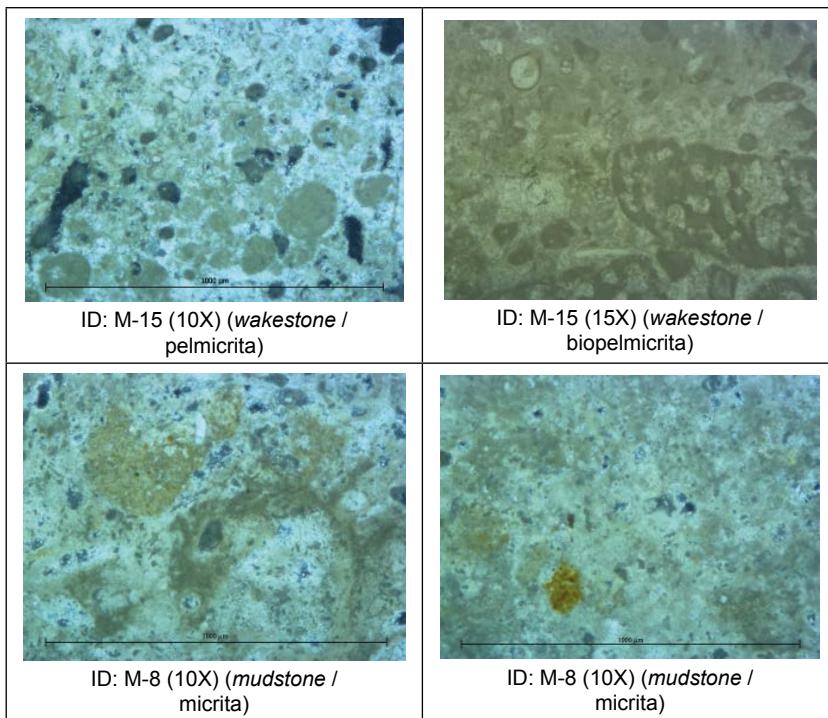


Figura 2. Petrografías de la muestra arqueológica de metates. Nota: los litotipos se identifican según la clasificación de las calizas a partir de su proporción de partículas (cursiva) (Embry y Klovan, 1971, modificado de Dunham, 1962), en combinación con la clasificación textural de las rocas carbonatadas (sin cursiva) de Folk (1962) (Fotografías del autor).

Para el cotejo analítico se usaron 23 muestras de referencia analizadas mediante fluorescencia (Tabla 3) y 11 por lámina delgada (Figuras 3 y 4), representativas de las tres formaciones geológicas principales de la península de Yucatán: Carrillo Puerto, Chichén Itzá e Icaiché (Figuras 5 y 6). La elección de estas formaciones responde a su relación de localidad y proximidad al sitio de Sihó; y por aportar materiales calcáreos susceptibles de ser explotados por sus propiedades funcionales para la molienda.

ID	FG	Al-Ka	Si-Ka	S-Ka	Cl-Ka	K-Ka	Ca-Ka	Ti-Ka	Cr-Ka	Mn-Ka	Fe-Ka	Ni-Ka	Cu-Ka	Zn-Ka	Rb-Ka	Sr-Ka
80	I	5.6660	9.6420	2.5620	0.0465	0.0053	48.6600	0.0043	0.0148	0.0177	0.0473	0.0073	0.0074	0.0065	0.0039	0.0370
83	I	3.2050	8.0800	1.5400	0.0014	0.0053	54.1300	0.0043	0.0178	0.0214	0.1801	0.0067	0.0068	0.0053	0.0043	0.0130
86	I	1.6840	3.7840	1.5550	0.0023	0.0053	52.2900	0.0043	0.0233	0.0280	0.2302	0.0105	0.0106	0.0116	0.0051	0.0189
89	I	2.6010	7.5930	1.8710	0.0053	0.0053	51.9800	0.0520	0.0584	0.0701	0.0713	0.0095	0.0096	0.0149	0.0078	0.0389
134	I	0.6475	1.6880	0.5128	0.0007	0.0053	55.6300	0.0043	0.0152	0.0183	0.2490	0.0007	0.0007	0.0024	0.0012	0.0205
158	I	0.3141	1.7930	0.9625	0.0009	0.0053	57.0100	0.0043	0.0111	0.0133	0.1281	0.0015	0.0016	0.0025	0.0006	0.0199
EG	CHI	3.2570	17.1200	1.1340	0.0071	0.1177	20.3600	0.0568	0.2181	0.2617	0.0889	0.0052	0.0053	0.0304	0.0043	0.0360
18	CHI	2.1710	23.5600	5.1930	0.0297	0.1955	20.1200	0.3294	0.0667	0.0800	0.0465	0.0226	0.0228	0.1964	0.0043	0.1056
22	CHI	2.1710	18.4100	1.2590	0.0068	0.0356	22.5600	0.0734	0.0529	0.0635	0.0336	0.0054	0.0054	0.0232	0.0043	0.0278
38	CHI	2.0520	20.1400	1.2670	0.0068	0.0308	21.8200	0.0603	0.1004	0.1205	0.0127	0.0057	0.0058	0.0268	0.0043	0.0256
41	CHI	2.2910	20.2900	1.3460	0.0066	0.0357	22.3200	0.0427	0.0487	0.0584	0.0157	0.0052	0.0053	0.0300	0.0043	0.0309
47	CHI	2.7600	16.8100	2.9010	0.0227	0.2772	18.0700	0.1891	0.3563	0.3275	0.0403	0.0138	0.0139	0.1615	0.0043	0.0662
53	CHI	2.5490	21.0800	1.9240	0.0108	0.1017	22.5000	0.0868	0.0825	0.0750	0.0214	0.0095	0.0096	0.0584	0.0043	0.0378
131	CP	1.1020	2.7740	0.8534	0.0008	0.0043	57.6700	0.0043	0.0101	0.0121	0.0116	0.0010	0.0010	0.0033	0.0012	0.0199
137	CP	1.3170	4.6850	0.6824	0.0007	0.0043	55.9700	0.0043	0.0222	0.0266	0.0745	0.0026	0.0026	0.0015	0.0020	0.0345
140	CP	1.0650	4.5290	0.9005	0.0008	0.0043	58.0500	0.0043	0.0124	0.0149	0.0106	0.0007	0.0007	0.0030	0.0011	0.0069
143	CP	0.6904	0.1790	0.3338	0.0003	0.0043	58.3600	0.0043	0.0090	0.0108	0.0155	0.0010	0.0010	0.0026	0.0005	0.0137
146	CP	1.6470	1.1350	0.8489	0.0004	0.0043	57.2300	0.0043	0.0082	0.0099	0.0207	0.0016	0.0016	0.0020	0.0013	0.0378
149	CP	1.3620	5.1120	0.7413	0.0004	0.0053	56.8500	0.0241	0.0139	0.0167	0.0541	0.0014	0.0014	0.0027	0.0011	0.0182
151	CP	0.8185	2.8450	0.8169	0.0005	0.0043	58.0500	0.0043	0.0141	0.0169	0.0210	0.0014	0.0014	0.0027	0.0021	0.0093
161	CP	2.1240	10.7900	0.7711	0.0006	0.0043	55.6200	0.2828	0.0110	0.0132	0.0905	0.0012	0.0012	0.0027	0.0007	0.0364
164	CP	1.9110	2.0570	0.7711	0.0006	0.0053	55.6200	0.0043	0.0101	0.0121	0.0743	0.0011	0.0012	0.0022	0.0007	0.0763
167	CP	1.9110	0.7249	0.3357	0.0005	0.0043	56.7300	0.0043	0.0101	0.0121	0.0666	0.0011	0.0011	0.0022	0.0005	0.0373

Tabla 3. Porcentajes de elementos traza de la muestra de referencia geológica.

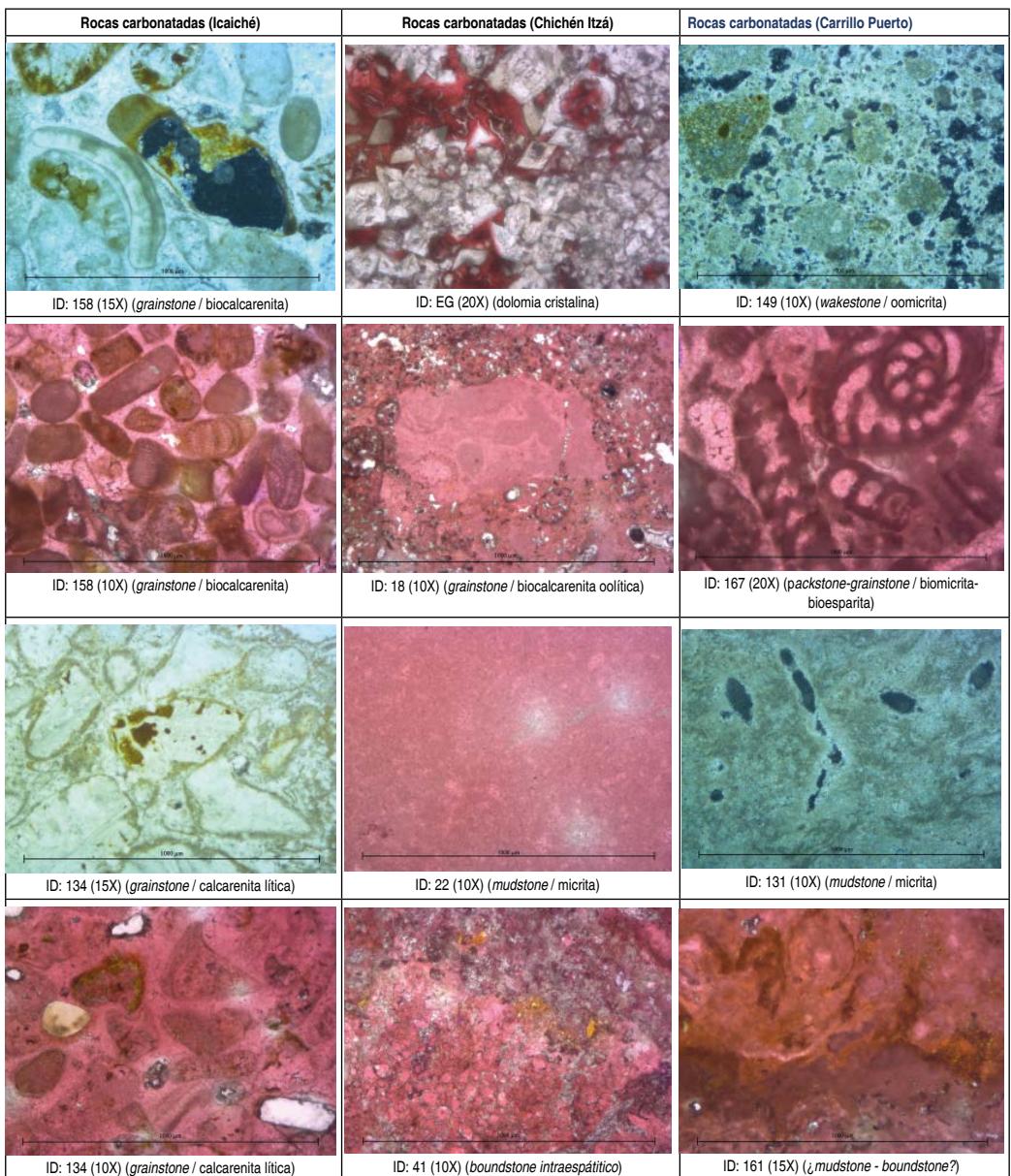


Figura 3. Identificación petrográfica general de la muestra de referencia geológica. Nota: los litotipos se identifican según la clasificación de las calizas a partir de su proporción de partículas (cursiva) (Embry y Klovan, 1971, modificado de Dunham, 1962), en combinación con la clasificación textural de las rocas carbonatadas (sin cursiva) de Folk (1962). Las láminas ID: EG, 18, 22, 41, 47, 134, 158, 161 y 167, han sido teñidas con la solución de alizarina. El carbonato cálcico se muestra enrojecido y la dolomita adopta un color blanco grisáceo. Comparativamente, la dolomitización es más evidente en las muestras de la formación geológica Chichén Itzá. En la lámina ID: 134 inferior (grainstone / calcarenita lítica) de la formación Icaiché se observa un intraclasto de cuarzo redondeado (blanco marfil) (Fotografías del autor).

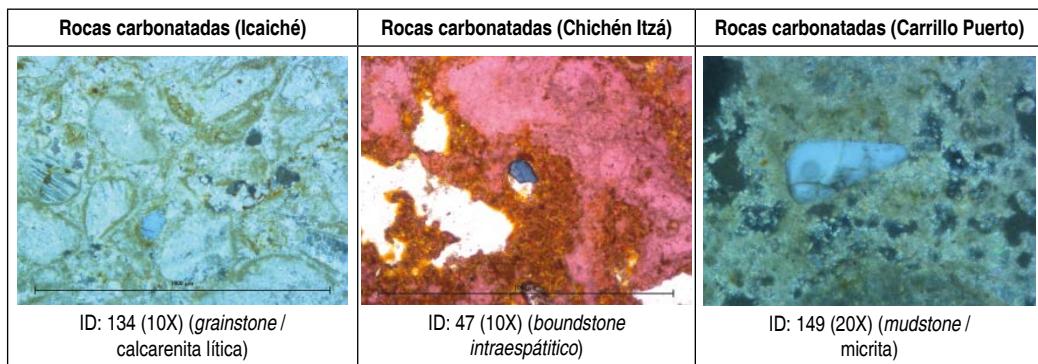


Figura 4. Identificación petrográfica de la sílice contenida en la muestra de referencia geológica.

Nota: los litotipos se identifican según la clasificación de las calizas a partir de su proporción de partículas (cursiva) (Embry y Klovan, 1971, modificado de Dunham, 1962), en combinación con la clasificación textural de las rocas carbonatadas (sin cursiva) de Folk (1962). Las láminas ID:

47 ha sido teñida con la solución de alizarina. Se muestran inclusiones silíceas (azul)

(Fotografías del autor).

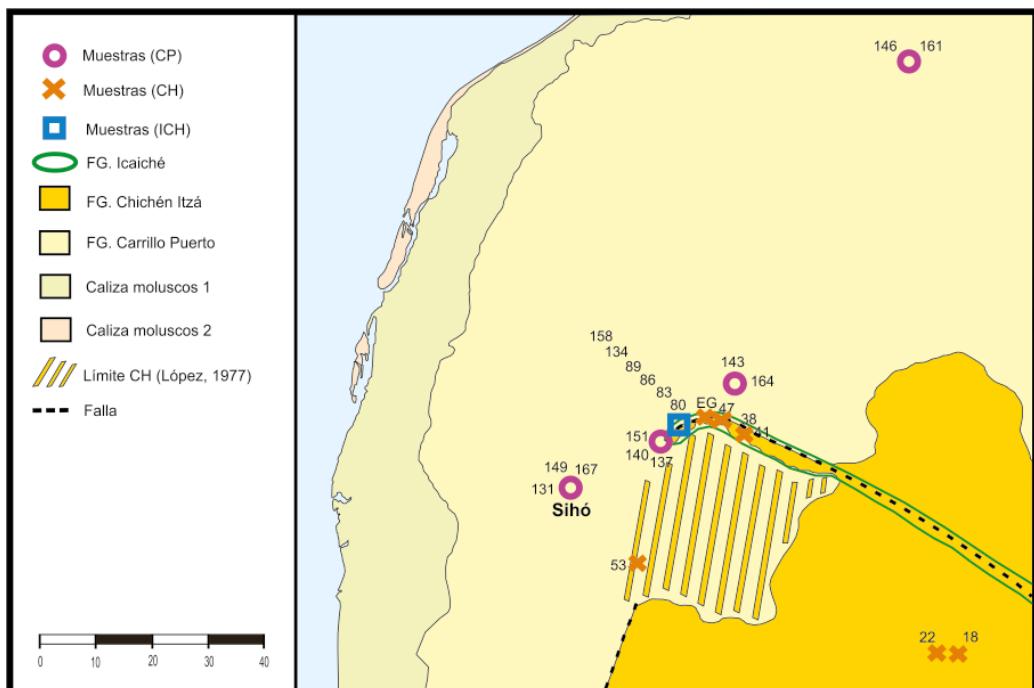


Figura 5. Localización de los puntos de muestreo geológico de referencia.

Nota: CP (Carrillo Puerto), ICH (Icaiché) y CHI (Chichén Itzá). Modificado de la carta geológico-minera, Servicio Geológico Mexicano, INEGI (2007)
(Escala 1: 500.000).

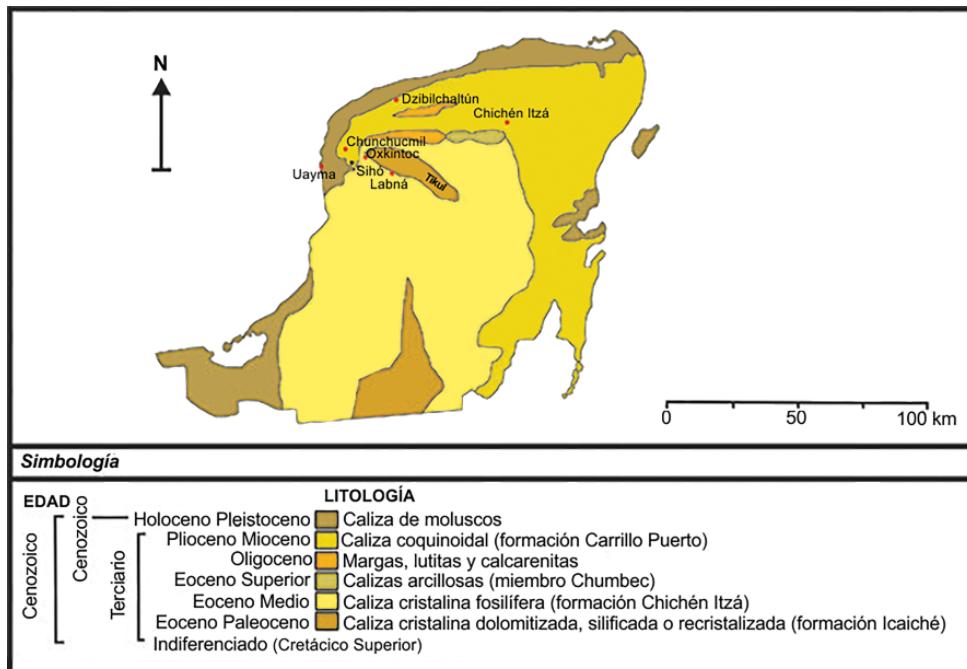


Figura 6. Geomorfología de la península de Yucatán.

Nota: modificado de García y Graniel (2010). Se ubican otros sitios que compartieron tiempo con el asentamiento de Sihó.

Para la diferenciación de contenidos en carbonato cálcico y/o dolomita, se procedió a la tinción de determinadas láminas delgadas de referencia. El sistema utilizado fue la solución de rojo de alizarina en una concentración de 0.2 g/100 ml de ácido clorhídrico al 1.5% en 1 l de agua destilada (Adams, MacKenzie y Guilford, 1997).

La identificación y cuantificación química de los materiales líticos se ha realizado con la técnica espectroscópica de fluorescencia de rayos X SANDRA (Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México). Esta técnica detecta los elementos traza de la muestra y su proporción en partes por millón (ppm) y las fracciones resultantes se han transformado a porcentajes para su trato estadístico. Como valor de calibración se utilizó la referencia material *standard* (SRM-NIST) del cemento Portland 1880a y Montana 2711. El análisis se desarrolló directamente sobre las muestras líticas sin pulverizar, en cuatro proyecciones y en distintos ángulos de penetración del haz. De los resultados obtenidos se extrapoló estadísticamente la mediana para reducir posibles distorsiones por valores extremos, en el caso que se detectaran inclusiones localizadas y sobre-dimensionadas de silicio u otros componentes. En la identificación petrográfica hemos utilizado un microscopio óptico de luz polarizada Carl Zeiss - Axioskop

40 pol.³ Para el procesado estadístico de los datos arqueométricos se ha usado el software libre: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis (PAST 3.20) (Hammer, Harper y Ryan, 2001).

2. Prospección y localización de las muestras geológicas de referencia

La recolección selectiva de muestras geológicas de referencia (afloramientos y depósitos secundarios) mediante prospección de campo, se ha realizado para disponer de una representación mínima de contextos litológicos que caracterizan las tres formaciones geológicas principales de la península de Yucatán (Carrillo Puerto, Chichén Itzá e Icaiché). La muestra geológica de referencia utilizada para los análisis elementales consta de un total de 23 individuos prospectados en los contextos apuntados (Figura 5).

Un primer conjunto de tres muestras (131, 149 y 167) se colectó en el mismo sitio de Sihó ubicado en la formación geológica neógena Carrillo Puerto. Las muestras número 149 y 167 se extrajeron de afloramientos de laja superficial y la 131 de un volado de laja de una *sascabera* localizada en un montículo natural (*tzekel*), con una estructura arqueológica asociada, tratándose de rocas de la misma unidad geo-estratigráfica. El área de prospección se amplió hacia la población de Kopomá con dos muestras (143 y 164) y a los alrededores de Dzityá, cerca de la ciudad de Mérida, con tres (146 y 161). Hay que mencionar un grupo de tres individuos (137, 140 y 151) obtenidos en el límite de la cara oeste de la última estribación de la falla de Ticul, a tocar del municipio de Maxcanú.

El segundo conjunto de seis muestras (80, 83, 86, 89, 134 y 158) proviene del área de prospección de la cara norte más expuesta del último tramo de la falla. Éstas pertenecen a depósitos geológicos secundarios desarrollados durante el Cuaternario, aunque en origen formarían parte de afloramientos primarios de transición, entre el Cretácico y el Paleógeno, de la formación Icaiché.

Un último conjunto de tres ejemplos (EG, 38, 41 y 47) se obtuvo en los montes asociados a la falla de Ticul, justo detrás de la estribación mencionada, más dos (22 y 18) recolectados hacia el sureste en los sitios de Sayil y Labná, y otro (53) cerca del municipio de Calkiní. Todos estos individuos formarían parte de la formación geológica paleogénica Chichén Itzá.

³ Los métodos técnicos aplicados para el análisis químico y físico de los materiales líticos han sido dispuestos por el Centro de Investigación en Corrosión (CICORR), vinculado a la Universidad Autónoma de Campeche (UAC).

3. El marco físico y geológico del sitio de Sihó

Sihó (15Q YN950681, Garza y Kurjack, 1980) se asienta sobre la formación geológica Carrillo Puerto (Figura 6) que ocupa las áreas norte, noroeste y oriente de la península de Yucatán, rodeando parcialmente de este a oeste y de norte a sur a la formación Chichén Itzá (Duch, 1988). El sitio se encuentra a unos 20 kilómetros al sureste del punto más cercano de esta formación, que se extiende hacia el sur y mitad norte de la península de Yucatán y que coincide con el límite occidental más extremo de la falla de la sierra de Ticul. Dicha sierra está asociada a la formación Chichén Itzá y al miembro subyacente Icaiché y recorre el norte peninsular en dirección sur-suroeste (Figura 6) (Marín, Pacheco y Méndez, 2004).

Los suelos calcáreos que conforman la mayor parte de la península de Yucatán se generaron a partir del Cretácico Superior (100.5 – 66.0 Ma),⁴ a lo largo del Paleógeno (66.0 – 23.03 Ma) y Neógeno (23.03 – 2.58 Ma), siendo dominantes las formaciones del Eoceno (56.0 - 33.9 Ma), Oligoceno (33.9 – 23.03 Ma), Mioceno (23.03 – 5.333 Ma) y Plioceno (5.333 – 2.58 Ma) (Dutch, 1988; Flores, 1974). En comparación con los materiales más modernos del Neógeno, las rocas superficiales cretácicas y paleogénicas tienen una mayor dureza que se desarrolla hacia el interior por acción atmosférica (Duch, 1988). Durante el Cuaternario (2.58 Ma - presente) se formó el caliche calcáreo que recubre gran parte de los sustratos emergidos del Cretácico, Eoceno, Oligoceno, Mioceno y Plioceno (López, 1977), igual que el desarrollo del litoral costero peninsular.

Formación geológica Icaiché

La formación Icaiché empieza a formarse durante el Cretácico superior Maastrichtiano ($72,1 \pm 2$ - 66,0 Ma), a partir de su nivel de transición (indiferenciado) hacia el Paleógeno, aunque se desarrolla plenamente a lo largo del Paleoceno (66.0 - 56.0 Ma) y del Eoceno inferior (56.0 - 47.8 Ma) (López, 1977).

Las formaciones Maastrichtianas del Cretáceo superior están formadas principalmente por rocas de anhidrita translúcida, con cuerpos intercalados de caliza dolomítica cristalina (López, 1977). Dichas formaciones contienen intercalaciones calcáreas criptocristalinas de tamaño fino a medio, microfósiles, oolitos y pseudolitos, que dan lugar a calcarenita (López, 1977). Estas rocas también han sido reportadas como calizas tipo Petén del Cretácico Superior (Aguilar, 1979a; 1979b; López, 1977; Miranda, 2005; Virgen y Baca, 1988). Esta descripción de materiales coincide con muestras (Figura 3) que colectamos en la falla de Ticul y en algunos afloramientos en las colinas ubicadas al sur, clasificadas por nosotros principalmente como *grainstone*⁵ en base a su textura depositaria bien cementada,

⁴ Cohen *et al.* (2013). Aplica para todas las cronologías geológicas que aparecen en el texto.

⁵ Clasificación de las rocas sedimentarias a partir de la proporción de partículas. Los *grainstones* contienen más de un 70% de partículas (Embry y Klovan, 1971, modificado de Dunham, 1962).

puntualmente silicificada y/o dolomitizada, con contenido erosionados de rocas calcáreas, fósiles y oolitas (Sánchez y Zamorano, 1993). También se ha reportado algún ejemplo de *mudstone*⁶ criptocristalino.

Formación geológica Chichén Itzá

La formación paleógena Chichén Itzá (miembro Pisté) abarcaría estratos del Eoceno Medio (47,8 - 41,3 Ma) al Eoceno Superior (41,3 Ma - 33,9 Ma) (Butterlin y Bonet, 1960; García y Graniel, 2010; López, 1977). En estos niveles se han reportado calizas cristalinas compactas de grano fino de color blanco a gris claro, dolomitas, calizas silicificadas y calizas recristalizadas con microfósiles (Duch, 1988; García y Graniel, 2010; López, 1977). Su alto grado de dolomitización o silificación, relacionado con una reducción de los contenidos fósiles, estaría causado por un proceso de sustitución de la calcita por magnesio o sílice en el contenido de bioclastos o cementantes (Álvarez, 1954; Bautista *et al.*, 2004; Bustillo, Pérez y Bustillo, 2012; Duch, 1988; Henao y Martínez, 2009; Tucker, 1991). No obstante, al igual que López (1977), recogimos muestras en la sierra de Ticul con un rango de clasificación sedimentario diverso y contenidos variables en inclusiones de litoclastos, peloídes, algunos ooides, microfósiles y elementos arrecifales. Estos materiales los hemos clasificado como calizas tipo *boundstone*⁷ y *mudstone*, *grainstone* y rocas dolomíticas cristalinas (Figura 3). Sin embargo, y en comparación a los materiales calcáreos de la formación neógena Carrillo Puerto, hemos observado una aparente mayor cantidad de calizas peloídes, que fosilíferas.

Sondeos practicados en la zona centro-norte de la península de Yucatán (Bautista *et al.*, 2015; López, 1977), en niveles del Eoceno Superior denominados como miembro Chumbec (García y Graniel, 2010), muestran la recurrencia de calizas micríticas,⁸ calcarenitas, margas y lutitas. Según López (1977), García y Graniel (2010) o Miranda (2005), las calizas margas, las lutitas y las calizas cristalinas compactas de grano fino también forman parte de niveles del Oligoceno, pero que en superficie son poco evidentes al no presentar una fauna fósil característica del Oligoceno inferior (33,9 – 27,82 Ma), aunque sí del Oligoceno superior (27,82 – 23,03 Ma) (López, 1977).

Formación geológica Carrillo Puerto

Estratos horizontales poco evidentes del Mioceno inferior (23.03 – 13.82 Ma) y que de forma particular no pertenecen a esta formación geológica, aunque presentan importantes similitudes, se han documentado al sur de Mérida (García

⁶ Clasificación de las calizas a partir de la proporción de partículas. Los *mudstone* contienen entre un 0-30% de partículas (Embry y Klovan, 1971, modificado de Dunham, 1962).

⁷ Calizas arrecifales según la clasificación de Dunham (1962).

⁸ Sedimento matricial carbonatado formado por cristales menores a cinco micras de diámetro (Adams, MacKenzie y Guilford, 1997).

y Graniel, 2010; López, 1977). En su mayoría se trata de afloramientos de caliza de color crema, pardo y blanca, margas y caliza microcristalina con gran cantidad de fósiles coquinoideos (Bautista *et al.*, 2004; 2015; López, 1977; Miranda, 2005) poco cohesionada y parcialmente conglomerática (brecha) (López, 1977). La formación Carrillo Puerto propiamente arranca a partir de niveles del Mioceno superior (13.82 – 5.333 Ma) y del Plioceno (5.333 – 2.58 Ma), con calizas rojizas a amarillentas, arcillosas y duras, calizas coquinoideos, margas y otras calizas superficiales blancas, duras y masivas (Bautista *et al.*, 2004; 2015; Duch, 1988, 1991; García y Graniel, 2010; López, 1977; Miranda, 2005). En particular, estos niveles geológicos contienen gasterópodos, pelecípodos, coquinas, ostrácodos, fósiles de algas o arrecifales (Butterlin y Bonet, 1960; Cardoso *et al.*, 2004; Miranda, 2005), peloídes y algunos ooides esporádicos.

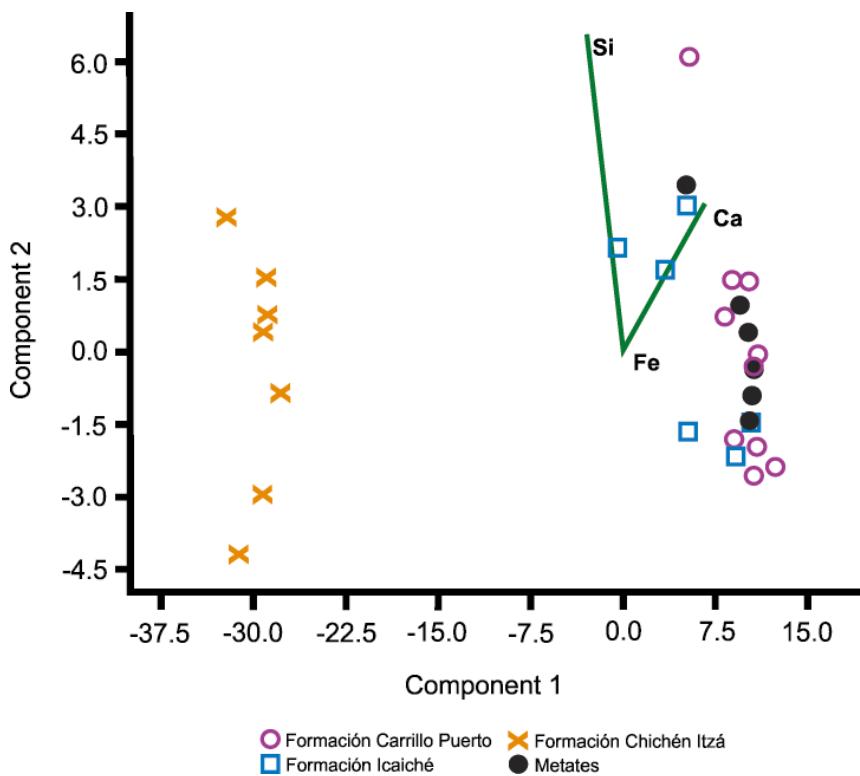
Muestras recolectadas (Figura 3) en el mismo sitio arqueológico de Sihó y en otros lugares de la formación geológica, se han clasificado como *mudstone* y *boundstone* con variación a *wackestone*,⁹ *packstone*¹⁰ y puntualmente hacia *grainstone*, con significativa correspondencia con litotipos identificados por Cardoso *et al.* (2004) y Miranda (2005). A diferencia de las rocas paleógenas de la formación Chichén Itzá, no se ha detectado a penas la presencia de dolomita cristalina, pero sí una mayor presencia de rocas fosilíferas.

4. Identificación química de los recursos geológicos explotados en Sihó

Para establecer los distintos contenidos elementales de las muestras arqueológica y de referencia geológica (Tablas 2 y 3) se ha usado la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX). Los elementos químicos diagnosticados en ambas muestras son el silicio (Si), el calcio (Ca), el aluminio (Al), el hierro (Fe); y el azufre (S), el tiro (Ti), el manganeso (Mn), el cromo (Cr), el zinc (Zn), el cobre (Cu), el níquel (Ni), el rubidio (Rb), el cloro (Cl), el potasio (K), el fósforo (P) y el estroncio (Sr). Para los análisis de distribución de componentes principales (Gráfica 1) y de significación probabilística (Tabla 4 y 5), se ha seleccionado la sílice y el calcio por su mayor variabilidad y considerando el proceso de silicificación por sustitución apuntado con anterioridad. Tras reiteradas pruebas, constatamos que su cotejo individual o en conjunto con el resto de los elementos químicos del grupo no generaba una distorsión significativa en la distribución de valores del test de componentes principales, al estar muy cerca del cero. De tal modo que la selección del hierro como elemento combinado resulta más bien arbitraria.

⁹ Clasificación de las calizas a partir de la proporción de partículas. Los *wackestone* contienen entre un 30-50% de partículas (Embry y Klovan, 1971, modificado de Dunham, 1962).

¹⁰ Clasificación de las calizas a partir de la proporción de partículas. Los *packstone* contienen entre un 50-70% de partículas (Embry y Klovan, 1971, modificado de Dunham, 1962).



Gráfica 1. Análisis de componentes principales elementales entre la muestra de metates y la de referencia geológica.

	Si	Ca	Fe
N	31	31	31
Variance	52.000	225.390	0.006
Coeff. var	96.000	31.170	118.000

Tabla 4. Análisis de variabilidad elemental sobre la muestra arqueológica y geológica.

Matriz Tukey (Ca)	MET	CP	ICH	CHI
MET		0.999	0.003	7.88E-12
CP	0.117		0.001	7.88E-12
ICH	5.599	5.963		7.88E-12
CHI	57.140	60.120	47.720	

Matriz Tukey (Si)	MET	CP	ICH	CHI
MET		0.969	0.736	7.80E-08
CP	0.634		0.447	1.85E-08
ICH	1.452	2.141		5.73E-07
CHI	12.620	13.740	11.170	

Tabla 5. Análisis de significancia de la variabilidad poblacional elemental (izquierdo: calcio y derecho: silicio) entre la muestra geológica de referencia y la de los metates.

Nota: MET (metates), CP (Carrillo Puerto), ICH (Icaiché) y CHI (Chichén Itzá).

Según el gráfico de componentes principales (Gráfica 1), la población de referencia geológica que más resalta la constituyen muestras de la formación Chichén Itzá, colectadas al sur-sureste de la sierra, entre Maxcanú, Calkiní, Labná, Sayil y Oxkintok. La segunda población de materiales de referencia que destaca proviene de la formación geológica Carrillo Puerto, recogidos en el sitio de Sihó, en Kopo-má y en Dzityá, al noroeste de Mérida. La última población observable, aunque con valores más distanciados, es la de los pedreros de la cara norte de la falla de Ticul, vinculados principalmente a los afloramientos del miembro geológico Icaiché. Si nos atenemos a la distribución que plantea el gráfico de componentes principales (Gráfica 1), observamos una mayor asociación elemental de los metates asociada con la muestra de la formación Carrillo Puerto, aunque aparece un individuo algo más alejado de la tendencia del grupo.

La distribución de poblaciones aportada por el gráfico de componentes sugiere que el silicio en combinación con el calcio, puede ser un factor químico fiable para determinar diferencias entre formaciones geológicas calcáreas. La causa de estas diferencias puede deberse al proceso de substitución de calcita por sílice en cementantes y bio-inclusiones (Álvarez, 1954; Bustillo, Pérez y Bustillo, 2012; Duch, 1988; Henao y Martínez, 2009; Tucker, 1991), en función del tipo de condiciones diagenéticas¹¹ a las que se expuso la formación geológica durante el proceso de sedimentación.

Como contraste estadístico practicamos una matriz de Tukey (Tabla 5) que expone, en los valores ubicados en su parte superior derecha, una mayor probabilidad de asociación porcentual del silicio o el calcio en los metates con la muestra de referencia de la formación Carrillo Puerto, seguida por la de Icaiché en el caso del silicio con una probabilidad positiva mayor 5% (0.05) de formar parte de la misma población. Sin embargo, respecto al calcio, esta probabilidad queda descartada al estar por debajo del p-valor necesario para que se cumpla con la hipótesis poblacional de relación con la formación Icaiché. Para con la muestra de referencia de la formación geológica Chichén Itzá, la probabilidad poblacional con la muestra arqueológica no se cumple con ninguno de los elementos, al desarrollar un p-valor mucho menor al 5% (0.05).

5. Identificación física de los recursos geológicos explotados en Sihó

El análisis petrográfico de los materiales arqueológicos se limita a un total de cuatro muestras de metates (M-2, M-4, M-8 y M-15) (Figura 2), que se han comparado con 10 muestras de referencia (ID: EG, 18, 22, 41, 131, 134, 149, 158, 161 y 167) (Figura 3) recolectadas durante los recorridos de prospección en las

¹¹ La diagénesis es el conjunto de procesos físicos y químicos (compactación, recristalización o cementación) de formación de una roca sedimentaria a partir del momento de deposición de los sedimentos.

tres principales formaciones geológicas. En general, las rocas calcáreas usadas para fabricar los metates se presentan microcristalizadas, compactas y duras, con una concentración variable de partículas o fósiles (peloides, pocos ooides, fragmentos de bivalvos, gasterópodos y alguno que otro intraclasto cuarcítico). No obstante, debido al gran volumen de los soportes tiene lugar una importante heterogeneidad petrográfica en las mismas unidades, con partes de *mudstone* o *boundstone* (M-2), con tendencia a *wackestone* (M-8, M-15), *packstone* (M-4) e incluso hacia *grainstone* (M-4). La primera observación al comparar las muestras arqueológicas, con las de referencia de cada una de las formaciones geológicas, radica en que con la simple caracterización de los litotipos calcáreos base a su textura deposicional, según su proporción de partículas (Embry y Klovan, 1971, modificado de Dunham, 1962), no es suficiente para discernir su procedencia. Ejemplo tenemos con la presencia de *grainstone* (ID: 18, 134, 158 y 167) en las tres formaciones geológicas o de *mudstone* (ID: 22 y 131) en Chichén Itzá o Carrillo Puerto. Los *grainstone* de la formación Icaiché (ID: 134 y 158) están dotados de un mayor contenido intraclástico lítico, en comparación a sus contenidos en fósiles u elementos peloidales u ooidales. Esta característica composicional presenta diferencias con los *grainstone* reportados de la formación geológica Carrillo Puerto (ID: 149 y/o 167), con contenidos más elevados en peloides, ooides o fósiles, que de partículas líticas. Otra diferencia aparente que contemplamos es un mayor grado de erosión de los contenidos de los *grainstone* de la formación Icaiché, que los de la formación Carrillo Puerto.

Otro aspecto a tener en cuenta entre las rocas calcáreas de la formación Carrillo Puerto y los de la Chichén Itzá, es que los *mudstone* y/o los *boundstone* de la primera (ID: 131 y/o 161) se muestran menos lavados. Las calizas de Carrillo Puerto también son más porosas (ID: 131 y 149) que las de las otras dos formaciones geológicas. Por otro lado, la formación geológica Chichén Itzá presenta materiales con una contenido cristalino-dolomítico (ID: EG) sin parangón al observado en la formación Icaiché o Carrillo Puerto.

Comparando los materiales arqueológicos con los de referencia geológica, observamos mayor concordancia petrográfica entre los materiales neógenos de la formación Carrillo Puerto obtenidos en los afloramientos inmediatos de Sihó (ID: 131, 149 y 167), atendiendo sobre todo al contenido en fósiles o peloides (M-2 y M4) y a las características menos lavadas en sus partes de *mudstone* y/o *boundstone* (M-2 y M8). Por ejemplo, estas similitudes quedan muy patentes entre los contenidos de gasterópodos fósiles de la muestra arqueológica del metate M-2, M-4 y M-15, con la muestra de referencia geológica ID: 167. Otro indicio menos evidente es la presencia compartida de algas coralinas rojizas o *Rhodophyta* (Antonio y Rosas, 2012), como se da entre la muestra de referencia ID: 41 o 149 y la muestra arqueológica M-8, aunque también se encuentran muy representadas en la formación Chichén Itzá (López, 1977). Alternativamente, en la misma muestra M-8 se observa alguna inclusión cuarcítica, localizada también en las rocas de las tres formaciones geológicas (Figura 4). Dicha situación refuerza la necesidad de

una cuantificación elemental del silicio y/o calcio, más allá de una simple identificación y caracterización mineralógica cualitativa.

6. Comentarios sobre la organización social de la explotación de recursos calcáreos en Sihó

Los datos aportados por los análisis arqueométricos y el gran tamaño de los soportes clásticos sugieren una extracción inmediata al sitio, probablemente de depósitos geológicos primarios neógenos, de las materias primas usadas para fabricar los metates de Sihó. Sin embargo, por el momento no se ha documentado la presencia de canteras especializadas con cajones estandarizados de corte de bloques, ya sea para fabricar herramientas de molienda u otros elementos arquitectónicos. A pesar de dicha ausencia, se han reportado *sascaberas* amortizadas con sus volados de laja calcárea desmoronados, vinculados a montículos naturales (*tzékel*) donde se ubica algún grupo arqueológico (5D16)¹² y que ofrecen buena asequibilidad de clastos (Figura 7). Tampoco podemos descartar la obtención de rocas sin la necesidad de agotamiento de las *sascaberas*, como los afloramientos expuestos en los mismos montículos naturales en proceso de fragmentación por meteorización.



Figura 7. Posible fuente geológica y materia prima. Nota: izquierda: *sascabera* colapsada (grupo 5D16); derecha: clasto aislado sin modificación (grupo 5D16) (Fotografías del autor).

Para la extracción de las lajas pudieron usarse estacas de madera insertada en las grietas de las rocas, en forma de palanca (Ruiz, 1986). También mazas enmangadas de buen tamaño (Figura 8a), como las reportadas en Chichén Itzá,

¹² Este grupo se excavó dentro del proyecto “El surgimiento de la civilización maya en el occidente de Yucatán: los orígenes de la complejidad social de Sihó”, de la Facultad de Ciencias Antropológicas de la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY) (Fernández, 2010; Jiménez *et al.*, 2006).

Mayapán (Proskouriakoff, 1962) o Dzibilchaltún (Santiago, 2004). Otros medios instrumentales pudieron ser azuelas y cinceles de pedernal documentados en Nakbé (Titmus y Woods, 2002), Muna y Dzibilchaltún (Andrews y Rovners, 1973) o cuñas de madera para tensionar por percusión las rocas agrietadas (Ruiz, 1986). Muchas de estas herramientas no se han documentado en Sihó, aunque sí se han reportado percutores manuales mediante cantos rodados o la reutilización de alguna mano grande fracturada (Figuras 8b, c y d).



Figura 8. Herramientas líticas de cantería. Nota: superior izquierda (a): maza con ranura de Chichén Itzá. Superior derecha (b): mano de Sihó reutilizada como percutor. Inferior izquierda y derecha (c y d): cantos rodados percutores de Sihó (Fotografías del autor).

La explotación local de estos recursos geológicos se adecuaría al primer intervalo de captación del modelo desarrollado por De Groot (1994) o Pétrequin y Jeunesse (1995), tratándose de materias primas que pueden ser obtenidas en menos de dos horas por su inmediatez, las características de los afloramientos y las herramientas disponibles (Figura 9). Dichos tiempos, en relación a la distancia de captación de los recursos, están aproximadamente dentro los intervalos reportados en varios ejemplos etnográficos y/o experimentales (Tabla 1). En particular, se ajustan bien a tiempos experimentales empleados por nosotros (Pujol, 2018), en el mismo espacio geológico, en la obtención de dos clastos para la fabricación

de un metate y una mano similares a los de Sihó. Esta franja hipotética formaría parte del territorio vinculado directamente al sitio (*site territory*), que circunscribe sus áreas inmediatas hasta una distancia máxima de unos 10 km (De Groot, 1994; Delgado, 2008; Pétrequin y Jeunesse, 1995; Risch, 1995).

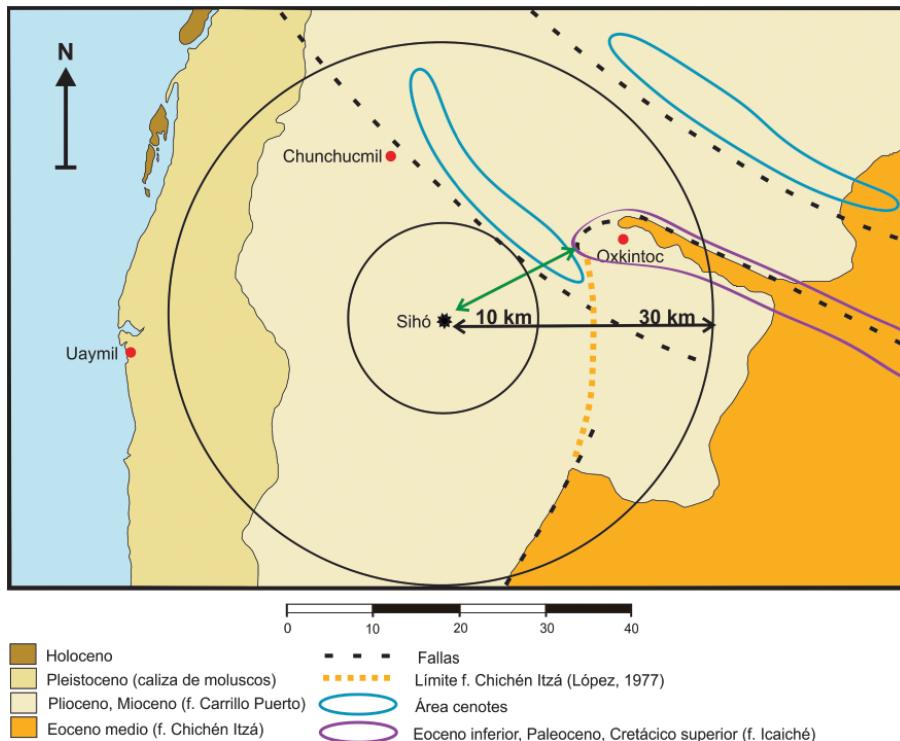


Figura 9. Adaptación del modelo concéntrico de captación de materias primas desarrollado por De Groot (1994) y Pétrequin y Jeunesse (1995). Nota: modificado de la carta geológico-minera, Servicio Geológico Mexicano, INEGI (2007) (Escala 1: 500.000). Se ubican otros asentamientos que compartieron tiempo con el sitio de Sihó.

Comparando las petrografías de las rocas referencia, observamos una mayor homogeneidad en la recurrencia y en el tamaño de los granos que presentan los *grainstone* de la formación Icaiché, tratándose de factores característicos para una buena propiedad abrasiva, incluso mejor que la presentada por los materiales líticos neógenos de la formación Carrillo Puerto (Pujol, 2018). También, como apunta Duch (1988), las rocas superficiales cretácicas y paleogénicas tienen mayor dureza que las del Neógeno, con la posibilidad de dotar a los instrumentos de mayor durabilidad funcional.

La captación potencial de estas rocas entraría dentro del segundo intervalo del modelo concéntrico de paleo génicas de Groot (1994) o Pétrequin y Jeunesse

(1995), a una distancia de captación entre los 10 y los 30 Km, y a una jornada de tiempo aproximada (Figura 9). Su no elección podría deberse al peso del clasto durante su traslado al asentamiento, aunque su mejor calidad abrasiva y durabilidad aportara mejores rendimientos funcionales a lo largo del tiempo. Otra posibilidad sería el desconocimiento funcional del material geológico, no obstante, en Sihó se ha documentado su utilización como abrasivo manual (Pujol, 2018). Ambos factores descartados, nos hace pensar en tendencia social hacia una plusvalía absoluta de la producción, con un menor interés por una mayor productividad económica aportada por la mejor calidad funcional de otros materiales geológicos.¹³ A esto le acompañaría la gran disponibilidad de recursos líticos colindantes neógenos y presentes en el mismo sitio de Sihó, con propiedades también aceptables para su transformación y uso como herramienta de molienda.

Con la aplicación de este modelo económico, pero partiendo del estudio de las características físico-químicas (independientes) de los objetos líticos arqueológicos y cotejándose con las características de las rocas disponibles en el medio natural, intentamos desarrollar hipótesis que aportaran información vinculada a decisiones sociales sobre la captación de los recursos geológicos. El modelo se centra en los diferentes niveles de asequibilidad social de los recursos en un territorio geográfico y se desarrolla como una relación entre su disponibilidad y su selección social. De tal forma se trataría de una escala de probabilidades, más que de certezas sobre los lugares de extracción de materias primas (Risch, 1995; 1998; Risch y Martínez, 2008).

Conclusiones

Con el presente artículo hemos querido demostrar que el tratamiento estadístico de datos cuantitativos elementales, obtenidos mediante fluorescencia de rayos X sobre muestras arqueológicas y geológicas de referencia, ofrece la posibilidad de discernir materiales calcáreos de distintas formaciones geológicas sedimentarias a partir de su proporción de silicio y/o calcio. Por otro lado, el uso de petrografías mediante láminas delgadas ha servido para identificar los litotipos con los que se fabricaron metates de Sihó y su comparación con otras láminas de referencia nos ha ayudado a reafirmar un probable origen geológico. De tal modo que los análisis de variancia porcentual de ambos elementos y las comparativas mediante lámina delgada, apuntan a una mayor concordancia petrográfica de la materia prima de los metates con las calizas neógenas de la formación geológica Carrillo Puerto donde se asienta Sihó.

¹³ Los rendimientos económicos aportados por plusvalía absoluta, en función de una mayor inversión de fuerza de trabajo y en relación opuesta a la mejora tecnológica de los medios de producción utilizados (plusvalía relativa), resultan más bajos (Marx, 1975; Risch, 1995).

Sin embargo, consideramos que, con la simple identificación química y petrográfica de los metates analizados, no siempre es suficiente para asegurar un área en concreto como fuente geológica; sobre todo cuando se trata de depósitos primarios. Cada formación sedimentaria contiene características fisicoquímicas (elementos químicos, minerales, fósiles, etcétera) que pueden ayudar a reconocerla entre las demás, en función de la diagénesis de cada nivel geológico. No obstante, debido al gran tamaño de cada formación, incluso con similares condiciones diagenéticas, dichos rasgos se pueden encontrar sobrerepresentados y/o compartidos en extensas áreas de las mismas o en formaciones geológicas distintas, dificultándose la concreción de las fuentes de recursos geológicos. En consecuencia, creemos necesario disponer de otros elementos independientes de contrastación arqueométrica, sin centrarse exclusivamente en datos cualitativos, que permitan cuantificar relaciones de variabilidad material, sea química o física, para una mayor concreción de las fuentes geológicas.

Tampoco descartamos la viabilidad del contraste cualitativo como la identificación de los contenidos fósiles, de gran utilidad para discernir edades geológicas que puedan caracterizar las formaciones geológicas analizadas. Del mismo modo, el uso de fuentes etnográficas o arqueológicas como la documentación de cantejas o *sascaberas*, de preferencia con otros vestigios tecnológicos, será de utilidad para proponer hipótesis mejor sustentadas sobre áreas de captación de recursos geológicos en depósitos primarios. Contrariamente, la identificación de fuentes geológicas secundarias, cuyos materiales se han formado por un agente natural, en particular (aluvión, fluvial, marítimo o glacial), puede resultar más sencilla si los artefactos líticos conservan en sus caras otros rasgos petrográficos, independientes y medibles de la erosión natural.¹⁴ En conclusión, las variables independientes de los objetos arqueológicos líticos dotan de elementos de análisis ubicados en la materialidad y circunscritos en un espacio físico (geológico), que puede ser commensurable y categorizado en un sentido socio-económico, al modelo de captación usado.

A pesar de las limitaciones metodológicas y de datos arqueométricos analizados, queda mucho recorrido por hacer: la sistematización de prospecciones y la caracterización cualitativa y cuantitativa de materiales y depósitos geológicos de la península de Yucatán; disponer en un futuro de una mayor muestra de referencia comparativa para nuestros materiales arqueológicos, aportará datos para

¹⁴ En geomorfología se han desarrollado ecuaciones para calcular los índices de esfericidad o aplanamiento de los materiales geológicos secundarios. Al uso podemos aplicar la fórmula Cailleux: $A_i = (L + l) : 2E$ o la de Lüttig: $\pi = E : L \cdot 10031$, estando ambas correlacionadas de manera inversamente proporcional (Cailleux, 1951; Delgado, 2008; Lüttig, 1956; Risch, 1995; 1998). Cailleux (1951) propició algunas estimaciones vinculadas a distintos procesos naturales de formación de cantos rodados: $A_i = 1.7-2.0$ (fluvioglaciares), $A_i = 2.3-2.8$ (playas marinas) o $A_i = 2.5-3.5$ (fluviales). Una ratio entre índices $A_i \leq 1.70 - 1.85$, podría ser apropiada para identificar discernir formaciones aluviales (Pujol, 2018).

alimentar el desarrollo de hipótesis sobre la gestión social y económica que los antiguos mayas hacían de sus recursos geológicos.

Agradecimientos

Agradezco a la doctora Lilia Fernández Souza de la Universidad Autónoma de Yucatán y al doctor Javier Reyes Trujeque del Centro de Investigación en Corrosión, vinculado a la Universidad Autónoma de Campeche, por la orientación y los medios aportados a mi tesis doctoral, origen y base para la realización del presente artículo. Al doctor Adam Temple Sellen por su inestimable apoyo y asesoría en mi actual proyecto de posdoctorado en el Centro Peninsular en Humanidades y Ciencias Sociales de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Bibliografía

- Adams, Arthur E., William Scott MacKenzie y C. Guilford
1997 *Atlas de rocas sedimentarias*. Barcelona: Masson.
- Aguilar Nogales, Mauro
1979a "Evaluación preliminar de las calizas Yucatán, municipio de Tekax, Yucatán", documento electrónico, Consejo de recursos minerales. Gerencia de exploración geológica. Residencia Quintana Roo. Chetumal, Quintana Roo.
1979b "Evaluación preliminar de arcillas lateríticas para la industria del cemento en el estado de Yucatán", documento electrónico, Consejo de recursos minerales. Gerencia de exploración geológica. Residencia Quintana Roo. Chetumal, Quintana Roo.
- Álvarez, Manuel
1954 "Exploración geológica preliminar del Río Hondo, Quintana Roo", *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 6: 207-213.
- Andrews E. Wyllies e Irving Rovner
1973 "Two Masons' Tool Kits from Muna and Dzibilchaltun, Yucatan", *Archaeological Evidence on Social Stratification and Commerce in the Northern Maya Lowlands*, Margaret A. L. Harrison y Robert Wauchop (eds.). Nueva Orleans: Middle American Research Institute, Universidad de Tulane (Middle American Research Institute, Publication 31).
- Antonio Sánchez, Jesús Marino y Edgar Francisco Rosas Alquicira
2012 "Rodolitos (Corallinales: Rhodophyta): vida y obra", *Ciencia y Mar*, XVI (47): 59-61.
- Bautista Zuñiga, Francisco, Héctor Estrada Medina, Juan J. Ma. Jiménez-Osornio y José A. González Iturbe
2004 "Relación entre el relieve y unidades de suelo en zonas cársticas de Yucatán", *TERRA Latinoamericana*, 22 (3): 243-254.

- Bautista Zuñiga, Francisco, Oscar Frausto, Thomas Ihl y Yameli Aguilar
2015 "Actualización del mapa de suelos del estado de Yucatán México: enfoque geomorfopedológico y wrb", *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 2 (6): 303-315. doi: <https://doi.org/10.19136/era.a2n6.110>.
- Bustillo, María Ángeles, José Luís Pérez-Jiménez y Manuel Bustillo
2012 "Caracterización geoquímica de rocas sedimentarias formadas por silificación como fuentes de suministro de utensilios líticos (Mioceno, cuenca de Madrid)", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 29 (1): 233-247.
- Butterlin, Jacques y Federico Bonet
1960 "Microfauna del Eoceno Inferior de la península de Yucatán", *Paleontología Mexicana*, 7: 1-17.
- Cailleux, André
1951 "Morphoskopische Analyse der Geschiebe und Sandkörner und Ihre Bedeutung für die Paläoklimatologie", *Geologische Rundschau*, 40: 11-19. doi: <https://doi.org/10.1007/BF01803203>.
- Cardoso Vázquez, Edith Arlet, Eduardo Sánchez Garrido y José Antonio Rafael Fernández
2004 "Carta Geológico-Minera Calkiní. Estados de Campeche y Yucatán", Clave F15-9-12, Escala 1:250,000. Lugar: Secretaría de Economía (SE). Consejo de Recursos Minerales (RM), <https://www.sgm.gob.mx/publicaciones_sgm/Informe_b.jsp> [consultado el 27 de enero de 2018].
- Clark, John E.
1988 *The Lithic Artifacts of La Libertad, Chiapas, Mexico: An Economic Perspective*. Provo: Utah: Brigham Young University (Papers of the New World Archaeological Foundation, Vol. 52).
- Cohen, Kim M., Stan C. Finney, Phil. L. Gibbard y Junxuan X. Fan
2013 "The ICS International Chronostratigraphic Chart", *Episodes*, 36 (3): 199-204, <https://stratigraphy.org/ICSchart/Cohen2013_Episodes.pdf> [consultada el 16 de agosto de 2020].
- Cook, Scott
1982 *Zapotec Stoneworkers: the Dynamics of Rural commodity productions in Modern Mexican Capitalism*. Washington D.C.: University Press of America.
- Dahlin, Bruce H., Marjukka Bastamow, Timothy Beach, Zachary Hruby, Scott Hutson y Daniel Mazeau
2011 "Phantom Lithics at Chunchucmil, Yucatán, México", *The Technology of Maya Civilization: Political Economy and beyond in Lithic Studies*, pp. 76-87, Zachary Hruby, Geoffrey Braswell, Oswaldo Chinchilla Mazariegos (eds.). Londres: Equinox Press.
- De Groot, Marjorie
1994 "Die Versorgung mit Silex in der Bandkeramischen Siedlung Hienheim 'Am

Weinberg' (Ldkr. Kelheim) und die Organisation de Abbus auf gebänderte Plattenhornsteine, im revier Arnhofen (Ldkr. Kelheim)", *Germania*, 72 (2): 355-407.

Delgado Raack, Selina

- 2008 "Prácticas económicas y gestión social de recursos (macro)líticos en la prehistoria reciente (III-I milenios a.C.) del Mediterráneo occidental", tesis de doctorado en Historia. Bellaterra, Barcelona, España: Universitat Autònoma de Barcelona, Departament d'Història de les Societats Precapitalistes i d'Antropología Social.

Duch Gary, Jorge

- 1988 *La conformación territorial del Estado de Yucatán. Los componentes del medio físico.* México: Universidad Autónoma de Chapingo, Centro Regional de la Península de Yucatán.
- 1991 *Fisiografía del Estado de Yucatán. Su relación con la agricultura.* México: Universidad Autónoma de Chapingo, Centro Regional de la Península de Yucatán, División de Ciencias Forestales.

Dunham, Robert J.

- 1962 "Classification of Carbonate Rocks According to Depositional Texture". *Classification of Carbonate Rocks*, pp. 108-121. W. E. Ham (ed.). Tulsa: American Association of Petroleum Geologist Foundation (AAPG).

Embry, Ashton F. y J. Edward Klovan

- 1971 "A late Devonian reef tract on northeastern Banks Island, Northwest Territories", *Bulletin of Canadian Petroleum Geologists*, 19 (4): 730-781. doi: <https://doi.org/10.35767/gscpgbull.19.4.730>.

Fernández Souza, Lilia

- 2010 "Grupos domésticos y espacios habitacionales en las Tierras Bajas Mayas durante el Período Clásico", tesis de doctorado en Filosofía. Hamburgo, Alemania: Universidad de Hamburgo.

Flores Díaz, Antonio

- 1974 "Los suelos de la República Mexicana", *El escenario geográfico. Recursos naturales*, pp. 9-108. México: Secretaría de Educación Pública, Instituto Nacional de Antropología e Historia.

Folan, William J.

- 1983 "Physical Geography of the Yucatan Peninsula", *COBA: A Classic Maya Metropolis*, pp. 21-40, William J. Folan, Ellen R. Kintz y Laraine A. Fletcher (eds.). Nueva York: Academic Press (Studies in Archaeology, 3).

Folk, Robert. L.

- 1962 "Spectral Subdivision of Limestone Types", *Classification of carbonate rocks. A Symposium, Tulsa*, pp. 62-84, W. E. Ham (ed.). American Association Petroleum Geologist Memoir. Tulsa: American Association of Petroleum Geologist Foundation (AAPG).

- Gallegos Gómora, Miriam Judith
 1994 "Explotación de piedra caliza en el Petén campechano", *Mayab*: 8-17.
- García Gil, Gerardo y Eduardo Graniel Castro
 2010 "Contexto físico", *Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán*, pp. 4-26, R. Durán y M. Méndez (eds.). Mérida [Yucatán]: Centro de Investigación Científica de Yucatán, Programa de Pequeñas Donaciones en México del Fondo para el Medio Ambiente Mundial, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente.
- Garza Tarazona, Silvia y Edward B. Kurjack
 1980 *Atlas Arqueológico del Estado de Yucatán*, tomo 2, pp. 229-249. México: Secretaría de Educación Pública, Instituto Nacional de Antropología e Historia, Centro Regional del Sureste.
- Götz, Christopher Markus
 2001 "Forma y función de los metates del Norte de Yucatán durante el Clásico", tesis de maestría en Filosofía. Bonn, Alemania: Universität Bonn.
 2005 "Una tipología de los metates prehispánicos de Yucatán", *Ketzalcalli*, 2: 70-99.
- Gronenborn, Detlef
 1995 "Ethnoarchäologische Untersuchungen zur rezenten Herstellung und Nutzung von Mahlsteinen in Nordost-Nigeria", *Experimentelle Archäologische, Bilanz 1994. Archäologische Mitteilungen aus Nordwestdeutschland*, 8, pp. 45-55, M. Fansa (ed.). Oldenburg: Staatliches Museum für Naturkunde und Vorgeschichte.
- Hammer, Øyvind, David A.T. Harper, Paul D. Ryan
 2001 "Past: Paleontological Statistics software package for education and data analysis", *Palaeontología Electronica*, 4 (1): 1-9.
- Hayden, Brian
 1987 "Traditional metate manufacturing in Guatemala using chipped stone tools", *Lithic studies among the contemporany Highland Maya*, pp. 8-119, Brian Hayden (ed.). Tucson: The University Arizona Press.
- Henao Aristizábal, Eduardo y Luís Fernando Martínez Casas
 2009 "Características diagenéticas del 'Paleozoico de la Jagua', Garzón-Huila", *Investigación y Desarrollo*, 8 (1): 14-19.
- Hersh, Theresa Lilian
 1982 "Grinding Stone and food processing techniques of the Neolithic societies of Turkey and Greece: statistical, experimental and ethnographic approaches to archaeological problemsolving", tesis de doctorado en Filosofía, Columbia: Columbia University.
- Horsfall, Gayel Ann
 1987 "A Design Theory Perspective on Variability in Grinding Stones", *Lithic stu-*

dies among the contemporany Highland Maya, pp. 332-337, Linda R. Manzanilla y Kenneth G. Hirth (eds.). Tucson: The University Arizona Press.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática)

- 2007 "Carta Geológico-Minera, Yucatán, Campeche y Quintana Roo", documento electrónico, Consejo General de Minería (CGMINERÍA). Secretaría de Economía (SE). Servicio Geológico Mexicano.

Jiménez Álvarez, Socorro del Pilar

- 2007 "Sihó: una unidad política del occidente de Yucatán", tesis de maestría en Ciencias Antropológicas. Mérida, Yucatán: Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ciencias Antropológicas.

Jiménez Álvarez, Socorro, Rafael Cobos, Heajoo Chung y Roberto Belmar Casso

- 2006 "El despertar de la complejidad sociocultural visto desde el estudio tecnológico de la cerámica: explicando las transformaciones sociopolíticas en el occidente de Yucatán", *XIX Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala, 2005*, pp. 532-542, Juan Pedro Laporte, Bárbara Arroyo y Héctor Mejía (eds.). Guatemala: Museo Nacional de Arqueología y Etnología.

Kidder, Alfred Vincent

- 1947 *Los artefactos de Uaxactún, Guatemala*. Washington: Institución Carnegie de Washington.

López Ramos, Ernesto

- 1977 "Estudio geológico de la península de Yucatán", *Enciclopedia Yucatanense*, vol. 10, pp. 43-70. Mérida, Yucatán: Gobierno del Estado de Yucatán

Lüutting, Gerd

- 1956 "Eine neue, einfache geröllmorphometrische Methode", *Eiszeitalter und Geogenwart Quaternary Science Journal*, 7 (1): 13-20. doi: <https://doi.org/10.23689/findgeo-944>.

Madrid González, Mariela Viridiana

- 2013 "Análisis morfológico de los artefactos líticos de molienda del asentamiento prehispánico de Piedra Labrada, Veracruz", tesis de licenciatura en Arqueología. Veracruz: Universidad Veracruzana, Facultad de Antropología, PiLaB.

Marín Stillman, Luís Ernesto, Julia Guadalupe Pacheco Ávila y Renán Méndez Ramos

- 2004 "Hidrogeología de la península de Yucatán", *El agua en México vista desde la Academia* 10, pp. 159-177, Blanca Jiménez y Luís Marín (eds.). México: Academia Mexicana de Ciencias.

Marx, Karl

- 1975 *El Capital. Crítica de la economía política, el proceso de producción de capital*, tomo I. Madrid: Siglo Veintiuno Editores, S.A.

- Miranda Huerta, Alfonso
- 2005 "Carta Geológico-minera Tizimín. Estado de Yucatán", Clave F16-7, Escala 1:250 000, Documento electrónico. Secretaría de Economía (se). Servicio Geológico Mexicano, <https://www.sgm.gob.mx/publicaciones_sgm/Informe_b.jsp> [consultada el 10 de enero 2021].
- Nelson, Margaret C. y Heidi Lippmeier
- 1993 "Grinding-Tool Design as Conditioned by Land-Use pattern", *American Antiquity*, 58 (2): 286-305. doi: <https://doi.org/10.2307/281971>.
- Pat Cruz, Daniel.
- 2006 "Análisis de las Piedras de Molienda de Sihó, Yucatán", tesis de licenciatura en Ciencias Antropológicas. Mérida, Yucatán: Universidad Autónoma de Yucatán.
- Pétrequin, Pierre y Christian Jeunesse (eds.)
- 1995 *La hache de Pierre. Carrières vosgiennes et échanges de lames polies pendant le Néolithique (5400-2100 av. J.C.)*. Paris: Editions Errance.
- Pie i Batlle, Jesús y Assumpció Vila i Mitjà
- 1991 "Relaciones entre objetivos y métodos en el estudio de la industria lítica", *Tecnología y Cadena Operativa Lítica, Treballs D'arqueologia 1*, pp. 271-278, Rafael Mora, Xavier Terrades, A. Parpal y C. Plana (eds). Bellaterra, Barcelona, España: Universitat Autònoma de Barcelona.
- Proskouriakoff, Tatiana
- 1962 "The Artifacts of Mayapan", *Mayapan, Yucatan, Mexico*, pp. 321-439, Harry Evelyn Dorr Pollock, Ralph Loveland Roys, Tatiana Proskouriadoff y Augustus Ledyard Smith (eds.). Washington: Carnegie Institution of Washington (Publication no. 619).
- Pujol Pizà, Lorenzo
- 2018 "Procesos económicos en las tierras bajas del norte durante el clásico tardío (550/600 - 750/800 d.C.). Un acercamiento teórico-metodológico a la producción y uso de instrumentos de molienda en Sihó", tesis de doctorado en Ciencias Antropológicas. Mérida, Yucatán: Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ciencias Antropológicas.
- Risch, Roberto
- 1995 "Recursos naturales y sistemas de producción en el sudeste de la Península Ibérica entre 3000 y 1000 a.n.e.", tesis de doctorado en Historia. Bellaterra, Barcelona, España: Universitat Autònoma de Barcelona, Departament d' Història de les Societats Precapitalistes i d'Antropologia Social.
- 1998 "Análisis paleoeconómico y medios de producción líticos: el caso de Fuente Álamo", *Minerales y metales en la prehistoria reciente. Algunos testimonios de su explotación y laboreo en la Península Ibérica*, pp. 105-154, Germán Delibes de Castro (coord.). Valladolid: Universidad de Valladolid.

- Risch, Roberto y Francisco Martínez Fernández
2008 “Dimensiones naturales y sociales de la producción de hachas de piedra en el noreste de la Península Ibérica”, *Trabajos de Prehistoria*, 65 (1): 47-71. doi: <https://doi.org/10.3989/tp.2008.v65.i1.135>.
- Ruiz Aguilar, María Elena
1986 “Análisis preliminar de la lítica de Mundo Perdido, Tikal”, *Mesoamérica*, 7 (11): 113-133.
- Ruiz Zapatero, Gonzalo y Francisco Burillo
1998 “Metodología para la investigación en arqueología territorial”, *Munibe*, 6: 45-64.
- Runnels, Curtis N.
1981 “A diachronic and economic analysis of millstone from the Argolid, Greece”, tesis de doctorado en Filosofía. Bloomington Indiana: Indiana University.
- Sánchez Rojas, Luis Edmundo y Gustavo Zamorano Montiel
1993 *Informe de exploración geológico-minera en los yacimientos de calcarenita del Ejido de Calchetoc, Municipio de Opichén, Yucatán*. Consejo de Recursos Minerales. Gerencia Regional Zona Sur. Oficina Regional Chiapas. Convenio de concertación en exploración geológico-minera entre el Consejo de Recursos Minerales y Empresas de Solidaridad.
- Santiago Lastra, Gloria
2004 “La Plaza Sur de Dzibilchaltún, Yucatán”. Fundación para el Avance de los Estudios Mesoamericanos, INC. FAMSI: 1-75, <<http://www.famsi.org/reports/0006es/00006esSantiagoLastra01.pdf>> [consultada el 9 de octubre de 2016].
- Titmus, Gene L. y James C. Woods
2002 “Un estudio arqueológico y experimental de las canteras antiguas de Nakbe, Petén, Guatemala”, *XV Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala, 2001*, pp.188-201, Juan Pedro Laporte, Héctor Escobedo y Bárbara Arroyo (eds.). Guatemala: Museo Nacional de Arqueología y Etnología.
- Tucker, Maurice E.
1991 *Sedimentary Petrology: An Introduction to the Origin of Sedimentary Rocks*. 2a ed. Londres: Blackwell Science.
- Virgen Magaña, Ángel y Julio César Baca Carreón
1988 *Monografía Geológico-Minera del estado de Yucatán*. Puebla, México: Consejo de Recursos Minerales, Subgerencia Regional zona Sur.

Llorenç Pujol Pizà. Español. Licenciado en Historia y Maestro en Arqueología Prehistórica por la Universidad Autónoma de Barcelona; doctor en Ciencias Antropológicas por la Universidad Autónoma de Yucatán. Adscrito al Centro Peninsular en Humanidades y Ciencias Sociales de la Universidad Nacional Autónoma de México mediante el programa de becas posdoctorales. Sus líneas de investigación son la geoarqueología y el análisis arqueométrico y funcional de los artefactos líticos pulimentados mediante petrografía y espectroscopía, desde un enfoque social y económico. Su proyecto en curso se titula “Rocas, martillos y sascaberas. La cantería maya prehispánica en el occidente de Yucatán”.

llorenspujol2@gmail.com

Lorenç Pujol Pizà. Spanish. Graduated in History and Master in Prehistoric Archaeology from the Universidad Autónoma de Barcelona, PhD in Anthropological Sciences from the Universidad Autónoma de Yucatán He is attached to Centro Peninsular en Humanidades y Ciencias Sociales de la Universidad Nacional Autónoma de México through the postdoctoral scholarship program. His lines of research are geoarcheology and archeometric and functional analysis of lithic artifacts polished by petrography and spectroscopy, from a social and economic perspective. His ongoing project is titled “Rocas, martillos y sascaberas. La cantería maya prehispánica en el occidente de Yucatán”.

llorenspujol2@gmail.com