

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS
DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

Unidad Mérida

Departamento de Ecología Humana

La Antropización del Paisaje en el Norte de la Península de Yucatán: Un estudio histórico-holístico de El Parque Estatal Lagunas de Yalahau.

Tesis que presenta:

M. C. Ricardo Rodolfo Antorcha Pedemonte

Para obtener el Grado de

Doctor en Ciencias

En la Especialidad de Ecología Humana

Director de Tesis

Dr. Lane Frederick Fargher.

Agradecimientos Instituciones

En primer lugar, extiendo mi más profundo agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por la beca otorgada, la cual permitió la realización de mis estudios de posgrado. Asimismo, agradezco al Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav) Unidad Mérida, particularmente al Departamento de Ecología Humana, por aceptarme como estudiante de doctorado durante estos seis años de arduo trabajo, y a los profesores que, con su dedicación, contribuyeron a mi formación como investigador científico.

Agradezco especialmente a la Secretaría de Educación Pública por confiar en nuestro proyecto y brindar los recursos necesarios para llevar a cabo esta investigación. El financiamiento proporcionado para la investigación arqueológica, paleoecológica e histórica en las Lagunas de Yalahau (SEP-Cinvestav #165) fue fundamental para el desarrollo del estudio.

Mi gratitud también va dirigida a la Secretaría de Desarrollo Sustentable del Estado de Yucatán, por aprobar el proyecto y otorgar los permisos indispensables para trabajar en la Reserva Estatal Parque Lagunas de Yalahau, un Área Natural Protegida de inestimable valor biocultural para la Península de Yucatán y México.

Reconozco el apoyo del Consejo Nacional de Arqueología del Instituto Nacional de Antropología e Historia, quienes en todo momento nos han brindado el apoyo para la obtención de los permisos necesarios.

Finalmente, quiero agradecer al Municipio de Homún, a sus dirigentes políticos y a sus cálidos habitantes, quienes nos brindaron su apoyo incondicional a lo largo de la realización del proyecto.

Agradecimientos Personales

En el ámbito personal, quiero expresar mi más profundo respeto y gratitud al Dr. Lane Fargher, más bien Lane, quien ha sido mucho más que un profesor, mentor y amigo. A él le debo estar donde me encuentro hoy, y de él he aprendido lecciones que van más allá de lo enseñado en un salón de clases. Su guía ha sido fundamental para convertirme en el investigador que soy, sirviendo siempre como un ejemplo a seguir, tanto en el ámbito académico como en el personal. Su motivación, dedicación y apoyo inquebrantable a lo largo de este proceso son simplemente invaluable. Es una persona con un corazón muy grande, que hace años me prometió que juntos llegaríamos hasta este momento, cumpliendo su palabra al mostrarme el camino para emprender uno de los viajes más importantes y significativos de mi vida.

De igual manera, extiendo mi gratitud a la Dra. Almira Hoogesteyn Reul, miembro del Comité Asesor, cuyos comentarios y sugerencias en cada reunión fueron claves para el desarrollo de esta investigación y para mi formación tanto profesional como personal.

Agradezco de manera especial al Dr. Alexander Correa Metrio, quien no solo me brindó su apoyo, sino que también abrió las puertas de su casa y puso a mi disposición valiosos recursos humanos e institucionales, sin los cuales este trabajo no habría sido posible. Su paciencia y guía fueron fundamentales en mi incursión en nuevos campos de investigación, convirtiéndome en un profesional más completo y con una visión más amplia.

Un profundo agradecimiento a la Arlga. Iziar Martínez Rojo, profesional impecable en el campo de la arqueología, que a lo largo del camino ha mostrado una y otra vez su enorme valor como ser humano y compañera de trabajo, a quien hoy tengo el honor de tener como amiga, junto a la cual emprendería cualquier proyecto con los ojos cerrados.

Un reconocimiento especial también para el Sr. Edecio Echeverría, custodio de la Reserva, cuyo vasto conocimiento del terreno fue esencial para la realización de este proyecto. Su apoyo, nacido del cariño por el Parque, nos acompañó en todo momento, trabajando siempre junto a los investigadores en la protección y conservación de esta Área Natural Protegida.

Mención especial merece mi compañero de buceo, César Sánchez, quien fue mi leal y confiable aliado en los viajes submarinos al Xibalbá, donde recolectamos los núcleos de sedimento que forman la base del análisis de esta investigación.

Finalmente, quiero agradecer a la compañía OBTURA y a su director, Cuauhtémoc Moreno Cabrera, por el apoyo crucial brindado en el trabajo de prospección y reconocimiento aéreo mediante vuelos de dron, permitiéndonos crear una visión integral del área.

Esta tesis está dedicada de manera muy especial a Cassandra Gleason Sánchez, quien me ha acompañado, apoyado y ha sido mi fuerza durante todos estos años. Le debo más de lo que las palabras pueden expresar, ya que, con su amor, paciencia y dedicación desinteresada e incondicional, me ayudó a construir los cimientos que hoy nos llevan a cumplir este objetivo, un logro que es tan suyo como mío. Gracias por todo amor, el juego apenas comienza.

Índice

Resumen	5
Abstract	7
La Antropización del Paisaje en el norte de la península de Yucatán: Un estudio histórico-holístico de El Parque Estatal Lagunas de Yalahau.	9
Capítulo I. Introducción	9
Capítulo II. Antecedentes: La arqueología, el paleoclima y los antiguos mayas	14
Antecedentes históricos y arqueológicos de las tierras mayas	14
<i>Historia de la arqueología en las tierras mayas.</i>	14
<i>Historia de investigación arqueológica en el norte de la península</i>	16
<i>Cronología de la cultura Maya</i>	17
Estudios paleoclimáticos del área maya.	21
Capítulo III. Marco Teórico	29
La nueva arqueología y los mayas	29
Las bases de la nueva arqueología y ecología cultural	29
La ecología política de la nueva arqueología	32
La ecología histórica como una perspectiva alternativa.	35
<i>La biodiversidad, sostenibilidad y resiliencia</i>	35
<i>Sostenibilidad y resiliencia de los sistemas tradicionales en área Maya.</i>	38
<i>El paisaje antrópico, las escalas y la larga duración.</i>	40
<i>El Paysage: Explorando las Interacciones Humanas con el Entorno a lo largo del Tiempo.</i>	42
<i>El medio ambiente construido como enfoque para entender la cultura.</i>	44
<i>Integración de Nicho Ecológico, la Especie Clave en la Ecología Histórica.</i>	45
<i>La ecología histórica del norte de la península de Yucatán</i>	47
Pregunta de investigación.	48
Objetivos.	48
<i>Objetivo general.</i>	48
Capítulo IV. Metodología	50
Estudio de Caso.	50
Métodos arqueológicos.	51
Métodos paleoecológicos.	52
<i>Procesos Lacustres, flujos y depositación de sedimento.</i>	54
<i>Procesos Físicos</i>	55

<i>Recolección de núcleos de sedimento no consolidados (en cenotes)</i>	56
<i>Fecha y modelo de edad</i>	57
<i>Análisis de espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF).</i>	58
<i>Procesos Geoquímicos e Indicadores</i>	62
<i>Análisis de Elementos Ligeros e Isótopos</i>	66
<i>La quimioestratigrafía isotópica. El $\delta^{13}\text{C}$ en los estudios de paleoecología.</i>	68
<i>Plantas C3, C4 y CAM</i>	68
<i>Fijación de carbono en suelos para la reconstrucción de paleoambiental.</i>	69
<i>Procedimiento de análisis $\delta^{13}\text{C}$.</i>	70
<i>Análisis isotópico de $\delta^{18}\text{O}$.</i>	70
<i>Procedimiento de análisis $\delta^{18}\text{O}$.</i>	71
Métodos cuantitativos	72
<i>Análisis de componente principales (PCA).</i>	72
Métodos históricos	72
Justificación del Caso	74
Antecedentes y caracterización del Área de Estudio	74
<i>Caracterización topográfica y valores hídricos del ANP-PELY.</i>	80
Antecedentes arqueológicos e históricos de ANP-PELY	83
<i>El sitio arqueológico Parque Estatal Lagunas de Yalahau</i>	83
<i>Devenir histórico-colonial del ANP-PELY</i>	84
<i>La transición a la época hispana</i>	87
<i>Los ranchos y haciendas en el ANP-PELY.</i>	91
<i>Principales investigaciones y estudios ecológicos conducidos hasta ahora en el ANP-PELY.</i>	94
Trabajo de campo.	95
<i>Temporada de campo 2020/2021.</i>	95
Resultados Arqueológicos	97
Patrón de asentamiento, cenotes y humedales de Yalahau.	103
<i>La Aguada Artificial Yohax ké</i>	104
<i>Las Terrazas Agrícolas de Yalkau y Mahuitzil.</i>	106
Resultados del estudio histórico	108
<i>Población, tributo y encomienda.</i>	109
<i>Territorialidad, producción y subsistencia</i>	113
<i>Luneros, acasillados y hacendados henequeneros</i>	119
<i>Área Natural Protegida Parque Estatal Lagunas de Yalahau</i>	124

Resultados Análisis Paleoecológicos	127
Exploración de cenotes y recolección de núcleos.	127
<i>Análisis de núcleos</i>	129
Cenote Cüil	130
<i>Fechas de radiocarbono y modelo de edad-profundidad</i>	131
<i>Tasa de sedimentación.</i>	132
<i>Quimioestratigrafía elemental</i>	136
<i>Quimioestratigrafía isotópica</i>	140
<i>Análisis del modelo de edad-profundidad y la quimioestratigrafía</i>	141
Cenote Kikal	143
<i>Fechas de radiocarbono y modelo de edad-profundidad</i>	144
<i>Tasa de sedimentación del cenote Kikal</i>	145
<i>Quimioestratigrafía elemental</i>	146
<i>Quimioestratigrafía isotópica</i>	149
<i>Análisis del modelo de edad-profundidad y la quimioestratigrafía</i>	153
Cenote Oxola	154
<i>Fechas de radiocarbono y modelo de edad-profundidad</i>	155
<i>Tasa de sedimentación en el cenote Oxola.</i>	156
<i>Quimioestratigrafía elemental</i>	158
<i>Quimioestratigrafía isotópica</i>	160
<i>Análisis del modelo de edad-profundidad y la quimioestratigrafía</i>	164
La Quimioestratigrafía de Yalahau.	165
La quimioestratigrafía elemental en Yalahau	165
<i>Elementos Carbonatados (Ca, TIC, CaCO₃, Sr).</i>	168
<i>Variabilidad de la Materia Orgánica (TN, TC y TOC)</i>	168
<i>Elementos Terrigénicos (Rb, K, Al, Fe y Zr).</i>	168
<i>Diferencias entre los Cenotes</i>	170
La quimioestratigrafía isotópica en Yalahau.	171
<i>Clásico temprano</i>	173
<i>Clásico tardío-terminal (500-550 al 950-1000 d.C.)</i>	175
<i>Postclásico</i>	177
<i>Época histórica</i>	181
El Paisaje de Yalahau en la larga duración. Análisis holístico del modelo de edad-profundidad, la quimioestratigrafía, arqueología e historia en la subregión de Yalahau.	184

<i>Clásico Temprano (250-550 d.C.)</i>	184
<i>Clásico Tardío-Terminal (550-950 d.C.)</i>	185
<i>Postclásico (950/1000-1450 d.C.)</i>	187
<i>Época histórica-colonial (1450/1550-1940 d.C.)</i>	188
VIII. Referencias citadas.	194
Lista de figuras.	220
Lista de tablas.	223
Apéndice 1 – Ostrácodos	224

Resumen

El trabajo de investigación se centra en un análisis multidisciplinario de larga duración, con un enfoque en la ecología histórica. Basado en análisis paleoecológicos de núcleos de sedimento recuperados en los cenotes Ciil, Kikal y Oxola en Área Natural Protegida Parque Estatal Lagunas de Yalahau, así como, en la prospección arqueológica del área circundante a las aguadas y la búsqueda y análisis de fuentes históricas, con el objetivo de entender las dinámicas ambientales de precipitación/sequía, su impacto en la civilización Maya a lo largo del tiempo y las posibles respuestas y cambios sociales asociados a estos durante estos eventos. Con este fin, se realizaron análisis de fluorescencia de rayos X (XRF por sus siglas en inglés), química orgánica y fechamientos por radiocarbono ^{14}C . Se realizaron pruebas estadísticas para interpretar la relación y variabilidad de la información, con pruebas de componentes principales (PCA) que explican el 95% de la variabilidad de los datos, compuestos en tres grupos principales; litogénicos, terrigénicos y material orgánico.

Los datos hasta ahora generados muestran que, durante el período Clásico el sitio de Yalahau experimentó un crecimiento significativo, posiblemente debido a su localización estratégica entre la zona de la costa, Izamal y la región del Puuc, al sur del Estado de Yucatán. Sin embargo, en el período Postclásico la actividad constructiva cesó y según fuentes históricas el poder político-administrativo se trasladó hacia el *cuchcabal* Hocabá, lo que abonó al decaimiento y posterior abandono de la zona, al menos del núcleo central junto a la aguada de Yalahau, de donde adquiere su nombre la ciudad. Este cambio refleja importantes transformaciones en la organización territorial y política de la región. Los registros paleoecológicos e históricos evidencian fluctuaciones climáticas considerables entre los siglos III y V, así como entre los siglos IX y X, y XVI y XIX, lo que creemos jugó un papel importante dentro de los procesos sociales, el diseño espacial de la ciudad y la construcción del paisaje. El sitio se encuentra envuelto dentro de una dinámica político-económica regional estrechamente relacionada con su crecimiento y los cambios documentados en la arquitectura, como lo muestran los resultados arqueológicos. Utilizando fuentes históricas hemos documentado periodos de sequía, huracanes y también epidemias, que afectaron a la población de Yalahau y su organización social, subrayando la interconexión entre los factores

ambientales y las respuestas humanas a los cambios climáticos mediante la integración de la información arqueológica, paleoecológica e histórica.

Por último, la investigación ofrece una visión integral de la historia ecológica y las condiciones socioambientales de Yalahau desde el período Clásico hasta finales del siglo XX, cuando el área es decretada como Área Natural Protegida Parque Estatal Lagunas de Yalahau y, posteriormente, sitio RAMSAR, por la importancia de sus humedales. La capacidad de ajuste de las comunidades mayas ante las fluctuaciones climáticas y los desafíos ambientales fue crucial en su evolución y mantenimiento por más de tres mil años, incluso hasta nuestros días. Estos hallazgos enriquecen y ofrecen en nuevo enfoque holista para la comprensión de las civilizaciones antiguas y modernas, brindando lecciones valiosas para enfrentar los desafíos ambientales contemporáneos. La interconexión entre el ambiente y las respuestas humanas, así como su interconectividad con factores políticos, económicos y simbólicos, destaca la importancia de considerar los factores culturales, históricos y ecológicos en el estudio de la sostenibilidad y la resiliencia de las sociedades.

Abstract

Our research focuses on a *long durée* multidisciplinary analysis, with a focus on historical ecology. Based on paleoecological analysis of sediment cores recovered from the Ciil, Kikal and Oxola cenotes in the Protected Natural Area Lagunas de Yalahau State Park, as well as on archaeological prospecting of the area surrounding the reservoirs and the search and analysis of historical sources, with the aim of understanding the environmental dynamics of precipitation/drought, its impact on the Mayan civilization over time and the possible responses and social changes associated with these during these events. To this end, X-ray fluorescence (XRF) analysis, organic chemistry and ¹⁴C radiocarbon dating were performed. Statistical tests were performed to interpret the relationship and variability of the information, with principal component tests (PCA) explaining 95% of the variability of the data, composed of three main groups: lithogenic, terrigenous and organic material.

The data generated so far show that during the Classic period the site of Yalahau experienced significant growth, possibly due to its strategic location between the coastal area, Izamal and the Puuc region, south of the State of Yucatán. However, in the Postclassic period construction activity ceased and according to historical sources political-administrative power was transferred to the *cuchcabal* Hocabá, which contributed to the decline and subsequent abandonment of the area, at least of the central core next to the Yalahau waterhole, from which the city gets its name. This change reflects important transformations in the territorial and political organization of the region. Paleoecological and historical records show considerable climatic fluctuations between the 3rd and 5th centuries, as well as between the 9th and 10th centuries, and the 16th and 19th centuries, which we believe played an important role in social processes, the spatial design of the city and the construction of the landscape. The site is involved in a regional political-economic dynamic closely related to its growth and documented changes in architecture, as shown by the archaeological results. Using historical sources, we have documented periods of drought, hurricanes and also epidemics, which affected the population of Yalahau and its social organization, highlighting the interconnection between environmental factors and human responses to climate change by integrating archaeological, paleoecological and historical information.

Finally, the research offers a comprehensive view of the ecological history and socio-environmental conditions of Yalahau from the Classic period to the end of the 20th century,

when the area was declared a Protected Natural Area, Lagunas de Yalahau State Park, and later a RAMSAR site, due to the importance of its wetlands. The ability of Mayan communities to adapt to climatic fluctuations and environmental challenges was crucial in their evolution and maintenance for more than three thousand years, even to this day. These findings enrich and offer a new holistic approach to understanding ancient and modern civilizations, providing valuable lessons for facing contemporary environmental challenges. The interconnection between the environment and human responses, as well as their interconnectivity with political, economic and symbolic factors, highlights the importance of considering cultural, historical and ecological factors in the study of the sustainability and resilience of societies.

La Antropización del Paisaje en el norte de la península de Yucatán: Un estudio histórico-holístico de El Parque Estatal Lagunas de Yalahau.

Capítulo I. Introducción

El impacto de los humanos sobre el ambiente global ha generado una prolífera y apasionada polémica, tanto en el ámbito social, como en la investigación científica, en las últimas décadas (v.g., Steffen et al. 2006). Esta discusión ha sido abordada desde diferentes puntos de vistas y perspectivas científicas a lo largo del tiempo, la mayoría enfocados a entender aspectos fundamentales sobre la subsistencia y desarrollo de asentamientos humanos en diferentes épocas y tipos de ambientes. Una de las regiones donde se ha generado más polémica sobre el impacto de los humanos en la tierra, es la de las tierras bajas mayas, ubicada sobre la península de Yucatán y partes de América Central, incluyendo los estados de Campeche, Yucatán, Quintana Roo, Tabasco y Chiapas, y los países de Guatemala, Belice y Honduras.

Hoy en día, hay extensivos argumentos que proponen a los mayas como degradadores de los ambientes que habitan y esto ha sido utilizado como herramienta de los ecólogos, biólogos y políticos para justificar medidas implementadas por el Estado, para mitigar la tragedia de los comunes (Hardin 1968). Estas medidas han resultado muchas veces en el despojo de los mayas y su relocalización para crear bioreservas, con el intento de conservar los ambientes prístinos que los mayas “no han tocado” y restaurar los que ellos han degradado, así como, otras políticas sobre el uso de tierras que limita las actividades que los mayas pueden realizar dentro y fuera de las reservas. Parte de las justificaciones sobre la necesidad de intervenciones para la conservación, incorporan discursos y narrativas sobre la historia de larga duración del impacto degradadora de los mayas (Acopa y Boege 1998; Eastmond y Faust 2006; Rivera-Núñez et al. 2020; cf. Beach et al. 2002; Douglas et al. 2018; Kennett y Beach 2013; Turner and Sabloff 2012).

Las narrativas actuales sobre los mayas reflejan una historia de intervención occidental y arqueología colonialista, especialmente por parte de estadounidenses, que catalogaron a los mayas como menos desarrollados que los europeos y sin conocimientos para un manejo ambiental sostenible (Anderson et al. 2005; Fischer 1996). Se cuestiona cómo la cultura maya se desarrolló en la selva tropical, un ambiente considerado incapaz de sostener grandes poblaciones humanas, limitándose a asentamientos dispersos con

agricultura de bajo impacto (Fedick y Morrison, 2004; Meggers 1954; Thompson 1954). En el siglo XX, la arqueología adoptó conceptos de la ecología de sistemas, destacando la ecología cultural de Steward (1955) y la ciencia de la cultura de White (1949), promoviendo proyectos multidisciplinarios para reconstruir las condiciones paleoecológicas de las sociedades mayas (Cowgill 1966; Couich y Stviver 1974; Rice, 1978; Deevey 1979; Binford 1987).

Estudios paleoambientales en Yucatán durante los últimos 50 años utilizaron diversos indicadores en sedimentos depositados en ambientes acuáticos para analizar interacciones entre clima, ambiente y cultura maya (Brenner et al. 2002), revelando cambios temporales y espaciales en los ecosistemas (Hodell 1995; Curtis et al. 1996, 1998; Leyden 1998) y proporcionando información sobre su impacto y recuperación (Roberts 1998). Los primeros estudios en las Tierras Altas del Sur y Tierras Bajas del Norte se centraron en la reconstrucción paleoecológica mediante polen fósil en sedimentos lacustres (Deevey 1979; Leyden 1987), aunque limitados al Holoceno medio. Este enfoque produjo un modelo de crecimiento demográfico sin control para la época prehispánica, culminando en una intensificación agrícola y deforestación masiva durante el Clásico Terminal (700-950 d.C.) (Demarest et al. 2013; Lowe 1985; Sanders y Murdy 1982; Sanders y Webster 1994; Abrams et al. 1996; Anselmetti et al. 2007; Heckbert 2014; Paine y Freter 1996). Se propuso que la deforestación, exacerbada por las sequías prolongadas, resultó en el colapso catastrófico de la civilización maya y el abandono de sus ciudades a finales del s. X, durante el período denominado como Clásico terminal (750-950 d.C.) (Hodell y Curtis, 1995; Cook et al. 2012).

A mediados de los 1990s, una nueva generación de académicos empezó una evaluación crítica de la “nueva” arqueología y su determinismo ecológico dentro y fuera de las tierras bajas mayas. El trabajo que empezó este debate fue abierto por Erickson (2006) con su artículo de 1999 sobre los campos elevados en la cuenca de lago Titicaca y su crítica de los argumentos determinísticas ambientales de Kolata y colegas. Esta crítica consolidó bajo el concepto de ecología histórica y empezó a ganar terreno en la década del 2000. Fue introducida al mundo maya por el trabajo de Ford y Nigh (2009, 2010, 2016; véase también Antorcha et al. 2023; Rivera-Núñez et al. 2020) pero tiene sus raíces en trabajos de muchos investigadores mexicanos (Gómez Pompa 1984, 1987; Toledo y Barrera 2008). Estas investigaciones plantean argumentos sobre un tipo diferente de manejo ambiental practicado

por los mayas (actuales como antiguos) que resulta (resultó) en resiliencia y sostenibilidad, en lugar de degradación. Así que, en las tierras bajas mayas, especialmente en el norte de la península de Yucatán (el centro del Estado de Yucatán), son necesarias las investigaciones y la aplicación de nuevos acercamientos empíricos para resolver el debate en esta región, que llene el vacío de información y resuelva dichas interrogantes. Estos estudios tendrán relevancia a nivel de área maya (las tierras bajas mayas del norte), así como, un impacto en cuestiones globales sobre las relaciones humano-ambiente, la resiliencia y la sostenibilidad en las sociedades indígenas.

Para abordar esta problemática, hemos realizado una investigación con la perspectiva de la ecología histórica, enfocándonos en el medio ambiente construido, la construcción del nicho ecológico y el análisis del paisaje a nivel subregional. Esto plantea una articulación entre dos esferas fundamentales: el cambio climático y la transformación sociocultural. Por esta razón, teoría y metodología, deben ser estudiadas desde una perspectiva monista, que no separa a los humanos de su entorno a través de diferentes escalas temporales y espaciales. La integración de diversos tipos de datos empíricos (arqueológicos, geográficos, geológicos y paleoambientales/paleoecológicos) es esencial para resolver esta problemática. La primera esfera está encaminada a conocer las dinámicas ambientales locales que afectan el ecosistema, mientras que la segunda busca entender las condiciones históricas, políticas, económicas y simbólicas que dieron forma y sentido al espacio construido por la agencia humana, entendida esta última como una especie clave en la transformación y mantenimiento del paisaje (cf. Balée y Erickson 2006).

Con esta idea, se desarrolló un proyecto de metodología holística, basado en diferentes estrategias de campo y técnicas de laboratorio enfocadas a la obtención de datos en distintas escalas de tiempo y espacio. Creamos un diseño de novedoso entre disciplinas y campos científicos como la ecología, la arqueología, la paleoecología, la historia y la etnografía. Esto nos permitiría realizar un análisis integral, diacrónico, comparativo y dialéctico, según las capacidades teórico/metodológicas inherentes de cada área de estudio. Este estudio se realizó en el Área Natural Protegida-Parque Estatal Lagunas de Yalahau (ANP-PELY), la cual se localiza en la Península de Yucatán, México (entre los paralelos 20°34'59.7" y 20°40'37.3" latitud Norte y los meridianos 89°10'49.6" y 89°15'00.5"

longitud Oeste). Se eligió el ANP-PELY porque presenta unas condiciones, tanto históricas como ecológicas, para el desarrollo de esta investigación.

Nuestra meta es conocer ¿el grado de impacto/degradación ambiental y transformación del paisaje, generados por el cambio climático y los procesos socioculturales en períodos de larga duración (*longue durée*)? Y determinar se asociación con diferentes momentos de ocupación y cambios en el paisaje (Braudel 1958). Para esto nos cuestionamos, (1) ¿de qué manera las transformaciones ambientales ocurridas durante los diferentes momentos de ocupación y crecimiento demográfico se relacionan en el tiempo con la transformación ambiental? (2) ¿existe una huella visible en el registro ecológico y/o arqueológico que revele los efectos acumulativos (*palimpsesto*) de los cambios climáticos que, en combinación con las acciones humanas (v.g., poblamiento, crecimiento demográfico, abandono, patrón de asentamiento, diseño espacial, construcción simbólica del espacio, ingeniería ambiental, estrategias de producción agrícola, deforestación, actividad económica y/o políticas públicas, etc.), son los autoras y responsables de las características ambientales y el *paysage* que observamos hoy en día?

Nuestros resultados indican que, los patrones esperados por la nueva arqueología y la ecología de sistemas no tiene soportes empíricos. Los resultados concuerdan más con los argumentos de ecología histórica y la perspectiva de paisaje. En la época prehispánica, especialmente durante clásico tardío-terminal (550-950 d.C.), los mayas que ocuparon Yalahau no muestran evidencias de un crecimiento poblacional descontrolado; por el contrario, diseñaron y construyeron el ambiente para aumentar la resiliencia y la sostenibilidad. Consistente con esto, los datos sobre cobertura de árboles indican que los bosques fueron mantenidos dentro la ciudad en una densidad lo suficientemente alta, que indiquen la existencia de paisajes mixtos de bosques y pastizales. Fuera de la ciudad, en zonas con poca ocupación humana, los ciclos entre bosques y bosque-sabana están ligados a ciclos pluviales, indicando que, sin la intervención humana, los cambios ambientales son más bruscos. Los indicadores de isótopos estables y química elemental muestran que dentro de la ciudad, el bosque resulta mucho más resiliente a las sequías y esto continua incluso después del abandono del sitio. Es importante destacar que, esto habla de un manejo maya que aumenta la calidad ambiental, lo que es consistente con los argumentos de ecólogos/as

históricos/as e indigenistas sobre la no degradación de los recursos naturales y contrario a lo expuesto desde la nueva arqueología.

De este modo, tendremos una primera parte destinada a los antecedentes generales del proyecto sobre la arqueología, la geografía, la geología, el paleoclima y la historia cultural general de las tierras bajas Mayas. Después, se presentan las bases teóricas de las dos perspectivas dominantes sobre la relación humano-ambiente en las tierras bajas Mayas y los contrastes en interpretaciones generadas sobre los mismos. Esto incluye las hipótesis para los estudios empíricos (arqueológicos y paleoambientales/paleoecológicos) de la relación humano-ambiente de las tierras bajas mayas (especialmente el norte de la península de Yucatán) generados por los dos acercamientos teóricos, al igual que, los objetivos generales y específicos de investigación. Posteriormente, se describen los métodos utilizados en este estudio y sus justificaciones dadas las necesidades generadas por el problema de investigación y el cuerpo teórico citado. Con estas bases, describimos el estudio de caso y los resultados empíricos del trabajo en campo y en laboratorio. En la discusión de los resultados, se consideran las implicaciones de nuestros resultados con respecto a los dos planteamientos teóricos (la nueva arqueología vs. la ecología histórica).

Capítulo II. Antecedentes: La arqueología, el paleoclima y los antiguos mayas

Antecedentes históricos y arqueológicos de las tierras mayas

Historia de la arqueología en las tierras mayas.

La historia de la arqueología maya ha experimentado una evolución significativa desde el siglo XIX hasta la actualidad. Los primeros estudios sistemáticos comenzaron con los exploradores John Lloyd Stephens y Frederick Catherwood, quienes documentaron y popularizaron sitios emblemáticos, despertando un interés global por la civilización maya (Stephens 1841; Catherwood 1843).

En el siglo XX, los pioneros Sylvanus G. Morley y Alfred V. Kidder llevaron a cabo excavaciones en Chichen Itzá y Uaxactun, promoviendo la metodología estratigráfica para entender la cronología de los sitios mayas (Morley, 1946). Durante esta época, Tatiana Proskouriakoff realizó una contribución crucial al demostrar que las inscripciones mayas registraban eventos históricos y dinásticos, proporcionando una base para la cronología histórica de varios sitios (Proskouriakoff 1960).

Durante las décadas de 1950 y 1960, la investigación arqueológica se expandió significativamente, incorporando nuevas tecnologías y enfoques interdisciplinarios. Las excavaciones en Tikal, lideradas por William R. Coe, revelaron estructuras monumentales y proporcionaron un marco cronológico detallado basado en fechas de radiocarbono y análisis estratigráficos (Coe 1990). Este proyecto también destacó la importancia de los hallazgos epigráficos, que ayudaron a desentrañar la compleja historia dinástica de Tikal.

Durante las décadas de 1980 y 1990, la arqueología maya experimentó importantes avances metodológicos y teóricos que sentaron las bases para las investigaciones contemporáneas. Este periodo estuvo marcado por la implementación de nuevas tecnologías, la expansión de enfoques interdisciplinarios y la revalorización de la epigrafía y la iconografía. Durante esta etapa, los arqueólogos comenzaron a utilizar técnicas más de datación por radiocarbono, lo que permitió establecer cronologías más exactas para los sitios mayas. Esta precisión cronológica fue crucial para entender la evolución de las ciudades y los cambios en la organización social y política. Uno de los proyectos más destacados de esta época fue el Proyecto Copán, liderado por Gordon R. Willey y posteriormente por David Webster.

Además, la década de 80s vio un aumento significativo en los estudios de epigrafía. Investigadores como Linda Schele y David Stuart hicieron grandes avances en la decodificación de los glifos mayas, lo que permitió una comprensión más profunda de la historia política y los eventos dinásticos de la civilización maya. Sus trabajos revelaron la complejidad de las relaciones políticas entre las ciudades mayas y la importancia de los eventos rituales en la legitimación del poder (Schele y Freidel 1990).

Para 1990, se continuó con la tendencia a incorporar enfoques interdisciplinarios en la arqueología maya. Uno de los proyectos emblemáticos de esta década fue el Proyecto Tikal, dirigido por William R. Coe y su equipo (Coe,1990). Este proyecto no solo se centró en las excavaciones de estructuras monumentales, sino que también incluyó estudios de paisaje y análisis de restos botánicos y faunísticos para comprender mejor las relaciones con el entorno y la economía de Tikal (Coe 1990).

En Copán, investigaciones lideradas por Gordon R. Willey, y posteriormente por David Webster y William Fash, profundizaron en la dinámica sociopolítica y económica de la civilización maya. Estos estudios incluyeron análisis detallados de la arquitectura, la epigrafía y la bioarqueología, proporcionando una comprensión más completa de la vida cotidiana y las prácticas funerarias en Copán (Willey et al. 1990; Fash 2001). En Palenque, los trabajos de Alberto Ruz Lhuillier, quien descubrió la tumba del rey Pakal en el Templo de las Inscripciones en 1952, fueron cruciales para entender las prácticas funerarias y la iconografía maya. Sus investigaciones proporcionaron información valiosa sobre la estructura social y las creencias religiosas de los mayas (Ruz Lhuillier 1973).

En el siglo XXI, la arqueología maya ha avanzado significativamente gracias a la integración de nuevas tecnologías, enfoques interdisciplinarios y colaboraciones internacionales. Estos avances han permitido una comprensión más profunda y detallada de la civilización maya, su organización social, política y su manejo del entorno. En resumen, la arqueología maya ha transitado de una disciplina dominada por la exploración y la especulación a una ciencia rigurosa que combina métodos tradicionales con análisis avanzados para desentrañar los secretos de esta civilización enigmática. Los estudios actuales continúan refinando y desafiando nuestras percepciones de los mayas, revelando una civilización altamente adaptativa y sofisticada cuya historia sigue cautivando a los investigadores (Marcus, 2003).

Historia de investigación arqueológica en el norte de la península

La historia de la investigación arqueológica en la península de Yucatán ha avanzado significativamente desde los primeros estudios sistemáticos en el siglo XIX hasta las investigaciones avanzadas del siglo XXI, caracterizándose por la evolución de métodos, la incorporación de nuevas tecnologías y enfoques interdisciplinarios, así como un creciente interés en comprender la compleja civilización maya. Los primeros estudios arqueológicos en la península comenzaron, como se mencionó anteriormente, con exploradores europeos y estadounidenses como John Lloyd Stephens y Frederick Catherwood, quienes documentaron y popularizaron sitios mayas como Uxmal, Kabah y Chichén Itzá. Sus descripciones y dibujos detallados capturaron la atención internacional y sentaron las bases para futuras investigaciones (Stephens 1841; Catherwood 1843, Teracena 2021). A principios del siglo XX, la investigación arqueológica se institucionalizó con el apoyo de diversas instituciones académicas y gubernamentales. El Instituto Carnegie de Washington desempeñó un papel crucial al financiar y llevar a cabo excavaciones sistemáticas en Chichén Itzá bajo la dirección de Sylvanus G. Morley, cuyos trabajos proporcionaron una cronología más precisa y revelaron la complejidad de la arquitectura y la organización social maya (Morley 1946).

Investigadores como E. Wyllys Andrews IV realizaron estudios exhaustivos en Dzibilchaltún, proporcionando una visión detallada de la vida urbana y ritual en la península (Andrews IV 1965). Para finales del siglo, la arqueología maya experimentó importantes avances metodológicos y teóricos. Los proyectos en Copán, dirigidos por Gordon R. Willey y posteriormente por David Webster, revelaron información detallada sobre la estructura social, la organización urbana y las prácticas funerarias (Fash 2001). Además, Linda Schele y David Stuart hicieron grandes avances en la decodificación de los glifos mayas, lo que permitió una comprensión más profunda de la historia política y los eventos dinásticos (Schele y Freidel 1990).

En el siglo XXI, la arqueología en Yucatán ha sido marcada por la integración de nuevas tecnologías y enfoques interdisciplinarios. Estudios bioarqueológicos han proporcionado información detallada sobre la dieta, la salud y la movilidad de las poblaciones mayas (Tiesler et al. 2017). Investigaciones en Chichén Itzá, lideradas por Cynthia Kristan-Graham y Peter Schmidt, han profundizado en la arquitectura monumental y los rituales religiosos (Kristan-Graham y Schmidt 2012). En Uxmal, los trabajos de George F. Andrews

han detallado las características arquitectónicas únicas de la región Puuc¹ (Andrews y Andrews, 2000). Además, las investigaciones en Calakmul, dirigidas por Simon Martin y Nikolai Grube, han ampliado nuestra comprensión de las interacciones políticas y económicas entre las ciudades mayas (Martin y Grube 2008).

La historia de la investigación arqueológica en el área Maya, particularmente en la península de Yucatán, refleja un progreso continuo y una creciente sofisticación en los métodos y enfoques utilizados para desentrañar los misterios de la civilización maya.

Cronología de la cultura Maya

La cronología maya está compuesta y basada en métodos relativos y absolutos, que revelan una evolución cultural compleja que se refleja en la cerámica, la arquitectura y los registros calendáricos. Esta cronología se divide en varias fases principales: Arcaico, Preclásico, Clásico Temprano, Clásico Tardío, Clásico Terminal, Postclásico Temprano y Postclásico Tardío (Figura 1).

El periodo Arcaico en el área maya, que abarca aproximadamente desde 8000 a.C. hasta 2000 a.C., es fundamental para comprender las primeras fases de la ocupación humana y el desarrollo cultural en la región. Durante este tiempo, las comunidades pre-mayenses pasaron de un estilo de vida basado en la caza y la recolección a uno más sedentario y agrícola. Las evidencias arqueológicas en sitios como Xcaret y Loltún, en la península de Yucatán, proporcionan una visión de estas adaptaciones tempranas. En Xcaret, se han descubierto herramientas líticas y restos faunísticos que indican la explotación de recursos naturales variados, incluyendo la caza de grandes mamíferos y la recolección de plantas silvestres (Andrews y Corletta 1995). En Loltún, los artefactos líticos y restos de fauna sugieren una economía basada en la caza y la recolección, con un uso intensivo de las cuevas como refugio y lugar de procesamiento de alimentos (Rissolo 2001).

Hacia el final del periodo Arcaico, se observa una transición hacia prácticas más sedentarias y el inicio de la agricultura, evidenciada por el hallazgo de herramientas agrícolas

¹ La serranía Puuc, una cadena de suaves colinas, se extiende desde Peto hasta la costa de Campeche, formando una "V" invertida con su ápice en Maxcanú. Esta región arqueológica alberga dos sectores principales: el este, desde Uxmal hasta Ichpich, y el oeste, menos conocido, que incluye Oxkintok y Yakal Chuc, con asentamientos del Clásico Temprano. El término Puuc también designa un estilo arquitectónico distintivo, que alcanzó su máximo esplendor durante el Clásico Terminal, siendo Uxmal, Sayil, Labná y Kabah ejemplos emblemáticos de este desarrollo arquitectónico (Lorenzo y Muñoz 1997).

y restos de plantas domesticadas como el maíz en sitios como Colha y el Bajío de Chunchucmil. El maíz, junto con otras plantas cultivadas, se convirtió en una parte esencial de la dieta, lo que contribuyó al desarrollo de comunidades más estables y complejas (Pohl et al., 1996). Las dataciones por radiocarbono y los análisis paleoambientales sugieren que la agricultura comenzó a tener un impacto significativo en la estructura social y económica de las comunidades hacia el 3000 a.C. (Clark y Pye 2000). Esta transición permitió el crecimiento demográfico y la especialización laboral, sentando las bases para el florecimiento de la civilización maya en los periodos subsecuentes.

Durante el Preclásico (2000 a.C. - 250 d.C.), se observan importantes desarrollos en cerámica y arquitectura. En Ek Balam, alrededor de 350 a.C., se identifican estilos cerámicos como Chunyaxché y Tases, que presentan una mayor complejidad en decoraciones y formas (Bond y Bey 1996). Las estructuras arquitectónicas eran modestas, consistiendo principalmente en plataformas elevadas de materiales perecederos. Las fechas de radiocarbono para este periodo, aunque limitadas, sitúan algunas ocupaciones tempranas alrededor de 800 a.C. en sitios como Cuello, Belice (Hammond et al. 1976).

El Clásico Temprano (250 - 550 d.C.) marca una era de mayor sofisticación en la cerámica y la arquitectura. Las ciudades mayas desarrollan grandes templos y palacios, reflejando una organización social avanzada. La cerámica muestra mejoras significativas en acabados y diversidad de diseños. Las estructuras arquitectónicas incluyen complejos templos y palacios, y las fechas de radiocarbono sitúan importantes desarrollos alrededor de 400 d.C., como en Tikal, donde la Estela 29 registra eventos importantes (Coggins 1979).

El Clásico Tardío (550 - 750 d.C.) es un periodo de esplendor. La emblemática cerámica Pizarra Maya en la región Puuc se caracteriza por superficies lisas y sin decoración, generalmente de color gris oscuro o negro, reflejando una economía doméstica estandarizada y una homogeneidad cultural (Sabloff y Andrews, 1986). Los mayas del Puuc construyeron estructuras impresionantes como el Palacio del Gobernador y el Cuadrángulo de las Monjas en Uxmal, con elaborados frisos de piedra y planificación urbana compleja, corroborada por fechas de radiocarbono que van de 650 a 850 d.C. (Pollock 1980; Lincoln 1986).

El Clásico Terminal (750 – 950/1000 d.C.) es un periodo de transición y, en muchos casos, de declive. En Chichén Itzá, la construcción de monumentos como el Templo de los Guerreros y El Castillo se data alrededor de 900 d.C., reflejando el apogeo de la ciudad durante este tiempo (García y Cobos 2009). La cerámica Sotuta, correspondiente a este periodo, incluye vasos cilíndricos decorados con escenas míticas y rituales, así como platos y cuencos con bordes festoneados y aplicaciones de pintura roja y negra (Lincoln, 1986). En Oxkintok, las estructuras como el Satunsat y el Grupo Ah Canul muestran una evolución arquitectónica que refleja tanto continuidad como cambio a lo largo del Clásico Terminal (Ruppert y Smith 1957). Las fechas de radiocarbono y las inscripciones calendáricas proporcionan una base sólida para la cronología de estos eventos, situando las principales construcciones alrededor de 900 d.C. (Coggins 1979).

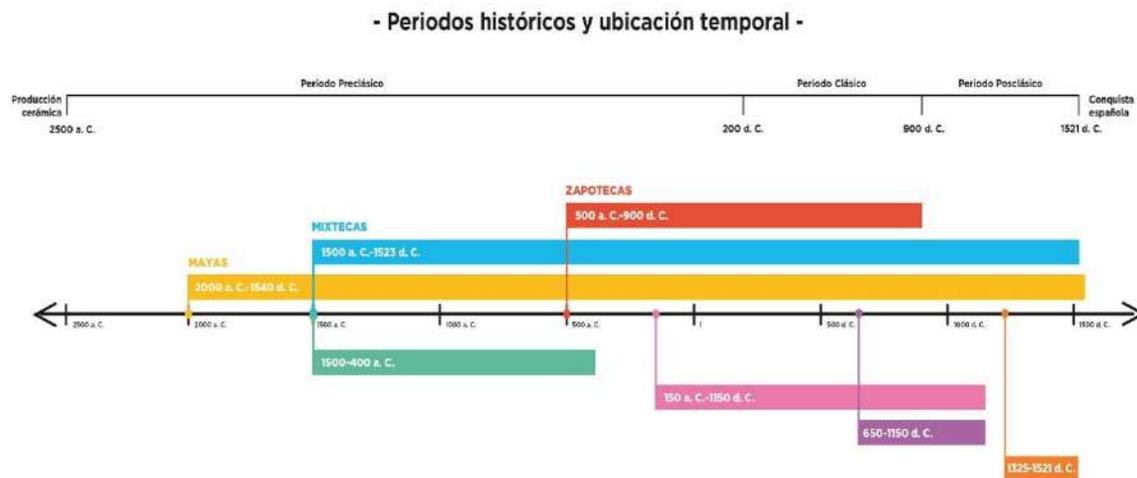


Figura 1. Línea de tiempo de la cultura Maya, con otras culturas Mesoamericanas. Tomado de Enciclopedia Humanidades. <https://humanidades.com/civilizacion-maya/>

La esfera cerámica Cambalam, que dominó la parte noroccidental del estado de Yucatán desde aproximadamente 730 hasta 900 d.C., es una muestra distintiva del Clásico Terminal en la región (Jiménez 2009). Este complejo cerámico abarca sitios importantes como Dzibilchaltún, Yaxcopoil, Acanceh, Tixpehual y Baca. Los tipos cerámicos característicos de esta esfera incluyen Muna Pizarra, Ticul, Teabo, Chum, Ich Canzihó, Chuburná y Chablekal. Particularmente, la cerámica gris fina Chablekal, aunque es un componente foráneo, es distintiva de la esfera Cehpech y se encuentra frecuentemente en contextos funerarios asociados a otros tipos cerámicos locales como Muna Pizarra y Ticul.

La cronología del grupo cerámico Chablekal se extiende desde el Clásico Tardío hasta el Clásico Terminal, con fechas aproximadas entre 650 y 1000 d.C. Las investigaciones recientes han mostrado que estas cerámicas llegaron al norte de Yucatán después de 730 d.C., en un periodo donde las vasijas estilo Tepeu 1 y 2 comenzaban a decaer. Este grupo cerámico, junto con las importaciones de cerámica de pasta naranja fina de los grupos Balancán y Silhó, refleja una compleja red de intercambios y movimientos de mercancías a través de la península, probablemente facilitada por mercaderes mayas que transportaban estas vasijas desde la costa del Golfo de México hacia el norte de la península (Jiménez 2009; Robles 2006).

La arquitectura de este periodo también muestra desarrollos significativos, con la construcción de estructuras monumentales en sitios clave como Uxmal, Kabah y Labná, que reflejan la sofisticación y la planificación urbana de las élites mayas del Puuc. Las fechas de radiocarbono corroboran estas construcciones, situándolas principalmente entre 650 y 850 d.C. En Uxmal, por ejemplo, el Palacio del Gobernador y el Cuadrángulo de las Monjas son emblemáticos de esta era, destacándose por sus elaborados frisos de piedra y su compleja planificación urbana (Pollock 1980).

En Xkalunkin, se han obtenido fechas de radiocarbono que indican ocupaciones de miles de habitantes durante el Clásico Tardío y el Clásico Terminal, aproximadamente entre 650 y 900 d.C. La cerámica recuperada de estos periodos incluye tipos característicos de la esfera Cehpech, como la cerámica Muna Pizarra y Ticul, que reflejan una economía doméstica estandarizada y una homogeneidad cultural significativa en la región (Jiménez 2009; Robles 2006). Los estudios realizados han revelado una continuidad en la ocupación, con un incremento en la construcción de estructuras monumentales y un aumento en la complejidad social durante este período.

Además, las investigaciones en Xkalunkin han identificado una correlación entre las fechas de radiocarbono y los estilos arquitectónicos, mostrando que la construcción de estructuras monumentales, como templos y palacios, se concentró principalmente entre 650 y 850 d.C. Este periodo coincide con el apogeo de la región Puuc, donde se encuentran sitios emblemáticos como Uxmal y Kabah, que destacan por su elaborada arquitectura, con complejos frisos de piedra y arcos abovedados (Pollock 1980).

El Postclásico Temprano (1000 - 1200 d.C.) se caracteriza por la cerámica del Complejo Hocaba en Mayapán, con decoración en pintura negra y roja sobre una base de engobe blanco (Proskouriakoff 1962). La arquitectura de este periodo muestra una influencia significativa de Chichén Itzá, con estructuras datadas alrededor del siglo XIII d.C. (Pollock 1980). Las fechas de radiocarbono sitúan la ocupación principal de Mayapán entre 1050 y 1250 d.C. (Rice y Forsyth 2004).

El Postclásico Tardío (1200 - 1450 d.C.) y el Postclásico Terminal (1450 - 1542 d.C.) presentan la cerámica del Complejo Cehpech en Mayapán, caracterizada por superficies pulidas y decoraciones florales y zoomorfas (Proskouriakoff 1962). Las fechas de radiocarbono indican la ocupación de Mayapán entre 1150 y 1450 d.C. (Rice y Forsyth, 2004). El uso del calendario maya, especialmente la Cuenta Larga, permite correlacionar eventos históricos con fechas precisas. Las estelas en sitios como Tikal y Copán documentan eventos significativos como ascensiones al trono y victorias militares. En Tikal, la Estela 29 registra eventos en 292 d.C., mientras que, en Copán, la Estela A marca eventos importantes en 822 d.C. (Coggins 1979; Fash 2001). En Uxmal, la Estela 14 registra eventos en 869 d.C. (Pollock 1980).

Es fundamental tener en cuenta que, como cualquier fuente histórica, las fechas en estelas pueden haber sido manipuladas, por ejemplo, con fines políticos, lo que implica que no siempre reflejarían con precisión los eventos históricos. Los gobernantes mayas utilizaban estas inscripciones para legitimar su poder, pero la combinación de métodos relativos y absolutos proporciona una comprensión más profunda y robusta de la cronología maya, con un alto nivel de precisión entre ambos métodos, facilitando la investigación arqueológica de esta desafiante civilización (Demarest y Sharer 1982).

Estudios paleoclimáticos del área maya.

Mientras que existen registros largos de la historia de clima en el área maya, el punto de interés para los investigadores de la cultura Maya es el Holoceno (últimos 11,000 años), el cual constituye una época que involucra variaciones climáticas globales, y se compone de una serie de eventos a meso, macro y microescalas espaciotemporales (Carrillo 2014). Durante esta época interglaciar, las masas de hielo, formadas durante el pleistoceno, retrocedieron. Entre otros factores, por el incremento en la insolación (Williams et al. 1993)

que, como consecuencia, incidió en la evolución de suelos, de lagos, el establecimiento de la línea de costa moderna y en gran medida, la distribución actual de las comunidades vegetales (Roberts 1998).

Dado que las comunidades vegetales son asociaciones temporales definidas por el ambiente físico, un método efectivo para la reconstrucción de la historia de ambientes y por ende de variación climática, lo constituye el análisis de polen fósil acumulado en los sedimentos de los cuerpos lacustres, previa datación del material orgánico mediante radiocarbono ^{14}C (Islebe 1999). En conjunto con el polen fósil, se han utilizado otro tipo de indicadores indirectos como las concentraciones de isótopos estables contenidos en paleosuelos (v.g., $\delta^{13}\text{C}$) así como en la concha de invertebrados, principalmente gasterópodos y ostrácodos (v.g., $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$) (Curtis et al. 1996; Leyden et al. 1996; Hodell et al. 2001, 1995). Las variaciones en dichas concentraciones permiten inferir cambios en la precipitación, temperatura y el dominio entre vegetación arbórea y herbáceas (Cohen 2003; Curtis et al. 1996).

El uso simultáneo de diversos indicadores sedimentarios (polen, isótopos, diatomeas, densidad de sedimentos, entre otros), permite inferir de manera robusta la historia del clima y de la vegetación en temporalidades que van más allá del registro histórico e instrumental (Coe 1994; Islebe y Sánchez 2002; Leyden et al. 1996, 1998, 2002; Torrescano e Islebe 2006).

Los trabajos de los Lagos Cobá (Leyden 1998) y Chichancanab (Hodell et al. 1995) son las reconstrucciones multi-indicador que abarcan los lapsos más amplios de tiempo (~7,500 años A.P.-5,500 a.C.) y permitieron reconstruir la historia del Holoceno temprano. Ambos trabajos concuerdan en que, durante esta fase de tiempo, como respuesta a la alta precipitación y el incremento del nivel del mar, se formaron la mayoría de los lagos en la península. Estas condiciones durante el Holoceno temprano favorecieron la distribución de los elementos de selva y al establecimiento de las formaciones vegetales modernas de la península de Yucatán (Leyden 2002). Con los trabajos que reproducen el Holoceno medio (Islebe et al. 1996, Curtis et al. 1996; Hodell et al. 1995; Leyden et al. 1996, 1998; Torrescano e Islebe 2006 y Torrescano 2007) se concluyó que en este tiempo prevalecieron las condiciones cálidas con abundante humedad y se establece la línea de costa actual posterior a los 3800 años B.P. aproximadamente (Torrescano e Islebe 2006).

El Holoceno tardío, es el lapso que resulta de gran interés por el establecimiento, florecimiento y el llamado colapso de la cultura Maya. Las investigaciones más sobresalientes concuerdan en la presencia de condiciones relativamente más secas y estacionales en comparación al Holoceno Temprano-Medio (Curtis et al. 1996; Hodell et al. 1995, 2001, 2005; Islebe et al. 2002, Leyden, 1996, 1998 y Torrescano 2007). Se registran evidencias de la ocupación de grupos agrícolas a partir de la identificación de polen de *Zea mays* en el Lago Yohou de Honduras (Rue 1987), con una antigüedad de hasta 4,500 años B.P. Además, establecen que el clima ha sido marcado por periodos alternados de condiciones secas y húmedas durante los pasados 2800 años, y relacionan los eventos de sequía con el declive de la cultura Maya (Haug et al. 2003).

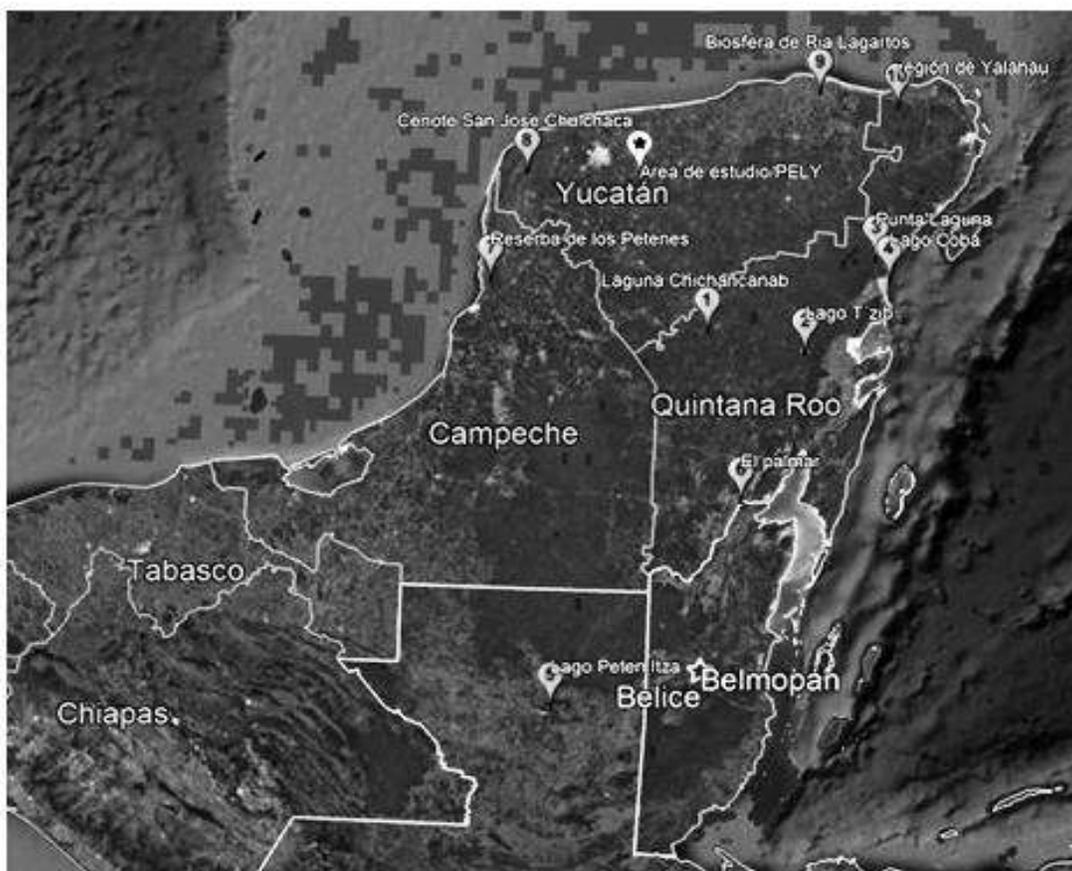


Figura 2: Principales sitios de análisis paleoecológicos (nota: se observa la ausencia de sitios en el interior del Estado de

En el resto de la región Circun-caribe, de igual forma, se han realizado estudios paleoambientales, con generalizaciones a escalas muy grandes de hasta continentes enteros, dentro de los cuales se encuentran: el del Lago Petén-Itzá (Islebe et al. 1996; Curtis et al.

1998; Anselmetii et al. 2006), la Cuenca del Cariaco (Haug et al., 2001, 2003), Lago Puerto Arturo (Wahl et al. 2006) y Twin Cays (Wooller et al. 2007), entre otros. Estos autores coinciden en que las tendencias de mayor calor durante el Holoceno tardío son consecuencia de una mayor estacionalidad causada por los cambios de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y el forzamiento de El Niño Oscilación Sur (ENOS) (Brenner et al. 2002) (Figura 2).

En la península de Yucatán los estudios desarrollados han avanzado en la historia climática y ecológica de la región. Sin embargo, para relacionar los cambios ambientales en un área tan grande y diversa, se requiere de una gran cantidad de datos paleoecológicos. También es necesario reconocer que existe mucha variación regional y subregional en el clima que no se puede captar con los datos generales. Así, es necesario, desarrollar herramientas para integrar sistemáticamente estos datos, de manera que permitan definir adecuadamente, cuáles de las variaciones en la vegetación fueron por impactos humano, cambio climático local o regional, y qué cambios se deben a la variación o ciclicidad natural del clima a niveles regionales y subregionales que corresponden con la escala de los procesos humanos (Islebe 1999).

Estas investigaciones, empiezan a cambiar la perspectiva sobre las Tierras Bajas del norte como un ecosistema uniforme de selva tropical, con sabanas esparcidas y ocasionales zonas de inundación, empezando a entenderse como un mosaico altamente diverso de recursos, que cambia en diferentes manera y escalas para formar un gran número de diferentes zonas fisiográficas o paisajes subregionales (Fedick y Morrison 2004), en regiones con características ambientales que generan en cada una la aplicación de diferentes técnicas y estrategias agrícolas y trayectorias únicas de transformación ambiental (Dunning et al. 1997).

Perspectivas sobre la relación entre los antiguos mayas y el ambiente

Las propuestas sobre la relación entre los antiguos mayas y su ambiente son el producto de una historia larga de intervención occidental en las tierras mayas y la arqueología colonialista (especialmente de los estadounidenses) catalogando a los mayas como menos desarrollados que los europeos y sus descendientes en EUA, sin los conocimientos adecuados para un manejo ambiental sostenible (Anderson et al. 2005; Fisher 2020). Uno de los

principales problemas que ha captado la atención, es el desarrollo de la cultura Maya durante el preclásico y clásico en la selva tropical, generalmente considerado como un ambiente incapaz de sostener grandes grupos humanos (Fedick y Morrison 2004), solo asentamientos pequeños dispersos, con actividades agrícolas de bajo impacto (Meggers 1954, Thompson 1954). Sylvanus Morley (1946:141) afirmó: “Este es prácticamente el único sistema agrícola utilizado en los trópicos húmedos de América, incluso actualmente. De hecho, es el único método disponible...” y “...los métodos modernos de cultivo de maíz de los mayas han sido los mismos desde hace más de tres mil años”. Según esto, dadas las estrategias agrícolas poco productivas de los mayas (especialmente la milpa y el enfoque en el maíz como cultivo básico), junto con las duras condiciones ambientales, las densidades de población debían permanecer bajas y el aumento de la producción solo se podía lograr despejando cada vez más bosque (Lundell 1933). Basándose en estas condiciones, los arqueólogos asumieron que la población maya permaneció baja durante toda la era prehispánica y hasta el presente (Mason 1927; Lundell 1933).

Las grandes ciudades mayas descubiertas por Stephens (1845) no eran observadas como ciudades en absoluto, sino centros ceremoniales vacíos (Sabloff 1994; cf. Morley 1947; Thompson 1943). Estos centros albergaban templos, bibliotecas y observatorios astronómicos y estaban ocupados únicamente por sacerdotes esotéricos. Más allá de estos centros, los agricultores campesinos se dispersaban en baja densidad por todo el bosque, cultivando pequeñas parcelas que periódicamente despejaban de la jungla (agricultura de roza y quema). A pesar de su baja densidad, el constante cambio de parcelas que agotaba la fertilidad del suelo eventualmente destruía la fertilidad a nivel regional, llevando al colapso. Reconocemos que se han presentado una variedad de otras teorías para el colapso maya, pero la sobrepoblación y la degradación ambiental han persistido como factores causales (Turner y Sabloff 2012)

Durante mediados del siglo XX, la arqueología integró ideas y conceptos de la ecología de sistemas, marcando el surgimiento de lo que se conoce como "la nueva arqueología". Este enfoque se inspiró en trabajos clave como la ecología cultural de Julian Steward (1955), la ciencia de la cultura de Leslie White (1949) y el nuevo evolucionismo representado por autores como Elman Service y William Sanders. Estos avances promovieron un enfoque ecológico en la arqueología, que desde la década de 1960 fomentó

la creación de proyectos multidisciplinarios que incorporaban estudios climáticos. Por ejemplo, George Cowgill (1966) destacó la importancia de reconstruir las condiciones paleoecológicas que prevalecieron durante el desarrollo y el colapso de las sociedades mayas. Otros estudios importantes en este campo incluyen las investigaciones de Deever (1979), Binford (1987) y Culbert y Rice (1990), que buscaban entender cómo los cambios ambientales afectaron a las civilizaciones antiguas.

En la península de Yucatán, se han realizado estudios paleoambientales durante los últimos 50 años, utilizando el análisis con diversos indicadores indirectos contenidos en los sedimentos de los cuerpos de agua, para explicar interacciones complejas entre el clima, el ambiente, y la antigua cultura maya (Brenner et al. 2002). Estas investigaciones, permitieron empezar a dilucidar la serie de cambios ocurridos en el tiempo y en el espacio (Hodell 1995, Curtis et al. 1996, 1998, Leyden 1998). Brindaron la oportunidad de conocer las condiciones que existían en el pasado y permiten interpretar las condiciones actuales de los ecosistemas, formando una fuente de información para entender las relaciones entre el hombre y sus recursos, así como, apreciar al tiempo el impacto y recuperación de los ecosistemas cuando estos han sido transformados (Roberts 1998).

Algunos de los primeros estudios de este tipo fueron llevados a cabo principalmente en las Tierras Altas Mayas del Sur, Guatemala y años más tarde en las Tierras Bajas del Norte. Se basaron en la reconstrucción paleoecológica por medio de polen fósil en núcleos de sedimento, recuperados en los lagos y lagunas (Deevey 1980; Leyden 1987). Es importante señalar que, a pesar del tiempo de estudio en la región, los trabajos realizados aún son escasos y pocos se han extendido más allá del Holoceno medio (véase arriba Figura 2).

El resultado de esto fue un modelo de crecimiento demográfico sin control en la época prehispánica que llegó a su apogeo en la época clásica terminal (700-950 d.C.), lo cual forzó la intensificación agrícola y la extensificación de área cultivado produciendo una deforestación masiva (Demarest et al. 2013; Lowe 1985; Sanders and Murdy 1982; Sanders and Webster 1994; véase también Anselmetti et al. 2007; Heckbert 2014; Paine and Freter 1996). En estas condiciones no sostenibles y precarias, los datos paleoecológicos indica que empezó una época de sequías severas recurrentes (e.g., Hodell and Curtis 1995), los cuales, según analogías a estudios recientes, fueron intensificadas por la deforestación masiva (Cook et al. 2012).

Se ha propuesto que, la deforestación y el cambio climático regional jugaron un papel crucial y determinante en el colapso de la civilización Maya. Según Hodell, Curtis y Brenner (1995), las sequías prolongadas coincidieron con la desaparición de las ciudades mayas, indicando un vínculo significativo entre el cambio climático y el colapso. Gill (2000) argumenta que las grandes sequías fueron un factor determinante en el colapso de las sociedades mayas, exacerbadas por la deforestación intensiva que redujo la evaporación y las precipitaciones. Weiss y Bradley (2001) también subrayan que los eventos climáticos abruptos y de larga duración tuvieron efectos devastadores en las civilizaciones antiguas, incluyendo la maya. El resultado fue catastrófico; los mayas murieron por cientos de miles, dejando sus ciudades abandonadas, su civilización en ruinas y el ambiente devastado (Weiss y Bradley 2001). Así que los datos arqueológicos e históricas muestran que los mayas por su naturaleza destruían sus ambientes y colateralmente, requieren la intervención de los occidentales (especialmente los científicos y ecologistas) para salvarlos a ellos y a los ambientes preciosos que ocupan.

A mediados de la década de 1990, una nueva generación de académicos comenzó una evaluación crítica de la llamada "nueva arqueología" y su determinismo ecológico tanto dentro como fuera de las tierras bajas mayas. Este debate fue iniciado por Erickson con su artículo de 1999 sobre los campos elevados en la cuenca del lago Titicaca y su crítica a los argumentos deterministas de Kolata y sus colegas. Erickson ha argumentado que la visión de Kolata sobre un sistema de agricultura estatalmente controlado y gestionado de manera centralizada es una forma de "determinismo ambiental" (Kolata 1999), mientras que Erickson apoya la idea de una gestión más local y comunitaria de los campos elevados, argumentando que la evidencia apunta más hacia un sistema manejado por las comunidades locales en lugar de un control estatal centralizado (Contreras 2016).

Esta crítica se consolidó bajo el concepto de ecología histórica, que comenzó a ganar terreno en los 2000s. La ecología histórica, como enfoque, integra la relación dinámica entre los seres humanos y su entorno a lo largo del tiempo, enfatizando la adaptabilidad y la resiliencia de las prácticas humanas en lugar de la degradación ambiental inevitable.

El enfoque desde la ecología histórica fue introducido al mundo maya por los trabajos de Ford y Nigh (2009, 2010, 2016; véase también Antorcha et al. 2023; Ford 2020; Rivera-Núñez et al. 2020). Estos estudios argumentan que los mayas, tanto actuales como antiguos,

practicaban un manejo ambiental que resultaba en resiliencia y sostenibilidad. Ford y Nigh (2009) propusieron que los mayas manejaban activamente sus paisajes a través de prácticas agroforestales, creando lo que ellos denominan "*jardines forestales mayas*". Estos jardines eran mosaicos de cultivos y vegetación nativa que mejoraban la biodiversidad y la productividad agrícola, demostrando una relación simbiótica con el entorno natural.

En las tierras bajas mayas, especialmente en el norte de la península de Yucatán, las investigaciones recientes han subrayado la importancia de reevaluar las interpretaciones tradicionales sobre el colapso y la sostenibilidad maya. Por ejemplo, estudios de campo en sitios como El Edén y Tz'unun exploraron cómo las terrazas agrícolas y los reservorios de agua indicaban una sofisticada gestión de recursos que permitía a las comunidades mayas resistir períodos de estrés ambiental (Beach et al. 2002; Luzzadder-Beach et al. 2016).

Estas investigaciones no solo tienen relevancia regional, sino que también impactan en temas globales sobre las relaciones humano-ambiente, la resiliencia y la sostenibilidad en las sociedades indígenas. La comprensión de cómo los mayas lograron mantener sistemas agrícolas sostenibles y adaptables durante milenios ofrece lecciones valiosas para la gestión moderna de recursos y la mitigación del cambio climático.

Este nuevo enfoque de ecología histórica, en combinación con los nuevos métodos empíricos que se están aplicando en las tierras bajas mayas prometen resolver debates de larga data sobre el manejo ambiental y la resiliencia. Estos estudios tienen el potencial de transformar nuestra comprensión de la interacción entre los humanos y su entorno en el pasado, proporcionando modelos para enfrentar desafíos ambientales contemporáneos.

Capítulo III. Marco Teórico

La nueva arqueología y los mayas

Las bases de la nueva arqueología y ecología cultural

Históricamente el desarrollo de la “nueva arqueología” en los 1960s a 1970s tuvo un impacto significativo en los estudios sobre los mayas (Sabloff 1994). La introducción del paradigma de la nueva arqueología se atribuya a Binford (v.g., 1962; véase Trigger 1989). En este artículo, Binford planteó primero que arqueología es una subespecialización dentro la disciplina de antropología dado que sus metas de entender la totalidad de la experiencia humana a través del estudio de procesos culturales compartían con la antropología (Binford 1962). De acuerdo con este planteamiento, Binford (1962) consideró que la antropología debe ser la fuente teórica principal en la arqueología y específicamente señaló los trabajos de White (1959) y Steward (1955) como claves.

Este planteamiento conectó a la nueva arqueología con el resurgimiento del evolucionismo cultural en la antropología o el neoevolucionismo. Esta corriente teórica se presentó bajo una epistemología científica que centró la investigación antropológica en la búsqueda de leyes generales que explica los procesos culturales (Trigger 1989). Para sostener este acercamiento se conceptualizó la cultural como un sistema que estaba conformado por subsistemas adaptivos (Rappaport 1971; Steward 1955; Trigger 1989). La inspiración para este acercamiento vino de la consolidación de la ciencia de ecología en los 1940s y 1950s (Dice 1952; Odem 1953). Las y los antropólogos/os y arqueólogas/os retomaron el concepto de sucesión y su resultado final de un ecosistema clímax en lo cual el balance en el flujo de energía resulta en un estado perpetua de equilibrio (homeóstasis en términos de teoría de sistemas) (v.g., Odem 1953).

Para las y los antropólogos/os, el equilibrio resultó en ambientes estables que no cambiaron en general en las escalas de tiempo humanas (Steward 1955). Así, inspirado por Marx, las y los antropólogos/os asumieron que la cultura (a través del subsistema tecno-ambiental) fue el mecanismo de adaptación al ambiente de los humanos (en lugar de adaptación biológica a través de la selección natural) (Binford 1962; Rapaport 1971; Steward 1955; Trigger 1989; White 1959). En este planteamiento, los humanos migraron a un nuevo ambiente y como respuesta modificaron su cultura (el subsistema tecno-ambiente – o su

tecnología para la subsistencia) para adaptar a ello, y una vez sincronizado, vivieron en armonía con ello (Steward 1955).

Pero esta formulación dejó al neoevolucionismo y a la nueva arqueología con dos problemas en su formulación teórica. Primero, el uso de la teoría de sistemas cosificó la separación cartesiana entre los humanos y el ambiente dado que se planteó cada uno como un sistema que interactuaron a través del flujo de energías y los procesos sistémicos de retroalimentación. Por ejemplo, en la formulación de Steward (1955), los humanos (en sus estudios cazadores y recolectores) solamente extraerán recursos del ambiente; no modificaron, no tuvieron un impacto negativo o positivo y no fueron parte de ello. Segundo, la teoría se cayó de un mecanismo para el cambio cultural externo al sistema cultura. Eso debido a que una vez que llegó a su “clímax adaptativa” se quedó en homeostasis como el ambiente (Steward 1955).

Mientras que los antropólogos neoevolucionistas nunca cuestionaron el primer problema dado sus raíces culturales europeas (las raíces...) que enfatizaron la separación de los humanos y la naturaleza (v.g., Botkin 1990), se enfrentaron al segundo problema con dos principales mecanismos empujadores externos: 1) cambio climático (las perturbaciones irregulares e infrecuentes en la ecología de sistemas) y 2) la teoría de carga de capacidad y de presión demográfica (Carneiro 1970; Flannery 1972; Sanders and Parsons 1968; Yoffee y Cowgill 1988).

Estas fuerzas externas empujaron (forzando la adaptación al ambiente con cambios tecno-ambientales) a las fuerzas culturales a cambiar resultando en una serie de niveles de complejidad: bandas, tribus, jefaturas y estados/civilización; así como estas fuerzas externas se explicaron los colapsos de civilizaciones también (Carneiro 1970; Flannery 1972; Fried 1967; Sahlins 1972; Sanders and Parsons 1968; Service 1971; Wittfogel 1957; Yoffee y Cowgill 1988). Cada nivel evolucionario se marcaba por características particulares como demografía, sistemas productivos, organización política, tamaño y permanencia de asentamientos y organización económica y formas de intercambio.

Dichas características tuvieron una tendencia de aumento en escala en complejidad desde bandas, hasta la conformación de un estado. Así los Estados premodernos, en la perspectiva de la nueva arqueología, se definieron por poblaciones grandes (decenas de miles a millones de personas), agricultura intensiva con riego, urbanismo, redistribución

económica controlado por el estado, estratificación social y monarquía, etc. (Childe 1950; Fried 1967; Sahlins 1972; Service 1971). Dado a las poblaciones expansivas, los antropólogos asumieron que excedieron continuamente la carga de capacidad forzando la extensificación (conversión de bosque a campos agrícolas anuales) y la intensificación (a través de reducción de barbecho y el riego) para aumentar la producción de cereales, lo cual resulta en deforestación, y degradación de suelos y ambiente (Adams 1977; Boserup 1968; Butzer 1971; Sanders et al. 1979).

La introducción de los planteamientos teóricos de la nueva arqueología y el neoevolucionismo en las tierras bajas mayas tuvo un impacto muy importante en cómo las y los arqueólogos conceptualizaron la relación humano-ambiente en el bosque maya (Sabloff 1994). Este marco teórico fue aceptada primero dada la larga historia de pensamiento negativo sobre el impacto de los mayas sobre bosque por la roza, tumba y quema (v.g., Morely 1947; Lundell 1933) y segundo por el cuestionamiento creciente de la teoría de centros ceremoniales vacantes (Shook y Proskouriakoff 1956; Sabloff 1994).

La incorporación de la nueva ecología en las tierras baja mayas alimentó investigaciones que enfocaron en estudios de patrón de asentamiento (primero en los mapeos de zonas urbanas y después estudios de zonas rurales), así como la búsqueda y estudio de vestigios de estrategias para la intensificación de la producción (v.g., campos drenados/elevados, terrazas agrícolas, etc.) (Sabloff 1994). Eso debido a que la teoría del neoevolucionismo planteó que la civilización maya como Estado debe contar con los característicos de ello en cuestiones demográficos y de intensificación, para completar lo conocido sobre las monarquías mayas y la estratificación social.

Armado con la teoría neoevolucionista, las y los arqueólogas/os entraron al bosque maya para buscar estas huellas predichas por la teoría. El resultado fue la documentación de poblaciones altas, un bosque tropical altamente modificado y discursos sobre excesos demográficos, intensificación y extensificación de la agricultura de maíz (y frijoles), deforestación y degradación ambiental (Rice and Rice 1984; Santley et al. 1986; Abrams y Rue 1988; Culbert y Rice 1990; Pohl et al. 1996; Dunning et al. 1997; Oglesby et al. 2010). Ellos consideran estos procesos como generales, ligando suelos pobres con crecimiento demográfico, pequeños cultivadores y falta de alternativas económicas, aplicables a los mayas en cualquier época y región geográfica, independiente de la época, los cuales resultan

(han resultado) en ciclos de crecimiento, intensificación, degradación y colapso (v.g., Dunning et al. 2012; Russell 1988; Sundberg 1998; véase también Acopa y Boege 1998; Ochoa-Gaona 2001; Wainwright et al. 2014).

La ecología política de la nueva arqueología

Reconstrucción demográfica

Las exploraciones arqueológicas intensivas en áreas urbanas y extensivas en zonas rurales han identificado sitios prehispánicos que cubren entre 5 y más de 80 km² (Blanton et al. 1993: Tabla 5.2). Estos sitios contienen miles de montículos pequeños que los arqueólogos interpretan como conjuntos residenciales. La densidad de estructuras por km² varía entre 70 y 1500 (Blanton et al. 1993: Tabla 5.2). Al considerar estas densidades junto con la extensión geográfica de los sitios, los arqueólogos calculan densidades poblacionales de 500 a 1,000 personas por km² en los centros urbanos y de 150 a 200 personas por km² en áreas rurales (Blanton et al. 1993).

Cabe mencionar que las estimaciones demográficas presentan retos, ya que dependen de supuestos preestablecidos. Esto se debe a factores como el cronológico y el traslape de periodos de ocupación, que se contrastan con el registro material. La mayoría de los sitios mayas carece de cronologías absolutas o relativas precisas para todo el asentamiento, lo que complica estimar fases de ocupación continuas en intervalos de tiempo menores a ± 50 años (Sharer y Traxler 2006). Las cronologías suelen depender de cerámicas de lujo, cambios en elementos arquitectónicos decorativos y, en el periodo Clásico principalmente, de fechas de la cuenta larga (Sabloff 1994; Sharer y Traxler 2006). Sin embargo, estos indicadores se concentran en la arquitectura monumental y en las unidades residenciales de la élite (Sharer y Traxler 2006).

Otro punto importante, son cómo las condiciones climáticas pueden influir en el estado de preservación de la cerámica en la superficie, lo que afecta su visibilidad durante las prospecciones. Por esta razón, datar los miles de restos de conjuntos residenciales sin excavación, en todo el asentamiento, es una tarea compleja. En este sentido, los arqueólogos asumen/suponen que estos conjuntos residenciales estuvieron ocupados simultáneamente a su máxima capacidad durante al menos 300 años, lo que puede llevar a reconstrucciones

demográficas infladas, estimando poblaciones de entre 65,000 y 100,000 habitantes en sitios como Tikal, Calakmul o Caracol durante el Clásico terminal (Sharer y Traxler 2006).

Si se consideran patrones de movilidad humana observados en experiencias urbanas actuales, estas estimaciones demográficas podrían no ser precisas. Estudios de Alexander (2006) sobre los asentamientos mayas muestran un patrón de ocupación trashumante. Las familias se trasladan entre pueblos y ranchos dispersos en las zonas rurales; construyen casas en los ranchos, las habitan durante unos 15 años y luego las abandonan para regresar al pueblo por un tiempo, antes de fundar otro rancho (Alexander 2006). En un estudio transversal, muchas casas en el pueblo aparecerían vacías, lo que indicaría que la población real no coincide con el número de conjuntos residenciales. Además, los sitios rurales presentan ocupaciones breves, y un núcleo familiar puede ocupar varios conjuntos durante una generación. Aplicando estos patrones de movilidad a la arqueología prehispánica, se podría inferir una disminución demográfica significativa.

Los documentos históricos de las incursiones españolas en las tierras bajas mayas sugieren que los patrones observados por Alexander (2006) prevalecieron durante la era prehispánica. Hullmuth (1977) menciona que los primeros exploradores españoles encontraron conjuntos habitacionales vacíos pero listos para ser ocupados en áreas rurales. En los centros urbanos, identificaron a los dueños de las casas, lo que indica que los habitantes podían estar ocupando ranchos al mismo tiempo. Con la llegada de los conquistadores armados, los habitantes rurales probablemente huyeron a los pueblos en busca de la seguridad que ofrecían los asentamientos más grandes. Las prospecciones en la región Puuc de Yucatán muestran que las casas rurales eran más precederas que las urbanas (Sabloff 1994), lo que podría indicar construcciones destinadas a ocupaciones temporales, más que una diferencia de riqueza entre la población rural y urbana.

En cuanto a los patrones de asentamiento, las excavaciones en zonas urbanas revelan historias de construcción y ocupación complicadas. Haviland (1968) documentó en Tikal un hogar que comenzó con una sola habitación techada, posiblemente ocupada por una pareja sin hijos, y que se fue ampliando gradualmente durante dos o tres generaciones antes de ser abandonado. Esto sugiere que las viviendas se expandían con el tiempo, y que un hogar podía ocupar múltiples conjuntos en diferentes periodos. Tales patrones también se observan en contextos etnográficos de los mayas contemporáneos (Wilk 1984). Dada la prevalencia de

conjuntos de patio en las zonas urbanas mayas prehispánicas, es razonable cuestionar las reconstrucciones demográficas basadas únicamente en la cantidad de conjuntos residenciales.

Dieta y entorno en una nueva perspectiva arqueológica

Las estimaciones demográficas elevadas llevaron a suponer que las grandes poblaciones requerían enormes cantidades de alimentos. Desde una perspectiva occidental, se pensó que el bosque no era fuente de alimento y que la agricultura de roza, tumba y quema no era suficiente para sostener a estas poblaciones (Sabloff 1994). Por ello, se concluyó que la conversión de bosques en campos agrícolas de maíz y frijol era necesaria, siguiendo observaciones etnográficas que señalan al maíz como el cultivo principal de los mayas, junto con el frijol y la calabaza (Salazar et al. 2016).

De manera similar al caso estudiado por Fairhead y Leach (1996) en África, los arqueólogos asumieron que cada persona habría requerido deforestar una cierta cantidad de bosque. Esta perspectiva influyó en los estudios de polen en núcleos limnológicos y en los análisis de $\delta^{13}\text{C}$, donde se esperaban evidencias de campos de maíz (Luzzadder-Beach et al. 2016; Burnett et al. 2012). La presencia de polen de pastos y maíz, junto con valores de $\delta^{13}\text{C}$ superiores a -24 ‰, llevó a algunos arqueólogos a concluir que los mayas talaron grandes extensiones de bosque (Abrams y Rue 1988; Oglesby et al. 2010). Incluso, se llegó a plantear la idea de que los mayas habrían cortado el último árbol en ciertas áreas como Copán.

No obstante, estudios arqueológicos e históricos sugieren que estas conclusiones carecen de solidez. Para los mayas, el bosque ofrecía una amplia variedad de alimentos aprovechables a través de la agrosilvicultura, incluyendo cultivos como camote, yuca, frutas y nueces (Hellmuth 1977). El maíz y el frijol no eran tan importantes en la dieta prehispánica hasta la llegada de los colonizadores, quienes demandaban tributos en forma de estos productos (Hellmuth 1977). Excavaciones recientes en el sitio de Ceren revelan que el maíz ocupaba un área limitada, siendo la yuca el cultivo principal (Sheets et al. 2012).

Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ menores a -24‰ durante el periodo prehispánico, encontrados en núcleos limnológicos como la presa Términos y otras áreas de Tikal, indican que no hubo una deforestación masiva, sino que el paisaje era un mosaico (Tankersley et al. 2023). Estos resultados coinciden con análisis de polen que sugieren la presencia de bosques en Copán durante el Clásico tardío y terminal (McNeil et al. 2010). Muchos estudios sobre $\delta^{13}\text{C}$ carecen

de análisis isotópicos adicionales o mediciones de cambios en los regímenes pluviales, lo que hace imposible concluir que los cambios en $\delta^{13}\text{C}$ se deban a la conversión de bosques en campos de maíz. Por lo tanto, la evidencia para respaldar la idea de una extensa agricultura de maíz por los antiguos mayas es limitada.

La ecología histórica como una perspectiva alternativa.

Dadas a las críticas a la nueva arqueología que empezaron a tomar forma a partir de los 1990s, los investigadores empezaron a buscar modelos teóricos alternativos que integraron los humanos con el ambiente y reconocieron que la relación humano-ambiente en las culturas indígenas no conocida con la visión europeo colonialista (Balée y Erickson 2006; Thurston y Fisher 2007). Como resultado, se empieza a acuñar el término “ecología histórica”, para referirse a una aproximación holística en la comprensión de las interacciones entre el hombre y la biosfera, partiendo de las premisas básicas de que ningún medio ambiente en la tierra ha estado exento de la influencia humana y que el hombre ha transformado en diferentes grados el paisaje “natural”, al menos desde mediados del Holoceno (Ehrlich 1968; Torrescano-Valle e Islebe 2015).

En este sentido, el paisaje se observa como “el nicho antropogénico”, una forma de medio ambiente construido, a menudo de manera intencional, modificando y diseñando la naturaleza arquitectónicamente o con algún otro medio de apropiación simbólica, con patrones identificables de usos complejos de la tierra que tienen efectos acumulativos (Balée y Erickson 2006; Rappaport 1989; Fisher et al. 2009). Por ende, es el producto de la interacción entre grupos humanos y el entorno, siendo los procesos ecológicos, políticos, económicos y simbólicos, los que determinarán la configuración espacial del entorno (Giddens 1984; Fisher et al. 2009). Se entiende que, cada disposición o configuración espacial será parte de procesos particulares de esta relación con el ambiente, formando patrones en el espacio donde se reproducen las actividades y dinámicas socioculturales (Hillier y Vaughan, 2007).

La biodiversidad, sostenibilidad y resiliencia

Algunos de los principales puntos de discusión en estos enfoques teóricos radican en la capacidad de los grupos humanos de crear ambientes sostenibles y resilientes capaces de

mantener sus funciones básicas y sin afectaciones extremas sobre la biodiversidad. La mayoría de las definiciones de sostenibilidad ya sea de manera implícita o explícita, se basan en el concepto de capacidad de carga y huella ecológica (cf., Goodland 1995; Wackernagel y Yount 1998; Giovannoni y Fabietti 2014). Por lo tanto, cualquier recurso específico o un "sistema" completo tiene un límite hasta el cual puede soportar indefinidamente su uso o extracción. Superar ese límite (por ejemplo, uso excesivo) agotará dichos recursos o sistemas hasta el punto de su colapso. En consecuencia, la sostenibilidad se refiere a la extracción o uso que permanece por debajo de ese límite y permite que el recurso o sistema se regenere, persista o sobreviva (Daly 1990; Costanza y Patten 1995; Goodland 1995). Muchos académicos han subdividido el concepto de sostenibilidad en tres ejes: 1) sostenibilidad social, 2) sostenibilidad económica o empresarial, y 3) sostenibilidad ambiental (Goodland 1995; Giovannoni y Fabietti 2014). En este contexto, nos centramos en la sostenibilidad ambiental (Costanza y Patten 1995; Goodland 1995; Giovannoni y Fabietti 2014; Carballo et al. 2022; Feinman et al. 2023; Hicks 1946) para discusiones sobre sostenibilidad social y económica.

La definición más directa de sostenibilidad ambiental que encontramos en la literatura la describe como la no-depleción del "capital natural" (Costanza y Patten 1995; Goodland 1995; Giovannoni y Fabietti 2014). En otras palabras, la tasa de extracción o consumo de recursos naturales renovables para cualquier actividad o meta se mantiene por debajo de la tasa a la cual ese recurso se renueva (Costanza y Patten 1995; Goodland 1995; Giovannoni y Fabietti 2014). Para los recursos no renovables, la sostenibilidad se enfoca en reducir el consumo o la extracción al mínimo nivel posible junto con la búsqueda e implementación de fuentes alternativas (por ejemplo, reemplazo de la extracción de petróleo por energía solar). De manera alternativa, la sostenibilidad ambiental busca mantener los servicios ecosistémicos a largo plazo, incluyendo la reducción, mitigación o eliminación de desechos y contaminación (Goodland 1995; Giovannoni y Fabietti 2014).

Estudios teóricos y empíricos han demostrado que existe una relación entre sostenibilidad y resiliencia derivada de la naturaleza del cambio ecológico. Según Holling (1996:31), el cambio ecológico es "episódico, con una lenta acumulación de capital natural, como biomasa o nutrientes, interrumpida por liberaciones súbitas y reorganización de ese capital como resultado de procesos internos o externos...". En consecuencia, la resiliencia

puede definirse como la capacidad de un entorno o paisaje para absorber perturbaciones (estrés) sin experimentar liberaciones súbitas o reorganización (Holling 1996:31-32). Así, una mayor resiliencia resulta en períodos más prolongados sin reorganización, permitiendo que los entornos o paisajes persistan, lo que produce una mayor sostenibilidad.

Teoría e investigación han demostrado que una mayor biodiversidad resulta en un mayor número de especies desempeñando el mismo rol en el ambiente (Peterson et al. 1998). Debido a que diferentes especies responden de manera distinta a las perturbaciones o estrés, una mayor diversidad de especies proporciona mayor robustez a los procesos ecológicos, lo que incrementa la resiliencia (Tilman y Downing 1994; Holling 1996). Esto se debe a que la diversidad permite un mayor refuerzo de las interacciones ecológicas, lo que a su vez amortigua las interrupciones (Peterson et al. 1998). Por ejemplo, Frank y McNaughton (1991) encontraron que los pastizales con mayor diversidad de especies de pastos se recuperaron más rápidamente de las sequías que en áreas con menor diversidad (Tilman y Downing 1994). Naeem et al. (1994) utilizaron parcelas experimentales para demostrar que una mayor riqueza de especies está asociada con un mayor consumo de dióxido de carbono, mayor captación de luz, canopias más densas y mayor productividad.

Es importante puntualizar que, la resiliencia y sostenibilidad son aspectos centrales en la ecología histórica. En este sentido, se define la resiliencia como la capacidad de un *sistema* [un paisaje en términos de ecología histórica] para absorber perturbaciones y mantener sus funciones básicas y estructuras organizativas (Holling 1973). En el contexto de la ecología histórica, esta capacidad de adaptación y recuperación es primordial para comprender cómo las sociedades humanas han enfrentado cambios ambientales y sociales a lo largo del tiempo (Gunderson y Holling 2002). Es importante especificar aquí que, esta perspectiva difiere de la de paisaje ecológico tradicional, que se enfoca en la estructura y función de los ecosistemas naturales sin considerar la influencia humana como un factor central. Mientras que el paisaje ecológico se centra en la biodiversidad, la sucesión ecológica y las dinámicas naturales, la perspectiva de paisajes antrópicos integra explícitamente la acción humana como un elemento transformador esencial, reconociendo la co-evolución de humanos y sus entornos.

La resiliencia y sostenibilidad están estrechamente relacionadas con la gestión del paisaje y la diversidad biocultural. Autores como Turner et al. (2003) y Folke et al. (2003)

han destacado cómo la diversidad de paisajes y prácticas culturales puede aumentar la resiliencia social al proporcionar opciones adaptativas frente a cambios ambientales y sociales. En el contexto de la ecología histórica, el estudio de prácticas y conocimientos tradicionales puede ofrecer lecciones valiosas sobre sostenibilidad y manejo de recursos (Erickson, 2008). Por ejemplo, investigaciones sobre las estrategias agrícolas tradicionales han demostrado que técnicas de manejo del suelo y cultivos diversificados habrían permitido a las sociedades prehispánicas mantener la productividad de sus tierras durante siglos (Denevan 2001).

Sostenibilidad y resiliencia de los sistemas tradicionales en área Maya.

La ecología histórica también investiga cómo las sociedades del pasado han mantenido la resiliencia y sostenibilidad y se enfatiza que "el estudio de prácticas tradicionales puede ofrecer lecciones valiosas sobre sostenibilidad y manejo de recursos" (Erickson 2008). Esto sugiere que muchas sociedades preindustriales desarrollaron estrategias exitosas para gestionar sus recursos de manera sostenible, desafiando la narrativa moderna de que solo las sociedades tecnológicamente avanzadas pueden lograr una gestión ambiental eficaz (Erickson 2000; Balée 1998).

Por ejemplo, investigaciones recientes en el área Maya han demostrado que el concepto de "*kanan ka'ax*" (que se traduce aproximadamente como "cuidar el bosque usándolo") tiene una profunda historia en las tierras bajas mayas. Desde tan temprano como el Preclásico (1500–250 a.C.) e incluso posiblemente durante el período Arcaico (8000–1500 a.C.), la experiencia y experimentación con el cultivo, la silvicultura, el manejo del suelo y la gestión hidrológica sirvieron como base para perfeccionar el complejo sistema agroforestal itinerante del Período Clásico, conocido como el "Jardín Forestal Maya" (Ford y Nigh 2015; 2016; 2020). El Jardín Forestal Maya es un sistema de manejo agrícola y silvícola sofisticado e intensivo (en términos de trabajo y rendimiento) que comienza con la generación de espacio para la plantación de cultivos anuales de maíz, frijoles y calabaza, en asociación con hasta 60 especies de cultivos adicionales; una policultura mesoamericana conocida como milpa maya o Ich Kool (Hernández Xolocotzi et al. 1995; Rodríguez-Robayo et al. 2020).

Durante la primera fase del Jardín Forestal Maya, se llevan a cabo dos prácticas de suma importancia para garantizar la sostenibilidad ambiental del manejo del paisaje: 1)

recorrer el monte (*kimbal ka'ax*) para la selección altamente especializada de sitios adecuados para iniciar un ciclo de sucesión agroforestal; y 2) quemas sofisticadas realizadas por los *Yum Ik'Ob* (cuidadores del viento), encargados de despejar el bosque mediante una quema controlada y de baja temperatura que aporta nutrientes al suelo y favorece la conservación de semillas en el sustrato, así como la reproducción vegetativa (Nigh y Diemont 2013; Rivera-Núñez et al. 2020). Después del cultivo de la milpa, hay siete fases adicionales de estratos de vegetación sucesiva que transitan desde combinaciones mixtas de arbustos y árboles hasta bosques maduros, debido a la competencia generada por la selección humana previa. Este proceso culmina en un jardín forestal dominado por especies cosechables o en un meta-paisaje funcional oligárquico (Ford y Nigh 2015).

Las siete fases de sucesión vegetativa, con la utilización activa de especies para alimentos, medicinas, utensilios y materiales de bioconstrucción para viviendas, son las siguientes (Gómez-Pompa 1987; cf. González-Cruz et al. 2014):

Sak'aab: Incluye los primeros tres años después de la milpa. Se caracteriza por suelos de baja fertilidad con una cantidad mínima de hojarasca y predominio de arbustos o maleza. Este estadio sucesional se caracteriza por una alta presencia de *Viguiera dentata*.

Sak'aab hubche': Bosque tropical de 3 a 5 años. Se establecen enredaderas, se acumula hojarasca y comienza la recuperación del suelo. *V. dentata* sigue siendo la especie dominante.

Hubche': Bosque tropical de 5 a 8 años. Esta etapa marca el primer cambio dramático en la comunidad vegetal debido a la alta mortalidad de pastos y plántulas de los estadios Sak'aab y Sak'aab hubche'. *Sabal mexicana* y *Brosimum alicastrum* son las especies dominantes.

Ka'anal hubche': Bosque tropical de 8 a 15 años. Es un bosque bajo con predominancia de árboles pequeños y una notable disminución en el número de enredaderas. *Lysiloma latisiliquum* y *Bursera simaruba* son dominantes.

Kelenche': Bosque tropical de 16 a 30 años. Equivalente a un sitio de bosque alto, con un dosel de aproximadamente 10 m de altura. La comunidad vegetal está compuesta mayormente por árboles. *Manilkara zapota* y *Enterolobium cyclocarpum* son las especies dominantes.

Suhuy ka'ax: Se refiere a un bosque tropical de 30 a 50 años. Se caracteriza por la presencia de grandes árboles con un dosel superior a 15 m de altura. Los árboles presentes en esta etapa son principalmente maderables o útiles para leña. *Simaruba glauca* es la especie arbórea dominante.

Ka'anal ka'ax: Es un bosque tropical antiguo de al menos 50 años, del cual se extraen pocos recursos porque se considera sagrado y un mosaico para la preservación de la continuidad de los procesos forestales. *Cordia sp.*, *Thrinax radiata* y *B. alicastrum* son dominantes.

Lo interesante en términos de sostenibilidad ambiental es que, a lo largo de los siglos, los mayas han logrado combinar una estrategia agrícola que equilibra el suministro de sus necesidades de subsistencia con la recuperación de la cobertura forestal y el mantenimiento de los servicios ambientales proporcionados por los bosques tropicales (Fedick 2010). Estudios etnobotánicos en el área del Jardín Forestal Maya, en Guatemala, han reportado que aproximadamente el 90% de las especies de plantas son recolectadas de alguna manera por las familias campesinas (Allen et al., 2003; Ford y Nigh, 2015). Además, las poblaciones de fauna silvestre se mantienen en un buen estado de conservación. Por ejemplo, se reporta anualmente la presencia de jaguar (*Panthera onca*), puma (*Puma concolor*), ocelote (*Leopardus pardalis*), tapir mesoamericano (*Tapirus bairdii*), mono araña (*Ateles geoffroyi*), saraguato (*Alouatta pigra*), pecarí (*Pecari tajacu*), venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*) y cocodrilo de pantano (*Crocodylus moreletii*).

Al integrar la resiliencia y sostenibilidad en el análisis, la ecología histórica puede contribuir a una comprensión más completa de las interacciones entre humanos y entornos naturales a lo largo del tiempo. Esto puede informar sobre estrategias de gestión y conservación que promuevan la salud y la integridad de los paisajes y comunidades humanas en un mundo en constante cambio (Antorcha et al. 2023).

Como hemos estado planteando, uno de los postulados fundamentales de la ecología histórica es que los paisajes no son entidades naturales inmutables, sino construcciones históricas cambiantes y moldeadas por la actividad humana, en donde "los paisajes actuales deben ser entendidos como el resultado de una larga serie de interacciones entre los seres humanos y su entorno" (Balée y Erickson 2006: 15). Esto en gran medida desafía la noción tradicional de que los entornos naturales son escenarios estáticos (tienen la tendencia a estabilidad) sobre los cuales actúan las sociedades humanas, proponiendo en cambio una visión dinámica donde ambos se co-evolucionan (Balée 2006; 2013).

El paisaje antrópico, las escalas y la larga duración.

El paisaje antrópico se refiere entonces a áreas donde la actividad humana ha alterado los patrones y procesos ecológicos para satisfacer diversas necesidades, creando así mosaicos complejos que reflejan la integración de factores bióticos, abióticos y culturales. Esta perspectiva monista ve a los humanos y su entorno como entidades interconectadas que han

co-evolucionado a lo largo del tiempo, formando un palimpsesto de ocupaciones humanas que deja huellas históricas acumulativas en el paisaje (Fuentes y Baynes-Rock 2017).

Los paisajes resultan de la interacción continua y contingente entre humanos y el medio ambiente, sujetos a cambios constantes debido a transformaciones y perturbaciones naturales y humanas. Esta postura, considera los paisajes no como entidades estáticas, sino como sistemas dinámicos y estocásticos donde las perturbaciones juegan un papel crucial en la configuración del entorno, contribuyendo tanto a su biodiversidad como a su resiliencia (Erickson 1999; 2000). En este sentido, una perspectiva de larga duración nos permite observar cómo estos paisajes han evolucionado a través del tiempo, reflejando adaptaciones y transformaciones en respuesta a diversos factores de cambio (Hooke et al. 2012).

Para analizar estos fenómenos, es primordial utilizar diversos métodos de análisis que se adecuen a la escala espacial y temporal de los procesos estudiados. Los análisis espaciales detallados juegan un papel importante para entender cómo las actividades humanas han transformado el uso del suelo y gestionado el paisaje a lo largo del tiempo (Ellis 2005). Esto incluye el estudio de mosaicos de paisajes que combinan áreas urbanas (asentamiento), agrícolas (patio, huerto, terreno y milpa) y naturales (actividad de silvicultura), cada uno con límites definidos y funciones específicas desde la construcción social (Ellis 2005).

Por otra parte, y de manera complementaria, la integración de conceptos como el nicho ecológico, como el rol o posición de una especie en dado ecosistema y las especies clave como agente de alto impacto son, como veremos más adelante, también fundamentales para comprender la dinámica de los paisajes antrópicos (Paine 1969; Redman 1999; Terborgh et al. 2001; Chase y Leibold 2003). Estos conceptos contribuyen al análisis de cómo las sociedades humanas han creado paisajes culturales complejos mediante la modificación de nichos ecológicos y la gestión de especies claves, en muchas ocasiones incrementando incluso la diversidad *beta* y *gama*, lo que, a su vez, la posiciona como especie clave en la construcción de su ecosistema. Por ejemplo, en la Amazonía, las sociedades precolombinas utilizaron técnicas de manejo del paisaje como campos elevados y canales de riego para transformar y gestionar su entorno de manera sostenible, aumentando la biodiversidad y la resiliencia del ecosistema (Erickson 2000).

Un aspecto primordial y clave que ya hemos venido tocando y que queremos puntualizar, es la importancia de considerar múltiples escalas temporales y espaciales en el

estudio de las interacciones entre humanos y ambientes. Balée y Erickson (2006) destaca que la comprensión de los cambios ambientales requiere un análisis que abarque desde eventos a corto plazo hasta procesos que se desarrollan a lo largo de milenios, con un enfoque o aproximación multiescalar que permita a los investigadores captar la complejidad y la variabilidad de las adaptaciones humanas a lo largo del tiempo (Balée y Erickson 2006). De tal manera que, la escalas deben estar directamente asociada a los fenómenos estudiados de cambio, tanto humanos como naturales, para la comprensión de estos paisajes, por lo tanto, estas deben ser adecuadas espacial y temporalmente para un correcto análisis.

En este sentido el enfoque de larga duración permite analizar cómo las prácticas culturales y los eventos naturales han moldeado el paisaje a lo largo del tiempo, observando cambios en el uso del suelo, la gestión de recursos y la respuesta a perturbaciones climáticas, proporcionando una visión integral de la interacción entre humanos y ambiente (Fuentes y Baynes-Rock 2017; Hooke et al. 2012).

Esta perspectiva, desarrollada en escuela de Annales, articula tres conceptos analíticos: momento, coyuntura y larga duración (Braudel 1958). El *momento* se refiere a los eventos de corta duración, que son inmediatos y transitorios, como batallas, decisiones políticas o desastres naturales. La *coyuntura*, en contraste, abarca periodos de mediana duración, como ciclos económicos y cambios sociales y políticos que pueden durar décadas o siglos. Finalmente, la *larga duración* se enfoca en estructuras profundas y persistentes que configuran la vida de las sociedades a lo largo de milenios, tales como las prácticas culturales, las geografías humanas y las configuraciones ecológicas. Esta metodología permite entender cómo las fuerzas estructurales y los cambios lentos pero constantes moldean el curso de la historia más allá de los eventos y coyunturas inmediatas (Braudel 1958; Matthews y Morrison, 2018).

El Paysage: Explorando las Interacciones Humanas con el Entorno a lo largo del Tiempo.

En su esencia, la ecología histórica reconoce entonces que, los paisajes son productos de procesos históricos y actividades humanas como la agricultura, la urbanización y la gestión de recursos. Esta visión dinámica del paisaje, como lo describen Balée y Erickson (2006) y Erickson (2006; 2008), desafía la concepción estática de los entornos naturales y

subraya la importancia de considerar múltiples escalas temporales y espaciales en el análisis ambiental (Balée 2006; 2013).

El concepto de "paysage" en la ecología histórica no se limita a la dimensión física del paisaje, sino que incorpora también aspectos culturales, simbólicos y perceptuales. Autores como Crumley (1994) y, Hirsch y O'Hanlon (1995) destacan cómo las prácticas culturales y las experiencias sensoriales contribuyen a la construcción y percepción del paisaje. Desde esta perspectiva, los paisajes son entendidos como redes de significados culturales y campos de experiencia donde se entrelazan las percepciones sensoriales y las prácticas sociales.

Al considerar el paisaje como un entorno dinámico y multidimensional, es fundamental analizar cómo las sociedades humanas han interactuado con su entorno y cómo estas interacciones han influido en la estructura y función de los paisajes. Aquí es donde entran en juego conceptos clave en ecología, mencionados arriba, como el nicho ecológico y las especies clave.

Clark Erickson enfatiza la idea de que los paisajes son productos de la ingeniería social y ecológica. Erickson (2008) sostiene que "los paisajes amazónicos deben ser vistos como sistemas complejos diseñados y manejados por sociedades indígenas a través de tecnologías y conocimientos ecológicos tradicionales". Este enfoque destaca la agencia humana en la creación y mantenimiento de sistemas agrícolas intensivos, como los campos elevados y los canales de riego, que transforman y gestionan el medio ambiente de manera sostenible (Erickson 1999; 2000). El argumenta que en el caso de los bajos la ingeniería indígena aumenta la biodiversidad beta y gamma.

Del mismo modo, los paisajes son redes de significados culturales y no solo entornos físicos, en donde, un paisaje es una construcción social que refleja las prácticas, los conocimientos y las cosmologías de las comunidades que lo habitan (Crumley 1994). Esta perspectiva añade una dimensión simbólica y cognitiva al concepto de paisaje, sugiriendo que las interpretaciones culturales y las prácticas simbólicas son fundamentales para entender cómo los humanos interactúan con su entorno.

Ingold (2000) introduce la noción de paisaje como una "tarea" y una "narración" continua. Argumenta que "los paisajes son mejor comprendidos como conjuntos de tareas, donde cada actividad humana se inscribe en una historia mayor del lugar", donde el paisaje

no solo se presenta como un espacio físico, sino como un proceso vivido y una historia en desarrollo, donde las actividades cotidianas de las personas contribuyen a la formación y transformación del entorno. En este sentido, Eric Hirsch aborda el paisaje desde una perspectiva fenomenológica, enfocándose en la experiencia perceptual. Hirsch (1995) sostiene que "los paisajes son campos de experiencia donde se entrelazan las percepciones sensoriales y las prácticas sociales", resaltando cómo las percepciones y experiencias individuales y colectivas contribuyen a la construcción del paisaje, destacando la importancia de la percepción sensorial y la interacción directa con el entorno.

En conclusión, el concepto de paisaje en la ecología histórica es multidimensional y dinámico, integrando aspectos históricos, sociales, culturales, ecológicos y perceptuales. Los enfoques de Balée, Erickson, Crumley, Ingold y Hirsch entre otros, proporcionan un marco teórico rico y variado para entender cómo los paisajes son el resultado de las interacciones entre factores bióticos, abióticos y culturales, así como son (re)construidos y transformados por las sociedades humanas a lo largo del tiempo porque cada generación recibe un paisaje legado que es un palimpsesto de la historia socioambiental e inscribe su vida cotidiana, social, espiritual, económico, etc. en ello.

El medio ambiente construido como enfoque para entender la cultura.

Entendido el paisaje como un producto, empezamos a definir el espacio como un medio ambiente construido, con patrones y características particulares, que complementa y robustece el concepto de paisaje. En términos generales, el paisaje arqueológico se refiere a la interacción entre los humanos y el entorno a lo largo del tiempo, y cómo esta relación ha sido afectada e influenciada por procesos culturales, bióticos y abióticos (físicoquímicos). Se enfatiza que el paisaje no es meramente un espacio físico, sino también un concepto multidimensional que abarca las percepciones, experiencias y significados atribuidos al entorno por individuos y culturas.

El paisaje no se refiere solo a los aspectos visuales o físicos de un lugar; sino que, involucra también las relaciones dinámicas entre espacio y tiempo, acciones y pensamientos, y los significados y valores que se le atribuyen (Robin y Rothschild 2002). En otras palabras, los paisajes son construcciones sociales y culturalmente significativas, moldeadas por las experiencias humanas y sus interacciones con su entorno. Así cada paisaje es único porque

es el producto de una sociedad en particular en un momento histórico particular. "Asimismo, el paisaje también ha sido concebido como...un conjunto de relaciones sociales y espaciales, con el entorno físico y humano, que se construye a lo largo del tiempo y es susceptible de ser interpretado en términos culturales" (Bender 1993); o como un enfoque para el estudio multidisciplinario de las relaciones entre los humanos y su entorno material y simbólico (Ashmore y Knapp 1999).

En este sentido, el medio ambiente construido se considera como un marco y el paisaje arqueológico como un enfoque metodológico y teórico que juntos confrontan un aspecto fundamental en el análisis y estudios de las sociedades, ya que la manera en que una sociedad construye su entorno tiene un impacto significativo en su economía, política, cultura, cosmovisión y expresión simbólica (cf. Blanton 1994; Wylie 2013).

Esta percepción se extiende no solo a los edificios y estructuras construidos por las personas, sino también a la infraestructura, caminos, sistemas de riego, áreas de cultivo, sistemas de transporte, suelos antrópicos, y otros elementos similares (Bender 1993). Por lo tanto, no se trata solo de arquitectura y estructuras físicas, sino también de cómo estas son producto de y a la vez influyen en, las relaciones sociales, políticas y económicas dentro de una sociedad, así como, en la interacción compleja entre la cultura y su ambiente construido y cómo esto afecta las dinámicas e interacciones de la sociedad en su conjunto. Esta es la materialización de la ideología y la cosmovisión de una sociedad en su entorno físico y social, no solo como una manifestación de la organización social y política, sino también de sus creencias culturales, valores y prácticas. Esta definición resalta la complejidad e importancia de la interacción entre los humanos y el entorno a lo largo del tiempo, influenciada por procesos culturales y naturales (Robin y Rothschild 2002).

Integración de Nicho Ecológico, la Especie Clave en la Ecología Histórica.

Como hemos venido planteando, la ecología histórica con su enfoque interdisciplinario ofrece una perspectiva enriquecedora para el estudio de la interacción entre sociedades humanas y sus entornos a lo largo del tiempo. Este enfoque se centra en la construcción histórica del *paysage*, reconociendo la agencia humana y la complejidad de las relaciones socio ecológicas. Al integrar entonces conceptos como el nicho ecológico y la

especie clave, la ecología histórica permite una comprensión más profunda y holística de cómo los humanos han moldeado y sido moldeados por sus entornos.

El paisaje, según la ecología histórica es un palimpsesto, es decir, una construcción histórica resultado de las interacciones humanas entre ellos y con los procesos bióticos y abióticos a lo largo del tiempo, una a la superposición de diversas capas de uso y modificación del suelo a lo largo del tiempo, con múltiples fases de ocupación y transformación humana, cada una dejando su marca sobre la anterior (Bailey 2007). El concepto de nicho ecológico, originalmente definido como el papel y posición de una especie en su entorno, se integra en la ecología histórica para entender cómo las sociedades humanas crean y modifican, a partir de sus recursos, sus propios nichos ambientales (Grinnell 1917). El nicho ecológico en sí es un *hipervolumen de n dimensiones*, donde cada dimensión representa una variable ambiental que afecta las interacciones ecológicas (Hutchinson 1957). En este contexto, Balée (1998) sostiene que "los humanos no solo ocupan nichos ecológicos, sino que también los crean activamente a través de prácticas culturales y tecnológicas".

En este orden de ideas, una especie clave es aquella cuya presencia o actividad tiene un impacto desproporcionadamente grande en la estructura y función del ecosistema (Paine 1969; Redman 1999). Puede ser una especie dominante en términos de biomasa o una especie que desempeña un papel único en la comunidad, con un impacto profundo en sus ecosistemas en comparación con su biomasa (Paine 1969). Estas especies pueden ser fundamentales para la estructura y función de los paisajes históricos. Por ejemplo, los estudios de Terborgh et al. (2001) muestran cómo la ausencia de depredadores clave puede llevar a cambios significativos en la estructura del bosque tropical. En la Amazonía, Erickson (2000) describe cómo las especies cultivadas por sociedades precolombinas han dejado huellas duraderas en la configuración del paisaje actual, aumentando la biodiversidad.

Al integrar estos conceptos, se proporciona un marco teórico para analizar cómo las sociedades humanas han creado paisajes culturales complejos mediante la modificación de nichos ecológicos y la gestión de especies clave, argumentando que las sociedades humanas han actuado como especies clave en muchos paisajes a lo largo de la historia. Sus actividades de caza, agricultura, construcción y gestión de recursos han modificado la estructura y función de los ecosistemas, afectando la distribución de otras especies y la dinámica de los paisajes.

Este enfoque interdisciplinario desafía la visión tradicional de los entornos naturales como estáticos con tendencias homeostáticas, subrayando la importancia del "paysage" como una combinación de aspectos físicos, culturales, simbólicos y perceptuales en constante cambio. (Balée 2006; Balée y Erickson 2006; Erickson 2008).

La ecología histórica del norte de la península de Yucatán

El enfoque de la ecología histórica, aplicado a estudios de caso en Yucatán ofrece beneficios científicos significativos a nivel teórico y metodológico. Teóricamente, este enfoque permite una comprensión profunda de las interacciones complejas entre las sociedades humanas y sus entornos a lo largo del tiempo. Proporciona, como hemos visto, un marco conceptual robusto y holístico con aproximaciones multidisciplinarias para analizar cómo las prácticas culturales y las interacciones ecológicas han cambiado en respuesta a transformaciones ambientales y sociales. Asimismo, al estudiar la sostenibilidad de las prácticas agrícolas tradicionales, se puede aportar evidencia empírica que respalda teorías sobre la resiliencia socio-ecológica y las estrategias de manejo sostenible de los recursos (Ford y Nigh 2015).

Metodológicamente, este enfoque integra múltiples técnicas de recolección y análisis de datos, incluyendo técnicas arqueológicas, paleoecológicas, históricas y etnográficas. Esta combinación metodológica permite una correlación de datos que fortalece la validez de los resultados. Por ejemplo, el uso de análisis de isótopos en sedimentos junto con la evidencia arqueológica proporciona una visión multidimensional del uso del suelo y las prácticas de manejo a lo largo del tiempo (Beach et al. 2002; Dunning et al. 2012). La integración de datos de diferentes fuentes y disciplinas fomenta un enfoque holístico y más detallado, que creemos, es esencial para entender las complejidades de la interacción entre humanos y medio ambiente.

Científicamente, estos estudios contribuyen significativamente al cuerpo de conocimiento sobre la historia ecológica, el desarrollo de las sociedades humanas, los procesos ambientales y la sostenibilidad, impacto y resiliencia de los paisajes antrópicos en medios construidos. Documentan cómo las prácticas tradicionales han permitido a las comunidades ajustarse y prosperar en entornos cambiantes a nivel local y subregional. Este conocimiento es trascendental para desarrollar modelos de resiliencia que puedan ser usados para estudios

comparativos a mayor escala. Además, al proporcionar datos detallados y contextualizados sobre la gestión de recursos a lo largo del tiempo, estos estudios enriquecen las teorías ecológicas y antropológicas, permitiendo un mejor entendimiento de las dinámicas de cambio y ajuste en diferentes contextos culturales y ambientales (Gómez-Pompa 1984; 1987; Lentz et al. 2018).

Pregunta de investigación.

En este sentido, nuestro principal cuestionamiento es, ¿cuál es el grado de impacto/transformación ambiental del paisaje que, resultan del cambio climático, en combinación con procesos socioculturales en períodos de larga duración (*longue dureé*)?

Objetivos.

Objetivo general.

Nuestro objetivo fue correlacionar diferentes momentos de ocupación, con evidencias en registros paleoecológicos, arqueológicos e histórico para, explicar la historia ecológica y el desarrollo de la actividad humana en el sitio de Yalahau.

Objetivos particulares

De manera particular queremos saber si:

1. ¿Los antiguos mayas degradaron su ambiente y causaron el colapso de acuerdo con el modelo de la nueva arqueología o construyeron ambientes resilientes y sostenibles desde la perspectiva de los datos subregionales y comparativas en el norte de Yucatán?
2. Si los mayas no eran la causa principal del colapso a través de la degradación ambiental, ¿qué nos dice la historia de larga duración sobre la relación humano-ambiente en el centro del estado Yucatán?
3. ¿De qué manera las transformaciones ambientales o afectaciones antrópicas ocurridas durante los diferentes momentos de ocupación y abandono de Yalahau, se relacionan en el tiempo con evidencias de transformación ambiental?

4. ¿Son los efectos acumulativos² de los cambios climáticos³, en combinación con las acciones humanas⁴ los autores y responsables de las características ambientales y el *paysage* que observamos hoy en día?

² *palimpsesto*.

³ factores bióticos y abióticos.

⁴ v.g., poblamiento, crecimiento demográfico, apogeo, abandono, patrón de asentamiento, diseño espacial, construcción simbólica del espacio, ingeniería ambiental, , deforestación, actividad económica y/o políticas públicas, etc.

Capítulo IV. Metodología

A continuación, expondremos el estudio y la justificación para el desarrollo del proyecto, así como, una revisión teórica/metodológica de los métodos empleados para la obtención de los datos en campo y las técnicas que se utilizaros en laboratorio y en gabinete para el análisis estadístico. Esta sección incluye las tres líneas de investigación desarrolladas dentro de los campos científicos de la arqueología, la paleoecológica y la historia.

Estudio de Caso.

Nuestra investigación en el Área Natural Protegida Parque Estatal Lagunas de Yalahau (ANP-PELY) en el municipio de Homún se propone como un estudio de caso debido a varias razones esenciales. Nos centramos en un análisis profundo y contextualizado de fenómenos específicos en esta subregión, lo que nos permite entender detalladamente la relación entre humanos y el ambiente en el sitio de Yalahau, ofreciendo una perspectiva rica y matizada (Matthews y Morrison 2018). Utilizamos diversos métodos de recolección de datos, como que proporcionan una visión completa y detallada del objeto de estudio. Esta diversidad metodológica y el enfoque diacrónico, que examina cambios y continuidades a lo largo del tiempo, son características esenciales y estructurales de nuestra investigación.

El uso de un estudio de caso en Yucatán se justifica por la falta de estudios detallados en esta región centro del Estado y la necesidad de análisis multidisciplinario de larga duración. La región ha sido poco investigada en términos de interacciones históricas entre humanos y el ambiente (Matthews y Morrison 2018). Este enfoque permite abordar preguntas sobre la sostenibilidad y resiliencia de prácticas culturales y ecológicas que no pueden ser captadas por estudios de corto o mediano plazo.

Los métodos de análisis detallados y a escala fina locales y subregionales son esenciales para comprender cómo las actividades humanas han transformado el uso del suelo y gestionado el paisaje a lo largo del tiempo, contraponiéndose a la extrapolación de datos locales para interpretaciones generalizadas a escalas de macroáreas. La integración de conceptos provenientes de la ecología y la biología ayuda a entender la dinámica de los paisajes antrópicos y la coevolución de las sociedades humanas con su entorno (Ellis 2005; Paine 1969; Terborgh et al. 2001). Este enfoque nos permite analizar cómo las sociedades

humanas han creado paisajes culturales complejos y sostenibles mediante la modificación de nichos ecológicos y la gestión de especies clave, lo cual es fundamental para la gestión y conservación de recursos en ANP-PELY (Erickson 2000; Fuentes y Baynes-Rock 2017).

En resumen, nuestra investigación se clasifica como un estudio de caso diacrónico, debido a su enfoque detallado y contextualizado, el uso de métodos arqueológicos, paleoecológicos e históricos, y su capacidad para proporcionar aplicaciones prácticas y una comprensión integral de la relación entre los seres humanos y el ambiente.

Métodos arqueológicos.

La arqueología es una disciplina crucial para entender las culturas humanas del pasado mediante el estudio de sus restos materiales. A través de diversos métodos, los arqueólogos pueden reconstruir aspectos significativos de las sociedades antiguas, como su vida cotidiana, organización social, economía y entorno ambiental. Los tipos de datos generados por la arqueología incluyen artefactos, ecofactos, estructuras y arquitectura patrón de asentamiento, y el contexto estratigráfico, entre otros.

Los métodos arqueológicos de prospección son fundamentales para identificar y evaluar sitios arqueológicos antes de la excavación. Estos métodos incluyen la prospección superficial, que consiste en caminar sistemáticamente sobre el área de estudio para localizar artefactos en la superficie del suelo. La prospección geofísica utiliza técnicas como la resistividad eléctrica, el magnetómetro y el radar de penetración terrestre para detectar anomalías subterráneas que pueden indicar la presencia de estructuras o artefactos enterrados (Conyers 2013). La prospección aérea con dron y la teledetección utilizan imágenes aéreas y satelitales para identificar características del paisaje que pueden ser indicativas de actividad humana pasada.

La arqueología también permite estudiar los cambios en el uso del paisaje a lo largo del tiempo. Mediante el análisis de núcleos de sedimentos, polen y otros restos orgánicos, los arqueólogos pueden reconstruir la vegetación y las condiciones ambientales de épocas pasadas (Meyers y Teranes 2001; Meyers 2003). Esto es esencial para entender cómo las sociedades antiguas adaptaron sus prácticas agrícolas y de manejo del territorio en respuesta a cambios climáticos y ambientales. Por ejemplo, los estudios de polen pueden revelar

cambios en la composición vegetal debidos a variaciones climáticas y actividades humanas como la agricultura y la deforestación (Faegri y Iversen 1989).

En este sentido, la arqueología es fundamental para los estudios de ecología histórica de larga duración porque proporciona datos únicos y detallados sobre las interacciones entre las sociedades humanas y su entorno en contextos donde los registros históricos escritos no existen o son insuficientes. Mediante el análisis de la información recolectada en campo, los arqueólogos pueden reconstruir aspectos críticos de la vida cotidiana, las prácticas agrícolas, las tecnologías utilizadas y la organización social de las sociedades antiguas. Además, los restos biológicos encontrados en contextos arqueológicos, como polen y fitolitos, permiten la reconstrucción de la vegetación y las condiciones ambientales pasadas, esenciales para entender cómo las sociedades se adaptaron a cambios climáticos y ambientales a lo largo del tiempo (Renfrew y Bahn 2016; Meyers 2003; Faegri y Iversen 1989). Esto es crucial para una comprensión profunda y holística de las dinámicas ecológicas y sociales en escalas temporales prolongadas, que son fundamentales para los estudios de ecología histórica.

El objetivo concreto de esta etapa es entender la disposición espacial y el diseño del asentamiento. Se corroborará la extensión y la temporalidad hasta ahora propuestas, utilizando un registro sistemático del patrón urbanístico, y los estilos arquitectónicos que puedan ser identificadas sin excavar. Estos datos nos brindaran un marco temporal relativo de ocupación del asentamiento, que será correlacionado con los datos de las diferentes condiciones paleoecológicas y paleoclimáticas provenientes de los análisis de los núcleos de sedimentos (que serán descritos más adelante), buscando observar los cambios y las diferentes relaciones espaciales de los elementos arquitectónicos, con las características de la vegetación y el terreno.

Métodos paleoecológicos.

Los núcleos de sedimentos no consolidados son herramientas cruciales en estudios paleoecológicos debido a su capacidad para proporcionar un registro continuo y detallado de los cambios ambientales y ecológicos a lo largo del tiempo. Estos núcleos, recuperados en distintos cuerpos de agua, permiten a los científicos reconstruir condiciones pasadas y entender cómo los ecosistemas han respondido a variaciones climáticas y actividades humanas (Smol et al. 2001).

El contenido de estos núcleos incluye capas de materiales orgánicos e inorgánicos que se depositan anualmente. Estas capas ofrecen información vital sobre las condiciones ambientales durante su depositación. Por ejemplo, la presencia de polen, diatomeas y foraminíferos en distintas capas puede indicar las condiciones climáticas prevalentes como temperatura y humedad, y sus variaciones a lo largo del tiempo, permiten reconstruir cambios climáticos que pueden abarcar miles de años (Bradley 1999). El análisis geoquímico de sedimentos revela datos sobre la composición química histórica del agua y del suelo. Isótopos estables de carbono y oxígeno pueden proporcionar información sobre temperatura y disponibilidad de agua en el pasado. Además, la concentración de elementos traza como hierro y manganeso indica cambios en la química del agua y procesos diagenéticos (Meyers 2003; Smol et al. 2001).

Restos biológicos en los núcleos de sedimentos, como polen, fitolitos, esporas y fragmentos de plantas, son esenciales para reconstruir vegetación y ecosistemas antiguos. El análisis de polen, por ejemplo, puede reflejar cambios en la composición vegetal debido a variaciones climáticas y actividades humanas como la agricultura y la deforestación (Faegri y Iversen 1989). Los fitolitos, partículas de sílice de las células vegetales, proporcionan información sobre prácticas agrícolas y uso del paisaje (Piperno 2006).

Los núcleos de sedimentos también pueden contener señales de contaminación y actividad humana. La presencia de metales pesados, compuestos orgánicos persistentes y otros contaminantes puede indicar la influencia humana en el ambiente (Birks y Birks 2006). Además, restos de carbón y otras partículas indicativas de incendios reflejan tanto eventos naturales como actividades humanas como la quema de biomasa (Whitlock y Larsen 2001).

La datación precisa de los núcleos de sedimentos es posible mediante métodos como la datación por radiocarbono, permitiendo correlacionar cambios observados en los núcleos con eventos específicos en la historia climática y ambiental (Walker 2005). Estas técnicas permiten desarrollar una comprensión detallada de los ritmos y magnitudes de los cambios paleoambientales (Geyh 2005).

Sin embargo, hay limitaciones significativas en la interpretación de estos núcleos debido a la escala espacial. Una de las principales limitaciones es la representatividad espacial, ya que un núcleo de sedimento extraído de un solo punto puede no ser representativo de una región más amplia debido a la heterogeneidad espacial del entorno sedimentario (Smol

et al. 2001). La dificultad para integrar datos a diferentes escalas espaciales también es una limitación, pues los análisis de núcleos proporcionan información detallada a nivel local, pero extrapolar estos hallazgos para inferir cambios ambientales a escalas regionales o globales puede ser problemático (Bradley 1999).

La de la definición de una escala espacial de las señales contenidas en los núcleos de sedimento, puede dificultar la captura de variaciones espaciales en la deposición de sedimentos o en la distribución de contaminantes (Last y Smol 2001). Los efectos de borde y la comparabilidad de datos entre diferentes estudios y regiones son otras limitaciones críticas que pueden afectar la interpretación y la aplicabilidad de los resultados obtenidos (Cohen 2003; 2009; Meyers y Teranes 2001).

En resumen, los núcleos de sedimentos no consolidados son herramientas poderosas en estudios paleoambientales y paleoecológicos, proporcionando un registro detallado de cambios ambientales y ecológicos. Sin embargo, sus limitaciones relacionadas con la representatividad espacial, la integración de escalas, la resolución espacial, los efectos de borde y la comparabilidad de datos deben ser cuidadosamente consideradas para asegurar interpretaciones precisas y aplicables.

Procesos Lacustres, flujos y depositación de sedimento.

La entrega de sedimentos, agua y materia orgánica a los lagos está determinada por el clima, topografía y escala de la cuenca hidrográfica, la naturaleza geológica de la roca madre de la cuenca hidrográfica y la morfología del lago (Cohen 1989). En general, los lagos muestran entradas comparativamente rápidas y continuas del entorno, lo que los convierte en indicadores sensibles de cambios ambientales. Cuanto mayor sea la cuenca hidrográfica, mayor sea la topografía y más elevado el nivel de lluvias, más rápido serán depositados los sedimentos y otras entradas en los lagos (Cohen 1989; 2003). En este contexto, el agua es la fuerza principal que entrega las entradas, pero el viento y la sedimentación de partículas atmosféricas también juegan un papel. El agua entra en los lagos a través de la precipitación directa, escorrentía superficial (incluyendo ríos) e infiltración de aguas subterráneas (Dean 1999).

En una cuenca hidrológicamente abierta, el flujo de agua dentro y fuera del lago es relativamente poco restringido; por lo tanto, los flujos de entrada y salida son

comparativamente constantes y los niveles de agua dentro de los lagos fluctúan mínimamente (Marion et al. 1995; Dean 1999). Por el contrario, una cuenca hidrológicamente cerrada resulta en lagos en los que la salida es a través de evaporación, crecimiento vegetal y reacciones de hidratación en la interfaz entre sedimento y agua (Dean 1999). En consecuencia, los lagos de cuenca cerrada están sujetos a cambios importantes en el nivel del agua y salinización, lo que los hace más sensibles a cambios climáticos y antropogénicos (Drees 2001). El clima, especialmente la temperatura y la lluvia, junto con la geología de la roca madre, controlan las tasas de erosión química en la cuenca hidrográfica y la química del agua (Cohen 2003). Mientras que la acidez está controlada por la geología de la roca madre, la lluvia, escorrentía y descomposición de la vegetación (Cohen 2003).

Procesos Físicos

Los factores físicos clave que afectan los archivos sedimentarios y el agua de lago son la luz, el calor y la turbulencia (Dean 1999). La profundidad a la que penetra la luz define la zona en la que las biotas pueden llevar a cabo la fotosíntesis. La turbidez, el crecimiento del plancton, el contenido disuelto, la ubicación geográfica y la orientación del lago respecto al sol controlan la zona fótica (Cohen 2003). Por otro lado, la temperatura, la morfología, el flujo de agua, el viento y la turbidez afectan principalmente el desarrollo de la estratificación en la columna de agua (Cohen 2003).

Bajo condiciones estables en la columna de agua, se desarrollarán capas. Mientras más fuerte sea esta estratificación, más difícil será para las fuerzas de mezcla superarla, lo que resulta en una continuidad de la frecuencia de mezcla desde dimíctica (mezcla regular y completa) hasta amíctica (estratificación permanente) (Harmon y Wicks 1999). Los casos intermedios se definen por la frecuencia de mezcla: monomíctica (una mezcla por año, sin estratificación), polimícticos (múltiples mezclas con estratificaciones breves), oligomíctica (mezcla rara e irregular) (Harmon y Wicks 1999). Durante la estratificación, la mezcla solo ocurre en la capa superior o epilimnio; por lo tanto, la entrega de O₂ y nutrientes a las capas profundas (o hipolimnion) está restringida, lo que limita la actividad biológica.

En casos donde la estratificación fuerte continúa durante períodos prolongados o es permanente y las cargas de nutrientes (especialmente fósforo y nitrógeno) y O₂ son altas, la productividad en el epilimnio se vuelve hiperactiva; mientras que el hipolimnion se vuelve

deficitario en O₂ (anóxico) y ácido (Harmon y Wicks 1999). Este estado se conoce como eutrófico. Las floraciones tóxicas de cianobacterias son típicas en condiciones eutróficas (Waters et al. 2021). Además, cuando ocurre una mezcla completa, el O₂ y los nutrientes son entregados al fondo del lago permitiendo que los organismos bentónicos prosperen, lo que remueve los sedimentos bioturbados y reduce la resolución de los archivos sedimentarios (Harmon y Wicks 1999). La estratificación versus la mezcla también tiene importantes implicaciones para el redox y el pH, que afectan la precipitación o re-suspensión de elementos en o desde la columna de sedimentos (Harmon y Wicks 1999, Cohen 2003).

Recolección de núcleos de sedimento no consolidados (en cenotes)

Se seleccionaron aleatoriamente 20 cenotes ubicados dentro del ANP-PELY para la exploración e investigación superficial. Para la selección de los cuerpos de agua se consideró: la ubicación, tamaño, accesibilidad, presencia de construcciones antiguas o modernas, permisos de dueños (en el caso de encontrarse al interior de un rancho o parcela) y la cantidad de información existente sobre las diferentes etapas de ocupación desde un punto de vista estratigráfico. Se establecen como criterios de exclusión: los cenotes que se encuentren dentro del Área Núcleo y los cenotes que presenten cualquier evidencia arqueológica en superficie o en la dolina principal de derrumbe, con la intención de evitar cualquier daño, contaminación o alteración posible del contexto durante la recolección de muestras (los trabajos de investigación se realizaron estrictamente en las Áreas Públicas y de Amortiguamiento de la Reserva). Por lo tanto, como criterios de inclusión se establece para aquellos cenotes que no contradigan los criterios de exclusión antes planteados y, aquellos cenotes que cuenten con sedimento depositado/acumulado bajo la dolina de derrumbe o en un área cercana al espejo de agua, como se detalla a continuación.

Para la obtención de núcleos de sedimento no consolidados en cuevas inundadas, hemos desarrollado una técnica novedosa que nos permite la recuperación de muestras en cenotes, donde se encuentran los valiosos archivos sedimentarios. Bajo estas particulares condiciones, las estrategias convencionales de muestreo basadas en embarcaciones flotantes no resultan factibles. Para abordar este desafío, se realizó un trabajo de buceo en los cenotes, ubicados en zonas donde los depósitos de sedimentos se extienden horizontalmente en el fondo, más allá de las zonas de caída de rocas (dolina de derrumbe). Allí, se implementó el

uso de un tubo de PVC de 1 pulgada de diámetro y 1.5 metros de longitud, el cual fue cuidadosamente introducido en los sedimentos mediante el uso de un mazo de goma bajo el agua.

Esta estrategia exigía un alto grado de destreza para mantener una flotabilidad neutra mientras que aseguraba el tubo de PVC en posición. Una vez que el tubo alcanzaba su profundidad máxima, ya fuera limitada por su propia longitud o al encontrarse con depósitos de roca impenetrables, se procedía a sellar el extremo del tubo con una tapa de goma. Posteriormente, con sumo cuidado se extraía el tubo del sedimento, sellando también su extremo inferior. Los tubos sellados fueron llevados a la superficie y transportados a Mérida para su posterior procesamiento.

En el laboratorio, tras retirar la tapa superior y sellar los extremos de los tubos con esponja floral para evitar contaminación o derrames, los sedimentos se dejaron secar a la sombra y temperatura ambiente durante un período aproximado de 6 semanas. Es importante señalar que, en este proceso, se evitó la congelación de los tubos, ya que se recolectaron muestras de suelo para análisis biológicos, como polen fósil y ostrácodos, así como para ensayos biogeoquímicos, que se ven perturbados por el proceso de congelación. Una vez secos, los núcleos fueron cuidadosamente cortados a lo largo de eje longitudinal con una herramienta Dremel (sierra), revelando así las capas de sedimento de manera detallada.

A continuación, se procedió con la fotografía digital para archivar imágenes de alta calidad de cada sección del núcleo; ya que, esta es una técnica destructiva por naturaleza, por lo cual, el registro fotográfico y la descripción detallada del núcleo son fundamentales para el análisis. Se continuó con medición de los núcleos, extrayendo muestras de sedimento en intervalos de aproximadamente 1 cm sin mezclar las distintivas capas estratigráficas visuales. Finalmente, las muestras de sedimento fueron divididas en dos grupos para su análisis: uno destinado al análisis geoquímico (XRF y espectrometría de masas de relación de isótopos), otro para la extracción de ostrácodos.

Fecha y modelo de edad

Se seleccionaron muestras para el fechamiento de los núcleos por medio de ^{14}C . Para esto, seleccionamos muestras de carbón y material orgánico en relación estratigráfica. En total, se recolectaron doce muestras para datación. Estas fueron enviadas al laboratorio de

Direct AMS, en Bothell, Washington/EU para su fechamiento absoluto. Las edades de radiocarbono fueron calibradas usando la curva de calibración del hemisferio norte IntCal20 (Reimer et al. 2020). Con los datos obtenidos se construyó un modelo Bayesiano de edad-profundidad utilizando el paquete rbacon 2.3.4 (Blaauw y Christen 2011), basado en el software R 4.0.2 (R Core Team 2020). Esto nos permitió generar un modelo Bayesiano con una curva de edad para cada núcleo.

Análisis de espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF).

Las doscientas cuarenta muestras de sedimento recolectadas en total ($n=240$), fueron analizadas utilizando un espectrómetro de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva (ED-XRF) Olympus Vanta VMR[®] siguiendo el método propuesto por Marino et al. (2022).

Instrumento: para el análisis se utilizó el espectrógrafo de Fluorescencia de rayos X con dispersión de energía dispersiva (FRX-ED) portátil Vanta VMR[®] de marca Olympus. Este FRX cuenta con un tubo de rayos X de 4 W con ánodo optimizada de rodio (Rh) de 8 a 50 keV, un filtro de selección automática de 8 posiciones, un detector de deriva de silicio de área grande y calibración para análisis geoquímica en muestras geológicas y sedimentos⁵. Así este instrumento es el FRX-DLO portátil indicado para el análisis de los núcleos no consolidadas recuperados en cenotes.

Validación: el proceso de validación de los resultados obtenidos con el espectrógrafo de FRX fue realizado utilizando 17 materiales de referencia (RMs). La validación incluye la determinación de la precisión y exactitud, límites inferiores de detección (LoD), límites inferiores de cuantificación (LoQ), rango linear dinámico, desarrollo de una corrección para comprobación comparativa inter-laboratorio y evaluación de la corrección con un RM.

1. Materiales de Referencia.

Los RMs utilizados (Tabla 1) en este proyecto incluyen tres materiales del *National Institute of Standards and Technology* (NIST), con valores certificadas, de referencia y de información (NIST SRMs 679, 688, 2711a) y dos materiales de referencia de *National Research Council Canada* (NRCC) con valores certificados y de referencia (Hiss-1, Mess-3). Los valores para estos RMs fueron recuperados de los certificados publicados por NIST

⁵ [https://www.olympus-ims.com/en/vanta-for-mining-geochemistry/#!cms\[focus\]=cmsContent14353](https://www.olympus-ims.com/en/vanta-for-mining-geochemistry/#!cms[focus]=cmsContent14353)

y NRCC, así como valores en la página de *Geological and Environmental Referencia Materials* (GeoReM)⁶.

Además de estos RMs comerciales, se utilizaron diez referencias secundarias fabricadas y analizadas por la Universidad de Misuri Reactor de Investigación (MURR) vía INAA. RMs secundarias son materiales de referencia preparado y analizado por un laboratorio que comparte los materiales, así como los valores obtenidos por sus ensayos. Esto valores son equivalentes a los valores de información publicados en los certificados de NIST. En este caso, se utilizaron para comprobar los resultados obtenidos en los RMs y para mejor la exactitud de las correcciones. Cabe señalar que los RMs de NIST, NRCC y MURR son materiales geológicos (v.g., roca molida, arcillas y sedimentos marinos) y por ende presentan matrices equivalentes (Matrix Matched RMs) a los analitos desconocidos (las muestras de sedimento de los cenotes). Dado a lo anterior estos RMs presentan interferencias entre elementos durante los ensayos comparables con los esperados de los analitos desconocidos.

El uso de RMs con matrices equivalentes es recomendado para determinar los límites de detección y cuantificación bajo condiciones reales, así los valores de estos límites se acercan los límites para los analitos desconocidos dado su composición elemental. Además de estos RMs, dos referencias preparadas con cantidades conocidas de carbonatos y calcio (CaCO_3) fueron utilizados para asegurar que los valores de Ca en los analitos desconocidos no excedieron los valores en los RMs y que fueron dentro el rango lineal dinámica. Estas referencias incluyen una de CaCO_3 puro (40.04% Ca) y uno de 39.4% CaCO_3 (15.78% Ca).

SRMs	Referencias secundarias	Referencias preparadas
Hiss-1 (Marine Sediment)	Albany Slip Clay 'A'	.3974 g CaO
Mess-3 (Marine Sediment)	Alberta Clay 'B'	Pure CaO
SRM 679 (Brick Clay)	Bentonite	
SRM 688 (Basalt Rock)	Bernard Clay 'M'	
SRM 2711a (Montana II soil)	Cornwall Clay 'D'	

⁶ <http://georem.mpch-mainz.gwdg.de>

	Gold Art	
	Hawthorne	
	New Ohio Red	
	Old Ohio Red	
	PV Clay 'p'	

Tabla 1: Materiales de referencia (RMs) para el análisis de XRF.

Preparación de los Materiales de Referencia: los 17 materiales de referencia fueron secados en un horno a los 150°C y molidos a un grosor menor a 50 micrones, empacados en copas analíticas para FRX (Chemplex 1065: Trimless® XRF Sample Cups) y tapados con soportes de película delgada (3017: Prolene® 4.0 µm (0.16 mil); 2.5"; SpectroMembrane® Thin-Film Sample Supports). Después, los diecisiete RMs fueron analizados por FRX-DLO.

Ensayos con la Espectrografía: todas las referencias fueron analizadas en triplicado por el Vanta VMR utilizados el modo de dos haces con intensidades de 10 keV y 90 µA para excitar elementos ligeros y 40 keV y 70 µA para excitar elementos pesados. Los ensayos para cada haz duraron 90 s para un total de 180 s para cada ensayo. Las investigaciones previas con terracota prehispánica de Veracruz determino que ensayos de 90 s resultaron en una mejor precisión con los LoDs más bajos.

Determinación de Precisión y los Límites de Detección y de Cuantificación: los resultados de los ensayos triplicados por RM y por elemento fueron utilizados para calcular la media, desviación estándar y desviación estándar relativa (RSD por sus siglas en ingles). La media fue utilizada como el valor de la muestra y la RSD la media de precisión. Dada la relación matemática entre el LoD, LoQ y la RSD, una precisión (RSD) de 33% marca el LoD y una precisión (RSD) de 10% marca la LoQ. Así, los valores de RSD fueron utilizados para calcular el LoD y LoQ en los materiales de referencia. Específicamente los valores más bajos de cada elemento con RSDs alrededor de 10% en los RMs fueron tomados como el LoQ. Este valor fue multiplicado por 3.3 para determinar los LoDs para cada elemento.

Determinación del Rango Lineal Dinámico: para determinar el Rango Lineal Dinámico (LDR por sus siglas en ingles), se realizó un análisis de correlación entre las medias de cada elemento con un RSD ≤ 10% en las RMs y los valores reportados por dichos elementos utilizando el estadístico de r de Pearson. La correlación mostró que dentro el valor

mínimo y el valor máximo, determinados por la FRX; los valores de los ensayos y los valores reportados mantuvieron una relación lineal (LDR) (por ejemplo, el elemento Vanadio) tiene una respuesta no lineal a los ensayos por FRX, v.g., concentraciones con diferencias de 100 ppm en la RMs son leídos por el Vanta con las mismas concentraciones, así no se puede cuantificarlo con esta metodología). El número amplio de RMs fue utilizado para asegurar que todos los valores cuantificables (>LoQ) en los analitos desconocidos cayeron dentro del LDR. De esta manera para la calibración de los resultados se pudo aplicar una regresión lineal.

Determinación de Exactitud: se calculó la exactitud basada en el porcentaje de error (Tabla 2). Para este estudio, un % error $\leq 10\%$ fue utilizado como el límite para resultados aceptables. Los elementos que produjeron un % error $> 10\%$ por promedio fueron eliminados del análisis. Para determinar la exactitud del espectrógrafo de FRX, los valores de los elementos en los RMs con RSDs $\leq 10\%$ y arriba del LoQ fueron calibrados utilizando la corrección lineal, basado en la relación entre los valores de lectura y los valores reportados. Posteriormente los valores reportados (R) fueron sustraídos de los valores calibrados (O) y el valor absoluto de resultado fue dividido por el valor reportado y multiplicado por 100 (% Error = $\frac{|O-R|}{R} \times 100$).

Elementos	Error (%)	LoQ	LoD
Fe	9.34	2500	825
Mn	8.37	<175	<58
As	5.765	<10	<3.3
Zn	8.92	<30	<9.9
Cu	10.13	<25	<8.25
Ni	10.93	<45	<14.85
Th	2.367	15	3.3.
Pb	5.59	<12	<4
Nb	2.66	<12	<4
Zr	9.44	15	4.95

Y	6.07	12	3.96
Sr	5.15	<35	<12
Rb	6.7	<12	<4
Ti	3.85	<3000	<990
Ca	7.01	6000	1980
K	6.46	5000	1650
P	6.33	250	82.5
Si	5.39	-	-
Al	3.72	7500	2475
Mg	5.51	<9500	<3135

Tabla 2: Media de porcentaje de error de calibración, límites de cuantificación (LoQ) y límites de detección (LoD) para cada elemento.

Validación de la calibración: Para validar la calibración desarrollado con los 16 RMs, las medias de los ensayos en triplicado de SRM 2711a arriba de los LoQs y con RSDs $\leq 10\%$, fueron corregidos y el % error del resultado fue evaluado con base en los valores reportados por SRM 2711a. De nuevo el límite aceptable para el error fue $\leq 10\%$. Así se verificó que los potenciales resultados de los ensayos de los analitos desconocidos dentro el LDR deben producir valores *válidos* y comparables con otros laboratorios. *Al final, la validación confirmó la calibración para 20 elementos y para los análisis posteriores, sólo se seleccionaron los elementos que se detectaron en más del 30 % de las muestras, con un total de doce elementos cuantificados.*

Procesos Geoquímicos e Indicadores

Los materiales disueltos (por ejemplo, O₂, sólidos disueltos, nutrientes, CO₂, etc.), materia orgánica y fragmentos clásticos descargados en los lagos, sufren transformaciones en la columna de agua dependiendo de una serie de variables antes de ser depositados en el archivo sedimentario (Marion 1985). La meteorización química del lecho lacustre también afecta la química de la columna de agua y, por ende, la deportación. Por lo tanto, la interpretación de los patrones geoquímicos en los depósitos lacustres es complicada. En cuencas kársticas, el agua ácida disuelve depósitos de carbonato y satura el agua con iones

de carbonato, que pueden precipitar como lodo de cal en contextos superficiales y de baja energía (Cohen 2003; Lal 2004; Ferrio et al. 2005). Los granos de carbonato de mayor tamaño, arena y gravilla tienden a ser el resultado de la erosión mecánica (Cohen 2003). A menudo, los lagos en cuencas kársticas muestran depositación repetitiva de capas de carbonato alternando con depósitos ricos en materia orgánica (Cohen 2003).

La inversión, sequías, descomposición de la materia orgánica o cambios químicos/redox pueden afectar la depositación o redisolución de óxidos de Ca, Al, Fe y Mn, S y P (Marion 1985). Comprender los procesos químicos en la columna de agua y cómo afectan la depositación de compuestos, elementos e isótopos es fundamental para reconstruir las condiciones ambientales a partir de los archivos sedimentarios. A continuación, describimos una serie de indicadores geoquímicos (relevantes para nuestro estudio) y los procesos que afectan su depositación (Ferrio et al. 2005).

Rb/Sr: Las investigaciones han demostrado que las razones Rb/Sr pueden ser usadas como indicadores de meteorización química versus erosión mecánica. Esto se debe a que el Sr se libera fácilmente de la roca madre, especialmente de las calizas, en condiciones ácidas y luego co-precipita con CaCO_3 , entre otros. El Rubidio, por otro lado, fácilmente se sustituye por K en rocas ígneas, así como en materia orgánica. Por lo tanto, tiende a estar asociado con la erosión mecánica y/o química. Dependiendo de la composición de la roca madre del lecho lacustre, así como de toda la cuenca, las razones Rb/Sr pueden ser usadas para monitorear la entrada de materiales terrígenos a través de la erosión mecánica versus la meteorización química in situ.

Sin embargo, estas interpretaciones deben tener en cuenta la composición de la roca madre del lecho lacustre. De manera particular, en basamentos kársticos, los incrementos en Sr generalmente indican un aumento en la meteorización química autóctona, lo cual incrementa la cantidad de Sr en la columna de agua y fomenta una mayor precipitación o coprecipitación. Alternativamente, incrementos en Rb indican la entrada de flujos alóctonos (terrígenos). Investigaciones han demostrado que en casos donde el Rb es liberado a través de meteorización química autóctona, su depositación tiende a incrementar durante períodos de sequía.

Por el contrario, los incrementos en Rb se han relacionado con un aumento en la precipitación (que incrementa la meteorización química/erosión mecánica fuera del lago y

transporte a través de escorrentía hacia el lago, y/o un incremento en la descomposición/depositación de materia orgánica) y/o un aumento en la erosión inducida por seres humanos a través de cambios en el uso de suelos. Por lo tanto, es importante distinguir entre las fuerzas climáticas y antropogénicas para interpretar las razones Rb/Sr. En estudios donde se han descartado los cambios en el uso de suelos y la composición de la roca madre del lecho lacustre es kárstica, se ha demostrado que el Rb/Sr es un indicador preciso de los cambios en precipitación/temperatura. Bajo condiciones altamente controladas, incluso se ha utilizado para calcular empíricamente cantidades de lluvia en unidades métricas y temperatura en grados Celsius (Cohen 2003).

Fe/Mn. En algunos estudios, las razones Fe/Mn se han utilizado para estudiar cambios en las condiciones redox dentro de los lagos. La comprensión del Redox es importante porque afecta a una gran cantidad de procesos geoquímicos en la columna de agua (Cohen 2003). El hierro disuelto ocurre como Fe^{2+} (hierro ferroso) y Fe^{3+} (hierro férrico) en la columna de agua. Bajo condiciones oxigenantes, el Fe^{2+} se oxida a Fe^{3+} y se (re)precipita como hidróxido de hierro ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) (Cohen 2003). Por el contrario, bajo condiciones anóxicas, el Fe^{3+} se reduce a Fe^{2+} , que es soluble en agua (Cohen 2003). Por lo tanto, la mezcla de agua rica en O_2 con capas inferiores anóxicas hará que el Fe^{3+} se reproduzca; mientras que el inicio de la eutrofización resultará en una privación de O_2 en el hipolimnion, lo que hará que el Fe^{3+} se reduzca y desorba de la columna de sedimento en la interfaz entre sedimento y agua como Fe^{2+} soluble (Cohen 2003).

Sin embargo, el Fe^{3+} enterrado en el archivo sedimentario permanece estable bajo condiciones anóxicas durante hasta mil años (Cohen 2003). El manganeso se comporta de manera similar al hierro bajo condiciones redox cambiantes. Sin embargo, ocurre como Mn^{2+} y Mn^{4+} , por lo que los cambios ocurren más lentamente en condiciones oxidantes en comparación con el Fe^{3+} , porque se necesita una oxidación más fuerte para transformar el Mn^{2+} en Mn^{4+} (Cohen 2003). Por el contrario, la reducción procederá mucho más rápido en el Mn que en el Fe por las mismas razones. Por lo tanto, la razón Fe/Mn (o Mn/Fe) se ha propuesto como un método para monitorear cambios en las condiciones redox donde se conoce el estado anóxico y trófico de los lagos.

Por lo tanto, podría usarse potencialmente para identificar el inicio de estados eutróficos versus oligotróficos (Cohen 2003). Es importante destacar que la comprensión de

los cambios en el estado trófico ayuda a comprender la estratificación y, por lo tanto, una serie de reacciones químicas que afectan la depositación de elementos e isótopos en el archivo sedimentario. Los iones clave afectados por las condiciones redox son Fe^{3+} , Mn, C, S, N, P, Pb, Cu, Cd, Co, Cr y Ni. Al inicio de las condiciones reductoras, las razones Fe/Mn aumentan en los sedimentos y luego disminuyen a medida que la anoxia se vuelve permanente, mientras que un aumento persistente en las razones Fe^{3+}/Mn podría ser el resultado de la elevación pasada del nivel freático (Cohen 2003).

Metales. Las concentraciones de metales como Fe^{3+} , Mn, Pb, Cu, Cd, Co, Cr, Ni y Zn pueden mostrar fluctuaciones a corto plazo en los archivos sedimentarios como resultado de modificaciones antropogénicas del paisaje (Cohen 2003). Se han asociado picos con incendios a gran escala, deforestación, movimientos de tierra, etc., todo lo cual indica tasas de erosión incrementadas. El cobre y el zinc también pueden ser influenciados por el TOC (carbón inorgánico total, por sus siglas en inglés), aumentando con su ingreso; también muestran una relación con los tamaños de grano de clastos alóctonos (Cohen 2003). Sin embargo, también pueden ser afectados por cambios en las condiciones redox, en los que el inicio de condiciones anóxicas seguido de un cambio de nuevo a condiciones oxidantes puede provocar un aumento súbito de los metales (Cohen 2003). En ausencia de cambios redox, la depositación de Fe^{3+} y Mn en el archivo sedimentario puede aumentar durante periodos más cálidos y con estabilización del suelo (Cohen 2003).

Ti y Razones Zr/Rb. Seguin et al. (2019) y Kylander et al. (2011) han utilizado los valores de Ti y las razones Zr/Rb como indicadores de cambios en el tamaño de grano de clastos en los archivos sedimentarios. Las micas y minerales de arcilla tienden a tener valores altos de Rb, especialmente debido a la fuerte adsorción de Rb en arcilla particularmente bajo condiciones alcalinas (Kylander et al. 2011).

Debido a la fuerte adsorción, el Rb muestra una movilidad ambiental limitada. El circonio está asociado con minerales más pesados y muestra concentraciones más altas en silts medianos a gruesos (Kylander et al. 2011). Si el Rb de los feldespatos potásicos en silts gruesos y arenas está ausente, la razón Zr/Rb puede ser usada como indicador del tamaño de grano (Kylander et al. 2011; Seguin et al. 2019). Kylander et al. (2011) utilizó los valores de la correlación de Pearson r en la relación entre Ti, que está asociado con aportes detritales finos, y K y Rb para confirmar la asociación de Rb con granos más finos; estos resultados

sugieren que Rb no está asociado con granos más grandes. Así, Ti, K y Rb están asociados con arcillas, sedimento muy fino y fino, mientras que Zr está asociado con arenas muy finas y arenas finas (Kylander et al. 2011:114). Valores más altos de Zr/Rb indican granos más gruesos y arcillas más delgadas (Seguin et al. 2019). Kylander et al. (2011) confirmó este patrón mediante la comparación con los resultados del análisis de textura de los sedimentos utilizados para los valores elementales de Ti, Rb y Zr.

P. El fósforo puede ser incorporado a la columna de agua de un lago a través de la meteorización de rocas ígneas y sedimentarias ricas en P, decaimiento de materia orgánica y de fuentes antropogénicas (fertilizantes y aguas residuales) (Cerling et al. 1993). Sin embargo, el comportamiento del fósforo en la columna de agua es muy complejo, estando controlado por las condiciones redox, pH y Fe sedimentario (Cerling et al. 1993). El fósforo ocurre en la columna de agua como fosfato disuelto (PO_4^{3-4}) y como fosforoso reactivo soluble (SRP) (Cohen 2003). Los fosfatos disueltos se adsorben a los hidróxidos de Fe^{3+} y CaCO_3 y luego están sujetos a precipitación o desorción a la columna de agua dependiendo de las condiciones oxidantes (Cerling et al. 1993). Específicamente, la mezcla puede disolver P co-precipitado en la interfaz entre sedimento y agua y llevarlo al epilimnion donde puede ser utilizado por microorganismos. Por el contrario, la actividad microbiana en los sedimentos atrapa el SRP e impide su liberación bajo condiciones oxidantes (Mateo et al. 2004). Un pH elevado favorece la liberación de P de la columna de sedimentación, haciéndolo disponible para volver a precipitarse como minerales de P o adsorberse a CaCO_3 (Mateo et al. 2004). Por lo tanto, la estacionalidad, así como el cambio climático a largo plazo, produce patrones complejos en la depositación de P en el archivo sedimentario.

Análisis de Elementos Ligeros e Isótopos

Dado que la técnica de ED-XRF es no destructiva, las muestras analizadas fueron posteriormente enviadas al laboratorio de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Florida, donde se analizaron las muestras para cuantificar las concentraciones de carbono total (TC), carbono inorgánico total (TIC), carbono orgánico total (TOC), carbonato de calcio (CaCO_3) y carbono estable ($\delta^{13}\text{C}$). El análisis y selección de ostrácodos se llevaron a cabo en el Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y

posteriormente fue enviado al laboratorio de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Florida para el análisis de carbono estable ($\delta^{13}\text{C}$) y oxígeno estable ($\delta^{18}\text{O}$).

Análisis isotópico de $\delta^{13}\text{C}$: Los isótopos estables de carbono se han utilizado ampliamente en arqueología para incorporar datos sobre cambios ambientales, incluyendo forzamientos climáticos que cambian la vegetación predominante la forma que las plantas procesan el CO_2 en el ciclo de Calvin, clasificándose en bosques (árboles C3) y sabanas tropicales (gramíneas C4), así como la introducción de agricultura de maíz (firma C4) en regiones dominadas por vegetación C3 (por ejemplo, Balzotti et al. 2013; Tankersley et al. 2022; 2023).

Los árboles, arbustos y hierbas de climas húmedos en bosque tropical predominan utilizando la fotosíntesis C3, que discrimina a favor de ^{12}C sobre ^{13}C , resultando en valores bajos de $\delta^{13}\text{C}$ que van desde -32 a -25‰ (Cerling et al. 1993; Pessenda et al. 1997). Las hierbas tropicales y templadas predominan utilizando la fotosíntesis C4, que discrimina menos contra el ^{13}C , resultando en valores de $\delta^{13}\text{C}$ enriquecidos en comparación con la vegetación C3, con rangos de -14 a -10‰ (Cerling et al. 1993; Pessenda et al. 1997). Debido a las diferentes maneras en que las plantas C3 y C4 fotosintetizan, las plantas C4 son más exitosas bajo condiciones de estrés hídrico o disminución del CO_2 atmosférico (Cohen 2003).

En los sedimentos lacustres, los cambios entre vegetación C3 y C4 en la cuenca hidrográfica pueden registrarse en los archivos sedimentarios. Sin embargo, la fotosíntesis por parte del fitoplancton, que contribuye a los valores $\delta^{13}\text{C}$ en el archivo sedimentario, también discrimina entre ^{13}C y ^{12}C . Por lo tanto, $\delta^{13}\text{C}$ en el fitoplancton puede variar de -40 a -12‰, con los valores más comunes en el rango de -30 a -25‰ (Cerling et al. 1993). Sin embargo, en lagos alcalinos, los valores $\delta^{13}\text{C}$ tienden a enriquecerse a alrededor de -12‰ (Cohen 2003). Finalmente, la discriminación en el metabolismo ácido de las crasuláceas o la fotosíntesis tipo CAM tiende a producir valores de $\delta^{13}\text{C}$ en el rango de -20 a -10‰ (Cohen 2003). Dado que la vegetación terrestre una cuenca puede incluir diversas vías (por ejemplo, C3, C4, CAM) que contribuyen a los sedimentos lacustres, así como el fitoplancton, las interpretaciones de los valores $\delta^{13}\text{C}$ en los archivos sedimentarios deben hacerse con cuidado.

La quimioestratigrafía isotópica. El $\delta^{13}\text{C}$ en los estudios de paleoecología.

En las plantas, el fraccionamiento del dióxido de carbono (CO_2) se lleva a cabo mediante distintos tipos de metabolismo que se clasifican como C3, C4 y CAM (Warren 2006). Cada una de estas vías metabólicas asimila el CO_2 de manera diferente, discriminando entre el isótopo estable ^{12}C , más ligero, y el ^{13}C , más pesado, en función de las condiciones ambientales de disponibilidad hídrica, concentración de CO_2 atmosférico e irradiancia. Esta discriminación influye directamente en las concentraciones de $\delta^{13}\text{C}$ fijado tanto en el tejido de la planta como en el suelo, donde se archiva una huella isotópica cuantificable. Esta huella isotópica permite realizar inferencias sobre los escenarios atmosféricos del pasado que prevalecieron durante la vida de determinados organismos.

Las relaciones entre los organismos y los ambientes del pasado son estudiadas por la paleoecología a través del registro geológico en el tiempo, con la intención de reconstruir las interacciones ecológicas entre los organismos y los ecosistemas presentes en la Tierra durante diferentes épocas. Para este fin, se utilizan diversas técnicas o proxis para de obtención de datos

Plantas C3, C4 y CAM

Las plantas C3 se originaron durante el Mesozoico y el Paleozoico, antes que las plantas C4, y representan aproximadamente el 94.2% de la biomasa terrestre (Park y Epstein, 1960). La vía C3, también conocida como la vía de tres carbonos, es un proceso metabólico en el cual el CO_2 se fija directamente en el ciclo de Calvin, produciendo un compuesto de tres carbonos llamado 3-fosfoglicerato (Flanagan et al. 1996; Schubert y Jahren 2012).

Estas plantas pierden aproximadamente el 95% del agua que absorben debido a la transpiración, lo que las hace más adecuadas para zonas con luz solar moderada y temperaturas templadas, como el arroz y la cebada (Schubert y Jahren 2010). Sin embargo, en áreas secas, las plantas C3 cierran sus estomas para reducir la pérdida de agua, lo que limita la entrada de CO_2 y disminuye su concentración interna (Ghashghaie et al. 2003). Otros ejemplos de plantas C3 incluyen el trigo (*Triticum aestivum*), arroz (*Oryza sativa*), soja (*Glycine max*), papa (*Solanum tuberosum*) y la cebada (*Hordeum vulgare*).

Las plantas con metabolismo C4 están presentes en 18 familias de angiospermas, incluyendo muchas gramíneas, y representan una parte significativa de la biomasa mundial

(Flanagan et al. 1996). El metabolismo C4 involucra dos tipos de células en la fotosíntesis: las células de la vaina y las células del mesófilo, que trabajan conjuntamente para concentrar el CO₂ alrededor de la enzima RuBisCo, mejorando la eficiencia fotosintética (Farquhar, 1983). Esta vía permite una mayor eficiencia en la fijación del CO₂, especialmente en condiciones de alta irradiación y temperaturas elevadas, reduciendo la pérdida de agua por transpiración (Hubick et al. 1993). Ejemplos de plantas C4 incluyen maíz (*Zea mays*) - caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) - sorgo (*Sorghum bicolor*), mijo (*Pennisetum glaucum*) y amaranto (*Amaranthus* spp.).

Las plantas CAM, adaptadas a ambientes áridos, utilizan un mecanismo diferente conocido como metabolismo ácido de las crasuláceas. Estas plantas absorben CO₂ durante la noche y lo almacenan en forma de ácido málico en las vacuolas, liberándolo durante el día para su uso en el ciclo de Calvin (Chen y Chen, 2007). Esta adaptación permite a las plantas CAM cerrar sus estomas durante el día, reduciendo la pérdida de agua y permitiéndoles sobrevivir en condiciones extremas de sequía (O'Leary 1988). Ejemplos de plantas CAM incluyen la piña (*Ananas comosus*), cactáceas (familia Cactaceae), agave (*Agave* spp.), orquídeas epífitas (familia Orchidaceae) y bromelias (familia Bromeliaceae).

Fijación de carbono en suelos para la reconstrucción de paleoambiental.

Las diferencias en las fijaciones isotópicas entre los metabolismos de las plantas C3, C4 y CAM son utilizadas en estudios paleoecológicos para reconstruir los cambios ambientales del pasado (Kohn 2010). La huella isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ en los suelos fósiles permite inferir la proporción de plantas C3 y C4, proporcionando información sobre las condiciones atmosféricas y climáticas de épocas pasadas. Las variaciones en la composición isotópica del carbono en los tejidos vegetales están influenciadas por factores ambientales como la disponibilidad hídrica, la concentración de CO₂ y la irradiancia (Conrad et al. 2010; Conrad et al. 2011).

En condiciones de sequía, se ha observado que las estomas limitan la fotosíntesis, lo que disminuye la relación entre la presión parcial de CO₂ en el aire y la cámara subestomática (ci/ca) (O'Leary 1993). Esto genera un aumento en la $\delta^{13}\text{C}$ en plantas C3 y una disminución en las plantas C4 (O'Leary 1993). Similarmente, un aumento en el gradiente de presión parcial de vapor (dppV) aumenta la $\delta^{13}\text{C}$ en plantas C3 y, en algunos casos, disminuye la

$\delta^{13}\text{C}$ de plantas C4 (Farquhar et al. 1982). Se han encontrado relaciones significativas entre la $\delta^{13}\text{C}$ y diversos parámetros ambientales relacionados con la disponibilidad hídrica, como la precipitación o la evapotranspiración potencial (Hubick et al. 1993).

En resumen, la fijación de CO_2 durante la fotosíntesis, determinada en gran medida por la conducción estomática, deja una huella isotópica en los suelos fósiles diferenciable entre metabolismos C3 y C4 mediante la estimación de $\delta^{13}\text{C}$. Esta técnica ha demostrado ser un indicador útil para la reconstrucción de condiciones ambientales en el pasado, especialmente aquellas relacionadas con la disponibilidad hídrica (precipitación/transpiración).

Procedimiento de análisis $\delta^{13}\text{C}$.

Estos análisis se realizaron en el Laboratorio de Isótopos Estables del Departamento de Ciencias Geológicas de la Universidad de Florida. Para estos análisis, las muestras de sedimento se liofilizaron y trituraron. Se pesó 5 mg de cada muestra en cápsulas de estaño utilizando una balanza (Sartorius M500P), las cuales se colocaron en un analizador elemental (Carlo Erba NA1500 CNS) y se incineraron a 1240°C .

Posteriormente, los gases CO_2 y N_2 fueron separados de los gases de combustión e ingresaron a un espectrómetro de masas (VG PRISM II), donde se concentraron en una trampa criogénica. Tras el calentamiento, CO_2 y N_2 se analizaron en el espectrómetro de masas y se compararon con los estándares (Atropina, USGS40 y USGS41). Previo al análisis de $\delta^{13}\text{C}$, las muestras de sedimento se trataron con HCl (^1N) para remover la fracción inorgánica de carbono. Los resultados de $\delta^{13}\text{C}$ se expresaron en notación delta estándar en relación con VPDB (Vienna Peedee Belemnite).

Análisis isotópico de $\delta^{18}\text{O}$.

Los isótopos estables de oxígeno se han utilizado extensamente para estudiar los cambios a largo plazo en los regímenes de evaporación-precipitación. La suposición subyacente es que el agua que contiene $\delta^{16}\text{O}$, que es más ligera que el agua que contiene $\delta^{18}\text{O}$, se evapora más fácilmente. En consecuencia, el aumento en el enriquecimiento de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ indica un aumento en los desequilibrios negativos de evaporación-precipitación y condiciones más secas, porque la lluvia es insuficiente para reponer el ^{16}O .

Por el contrario, el agotamiento creciente de $\delta^{18}\text{O}$ indica un exceso de precipitación sobre la evaporación. Sin embargo, la recuperación y la interpretación de $\delta^{18}\text{O}$ es complicada porque generalmente no se recupera agua antigua en el muestreo lacustre. Por lo tanto, los isótopos de oxígeno deben medirse indirectamente. Un método común y altamente exitoso implica el uso de carbonatos bentónicos excretados por organismos, como los ostrácodos (Curtis et al. 1999).

Es importante señalar que, aunque los valores de $\delta^{18}\text{O}$ deberían ser iguales entre el agua y estos organismos, dos factores intervienen. Estos incluyen los efectos vitales, lo que significa que hay diferencias específicas de la especie en la discriminación entre la captación de ^{16}O y ^{18}O durante la producción de conchas (Cohen, 2003). Además, estos organismos son sensibles a las condiciones del agua, como la temperatura, el pH, la salinidad, el redox y los nutrientes, por lo que las condiciones limnológicas cambiantes pueden afectar la presencia de especies específicas a lo largo del tiempo, haciendo que los efectos vitales sean un problema importante. El otro factor que afecta a $\delta^{18}\text{O}$ es la infiltración de aguas subterráneas con valores distintivos de $\delta^{18}\text{O}$. Tal infusión podría alterar las condiciones bentónicas, haciéndolas diferentes de las condiciones en el epilimnion (Cohen 2003).

Procedimiento de análisis $\delta^{18}\text{O}$.

Este análisis se realizó a partir de muestreo e identificación de ostrácodos presentes en el sedimento, contando así de dos partes: 1.- la primera que incluye la obtención e identificación taxonómica de las especies y 2.- el análisis de isótopos de ^{16}O y ^{18}O (así como $\delta^{13}\text{C}$ en los ostrácodos). Para la obtención de las muestras, tomamos de cada tramo de la secuencia sedimentaria un submuestreo 2g de sedimento. Esta muestra se tamizó para eliminar arcillas y limos. De los ostrácodos fósiles extraídos se contaron adultos y juveniles, rotos e intactos y se colocaron en microplacas paleontológicas para su posterior identificación. La identificación taxonómica de las especies de ostrácodos se realizó con base en Ahyong et al. 2011. La identificación fósil se basó en características como la morfología del caparazón, tamaño, forma, ornamentación, cicatrices musculares y charnelas. Se extrajeron tanto valvas y caparazones de organismos adultos (15 a 20 organismos) de las especies presentes en el registro sedimentario.

Se realizó una técnica de limpieza la cual consistió en sumergir las valvas en peróxido de hidrógeno (H₂O₂) al 15% durante 15 minutos, posteriormente se enjuaga con agua destilada, y se hace otro segundo enjuague con metanol, finalmente las valvas se dejan secar al horno a 50°C durante 12hr en cajas Petri de vidrio, previamente identificadas. Las muestras se almacenaron en tubos Eppendorf de 0.5ml para su posterior análisis de isótopos estables. La metodología utilizada para dicho análisis se encuentra en Curtis et al. (1998).

Métodos cuantitativos

Análisis de componente principales (PCA).

El Análisis de Componentes Principales (PCA, por sus siglas en inglés) es una técnica estadística multivariante utilizada para reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos mientras se conserva la mayor cantidad de variabilidad posible. Este método transforma las variables originales correlacionadas en un nuevo conjunto de variables no correlacionadas denominadas componentes principales, ordenadas de tal manera que la primera componente retiene la mayor variabilidad del sistema, seguida por la segunda, y así sucesivamente (Jolliffe, 2002).

El PCA se utiliza para la simplificación de datos, la identificación de patrones subyacentes y la visualización de datos complejos en espacios de menor dimensión (Jolliffe y Cadima, 2016) y evaluar las relaciones entre diferentes variables ambientales (Ringnér, 2008; Legendre y Legendre, 2012). Los vectores propios determinan la dirección de las componentes principales, mientras que los valores propios indicarán la cantidad de varianza explicada por cada componente (Abdi y Williams, 2010). Esta técnica se utiliza para mitigar la colinealidad entre variables y facilitar la interpretación de los datos en estudios exploratorios de los datos (Shlens, 2014).

Métodos históricos

La investigación histórica plantea un enfoque que considera las transformaciones del entorno, el impacto de la ocupación humana y el proceso de construcción sociocultural del espacio. Lo anterior implica establecer un diálogo sincrónico y diacrónico con los postulados de la historia regional y, asimismo, con otras disciplinas, tales como la arqueología y la antropología.

Nuestro objetivo será hilvanar a través de una perspectiva de larga duración los procesos de cambio estableciendo los elementos diacríticos de que marcaron sus distintos puntos de inflexión a través del tiempo, implica, en términos metodológicos, desentrañar su especificidad cronológica. Debido a ello, es menester reconocer las directrices de análisis a partir de sus rasgos espaciales y temporales.

En términos geográficos, Yalahau conforma un espacio que denota múltiples patrones de asentamiento, producción, desplazamiento y aprovechamiento del entorno. Es decir, que debido a sus características este emplazamiento (y sus alrededores), conceptualmente puede concebirse como una microregión. Lo anterior significa, en términos de una ecología histórica cuya dinámica se imbrica en forma inexorable a distintos ritmos de mutabilidad a lo largo del tiempo, considerar la intensidad de las relaciones humanas, así como su correlación con la antropización del ambiente a partir de los elementos culturales y los procesos sociales.

Para emprender metodológicamente el análisis de una microregión en el transcurso de las centurias, es necesario esclarecer la amplitud del marco temporal donde sus acontecimientos cobran vigencia. De este modo, es posible establecer como punto de partida el momento del contacto entre el Viejo y el Nuevo Mundo. En este orden de ideas, la primera mitad del s. XVI conforma un *momentum* particular donde surgen los grandes cambios que trastocan la organización sociopolítica, los elementos culturales, la organización del espacio y el ordenamiento ecológico de los pueblos mesoamericanos.

La irrupción de los antiguos territorios y el posterior establecimiento del sistema colonial dejó una huella documental indeleble. Estos registros permiten esclarecer en forma pormenorizada la construcción eco histórica de una microregión, en este caso Yalahau, a través de sus actores sociales. Dicha tarea conlleva al reconocimiento de sus matices históricos a partir de la compilación, transcripción y análisis de fuentes documentales provenientes de diferentes repositorios (archivos y bibliotecas especializadas). De este modo, resulta plausible esbozar hasta donde los recursos de información lo permitan, una etnografía histórica identificando sus distintos elementos: culturales, ecológicos, espaciales, demográficos y sociopolíticos, mismos que cobran vigencia al interior de un complejo engranaje de dominación y asimetría social que perduró hasta el ocaso del régimen colonial.

V. Estudio de Caso – ANP-PELY

Justificación del Caso

El ANP-PELY presenta condiciones excepcionales, tanto historias como ecológicas, para el desarrollo de este proyecto. Dentro del polígono de protección del parque se encuentra la Laguna de Yalahau, el mayor cuerpo de agua dulce del Estado de Yucatán, así como, una gran cantidad de cenotes, aguadas y zonas de humedales, de donde recolectamos muestras para análisis paleoecológicos⁷. Esto además anticipa una relevante relación entre el lugar, las etapas de poblamiento y la disposición del recurso hídrico, especialmente en uno de los períodos focales del estudio durante el clásico terminal (750-950 d.C.).

En este mismo sentido, en el ANP-PELY existe evidencia arqueológica e histórica de una sucesión de etapa de ocupación/abandono, donde se ejemplifican cinco momentos históricos identificados como claves en la transformación cultural de la Península de Yucatán: *a.- período prehispánico*, comprendido al menos desde el período Clásico, al período Postclásico (250-1450 d.C.), *b.-período colonial*, establecido a partir del régimen de encomiendas instituidas entre 1549 y 1725, *c.-período histórico*, entre 1850 y 1940, principalmente durante el apogeo del henequén en la Península de Yucatán. Para finales de la década de 1990s, se decreta la zona del ANP-PELY y 2007 el sitio es declarado como “Humedales de Importancia Internacional” RAMSAR, poniendo atención en las políticas ecológicas de conservación implementadas, por lo que los desarrollos a gran escala en la zona se han detenido desde mediados del s. XX.

Antecedentes y caracterización del Área de Estudio

El ANP-PELY se encuentra en el sureste de la República Mexicana, en el Estado de Yucatán, en los municipios de Homún, Huhí, Tekit y Sotuta. Se localiza a aproximadamente 13 km al sureste del pueblo de Homún. Las principales vías de acceso son la carretera estatal Mérida-Mayapán con desviación a Acanceh-Homún (15 km) y un desvío Homún-Yalahau (13 km), por camino blanco. El Parque Estatal “Lagunas de Yalahau” se localiza en la porción

⁷ En esta sección del parque se encuentra el rancho y la aguada de Yalahau, de donde recibe el nombre el ANP. El nombre de Yalahau sido traducido como *u há* “su aguada de él o de ella”, *ahaw* “soberano, señor o gobernante” siendo “donde el agua del señor o agua del señor” (Dahlin 1990).

central del Estado de Yucatán, México. Abarca una superficie de 5,683.28 hectáreas, con un perímetro de 28.14 Km, abarcando terrenos de tres municipios de la zona productora de henequén (Homún, Huhí y Tekit) y un municipio de la zona productora de maíz (Sotuta). El proyecto de investigación Parque Estatal Lagunas de Yalahau (PELY), se desarrolla en la zona norte del parque, donde se encuentran varios cenotes (perteneciente al municipio de Homún), así como algunas áreas del sur (pertenecientes al municipio de Tekit).

El clima de esta región es tropical seco-húmedo (Aw), según Holdridge (1967) El parque recibe un promedio de entre 1000 y 1500 mm de precipitación anualmente (cf. Schmitter-Soto et al. 2002). La temperatura media anual es de 26.1°C y varía a lo largo del año con mínimas alrededor de 5°C en enero y máximas que alcanzan los 42.5°C en mayo y principios de junio (Schmitter-Soto et al. 2002). Debido a su posición relativamente al norte y la presencia del Golfo de México al Oeste y Norte y el Caribe al Este, la región experimenta tres estaciones: 1) una temporada muy seca desde mediados/finales de marzo hasta mediados de junio; 2) un periodo típico de monzón tropical desde mediados de junio hasta finales de noviembre; y 3) una temporada de nortes desde finales de noviembre hasta mediados/finales de marzo, en la que los frentes fríos de Canadá/EEUU colisionan con aire tropical cálido causando descensos de temperatura y lluvias frías (Schmitter-Soto et al. 2002) (Figura 3).

La Península de Yucatán del Norte es parte de una enorme plataforma que se formó bajo el Golfo de México y que ha estado expuesta gradualmente por el retroceso del nivel del mar desde al menos el Plioceno (Schmitter-Soto et al. 2002). En consecuencia, el agua superficial generalmente está ausente. Esto se debe a que la lluvia se mezcla con CO₂ en los suelos, liberado por la descomposición de materia orgánica, para crear ácido carbónico que erosiona fácilmente la roca caliza subyacente, creando agujeros y fisuras que permiten la rápida infiltración del agua en el acuífero (Schmitter-Soto et al. 2002). Como resultado, el acuífero kárstico no confinado de Yucatán (Schmitter-Soto et al. 2002) es uno de los cuerpos de agua subterráneos más grandes del mundo.

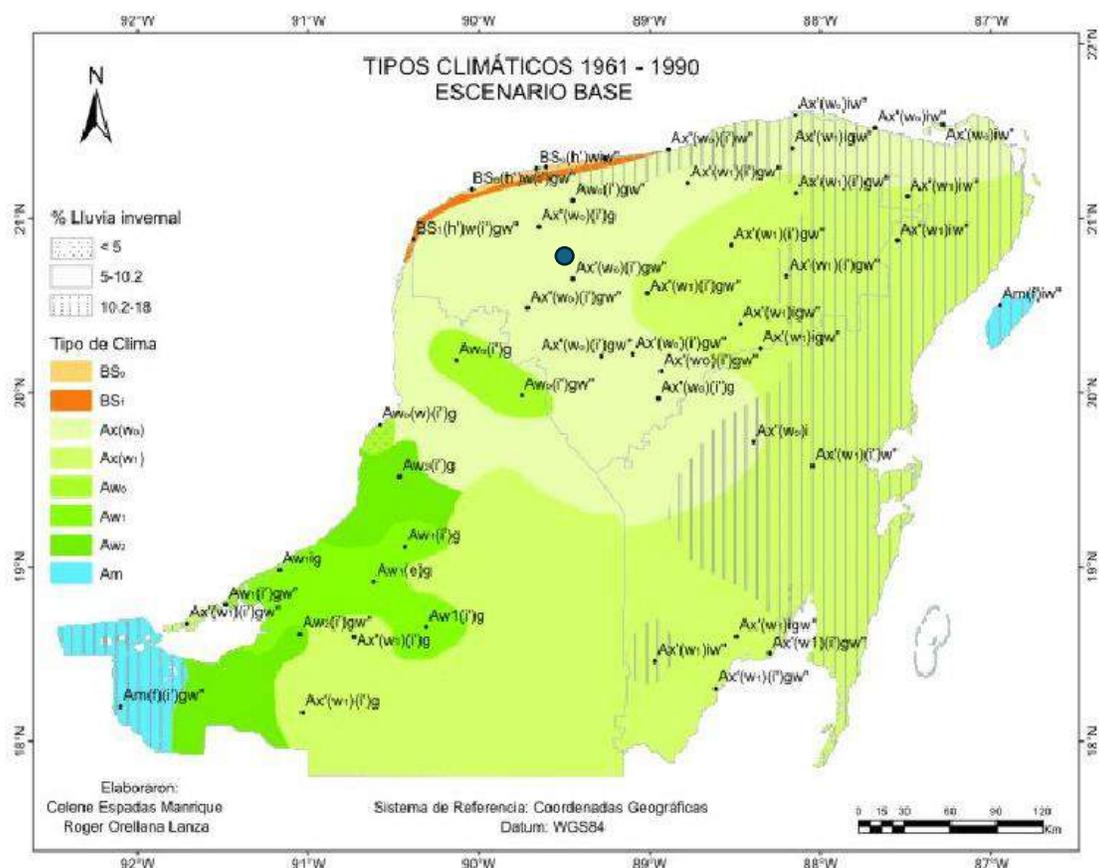


Figura 3: Mapa climático de la península de Yucatán, según Holdridge (1967)
● Sitio de estudio.

La región maya del norte se caracteriza por una geología distintiva que ha influido significativamente en el desarrollo cultural y ecológico de sus habitantes. Esta plataforma, compuesta esencialmente de rocas sedimentarias, se formó en un antiguo mar poco profundo. A lo largo de millones de años, los movimientos tectónicos y los cambios en el nivel del mar moldearon la topografía actual (Ford y Williams 2007).

La península de Yucatán, una de las áreas más representativas de las tierras mayas, se caracteriza por su geología predominantemente calcárea. Formada durante el Mesozoico, la península está compuesta principalmente de piedra caliza, una roca sedimentaria originada a partir de los restos compactados de organismos marinos. La península es relativamente plana, con una topografía suave, interrumpida ocasionalmente por colinas bajas conocidas como "cerros" y depresiones. La formación geológica de la península, como veremos, ha sido

influenciada por la elevación tectónica y la disolución de la caliza, procesos que han dado lugar a una característica topográfica notable: el karst (Perry et al. 2009; Perry et al. 2021).

Un karst es un tipo de paisaje formado por la disolución de rocas solubles, como la piedra caliza, el yeso y la dolomita. Este proceso de disolución, causado principalmente por la acción del agua de lluvia ligeramente ácida, crea una serie de características distintivas, incluyendo cuevas, dolinas (depresiones o sumideros), ríos subterráneos y cenotes (Stringfield y LeGrand 1976). En la península de Yucatán, el karst es especialmente notable debido a la ausencia de ríos superficiales permanentes, ya que la mayoría del drenaje ocurre a través de sistemas subterráneos. Los cenotes, pozos naturales resultantes del colapso de techos de cuevas inundadas, son una característica destacada del karst y tienen una importancia cultural y ceremonial significativa para los mayas.

La geología kárstica de la península de Yucatán ha tenido un impacto profundo en la cultura maya. Los cenotes no solo proporcionaron una fuente vital de agua dulce en una región donde los cuerpos de agua superficiales son prácticamente inexistentes, sino que también jugaron un papel central en la cosmología y la religión maya. Además, la disponibilidad de materiales de construcción como la piedra caliza permitió el desarrollo de técnicas avanzadas de arquitectura y construcción, evidentes en las impresionantes ciudades y templos mayas (Weidie 1985).

Al igual que en otras regiones kársticas del mundo, en Yucatán, los lagos se forman por la disolución de la roca madre de carbonato de calcio. En términos generales, el ácido carbónico⁸ ha erosionado lentamente la roca kárstica, transformándola en un “queso suizo” de cavernas subterráneas llenas de agua, grietas y fisuras. Los techos de estas cavernas eventualmente colapsan, creando dolinas inundadas conocidas localmente como cenotes. Sin embargo, en términos limnológicos, los cenotes son lagos de disolución⁹ (Cohen 2003; Schmitter-Soto et al. 2002).

A primera vista, puede parecer extraño que elijamos esta región para una investigación paleolimnológica. Sin embargo, una consideración más cercana de la geología de la península indica que las depresiones llenas de agua, según la definición propuesta por Cohen (2003), están densamente distribuidas por la región. Al igual que otras regiones

⁸ En este proceso, la lluvia se mezcla con la materia orgánica en la superficie y la descomposición de materia forma CO₂, a su vez, el agua absorbe el CO₂ para formar ácido carbónico.

⁹ En términos generales, un lago se refiere a depresiones topográficas que están llenas de agua (Cohen 2003).

kársticas en todo el mundo, en Yucatán, los lagos se forman a través de la disolución de la roca caliza. En términos generales, el ácido carbónico ha erosionado lentamente la roca kárstica en un queso suizo de cavernas subterráneas llenas de agua, grietas y fisuras. Los techos de estas cavernas eventualmente colapsan, creando dolinas inundadas conocidas localmente como cenotes. Sin embargo, en términos limnológicos, los cenotes son lagos de disolución (Cohen 2003; Schmitter-Soto et al. 2002).

La región de estudio presenta una topografía relativamente plana, sin flujos de agua superficial (ríos, arroyos, etc.) y con una alta densidad de cenotes a pequeña escala, con cuencas hidrográficas muy pequeñas y poco relieve dentro de ellas, esto significa que, proporcionan archivos de sedimentos mucho más localizados que otros tipos de lagos, siendo mucho más lenta la depositación si se compara con la de lagos más grandes (cf. Cohen 2003). Otra particularidad que distingue a los cenotes como características paleolimnológicas es su posición intermedia entre lagos de cuenca cerrada y abierta, es decir, son como lagos de cuenca cerrada porque no son alimentados por ríos, por lo que los aportes provienen de la precipitación directa y el escurrimiento muy localizado, y son como lagos de cuenca abierta porque la roca kárstica de la región permite flujos de agua subterránea a través de los cenotes (Schmitter-Soto et al. 2002).

Es importante destacar que la mayoría de los cenotes tienen entradas muy restringidas (de unos pocos metros a no más de 100 m) (Schmitter-Soto et al. 2002) y las superficies del agua pueden estar a hasta 15 metros o más por debajo de la abertura de la caverna, lo que los mantiene altamente protegidos de los vientos. Sin embargo, algunos tienen aperturas mucho más grandes con niveles de agua cerca de la superficie, lo que los hace parecer lagos de disolución comunes.

Los cenotes se clasifican en dos tipos principales según el flujo de agua subterránea, lóticos y lénticos (Schmitter-Soto et al. 2002). En los cenotes lóticos, el agua que fluye a través de grietas y fisuras en la roca madre, así como a través de la permeación de la matriz rocosa, entra y sale de los cenotes como parte del flujo general del acuífero de Yucatán desde el interior hasta el Golfo y el Caribe (Schmitter-Soto et al. 2002). Durante la época de lluvias, los flujos alcanzan aproximadamente 1-3 mm/seg., por lo que, el tiempo de residencia es corto (Schmitter-Soto et al. 2002). Sin embargo, durante la temporada seca, se ralentizan

hasta condiciones casi lénticas. En consecuencia, durante el ciclo estacional, los niveles de agua oscilan mucho, al igual que en los lagos de cuencas cerradas.

Al igual que en los lagos tropicales poco profundos, las aguadas y los cenotes lóticos son polimícticos, que se refiere a cuerpos de agua que se mezclan completamente varias veces al año debido a cambios en la temperatura y/o el viento. En los cuerpos de agua polimícticos, la estratificación térmica, que es la formación de capas de diferentes temperaturas, no es permanente (Likens 2010). En lugar de mantener capas de agua cálida en la superficie y agua fría en el fondo durante largos períodos, estos cuerpos de agua se mezclan con frecuencia, homogeneizando la temperatura y la composición química en toda su columna de agua, experimentando estratificación térmica periódica durante las temporadas seca y de lluvias, que pueden durar desde unas pocas horas hasta varios días (Schmitter-Soto et al. 2002).

Durante la temporada de nortes, ocurre la mezcla completa de la columna de agua, por lo tanto, durante un ciclo estacional típico, no tienden a establecerse condiciones anóxicas en el fondo, ni eutrofización. Estos cenotes tienen agua clara, fondos de arena y columnas de agua bien mezcladas y oxigenadas (Wetzel 2001). La temperatura, así como la acidez ($\text{pH} < 7$), son bastante constantes en los cenotes lóticos (Schmitter-Soto et al. 2002). Como resultado, la bioturbación reduce la resolución del archivo de sedimentos en comparación con los cenotes lénticos (cf. Cohen 2003; 2009). Este fenómeno es particularmente relevante durante sequías severas, cuando los cenotes lóticos pueden potencialmente empezar a funcionar como cenotes lénticos, lo que lleva a condiciones de anoxia (Perry et al. 2009). Además, como veremos más adelante, las terrazas en la región de Yalahau reducen el flujo de agua hacia las aguadas, que, de manera general, no están conectadas al manto freático y son poco profundas, haciéndolas más susceptibles a la anoxia y la eutrofización natural (Beach et al. 2002).

Por su parte, las zonas de humedales en el área maya del norte, particularmente en la península de Yucatán, son ecosistemas cruciales tanto para la biodiversidad como para la subsistencia humana. Estos humedales, que incluyen los llamados bajos y áreas inundables alrededor de las aguadas y cenotes desbordados, han jugado un papel vital en la ecología y la subsistencia de los mayas (Fedick et al. 2000). Las investigaciones recientes en humedales han proporcionado una mejor comprensión de cómo los mayas interactuaron con estos ecosistemas (Dunning et al. 1997).

Los humedales en la península de Yucatán se caracterizan por su capacidad para retener agua en un entorno predominantemente kárstico. Las aguadas, depresiones naturales que retienen agua de lluvia, se convierten en lagunas estacionales que fueron esenciales para el almacenamiento de agua en tiempos de sequía. Estas aguadas, bajos y humedales fueron y son particularmente importantes en el norte de Yucatán, donde como mencionamos, los cuerpos de agua superficiales son escasos debido a la alta permeabilidad del suelo calcáreo (Beach et al. 2002).

Caracterización topográfica y valores hídricos del ANP-PELY.

El Parque está situado en la zona fisiográfica de “Llanuras onduladas con montículos y hondonadas someras”. Esta zona se caracteriza por su configuración general de terrenos ondulados y se distingue de otras por presentar un patrón topográfico constituido por una serie de montículos rocosos separados unos de otros, alternando con planicies más o menos extensas, dentro de las que aparecen ocasionalmente hondonadas por lo regular someras. Al igual que toda la región que comprende el Estado de Yucatán, se caracteriza por la relativa uniformidad que presenta el estrato geológico, en forma particular el manto rocoso más superficial, presentando calizas consolidadas formadas a partir de materiales conchíferos correspondientes a la formación Chichén Itzá (Pisté), depositados durante el Terciario Inferior (Eoceno). En esta zona fisiográfica la combinación de materiales geológicos de edad eocénica, la altitud de los terrenos cercana a los 30 msnm y la dominancia de climas cálido-subhúmedos, han propiciado la conformación de un patrón topográfico contrastado, con el cual se encuentran unidas las variaciones edáficas más evidentes (POETY 2006).

La región del Parque Estatal está constituida por rocas carbonatadas, cuya edad oscila decreciente al terciario, con un máximo de espesor de aproximadamente 1,000 m, con una estratificación horizontal y sub-horizontal. Las unidades cuaternarias son representadas por coquinas (calizas), estando el acuífero formado por rocas carbonatadas del Mio-plioceno y Eoceno (POETY 2006).

La península de Yucatán forma parte de la plataforma calcárea más grande existente en la actualidad. En virtud de la topografía suave que la caracteriza y la alta permeabilidad del terreno, las aguas pluviales tienden a infiltrarse. Las rocas más jóvenes se encuentran en aproximación con la línea costera y las rocas de edad vieja se encuentran en la parte central

y sur de la Península. Las rocas aflorantes más antiguas son las calizas y evaporitas del Paleoceno-Eoceno indiferenciado. Éstas se localizan en la porción sur, donde están rodeadas por depósitos calcáreos más recientes, con edades que oscilan entre el Oligoceno y el Reciente. Las calizas que ocupan gran superficie y de mejores características acuíferas son las del Eoceno y Mio-Plioceno, con una transición de edades geológicas y climáticas.

Esta condición, aunada a la escasa pendiente topográfica del terreno favorece que la mayor parte del escurrimiento en la zona sea mínima, por lo que menos del 5% de la lluvia escurre o se acumula superficialmente (Programa de Manejo del Área Natural Protegida 2004). Por esta razón la hidrología superficial, como ya se ha mencionado es efímera y, sobre todo, dependiente de la dinámica de las aguas subterráneas. Aún en los múltiples acuíferos, con exposición a cielo abierto, principalmente cenotes y aguadas, que se pueden encontrar en la zona, no son otra cosa que resurgimientos del propio manto freático a causa de depresiones que interceptan su nivel, o de hundimientos de las bóvedas de lo que fueron recintos ocupados por antiguos acuíferos subterráneos (POETY 2006). El movimiento del agua en el subsuelo se realiza por medio de infiltraciones capilares a través de los materiales calcáreos más porosos del subsuelo, o mediante corrientes que se desarrollan dentro de conductos cavernosos y oquedades que se conectan unos con otros para formar un complejo sistema hidrológico subterráneo. Esto ofrece la oportunidad de recolectar núcleos sedimentarios del centro del Estado de Yucatán, una zona con formaciones ideales para la recolección de muestras paleoecológicas (v.g., aguadas/cenotes), y sin estudios paleoambientales sólidos hasta el momento (Figura 4).

En el ANP-PELY se encuentran gran cantidad de cuerpos de agua denominados cenotes y lagunas (Programa de Manejo del Área Natural Protegida 2004). Geológicamente, se clasifican en dos tipos de lagos: los que tienen comunicación con el manto freático (cenotes) y los que forman sobre suelos impermeables que no comunican directamente con el acuífero (aguadas). Los registros que se encuentran en el inventario de cenotes de la Secretaría de Ecología indican que en los cuatro municipios que abarca el ANP existen 203 cenotes (POETY 2006). De acuerdo al censo de Cenotes y Grutas de Yucatán realizado por la Secretaría de Ecología del Gobierno del Estado de Yucatán, se tienen registrados para el municipio de Homún 32 cenotes abiertos, 28 cenotes semiabiertos, 37 cenotes cerrados y cinco grutas; el municipio de Huhí cuenta con ocho cenotes abiertos y ocho cenotes cerrados; el municipio de Tekit con 15 cenotes abiertos, 10 cenotes semiabiertos y tres cenotes

cerrados; y el municipio de Sotuta con 13 cenotes abiertos, siete cenotes semiabiertos, 11 cenotes cerrados y cinco grutas. Por el número de cenotes que presenta el sitio en los municipios involucrados en el ANP, se fundamenta su inclusión en la subregión denominada “Anillo de Cenotes” (Programa de Manejo del Área Natural Protegida 2004).

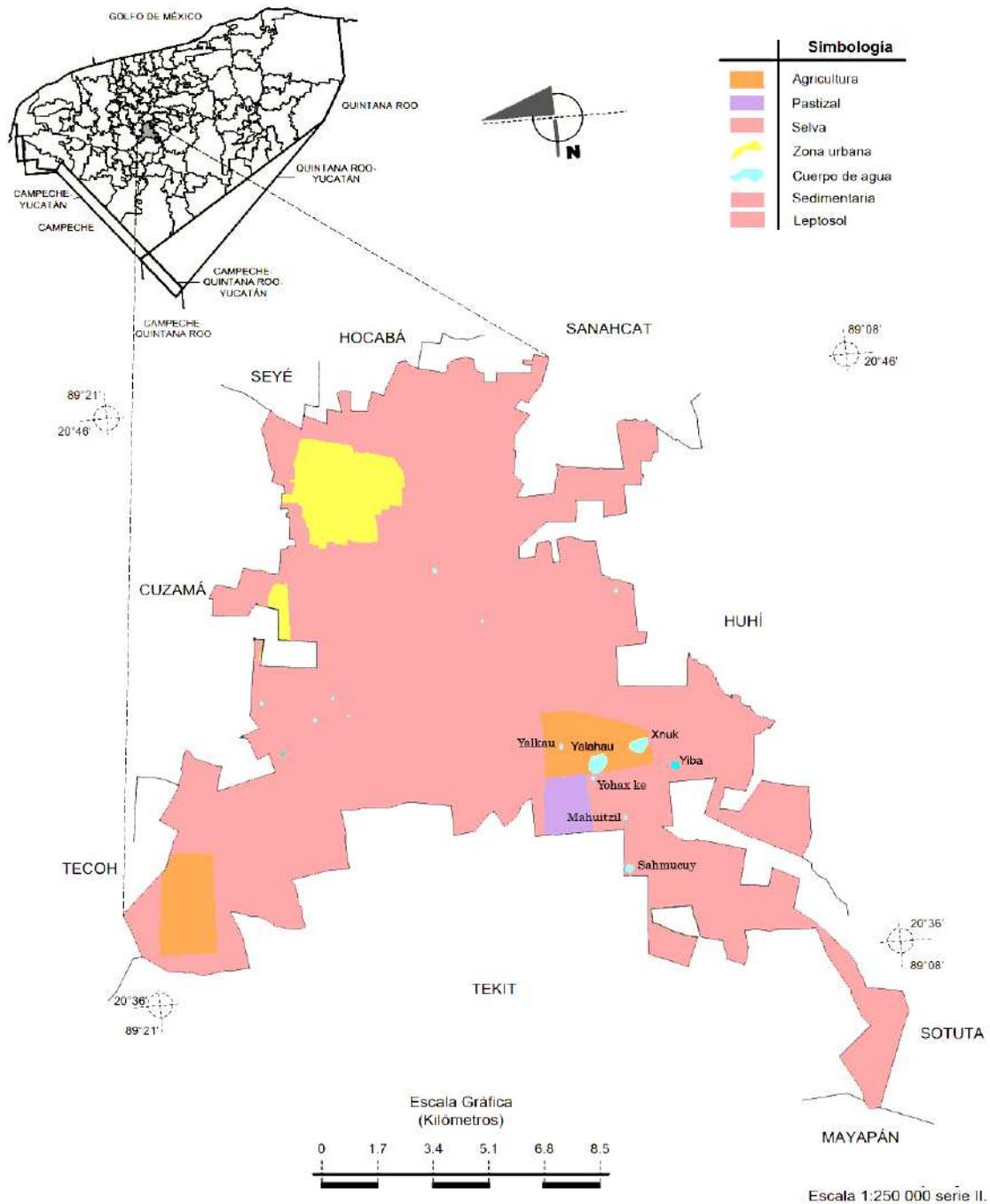


Figura 4: ANP-PELY. Caracterización del entorno ecológico. Tomado y modificado del Plan de Manejo (INEGI 2005).

Antecedentes arqueológicos e históricos de ANP-PELY

El sitio arqueológico Parque Estatal Lagunas de Yalahau

En cuanto al asentamiento o al menos lo que se cree es el núcleo o centro del asentamiento prehispánico, este se localiza en el costado oeste de la aguada de Yalahau y fue reportado en primera ocasión por Garza y Kurjak (1980)¹⁰. Posteriormente, en 1990, como parte del proyecto “*Reconstrucción del Ambiente Holoceno en una Planicie Kárstica, Yucatán, México*”, Dahlin (1990)¹¹ toma muestras de sedimentos de las aguadas, recoleta tiosos cerámicos de superficie y establece una primera propuesta sobre la ocupación, desde el período pre Clásico tardío (c. 300 a.C. – 300 d.C.), hasta el período Postclásico (1100 d.C. - ¿?). Finalmente, en 1999, se realizó el “*Proyecto Arqueológico Yalahau*” de INAH, dirigido por él Dr. Fernando Robles Castellano. Durante este proyecto, se llevó a cabo el levantamiento y mapeo de la sección oeste de la aguada de Yalahau, proponiendo un posible núcleo del sitio integrado por las denominadas plazas A y B (Cantero y Robles 2002) (este núcleo corresponde con nuestra zona denominada como grupo A – véase abajo). También, se recolecto material de superficie (cerámica y lítica) con la cual se determinó que, al igual que muchos otros sitios del área Puuc, este tuvo un momento de apogeo en su ocupación hacia el período Clásico tardío/terminal (Cantero y Robles 2002).

Hasta el momento, el asentamiento ha sido descrito como un sitio de tercer rango con influencia arquitectónica del estilo Puuc y una interacción regional limitada. Durante el periodo clásico Tardío/Terminal (750 d.C. – 1000 d.C.), el sitio experimentó una fase significativa de expansión y crecimiento. Esta expansión se evidenció tanto en el desarrollo arquitectónico como en la cerámica pizarra de alta calidad recolectada en la superficie.

Este periodo de florecimiento coincidió con una época de apogeo para muchos asentamientos y ciudades mayas en las tierras bajas del norte. Además, marcó una transición hacia un nuevo orden social durante el periodo postclásico, observable en sitios como Mayapán y la Costa Oriental (Sharer 2006; Aimers 2007).

¹⁰ El asentamiento es reportado en el “*Atlas Arqueológico del estado de Yucatán*” como un asentamiento de 3er rango (Garza y Kurjak 1980).

¹¹ Dr., Bruce Dahlin (1990) realiza algunas exploraciones en la zona en la década de los 80’ y toma muestras de los cuerpos de agua como parte del proyecto “*Reconstrucción del Ambiente Holoceno en una Planicie Kárstica, Yucatán, México*”, enfocado en la reconstrucción de procesos paleo ambientales en la región.

Devenir histórico-colonial del ANP-PELY

Al momento de la irrupción hispana, Yalahau denotaba características limítrofes muy diferentes a las que muestra hoy en día. Al respecto, se sabe que, durante el Posclásico Tardío, justo después de la fragmentación de los territorios mayas en la península de Yucatán (acaecida entre 1440 y 1460 d.C.), mismos que dieron paso a la conformación de los últimos señoríos mayas identificados por Roys (1957) y Chamberlain (1974), Yalahau formaba parte del territorio o *cuchcabal* de Hocabá.

Al respecto, es posible aludir que la prevalencia del andamiaje sociopolítico registrado por los amanuenses franciscanos en el transcurso del siglo XVI, según lo indican las fuentes documentales, guarda una estrecha relación con los acontecimientos suscitados en la segunda mitad del siglo X. Este *momentum*, se entrelaza con la penetración de grupos mesoamericanos procedentes del Altiplano Central de México y Guatemala hacia la península de Yucatán, hechos que asimismo se constatan en las fuentes indígenas denominadas libros del *Chilam Balam* (Quezada 1993: 21-23). En aquel entonces, los *itzaes* conquistaron *Chichén Itzá*, fijando ahí su centro político-administrativo, caso similar a lo que aconteció con los *Xiu* en *Uxmal* y los *Cocom* en *Mayapán* (Villagutierre 1701; Quezada 1993; 2001).

Al respecto, los estudios de Sergio Quezada (1993) indican que dichos señoríos gobernaron por casi dos siglos (987 d C.-1185 d C.), dando paso al resurgimiento de estos importantes emplazamientos político-administrativos que fungieron como ejes rectores de la vida política y ceremonial entre los mayas yucatecos (Figura 5). Lo anterior, también implicó la redefinición territorial de estos sitios y sus áreas de influencia. Se ha mencionado en este sentido que existió una presunta alianza entre esta triada de entidades político-territoriales encabezada por Mayapán, sin embargo, tal especulación se desdibuja al contrastarse con la evidencia arqueológica y las fuentes documentales primarias (Quezada, 1993: 25-31). Lo que sí es posible inferir, es un dominio intermitente de estos sitios marcado por momentos de alianzas estratégicas, periodos de conciliación y respectiva animadversión (*cf.* Baudez 2004; Chamberlain 1974).

A mediados del s. XI *Chichén Itzá* se perfiló como un sitio de primer orden, aunado a la expansión de sus dominios. Si bien existen divergencias concernientes a qué tanto se extendían la influencia de este emplazamiento, ya que, por un lado, las fuentes históricas

indican que lograron una hegemonía en la porción septentrional de Chiapas y Guatemala, e incluso, que su dominio prevaleció hasta la zona de Tabasco y las Hibueras (Honduras). Por su parte, las fuentes arqueológicas indican que su área de hegemonía resultó mucho más limitada, abarcando los territorios que van desde *Yaxuná* hasta posiblemente *Cobá*, en la Costa Oriental (Quezada 1993: 25-31). Lo cierto es que, a todas luces, se advierte una evidente y vertiginosa expansión de Chichén Itzá, es decir, su hegemonía incuestionable con relación a su preeminencia militar y comercial. También es probable que esto haya implicado subordinación por parte de los gobernantes de *Uxmal* y *Mayapán* (Thompson 1964).

No fue hasta mediados del siglo XIII que las diferencias entre *Hunac Ceel* y *Chac Xib Chac*, gobernantes de *Mayapan* y *Chichén Itzá* respectivamente, desembocaron en un intrincado periodo de pugnas internas que dieron como resultado el declive de este último sitio, mismo que perduró hasta las postrimerías de esta misma centuria (Quezada, 1993). Paralelamente, comenzó a percibirse en el horizonte peninsular la consolidación de una nueva capital que inexorablemente derivó en la redefinición espacial de los asentamientos aunada a los cambios sociopolíticos impuestos por las élites gobernantes emergentes.

En términos políticos y administrativos el auge de Mayapán permite esclarecer la transición hacia los gobiernos de linajes compartidos o *multepales* (Baudez 2004). Es decir, a diferencia de lo que anteriormente había ocurrido durante el auge de *Chichén Itzá*, la atomización de las unidades políticas ya no descansaba en una única figura que aglutinaba el poder, más bien, éste podía distribuirse en varios linajes principales cuyas parcialidades coexistían al interior de una misma entidad (Caso y Aliphath 2002). Así, en Mayapán, sitio donde anteriormente gobernaban los descendientes del linaje *Cocom*, residieron los herederos de los linajes *Xiu*, *Chel*, *Tzeh*, *Canul*, *Cupul*, y muy probablemente los *Iuit*, *Pech* y *Cochuah* (Quezada 1993; Saucedo 2014).

A mediados del siglo XV, las disputas entre las parcialidades de los linajes *Xiu* y *Cocom* propiciaron la decadencia y posterior destrucción de *Mayapán*, propiciando la disolución del gobierno confederado o *multepal* provocando la dispersión de sus pobladores hacia diferentes sitios de la península. Esta diáspora, evidentemente modificó el patrón de asentamiento de los linajes principales dando paso al surgimiento de pequeñas unidades residenciales basadas en la filiación y parentesco, cuya toponimia fue identificada por las

huestes hispanas encabezadas por los Montejo y sus tardías expediciones de conquistas que se extendieron por más de tres lustros.

La correlación entre el lugar de residencia y el ámbito territorial de competencia gobernado por los señores o principales de acuerdo con la potestad del linaje en turno se denominó entonces *cuchcabal*, entidad denominada provincia en años posteriores por los conquistadores hispanos (Quezada 1993). En su interior, se ubicada la localidad o sede donde se encontraba la institución político-religiosa más importante, es decir, la cabecera del *cuchcabal*, que concentraba gran parte del núcleo poblacional, regulaba las actividades mercantiles y religiosas, así como los menesteres de la tributación y el trabajo rotativo de carácter compulsivo (Saucedo 2014).

Las cabeceras de las entidades político-territoriales de carácter autónomo prevalentes al momento de la irrupción hispana en la península fueron las siguientes: Calkiní, Chancénote, Chichén Itzá (remanentes dispersos de población en el área de Pisté), Maní, Motul, Sací, Tecoh, Dzizantún, Tihosuco, Tibilón, Sotuta y Hocabá (Figura 5). Cada una de estas jurisdicciones se encontraba gobernada por una *halach uinic* (autoridad que encarnaba funciones civiles, administrativa y religiosas) que residía en la cabecera de la demarcación, mientras el ordenamiento de las poblaciones sujetas recaía en los hombros de los *batabes* auxiliado por un consejo de ancianos representantes de cada linaje denominado *ah chuch cab* (Saucedo 2014)¹².

La segmentación de los gobiernos del posclásico tardío aunada a la dispersión y el reacomodo poblacional transcurrido en la segunda mitad del siglo XV se empalmó con la llegada de las tripulaciones provenientes del Viejo Mundo y la violenta irrupción de los territorios mesoamericanos. La caída definitiva de Tenochtitlan en 1521 marcó un parteaguas en el devenir de los pueblos originarios y la prolongada pugna por el control de las tierras del Nuevo Mundo y la explotación de sus recursos. Así, las expediciones de conquista se

¹² Generalmente los *batabes* prevenían de las mismas familias o linajes, cuyas designaciones se hacían en forma patrilineal (Saucedo 2014: 14-18). En relación con la atomización de los gobiernos indígenas suscitados a partir de la caída de Mayapán, se puede establecer que los gobiernos confederados tenían más de un *halach uinic* en cada sitio, como en el caso de Chichén Itzá que tenían uno por cada punto cardinal. A partir de la transición ya señalada se identifica la presencia de una figura del poder tradicional ubicada en la cabecera de cada cacicazgo o *cuchcabal*, mismo que era auxiliado por figuras de menor rango establecidos en los pueblos sujetos pertenecientes la misma jurisdicción.

extendieron hasta los confines abarcando entonces latitudes indómitas, tal como aconteció en la península de Yucatán.



Figura 5: Representación de la diáspora peninsular a mediados del siglo XV. (Tomado y modificado de Tomada de Quezada 1993:35). Sitio de estudio.

La transición a la época hispana

En 1526, luego de haber retornado al Viejo Mundo por órdenes de Hernán Cortés, Francisco de Montejo y Álvarez recibió en Granada, por parte del emperador Carlos V, las capitulaciones que lo nombraban adelantado de Yucatán, es decir, que finalmente le fueron conferidas las garantías legales para emprender la incursión militar hacia los territorios que habían logrado mantenerse al margen de la sujeción (Saucedo 2014). Seguidamente, Montejo retornó a América y emprendió los preparativos necesarios para su incursión en territorio peninsular. En la hueste comandada por el Adelantado, oriundo de Salamanca, iba también su progenitor Francisco de Montejo y León, el Mozo, y su sobrino, Francisco de Montejo (Chamberlain 1974; Saucedo 2014).

En la incursión inicial del Adelantado, acaecida a fines de 1527, se atisba su traslado desde la zona insular de Cozumel hacia Xelhá en la costa oriental de la península, lugar donde fue recibido por una comitiva indígena que les permitió el desembarco y establecimiento de nexos de intercambio impulsados por Juan Rodríguez Caraveo y Pedro de Añasco, que a la postre se hicieron intérpretes de la comitiva encabezada por Montejo. Aprovechando la segmentación de la sociedad maya y los conflictos internos, la expedición de al menos 125 efectivos hispanos contaba con el apoyo del Cacique Nahum Pat de Cozumel, incursionó en los territorios de Polé, Xamanhá, Tulum y Conil (Saucedo 2014). En el verano de 1528, la expedición diezmada por el hambre, la falta de bastimentos y azotada por las afecciones causadas por las enfermedades, decidió abandonar Yucatán (Saucedo 2014) culminando el primer intento de conquista marcado por un indeleble fracaso y el retiro de la hueste comandado por el Adelantado que, no perdió tiempo en preparar una nueva expedición.¹³

El avance de la hueste invasora prosiguió su marcha hacia la zona noroccidental trastocando Tuchicán y el área de Maxcanú. En aquel momento corrió el rumor de un presunto levantamiento de las poblaciones cercanas a las inmediaciones de Pebá, Hocabá-Homún, Cuzama y Sotuta, coalición rebelde encabezada por el cacique de este último asentamiento llamado Nachi Cocom. Al recibir esta noticia por parte de los mayas aliados de la zona occidental, Montejo, el Sobrino, emprendió una súbita acometida en contra del cacique Cocom y el sacerdote de apelativo Chuy proveniente de Pebá, sofocando la movilización con un furtivo ataque de 300 efectivos que posteriormente marchó hacia T'hó, asentamiento que se convirtió en la capital provincial de Yucatán (hoy conocido como Mérida) el 6 de enero de 1542. Luego de instalar el cabildo y repartir encomiendas los invasores resintieron de nueva cuenta el ataque de la vertiente más radical de los mayas indómitos, ya que, para ellos, el sometimiento por parte de los extranjeros resultaba a todas luces inadmisibile. El *halach uinic* Nachi Cocom emprendió una nueva acometida sitiando Mérida, fue doblegado provocando el desplazamiento de las fuerzas hispanas hacia los *chuchcabaloob* de Hocabá-Homún, Motul, Dzidzantú y Sotuta.

La acometida encabezada por el Mozo prácticamente arrasó los asentamientos de la zona causando la rendición del cacique Cocom, quien no tuvo más remedio que someterse a los invasores. Una vez que se consolidó el sometimiento de la zona occidental y norte que

corría hasta las inmediaciones de la porción central, Montejo, el Sobrino, vislumbró extender la acometida hispana hacia la porción noreste y oriental de la península (Quezada 2001; Saucedo 2014). Así, por medio de la fuerza logró someter Chauac-Há y Valladolid impulsando en 1543 el tercer gran reparto de asentamientos y población indígena a través de encomiendas. En este mismo tenor, el capitán Francisco López de Cieza emprendió un furtivo ataque que desmanteló la sublevación floreciente en Sací, Tihosuco, Popolá, Ekbalam y Chancénote, congregando a sus pobladores en un mismo asiento que durante marzo de 1544 finalmente fue trasladado a Sací. De modo similar, los capitanes Melchor y Gaspar Pacheco arrasaron violentamente a los pobladores de Chetumal y Bacalar ese mismo año estableciendo el dominio hispano y provocando la huida de la población indígena hacia la zona del Petén y el cono sur de la península (Quezada 2001; Saucedo 2014)¹⁴

El avance de las misiones y reducciones de conquista era innegable en aquellos años, es decir, faltaba una última proeza antes de poder exclamar a los cuatro vientos que el sometimiento de los mayas peninsulares se había consumado. La cuenta calendárica marcada con el katún 5 Cimi, 19 Xul, según los *chilames*, y correspondiente a noviembre de 1546, marcó un corchete temporal inscrito en el ámbito de la cosmovisión indígena que presagiaba el fin de los españoles y el retorno del antiguo orden precolombino, pensamiento espiral que sería retomado en distintos momentos de la Colonia y conformaría el inicio de las grandes sublevaciones entre los pueblos mayas (Chamberlain 1974). En este contexto varios españoles aprehendidos fueron sacrificados de distintas maneras, por empalamiento, postrados en una cruz y flechados. A muchos de ellos se les arrancó el corazón y sus extremidades fueron arrojadas a los cenotes, otros más fueron quemados o arrojados a grandes pilas de incienso y fuego (Chamberlain 1974).

De igual modo, los restos de aquellos que perecieron descuartizados fueron enviados a los pueblos de los diferentes puntos cardinales como afrenta hacia aquellos que habían apoyado la invasión y se habían aliado con los conquistadores (González Cicero 1978). La revuelta perduró hasta la primavera de 1547, cuando finalmente las fuerzas hispanas apoyadas por los mayas del territorio occidental apresaron a los caciques y sacerdotes artífices del levantamiento, mismos que fueron ejecutados por las armas y quemados en la hoguera (Chamberlain 1974). Aquellos que lograron escapar, huyeron hacia las zonas más

¹⁴ Quezada 2001; Saucedo 2014: 35-55; Chamberlain, 1974; González Cicero 1978.

breñosas de los montes del cono sur, las inmediaciones de Tayasal en el Petén y la porción oriental de la Verapaz colindante con el Golfo Dulce y el territorio Mopán (González Cicero 1978).

Después de la conquista, la población estuvo bajo el régimen de las encomiendas, empezando con Don Pedro Álvarez y Melchor Pacheco, en 1549; Juan Vela, 1564; Don Juan Vela de Aguirre, Doña Catalina de Rúa y Don Santillán Gómez del Castillo, en 1579; Don Pedro de Mézquita, 1629; Cristóbal Gutiérrez Flores, Don Juan del Castillo y Quiñones y Don Juan Serrano, en 1687; Doña Ana Serrano y don Alonso de Aranda y Aguayo, con 162 indios en 1710, y la de Don Antonio del Castillo y Carrillo, de quien se tiene registro que poseía 469 indios a su cargo en 1725 (De la Garza y Cázares 1983)¹⁵.

En términos socioecológicos, las encomiendas contribuyeron a la transformación del paisaje. Los indígenas fueron forzados a trabajar en la agricultura, la minería y otras actividades que modificaron significativamente el entorno natural. La intensificación del uso de la tierra y la extracción de recursos naturales condujeron a cambios en la cobertura vegetal, la calidad del suelo y los ecosistemas locales. Además, la introducción de cultivos y prácticas agrícolas europeas alteró los sistemas agrícolas indígenas tradicionales, afectando la biodiversidad y la sostenibilidad de los paisajes (Himmerich y Valencia 1991).

La reorganización del trabajo y la explotación de los recursos naturales bajo el sistema de encomiendas también tuvo efectos duraderos en las dinámicas sociales y ecológicas. La pérdida de población indígena debido a las duras condiciones laborales y las enfermedades introducidas por los europeos debilitó las comunidades locales y su capacidad para gestionar sosteniblemente sus tierras. Esto no solo afectó la resiliencia de los ecosistemas, sino que también alteró las prácticas culturales y los conocimientos ecológicos tradicionales que habían sustentado la gestión del paisaje durante siglos (Zavala 1967).

¹⁵ El régimen de encomiendas, implementado en el siglo XVI durante la colonización española en América, asignaba a un colono español la responsabilidad de un grupo de indígenas, otorgándole el derecho de recibir tributos en forma de trabajo o bienes a cambio de su "protección" y evangelización (Himmerich y Valencia 1991). En teoría, este sistema buscaba beneficiar a ambas partes, pero en la práctica se convirtió en una forma de explotación severa, con los indígenas obligados a trabajar en condiciones duras, resultando en su opresión y disminución poblacional (Lockhart y Schwartz 1983). Aunque la Corona Española intentó regular y limitar los abusos mediante leyes como las Nuevas Leyes de 1542, los esfuerzos tuvieron un éxito limitado (Gibson 1974). Este sistema refleja tanto los objetivos económicos y evangelizadores de la colonización, así como, las injusticias que caracterizaron el periodo colonial en América Latina (Zavala 1967).

La evolución y desarrollo de la zona comienza en 1821, cuando Yucatán se declara independiente de la Corona Española. En 1825, Homún pasa a formar parte del partido de Beneficios Bajos con cabecera en Sotuta. El 23 de marzo de 1829, la finca denominada Sutupil pasa a formar parte del Municipio y el 8 de marzo de 1884, la población adquiere la categoría de Villa (Flores et. al. 2004).

Los ranchos y haciendas en el ANP-PELY.

En el siglo XVIII, tras una significativa disminución demográfica, la población de Yucatán comenzó a recuperarse, y surgieron nuevas comunidades conocidas como "ranchos". Estos ranchos consisten en parcelas con cenotes, reholladas o pozos, y se utilizan para la cría de ganado, la apicultura y el cultivo de milpa. Estas propiedades podían ser de propiedad privada o gestionadas de manera independiente o corporativa. Los ranchos independientes, habitados principalmente por agricultores mayas, eran considerados comunidades no autorizadas bajo el régimen político de la época (Farriss 1984; García Bernal 2005).

Después de la Revolución Mexicana, muchas de estas comunidades iniciaron procesos para legalizar sus tierras como ejidos y establecer sus propias comisarías. Estos lugares tienen una historia de ocupación intermitente, alternando entre períodos de habitación permanente y épocas de uso intensivo para la agricultura (Güemez et al. 2003). Durante el periodo colonial, los ranchos y estancias en Yucatán se centraron en la ganadería y la apicultura, actividades que tenían una gran importancia económica tanto local como regionalmente (Hernández 2020; Güemez et al. 2003).

Un ejemplo de rancho independiente es el Rancho Yalahau, fundado en el siglo XIX. Durante la Guerra de Castas fue abandonado y luego ocupado nuevamente en el siglo XX. Hace 35 años, tras el huracán Gilberto, se abandonó debido a las frecuentes inundaciones. Actualmente, se utiliza para el cultivo de milpa y la apicultura, y cuenta con dos casas construidas con materiales perecederos, además de un centro de observación y monitoreo de SEMARNAT. El centro del rancho es el amplio aguadado de Yalahau, con albarradas en los solares desocupados del asentamiento. La arquitectura, a menudo construida con bloque de concreto, refleja la adaptación a condiciones climáticas adversas. Algunos ranchos tienen pozos en la plaza principal que cubren antiguos cenotes, junto con pilas o bebederos, y

ocasionalmente norias. La evidencia de cultura material en la superficie es limitada, reflejando el uso de tecnología perecedera (Masson 2000).

Los ranchos privados dedicados al cultivo de milpa y la cría de ganado también son comunes en la región, muchos de ellos establecidos a finales del siglo XIX después de la Guerra de Castas. Estas propiedades suelen estar en manos de la misma familia durante varias generaciones. Por lo general, incluyen un pozo, una pila o bebedero y un corral adyacente. Algunos ranchos están actualmente ocupados, mientras que otros no, pero la mayoría tiene casas construidas con materiales perecederos utilizadas para almacenamiento y actividades agrícolas. Se conservan y reutilizan antiguas vasijas cerámicas, como la jarra olivera, para el almacenamiento. Los ranchos suelen tener cruces de madera marcando las entradas a la propiedad, y en algunos casos, como en el Rancho Y'ba, los propietarios mantienen adoratorios semiprivados (Ciaramella 2002; Farriss 1984; 1992).

La importancia económica de los ranchos y estancias en Yucatán se centró en la ganadería y la apicultura durante el periodo colonial, actividades que tenían gran relevancia tanto local como regionalmente. La ganadería, especialmente de ganado vacuno, era fundamental, mientras que la apicultura proporcionaba miel y cera, productos altamente valorados y comercializados. La geografía de la región, con su acceso a recursos hídricos subterráneos a través de cenotes, facilitó estas actividades (Clarke et al. 2007; Güemez et al. 2004).

En la primera mitad del siglo XIX, la población rural de Yucatán creció significativamente, y los criollos españoles promovieron la agricultura comercial mediante el desarrollo de haciendas. Estas grandes propiedades, conocidas como haciendas, fomentaron principalmente la producción ganadera, y sus dueños recibieron licencias para el establecimiento de ganado mayor. En las haciendas residían asalariados, vaqueros y luneros, quienes proporcionaban la mano de obra necesaria para la producción (Patch 1993). Los productos derivados, como carne y pieles, se vendían a comerciantes en centros urbanos como Valladolid y Mérida para el abastecimiento público (García Bernal 2005).

Algunas haciendas, como Chichí Suárez, diversificaron su producción, incluyendo tanto cultivos de henequén como ganado. En tiempos recientes, estas propiedades han incursionado en actividades turísticas bajo la gestión de agencias como Catherwood (Bracamonte 1993; Machuca Gallegos 2010). Aunque comúnmente se asocian con la clase

dominante de la península, varios historiadores han señalado la variabilidad socioeconómica entre los dueños de las haciendas. De hecho, las haciendas ganaderas del siglo XIX sirvieron como vehículos para la movilidad socioeconómica de caudillos rurales, mestizos y élites indígenas (Alexander 2003).

La inversión en bienes raíces y edificaciones por parte de los hacendados tenía el doble propósito de aumentar tanto el prestigio como la producción ganadera. Esta variabilidad se reflejaba en el tamaño y las características de los cascos de las haciendas, que variaban considerablemente en infraestructura. En general, las haciendas contaban con norias, bebederos, corrales y arquitectura residencial de mampostería. Algunas incluso incluían capillas de mampostería, aunque estas eran más comunes en propiedades ubicadas al noroeste de Yalahau y Homún (Hernández et al. 1995; Hernández Álvarez 2020).

Las haciendas más grandes, como Canul, datan del Porfiriato y lograron sobrevivir tanto a la Guerra de Castas como a la Revolución Mexicana. En el siglo XX, muchas fueron reconstruidas para la producción de henequén. La variabilidad en la cantidad de construcciones de mampostería y los patrones espaciales corrobora la hipótesis de que las haciendas yucatecas experimentaron un ciclo de crecimiento. Inicialmente, se construyeron estructuras básicas para adquirir y controlar el agua y el ganado, seguidas por viviendas para el dueño, los asalariados y los trabajadores. Con el tiempo, las construcciones percederas fueron reemplazadas por mampostería (Bracamonte 1993; 2001).

Durante la Guerra de Castas, la destrucción de las haciendas seguía una secuencia inversa, con la casa principal y la capilla siendo los primeros objetivos. En muchos casos, la arquitectura religiosa y residencial de las haciendas quedó en abandono, y hoy en día, muchas de estas estructuras no reciben mantenimiento adecuado y están en franco deterioro. Si se estableció una nueva comisaría municipal en el lugar de una ex hacienda después de la Revolución Mexicana, la arquitectura asociada con la hacienda se reutiliza ocasionalmente para actividades cotidianas, aunque generalmente permanece en estado vacío (Masson 2000).

Actualmente, en municipios como Homún, las haciendas se utilizan principalmente para el turismo o como corrales, aprovechando las norias y pozos que aún se conservan. Sin embargo, las capillas y casas principales suelen estar desocupadas y en mal estado debido al abandono por parte de los propietarios (Güemez et al. 2004).

Principales investigaciones y estudios ecológicos conducidos hasta ahora en el ANP-PELY.

Los estudios e investigaciones llevados a cabo en el ANP-PELY son escasos, aunque existe información de áreas adyacentes cuyo análisis puede ayudar a interpretar lo que ocurre en la zona protegida. Toda la información disponible sobre fauna es producto de generalizaciones e inferencias a datos de distribución y manejo más generales. Entre los estudios que se han realizado, en su mayoría por la Universidad Autónoma de Yucatán están, diagnóstico socioeconómico de las familias que viven al interior del Área Natural Protegida y en la zona de influencia (Flores y Espejel 1994), la exploración de vestigios arqueológicos (Dahlin 1990, Pérez Romero et al. 2000, Cantero y Robles 2002), la propuesta de manejo Unidad de Manejo Ambiental (UMA's); y el estudio de suelos y la elaboración del listado de flora y fauna (Flores y Espejel 1994; Chumba y Medina 2000; Medina et al. 2001).

Los estudios llevados a cabo en el ANP-PELY son limitados, abarcando principalmente diagnósticos socioeconómicos, algunas exploraciones arqueológicas, propuestas de manejo ambiental y listados de flora y fauna. Sin embargo, existe una carencia notable de investigaciones que analicen el paisaje desde una perspectiva de larga duración, lo que impide una comprensión completa y profunda de los cambios y dinámicas históricas de la región.

VI. Resultados y Discusión.

Trabajo de campo.

Un hecho importante sobre el que queremos hacer hincapié es el contexto mundial bajo el cual se realizó el proyecto y es que, el trabajo de campo y el proyecto en sí, se han llevado a cabo dentro de un ambiente y el clima social extraordinario, desarrollado por la pandemia COVID-19, la cual modificó todos los aspectos logísticos, económicos y cronológicos de nuestro proyecto, convirtiendo el ejercicio en un verdadero esfuerzo académico y científico.

A partir de este momento el proyecto sufre diferentes contratiempos, empezando por suspensión de todas las actividades no esenciales, la pérdida de vehículos asignados por remisión de contratos de renta realizados en el CINVESTAV, cancelación de contratos de trabajadores, pérdida del campamento en sitio de trabajo y retraso en la realización de los análisis de laboratorio. Además, se decreta el cierre de la reserva Parque Estatal Lagunas de Yalahau y del Municipio de Homún por tiempo indefinido, lo que como consecuencia nos hizo perder los avances en el brecheo, desmonte, exploración y mapeo de los trabajos de prospección, demorando y afectando la etapa de registro arqueológico. Ante este escenario, no nos quedó otra alternativa que replantear nuestra logística, acotar nuestro trabajo de campo y optimizando los esfuerzos para poder cumplir con los objetivos planteados en el protocolo de investigación.

Temporada de campo 2020/2021.

La temporada de campo se completó de manera intermitente entre los meses de noviembre de 2020 y junio del 2021. Los trabajos se retomaron pasada la etapa de confinamiento establecida por la Secretaría de Salud Pública y la apertura paulatina de las actividades a finales de ese año. En este punto se reenfocaron nuestros objetivos: *a)* registro y clasificación de los conjuntos arquitectónicos clasificados como B, C y D, los cuales fueron identificados y localizados en las secciones noreste y sureste de nuestro polígono de trabajo y *b)* colecta de muestras de sedimentos no consolidados en núcleos de cenotes, con lo cual realizaríamos estudios para la reconstrucción paleoambiental. De esta manera, pretendimos

obtener la mayor cantidad de información posible en campo, maximizando las posibilidades de éxito del proyecto.

En cuanto a la prospección arqueológica, cambiamos de una estrategia extensiva a una intencional. Concentramos esfuerzos en documentar los grupos arquitectónicos localizados y no reportados hasta el momento¹⁶. En esta parte, optamos por demarcar el perímetro de los grupos, registrar la parte central de los conjuntos arquitectónicos y documentar, lo que luego veríamos, como un patrón del sitio compuesto de una plaza principal y pirámide, con agrupaciones de estructuras posiblemente domésticas/habitacional en la periferia.

Con esta estrategia pudimos documentar los límites de los grupos existentes, con la limitante de la falta de información sobre el número total de estructuras. Esto restringe nuestra capacidad para inferir sobre aspectos demográficos, pero nos permitió documentar la disposición espacial de los grupos, la secuencia arquitectónica visible en superficie, usada para generar una cronología relativa con base en los estilos constructivos, así como, modificaciones al paisaje a lo largo del tiempo, lo que nos faculta a plantear la dinámica de desarrollo del asentamiento a lo largo del tiempo.

En cuanto a la recolección de muestra en cenotes; debido al equipo reducido de trabajo y a la estrategia diseñada, la recolección de los núcleos se llevó a cabo prácticamente sin ningún inconveniente, fuera de la reducción del equipo de buzos, lo cual no afectó en nuestro desempeño final.

Por último, el trabajo de búsqueda, recopilación y análisis de fuentes históricas se llevó a cabo sin ningún contratiempo, debido a la naturaleza misma del trabajo realizado en bibliotecas y archivos, se reanuda a partir de la cancelación del confinamiento, pudiendo avanzar de manera paulatina, según sus propios tiempos y ordenes de apertura. Por supuesto, hubo algunas excepciones como en el AGN: Archivo General de la Nación (Ciudad de México) y el AHAY: Archivo Histórico de la Arquidiócesis de Yucatán (Conkal, Yucatán), en donde la admisión estuvo prohibida por mayor tiempo y no fue posible consultar los archivos como se había planeado en un principio.

¹⁶ Es importante señalar que, para este trabajo fue esencial el apoyo y guía de informantes locales como el Sr. Edecio Echeverría, actual guarda parques del ANP-PELY.

Resultados Arqueológicos

En la etapa arqueológica, nos enfocamos en documentar evidencia física de la transformación del paisaje, lo cual contribuyó a nuestra comprensión de las relaciones espaciales y temporales que los antiguos mayas, así como, ocupaciones posteriores, desarrollaron con su entorno a lo largo del tiempo. Encontramos que el sitio prehispánico de Yalahau presenta un patrón de asentamiento mucho más complejo y extenso de lo que se había informado previamente (Dahlin 1990; Cantero y Robles 2002), con un total de cuatro zonas de ocupación, tres de las cuales no se habían reportado anteriormente.

El grupo arquitectónico previamente explorado por Cantero y Robles (2002) ubicado en el lado oeste de la aguada de Yalahau (latitud 20.93436, longitud -89.139470), fue catalogado en este estudio como grupo A y los otros grupos marcados consecutivamente como B, C y D (Figura 6). Curiosamente, una vista integrada de la distribución de estos grupos cambia sustancialmente nuestra comprensión del sitio y su relación con el entorno, así como su importancia a nivel regional. Los tres principales grupos arquitectónicos se clasifican como A, C y D. En este sentido, el Grupo B (latitud 20.665486, longitud -89.213547), es una posible extensión del Grupo A, quizás como un área residencial periférica o, como nosotros proponemos, un asentamiento mucho más tardío, fechado tentativamente para el postclásico tardío o incluso, el comienzo del período colonial.

Para determinar cabalmente la asociación temporal y estratigráfica de los grupos y en especial del grupo B, es necesario realizar futuras excavaciones. Sin embargo, como característica distintiva, en este grupo no se presentan estructuras con arquitectura monumental, cambiando significativamente el patrón de asentamiento con respecto a los grupos A, C y D. El grupo B se compone de elevaciones con nivelaciones modificadas, cimientos absidales y circulares de piedras medianas burdas, seguramente para casa/habitación. Estructuras sencillas, sin mampostería y pequeñas plataformas con un evidente carácter residencial, de baja densidad, aunque con un patrón aparentemente más compacto que al observado en los otros grupos. Apoyando lo anterior, se observaron artefactos de tipo doméstico como metates dispersos, lo que evidencia la preparación de alimentos *in situ*. Estas características distan de lo documentado en otras áreas del asentamiento, donde se registran plazas y arquitectura monumental con estilos

arquitectónicos definidos, por lo que, como mencionamos arriba, creemos que esta sección del ANP-PELY, fue ocupada o reocupada posterior a la ocupación de los grupos A, C y D.

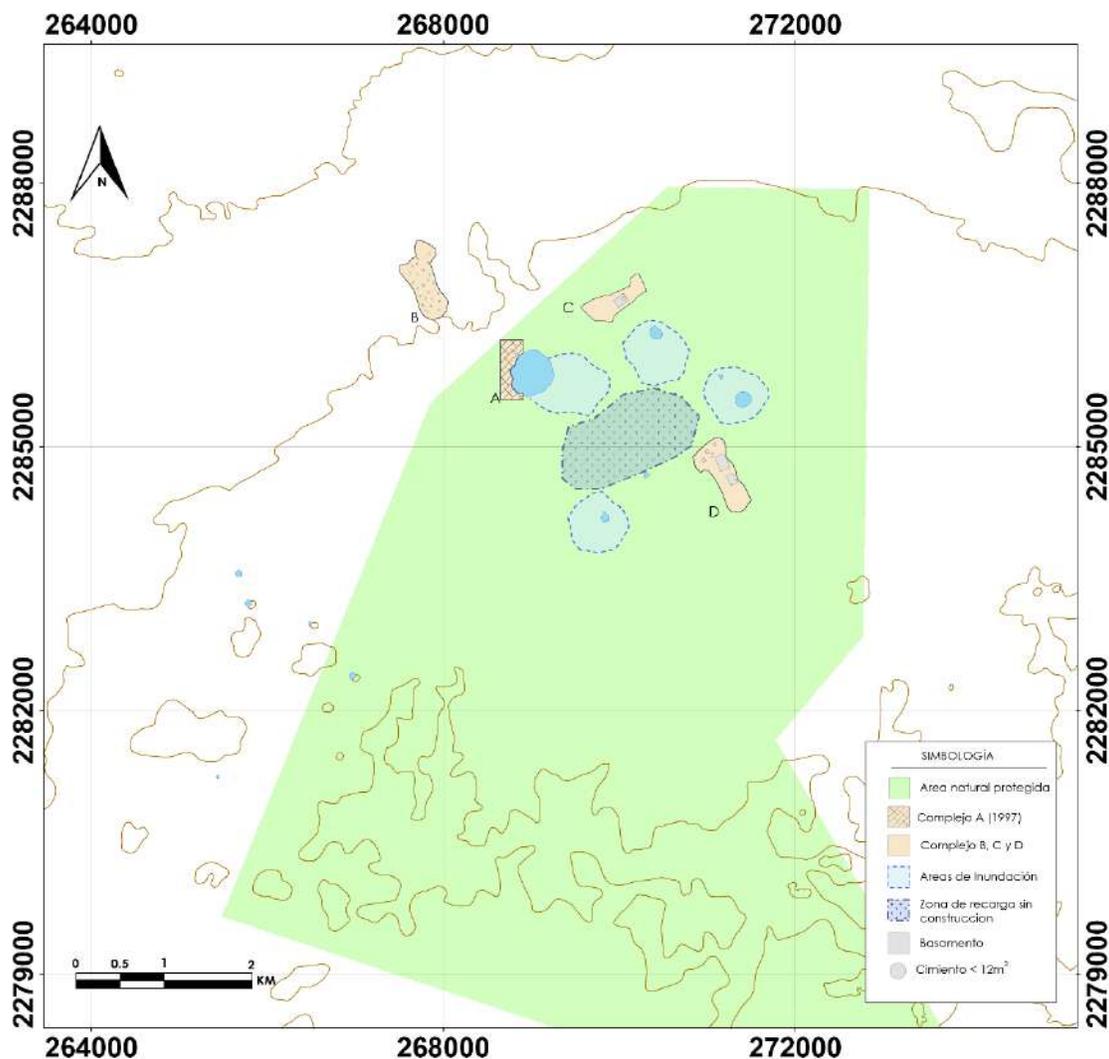


Figura 6: Mapa de la reserva modificado por el proyecto PELY-2021. Grupos arquitectónicos A, B, C y D. Área de recarga en bajos inundables de temporada.

El Grupo A, que ha sido considerado el núcleo del asentamiento, se caracteriza por estructuras monumentales, dos plazas (a y b), plataformas, basamentos escalonados de más de entre 8 y 10m de altura, *sacbeo* e incluso un muelle con cimientos de piedra dentro de la aguada de Yalahau (Cantero y Robles 2002:301-303). Las estructuras principales, asociadas a las plazas y sus alrededores, muestran un estilo arquitectónico con elementos Puuc temprano y Puuc clásico, como lo son columnas monolíticas, frisos decorativos y paneles

con diseños de junquillos y tambores, estructuras con mampostería finamente labrada y bóvedas de piedra aparentemente escalonadas o saledizas¹⁷ (Gendrop 1983; Vidal y Muñoz 1997). Se observan dispersos por el área dinteles y jambas, así como piedras especializadas de bota para bóvedas lisas y escalonada.

En la sección norte, oeste y sur del grupo, se observan estructuras y conjunto de carácter habitacional, con cimio de estructuras circulares y plataformas de entre 4 y 20 m², de donde seguramente desplantaron construcciones de materiales perecederos ausentes hoy día. Ciertamente, esta es el área con el mayor número de estructuras, tanto monumentales como habitacionales, y coincidimos con Cantero y Robles (2002) en que esta sección se asentó el núcleo cívico/administrativo del sitio; durante uno de nuestros períodos focales del colapso a finales del clásico terminal.

El Grupo C, está ubicado al norte de la aguada de X'nuk y al noreste de la aguada de Yalahau (latitud 20.671735, longitud -89.234703). Se caracteriza por plataformas rectangulares largas, con estructuras absidales, cuadradas y circulares entre 6 y 30 m². En la sección suroeste se ubicaba la plaza central del complejo, catalogada como Plaza C. Está compuesta por una plataforma de aproximadamente 1,500 m², que está nivelada en relación con la elevación natural del terreno con pendiente al norte. En la sección este de la plaza se encuentra la estructura principal del complejo. Tiene un basamento escalonado de 120 m² con una altura de aproximadamente 5 a 7 m y se clasificó como estructura C-1. Este grupo, de características modestas en comparación a las documentadas en los grupos A y D, se compone principalmente de estructuras con un claro uso habitacional. La estructura C-1 no muestra características arquitectónicas distintivas para su fechamiento relativo, aunque se observan algunas piedras especializadas dispersas, por lo que se presume que tuvo un techo abovedado.

¹⁷ El estilo arquitectónico Puuc maya se divide en varias fases, cada una con características distintivas. El Proto-Puuc (300-600 d.C.) se caracteriza por el uso de mampostería rústica con piedras irregulares y diseños simples, mostrando una evolución hacia técnicas más refinadas (Gendrop 1983). El Puuc Temprano (600-750 d.C.) utiliza piedra caliza con una técnica de mampostería más precisa. Las estructuras son menos elaboradas y representan una transición hacia el Puuc Clásico, con ejemplos en Uxmal y Sayil (Gendrop 1983). El Puuc Clásico (750-900 d.C.) emplea bloques de piedra caliza bien cortados, creando muros lisos y rectos. Las fachadas tienen una ornamentación mayor con frisos geométricos y máscaras de Chaac, como se observa en el Palacio del Gobernador en Uxmal y el "Codz Poop" en Kabah (Pollock, 1980). Finalmente, el Puuc Tardío (900-1000 d.C.) presenta una decoración más elaborada y compleja, con mayor integración de elementos escultóricos. La arquitectura es más sofisticada, con ejemplos en Sayil y Labná (Gendrop 1983; Pollock 1980).

El Grupo D, está ubicado al noreste de la aguada de Sahmucuy (latitud 20.650932, longitud -89.198977). Este es el grupo que proporcionó evidencia de una posible ocupación temprana. Se caracteriza por grandes basamentos escalonados de más de 2,500 m². Alrededor de la plaza central y en la periferia del grupo, se observan plataformas cuadradas, cimientos absidales y circulares, nivelaciones de uno, dos y tres muros, con un uso habitacional, construidas sobre cimentaciones con muros de contención de piedras burdas medianas y grandes, sobre las que desplantaron casas de materiales perecederos.

La plaza central del complejo, etiquetada como Plaza D, está delimitada por las estructuras D-1 al oeste y la estructura D-2 al este. Ambas estructuras son descritas como basamentos escalonados de entre 3 y 4 m de altura. En el grupo D, a diferencia de lo documentado en el grupo A y C, donde se aprecian vestigios de una arquitectura con clara influencia del Puuc, aquí observamos un estilo mucho más sobrio que recuerda a la arquitectura del clásico temprano (AD 250 – 550) del norte de Yucatán registrada en sitios como Izamal, Poxilá, Ake o Acanceh (Figura 7). La característica distintiva del grupo D son basamentos monumentales con arquitectura de tipo monolítica. Esta se distingue por usar bloques de piedra de más de 1 m de largo y 70 a 80 cm de grosor, para muros de contención masivos. Están bien tallados y careados, pero de manera rudimentaria y están colocados en dos, tres y cuatros hileras sobrepuestas en junta seca, sin ningún tipo de mezcla o argamasa.

Sobre las estructuras D-1 y D-2 se construyeron estructuras superiores, descritas como cimientos de plataformas rectangulares y cuadradas en un aparente arreglo triádico, formado por plataformas más pequeñas alrededor de un patio interno, al que se accede desde el lado sur. Al centro del patio, se observa una plataforma cuadra, normalmente descrita como altar, aunque esta es una categorización funcional que deseamos evitar y por la cual solo será mencionada como cimiento cuadrado de entre 2x2m aproximadamente. El patrón triádico es una disposición arquitectónica característica de varios sitios mayas, consistente en una estructura principal flanqueada por dos estructuras menores, todas situadas sobre una plataforma común. Estas disposiciones solían tener funciones ceremoniales y simbolizaban el poder y la legitimidad de los gobernantes mayas. Ejemplos destacados de este patrón se encuentran en sitios como Uaxactún y Tikal (Harrison 1999). En la península de Yucatán, el patrón triádico se observa en sitios como Yáxuna, Izamal y Edzná, asociado principalmente

con la transición del periodo Preclásico Tardío al Clásico Temprano (aproximadamente 400 a.C. - 600 d.C.) (Fergusson 2014).

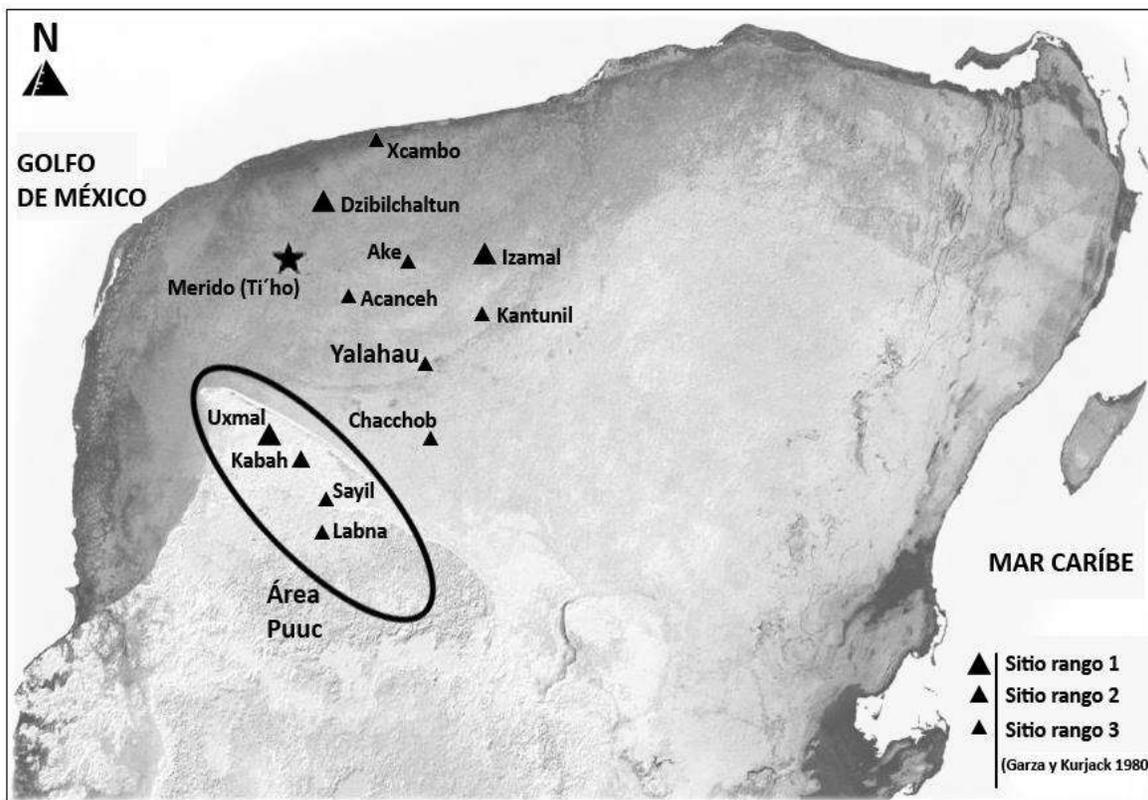


Figura 7: Relación regional de Yalahau con otros asentamientos en el área maya del norte. Clasificación de sitios por rango de mayor a menor importancia regional. Yalahau es catalogado como rango 3, según Garza y Kurjack (1980).

Con base en las características arquitectónicas observadas en el grupo D, su posible asociación temporal con otros asentamientos en la región y la evidencia de arquitectura monumental temprana, que como mencionamos, difiere en gran medida de la documentada en la sección norte del sitio (grupos A y C). Pensamos que, este fue un grupo de especial relevancia político/religiosa durante el clásico temprano, momento durante el cual el asentamiento se expande y comienza la construcción de basamentos monumentales. Esta expansión debe haber estado asociada con la creciente importancia político-económica de Yalahau a nivel regional, seguramente asociada a su posición estratégica entre la costa, Izamal y la zona Puuc, funcionando como un sitio intermedio entre regiones (Cantero y Robles 2002).

Otra explicación posible para el crecimiento del asentamiento podría haber estado relacionado a la fragmentación de facciones dentro del sitio, las cuales ocuparon zonas más al norte, explicando el patrón disperso de los grupos habitacionales, con similitudes en el arreglo espacial. Esta es una perspectiva que merece la pena observar más a detalle. Nosotros creemos que el asentamiento pudo crecer de sur a norte, según nos muestra la evidencia en la secuencia arquitectónica (basamentos monolíticos arquitectura Puuc), donde las etapas expuestas en superficie del último momento de ocupación revelan secuencias constructivas y estilos arquitectónicos temporal y geográficamente diferentes.

Esto podría ser explicado a través de dos escenarios. El primero, como discutiremos más adelante, puede estar influenciado por los cambios climáticos y las sequías documentadas en el clásico temprano, lo que generó una mayor presión ambiental, obligando a movilizarse más cerca de los mayores cuerpos de agua. En el segundo escenario, los grupos A y C podrían contar con una secuencia arquitectónica más profunda y antigua, no estudiada hasta ahora, para lo cual, el escenario sería el crecimiento político/administrativo que se centraría en esta área para el clásico tardío-terminal, lo que explicaría la evolución arquitectónica del asentamiento.

Este cambio en la ocupación y en los estilos arquitectónicos, ya sea debido a la fragmentación de facciones, a la presión ambiental o al crecimiento político y económico de Yalahau en la región, está vinculado al gradual declive de la influencia de Izamal hacia el final del período Clásico Temprano y un aumento de la influencia de la región Puuc durante el Clásico Tardío y Terminal.

Hasta ahora, ningún proyecto ha realizado excavaciones para establecer la secuencia arquitectónica detallada de los grupos y, así, puntualizar su fundación, período de ocupación, secuencia y asociación regional, más allá de la comparación de estilos cerámicos y/o arquitectónicos visibles en la superficie. Concretamente, basándonos en la evidencia cerámica recolectada en la superficie (sin excavación), primero por Dahlin (1990) y luego por Cantero y Robles (2002), en combinación con los resultados del análisis de núcleos sedimentos recuperados de la aguada de Yalahau por Rodríguez y Correa (2023), y la secuencia arquitectónica documentada por el proyecto PELY, se plantea que la actividad humana en la zona se remonta al menos al período preclásico tardío.

El primer momento de expansión y desarrollo importante de la ciudad debe haber ocurrido en algún momento durante el clásico temprano (AD 250 – 550) con la construcción de los primeros basamentos monumentales. Posteriormente tiene un segundo momento de transición importante a finales del clásico temprano, en donde surgen importantes cambios en el patrón de asentamiento, posiblemente reflejando o ejemplificando un cambio de mayor escala, tal vez detonado por la disminución de la influencia político/económica/religiosa con Izamal. Finalmente, el asentamiento presenta un crecimiento considerable en la extensión de la construcción monumental durante el clásico tardío-terminal (AD 550 – 990), posiblemente durante uno de sus momentos de mayor apogeo, con un área de ocupación que supera las 923 hectáreas, constando los grupos arquitectónicos descritos, las aguadas, cenotes y área de recarga entre las zonas urbanas y la periferia rural del asentamiento.

Patrón de asentamiento, cenotes y humedales de Yalahau.

Uno de los aspectos centrales del patrón de asentamiento en el ANP-PELY, es la relación espacial de los grupos arquitectónicos con las aguadas, cenotes y humedales. Esta característica presume la planificación espacial y construcción intencional del *paysage*, considerando las condiciones topográficas del área y el flujo natural del agua de norte a sur durante la temporada de lluvias. Cabe mencionar que esta relación socio ecológica no ha sido plasmado en ningún estudio anterior, así es un apartamiento singular al conocimiento en la zona centro del estado de Yucatán.

Un ejemplo de esto es el Grupo A, que está construido en los lados oeste y norte de la aguada de Yalahau. El lado este es una de las principales áreas de inundación del asentamiento, donde se ubicaban la mayoría de los ranchos ganaderos establecidos durante el siglo XX, siendo un ejemplo de un cambio en el uso de la tierra y la diferencia entre en la comprensión de la dinámica ecológica del entorno durante la época prehispánica y las posteriores ocupaciones después de la conquista en el s. XVI, ya que estos ranchos se inundan completamente durante los períodos de lluvia intensa, generando grandes pérdidas económicas.

Otro caso de planeación espacial es el Grupo C, ubicado en la porción elevada al norte del área de humedales de la aguada de X'nuk; del mismo modo que el Grupo D al sur, construido en el área elevada entre las zonas de humedales de la aguada de Sahmucuy al

suroeste y Yibá al noreste (Figura 8). Observamos que el diseño y planeación de las estructuras aprovecha las elevaciones naturales del terreno, evitando las depresiones y las zonas de recarga. Esto beneficia tanto al flujo de agua, que se acumula en las áreas bajas, como al resguardo de las casas contra las inundaciones en épocas de temporal, a diferencia de los ranchos ganaderos que obstruyen y se inundan.



Figura 8: Área de inundación y humedales alrededor de la aguada X'nuk y próximos a la zona de recarga

Además, en algunas zonas, estas depresiones favorecen las acumulaciones de sedimentos arrastrados por los flujos de agua, mismos que todavía se utilizan hoy en día como milpas. El dinamismo que observamos hoy en los humedales y áreas de recarga parece haber sido moldeado o mejorado durante la ocupación prehispánica y cambiado durante la etapa de las haciendas henequeneras y ganaderas a principios y mediados del siglo XX, pero que aún podemos apreciar como un palimpsesto ecológico en el entorno (por ejemplo, Balée 2006; Szabó 2015; Armstrong et al. 2017).

La Aguada Artificial Yohax ké

En el extremo sur de la aguada de Yalahau, hay un cuerpo de agua conocido como la aguada de Yohax ké, de aproximadamente 60 m de diámetro con un área total de 1,150 m². Este cuerpo de agua, mucho más pequeño en comparación con las aguadas de Yalahau,

Ixnukil y Yibá, fue reportado previamente por Cantero y Robles (2002) como una "cuenca exorreica", alrededor de la cual hay "una serie de plataformas y cimientos de habitaciones que rodean el cuerpo de agua".

La observación detallada de las características espaciales y ambientales de este sector nos permite determinar que esta aguada es artificial y, por lo tanto, fue planificada y construida por los antiguos mayas para formar un reservorio, que se abastecía de desbordamientos provenientes de la aguada de Yalahau durante la temporada de lluvias. En la sección norte de Yohax ké, observamos un canal artificial, que permitía el flujo controlado de agua hacia el reservorio, ya que, carece de un sistema de recarga subterránea, confiando exclusivamente en la aguada de Yalahau para su reabastecimiento (Figura 9).

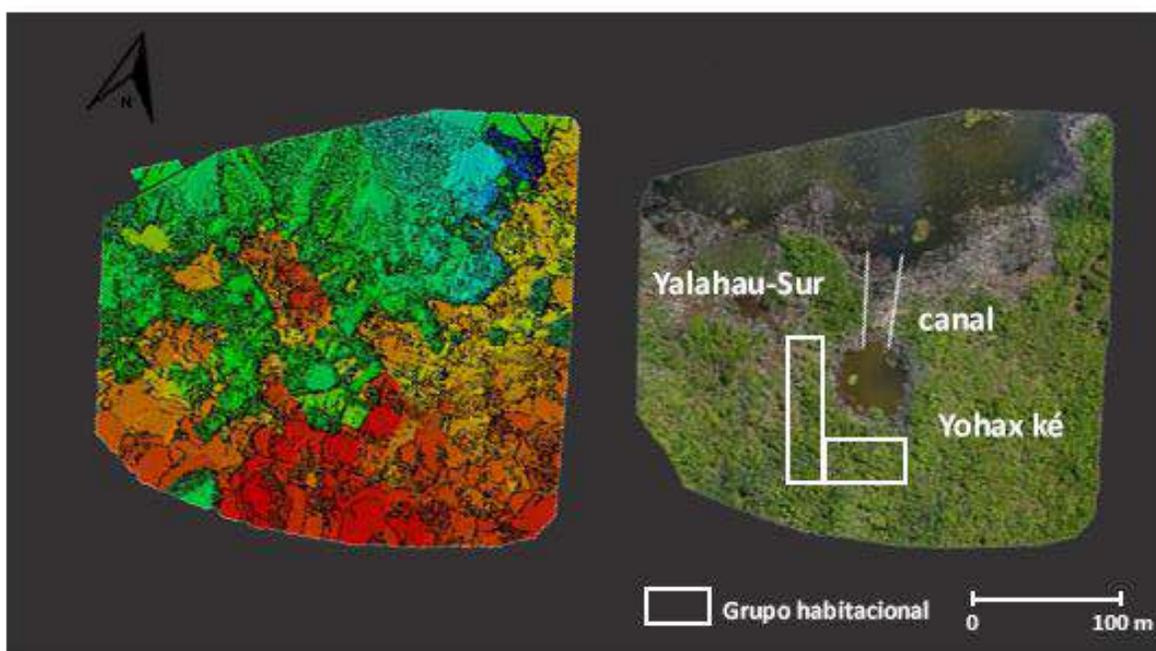


Figura 9: Aguada artificial de Yohax ké. Fotogrametría con vuelo de dron, para análisis de altimetría. Colores cálidos mayor elevación, colores fríos zonas bajas.

Aparentemente, se empleó la pendiente natural (7 m bajo el nivel medio del mar) al sur del terreno en la construcción del canal, aprovechando el gradiente natural del terreno hacia el sur, facilitando y guiando el movimiento del agua por escorrentía hacia el reservorio por medio del canal. Además, se seleccionó el área entre dos elevaciones naturales y se niveló la base del terreno para exponer la roca madre, permitiendo el flujo ininterrumpido del agua

durante la temporada de lluvias. Los lados este y oeste del canal aún muestran rastros del relleno de la construcción, y algunas de las piedras de contención que una vez formaron las paredes todavía son visibles. El perímetro original de la aguada de Yohax ké también conserva restos del muro de contención, que estaba hecho de piedras medianas y grandes, con relleno de piedras pequeñas y sascab.

Las Terrazas Agrícolas de Yalkau y Mahuitzil.

Al noroeste y sur de la aguada de Yalahau se encuentran las aguadas de Yalkau y Mahuitzil, respectivamente (Fig. 10). Estos cuerpos de agua permanentes fueron sin duda esenciales para el establecimiento y mantenimiento de los habitantes del asentamiento. Alrededor de las aguadas encontramos los restos de algunas pequeñas plataformas y cimientos circulares, que probablemente se utilizaron con fines residenciales. Es importante mencionar que, aunque las aguadas de Yalkau y Mahuitzil se encuentran relativamente cerca de los conjuntos A y D respectivamente, estas no forman parte del núcleo urbano, localizándose en un área intermedia entre los grupos y las áreas rurales.

En ambas aguadas documentamos la presencia de muros de contención bajos, entre 30 y 45 cm de altura, contruidos con piedras medianas, con juntas secas y rellenos de piedras pequeñas. Estos muros de contención fueron contruidos en la pendiente que desciende directamente hacia el agua, bordeando la circunferencia de las aguadas, aprovechando los afloramientos de losas y la irregularidad del terreno para construir terrazas.

Este tipo de construcciones ha sido ampliamente documentado en el área Maya (por ejemplo, Dunning et al., 1997), pero esta es la primera vez que se encuentran dentro de aguadas, y no en laderas o pendientes de cerros donde típicamente se han reportado. Nosotros planteamos que, las terrazas documentadas en Yalkau y Mahuitzil tienen un doble propósito: 1) sirven para atrapar los sedimentos arrastrados por la lluvia y acumular humedad, fomentando el cultivo de especies útiles; y 2) retienen la materia que cae y se descompone naturalmente fuera de la aguada, reduciendo la carga orgánica del agua y, por lo tanto, contribuyendo a su mantenimiento y limpieza.

En la actualidad, estas construcciones han sido severamente afectadas por el paso del tiempo, la extracción de material, la tala de árboles y la falta de mantenimiento; pero, sobre todo, por la reutilización de piedras para la construcción de barricadas, lo que llevó al

desmantelamiento sistemático de estas y muchas otras estructuras y sistemas agrícolas en el sitio. Sin embargo, el método fue tan efectivo que, durante nuestro estudio del área pudimos registrar algunos de los árboles más grandes y frondosos del ANP sobre secciones de terrazas aún en pie, que continúan acumulando una gran cantidad del sedimento arrastrado a las terrazas durante las fuertes lluvias, contribuyendo a la calidad del suelo y la humedad de las raíces, creando una serie de nichos con mosaicos de vegetación y mayor profundidad y acumulación de sedimento que crean suelos fértiles por escorrentía, mismos que son visibles en secciones de ANP hasta nuestros días y que solo son apreciables a escala local.



Figura 10: Muro de contención de la terraza 1 en la aguada Yalkau. Localizada al noroeste de la aguada de Yalahau, próxima al complejo B.

Resultados del estudio histórico

La investigación centró en el análisis del sistema colonial en Yucatán plantea diversos objetivos. El periodo temprano que va de 1512 a 1589 enfatiza los mecanismos de transición que se enmarcan entre la decadencia de los señoríos mayas o cacicazgos y el surgimiento de las repúblicas de indios. Al interior de este proceso se llevó a cabo un intenso desplazamiento de población inherente a las misiones y reducciones, a partir de las cuales fue emergiendo la configuración del espacio sociopolítico que desembocó en la conformación de los pueblos de indios (cabeceras y asentamientos sujetos).

En la actualidad, la circunscripción del Parque Estatal Lagunas Yalahau abarca los municipios de Homún, Tekit, Sotuta y Huhí. Sin embargo, es importante señalar que tal demarcación es resultado de una historicidad cuyos pormenores están aún por ser desentrañados. Es decir, todavía permanecen invisibles los aspectos nodales articulados a su antigua demarcación espacial y sus características. En este sentido, surgen distintas interrogantes con respecto a quiénes fueron sus antiguos pobladores a finales del posclásico tardío, qué demarcación o demarcaciones territoriales comprendían este espacio, quién o quiénes gozaban de su usufructo, cómo se transformó esta configuración espacial después de la irrupción hispana, etcétera.

En este orden de ideas, resulta plausible mencionar que en el transcurso del régimen colonial tanto las cabeceras administrativas como las sedes de los curatos sufrieron alteraciones notables. Es decir, sus linderos fueron cambiando, dependiendo de la capacidad productiva y la necesidad de los mecanismos de compulsión que se utilizaban para obtener las cargas impositivas entre los habitantes de los pueblos: tributos, servicios personales y repartimientos para los vasallos del rey, así como, obvenciones y limosnas para los feligreses.

La capacidad productiva o carga que recaía sobre los habitantes de los pueblos evidentemente causó alteraciones en el ordenamiento ecológico, la tenencia de la tierra y su respectivo usufructo. Esos acontecimientos cobraron vigencia al interior de los corchetes temporales que se insertan dentro del periodo de análisis que va de 1590 a 1813, es decir, en el ámbito que abarca tanto la consolidación del sistema colonial como su posterior decadencia.

Por otro lado, valdría la pena agregar que, desde el punto de vista social y cultural,

la investigación plantea esclarecer los vínculos simbólicos entre población maya y su entorno natural. Esta consideración abrirá la posibilidad de entrever las distintas formas de concebir los ciclos naturales y la interacción con el entorno a través de la ritualidad. Con ello, se pretende integrar al análisis la pervivencia de los elementos de antigua impronta mesoamericana que lograron trascender a los embates de la implantación del sistema colonial. No está demás señalar que, en el transcurso de las centurias que perduró la dominación hispana en Yucatán, los clérigos denunciaron las prácticas “pecaminosas” de los mayas, “idolatrías” que cotidianamente refieren una importante cantidad de ceremonias llevadas cabo en los solares de las casas, milpas, colmenares, cenotes, cuevas, los sitios más recónditos de los montes, e incluso, la cima de los cerros. Muchos de estos elementos de antigua impronta coexisten en la actualidad y todavía son utilizados por los *hmenob* en distintas ceremonias.

Finalmente, la investigación planteó el desarrollo de una segunda fase de análisis que abarca los años 1813 a 1950. Este marco cronológico, contempla asimismo el análisis de la transición de los modelos productivos vinculados a las estancias maicero-ganaderas, la presión sobre la tierra derivada de las leyes de desamortización de los bienes eclesiásticos, la expoliación de la territorialidad indígena, la conformación de las haciendas henequeneras y su impacto en la creación del peonaje, así como su posterior declive a mediados del s. XX.

Población, tributo y encomienda.

Además del desplazamiento a mediados del s. XVI, comenzaron a surgir las primeras tasaciones tributarias, mismas que permiten entrever las estimaciones más tempranas referentes al volumen de la población indígena a nivel peninsular (García Bernal 1978). Para poner en contexto estos datos, es necesario señalar que los procesos de conquista y sus distintos momentos, implicó en muchos casos la congregación de la población originaria en asentamientos de mayor densidad demográfica. A diferencia de lo que ocurrió en el altiplano central de México y el Reino de Guatemala, este tipo de movilidad poblacional en Yucatán, denominado “reducción”, debido a las condiciones geográficas, la lengua y la similitud geográfica, se realizó sin mayores contratiempos.

De este modo, los asentamientos o parcialidades (población dispersa) quedaron bajo la jurisdicción de un asentamiento nuclear o capital correspondiente a una provincia que regía a una circunscripción político-administrativa (García Bernal 1978). Lo anterior, indica que se optó por mantener a la población en sus asentamientos originarios, o bien, desplazarla a las inmediaciones más cercanas, con jurisdicciones establecidas por la Iglesia y la Corona que cimentaron los mecanismos de imposición que recayeron sobre la población nativa, independientemente de su lugar de residencia.

Estos mecanismos de compulsión nos permiten entrever, tempranamente, la manera en que el tributo y la encomienda se entrelazaron con la dinámica poblacional, la subsistencia y las diferentes formas de compulsión. En su acepción más elemental, es posible mencionar que una encomienda, como prebenda otorgada a los españoles por su desempeño militar durante la conquista, implicaba una retribución por poner bajo la tutela del rey los territorios ultramarinos del Nuevo Mundo (García Bernal 1978). De tal suerte que, los nuevos vasallos del rey, en este caso, los mayas yucatecos, debían retribuir a la Corona una parte de estos dividendos recolectados por la Real Hacienda, derivados del cobro de estas contribuciones impositivas, a modo de renta o recompensa pasaba a manos de los encomenderos.

Si bien, en primera instancia, los encomenderos buscaron establecer legalmente la perpetuidad generacional de esta renta, lo cierto es que entre 1542 y 1549, la Corona buscó establecer una política de control sobre aquellos beneficios, generalmente heredables a dos generaciones (la del titular y su heredero), aunque se sabe que, en casos excepcionales, esta prerrogativa llegó a heredarse hasta por cuatro generaciones (García Bernal 1978). A pesar de que la Corona hizo lo propio confiscando un gran número de encomiendas desde la primera mitad del siglo XVI, se sabe que algunas de ellas lograron trascender hasta los albores del siglo XVIII (García Bernal 1978).

Este hecho implicaba “repartir” a los indios, e incluso, a pueblos enteros que, a pesar de lo anterior, no era la fuerza de trabajo la que se transfería en calidad de prerrogativa, sino el producto de ésta manifestada a partir del tributo en dinero o en especie (Viqueira 1997). La mercancía se podía conmutar según al valor de cada producto en el mercado, aunque la realidad era que su equivalencia casi siempre se encontraba tasada a un precio muy por debajo de su valor real (Viqueira 1997).

Según estimaciones, para el año 1549, un total de 36,870 indígenas mayas pagaban tributo en la jurisdicción de Mérida, la más grande en toda la península (González Cicero 1978; Chamberlain 1974). En Valladolid se estima que fueron 15,094 y 5,820 en la jurisdicción de Campeche (González 1978; Chamberlain 1974). Desafortunadamente no se cuenta con las estimaciones de la población de la costa oriental (Chetumal y Bacalar). Tomando en consideración una cifra aproximada de cuatro personas por cada indígena varón que pagaba tributo per cápita, el estimado poblacional sería de al menos 230,000 personas en Yucatán (González Cicero 1978; Chamberlain 1974).

Esta cifra inicialmente acuñada por Roys (1957) y seguida por autores como Chamberlain (1974), y más recientemente por Borah y Cook (1971), ha sido revisada por García Bernal (1978). Esta autora pondera asimismo los valores de conversión (con un factor de 4.5 por cada tributario), poniendo de relieve importantes acotaciones referentes al subregistro inherente a la ausencia de matrículas tributarias de los habitantes de la parte oriental, el cono sur de la Península y el Petén, sitio predilecto de los indios montaraces y “huidos”. La rectificación de las cifras de población estimadas en 57,644 tributarios (hombres casados) cuyo cálculo poblacional arroja una cifra de 259,398 habitantes, si bien resulta interesante, hay que tomarla con reserva, considerando que el siglo XVI representó una gran debacle poblacional para los pueblos indígenas. De hecho, se contempla que al menos 50 por ciento de la población maya sucumbió al asedio militar y, sobre todo, a las enfermedades derivadas del denominado “choque microbiano” (García Bernal 1978).¹⁸

Para el área de Hocabá, cabecera cuyas inmediaciones albergaban a la población sujeta de Homún y Yalahau, se estima de acuerdo con los registros derivados de la tasación de 1549 una matrícula de 1,200 tributarios, mismos que estaban bajo la tutela de los primeros encomenderos de estos asentamientos, Pedro Álvarez (alias Perálvarez) y Francisco Pacheco. Asimismo, el asentamiento de Sotuta se encontraba repartido por mitades entre los encomenderos Gonzalo Méndez y Juan Magaña, con una matrícula total de 720 tributarios (García Bernal, 1978).

El tributo abarcaba una amplia variedad de géneros, destacando entre ellos las mantas de algodón, gallinas, maíz, frijoles, cera y miel de abeja melipona, chile, comales, ollas y

¹⁸ La acepción más temprana de la tasación indica que en principio quedaban exentos de contribución los ancianos, los enfermos, así como los descendientes de la nobleza indígena y aquellos que ejercían cargos político-administrativos en las comunidades (García Bernal 1978: 374-378).

cántaros de barro, así como pescado y sal en los asentamientos costeros (García Bernal 1978). Estas contribuciones debían realizarse cada cuatro meses, es decir, por los “tercios” de cada año por un monto aproximado de 24 reales (García Bernal 1978), lo que conllevó a una mayor presión ambiental por el aumento en el paso de una producción de autoconsumo a una de exportación dentro de una lógica de mercado centralizado en Mérida, con una demanda de productos específicos.

No es del todo claro lo que acontece con las encomiendas de la circunscripción de Hocabá en los años posteriores, sin embargo, es posible establecer que Francisco Pacheco ostentó el título de encomendero hasta el año de 1579 (García Bernal 1978). Otros nombres que figuran son los de Francisco Solís (1607), su descendiente Ignacio de Solís Osorio (1688), que al igual que Pedro Álvarez, Gaspar Juárez de Ávila (1549) poseían una fracción de esta encomienda junto con la de Timucuy, tal como aconteció con doña Isabel de Lara, caso similar al de Juan de Magaña Pacheco (1597) que poseían la mitad de la encomienda de Tahmek, y al unísono, Martín Pacheco tenía en usufructo las mitades de Hochtun y Tahmek (García Bernal 1978). Las encomiendas más grandes estuvieron en manos de Gaspar Pacheco (1549) y Melchor Pacheco para el año de 1565. Para el año 1607, heredó a segunda vida esta encomienda el vástago Gaspar Pacheco, así como Luis Melchor Pacheco de Solís en tercera generación (García Bernal 1978). De igual modo, se registra la potestad de Alonso de Solís por concepto de 300 ducados de renta perpetua concedidos en 1617 y de José de Solís Valderrábano, conde de Montellano en 1689 (García Bernal 1978).

Para el caso particular de los pueblos de Homún y Cuzamá, cuyas demarcaciones albergan parte de lo que actualmente ocupa la reserva de Yalahau, los registros indican que estos asentamientos estuvieron encomendados por mitades (García Bernal 1978). La tasación más temprana indica que para el año de 1549 las encomiendas de estos emplazamientos además de estar divididas en mitades pertenecían a la real Corona (García Bernal, 1978). En la segunda mitad del siglo XVI la mitad de ambos asentamientos pasó a manos de Juan Vela (1564) y de un encomendero de apellido Gómez del Castrillo (García Bernal 1978). Durante el siglo XVII, Juan Vela de Aguirre heredó en segunda vida las prerrogativas de su padre (1607), sin embargo, para el año de 1666 este usufructo pasó a manos de doña Catalina de Rúa y Santillán, posteriormente a las de Juan Serrano (1687), hasta llegar a las manos de su última heredera, en segunda vida o generación, Ana Serrano (García Bernal 1978). Lo propio

ocurrió este mismo siglo con las dos mitades restantes que pasaron a las manos de Cristóbal Gutiérrez Flores (1607), y posteriormente a las de Juan del Castillo y Quiñones y Pedro Mézquita en 1629, prerrogativas que al parecer se extendieron hasta el año de 1688 (García Bernal 1978).

Territorialidad, producción y subsistencia

Al unísono con el surgimiento de las prerrogativas a los conquistadores, la implantación de las cargas impositivas a los indios, los servicios personales y las cargas eclesiásticas emanadas del pago compulsivo del diezmo y otras obvenciones, en el horizonte colonial se avizora también la expansión de la actividad pecuaria. No hay duda de que las consecuencias culturales y ecológicas más profundas de la conquista de América se derivan de la introducción de especies vegetales y animales provenientes del Viejo Mundo. Se sabe que, la importación más temprana de ganado se llevó a cabo en el segundo viaje de Colón el año de 1493 en los territorios insulares del Caribe (Lefebvre y Manin 2019). Subsecuentemente, Hernán Cortés introdujo estas especies en la Nueva España, caso similar a lo que ocurrió con los Montejo en Yucatán. De hecho, una de las primeras especies animales importadas fue el cerdo, debido a que se transporta y reproduce fácilmente y es que, los colonizadores se mostraron muy renuentes a modificar su dieta por aquellas viandas que comúnmente preparaban los habitantes nativos de la península (Lefebvre y Manin 2019).

En Yucatán la actividad pecuaria constituyó un aspecto nodal del devenir agrícola, ya que las estancias ganaderas “no sólo representaron un patrón de desarrollo regional acorde con las características ecológicas de la península, sino también, una etapa realmente importante en el proceso de ocupación del suelo por parte de los españoles, aunque el ritmo de evolución fuera mucho más pausado que en el resto de México y su progreso notoriamente más restringido” (García Bernal 1991). De hecho, las incipientes rancherías y estancias ganaderas representan el antecedente de las formaciones económicas que, más tardíamente, dieron paso a las haciendas y plantaciones, que sin duda ejercieron una grave presión sobre las tierras indígenas. Esta presión, se agudizó paulatinamente ante la confiscación de encomiendas y la restricción de las prerrogativas a los colonizadores por parte de la Corona (García Bernal 1978).

Prácticamente, la actividad ganadera con fines comerciales surgió en Yucatán desde los inicios de la colonización ante la ausencia de recursos mineros y agrícolas de importante valor comercial (García Bernal 1991; Patch 1994). Así, desde mediados del siglo XVI se registran estancias de ganado (mayor y menor) que contienen registros de la cría de ovejas, cabras, vacas y equinos instaladas por los primeros encomenderos aprovechando los ingresos provenientes de la tributación indígena, población que asimismo se encargaba del cuidado de los rebaños (García Bernal 1991; Patch 1994).

Algunas estancias fueron incorporando paulatinamente, tal como lo señaló el regidor de Mérida Sebastián Vázquez de Andrada (en 1574) del cultivo de añil y la crianza de cerdos (García Bernal 1991; Patch 1994). En los albores del siglo XVII existieron estancias como las de Chacsinkin y Tepecal con 800 cabezas de ganado mayor, que además contaban con “casa, cocina, pozo, pila y todo lo demás a ella anexo”; corrales, pastos, abrevaderos, norias, árboles silvestres y frutales, así como casas de paja. Estancias cercanas a la capital provincial, Mérida, tales como Chichí Suárez, para el año de 1640 albergaban más de 300 cabezas de ganado vacuno, caballos y bestias de carga...” (Patch 1994).

En este orden de ideas los registros notariales de la época indican que, en 1699, Nicolás Carrillo de Albornoz, regidor de Mérida, fue dueño de la estancia Holactún cerca de Dzecuzamá mientras era encomendero de Homún-Cuzamá (García Bernal 1991; Patch 1994). Años más tarde, su yerno Juan Manuel Chacón estableció en las inmediaciones de esta misma zona, la estancia de Pixixá (García Bernal 1991; Patch 1994).

No hay que dejar de señalar que, a través del concepto de composición, los colonizadores buscaron legalizar las tierras irregulares poseídas sin título a través de una aportación pecuniaria, siendo que esta ocupación ilegal consolidó en gran parte la expoliación de los territorios indígenas en prácticamente toda la península (García Bernal 1991). De este modo, se “legitimó” la usurpación de los fundos indígenas, práctica cuyo auge entró en vigor a partir de la segunda mitad del siglo XVII (García Bernal 1991). En forma adicional, la competencia por el pasto para la alimentación del ganado fue común entre los dueños de las estancias colindantes y, asimismo, las querellas de la época señalan que el ganado muchas veces invadía las tierras comunales, así como las milpas de los agricultores mayas causando notables estragos (García Bernal 1991).

Aunado a lo anterior, es importante señalar que la sociedad colonial transitó por notables calamidades y tiempos aciagos que hacían más compleja la supervivencia colectiva, pues los habitantes de los pueblos se enfrentaban constantemente a periodos aciagos marcados por la hambruna, enfermedad y muerte que arrasaba prácticamente con provincias enteras (Peniche 2010). Cuando esto acontecía, paliaban la inanición a partir de las hojas y frutos de ramón y otras raíces (Peniche 2010). Por si esto no fuera suficiente, las sequías y huracanas causaban estragos agrícolas y periodos constantes de hambruna y escasez (Peniche 2010) (Tabla 3).

Fecha	Evento
1551	Sequía, hambruna.
1552	Huracán, inundación.
1561	Huracán.
1564	Sequía.
1568	Huracán.
1571-1576	Epidemias, falta de lluvias, sequías, escasez de maíz, hambruna.
1587, 1588, 1590, 1592	Plaga de langosta.
1623	Hambruna, lluvia excesiva.
1631	Plaga de Langosta, hambruna, mortandad.
1648-1651	Epidemias, mortandad, sequía, falta de alimentos.
1661	Sequía, heladez.
1686	Sequía.
1692	Huracán.
1767	Plaga de langosta, huracán
1768-1770	Plaga de langosta, sequía, hambre, muerte.
1772	Huracán.
1773-1774	Sequía-Hambre.
1785	Huracán
1805	Falta de lluvia

Tabla 3: Cronología de desastres y sequías en Yucatán siglos XVI-XVIII (tomado de Peniche, 2010).

En las décadas finales del siglo XVII, la producción y abasto de granos hacia los asentamientos de mayor relevancia en la península se realizaba a través de contratos de producción. Por ejemplo, al menos trece villas y pueblos de la región oriental cercanos a Tizimín y Temozón se encargaban de realizar el abasto de maíz (Patch, 1994). De modo similar, cerca de noventa asentamientos se encargaban de suministrar este mismo insumo hacia Mérida, entre ellos se encontraban las poblaciones de la entonces administración del partido de Beneficios Bajos, en cuya jurisdicción se encontraban Hochtún, Seyé, Tahmek, Xocchel, Homún, Cuzamá, Hocabá, Huhí, Sahcabá, Sanlahcat, Cantamayec, Yaxcabá y Mopilá (Patch 1994). Esto significó un cambio en la lógica de producción y consumo de las nacientes villas, con implicaciones en el paisaje y la biodiversidad, debido a la predilección de productos dictaminados por una nueva por una lógica de mercado.

Se sabe que, durante el siglo XVIII los terrenos comunales de los pueblos indígenas que pasaron a manos de españoles cimentaron su premisa de adquisición en la apropiación de pozos, reholladas y cualquier cuerpo de agua existente, ya que dicho recurso garantizaba su poblamiento y explotación (Kú 2023). Se sabe también que, la importancia de estos cuerpos de agua era tal, que incluso llegaron a fungir como mojoneras naturales (Kú 2023). De igual modo, en el caso de Homún, Sotuta y Hocabá, los hidrónimos servían también para delimitar el nombre de las estancias y parajes en cuya extensión existían importantes cuerpos de agua (Kú 2023). La carencia del vital líquido implicaba el acarreo de este insumo desde lugares lejanos, o bien, la apertura de pozos, de entre diez a quince brazas de fondo, trabajados con “muchísimas penurias para los naturales” por ser “peña viva” y laja el terreno de Yucatán (Solís 2003). No es de sorprender, entonces, que durante la Colonia el éxito de este sistema productivo haya dependido del abastecimiento continuo de agua (Kú 2023; Carrillo 2019).

En 1701, el gobernador Martín de Urzúa otorgó uno de los primeros permisos para el establecimiento de las primeras estancias en los parajes de la circunscripción de Cuzama, Sotuta y Homún (Kú 2023). Concretamente, otorgó a Juan Bautista Cámara permiso para poblar los parajes de Xukú y construir corrales, pilas, estanques, norias y cualquier otro basamento necesario para el usufructo de estos “montes, sabanas, pastos y abrevaderos” que en el pasado formaron parte de las tierras comunes de los mayas de esta región (Kú 2023).

En las décadas siguientes, la rampante proliferación de unidades productivas en diferentes latitudes cercanas a Hocabá-Homún, Sotuta y Tekit continuó su imparable marcha. Incluso antes de culminar la primera mitad del siglo XVIII comenzó a vislumbrarse en forma más clara la difusa línea que anteriormente delimitaba el usufructo y aprovechamiento de estos emplazamientos. y es que, anteriormente, ante la proliferación de rancherías y estancias resultaba complejo diferenciar a las nacientes haciendas de sus antecesores (García Bernal 1978). Por tal motivo, la historiografía ha señalado que a partir de la segunda mitad de este siglo la diferencia entre estancia y hacienda estriba en la capacidad productiva y, asimismo, en la prerrogativa o licencia conferida para tener ganado mayor, situación que se acentuó de manera particular después del impacto de las Reformas Borbónicas durante las postrimerías del siglo XVIII (García Bernal 1978).

La documentación de la época indica también que para el año de 1777, la zona de Campeche y Sahcabchén era la más próspera de la península, junto con Hunucmá y Maxcanú, mientras otras regiones tales como la de Sotuta, Hochtún, Hocabá y Homún tuvieron un apogeo un poco más modesto, aunque no del todo desdeñable comparado con la relativa pobreza que mostraban las arcas del resto de las poblaciones mayas de la península, de acuerdo con las tasaciones de los tributos y otras contribuciones impositivas registradas, tales como los diezmos y otras obvenciones eclesiásticas ¹⁹ (Patch 1994). Los registros documentales de la época refieren también que entre los años de 1777 a 1796, la población maya de la zona Hochtún-Hocabá-Homún poseía tierras cuyo usufructo contabilizaba una producción con un valor de 47 pesos, de las cuales un 30 por ciento correspondía a la crianza de ganado, 40 por ciento a la crianza de abejas melipona, y un 29 a la agricultura (Patch 1994).

A pesar de que la movilidad social resultaba limitada durante la época colonial, se registran casos como el de Francisco Tun del curato de Hocabá, dueño de la Estancia Sac Nicté que en 1778 contribuyó solamente en diezmos con 42 fanegas de maíz, 2 almudes de frijoles y 5 pesos y 4 reales derivados de la producción de cera y miel, contabilizando una suma total de 18 pesos y tres reales, con lo que se puede deducir que poseía el tercer fundo

¹⁹ Para el año de 1795 la producción de arroz en esta misma zona cobró mayor relevancia equiparándose, por ejemplo, con la producción de algodón y maíz (Patch 1994).

más productivo de la región Hochtún-Hocabá-Homún (Patch 1994). Según parece, varios fundos pequeños de esta área se encontraban en manos de indígenas mayas (Patch 1994).

Como ya se ha mencionado, en Yucatán, a diferencia de lo que aconteció en otras latitudes novohispanas, se aprecia el surgimiento un tanto más tardío de las haciendas hacia finales del siglo XVIII como resultado del impulso a la propiedad individual (Machuca 2010). De tal suerte que, la hacienda se perfiló como un modelo económico de capital importancia que incluyó una participación más diversa de los estratos sociales, en los que asimismo lograron incursionar algunos descendientes de linajes indígenas prominentes. Es posible señalar que, incluso antes del Porfiriato, algunas haciendas todavía eran confundidas con pequeñas estancias y rancherías debido a la modesta confección e infraestructura de estas empresas agrícolas y ganaderas, cuyas proporciones arrojaban en sus inicios una incidencia de bajo avalúo comercial que oscilaba entre el rango de los 200 y 5000 pesos (Machuca 2010). En el caso de los “amos” mayas, se sabe que algunos de ellos ante la incapacidad de solventar los gastos de producción optaron por rematar sus propiedades (Machuca 2010). Otros más, lograron conservar o transferir sus posesiones, tal como aconteció con Antonio Cocom de Xluch, Pascuala Balam de Xhobonyá, y Pedro Cab de Tzutzuyil (Machuca 2010).

Durante el siglo XIX, las figuras del poder tradicional permanecieron articuladas a los cabildos indígenas con el apoyo de los subdelegados y curas (Machuca 2010). En ocasiones, este entramado sociopolítico les permitía competir por la adquisición de terrenos y parajes particulares para usufructo personal (Machuca 2010). Un ejemplo ilustrativo en este sentido se atisba en la circunscripción del área de Homún colindante con importantes cuerpos de agua, reholladas y lagunas que se encontraban en sus inmediaciones, mismos que se encontraban cercanos a los actuales terrenos de Yalahau, la hacienda Chichí de los lagos, los parajes de los *chabo'ob* y las tierras de los *cheles* que se ubicaban más al sur del cenote Xpacabtún que delimitaba con la porción oriental de la hacienda Usil (Kú 2023).

Con relación a lo anterior, los registros documentales indican que Pablo Chablé se casó con una descendiente del linaje Puch que respondía al nombre de Dionisia y producto de esta unión nacieron Santiago, Juana, Casimiro, Lorenza y Juan (Machuca 2010). Al paso de los años Pablo logró adquirir la hacienda Catzimechén en Homún. Desafortunadamente al poco tiempo enviudó, y debido a ello repartió la mitad de esta posesión entre sus hijos (Machuca 2010). Al poco tiempo contrajo nupcias con María Ceh, entregando como dote su

mitad de la hacienda Catzimechén, “siete vacas, tres yeguas, tres mulas y cien colmenas” (Machuca 2010).

En el extremo opuesto de esta situación se encontraba la mayor parte de los habitantes de los pueblos indígenas que no pertenecían a los estratos privilegiados y, por tanto, no tenían acceso a la tierra, mucho menos a su usufructo. Se puede decir, entonces, que los mayas comunes o *winiko'ob* conformaban un gran estrato subalterno, el cual brindaba la fuerza de trabajo necesaria para alimentar el andamiaje de compulsión impuesto desde la Colonia, cuyo devenir estuvo marcado por la explotación y el despojo, condición que desafortunadamente formó la columna vertebral de la transformación de las haciendas maicero-ganaderas, en haciendas henequeneras en el transcurso del siglo XIX (Machuca 2010).

Luneros, acasillados y hacendados henequeneros

El largo ocaso del régimen colonial transcurrió al unísono con el desplazamiento de los denominados luneros, fuerza de trabajo indígena que abandonó sus pueblos para migrar hacia las estancias y haciendas. Esta movilidad comenzó a despuntar en el noroeste y el área central de Yucatán, zonas estrechamente imbricadas al trabajo agrícola y ganadero de los hacendados, la posesión de aguas y montes, y la contracción de la territorialidad de los pueblos indígenas, cuyos habitantes, al ver comprometida su subsistencia comenzaron a refugiarse en estos espacios voluntariamente, razón por la cual tenía la obligación de prestar cada lunes su fuerza laboral en el sitio donde se avecindaban, situación que los compelió a rozar al menos 10 mecatres de milpa y cultivar diez mecatres de caña (Kú 2023). Además de estas tareas, se veían en la necesidad de cortar leña, conducir reses e incursionar en las tareas de desmonte. No está demás señalar que esta movilidad y su respectiva coerción formó un campo fértil para la posterior conformación del peonaje y su respectivo acasillamiento (Kú 2023).

Los enclaves de producción que aglutinaban una importante cantidad de fuerza de trabajo indígena continuaron proliferando en los parajes y haciendas ganaderas entre 1866 y 1877, en un territorio caracterizado por formar parte de la actual Reserva Geohidrológica del Anillo de Cenotes. Así lo indican los documentos referentes a la subsecuente emisión de la legislación sobre terrenos baldíos que, propició la rectificación de los fundos y haciendas de

la jurisdicción de Homún y sus inmediaciones, tal como aconteció en las haciendas de Dzecuzamá, Aculá, Xcullutil, San Antonio Usil y Cullutil (Kú 2023; 2021).

Para la elaboración de estos materiales cartográficos resultaba capital la intervención de las autoridades de la corporación municipal, que supervisaban los recorridos que certificaban los linderos de los asentamientos (Kú 2023). En este mismo sentido, se aprecia el visto bueno del entonces presidente municipal de Homún, José Esteban Rodríguez, personaje que había participado en el combate en contra de los mayas insurgentes de la zona de Izamal, a inicios de la Guerra de Castas, en calidad de capitán de la Compañía de Hidalgos de Homún en 1851 (Kú 2023) (Figura 11).



Figura 11: Rectificación cartográfica en la zona Yalahau-Homún. Se muestran los enclaves de producción y aglutinamiento de fuerza laboral indígena en la zona centro del Edo, entre 1866-1877. Homún es uno de los puntos de relevancia productiva y concentración poblacional durante el s. XIX (imagen tomada de Kú 2023: 79). Sitio de estudio ●

Por otro lado, hay la necesidad de señalar que hasta mediados del siglo XIX las norias facilitaban a las pequeñas rancherías y haciendas el aprovisionamiento de agua, y es que, independientemente de que un pozo o cuerpo de agua tuviese la maquinaria suficiente para la extracción de agua, o simplemente se tratase de una cavidad horizontal profunda con un brocal de mampostería, esta tecnología no canceló de ningún modo la presencia de los denominados cargadores de cántaros que acarreaban el vital líquido desde los cenotes abiertos, lagunas, como en el caso de Yalahau, o incluso, desde los cuerpos de agua que se encontraban en el interior de los cenotes. De hecho, las bombas de pistón aspirantes fabricadas en hierro, así como los dispositivos centrífugos impulsados por las aspas de viento no aparecieron en el horizonte peninsular sino hasta la segunda mitad del siglo XIX (Taracena 2021).

Así, la aparición de este importante eslabón tecnológico conformó la pieza medular para el descubrimiento y explotación de las corrientes subterráneas de la península que requería el despunte y explotación del agro, la industria y la economía doméstica como una visión de un futuro prístino sin malas cosechas, hambrunas y sequías aunada al súbito impulso de la agricultura y la industria. Sin embargo, detrás del rostro de esta ideología de progreso heredada de la Revolución Industrial descansaba la añeja concepción de la servidumbre natural que justificaba, además de la extralimitada coerción sobre la fuerza de trabajo, la imperante vigencia de una rampante asimetría social (Kú 2023; Taracena 2021).

Así, las postrimerías del siglo XIX y los albores de la centuria ulterior traslucen el cambio del pueblo maya peninsular de campesinos milperos a campesinos henequeneros, sinónimo del peonaje furtivo cuasi feudal, donde el endeudamiento eterno y la explotación marcaron el rumbo del monocultivo y el despunte económico regional gracias a la inserción de la fibra de sisal y sus derivados al mercado internacional.

A grandes rasgos, se puede mencionar que el proceso económico de la producción henequenera abarcaba tres fases: la etapa agrícola, que comprende la obtención de la hoja o materia prima; el procesamiento industrial de la hoja para la obtención de fibra en las máquinas de raspado; y finalmente la etapa industrial, que consiste en la transformación de la fibra en productos mercantiles tales como hilos agrícolas, jarcias, cordeles, costales, tapetes y demás productos. El 45 por ciento del Producto Interno Bruto de Yucatán guardaba una

estrecha relación con el henequén y cerca de medio millón de personas, la mitad de la población del Estado dependía de esta actividad (Villanueva 2012).

En este orden de ideas, es posible mencionar que la zona henequenera se dilataba a lo largo de la región noroccidental de Yucatán “abarcando un total de 1’119,00 hectáreas” en 52 municipios habitados por alrededor de 95,000, trastocando los asentamientos de: Abalá, Acancéh, Baca, Bokobá, Cacalchén, Cansahcab, Conkal, Cuzamá, Chapab, Chicxulub, Chocholá, Dzemul, Dzidzantún, Dzilam González, Halachó, Hocabá, Hoctún, Homún, Hunucmá, Huhí, Izamal, Kanasín, Kinchil, Kopomá, Maxcanú, Mocochoá, Motúl, Mérida, Muxupip, Sacalum, Samahil, Sanakat, Seyé, Sinanché, Suma, Tahmek, Telchac, Tekal de Venegas, Tekantó, Tekit, Temax, Tepakán, Tetíz, Teya, Timucuy, Tixkokob, Tixpéhual, Uucú, Umán, Yaxcucul y Yobaín (Villanueva 2012).

Al perfilarse los decenios finales del siglo XIX, el erosiónamiento de las comunidades indígenas aunado al despojo territorial de las tierras comunales, la política secular juarista, la desamortización de los bienes eclesiásticos y la aparición de la denominada Ley Lerdo, causó un grave perjuicio al corporativismo y las formas tradicionales de subsistencia en los entornos rurales. Todo ello, derivó en un rampante latifundismo hacendario cuya avidez por la acumulación de fundos y el desarrollo de los sistemas productivos agudizó aún más la recalcitrante compulsión que recayó sobre los hombros de la población maya. Así, las haciendas maicero-ganaderas paulatinamente fueron modificando sus procesos productivos dando paso a una actividad primordial fincada en el monocultivo del henequén, que a la postre se convirtió en el motor de la economía regional por encima de la actividad pecuaria (Villanueva 2012).

El Estado se encargó de legalizar la mano de obra barata y obediente para los hacendados al dictar leyes que prohibían el abandono de los peones de sus haciendas, salvo en los casos en que “sus amos” les extendieran un certificado o pase de no adeudo o finiquito de contrato, con el cual un peón podía ofertar sus servicios en otra hacienda, algo que prácticamente era imposible de conseguir tomando en cuenta que la deuda adquirida al momento de la contratación era a todas luces impagable, e incluso, trascendía a sus demás descendientes (Villanueva 2012).

La servidumbre esclavista articulada al desarrollo del capitalismo mundial, fincada en la producción de Henequén en Yucatán tuvo diversos matices. La incipiente producción

correspondiente al año 1860 a duras penas logró cubrir unas 2,500 hectáreas y para el año de 1916 la producción de la floreciente región henequenera ya abarcaba 192,000 hectáreas, correspondientes a una producción de más de 200,000 toneladas de fibra (Villanueva 2012). Por más de medio siglo de crecimiento constante, lapso en el cual la producción creció más de 700 por ciento, se marcó el devenir de la actividad henequenera hasta su caída en el lustro subsecuente (Villanueva 2012).

En 1920, México perdió el monopolio de la producción de fibra y para el año de 1931, la producción continuó su vertiginoso descenso hasta alcanzar apenas una producción de 74,000 toneladas (Villanueva 2009). Años más tarde en 1937, bajo el influjo del reparto agrario impulsado por el presidente Lázaro Cárdenas se promulgó la creación de los denominados ejidos henequeneros, fragmentando la distribución territorial de las zonas henequeneras y agropecuarias estratégicas (Villanueva 2009; 2012). Este decreto afectó “las haciendas henequeneras para dotar de tierras por la vía ejidal a los trabajadores rurales, creándose 272 ejidos con una superficie de 1,294,282 hectáreas, de las cuales 123,377 correspondían a plantíos de henequén” (Villanueva 2009; 2012). Esta dotación ejidal pretendió resarcir entre la población maya la expoliación histórica que habían sufrido desde la Colonia, pese a ello, la entrega de henequenales no puso fin a la crisis de este sector, y tampoco eliminó de raíz las prácticas de sometimiento entre trabajadores y hacendados, ya que el Estado debía actuar, al menos hipotéticamente, como financiador, gestor y comercializador de la producción (Villanueva 2009; 2012).

De este modo, se fincó un proceso de proletarización cimentado en el capital estatal, siendo que los peones acasillados simplemente cambiaron de patrón, por decirlo de algún modo, y tampoco lograron recuperar su condición de productores campesinos. De manera posterior al reparto de los plantíos, se creó una asociación de productores denominada Henequeneros de Yucatán, conformada por ejidatarios y productores independientes, es decir, productores rurales privados, quedando los exhacendados como socios mayoritarios, ahora bajo la denominación de pequeños parcelarios (Villanueva 2009; 2012). A pesar un efímero repunte en la demanda de la producción henequenera inherente a la Segunda Guerra Mundial, el año 1955 marcó el colapso definitivo de esta asociación de productores henequeneros marcada por la corrupción y el desfalco de sus dirigentes, por un lado, y las protestas de los ejidatarios por el otro, dando paso a su total bancarrota (Villanueva 2009; 2012).

En el ocaso de esta actividad, el gobierno federal se hizo cargo de la administración de los créditos que buscaron incentivar la decadente producción agrícola a través del Banco de Crédito Ejidal, buscando sin éxito incentivar la autonomía productiva de la colapsada industria henequenera que, para aquellos años, había sucumbido en su totalidad ante la aparición de las fibras sintéticas derivadas del plástico y otros materiales (Villanueva 2012). Esta institución fue sustituida en 1961 por el Banco Agrario de Yucatán, posteriormente, con la aparición del CORDEMEX en 1963 y el Banco de Crédito Rural Peninsular en 1975 el gobierno de Yucatán asumió el control de la producción henequenera, quedando de este modo los ejidatarios como asalariados del estado (Villanueva 2009).

Poco después del triunfo revolucionario y en el contexto del reparto agrario cardenista, se atisba el último eslabón del reordenamiento territorial que llevó al abandono de gran parte de la zona centro-sur de Yucatán que tempranamente sucumbió a los embates de la caída del monocultivo (Villanueva 2012). Es posible advertir con claridad que, al paso de las décadas subsecuentes la súbita contracción de la actividad henequenera que causó el abandono de gran parte de las haciendas, entre ellas las que se encontraban en las inmediaciones de Homún, Hocabá, Sotuta y Cuzama; continuó su marcha con el paso del tiempo abarcando diversas latitudes. En el mejor de los casos, esta transición dio lugar a la diversificación de las actividades productivas que emergieron en la zona oriental a partir de la actividad pecuaria que todavía persiste, al unísono con la zona citrícola del área sur y poniente de la península.

Área Natural Protegida Parque Estatal Lagunas de Yalahau

En el transcurso de las décadas que, corren más allá del primer tercio del siglo XX, hasta hoy día, se evidencia que algunas regiones abandonadas tempranamente durante el colapso henequenero lograron permanecer al margen de la explotación por decreto gubernamental en áreas naturales protegidas, tal como aconteció con Yalahau el martes 8 de junio de 1999 (Figura 12), cuando fue publicado en el diario oficial del Gobierno del Estado de Yucatán el decreto 202, donde se proclamó a esta zona como una reserva natural, aludiendo que:

“Entre las finalidades del establecimiento de áreas naturales protegidas, figuran las de contribuir a la preservación y conservación de los ambientes naturales y de los

ecosistemas más frágiles de la entidad; el de contribuir a la preservación de la diversidad genética de las especies de los ecosistemas, en particular las endémicas, las que estén en peligro de extinción o que se encuentren bajo cualquier régimen de protección y aquellas de utilidad actual o potencial para los habitantes de la entidad; el contribuir a mantener los procesos ecológicos básicos que aseguran el ciclo ecológico regional, la conservación del suelo, la regulación climática y la productividad agropecuaria y pesquera; el promover la investigación científica [...], y asegurar el aprovechamiento sustentable de los ecosistemas y sus elementos”.²⁰

En el transcurso del presente capítulo ha sido posible determinar la forma en que un territorio, en términos de sus particularidades históricas, ecológicas, culturales, y sobre todo espaciales, puede ser concebido como una microregión. El acontecer de este espacio marcado por la historicidad social denota características de un asentamiento de baja densidad demográfica que se articula a un aprovechamiento diverso que fue a transitando, en principio, por una actividad meramente de subsistencia, como aconteció luego de la diáspora de los asentamientos precolombinos de mediados del siglo XV.

Posteriormente, como resultado de la irrupción de los territorios mesoamericanos inherente a la conquista y colonización, este emplazamiento se fue transformando lentamente con el transcurrir de los siglos a través de la incorporación de la explotación pecuaria y la introducción de especies animales y vegetales exógenas, la implantación de los mecanismos de compulsión que recayeron sobre la población indígena, el ordenamiento de una nueva configuración territorial basada en la explotación ecológica y de la fuerza de trabajo existente en la península y la expoliación.

Pasando tempranamente por las manos de los encomenderos, rancheros, dueños de estancias y finalmente hacendados, la explotación de los fundos y cuerpos de agua en la zona de Yalahau, que por largo tiempo se mantuvieron bajo la tutela de la provincia de Hocabá-Homún, perteneciente a la jurisdicción de Mérida, pasando a formar parte del partido de Beneficios Bajos antes de finalizar el régimen colonial, fueron explotados sistemáticamente en nombre de la consolidación de las unidades de producción maicero-ganaderas, que luego del ocaso del régimen colonial se transformaron en florecientes haciendas henequeneras.

²⁰ Diario Oficial del Gobierno del Estado de Yucatán (8 de junio de 1999), pp. 2-5.

Así, el contexto de la consolidación del Estado-nación devela que el surgimiento de los nacientes cabildos republicanos desembocó en la fragmentación de los linderos de Yalahau, fijando las demarcaciones que conocemos hoy en día, junto con la subsecuente emisión de la legislación sobre terrenos baldíos y la rectificación de la agrimensura de las haciendas realizada en Homún entre 1866-1877. Esta configuración revela también los rasgos de una imperante carrera por el acaparamiento de tierras municipales fincada en el latifundismo henequenero que, despuntó antes de terminar el s. XIX y cuya decadencia estrepitosa se ve tempranamente a finales del primer tercio del s. XX, pasmando la continuidad de las actividades productivas en la porción centro-sur de la península, marcando el rumbo de las inmediaciones de Yalahau y configurando de nuevo cuenta su devenir tal y como lo conocemos hoy en día.

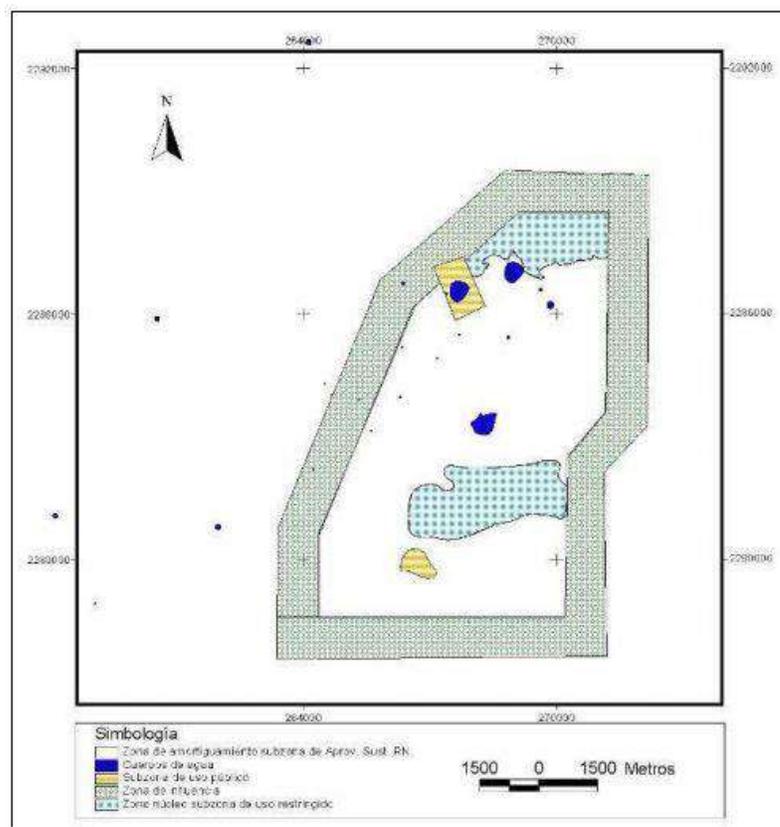


Figura 12: Mapa del ANP-PELY. Plan de Manejo (2005).

Resultados Análisis Paleoecológicos

Exploración de cenotes y recolección de núcleos.

Para esta etapa nos concentramos en los diecinueve cenotes próximos al área de estudio, los cuales fueron recorridos en superficie para validar los criterios de exclusión sobre vestigios prehispánicos cercanos (Fig. 9). De los diecinueve cenotes seleccionamos ocho para la exploración inicial de buceo, ya que los otros once mostraron algún tipo de vestigio próximo.

Después del primer buceo de acercamiento a estos ocho cenotes, concentramos el esfuerzo en cuatro para el muestreo. Al final, cerramos la muestra con tres cenotes, llamados Ciil, Oxola y Kikal, eliminando los núcleos del cenote Sacalum debido a su mal estado de la secuencia estratigráfica entre las capas de sedimento dentro de los tubos. Estos tres cenotes presentaban las mejores condiciones para la recuperación de los núcleos, presentando secuencias estratigráficas en laminillas de sedimentos bien formados, de contextos no perturbados. La obtención de las muestras de sedimentos no consolidados en cenotes se elaboró por medio de una técnica vertical, utilizando tubos de acrílico transparente (exploratorios) y tubos de PVC de dos pulgadas y media (Fig. 13).

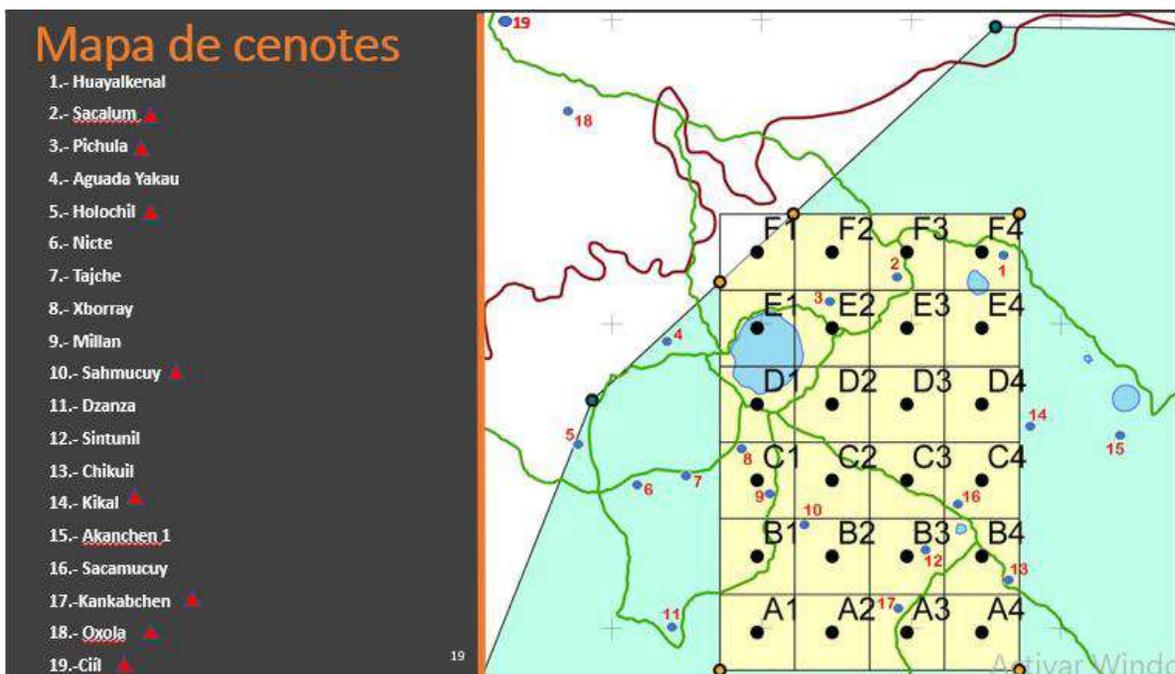


Figura 13. Cenotes localizados y documentados dentro y alrededor del área norte/noroeste de la Reserva. Se puede observar la vasta cantidad de reservorios de agua próximos al asentamiento.

En total, se recolectaron doce núcleos, a razón de cuatro núcleos por cenote, mismos que fueron tomados bajo la dolina principal de derrumbe, donde creemos, se ha depositado la mayor cantidad de polen y materia orgánica, esperando poder captar la huella ecológica del área, maximizando la variación y riqueza de las muestras (Fig. 14). De estos cuatro núcleos por cenote, se seleccionó el tubo con la mejor muestra, basados en un criterio de máxima longitud del registro alcanzada por el núcleo y su integridad estratigráfica.

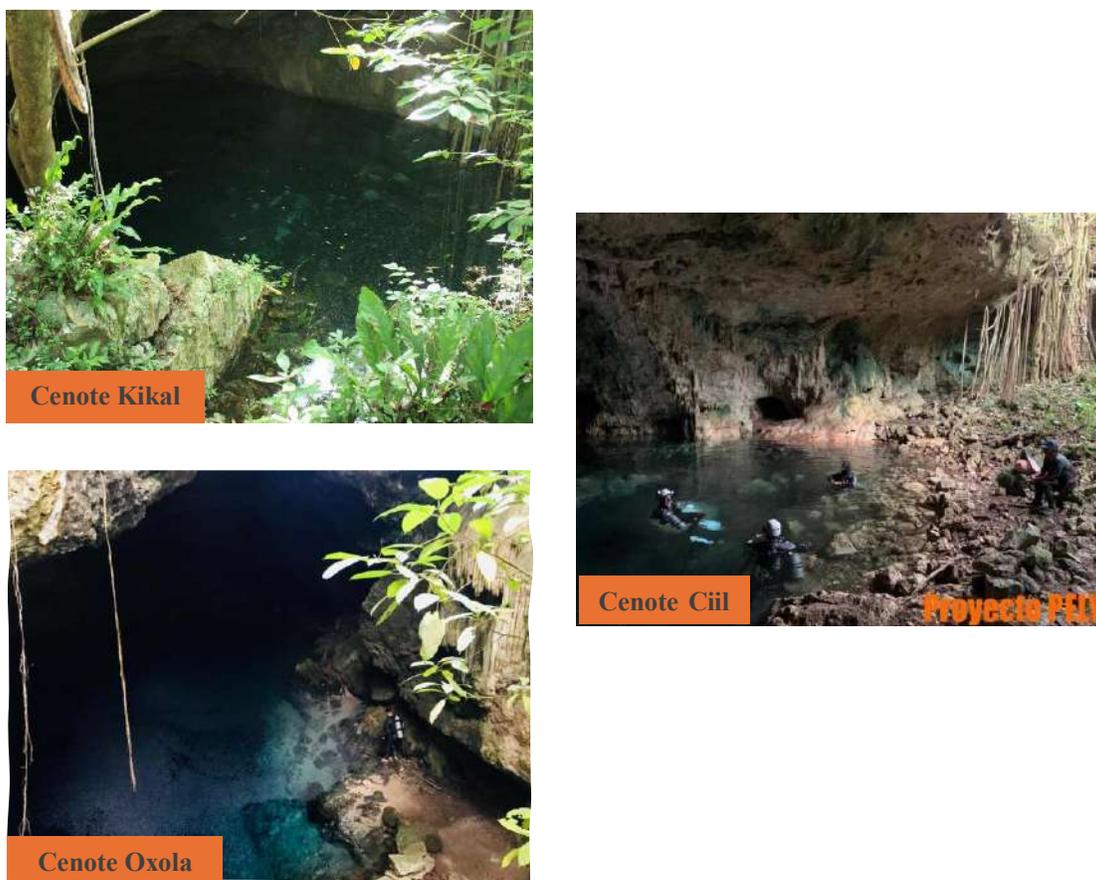


Figura 14. Cenotes explorados y muestreados para la extracción de núcleos de sedimentos no consolidados.

Los tres cenotes que fueron muestreado, Kikal, Oxola y Ciil, actualmente se clasifican como cenotes lóticos semiabiertos, con caverna. Por consiguiente, esto proporciona una base fundamental para comprender la variación en la geoquímica de los archivos sedimentarios a lo largo del tiempo.

Análisis de núcleos

Mediante el análisis de fluorescencia de rayos X (XRF), se detectaron un total de veinte diferentes elementos (Fe, Mn, As, Zn, Cu, Ni, Th, Pb, Nb, Zr, Y, Sr, Rb, Ti, Ca, K, P, Si, Al, Mg). Sin embargo, para este estudio solo se utilizaron los siguientes elementos Ca, Sr, Fe, Rb, Al y Zr, siendo que fueron los que presentaron una variabilidad estadísticamente significativa y un registro relativamente continuo a lo largo de los núcleos. A estos, se suman las mediciones de TN, TC, TIC, TOC, CaCO₃ y $\delta^{13}\text{C}$, resultados del análisis de la química orgánica, para un total de doce elementos a describir y comparar a la largo del núcleo y entre núcleos, ya que estos se superponen temporalmente entre sí en algunas secciones (Figura 15).

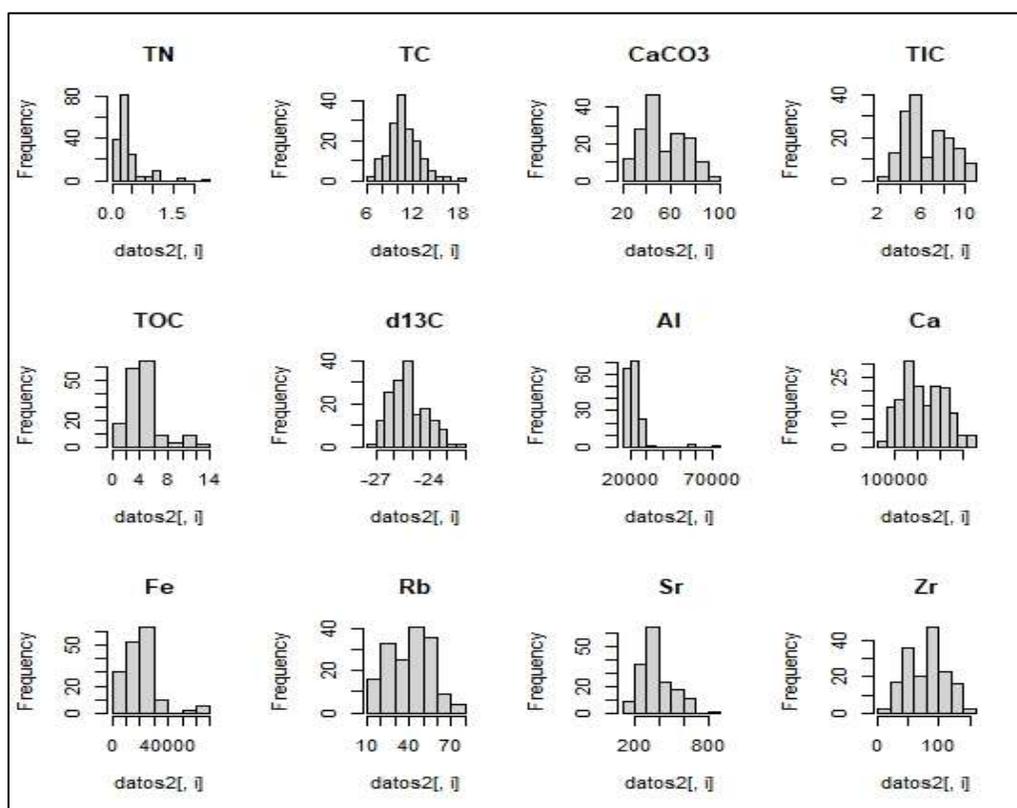


Figura 15: Lista de elementos seleccionados para el análisis.

Para el análisis de δO^{18} se seleccionaron los núcleos provenientes de los cenotes Kikal y Oxola, dejando los estudios en el núcleo de Ciil para próximas investigaciones por aspectos logísticos relacionados al tiempo y el esfuerzo de muestreo. En las muestras se identificaron un total de 3 especies de ostrácodos fósiles: *Cypridopsis vidua*, *Darwinula stevensoni* y

*Cytheridella ilosvayi*²¹ (Figura 16). Las especies *C. vidua*, *D. stevensoni* presentaron mayor abundancia a lo largo de las secuencias sedimentarias. De las sesenta muestras procesadas en ambos núcleos, únicamente siete no presentaron ostrácodos (valvas y/o restos de valvas). Algunos horizontes presentaron una proporción considerable de valvas fragmentadas y poca abundancia de organismos adultos. Para el análisis isotópico se seleccionaron, en el caso de las especies pequeñas *C. vidua* y *D. stevensoni*, las secciones que sobrepasaban quince valvas de organismos adultos. Para la especie *C. ilosvayi* solo se seleccionaron las secciones que tenían tres o más valvas de organismos adultos.

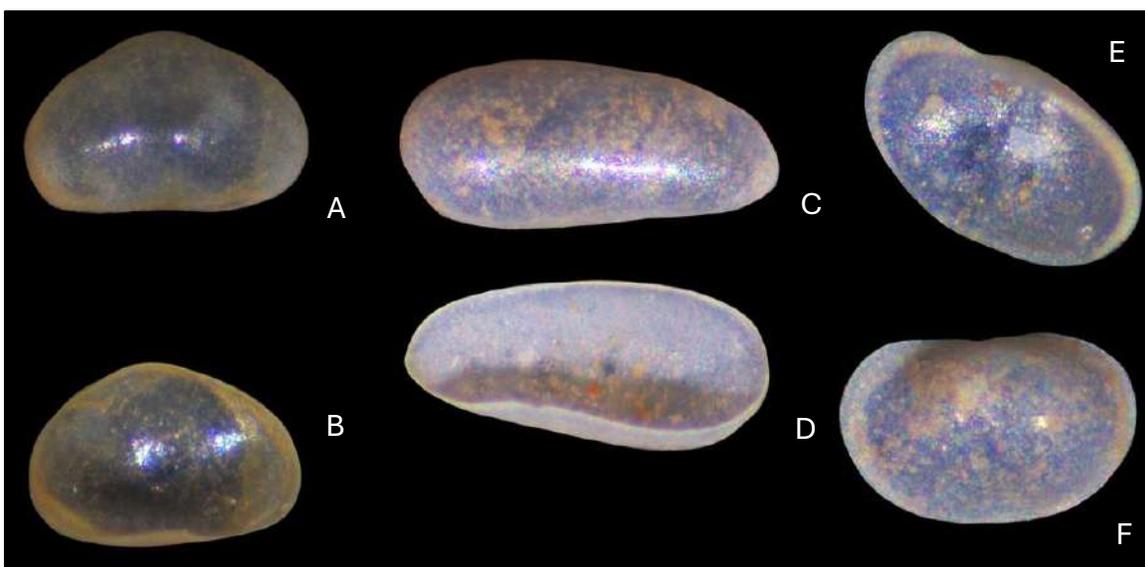


Figura 16: Especies de ostrácodos encontradas en las secuencias sedimentarias Oxola y Kikal II. A-B) *Cypridopsis vidua*, C-D) *Darwinula stevensoni*, E-F) *Cytheridella ilosvayi*.

Cenote Ciil

Este cenote se localiza al norte del área de estudio, en las coordenadas 20°42'29"N y 89°15'17"W. Este cenote se encuentra a aproximadamente a 6 km al noroeste del grupo A. No se registraron vestigios prehispánicos en los alrededores, por lo que esta zona se considera como un área rural, de bajo uso durante esa época. Los vestigios más cercanos que encontramos son los del rancho Ciil, de donde obtiene su nombre el cenote. Este se abastecía del agua para bebedero de ganado bovino a mediados del s. XX. Este rancho queda en desuso

²¹ Ver Apéndice 1 para información detallada sobre las especies *Cypridopsis vidua*, *Darwinula stevensoni* y *Cytheridella ilosvayi*.

y posteriormente es abandonado a finales del mismo siglo, conservando solo la infraestructura que delimitaba los corrales y bebederos antes mencionados.

El núcleo fue recuperado a una profundidad promedio de 28 m bajo la superficie del agua y tiene una longitud de 115 cm. Este fue el núcleo de mayor profundidad recuperado y con la estratigrafía de mayor profundidad temporal de toda la muestra.

Fechas de radiocarbono y modelo de edad-profundidad

El *modelo de edad*. Se realizó a partir de tres dataciones radiométricas de ^{14}C en semillas y restos macro botánicos, mediante el método de espectrometría de masas por aceleración (AMS, por sus siglas en inglés) (Tabla 4).

ID de la muestra	Tipo de muestra	Fracción moderna* ²²		Edad de radiocarbono	
		pMC	1 σ error	AP	1 σ error
Cii21-II28	Semilla	90.99	0.24	758	21
Cii21-II45	Macro botánica	82.10	0.20	1584	20
Cii21-II66	Semilla	74.26	0.24	2391	26
Cii21-III15	Carbón	no hay material de carbón presente			

Table 4: Fechamiento absoluto ^{14}C . Cenote Ciil.

De acuerdo con el modelo de edad-profundidad, tomado para este estudio, será a partir de los 60 cm, con una edad de $\sim 2,000$ años calibrados antes del presente (cal. AP, en adelante), ya que, este lapso se enmarca dentro el espacio temporal establecido para nuestra investigación. Los primeros 36 cm de este núcleo desde la parte basal (desde 106-80 cm de profundidad) consisten en laminaciones de una matriz caliza con solo variaciones menores entre las capas (Figura 17).

²² *Los resultados se presentan en unidades de porcentaje de carbono moderno (pMC por sus siglas en inglés) y en la edad radiocarbónica sin calibrar antes del presente (AP). Estos resultados se refieren únicamente al material de la muestra enviada y a la porción analizada. Todos los datos han sido corregidos por fraccionamiento isotópico utilizando un valor no reportado de $\delta^{13}\text{C}$, medido en el carbono preparado por el acelerador. El pMC informado no requiere corrección adicional por fraccionamiento.

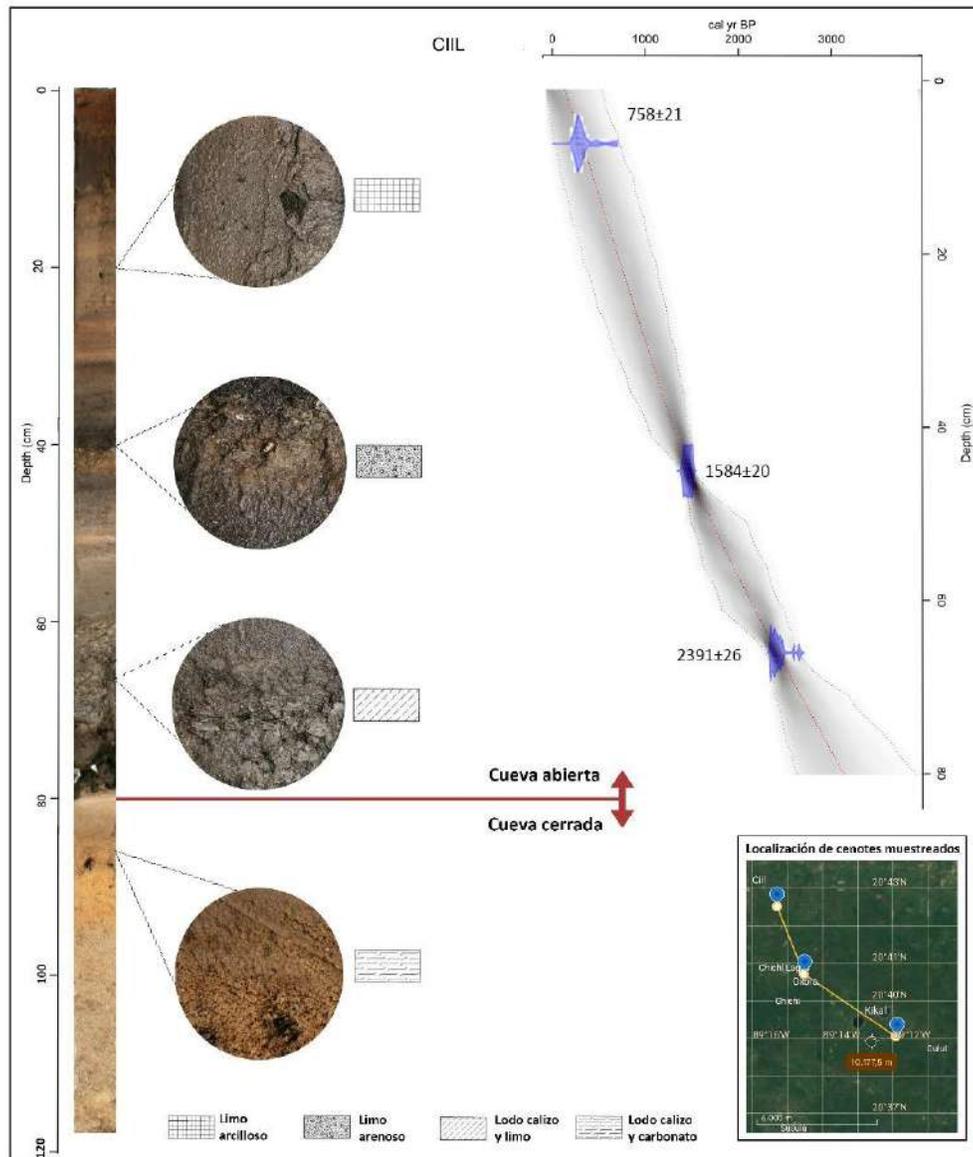


Figura 17: Núcleo del cenote Ciil. Modelo de edad con fechas calibradas a.P. Localización de cenote ANP-PELY. La flecha roja indica la sección del núcleo antes y después de la apertura de la cueva.

Tasa de sedimentación.

El estudio de la tasa de sedimentación en el Cenote Ciil ofrece una visión de los procesos deposicionales a lo largo del tiempo, reflejando los cambios ambientales y eventos específicos que afectaron la entrada de sedimentos. Es importante advertir al lector de los problemas que se asocian a un modelo de edad poco robusto. La interpretación de tasas de sedimentación del cenote Ciil, así como, de los cenotes Kikal y Oxola, son derivadas de

modelos con pocas fechas, lo que dificulta su interpretación detallada de la tasa de sedimentación. No se descarta la posibilidad de realizar más dataciones en un futuro, con la intención de afinar el modelo.

Se observaron variaciones en la tasa de sedimentación entre diferentes intervalos de edad y profundidad, por ejemplo: 1) entre 7.4 cm y 9.5 cm de profundidad, la edad varía de 1675 a 1618 d.C., resultando en una tasa de depositación de 0.037 cm por año; 2) entre 10.9 cm y 11.7 cm de profundidad, la edad varía de 1576 a 1555 d.C., resultando en una tasa de depositación de 0.038 cm por año; 3) entre 50.5 cm y 55.8 cm de profundidad la edad varía entre 50 a 250 d.C. y se observan tasas de depositación entre de 0.020 cm por año a 0.035 cm por año. En general, las capas más jóvenes (menos de 500 años) asociados a la época posterior a la llegada de los españoles presentaron tasas de depositación más altas en comparación con las muestras más antiguas (más de 1000 años), lo cuales son asociadas a la ocupación prehispánica (Figura 18)

Los sedimentos del Cenote Ciil, muestreados hasta una profundidad de 55.8 cm, abarcan un periodo que va desde aproximadamente 1946 a.P. (4 años d.C.) hasta 275 a.P. (1675 años d.C.), son considerados como cueva abierta. La tasa de sedimentación, que varía entre 0.01 cm/año y 0.10 cm/año, presenta fluctuaciones que pueden estar vinculadas a eventos climáticos, cambios en el uso del suelo o variaciones en el aporte de material sedimentario. Nuevamente, no debemos descartar que las fluctuaciones observadas sean también el resultado de tener pocos fechamientos.

En las capas superficiales (7.4 - 10.9 cm), correspondientes a edades entre 275 y 374 años a.P., se observa una tasa de sedimentación que oscila entre 0.04 y 0.03 cm/año. Estas tasas relativamente bajas podrían indicar un periodo reciente con una menor entrada de sedimentos, posiblemente debido a una disminución en la erosión o cambios en las prácticas agrícolas y de uso de la tierra.

A profundidades intermedias (10.9 - 20 cm), que abarcan edades desde 374 hasta 667 a.P. (1576-1283 d.C.), la tasa de sedimentación presenta periodo de estabilidad ambiental, con una entrada de sedimentos relativamente constante, indicando un entorno depositacional estable entre 0.03 y 0.04 cm/año.

En las profundidades medias (20 - 30 cm), con edades entre 667 y 941 a.P. (1283-1010 d.C.), se observa la tasa de sedimentación estable de las secciones superiores, de entre

0.03 y 0.04 cm/año. Esta tendencia podría reflejar un aporte gradual de sedimentos, posiblemente asociada con el manejo del entorno circundante por las actividades humanas. En las capas más profundas (30 - 55.8 cm), que cubren edades desde 941 hasta 1946 a.P. (1010-4 d.C.), la tasa de sedimentación muestra una mayor variabilidad, fluctuando entre 0.01 y 0.04 cm/año. Esta variabilidad podría indicar periodos de mayor inestabilidad ambiental, con cambios significativos en el aporte de material sedimentario, sugiriendo una respuesta a eventos climáticos o cambios en el uso de la tierra a lo largo del tiempo.

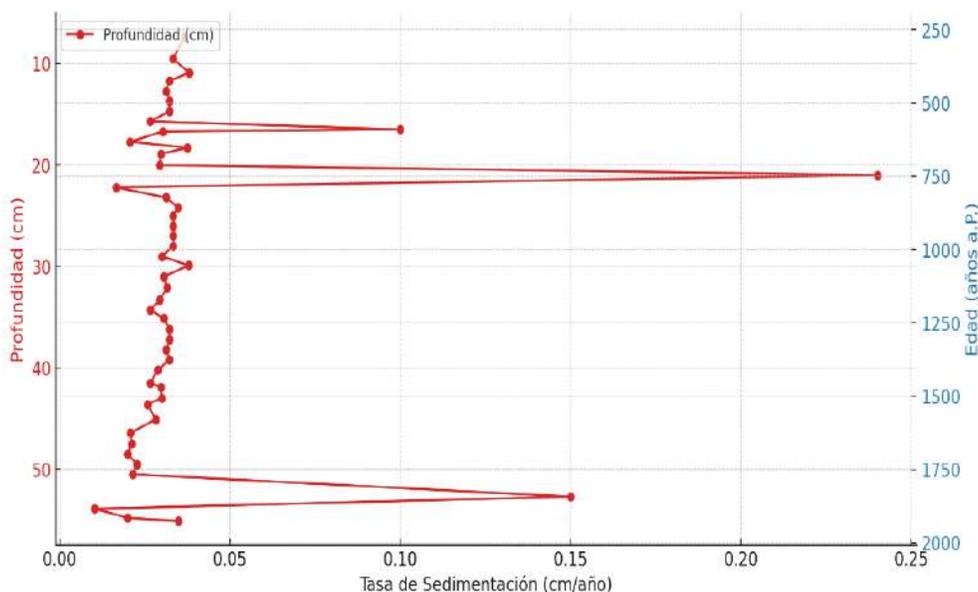


Figura 18: Cenote Ciil. Tasa de sedimentación, Modelo edad y profundidad. Sección de núcleo cueva abierta

Los sedimentos del Cenote Ciil, muestreados a una profundidad de entre 60 -115 cm, abarcan un periodo que va desde aproximadamente 1028 a.P. hasta 1998 a.P, son considerados como cueva cerrada. La tasa de sedimentación varía entre 0.01 cm/año y 1.00 cm/año, con fluctuaciones que pueden estar vinculadas a eventos climáticos, cambios en el uso del suelo y variaciones en el aporte de material sedimentario (Figura 19).

En las capas comprendidas entre 58 cm y 61 cm de profundidad, con edades que van desde 1998 hasta 2212 años a.P., se observa una tasa de sedimentación constante de aproximadamente 0.02 cm/año. Este periodo reciente sugiere una entrada moderada y continua de sedimentos, lo que podría reflejar estabilidad en las condiciones ambientales y en el uso de la tierra circundante.

A profundidades intermedias, entre 61.9 cm y 72.9 cm, correspondientes a edades de 2347 a 3168 años a.P., la tasa de sedimentación varía ligeramente entre 0.01 y 0.02 cm/año. Esta estabilidad sugiere un entorno depositacional relativamente uniforme con una entrada constante de sedimentos.

El modelo de edad-capa indica una discontinuidad importante en las tasas de acumulación de sedimentos en la transición a ~ 82 cm ± 2 , transitando de lodo calizo a material orgánico, con una textura arenosa. De acuerdo con esta discontinuidad, a los ~ 82 cm ± 2 se encuentra una afluencia masiva de material orgánico sobre el lodo calizo. Desde aproximadamente 74 cm hacia arriba, las capas ricas en carbonato de calcio alternan con capas ricas en material orgánico limoso y arcilla (cf. Cohen 2003). Por debajo de los ~ 82 cm ± 2 , las tasas de depositación son mucho más lentas que por encima de este punto (Figura 19).

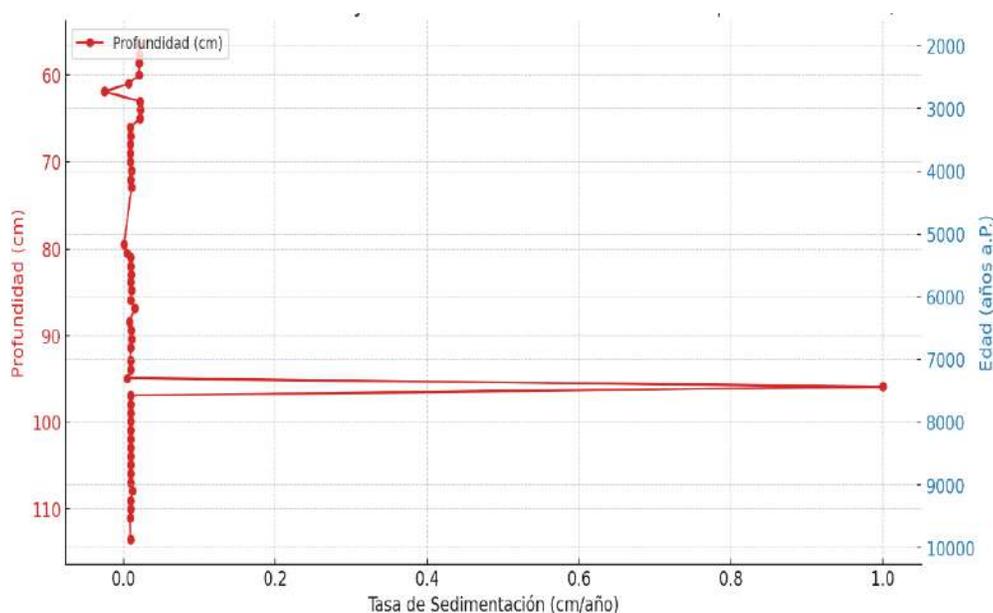


Figura 19: Tasa de sedimentación, edad y profundidad. Sección del núcleo cueva cerrada.

En profundidades medias, entre 79.5 cm y 86.9 cm, que abarcan edades de 3771 a 7173 años a.P., se observa un ligero aumento en la tasa de sedimentación, fluctuando entre 0.01 y 0.04 cm/año. Este incremento gradual podría estar relacionado con cambios en el entorno circundante, como un aumento en la erosión o modificaciones en las prácticas de uso de la tierra.

En las capas más profundas, entre 88.4 cm y 115 cm, que cubren edades desde 7274 hasta 10028 años a.P., la tasa de sedimentación muestra una mayor variabilidad, oscilando entre 0.01 y 1.00 cm/año. Esta variabilidad podría indicar periodos de mayor inestabilidad ambiental o eventos significativos que alteraron la entrada de material sedimentario, sugiriendo una respuesta a cambios climáticos o actividades antropogénicas.

En promedio, la tasa de sedimentación es de aproximadamente 0.033 cm por año en el lugar de muestreo. Estas variaciones indican que la tasa de sedimentación no es constante y que está influenciada por factores ambientales, incluyendo eventos climáticos y/o factores culturales que varían con el tiempo. La presencia de anomalías, como tasas de depositación notablemente altas en ciertos intervalos, sugiere sucesos de depositación rápida, posiblemente asociados a eventos climáticos extremos (v.g., huracanes o sequias) o cambios en el uso de suelos (v.g., conversión de bosque a pastizales o cultivación perennal), dentro de otros.

En resumen, el modelo de la tasa de sedimentación del Cenote Ciil revela una relación compleja entre la profundidad, la edad de los sedimentos y la variabilidad en la tasa de sedimentación. Los cambios observados a lo largo del tiempo reflejan influencias tanto naturales como humanas en los procesos depositacionales. Estos hallazgos proporcionan una base importante para comprender mejor la historia ambiental y los cambios en el uso de la tierra en la región circundante al Cenote Ciil.

Quimioestratigrafía elemental

El análisis geoquímico por estratos indica cambios significativos en los sedimentos a lo largo del nivel ~82 cm \pm 2 cm. El depósito de CaCO₃ es casi puro por debajo de los ~80 cm y podemos observar el cambio abrupto en la tasa de sedimentos. La geoquímica de los sedimentos cambia significativamente a elementos terrigénicos que se encuentra en la materia orgánica de la superficie valores de cuantificables (v.g., K, Si, P, Zr y Rb); mientras que los valores de Al y Fe muestran un patrón bimodal, que indica la erosión química y la depositación intermitente de sedimento, lo cual sugiere que su distribución no es homogénea en el karst y hay enclaves locales (concentraciones localizadas de estos elementos en el matriz de caliza). Con base en estos cambios en sedimentación y geoquímica, argumentamos que, por debajo de los ~80 cm \pm 2 cm, el cenote Ciil era una caverna submarina sin

comunicación con la superficie. En este punto de transición, el techo de la caverna colapsó abriendo el cenote, lo que permitió que la lluvia y el escurrimiento que contenía material terrígeno ingresaran al centro de la dolina para depositarse en el fondo. Esto ocurrió alrededor de ~4000 y 6500 años A.P (2000 y 4500 a.C.).

Por lo tanto, consideramos los depósitos por debajo de los ~80 cm \pm 2 como una medida de línea base para el análisis geoquímico de la cuenca hidrográfica – la composición litogénica. Es importante puntualizar que, no obstante que muchos usan litogénico y terrigénicos como sinónimos, aquí usamos litogénico para los materiales autóctonos que provienen de la disolución de la roca caliza y terrigénico para los materiales alóctonos que provienen de la superficie y contienen tierra – material sólido como partículas de roca, minerales o materia orgánica, que ha sido transportado por el agua, el viento o la gravedad y son depositados en el fondo del cenote (Einsele, 2000). Los sedimentos varían en tamaño, desde partículas finas como arcillas hasta partículas grandes como gravas. Este se forma a través de la meteorización, el transporte y la depositación de partículas y son importantes en procesos geológicos y ecológicos, ya que pueden contener información sobre el pasado climático y ambiental, siendo esenciales para la formación de suelos fértiles y hábitats (Boggs, 2006).

En este sentido, el Ca, Sr, Carbono inorgánico y CaCO₃ en el archivo sedimentario son principalmente el resultado de la meteorización química autóctona de la roca madre, a través del ácido carbónico en el agua subterránea, y que la redeposición sucede mediante la sobresaturación de las aguas y la precipitación de lodo calizo en el cenote (cf. Cohen 2003). En consecuencia, para el análisis la quimioestratigrafía elemental, se consideran otros elementos como Si, Al, K, Rb, Fe, Mn, P, S y Ti, como materiales terrígenos alóctonos transportados al cenote por erosión mecánica.

En cuanto a los elementos pesados, Al presentó valores entre 17,233.29 y 59,494.47 ppm (media: 21,874.61 ppm) con un incremento moderado a mayores profundidades, mientras que Ca tuvo un rango de 68,384.77 a 224,021.18 ppm (media: 143,596.21 ppm) con una leve disminución a mayores profundidades. Fe mostró valores entre 10,116.82 y 66,059.31 ppm (media: 20,704.72 ppm) con una disminución a mayores profundidades. Rb varió entre 18.42 y 75.13 ppm (media: 46.46 ppm) con un aumento a mayores profundidades, y Sr entre 184.09 y 814.03 ppm (media: 311.61 ppm) con una disminución notable a mayores

profundidades. Finalmente, Zr osciló entre 40.87 y 151.11 ppm (media: 87.46 ppm) con un incremento a mayores profundidades (Figura 20).

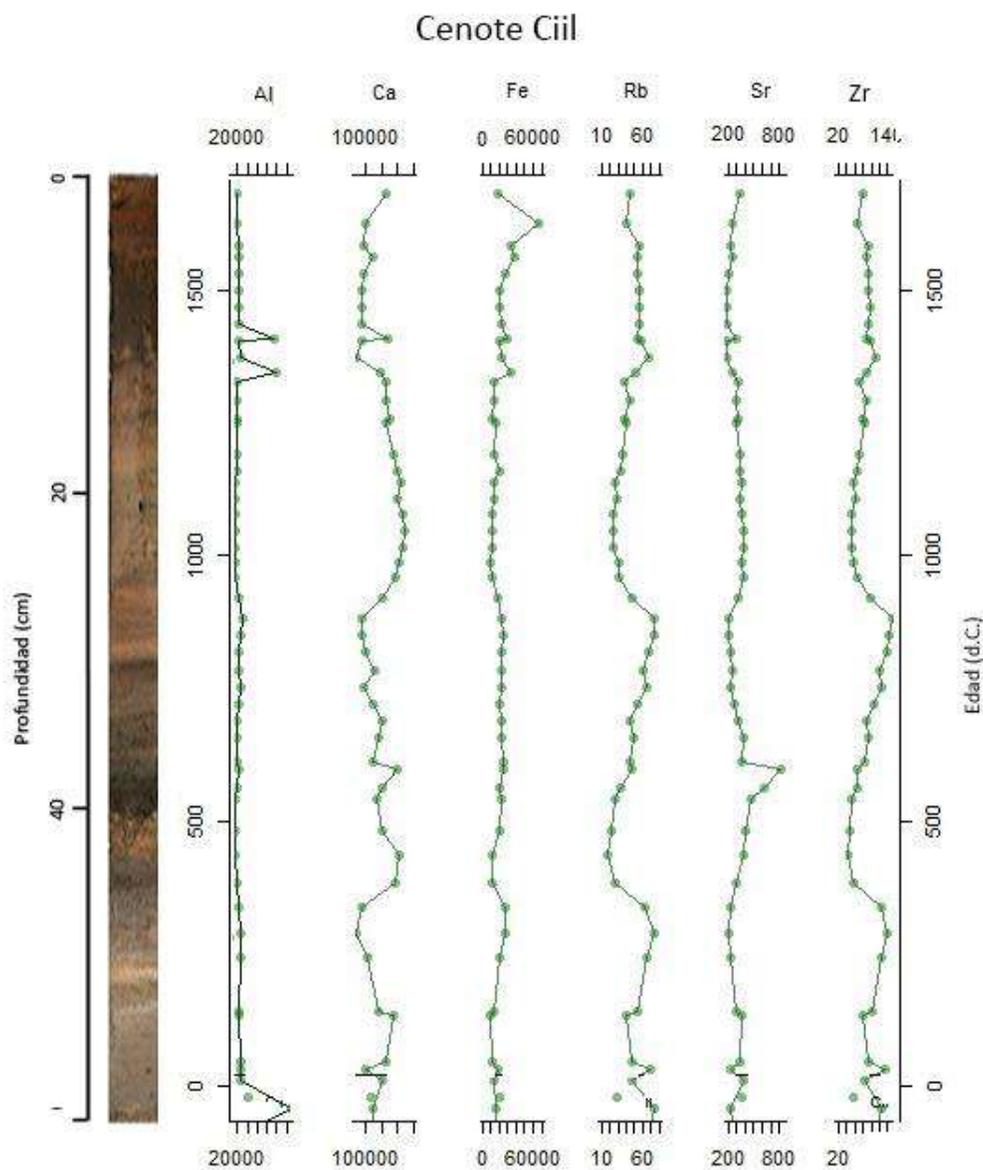


Figura 20: Quimioestratigrafía elemental. Cenote Ciil.

Las concentraciones de Rb y Sr en las muestras de Ciil proporciona información valiosa sobre los cambios climáticos (específicamente cambios en precipitación) a lo largo del tiempo. Los picos máximos de Rb relativa a Sr indican momentos de erosión mecánica y depositación de materia orgánica como resultado de mayor precipitación. Cerca del año 876

d.C., se observa una concentración de Rb de 75.13 ppm, lo que corresponde a un período de intensas lluvias. De manera similar, en el año 280 d.C., se registra una concentración de Rb de 74.25 ppm, sugiriendo otro período significativo de alta precipitación y erosión mecánica. Otros picos importantes de Rb se observan en los años 842 d.C. (73.96 ppm), 24 d.C. (68.70 ppm) y 812 d.C. (66.95 ppm).

Estos resultados refuerzan la hipótesis sobre períodos de clima húmedo en la región de estudio. La recurrencia de picos altos de Rb en intervalos temporales cercanos sugiere una fase prolongada de clima húmedo, destacando episodios recurrentes de precipitaciones intensas que resultaron en una mayor erosión mecánica y acumulación de sedimentos ricos en rubidio.

Por otro lado, las concentraciones de Sr relativa a Rb reflejan momentos de mayor sequía y erosión química. En el año 591 d.C., se observa un fuerte pico bajo en la Sr/ concentración de 814.03 ppm, indicando un período de sequía prolongada. Durante este tiempo, las condiciones climáticas favorecieron la intemperización química y la acumulación de estroncio relativa a rubidio en los sedimentos. Otro pico bajo importante se registra en el año 554 d.C., con una concentración de Sr de 608.81 ppm, sugiriendo otro período significativo de sequía.

La alta concentración de Sr en estos años sugiere fases recurrentes de aridez. Otros picos significativos se observan en los años 534 d.C. (458.15 ppm), 476 d.C. (399.15 ppm) y 430 d.C. (388.05 ppm). Estos picos reflejan una naturaleza recurrente de los eventos secos en la región, destacando períodos de condiciones secas prolongadas que resultaron en una mayor erosión química y acumulación de estroncio. La alta concentración de Sr sugiere que estos períodos secos no solo fueron prolongados, sino también intensos, contribuyendo de manera importante a la redistribución de elementos químicos en el paisaje.

La variación en los valores de Rb/Sr ilustra un patrón de cambios climáticos (cambios en precipitación que provoca cambios en la erosión mecánica) que ha influido en cambios en el paisaje histórico de la subregión de estudio. Estos espacios con aumentos y reducciones en la precipitación no solo afectaron los procesos de erosión y depositación, sino que también moldearon la composición química de los sedimentos a lo largo del tiempo. La recurrencia de estos eventos climáticos sugiere una dinámica climática compleja, donde los períodos de

alta y baja (sequía prolongada) precipitación se sucedieron de manera regular, dejando una huella distintiva en el registro sedimentario.

Quimioestratigrafía isotópica

En el cenote Ciil el rango de los valores encontrados representa una variabilidad baja que, a pesar de hacerse más o menos negativo, permanece en el rango de las plantas C3. El umbral de C3 está alrededor de -21 y los valores registrados de $\delta^{13}\text{C}$ variaron de -25.46 a -22.39 ppm (media: -24.18 ppm). a lo largo de todo el núcleo. Se observa que, en capas menos profundas, es decir, edades más recientes, los valores de $\delta^{13}\text{C}$ son generalmente menos negativos, lo que sugiere una influencia isotópica específica en estas capas más superficiales. A medida que nos adentramos en el núcleo, los valores de $\delta^{13}\text{C}$ tienden a volverse más negativos, indicando posibles cambios en la fuente de carbono o en la composición de la vegetación circundante a lo largo de las edades registradas.

A profundidades entre 10.9 y 12.7 metros, correspondientes a edades de alrededor de 1576 a 1524 d.C., se observan valores de $\delta^{13}\text{C}$ alrededor de -24.35 a -24.69, mostrando una cierta estabilidad isotópica en ese intervalo de tiempo. Sin embargo, a menor profundidad, entre 53.9 y 55.8 metros con edades de 126 a 4 años d.C., los valores de $\delta^{13}\text{C}$ disminuyen hasta -24.27 y -25.05, respectivamente, indicando posiblemente cambios significativos en la composición ambiental en esos estratos más profundos y recientes del cenote Ciil.

En el caso de los valores de TN, estos oscilaron entre 0.13 y 2.23 ppm (Mediana: 0.38, Q1: 0.29, Q3: 0.99), mientras que los de TC variaron de 6.48 a 18.71 ppm (media: 11.51 ppm). Los valores de TIC oscilaron entre 2.48 a 8.73 ppm (media: 5.29 ppm) y, en consecuencia, se calcula los valores de TOC en un rango de 1.62 y 13.75 ppm (media: 6.22 ppm). Finalmente, para CaCO_3 , los valores fluctuaron entre 20.64 y 72.75 ppm (media: 44.11 ppm) (Figura 21).

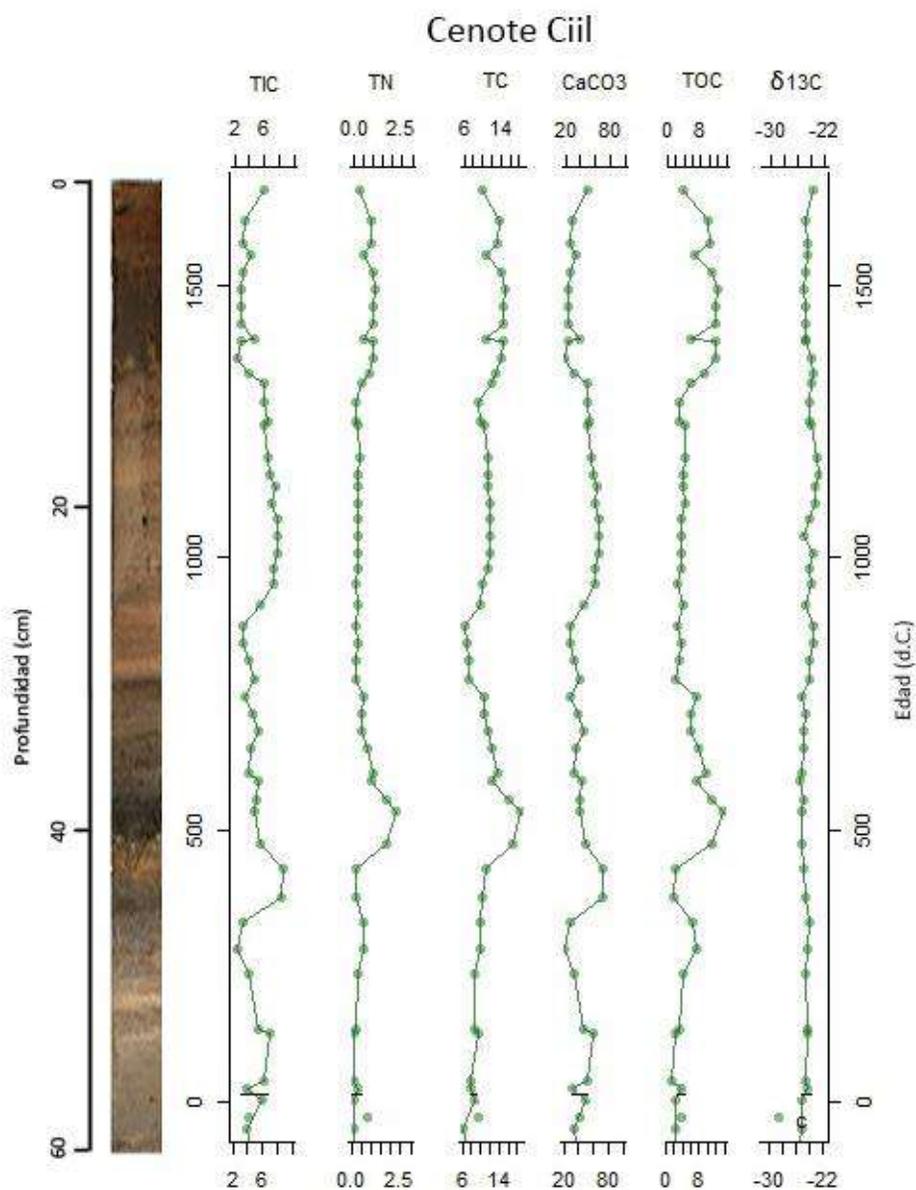


Figura 21: Quimioestratigrafía isotópica. Cenote Ciil.

Análisis del modelo de edad-profundidad y la quimioestratigrafía

El análisis de componentes principales (PCA) realizado reveló información importante sobre las principales fuentes de variabilidad en los elementos analizados. A través de la reducción dimensional, se logró identificar las contribuciones de las variables a los dos primeros componentes principales, PC1 (58.46%) y PC2 (27.37%), que juntos explican el 85.83% de la variabilidad total en los datos (Figura 22).

El PC1 está fuertemente influenciado por el componente litogénico, incluyendo TIC, Ca, Sr y CaCO₃. Las cargas más altas en PC1 corresponden a CaCO₃ (0.417), TIC (0.417), Ca (0.405), y Sr (0.236), que son elementos típicamente asociados con carbonatos. Además, δ¹³C (0.097), Rb (-0.351) y Zr (-0.306), elementos terrigénicos, también contribuyen significativamente al PC1. Este componente captura principalmente la variabilidad relacionada con la presencia de carbonatos y ciertos minerales litogénicos en las muestras.

El PC2, por otro lado, está influenciado predominantemente por compuestos orgánicos y elementos terrígenos y litogénicos. Las cargas más altas en PC2 corresponden a TC (0.516), TN (0.467), TOC (0.406), Sr (0.255), y Fe (0.112). Los compuestos orgánicos, como TC, TN y TOC, tienen cargas positivas altas, indicando que PC2 captura variabilidad asociada con material orgánico. Además, Sr y Fe, que son elementos litogénicos y terrígenos, también contribuyen de manera significativa a este componente.

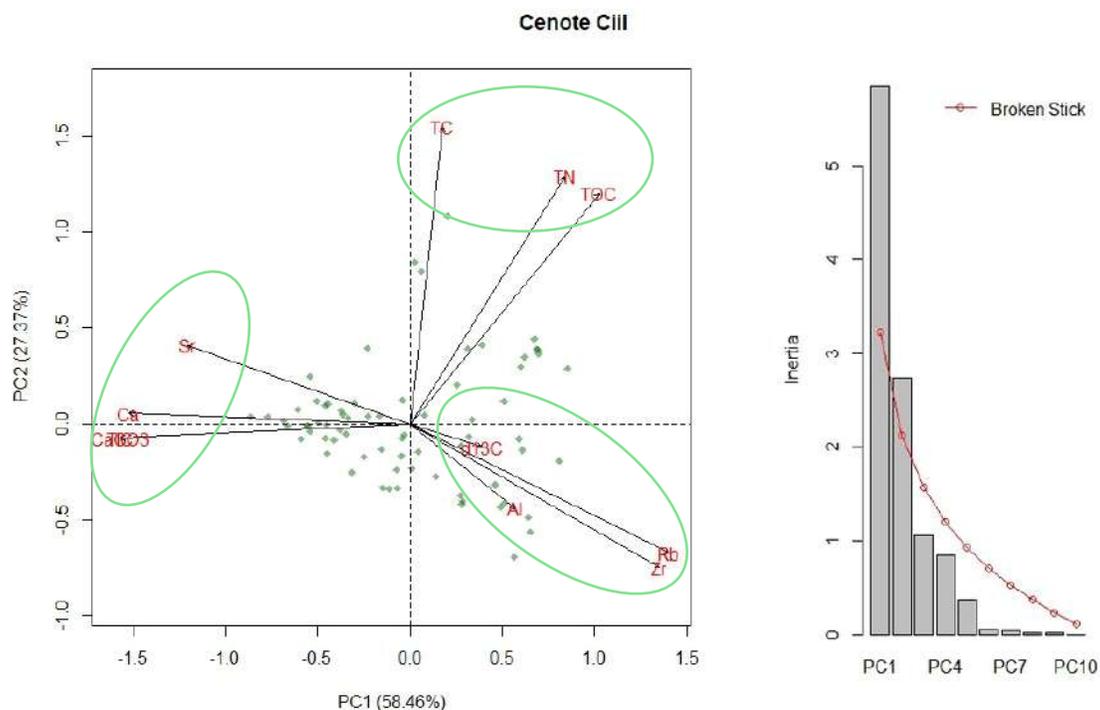


Figura 22: PCA cenote Ciil. Prueba de Broken Stick.

Para una interpretación más clara de los resultados del PCA, los elementos se clasificaron en tres categorías principales basadas en sus características geoquímicas:

1. Terrígenos: Elementos como Al, Fe, Rb, y Zr, que provienen de la erosión y el desgaste de rocas continentales en conjunto con la actividad biológica (v.g., liberación de estos elementos de los sedimentos por microorganismos y bioacumulación, como nutrientes, de ellos por plantas y su depositación en los suelos como materia orgánica – microorganismos y tejido vegetal muertos).
2. Litogénicos: Elementos como CaCO_3 , TIC, Ca, y Sr, que forman parte de los minerales carbonatados. La caliza contiene concentraciones menores de Al y Fe, así como Rb, Zr, K, etc. en concentraciones trazas de manera intermitente, pero ende estas concentras no son suficientes para influir en los resultados.
3. Material orgánico: El aporte de materia orgánica reflejan en el aumento en las mediciones de carbón (TC), de carbón orgánico total (TOC) y nitrógeno total (TN).

PC1 y PC2 juntos proporcionan una comprensión detallada de las principales fuentes de variabilidad química elemental en las muestras de sedimentos. PC1 refleja el componente litogénico dominado por elementos carbonatados, sugiere que las variaciones en estos componentes son clave para explicar la mayor parte de la variabilidad en los datos. Esto puede estar relacionado con procesos de depositación de carbonatos y la presencia de minerales en el sedimento. Por otro lado, PC2, influenciado por compuestos orgánicos y elementos terrigénicos, captura la variabilidad asociada con la materia orgánica y la sedimentación de materiales alóctonos.

Cenote Kikal

El cenote Kikal se localiza en la sección sur del asentamiento, dentro del Grupo D, en las coordenadas $20^{\circ}39'01''\text{N}$ y $89^{\circ}11'52''\text{W}$. El núcleo Kikal II fue recolectado a unos 8 m de profundidad bajo la superficie de agua. Esta muestra fue seleccionada debido a su extracción desde el centro de la ocupación urbana del sitio. Argumentamos que la modificación del terreno urbano puede representar una fuente significativa de erosión inducida por actividades humanas (o erosión acelerada). Además, considerando las pequeñas cuencas hidrográficas asociadas con los cenotes, el núcleo de Kikal ofrecería la mejor oportunidad para ligar un aumento en la erosión con los procesos de urbanización, en caso

de que esta estuviera presente y entonces no se puede explicar únicamente por factores climáticos (v.g., aumento en precipitación/frecuencia e intensidad de huracanes).

Fechas de radiocarbono y modelo de edad-profundidad

El *modelo de edad*. Se realizó a partir de tres dataciones radiométricas de ^{14}C en sedimento (humina). Usando estas fechas, el modelo de edad mostró una antigüedad basal de ~ 1800 cal. A.P., en adelante (200 d.C.) a 62.8 cm, mientras que la parte superior con 4.3 cm de profundidad presento una antigüedad ~ 650 a.P. (1350 d.C.), abarcando un intervalo de 1150 años (Tabla 5). El núcleo consiste en laminaciones principalmente de limo, alternando con capas de limo arcilloso y arena (Figura 23).

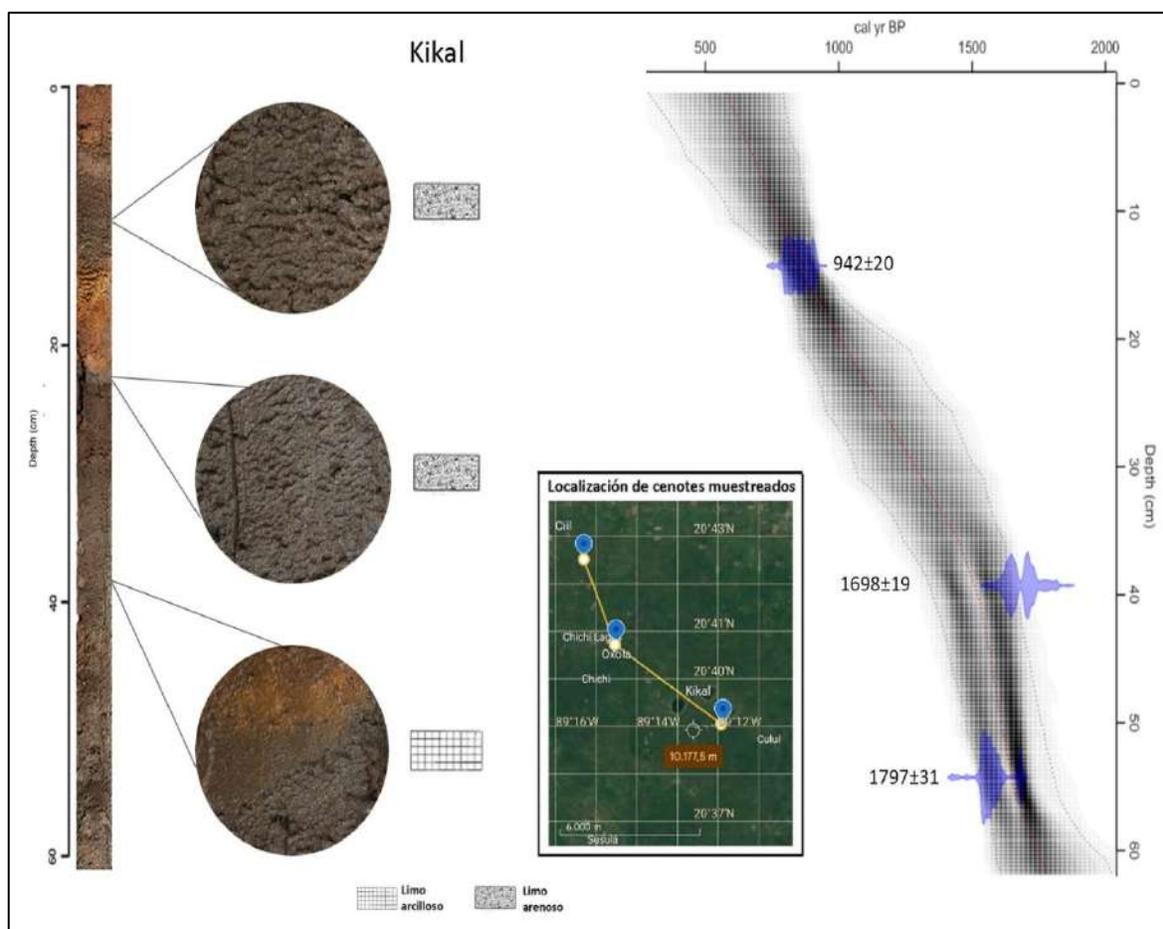


Figura 23: Núcleo del cenote Kikal. Modelo de edad/profundidad. Localización del cenote ANP-PELY

ID de la muestra	Tipo de muestra	Fracción moderna		Edad de radiocarbono	
		pMC	1 σ error	AP	1 σ error
Kik21-II14.5	humina	88.93	0.22	942	20
Kik21-II24.5	Sedimento (humina)	80.95	0.19	1698	19
Kik21-II39.5	humina	79.96	0.31	1797	31

Tabla 5: Fechamiento absoluto. Cenote Kikal

Tasa de sedimentación del cenote Kikal

El análisis de la tasa de sedimentación en el Cenote Oxola proporciona una comprensión detallada de los procesos depositacionales a lo largo del tiempo, reflejando cambios ambientales y eventos específicos que afectaron la entrada de sedimentos. Los sedimentos del cenote Kikal, muestreados hasta una profundidad basal de 62.8 cm, abarcan un periodo que va desde aproximadamente 1796 años a.P. (154 años d.C.) hasta 650 años a.P. (1300 años d.C.). La tasa de sedimentación varía entre 0.03 cm/año y 0.12 cm/año, con fluctuaciones que pueden estar vinculadas a eventos climáticos, cambios en el uso del suelo y variaciones en el aporte de material sedimentario (Figura 24).

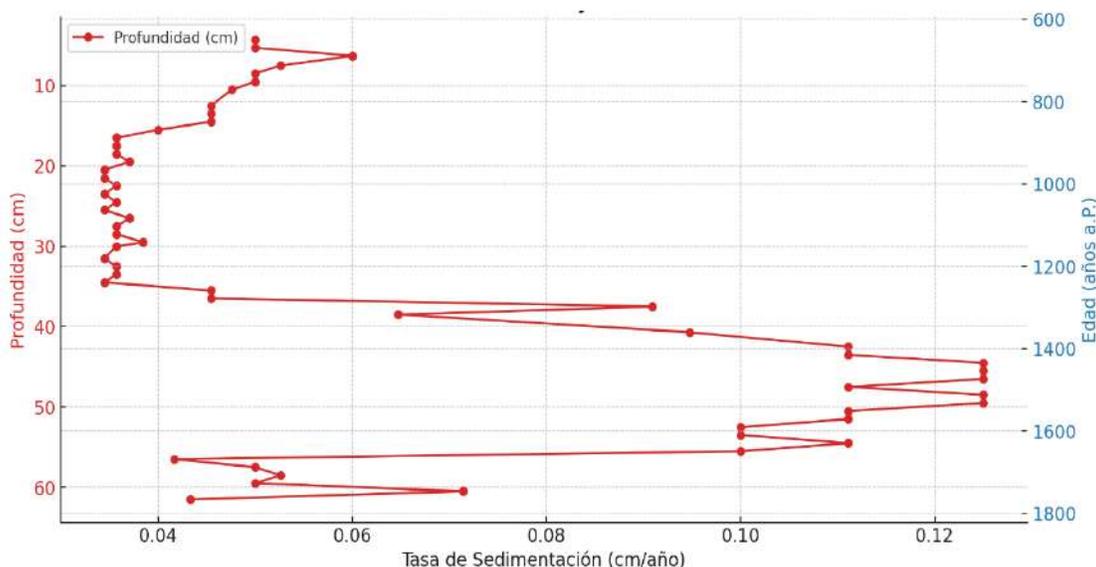


Figura 24: Modelo de sedimentación, edad y profundidad. Cenote Kikal.

En las capas superficiales (4.3 - 10.5 cm), correspondientes a edades entre 650 y 769 años a.P., se observa una tasa de sedimentación que oscila entre 0.05 y 0.06 cm/año. Estas tasas relativamente consistentes indican un periodo reciente con una entrada moderada y

constante de sedimentos, reflejando una posible estabilidad en las condiciones ambientales y en el uso de la tierra circundante.

A profundidades intermedias (10.5 - 25.5 cm), que abarcan edades desde 769 hasta 1156 años a.P., la tasa de sedimentación varía entre 0.03 y 0.05 cm/año. Esta ligera variabilidad sugiere un entorno depositacional relativamente estable con una entrada continua de sedimentos. Los datos indican un periodo de equilibrio ambiental, donde la tasa de sedimentación se mantuvo bastante uniforme.

En las profundidades medias (25.5 - 40 cm), con edades entre 1156 y 1492 años a.P., se observa una tasa de sedimentación que varía entre 0.03 y 0.09 cm/año. Esta tendencia refleja un aumento gradual en el aporte de sedimentos, posiblemente relacionado con cambios en el entorno circundante, como un aumento en la erosión o modificaciones en las prácticas de uso de la tierra.

En las capas más profundas (40 - 62.8 cm), que cubren edades desde 1492 hasta 1796 años a.P., la tasa de sedimentación muestra una mayor variabilidad, oscilando entre 0.04 y 0.12 cm/año. Esta variabilidad podría indicar periodos de mayor inestabilidad ambiental o eventos significativos que alteraron la entrada de material sedimentario, sugiriendo una respuesta a cambios climáticos o actividades antropogénicas.

La tasa de sedimentación media es de aproximadamente 0.063 cm/año, mientras que la mediana se sitúa en 0.05 cm/año, mostrando que la distribución de la tasa de sedimentación no es normal (Shapiro-Wilk, con un estadístico de 0.790 y un valor p de 1.92e-07, indicando que los datos no siguen una distribución normal.). La desviación estándar es de 0.031 cm/año, indicando una variabilidad moderada en los datos, con una varianza de 0.00097. No se identificaron valores atípicos (*outliers*) en este conjunto de datos.

Quimioestratigrafía elemental

En cuanto a los elementos pesados, Al presentó valores entre 19,544.27 y 31,568.56 ppm (media: 24,720.80 ppm) con un incremento moderado a mayores profundidades, mientras que Ca tuvo un rango de 97,638.83 a 22,5947.81 ppm (media: 13,9074.42 ppm) con una leve disminución a mayores profundidades. Fe mostró valores entre 13713.65 y 68997.93 ppm (media: 29397.00 ppm) con una disminución a mayores profundidades. Rb varió entre 17.54 y 59.93 ppm (media: 45.32 ppm) con un aumento a mayores profundidades, y Sr entre

259.90 y 510.48 ppm (media: 341.14 ppm) con una disminución notable a mayores profundidades. Finalmente, Zr osciló entre 38.92 y 126.10 ppm (media: 96.86 ppm) con un incremento a mayores profundidades (Figura 25).

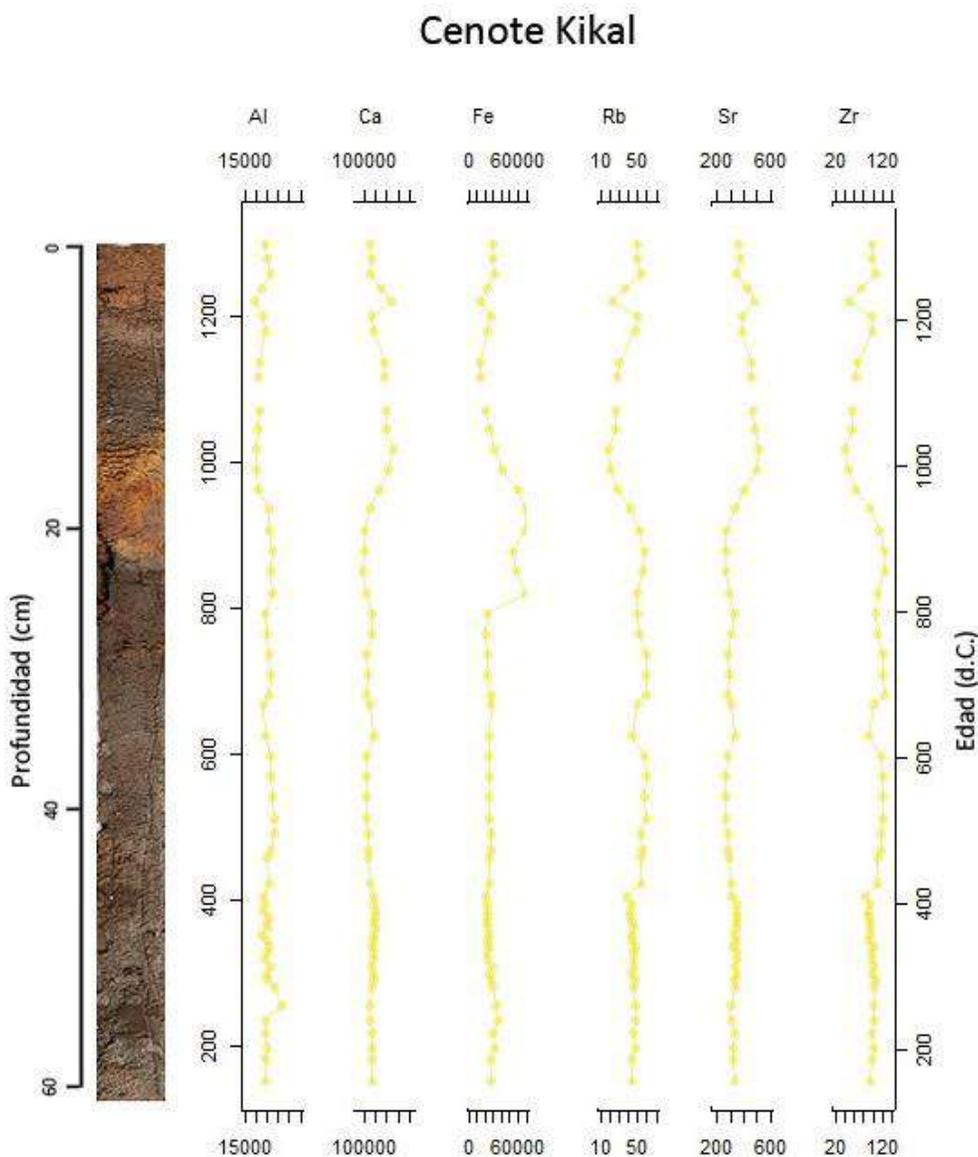


Figura 25: Quimioestratigrafía elemental. Cenote Kikal.

Los valores de Rb en las muestras de Kikal señalan una distribución con una media de 45.32 ppm. Los valores oscilan entre un mínimo de 17.54 ppm y un máximo de 59.93 ppm, sugiriendo una variabilidad significativa en las concentraciones de Rb a lo largo de las

diferentes muestras. Los picos más importantes de Rb se encuentran en varias muestras, indicando periodos con mayor humedad y condiciones de lluvia. En el año 1260 d.C., a una profundidad de 6.3 cm, el valor de Rb es de 53.79 ppm, reflejando un periodo húmedo. En el año 879 d.C., a 22.5 cm de profundidad, se registra un valor de Rb de 57.88 ppm, y a 23.5 cm en el año 851 d.C., el valor es de 56.13 ppm, ambos sugiriendo condiciones de mayor humedad. Otro pico significativo se encuentra en el año 738 d.C., a una profundidad de 27.5 cm, con un valor de 59.93 ppm, indicando un periodo de intensa lluvia. En el año 710 d.C., a 28.5 cm de profundidad, el valor de Rb es de 59.35 ppm, mientras que en el año 682 d.C., a 29.5 cm de profundidad, también se registra un valor de 59.35 ppm, reflejando periodos prolongados de humedad.

Otros picos importantes incluyen 57.88 ppm a 32.5 cm de profundidad en el año 598 d.C., 59.64 ppm a 33.5 cm en el año 570 d.C., y 57.88 ppm a 34.5 cm en el año 542 d.C., todos sugiriendo condiciones húmedas. En el año 513 d.C., a 35.5 cm de profundidad, el valor de Rb es de 58.18 ppm, y en el año 491 d.C., a 36.5 cm, es de 54.08 ppm, reflejando igualmente periodos húmedos. Finalmente, en el año 469 d.C., a 37.5 cm de profundidad, el valor de Rb es de 55.54 ppm, en el año 458 d.C., a 38.5 cm, el valor es de 52.33 ppm, y en el año 424 d.C., a 40.7 cm de profundidad, el valor de Rb es de 52.33 ppm, todos indicando condiciones de mayor humedad.

Por otro lado, los picos máximos de estroncio Sr reflejan momentos de mayor sequía y erosión química. En el año 1221 d.C., se observa un pico significativo de Sr con una concentración de 482.89 ppm, indicando un período de sequía prolongada. Durante este tiempo, las condiciones climáticas favorecieron la intemperización química y la acumulación de estroncio en los sedimentos. Otro pico importante se registra en el año 1240 d.C., con una concentración de Sr de 422.94 ppm, sugiriendo otro período significativo de sequía. La alta concentración de Sr en estos años sugiere fases recurrentes de aridez. Otros picos significativos se observan en los años 1260 d.C. (352.52 ppm), 1280 d.C. (370.60 ppm) y 1300 d.C. (360.45 ppm). Estos picos reflejan una naturaleza cíclica de los eventos secos en la región, destacando períodos de condiciones secas prolongadas que resultaron en una mayor erosión química y acumulación de estroncio.

Quimioestratigrafía isotópica

Los valores de TN oscilaron entre 0.14 y 0.50 ppm, con una media de 0.37 ppm y una relación débil con la profundidad, abarcando un rango de profundidad de 4.3 cm a 62.8 cm. TC varió de 7.12 a 12.17 ppm (media: 10.09 ppm), mostrando una ligera disminución con la profundidad. TIC mostró un rango de 4.10 a 9.40 ppm (media: 5.60 ppm) y CaCO₃ fluctuó entre 34.13 y 78.30 ppm (media: 46.70 ppm), y, ambos con una notable disminución a mayores profundidades. Los valores de TOC oscilaron entre 1.67 y 5.62 ppm (media: 4.49 ppm), mostrando un aumento con la profundidad

La medición de $\delta^{13}\text{C}$ varió de -26.20 a -23.62 ppm (media: -25.31 ppm) con una relación casi nula con la profundidad. En la capa más superficial del sedimento, ubicada a una profundidad de 4.3 centímetros correspondiente a una edad de aproximadamente 1,300 años, el valor de $\delta^{13}\text{C}$ es de -25.71‰. Este registro isotópico inicial ya nos ofrece una visión preliminar de las condiciones ambientales prevalentes durante este período. A medida que descendemos a una profundidad de 8.5 centímetros con una edad de 1,221 años, notamos una ligera disminución en el valor de $\delta^{13}\text{C}$ a -25.86‰. Este cambio sutil podría indicar variaciones en la vegetación o en las condiciones climáticas de la época.

Continuando, encontramos una capa en la profundidad de 14.5 centímetros, donde, desafortunadamente, faltan los datos de $\delta^{13}\text{C}$, lo cual representa un pequeño vacío en nuestra interpretación. No obstante, al pasar esta zona y alcanzar los 16.5 centímetros (edad de 1,048 años), se observa un valor de $\delta^{13}\text{C}$ de -25.73‰, sugiriendo una ligera recuperación hacia las condiciones previas.

Profundizando aún más, llegamos a 22.5 centímetros y una edad de 879 años. Aquí, el valor de $\delta^{13}\text{C}$ cae a -23.74‰, marcando un cambio más significativo. Este descenso puede reflejar un cambio drástico en el medio ambiente, posiblemente relacionado con alteraciones en la fuente de materia orgánica o cambios climáticos pronunciados. A medida que continuamos hacia los 30 centímetros de profundidad (669 años de antigüedad), advertimos un valor de $\delta^{13}\text{C}$ de -25.49‰, indicando una tendencia hacia la estabilización en las condiciones isotópicas del sedimento. Descendiendo aún más, al llegar a 40.7 centímetros (edad aproximada de 424 años), el $\delta^{13}\text{C}$ se mantiene alrededor de -25.38‰. Esto sugiere un período de relativa estabilidad isotópica durante esta franja del perfil sedimentario.

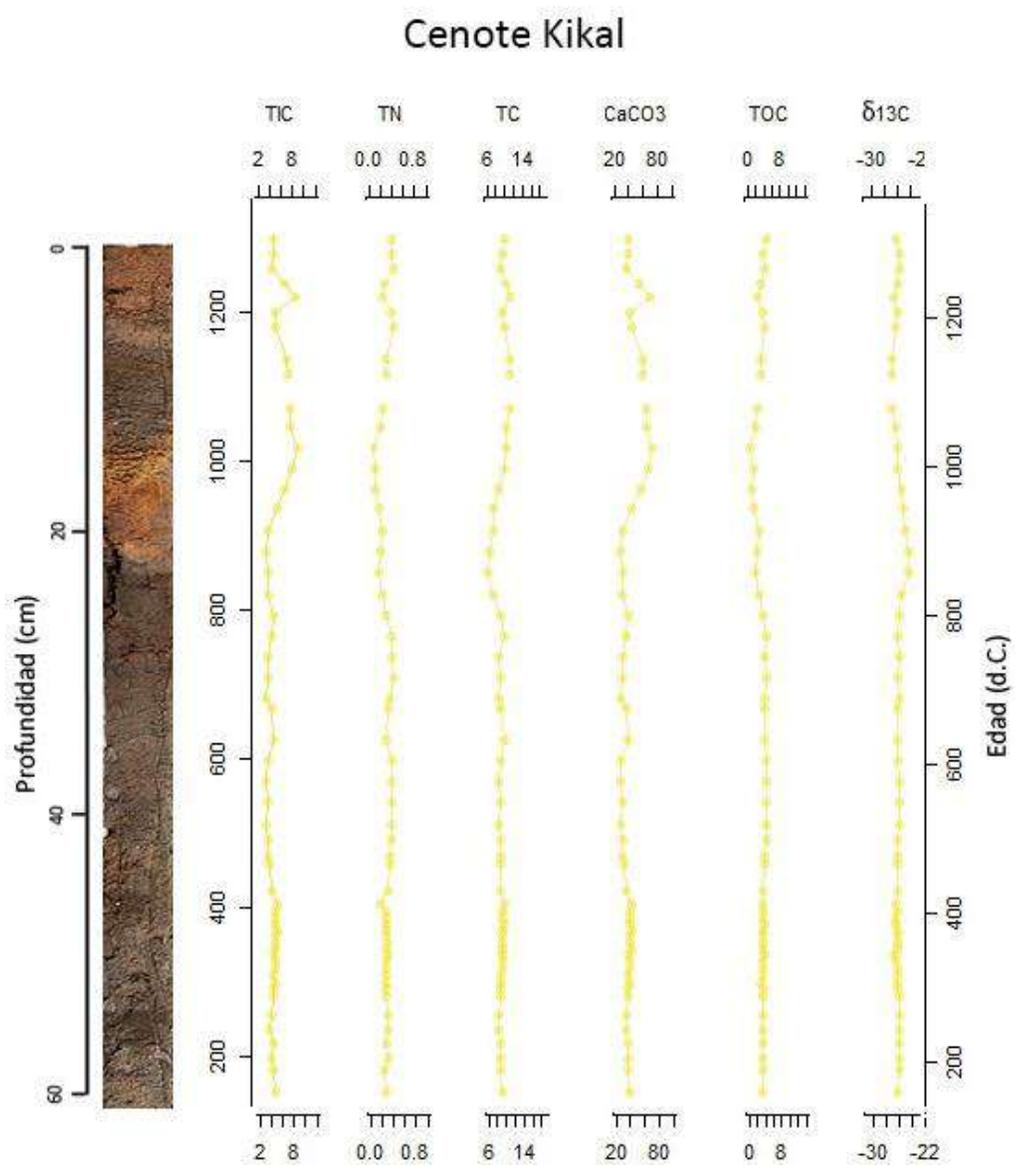


Figura 26: Quimioestratigrafía isotópica. Cenote Kikal.

Finalmente, en las capas más profundas, cerca de 60.5 centímetros de profundidad (198 años), el valor de $\delta^{13}\text{C}$ se sitúa en -25.21% . Esto indica que, aunque hubo variaciones a lo largo del tiempo, hacia el pasado más reciente, las condiciones se asemejaban en cierta medida a las observadas en las capas más superficiales (Figura 26).

La variable $\delta^{13}\text{C}$ -Darw presenta valores válidos en varias muestras a diferentes profundidades y edades. En la muestra correspondiente al año 1280 d.C. y una profundidad

de 5.3 cm, el valor de $\delta^{13}\text{C}$ -Darw es de -8.60‰. A medida que se examinan ostrácodos de sedimentos más profundos y antiguos, el valor de $\delta^{13}\text{C}$ -Darw varía, alcanzando un valor máximo de -8.49‰ a 21.5 cm de profundidad y un valor mínimo de -8.97‰ a 9.5 cm de profundidad en el año 1,201 d.C. Estos resultados indican cambios en la composición isotópica del carbono en Darwina, posiblemente reflejando fluctuaciones en las fuentes de materia orgánica y la productividad biológica a lo largo del tiempo. Esto indica que las condiciones ambientales o ecológicas dentro el cenote fueron variable sobre la larga duración. La variable $\delta^{13}\text{C}$ -Cyp también presenta valores válidos en las muestras. En la misma muestra de 1280 d.C. y 5.3 cm de profundidad, el valor de $\delta^{13}\text{C}$ -Cyp es de -9.21‰. Este valor varía en sedimentos más profundos, con un rango de -9.21‰ a -8.40‰, sugiriendo cambios en las condiciones ambientales y en las fuentes de carbono orgánico durante el periodo de depositación.

Para la variable $\delta^{18}\text{O}$ -Darw, los valores válidos muestran una tendencia clara en relación con la profundidad y la edad de los sedimentos. En la muestra de 1280 d.C. y 5.3 cm de profundidad, el valor de $\delta^{18}\text{O}$ -Darw es de -4.53‰. Este valor varía en sedimentos más profundos, alcanzando un máximo de -4.24‰ a 23.5 cm de profundidad y un mínimo de -4.72‰ a 9.5 cm de profundidad en el año 1201 d.C. Estas variaciones pueden reflejar cambios en la temperatura del agua y otras condiciones climáticas durante la formación de los sedimentos.

La correlación entre $\delta^{13}\text{C}$ -Darw y $\delta^{13}\text{C}$ -Cyp muestra un valor negativo de -0.484. Esto indica que, aunque hay una tendencia a que los valores se muevan en direcciones opuestas, esta relación no es tan fuerte como en otros casos. Aun así, podría sugerir diferencias en las fuentes de carbono orgánico o en la respuesta de estas especies a cambios ambientales.

La correlación entre $\delta^{13}\text{C}$ -Darw y $\delta^{18}\text{O}$ -Darw es positiva y moderada, con un valor de 0.690. Esto sugiere que las variaciones en la composición isotópica de carbono en Darwina están algo relacionadas con las variaciones en la composición isotópica de oxígeno en la misma especie. Esta relación podría indicar que ambos isótopos están respondiendo a factores ambientales comunes, como la temperatura del agua y las condiciones climáticas.

La correlación entre $\delta^{13}\text{C}$ -Cyp y $\delta^{18}\text{O}$ -Darw es ligeramente negativa con un valor de -0.118, lo que indica una relación muy débil entre estas dos variables. Esto sugiere que las

composiciones isotópicas de carbono en Cypris y de oxígeno en Darwina no están fuertemente relacionadas, lo cual podría reflejar respuestas diferenciadas a las condiciones ambientales o diferentes fuentes de materia orgánica.

Las correlaciones observadas entre las composiciones isotópicas de carbono y oxígeno en Darwina y Cypris en Kikal muestran relaciones significativas, pero no extremadamente fuertes. La moderada correlación positiva entre $\delta^{13}\text{C-Darw}$ y $\delta^{18}\text{O-Darw}$ destaca la posible influencia de factores ambientales comunes, mientras que las correlaciones más débiles entre $\delta^{13}\text{C-Darw}$ y $\delta^{13}\text{C-Cyp}$, así como entre $\delta^{13}\text{C-Cyp}$ y $\delta^{18}\text{O-Darw}$, sugieren posibles diferencias en las fuentes de carbono orgánico y en la respuesta de estas especies a los cambios ambientales (Figura 27).

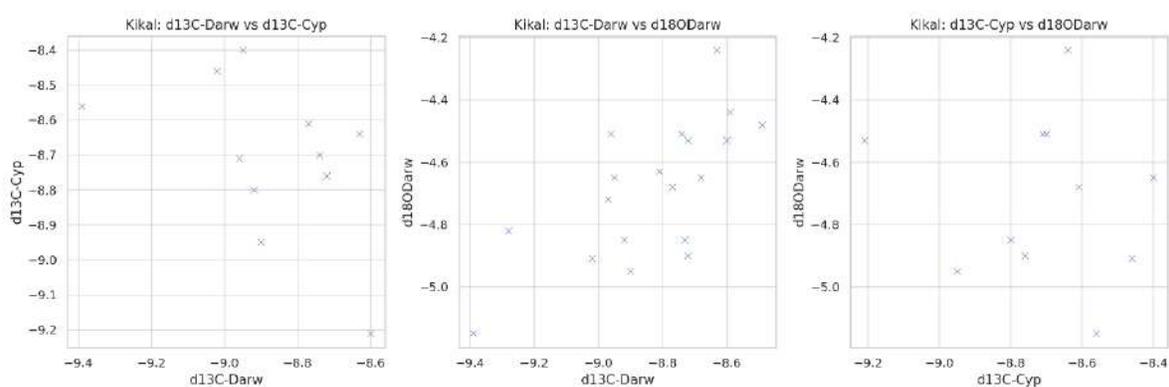


Figura 27: Grafica de dispersión $\delta^{13}\text{C-Darw}$ y $\delta^{13}\text{C-Cyp}$, $\delta^{13}\text{C-Darw}$ y $\delta^{18}\text{O-Darw}$ y $\delta^{13}\text{C-Cyp}$ y $\delta^{18}\text{O-Darw}$.

Típicamente, $\delta^{18}\text{O}$ es utilizado para documentar cambios en el régimen lluvia en los perfiles de núcleos de lagos. Los cambios en las condiciones ecológicas dentro del cenote lo cual responde de manera diferente las especies de ostrácodos como los resultados anteriores muestran limitado su uso para dicho análisis en este caso. Esto es dado que la selección preferencia de ^{16}O y ^{18}O varía entre especies, así como cuando las condiciones ecológicas cambian y esto cambia la especie dominante no se puede recuperar un registro continuo de los valores, y sin este registro, no se puede hacer modelación del régimen lluvia sobre la larga duración. Si podemos inferir por los cambios de especies que, los cambios ambientales estuvieron presentes a lo largo de toda la secuencia estratigráfica de manera continua (Figura 28).

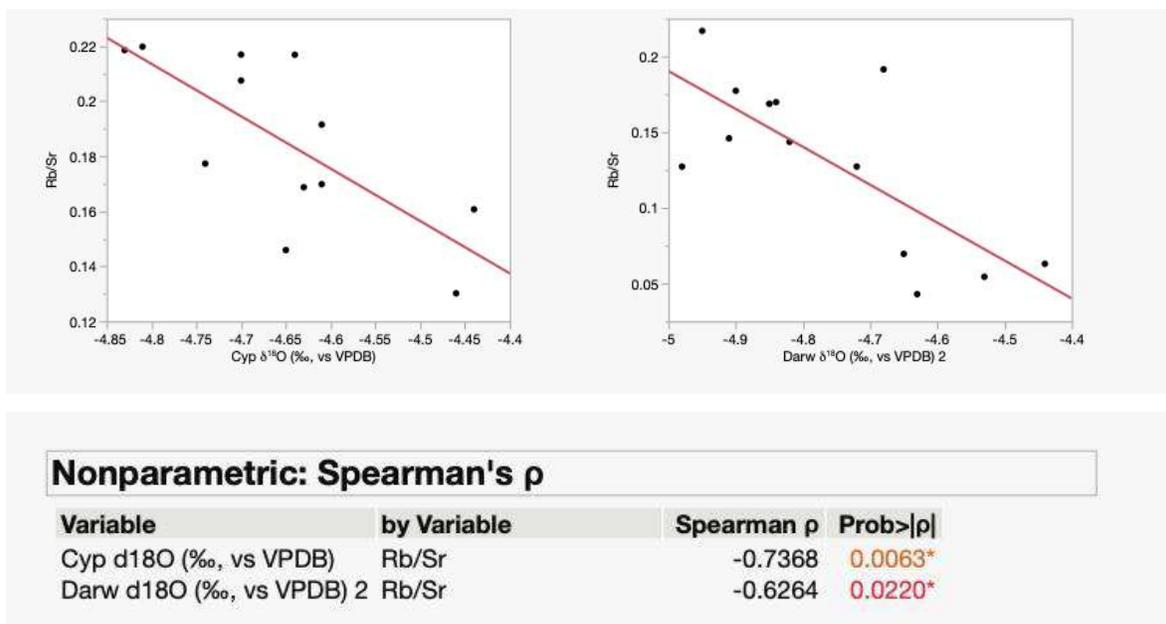


Figura 28: Correlación entre $\delta^{18}\text{O}$ y Rb/Sr en el Cenote de Kikal.

Análisis del modelo de edad-profundidad y la quimioestratigrafía

El análisis de componentes principales (PCA) realizado sobre los datos de la tabla Kikal reveló el PC1 está fuertemente influenciado por elementos carbonatados y litogénicos. Las cargas más altas en PC1 corresponden a CaCO_3 (0.348), TIC (0.348), Ca (0.345), y Sr (0.338), que son elementos típicamente asociados con carbonatos. Además, Rb (-0.340), Zr (-0.346), Al (-0.301) y TC (0.257), elementos litogénicos, también contribuyen significativamente a PC1. Este componente captura principalmente la variabilidad relacionada con la presencia de carbonatos y ciertos minerales litogénicos en las muestras.

PC2, por otro lado, está influenciado predominantemente por compuestos orgánicos y elementos terrígenos y litogénicos. Las cargas más altas en PC2 corresponden a Fe (0.514), $\delta^{13}\text{C}$ (0.432), TOC (-0.446), TN (-0.439), y TC (-0.379). Los compuestos orgánicos, como TOC, TN y TC, tienen cargas negativas altas, indicando que PC2 captura variabilidad asociada con la materia orgánica. Además, Fe y $\delta^{13}\text{C}$, que son elementos terrígenos y de isótopos estables, también contribuyen de manera significativa a este componente.

En conclusión, los PC1 y PC2 juntos explican el 96.54% de la varianza de los datos. El PC1 (84.54%), dominado por elementos carbonatados y litogénicos, sugiere que las variaciones en estos componentes son clave para explicar la mayor parte de la variabilidad

en los datos. Por otro lado, el PC2 (15%), influenciado por compuestos orgánicos y elementos terrígenos y litogénicos, captura la variabilidad asociada con la materia orgánica y la sedimentación de materiales terrígenos (Figura 29).

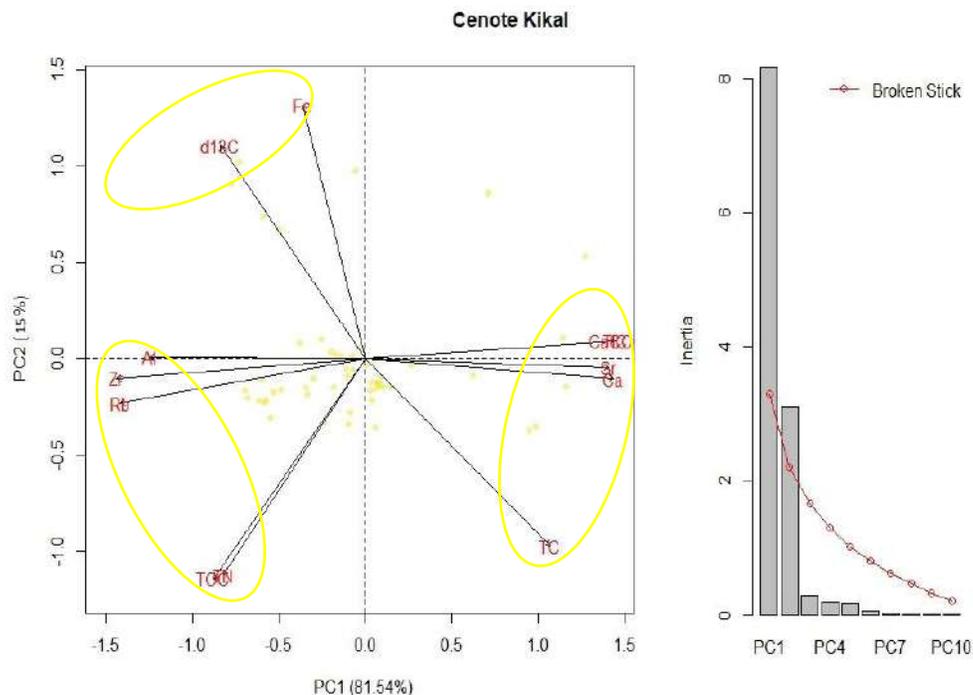


Figura 29: PCA cenote Kikal. Prueba de Broken Stick.

Cenote Oxola

El cenote Oxola se ubica en la sección noroeste del ANP. Esta localizado a aproximadamente 2 km al oeste de Grupo A, en las coordenadas 20°40'41"N 89°14'30"W. El núcleo fue recolectado a unos 35 m de profundidad bajo la superficie de agua y mide 94 cm, siendo el segundo núcleo más largo de la muestra, pero el de menor profundidad temporal, traslapando a partir del siglo XV hasta el s. XIX con el núcleo recuperado en Ciil. En las proximidades del cenote se observaron algunas estructuras prehispánicas, entre basamentos sencillos, plataformas y cimientos absidales, los cuales se cree, tuvieron una función de carácter habitacional. Por la baja densidad de estructuras observadas, esta área se considera como rural y periférica al núcleo urbano de Yalahau.

Durante épocas posteriores a la conquista, esta zona presenta una ocupación prácticamente nula, siendo hasta años posteriores cuando destinada para planteles henequeneros, asociados a la producción de la hacienda Chichi Suarez en el s. XIX y XX, misma que se ubicada a 2 km al oeste del cenote. Hasta la actualidad, esta área continúa funcionando como área de cultivo henequenero, pero en mucha menor densidad comparado con sus tiempos de apogeo.

Fechas de radiocarbono y modelo de edad-profundidad

El *modelo de edad*. Se realizó a partir de dos dataciones radiométricas de ^{14}C en madera y restos botánicos. Con base en las fechas y los estratos del núcleo, el modelo de edad reveló una antigüedad basal de ~ 600 años A.P. (1350 d.C.), a 94 cm de profundidad, mientras que la parte superior con 4 cm de profundidad presento una antigüedad ~ 150 (1800 d.C.) años calibrados antes del presente (cal. AP, en adelante), abarcando un intervalo de ~ 460 años (Tabla 6). El núcleo consiste en capas gruesas que alternan entre limo arcilloso y capas de lodo calizo con arena (Figura 28).

ID de la muestra	Tipo de muestra	Fracción moderna		Edad de radiocarbono	
		pMC	1 σ error	AP	1 σ error
Oxo21-III32.5	madera	96.96	0.22	248	18
Oxo21-III83	orgánica	91.27	0.27	734	24

Tabla 6: Fechamientos absolutos. Años calibrados a.P. Cenote Oxola

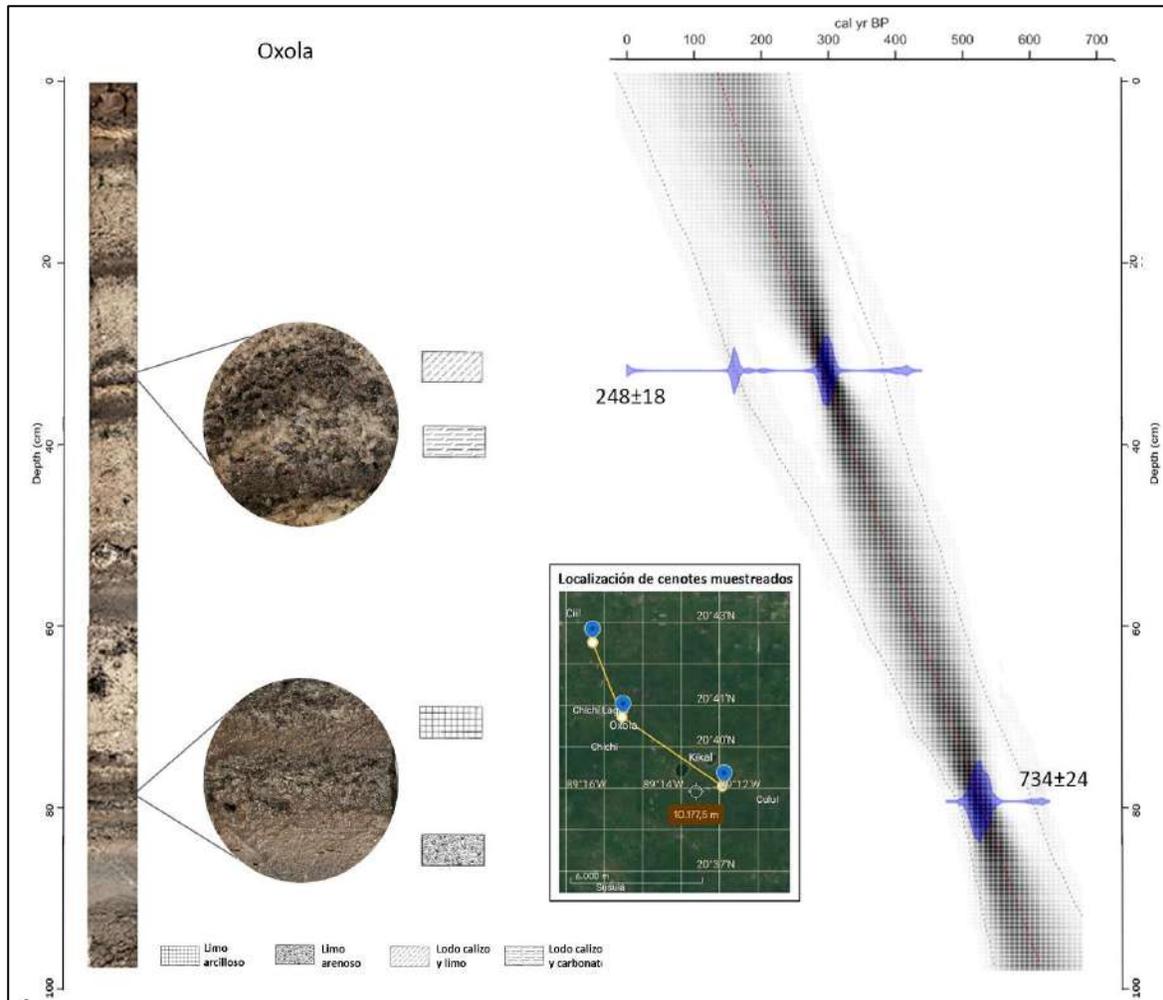


Figura 30: Núcleo del cenote Oxola. Modelo de edad corregido a.P. localización del cenote Oxola.

Tasa de sedimentación en el cenote Oxola.

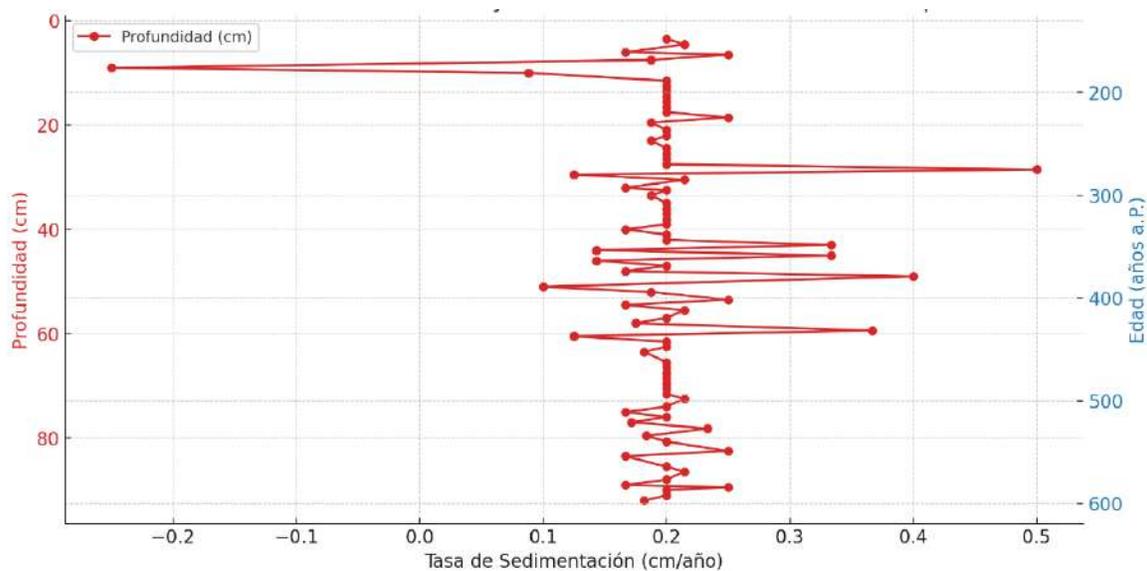
El estudio de la tasa de sedimentación en el Cenote Oxola proporciona una visión detallada de los procesos depositacionales a lo largo del tiempo, reflejando tanto cambios ambientales como eventos específicos que afectaron la entrada de sedimentos. Los sedimentos del Cenote Oxola, muestreados hasta una profundidad basal de 94 cm, abarcan un periodo que va desde aproximadamente 608 años a.P. (1342 d.C.) hasta 148 años a.P. (1802 ad.C.). La tasa de sedimentación, que varía entre 0.01 cm/año y 0.50 cm/año, presenta fluctuaciones que pueden estar vinculadas a eventos climáticos, cambios en el uso del suelo o variaciones en el aporte de material sedimentario (Figura 29).

En las capas superficiales (3.5 - 10.5 cm), correspondientes a edades entre 148 y 769 años a.P., se observa una tasa de sedimentación que oscila entre 0.05 y 0.20 cm/año. Estas tasas relativamente bajas podrían indicar un periodo reciente con una menor entrada de sedimentos, posiblemente debido a una disminución en la erosión o cambios en las prácticas agrícolas y de uso de la tierra.

A profundidades intermedias (10.5 - 25.5 cm), que abarcan edades desde 769 hasta 1156 años a.P., la tasa de sedimentación varía entre 0.05 y 0.11 cm/año. Esta ligera variabilidad sugiere un periodo de estabilidad ambiental, con una entrada de sedimentos relativamente constante, indicando un entorno depositacional estable.

En las profundidades medias (25.5 - 40 cm), con edades entre 1156 y 1612 años d.C., se observa una ligera disminución en la tasa de sedimentación, que varía entre 0.10 y 0.12 cm/año. Esta tendencia podría reflejar una reducción gradual en el aporte de sedimentos, posiblemente asociada con cambios en el entorno circundante o en las actividades humanas.

En las capas más profundas (40 - 94 cm), que cubren edades desde 1612 hasta 608 años a.P., la tasa de sedimentación muestra una mayor variabilidad, fluctuando entre 0.01 y 0.50 cm/año. Esta variabilidad podría indicar periodos de mayor inestabilidad ambiental o cambios significativos en el aporte de material sedimentario, sugiriendo una respuesta a eventos climáticos a lo largo del tiempo.



Quimioestratigrafía elemental

En cuanto a elementos pesados, Al presentó valores entre 16119.36 y 24382.80 ppm (media: 19439.47 ppm) con un incremento moderado a mayores profundidades, mientras que Ca tuvo un rango de 108027.18 a 311392.99 ppm (media: 253188.92 ppm) con una leve disminución a mayores profundidades. Fe mostró valores entre 2526.00 y 32687.89 ppm (media: 7216.41 ppm) con una disminución a mayores profundidades. Rb varió entre 10.53 y 62.85 ppm (media: 25.37 ppm) con un aumento a mayores profundidades, y Sr entre 181.87 y 692.23 ppm (media: 584.54 ppm) con una disminución notable a mayores profundidades. Finalmente, Zr osciló entre 19.74 y 107.16 ppm (media: 45.53 ppm) con un incremento a mayores profundidades (Figura 30).

El análisis detallado de los picos de concentración de rubidio (Rb) y estroncio (Sr) en las muestras sedimentarias proporciona información crucial sobre los cambios climáticos a lo largo del tiempo. Los picos máximos de Rb indican momentos de mayor precipitación y erosión mecánica. En el año 1397 d.C., se observa una concentración de Rb de 62.85 ppm, lo que corresponde a un período de intensas lluvias. Las condiciones climáticas durante este período favorecieron la erosión mecánica, incrementando la carga de sedimentos ricos en rubidio. Similarmente, en el año 1365 d.C., se registra una concentración de Rb de 56.71 ppm, señalando un período de alta precipitación y erosión mecánica.

La recurrencia de picos altos de Rb en este intervalo temporal sugiere una fase prolongada de clima húmedo. Otro período significativo de lluvias se observa en el año 1385 d.C., con una concentración de Rb de 56.13 ppm, reforzando la hipótesis de ciclos climáticos húmedos recurrentes en la región. En el año 1527 d.C., la concentración de Rb es de 54.38 ppm, marcando un período posterior de lluvias intensas y destacando una fluctuación en los patrones climáticos hacia condiciones más húmedas. Este análisis revela que la recurrencia de estos picos altos de Rb sugiere una fase prolongada de clima húmedo, con ciclos climáticos húmedos recurrentes en la región.

Por otro lado, los picos máximos de Sr reflejan momentos de mayor sequía y erosión química. En el año 1639 d.C., se registra una concentración de Sr de 692.23 ppm, indicando un período de sequía prolongada. Las condiciones climáticas durante este tiempo favorecieron la intemperización química y la acumulación de estroncio en los sedimentos. En el año 1752 d.C., la concentración de Sr alcanza 688.11 ppm, señalando otra fase

significativa de sequía. La alta concentración de Sr en el año 1692 d.C. (687.79 ppm) sugiere fases recurrentes de aridez, reforzando la naturaleza cíclica de los eventos secos. En el año 1687 d.C., se observa una concentración de Sr de 681.77 ppm, indicando fluctuaciones en los patrones climáticos hacia condiciones más secas. Finalmente, en el año 1487 d.C., la concentración de Sr es de 679.55 ppm, confirmando la existencia de períodos recurrentes de alta sequía en el registro sedimentario.

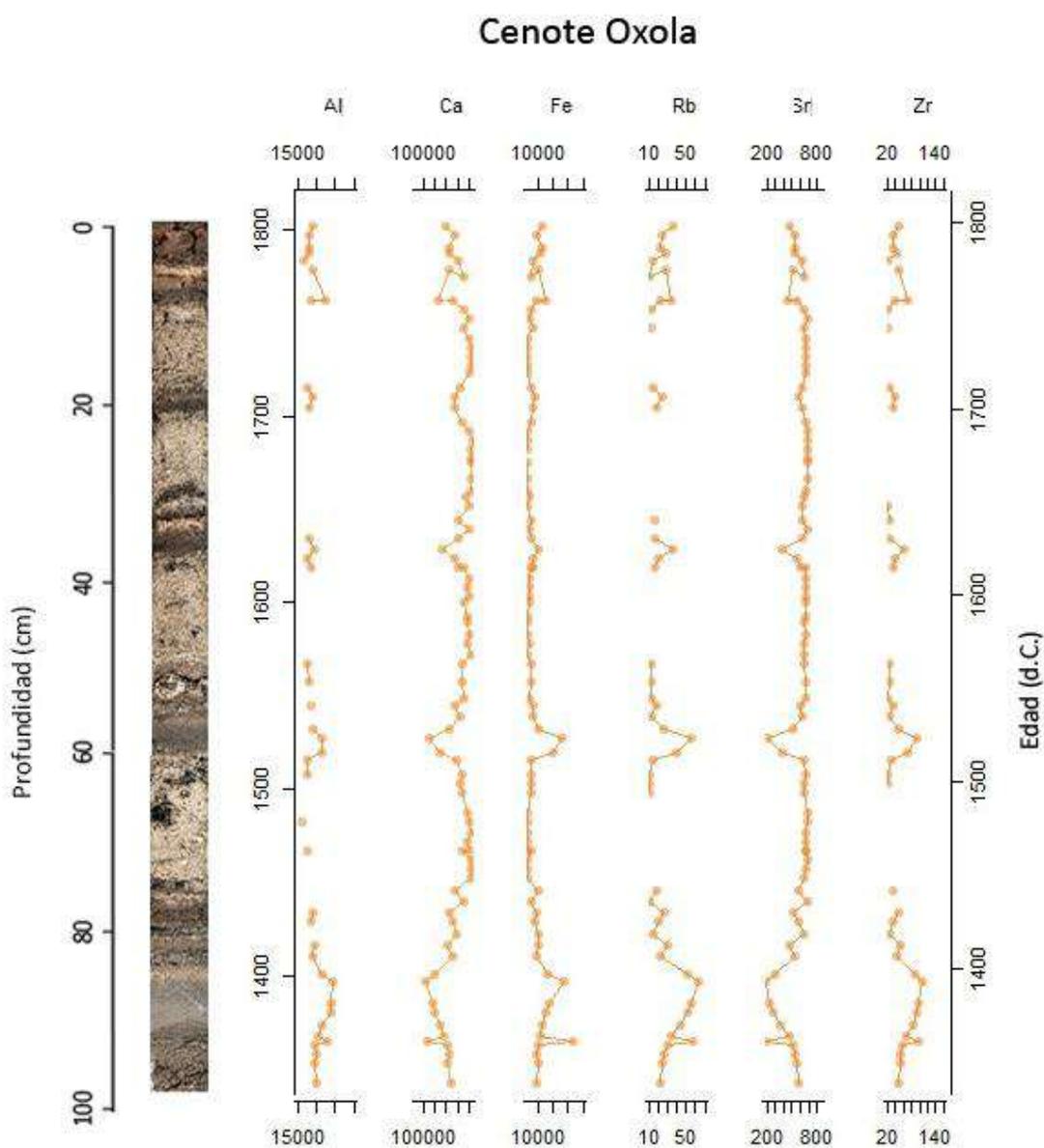


Figura 32: Quimioestratigrafía elemental. Cenote Oxola. (Los espacios en blanco son valores faltantes en la cuantificación \leq LoD).

En conclusión, el análisis de las concentraciones de Rb y Sr revela patrones cíclicos de cambios climáticos, alternando entre períodos de mayor precipitación y sequía. Los años 1397 d.C., 1365 d.C., 1385 d.C., 1527 d.C. y 1380 d.C. están caracterizados por picos altos en las concentraciones de Rb, indicando episodios climáticos húmedos que afectaron la región de estudio. Por el contrario, los años 1639 d.C., 1752 d.C., 1692 d.C., 1687 d.C. y 1487 d.C. muestran picos altos en las concentraciones de Sr, reflejando períodos de sequía prolongada.

Quimioestratigrafía isotópica

Con respecto a los elementos ligeros, los valores de TN oscilaron entre 0.02 y 0.51 ppm (media: 0.15 ppm), mientras que los de TC variaron de 8.09 a 14.07 ppm (media: 11.98 ppm). y TIC mostró un rango de 4.25 a 11.70 ppm (media: 9.97 ppm). Los valores de TOC oscilaron entre 0.23 y 5.88 ppm (media: 2.00 ppm), mientras que los valores de CaCO₃ fluctuaron entre 35.43 y 97.49 ppm (media: 83.10 ppm).

La medición de $\delta^{13}\text{C}$ varió de -30.61 a -25.17 ppm (media: -26.44 ppm). En las capas superiores, a una profundidad de 3.5 centímetros y una edad de aproximadamente 1802 años, el valor de $\delta^{13}\text{C}$ es de -26.47‰. A una profundidad de 6.5 centímetros, con una edad estimada de 1787 años, el valor de $\delta^{13}\text{C}$ se eleva levemente a -25.86‰. Este incremento puede reflejar un periodo específico de cambios en la vegetación o en las condiciones limnológicas del cenote. Al llegar a 14.5 centímetros (1747 d.C.), notamos un valor de $\delta^{13}\text{C}$ de -26.19‰. Este valor sugiere un retorno a condiciones de más estabilidad en comparación con las capas inmediatamente superiores.

A una mayor profundidad de 24.5 centímetros y una antigüedad de 1697 d.C., observamos un cambio dramático en el $\delta^{13}\text{C}$, con un valor de -30.61‰. Esta significativa disminución podría indicar una anomalía o un cambio ambiental repentino, posiblemente asociada con eventos de aporte extraordinario de material orgánico. A medida que continuamos descendiendo, a 29.5 centímetros y una edad de aproximadamente 1675 d.C., el valor de -26.42‰ sugiere un regreso a condiciones más constantes, reflejando una estabilidad en los factores que influyen en la sedimentación orgánica del cenote (Figura 31).

Cenote Oxola

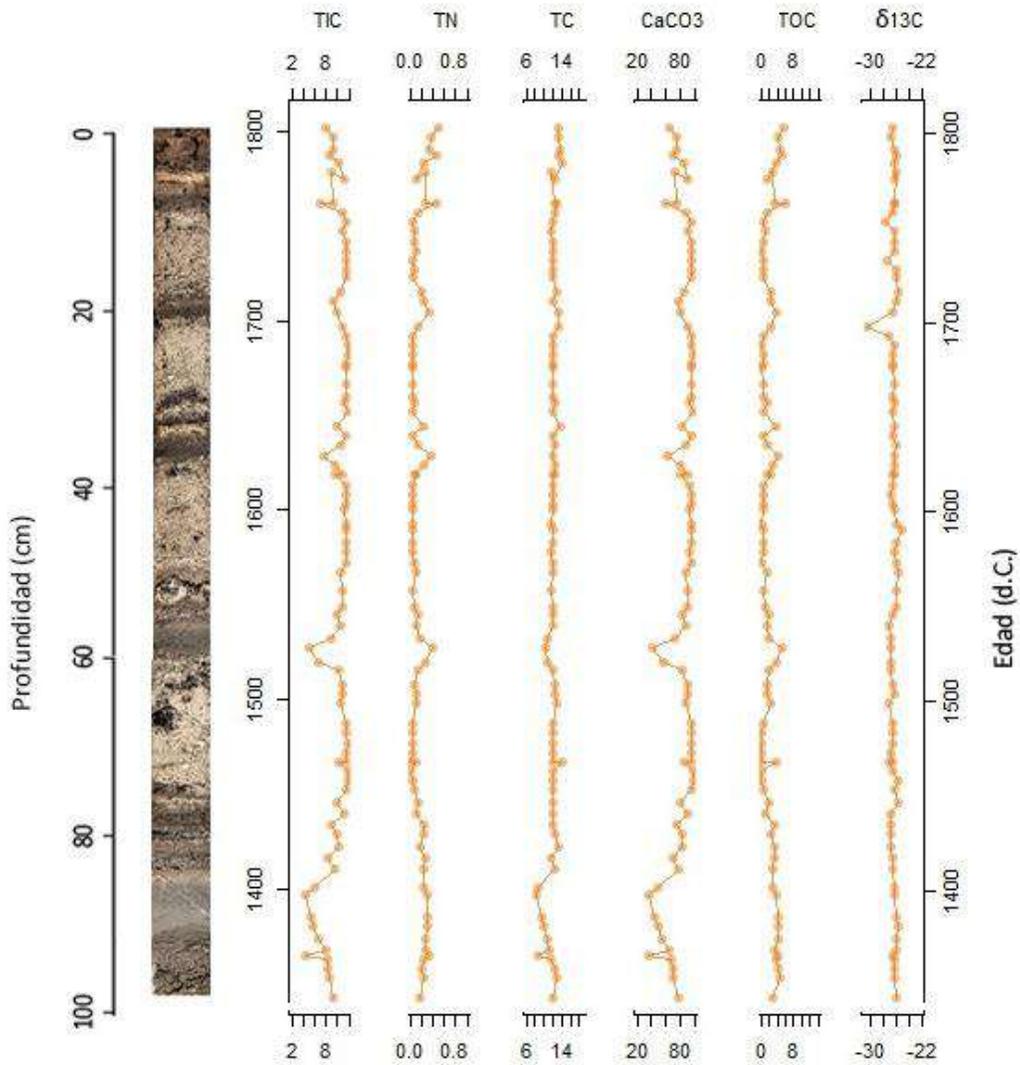


Figura 33: Quimioestratigrafía isotópica. Cenote Oxola.

A profundidades de 40 a 41 centímetros (1619 a 1613 d.C.), los valores de $\delta^{13}\text{C}$ muestran ligeras variaciones entre -26.22‰ y -26.64‰. Estas fluctuaciones indican pequeñas oscilaciones en las condiciones ambientales, sin cambios drásticos en comparación con las capas previas. En un sondeo más profundo, a 46 centímetros (1590 d.C.), encontramos un valor notablemente bajo de $\delta^{13}\text{C}$ de -25.17‰, seguido por un retorno a valores medios de

alrededor de -26.07‰ a profundidades de 47 a 49 centímetros (1583 a 1572 d.C.). Este patrón podría reflejar un breve cambio en las condiciones de aporte orgánico o climáticas, seguido por una vuelta a la normalidad.

Hacia una profundidad de 55.5 centímetros (1539 d.C.), ocurre otra notable disminución del $\delta^{13}\text{C}$ a -26.99‰, seguido de valores levemente fluctuantes pero altos que se mantienen entre -26.99‰ y -26.73‰ hasta 61.5 centímetros (1508 d.C.). Esta secuencia indica una fase continua de condiciones que favorecen una composición isotópica similar durante muchos años.

Al llegar a 65.5 centímetros (1487 d.C.), el valor de $\delta^{13}\text{C}$ es de -26.48‰, conduciendo a una estabilización que se conserva hasta aproximadamente 74 centímetros (1445 años), con un notable valor bajo de -25.78‰ que marca una pequeña alteración en este patrón continuo. Finalmente, las capas más profundas, de 85.5 a 94 centímetros (1385 a 1342 d.C.), presentan valores de $\delta^{13}\text{C}$ fluctuando entre -26.03‰ y -25.9‰. Esta secuencia sugiere una cronología de condiciones estables con leves variaciones reflejando uniformidad en las fuentes de materia orgánica y en las condiciones ambientales del cenote.

Para la variable $\delta^{13}\text{C}$ -Darw, se observaron valores válidos en varias muestras a diferentes profundidades y edades. En la muestra correspondiente al año 1802 d.C. y una profundidad de 3.5 cm, el valor de $\delta^{13}\text{C}$ -Darw es de -8.97‰. A medida que nos movemos a sedimentos más profundos y antiguos, el valor de $\delta^{13}\text{C}$ -Darw varía, alcanzando -8.14‰ a una profundidad de 89 cm en el año 1368 d.C. Estos datos reflejan variaciones en la composición isotópica del carbono en Darwina, que pueden estar relacionadas con cambios en las fuentes de materia orgánica y la productividad biológica a lo largo del tiempo.

En cuanto a la variable $\delta^{13}\text{C}$ -Cyp, se registraron valores válidos en muestras que también abarcan diferentes profundidades y edades. A una profundidad de 3.5 cm en el año 1802 d.C., el valor de $\delta^{13}\text{C}$ -Cyp es de 1.99‰. Este valor se vuelve negativo en sedimentos más profundos, alcanzando -9.74‰ a 11.5 cm en 1762 d.C. y -8.66‰ a 89 cm en 1368 d.C. Esto sugiere cambios en las condiciones ambientales y en las fuentes de carbono orgánico durante el periodo de depositación.

Para la variable $\delta^{18}\text{O}$ -Darw, los valores válidos muestran una tendencia clara en relación con la profundidad y la edad de los sedimentos. A una profundidad de 3.5 cm y 1802 d.C., el valor de $\delta^{18}\text{O}$ -Darw es de -5.46‰. Este valor varía en sedimentos más profundos,

alcanzando -5.29‰ a 22 cm en 1710 d.C. y -4.52‰ a 89 cm en 1368 d.C. Esto puede reflejar cambios en la temperatura del agua y otras condiciones climáticas durante la formación de los sedimentos.

La correlación entre $\delta^{13}\text{C-Darw}$ y $\delta^{13}\text{C-Cyp}$ es negativa y significativa, con un valor de -0.850 . Esto indica que a medida que la composición isotópica de carbono en Darwina se vuelve más negativa, la composición isotópica de carbono en Cypris tiende a ser más positiva, y viceversa. Esta relación inversa puede sugerir diferencias en las fuentes de carbono orgánico o en la respuesta de estas especies a cambios ambientales (Figura 32/a).

La correlación entre $\delta^{13}\text{C-Darw}$ y $\delta^{18}\text{O-Darw}$ es positiva y fuerte, con un valor de 0.924 . Esto sugiere que las variaciones en la composición isotópica de carbono en Darwina están estrechamente relacionadas con las variaciones en la composición isotópica de oxígeno en la misma especie. Esta fuerte correlación puede indicar que ambos isótopos están respondiendo a factores ambientales comunes, como la temperatura del agua y las condiciones climáticas (Figura 32/b).

La correlación entre $\delta^{13}\text{C-Cyp}$ y $\delta^{18}\text{O-Darw}$ es negativa y significativa, con un valor de -0.979 . Esto indica una relación inversa muy fuerte entre la composición isotópica de carbono en Cypris y la composición isotópica de oxígeno en Darwina. Esta relación puede reflejar diferencias en las respuestas de estas especies a las condiciones ambientales, así como posibles interacciones complejas entre los ciclos de carbono y oxígeno en el medio ambiente (Figura 32/c).

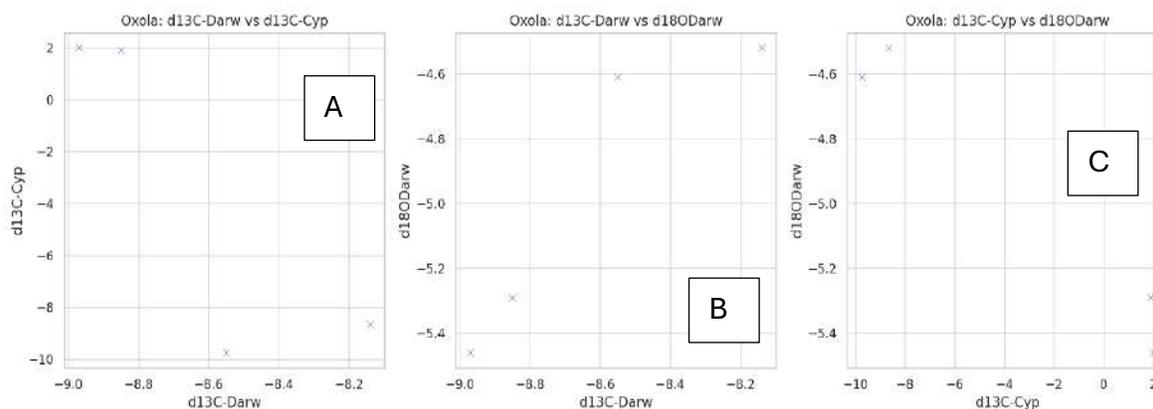


Figura 34: Gráfica de dispersión de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en ostrácodos, a, b y c Oxola.

Las correlaciones observadas entre las composiciones isotópicas de carbono y oxígeno en Darwina y Cypris sugieren relaciones significativas entre estas especies. La fuerte correlación positiva entre $\delta^{13}\text{C-Darw}$ y $\delta^{18}\text{O-Darw}$ destaca la influencia de factores ambientales comunes en ambas composiciones isotópicas, mientras que las correlaciones negativas entre $\delta^{13}\text{C-Darw}$ y $\delta^{13}\text{C-Cyp}$, así como entre $\delta^{13}\text{C-Cyp}$ y $\delta^{18}\text{O-Darw}$, indican posibles diferencias en las fuentes de carbono orgánico y en la respuesta de estas especies a los cambios ambientales. Si podemos inferir por los cambios de especies que, los cambios ambientales estuvieron presentes a lo largo de toda la secuencia estratigráfica de manera continua

Análisis del modelo de edad-profundidad y la quimioestratigrafía

A través del análisis de PCA al núcleo de Oxola, se logró identificar las contribuciones de las variables a los dos primeros componentes principales, PC1 (55%) y PC2 (15%), que juntos explican el 70% de la variabilidad total en los datos (Figura 33).

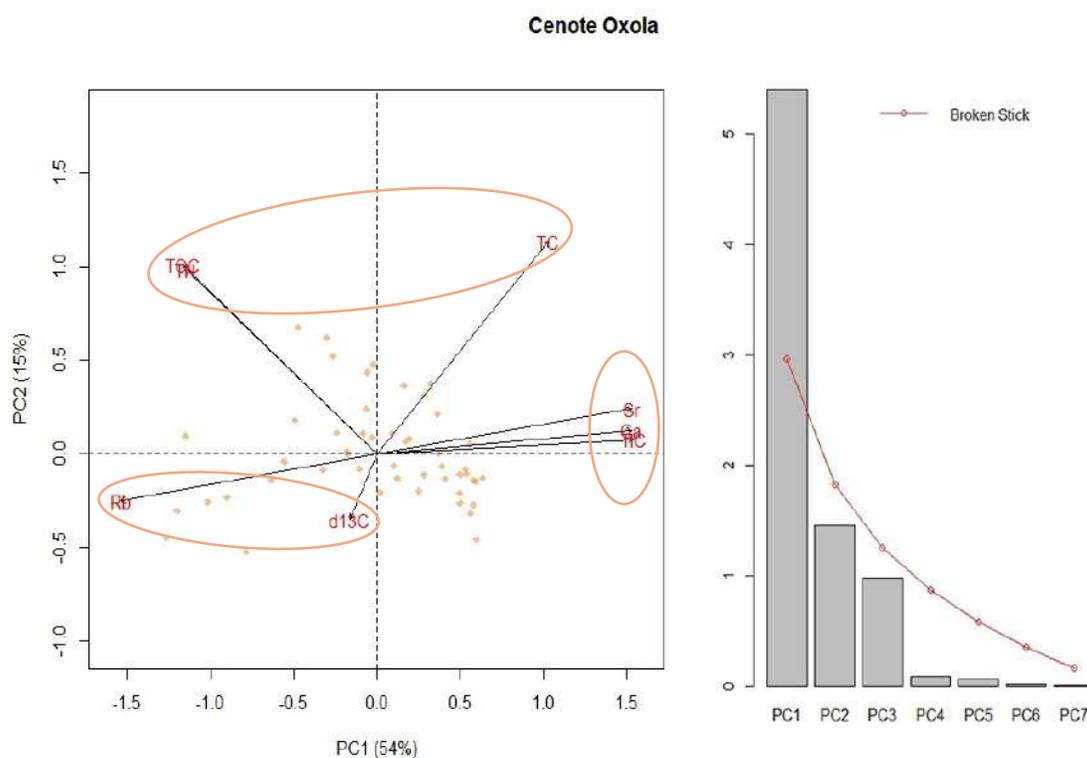


Figura 35: PCA del cenote Oxola. Prueba de Broken Stick.

El PC1 está fuertemente influenciado por elementos terrígenos y litogénicos. Las cargas más altas en PC1 corresponden a Rb (0.335), Zr (0.329), Fe (0.312), y Al (0.308), así como por elementos relacionados con carbonatos como Ca (-0.333), CaCO₃ (-0.333), TIC (-0.333) y Sr (-0.334). Estas variables tienen las cargas más altas en PC1, indicando que contribuyen significativamente a la variabilidad explicada por este componente. En particular, Rb y Zr tienen las cargas más altas, sugiriendo que las variaciones en estos elementos son clave para explicar la mayor parte de la variabilidad en los datos.

Para el PC2, por otro lado, vemos que se encuentra principalmente compuesto por materia orgánica, elementos terrígenos e isótopos estables. Las cargas más altas en PC2 corresponden a TN (0.593), TOC (0.583), TC (0.455), Al (-0.195), y $\delta^{13}\text{C}$ (-0.195). Los compuestos orgánicos, como TN, TOC y TC, tienen cargas positivas altas, indicando que PC2 captura variabilidad asociada con la materia orgánica. Además, Al y $\delta^{13}\text{C}$, que son elementos terrígenos y de isótopos estables, también contribuyen de manera significativa a este componente.

La Quimioestratigrafía de Yalahau.

Dado que los cambios entre secuencia en el registro individual muestra procesos similares entre los diferentes cenotes, se decidió hacer un PCA general con todos los registros juntos. El análisis de componentes principales realizado sobre los datos de los núcleos de sedimentos de los cenotes "Kikal", "Oxola" y "Ciil" proporciona una visión comprensiva de las principales fuentes de variabilidad en los elementos presentes en las muestras. Este análisis permitió identificar las contribuciones de diversas variables a los dos primeros componentes principales (PC1 y PC2), que explican conjuntamente el 95% de la variabilidad total en los datos.

La quimioestratigrafía elemental en Yalahau

El PCA revela que los dos primeros componentes principales, PC1 (70%) y PC2 (25%), explican el 95% de la variabilidad en los datos (Figura 34). Las observaciones están coloreadas según el cenote: verde para Ciil, naranja para Oxola y amarillo para Kikal. Las

variables están representadas por flechas rojas, indicando su contribución a los componentes principales. En el PC1 está fuertemente influenciado por los elementos litogénicos de Ca,

TiC, CaCO₃ y Sr, sugiriendo que estos componentes son determinantes en la variabilidad explicada por este componente. Contrariamente, TC, TN y TOC están correlacionados negativamente con PC1, lo que indica una influencia opuesta. PC2 está principalmente determinado por las concentraciones de los elementos Al, Rb, Fe y Zr en el componente terrigénico, lo que sugiere su importancia en la variabilidad explicada por el segundo componente principal (Figura 34).

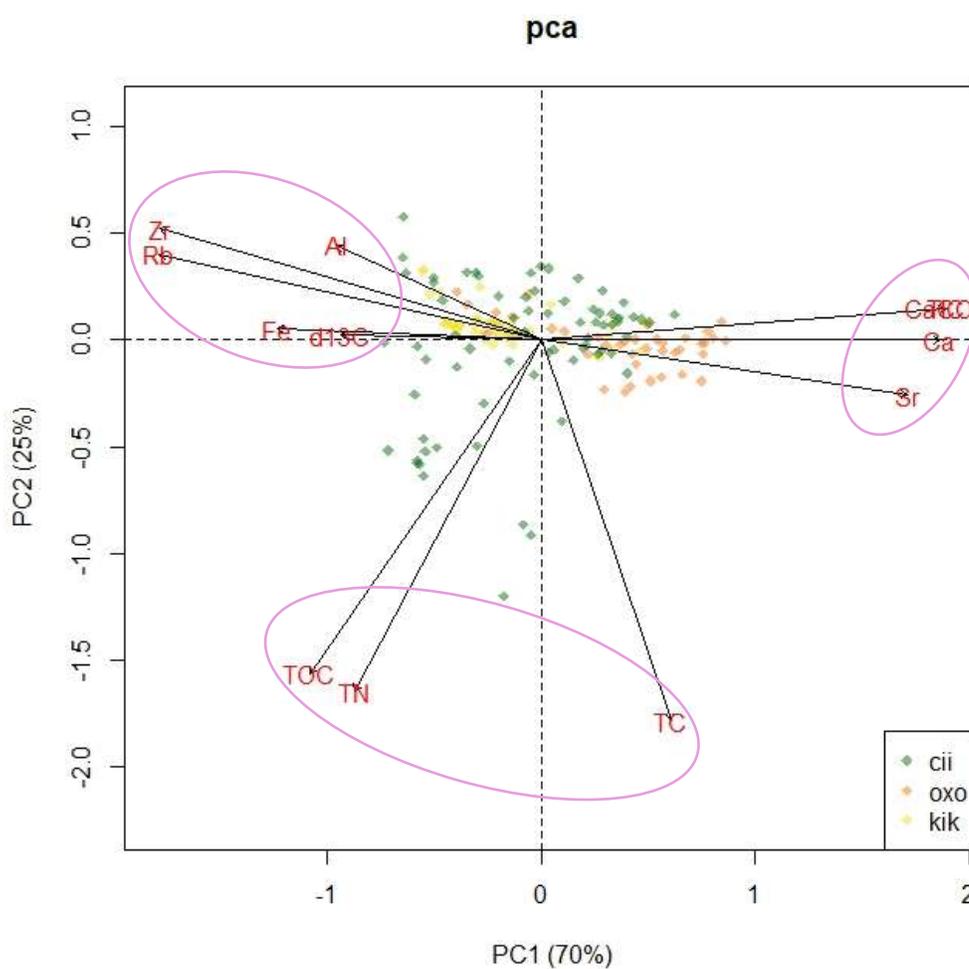


Figura 36: PCA general, integrando los datos de los cenotes Ciil, Kikal y Oxola.

Los gráficos de densidad por Kernel (KDE) presentados muestran las distancias de las muestras Ciil, Oxola y Kikal para dos conjuntos de datos distintos. En el primer gráfico (dist_cii), con un tamaño de muestra de $N=2556$ y un ancho de banda de 0.06508 , se observa que la muestra de Ciil presenta un pico alto y estrecho cerca del valor 0, indicando una alta concentración de datos en esa región. En contraste, las muestras de Oxola y Kikal exhiben distribuciones más amplias y uniformes, con picos menos pronunciados y colas más largas hacia valores mayores, sugiriendo una dispersión más considerable de los datos, seguramente como subrogado de variabilidad ambiental reflejada en cada sitio. En el segundo gráfico (Ciil-Oxola), (con un valor de $n= 1995$ para las tres muestras...) observaciones y utiliza un ancho de banda de 0.07387 , las distribuciones muestran un comportamiento similar. La muestra Ciil tiene una concentración moderada alrededor del valor 0.5, mientras que Oxola y Kikal mantienen distribuciones amplias con picos menos marcados, reflejando una dispersión homogénea en el rango de valores. Este análisis muestra que, aunque la muestra Ciil tiende a concentrarse en valores específicos, las muestras Oxola y Kikal presentan una variabilidad mayor en ambas configuraciones de datos, lo cual ayuda a entender las diferencias en la dispersión y concentración de los datos entre las distintas muestras (Figura 35).

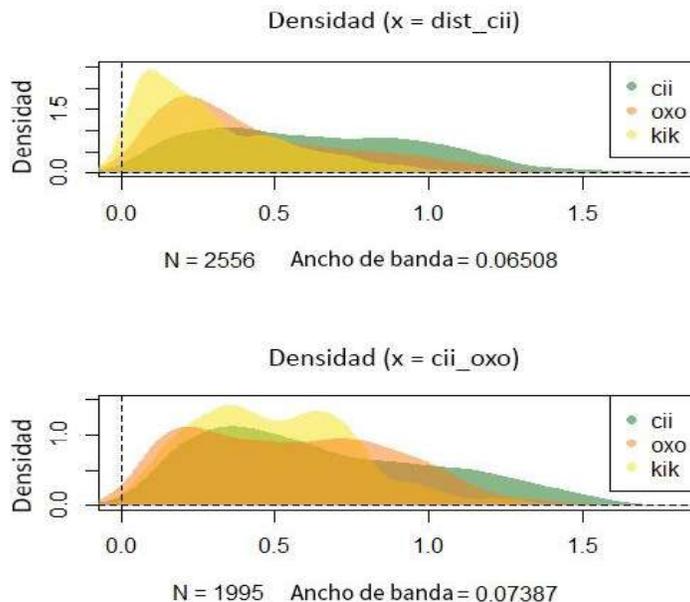


Figura 37: Análisis de densidad. Prueba Kernel (KDE).

Elementos Carbonatados (Ca, TIC, CaCO₃, Sr).

En los tres cenotes, los elementos litogénicos Ca, TIC, CaCO₃ y Sr son sobresalientes en el primer componente principal (PC1). Esto sugiere que los procesos relacionados con la depositación de carbonatos son un factor clave que explica gran parte de la variabilidad en los datos de sedimentos. Los altos valores de estos elementos pueden estar relacionados con condiciones ambientales que favorecen la disolución de rocas calizas que forman parte del sustrato geológico de los cenotes (a través del ácido carbónico en el agua del manto freático), la saturación de las aguas con bicarbonatos y calcio y su precipitación como carbonatos por cambios en la solubilidad (v.g., vía reducción en el volumen de agua por evaporación). La ausencia de otros elementos pesados indica que su concentración en la roca madre no es suficiente para que ellos juegan un papel importante en los procesos geoquímicas del cenote (Figura 36).

Variabilidad de la Materia Orgánica (TN, TC y TOC)

TC, TN y TOC muestran una correlación negativa con PC1 y positiva con PC2, especialmente en los núcleos de Oxola y Ciiil. Esto indica que la materia orgánica es un factor importante que contribuye a la variabilidad en los sedimentos, pero en una dirección opuesta a los elementos carbonatados. La presencia de altos niveles de materia orgánica puede estar relacionada con una alta productividad biológica en la superficie del cenote o con la entrada de material orgánico terrestre, como hojas y detritos vegetales. Esta variabilidad también podría indicar diferentes épocas de depositación o cambios estacionales en la entrada de materia orgánica. Cabe señalar que, por las entradas restringidos de los cenotes y sus naturalezas lóticos bajo condiciones ambientales predominantes, la fotosíntesis por plantas acuáticas o bacteria que produzca materia orgánica no es un factor clave en la geoquímica de los sedimentos (pero esto pudiera cambiar bajo condiciones extremas, v.g., inyección excesiva de P o sequía extrema asumiendo que suficiente luz solar pega en el agua) (Figura 36).

Elementos Terrigénicos (Rb, K, Al, Fe y Zr).

Rb, K, Al, Fe y Zr son elementos que están fuertemente correlacionados con el segundo componente principal (PC2) en los tres núcleos. Esto sugiere que los sedimentos terrígenos, derivados de la erosión mecánica y química de rocas, lo cual hace estos elementos

biodisponibles, la actividad de microorganismos conjunto con las plantas, los cuales concentran estos elementos en la materia orgánica a través de bioacumulación (citas), y su depositación posterior en los suelos, juegan un papel importante en la composición de los sedimentos. Se espera una entrada continua de material terrigénico a los cenotes bajo las condiciones pluviales predominantes por la escorrentía superficial de agua. En consecuencia, la intensidad (velocidad y volumen) de la depositación de este material en los cenotes varía dependiendo de cambios en el régimen lluvia o cambios en el uso de tierras. Por ejemplo, durante sequías prolongadas el arrastre de suelos con materia orgánica disminuya resultando en sedimentos con menor concentración de elementos terrigénicos en los cenotes, así como cuando tierras agrícolas se dejan en barbecho prolongas y el bosque o pastizales entran y anclan los suelos en su lugar. Al contrario, cuando la intensidad de lluvias aumenta significativamente (v.g., durante huracanes fuertes o ciclos climáticos con un aumento en la humedad) o cuando el bosque se convierte a pastizales o tierras agrícolas, el arrastre por erosión aumenta y más elementos terrigénicos se depositan en los cenotes.

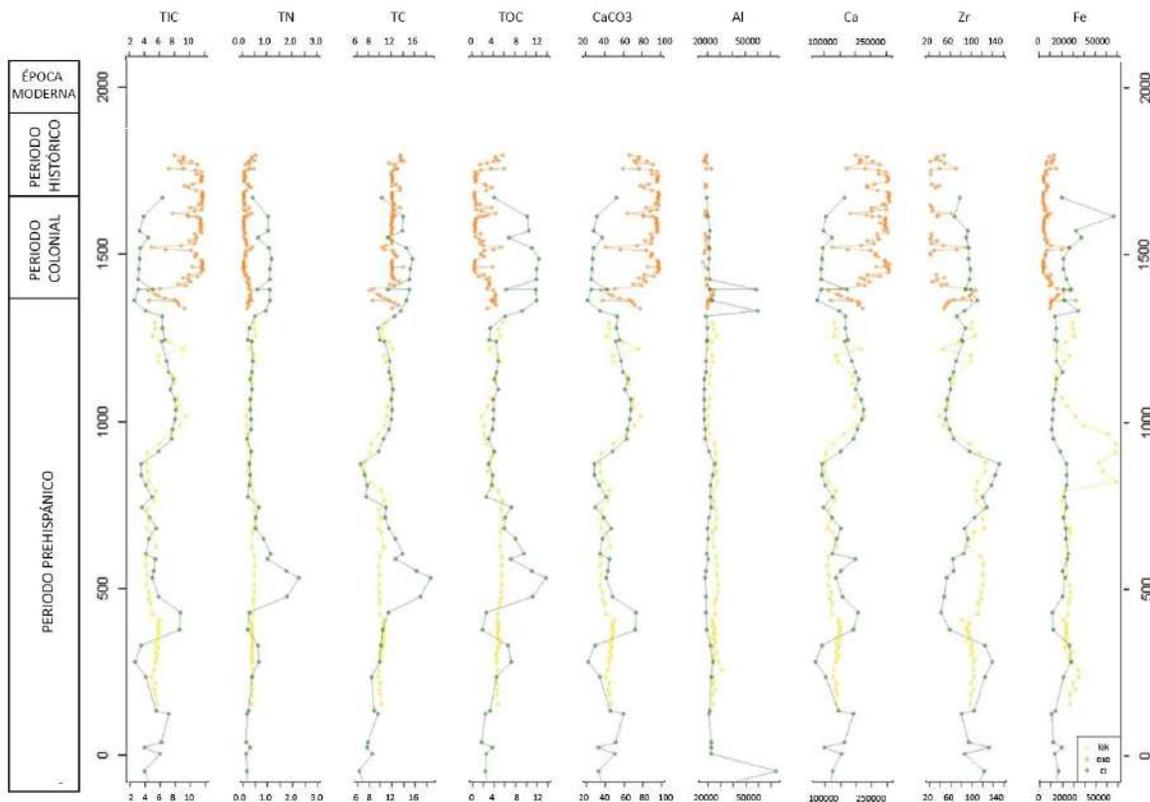


Figura 38: Relación de valores en elementos terrigénicos y materia orgánica de los cenotes Oxola, Kikal y Ciil/ Períodos de ocupación.

Así estos elementos en combinación con los procesos de depositación de los elementos litogénicos nos puede informar sobre procesos climáticos (cambios en temperatura y humedad) y/o cambios en los usos de suelos por humanos.

Diferencias entre los Cenotes

Cada cenote presenta un patrón de variabilidad, reflejando los procesos depositacionales y las condiciones ambientales específicas de cada sitio de muestreo. Por ejemplo:

- En Kikal, la alta explicación de la varianza por parte de PC1 (81.54%) sugiere que los procesos dominados por los carbonatos son particularmente importantes en este cenote, con menor influencia de otros factores. Que dice esto: planteo que muestra un régimen lluvia estable con intermitente períodos de humedad y sequías, con algunos momentos con excesos de lluvia extremos, posiblemente huracanas entre los s. IV-XIII.
- En Oxola, la menor explicación de la varianza por PC1 (54%) y la mayor dispersión de las observaciones indican una mayor complejidad y diversidad en las fuentes y procesos que contribuyen a la deposición de sedimentos. Que significa: se considera una época y espacio donde las oscilaciones climáticas son fuertes y sin estabilidad entre los s. XIV-XIX.
- En Ciil, los componentes principales muestran una combinación equilibrada de influencias de carbonatos, materia orgánica y elementos terrígenos, sugiriendo un entorno deposicional más heterogéneo en lo que se considera como el área más alejada del asentamiento.

El análisis de PCA general proporciona una visión integral de las fuentes de variabilidad en los sedimentos de los cenotes "Kikal", "Oxola" y "Ciil". La importancia de los elementos carbonatados, la variabilidad en la materia orgánica y la contribución de elementos terrígenos o litogénicos destacan la complejidad de los procesos depositacionales en estos entornos. Por ende, cuando se combinan los datos de quimioestratigrafía elemental con la quimioestratigrafía de $\delta^{13}\text{C}$ y los modelos de edad-profundidad derivados de varios núcleos en la misma subregión, así como la arqueología y la historia, se puede generar una visión más holística de la historia ecológica del paisaje de una subregión. Estas interpretaciones son

esenciales para comprender la historia y las condiciones socioambientales en la larga duración.

La quimioestratigrafía isotópica en Yalahau.

En el núcleo de Kikal, los valores de $\delta^{13}\text{C}$ reflejan variaciones en las condiciones climáticas y ecológicas a lo largo del tiempo. Desde una profundidad de 4.3 cm correspondiente al año 1300 d.C., con un valor de $\delta^{13}\text{C}$ de -25.71 unidades, se observa un entorno de bosque tropical húmedo, dominado por plantas C3. Este ambiente relativamente húmedo se mantiene hasta 10.5 cm (1181 d.C.), donde el valor de $\delta^{13}\text{C}$ es -25.6. A 12.5 cm (1139 d.C.), el valor desciende a -26.2, indicando condiciones aún más húmedas. La variabilidad continúa a profundidades mayores, con un valor de -25.31 a 18.5 cm (992 d.C.), señalando condiciones menos húmedas. A 21.5 cm (908 d.C.), el valor de $\delta^{13}\text{C}$ es -24.32, reflejando un ambiente menos húmedo, posiblemente con una mayor presencia de plantas C4.

Esta tendencia de alternancia entre periodos de mayor y menor humedad persiste, como lo indica el valor de -23.62 a 23.5 cm (851 d.C.). A 33.5 cm (570 d.C.), el valor de -25.06 sugiere un ambiente moderadamente húmedo, mientras que a 35.5 cm (513 d.C.), con un valor de -25.03, se observa una ligera mejoría en la humedad. En las profundidades mayores, los valores de $\delta^{13}\text{C}$ fluctúan entre -25.03 a 35.5 cm (513 d.C.) y -25.88 a 50.5 cm (338 d.C.), mostrando alternancias entre periodos de mayor y menor humedad. Hacia los 62.8 cm (154 a.P.), el valor de $\delta^{13}\text{C}$ es -25.29, lo que refleja condiciones moderadamente húmedas.

En Oxola, los valores de $\delta^{13}\text{C}$ muestran una notable variabilidad a lo largo del tiempo. A una profundidad de 3.5 cm correspondiente al año 1802 d.C., el valor de $\delta^{13}\text{C}$ de -26.47 indica un entorno extremadamente húmedo, dominado por plantas C3. Este patrón de alta humedad se mantiene con valores de -26.3 a 6 cm (1790 d.C.) y -26.37 a 7.5 cm (1783 d.C.). A 13.5 cm (1752 d.C.), el valor de $\delta^{13}\text{C}$ desciende a -27.82, señalando un periodo de condiciones muy húmedas. Las fluctuaciones continúan con valores de -26.11 a 18.5 cm (1727 d.C.), sugiriendo un ambiente menos húmedo en comparación con los periodos anteriores. A 21 cm (1715 d.C.), el valor de -25.8 refleja condiciones más secas, posiblemente con una mayor presencia de plantas C4.

Hacia los 30.5 cm (1667 d.C.), el valor de $\delta^{13}\text{C}$ de -26.38 indica una ligera mejora en las condiciones climáticas, reflejando un entorno más húmedo. Este patrón continúa hasta los 39 cm (1624 d.C.), con un valor de -26.33, sugiriendo una tendencia hacia un ambiente más húmedo. En las profundidades mayores de Oxola, los valores de $\delta^{13}\text{C}$ siguen mostrando variabilidad con -25.55 a 51 cm (1567 d.C.) y -26.93 a 57 cm (1532 d.C.), sugiriendo episodios de alta humedad. Hacia los 63.5 cm (1498 d.C.), el valor de $\delta^{13}\text{C}$ es de -27.18, indicando condiciones extremadamente húmedas. Este patrón continúa hasta los 94 cm (1342 d.C.), con un valor de -25.9, reflejando una tendencia hacia un ambiente más húmedo.

El núcleo Ciil muestra una historia climática dinámica con variaciones en los valores de $\delta^{13}\text{C}$. A una profundidad de 7.4 cm correspondiente al año 1675 d.C., el valor de $\delta^{13}\text{C}$ de -23.39 sugiere un entorno de bosque tropical moderadamente húmedo, con una posible mayor presencia de plantas C4. Este valor mejora a -24.42 a 9.5 cm (1618 d.C.), indicando condiciones ligeramente más húmedas, predominando las plantas C3.

A profundidades mayores, como 13.7 cm (1492 d.C.), el valor de $\delta^{13}\text{C}$ sube a -24.69, señalando condiciones más húmedas. Sin embargo, a 18.9 cm (1320 d.C.), el valor de -23.72 sugiere un entorno más seco. Este patrón fluctuante continúa, con valores de -23.88 a 21 cm (1249 d.C.) y -22.39 a 24.2 cm (1152 d.C.), reflejando periodos de menor humedad. A mayores profundidades, el valor de $\delta^{13}\text{C}$ desciende a -23.2 a 26 cm (1099 d.C.), indicando un entorno menos húmedo, mientras que a 29 cm (1009 d.C.), con un valor de -23.27, se observa una ligera mejora hacia condiciones más húmedas. Este patrón continúa con variaciones reflejando alternancia entre periodos de mayor y menor humedad, hasta valores de -24.98 a 37.2 cm (745 d.C.) y -25.46 a 41.9 cm (591 d.C.), indicando una tendencia hacia condiciones más húmedas. En profundidades mayores, como a 60 cm (213 d.C.), perteneciente a la parte del núcleo de cueva cerrada, el valor de $\delta^{13}\text{C}$ es de -26.53, indicando condiciones extremadamente húmedas. Este patrón continúa hasta los 115 cm (8078 a.P.), con un valor de -24.82, reflejando una tendencia nuevamente hacia un ambiente más seco (Figura 37).

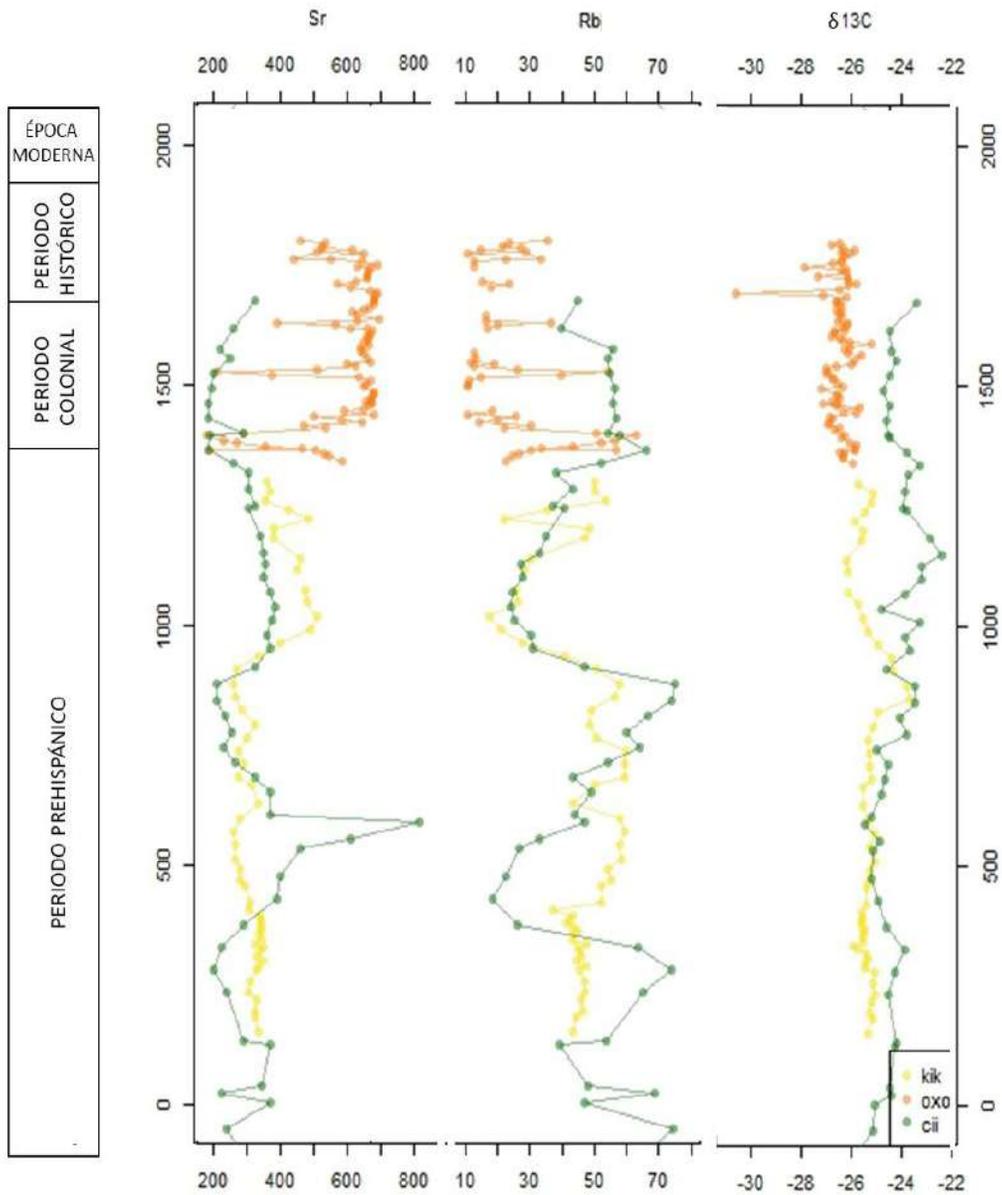


Figura 39: Relación entre Sr, Rb y $\delta^{13}\text{C}$. Períodos de ocupación de Yalahau.

Clásico temprano

Durante el Clásico Temprano en el cenote Ciil, los valores de Rb oscilan entre 57.88 ppm a 41.22 ppm, mientras que Sr varía de 266.88 ppm a 349.35 ppm. Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ se encuentran entre -25.88 y -25.03. Estos datos reflejan una alternancia entre periodos de humedad y sequía. Por ejemplo, en 542 d.C., con valores de Rb de 57.88 ppm y Sr de 266.88

ppm, se sugiere un periodo húmedo. Similarmente, en 491 d.C., los valores de Rb de 54.08 ppm y Sr de 282.42 ppm, acompañados de un $\delta^{13}\text{C}$ de -25.25, indican condiciones húmedas. En contraste, en 405 d.C., los valores de Rb disminuyen a 37.13 ppm y Sr se mantiene en 307.48 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -25.56, reflejando un periodo de sequía.

Durante el Clásico Temprano en el cenote de Kikal, los valores de Rb oscilan entre 57.88 ppm y 41.22 ppm, mientras que Sr varía de 266.88 ppm a 349.35 ppm. Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ se encuentran entre -25.88 y -25.03, reflejando una alternancia entre periodos de humedad y sequía. En 542 d.C., con valores de Rb de 57.88 ppm y Sr de 266.88 ppm, se sugiere un periodo húmedo. En 513 d.C., los valores de Rb aumentan a 58.18 ppm y Sr disminuye a 264.66 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -25.03, indicando condiciones igualmente húmedas. Para 491 d.C., los valores de Rb son de 54.08 ppm y Sr de 282.42 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -25.25, continuando con las condiciones húmedas.

A partir de 405 d.C., los valores de Rb disminuyen a 37.13 ppm y Sr se mantienen en 307.48 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -25.56, reflejando un periodo de sequía. En 379 d.C., los valores de Rb son de 41.22 ppm y Sr de 343.01 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -25.57, sugiriendo un periodo de sequía persistente. En el Clásico Temprano, los periodos de humedad entre 542 d.C. y 491 d.C., habrían proporcionado condiciones óptimas para la agricultura y la disponibilidad de recursos hídricos, cruciales para la estabilidad social y el crecimiento demográfico. En contraste, los periodos de sequía, como los observados en 405 d.C. y 396 d.C., habrían incrementado la presión sobre los recursos, exacerbando tensiones sociales y políticas.

En 458 d.C., el valor de $\delta^{13}\text{C}$ es de -25.39, lo que sugiere una tendencia hacia condiciones más secas. La tendencia continúa con valores de -25.38 en 424 d.C., -25.56 en 405 d.C. y -25.51 en 396 d.C., lo que refleja fluctuaciones hacia condiciones más secas. En este período, el cenote de Ciil muestra una variabilidad significativa en las condiciones climáticas. La alternancia entre humedad y sequía es evidente. Los valores de Rb y Sr presentan fluctuaciones que sugieren periodos de humedad seguidos de sequía. Por ejemplo, en ciertos años se observa un incremento en los valores de Rb, acompañado de una disminución en Sr, indicando condiciones húmedas. Sin embargo, en otros periodos, los valores de Sr aumentan mientras que los de Rb disminuyen, señalando condiciones más secas. En 491 d.C., el valor de $\delta^{13}\text{C}$ es de -25.25, lo que refleja condiciones estables. Hacia

el año 469 d.C., el valor de $\delta^{13}\text{C}$ cambia ligeramente a -25.33, indicando un entorno ligeramente más seco.

A finales del Clásico Temprano observamos periodos de mayor humedad de entre 554 d.C. y 476 d.C., en contraste a los periodos de sequía, como los observados en 330 d.C. y 280 d.C. La persistencia de un entorno de bosque tropical, indicada por los valores de $\delta^{13}\text{C}$ que oscilan entre -25.19 y -23.87, sugiere una resiliencia ecológica considerable. Esta resiliencia habría permitido a las comunidades mayas adaptarse a las fluctuaciones climáticas, aunque no sin enfrentar desafíos significativos durante periodos de sequía prolongada. En 513 d.C., el valor de $\delta^{13}\text{C}$ mejora a -25.03, lo que sugiere condiciones similares. Para inicios del Clásico Tardío en 542 d.C., el valor de $\delta^{13}\text{C}$ es de -25.22, indicando un entorno de bosque tropical húmedo.

En el cenote Ciil, los periodos de mayor humedad, observables en los años 542 d.C., 491 d.C., habrían proporcionado condiciones óptimas para la agricultura y la disponibilidad de recursos hídricos, cruciales para la estabilidad social y el crecimiento demográfico. En contraste, los periodos de sequía, como los observados en 405 d.C., 379 d.C. y 354 d.C., habrían incrementado la presión sobre los recursos, exacerbando tensiones sociales y políticas.

El análisis de los valores de Rb, Sr y $\delta^{13}\text{C}$ en los sedimentos del Cenote Ciil y Kikal durante el periodo del clásico temprano los datos muestran una alternancia entre periodos de humedad y sequía, reflejando una dinámica climática que afectó directamente la vida de las comunidades mayas. Durante esta etapa, ambos cenotes muestran fluctuaciones en los valores de $\delta^{13}\text{C}$ que indican una variabilidad en las condiciones climáticas. El Cenote Ciil generalmente refleja condiciones de humedad moderada a alta, lo que sugiere un entorno de bosque tropical relativamente estable. Por otro lado, el Cenote Kikal muestra más variabilidad, con periodos de sequía moderada reflejados por los valores más bajos de $\delta^{13}\text{C}$. Esto podría indicar diferencias locales en las condiciones climáticas o variaciones en la vegetación local y la gestión del paisaje.

Clásico tardío-terminal (500-550 al 950-1000 d.C.)

El análisis de los valores de Rb, Sr y $\delta^{13}\text{C}$ en los sedimentos del Cenote Kikal proporciona una narrativa detallada de las condiciones climáticas y ecológicas durante un periodo crucial en la historia maya. La variación en estos elementos traza reflejan la

interacción compleja entre el clima y las sociedades humanas dentro de un entorno de bosque tropical, destacando la importancia de los factores ambientales en la evolución y el colapso de las civilizaciones antiguas. La persistencia del bosque tropical a lo largo de periodos de sequía y humedad sugiere una resiliencia ecológica que permitió a las comunidades mayas adaptarse a las fluctuaciones climáticas, aunque no sin enfrentar desafíos significativos.

Por su parte, el cenote Kikal muestra una variabilidad significativa en las condiciones climáticas. Durante este periodo, los valores de Rb y Sr presentan fluctuaciones que sugieren periodos de humedad seguidos de sequía. En 750 d.C., los valores de Rb de 55.54 ppm y Sr de 282.42 ppm, junto con un $\delta^{13}\text{C}$ de -25.33, sugieren un periodo húmedo. Para 794 d.C., los valores de Rb disminuyen ligeramente a 48.53 ppm y Sr aumenta a 326.83 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -25.11, reflejando un retorno a condiciones más secas. En 765 d.C., a 26.5 cm de profundidad, los valores de Rb son de 50.87 ppm y Sr de 301.45 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -25.32, indicando condiciones más secas dentro del bosque tropical. Hacia 800 d.C., los valores de Rb disminuyen a 52.33 ppm y Sr aumentan a 295.11 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -25.39, indicando un entorno aún húmedo. En 822 d.C., a 24.5 cm de profundidad, los valores de Rb son de 48.82 ppm y Sr de 286.23 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -24.90, lo que indica una ligera reducción en la humedad.

En 850 d.C., los valores de Rb son de 37.13 ppm y Sr de 307.48 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -25.56, reflejando un periodo seco. En particular, el periodo de 876 d.C. a 850 d.C. con altos niveles de humedad podría corresponder a un tiempo de prosperidad, con la expansión agrícola y el crecimiento de la ciudad durante el clásico Terminal. Los valores de Rb y Sr sugieren un entorno predominantemente húmedo con algunas fluctuaciones hacia condiciones más secas, especialmente en los años 908 d.C. y 879 d.C. En 908 d.C., a 21.5 cm de profundidad, Rb sigue aumentando a 50.87 ppm y Sr disminuye a 269.10 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -24.32, indicando un periodo de humedad significativa. Para el año 937 d.C., a una profundidad de 20.5 cm, los valores de Rb cambian a 40.93 ppm y Sr disminuye a 332.54 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -24.39, sugiriendo un periodo de mayor humedad. Sin embargo, el cambio hacia condiciones más secas en 914 d.C., podría haber señalado el inicio de un periodo de vicisitudes, donde la disminución de la lluvia habría tenido un impacto directo en la producción agrícola y la vida diaria.

En el año 992 d.C., a una profundidad de 18.5 cm, se observa una concentración de Rb de 21.05 ppm y de Sr de 489.86 ppm, con un valor de $\delta^{13}\text{C}$ de -25.31. Estos datos sugieren una continuidad del periodo de sequía dentro de un entorno de bosque tropical. Para 964 d.C., a una profundidad de 19.5 cm, Rb aumenta a 27.77 ppm y Sr disminuye a 399.15 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -24.88, indicando una ligera mejora en las condiciones hídricas, pero aún secas.

La alternancia entre periodos húmedos y secos en el Cenote Kikal durante 765 d.C. a 992 d.C., evidenciada por las fluctuaciones en Rb y Sr, y respaldada por la persistencia de un bosque tropical ($\delta^{13}\text{C}$), que sugiere una capacidad notable de las comunidades mayas para adaptarse a las condiciones cambiantes del clima. Este patrón se mantiene durante el s. X, con aumento de los valores de Rb a 43.56 ppm, Sr a 342.37 ppm y $\delta^{13}\text{C}$ de -25.51, sugiriendo una leve recuperación de la humedad. Para finales del s. X los valores de Rb disminuyen ligeramente a 42.39 ppm y Sr a 341.42 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -25.58, indicando una continuación de condiciones de semi secas. Durante este período, los valores de $\delta^{13}\text{C}$ en el Cenote Ciil también reflejan fluctuaciones similares.

La persistencia de un entorno de bosque tropical, indicada por los valores de $\delta^{13}\text{C}$ que oscilan entre -25.88 y -25.03, sugiere una resiliencia ecológica considerable entre el Clásico Tardío/Terminal. Esta resiliencia habría permitido a las comunidades mayas adaptarse a las fluctuaciones climáticas, aunque no sin enfrentar desafíos significativos durante periodos de sequía prolongada. En combinación, los valores muestran una mayor variabilidad, con periodos de humedad seguidos de sequía, como en 750 d.C., 850 d.C. y 900 d.C., lo que sugiere una dinámica climática más compleja y desafiante, observando una tendencia de condiciones húmedas al principio del periodo, seguidas de sequías más prolongadas hacia el final del Clásico Terminal, para 1000 d.C. y 1050 d.C.

Postclásico

El análisis de los valores de Rb, Sr y $\delta^{13}\text{C}$ en los sedimentos del Cenote Kikal durante el periodo Postclásico Temprano (1050 d.C. a 1300 d.C.) revela un patrón claro de fluctuaciones climáticas. Los datos muestran una alternancia entre periodos de humedad y sequía, indicando una capacidad de adaptación notable, pero también evidencian los desafíos que enfrentaron estas comunidades debido a las variaciones en las condiciones climáticas.

Durante el Postclásico el cenote de Kikal, en 1050 d.C., los valores de Rb son de 45.02 ppm y Sr de 345.86 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -25.52, sugiriendo condiciones húmedas a partir del 1050 d.C. En 1100 d.C., los valores de Rb disminuyen a 43.56 ppm y Sr a 335.08 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -25.52, indicando un entorno aún húmedo. En 1100 d.C., los valores de Rb aumentan a 43.27 ppm y Sr de 342.69 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -25.53, continuando con las condiciones húmedas. A partir de 1200 d.C., los valores de Rb disminuyen a 45.31 ppm y Sr aumentan a 341.42 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -25.4, reflejando un periodo de sequía. En 1300 d.C., los valores de Rb son de 46.19 ppm y Sr de 331.59 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -25.33, sugiriendo un periodo de sequía persistente. Para 1400 d.C., los valores de Rb aumentan a 44.14 ppm y Sr de 349.35 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -25.42, indicando una leve recuperación de la humedad.

Por otro lado, los periodos de sequía más significativos se observan en 1221 d.C. y 1117 d.C. En 1221 d.C., a una profundidad de 8.5 cm, los valores de Rb son de 21.93 ppm y Sr de 482.89 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -25.86, lo que sugiere condiciones de sequía significativa. Estos valores indican una reducción en la disponibilidad de agua, lo que habría afectado negativamente la producción agrícola y aumentado las tensiones sociales. De manera similar, en 1117 d.C., a una profundidad de 13.5 cm, los valores de Rb son de 28.36 ppm y Sr de 450.22 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -26.13, reflejando condiciones más secas que habrían impuesto desafíos adicionales a las comunidades mayas.

Los periodos de mayor humedad se destacan en los años 1260 d.C. y 1201 d.C. En 1260 d.C., a una profundidad de 6.3 cm, los valores de Rb alcanzan 53.79 ppm y los de Sr 352.52 ppm, junto con un $\delta^{13}\text{C}$ de -25.18. Estos valores sugieren un periodo de mayor humedad, que habría favorecido la agricultura y la disponibilidad de agua, cruciales para la estabilidad social y el crecimiento demográfico. Similarmente, en 1201 d.C., a una profundidad de 9.5 cm, los valores de Rb son de 48.53 ppm y Sr de 381.39 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -25.49, indicando nuevamente un entorno favorable para la vida de las comunidades mayas.

Los sedimentos en el Cenote Ciil en 1099 d.C. presentan valores de Rb son de 27.77 ppm y Sr de 348.08 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -23.20, sugiriendo condiciones secas persistentes. Para 1152 d.C., muestran la disminución de Rb a 32.74 ppm y el aumento de Sr a 348.40 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -22.39, reflejan un periodo de sequía significativa.

Para 1320 d.C., los valores de Rb disminuyen a 38.30 ppm y Sr aumenta a 307.16 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -23.72, sugiriendo un nuevo periodo de sequía. En 1244 d.C., los valores de Rb son de 40.93 ppm y Sr de 305.58 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -23.77, indicando condiciones moderadamente húmedas. En 1400 d.C., la disminución de Rb a 54.38 ppm y el aumento de Sr a 290.35 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -24.50, indican un periodo de sequía. En 1365 d.C., el aumento de Rb a 66.36 ppm y la disminución de Sr a 184.09 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -23.75, reflejan un retorno a condiciones de alta humedad, favorables para la vida de las comunidades mayas.

Por otro lado, en el Cenote Ciil, los datos indican una tendencia similar con condiciones predominantemente húmedas en los años 1450 d.C. y 1425 d.C., seguidas de sequías moderadas en los años 1350 d.C. y 1325 d.C. Los periodos de mayor humedad, como en 1461 d.C. y 1365 d.C., habrían proporcionado condiciones óptimas para la agricultura y la disponibilidad de recursos hídricos, cruciales para la estabilidad social y el crecimiento demográfico. En contraste, los periodos de sequía, como en 1400 d.C. y 1320 d.C., habrían puesto a prueba esta resiliencia, incrementando la presión sobre los recursos y posiblemente contribuyendo a tensiones sociales y políticas que, a largo plazo, podrían haber influido en el declive de las ciudades mayas. En 1461 d.C. los valores de 55.84 ppm de Rb y 185.68 ppm de Sr, junto con un $\delta^{13}\text{C}$ de -24.42, sugieren un entorno de bosque tropical moderadamente húmedo. Para 1430 d.C., el valor de Rb aumenta ligeramente a 56.71 ppm y Sr a 186.63 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -24.59, reflejando condiciones climáticas similares y favorables para la agricultura.

En el traslape de los núcleos de Kikal y Ciil, la persistencia de un entorno de bosque tropical es evidenciada por los valores de $\delta^{13}\text{C}$ que se mantienen consistentemente entre -24.59 y -22.39, sugiere una resiliencia ecológica considerable. Los datos sugieren condiciones climáticas variables, pero con una tendencia hacia la sequía prolongada en ciertos periodos. En 1200 d.C., los valores de Rb indican condiciones moderadamente húmedas, pero hacia finales del periodo, los valores de Sr aumentan significativamente, lo que sugiere una intensificación de las condiciones de sequía. Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ durante este periodo indican una persistencia de entornos de bosque tropical, pero con fluctuaciones que reflejan la alternancia entre periodos de mayor y menor humedad.

Comparando los datos del Cenote Kikal y el Cenote Ciil durante el postclásico, se observan patrones similares de fluctuaciones climáticas con alternancia entre periodos de humedad y sequía. Ambos sitios muestran una tendencia hacia condiciones húmedas al principio del periodo, seguidas de periodos de sequía moderada hacia el final. Esta resiliencia habría proporcionado una base estable para la adaptación de las comunidades mayas a las fluctuaciones climáticas. Sin embargo, los periodos de sequía prolongada habrían puesto a prueba esta resiliencia, incrementando la presión sobre los recursos y posiblemente contribuyendo a tensiones sociales y políticas.

Por su parte, los datos del Cenote Oxola EN1221 d.C., a una profundidad de 8.5 cm, los valores de Rb disminuyen aún más a 21.93 ppm y Sr aumenta a 482.89 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -25.86, sugiriendo un periodo de sequía severa. En 1201 d.C., los valores de Rb se recuperan ligeramente a 48.53 ppm y Sr disminuye a 381.39 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -25.49, reflejando un retorno a condiciones más húmedas. Para 1260 d.C., los valores de Rb son de 53.79 ppm y Sr disminuyen a 352.52 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -25.18, sugiriendo un entorno aún húmedo. Sin embargo, en 1240 d.C., los valores de Rb disminuyen a 35.37 ppm mientras que Sr aumenta significativamente a 422.94 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -25.47, indicando una sequía considerable.

Los datos reflejan fluctuaciones significativas en los valores de Rb, Sr y $\delta^{13}\text{C}$, que sugieren alternancias entre periodos de humedad y sequía. En el inicio del postclásico tardío, hacia 1300 d.C., a una profundidad de 4.3 cm, los valores de Rb son de 50.28 ppm y Sr de 360.45 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -25.71, indicando condiciones húmedas. En 1280 d.C., a una profundidad de 5.3 cm, los valores de Rb disminuyen ligeramente a 49.99 ppm y Sr aumenta a 370.60 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -25.12, reflejando una continuación de las condiciones húmedas.

Durante el Postclásico, los cenotes de Ciil y Oxola muestran una tendencia hacia condiciones húmedas, como se observa en 1300 d.C. y 1280 d.C., seguidas de sequías severas en 1240 d.C. y 1221 d.C. En el periodo histórico colonial, se observan fluctuaciones continuas, pero con una tendencia hacia condiciones predominantemente húmedas, como se refleja en los datos de 1802 d.C. y 1790 d.C., en Oxola y en 1450 d.C. y 1425 d.C., en Ciil. La resiliencia ecológica en ambos sitios, indicada por los valores de $\delta^{13}\text{C}$ que oscilan entre -

25.56 y -23.62, sugiere que las comunidades mayas pudieron adaptarse a estas fluctuaciones climáticas, aunque enfrentando desafíos significativos durante las fases de sequía.

La persistencia de un entorno de bosque tropical, evidenciada por los valores de $\delta^{13}\text{C}$ que se mantienen consistentemente entre -25.71 y -23.62, sugiere una resiliencia ecológica considerable. Esta resiliencia habría proporcionado una base estable para la adaptación de las comunidades mayas a las fluctuaciones climáticas. Sin embargo, los periodos de sequía prolongada habrían puesto a prueba esta resiliencia, incrementando la presión sobre los recursos y posiblemente contribuyendo a tensiones sociales y políticas.

Época histórica

Durante el periodo histórico colonial, los datos del Cenote Oxola reflejan continuas fluctuaciones climáticas. En 1802 d.C., a una profundidad de 3.5 cm, los valores de Rb son de 35.37 ppm y Sr de 461.63 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -26.47, sugiriendo condiciones húmedas. Hacia 1790 d.C., los valores de Rb disminuyen a 21.64 ppm mientras que Sr aumenta a 525.71 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -26.30, continuando con las condiciones húmedas. Para 1775 d.C., los valores de Rb son de 10.53 ppm y Sr de 648.78 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -26.27, sugiriendo un periodo de sequía significativa. En 1762 d.C., los valores de Rb son de 33.62 ppm y Sr de 439.43 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -26.35, reflejando un retorno a condiciones ligeramente más húmedas. En 1742 d.C., los valores de Rb no están disponibles, pero Sr es de 668.13 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -26.38, indicando condiciones de sequía. Para 1715 d.C., los valores de Rb son de 15.2 ppm y Sr de 624.67 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -25.80, sugiriendo condiciones moderadamente secas.

En el período histórico colonial (1450 d.C. a 1800 d.C.), los valores de $\delta^{13}\text{C}$ muestran fluctuaciones significativas. En 1802 d.C., el valor de $\delta^{13}\text{C}$ es de -26.47, lo que sugiere un entorno más húmedo. A medida que retrocedemos hacia 1790 d.C., el valor de $\delta^{13}\text{C}$ se estabiliza en -26.30, indicando condiciones similares. En 1775 d.C., el valor de $\delta^{13}\text{C}$ es de -26.27, lo que sugiere condiciones ligeramente más secas. A medida que llegamos a 1762 d.C., el valor de $\delta^{13}\text{C}$ mejora a -26.35, indicando una ligera recuperación hacia condiciones más húmedas. Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ de -26.38 en 1742 d.C. y -25.80 en 1715 d.C. reflejan una tendencia continua de fluctuaciones entre condiciones húmedas y secas.

Durante el periodo histórico colonial, el Cenote Ciil muestra fluctuaciones similares a las de Oxola. En 1450 d.C., los valores de Rb son de 50.28 ppm y Sr de 266.88 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -25.22, sugiriendo condiciones húmedas. En 1425 d.C., los valores de Rb son de 58.18 ppm y Sr de 264.66 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -25.03, reflejando un entorno húmedo. Para 1400 d.C., los valores de Rb son de 54.08 ppm y Sr de 282.42 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -25.25, sugiriendo condiciones húmedas. Sin embargo, en 1350 d.C., los valores de Rb disminuyen a 35.37 ppm y Sr aumenta significativamente a 422.94 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -25.47, indicando una sequía considerable. Hacia 1325 d.C., a una profundidad de 8.5 cm, los valores de Rb disminuyen aún más a 21.93 ppm y Sr aumenta a 482.89 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -25.86, sugiriendo un periodo de sequía severa. En 1300 d.C., los valores de Rb se recuperan ligeramente a 48.53 ppm y Sr disminuye a 381.39 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -25.49, reflejando un retorno a condiciones más húmedas.

En el período histórico colonial, los valores de $\delta^{13}\text{C}$ en Ciil muestran una tendencia similar a la de Oxola. En 1450 d.C., el valor de $\delta^{13}\text{C}$ es de -25.22, lo que sugiere un entorno húmedo. A medida que avanzamos hacia 1425 d.C., el valor de $\delta^{13}\text{C}$ mejora a -25.03, indicando condiciones similares. En 1400 d.C., el valor de $\delta^{13}\text{C}$ es de -25.25, reflejando condiciones estables. A medida que llegamos a 1350 d.C., el valor de $\delta^{13}\text{C}$ disminuye a -25.47, lo que sugiere un entorno más seco. Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ de -25.86 en 1325 d.C. y -25.49 en 1300 d.C. reflejan fluctuaciones hacia condiciones más secas y luego una ligera recuperación hacia condiciones más húmedas.

Comparando los datos de Oxola y Ciil durante los periodos postclásico y el periodo histórico colonial, se observan patrones similares de fluctuaciones climáticas. Ambos cenotes muestran alternancias entre periodos de humedad y sequía, con condiciones húmedas predominantes al principio de los periodos seguidas de sequías hacia el final. En ambos cenotes, los valores de $\delta^{13}\text{C}$ indican una persistencia de entornos de bosque tropical, con fluctuaciones que reflejan la alternancia entre periodos de mayor y menor humedad.

En el periodo histórico colonial, se observan claras señales de fluctuaciones climáticas que habrían afectado las condiciones socioeconómicas de la región. Por ejemplo, en 1802 d.C., los valores de Rb de 35.37 ppm y Sr de 461.63 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -26.47, sugieren condiciones húmedas. En 1790 d.C., los valores de Rb disminuyen a 21.64 ppm y Sr aumenta a 525.71 ppm, con un $\delta^{13}\text{C}$ de -26.30, continuando con las condiciones húmedas.

En contraste, en 1687 d.C., los valores de Sr son de 681.77 ppm y $\delta^{13}\text{C}$ de -26.21, reflejando un periodo de sequía severa. La persistencia de un entorno húmedo se observa nuevamente en 1667 d.C., con Sr de 678.28 ppm y un $\delta^{13}\text{C}$ de -26.38.

Las tendencias de $\delta^{13}\text{C}$ en ambos cenotes, Oxola y Ciil, durante los períodos Postclásico y el período histórico colonial, muestran patrones similares de fluctuaciones entre condiciones húmedas y secas. Ambos cenotes reflejan un entorno de bosque tropical, con variaciones que indican periodos de mayor y menor humedad. En el Postclásico, las fluctuaciones de $\delta^{13}\text{C}$ en Oxola y Ciil indican periodos de estabilidad climática intercalados con periodos más secos. Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ reflejan que ambos cenotes experimentaron condiciones ecológicas similares, con una tendencia general hacia un entorno húmedo, pero con episodios de sequía. Durante este período, las fluctuaciones en $\delta^{13}\text{C}$ sugieren que las condiciones climáticas continuaron variando, con periodos de humedad prolongada y episodios de sequía en ambos cenotes. Esta similitud en las tendencias de $\delta^{13}\text{C}$ sugiere que ambos cenotes estaban sujetos a fuerzas climáticas similares, lo que influiría en la vida y las prácticas agrícolas de las comunidades mayas que habitaron estas áreas.

El periodo histórico colonial evidencia una clara alternancia entre periodos de humedad y sequía, con valores de Rb y Sr que reflejan fluctuaciones significativas. La persistencia de un entorno de bosque tropical, indicada por los valores de $\delta^{13}\text{C}$, sugiere una resiliencia ecológica considerable. Esta resiliencia habría permitido a las comunidades mayas adaptarse a las fluctuaciones climáticas, aunque no sin enfrentar desafíos significativos durante periodos de sequía prolongada.

El Paisaje de Yalahau en la larga duración. Análisis holístico del modelo de edad-profundidad, la quimioestratigrafía, arqueología e historia en la subregión de Yalahau

El análisis de los valores de $\delta^{13}\text{C}$, Rb, Sr y el Análisis de Componentes Principales (PCA) en los sedimentos de los cenotes Ciil, Kikal y Oxola durante los periodos Clásico Temprano, Clásico Tardío-Terminal y Postclásico revela una dinámica climática compleja que impactó significativamente la vida de las comunidades mayas. La alternancia entre periodos de mayor y menor humedad, documentada en estos datos, proporciona una comprensión detallada de cómo las fluctuaciones climáticas afectaron la agricultura, el clima y la estabilidad social.

Clásico Temprano (250-550 d.C.)

Durante el Clásico Temprano, los cenotes Ciil y Kikal muestran una fuerte variabilidad climática reflejada en los valores de Rb, Sr y $\delta^{13}\text{C}$. Los periodos de mayor humedad, como los observados entre 542 d.C. y 491 d.C., están asociados con valores más negativos de $\delta^{13}\text{C}$, indicando una mayor presencia de plantas C3 en un entorno de bosque tropical húmedo. Estos periodos habrían creado condiciones favorables para la agricultura y la disponibilidad de agua, esenciales para la estabilidad social y el crecimiento demográfico. En contraste, los periodos de menor humedad, como los registrados en 405 d.C. y 379 d.C., muestran valores de $\delta^{13}\text{C}$ menos negativos, sugiriendo una mayor presencia de plantas C4 y condiciones más secas. Estos periodos habrían incrementado la presión sobre los recursos, exacerbando tensiones sociales y políticas. La capacidad de adaptación de las comunidades mayas frente a estas condiciones fluctuantes es notable, aunque los periodos de sequía prolongada presentaron desafíos significativos.

El análisis exhaustivo del grupo D en Yalahau, fundamentado en características arquitectónicas, evidencia cerámica y secuencias sedimentarias, subraya su importancia política y religiosa durante el Clásico temprano. En contraste con los grupos A y C en la sección norte, el grupo D refleja un periodo de expansión significativa marcado por la construcción de basamentos monumentales, indicando el auge político-económico de Yalahau debido a su ubicación estratégica entre la costa, Izamal y la región Puuc.

El crecimiento del asentamiento puede explicarse mediante dos escenarios posibles. En primer lugar, la fragmentación de facciones que llevó a una dispersión hacia el norte del sitio, sugiriendo un patrón de asentamiento con similitudes espaciales. En segundo lugar, la presión ambiental generada por cambios climáticos y sequías durante el Clásico Temprano, que obligó a la población a asentarse cerca de cuerpos de agua. Ambos factores podrían haber influido en la secuencia arquitectónica observada, con un desarrollo de sur a norte y la integración de estilos arquitectónicos regionales de la zona Puuc.

La ausencia de excavaciones detalladas limita la comprensión completa de la secuencia arquitectónica y la cronología precisa de los grupos habitacionales. Sin embargo, la combinación de evidencia cerámica superficial y análisis sedimentarios sugiere que la ocupación humana en Yalahau data al menos del preclásico tardío. El primer gran desarrollo urbano ocurrió durante el Clásico Temprano (AD 250-550) con la construcción de monumentos significativos. Este periodo fue seguido por una transición notable a finales del Clásico Temprano, coincidiendo con una disminución en la influencia de Izamal.

Clásico Tardío-Terminal (550-950 d.C.)

En el periodo Clásico Tardío-Terminal, los cenotes Ciil y Kikal continúan mostrando fluctuaciones climáticas significativas. Los datos del PCA revelan que PC1, que explica el 70% de la variabilidad, está fuertemente influenciado por los elementos litogénicos Ca, TIC, CaCO₃ y Sr. Esto sugiere que los procesos relacionados con la depositación de carbonatos jugaron un papel crucial en este periodo. Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ más negativos indican la persistencia de un entorno de bosque tropical, reflejando condiciones de mayor humedad. Sin embargo, los periodos de menor humedad prolongada, como los observados hacia el final del Clásico Terminal en 1000 d.C. y 1050 d.C., habrían puesto a prueba esta resiliencia, aumentando la presión sobre los recursos y contribuyendo potencialmente al declive de las ciudades mayas.

Durante el período Clásico Tardío-Terminal, Yalahau experimentó un significativo desarrollo urbano, evidenciado por la construcción de estructuras monumentales y la expansión del asentamiento. Los datos arqueológicos y la arquitectura monumental del grupo D indican que este fue un núcleo importante desde el Clásico Temprano, con un crecimiento continuo hasta el Clásico Tardío-Terminal. Este desarrollo se asocia con la importancia

política y económica de Yalahau en la región, que servía como un nodo estratégico entre la costa, Izamal y la zona Puuc.

Yalahau mantuvo una relación estrecha con la zona Puuc, una región que también experimentó un apogeo durante el Clásico Tardío-Terminal. Las similitudes en estilos arquitectónicos y cerámicos sugieren intercambios culturales y económicos. Sin embargo, hacia el final del Clásico Terminal, la influencia de la zona Puuc comenzó a decaer, lo cual coincide con cambios observados en Yalahau, como la modificación en los patrones de asentamiento y arquitectura.

El impacto de las condiciones climáticas adversas y la presión sobre los recursos naturales probablemente contribuyeron a cambios en la estructura sociopolítica y en la ocupación del territorio. La disminución de la influencia de Izamal y el aumento de la influencia de la zona Puuc durante el Clásico Tardío-Terminal reflejan esta dinámica cambiante. Eventualmente, la presión ambiental y las transformaciones sociopolíticas llevaron al abandono gradual de Yalahau, con el poder político-administrativo trasladándose hacia áreas más sostenibles como Hocabá durante el Postclásico y el inicio del período colonial.

Para este período, observamos un patrón de asentamiento de “núcleos múltiples”, referido a la disposición de una comunidad en varios centros habitacionales distribuidos en un paisaje, en lugar de estar concentrada en un solo núcleo urbano, muy parecido al patrón de asentamiento reportado en sitios como Okolhuitz en Campeche (Pacheco, 2014) y El Resbalón en Quintana Roo (Tsukamoto, 2005). Como hemos visto en el contexto de Yalahau, esto significa que el asentamiento no se limita a un centro principal, sino que está compuesta por múltiples núcleos habitacionales (A, C y D), cada uno con sus propias estructuras residenciales, templos, plazas, áreas agrícolas e incluso aguadas.

Este tipo de asentamiento refleja la organización social, política y económica de los mayas, donde la distribución del poder y los recursos era más dispersa y descentralizada. En sitios con patrones de núcleos múltiples, se pueden encontrar varias áreas ceremoniales y residenciales que funcionaban de manera semindependiente pero que formaban parte de una red más amplia de interacción social y económica en el paisaje. El entendimiento de este patrón permite entender mejor la complejidad de la organización territorial y la dinámica de las relaciones entre diferentes sectores del asentamiento prehispánico de Yalahau.

En resumen, el período Clásico Tardío-Terminal en Yalahau está marcado por un notable desarrollo urbano y arquitectónico, influenciado por complejas interacciones sociopolíticas. La capacidad de adaptación de las comunidades mayas ante fluctuaciones climáticas y cambios en las esferas de poder regional subraya la resiliencia y dinamismo de estas sociedades. Estos hallazgos, integrando tanto los registros arqueológicos como los estudios paleoambientales, ofrecen una visión integral de la evolución socioecológica de Yalahau, destacando la importancia de los factores ambientales y las respuestas humanas en la configuración del paisaje antropogénico que conocemos hoy en día.

Esta visión comprensiva de la evolución de Yalahau subraya cómo las fluctuaciones climáticas, documentadas a través de registros arqueológicos y paleoambientales, interactuaron con las dinámicas sociopolíticas y económicas para moldear el desarrollo y eventual abandono de este importante centro maya. La integración de datos ambientales y arqueológicos revela la complejidad de los procesos que configuraron el paisaje y proporciona lecciones valiosas para entender la resiliencia y sostenibilidad en contextos contemporáneos.

Postclásico (950/1000-1450 d.C.)

Durante el Postclásico, los cenotes Ciil y Oxola muestran patrones claros de fluctuaciones climáticas. Los periodos de mayor humedad, como los observados en 1300 d.C. y 1280 d.C. en Oxola, están asociados con valores de $\delta^{13}\text{C}$ más negativos, sugiriendo una mayor presencia de plantas C3 y condiciones de bosque tropical húmedo. En contraste, los periodos de menor humedad en 1240 d.C. y 1221 d.C., con valores de $\delta^{13}\text{C}$ menos negativos, indican condiciones más secas y una mayor presencia de plantas C4. En Ciil, los valores de $\delta^{13}\text{C}$ también reflejan una alternancia entre periodos de mayor y menor humedad, indicando una adaptación continua a las condiciones climáticas cambiantes. El PCA muestra que PC2, que explica el 25% de la variabilidad, está determinado principalmente por elementos terrígenicos como Al, Rb, Fe y Zr, sugiriendo la importancia de los sedimentos terrígenos en la composición de los sedimentos.

Durante el periodo Postclásico, se evidencia una notable interrupción en la actividad constructiva en Yalahau, señalando un aparente abandono del sitio en épocas posteriores. Este fenómeno sugiere que las comunidades mayas probablemente se trasladaron hacia áreas más

cercanas a la actual cabecera del municipio de Homún. Este desplazamiento pudo haber sido motivado por la necesidad de acceder a recursos hídricos más confiables, así como por la presión ambiental y los cambios en las dinámicas políticas y económicas de la región. La caída de la zona Puuc hacia finales del Clásico Terminal, con la cual Yalahau mantenía relaciones estrechas, también pudo haber contribuido significativamente al declive y eventual abandono del sitio.

Los registros históricos coloniales, señalan que, para este período, la estructura política y administrativa de Yalahau experimentó una notable transformación, con un desplazamiento del poder hacia Hocabá. Este cambio refleja la dinámica compleja de la organización territorial maya en respuesta a las fluctuaciones políticas y ambientales de la época.

La organización territorial, conocida como *cuchcabal*, que los conquistadores españoles posteriormente denominaron provincia, era esencial para la administración y control regional. Dentro de cada *cuchcabal*, la cabecera funcionaba como el centro político, religioso y económico, concentrando una gran parte de la población y regulando las actividades comerciales, religiosas, tributarias y de trabajo rotativo compulsivo.

La cabecera del *cuchcabal* de Hocabá, que incluía a Yalahau durante el postclásico y posterior período colonial, desempeñaba un papel crucial en la coordinación de estos aspectos bajo el liderazgo de un *halach uinic*, una autoridad que combinaba funciones civiles, administrativas y religiosas, lo que a la larga fue disminuyendo la importancia regional de Yalahau.

La reubicación del poder hacia Hocabá pudo haber sido motivada por diversos factores, incluyendo cambios en las alianzas políticas, presión ambiental y la necesidad de consolidar el control sobre recursos estratégicos. Este movimiento no solo evidencia la flexibilidad y adaptabilidad de las estructuras políticas mayas, sino también cómo los centros de poder podían trasladarse en respuesta a las circunstancias cambiantes, reflejando una historia compleja en interacciones entre el medio ambiente y las estructuras sociopolíticas.

Época histórica-colonial (1450/1550-1940 d.C.)

Durante el periodo histórico colonial, los cenotes Oxola y Ciil continúan mostrando fluctuaciones climáticas significativas. Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ indican la persistencia de un

entorno de bosque tropical, con fluctuaciones entre condiciones más húmedas y menos húmedas. Los periodos de mayor humedad, reflejados en valores de $\delta^{13}\text{C}$ más negativos, sugieren una mayor actividad biológica y una mayor entrada de materia orgánica terrestre. En contraste, los periodos de menor humedad están asociados con valores de $\delta^{13}\text{C}$ menos negativos, indicando condiciones más secas y una menor entrada de materia orgánica. La resiliencia ecológica indicada por estos valores habría permitido a las comunidades mayas adaptarse a las fluctuaciones climáticas, aunque los periodos de menor humedad prolongada habrían incrementado la presión sobre los recursos y posiblemente contribuido a tensiones socioeconómicas.

La irrupción de los territorios mesoamericanos por parte de los colonizadores marcó un periodo de transformación profunda en el emplazamiento de Yalahau. La introducción de la explotación pecuaria y de especies animales y vegetales exógenas, junto con la implementación de mecanismos de compulsión sobre la población indígena, reorganizó la configuración territorial. Este proceso estuvo marcado por la sistemática explotación ecológica y de la fuerza de trabajo local, conduciendo a una notable expoliación de recursos, rompiendo con los sistemas de manejo tradicionales mayas, teniendo como consecuencia un alto impacto en el paisaje.

Inicialmente, los recursos y cuerpos de agua de Yalahau fueron explotados por encomenderos, rancheros y dueños de estancias, hasta consolidarse en manos de hacendados. Durante este tiempo, Yalahau se mantuvo bajo la jurisdicción de la provincia de Hocabá-Homún, dentro de Mérida, y más tarde se integró al partido de Beneficios Bajos antes de la finalización del régimen colonial. La explotación sistemática de estas tierras, inicialmente en unidades de producción maicero-ganaderas, evolucionó con el tiempo hacia prósperas haciendas henequeneras.

Con la consolidación del Estado-nación, la formación de cabildos republicanos fragmentó los linderos de Yalahau, estableciendo las demarcaciones actuales. Entre 1866 y 1877, la legislación sobre terrenos baldíos y la rectificación de la agrimensura de las haciendas en Homún demostraron una carrera por acaparar tierras municipales, impulsada por el latifundismo henequenero. Este fenómeno alcanzó su auge a finales del siglo XIX, pero experimentó una decadencia significativa a finales del primer tercio del siglo XX. La caída del latifundismo henequenero detuvo la continuidad de las actividades productivas en

la porción centro-sur de la península, redefiniendo una vez más el destino de Yalahau y estableciendo su configuración contemporánea.

Este periodo estuvo caracterizado por la transformación del paisaje y la organización socioeconómica de Yalahau bajo la presión del nuevo orden colonial, resaltando la complejidad y la capacidad de adaptación de las comunidades locales frente a los cambios ambientales y socioeconómicos impuestos. Este, llamemos “nuevo orden”, trajo consigo diferentes tipos de presiones sobre el ambiente, como la introducción de animales, especies y lógicas nuevas sobre la agricultura y sobre todo un cambio radical en el patrón de asentamiento registrado durante el período prehispánico, el cual como señalamos, tenía un especial interés en el mantenimiento de las zonas de recarga, evitando la construcción de edificaciones en zonas claves de Yalahau. En este caso, la nueva lógica de producción y sobre todo, la introducción de la ganadería, trajeron consigo afectaciones serias en el diseño espacial y el mantenimiento de la biodiversidad, siendo durante este momento que, fueron llevadas a cabo procesos de deforestación masivos y la introducción de pastos para la ganadería. Lo anterior es visible durante las temporadas de lluvia y mayor humedad, en donde los ranchos, ahora construidos prácticamente sobre los principales cuerpos de agua (Yalahau, Y’ba y X’nuk), se inundan completamente, lo que afectó seriamente la producción de los ranchos (Figura 38).



Figura 40: Rancho ganadero inundado junto a la aguada de Yalahau.

VII. Conclusión

El paisaje antropogénico de Yalahau hoy en día es el resultado de una compleja interacción de factores históricos, ecológicos y socioeconómicos que han moldeado la región a lo largo de los siglos. La investigación arqueológica y el análisis de sedimentos de cenotes han proporcionado una visión integral de cómo las civilizaciones mayas gestionaron y ajustaron sus prácticas agrícolas, urbanísticas y de uso del suelo en respuesta a las variaciones climáticas y las presiones ambientales. Estos datos destacan la capacidad de las comunidades mayas para modificar su entorno en mosaicos especializados sostenibles, lo que llevó al desarrollo de un paisaje culturalmente rico y ecológicamente diverso.

Los análisis paleoecológicos en los sedimentos de los cenotes Ciil, Kikal y Oxola, combinados con el análisis de componentes principales, subrayan la relevancia crucial de los factores ambientales en la evolución y el decaimiento de las civilizaciones mayas. La alternancia entre condiciones más húmedas y menos húmedas, junto con la variabilidad en la materia orgánica y los elementos litogénicos y terrigénicos, revela la notable capacidad de respuesta de las comunidades mayas ante las fluctuaciones climáticas y los desafíos impuestos por periodos prolongados de sequía.

Estos descubrimientos proporcionan una visión integral y profunda de la historia ecológica y las condiciones socioambientales de la región, destacando la complejidad y dinamismo de los procesos depositacionales en estos entornos y su profunda influencia en la vida de las comunidades mayas. Este estudio, al resaltar la interconexión entre el ambiente y las respuestas humanas en períodos de larga duración, contribuye significativamente a nuestra comprensión de cómo las civilizaciones antiguas manejaban los cambios climáticos, ofreciendo valiosas lecciones para abordar los desafíos ambientales contemporáneos.

Los hallazgos destacan la importancia de factores ambientales y políticos en la evolución de Yalahau. La capacidad de ajuste de las comunidades ante las variaciones climáticas y los cambios en la estructura política y económica regional subraya la complejidad de los procesos históricos y su influencia en la vida y desarrollo de las sociedades mayas en esta región estratégica entre el Puuc y la costa de Yucatán. La ocupación de Yalahau, evidenciada por la arquitectura monumental de los grupos A, C y D y su desarrollo urbano durante los periodos clásico temprano y clásico tardío-terminal, muestra

una interacción dinámica con el entorno natural y político. La variabilidad en la organización espacial y los estilos arquitectónicos, influenciadas por presiones ambientales y cambios en las esferas de poder regional, proporciona una visión comprensiva del desarrollo sociocultural de Yalahau a lo largo de los siglos, en lo que es definido como un patrón de asentamiento de núcleos múltiples.

Durante el período prehispánico, las civilizaciones mayas lograron crear un balance dinámico entre el uso intensivo de la tierra y la conservación de recursos naturales. Este manejo sostenible se reflejaba en la creación de sistemas agrícolas avanzados, como las terrazas y los canales, y en la preservación de áreas forestales que actuaban como reservas de biodiversidad y fuentes de recursos (*Kanan K'aax*). La capacidad de los mayas para adaptarse a las fluctuaciones climáticas mediante la diversificación de cultivos y la gestión del agua fue clave para su sostenibilidad.

Desde una perspectiva de ecología histórica, estos hallazgos ilustran cómo las comunidades mayas gestionaron su nicho ecológico, adaptándose a los cambios ambientales para mantener la sostenibilidad y resiliencia del ecosistema a largo plazo, funcionando como especie clave. La arquitectura monumental y la organización espacial reflejan no solo las respuestas a las condiciones climáticas fluctuantes, sino también la capacidad de estas comunidades para modificar su entorno de manera sostenible como especies clave. El manejo hidráulico de los cuerpos de agua y los recursos naturales, jugaron roles fundamentales en la estructura y organización socioeconómica del sitio, influenciando tanto la vida cotidiana como las decisiones estratégicas de diseño espacial del asentamiento.

El palimpsesto ecológico es evidente en la estratigrafía de los sedimentos y la arquitectura de Yalahau, donde las capas de actividad humana y procesos naturales se superponen para formar un registro complejo y detallado de la interacción entre los mayas y su entorno. Este enfoque holístico revela cómo los paisajes actuales son productos de una larga historia de interacciones entre actividades humanas y procesos ecológicos, proporcionando un contexto rico y matizado para entender la historia ambiental de la región.

Hoy en día, el paisaje de Yalahau refleja esta historia de uso y transformación intensiva del suelo. La creación de áreas naturales protegidas, como el Parque Estatal Lagunas de Yalahau, busca preservar los remanentes de los ecosistemas y promover prácticas de manejo sostenible que integren el conocimiento ecológico tradicional con enfoques

contemporáneos de conservación. Este enfoque holístico es esencial para abordar los desafíos ambientales contemporáneos y asegurar la sostenibilidad a largo plazo de los recursos naturales y culturales de la región.

Por último, la combinación de datos geoquímicos, análisis de componentes principales y estudios arqueológicos e históricos, integrados desde una perspectiva de ecología histórica, ofrece una visión profunda y detallada de la historia socioambiental de Yalahau. Estos resultados no solo iluminan el pasado, sino que también ofrecen experiencias valiosas para el presente, subrayando la importancia de la gestión sostenible de los recursos, el mantenimiento de la biodiversidad y la resiliencia ante las fluctuaciones climáticas. La investigación en Yalahau contribuye significativamente a nuestra comprensión de las dinámicas ecológicas y sociales que han moldeado la región por cerca de dos mil años (250 d.C. – 2002 d.C.), destacando la importancia de integrar múltiples líneas de evidencia para abordar los complejos problemáticas ambientales y sociales de hoy.

VIII. Referencias citadas.

1. Acopa, D., y Boege, E. (1998). "The Maya forest in Campeche, Mexico: experiences in forest management at Calakmul". In *Timber, tourists, and temples: conservation and development in the Maya forest of Belize, Guatemala, and Mexico*, pp. 81-97. Island Press.
2. Abdi, H., & Williams, L. J. (2010). *Principal component analysis*. Wiley interdisciplinary reviews: computational statistics, 2(4), 433-459.
3. Alexander, R. T. (2003). *Architecture, haciendas, and economic change in Yaxcabá, Yucatán, Mexico*. *Ethnohistory*, 50(1), 191-220.
4. Alexander, R. T. (2006). *Yaxcabá and the Caste War of Yucatán: An Archaeological Perspective*. University of New Mexico Press.
5. Adams, R. E. W. (1977). *Prehistoric Mesoamerica*. Little, Brown and Company.
6. Aimers, J. J. (2007). *What Maya collapse? Terminal classic variation in the Maya lowlands*. *Journal of archaeological research*, 15, 329-377.
7. Anderson, E. N., Dzib Xihum de Cen, A., Medina Tzuc, F., y Valdez Chale, P. (2005). *Political ecology in a Yucatec Maya community*. University of Arizona Press.
8. Anselmetti, F. S., Hodell, D. A., Ariztegui, D., Brenner, M., y Rosenmeier, M. F. (2007). *Quantification of soil erosion rates related to ancient Maya deforestation*. *Geology*, 35(10), 915-918.
9. Andrews, E. W., & Corletta, C. (1995). *Late Classic Maya Civilization in the Puuc Region: Settlement Patterns and Dynamics*. In *The Puuc: New Perspectives on the Northern Maya Lowlands* (pp. 41-69). University of Oklahoma Press.
10. Antorcha-Pedemonte, R., Rivera-Núñez, T., & Fargher-Navarro, L. F. (2023). *The impact of ancient Mesoamerican cities on long-term environmental sustainability: the view from historical ecology*. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11, 1237953.
11. Armstrong, A. H., Tsuji, Y., Rojas Sandoval, C., y Correa, E. (2017). *Comparing the past and present structure of freshwater wetlands in the northern lowlands of the Yucatan Peninsula: Human impact over the last three millennia*. *Geomorphology*, 278, 97-111.
12. Allen, M. F., Gómez-Pompa, A., Fedick, S. L., y Jiménez-Osornio, J. J. (2003). "The Maya Lowlands: A case study for the future?" Conclusions. *The lowland Maya area:*

- Three millennia at the human-wildland interface*, (eds). A. Gomez-Pompa, MF Allen, SL Fedick, and JJ Jimenez-Osornio, 623-634.
13. Ashmore, W., y Knapp, A. B. (1999). *Archaeologies of Landscape: Contemporary Perspectives*. Blackwell Publishers.
 14. Balée, W. (1998). *Historical ecology: premises and postulates*. *Advances in historical ecology*, 13-29.
 15. Balée, W. (2006). *The research program of historical ecology*. *Annu. Rev. Anthropol.*, 35(1), 75-98.
 16. Balée, W. (2013). *Cultural forests of the Amazon: a historical ecology of people and their landscapes*. University of Alabama Press.
 17. Balée, W., y Erickson, C. L. (Eds.). (2006). *Time and Complexity in Historical Ecology: Studies in the Neotropical Lowlands*. Columbia University Press.
 18. Balzotti, C., & Anderson, R. S. (2013). *Holocene vegetation, fire, and climate history of a subalpine meadow in the eastern Sierra Nevada, California, USA*. *Quaternary Research*, 79(1), 97-109.
 19. Bailey, G. (2007). *Time perspectives, palimpsests and the archaeology of time*. *Journal of anthropological archaeology*, 26(2), 198-223.
 20. Bautista, F., y Palacio-Aponte, G. (2013). *Caracterización edafológica y geomorfológica del Parque Estatal Lagunas de Yalahau*. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 30(2), 211-223.
 21. Bautista, F. (2021). *Clasificación de suelos de la península de Yucatán*. En: *Los territorios kársticos de la península de Yucatán: caracterización, manejo y riesgos*. Bautista F (Coord.) Asociación Mexicana de Estudios sobre el Karst. Ciudad de México. pp, 25-38.
 22. Beach, T., Luzzadder-Beach S., Dunning, N., Hageman, J., y Lohse, J. (2002). *Upland agriculture in the Maya Lowlands: ancient Maya soil conservation in northwestern Belize*. *Geographical Review*, 92(3), 372-397.
 23. Baudez, Claude (2004). *Una historia de la religión de los antiguos mayas*. Universidad Nacional Autónoma de México/Centro Francés de Estudios Mexicanos y Centroamericanos. México-Francia.
 24. Bender, B. (1993). *Landscape: Politics and Perspectives*. Berg Publishers.

25. Binford, L. R. (1987). *Researching Ambiguity: Frames of Reference and Site Structure*. *Advances in Archaeological Method and Theory*, 11, 1-47.
26. Blanton, R. E. (1994). *Houses and households: a comparative study*. Springer Science & Business Media.
27. Blanton, R. E., Kowalewski, S. A., Feinman, G. M., y Appel, J. (1993). *Ancient Mesoamerica: A Comparison of Change in Three Regions*. Cambridge University Press.
28. Boggs, S. (2006). *Principles of Sedimentology and Stratigraphy*. Pearson Prentice Hall.
29. Blaauw, M., y Christen, J. A. (2011). *Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process*. *Bayesian Analysis*, 6(3), 457-474
30. Bond, T. M., y Bey, G. J. III. (1996). *Ceramic Analysis at Ek Balam and Its Bearing on Current Issues in Northern Maya Archaeology*. *Ancient Mesoamerica*.
31. Borah, W. y Cook S. F. (1971). *Essays in Population History: Mexico and the Caribbean*. Berkeley, University of California Press.
32. Botkin, D. B. (1990). *Discordant Harmonies: A New Ecology for the Twenty-first Century*. Oxford University Press.
33. Braudel, F. (1958). *La longue durée*. *Annales. Histoire, Sciences Sociales*.
34. Bracamonte y Sosa, P. (1993). *La Guerra de Castas de Yucatán*. Consejo Nacional para la Cultura y las Artes. CIESAS/Universidad de Quintana Roo-Miguel /Ángel Porrúa. México.
35. Bracamonte y Sosa, P. (2001). *La conquista inconclusa de Yucatán. Los mayas de la montaña, 1560-1680*. CIESAS/Universidad de Quintana Roo-Miguel /Ángel Porrúa. México
36. Bradley, R. S. (1999). *PALEOCLIMATOLOGY: Reconstructing Climates of the Quaternary* (Vol. 613). Academic Press.
37. Brenner, M., Hodell, D. A., Curtis, J. H., Rosenmeier, M. F., y Binford, M. W. (2002). *Paleolimnological investigations of the Maya Lowlands: Long-term perspectives on interactions among climate, environment, and humans*. *Ancient Mesoamerica*, 13(1), 141-157.

38. Burnett, P., Krause, S., y Beach, T. (2012). *Environmental archaeology of the ancient Maya: A review of sedimentological and palynological studies*. *Quaternary Science Reviews*, 45, 112-130.
39. Butzer, K. W. (1971). *Environment and Archaeology: An Ecological Approach to Prehistory* (2nd ed.). Aldine Publishing Company.
40. Catherwood, F. (1843). *Incidents of Travel in Yucatan*. Harper & Brothers.
41. Caso B. L., y Mario Aliphath F. (2002). *Organización política de los itzáes desde el Posclásico hasta 1702*. *Historia Mexicana*, Vol. LI, Núm. 4, El Colegio de México. México.
42. Carneiro, R. L. (1970). *A Theory of the Origin of the State*. *Science*, 169(3947), 733-738.
43. Carrillo González, Juan (2019). *"Los umbrales de los proscrito. Ritualidad y simbolismo en torno a las cuevas y cenotes entre los mayas peninsulares"*. En *Trashumante*, Núm. 14, Colombia/México: Universidad de Antioquia/Universidad Autónoma Metropolitana.
44. Carrillo González, Juan (2014). *"Por los senderos de Tezulutlán: los mayas y su búsqueda de la verdadera paz en tierras de confines, siglos XVI-XVIII"*, Tesis de Doctorado en Historia, México: Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social.
45. Cantero Aguilar, Á. y Robles Castellanos, F. 2002. *Yalahau, un Sitio Prehispánico Lacustre del Municipio de Homún, Yucatán*, en *Los Investigadores de la Cultura Maya*, 10 (2), 297-306. Universidad Autónoma de Campeche
46. Cerling, T. E., Wang, Y., & Quade, J. (1993). *Expansion of C4 ecosystems as an indicator of global ecological change in the late Miocene*. *Nature*, 361(6410), 344-345.
47. Chase, J. M., y Leibold, M. A. (2003). *Ecological Niches: Linking Classical and Contemporary Approaches*. University of Chicago Press.
48. Chamberlain, Robert (1974). *Conquista y colonización de Yucatán, 1517-1550*. Porrúa. México.
49. Chen, T. W., y Chen, J. M. (2007). *CO2 uptake and water loss in plants under CAM metabolism*. *Journal of Experimental Botany*.

50. Childe, V. G. (1950). *The Urban Revolution*. *Town Planning Review*, 21(1), 3-17.
51. Chumba –Segura, L y R. Medina –Gonzalez (2000). *Los peces dulceacuicolas de Yucatán: Cenotes petenes y Manantiales*. Vol. 2 Num. 1 73-79. Mexicoa.
52. Carballo, A., García Negro, M. do C., y Doménech Quesada, J. L. (2009). *El MC3 una alternativa metodológica para estimar la huella corporativa del carbono (HCC)*. *DELOS: Desarrollo Local Sostenible*, 2(5), 3. www.eumed.net/rev/delos/05.
53. Ciaramella, M. (2002). *The Bee-Keepers in the Madrid Codex*. Center for Maya Research.
54. Clark, J. E., y Pye, M. E. (2000). *Early Formative Period in Mesoamerica*. In *Handbook of Middle American Indians* (Vol. 13).
55. Clarke, K., Rinderer, T., Franck, P., Quezada-Euán, J., y Oldroyd, B. (2007). *The africanization of honeybees (Apis mellifera L.) of the Yucatán: a study of a massive hybridization event across time*. *Evolution*, 56(7), 1462-1474.
56. Coe, W. R. (1990). *Excavations in the Great Plaza, North Terrace and North Acropolis of Tikal*. University of Pennsylvania Museum of Archaeology and Anthropology.
57. Coe, M. D. (1994). *Breaking the Maya Code*. London: Penguin.
58. Coggins, C. (1979). *A New Order and the Role of the Calendar: Some Characteristics of the Middle Classic Period at Tikal*. In T. Patrick Culbert (Ed.), *The Classic Maya Collapse* (pp. 38-50). University of New Mexico Press.
59. Conyers, L. B. (2013). *Ground-Penetrating Radar for Archaeology*. AltaMira Press.
60. Conrad, J. P., Harrison, S. P., y Prentice, I. C. (2010). *Ecophysiology and macroecology of C4 grasses*. *New Phytologist*.
61. Conrad, J. P., Harrison, S. P., y Prentice, I. C. (2011). *C4 photosynthesis and climate through space and time*. *Trends in Plant Science*.
62. Costanza, R., y Patten, B. C. (1995). *Defining and predicting sustainability*. *Ecological economics*, 15(3), 193-196.
63. Contreras, D. A. (2016). *The Archaeology of Human-Environment Interactions: Strategies for Investigating Anthropogenic Landscapes, Dynamic Environments, and Climate Change in the Human Past*. Routledge.

64. Cook, B. I., Anchukaitis, K. J., Kaplan, J. O., Puma, M. J., Kelley, M., & Gueyffier, D. (2012). *Pre-Columbian deforestation as an amplifier of drought in Mesoamerica*. *Geophysical Research Letters*, 39(16), L16706.
65. Cowgill, G. L. (1966). *Some Applications of Mathematical Probability to Archaeological Data*. *American Antiquity*, 31(3), 342-347.
66. Crumley, C. L. (1994). "Historical Ecology: A Multidimensional Ecological Orientation". In C. L. Crumley (Ed.), *Historical Ecology: Cultural Knowledge and Changing Landscapes* (pp. 1-16). School of American Research Press.
67. Culbert, T. P., & Rice, D. S. (Eds.). (1990). *Precolumbian Population History in the Maya Lowlands*. University of New Mexico Press.
68. Curtis, J. H., Hodell, D. A., & Brenner, M. (1996). *Climate variability on the Yucatan Peninsula (Mexico) during the past 3500 years, and implications for Maya cultural evolution*. *Quaternary Research*, 46(1), 37-47.
69. Curtis, J. H., Hodell, D. A., & Brenner, M. (1998). *Climate and cultural history in the western Maya Lowlands from lake sediment cores*. *Quaternary Research*, 50(3), 369-380.
70. Cohen, M. N. (1989). *Health and the Rise of Civilization*. Yale University Press.
71. Cohen, M. N. (2003). *The Origins of Agriculture: An International Perspective*. University of Alabama Press.
72. Cohen, M. N. (2009). *Introduction: rethinking the origins of agriculture*. *Current Anthropology*, 50(5), 591-595.
73. Dahlin, B. H. 1990. "Climate and Prehistory on the Yucatan Peninsula." *Climatic change* 5 (3): 245–263.
74. Daly, H. E. (1990). *Toward some operational principles of sustainable development*. *Ecological Economics*, 2(1), 1-6.
75. Dean, W. E. (1999). *The carbon cycle and biogeochemical dynamics in lake sediments*. *Journal of Paleolimnology*, 21(4), 375-393.
76. Demarest, A. A., y Sharer, R. J. (1982). *The Origins and Evolution of Usulután Ceramics*. *American Antiquity*, 47(4), 810-822.
77. Demarest, A. A., Rice, P. M., y Rice, D. S. (2013). *The Terminal Classic in the Maya Lowlands: Collapse, Transition, and Transformation*. University Press of Colorado.

78. Denevan, W. M. (2001). *Cultivated Landscapes of Native Amazonia and the Andes*. Oxford University Press.
79. Deevey, E. S. (1979). *Maya Demography and Environmental History*. In C. Adams (Ed.), *Prehispanic Maya Agriculture* (pp. 134-150). University of New Mexico Press.
80. Deevey, E. S., Brenner, M., & Binford, M. W. (1980). *Paleolimnology of the Peten Lake District, Guatemala*.
81. Diario Oficial del Gobierno del Estado de Yucatán. (1999). En línea, consultado el 6 de agosto de 2023, en: https://conahcyt.mx/cibiogem/images/cibiogem/sistema_nacional/documentos/ANP_L/Yuc/8-dec-creacion-lagunas-yalahau.pdf.
82. Dice, L. R. (1952). *Natural Communities*. University of Michigan Press
83. Drees, L. R., et al. (2001). *Reactions of Carbonates, Gypsum, and Silica in Soils*. Soil Science Society of America Journal.
84. Douglas, P. M., Pagani, M., Eglinton, T. I., Brenner, M., Curtis, J. H., Breckenridge, A., y Johnston, K. (2018). *A long-term decrease in the persistence of soil carbon caused by ancient Maya land use*. *Nature Geoscience*, 11(9), 645-649.
85. Dunning, N. P., et al. (1997). *Arqueología del humedal Yalahau*. *Ancient Mesoamerica*, 8(2), 299-300.
86. Dunning, N. P., et al. (2012). *Ancient Maya Agroforestry and Agricultural Production*. *Journal of Anthropological Archaeology*.
87. Eastmond, A., y Faust, B. (2006). *Farmers, fires, and forests: a green alternative to shifting cultivation for conservation of the Maya forest?* *Landscape and Urban Planning*, 74(3-4), 267-284.
88. Ehrlich, P. (1968). *The Population Bomb*. Cutchoque: Buccaneer Books
89. Einsele, G. (2000). *Sedimentary Basins: Evolution, Facies, and Sediment Budget*. Springer.
90. Ellis, E. C. (2005). *Anthropogenic landscapes and ecological theory: A framework for integrating humans into ecology*. *Environmental Management*, 35(4), 445-463.
91. Erickson, C. L. (1999). *Neo-environmental determinism and agrarian 'collapse': The 'fields of ancient Peru'*. *Antiquity*, 73(282), 634-641.

92. Erickson, C. L. (2000). An artificial landscape-scale fishery in the Bolivian Amazon. *Nature*, 408(6809), 190-193.
93. Erickson, C. L. (2006). "Intensification, Political Economy, and the Farming Community: In Defense of a Bottom-Up Perspective of the Past". In J. Marcus y C. Stanish (Eds.), *Agricultural Strategies*, pp. 233-265. Cotsen Institute of Archaeology Press.
94. Erickson, C. L. (2008). "Amazonia: The Historical Ecology of a Domesticated Landscape". In *Handbook of South American Archaeology*. H. Silverman y W. H. Isbell (Eds.), pp. 157-183. Springer.
95. Faegri, K., e Iversen, J. (1989). *Textbook of Pollen Analysis*. Blackwell.
96. Fairhead, J., y Leach, M. (1996). *Misreading the African Landscape: Society and Ecology in a Forest-Savanna Mosaic*. Cambridge University Press.
97. Farriss, N. M. (1984). *Maya Society under Colonial Rule: The Collective Enterprise of Survival*. Princeton University Press.
98. Farriss, N. M. (1992). *La sociedad maya bajo el dominio colonial. La empresa colectiva de la supervivencia*, Madrid: Alianza Editorial.
99. Farquhar, G. D., O'Leary, M. H., & Berry, J. A. (1982). *On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves*. *Functional Plant Biology*, 9(2), 121-137.
100. Fash, W. L. (2001). "Scribes, Warriors, and Kings: The City of Copán and the Ancient Maya". Thames & Hudson.
- Fedick, S. L. (2010). *The Maya Forest: Destroyed or cultivated by the ancient Maya?* *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(3), 953-954.
101. Fedick, S. L., Morrison, B. A., Andersen, B. J., Boucher, S., Acosta, J. C., y Mathews, J. P. (2000). *Wetland manipulation in the Yalahau region of the northern Maya lowlands*. *Journal of Field Archaeology*, 27(2), 131-152.
102. Fedick, S. L., y Morrison, B. A. (2004). "Ancient Maya use and manipulation of landscape in the Yalahau region of the northern lowlands". In S. L. Fedick (Ed.), *The Maya Lowlands: The Yalahau Regional Human Ecology Project* (pp. 12-28). University Press of Colorado.

103. Feinman, G. M., Carballo, D. M., Nicholas, L. M., y Kowalewski, S. A. (2023). *Sustainability and duration of early central places in prehispanic Mesoamerica*. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11, 1076740.
104. Fergusson, L. V. (2014). *El patrón triádico en el contexto urbano e ideológico de los antiguos asentamientos mayas*. *Estudios de cultura maya*, 43(43), 11-40.
105. Ferrio, J. P., Alonso, N., López, J. B., Araus, J. L., y Voltas, J. (2005). *Carbon isotope composition of fossil charcoal reveals aridity changes in the past*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*.
106. Fisher, C. (2020). *Maize politics and Maya farmers' traditional ecological knowledge in Yucatán, 1450–1600*. *Human Ecology*, 48(1), 33-45.
107. Fischer, E. F. (1996). Induced culture change as a strategy for socioeconomic development: The pan-Maya movement in Guatemala. In *Maya cultural activism in Guatemala* (pp. 51-73).
108. Fisher, C. T., Hill, J. B., y Feinman, G. M. (2009). The role of environmental and social factors in the Classic Maya collapse: A case study from the Puuc region of Yucatan, Mexico. *Journal of Archaeological Science*, 36(6), 1345-1355.
109. Flanagan, L. B., Ehleringer, J. R., y Marshall, J. D. (1996). *Differential uptake of CO₂ by C₃ and C₄ plants*. *Plant Physiology*.
110. Flannery, K. V. (1972). *The Cultural Evolution of Civilizations*. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 3, 399-426.
111. Flores J.S. e I. Espejel (1994). *Los tipos de vegetación de la Península de Yucatán. Etnoflora, Yucatanense*. Fasc. 3. Universidad Autónoma de Yucatán y Sostenibilidad maya.
112. Folke, C., Colding, J., y Berkes, F. (2003). *Building resilience and adaptive capacity in social-ecological systems*. *Navigating Social-Ecological Systems*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 352-387.
113. Ford, D., y Williams, P. (2007). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Wiley.
114. Ford, A. (2020). *Resilience and Sustainability in the Ancient Maya World*. Cambridge University Press.
115. Ford, A., y Nigh, R. (2009). *Origins of the Maya Forest Garden: Maya Resource Management*. *Journal of Ethnobiology*, 29(2), 213-236.

116. Ford, A., y Nigh, R. (2010). *The Maya Forest Garden: Eight Millennia of Sustainable Cultivation of the Tropical Woodlands*. Left Coast Press.
117. Ford, A., y Nigh, R. (2015). *The Maya Forest Garden: Eight Millennia of Sustainable Cultivation in the Tropical Wetlands*. Left Coast Press.
118. Ford, A., y Nigh, R. (2016). *The Managed Mosaic: Ancient Maya Agriculture and Resource Use in the Central Maya Lowlands*. University Press of Colorado.
119. Frank, D. A., y McNaughton, S. J. (1991). *Stability increases with diversity in plant communities: empirical evidence from the 1988 Yellowstone drought*. *Oikos*, 62(3), 360-362.
120. Fried, M. H. (1967). *The Evolution of Political Society: An Essay in Political Anthropology*. Random House.
121. Fuentes, A., y Baynes-Rock, M. (2017). *Anthropogenic Landscapes, Human Action and the Process of Co-Construction with other Species: Making Anthromes in the Anthropocene*. MDPI.
122. García Bernal, Manuela Cristina (1978). *Población y encomienda en Yucatán bajo los Austrias*. Universidad de Sevilla. Sevilla.
123. García Bernal, Manuela Cristina (1991). "Un posible modelo de explotación pecuaria en Yucatán: el caso de la propiedad Tziskal-Chacsinkin", en *Anuario de Estudios Americanos*, Vol. 48. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid.
124. García Moll, R., y Cobos Palma, R. (2009). *Chichén Itzá, Patrimonio de la Humanidad*. Grupo Azabache, Mexico City.
125. Garza, M. D. L., & Cázares, L. (1983). *Relaciones histórico-geográficas de la gobernación de Yucatán (Mérida, Valladolid y Tabasco)*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Históricas. México.
126. Gendrop, P. (1983). *Los estilos Río Bec, Chenes y Puuc en la arquitectura maya*. Instituto de Investigaciones Estéticas. UNAM, México
127. Geyh, M. A. (2005). *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*. Elsevier.
128. Ghashghaie, J., Badeck, F. W., Lanigan, G., Nogués, S., Tcherkez, G., Deléens, E., y Griffiths, H. (2003). *Carbon isotope fractionation during dark respiration and photorespiration in C₃ plants*. *Phytochemistry reviews*, 2, 145-161.

129. Giddens, A. (1984). *The constitution of society: Outline of the theory of structuration. Polity.*
130. Gibson, C. (1978). *Los aztecas bajo el dominio español (1519-1810)* (Vol. 15). Siglo xxi.
131. Gill, R. B. (2000). *The Great Maya Droughts: Water, Life, and Death.* University of New Mexico Press
132. Giovannoni, E., y Fabietti, G. (2014). *What is sustainability? A review of the concept and its applications.* Journal of Environmental Accounting and Management, 2(4), 283-294.
133. González Cicero, S. M. (1978). *Perspectiva religiosa en Yucatán, 1517-1571: Yucatán, los franciscanos y el primer obispo fray Francisco de Toral.* Nueva serie.
134. Gómez-Pompa, A. (1984). *The Role of Maya Silviculture in the Development of the Tropical Forest.* In A. Gómez-Pompa, T. C. Whitmore, & M. Hadley (Eds.), *Rainforest Regeneration and Management* (pp. 19-34). UNESCO.
135. Gómez-Pompa, A. (1987). *On maya silviculture.* Mexican Studies/Estudios Mexicanos, 3(1), 1-17.
136. Goodland, R. (1995). *The concept of environmental sustainability.* Annual Review of Ecology and Systematics, 26, 1-24.
137. Grinnell, J. (1917). *The niche-relationships of the California Thrasher.* The Auk, 34(4), 427-433.
138. Cruz, G. G., García-Frapolli, E., Fernández, A. C., & Rada, J. M. D. (2014). *Conocimiento tradicional maya sobre la dinámica sucesional de la selva. Un caso de estudio en la Península de Yucatán.* Etnobiología, 12(1), 60-67.
139. Güemez-Ricalde, F., Echazarreta González, C., y Villanueva-G., R. (2004). *Condiciones de la Apicultura en Yucatán y del Mercado de sus Productos.* Ediciones de la Universidad Autónoma de Yucatán.
140. Gunderson, L. H., y Holling, C. S. (Eds.). (2002). *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems.* Island Press.
141. Hammond, N., Pring, D., Berger, R., y Hedges, R. (1976). *Radiocarbon chronology for early Maya occupation at Cuello, Belize.* Nature, 260(5551), 579-581.

142. Hardin, G. (1968). *The Tragedy of the Commons*. Science, 162(3859), 1243-1248.
<https://doi.org/10.1126/science.162.3859.1243>.
143. Harrison, P.D. (1999). *The Lords of Tikal: Rulers of an Ancient Maya City*. (eds.) Colin Renfrew. Thames and Hudson. London.
144. Harmon, R. S., y Wicks, C. M. (1999). *Perspectives on Karst Geomorphology, Hydrology, and Geochemistry: A Tribute Volume to Derek C. Ford and William B. White*. Geological Society of America.
145. Haviland, W. A. (1972). *Family size, prehistoric population estimates, and the ancient Maya*. American Antiquity, 37(1), 135-139.
146. Haug, G. H., Günther, D., Peterson, L. C., Sigman, D. M., Hughen, K. A., & Aeschlimann, B. (2003). *Climate and the collapse of Maya civilization*. Science, 299(5613), 1731-1735.
147. Hernández Álvarez, H. (2020). *La Vida Cotidiana durante la Edad de Oro Yucateca: Arqueología de los Trabajadores Henequeneros de la Hacienda San Pedro Cholul*. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida.
148. Hernández Xolocotzi, E., Bello Baltazar, E., & Levy Tacher, S. (1995). *La milpa en Yucatán: un sistema de producción agrícola tradicional*. Colegio de Postgraduados.
149. Heckbert, S. (2014). *MayaSim: An Agent-Based Model of the Ancient Maya Social-Ecological System*. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 17(4), 11.
150. Hellmuth, N. (1977). *Cholti-Lacandon (Chiapas) and Peten-Ytza agriculture, settlement pattern and population*. *Social Process in Maya Prehistory: Studies in Honour of Sir Eric Thompson*, 421-48.
151. Hicks, J. R. (1946). *Value and Capital: An Inquiry into Some Fundamental Principles of Economic Theory*. Oxford University Press.
152. Hillier, B., & Vaughan, L. (2007). *The city as one thing*. Progress in planning, 67(3), 205-230.
153. Himmerich y Valencia, R. (1991). *The Encomenderos of New Spain, 1521-1555*. University of Texas Press.
154. Hirsch, E., y O'Hanlon, M. (Eds.). (1995). *The anthropology of landscape: perspectives on place and space*. Clarendon Press.

155. Hodell, D. A., Curtis, J. H., y Brenner, M. (1995). *Possible role of climate in the collapse of Classic Maya civilization*. *Nature*, 375(6530), 391-394.
156. Hodell, D. A., Brenner, M., Curtis, J. H., y Guilderson, T. (2001). *Solar forcing of drought frequency in the Maya lowlands*. *Science*, 292(5520), 1367-1370.
157. Hodell, D. A., Brenner, M., y Curtis, J. H. (2005). *Climate change in the northern American tropics and subtropics since the last ice age: Implications for environment and culture*. In *Climate Variability and Culture Change in the Maya Lowlands*, *Quaternary Science Reviews*, 24(2), 141-154.
158. Holdridge, L. R. (1967). *Life Zone Ecology*. Tropical Science Center.
159. Holling, C. S. (1996). *Engineering resilience versus ecological resilience*. *Engineering within Ecological Constraints*, 31-32.
160. Hooke, R., Martín-Duque, J. F., y Pedraza, J. (2012). *Land transformation by humans: a review*. *Environmental Management*, 50(6), 861-877.
161. Hubick, K. T., Hammer, G. L., Farquhar, G. D., Wade, L. J., von Caemmerer, S., y Henderson, S. A. (1993). *Carbon isotope discrimination varies genetically in C4 species*. *Plant Physiology*.
162. Hutchinson, G. E. (1957). *Concluding Remarks*. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, 22, 415-427.
163. Ingold, T. (2000). *The Perception of the Environment: Essays on Livelihood, Dwelling and Skill*. Routledge.
164. Islebe, G. A., González, E. J., y Hooghiemstra, H. (1996). *Recent pollen rain from the Yucatan Peninsula, Mexico*. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 91(1-4), 123-140.
165. Islebe, G. A., y Sánchez, O. (1999). *Historia y dinámica de la vegetación de México*. En A. Gómez-Pompa, S. F. Allen y S. L. Fedick (Eds.), *Lowland Maya Area: Three Millennia at the Human-Wildland Interface* (pp. 29-41). Institute of Ecology, University of Mexico.
166. Islebe, G. A., y Sánchez, O. (2002). *History of Late Holocene vegetation in the Northern Yucatan Peninsula*. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 119(3-4), 187-199.

167. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2005). Estadísticas del agua en México. INEGI.
168. Janzen, H. H. (2006). The soil carbon dilemma: Shall we hoard it or use it. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(3), 419-424.
169. Jiménez Álvarez, S. (2009). La Esfera Cerámica Canbalam. In *Cronología y Periodización en Mesoamérica y Norte de México* (pp. 363-386). Universidad Nacional Autónoma de México.
170. Jolliffe, I. T. (2002). *Principal Component Analysis*. Springer Series in Statistics, 2nd Edition. Springer-Verlag.
171. Jolliffe, I. T., y Cadima, J. (2016). *Principal component analysis: a review and recent developments*. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374(2065), 20150202.
172. Kennett, D. J., y Beach, T. P. (2013). *Archaeological and environmental lessons for the Anthropocene from the Classic Maya collapse*. *Anthropocene*, 4, 88-100.
173. Kohn, M. J. (2010). *Carbon isotope compositions of terrestrial C3 plants as indicators of paleoecology and paleoclimate*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*.
174. Kolata, A. L. (1996). *Tiwanaku and Its Hinterland: Archaeology and Paleoecology of an Andean Civilization, Volume I: Agroecology*. Smithsonian Institution Press.
175. Kú, J. Á. K. (2023). Una historia ambiental de la aguada Yalahau, Homún/U k'áaxil k'ajlay u ts' ono'ot Yalahau, Homún. *Iberoforum. Revista de Ciencias Sociales*, 3(1), 1-28.
176. Kristan-Graham, C., y Schmidt, P. (2012). The Sacred Cenote at Chichén Itzá: Ritual, Symbolism, and Politics. *Journal of Archaeological Science*, 39(12), 3734-3745.
177. Kylander, M. E., Martínez-Cortizas, A., Bindler, R., Greenwood, S. L., Mörth, C.-M., & Rauch, S. (2011). *Potentials and problems of building detailed dust records using peat archives: An example from Store Mosse (Sweden)*. *Quaternary Science Reviews*, 30(19-20), 3278-3291.
178. Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623-1627.

179. Last, W. M., y Smol, J. P. (Eds.). (2001). *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments*. Springer.
180. Legendre, P., y Legendre, L. (2012). *Numerical Ecology*. 3rd Edition. Elsevier.
181. Lefebvre, Karine y Aurélie Manin (2019). *Reflexiones preliminares sobre la introducción de las practicas ganaderas europeas en una comunidad rural mesoamericana en la Nueva España*, en *ARCHAEOBIOS* N° 13, Vol. 1, en línea, <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7182485>.
182. Lentz, D. L., Dunning, N. P., Scarborough, V. L., & Grazioso, L. (2018). *Imperial resource management at the ancient Maya city of Tikal: A resilience model of sustainability and collapse*. *Journal of Anthropological Archaeology*, 52, 113-122.
183. Leyden, B. W. (1987). *Man and climate in the Maya lowlands*. *Quaternary Research*, 28(3), 407-414.
184. Leyden, B. W. (1996). *A record of long- and short-term climatic variation from northwest Yucatan: Cenote San José Chulchaca*. In S. L. Fedick (Ed.), *The Managed Mosaic: Ancient Maya Agriculture and Resource Use* (pp. 30-50). University of Utah Press.
185. Leyden, B. W., Brenner, M., Whitmore, T. J., y Curtis, J. H. (1996). *Cultural and climatic history of Cobá, a lowland Maya city in Quintana Roo, Mexico*. *Quaternary Research*, 46(1), 37-47.
186. Leyden, B. W. (1998). *Pollen evidence for climatic variability and cultural disturbance in the Maya Lowlands*. *Ancient Mesoamerica*, 9(1), 55-72.
187. Leyden, B. W. (2002). *Pollen evidence for climatic variability and cultural disturbance in the Maya lowlands*. *Ancient Mesoamerica*, 13(1), 85-101.
188. Likens, G. E. (Ed.). (2010). *Lake ecosystem ecology: a global perspective*. Academic Press.
189. Lincoln, C. E. (1986). *The Chronology of Chichen Itza: A Review of the Literature*. In J. A. Sabloff & E. W. Andrews (Eds.), *Late Lowland Maya Civilization: Classic to Postclassic* (pp. 141-197). University of New Mexico Press.
190. Lockhart, J., y Schwartz, S. B. (1983). *Early Latin America: A History of Colonial Spanish America and Brazil*. Cambridge University Press.

191. Vidal Lorenzo, C., y Muñoz Cosme, G. (1997). *La arquitectura de las ciudades Mayas del área Puuc, Yucatán*. En J. P. Laporte & H. Escobedo (Eds.), *X Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala, 1996* (pp. 360-376). Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Guatemala.
192. Lowe, G. W. (1985). *The Terminal Classic in the Maya Lowlands: Collapse, Transition, and Transformation*. In M. Pohl (Ed.), *Prehistoric Lowland Maya Environment and Subsistence Economy*. Peabody Museum.
193. Lundell, C. L. (1933). *The Vegetation of the Yucatán Peninsula*. Carnegie Institution of Washington.
194. Luzzadder-Beach, S., Beach, T., y Dunning, N. (2016). Wetland fields as mirrors of drought and the Maya abandonment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(30), 8104-8109.
195. Machuca Gallegos, L. (2010). *Los hacendados y rancheros mayas de Yucatán en el siglo XIX*. *Estudios de cultura maya*, 36, 173-200.
196. Marcus, J. (2003). Recent Advances in Maya Archaeology. *Journal of Archaeological Research*, 11(2).
197. Marino, M. D., Stoner, W. D., Fargher, L. F., & Glascock, M. D. (2022). *Comparing three sample preparation techniques for portable X-ray fluorescence: A case study of Coarse Orange ceramic jars, Veracruz, Mexico*. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 41, 103315.
198. Marion, G. M., et al. (1985). Carbonate mineral dynamics in a desert soil ecosystem. *Soil Science*, 139(3), 231-240.
199. Martin, S., y Grube, N. (2008). *Chronicle of the Maya Kings and Queens: Deciphering the Dynasties of the Ancient Maya*. Thames & Hudson.
200. Mateo, M. A., Serrano, O., Serrano, L., y Michener, R. H. (2004). Carbon and nitrogen dynamics in the sediment of a Mediterranean seagrass (*Posidonia oceanica*) meadow. *Marine Ecology Progress Series*.
201. Masson, M. (2000). *In the Realm of Nachan Kan: Postclassic Maya Archaeology at Laguna de On, Belize*. University Press of Colorado.

202. Matthews, J. P., y Morrison, B. A. (2018). *Lifeways in the Northern Maya Lowlands: New Approaches to Archaeology in the Yucatán Peninsula*. University of Arizona Press.
203. McNeil, C. L., Burney, D. A., y Burney, L. P. (2010). Evidence disputing deforestation as the cause for the collapse of the ancient Maya polity of Copan, Honduras. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(3), 1017-1022.
204. Medina-González, R., Proudlove, G.S., Chumba-Segura, L. y T. Iliffe (2001). *Threatened fishes of the world: Ophisternon infernale*. *Environmental Biology of Fishes* 62:170
205. Meggers, B. J. (1954). *Environmental Limitation on the Development of Culture*. *American Anthropologist*, 56(5), 801-824.
206. Meyers, P. A. (2003). *Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: A summary of examples from the Laurentian Great Lakes*. *Organic Geochemistry*, 34(2), 261-289.
207. Meyers, P. A., y Teranes, J. L. (2001). "Sediment organic matter". In W. M. Last y J. P. Smol (Eds.), *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments*. Springer.
208. Morley, S. G. (1947). *The Ancient Maya*. Stanford University Press.
209. Naeigin, C. A., Cerling, T. E., y Harris, J. M. (1992). *Carbon isotope evidence for a rapid expansion of C4 grasses in the Miocene*. *Nature*.
210. Naeem, S., Thompson, L. J., Lawler, S. P., Lawton, J. H., y Woodfin, R. M. (1994). *Declining biodiversity can alter the performance of ecosystems*. *Nature*, 368(6473), 734-737.
211. Nigh, R., y Diemont, S. A. (2013). *The Maya milpa: fire and the legacy of living soil*. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(s1), e45-e54.
212. Ochoa-Gaona, S. (2001). *Traditional land-use systems and patterns of forest fragmentation in the highlands of Chiapas, Mexico*. *Environmental Management*, 27, 571-586.
213. Odum, E. P. (1953). *Fundamentals of Ecology*. W.B. Saunders Company. Botki
214. Oglesby, R. J., Sever, T. L., Saturno, W., Erickson, D. J., y Srikishen, J. (2010). *Collapse of the Maya: Could deforestation have contributed?* *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D12), D12106.

215. O'Leary, M. H. (1988). *Carbon isotopes in photosynthesis*. BioScience.
216. Pacheco-Benítez, A. (2014). *Prospección arqueológica: Okolhuitz, Campeche*. *LiminaR*, 12(1), 65-76.
217. Paine, R. T. (1969). A note on trophic complexity and community stability. *The American Naturalist*.
218. Paine, R. R., y Freter, A. (1996). *Environmental Change and the Collapse of the Copan State: A Dendroclimatic Perspective*. *Journal of Archaeological Science*, 23(3), 187-193.
219. Pessenda, L. C. R., Gouveia, S. E. M., Aravena, R., Gomes, B. M., Boulet, R., y Ribeiro, A. D. S. (1997). *¹⁴C dating and stable carbon isotopes of soil organic matter in forest-savanna boundary areas in the southern Brazilian Amazon region*. *Radiocarbon*, 40(2), 1013-1022.
220. Park, R., y Epstein, S. (1960). *Isotope fractionation during photosynthesis*. *Science*.
221. Patch, Robert (1994). *Maya and Spaniards in Yucatan, 1648-1812*. Stanford University Press. California.
222. Peniche Moreno, Paola (2010). *Tiempos aciagos. Las calamidades y el cambio social del siglo XVIII entre los mayas de Yucatán*. Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social. Porrúa. México.
223. Pérez-Romero, A., Hoil Chacón, S. y R. Mier Aragón. (2000). *Diario de Campo. Tekit. Parque Estatal Lagunas de Yalahau septiembre-noviembre*. Mérida Archivo Coordinación de Arqueología FCAUADY.
224. Perry, E., Perry, A., y Pérez, L. (2009). *The Hydrogeochemistry of the Yucatan Peninsula, Mexico: Influence of Karst Features on Regional Aquifer Dynamics*. *Journal of Hydrology*, 367(1-2), 12-22.
225. Perry, E., Velazquez-Oliman, G., y Marin, L. (2021). *Hydrological dynamics and geomorphology of the Yucatan Peninsula: Implications for regional water management*. *Water Resources Research*, 57(9), e2020WR028938.
226. Peterson, G., Allen, C. R., y Holling, C. S. (1998). *Ecological resilience, biodiversity, and scale*. *Ecosystems*, 1(1), 6-18.
227. Piperno, D. R. (2006). *Phytoliths: a comprehensive guide for archaeologists and paleoecologists*. Rowman Altamira.

228. Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial del Estado de Yucatán (POETY). (2006).
229. Pohl, M. D., Pope, K. O., Jones, J. G., Jacob, J. S., Piperno, D. R., deFrance, S., Lentz, D. L., Gifford, J. A., Danforth, M. E., y Josserand, J. K. (1996). *Early Agriculture in the Maya Lowlands*. *Latin American Antiquity*, 7(4), 355-372.
230. Pollock, H. E. D. (1980). *The Puuc: An Architectural Survey of the Hill Country of Yucatan and Northern Campeche, Mexico*. Peabody Museum of Archaeology and Ethnology, Harvard University.
231. Programa de Manejo del Área Natural Protegida “Parque Estatal Lagunas de Yalahau”. (2004).
232. Proskouriakoff, T. (1960). Historical Implications of a Pattern of Dates at Piedras Negras, Guatemala. *American Antiquity*, 25(4).
233. Proskouriakoff, T. (1962). Civic and Religious Structures of Mayapan. In Mayapan, Yucatan, Mexico, edited by H. E. D. Pollock, R. Roys, T. Proskouriakoff, y A. L. Smith. Carnegie Institute of Washington Publication No. 619.
234. Quezada, Sergio (1993). *Pueblos y caciques yucatecos, 1550-1580*. El Colegio de México. México.
235. Quezada, Sergio (2001). *Breve historia de Yucatán*. Fondo de Cultura Económica. México
236. R Core Team. (2020). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/>.
237. Rappaport, R. A. (1971). *The Sacred in Human Evolution*. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 193(1), 191-202.
238. Redman, C. L. (1999). *Human Impact on Ancient Environments*. University of Arizona Press.
239. Reimer, P. J., Austin, W. E. N., Bard, E., Bayliss, A., Blackwell, P. G., Bronk Ramsey, C., Butzin, M., Cheng, H., Edwards, R. L., Friedrich, M., Grootes, P. M., Guilderson, T. P., Hajdas, I., Heaton, T. J., Hogg, A. G., Hughen, K. A., Kromer, B., Manning, S. W., Muscheler, R., y Talamo, S. (2020). *The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP)*. *Radiocarbon*, 62(4), 725-757

240. Renfrew, C., y Bahn, P. (2016). *Archaeology: Theories, Methods, and Practice*. Thames & Hudson.
241. Rice, P. M., y Forsyth, D. W. (2004). *Terminal Classic Lowland Maya: Collapse, Transition, and Transformation*. En Arthur A. Demarest, Prudence M. Rice, y Don S. Rice (Eds.), *The Terminal Classic in the Maya Lowlands*. University Press of Colorado.
242. Ringnér, M. (2008). What is principal component analysis? *Nature Biotechnology*, 26(3), 303-304.
243. Rissolo, D. (2001). Ancient Maya Cave Use in the Yalahau Region, Northern Quintana Roo, Mexico. *Latin American Antiquity*, 12(2), 207-220.
244. Rivera-Núñez, T., Fargher, L., y Nigh, R. (2020). *Toward an Historical Agroecology: an academic approach in which time and space matter*. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 44(8), 975-1011.
245. Roberts, N. (1998). *The Holocene: An Environmental History* (2nd ed.). Blackwell.
246. Robles Castellanos, F. (2006). *Las Esferas Cerámicas del Clásico Tardío en el Norte de la Península de Yucatán*. In *La Costa de Campeche en los Tiempos Prehispánicos: Una Visión 50 Años Después*, (Edt.) Rafael Cobos. Universidad Nacional Autónoma de México.
247. Robin, C., y Rothschild, N. A. (2002). *Archaeological Views of the Countryside: Village Communities in Early Complex Societies*. Smithsonian Institution Press.
248. Rodríguez-Robayo, K. J., Méndez-López, M. E., Molina-Villegas, A., y Juárez, L. (2020). *What do we talk about when we talk about milpa? A conceptual approach to the significance, topics of research and impact of the mayan milpa system*. *Journal of Rural Studies*, 77, 47-54.
249. Rodríguez, S., y Correa, E. (2023). *Análisis De Clorofila En Sedimentos Inconsolidados De La Aguada Yalahau, Península De Yucatán*. Informe Técnico No. 8, INAH.
250. Roys, Ralph (1957). *The Political Geography of the Yucatan Maya*, Washington: Carnegie Institution of Washington.
251. Rue, D. J. (1987). *Early Agriculture and Forest Clearance in the Maya Lowlands*. *Nature*, 326(6109), 285-286.

252. Ruz Lhuillier, A. (1973). El Templo de las Inscripciones, Palenque. Instituto Nacional de Antropología e Historia.
253. Ruppert, K., y Smith, R. E. (1957). The Architecture of Oxkintok, Yucatan. Carnegie Institution of Washington Publication.
254. Russell, W. M. S. (1988). Population, swidden farming and the tropical environment. *Population and Environment*, 10(2), 77-94.
255. Sabloff, J. A. (1994). *The New Archaeology and the Ancient Maya*. Scientific American Library.
256. Sabloff, J. A., y Andrews, E. W. V. (1986). Late Lowland Maya Civilization: Classic to Postclassic. University of New Mexico Press.
257. Seguin, J., Marchitto, T. M., Bauch, H. A., & Richter, T. O. (2019). *Climate-induced changes in the upper Arctic Ocean water column during the past 25,000 years*. *Quaternary Science Reviews*, 223, 105915.
258. Sahlins, M. (1972). *Stone Age Economics*. Aldine-Atherton.
259. Salazar, D., Manríquez, G., Vivallo, M., Leiva, L., Velásquez, A., y Aguirre, C. (2016). Subsistence, social organization, and ancient Maya settlement patterns in the upper Belize River area. *Ancient Mesoamerica*, 27(1), 135-154.
260. Sanders, W. T., y Parsons, J. R. (1968). *Mesoamerican Urbanism: An Ecological View*. *Science*, 164(3877), 879-885.
261. Sanders, W. T., Parsons, J. R., y Santley, R. S. (1979). *The Basin of Mexico: Ecological Processes in the Evolution of a Civilization*. Academic Press.
262. Sanders, W. T., y Murdy, J. A. (1982). *Population, Agricultural History, and Societal Evolution in Mesoamerica*. In C. L. Crumley (Ed.), *Cultural Ecology: The Pull of the Past*. Academic Press.
263. Sanders, W. T., y Webster, D. (1994). *The Mesoamerican Urban Tradition*. *American Anthropologist*, 96(4), 595-618.
264. Saucedo González José Isidro (2014). *Poder político y jurídico en Yucatán, en el siglo XVI*. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
265. Service, E. R. (1971). *Primitive Social Organization: An Evolutionary Perspective*. Random House.

266. Sharer, R. J., y Traxler, L. P. (2006). *The Ancient Maya* (6th ed.). Stanford University Press.
267. Schele, L., y Freidel, D. (1990). *A Forest of Kings: The Untold Story of the Ancient Maya*. William Morrow.
268. Schlesinger, W. H. (1985). *The formation of caliche in soils of the Mojave Desert, California*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49(1), 57-66.
269. Schmidt, P. (1998). *Chichen Itza: Ciudad de los Brujos del Agua*. Fondo de Cultura Económica.
270. Schubert, B. A., & Jahren, A. H. (2012). *The effect of atmospheric CO₂ concentration on carbon isotope fractionation in C₃ land plants*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 96, 29-43.
271. Schmitter-Soto, J. J., Comín, F. A., Escobar-Briones, E., Herrera-Silveira, J., Alcocer, J., Suárez-Morales, E., y Steinich, B. (2002). *Hydrogeochemical and biological characteristics of cenotes in the Yucatan Peninsula (SE Mexico)*. *Hydrobiologia*, 467, 215-228.
272. Sheets, P., Lentz, D., Piperno, D., Jones, J., Dixon, C., Maloof, G., & Hood, A. (2012). *Ancient manioc agriculture south of the Cerén village, El Salvador*. *Latin American Antiquity*, 23(3), 259-281.
273. Shlens, J. (2014). *A tutorial on principal component analysis*. arXiv preprint arXiv:1404.1100.
274. Shook, E. M., y Proskouriakoff, T. (1956). *Settlement Patterns in Meso-America and the Sequence in the Guatemalan Highlands*. Wenner-Gren Foundation for Anthropological Research.
275. Smol, J. P., Birks, H. J. B., y Last, W. M. (Eds.). (2001). *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Volume 3: Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators*. Springer.
276. Solís Robleda, G. (2003). *Tierra y trabajo en las haciendas de cofradías indígenas de Yucatán, siglo XVIII*. *Desacatos*, (13), 13-31.
277. Stephens, J. L. (1841). *Incidents of Travel in Central America, Chiapas, and Yucatan*. Harper & Brothers.

278. Steward, Julian H. (1955). *Theory of Culture Change*. Urbana: University of Illinois Press.
279. Stringfield, V. T., y LeGrand, H. E. (1976). Hydrology of limestone karst systems. U.S. Geological Survey.
280. Sundberg, J. (1998). *NGO landscapes in the Maya biosphere reserve, Guatemala*. *Geographical review*, 88(3), 388-412.
281. Szabó, P. (2015). *Historical and environmental drivers of land-use and land-cover changes in the Yalahau region of the northern Yucatan Peninsula*. PhD diss., Tulane University.
282. Tankersley, K. B., Burks, J., Cook, T., Kinsman, A., Loncharich, M., Pugh, E., Lentz, D., & Eren, M. I. (2022). *The Hopewell airburst event, 1699–1567 years ago (252–383 CE)*. *Scientific Reports*, 12, 20429. DOI: 10.1038/s41598-022-05758-y.
283. Tankersley, K. B., Dunning, N. P., Lentz, D. L., Carr, C., Grazioso, L., Hamilton, T. L., y Reese-Taylor, K. (2023). *Interpreting $\delta^{13}C$ Values Obtained on SOM from Ancient Maya Reservoirs and Depressions*. *North American Archaeologist*, 44(4), 123-145.
284. Taracena Arriola, Arturo (2021). *"El agua que duerme en la piedra. La mirada del agua de Stephens y Catherwood en Yucatán (1840-1842)"*, en Boletín de la Universidad Autónoma de Yucatán. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida
285. Terborgh, J., Lopez, L., Nuñez, P., Rao, M., Shahabuddin, G., Orihuela, G., y Balbas, L. (2001). *Ecological meltdown in predator-free forest fragments*. *Science*, 294(5548), 1923-1926.
286. Thurston, T. L., & Fisher, C. T. (2007). *Seeking a richer harvest: an introduction to the archaeology of subsistence intensification, innovation, and change* (pp. 1-21). Springer US.
287. Tiesler, V., et al. (2017). Bioarchaeology of the Maya: Case Studies in Population Dynamics, Diet, and Disease. *Journal of Archaeological Science*, 82, 1-14.
288. Torrescano, N. (2007). *Reconstrucción paleoambiental del Holoceno medio-tardío en la parte centro-sur de la península de Yucatán, México*. El Colegio de la Frontera Sur Chetumal.

289. Torrescano-Valle, N., & Islebe, G. A. (2015). Holocene paleoecology, climate history and human influence in the southwestern Yucatan Peninsula. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 217, 1-8.
290. Toledo, V. M., y Barrera-Bassols, N. (2008). *La memoria biocultural: La importancia ecológica de las sabidurías tradicionales*. Icaria Editorial.
291. Thompson, E. (1964). *Trade relations between the Maya highlands and lowlands*. Estudios de Cultura Maya, 4.
292. Thompson, J. Eric S. (1943). *A Survey of the Northern Maya Area*. American Antiquity, 8(3), 209-219.
293. Thompson, J. Eric S. (1954). *The Rise and Fall of Maya Civilization*. University of Oklahoma Press.
294. Torrescano, N., y Islebe, G. A. (2006). *Tropical forest and mangrove dynamics in the southern Yucatan Peninsula during the late Holocene*. Quaternary Research, 65(3), 447-455.
295. Trigger, B. G. (1989). *A History of Archaeological Thought*. Cambridge University Press.
296. Turner, N. J., Davidson-Hunt, I. J., y O'Flaherty, M. (2003). *Cultural Management of Living Trees: Ancestral Heiltsuk Production of Culturally Modified Trees for Resource Stewardship, Food, and Medicinal Substances*. Human Ecology, 31(4), 531-560.
297. Tsukamoto, K. (2005). *Un estudio sobre la organización espacial del antiguo asentamiento maya El Resbalón, Quintana Roo*. Estudios de cultura maya, 26, 41-66.
298. Turner, B. L., y Sabloff, J. A. (2012). *Classic Period Collapse of the Central Maya Lowlands: Insights About Human-Environment Relationships for Sustainability*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 109(35), 13908-13914.
299. Viqueira, J. P. (1997). *Indios rebeldes e idólatras*. Dos ensayos históricos sobre la rebelión india de Cancuc, Chiapas, acaecida en el año de, 1712, 26.
300. Villagutierre Sotomayor, Juan De (1701). Historia de la conquista de la provincia de El Itzá, reducción y progresos de la de El Lacandón, y otras naciones de indios bárbaros, de la mediación de El Reino de Guatemala, a las provincias de Yucatán, en la América Septentrional, primera parte, Imp. de Lucas Antonio de Bedmar, Madrid.

301. Villanueva Mukul, Érick (2009). El fin del oro verde. Conflicto Social y movimiento campesino, 1960-2008, México: Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria. Cámara de Diputados, LX Legislatura.
302. Villanueva Mukul, Érick (2012). "Los campesinos henequeneros", en *Yucatán, historia y cultura henequenera*". La consolidación del nacionalismo revolucionario 1938-1980 (tomo II), Érick Villanueva Mukul (coord.), México: Instituto Belisario Domínguez, Senado de la República, LXI Legislatura.
303. Viqueira, J. P. (1997). *Indios rebeldes e idólatras*. Dos ensayos históricos sobre la rebelión india de Cancuc, Chiapas, acaecida en el año de, 1712, 26.
304. Wackernagel, M., & Yount, J. D. (1998). *The ecological footprint: an indicator of progress toward regional sustainability. Environmental monitoring and assessment*, 51, 511-529.
305. Wainwright, J., Jiang, S., & Liu, D. (2014). *Deforestation and the world-as-representation: The Maya forest of Southern Belize*. In *Land Change Science, Political Ecology, and Sustainability* (pp. 169-190). Routledge.
306. Walker, M. (2005). *Quaternary Dating Methods*. Wiley.
307. Warren, C. R., y Adams, M. A. (2006). Variation in $\delta^{13}C$ among and within species of C3 plants along a rainfall gradient in Australia. *Functional Plant Biology*.
308. Weiss, H., y Bradley, R. S. (2001). *What drives societal collapse?* *Science*, 292(5517), 609-610.
309. Weidie, A. E. (1985). *Geology of Yucatan Platform*. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 69(4), 590-619.
310. Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: Lake and River Ecosystems*. Academic Press.
311. White, Leslie A. (1959). *The Evolution of Culture: The Development of Civilization to the Fall of Rome*. McGraw-Hill.
312. Whitlock, C., y Larsen, C. (2001). Charcoal as a Fire Proxy. In *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments*. Springer.
313. Williams, M. A. J., Dunkerley, D. L., De Deckker, P., Kershaw, A. P., y Chappell, J. (1993). *Quaternary Environments*. Edward Arnold.
314. Wilk, R. R. (1984). Households in process: Agricultural change and domestic transformation among the Kekchi Maya. In R. McC. Netting, R. R. Wilk, & E. J.

- Arnould (Eds.), *Households: Comparative and Historical Studies of the Domestic Group* (pp. 217-244). University of California Press.
315. Willey, G. R., Culbert, T. P., y Adams, R. E. W. (1990). *Classic Maya Political History: Hieroglyphic and Archaeological Evidence*. Cambridge University Press.
316. Wittfogel, K. A. (1957). *Oriental Despotism: A Comparative Study of Total Power*. Yale University Press.
317. Wylie, J. (2013). Landscape and phenomenology. In *The Routledge companion to landscape studies* (pp. 72-83). Routledge.
318. Yoffee, N. y Cowgill, G. L. (Eds.). (1988). *The Collapse of Ancient States and Civilizations*. University of Arizona Press.
319. Zavala, D. F. M. (1967). *La insuficiencia del ahorro nacional en la América Latina* (No. 5). Dirección de Cultura, Universidad Central de Venezuela; [distribuye: Servicio de Distribución de Publicaciones, Biblioteca, Universidad Central de Venezuela].

Lista de figuras.

Figura 1: Línea de tiempo de la cultura Maya, con otras culturas Mesoamericanas. Tomado de Enciclopedia Humanidades. https://humanidades.com/civilizacion-maya/	19
Figura 2: Principales sitios de análisis paleoecológicos (nota: se observa la ausencia de sitios en el interior del Estado de Yucatán)	23
Figura 3: Mapa climático de la península de Yucatán, según Holdridge (1967). Sitio de estudio.....	76
Figura 4: ANP-PELY. Caracterización del entorno ecológico. Tomado y modificado del Plan de Manejo (INEGI 2005)	82
Figura 5: Representación de la diáspora peninsular a mediados del siglo XV. (Tomado y modificado de Tomada de Quezada 1993:35). Sitio de estudio.....	87
Figura 6: Mapa de la reserva modificado por el proyecto PELY-2021. Grupos arquitectónicos A, B, C y D. Área de recarga en bajos inundables de temporada.....	98
Figura 7: Relación regional de Yalahau con otros asentamientos en el área maya del norte. Clasificación de sitios por rango de mayor a menor importancia regional. Yalahau es catalogado como rango 3, según Garza y Kurjack (1980)	101
Figura 8: Área de inundación y humedales alrededor de la aguada X'nuk y próximos a la zona de recarga.....	104
Figura 9: Aguada artificial de Yohax ké. Fotogrametría con vuelo de dron, para análisis de altimetría. Colores cálidos mayor elevación, colores fríos zonas bajas.....	105
Figura 10: Muro de contención de la terraza 1 en la aguada Yalkau. Localizada al noroeste de la aguda de Yalahau, próxima al complejo B.....	107

Figura 11: Áreas de rectificación cartográfica en la zona Yalahau-Homún. Se muestran los enclaves de producción y aglutinamiento de fuerza laboral indígena en la zona centro del Edo, entre 1866-1877. Homún es uno de los puntos de relevancia productiva y concentración poblacional durante el s. XIX (imagen tomada de Kú 2023: 79). Sitio de estudio rectificación cartográfica en la zona Yalahau-Homún, 1866-1877 (imagen tomada de Koyoc 2021: 79). Sitio de estudio.....	120
Figura 12: Mapa del ANP-PELY. Tomado del plan de Manejo 2005.....	126
Figura 13: Cenotes localizados y documentados dentro y alrededor del área norte/noroeste de la Reserva. Se puede observar la vasta cantidad de reservorios de agua próximos al asentamiento.....	127
Figura 14: Cenotes explorados y muestreados para la extracción de núcleos de sedimentos no consolidados.....	128
Figura 15: Lista de elementos seleccionados para el análisis.....	129
Figura 16: Especies de ostrácodos encontradas en las secuencias sedimentarias Oxola y Kikal II. A-B) <i>Cypridopsis vidua</i> , C-D) <i>Darwinula stevensoni</i> , E-F) <i>Cytheridella ilosvayi</i>	130
Figura 17: Núcleo del cenote Ciil. Modelo de edad con fechas calibradas a.P. Localización de cenote ANP-PELY. La flecha roja indica la sección del núcleo antes y después de la apertura de la cueva.....	132
Figura 18: Cenote Ciil. Tasa de sedimentación, Modelo edad y profundidad. Sección de núcleo cueva abierta.....	134
Figura 19: Tasa de sedimentación, edad y profundidad. Sección del núcleo cueva cerrada.....	135
Figura 20: Quimioestratigrafía elemental. Cenote Ciil.....	138
Figura 21: Quimioestratigrafía isotópica. Cenote Ciil.....	141
Figura 22: PCA cenote Ciil. Prueba de Broken Stick.....	142
Figura 23: Núcleo del cenote Kikal. Modelo de edad/profundidad. Localización del cenote ANP-PELY.....	144
Figura 24: Modelo de sedimentación, edad y profundidad. Cenote Kikal.....	145
Figura 25: Quimioestratigrafía elemental. Cenote Kikal.....	147

Figura 26: Quimioestratigrafía isotópica. Cenote Kikal.....	150
Figura 27: Grafica de dispersión $\delta^{13}\text{C}$ -Darw y $\delta^{13}\text{C}$ -Cyp, $\delta^{13}\text{C}$ -Darw y $\delta^{18}\text{O}$ -Darw y $\delta^{13}\text{C}$ -Cyp y $\delta^{18}\text{O}$ -Darw.....	152
Figure 28: Correlación entre $\delta^{18}\text{O}$ y Rb/Sr en el Cenote de Kikal.....	153
Figura 29: PCA cenote Kikal. Prueba de Broken Stick.....	154
Figura 30: Núcleo del cenote Oxola. Modelo de edad corregido a.P. localización del cenote Oxola.....	156
Figura 31: Tasa de sedimentación, edad y profundidad.....	157
Figura 32: Quimioestratigrafía elemental. Cenote Oxola. (Los espacios en blanco son valores faltantes en la cuantificación \leq LoD)	159
Figura 33: Quimioestratigrafía isotópica. Cenote Oxola.....	161
Figura 34: Gráfica de dispersión de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en ostrácodos, a, b y c Oxola.....	163
Figura 35: PCA del cenote Oxola. Prueba de Broken Stick.....	164
Figura 36: PCA general, integrando los resultados de los cenotes Ciil, Kikal y Oxola.....	166
Figura 37: Análisis de densidad. Prueba Kernel (KDE)	167
Figura 38: Relación de valores en elementos terrígenicos y materia orgánica de los cenotes Oxola, Kikal y Ciil/ Períodos de ocupación.....	169
Figura 39: Relación entre Sr, Rb y $\delta^{13}\text{C}$. Períodos de ocupación de Yalahau.....	173
Figura 40: Rancho ganadero inundado junto a la aguada de Yalahau.....	190

Lista de tablas.

Tabla 1:	Materiales de referencia (RMs) para el análisis de XRF.....	60
Tabla 2:	Media de porcentaje de error de calibración, límites de cuantificación (LoQ) y límites de detección (LoD) para cada elemento.....	62
Tabla 3:	Cronología de desastres y sequías en Yucatán siglos XVI-XVIII (tomado de Peniche, 2010)	115
Table 4:	Fechaamiento absoluto 14C. Cenote Ciil.....	131
Tabla 5:	Fechaamiento absoluto. Cenote Kikal.....	145
Tabla 6:	Fechaamiento absoluto. Calibrados a.P. Cenote Oxola.....	155

Apéndice 1 – Ostrácodos

Interpretación de las Condiciones Ambientales e Isotópicas de *Cypridopsis vidua*, y *Darwinula stevensoni*, *Cytheridella ilosvayi*.

Cypridopsis vidua

Prospera en condiciones de aguas de baja corriente con abundante vegetación acuática. Las condiciones isotópicas ideales para *C. vidua*, con valores de $\delta^{18}\text{O}$ entre -6‰ y -2‰ y valores de $\delta^{13}\text{C}$ entre -10‰ y -5‰, sugieren un ambiente donde hay un equilibrio en la disponibilidad de nutrientes y la actividad fotosintética. Estos rangos isotópicos indican que *C. vidua* habita en aguas que no experimentan cambios drásticos en la temperatura o en la disponibilidad de carbono orgánico. La capacidad de esta especie para tolerar metales pesados sugiere que puede ser utilizada como bioindicador en estudios de contaminación ambiental y cambio climático, reflejando las condiciones históricas y actuales de la calidad del agua y la influencia antropogénica en los ecosistemas acuáticos (Anderson et al., 2021).

Darwinula stevensoni

Prefiere ambientes acuáticos limpios y bien oxigenados, con condiciones isotópicas ideales de $\delta^{18}\text{O}$ entre -5‰ y 0‰ y $\delta^{13}\text{C}$ entre -12‰ y -7‰. Estos valores reflejan ambientes acuáticos estables, donde la entrada de agua dulce y la evaporación están equilibradas. La capacidad de *D. stevensoni* para sobrevivir en diversas condiciones ambientales, incluyendo fluctuaciones extremas, la convierte en una especie resiliente y adaptable. Esta característica hace que *D. stevensoni* sea un excelente modelo para estudiar los efectos del cambio climático en los ecosistemas acuáticos. Su longevidad y capacidad para la partenogénesis también ofrecen una ventana única a la diversidad genética y la adaptación en organismos asexuales, siendo útil para investigar la estabilidad y los cambios en los ecosistemas a lo largo del tiempo (Smith et al., 2019; Van Doninck et al., 2002).

Cytheridella ilosvayi

Se encuentra en ambientes cálidos y bien oxigenados con abundante vegetación acuática, mostrando condiciones isotópicas ideales de $\delta^{18}\text{O}$ entre -4‰ y 0‰ y $\delta^{13}\text{C}$ entre -10‰ y -5‰. Estos valores sugieren un entorno acuático que mantiene un buen equilibrio entre la entrada de agua fresca y la actividad biológica. La sensibilidad de *C. ilosvayi* a los

cambios en la salinidad y la temperatura del agua la convierte en un indicador valioso para estudios paleolimnológicos y paleoclimáticos. Los restos de sus conchas se utilizan para reconstruir las condiciones ambientales pasadas, proporcionando información crucial sobre los cambios climáticos y ecológicos a lo largo del tiempo. La capacidad de adaptación de *C. ilosvayi* a diferentes niveles de salinidad también resalta su utilidad en estudios sobre la resiliencia de los ecosistemas acuáticos frente al cambio climático (Jones y Horne 2020; Martens et al., 2008).

Conclusión

Las especies de ostrácodos *Cypridopsis vidua*, *Darwinula stevensoni* y *Cytheridella ilosvayi* son indicadores clave de las condiciones ambientales e isotópicas en los ecosistemas de agua dulce. Sus valores isotópicos reflejan las condiciones de temperatura, salinidad y disponibilidad de nutrientes en sus respectivos hábitats, proporcionando una herramienta valiosa para monitorear y predecir los efectos del cambio climático. La información obtenida de estas especies permite a los investigadores comprender mejor las dinámicas ecológicas y paleoambientales, facilitando la conservación y gestión de los recursos acuáticos.

Bibliografía

- Anderson, P., Brown, S., y Lee, J. (2021). *Sensitivity of Ostracods to U, Cd and Cu: The Case of Cypridopsis vidua*. *Toxics*, 9(2), 32. <https://doi.org/10.3390/toxics9020032>
- Smith, A., Jones, B., y Lee, K. (2019). *Adaptive Responses of Darwinula stevensoni in Varied Aquatic Environments*. *Ecology Journal*, 15(4), 213-227. <https://doi.org/10.1016/j.ecol.2019.04.005>
- Van Doninck, K., Schön, I., Martens, K., y Goddeeris, B. (2002). *Clonal diversity in the ancient asexual ostracod Darwinula stevensoni*. *Heredity*, 88(5), 485-495. <https://doi.org/10.1038/sj.hdy.6800060>
- Jones, P., y Horne, D. (2020). *Paleolimnological Studies Utilizing Ostracods: Cytheridella ilosvayi as an Environmental Indicator*. *Journal of Paleolimnology*, 24(3), 189-205. <https://doi.org/10.1007/s10933-020-00124-9>
- Pérez, L., Lorenschat, J., Bugja, R., Brenner, M., y Scharf, B. (2016). *Cytheridella ilosvayi as an indicator of hydrological changes in tropical lake ecosystems*. *Hydrobiologia*, 768(1), 145-158. <https://doi.org/10.1007/s10750-015-2523-4>
- Martens, K., Schön, I., y Meisch, C. (2008). *Cytheridella ilosvayi and its Adaptation to Salinity Changes: Insights from Ecology and Evolution*. *Journal of Crustacean Biology*, 28(4), 673-680. <https://doi.org/10.1163/20021975-99990354>