



30.

**MODELADO DIGITAL GIS PARA
LA INVESTIGACIÓN ETNOARQUEOLÓGICA
DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL
DE LOS RECURSOS FORESTALES
EN LAS CIUDADES MAYAS PRECOLOMBINAS
DEL CENTRO-ESTE DE PETÉN**

Paul Graf

XXXIII SIMPOSIO DE INVESTIGACIONES
ARQUEOLÓGICAS EN GUATEMALA

MUSEO NACIONAL DE ARQUEOLOGÍA Y ETNOLOGÍA
15 AL 19 DE JULIO DE 2019

EDITORES
BÁRBARA ARROYO
LUIS MÉNDEZ SALINAS
GLORIA AJÚ ÁLVAREZ

REFERENCIA:

Graf, Paul

2020 Modelado digital GIS para la investigación etnoarqueológica de la distribución espacial de los recursos forestales en las ciudades Mayas precolombinas del centro-este de Petén. En *XXXIII Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala, 2019* (editado por B. Arroyo, L. Méndez Salinas y G. Ajú Álvarez), pp. 379-391. Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Guatemala.

MODELADO DIGITAL GIS PARA LA INVESTIGACIÓN ETNOARQUEOLÓGICA DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS RECURSOS FORESTALES EN LAS CIUDADES MAYAS PRECOLOMBINAS DEL CENTRO-ESTE DE PETÉN

Paul Graf

PALABRAS CLAVE

Tierras Bajas centrales, Yaxhá, Clásico Tardío, metodología multidisciplinaria, sistemas de información geográfica digital, casa vernácula.

ABSTRACT

The study of human interaction with the environment has led to the emergence of various academic disciplines. However, the temporal-comparative aspect of access to forest resources in difficult climatic conditions remains a critical topic and requires new research perspectives. This paper proposes a transdisciplinary approach that combines various methods of environmental archaeology, ethnobotany and geoinformatics to discuss the issue of accessibility of perishable resources used in the construction of Maya houses in the pre-Columbian past and today. Based on new ethnobotanical data collected in the framework of the Yaxha Geobotanical Project (ProGY) between february and march 2018 around the archaeological site Yaxha, as well as in various rural communities of the Petén, and incorporating data from other research projects, a GIS model was designed about access to forest resources from urban spaces in the central-eastern Petén during the Late Classic period. The results of this study on the example of Tikal and its surroundings will be presented, examining some concepts of urbanism and economics.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo trata sobre un nuevo enfoque de la arqueología ambiental para investigar el acceso a los recursos forestales en los espacios urbanos de Petén centro-oriental durante el periodo Maya Clásico Tardío. Combinando diferentes métodos de la arqueología, antropología, botánica y geografía, el objetivo fue determinar de una manera cualitativa y cuantitativa el material principal para los techos de casas vernáculas (la vivienda de la “gente común”) en el pasado precolumbino. Este aspecto se basa en la hipótesis de que los Mayas de las Tierras Bajas originalmente usaban

una especie del género *Sabal* para tapar los techos de sus casas. Como objeto de estudio se eligió Tikal, ya que se dispone de suficientes datos sobre su estructura de asentamiento y su paleoecología para establecer un modelo con simulaciones sobre la economía de recursos forestales.

Respecto al término “ciudad”, hay que destacar que todavía no está claro cómo se aplica este concepto eurocéntrico a las sociedades Mayas Clásicas de la península de Yucatán. Hay varias sugerencias acerca de un urbanismo en el área Maya que combina asentamientos y tierras de uso, especialmente el urbanismo de baja densidad (Chase y Chase 2017; Fletcher 2009),

ciudades verdes (Graham 1999), ciudades jardín (Chase y Chase 1998; Dunning y Beach 2010; Ford y Nigh 2009; Stierlin 1964) o paisajes agro-urbanos (Isendahl 2012; Isendahl y Smith 2012). Aquí el autor está de acuerdo con la idea de que había un tipo de espacios de asentamiento centralizados que constituían un mosaico de zonas pobladas, así como áreas de uso agrario y agroforestal.

Primero en esta ponencia se contextualiza el estudio de la casa Maya vernácula en el pasado. Asimismo, se explican las líneas de la investigación transdisciplinaria y su metodología. Luego se profundiza la parte geoespacial y se presentan brevemente los resultados. Se concluye con algunas implicaciones de la metodología transdisciplinaria y el estudio de *Sabal*, que es conocido bajo el nombre palma de guano en castellano y xa'an en las lenguas Mayas de las Tierras Bajas. A continuación, se utiliza este último nombre para referirse a las palmas de *Sabal*.

ESTUDIO DE LO INVISIBLE

Han surgido varias disciplinas que se ocupan del estudio de la interacción del ser humano y el medio ambiente. Pese a esto, el tema de recursos perecederos en condiciones climáticas extremas, con respecto a la subsistencia del ser humano, sigue siendo difícil de explorar y requiere nuevas perspectivas de investigación.

En las Tierras Bajas normalmente se encuentran solo unas huellas de los componentes de la casa Maya debido a su mal estado de conservación en el contexto arqueológico, así como el hecho de que la mayoría de estas era de materiales perecederos que provenían de los bosques tropicales (Wauchope 1938). Sin embargo, se puede asumir que esta forma de casa fue generalmente la misma construcción que se encuentra en las comunidades Mayas contemporáneas (Figura 1). En otras palabras, la actual casa tradicional, o mejor dicho la casa vernácula, tiene una larga tradición que se remonta al periodo Maya Clásico o con anterioridad. Hay evidencias de esto por lo menos en el contexto arqueológico (Haviland *et al.* 1985; Valdés Gómez *et al.* 2015), la escritura jeroglífica (Stuart 1998; Krempel 2019) y la iconografía (Stone y Zender 2011:36). Otro aspecto a destacar es el hecho de que la construcción compleja y ligera de la casa Maya de hoy es perfectamente adaptada al clima tropical de la península (Davidson 2009:137).

INVESTIGACIÓN TRANSDISCIPLINARIA

El enfoque transdisciplinario se define por la combinación de varias disciplinas que son mayormente la Arqueología, la Antropología o Etnología, la Botánica y la Geografía (Figura 2). En general, la metodología de este enfoque consiste de cuatro líneas de investigación: La revisión y evaluación de árboles utilizados en la construcción (especialmente de los techos) en el presente y el pasado, el estudio geoespacial de la distribución de estos árboles en forma de un recorrido geo-etnobotánico en el entorno de Yaxha en el centro-este de Petén, el estudio etnográfico de la casa vernácula en unas comunidades contemporáneas en Petén y la simulación de la zona de extracción de hojas de palma en Tikal por medio de un modelo GIS.

En cuanto a la Geografía, la investigación se relaciona principalmente al centro-este de Petén, es decir, la Cuenca de Los Lagos, la Cuenca Río Holmul y el Área Tikal, aunque entre las comunidades tradicionales visitadas para la investigación etnoarqueológica también es San Luis, que está ubicado al sur del departamento de Petén (Figura 3).

En primer lugar, se revisaron las especies de árboles utilizados en la construcción de casas (etnobotánica, etnoarqueológica, etnoarquitectónica), y se estudiaron sus características y su procedencia (arqueobotánica, paleobotánica, paleoetnobotánica), así como su distribución ecológica (geoetnobotánica). Por lo tanto, para determinar las especies y la cantidad de los materiales de construcción, fue necesario recurrir a ciertas analogías.

En particular, el techo de la casa vernácula Maya ha sido escasamente investigado, a pesar de que se conoce menos materiales potenciales para su construcción que en el caso de las varas, varillas y paredes. Con el fin de realizar una evaluación desde múltiples perspectivas, se recogieron varios tipos de datos acerca de los árboles utilizados para tapar los techos perecederos en las Tierras Bajas Mayas: la morfología, las condiciones de crecimiento y de conservación, la procedencia, la cantidad necesaria del material, etc. Especialmente, se investigaron las palmas del género *Sabal*, examinando los contextos ecológicos, paleoecológicos, arqueológicos, etnohistóricos, etnobotánicos y etnolingüísticos. Las fuentes principales para la revisión (etno-)botánica y etnolingüística de estos aspectos fueron los trabajos de Scott Atran (2004), Scott Zona (1990), Javier Caballero (1994) y Andrea Martínez-Ballesté (*et al.* 2002, 2015, 2016), entre otros. Para determinar la procedencia de

las palmas *Sabal* se revisó sobre todo la base de datos paleoecológica Neotoma (Neotoma s/d), así como las pruebas arqueológicas de Maynard Cliff y Cathy Crane (1989) y Miksicek (1983). Con respecto a las fuentes etnohistóricas existe, por un lado, la literatura epigráfica (Krempel 2019; Prager y Wagner 2016; Stuart 1998) y, por otro lado, los documentos coloniales (Garza *et al.* 1983; Landa 1959; López de Cogolludo 1867).

Desde esta evaluación se concluyó que el material preferido para construir los techos era, como hoy en día, una especie mesomorfa del género *Sabal*, que quiere decir que es una palma con condiciones medias y una demanda de agua relativamente alta. La palma antiguamente preferida fue probablemente similar a las actuales *Sabal mauritiiformis* o *Sabal guatemalensis*, que crecen simpátricas en el centro-este de Petén (Figura 4), y contrastaba con las palmas xeromorfas como *Sabal yapa*, así como con las especies exóticas como *Sabal mexicana* y *S. gretheriae*.

Segundo, se llevó a cabo un recorrido geoetnobotánico alrededor del sitio arqueológico Yaxha entre 28 de febrero y el 9 de marzo de 2018. El objetivo de ello fue ampliar la base de datos sobre los materiales de construcción, así como determinar su distribución, proporción y la diversidad o composición de los bosques donde se ubican. Con el fin de facilitar la identificación de los árboles, el autor colaboró con dos asistentes locales como parte del proyecto que tenían un conocimiento amplio de la flora y su valor. Aunque el análisis arqueoinformático de la cantidad de x'a'an se refiere al territorio de Tikal, se hizo el recorrido en Yaxha, ya que este sitio tiene más diversidad de zonas geográficas en un espacio relativamente pequeño, de tal modo que todo era más accesible y efectivo en vista del poco tiempo disponible para realizar trabajo de campo.

La tercera parte de la investigación consistió en visitas de diversas comunidades a lo largo de Petén para documentar las casas tradicionales desde una perspectiva etnoarqueológica. Esto significa que se examinaron solo los materiales que existieran en la época Maya Clásica y, asimismo, que se consideraron aspectos diacrónicos, por ejemplo, la forma de la planta. En este sentido, se documentaron las casas tradicionales en las comunidades La Máquina, San Luis, San José y San Miguel (Figura 3) y se habló con sus habitantes para determinar el tipo y la cantidad de los materiales empleados en su construcción. Como resultado, los tipos de casas fueron bastante diversos, también porque corresponden a diferentes grupos lingüísticos, especialmente Itza', Mopan y Q'eq'chi', que tienen características específicas.

La cuarta y última línea de investigación fue la parte geodigital y estadística, que se presenta de forma detallada en el siguiente capítulo.

DATOS Y MÉTODOS DEL ESTUDIO ARQUEOAMBIENTAL Y GEOESTADÍSTICO

Recorrido geoetnobotánico en Yaxha

En el recorrido se documentaron todos los árboles utilizados en la construcción de casas con sus coordenadas en un sistema de información geográfica móvil. Para sistematizar esto, se estableció una cuadrícula con un muestreo aleatorio de 30 cuadrantes, cada uno con 1 hectárea. Para registrar y almacenar los datos se utilizó una Tablet Huawei M3 con la aplicación mapitGIS (Figura 5). Originalmente programada para la silvicultura, esta aplicación proporciona varias funciones útiles para cualquier tipo de sondeo, incluyendo la prospección arqueológica y botánica. Entre las principales ventajas se encuentra la posibilidad de importar mapas de fondo, el posicionamiento GPS visual en vivo, el registro de waypoints, líneas y polígonos con plantillas de datos modificables individualmente, así como la posibilidad de generar los datos recopilados en forma de tabla. Las plantillas de datos pueden constituirse de cuadros de texto, menús desplegables, colores y fotos. Se utilizó esta tecnología no solo para el recorrido geoetnobotánico, sino también para georeferenciar el mapa de Yaxha elaborado por Óscar Quintana Samayoa (*et al.* 2000).

El uso de la Tablet para sondeos geoestadísticos parece una herramienta poderosa, debido a los menores costos, la multifuncionalidad y la habilidad de adquirir datos adaptables en sistemas de información geográfica estáticos. Especialmente en comparación con las listas de recuento que se utilizaron simultáneamente y que causaron más problemas logísticos, la documentación digital con la Tablet salió mucho mejor. Pese a ello, la densidad de la corona del bosque, especialmente en los matorrales, a veces causaron afectaciones en la señal GPS, lo cual provocó que saliera menos preciso.

Clasificación de los datos geoetnobotánicos

En la base de los datos del recorrido se realizaron diferentes análisis espaciales con los programas QuantumGIS y R statistics. Gracias a la función Hierarchical Cluster sobre la distribución de las especies forestales y en comparación con los datos de investigaciones anteriores (Schulze y Whitacre 1999; Thompson 2013;

Thompson *et al.* 2015), se pudieron determinar once diferentes zonas de vegetación en el área de Yaxha (Figura 6). Además, se estimó el rendimiento medio de hojas de xa'an por cada zona, con ayuda de los valores elaborados durante la investigación etnoarqueológica.

Digitalización y vectorización de mapas geológicos y arqueológicos

Para aplicar los valores de rendimiento a Tikal se analizaron las zonas de vegetación respecto a sus características geográficas. En este contexto, se generó un modelo digital de elevación (DEM) con los datos del proyecto Shuttle Radar Topography Mission (USGS *et al.* s/d) con una resolución de 30x30 m (SRTM30). Las especies varían en las diversas condiciones de terreno, entre ellas también el drenaje, así que el DEM incluye no solo el mapa de elevación sino también una de inclinación. Asimismo, se digitalizó el mapa de suelos de Charles Simmons, José Manuel Tarano y José Humberto Pinto que fue publicado en 1959 (Sanders 1977:288), y se agregó información adicional más reciente (MAGA 2000; Rice 1976; Sifuentes 2005).

Además de los mapas geográficos, se vectorizó el plano de Tikal, creado por Robert Carr y James Hazard (1961), es decir, se produjeron varios estratos de polígonos con respecto a la función de los edificios, plazas, calzadas y obras hidráulicas, así como los contornos de las estructuras.

Análisis espacial de techos con xa'an en los contextos arqueológicos de Tikal

Con el fin de examinar cuáles estructuras del Clásico Tardío en los 9 km² del centro de Tikal tuvieron un techo de materiales perecederos, supuestamente Xa'an, se revisaron los Tikal Reports del proyecto de Pennsylvania de los años 1950 y 60. Para facilitar la búsqueda, se digitalizaron los reportes que tratan sobre estructuras residenciales y se aprovechó de la función de reconocimiento automático de texto en Adobe Acrobat. Luego se agregó la información a los polígonos diseñados. Aún hay una carencia de datos del subsuelo, especialmente en la periferia, por lo tanto, se utilizó el estudio de la literatura como muestreo y se identificaron todos los edificios potenciales con techos de palma.

La demanda total de Xa'an para sustentar a la población del centro de Tikal depende de varios factores así que se tomaron en cuenta cuatro valores límites. Estos se definen por los valores mínimos y máximos de,

por un lado, la demanda anual que constituye un índice del material necesario para reparaciones en cada año y la menos frecuente renovación del techo, y, por otro lado, la demanda que se daría si todos edificios tuvieran que ser cubiertos a la vez.

Para considerar todos los posibles escenarios acerca del acceso a Xa'an en Tikal durante el Clásico Tardío, se realizaron tres diferentes simulaciones, cada una para otra forma de extracción de las hojas de palma: dos de estas simulaciones se modelaron con métodos GIS, mientras que la tercera, el contexto de los huertos familiares, se estimó con ayuda de funciones estadísticas. La primera simulación geoespacial se refiere a la extracción de solo bosque, mientras que la otra presenta una extracción parcial de bosques y milpas. La segunda simulación considera las áreas de cultivo que acumula un menor rendimiento de hojas de Xa'an con calidad inferior (Pulido y Caballero 2006:405). A pesar de esto, la milpa parece adecuada para la extracción de Xa'an, que es resistente al fuego y muy adaptable. La tercera simulación de los jardines se integraría en los otros escenarios, ya que se ubican cerca de la casa. Hoy en día se cultivan Xa'an tanto en milpas como en jardines, utilizando ciertas estrategias para proteger las palmas contra fuego, herbívoros y sequías (Caballero 1994:135; Lundell 1938:50; Martínez-Ballesté y Martorell 2015:15).

Resultados y modelización de una zona de extracción de xa'an en GIS

Al principio, la investigación reveló que, en la mayoría de los casos en las Tierras Bajas Mayas, las palmas de *Sabal* proporcionan el material preferido para los techos de las casas vernáculas. El recorrido geoetnobotánico en Yaxha ha demostrado que la palma mesomorfa *Sabal mauritiiiformis* se puede encontrar en casi todos tipos de bosque y que prospera particularmente bien en las zonas entre los pies de monte y los márgenes coluviales de los bajos. Entre los otros candidatos de materiales para tapar techos solo Corozo (*Orbignya cohune*) parece una alternativa como especie preferida. Esta palma tiene varias estrategias defensivas en común con las especies de *Sabal* y, además, tiene la característica poderosa que acumula su propio suelo fértil (Schlesinger 2004:118). Aunque en los datos accesibles no hay indicaciones para grandes poblaciones de Corozo en Tikal (Schulze y Whitacre 1999; Thompson *et al.* 2015), algunos investigadores prometen lo contrario (Comunicación personal con Nicholas Dunning, 14-06-19; Com. pers. con Anabel Ford, 24-06-19). Finalmente,

plantas como pasto (paja) y palmas que hoy en día se usan con menor frecuencia son poco probables, debido a varios factores como procedencia, ecología, calidad y durabilidad.

En Tikal se detectaron un mínimo de 145 edificios del Clásico Tardío probablemente cubiertos de techos de palma. El máximo, que se define por edificios potenciales con techos de palma, fue de 1394 estructuras (Figura 7). El valor medio acerca de la cantidad de hojas de palma se lo estimó en 100 hojas por cada metro cuadrado, considerando la medida horizontal sobre un techo con una inclinación de unos 50 grados.

Con respecto a las simulaciones, la zona de extracción de xa'an en la simulación para bosques y milpas resulta apenas mayor que en la simulación en donde solo se extrae del bosque (Figura 8); puesto que, en las zonas de bajo, donde se encuentra el mayor rendimiento, se extienden exponencialmente. De hecho, los círculos que representan la zona de extracción son muy idealizados. No obstante, se puede suponer que la zona de extracción tendería más al Bajo de Santa Fe en el este de Tikal (y posiblemente también al bajo en el oeste), lo que sería más eficiente.

De los tres contextos de extracción de xa'an, el forestal demostró ser el más importante, ya sea bosque natural o parcelas de manejo sistemático. Aunado al hecho de que hay indicios de esto en las fuentes históricas (Garza *et al.* 1983), es de allí que provienen las hojas de mayor calidad, es decir, son más durables y más fáciles de manejar. Además, la baja intensidad de luz asegura que las palmas sean menos altas y por lo tanto más fáciles de cosechar.

El modelo presentado encaja bien con un escenario sugerido por María Pulido y Javier Caballero (2006:405 y siguientes). Ellos observaron en sus investigaciones etnográficas en Yucatán y Quintana Roo que se tomaban las hojas del bosque cuando había una mayor demanda, mientras que se cosecharon cantidades más pequeñas en el jardín o en la milpa.

CONCLUSIONES E IMPLICACIONES DEL ESTUDIO DE XA'AN

Con la ayuda de diversas perspectivas y la combinación de varias disciplinas se pudo iluminar un tema que es casi invisible en el contexto arqueológico.

Primero, la evaluación de los árboles útiles a nivel de especie y su interacción ecológica desde varias perspectivas parece ser un paso necesario para entender las antiguas estrategias forestales y el uso de los bosques por

el ser humano. En otras palabras, resultó que el xa'an, guano o *Sabal* no es un género homogéneo sino incluye una serie de especies con diferentes características destacadas, por poner un ejemplo, *Sabal mexicana* tiene otras condiciones que *Sabal mauritiiformis*. Además, el término émico xa'an es más rico en especies que el género en latín.

Segundo, el método del recorrido focalizado que solo considera los árboles con un beneficio en la construcción de casas tiene una gran ventaja. Comparado con proyectos anteriores que tomaron cada planta en cuenta, el recorrido focalizado ha mostrado que se puede documentar un área bastante grande en relativamente poco tiempo. El aspecto ecológico del método presentado también se distingue de otros proyectos en cuanto al hecho de que se llevó a cabo el recorrido en otro sitio distinto al objeto de la investigación. Como se ha indicado antes, las zonas geográficas de Yaxha están más cerca unas de otras y por ello más accesibles. Aunque los datos utilizados para la clasificación de la vegetación derivan de Yaxha, la proyección en Tikal encaja perfectamente con las asignaciones del recorrido de Kim Thompson al margen del proyecto paleoecológico de la Universidad de Cincinnati (UCAPT) en 2009 y 2010 (Figura 9).

Tercero, la revisión de los reportes arqueológicos ha revelado que todavía hay una carencia de información sobre la mayoría de los contextos de viviendas en el subsuelo. Por lo tanto, debe de haber un número de asentamientos desconocidos dentro de la zona de extracción de xa'an. En consecuencia, se puede suponer que esta última es aún mayor, lo que podría haber conducido a una escasez de recursos en una población expuesta, así como a tensiones con los asentamientos vecinos.

En cualquier caso, el modelo digital GIS da una idea preliminar sobre un tema inexplorado, además de que proporciona un escenario plausible. Esto lo indica también la comparación del modelo presentado con el polígono de extracción elaborado por UCAPT. David Lentz y sus colegas argumentaron que por lo menos la mitad del territorio representado por el polígono debía estar cubierto de bosque para garantizar la cantidad necesaria de recursos forestales (Lentz *et al.* 2015). El modelo de extracción de xa'an encaja perfectamente en esta zona – incluso si se consideran las zonas de milpa (Figura 10). Encima de esto, las tres simulaciones interiores no cortan los sitios satélites y todavía están dentro de los terraplenes que rodean el centro de Tikal.

Según los nuevos datos, una economía de xa'an basada en el bosque, la milpa y el jardín forestal es un

escenario muy probable para Tikal. Sin embargo, hace falta amplificar más el estudio del subsuelo, las zonas de bajos, así como el comportamiento de las palmas ante cambios ambientales y la influencia del ser humano.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo de los colegas y nuevos amigos en la Ciudad de Guatemala y en Petén, sobre todo Alejandro Garay, los asistentes de investigación Carlitos Salazar y Moisés Pérez Días, los sabios Joel Martínez, Welman Suchite, Luis Bol Acalja, Otoniel Caal, Kensi Tesucun Chayax, Reginaldo Chayax, Aurea y Julio Romero, el Consejo Nacional de Áreas Protegidas (CONAP) y los investigadores y vigilantes del Parque Nacional de Yaxha, Nakum y Naranjo (PNYNN), especialmente Lorena Lobos quien me ayudó a conseguir un mejor alojamiento en el parque. Al final, me gustaría agradecer también a los colegas y docentes en Bonn, Alemania, sobre todo a mis tutores Nikolai Grube y Ulrich Wölfel, así como al Deutschen Akademischen Ausendienst (DAAD) por su apoyo financiero.

REFERENCIAS

- ATRAN, Scott; Lois Ximena y Edilberto Ucan Ek'
2004 *Plants of the Petén Itza' Maya*. Memoirs of the Museum of Anthropology, University of Michigan, No. 38. University of Michigan, Ann Arbor.
- CABALLERO, Javier
1994 *Use and Management of Sabal palms among the Maya of Yucatan*. Tesis de doctorado, Biología, University of California, Berkeley.
- CARR, Robert F. y James E. Hazard
1961 *Map of the Ruins of Tikal, el Petén, Guatemala*. Tikal Reports, No. 11. The University Museum, University of Pennsylvania, Philadelphia.
- CLIFF, Maynard B. y Cathy J. Crane
1989 Changing Subsistence Economy at a Late Preclassic Maya Community. En *Prehistoric Maya Economies of Belize, Research in Economic Anthropology Supplement 4* (editado por P. A. McAnany y B. L. Isaac), pp.295-324. JAI Press INC, Greenwich.
- DAVIDSON, James S.
2009 *Casas de Paja: Maya House Architectures*. Tesis de doctorado, School of Architecture, University of Queensland, Brisbane.
- DUNNING, Nicholas P. y Timothy Beach
2010 Farms and Forests: Spatial and Temporal Perspectives on Ancient Maya Landscapes. En *Landscapes and Societies* (editado por I. P. Martini y W. Chesworth), pp.369-389. Springer, New York.
- FLETCHER, Roland
2009 Low-Density, Agrarian-Based Urbanism: A Comparative View. *Insights* 2(4):1-19. Durham.
- FORD, Anabel y Ronald Nigh
2009 Origins of the Maya Forest Garden: Maya Resource Management. *Journal of Ethnobiology* 29 (2):213-236, Tacoma.
- GARZA, Mercedes de la; Ana L. Izquierdo, Ma. del Carmen León y Tolita Figueroa
1983 *Relaciones Histórico-geográficas de la Gobernación de Yucatán*. UNAM, C. d. México.
- GRAHAM, Elizabeth A.
1999 Stone Cities, Green Cities. *Archaeological Papers of the American Anthropological Association* 9(1):185-194. Washington, D. C.
- HAVILAND, William A.; Marshall J. Becker, Ann Chowning, Keith A. Dixon y Karl Heider
1985 *Excavations in Small Residential Groups of Tikal: Groups 4F-1 and 4F-2* (Tikal Report No. 19, University Museum Monograph 58). University of Pennsylvania, Philadelphia.
- ISENDAHL, Christian
2012 Agro-Urban Landscapes: The Example of Maya Lowland Cities. *Antiquity* 86:1112-1125. Cambridge.
- ISENDAHL, Christian y Michael E. Smith
2012 Sustainable Agrarian Urbanism: The Low-Density Cities of the Mayas and Aztecs. *Cities* 31:132-143. Beijing.
- KREMPEL, Guido
2019 *Scattered Remnants of a Short-lived Glory: A Re-evaluation of Machaquila Structure 4, the 'Huunal-*

- House' of Ix Mahk Ajaw and 'Scorpion' Ti' Chaahk [en prensa].
- LANDA, Fray Diego de
1959 *Relación de las Cosas de Yucatán*. Editorial Porrúa, México.
- LENTZ, David L.; Kevin Magee, Eric Weaver, John G. Jones, Kenneth B. Tankersley, Angela Hood, Gerald Islebe, Carmen E. Ramos Hernandez y Nicholas P. Dunning
2015 Agroforestry and Agricultural Practices of the Ancient Maya at Tikal. En *Tikal: Paleoecology of an Ancient Maya City* (editado por D. L. Lentz, N. P. Dunning y V. L. Scarborough), pp.152-185. Cambridge University Press, New York.
- LÓPEZ DE COGOLLUDO, Fray Diego
1867 *Historia de Yucatán: Escrita en el Siglo XVII por el R. P. Fr. Diego López Cogolludo, Provincial que fue de la Orden Franciscano (Tomo I)*. 3ª edición. Imprenta de Manuel Aldana Rivas, Mérida.
- LUNDELL, Cyrus L.
1938 Plants probably utilized by the Old Empire Maya of Peten and Adjacent Lowlands. En *Papers of the Michigan Academy of Sciences, Arts, and Letters*, Vol. 24 (editado por Council of the Academy, Executive Board of the Graduate School of the University of Michigan), pp.37-56. University of Michigan, Ann Arbor.
- MAGA (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación de la República de Guatemala)
2000 *Primera Aproximación al Mapa de Clasificación Taxonómica de los Suelos de la República de Guatemala, a escala 1:250,000: Memoria Técnica*. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, Guatemala.
- MARTÍNEZ-BALLESTÉ, Andrea y Javier Caballero
2016 Management Compromises and the Sustainability of Palm Populations in Mayan Homegardens. *Botanical Sciences* 94 (2):1-10. México.
- MARTÍNEZ-BALLESTÉ, Andrea; Javier Caballero, V. Gama, S. Flores y Carlos Martorell
2002 Sustainability of the Traditional Management of Xa'an Palms by the Lowland Maya of Yucatan, México. En *Ethnobiology and Biocultural Diversity: Proceedings of the Seventh International Congress of Ethnobiology* (editado por J. R. Stepp, F. S. Wyndham y R. K. Zarger), pp.381-388. International Society of Ethnobiology, Athens.
- MARTÍNEZ-BALLESTÉ, Andrea y Carlos Martorell
2015 Effects of Harvest on the Sustainability and Leaf Productivity of Populations of Two Palm Species in Maya Homegardens. *PLoS ONE* 10 (3):1-17. San Francisco.
- MIKSICEK, Charles H.
1983 Macrofloral Remains of the Pulltrouser Area: Settlements and Fields. En *Pulltrouser Swamp: Ancient Maya Habitat, Agriculture, and Settlement in Northern Belize* (editado por B. L. Turner II y P. Harrison), pp. 94-104. University of Texas, Austin.
- NEOTOMA
s.f. *Neotoma Paleoecology Database*. URL: <https://www.neotomadb.org/> (acceso: 04-11-2018).
- PRAGER, Christian y Elisabeth Wagner
2016 A Possible Logograph XAN 'Palm' in Maya Writing (Textdatenbank und Wörterbuch des Klassischen Maya, Research Note 5). URL: <http://hdl.handle.net/20.500.11811/1089> (acceso: 16-02-19).
- QUINTANA SAMAYOA, Óscar A.; Wolfgang W. Wurster y Bernard Hermes
2000 El plano del sitio Maya de Yaxhá, Petén, Guatemala. *Beiträge zur Allgemeinen und Vergleichenden Archäologie* 20:261-286. Bonn.
- RICE, Don S.
1976 *The Historical Ecology of Lakes Yaxhá and Sacnab, El Petén, Guatemala*. Tesis de doctorado, Antropología, Pennsylvania State University, Pennsylvania.
- SANDERS, William T.
1977 Environmental Heterogeneity and the Evolution of Lowland Maya Civilization. En *The Origins of Maya Civilization* (editado por R.E.W. Adams), pp. 287-297. University of New Mexico Press, Albuquerque.
- SCHLESINGER, Victoria
2001 *Animals and Plants of the Ancient Maya: A Guide*. University of Texas Press, Austin.
- SCHULZE, Mark D. y David F. Whitacre
1999 A Classification and Ordination of the Tree Community of Tikal National Park, Petén, Guatemala.

- Bulletin of the Florida Museum of Natural History* 41 (3):169-297. Gainesville.
- SIFUENTES, Jorge M.
2005 *Geographical Information Systems Data Implementation for Analyses of Settlement Patterns of an Early Agricultural Society*. Tesis de doctorado, Geografía, University of California, Santa Barbara.
- STIERLIN, Henri
1964 *Architektur der Welt: Maya*. Benedikt Taschen Verlag, Berlin.
- STONE, Andrea y Marc Zender
2011 *Reading Maya Art: A Hieroglyphic Guide to Ancient Maya Painting and Sculpture*. Thames & Hudson, London.
- STUART, David
1998 'The Fire Enters His House': Architecture and Ritual in Classic Maya Texts. En *Function and Meaning in Classic Maya Architecture* (editado por S. D. Houston), pp.373-425. Dumbarton Oaks Research Library and Collection, Washington, D. C.
- THOMPSON, Kim M.
2013 *Biodiversity in Forests of the Ancient Maya Lowlands and Genetic Variation in a Dominant Tree, Manilkara zapota (Sapotaceae): Ecological and Anthropogenic Implications*. Tesis de doctorado, Department of Biological Sciences, University of Cincinnati, Cincinnati.
- THOMPSON, Kim M.; Angela Hood, Dana Cavallaro y David L. Lentz
2015 Connecting Contemporary Ecology and Ethnobotany to Ancient Plant Use Practices of the Maya at Tikal. En *Tikal: Paleoecology of an Ancient Maya City* (editado por D. L. Lentz, N. P. Dunning y V. L. Scarborough), pp.124-151. Cambridge University Press, New York.
- USGS, U.S. Geological Survey, NGA, National Geospatial-Intelligence Agency, NASA, National Aeronautics and Space Administration
s.f. *Shuttle Radar Topography Mission 1 Arc-Second Global: SRTM1N22W016V3*. URL: https://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SRTM30/ (acceso: 02-11-2018).
- VALDÉS GÓMEZ, Juan Antonio; Marco Antonio Valladares Farn y José Roberto Díaz Calderón
2015 Arquitectura Prehispánica de las Tierras Bajas Mayas de Guatemala: *El Preclásico*. En *Antropología e Historia de Guatemala: Anuario de la Dirección General de Patrimonio Cultural y Natural, III Época No. 14* (editado por P. Flores), pp.9-75. Instituto de Antropología e Historia, Guatemala.
- WAUCHOPE, Robert
1938 *Modern Maya Houses: A Study of their Archaeological Significance*. Carnegie Institution of Washington, Washington, D. C.
- ZONA, Scott
1990 A Monograph of Sabal (Arecaceae: Coryphoideae). *Aliso: A Journal of Systematic and Evolutionary Botany* 12(4):583-666. Claremont.



Figura 1. Perspectiva diacrónica de la casa vernácula maya (Foto: el autor). Casa tradicional en San Miguel, Petén, y dibujo del glifo OTOOT de Machaquila (Krempel 2019).

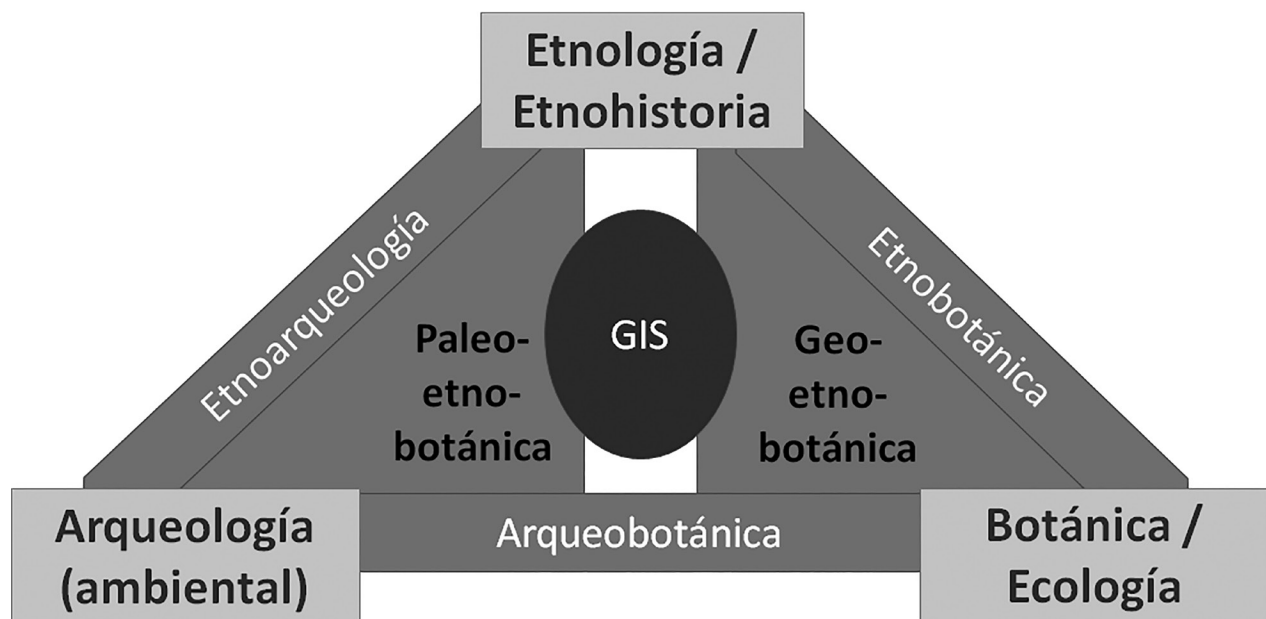


Figura 2. Esquema de la investigación transdisciplinaria.

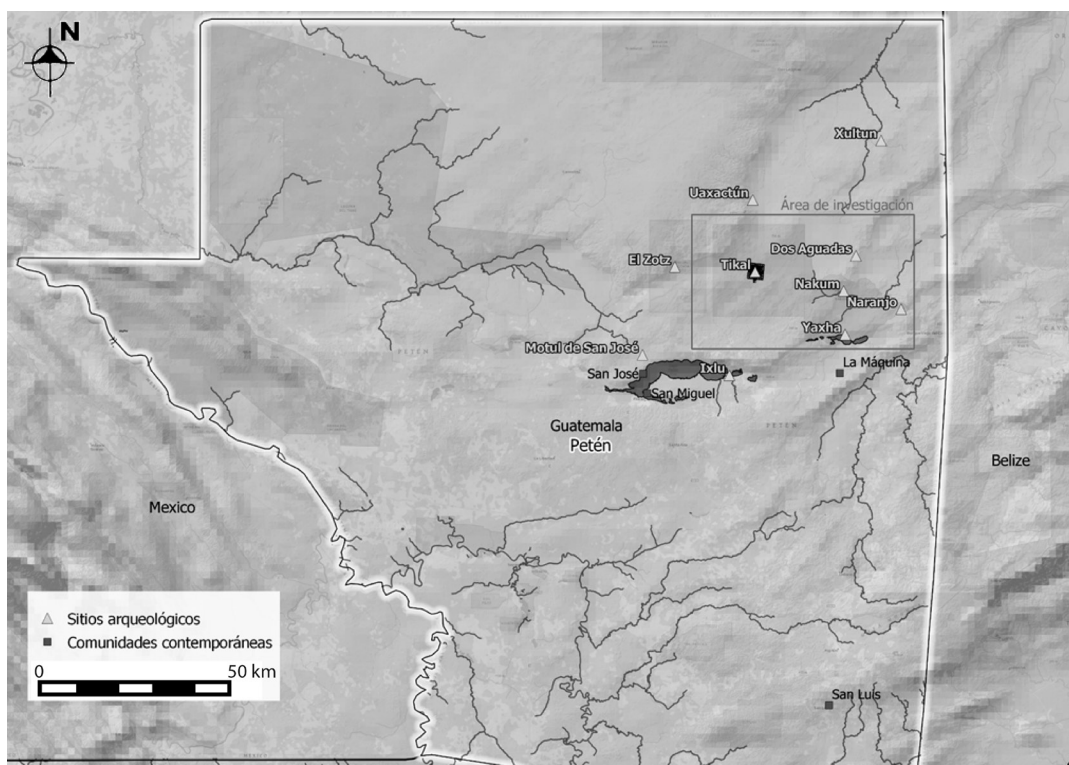


Figura 3. Ubicación de los lugares de estudio en el Petén, Guatemala (Ilustración: el autor).

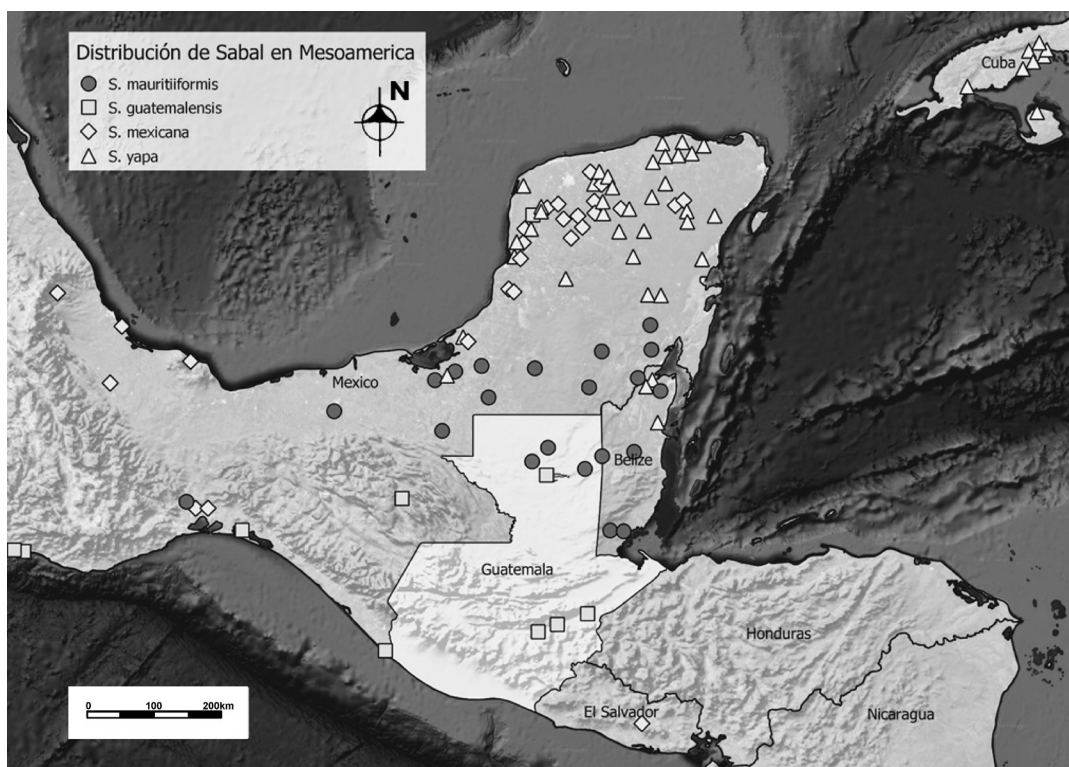


Figura 4. Distribución de las especies de *Sabal* en la Península Yucatán según los datos de Caballero (1994) y Wauchope (1938).



Figura 5. Sistema de información geográfica mapitGIS. Cada punto representa un árbol. Puntos agrupados se convierten en burbujas que llevan el número de árboles.

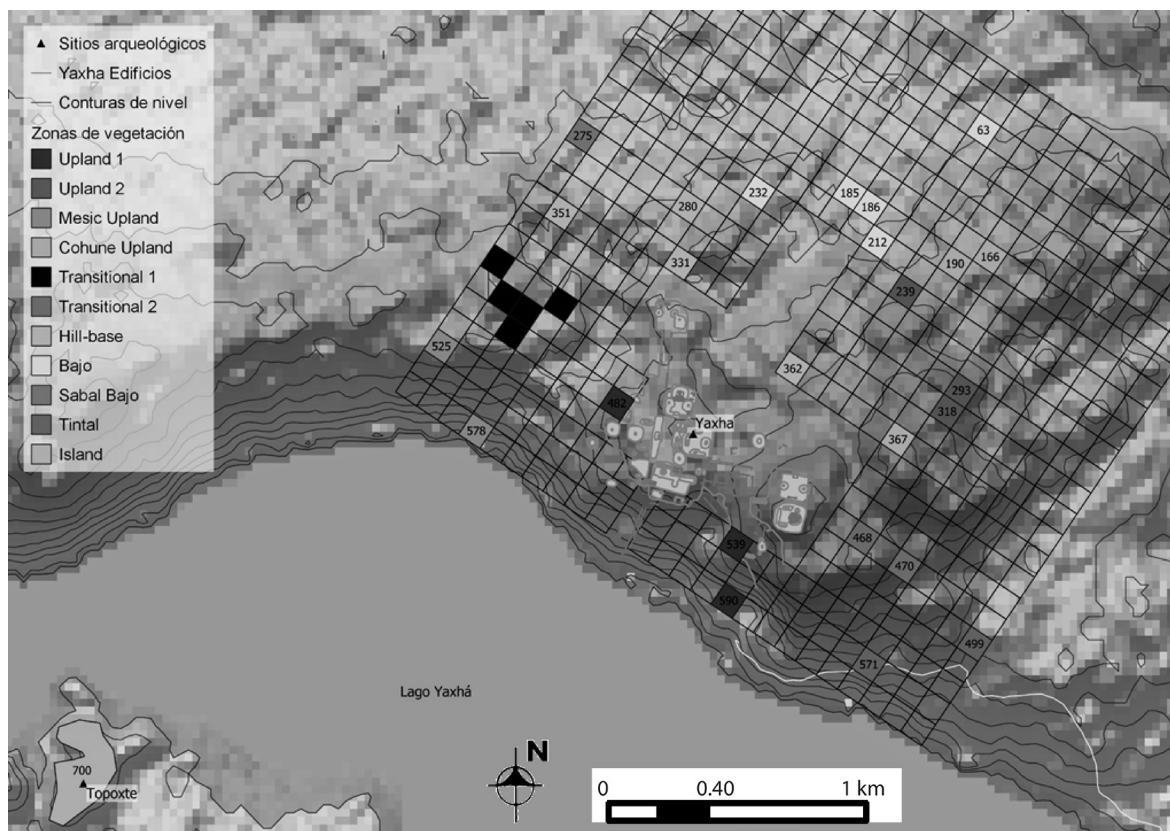


Figura 6. Cuadrícula sobre Yaxha con el muestreo de las zonas de vegetación.

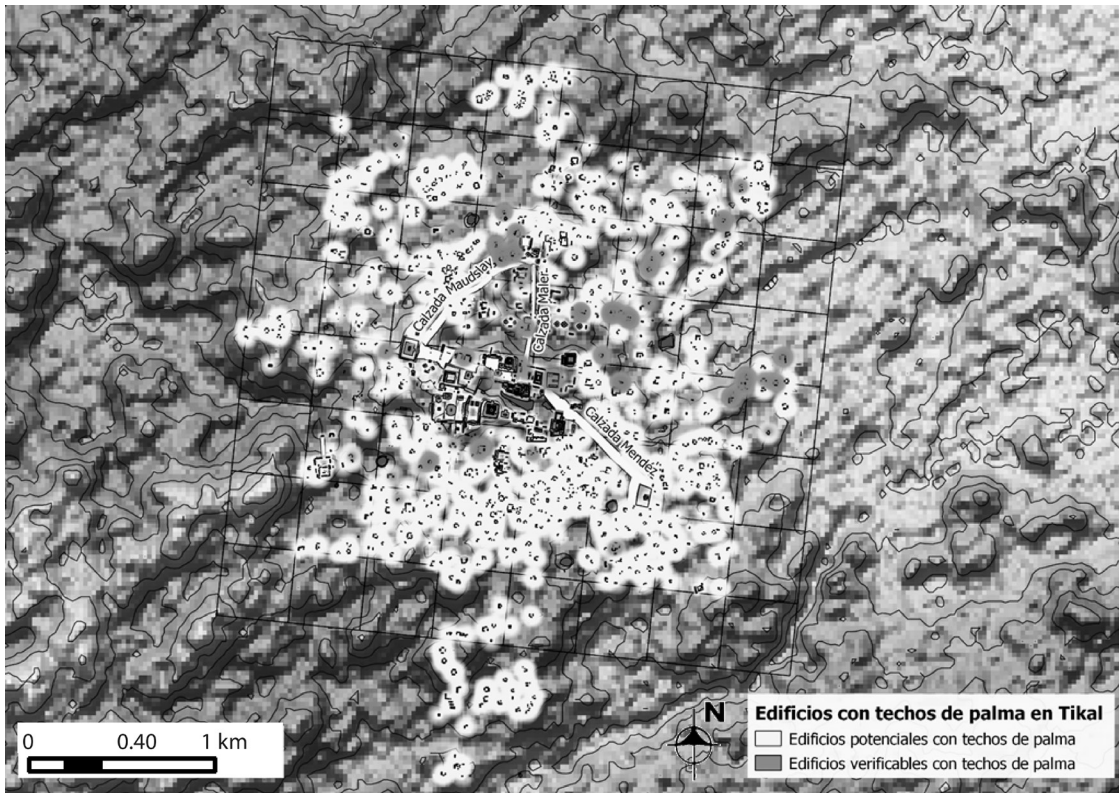


Figura 7. Plan de Tikal en que aquellos edificios están acentuados que deben de haber tenido un techo perecedero.

Contexto de rendimiento	Mínimo anual: 43,300 hojas	Máximo anual: 462,300 hojas	Mínimo absoluto: 1,160,000 hojas	Máximo absoluto: 12,340,000 hojas
Bosque	881 ha	2449 ha	4300 ha	36,000 ha
Bosque y milpa	917 ha	2464 ha	4324 ha	38,000 ha
Diferencia	36 ha	14.5 ha	24 ha	2145 ha

Figura 8. Valores estimados para los escenarios de extracción de xa'an.

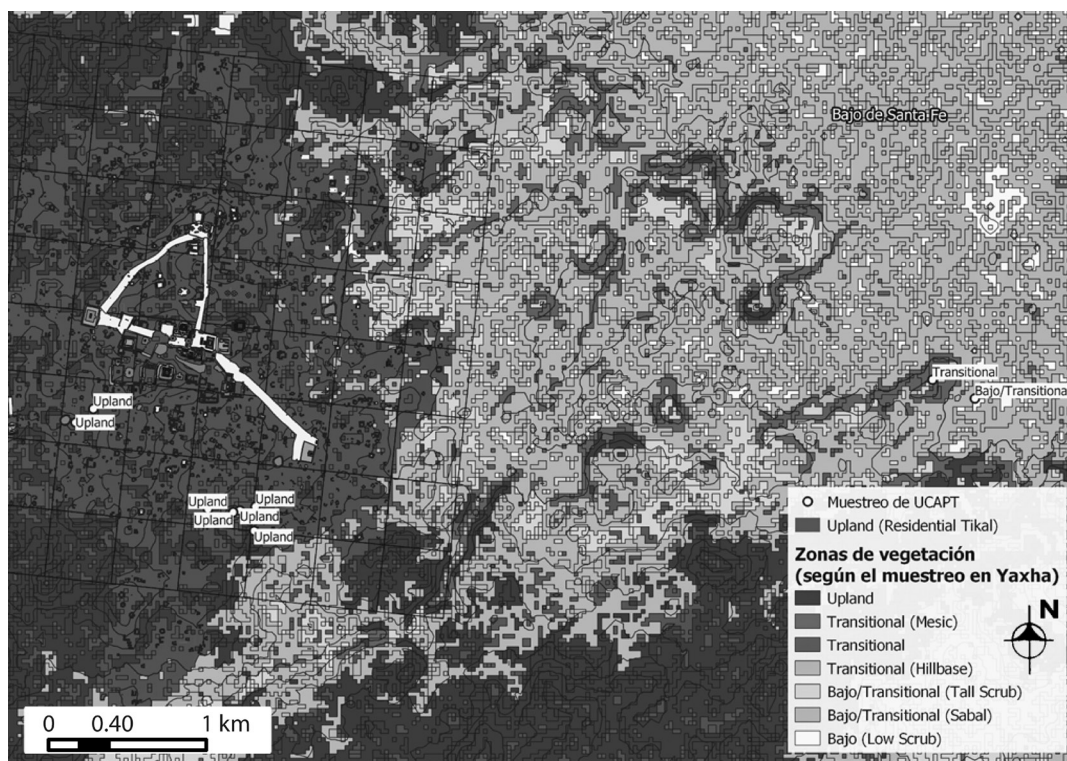


Figura 9. Zonas geográficas con el muestreo de la vegetación en el este de Tikal, combinado con el muestreo del proyecto de la Universidad de Cincinnati (UCAPT). Se ve que las zonas son idénticas.

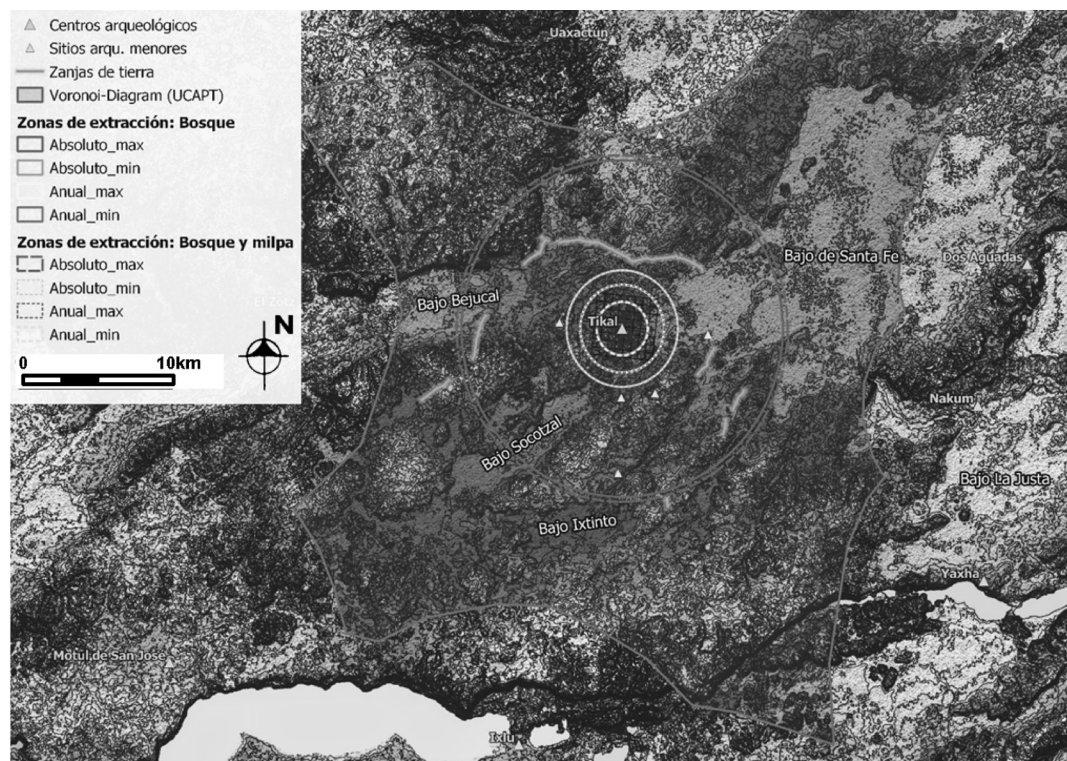


Figura 10. Simulaciones de la zona de extracción de xa'an. La proyección de la zona de extracción general de UCAPT (Lentz et al. 2015) indica que especialmente los escenarios del rendimiento anual corresponden este modelo.