Universidad Autónoma Del Estado De México

Facultad de Geografía

Patrón de asentamiento de los hallazgos arqueológicos en la región de Coatepec Harinas: aplicación geotecnológica en el estudio del paisaje.

Tesis

que para obtener el grado de

Doctor en Geografía y Desarrollo Geotecnológico.

PRESENTA

Raúl Miranda Gómez

Comité Tutorial:

Dr. Héctor Víctor Cabadas Baez

Dra. Xanat Antonio Nemiga

Dra. Marcela Virginia Santana Juárez

Revisor externo:

Dr. Armando Trujillo Herrada

Toluca de Lerdo, Estado de México noviembre, 2025

Índice general.

Índice general.----------1
Índice de cuadros---------- 2
Índice de figuras----------3
Índice de mapas.---------- 3
Resumen---------- 4
Abstract----------6
Prólogo---------- 8
1. Introducción---------- 10
2. Planteamiento del problema----------16
2.1 Justificación----------17
2.2 Pregunta de investigación----------18
2.3 Preguntas auxiliares----------18
2.4 Objetivo general---------- 19
2.5 Objetivos específicos----------19
2.6 Estructura de la tesis---------- 20
2.7 Marco teórico referencial---------- 21
2.7.1. Fundamentación epistemológica y teórica del estudio---------- 21
2.7.2. Geotecnologías y la prospección arqueológica no invasiva---------- 26
3. Ubicación y antecedentes----------31
3.1 Ubicación del área de estudio----------31
3.2 Investigaciones Arqueológicas----------39
3.3 Coatepec Harinas como asentamiento prehispánico en el contexto histórico----------43
4. Metodología de investigación----------46
4.1 Fundamentos metodológicos----------46
4.1.2 Alcances y limitaciones----------49
4.1.3 Diseño metodológico general----------49
4.2 Materiales y métodos----------56
4.2.1 Fase A. Acopio de información y contextualización.----------56
4.2.1.1. Investigación documental y contextualización.---------- 56
4.2.1.2 Descripción del área de estudio---------- 57
4.2.1.2.2. Descripción fisiográfica---------- 57
4.2.1.2.3. Descripción hidrográfica.---------- 58
4.2.1.2.4. Aspectos antrópicos.---------- 58
4.2.2 Fase B. Prospección Arqueológica y Geoespacial.---------- 59
4.2.2.1 Caracterización de coberturas geomorfológicas.----------59
4.2.2.1.1 Caracterización y clasificación de unidades geomorfológicas-------61

4.2.2.2 Análisis con Tecnologías de Información Geográfica (TIG)---------- 64
4.2.3. Fase C. Prospección Satelital, registro arqueológico remoto, y validación de campo.---------- 66
4.2.3.1. Acceso a información satelital (GEE) y SNAP.----------66
4.2.3.1.1 Análisis de teledetección con Sentinel-2 y VANT.---------- 70
4.2.3.1.3. Percepción Remota de GEE en la ADI---------- 74
4.2.3.1.5. Selección de anomalías con potencial de interés arqueológico.--------79
4.2.3.1.6. Análisis comparativo e identificación de rasgos.----------80
4.2.3.2 Registro arqueológico remoto.----------82
4.2.3.2.1. Prospección no invasiva de alta resolución (VANT)----------82
4.2.3.2.2 Sensor multiespectral VANT en prueba piloto (registro IR) para generar análisis de Morfometría e interpretación NDVI de geoformas antropogénicas.-- 84
4.2.3.2.2 Planeación de registro de datos de campo.----------85
4.3.4.2 Prospección Arqueológica en Campo.----------86
4.2.3.3 Validación de datos en campo.---------- 88
4.2.3.1 Reconocimiento y recorrido de superficie----------90
4.2.3.2 Registro arqueológico de superficie.---------- 91
4.2.3.3 Mapa binario de potencial de prospección arqueológica.----------92
5. Resultados---------- 93
5.1 Percepción Remota Satelital.---------- 93
5.2 Geotecnología VANT en Cerro La Catarina.---------- 93
5.2.1 La cima---------- 93
5.2.1 Ladera este.----------97
5.3 Mapa binario de potencial de prospección arqueológica (Estrategia Piloto de la Ladera Este)----------98
6. Discusión de resultados---------- 107
6.1 Percepción remota en regiones montañosas: algunos desafíos técnicos.----------108
6.2 Mapa binario para la prospección e identificación de sitios.----------109
6.3 El asentamiento prehispánico de jerarquía mayor, Cerro La Catarina en el contexto de la provincia de Matlatzinco.---------- 114
6.4 Contribución de los índices de vegetación y su desempeño en el Paisaje.----------116
6.5 Certeza e Incertidumbre en los resultados de la Prospección Arqueológica.------ 117
7. Conclusiones y propuesta de trabajos a futuro.----------120
7.1. Propuesta de trabajos a futuro.---------- 122

Índice de cuadros

Cuadro 1. Diseño metodológico. 49
Cuadro 2. Alineación y precisión 50
Cuadro 3. Operacionalización. 54
Cuadro 4. Lista de Unidades Geomorfológicas. 62
Cuadro 5. Comparativo de las principales características de los sensores. 68
Cuadro 6: Parámetros Sentinel 2 70

Cuadro 7. Especificaciones de los VANT y Procesamiento de Datos. 82

Índice de figuras

Figura 1. Diagrama V. de Gowin. 30
Figura 2. Cartografía histórica de la región. S.XVI. 33
Figura 3. Cartografía histórica de la región. S.XVII. 34
Figura 4. Matrícula de Tributos (izq.), Códice Mendocino Folio 34 (der.) 42
Figura 5. Flujo de trabajo. 53
Figura 6. Evidencia arqueológica identificada en el sitio de Cerro la Catarina. 65
Figura 7. Desarrollo metodológico para las pruebas piloto. 71
Figura 8. Fragmento del código utilizado en la plataforma GEE para identificación de anomalías en biomasa. 75
Figura 9. Análisis interactivo y comparación en GEE. 77
Figura 10. Comparación espacial de los resultados de los índices de vegetación de GEE con los MDT y curvas de nivel. 79
Figura 11. Selección de anomalías con potencial de interés arqueológico. 80
Figura 12. Cédula de registro en campo. 86
Figura 13. Registro de evidencia arqueológica observada en Meyuca de Morelos . 87
Figura 14. Levantamiento de datos en campo con TIG. 89
Figura 15 Material cerámico recuperado en el sitio Meyuca. 91
Figura 16 Prueba piloto en cima del cerro la catarina. 95
Figura 17. Histograma SNAP 96
Figura 18. Nube de puntos derivada del VANT. 96
Figura 19. Resultados prueba piloto ladera. 98
Figura 20 . Mapas derivados de a) MDT, b) Pendiente, c) Orientación y d) TRI. 99
Figura 21. Mapa de salida con potencial de observación de evidencia antrópica. 101
Figura 22. Comparación de anomalías observadas en GEE. a) NDVI, b) Imagen Satelital, c) MDT y b) curvas de nivel. 104
Figura 23. Validación en campo. a) elementos naturales, b) valores derivados del NDVI y levantamiento GNSS y c)Evidencia antrópica. 106
Figura 24 Validación en campo vs GEE. a) y b) NDVI Planet, c) imagen satelital y d) evidencia arqueológica identificada. 112

Índice de mapas.

Mapa 1. Ubicación del área de estudio respecto al límite municipal. 32
Mapa 2. Localidades actuales con respecto a la fisiografía representada por elevación. 36
Mapa 3. Provincia Tributaria con respecto al área de estudio. 44
Mapa 4. Unidades geomorfológicas 60
Mapa 5. Estudio comparativo de áreas prospectadas en los cerros de La Catarina y la Malinche. 102

Resumen

México tiene una amplia tradición de investigación arqueológica que en la actualidad enfrenta múltiples desafíos. Esta ha incrementado en las últimas décadas con el uso de geotecnologías; sin embargo, este enfoque representa aún un alto costo en el contexto de las economías emergentes (EM). Lo anterior, limita significativamente el desarrollo de investigaciones y proyectos, además de las condiciones geográficas adversas en el paisaje, y la inseguridad, que en ciertas regiones impide el desarrollo de las investigaciones realizadas por institutos y universidades que resguardan el bien patrimonial.

Este trabajo se centra en la prospección geotecnológica de sitios arqueológicos basada en la percepción remota con la integración de datos espaciales de sensores ópticos y cámaras multiespectrales en dichos dispositivos.(Sentinel-2 y Planet), la plataforma Google Earth Engine (GEE) y Vehículos aéreos no tripulados (VANTs), para generar modelos digitales del terreno (MDT) e índices de vegetación (NDVI, ARVI, SAVI etc.), que, con la validación de campo, revela la relación entre las morfologías del terreno y las modificaciones antrópicas.

La prospección arqueológica en regiones con vegetación densa y topografía compleja, como la que se muestra en el sur del Estado de México, presenta retos para la aplicación de metodologías tradicionales. Por ello, el objetivo principal es precisar la conformación del patrón de asentamiento de los sitios arqueológicos al interior del municipio de Coatepec Harinas, Estado de México, a través del análisis de anomalías paisajísticas asociadas a modificaciones antrópicas detectadas mediante percepción remota y análisis geoespacial, de este modo, determinar los componentes, características y relación con el paisaje. Mediante la correlación de valores espectrales de la biomasa y parámetros morfométricos (pendiente, orientación, índice de rugosidad) con características culturales, se generaron mapas *binarios/ de umbrales con potencial arqueológico para estos sitios considerados de jerarquía mayor.

Los resultados preliminares sugieren la identificación de áreas con probabilidad de contener evidencia arqueológica. Este enfoque ofrece una alternativa eficiente y de

menor costo para la prospección en entornos con limitada visibilidad en superficie, potencialmente replicables en otras regiones con condiciones similares, contribuyendo al avance de las metodologías de investigación en contextos con recursos limitados.

Palabras clave: Geotecnologías, Percepción remota, Prospección arqueológica, Asentamientos prehispánicos, Google Earth Engine (GEE).

Abstract

México has a remarkable tradition on archeological research, which nowadays faces several constraints. Certainly, it has increased in the last decades with the use of geotechnologies. Yet, such technologies are too expensive for most emerging economies. In turn, this reduces the development of research and explorations. Besides, the topographical constraints and the lack of security slow down the development of research done by Universities and Institutes to protect patrimonial goods.

Hence, this work focuses on the geotechnical prospection of archeological sites, based on remote sensing techniques; and its integration with spatial data obtained from optical sensors and multispectral cameras. So, imagery from Sentinel 2 and Planet are combined in Google Earth Engine platform (GEE) and compared to information obtained from unmanned aerial vehicles (AUVs). With such information, the Digital Elevation Model (DEM), as well as several vegetation indexes are calculated (NDVI, ARVI, and SAVI to mention some). This is compared to field validation data to demonstrate the relationship with such information, and the anomalies due to terrain morphology and anthropic modifications.

Archeological prospection in areas with complex topography and dense vegetation, like occurs at the south Mexico State, faces challenges on traditional methods application. For such a reason the main objective was to evaluate the pattern of the settlement of archeological sites at the Coatepec Harinas municipality, located at the south portion of Mexico state. This is done through the association of landscape anomalies related to anthropic modifications detected with the use of remotely sensed imagery; combined with spatial analysis. In such a way, evaluating its components, characteristics and landscape associations. Correlating the spectral values of biomass with morphometric parameters (slope, orientation and rugosity) with cultural attributes, we generate binary maps; combining these, it is possible to establish those sites with a higher relevance. Preliminary results suggest the identification of areas with high probability to host archeological evidence. Such focus offers an efficient alternative, of lower cost for prospection in places with reduced superficial visibility. The potential replicability makes

this technique a feasible option in locations with similar characteristics, contributing to the advance of methodologies for research in contexts of scarce resources.

Keywords: geotechnologies, remote sensing, archeological prospect, prehispanic settlements, Google Earth Engine (GEE).

Prólogo

El presente trabajo, es resultado del interés por explorar no sólo los paisajes montañosos del Estado de México, sino también, a través de las posibilidades que las geotecnologías ofrecen para desentrañar los vestigios de aquellas sociedades que habitaron estos lugares en el pasado. El desafío de identificar patrones de asentamiento en un entorno donde el relieve y la vegetación se imponen, fue un reto que se convirtió en la motivación central de esta investigación.

Este estudio constituye un esfuerzo por enriquecer, desde la perspectiva geoespacial, el legado de quienes han investigado el pasado de Coatepec Harinas, ampliando así el panorama arqueológico de una región que durante décadas ha sido objeto de estudio en el sur de la entidad. La integración de metodologías no invasivas representa un avance metodológico en la prospección arqueológica, lo que contribuye a dejar un precedente para futuras investigaciones en el área.

Quisiera expresar mi agradecimiento a los integrantes de mi comité tutorial cuyo acompañamiento fue fundamental para la realización de este proyecto: al Dr. Héctor Cabadas por guiar la investigación a nuevos horizontes, impulsando la elaboración de artículos científicos, su experiencia en análisis geológico e interpretación del paisaje; a la Dra. Xanat Antonio, por su invaluable apoyo con la implementación tecnológica y compartir sus profundos conocimientos en percepción remota que fueron importantes para este trabajo; a la Dra Virginia Santana por su orientación y contribución a la culminación exitosa de este proceso. Extiendo también mi agradecimiento al Dr. Armando Trujillo, por aceptarme en una enriquecedora estancia académica y su importante contribución para la publicación del segundo artículo derivado de esta investigación y por sus valiosos comentarios como revisor externo.

Agradezco al Consejo de Arqueología del INAH por el permiso otorgado para la realización de este proyecto. (Oficio 401.S.3/2018/40). Mi reconocimiento al Ayuntamiento de Coatepec Harinas por el apoyo institucional brindado; a los estudiantes de la asignatura de *Arqueología de Superficie,* -varios de ellos y ellas ya

colegas egresados de Licenciatura de Arqueología del Centro Universitario Tenancingo (UAEMéx)- cuya participación entusiasta a lo largo de las jornadas de trabajo en campo fue invaluable para la recolección de los datos que aquí se presentan; y a los Directivos del Centro Universitario Tenancingo por el respaldo otorgado.

De manera especial quiero agradecer a la familia Gonzaléz Espinoza y a la familia Hernández García, de la comunidad de Meyuca de Morelos. A la primera, por ser el puente de cercanía con la población; y a la segunda, en particular, por el indispensable soporte logístico que hizo posible nuestra estancia en la comunidad. Asimismo a la arqueóloga, la Mtra. Susana Poleth Sánchez Ramírez por su valioso apoyo y acertados consejos durante las labores de campo.

Por último dedico este esfuerzo a mi familia, de quien siempre he recibido muestras de cariño y aliento no solo durante este proceso si no a lo largo de mi vida: a mi querida esposa, a mi amada hija Natalia, de quien, a su corta edad, recibo lecciones diarias que me recuerdan la importancia de nunca perder la capacidad de asombro; a mi Madre, Padre y hermanos, con todo mi cariño. A ti Natalia, te dedico especialmente este trabajo.

Patrón de asentamiento de los hallazgos arqueológicos en la región de Coatepec Harinas: aplicación geotecnológica en el estudio del paisaje.

1. Introducción

El concepto de *patrón de asentamiento,* categoriza, jerarquiza y explica mediante modelos, la distribución espacial de las sociedades. En arqueología, se utilizan métodos y técnicas específicas para definir la jerarquía y distribución de los asentamientos desde la prospección superficial hasta la validación de datos en campo.

En el centro de México, durante el Posclásico Mesoamericano (900-1521 d.C.), el Patrón de Asentamiento Prehispánico atravesó transformaciones político-geográficas, y procesos de expansión impulsados notablemente por el Imperio Tenochca. Estudios arqueológicos señalan la complejidad de asentamientos caracterizados por una jerarquía y organización territorial antes y durante el dominio del imperio en el altiplano central. Sin embargo, la evidencia es difícil de identificar; en particular en el sur del actual territorio del Estado de México, en la transición entre las cuencas de los ríos Lerma y Balsas.

El área de estudio corresponde al municipio de Coatepec Harinas, localizada en el sur del Estado de México, región de la que no se tiene información suficiente. Los estudios arqueológicos y las fuentes etnohistóricas existentes hasta el momento proveen pocos datos que permitan comprender de qué manera fue el patrón de asentamiento, qué organización social tuvo durante la época prehispánica y cómo se desarrollaron históricamente estos pueblos que transformaron el paisaje.

En México, la práctica arqueológica institucional, se ha orientado en su mayoría, a la preservación y protección de sitios monumentales, además, trabajos de rescate y salvamento arqueológico enfocados en sitios considerados de menor jerarquía, según cifras oficiales (Instituto Nacional de Antropología e Historia, 2025), se estudian y protegen 194 zonas abiertas a la visita pública, sin embargo, el inventario nacional a través de diversos registros, estima que más 57 mil sitios registrados por el INAH (*Informe Gestión INAH 2018-2024*,2025) son considerados como de menor escala, y en gran medida carecen de preservación, investigación y salvaguarda legal, tienen

condiciones de vulnerabilidad, en algunos casos con riesgo a desaparecer (Olay-Barrientos, 2021: 9-31)

Estas condiciones son similares para la práctica arqueológica en Mesoamérica que se centran en la prospección y preservación de sitios monumentales, mientras que los sitios de menor escala quedan relegados e incluso, en algunos casos, destruidos por la urbanización (López Wario, 2016)

Interesa precisar las limitaciones que existen en estudios arqueológicos respecto al tiempo, recursos financieros y que trascienden fronteras particularmente en regiones como Latinoamérica (Ledergerber-de-kohli, 1984; McAnany y Rowe, 2015) y se extiende en diferentes paisajes, si bien, los métodos de prospección arqueológica se benefician de técnicas no invasivas como alternativas para identificar y reinterpretar sitios, desde la perspectiva espacial, enfrentamos un panorama distinto.

Aunque es extensa la producción de trabajos internacionales en arqueología de superficie que presentan un desarrollo metodológico aplicado a contextos de sitios de menor escala (di Lernia *et al.*, 2020; Alexakis *et al*., 2021), en Latinoamérica el factor económico, limita el acceso a tecnologías recientes sobre contextos arqueológicos lo que representa una oportunidad para explorar soluciones menos costosas.
Actualmente, los datos de acceso abierto, como lo promueve la UNESCO, (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura,2022) han revolucionado la prospección arqueológica al brindar acceso gratuito a diversos recursos digitales. Imágenes satelitales de alta resolución y datos de VANT, cada vez más asequibles, lo que ha democratizado el uso de tecnologías geoespaciales en arqueología (Agapiou *et al*., 2014; Parcak, 2009; Lasaponara y Masini, 2016; Hill, 2019). La generación de productos derivados de restituciones fotogramétricas como modelos digitales de superficie (DSM), ortofotos, modelos digitales del terreno (DEM) y modelos 3D a partir de estas fuentes facilitan el mapeo topográfico y la identificación de patrones de asentamiento (Gutiérrez *et a*l., 2016; Hinojosa-Baliño, 2016). No obstante, la adquisición de datos LiDAR, a pesar de su superioridad para el análisis del relieve, es costosa y restringida, lo que limita su uso en muchos proyectos arqueológicos (Jensen y Mathews, 2016; Stone et al., 2016; Fernández Gutiérrez, 2016,).

En años recientes, las geotecnologías aplicadas en la disciplina arqueológica han ganado relevancia, sin embargo, en México, y en otros países considerados como economías de Mercados Emergentes (ME) sigue siendo costoso para instituciones encargadas del cuidado y estudio del patrimonio arqueológico.

Ante estas limitaciones, la aplicación de la percepción remota y el análisis geoespacial surge como una alternativa metodológica para la prospección arqueológica. Ofrece la capacidad de analizar extensas áreas en menor tiempo, por ejemplo, con técnicas no invasivas, identificando patrones y anomalías en el terreno y la cubierta vegetal que podrían ser indicios de remanentes arqueológicos.

El estudio, comprende asentamientos prehispánicos descritos en fuentes etnohistóricas que corresponden a la región. Dada las características del paisaje (heterogeneidad del relieve y vegetación que dificultan la observación) de rasgos en la fase de prospección, se propone el estudio en el cerro de la Catarina en la localidad de Meyuca de Morelos, municipio de Coatepec Harinas, en el sur del Estado de México.

Su compleja topografía (donde convergen el Eje Neovolcánico Mexicano y la Sierra Madre del Sur) y densa cobertura vegetal dificulta la investigación arqueológica tradicional. A pesar de que esta área experimentó significativas transformaciones en sus patrones de asentamiento bajo el dominio de dicho imperio durante el Posclásico Tardío, la identificación y el estudio de sus sitios prehispánicos se ven obstaculizados.

Previo al trabajo de tesis doctoral, se entregó al Consejo de Arqueología, único organismo para otorgar permisos de intervenciones arqueológicas, un proyecto de investigación para la región de Coatepec Harinas, mismo que fue aceptado el mes de marzo del 2018.

Se realizó trabajo de campo durante 28 días distribuidos en diferentes fechas en los meses de agosto de 2018 a julio de 2023 en la comunidad de Meyuca de Morelos al sureste de la cabecera municipal.

Este estudio se centra en la prospección geotecnológica de sitios arqueológicos evaluando la eficacia de la integración de datos espaciales provenientes de sensores

ópticos y Vehículos aéreos no tripulados (VANTs) también conocidos conforme la norma oficial mexicana NOM OM-107-SCT3-2019 como sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS); A través de herramientas, técnicas y recursos asequibles, basada en la observación de índices espectrales asociados a la biomasa generados en Google Earth Engine (GEE), una plataforma de geomática basada en la nube que permite visualizar y analizar imágenes de diferentes sensores satelitales, en particular, para este estudio, Sentinel-2, Imágenes satelitales de alta resolución y de Planet, datos que la iniciativa internacional para el clima y bosques de Noruega,(NICFAI) y Kongberg Satellite Services (KSAT) tienen disponibles para propósitos de investigación.

Esta integración de datos posibilita la generación de productos tales como modelos digitales del terreno (MDT) e índices de vegetación, el más usual es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), y otros semejantes, entre ellos; Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI), y el Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera (ARVI). El análisis del comportamiento de estos índices en periodos de sequía permite correlacionar la morfología del terreno derivada de la restitución fotogramétrica con VANT y las variaciones observadas en los índices con modificaciones de origen antrópico.

Se tiene como propósito de investigación precisar la conformación del patrón de asentamiento de los sitios arqueológicos de jerarquía mayor al interior del municipio de Coatepec Harinas, Estado de México, a través del análisis de anomalías paisajísticas asociadas a modificaciones antrópicas detectadas mediante percepción remota y análisis geoespacial y de este modo determinar los componentes, características y relación con el paisaje. Con lo anterior demostrar la eficacia y el potencial de la percepción remota y el análisis geoespacial como herramientas fiables para la prospección arqueológica, particularmente en paisajes donde la vegetación densa y la topografía compleja limitan la observación y dificultan los métodos de prospección tradicionales.

Para identificar áreas con este potencial, se utilizaron sensores ópticos RGB en dispositivos VANTs y la plataforma GEE, que junto con otros datos geoespaciales,

permitieron delimitar sectores con probabilidad de contener información de sitios prehispánicos, aprovechando las capacidades de procesamiento y análisis de grandes volúmenes de datos que ofrece Google Earth Engine. Esto se logra mediante la asociación de valores espectrales de la vegetación y parámetros morfométricos del terreno (como pendiente, orientación e índice de rugosidad) con características antrópicas previamente definidas, tales como la presencia de meso relieves con geometrías regulares y valores de los índices de vegetación.

La propuesta ofrece una alternativa con el fin de que ésta sea replicada en otros paisajes montañosos que se encuentran densamente cubiertos por vegetación, contribuyendo a las metodologías de prospección arqueológica, especialmente en contextos donde los recursos económicos y humanos son limitados. La aplicación de estas técnicas facilita la identificación de sitios prehispánicos y, por ende, el avance en la comprensión de los patrones de asentamiento, en particular, la dinámica sociopolítica que ocurrió durante el Posclásico tardío mesoamericano en el sur del Estado de México.

“Los datos de acceso abierto y las tecnologías de bajo costo, como los VANTs, han generalizado el uso de imágenes multiespectrales para arqueología. Estas imágenes, particularmente en bandas como el infrarrojo cercano (NIR) y mediante el cálculo de índices espectrales, ayudan a detectar rasgos en la vegetación que podrían revelar la presencia de estructuras subyacentes, incluso en áreas con vegetación densa” (Bennett *et al.*, 2012; Calleja *et al.*, 2018; Stott *et al.*, 2015). Si bien, “la vegetación puede dificultar la detección directa de estructuras arqueológicas, su respuesta espectral puede ser un indicador importante. Sin embargo, en paisajes complejos y con cobertura vegetal densa, la adquisición y procesamiento de imágenes multiespectrales pueden presentar desafíos logísticos y técnicos, especialmente en términos de costo y acceso a zonas remotas. En estos casos, los métodos tradicionales de prospección y recorrido en campo son necesarios para complementar la información obtenida a través de estos sensores” (Golden *et al.*, 2016).

“Los ecosistemas montañosos se encuentran entre los más extensos de México y durante un lapso de tiempo en la época prehispánica fueron los asentamientos

preferidos debido, entre otras variables, a la importancia del recurso y el factor ecológico en torno al clima, la hidrología y la fertilidad del suelo" (Cantú Ayala *et al.,* 2013).

Los paisajes volcánicos en el centro-sur del Eje Volcánico Transmexicano, son particularmente complicados para el trabajo de campo arqueológico debido a las escalas de prospección (incluyendo la disponibilidad de imágenes con la resolución adecuada y su alto costo). No obstante, las geotecnologías de prospección son más comunes a nivel local en zonas montañosas (Castillo *et al.*, 2019; Rouse y Krumnow, 2020). Estas se aplican regularmente en topografías bajas y con escasa vegetación, brindando algunas ventajas para localizar geoformas antropogénicas (Fernández y Gutiérrez, 2016; Brooke y Clutterbuck., 2020). Estas condiciones, al menos en el centro de México, no son las más frecuentes para los estudios del patrón de asentamiento. Las condiciones ambientales del sitio y sus registros arqueológicos son factores decisivos que inciden en las actividades de prospección; de ahí la importancia de generar modelos predictivos para explicar a estos asentamientos. (Vaughn y Crawford, 2009; Danese et al., 2014; Kirk, et al., 2016; Noviello et al., 2018).

Con el fin de identificar patrones de asentamiento en Meyuca de Morelos, Municipio de Coatepec Harinas, Estado de México, se desarrolló una metodología basada en la integración de diversas fuentes de datos de percepción remota. A través de plataformas como SNAP, recurso informático disponible de la Agencia Espacial Europea (ESA) y GEE, y sensores infrarrojos y RGB, procesamos imágenes con diversas características espectrales y resoluciones espaciales. El principal desafío consistió en correlacionar espacialmente y fusionar estos datos heterogéneos para generar un modelo integrado del paisaje y validar los resultados obtenidos en campo.

En los mapas resultantes se identifican píxeles con valores específicos en los índices de vegetación y en los parámetros morfométricos que, al relacionarse con dichas características antrópicas, se interpretan como probable evidencia arqueológica, señalando así la posible presencia de remanentes de asentamientos prehispánicos.

2. Planteamiento del problema

La investigación arqueológica en México representa un desafío debido a la concentración de trabajos arqueológicos y estudios sobre sitios monumentales, lo que deja desprotegidos o con poca atención a más de 57 mil sitios considerados de menor escala. Esta omisión genera un sesgo significativo en la comprensión de los procesos históricos de las sociedades antiguas (Sugiura y Nieto, 2014).

Esta problemática de alcance nacional, también se observa en el municipio de Coatepec Harinas, Estado de México. A pesar de su importancia histórica en el Posclásico Mesoamericano, la región carece de información detallada sobre el patrón de asentamiento, principalmente por su compleja topografía y densa vegetación, que impiden la identificación de sitios desde la prospección tradicional.

Si bien las geotecnologías (percepción remota, datos de acceso abierto, VANTs) ofrecen un enorme potencial, su aplicación en México se limita por los altos costos y la escasez de metodologías robustas para integrar datos y analizar paisajes complejos. Esto impide su uso generalizado en la identificación de anomalías paisajísticas.

El presente estudio propone una alternativa metodológica innovadora y asequible: la integración de datos espaciales de sensores ópticos (Sentinel-2, Planet) procesados en Google Earth Engine (GEE) y VANTs. Al correlacionar valores de los índices de vegetación obtenidos de imágenes satelitales e índices morfométricos con características antrópicas, se busca demostrar la eficacia de estas geotecnologías para identificar y caracterizar sitios arqueológicos en Coatepec Harinas.

Con ello, no solo un intento por precisar el patrón de asentamiento en una región poco estudiada, sino también ofrecer una metodología replicable y de bajo costo para la prospección y preservación del patrimonio en paisajes complejos, contribuyendo así a una mayor comprensión de la dinámica sociopolítica del Posclásico Tardío en la región.

2.1 Justificación

Ante la escasez de investigaciones arqueológicas a gran escala y la falta de metodologías geotecnológicas asequibles en Coatepec Harinas, este estudio busca impulsar el desarrollo y la aplicación de geotecnologías en el ámbito arqueológico. A través de estrategias innovadoras, que emplean geotecnologías para optimizar el diseño, prospección recorrido y reconocimiento arqueológico así como para sistematizar y analizar de manera eficiente los datos derivados del trabajo de campo.

El estudio enfatiza la relación entre los asentamientos humanos y el entorno natural en la región mediante la Percepción Remota y los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Se espera identificar patrones de asentamiento vinculados a características de relieve y de vegetación, y así, contribuir a una mejor comprensión de la ocupación del paisaje por el ser humano en el pasado.

Debido a que la UAEMéx oferta la licenciatura en arqueología, que se imparte en el en el Centro Universitario Tenancingo, ubicado en el sur del Estado de México, los estudios derivados de este programa han contribuido a la obtención de información en regiones cercanas a Coatepec Harinas.

Tal es el caso de los Proyectos de Ocuilan y Tenancingo que definen entre otros elementos, la distribución espacial de los sitios arqueológicos al interior de estos territorios (Palma Linares, 2014), (De la Peña Virchez, 2006).

Con lo anterior, se busca establecer límites, jerarquías y relaciones de la evidencia, principalmente, generar información del remanente arqueológico, mediante cartografía temática derivada de procesos geotecnológicos.

Mediante la combinación de estrategias de prospección de rango alto y medio, índices de vegetación, y el uso de vehículos aéreos no tripulados se tiene una aproximación de los sitios con mayor posibilidad de análisis e interpretación.

El trabajo se inserta en paralelo a las investigaciones mencionadas con el fin de rediseñar una metodología que se pueda aplicar en regiones cercanas que comparten

características en cuanto a geomorfología, suelo, hidrografía, topografía, vegetación y rasgos culturales. Con base en lo anterior contribuye a consolidar un marco metodológico aplicable en regiones con características geográficas y culturales semejantes. Al replicar y adaptar los procedimientos en diferentes contextos, posiblemente en regiones adyacentes se espera enriquecer el conocimiento sobre el patrón de asentamiento y sus variaciones espaciales determinadas por el medio.

2.2 Pregunta de investigación

¿Cómo se relaciona la variabilidad de las características geográficas observadas en el paisaje, analizada a través de las geotecnologías, con el patrón de asentamiento prehispánico en la región de Coatepec Harinas durante el Posclásico tardío?

2.3 Preguntas auxiliares

- ¿Cuál es la estrategia pertinente para generar un sistema clasificatorio que permite una recolección de información adecuada a las características geográficas del paisaje a estudiar?
- ¿Qué relación existe entre la topografía y vegetación (pendientes, elevaciones) y la ubicación de evidencia arqueológica al interior de la región de Coatepec Harinas?
- ¿Cuáles son las características del patrón de asentamiento de los sitios localizados en la región de Coatepec Harinas?
- ¿Cómo incide el paisaje en la disposición de estos asentamientos?

2.4 Objetivo general

Establecer la relación entre la variabilidad de las características geográficas observadas en paisaje, a partir de herramientas geotecnológicas, con patrones de asentamiento prehispánico de los sitios localizados en la región de Coatepec Harinas durante el Posclásico Tardío (1200-1521).

2.5 Objetivos específicos

- Establecer una estrategia con la integración de herramientas geotecnológicas para identificar y caracterizar rasgos geográficos de origen antrópico en paisajes de difícil acceso y vegetación densa en Coatepec Harinas.
- Analizar la relación existente entre la topografía (pendientes, elevaciones) y la ubicación de los asentamientos prehispánicos en la región,empleando modelos digitales del terreno y herramientas de análisis morfométrico espacial.
- Caracterizar las propiedades del patrón de asentamiento de los sitios arqueológicos localizados en la región de Coatepec Harinas utilizando las capacidades de análisis geoespacial con el fin de tener una comprensión de la configuración espacial de la evidencia recuperada.
- Evaluar la incidencia de la disponibilidad de los recursos sobre el paisaje geoespacialmente mapeados respecto a los asentamientos prehispánicos.

2.6 Estructura de la tesis

El presente trabajo, refleja el proceso de investigación para la obtención de datos arqueológicos desde el concepto de patrón de asentamiento a partir de las tecnologías de información geográfica, comprende un total de siete capítulos que desarrollan el estudio desde la fundamentación teórica hasta la validación en campo.

El capítulo 1. Introducción, establece el contexto general y la relevancia del área de estudio para el problema abordado, muestra un panorama de la relación de la Arqueología del paisaje y las Tecnologías de información geográfica como punto de partida metodológico.

En el capítulo 2. Planteamiento del Problema, se presenta la justificación de la investigación, acotando la problemática central, las preguntas auxiliares y la formulación del objetivo general y los específicos. se incluye la fundamentación epistemológica y teórica que le da sustento a este estudio.

En el apartado del capítulo 3 Ubicación y Antecedentes, pone en contexto espacial y temporal el desarrollo de la investigación. Describe a mayor detalle la ubicación geográfica del área de estudio así destacando los aspectos geográficos y antrópicos de relevancia. Además realiza un revisión de las investigaciones previas en Coatepec Harinas con énfasis en su contexto histórico, en especial el Posclásico Tardío.

El capítulo 4. Metodología de Investigación. Es la sección medular, presenta la estrategia de investigación que será el curso del trabajo a desarrollar, comienza con los fundamentos metodológicos, el enfoque, alcance y validación. Posteriormente, se describen los materiales y métodos empleados mediante tres fases propuestas: acopio y contextualización; prospección arqueológica y geoespacial, además el registro arqueológico remoto con validación en campo.

La siguiente sección, el capítulo 5. Resultados, presenta los hallazgos obtenidos de las fases metodológicas, muestra los resultados del análisis de la percepción remota satelital y la información generada con la tecnología VANT en las áreas clave de los

sitios prospectados además de los datos preliminares del registro arqueológico en campo.

El capítulo 6 Discusión de resultados. Analiza y contrasta los resultados del marco teórico y los objetivos propuestos. Examina el desempeño de los índices utilizados sobre el paisaje con un relieve montañoso. Y discute los desafíos técnicos encontrados, la utilidad de los mapas resultantes y fundamentalmente el remanente del asentamiento prehispánico de jerarquía mayor dentro del municipio de Coatepec Harinas.

Finalmente, el capítulo 7. Conclusiones y propuesta de trabajos a futuro. Sintetiza los hallazgos principales y las contribuciones de esta investigación. Se plantean líneas de acción y recomendaciones proyectadas para futuros trabajos académicos o políticas de protección acordes a la metodología propuesta con el fin de ampliar y mejorar en otros escenarios los recursos y herramientas desarrolladas en este estudio.

2.7 Marco teórico referencial

A continuación se presentan de forma general, las bases conceptuales, epistemológicas y metodológicas que sustentan el estudio de la variabilidad geográfica del paisaje, observada por geotecnologías, en relación con el patrón de asentamiento prehispánico en Coatepec Harinas durante el Posclásico Tardío.

2.7.1. Fundamentación epistemológica y teórica del estudio

De las corrientes epistemológicas en la investigación geográfica a las metodologías innovadoras en arqueología:

Para una mayor comprensión de la complejidad de los enfoques utilizados en este estudio, con perspectivas geográficas y arqueológicas, se recurre a las corrientes filosóficas que sustentan la construcción del conocimiento y que a menudo entran en el terreno del debate. Ello sustenta el análisis de hallazgos, patrones y en consecuencia, modelos predictivos relevantes nuestro caso de estudio

El conocimiento científico que nos fundamenta tiene su concepción en el S. XVII con Francis Bacon, este planteamiento surge en oposición a la filosofía Aristotélica que prevaleció siglos atrás, prácticamente hasta la edad media (Gutierrez, 2013) Para Bacon, el conocimiento del mundo y de la naturaleza en general no puede proceder sólo a partir de la experiencia, es la observación sistemática la que sirve de referente. Dicho conocimiento, precisa a diferencia del conocimiento general, una serie de postulados cuya racionalidad, objetividad, sistematicidad y verificabilidad ayudan a tener un entendimiento del entorno, y con ello sientan las bases para la formulación de leyes y teorías más robustas.

Para las ciencias formales y las fácticas como las sociales, a través de la historia, son reconocibles algunos paradigmas preestablecidos desde el S. XIX, esta forma de ver el mundo, engloba la escuela positivista que reconoce con sus principales impulsores, Augusto Comte y Stuart Mill, que la base es un conocimiento científico riguroso que deriva en la observación, con la idea de identificar las relaciones de los fenómenos de estudio que eventualmente conducen a la formulación de leyes (Gutierrez, 2013) y (Watson et al., 1987).

Para Gandara (2011) el positivismo en la filosofía de la ciencia, concibe al conocimiento científico como una descripción del mundo, se obtiene a través de la observación, experimentación y verificación empírica. Sin embargo, su enfoque reduccionista en el que solo se aspiraba a explicar fenómenos con causalidades lineales pronto mostró sus limitaciones ante la complejidad de los entornos naturales y sociales.

En contraste con el positivismo, la noción de que bajo un criterio de demarcación entre lo que se considera conocimiento científico del que no lo es, el falsacionismo propuesto por Karl Popper emergió como crítica que argumenta la idea de que ese conocimiento avanza mediante la refutación de teorías en el entendido de que no existe la verificación absoluta, y el progreso científico se da mediante error y ensayo, es decir, no se basa en la confirmación de verdades absolutas sino al descartar errores.

Fue en este contexto donde la teoría General de Sistema (TGS) impulsada por Bertalanffy, (1976) representa un cambio de paradigma en la forma de entender la ciencia y la realidad que se describe, si en el positivismo predomina la idea de una

causalidad lineal buscando relaciones directas en un solo sentido, la TGS reconoce una causalidad circular, retroalimentación y complejidad y de este modo se desmarcó de la visión reduccionista del positivismo al postular que los sistemas son comprendidas como totalidades organizadas.

En un nivel de análisis menor las teorías base para una investigación geográfica y arqueológica desde una perspectiva sistémica, la *TGS* nos brinda herramientas para el entendimiento de los patrones de comportamiento del pasado como una serie de elementos inmersos en la estructura sistémica ofreciendo un recurso muy robusto para intentar explicar fenómenos complejos, dentro de un marco holístico, busca entender una diversidad de fenómenos dentro de diferentes áreas de conocimiento, biología, sociología y eventualmente geografía y arqueología.

Este cambio de paradigma, permeó en la geografía (Villafañez 2011,) dando orígen a la Nueva Geografía que en las décadas de 1950 y 1960 adoptaría un enfoque más orientado al análisis cuantitativo, buscando de este modo, la identificación de patrones espaciales, formulación de modelos para la compresión de territorios y asentamientos dentro de sistemas complejos.

Por otro lado, la Arqueología adoptaría dentro de estos postulados una nueva corriente denominada Nueva Arqueología (Arqueología Procesual), contrastando con las metodologías de la época, ésta, estaría inspirada en el positivismo, la TGS y la Nueva Geografía, para analizar a las sociedades pasadas como sistemas culturales complejos, buscando a través de modelos y patrones, inferencias sólidas a partir del registro arqueológico apoyados en la formulaciones de hipótesis (verificables o falseables).

En ese camino, la arqueología orientada en la búsqueda y observación de patrones, surgiría una teoría centrada en la formación y transformación de los contextos observables en el paisaje que ayudaría a la interpretación de los datos obtenidos. La Teoría Observacional comenzó a ganar terreno con la observación sistemática como un componente metodológico, para entender, describir y explicar los procesos de formación y transformación naturales y culturales. Al integrar esta aproximación se pueden identificar y distinguir modificaciones de origen antrópico del entorno natural,

situación que promueve una análisis más detallado de las intervenciones humanas en el entorno a lo largo del tiempo.

Para ampliar dicho concepto se recurre a *la teoría observacional,* Gándara (2011), cuyo componente de análisis, para este contexto, es la formación y transformación de contextos observados en el paisaje.

Un cambio significativo en el paisaje es el resultado de la acción del ser humano en su medio y se observa de manera espacial en el *Patrón de Asentamiento* que recurre al análisis de la arquitectura y de los espacios que indican una ocupación por poblaciones humanas y pueden ser representadas a partir de modelos. Es un reflejo no sólo de la tecnología y las instituciones, sino también la interrelación funcional de los sitios dentro de una región (Parsons, 1972).

Con el fundamento teórico se adecua la organización de información de un territorio determinado por factores de orden topográfico y sociohistórico y deriva en la aplicación herramientas metodológicas como la prospección para la comprensión de procesos, pero sobre todo de patrones útiles para el entendimiento del paisaje.

Por último, la integración de la TGS con sus enfoques sistémicos, las perspectivas de análisis de la nueva geografía y la nueva arqueología aunado a los avances tecnológicos, derivó en un concepto innovador conocido como la arqueología predictiva ,(Anaya, 2023, 87).

Parte de modelos basados en variables naturales y culturales, frecuentemente procedente de datos obtenidos mediante geotecnologías con el fin de pronosticar lugares con alta probabilidad de ser sitios arqueológicos. Correlacionando características en el paisaje con elementos arqueológicos conocidos esta arqueología permite una prospección más eficiente, particularmente en entornos con topografías complejas y vegetación densa.

La TGS permite entender bajo este enfoque las sociedades prehispánicas y sus patrones de comportamiento como sistemas complejos interconectados.

La noción del espacio y paisaje

El paisaje es el concepto sobre el que establece el eje transversal del estudio de caso, éste se observa desde el enfoque geográfico y después, su relación respecto a la disciplina arqueológica, se utiliza el análisis paisajístico y sus métodos para tener una interpretación de estos asentamientos en la región.

La disciplina geográfica al observar los fenómenos, naturales y sociales que ocurren en la superficie terrestre se ha valido de elementos teóricos con los que sustenta la ciencia e investigación.

La geografía, al estudiar los modos de organización del espacio así como la distribución de las formas encuentra en la superficie terrestre una serie de fenómenos que se intentan explicar con dicho método (Dollfus, 1990).

“El *análisis regional* tiene una esencia geográfica y se designa como una porción de la superficie terrestre con un marco de referencia, la geografía regional se interesó más por ser contenedor de fenómenos como objetos de la descripción de los distintos espacios de conceptualización” (Delgado Mahecha, 2003) señala entonces que la preocupación de la geografía regional con o sin matices históricos, se centra en las cosas y los procesos de transformación de los paisajes.

Con el fin de explicar las implicaciones que existen en el contexto arqueológico a nivel espacial, la regionalización ha resultado útil en diversos trabajos de esta índole, (Nieto Hernández, 2010), “no se trata de un concepto ajustable a cada contexto de orden social, pero, a partir del enfoque de otras disciplinas se puede acotar en términos físicos, históricos y geográficos”.

El espacio, en consecuencia, no es sólo un paisaje físico, sino el resultado de relaciones sociales y prácticas culturales que lo modifican. Trujillo (2020,2023), sostiene que el espacio es una construcción social y dinámica, por lo anterior, para tener un panorama que permita esta apreciación, las geotecnologías se muestran como herramienta fundamental que la disciplina arqueológica hoy en día recurre para la interpretación de su objeto de estudio.

2.7.2. Geotecnologías y la prospección arqueológica no invasiva

“La *prospección* es una fase de clarificación metodológica que responde a una aproximación específica a aspectos concretos del registro arqueológico. Es la estrategia en la que mediante técnicas y métodos se obtiene información arqueológica de un territorio, ésta se puede utilizar para la localización de sitios mediante su registro y análisis”, (Ruíz Zapatero & Burillo Mozota, 1988).

Existen métodos específicos utilizados para la localización de artefactos y elementos en superficie, los cuales, en la mayoría de los casos, parten de una investigación documental y se insertan dentro de una sistematización.

El método convencional para la localización de *sitios* consiste en buscar los restos más prominentes del paisaje, (Renfrew & Bahn, 2011), los elementos observables y los artefactos dispersos en la superficie que representan de manera significativa una actividad humana; en los estudios arqueológicos de prospección regional, se tiene el precedente con investigaciones como las de Sanders en la cuenca de México y Willey en el valle de Perú (Renfrew & Bahn, 2011).

En años recientes los estudios arqueológicos se han beneficiado de la integración de métodos y técnicas que permiten una comprensión más profunda y no invasiva de los paisajes culturales. En este panorama, la percepción remota y el análisis geoespacial surgen como herramientas fundamentales para la detección, identificación, caracterización y estudio de sitios arqueológicos en diversas escalas.

A partir de la detección de anomalías en el terreno, los índices de vegetación y morfometría del terreno, derivados de imágenes de satélite y datos de VANTs, pueden revelar la presencia de estructuras antrópicas, como terrazas, plataformas y montículos, en áreas donde la vegetación y el relieve dificulta la prospección tradicional.

Históricamente existe una variedad de sensores y plataformas para identificar anomalías o patrones que sugieran la presencia de vestigios humanos. Desde la fotografía aérea en las década de 1920, hasta las imágenes satelitales de alta resolución (WorldView, Pleiades), y más recientemente, el desarrollo de datos LíDAR

(Light Detection and Ranging) en sensores terrestres (Carver et al., 2014,) y sensores en dispositivos aéreos, estas tecnologías han revolucionado la prospección, como lo menciona Rączkowski citado en Carver et al 2014: “el mejoramiento de estos métodos es constante, elevando nuevas interpretaciones, expectativas y metas”.

Por lo anterior, la aplicación geotecnológica Google Earth Engine (GEE) se muestra como una herramienta potente y abierta a nuevas interpretaciones para el reconocimiento e identificación de evidencia arqueológica desde la perspectiva espacial. GEE es una plataforma de geomática basada en almacenamiento remoto (en la nube) de repositorios virtuales de imágenes satelitales, lo que permite a los usuarios visualizar y analizar imágenes de satélite del planeta para llevar a cabo estudios de percepción remota. Reúne información de distintos sensores ópticos, radar e hiperespectrales que apoyan a la apreciación de diferentes rasgos geográficos perceptibles desde el espacio.

Existen numerosos trabajos que justifican y demuestran la utilidad de GEE en el ámbito arqueológico. Por ejemplo, Firpi (2016) y (Herndon *et al*., 2023) han revisado y destacado el progreso en la utilización de datos masivos de percepción remota en GEE para aplicaciones arqueológicas, mientras que estudios como los de Brandolini et al. (2021) y Ullmann *et al.* (2022) han desarrollado metodologías específicas para la identificación de características paleo-paisajísticas y estructuras arqueológicas subyacentes con el uso de esta plataforma.

La capacidad de GEE para procesar y analizar grandes volúmenes de datos lo coloca como una herramienta clave para la prospección no invasiva en diversas escalas y contextos (Valente et al., 2023; Lepori y Zamora, 2023). Particularmente, existen trabajos que abordan el efecto de la respuesta espectral de la vegetación asociados a contextos antrópicos en la detección arqueológica (Fattore et al., 2021). GEE ofrece la posibilidad de identificar, mediante diferentes índices de vegetación (tales como el NDVI, ARVI y SAVI, por citar algunos), ya que las variaciones en los valores de estos índices tienen potencial de ser asentamientos arqueológicos. Así, observando las

anomalías en el desarrollo de la vegetación, se pueden buscar como causales elementos culturales que en la actualidad subyacen de la superficie.

La relevancia de esta investigación radica en la integración de tecnologías de prospección y caracterización de sitios arqueológicos, particularmente en sitios de mayor jerarquía dentro de paisajes complejos. El uso de GEE proporciona una plataforma robusta para el procesamiento y análisis de grandes volúmenes de datos satelitales, permitiendo la identificación de anomalías que, en el contexto de este tipo de paisajes como los que presentan los remanentes de asentamientos prehispánicos de Coatepec, serían difíciles de detectar mediante métodos terrestres convencionales.

Esté análisis en macro escala se complementa con los datos de sensores en dispositivos (VANTs), que ofrecen una resolución espacial y temporal sin precedentes. Los datos obtenidos por estos sensores facilitan la identificación de anomalías en el microrelieve, la generación de modelos 3D a partir de la restitución fotogramétrica y la visualización de rasgos arqueológicos a nivel de sitio, proporcionando una perspectiva conjunta la observación regional y el análisis detallado del terreno (Herndon *et al*., 2023). La integración de estas herramientas permite no solo la identificación de rasgos asociados a asentamientos prehispánicos, sino también una mayor comprensión de la interacción con su entorno. De este modo, la identificación de elementos ocultos bajo densa vegetación o relieve accidentado representa un avance significativo en la metodología arqueológica aplicada a este tipo de contextos.

Buzai(1999) señala que en un nuevo marco interpretativo del mundo, la geografía se nutre de las geotecnologías y se expande hacia otras disciplinas. Esta, es una perspectiva que la geografía brinda al resto de las disciplinas científicas y prácticas humanas, impacta de manera positiva a la arqueología con el uso de las las TIG, de tal modo que aportan alternativas socioespaciales, la computación gráfica, la fotointerpretación, la gestión de bases de datos y la fotogrametría ganan terreno junto con los sistemas de información geográfica.

Con el fundamento teórico se adecúa la organización de información de un territorio determinado por factores de orden topográfico y sociohistórico y deriva en la aplicación

de herramientas metodológicas, tales como la prospección para la comprensión de procesos, pero sobre todo de patrones útiles para el entendimiento del paisaje.

Para tener mayor claridad en este apartado se elaboró un diagrama V. de Gowin,(figura 1) (Novak & Gowin, 1984) con el objetivo de mostrar la interacción (*interrelación activa*) entre el dominio metodológico y el conceptual, como herramienta para responder la pregunta central, refiere cada uno de los niveles de aplicación teórica antes mencionados, en contraste con el desarrollo metodológico para el tema de investigación que nos atañe, en específico, observa la pregunta en congruencia con los objetivos y las aplicaciones prácticas para la generación del conocimiento.

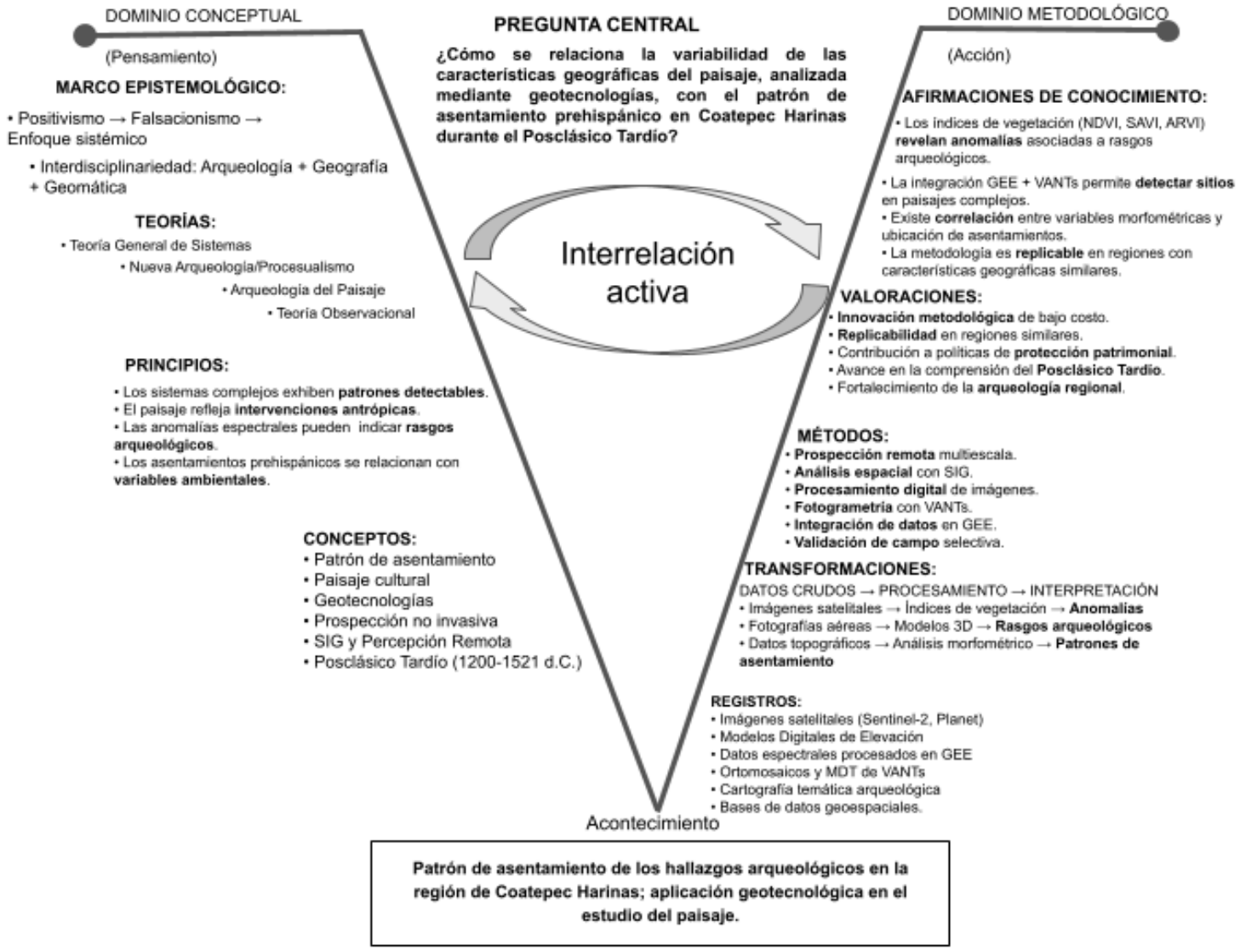


Figura 1. Diagrama V. de Gowin.

3. Ubicación y antecedentes

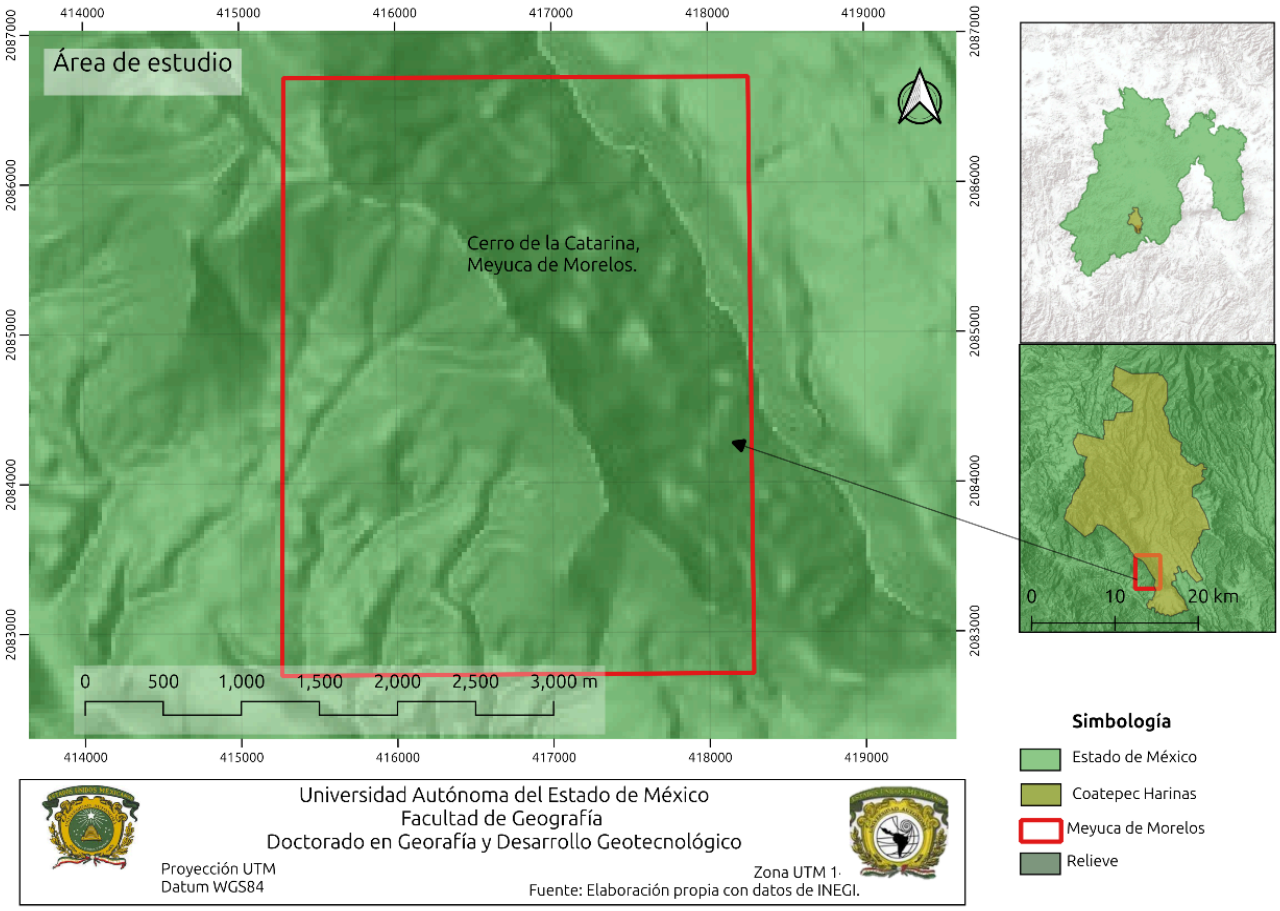
3.1 Ubicación del área de estudio

La zona de estudio es la región de Coatepec Harinas, localizada al sur del Estado de México, y corresponde en su mayoría al municipio de Coatepec Harinas,(mapa 1) colindante con los municipios de Zinacantepec y Toluca al norte, al sur con Almoloya de Alquisiras, Zacualpan e Ixtapan de la Sal, al este con Villa Guerrero y al oeste con Temascaltepec y Texcaltitlán.

Para tener una perspectiva general del trabajo a realizar es necesario considerar para sus factores abióticos; geológicos, climáticos, orográficos, hídricos y edafológicos; ya que influyen sobre las actividades humanas pretéritas y actuales y definen la forma en que los asentamientos humanos se distribuyeron a lo largo y ancho de la región.

La presente investigación se enfoca en sitios importantes de los que se tiene información de existencia de vestigios prehispánicos de alta jerarquía, ubicados en el sur del Estado de México: el primero en el cerro de la Catarina en Meyuca de Morelos, en el municipio de Coatepec Harinas, que como sitio arqueológico se observa que el asentamiento corresponde la zona de transición entre las cuencas de los ríos Lerma y Balsas, lo que les confirió una posición relevante en la configuración cultural y geográfica prehispánica.

No hay suficiente información de investigaciones arqueológicas en dicha región, y las fuentes etnohistóricas consultadas arrojan pocos estudios realizados que permitan comprender de qué manera fue su asentamiento, qué organización social ha tenido desde la época prehispánica y cómo se observa su eventual desarrollo histórico desde la perspectiva arqueológica del paisaje.



Mapa 1. Ubicación del área de estudio respecto al límite municipal.

Para la regionalización e identificación de sitios con alto potencial arqueológico, se revisó la cartografía histórica elaborada durante los siglos XV, XVI y XVII con claras referencias a Coatepec, Meyuca, Acuitlapilco y Chiltepec y los restos de sus asentamientos prehispánicos (figuras 2 y 3) .Estos documentos se encuentran bajo la custodia del Archivo General de la Nación (AGN).



Figura 2. Cartografía histórica de la región. S.XVI.
Se muestra el asentamiento de Coatepec en relación con rasgos geográficos (1589). Fuente: AGN



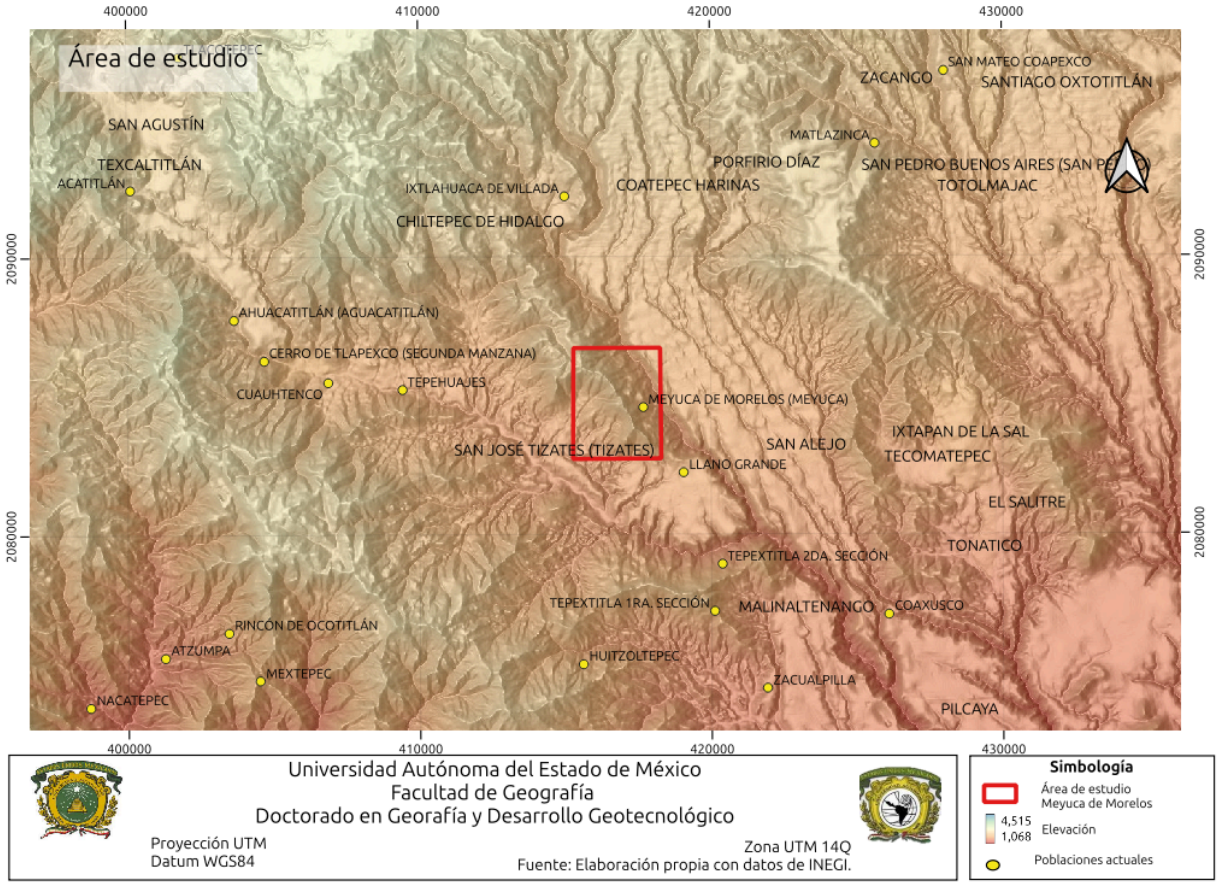
Figura 3. Cartografía histórica de la región. S.XVII.

Fragmento del mapa denominado “pleito de indios contra *Don Isidro Antonio Izquierdo”*, se observa el cerro de la Catarina antes “Moctezuma” y el arroyo del mismo nombre cercano al Río Meyuca (1771). Fuente: (AGN).

La región presenta un clima templado subhúmedo con lluvias en verano y precipitaciones anuales de 1100-2000 mm/año; la temperatura media anual oscila entre 6 °C y 20 °C. La precipitación máxima es de junio a septiembre (INEGI, 1999). Los principales ríos corresponden a las regiones hidrológicas de la Cuenca del Balsas y la Cuenca de Amacuzac (Subcuenca Alto Amacuzac), con importantes afluentes de corrientes perennes que modelaron activamente el paisaje.

En el Cerro La Catarina aún se encuentran evidencias de la vegetación original, como el bosque mesófilo de montaña, que puede crecer más de 25 metros de altura; Los árboles maderables, incluidos robles, abetos, álamos, robles rojos, cedros y fresnos, se presentan en parches, la mayoría creciendo en los relieves más altos. El área forma parte del “Corredor Florícola del Sur del Estado de México” (Ramírez & Avitia, 2018), donde el cambio de uso de suelo ha generado producción en invernadero de árboles frutales, entre ellos aguacate (*Persea americana*), zapote blanco (*Casimiroa edulis*), capulín (*Prunus salicifolia*), espino mexicano (*Crataegus mexicana*), durazno (*Prunus persica*), ciruela japonesa (*Prunus salicina*), pera (*Pyrus communis*), manzana (*Malus domestica*), nuez inglesa (*Juglans regia*), limón (*Citrus limon*) y otros.

La región propuesta consta de 284 kilómetros cuadrados. La cabecera municipal de Coatepec Harinas se localiza sobre una meseta, limita al norte con las poblaciones de Huayanalco, La Conchita y Potrero Redondo, al sur con los poblados de Meyuca de Morelos, La Cercada y Baja Laja, al este con Cochisquila y al oeste con Chiltepec[1] (Mapa 2).



Mapa 2. Localidades actuales con respecto a la fisiografía representada por elevación.

Se ubica dentro de dos sistemas fisiográficos: al norte forma parte de la Provincia del

[1] *Carta Topográfica IXTAPAN DE LA SAL Clave E14A57, INEGI, 2000*

Eje Neovolcánico, Subprovincia Lagos y Volcanes del Anáhuac, la cual corresponde a las últimas estribaciones del Xinantécatl y al sur forma parte de la Provincia de la Sierra Madre del sur, Subprovincia Sierras y Valles Guerrerenses, situación que propicia la complejidad topográfica, sierras de cumbres extendidas y laderas escarpadas, lomeríos con llanos aislados y valle de laderas tendidas con mesetas, así como mesetas de aluvión antiguo y mesetas de aluvión antiguo con cañadas.

El sistema de sierras y cumbres extendidas y laderas escarpadas se ha asociado a rocas ígneas de composición máfica a intermedia, principalmente basaltos y andesitas (Servicio Geológico Mexicano, 2013).

El sitio se ubica cerca de la localidad actual de Meyuca de Morelos se puede acceder a 8.58 km hacia el sureste de la cabecera municipal de Coatepec. El paisaje está dominado por una compleja sucesión de sierras, volcanes, valles y cuencas intramontanas. Los lomeríos y elevaciones aisladas como el Cerro de la Catarina son formaciones comunes dentro de este sistema.

Desde el punto de vista geológico y fisiográfico, se ubica en el límite del Eje Volcánico Transmexicano (EVTM) y la Sierra Madre del Sur (SMS), dentro de la Subprovincia de la Cuenca Balsas-Mexcala y parte del estado de Guerrero (Campa & Coney, 1983). Predominan las rocas volcánicas, aunque también hay indicios de metamorfismo y afloramientos sedimentarios en las laderas de las sierras. La actividad volcánica pretérita, con flujos piroclásticos y lavas riolíticas del Oligoceno (Servicio Geológico Mexicano, 2013), fue influenciada por procesos tectónicos que generaron fallas y fracturas. Esto afectó la estratigrafía, incluyendo depósitos distales del Nevado de Toluca (Capra & Macías, 2000; García-Palomo et al., 2002). En la ladera este del Cerro La Catarina, los escarpes y deslizamientos traslacionales son evidentes, impactando incluso el asentamiento moderno de Meyuca de Morelos. Los suelos recientes son principalmente Vertisoles sobre flujos piroclásticos, Feozems en laderas bajas y Litosoles sobre las riolitas del Cerro La Catarina (INEGI, 1999;García Cortéz et al., 2021).

El clima de la región es templado subhúmedo, con lluvias de verano (junio a septiembre) y una precipitación anual de 1100-2000 mm/año. La temperatura promedio anual oscila entre 6 °C y 20 °C (INEGI, 1999). Los ríos pertenecen a las cuencas hidrológicas del Balsas y Amacuzac, con afluentes perennes que han modelado eventualmente el paisaje.

En el Cerro La Catarina, la vegetación original incluye remanentes de bosque mesófilo de montaña No obstante, la región forma parte del "Corredor Florícola del Sur del Estado de México" (Ramírez y Avitia, 2018), lo que se traduce en un cambio significativo en el uso del suelo hacia la producción intensiva en invernadero de diversos árboles frutales.

La geología del área se asocia a la evolución geológica de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) (Gómez-Tuena *et al.* 2005). En la actualidad, y gracias a la abundancia de fechamientos isotópicos obtenidos en las últimas tres décadas, es claro que la individualización de la FVTM como una entidad geológica distintiva de rocas ígneas en México ocurrió durante el Mioceno medio y tardío. Respecto a la edafología el suelo predominante es Andosol con (52.67%), enseguida Luvisol (21.45%), Cambisol (9.34%), Vertisol (9.19%), Leptosol (5.45%) y Phaeozem (0.98%).

Acorde a los datos del prontuario de información del INEGI (1999) y el compendio de información geográfica(Instituto Nacional de Geografía y Estadística, 2010), la superficie donde se desarrolla la agricultura corresponde a un 45%, el bosque corresponde a un 51% pastizal con 2.35% y zona urbana con 0.92%.

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen la región tiene un clima CW, templado subhúmedo con lluvias en verano, presenta una precipitación anual de entre 1100 a 2000 mm al año, la temperatura media anual oscila entre 6 y 20 ° C., La máxima incidencia de lluvias se presenta en los meses de junio, julio, agosto y septiembre. Esto repercute en el modelado del paisaje respecto a su hidrografía.

Coatepec Harinas corresponde a la región hidrológica del Balsas, a la cuenca de Amacuzac, subcuenca del Alto amacuzac, con un importante afluente de corrientes de agua perennes, tales como: Nava, El Jabalí, Los Tizantes, Agua Blanca, Sabanillas, La

Tortuga, Chiquihuitero, Tecolotepec, Salto La Providencia, Chiltepec, El Molino, Las Flores, Salto, Tlapala, De Las Flores y Almoloya e Intermitentes: Chiquihuitero, Tequimilpa, Culebrillas, Chiltepec, El Salto, Los Capulines, Utlapilco, La Fragua, El Paso, Los Hernández, Las Mesas y Malina (INEGI,1999).

Es importante precisar que en los últimos años el medio geográfico ha sufrido importantes cambios, como consecuencia de las actividades económicas además de la producción agrícola, otros son resultado de la producción florícola, y fruticultura dentro de la región, el aprovechamiento del suelo ha tenido modificaciones importantes. Estas alteraciones han impactado en la flora y fauna originales, se puede apreciar una intensa transformación del entorno resultado del acelerado desarrollo económico, fundamentalmente con la construcción de invernaderos.

3.2 Investigaciones Arqueológicas

Existe escasa información de estudios arqueológicos en dicha región, y las fuentes etnohistóricas consultadas hasta el momento arrojan pocos estudios realizados que permitan comprender de qué manera fue su asentamiento, qué organización social se tuvo durante la época prehispánica y cómo fue el impacto en el paisaje desde el enfoque arqueológico.

En cuanto a las investigaciones arqueológicas se ha documentado poco acerca de la importancia que tuvo la región antes de la conquista española, destacan los informes y publicaciones de Barlow,(1992).

No obstante que se han realizado investigaciones con perspectiva regional en los municipios de Tenancingo y Ocuilan (Palma Linares, 2014) (De la Peña Virchez, 2006), no existen trabajos sistemáticos de recorrido de superficie con perspectiva regional e intrasitio. No hay suficiente registro de las intervenciones en sitios arqueológicos, esto se puede corroborar tanto en el archivo técnico del INAH como en la dirección de registro arqueológico de la misma institución[2], donde se tienen reportados dos sitios: el primero; *Coatepec* reportado “a cielo abierto con observación de estructuras”, una

[2] *Archivo Técnico del INAH. Dirección de Registro Arqueológico, Consultado en línea en* http://consejoarqueologia.inah.gob.mx *y http://www.registropublico.inah.gob.mx/* .

superficie de 115 ha, folio de registro 2ASA00016148, el segundo; el *Jagüey* reportado “a cielo abierto con observación de estructuras”, una superficie de 128 ha, con folio de registro 2ASA00016160, ambos con asociación cultural Mexica y cronología de 1200 - 1521 d.C.

Se menciona a Coatepec como asentamiento en investigaciones posteriores como el *Proyecto Coatlán,* desarrollado por el arqueólogo Raúl Arana en 1975, aunque la intervención solo estuvo sujeta a algunos municipios de la porción sur, algunos colindantes con el municipio de Coatepec Harinas (Arana, 1990, 19).

Resulta difícil distinguir límites claramente definidos entre estos territorios del sur (Tomaszewski & Smith, 2011), particularmente después de su conquista y sometimiento al Imperio Azteca (Isaac, 1983; Hassing, 1988; León-Portilla,2000; Albores, 2006; Gutiérrez, 2017;). Existen interpretaciones adicionales inferidas de documentos históricos (García-Castro, 1999, 2013; Vázquez, 2008; González 2010, 2013) y toponimia que aluden a los sitios previos a la conquista española.

El asentamiento moderno de Coatepec Harinas es un remanente directo de una entidad político-territorial dominada por el Imperio Azteca (Smith & Sergheraert, 2016; Berdan, 2017; Gutiérrez, 2017) durante su control sobre el área de Matlatzinca (Isaac, 1983; Hassing,1988; Ruz Barrio, 2019), y que utilizaban el sistema tributario como mecanismo para obtener recursos (Berdan, 1996). En el Folio 34r del Códice Mendoza y la Matrícula de tributos se menciona el asentamiento de Coatepec (Barlow, 1992: 34) (figura 4)como perteneciente a la provincia de Ocuilan junto con Tenancingo y Tecualoyan; por lo tanto, fue uno de los Altepemes distantes bajo el sistema de división tributaria y provincial del Imperio Azteca (Carrasco, 1996).

La necesidad de registrar y recuperar evidencia arqueológica que ha estado sujeta a diferentes condiciones ambientales (naturales e inducidas) requiere el desarrollo de metodologías de prospección asequibles y relativamente fáciles de leer, para planificar intervenciones en territorios complejos y evitar la pérdida de datos sensibles. información sobre estas regiones periféricas del gran imperio, y contribuir a la discusión sobre las "provincias estratégicas" (Berdan & Smith, 1996; Sergheraert, 2016).



Figura 4. Matrícula de Tributos (izquierda.), Códice Mendocino Folio 34 (derecha.)

3.3 Coatepec Harinas como asentamiento prehispánico en el contexto histórico

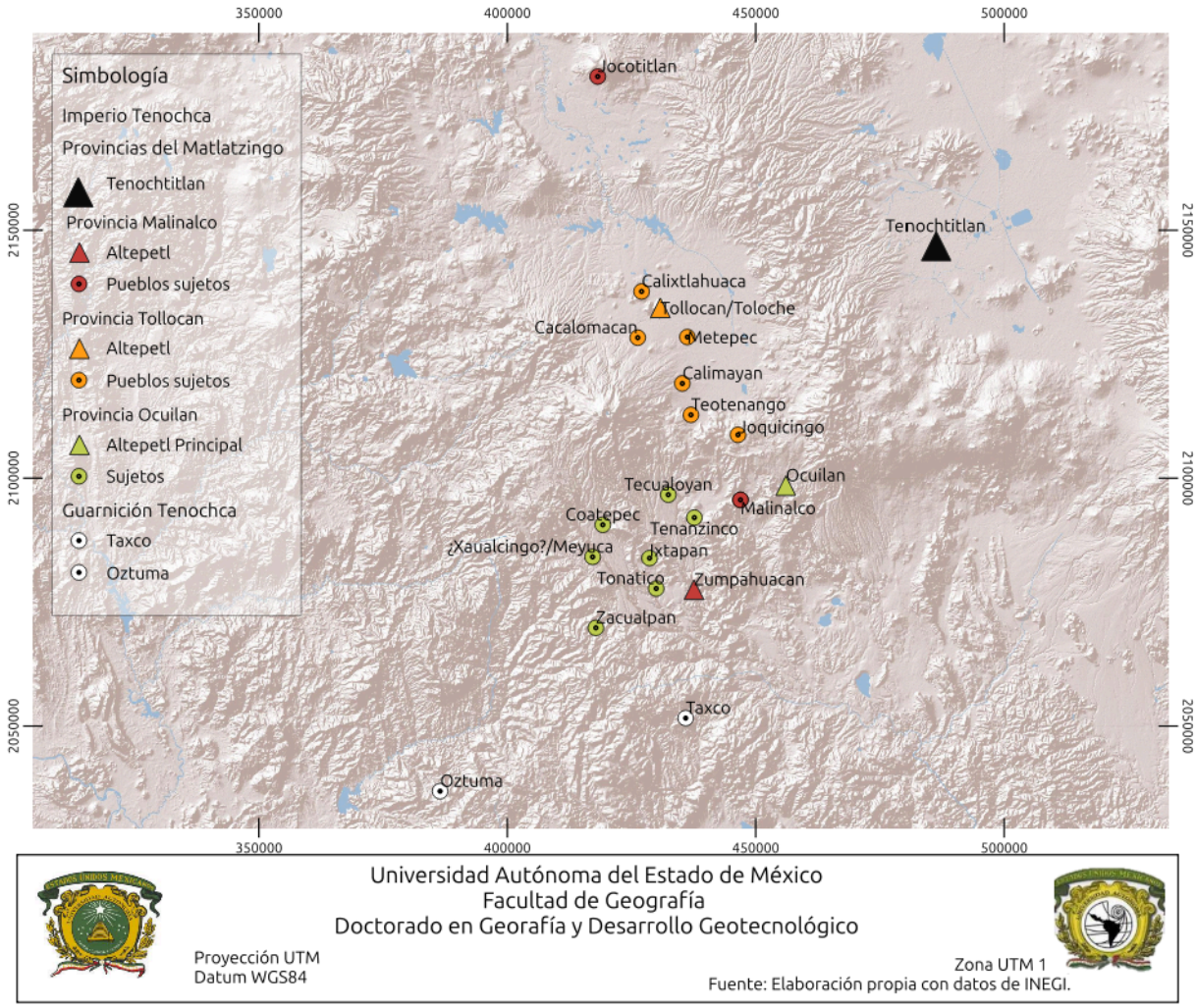
El Posclásico en la Sierra Central y sur de la provincia de Matlazinca

En el Centro de México, durante el Período Posclásico (900-1521 d.C.), la mayoría de la población indígena estaba organizada en altépetl o ciudad-estado, (Carrasco,1996; Lockhart, 1994; Fernández y García, 2006; Smith, 2008), frecuentemente con un patrón de asentamiento que se dispersó en algunos casos sobre barrancas y laderas (Garza & Fernández, 2016). El gobernante y una proporción importante de la población residían en la capital homónima del altépetl, que eclipsaba a otros pueblos de su territorio por su tamaño e importancia (Borejsza, 2018).

Particularmente, en la Cuenca de México (Sanders, 1979), el Valle de Toluca (Tomaszewski & Smith, 2011, Nieto, 2012; Sugiura & Nieto, 2014), y la sección sur del actual territorio del Estado de México, (Jaramillo, 1987; Arana, 1990; De la Peña et al., 2008; García Castro, 2013; Palma,2014; Garza & Fernández, 2016), se han desarrollado investigaciones centradas en sitios arqueológicos de menor escala, con el objetivo de comprender la dinámica territorial previa a la conquista española.

Los análisis locales, como en Tenango (Garza & Fernández, 2016), proponen cambios en el paisaje durante el Posclásico Mesoamericano y la Época Colonial, particularmente dentro de los asentamientos matlatzincas; sugiere que su territorio central (Mapa 3) se extendía desde Calixtlahuaca, Calimaya y Tenango hasta Coatepec-Harinas y Texcaltitlán. Generalmente se considera que son una serie de pueblos establecidos principalmente a lo largo de la cuenca superior del río Lerma, cuya expansión hacia las tierras bajas del sur se facilitó a través de pasos de montaña. En los sitios más distantes (Tenancingo, Ocuilan, Malinalco, Teotenango y Tecualoyan), las complejidades de los asentamientos están asociadas a su filiación cultural y paisajística e incluso se relacionan con las provincias de la cuenca del río Balsas (Smith y Berdan 1996; Gutiérrez, 2017). “Esta zona sirvió como paso complementario de recursos, así como ruta primordial hacia el suroeste de Mesoamérica, incluso durante la conquista española” (Garza & Fernández, 2016).

El desarrollo de las sociedades en la época prehispánica en la región sur del Estado de México ha sufrido numerosos cambios; los documentos que se produjeron para esta época y para los siglos subsecuentes son una fuente imprescindible de información que dan cuenta de la dinámica social.



Mapa 3. Provincia Tributaria con respecto al área de estudio.

La mayoría de los datos que fueron examinados nos permiten situar la ocupación prehispánica en la región para el periodo Posclásico tardío (1200- 1521d.C.), además de información de años posteriores a la conquista española. Los datos que han sido consultados enfatizan en el aspecto regional, comprendiendo la espacialidad de los asentamientos dentro del área de estudio.

“Dentro de la estructura interna del imperio Tenochca, Coatepec se insertó en la organización de la Triple Alianza al mando de Axayácatl contra el Matlatzinco, teniendo

una intensa actividad militar en el sur. Bajo el dominio del imperio antes mencionado, formó la provincia tributaria de Tollocan, incluyendo entidades como Ocuillan, Tenancingo, Coatepec, Xocotitlan, y Xiquipilco" (Carrasco Pizana, 1996: 359).

El Folio 34r del Códice Mendocino corresponde a la porción sur del actual Estado de México, en éste documento se hace mención de la provincia de Ocuilan en la Matrícula de Tributos (Barlow, 1992: 34), en este apartado se describe a dicha provincia tributaria junto con los pueblos de Tenancingo y Tequaloyan,

Hacia el S. XVI, una nueva organización político-territorial surgió, la Nueva España se configuraba y con ello, la administración y control de sus recursos, hacia 1546 d.C. se gesta uno de los documentos que sirvieron de base para entender la configuración espacial y poblacional de los asentamientos sujetos al dominio de los españoles *La Suma de Visitas* (García Castro,1999, 2013).

Dicho documento describe desde la perspectiva demográfica el Sistema de Encomiendas que caracterizó la organización política y social de la época (García Castro, 2013). de este modo García Castro, (2013) y Gerhard, 2000 aportan información acerca de las sociedades mesoamericanas que conocieron los españoles. A finales del S. XV y principios del S. XVI para el caso particular de Coatepec, se hace mención como un "estado menor dependiente de Tzacualpan junto con Cuitlapilco y Xaualztinco, entre 1520 y 1522 este asentamiento es tomado por los españoles. Posterior a la conquista española la conformación espacial fue distinta, siendo Coatepec un asentamiento sujeto del pueblo minero de Zacualpan, que recibe parte del usufructo producto de la actividad económica de la población" (Gerhard, 2000).

Coatepec es mencionado como Coatepeque una de las cuatro cabeceras de Çacualpa actualmente *Zacualpan* bajo la encomienda de Pedro de Salcedo. En este lugar hace referencia expresa de cerca de 400 casas con una población de "1000 hombres sin mujeres y niños" (García Castro, 2013; INEGI, 1999).

4. Metodología de investigación

El planteamiento metodológico se centra en la obtención y generación de información a partir de la aplicación de geotecnologías.

4.1 Fundamentos metodológicos

La parte medular de la disciplina arqueológica está estrechamente vinculada a los conocimientos teóricos y técnicos que desentrañan dudas acerca de las sociedades del pasado, para dar respuesta a estas interrogantes, es necesario hacerlo a través de la observación de su cultura material que es el instrumento que sirve de vía para resolver los supuestos planteados. Además, la perspectiva geotecnológica complementa lo anterior al permitir la localización de sitios mediante técnicas no invasivas y posibilita la reconstrucción de contextos arqueológicos en los paisajes antiguos.

“Se hace cada vez más importante el papel de la obtención de información sobre aspectos geográficos e informáticos y su manifestación espacial, territorial y regional” (Mateo Rodriguez, 2008). Por ello en la actualidad es más recurrente el uso de estos recursos en dichas disciplinas. Con lo anterior el proceso de investigación va desde la prospección arqueológica con métodos propios de la disciplina, el análisis del material obtenido y posteriormente la representación cartográfica de los datos recabados en campo que sirvan para explicar desde la geografía del paisaje la distribución socio-espacial de los asentamientos que tuvieron lugar en la época del Posclásico tardío.

Los estudios de Patrón de Asentamiento están basados en la premisa de que el análisis de la arquitectura y los espacios indican una ocupación por poblaciones humanas y el aprovechamiento del medio. Para Morales el tema de patrón de asentamiento ya se ha discutido por diversos investigadores mismos que han propuesto y aplicado diferentes modelos de análisis e interpretación (Wilk & Ashmore, 1988).

Wendy Ashmore, propone que toda clasificación de las unidades de análisis y patrones de asentamiento debe tener al menos dos enfoques: 1) Un inventario de los elementos que componen un patrón de asentamiento y 2) un esquema para la integración de las

unidades en una jerarquía de asentamientos que aumentan en tamaño y complejidad organizacional (Ashmore, 1981:43). Estos niveles de análisis participan en configuración interna dentro de un área de estudio y están determinados por el *patrón de asentamiento*, un elemento de observación que se define como:

> "La manera en la cual el hombre se dispuso sobre el paisaje en que vivió. Se refiere a las viviendas, a su arreglo, y a la naturaleza y disposición de otros edificios concerniente a la vida de la comunidad. Estos asentamientos reflejan el ambiente natural, el nivel de tecnología en el cual los constructores funcionaron, y a varias instituciones de interacción social y control que la cultura mantuvo. Porque los patrones de asentamiento son, en gran parte, directamente formados por necesidades culturales muy frecuentes, y ofrecen un punto de partida estratégico para la interpretación funcional de las culturas arqueológicas" (Willey, 2017).

El patrón de estos asentamientos refleja no sólo la tecnología y las instituciones, sino también la interrelación funcional de los sitios dentro de una región (Sanders et al., 1979).

El término región tiene una esencia geográfica y se designa como una porción de la superficie terrestre con un marco de referencia, la geografía regional se interesó más por ser contenedor de fenómenos como objetos de la descripción de los distintos espacios de conceptualización (Delgado Mahecha, 2003, 26) .Delgado señala entonces que la preocupación de la geografía regional con o sin matices históricos, se centra en las cosas y los procesos de transformación de los paisajes.

"Con el fin de explicar las implicaciones que existen en el contexto arqueológico a nivel espacial, la regionalización ha resultado útil en diversos trabajos de esta índole no se trata de un concepto ajustable a cada contexto de orden social pero, a partir del enfoque de otras disciplinas se puede acotar en términos físicos, históricos y geográficos. De tal manera que bajo estos criterios posibilite la organización de información de un territorio determinado por factores de orden topográfico y socio histórico y que se recurre a este concepto como la aplicación de una herramienta

metodológica como la prospección para la comprensión de procesos, pero sobre todo de patrones útiles para el entendimiento del paisaje" (Nieto Hernández, 2010).

La prospección es una fase de clarificación metodológica que responde a una aproximación específica de aspectos concretos del registro arqueológico (Ruíz Zapatero & Burillo Mozota, 1988).Es la estrategia que mediante técnicas y métodos se obtiene información arqueológica de un territorio, esta se puede utilizar para la localización de sitios mediante su registro y análisis.

En los últimos años, la prospección arqueológica ha ganado adeptos, incluso, desde una perspectiva regional. Existen métodos específicos utilizados para la localización de artefactos y elementos en superficie, los cuales, en la mayoría de los casos, parten de una investigación documental y se insertan dentro de una sistematización.

4.1.1 Enfoque metodológico.

"El arqueólogo accede a su recurso de información con la ayuda de instrumentos elaborados metodológicamente a partir de teorías, este fundamento está explícita o implícitamente cargado de la *teoría de la observación* a partir de cualquier prueba empírica" (Lull, 1988).

Es decir; es un procedimiento práctico para obtener, registrar, analizar y presentar información, para Gándara (2011), el enfoque de la *teoría observacional*, justifica los procesos de identificación, análisis y representación de los datos, además establece límites de confiabilidad (Gándara, 2011: 54-55); el método como procedimiento lógico inserta las técnicas utilizadas para la obtención de información del patrón de asentamiento.

En este sentido la investigación será de corte mixto incluyente complementario, dado que su alcance intentará dar un diagnóstico acerca de las condiciones del patrón de asentamiento prehispánico y complementario porque caracterizará las variables observadas en el trabajo de campo por su objeto de estudio será sistémico.

4.1.2 Alcances y limitaciones

A través de estudio cuantitativo y cualitativo, la presente investigación pretende, mediante la obtención de información en campo y su tratamiento en gabinete, abordar de manera longitudinal a un escenario explicativo mediante las etapas, exploratoria con la adquisición de información en campo y las fuentes históricas, descriptiva con la organización de la información recabada, y correlacional con el análisis de las variables observadas en las dos primeras etapas. Dentro de las limitaciones, las hemos considerado en cuatro tipos; actividades respecto a la aplicación de instrumentos en campo, recursos tecnológicos para la prospección, factores temporales y delimitación territorial en la región. Articulando estrategias específicas de recolección y análisis para cada factor metodológico según se detalla en el siguiente apartado.

4.1.3 Diseño metodológico general

El diseño metodológico es propuesto mediante un proceso secuencial de tres fases o etapas, inicia con una exploración de contexto y descripción de los hallazgos, con la adquisición de información documental, continúa con el análisis de las correlaciones entre las variables y termina con la interpretación explicativa de los patrones identificados. Para tal efecto, el cuadro 1 muestra la finalidad, secuencia temporal, asignación de variables y cronología, permitiendo comprender el objeto de estudio con un enfoque longitudinal de tipo observacional, como clave para la reconstrucción de procesos culturales a partir de la evidencia material y contextual.

Cuadro 1. Diseño metodológico.

Diseño metodológico	Fase A	Fase B	Fase C
Finalidad	1. Exploratoria	1. Descriptiva	1. Analítica
	2. Descriptiva	2. Correlacional	2.Explicativa
Secuencia Temporal	Longitudinal		
Control de Asignación de Variables	Observacional		
Cronología	Prospectivo	Prospectivo	Retrospectivo

Dado que el estudio tiene como propósito: explicar la configuración del paisaje, sus patrones y procesos con respecto al patrón de asentamiento de los sitios prehispánicos del Posclásico tardío (1200-1521d.C) localizados en Coatepec Harinas, Estado de México. En el siguiente cuadro se describen las etapas metodológicas, metas y los productos propuestos en la investigación, (cuadro 2).

Cuadro 2. Alineación y precisión

No.	Objetivos Específicos	Preguntas de Investigación	Etapas Metodológicas	Metas	Productos
1	Establecer una estrategia con la integración de herramientas geotecnológicas para identificar y caracterizar rasgos geográficos de origen antrópico en paisajes de difícil acceso y vegetación densa en Coatepec Harinas.	¿Cuál es la estrategia pertinente para generar un sistema clasificatorio que permite una recolección de información adecuada a las características geográficas del paisaje a estudiar?	Recolección y sistematización de información proveniente de investigaciones previas y documentos históricos. Prospección Arqueológica Reconocimiento Superficial Fotointerpretación ,Elaboración de cartografía base Recorrido Superficie	Generar un marco referencia de trabajos previos.	1.-Cuadro resumen de investigaciones arqueológicas previas al área de estudio. 2.- Cuadro resumen de documentos históricos. 3.-Carpeta con cartografía histórica del área de estudio. 1.-Mapa de Geología 2.-Mapa Litológico 3.-Mapa Edafológico 4.-Mapa de Uso de Suelo 5.-Carta Topográfica 6.-Base de datos con localización y atributos de los sitios registrados.
2	Analizar la relación existente entre la topografía (pendientes, elevaciones) y la ubicación de los asentamientos prehispánicos en la región,empleando modelos digitales del terreno y herramientas de análisis morfométrico espacial.	¿Qué relación existe entre la topografía y vegetación (pendientes, elevaciones) y la ubicación de evidencia arqueológica al interior de la región de Coatepec Harinas?	Prospección Arqueológica(etapa 2) Reconocimiento Superficial Elaboración de cartografía temática Recorrido Superficie.	Trabajo de campo, Recorrido arqueológico de superficie, registro de sitios arqueológicos.	1.-Cartografía temática de evidencia registrado en campo.1.-
3	Caracterizar las propiedades del patrón de asentamiento de los sitios arqueológicos localizados en la región de Coatepec Harinas utilizando las capacidades de análisis geoespacial con el fin de tener una comprensión de la configuración espacial de la evidencia recuperada.	¿Cuáles son las características del patrón de asentamiento de los sitios localizados en la región de Coatepec Harinas?	. y Percepción remota mediante dispositivos satelitales y RPAS	Trabajo de campo, Recorrido arqueológico de superficie (etapa 2), registro de sitios arqueológicos. Trabajo de campo (Etapa 3) recolección de datos mediante vuelo con dispositivo RPAS y cámara multiespectral	Cartografía temática. 1.-Ortofotos. 2.-Nubes de puntos de los sitios de Prospectados.

4	Evaluar la incidencia de la disponibilidad de los recursos sobre el paisaje geoespacialmente mapeados respecto a los asentamientos prehispánicos.	¿Cómo incide el paisaje en la disposición de estos asentamientos?	Discusión metodológica a partir de la sustentación teórica de la geografía y arqueología del paisaje aplicados al área de estudio.	Sistematizar los datos recopilados en campo. Jerarquizar los datos recopilados en campo. Discutir sobre los resultados obtenidos en la investigación en contraste con los aspectos teóricos, metodológicos y técnicos que sirvieron de base para la investigación.	1.-Análisis de Resultados. 2.-Discusión. 3.-Conclusión.

Respecto a la operacionalización, el estudio será de visión sistémica abordado desde la perspectiva de teoría de sistema aplicada a la arqueología (Watson et al., 1987), centrado por supuesto en el análisis de la espacialidad de la cultura material. Será además inicialmente de carácter descriptivo, longitudinal y de retrospectiva puesto que estudia la evidencia material que se produjo en el pasado y el periodo de estudio es amplio.

Esto derivará en un estudio consistente en la mayor concentración de elementos, en el uso de las fuentes históricas, los documentos, datos etnográficos y la recopilación de evidencia material en donde puedan contrastarse con lo anterior (cuadro 3), además de un análisis del espacio físico.

Para abordar dicho análisis respecto los estudios de patrón de asentamiento nos basaremos en tres fases que se desarrollarán a detalle en el apartado 4.2:

a) **Acopio de Información y Contextualización**, con la recolección de antecedentes de trabajos arqueológicos, históricos y geográficos que determinan a la región, además de la fundamentación teórica respecto al tema de patrón de asentamiento.

b) **Prospección Arqueológica y Geoespacial**, con la recopilación de variables y criterios que se ocupan para la obtención de información previo al recorrido de superficie y de este modo establecer la distribución preliminar de posibles sitios arqueológicos.

c) **Prospección Satelital, registro arqueológico remoto, y validación de campo.**, como herramienta primordial para la representación de información desde en prospección arqueológica en combinación con percepción remota satelital, y de VANT, la comparación, el análisis e interpretación de los datos obtenidos durante la fases anteriores y el recorrido superficial.

El siguiente diagrama muestra el flujo de trabajo desarrollado en la investigación y que está determinado por las tres fases previamente mencionadas (Figura 5).

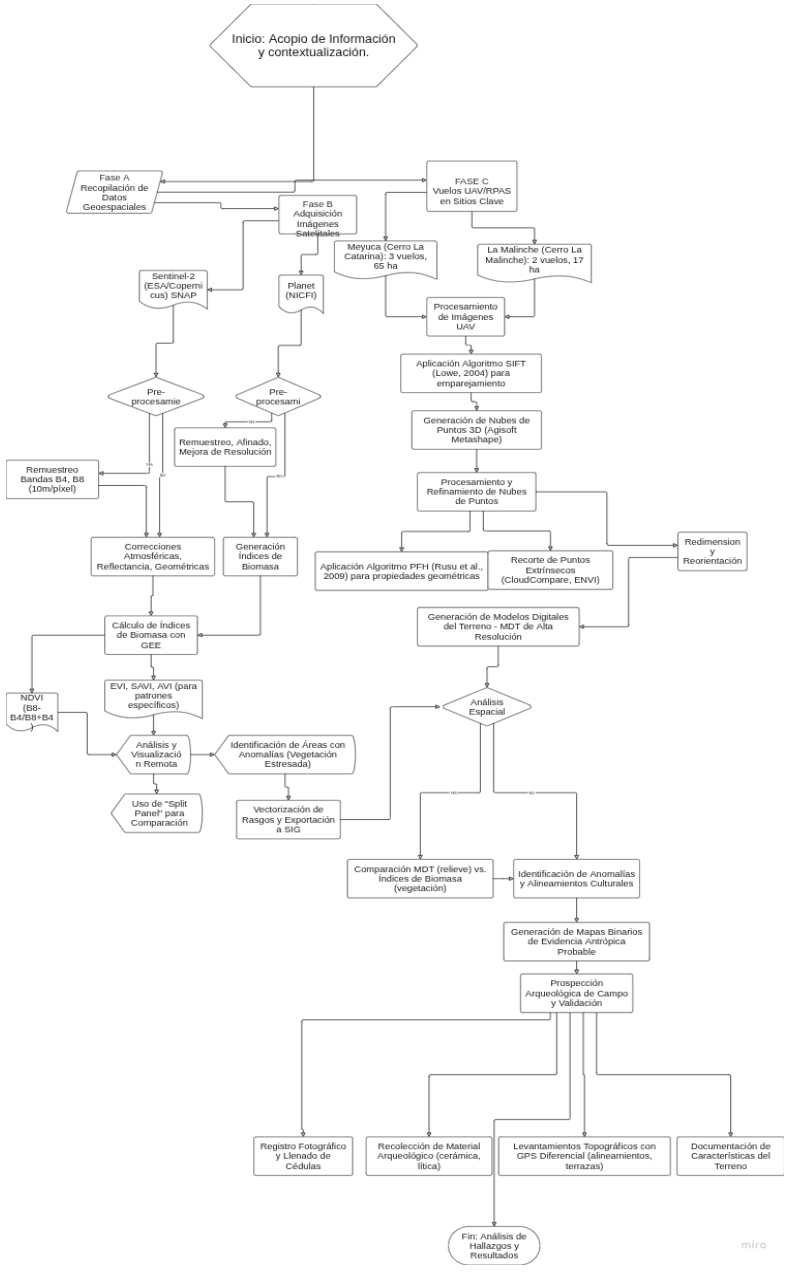


Figura 5. Flujo de trabajo.

El Diagrama correspondiente al diseño metodológico se puede consultar en el siguiente enlace.

Cuadro 3. Operacionalización.

Fase de Investigación	No.	Factor	Variable	Unidad	Método Específico	Fuente	Obra	Producto
A	**1**	Información proveniente de investigaciones previas.	Investigaciones arqueológicas	Ficha bibliográfica	Investigación documental	Documental	Archivos técnico del INAH	Capítulo de Antecedentes.
			Referencias Históricas	Ficha Bibliográfica	Investigación Documental , Método Histórico, Crítica de Fuentes	Documental	Publicaciones	
							Archivo General de la Nación	
							Archivos Municipales	
							Cartografía S. XVI AGN	
							Códices Prehispánicos (Códice Mendoza, Matrícula de Tributos)	
			Estado del arte	Ficha de trabajo	Investigación Documental , Método Histórico, Crítica de Fuentes	Documental	Referencias bibliográficas de temas de Positivismo, Geografía del Paisaje, Geografía Histórica, Arqueología del Paisaje, Nueva Arqueología, Nueva Arqueología, Nueva Geografía, Geotecnologías y estudios de caso aplicados a contextos similares.	
				Ficha de trabajo				
				Ficha textual de cita directa				
				Ficha de sinópsis				
				Ficha de Traducción				
				Ficha de interpretación o comentario				
B	**2**	Prospección sistemática de datos geográficos.	Geología	Superficie en hectáreas por tipo	Investigación cartográfica, Método vectorial y cartodiagráma	Documental	Servicio Geológico Nacional	Cartografía temática de unidades de paisaje: (litología, tipo de suelo, uso de suelo)
			Litología				INEGI	
			Edafología				Prontuario de Información Geográfica del Municipio de Coatepec Harinas	
			Uso de Suelo					
		Prospección Sistemática de datos arqueológicos.	Topografía		Prospección arqueológica, método levantamiento topográfico	Trabajo de campo	Datos geográficos observados en campo.	Carta topográfica con resultados de la prospecciòn.
C	**3**	Estrategia de recolección de datos de superficie.	Geomorfología	Clasificación de rasgos.	Reconocimiento de superficie. Método vectorial y cartodiagráma	Trabajo de campo	Clasificación de rasgos acorde a diccionario de geomorfología, José Lugo Hubp	Cartografía de unidades geomorfológicas.
			Uso de Suelo	Porcentaje			Atributos de los de la evidencia arqueológica	Base de datos con las variables
			Pendiente	Porcentaje				

			Vegetación	Porcentaje			observada durante el reconocimiento superficial.	observadas en la etapa de recorrido y reconocimiento arqueológico.
			Modificación del Paisaje	Porcentaje				
			Material Arqueológico	Densidad por tipo de material; Alta, media, baja.				
			Arquitectura	Presencia/Ausencia				
	4	Diagnóstico e identificación de sitios arqueológicos mediante Tecnologías de Información Geográfica.	Geomorfología	Clasificación de rasgos.	Prospección arqueológica y reconocimiento superficial intra-sitio. Método topográfico.	Trabajo de campo	Obtención de datos mediante TIG, RPAS	Cartografía con MDE y MDS con representación de anomalías registradas en campo.
			Uso de Suelo	Porcentaje				
			Pendiente	Porcentaje				
			Vegetación	Porcentaje				
			Modificación del Paisaje	Porcentaje				
			Material Arqueológico	Densidad por tipo de material; Alta, media, baja.		Trabajo de gabinete	Tipología y jerarquía de sitio.	Mapa de la evidencia identificada al interior de los sitios.
			Arquitectura	Presencia/Ausencia				

En cuanto a la validación se fundamenta en la integración , como el uso de las tecnologías de información geográfica, para garantizar la confiabilidad de los datos de cada fase. El acopio de información y contextualización se contrasta con la cartografía temática y el trabajo de campo asegurando la estandarización de las variables observadas respecto a los referentes teóricos antes mencionados, prospección, diseño de la recolección de datos en campo, y su posterior sistematización. De ahí que sea importante la validación de datos.

Dicha Validación se realiza mediante la comparación de las anomalías identificadas con las TIG respecto a la evidencia física registrada, (datos cualitativos y cuantitativos) garantizado la replicabilidad del método en contextos arqueológicos con componentes geotecnológicos.

4.2 Materiales y métodos

Para explicar la configuración del paisaje, sus patrones y procesos con respecto al patrón de asentamiento de los sitios prehispánicos del Posclásico tardío (1200-1521d.C) localizados en Coatepec Harinas, Estado de México, se consideraron las siguientes etapas metodológicas:

4.2.1 Fase A. Acopio de información y contextualización.

Además de la información preliminar, se revisó cartografía histórica correspondiente a la región de Coatepec Harinas, se consultaron documentos cuya manufactura data de los siglos S. XVI y XVII, hacen referencia a los asentamientos de Coatepec, lo anterior refuerza el planteamiento de que estos pueblos son de origen prehispánico. Esto propició una regionalización preliminar y la identificación de sitios con alto potencial de información arqueológica. Además, se consideraron los componentes geológicos, climáticos, orográficos, hídricos y edafológicos; dichas características influyen de manera particular sobre las actividades humanas pretéritas y actuales y definen la forma en que los asentamientos humanos se distribuyeron a lo largo y ancho de la región.

4.2.1.1. Investigación documental y contextualización.

El estudio precisó de revisión documental y cartográfica. Para su desarrollo, se consultaron registros históricos de los siglos XVI y XVII del Archivo General de la Nación (AGN) de México, los cuales contenían menciones explícitas de los asentamientos prehispánicos de: Coatepec, Meyuca, Acuitlapilco y Chiltepec entre otros. Dichos asentamientos corresponden al municipio actual de Coatepec Harinas Esta información, complementada con datos de investigaciones arqueológicas etnohistóricas y etnográficas previas, fueron fundamentales para establecer contexto de referencia en el apartado 3.1 y 3.2 lo que permitió comprender el patrón de asentamiento prehispánico y delimitar lugares con alto potencial de contener hallazgos arqueológicos, sentando las bases para las fases subsecuentes de la investigación.

4.2.1.2 Descripción del área de estudio

La selección del área se propuso basado en las fases antes descritas como herramienta primordial para la representación espacial.

La descripción del área de estudio consideró dentro de las implicaciones arqueológicas, realizar un estudio consistente en la mayor concentración de elementos, para lograrlo, se hizo uso de las fuentes históricas, datos etnográficos y la recopilación de evidencia material en donde puedan contrastarse con lo anterior, además de un análisis del espacio físico. Hemos considerado como criterios para la delimitación del área basados en Grave Tirado, (2000): 1) criterio geográfico; 2) criterio cultural y; 3) criterio logístico, como se describió anteriormente primero corresponde a los datos concernientes al medio físico, el segundo a los datos recabados de las fuentes históricas e investigaciones previas y el tercero a los alcances de la investigación.

4.2.1.2.1 Aspectos geológicos.

La evolución geológica del área se asocia a la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) (Gómez-Tuena *et al.* 2005). En la actualidad, debido a la abundancia de fechamientos isotópicos obtenidos en las últimas tres décadas, es claro que la individualización de la FVTM como una entidad geológica distintiva de rocas ígneas en México ocurrió durante el Mioceno medio y tardío. Respecto a la edafología el suelo predominante es Andosol con (52.67%), enseguida Luvisol (21.45%), Cambisol (9.34%), Vertisol (9.19%), Leptosol (5.45%) y Phaeozem (0.98%).

4.2.1.2.2. Descripción fisiográfica

Se ubica dentro de dos sistemas fisiográficos: al norte forma parte de la Provincia del Eje Neovolcánico, Subprovincia Lagos y Volcanes del Anáhuac, la cual corresponde a las últimas estribaciones del Xinantécatl y al sur forma parte de la Provincia de la Sierra Madre del sur, Subprovincia Sierras y Valles Guerrerenses, situación que propicia la complejidad topográfica, sierras de cumbres extendidas y laderas escarpadas, lomeríos con llanos aislados y valle de laderas tendidas con mesetas, así como mesetas de aluvión antiguo y mesetas de aluvión antiguo con cañadas (Gómez-Tuena *et al.,* 2005). El sistema de sierras y cumbres extendidas y laderas escarpadas se ha

asociado a rocas ígneas de composición máfica a intermedia, principalmente basaltos y andesitas (Servicio Geológico Mexicano, 2013).

4.2.1.2.3. Descripción hidrográfica.

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen la región tiene un clima CW, templado subhúmedo con lluvias en verano. Presenta una precipitación anual de entre 1100 a 2000 mm al año, y su temperatura media anual oscila entre 6 y 20 ° C. La máxima incidencia de lluvias se presenta en los meses de junio, julio, agosto y septiembre. Esto contribuye a la segmentación del paisaje respecto a su cobertura geomorfológica, que depende en gran medida al modelado topográfico.

El paisaje de la cobertura regional, corresponde a la región hidrológica del Balsas, a la cuenca de Amacuzac, subcuenca del Alto amacuzac, con un importante afluente de corrientes de agua perennes que incluyen: Nava, El Jabalí, Los Tizantes, Agua Blanca, Sabanillas, La Tortuga, Chiquihuitero, Tecolotepec, Salto La Providencia, Chiltepec, El Molino, Las Flores, Salto, Tlapala, De Las Flores y Almoloya. Las corrientes intermitentes reciben por nombre: Chiquihuitero, Tequimilpa, Culebrillas, Chiltepec, El Salto, Los Capulines, Tía Nieves, Utlapilco, La Fragua, El Paso, Los Hernández, Las Mesas y Malina (INEGI, 1999)

4.2.1.2.4. Aspectos antrópicos.

En el año en que se recabaron los datos del prontuario de información (1999), la superficie donde se desarrolla la agricultura corresponde a un 45%, el bosque corresponde a un 51% pastizal con 2.35% y zona urbana con 0.92%. Es importante precisar que en los últimos años el medio geográfico ha sufrido importantes cambios, como consecuencia de las actividades económicas. El auge de la producción de flores ornamentales para exportación dentro de esta región, ha generado modificaciones profundas en el uso del suelo, causando importantes modificaciones que han impactado en la flora y fauna originales. Visiblemente se puede apreciar una intensa transformación del entorno fundamentalmente con la construcción de invernaderos

apostados en las laderas y planicies y mesetas; mismos que han avanzado desplazando a la vegetación original (selvas y matorrales).

4.2.2 Fase B. Prospección Arqueológica y Geoespacial.

La prospección arqueológica, recopila las variables y criterios que se ocupan para la obtención de información en el recorrido de superficie, para intentar establecer la distribución de los sitios arqueológicos. Se desarrolló una base de datos en un sistema de información geográfica que contiene datos vectoriales, rasterizados y tablas con información geológica, edafológica, litológica, hidrográfica y topográfica de la región. Se generaron límites provisionales del área de estudio, modelos digitales de elevación, área de muestreo en los sitios con mayor información, etc. A partir de estos datos se segmentan las coberturas geomorfológicas.

4.2.2.1 Caracterización de coberturas geomorfológicas.

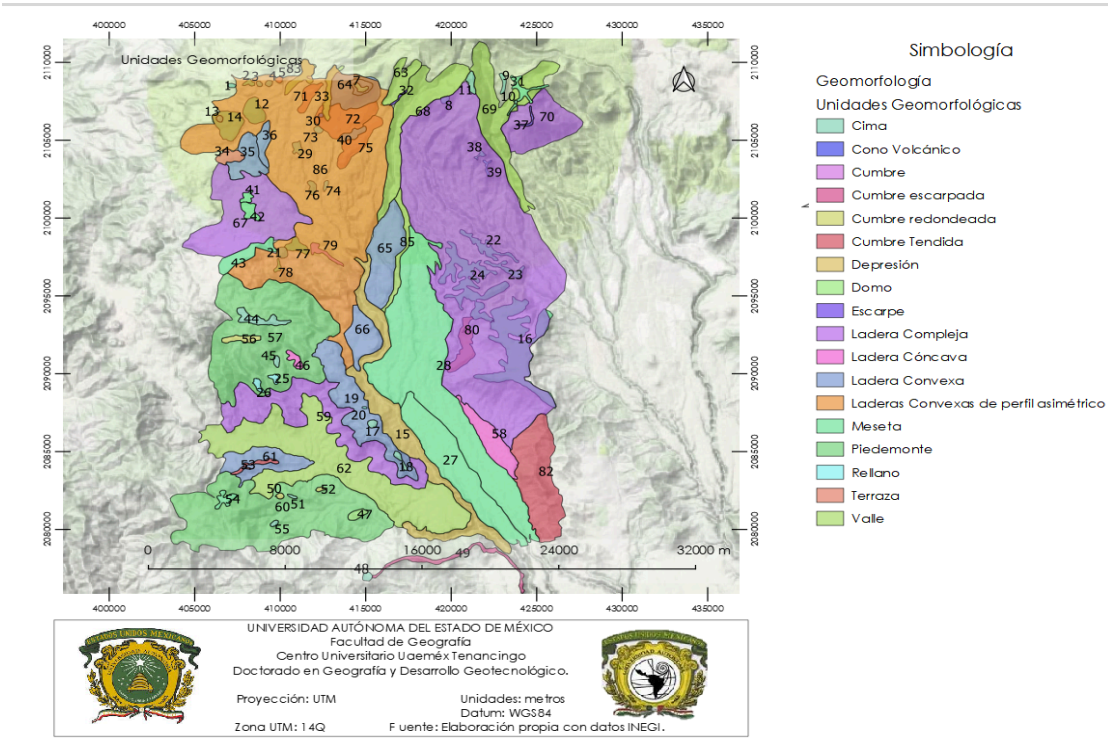
En adelante nos referiremos a cobertura geomorfológica aquella que excede el límite del área de estudio propuesta para el recorrido superficial, dicha cobertura fue definida por un criterio mayor en razón de las formaciones geológicas visibles mayores a los eventos observables a una escala mayor. Es decir, para poder entender una forma específica del relieve como una ladera por ejemplo tuvimos que recurrir a entender el proceso geológico que le antecede, a partir de su geomorfogénesis, entendida como “el origen de los procesos endógenos y exógenos en términos de su historia de desarrollo” (Lugo Hubp, 2011). Se caracterizaron 31 coberturas geomorfológicas, de las cuales podemos distinguir que corresponden al área de estudio las siguientes;9, 25, 26, 28 y 29, (mapa 4). Estas se describen a continuación:

“La cobertura 9 se ubica en la parte suroeste del área de estudio, en su mayoría corresponde a roca; arenisca-conglomerado, clase sedimentaria, de la era cenozoica específicamente del neógeno.

La cobertura 25, comprende la parte norte del área de estudio, está definida por el sistema volcánico local, corresponde al flanco sur del Nevado de Toluca. En ella se pueden observar al menos dos secuencias geológicas, asociados a depósitos de material con procesos de intemperismo, de erosión y acumulación. En términos

geológicos, la primera secuencia es de composición andesítica, de la clase ígnea extrusiva, de la era cenozoica y del neógeno, la segunda secuencia es de carácter es brecha sedimentaria y también del cenozoico.

La cobertura 26 se compone de dos secuencias, la primera data del cuaternario, y está formada por basalto y brecha volcánica ígnea extrusiva y la segunda es del tipo arenisca conglomerado, del neógeno, esta última descripción se tiene también en la cobertura 28, en la parte central del área de estudio, la cobertura 29, presenta una complejidad litológica, con contenido meta volcánico y metasedimentario, ambos del periodo mesozoico”



Mapa 4. Unidades geomorfológicas

4.2.2.1.1 Caracterización y clasificación de unidades geomorfológicas

La caracterización de las unidades geomorfológicas se circunscribe al área de estudio, y comprende cuatro coberturas geomorfológicas de las 31 descritas previamente. Considerando la complejidad topográfica de la región, optamos por determinar las formas topográficas del relieve, basándonos en el grado de pendiente del relieve, y la red de drenaje. Con este enfoque se digitalizaron las principales formas del relieve, haciendo uso de software. Contrastar las topoformas permite una valoración más detallada. Se contrastaron las formas actuales del relieve con los tipos de roca, clase, y periodo, contra las productos de servicio geológico mexicano (SGM). Esto nos dio una primera aproximación de la formación del relieve y los procesos geomorfológicos. Retomando a (Espinosa et al., 2014), podemos entender el modelado del paisaje como una serie de procesos primero, geológicos entendiendo la tectónica y vulcanismo (Procesos endógenos) y después los exógenos, los procesos erosivos, de transporte y acumulación observados principalmente en la complejidad de la red drenaje. En el cuadro 4 se muestran los 84 rasgos clasificados en 18 tipos de unidades geomorfológicas, esto contribuyó a la oportuna apreciación del paisaje, previo a la temporada de campo para recorrido de superficie.

Esta complejidad estriba principalmente el la resistencia de la roca y el desarrollo del suelo que facilita los procesos de modelado del relieve, por ejemplo la unidad 15 que es la depresión más abrupta y accidentada tiene es más antigua y en combinación con el tipo de roca, metasedimentaria y meta volcánica, propician el deterioro de valle hasta convertirse una depresión de estas características. El inicio de esta topoforma se encuentra en la parte distal del Nevado de Toluca, lo que en consecuencia propicia la complejidad topográfica y la heterogeneidad de los patrones de drenaje que modelan el paisaje.

Cuadro 4. Lista de Unidades Geomorfológicas.

No.	Geoformas	Tipo	Era	Sistema
1	Cima	Basalto	Cenozoico	Cuaternario
2	Meseta	Brecha sedimentaria	Cenozoico	Neógeno
3	Cima	Brecha sedimentaria	Cenozoico	Neógeno
4	Cima	Brecha sedimentaria	Cenozoico	Neógeno
5	Terraza	Andesita	Cenozoico	Neógeno
6	Cima	Andesita	Cenozoico	Neógeno
7	Ladera Convexa	Andesita	Cenozoico	Neógeno
8	Cima	Andesita	Cenozoico	Neógeno
9	Cima	Andesita	Cenozoico	Neógeno
10	Cima	Andesita	Cenozoico	Neógeno
11	Cima	Andesita	Cenozoico	Neógeno
12	Meseta	Andesita	Cenozoico	Neógeno
13	Cima	Basalto	Cenozoico	Cuaternario
14	Meseta	Basalto	Cenozoico	Cuaternario
15	Depresión	Metavolcánica	Mesozoico	
16	Meseta	Andesita	Cenozoico	Neógeno
17	Cima	Brecha Sedimentaria	Cenozoico	Neógeno
18	Cima	Depósito Piroclástico	Cenozoico	Paleógeno
19	Ladera Convexa	Brecha sedimentaria	Cenozoico	Neógeno
20	Cima	Brecha sedimentaria	Cenozoico	Neógeno
21	Cima	Brecha Volcánica	Cenozoico	Cuaternario
22	Meseta	Brecha sedimentaria	Cenozoico	Neógeno
23	Meseta	Brecha sedimentaria	Cenozoico	Neógeno
24	Meseta	Arenisca Conglomerado	Cenozoico	Neógeno
25	Reliano	Brecha Volcánica	Cenozoico	Cuaternario
26	Reliano	Brecha Volcánica	Cenozoico	Cuaternario
27	Meseta	Arenisca-Conglomerado	Cenozoico	Neógeno
28	Meseta	Conglomerado	Cenozoico	Paleógeno
29	Cima	Brecha Sedimentaria	Cenozoico	Neógeno

30	Cono Volcánico	Brecha Sedimentaria	Cenozoico	Neógeno
31	Meseta	Andesita	Cenozoico	Neógeno
32	Escarpe	Andesita	Cenozoico	Neógeno
33	Valle	Brecha Sedimentaria	Cenozoico	Neógeno
34	Terraza	Basalto	Cenozoico	Cuaternario
35	Ladera Convexa	Depósito Piroclástico	Cenozoico	Paleógeno
36	Ladera Convexa	Brecha Sedimentaria	Cenozoico	Neógeno
37	Escarpe	Andesita	Cenozoico	Neógeno
38	Meseta	Andesita	Cenozoico	Neógeno
39	Reliano	Andesita	Cenozoico	Neógeno
40	Ladera Convexa	Brecha Sedimentaria	Cenozoico	Neógeno
41	Meseta	Depósito piroclástico	Cenozoico	Paleógeno
42	Meseta	Depósito piroclástico	Cenozoico	Paleógeno
43	Meseta	Brecha Volcánica	Cenozoico	Cuaternario
44	Cima	Basalto	Cenozoico	Cuaternario
45	Cima	Brecha Volcánica	Cenozoico	Cuaternario
46	Ladera Cóncava	Depósito piroclástico	Cenozoico	Paleógeno
47	Domo	Metavolcánico	Mesozoico	
48	Cima	Metavolcánico	Mesozoico	
49	Cumbre escarpada	Dacita	Cenozoico	Neógeno
50	Cumbre redondeada	Metavolcánico	Mesozoico	
51	Cima	Metavolcánico	Mesozoico	
52	Cumbre redondeada	Metavolcánico	Mesozoico	
53	Cumbre Tendida	Arenisca	Cenozoico	Neógeno
54	Meseta	Arenisca	Cenozoico	Neógeno
55	Cima	Arenisca	Cenozoico	Neógeno
56	Cumbre redondeada	Basalto	Cenozoico	Cuaternario
57	Piedemonte	Basalto	Cenozoico	Cuaternario
58	Ladera Cóncava	Arenisca-Conglomerado	Cenozoico	Neógeno
59	Ladera Compleja	Metasedimentaria	Mesozoico	
60	Piedemonte	Depósito Piroclástico	Cenozoico	Paleógeno
61	Ladera Convexa	Arenisca-Conglomerado	Cenozoico	Neógeno

62	Valle	Conglomerado	Cenozoico	Cuaternario
63	Valle	Andesita	Cenozoico	Neógeno
64	Ladera Convexa	Brecha Sedimentaria	Cenozoico	Neógeno
65	Ladera Convexa	Arenisca Conglomerado	Cenozoico	Neógeno
66	Ladera Convexa	Brecha Sedimentaria	Cenozoico	Neógeno
67	Ladera Compleja	Depósito Piroclástico	Cenozoico	Paleógeno
68	Valle	Brecha Sedimentaria	Cenozoico	Neógeno
69	Valle	Andesita	Cenozoico	Neógeno
70	Ladera Compleja	Andesita	Cenozoico	Neógeno
71	Terraza	Brecha Sedimentaria	Cenozoico	Neógeno
72	Terraza	Brecha Sedimentaria	Cenozoico	Neógeno
73	Reliano	Brecha Sedimentaria	Cenozoico	Neógeno
74	Reliano	Brecha Sedimentaria	Cenozoico	Neógeno
75	Terraza	Brecha Sedimentaria	Cenozoico	Neógeno
76	Cima	Brecha Sedimentaria	Cenozoico	Neógeno
77	Meseta	Basalto	Cenozoico	Cuaternario
78	Meseta	Basalto	Cenozoico	Cuaternario
79	Cumbre	Basalto	Cenozoico	Cuaternario
80	Cima	Metasedimentaria	Mesozoico	
81	Terraza	Arenisca-Conglomerado	Cenozoico	Neógeno
82	Cumbre Tendida	Metavolcánica	Mesozoico	
83	Valle	Brecha Sedimentaria	Cenozoico	Neógeno
84	Ladera Compleja	Brecha sedimentaria	Cenozoico	Neógeno
85	Valle	Brecha sedimentaria	Cenozoico	Neógeno
86	Laderas Convexas de perfil asimétrico	Brecha Sedimentaria	Cenozoico	Neógeno

4.2.2.2 Análisis con Tecnologías de Información Geográfica (TIG).

El componente TIG fue el eje central del trabajo, permitiendo la detección y el análisis espacial de anomalías con potencial de rasgo antrópico a distintas escalas.

Basado en sensores remotos satelitales, y contrastado con documentos e informantes locales, el asentamiento de Meyuca de Morelos y particularmente el cerro La Catarina (presentan altos potencial arqueológico, como lo evidencian los artefactos, estructuras de terrazas, muros discontinuos y saqueos (Figura. 6).

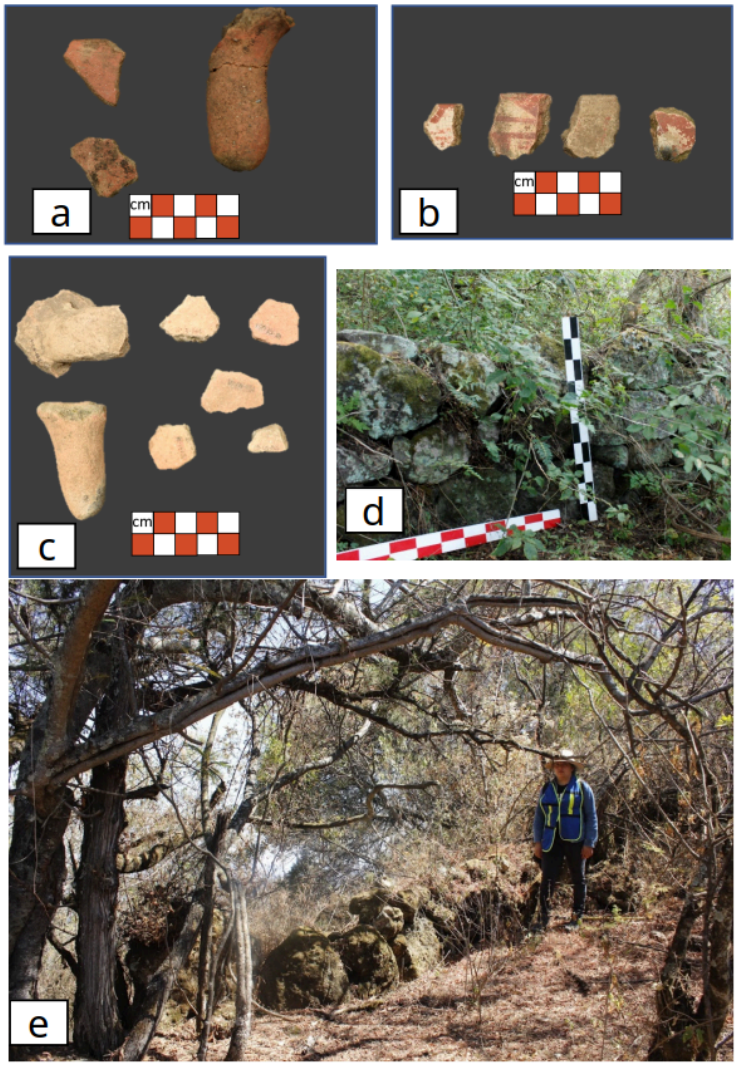


Figura 6. Evidencia arqueológica identificada en el sitio de Cerro la Catarina.

a) Fragmento de vasija cerámica; b) Fragmento cerámico decorado Matlatzinca; c) Fragmento de vasija cerámica; d) estructura de rocas en ladera; y e) Alineamiento de rocas en la cima.

4.2.3. Fase C. Prospección Satelital, registro arqueológico remoto, y validación de campo.

Con la información generada derivada de las TIG y la recolectada en campo se trabaja en la generación de una base de datos a partir de los datos de la cédula de registro, esta, se concentra en una cuenta de Google Drive junto con el registro fotográfico obtenido en campo, los datos están asociados mediante las coordenadas geográficas y que eventualmente se podrán desplegar en la nube mediante un visualizador de mapas en la web.como se muestra en el siguiente enlace.

En paralelo se alimentan los datos en el SIG (QGIS 3.34), con la información recabada del GNSS diferencial, esta, se comparó con los datos procesados a partir de los vuelos, la generación de la nube de puntos y la fotogrametría teniendo como resultado la segmentación de la vegetación para obtener el modelo digital del terreno (MDT).

El resultado de este proceso reúne la información del GNSS y el VANT, de forma preliminar se observan coincidencias de los rasgos topográficos respecto a los rasgos antrópicos registrados en campo.

4.2.3.1. Acceso a información satelital (GEE) y SNAP.

Google Earth Engine (GEE), es una plataforma de geomática que permite la conexión a las librerías virtuales con imágenes satelitales de diferentes sensores en el mundo. Mediante secuencias de código permite seleccionar y procesar imágenes de diferentes sensores satelitales. Para el procesamiento avanzado de imágenes en gabinete, se empleó SNAP (Sentinel Application Platform), un software de la Agencia Espacial Europea (ESA) especializado en el análisis de datos de observación terrestre.

Es importante precisar que eventualmente se optó por la plataforma Google Earth Engine (GEE) en lugar de SNAP, debido a que GEE ofrece mayores ventajas al operar en la nube, lo que permite acceder a vastos catálogos de datos y ejecutar procesos complejos y eficientes, en línea y sin las limitaciones de procesamiento local.

Para este trabajo, en particular, se emplearon imágenes satelitales multiespectrales de dos fuentes principales cuyas características comparativas se presentan en el cuadro 5.

- Sentinel-2: Sensor multiespectral del programa Copernicus de ESA, utilizados por su cobertura global y resolución espacial adecuada para análisis regionales. Su propósito principal es el monitoreo de las coberturas de uso de suelo; para lo que cuenta con una resolución espacial máxima de 10m y colecta información en 13 bandas que operan en la región visible e infrarroja, tanto cercanas como de onda corta. Su cobertura de la región intermedia comprendida entre el rojo y el infrarrojo cercano, conocida como *red edge, ha dado* resultados muy prometedores en el seguimiento de los procesos relacionados con la vegetación (estimación de la cosecha y el vigor, plagas y enfermedades, por citar algunos).
- Planet Imagery: Imágenes ópticas multiespectrales de alta resolución obtenidas a través del programa de monitoreo de la empresa Planet, que durante una temporada permitió el libre acceso a la información mediante la iniciativa internacional para el clima y bosques de Noruega (NICFI), gestionadas por Kongsberg Satellite Services (KSAT). Estas imágenes ofrecieron una resolución espacial significativamente mayor (hasta 3−5m), lo que permitió un análisis más detallado de las características del terreno.

Los conjuntos completos de la información se pueden consultar en los siguientes enlaces: Sentinel 2 (https://browser.dataspace.copernicus.eu/) y Planet (https://planet.skyfi.com/welcome).

Cuadro 5. Comparativo de las principales características de los sensores.

Característica	Sentinel-2 (Misión Copernicus, ESA)	PlanetScope (Planet Labs)
Origen/Operador	Agencia Espacial Europea (ESA) / Programa Copernicus	Planet Labs (a través de una constelación masiva de CubeSats "Doves" y "SuperDoves")
Cobertura Geográfica	Global	Casi toda la superficie terrestre (con énfasis en áreas monitoreadas por iniciativas como NICFI)
Misión Principal	Monitoreo de la Tierra para gestión de recursos, uso del suelo, cubierta vegetal, agua, y apoyo a disciplinas como la arqueología.	Monitoreo diario de cambios rápidos en la superficie terrestre, fundamental para monitoreo forestal, agrícola, urbano, etc.
Constelación	2 satélites: Sentinel-2A y Sentinel-2B	Cientos de CubeSats "Doves" y "SuperDoves"
Resolución Espacial (GSD)	Multiresolución según la banda:	Variable según el producto/satélite:
	- 10 metros: Bandas visibles (B2 Azul, B3 Verde, B4 Rojo) y NIR (B8). (Adecuada para análisis regionales).	- 3.7 a 4.1 metros (nativa en Nadir para Doves).
	- 20 metros: Bandas de borde rojo (B5, B6, B7, B8A) y SWIR (B11, B12).	- Re Muestreada a 3 metros para productos Ortho Scene o BaseMap (comúnmente utilizados).
	- 60 metros: Bandas atmosféricas (B1 Costera, B9 Vapor de Agua, B10 Cirros).	- Productos de mayor resolución de SkySat pueden alcanzar 50 cm.
Bandas espectrales	13 bandas que cubren la región cirrus (UV), visible (azul, verde y roja), el infrarrojo cercano, y el infrarrojo de onda corta	3 bandas cubriendo las regiones visibles Azul, Verde y Rojo y una banda en la región del infrarrojo cercano (NIR).
Frecuencia de Revisitado	10 días al nivel del ecuador (más frecuente en latitudes altas debido al solape de pasadas). La presencia de más de un satélite (S2A y S2B) permite contar con adquisiciones cada 5 días.	Casi diaria sobre la mayoría de la superficie terrestre. Principal ventaja para el monitoreo de cambios rápidos.
Niveles de Procesamiento (Disponibles en GEE)	- Nivel 1C (TOA - Top-of-Atmosphere): Reflectancia en la parte superior de la atmósfera, ortorectificada.	- Basic Scene (Nivel 1): Datos con correcciones radiométricas y de sensor.
	- Nivel 2A (SR - Surface Reflectance): Reflectancia de superficie corregida atmosféricamente, ortorectificada.	- Ortho Scene (Nivel 3): Imágenes ortorectificadas y radiométricamente calibradas.

	- Colecciones "Harmonized Sentinel-2 MSI" (COPERNICUS/S2_HARMONIZED y COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED) para consistencia en series temporales.	- Surface Reflectance (SR): Productos con corrección atmosférica.
Ventajas principales	Número de bandas espectrales (13) para análisis detallado.	- Revisita casi diaria, ideal para detección de cambios rápidos.
	- Resolución espacial de 10m para bandas clave (visible, NIR) adecuada para análisis regionales.	- Mayor resolución espacial (3m) en comparación con las bandas clave de Sentinel-2, permitiendo un análisis más detallado de características del terreno.
	- Datos de acceso abierto y gratuito.	- Masiva constelación que asegura una alta disponibilidad de imágenes.
Limitaciones/ Consideraciones	- Menor frecuencia de revisita comparada con PlanetScope.	- Generalmente menor número de bandas espectrales (4 vs 13 en versiones básicas).
	- Resolución espacial mínima de 10 m.	- Requiere de licencias comerciales o acuerdos específicos (ej. NICFI para investigación en ciertas regiones).
Aplicación en Arqueología	- Análisis regional de paisaje, detección de anomalías de vegetación a gran escala, monitoreo de cambios a largo plazo.	- Detección de anomalías más sutiles en el terreno y vegetación debido a su mayor resolución, monitoreo de sitios y disturbios con alta frecuencia.

La obtención y tratamiento en GEE, por su capacidad de procesamiento y acceso a vastos catálogos de datos geoespaciales, facilitó la aplicación de algoritmos para los índices de vegetación a partir de las áreas de interés.

4.2.3.1.1 Análisis de teledetección con Sentinel-2 y VANT.

Para el análisis específico del área de estudio se utilizó la imagen Sentinel-2 adquirida el el 21 de julio de 2018, hora: 16:58:51, se utilizó un nivel de procesamiento 1C (cuadro 6).

Cuadro 6: *Parámetros Sentinel 2*

Bandas	*Longitud de onda (nm)*	*Resolución espacial (m)*
1	0.443	60
2	0.490	10
3	0.560	10
4	0.665	10
5	0.705	20
6	0.740	20
7	0.783	20
8	0.842	10
8a	0.865	20
9	0.945	60
10	1.375	60
11	1.610	20
12	2.190	20

El cálculo del índice NDVI se realizó utilizando el software SNAP, empleando las bandas 4 (rojo) y 8 (infrarrojo cercano) mediante la fórmula:
NDVI = (B8 - B4) / (B8 + B4)

Este índice permitió identificar anomalías de vegetación asociadas a posibles estructuras arqueológicas, basándose en el principio de que la vegetación estresada muestra firmas espectrales características (Agapiou, 2014; Abate et al., 2020).

El índice, que varía de -1 a 1, combina bandas de espectro rojo e infrarrojo cercano para indicar la salud de la vegetación. Plantas sanas absorben luz roja y reflejan infrarroja; una gran diferencia entre ambas bandas señala vegetación sana y con humedad adecuada. Una pequeña diferencia o valores cercanos a 0 o negativos indican estrés, Los valores positivos, especialmente cercanos a 1, denotan biomasa verde y vegetación sana. La figura 7 describe mediante un diagrama, el proceso de trabajo de esta etapa.

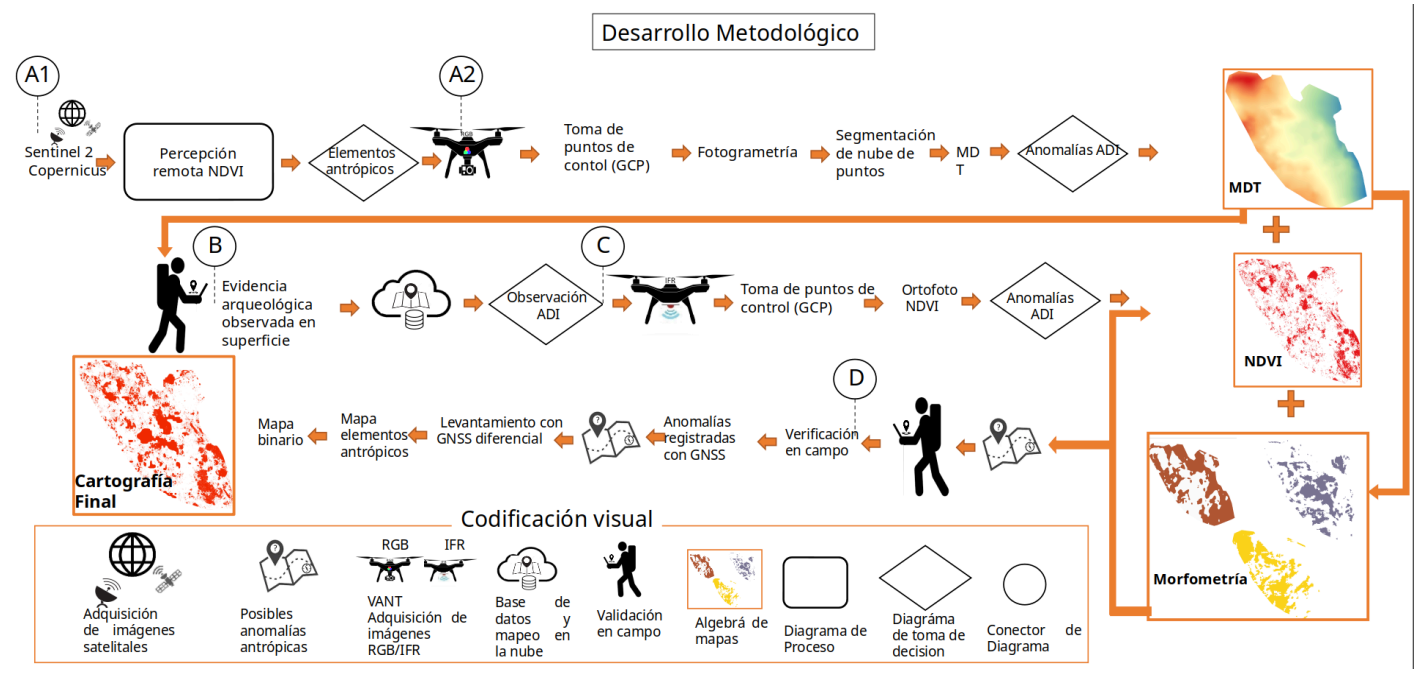


Figura 7. Desarrollo metodológico para las pruebas piloto.

Con base en el análisis de teledetección con Sentinel-2, se calculó el NDVI en SNAP para identificar anomalías de vegetación asociadas a posibles estructuras arqueológicas. Este proceso permitió definir dos áreas para las pruebas piloto en el Cerro La Catarina, donde posteriormente se realizaron vuelos de VANT con un sensor RGB e Infrarrojo. La decisión de proponer sitios de prueba piloto y sus metodologías contrastantes depende de la facilidad con la que se detectaron visualmente las

anomalías y de su mejora mediante el análisis NDVI, en particular la detección de morfologías lineales asociadas con estructuras antropogénicas. Mediante fotogrametría y un solapamiento mayor al 70%, se generó un modelo topográfico que sirvió de base para el registro arqueológico remoto detallado posteriormente.

4.2.3.1.2. Cálculo de índices de índices de vegetación.

Google Earth Engine (GEE) funciona mediante conjuntos de comandos del lenguaje javascript, conocidos como código. En este caso se hizo uso de códigos para el cálculo eficiente de diversos índices de vegetación, mismos que se describen a continuación:

- Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada *(NDVI):*

  NDVI= (NIR−Red) / (NIR+Red)

  donde NIR es la reflectancia en el infrarrojo cercano y Red es la reflectancia en la región del rojo visible.

  “Este índice es fundamental para evaluar la salud y densidad de la vegetación, y sus anomalías pueden indicar perturbaciones del terreno asociadas con estructuras enterradas o alteradas por la actividad humana” (Parcak, 2009: 92)

Se exploraron también el Índice de Vegetación Mejorado (EVI) y el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) para mitigar efectos atmosféricos o de fondo del suelo, y el Índice de Vegetación Anómala (AVI) para resaltar patrones específicos, (Agapiou et al., 2012) a continuación se describen sus características.

- Índice de Vegetación Mejorado (EVI): Este índice busca mejorar la sensibilidad en áreas de alta biomasa y reducir la influencia atmosférica y del fondo del suelo.

  EVI = G * ((NIR - RED) / (NIR + C1 * RED - C2 * BLUE + L)),

  donde L es un factor de brillo del suelo, y C1 y C2 son coeficientes atmosféricos.

Las bandas utilizadas son infrarrojo cercano (NIR), rojo visible (RED) y azul visible (BLUE).

- Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI): Similar al EVI, pero con un factor de ajuste para minimizar los efectos de la reflectancia del suelo.

  SAVI = (NIR - RED) / (NIR + RED + L) * (1 + L),

donde NIR es la reflectancia del infrarrojo cercano, RED es la reflectancia de la banda roja, y L es un factor de corrección del brillo del suelo, usualmente establecido en 0.5 para adaptarse a diferentes tipos de vegetación.

- Índice de Vegetación Anómala (AVI): Este índice es útil para realizar patrones específicos de vegetación que podrían indicar rasgos subsuperficiales.

  Para su cálculo se utilizan otros índices ampliamente conocidos, como el NDVI o el EVI, a lo largo de un periodo específico de tiempo, sobre el cual se calculan las anomalías; es decir los valores que exceden el promedio por un determinado número de desviaciones estándar. Estos valores pueden ser calculados por estaciones o por periodos específicos (mensuales, por ejemplo).

En las imágenes Planet se emplearon los siguiente índices para caracterizar la vegetación:

- Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI): Se obtuvo mediante la fórmula estándar ((N - R) / (N + R)).
- Índice de Vegetación Mejorado (EVI): Calculado como 2.5 * ((N - R) / (N + 6 * R - 7.5 * B + 1)).
- Índice de Pigmento Insensible a la Estructura (SIPI): Derivado como ((N - B) / (N - R)).
- Índice de Hoja Verde (GLI): Calculado mediante (((G - R) + (G - B)) / ((2 * G) + R + B)).

- Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera (ARVI): Obtenido como ((N - (2 * R) + B) / (N + (2 * R) + B)).
- Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI): Calculado como (((N - R) / (N + R + L)) * (1 + L)) donde L se fijó en 0.5.

Las respectivas fórmulas fueron traducidas en secuencias de código ejecutable en GEE, permitiendo el cálculo automatizado de valores antes mencionados a partir de las bandas espectrales de las imágenes. Todos los índices fueron normalizados (ajustados en su valor en el rango de 0 a 1), para asegurar la comparabilidad entre ellos.

4.2.3.1.3. Percepción Remota de GEE en la ADI

Se utilizó la plataforma GEE para el procesamiento y análisis de datos geoespaciales, principalmente para el cálculo de índices para el monitoreo de la vegetación, comparando estos resultados con levantamientos fotogramétricos de las pruebas piloto. El código (Figura 8) detalla el flujo de trabajo y los insumos generados en las fases anteriores, que se describen a continuación:

- Adquisición y Preprocesamiento de Datos

Se utilizó una colección de imágenes del sensor PlanetScope (Planet NICFI Basemaps, projects/planet-nicfi/assets/basemaps/americas), específicamente las correspondientes al periodo anual del 1 de junio de 2022 al 1 de junio de 2023. Esta colección fue filtrada espacialmente a dos áreas de estudio predefinidas: Meyuca (definida por un polígono) y Malinche (definida por un punto).

Es importante precisar que, el Cerro de La Malinche se definió, para prueba piloto a pesar de no pertenecer al área de interés principal, debido a que representa una zona de referencia valiosa con información arqueológica previamente validada en campo por otras investigaciones, lo que garantiza la confiabilidad de los datos para comparación.

Su similitud de las condiciones geográficas y ambientales permite extrapolar y mejorar los resultados obtenidos a través de los índices de vegetación calculados en GEE, lo que será discutido a profundidad en los capítulos 5 y 6.

Se incorporaron bandas de reflectancia en el azul (B), verde (G), rojo (R) y el infrarrojo cercano (N) para el cálculo de los índices.

Adicionalmente, se incluyeron capas de datos de elevación (image2 para Meyuca e image4 para Malinche), ortofotos (image3 para Meyuca) y datos de levantamientos en campo (tablas: table, table2, table3, table4), que sirvieron como referencia para la validación y comparación.

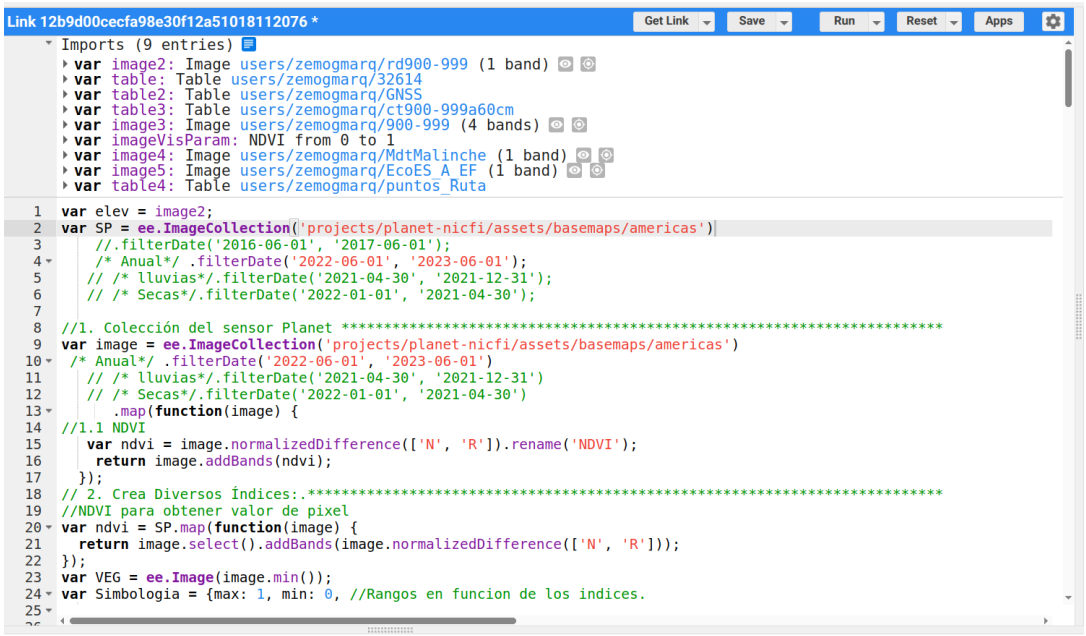


Figura 8. *Fragmento del código utilizado en la plataforma GEE para identificación de anomalías en biomasa.*

- Análisis Interactivo y Comparación

  Se desarrolló una interfaz de usuario interactiva en GEE para facilitar la visualización y el análisis de los datos. Esta interfaz permite, tanto la selección de áreas de interés, pues se habilitó la conmutación entre las geometrías de Meyuca y Malinche para enfocar el análisis (figura 9, sección a), como la visualización de índices que muestra los índices de vegetación calculados (NDVI, EVI, SIPI, GLI, ARVI, SAVI) con una simbología de color gradual resaltando los rangos de valores resultantes (figura 9, sección b).

- Análisis de umbral NDVI:

Se implementó un deslizador (***ui.Slider***) para establecer un umbral de NDVI, (figura 9, sección c), permitiendo la generación de mapas binarios (mapas con valor falso o verdadero) que permiten discriminar áreas con valores de NDVI por encima y por debajo del umbral definido por el usuario. Esto facilitó la identificación de zonas de interés con baja o alta cobertura vegetal.

- Consulta del valor del píxel:

La funcionalidad de clic en el mapa (***Map.onClick***) posibilitó la obtención de los valores de píxel de los índices en puntos específicos, así como la generación de gráficos de series de tiempo del NDVI para analizar la evolución de la vegetación por periodo (figura 9, sección d).

- Visualización de datos de referencia:

Las capas de elevación, ortofotos y levantamientos terrestres se superpusieron para una comparación visual directa y para identificar rasgos antrópicos o características del terreno en relación con los patrones de vegetación mediante la comparación de mapas distintos en un entorno dividido. (***ui.SplitPanel***) para facilitar la observación.

- Herramienta de medición:

Se integró una herramienta de medición de distancia para el análisis espacial dentro del mapa. Esto permitió la identificación de patrones de NDVI asociados a la vegetación y su comparación con levantamientos fotogramétricos previos, como base para el monitoreo de la cobertura vegetal y la detección de cambios en el paisaje.**4.2.3.1.4. Determinación de áreas de interés (ADI)**

La determinación de las ADI se hizo con base en la información preliminar en GEE con imágenes satelitales multiespectrales de los dos recursos antes mencionados: esto permitió una cobertura y resolución adecuadas para la cuantificación y el monitoreo de la vegetación en las ADI predefinidas para el estudio.

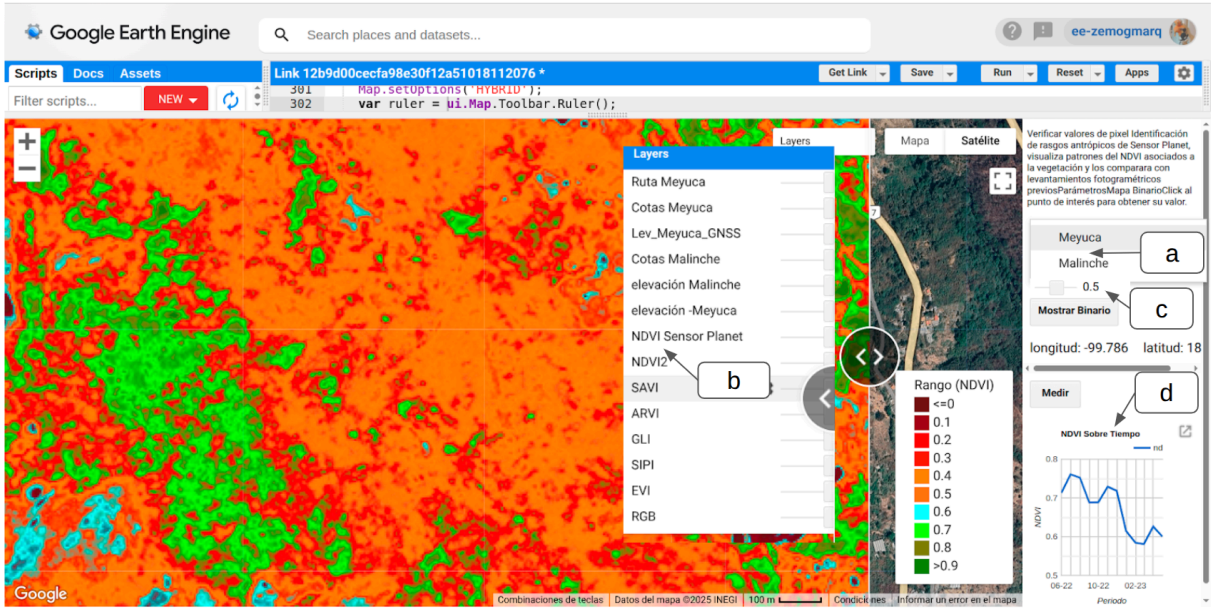


Figura 9. Análisis interactivo y comparación en GEE.

Las imágenes Sentinel-2 se seleccionaron por su cobertura global y resolución espacial adecuada para el análisis regional, aprovechando sus capacidades para la gestión y procesamiento de grandes volúmenes, se realizó lo siguiente:

- Selección y Pre-procesamiento: Se adquirieron imágenes Sentinel-2A y Sentinel-2B. Se prioriza el uso de datos en su Nivel 2A (Reflectancia de Superficie - SR), ya que estas colecciones incorporan las correcciones atmosféricas, de reflectancia y geométricas necesarias. Esto asegura que los valores de píxel expresan la reflectancia real de la superficie del terreno.
- Remuestreo de Bandas: Utilizando las funciones de GEE, las bandas que colectan información de las regiones espectrales relevantes para el cálculo de índices de vegetación fueron ajustadas a un tamaño uniforme de 10 metros por píxel. Estas son la banda B4, que cubre la región del rojo visible y la banda B8 que registra la respuesta del Infrarrojo Cercano (NIR). Esta operación es fundamental para garantizar la compatibilidad espacial y la precisión en el análisis de índices subsiguientes.

Las imágenes multiespectrales de Planet, fueron un complemento crucial para el análisis de Sentinel-2. Su resolución espacial significativamente mayor (hasta 3-5 metros por píxel) con colecta casi diaria de información, permite un monitoreo más detallado y una detección de anomalías a una mejor escala. El procesamiento específico para estas imágenes incluyó:

- Remuestreo y Mejora de Resolución: Aunque las imágenes de Planet ya ofrecen una alta resolución, se realizó un proceso predeterminado para optimizar la resolución para el análisis detallado.
- Generación de índices de vegetación: Al igual que con Sentinel-2, se integraron los mismos índices de vegetación (NDVI, EVI, SAVI, AVI) utilizando las bandas que registran la región del rojo visible y la del infrarrojo cercano (NIR). Su mayor resolución permitió identificar anomalías de vegetación en una escala espacial más detallada, lo que es de suma importancia para la detección de rasgos arqueológicos sutiles.

4.2.2.4. Comparación con Modelos Digitales del Terreno (MDT).

- La comparación visual entre los resultados de los índices de vegetación y los modelos digitales de terreno de alta resolución (MDT) fue crucial (figura 10), dado que permitió observar las coincidencias de los valores de respuesta espectral (anomalías de vegetación) con el relieve topográfico (formas del terreno), identificando así anomalías y lineamientos de carácter cultural difícilmente detectables con métodos tradicionales. Para hacerlo, se añadieron capas vectoriales de levantamientos topográficos previos, para una inspección visual y para contrastarlo con aquellos sitios señalados como de interés por las anomalías en el valor de los índices de vegetación obtenidas mediante percepción remota.

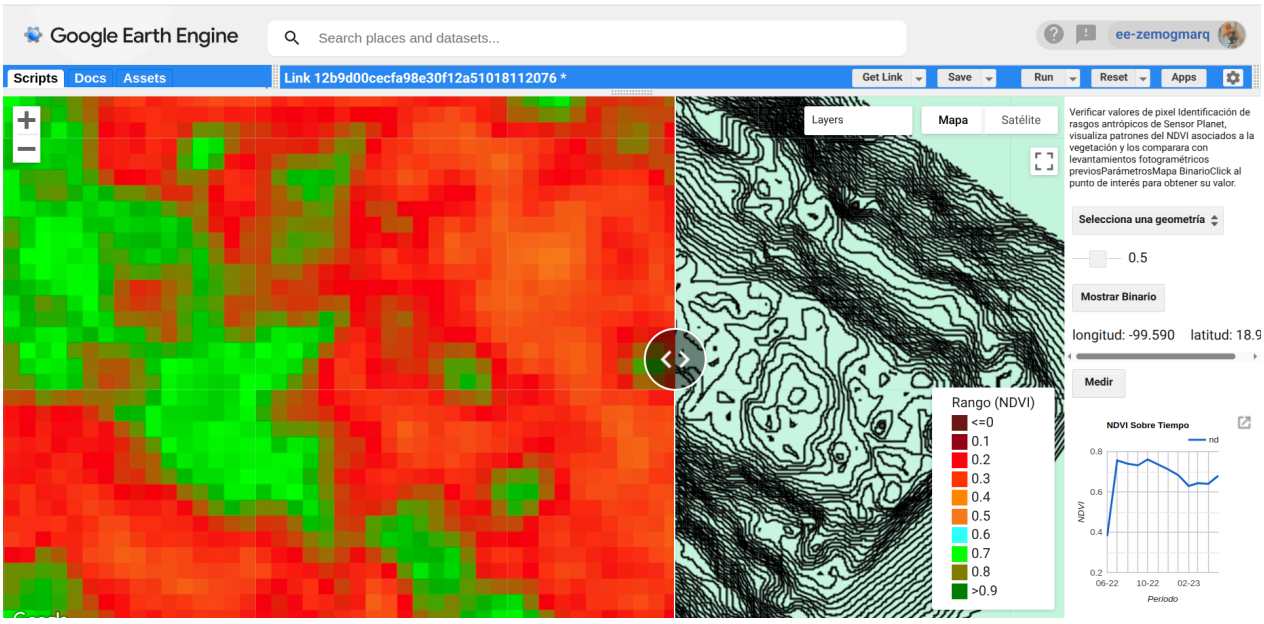


Figura 10. Comparación espacial de los resultados de los índices de vegetación de GEE con los MDT y curvas de nivel.

4.2.3.1.5. Selección de anomalías con potencial de interés arqueológico.

A partir de esta validación cruzada entre los patrones de vegetación anómalos detectados por los índices de vegetación y las micro topografías detectadas en los MDT de alta resolución, se realizó una selección rigurosa de áreas con características geométricas y valores de índices de vegetación similares. Estas áreas, que indican un potencial significativo de ser rasgos antrópicos, fueron priorizadas como zonas susceptibles de recorrido de campo (ADI).

La convergencia de estas evidencias geoespaciales incrementó la probabilidad de que dichas anomalías representaran evidencia arqueológica subsuperficial o alterada por la actividad humana (figura 11).

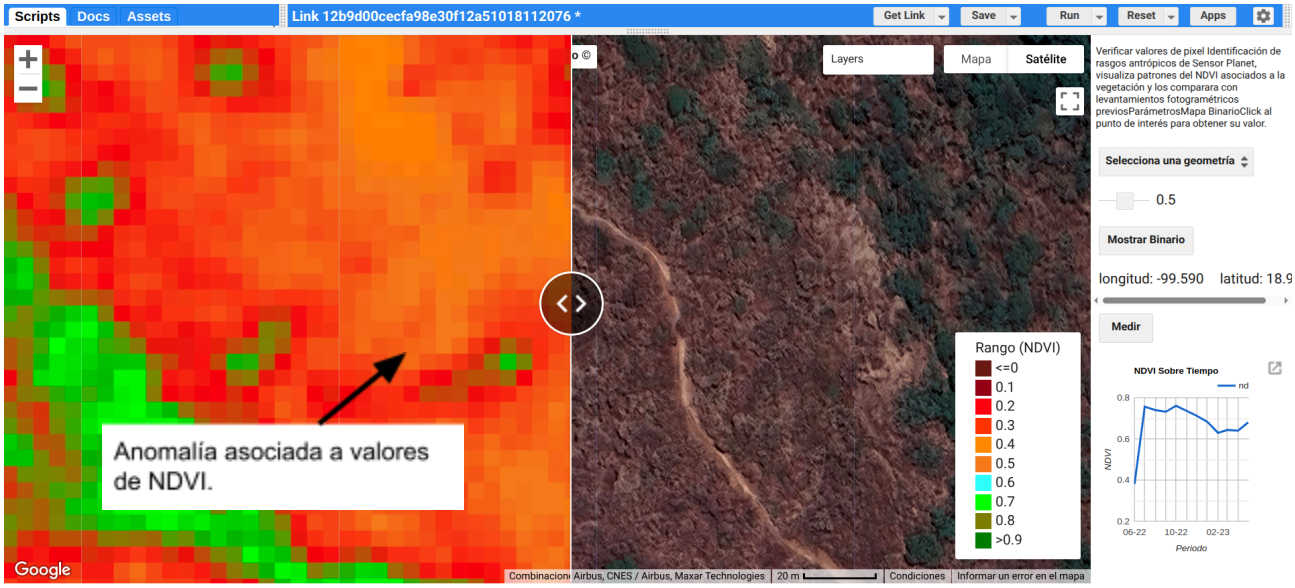


Figura 11. Selección de anomalías con potencial de interés arqueológico.

4.2.3.1.6. Análisis comparativo e identificación de rasgos.

Una vez ejecutado el código para el cálculo de los índices mencionados, se hizo un análisis comparativo e identificación de rasgos haciendo uso de la herramienta "***Split Panel***" de GEE. Esta facilita la comparación visual e interactiva de diferentes índices de vegetación y capas de información, lo que permitió una mayor identificación de patrones. A partir de los resultados de los índices, se observaron mapas considerando la paleta de colores asociados al rango resultante de los índices (presencia/ausencia de anomalía) para resaltar las áreas con mayor probabilidad de evidencia antrópica. Las anomalías son patrones lineales o geométricos de vegetación estresada o más vigorosa, que se consideraron potencialmente asociadas con estructuras enterradas o alteraciones del terreno. Estas fueron identificadas y registradas como entidades geográficas vectoriales (líneas y polígonos), los cuales fueron exportados para su posterior integración en Sistemas de Información Geográfica (SIG). Esta herramienta facilitó la detección de anomalías y patrones recurrentes que no serían evidentes con una sola fuente de datos.

Los rasgos vectorizados se integraron en un (SIG), para su posterior superposición con otras capas de información geoespacial, como Modelos Digitales del Terreno (MDT) de alta resolución, datos topográficos y registros de prospección arqueológica de campo. Esto permitió una visualización y análisis espacial integrado, sentando las bases para la validación en campo.

4.2.3.2 Registro arqueológico remoto.

4.2.3.2.1. Prospección no invasiva de alta resolución (VANT)

Complementando la percepción remota satelital, se realizaron vuelos de VANT para registrar con el sensor RGB, imágenes de los sitios de jerarquía mayor, como Meyuca de Morelos y La Malinche. En el sitio Meyuca, en el cerro la Catarina, se llevaron a cabo tres vuelos estratégicos: dos en las cimas (cumbre) y uno en las laderas intermedias del lado este (vertiente oriental), cubriendo una superficie aproximada de 65 hectáreas. En el sitio La Malinche, en el cerro del mismo nombre, se realizaron dos vuelos en la cima con una cobertura aproximada de 17 has.

Las características técnicas de los VANT marca DJI utilizados se describen en el cuadro 7.

Cuadro 7. Especificaciones de los VANT y Procesamiento de Datos.

Característica	DJI Phantom 3 Advanced (Sensor 1)	DJI Inspire One (Sensor 2)
VANT	Quadcopter. Autonomía: 17 min. Resolución: HD 4K RGB.	Quadcopter. Autonomía: 22 min. Resolución: HD 4K R edge / NIR.
Sensor (RGB)	Sony Exmor R BSI 1 / 2.3. Píxeles efectivos: 12.4 MP. FOV 94°, lente 20 mm f/2.8, enfoque a ∞.	Parrot Sequoia
Rango ISO	100-3200 (video), 100-1600 (foto).	---
Velocidad de obturación	8s - 1 / 8000s.	---
Tamaño máx. imagen	4000 × 3000. px	1280 x 960 px
Modos fotográficos	Disparo único, ráfaga: 3/5/7 disparos.	---
Sensor (Multiespectral)	CMOS de 1/2.3" o un sensor mejorado que captura fotos de 12 megapíxeles y vídeo de alta resolución que puede alcanzar hasta 4K	Cámara RGB: 16 MP 4 cámaras de 1.2 MP (banda única global shutter,, Bandas: Verde (550 BP 40), Rojo (660 BP 40), Red Edge (735 BP 10), NIR (790 BP 40).
Altura de vuelo	40-50 m	30-40 m
GSD	2 m	2 m
Plan de vuelo	Sí	No
Software de post-procesamiento	Agisoft Photoscan 1.5.	WebODM

Las imágenes obtenidas fueron sometidas al proceso de restitución fotogramétrica. Dado que el VANT cubre una trayectoria en diferentes direcciones, la restitución fotogramétrica es un proceso necesario pues posiciona geográficamente (en coordenadas X, Y) y en la tridimensión (Z) a las imágenes obtenidas por el VANT. Para este proceso se requiere la transferencia de información desde puntos de control de referencia, mediante el uso de algoritmos (ecuaciones matemáticas) que reconstruyen el modelo geométrico de la imagen. En este caso se emplearon dos algoritmos de procesamiento de imágenes a nubes de puntos. El algoritmo ***Scale-Invariant Feature Transform*** (SIFT) establece puntos distintivos e invariantes a escala en las imágenes a través de subregiones, generando datos vectoriales para el emparejamiento entre imágenes. Para tal emparejamiento se consideró un sobrelape de las imágenes en campo mayor al 70%. Una vez generada la nube de puntos tridimensional se empleó el algoritmo ***Point Feature Histogram*** (PFH) que permite codificar las propiedades geométricas locales de cada punto, generando una representación de la superficie muestreada, permitiendo el reconocimiento de objetos y el cálculo de nubes de puntos (Lowe, 2004; Rusu *et al.*, 2009). Una vez procesadas las imágenes es posible la posterior generación de un modelo digital de terreno (MDT).

Se extrajeron los puntos y se vectorizó una nube 3D para generar un modelo topográfico sin marquesina. En particular, dadas las características de la vertiente oriental y el terreno accidentado, se aplican vuelos escalonados con una altura promedio de 40 m para asegurar una adquisición de datos más homogénea (Rouse & Krumnow, 2020).

El flujo de trabajo fotogramétrico consistió en:

1. Generación de Nubes de Puntos: Las imágenes aéreas fueron procesadas en Agisoft Metashape y WEBODM, utilizando algoritmos SIFT y PFH para codificar propiedades geométricas. La intersección y el traslape de los valores numéricos digitales (VND) de cada píxel de las imágenes seleccionadas permitieron generar una nube de puntos densa en 3D.
2. Procesamiento de Nubes de Puntos: La nube de puntos resultante se exportó a CloudCompare para su refinamiento. Aquí se realizó un recorte de los puntos

extrínsecos o distorsionados, y se ajustó el tamaño de la imagen según las proporciones de los elementos de campo (como puntos de control y vegetación) y se reorientó conforme a los ejes X, Y y Z para una visualización adecuada en planta, perfil y vistas ortogonales.

3. Generación de Modelos Digitales del Terreno (MDT): A partir de las nubes de puntos densas en WEBODM, se generaron MDT de alta resolución. Estos MDT representan la superficie del terreno sin la vegetación, lo que permitió la visualización de micro-topografía y la identificación de rasgos culturales sutiles como terrazas, muros discontinuos y alineamientos de roca.

4.2.3.2.2 Sensor multiespectral VANT en prueba piloto (registro IR) para generar análisis de Morfometría e interpretación NDVI de geoformas antropogénicas.

Con los datos derivados de las fases anteriores, se seleccionaron áreas distintivas para el uso de registro Infrarrojo (IR) de acuerdo con la evidencia de artefactos y accesibilidad para generar un ortomosaico, con el fin de interpretar los valores más altos de NDVI asociados a las estructuras, junto con algoritmos relacionados. al índice de rugosidad del terreno, pendiente y orientación; la composición final fue la cartografía derivada del álgebra de mapas como resultado de la suma de cada valor donde ocurrieron coincidencias espaciales. Todas las imágenes fueron georreferenciadas en una proyección WGS84 14 N; para el MDT, se consideraron promedio 7324 puntos por imagen, con una superposición cubierta del 75%.

Derivado de los datos RGB y multiespectrales del VANT, se realizó un análisis morfométrico obtenido de los MDT para identificar anomalías microtopográficas asociadas a potenciales rasgos arqueológicos. Este proceso cuantificó variables como el porcentaje de pendiente, el tipo de orientación y la rugosidad del terreno, cuyas coincidencias espaciales destacaron posibles geoformas antropogénicas. La integración de estos parámetros mediante álgebra de mapas permitió generar cartografía temática que sirve como base fundamental para la interpretación de potenciales sitios arqueológicos.

4.2.3.2.2 Planeación de registro de datos de campo.

La planeación del recorrido de superficie se basó en la elaboración de cédulas de registro con el fin de recopilar la mayor cantidad de variables de rasgos geomorfológicos, de ocupación, edafológicos y arqueológicos, todos incluidos mediante un número consecutivo de control, (figura 12).

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

Centro Universitario UAEM Tenancingo

Proyecto de Investigación Integral; Coatepec Harinas del periodo Posclásico al Colonial temprano.

Temporada:_____ **No. Control:**

Clave de sitio: _____	**P.C.**	**Fecha:**		
U. OBS. _____	**U.R.**	**Elm:**	**Cr.:**	**Lt.:**
_____	**Estandar.**		**He.:**	**Lp.:**
C. Muestreo	**Oportuno.**			

Localización.

Este:_____ Norte:_____ Elevación:_____msnmm

Contexto.

Urbano Rural Transición Invernadero

Elementos.

Estructura Muro Piso Alineamiento Saqueo

Otros:_____

Relieve./Topografía./Uso.

Cima				
Ladera	Leve:___	Moderada:___		Abrupta:___
Terraza	Plano:___		Leve:___	
Piedemonte	Plano:___		Leve:___	
Valle				
Agua	Río:___	Manantial:___		Bordo:___
Franja de roca				
Campo abierto	Recreación:___		Pastizal:___	Claro:___
Cultivo	Milpa__	Arado__	Huerto__	Riego__
Corte	Camino:___	Vereda:__		Construcción:___

Cobertura Vegetal.

Arbórea___ Arbustiva___ Herbácea___ Ruderal___

Visibilidad.

Alta___ Media___ Baja___

Observaciones.

_____

_____

_____

_____

_____

Registró.

Equipo: _____ Nombre(s): _____

Figura 12. Cédula de registro en campo.

4.3.4.2 Prospección Arqueológica en Campo.

Se recopilaron datos directos en superficie para validar los procesamientos de imágenes satelitales y fotografías aéreas. Este muestreo fue dirigido en las áreas de interés (ADI). Se tomaron puntos de control en campo, realizando registro fotográfico (figura 13 a, b, y c), recolección sistemática de material arqueológico (fragmentos cerámicos y líticos) y llenado de cédulas de información estandarizadas. El análisis preliminar de los materiales recuperados, incluyendo el estudio del contenido de arcillas, sugiere una ocupación matlatzinca del Posclásico Temprano (aproximadamente 1200 d.C.), con evidencia de producción local. Paralelamente, se realizaron levantamientos topográficos con GNSS en áreas previamente identificadas con alineamientos de roca, muros de contención y sistemas de terrazas, los cuales presentan claras evidencias de ocupación prehispánica (que en algunos casos ha sido reportada en investigaciones previas), lo cual sirvió de elemento claro de comparación con los valores del índice de vegetación.



Figura 13. Registro de evidencia arqueológica observada en Meyuca de Morelos .

a) registro de evidencia en campo con cédula y GNSS, b) registro de evidencia con VANT, d) evidencia arqueológica expuesta en superficie.

4.2.3.3 Validación de datos en campo.

La combinación de estrategias de prospección satelital y el uso de VANTs permitió aproximarnos a sitios con mayor posibilidad de análisis e interpretación en el entorno regional. La fase final consistió en la validación directa en campo de las áreas identificadas a través de la percepción remota y fotogrametría. Se realizó una inspección directa de los sitios, con las fases de reconocimiento y recorrido arqueológico. Se documentaron sus características de terreno y se corroboraron los hallazgos mediante el registro de artefactos y elementos superficiales. En casos específicos, como el Cerro La Catarina, se incluyeron testimonios locales de

informantes que confirmaron la presencia de estructuras prehispánicas y signos de saqueo. Además, para fortalecer la validación en campo, y la comparación metodológica en regiones cercanas, en el sitio la Malinche también fue corroborada la identificación de rasgos antrópicos con la validación en campo. Mediante la inspección de áreas prospectadas, la documentación detallada de las características del terreno y con la recolección sistemática de materiales arqueológicos en superficie se logró identificar elementos arqueológicos. Además, se llevaron a cabo levantamientos topográficos con GNSS en las zonas con alineamientos de roca, muros de contención y sistemas de terrazas, los cuales representan una clara evidencia de ocupación prehispánica (figura 14).



Figura 14. Levantamiento de datos en campo con TIG.

4.2.3.1 Reconocimiento y recorrido de superficie

Previo a recorrido de superficie asistimos a las comunidades del Cerrito y Meyuca de Morelos, con el fin de observar la geomorfología y las características del terreno y planear los recorridos de superficie mediante rutas registradas con dispositivos GNSS.

Además de entrevistarnos con los representantes del municipio, la segunda regidora, el secretario, y autoridades delegacionales, les informamos del propósito de la investigación y nos otorgaron permiso para acudir a dichos sitios, en la comunidad de Meyuca de Morelos la Delegada nos apoyó con una casa que utilizamos de campamento, prestada por la familia Hernández García.

Los días 16 de agosto, 12-18 de octubre, 15-16 de noviembre, 5 de diciembre de 2018 y 8,9, 10 de enero de 2019, 5 de junio, 10-11 de julio de 2023, asistimos a la comunidad de Meyuca de Morelos, se hicieron 49 puntos de control con tres equipos de trabajo que hicieron registro fotográfico, recolección de material arqueológico y llenado de cédulas de información de los elementos observados.

Se hicieron tres vuelos con vehículos aéreos no tripulados para obtener la fotogrametría y ortofotografía del sitio, dos de ellos en las cimas del cerro y uno más en las laderas intermedias del lado este. La cobertura aproximada del vuelo corresponde a 65 hectáreas.

Se realizaron levantamientos topográficos con GNSS diferencial en las áreas identificadas con alineamientos de roca, muro de contención y sistemas terrazas que son evidencia de ocupación prehispánica.

El material arqueológico recuperado, con el análisis preliminar arroja una ocupación matlatzinca, con una producción local, esto se observa en el análisis del contenido de las arcillas, la ocupación propuesta es para el posclásico temprano, 1200 d.C. Figura 15

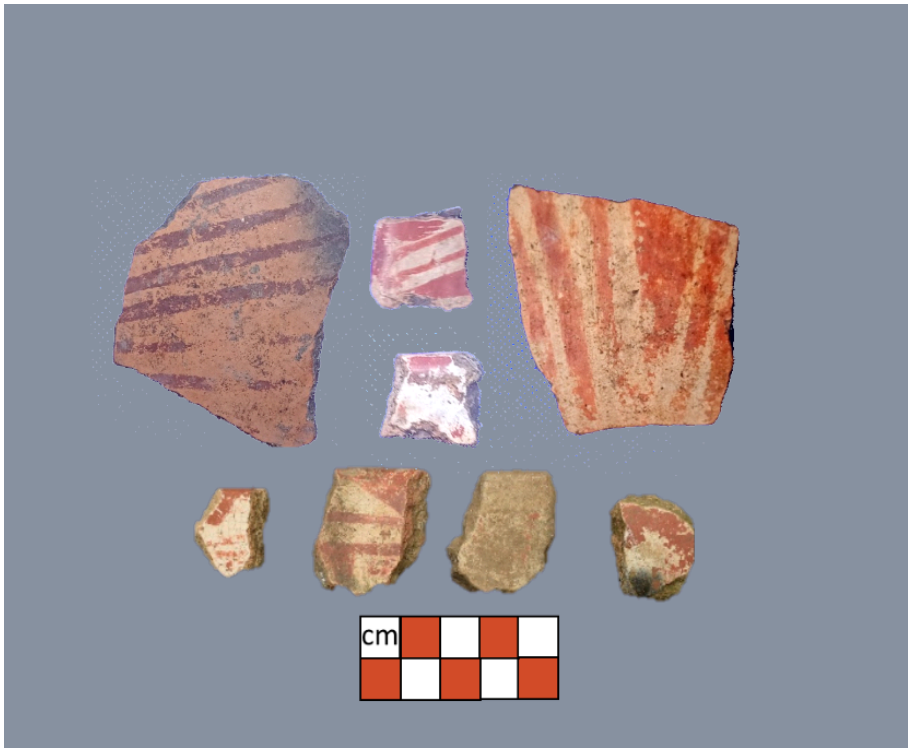


Figura 15 Material cerámico recuperado en el sitio Meyuca.

4.2.3.2 Registro arqueológico de superficie.

El levantamiento sistemático consistió en ascender topográficamente y registrar la distancia y el tiempo invertido en la prospección. En Cerro La Catarina se seleccionaron 83 puntos de control mediante muestreo oportunista. La encuesta y descripciones del material recolectado se pueden consultar de forma espacial dentro de la plataforma de *Google MyMaps* en el siguiente vínculo y el manejo de los datos para visualización interactiva se realizó en *Google Locker* y se puede consultar en este enlace. Para mejorar la eficiencia y precisión de los datos arqueológicos, se centró especial atención en áreas con alineamientos rocosos, aparentes muros de contención y sistemas de terrazas asociados con clara evidencia arqueológica prehispánica. El levantamiento topográfico piloto se realizó utilizando un sistema Geomax® GNSS GPS Zenith 25, permitiendo comparar la precisión cartográfica resultante del VANT con la información satelital y el GNSS topográfico.

4.2.3.3 Mapa binario de potencial de prospección arqueológica.

Considerando el mapa binario de posibles características arqueológicas, se seleccionaron algunas “anomalías” para validación de campo basada en inspección visual (Román et al.,2019) y sus patrones morfológicos (tendencia hacia la geometría y orientación regulares) que podrían estar asociados con el paisaje antrópico. modificaciones. El levantamiento topográfico apoyado en GNSS Diferencial se aplicó a estos, elementos y estructuras arqueológicas que eran directamente visibles en campo. Además, en la validación se consideraron las “características naturales” (juntas de rocas, bloques de roca desprendidos, fracturas) para diferenciarlas de las modificaciones antropogénicas del relieve.

5. Resultados

5.1 Percepción Remota Satelital.

El análisis NDVI en el sensor Sentinel 2 en SNAP (figura. 16, sección a), muestra el resultado con un tipo ráster para identificar contrastes de vegetación asociados con estrés hídrico. El histograma (figura 17), muestra un rango de NDVI -1 a +1 para visualizar una cubierta vegetal de escasa a densa (Abate *et al.*, 2020; Brooke & Clutterbuck, 2020); el rango de +0,68 a +0,78 es la vegetación relacionada con las características del relieve antrópico, Estos fueron verificados en campo en fases metodológicas subsecuentes, la mayoría, se asociaron con un alineamiento intermitente del muro prehispánico (figura 16, sección b).

Para la plataforma GEE las propuestas de las ADI (cima y ladera este) se hizo con base en la información preliminar de imágenes satelitales multiespectrales de los dos recursos antes mencionados: una cobertura y resolución adecuadas para la cuantificación y el monitoreo de los índices y la generación de las eventuales pruebas piloto con VANT para el estudio y la corroboración que se detalla a continuación.

5.2 Geotecnología VANT en Cerro La Catarina.

5.2.1 La cima

El MDT (figura. 16 c) es el resultado de tres vuelos, utilizando un sensor RGB, con una cobertura aproximada de 15 ha; luego del proceso de fotogrametría, el modelo fue segmentado para eliminar el dosel (Salach *et al.*, 2018). La nube de puntos generada se publicó mediante visualización web de código abierto basados en Martínez-Rubí *et al.*, (2015) y está disponible en el siguiente enlace para observación del relieve, mediciones, perfiles y toma de coordenadas entre otros(figura 18). Debido a problemas logísticos, como el difícil acceso y excedente de vegetación, el estudio fotogramétrico se registró sólo en la parte norte de la cumbre, mientras que la región sur se documentó con un sensor IR.

En los límites norte y sur del modelo con el estudio RGB, se distinguen dos morfologías positivas con una orientación general NW-SE, que comprende una sección de la

cuenca local de Meyuca. Particularmente interesante es la elevación principal en el norte del modelo y su descenso progresivo hacia el sur, donde la apertura de las curvas de nivel en los flancos de la elevación más alta (2260 msnm) sugiere una tendencia hacia una superficie más plana. Algunos escalones tienen una gran superficie, como es el caso que se da a partir de los 2190 msnm, y conducen a dicha elevación, ubicado al sur del terreno, a través de un estrecho corredor.

Respecto al registro del sensor IR en la porción sur de la cumbre, se realizaron dos vuelos a una altura promedio de 40 m. La figura. 16, sección d, muestra el ortomosaico generado, donde es posible observar la vegetación con valores de NDVI. El aspecto más distintivo es que los valores más altos de NDVI han mostrado algunos patrones lineales discontinuos, como continuación de la orientación NW-SE, claramente asociados con estructuras de muros (Abate *et al.*, 2020; Brooke y Clutterbuck, 2020).

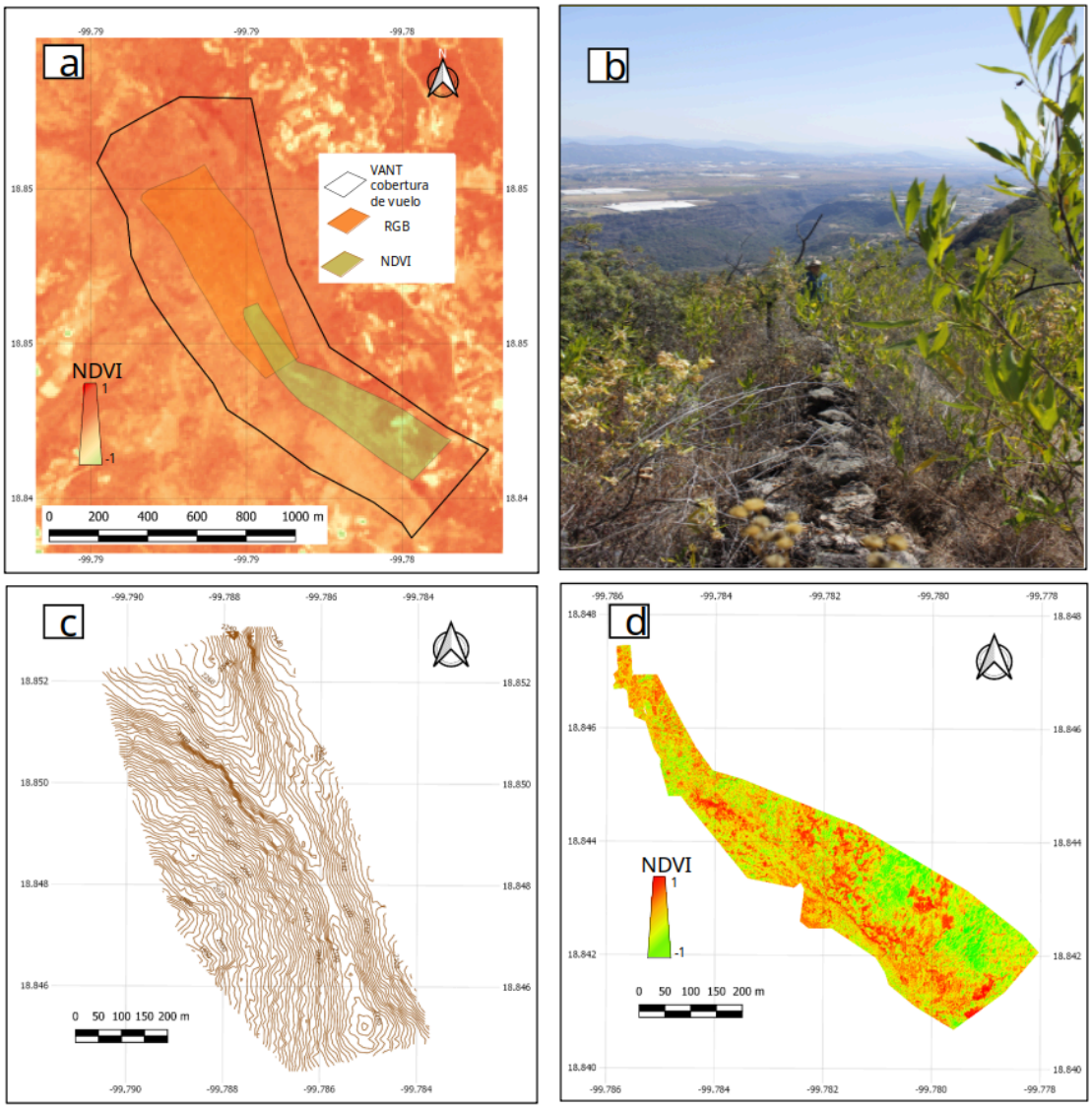


Figura 16 Prueba piloto en cima del cerro la catarina.

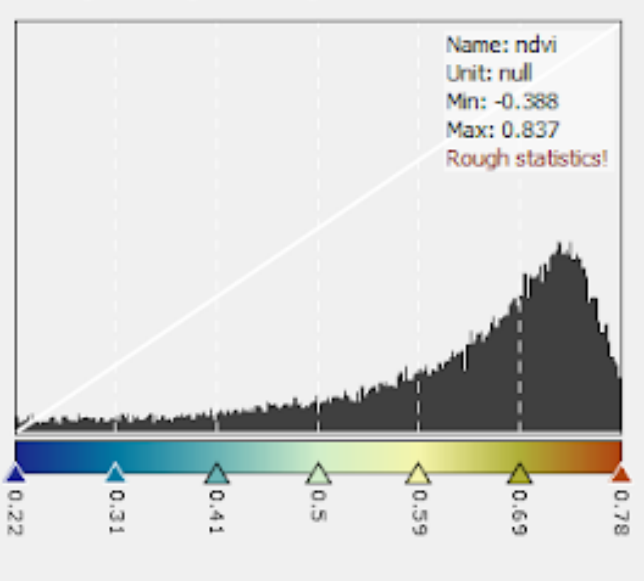


Figura 17. Histograma SNAP

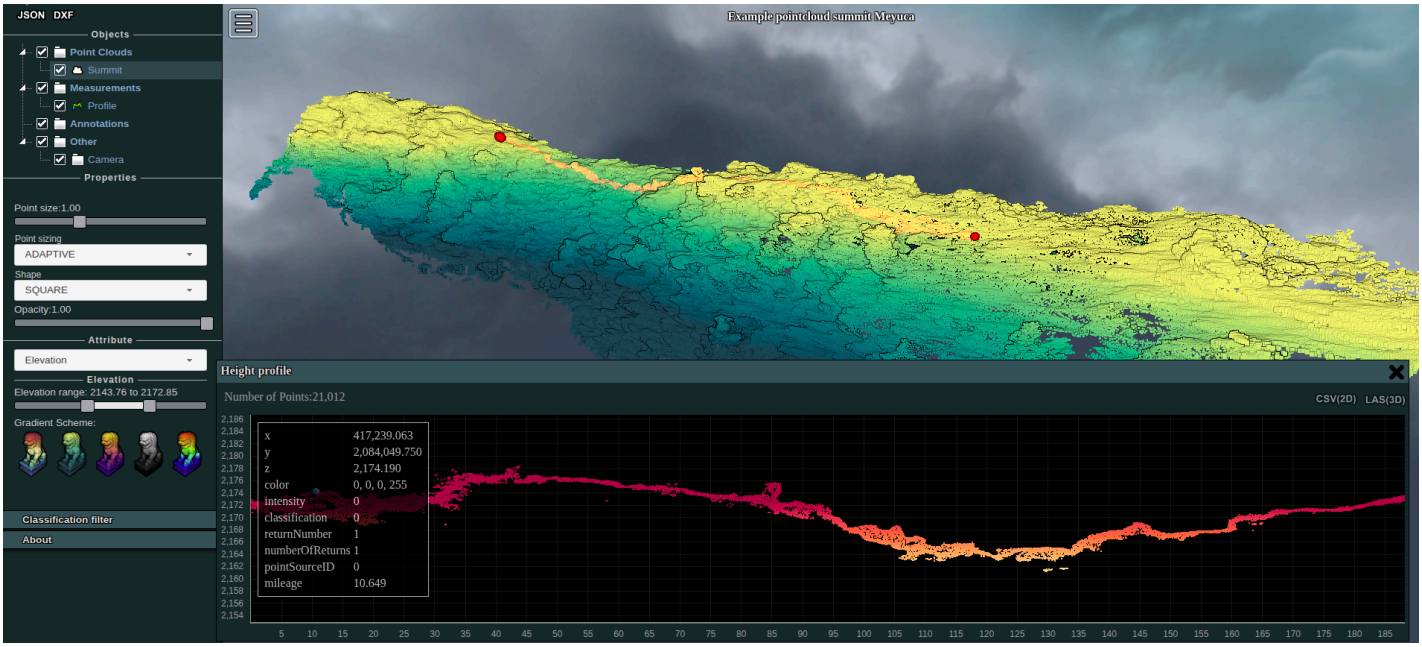


Figura 18. Nube de puntos derivada del VANT.

5.2.1 Ladera este.

Esta zona se ubica a 200 m al NE de la prueba piloto de cumbre. La figura 19 a, es el resultado de cuatro vuelos escalonados usando el sensor óptico (RGB) con una altura promedio de 40 m; el gradiente topográfico disminuye hacia el este, con las mayores elevaciones en un rango de 2000 a 2010 msnm.

La figura 19 b ilustra la vegetación sobre el elemento arqueológico y las condiciones de visibilidad limitada que, con esta técnica, permite diferenciar las “anomalías” en el paisaje. Particularmente interesante el área central del MDT, que muestra claramente el mayor espacio entre las curvas de nivel (figura 19 c). Estos definen una tendencia a superficies planas, delimitadas por la unión agrupada de curvas de nivel (con un rango de elevación que comprende de los 1985 a 1995 msnm) que asemejan un patrón pseudo poligonal. Esta geometría sugiere una posible pendiente suave y terrazas creadas mediante la construcción de muros de sustentación y superficies basales que se distinguen por la orientación general de la pendiente natural.

La imagen generada (NDVI), expresa consistentemente la respuesta espectral de la vegetación, resultante de la combinación de bandas Red, Red Edge y Nir (figura 19d) . La precisión de la ortofoto tiene una GSD de 2,88 cm por píxel en una superficie de 1,56 ha . La imagen muestra en rojo los valores asociados a los mayores niveles de índice (19,9% del área total); en algunos casos coinciden con el levantamiento topográfico (líneas intermitentes). En este enlace se muestra de forma interactiva la comparación del área prospectada con el resultado obtenido con relación al excedente de vegetación.

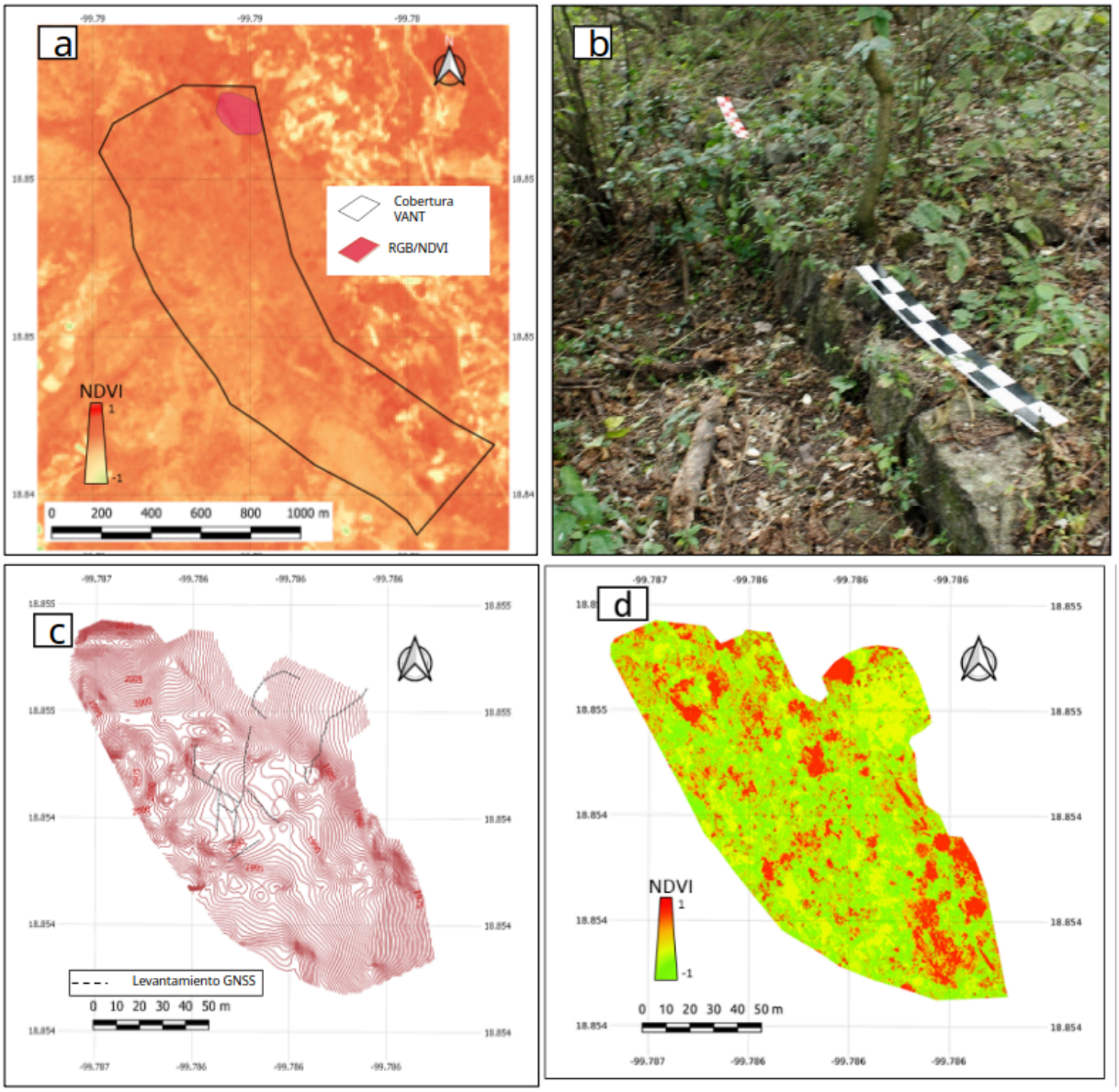


Figura 19. Resultados prueba piloto ladera.

5.3 Mapa binario de potencial de prospección arqueológica (Estrategia Piloto de la Ladera Este)

Las condiciones del relieve y la vegetación limitaron las observaciones resultantes del NDVI calculado en la escena obtenida con VANT, particularmente a la prueba piloto de la ladera oriental; la falta de nitidez a escala y la resolución utilizada impidieron diferenciar claramente las características antrópicas en el paisaje (en contraste con la

detección relativamente fácil de alineaciones intermitentes en la cumbre). Esto llevó a la propuesta de integrar técnicas morfométricas, además de la fotogrametría y el NDVI.

Estos algoritmos se aplicaron a partir del MDT (figura 20 a) para encontrar porcentajes de pendiente en un rango de 0-20°, lo que representa geoformas susceptibles de uso agrícola y residencial (Wasowski, 1998; Ardizzone *et al.*, 2007, Giordan *et al.*, 2017; Patruno *et al.,* 2020) (figura 20 b). Al mismo tiempo, se consideró un mapa que muestra la tendencia de orientación de la pendiente (figura. 20 c), y finalmente se representó el índice de rugosidad del terreno (TRI) (Riley, 1999; Skentos y Ourania, 2017), tal como se muestra en la figura 20 d.

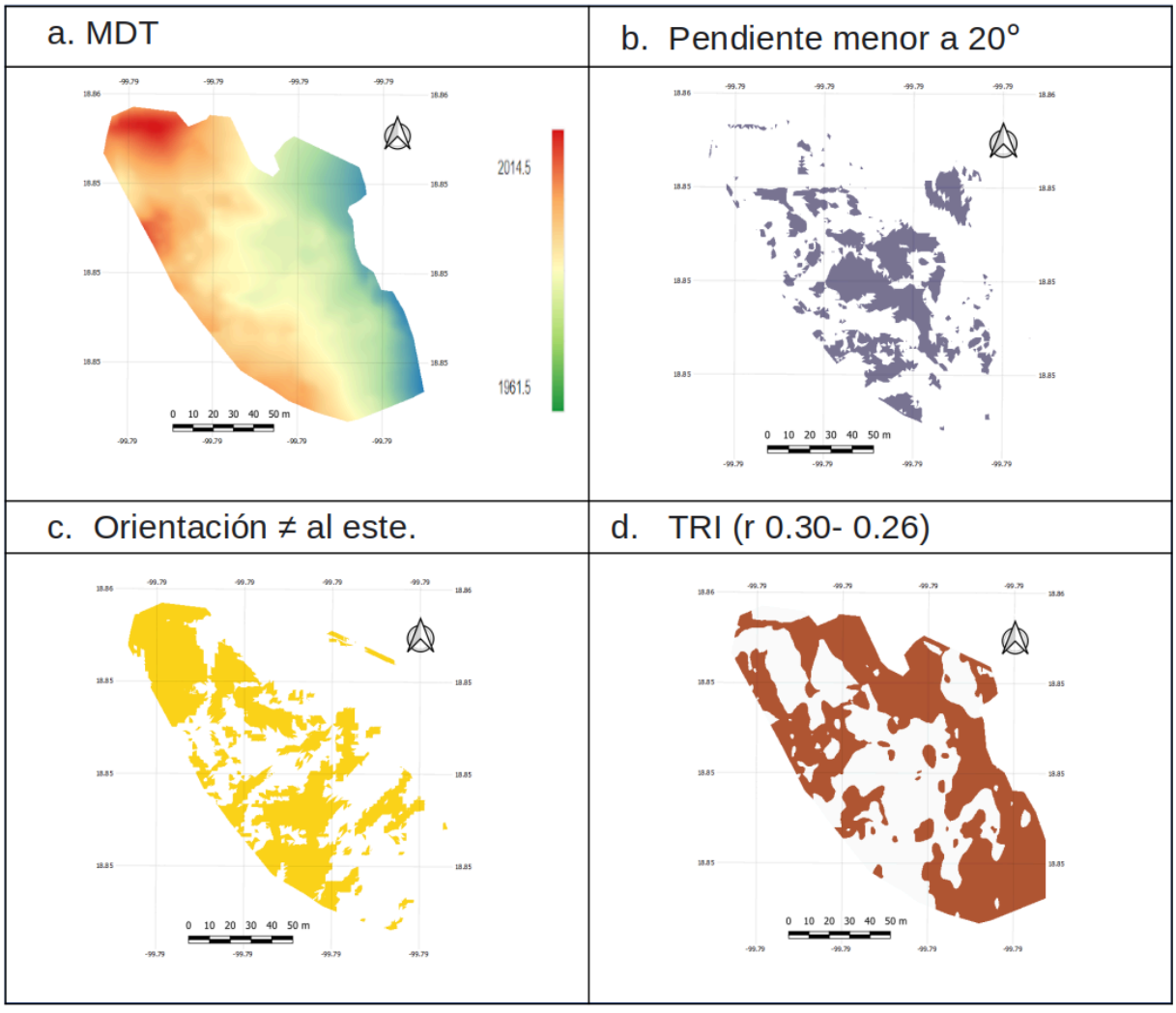


Figura 20 . Mapas derivados de a) MDT, b) Pendiente, c) Orientación y d) TRI.

La representación cartográfica final se proporcionó utilizando álgebra de mapas en el software QGIS, que consiste en la suma de cada valor espacialmente coincidente, incluido el análisis NDVI, (figura. 21). El mapa de salida muestra una simple representación tanto de la información cualitativa (probabilidad de evento) como de la cuantitativa (porcentaje del resultado), dividida por categorías con una superficie total de 1.488 ha y, a partir de investigaciones, muestra el área potencial para identificar rasgos antrópicos con base en métodos predictivos (Espa *et al.*, 2006; Mink *et al.*, 2009; Malaperdas & Zacharias, 2019). Se identificaron modificaciones al relieve en 0,38688 ha, que representan el 26,0% de la superficie total.

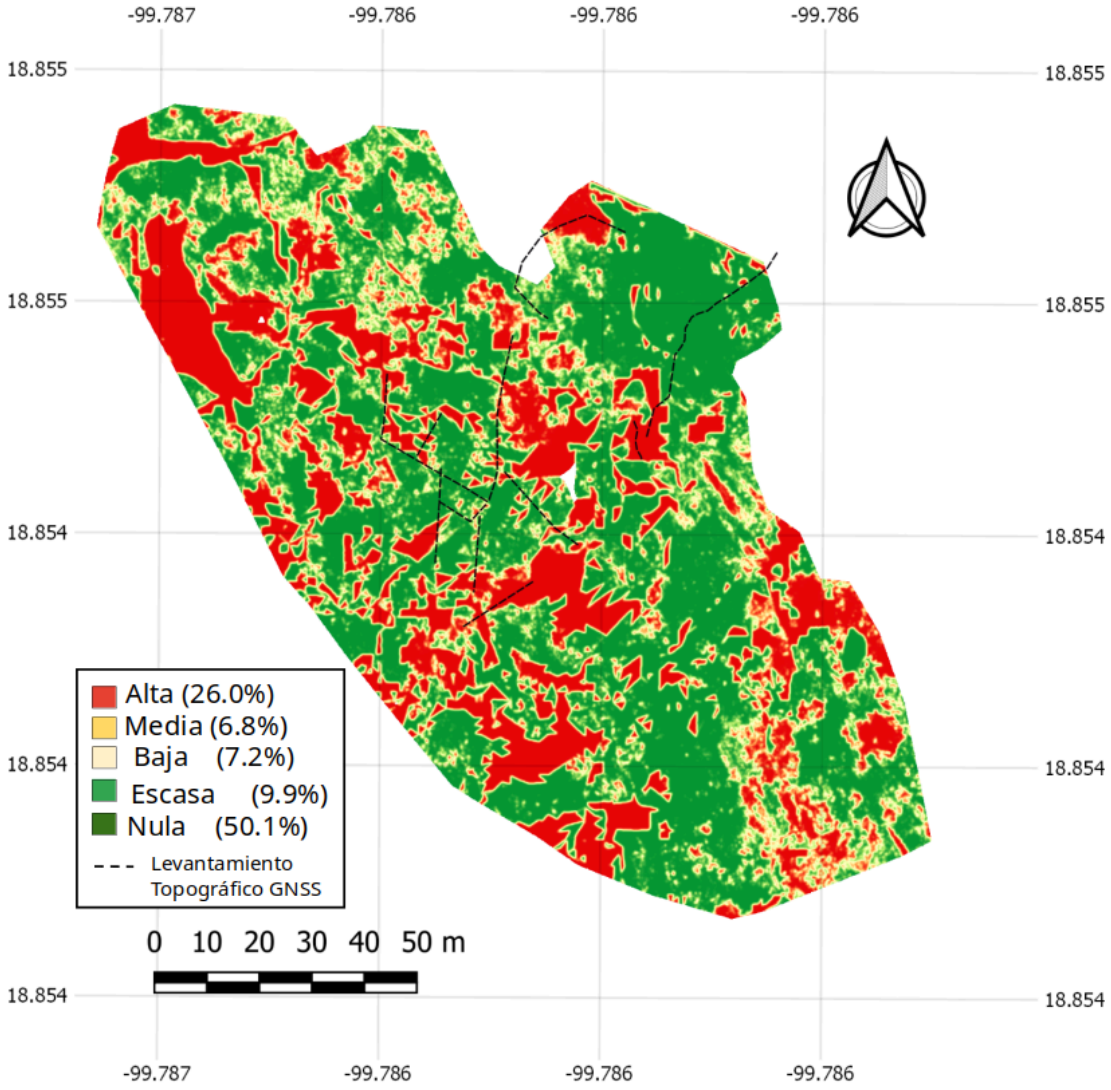
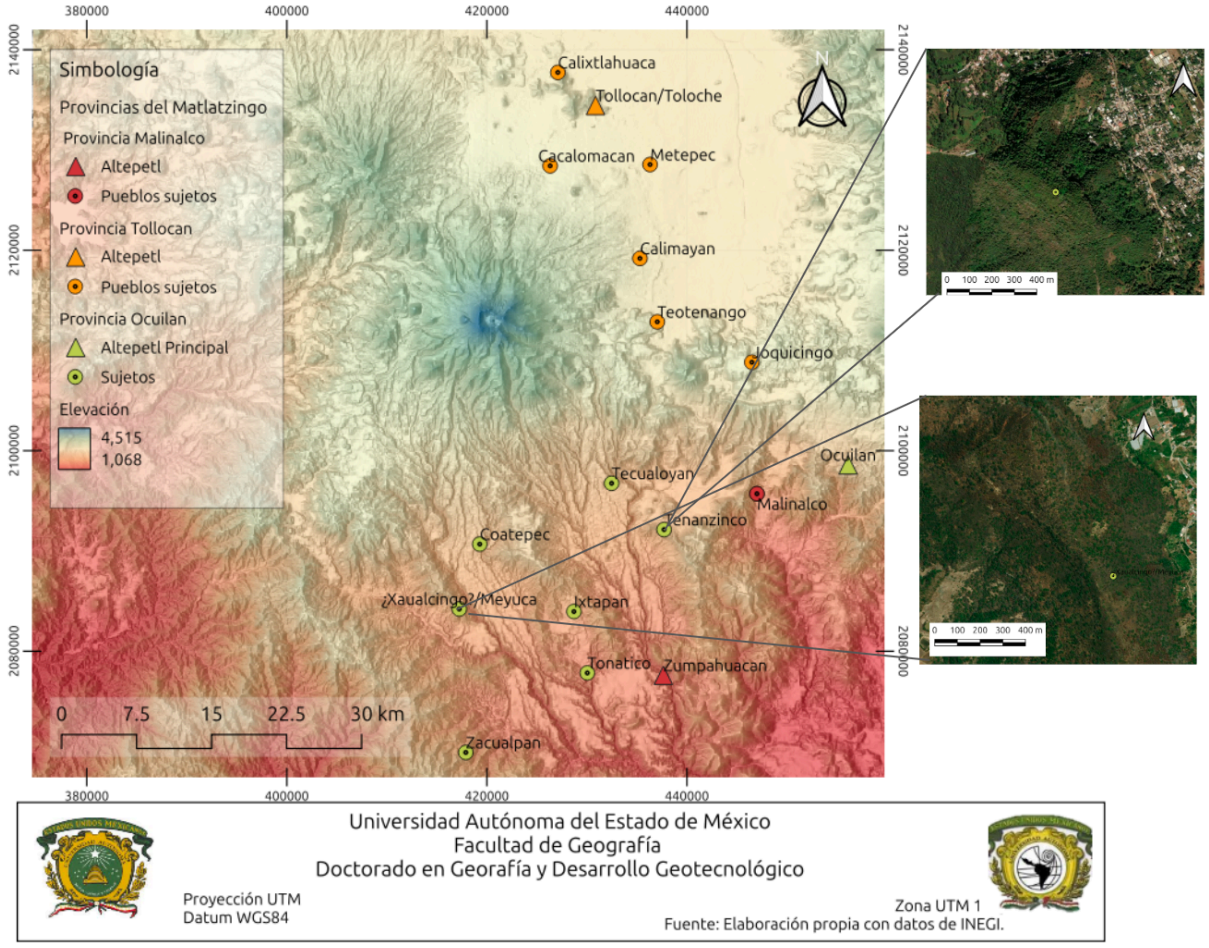


Figura 21. Mapa de salida con potencial de observación de evidencia antrópica.

Corroboración de GEE vs datos en campo.

Importante es precisar que aunque los objetivos de la investigación se desarrollaron al interior del municipio de Coatepec Harinas, se replicó la estrategia en regiones cercanas que contienen clara evidencia arqueológica de ocupación prehispánica, el sitio identificado de jerarquía mayor dentro del territorio de Tenancingo (Palma Linares, 2014), denominado *la Malinche* en el cerro del mismo nombre, en la comunidad de Acatzingo de la piedra fue de utilidad para aplicar el modelo sobre este paisaje que se asemejan por su vegetación y complejidad topográfica, (Mapa 5).



Mapa 5. Estudio comparativo de áreas prospectadas en los cerros de La Catarina y la Malinche.

La información obtenida a partir del análisis geoespacial reveló la presencia de diversas áreas susceptibles de contener información. Estas áreas sugieren la presencia de anomalías de origen cultural que se podrán consultar en el entorno de trabajo de GEE en el siguiente enlace.

Los mapas de umbral del índice de vegetación generados a partir del análisis geoespacial revelaron la presencia de diversas áreas con potencial arqueológico en los cerros de la Catarina y la Malinche. Estas áreas se caracterizan por presentar mesos relieves con geometrías regulares y patrones específicos de pendientes, orientaciones y rugosidad que sugieren la existencia de estructuras antrópicas subyacentes.

La observación detallada en Google Earth Engine, derivada de los sensores Sentinel-2 y Planet complementada con el uso del *split panel*, fue crucial para identificar y comparar las anomalías espectrales asociadas a estos rasgos, específicamente:

- En el cerro de la Catarina, (Meyuca de Morelos), se identificó un sistema de desniveles y plataformas en la cima del cerro que exhibe un rango particular de valores de NDVI, indicando una respuesta de vegetación que sugiere perturbación o alteración antrópica. En particular, se observa una marcada geometría lineal con orientación SW-NE con un rango de NDVI de 0.2-0.4 en tonalidades rojas (figura 22 a y b) que muestra una clara modificación del relieve, esto coincide con el MDT obtenido previamente por restitución fotogramétrica de VANT. (figura 22 c)Este mismo patrón de coloración y rango de NDVI se replica consistentemente en las laderas adyacentes en el eje NW-SE donde la superposición visual revela geometrías y alineamientos que coinciden con esta anomalía espectral, insinuando que hubo una continuación de la ocupación o actividad humana en prácticamente toda la cima de dicho relieve figura 22 sección c.

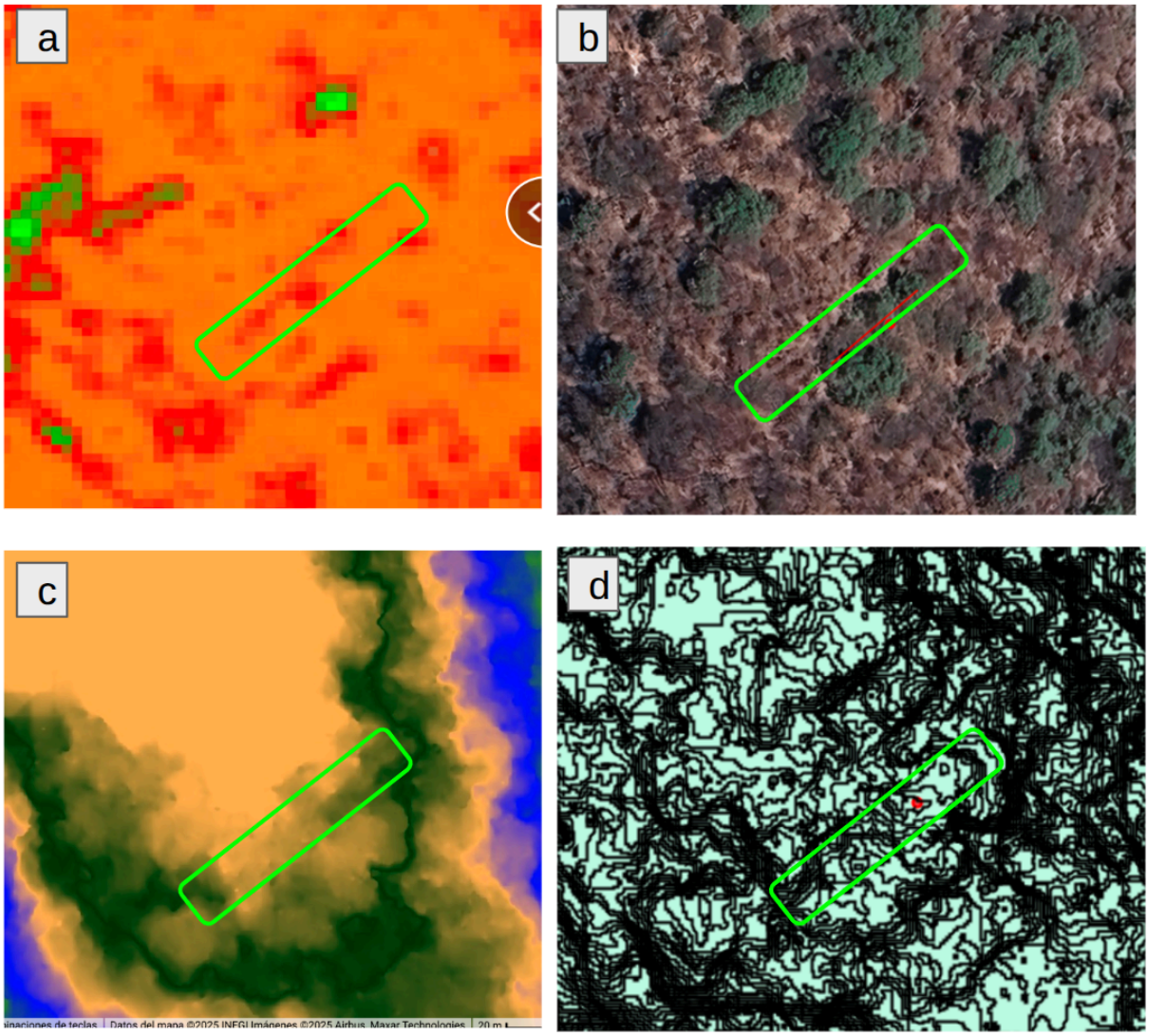


Figura 22. Comparación de anomalías observadas en GEE. a) NDVI, b) Imagen Satelital, c) MDT y b) curvas de nivel.

- En la cima del Cerro La Malinche, (Acatzingo de la piedra) la evidencia arqueológica observada se asocia directamente con valores de NDVI en el rango de 0.2 a 0.4. Este umbral numérico específico corresponde a una coloración distintiva correspondiente a la paleta de colores predefinida en GEE, que, al ser visualizada y comparada en el *split panel* con el MDT coincide con formas del

relieve derivadas de la intervención antrópica que le subyace a la vegetación. Esta correlación entre el umbral de NDVI y las formas del terreno, refuerza la interpretación de presencia de anomalías que influyen en el patrón de crecimiento de la vegetación.

La validación en campo posterior a estas observaciones satelitales confirmó la presencia de evidencia arqueológica tangible en las distintas áreas que previamente fueron identificadas, mediante el análisis de GEE, como susceptibles de ser rasgos antrópicos.

Por último, para validar los resultados, considerando el mapa binario derivado de la prueba piloto 2. (Ladera este) de características antrópicas potenciales, se seleccionaron algunas “anomalías” para validación de campo, con base en inspección visual, así como sus patrones morfológicos (tendencia a geometría y orientación regulares) que podrían estar asociados con modificaciones antrópicas del paisaje. Se aplicó un levantamiento topográfico apoyado por GNSS Diferencial a los restos, elementos y estructuras arqueológicas visibles directamente en campo (figura 23 a),. Además, en la validación se consideraron las “características naturales” (juntas de rocas, bloques de roca desprendidos, fracturas), (figura 23 a) para distinguirlas de las modificaciones antropogénicas del relieve (figura 23 c).

El mapa binario en la figura 23 b muestra “anomalías” rojas derivadas de los valores altos en la información cualitativa (categoría alta y media) y distingue puntos de validación de campo en el 75% de las estructuras antrópicas (muros de contención aparentes, alineamientos de rocas en la superficie, terrazas) y un 25% de elementos “geométricos” naturales (principalmente, bloques de roca desprendidos por erosión/deposición).

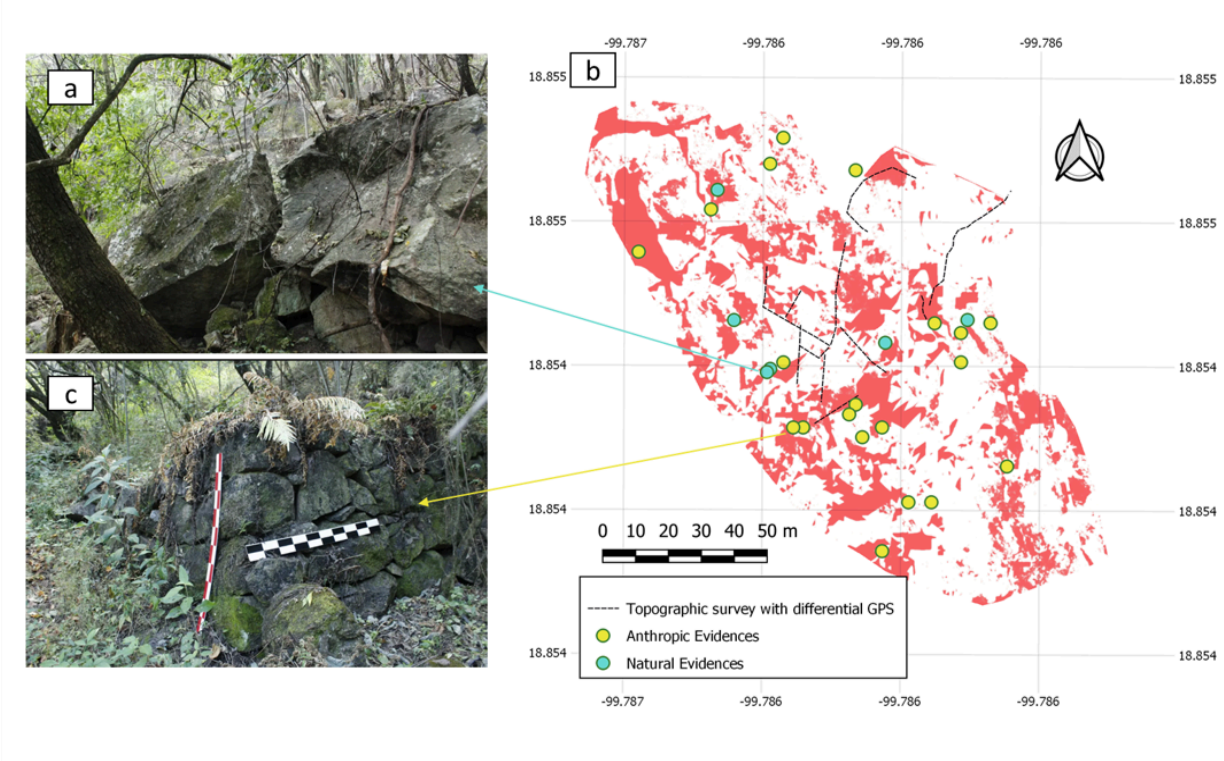


Figura 23. Validación en campo. a) elementos naturales, b) valores derivados del NDVI y levantamiento GNSS y c)Evidencia antrópica.

6. Discusión de resultados

Los resultados de este estudio demuestran la eficacia de la percepción remota y el análisis geoespacial como herramientas para la prospección arqueológica en áreas con vegetación densa y topografía compleja. La metodología desarrollada permitió la identificación de evidencia arqueológica que no había sido registrada previamente, lo que sugiere el potencial de esta técnica para ampliar el conocimiento de los patrones de asentamiento prehispánico en la región.

La efectividad de la aproximación metodológica basada en el análisis de imágenes satelitales en GEE para la prospección arqueológica no invasiva, promovió la identificación de patrones espectrales anómalos, asociados a mesos relieves con geometrías regulares en Meyuca de Morelos, el potencial de estas técnicas para delimitar áreas de interés, incluso en entornos geográficamente complejos.

Comparación GEE vs. Validación en Campo: Evidencia de Ocupación Subyacente

La detección de plataformas en la cima mediante la visualización de un rango específico de NDVI (~0.2-0.4 en tonalidades rojas) fue un indicio clave. Este patrón de coloración, que sugiere una respuesta anómala de la vegetación, se extiende consistentemente en la cima, asociado en algunos casos con tonalidades verdes en un NDVI de ~ 0.7 lo que permite apreciar geometrías y orientaciones y alineamientos que no parecerían de origen natural, hacia la ladera baja lo que se puede inferir por la orientación geometría y color un sistema de terrazas.

La validación en campo en esta área confirmó la presencia de evidencia arqueológica, cerámica, muros de contención, plataformas en la cima y sistemas de terrazas en la ladera este, lo que corrobora la interpretación de los datos de la percepción remota como indicadores de ocupación prehispánica (Figura 9, sección a). Esta coincidencia entre las anomalías espectrales observadas vía satélite, los sensores VANTs y la evidencia física refuerza la noción de marcas de vegetación apoyadas en los índices de vegetación como posibles indicadores de rasgos antrópicos.

6.1 Percepción remota en regiones montañosas: algunos desafíos técnicos.

En cuanto al VANT y lo accidentado del terreno, se plantearon estrategias de vuelo en las que se aprovecha la máxima autonomía de los dispositivos del VANT con especial interés en el rendimiento del vuelo. La prueba piloto de la cumbre logró una cobertura limitada para el área de interés que había sido observada previamente con el sensor satelital; con la nube de puntos resultante del proceso fotogramétrico se redujo la extensión para tener mayor precisión debido al efecto visual del relieve, debido a que los puntos en la parte superior son más densos que en las puntas, donde se observaron en un patrón más disperso.

Esto limita el nivel de precisión. Para garantizar un mejor resultado, se tomó la decisión de excluir los datos más dispersos y remotos de la parte superior. Salach et al. (2018) han experimentado con el nivel de precisión de los datos de VANT y LíDAR, en función de su trabajo y las variables utilizadas (superposición >70%, vuelo vertical > 45 m y densidad de 180 puntos por metro cuadrado); el ajuste presenta un nivel aceptable de confiabilidad.

El caso de la Prueba Piloto de la Ladera Oriental requirió una estrategia de vuelos escalonados en relieve accidentado (Rouse & Krumnow, 2020). Esto presentaba una ventaja sobre la cima porque pertenecía a una distancia vertical constante de la superficie del terreno, lo que ayudaba a que las características aparecieran con mayor detalle. Una vez solucionada la rugosidad del terreno, se puso el foco en resolver la limitada visibilidad derivada del exceso de vegetación en superficie.

El NDVI derivado de la cámara multiespectral de VANT mostró un rendimiento aceptable considerando las condiciones del paisaje, según Adamopoulos & Rinaudo (2020). La respuesta radiométrica fue óptima y el sensor multiespectral montado en el VANT generó información suficiente para identificar variaciones asociadas con la cobertura vegetal. Se logró identificar vegetación estresada, con alto potencial para ser evidencia arqueológica. Brooke & Clutterbuck (2020) muestran que la correlación entre cobertura vegetal-restos arqueológicos puede no ser tan alta, principalmente en pastizales, situación que dificulta la detección de rasgos, principalmente en épocas secas.

Las condiciones del paisaje mostraron un bajo rendimiento en comparación con otros estudios (Calleja *et al.,* 2018; O'Driscoll, 2018; Rouse & Krumnow, 2020) en los que la vegetación proyectada es menos densa o está formada por pastizales o cultivos. Un factor a considerar son las temporadas en las que se realizaron los vuelos (verano). Para aumentar la certeza sobre el uso de la región IR, valdría la pena hacer un análisis comparativo en la época lluviosa y seca y así comparar su desempeño.

6.2 Mapa binario para la prospección e identificación de sitios.

Los resultados del NDVI a partir de datos satelitales gratuitos mostraron una precisión espacial moderada debido a la resolución espacial; sin embargo, cabe señalar que los datos de Sentinel-2 permitieron un enfoque general para el análisis del NDVI. Así, el aporte de datos de Sentinel-2 radica en incrementar el uso y procesamiento de datos gratuitos para abordar la prospección arqueológica en aquellos países donde los recursos satelitales son escasos, como México. La implementación de sensores remotos de bajo costo aseguró cierto grado de confiabilidad, como sugiere Hill (2019), con una precisión submétrica.

La adquisición de imágenes del VANT con sensores multiespectrales hizo más factible la interpretación en la cumbre (Prueba Piloto 1) del Cerro La Catarina, debido a las morfologías más regulares que eran visibles. Se observaron alineamientos rocosos con dirección NO-SE, que son más trazables gracias al microrrelieve relativamente plano, junto con una cubierta vegetal más abierta. Sin embargo, se debe tener cierta cautela en una interpretación directa, debido a la presencia de fallas y fracturas asociadas al Graben de Coatepec como estructura geológica predominante (Servicio Geológico Mexicano, 2013). Es importante no descartar la explotación de estas estructuras naturales en tanto, consideremos la configuración de asentamientos antiguos y modernos.

El mapa binario de la vertiente oriental (Prueba Piloto 2) mostró que el 26% tenía evidencia arqueológica potencial de la superficie total con base en la morfometría combinada-NDVI. Se requirió trabajo de campo para corroborar el grado de incertidumbre para las áreas que podrían ser antrópicas. Las anomalías segmentadas propuestas se diferenciaron por el grado de geometría, pendiente y altos valores de IR

asociados a la cobertura vegetal. Del total de anomalías en el mapa binario, el 6.5% pudo descartarse mediante inspección visual por tener un origen natural.

Los estudios arqueológicos han encontrado una manera de aumentar la certeza en los hallazgos falsos positivos (Bannig & Stewart, 2006; Menze & Sherratt, 2006; Soroush et al. 2020). Discuten varias razones posibles para la evidencia confusa en el mapeo binario resultante de características en los elementos del paisaje, incluido el tamaño, la forma, la geometría y la asociación con elementos geográficos. Wiratama & Sim (2019) han sugerido aplicar esta estrategia a sensores con imágenes pancromáticas, para estimar errores en la clasificación; Bourgeau-Chavez et al, (2016) utilizaron el Índice de Posición Topográfica (TPI), cuyo algoritmo es “altamente dependiente de parámetros de entrada como la forma y el tamaño”, similar al Índice de Rugosidad del Terreno (TRI) que se utilizó en nuestra investigación para mediciones morfométricas. análisis.

Para determinar el análisis de certeza en la Prueba Piloto 2, se observó que más de la mitad de los píxeles del mapa binario fueron clasificados como sitios potenciales y encontrar la tasa de falsos positivos es decisivo para abordar investigaciones más precisas. Como la descripción detallada de este concepto y el marco arqueológico está rebasa los alcances de esta investigación; Se remite al lector a Kirk *et al.*, (2016), quienes sugieren que los cambios en la diversidad ecológica también ocurren en la elevación, y las diferencias fisiográficas en la vegetación y sus causas se han discutido para los sensores LíDAR y SAR (Bourgeau-Chavez *et al.*, 2016; Chase et al., 2018, Murtha et al., 2019; Van Valkenburgh,et al., 2020). El propósito de esa investigación fue identificar los humedales y la vulnerabilidad a la influencia antropogénica. El estudio de Bourgeau-Chavez (2016) se limita a los bosques caducifolios donde la precisión y la interpretación generalmente están relacionadas con la cubierta forestal. Por lo tanto, las características del paisaje y los falsos positivos se relacionan con la existencia de características antrópicas debajo del dosel.

Sin embargo, en un estudio arqueológico estas anomalías representan una ventaja, dada la intención de encontrar evidencia antrópica, lo que asegura confiabilidad en la investigación.

Wallach (2019) menciona la máxima verosimilitud como estrategia en arqueología. Utilizada en teledetección para reducir el grado de incertidumbre, la efectividad de esta herramienta estadística es conocida en contextos arqueológicos (De Laet et al., 2007; Sober, 2009; Yaworsky et al., 2020); sin embargo, en la Prueba Piloto 2, la zona prospectada en esta investigación arroja mejores resultados al no tener un enfoque regional, y se ha obtenido verificación con datos sólidos.

Si bien la prueba piloto se considera una muestra de la topografía total, la verificación de campo encontró evidencia antrópica en el 75% del mapa binario total. Basado en Yaworsky *et al.* (2020), se supone que la mejor práctica arqueológica es comprender las limitaciones de nuestros datos y ser conservadores con las predicciones. Por ello, aunque el estudio se limita a un enfoque local, la selección intencionada de pruebas piloto proporciona una prueba de presencia-ausencia para evaluar posibles resultados. Sin embargo, es importante extender las pruebas piloto a un contexto más amplio para determinar los falsos positivos y eventualmente producir datos comparables con regiones adyacentes.

Un hallazgo metodológico significativo fue la aplicación exitosa de una estrategia integrada que combina la plataforma Google Earth Engine (GEE) con la fotogrametría de alta resolución mediante VANT, validadas en nuestra área de estudio. Además, en el contexto del Cerro La Malinche, la eficacia de este enfoque quedó demostrada al establecer un umbral espectral específico de NDVI, comprendido entre ~0.2 y 0.4, que funcionó como un indicador confiable para la detección remota de anomalías arqueológicas. (figura 24 a, b, y c) Este rango numérico, asociado a una firma de vegetación distintiva, permitió identificar patrones geométricos y alineamientos claramente antrópicos que habían pasado desapercibidos en estudios convencionales. La correlación espacial entre estas anomalías y las microtopografías visibles en los modelos digitales del terreno generados con el VANT reforzó la idea de la presencia de un asentamiento prehispánico subyacente (figura 24 d), respecto al vigor y la distribución de la cobertura vegetal.

La verificación en campo durante la temporada 2024 no solo confirmó la precisión de las predicciones derivadas de la percepción remota, sino que reveló la importancia de factores externos imprevistos aunque lamentables por el impacto al ambiente, ayudaron a la interpretación. El incendio forestal sin precedentes registrado en marzo de 2024, si bien representó una perturbación ecológica severa, actuó como un factor de apoyo en la prospección arqueológica. Este evento eliminó la densa capa de vegetación arbustiva y herbácea que por más de una década había imposibilitado el acceso y la observación directa en amplias zonas de la ladera. La desfavorable condición se transformó así en una oportunidad única, permitiendo un recorrido sistemático de áreas que hasta entonces eran prácticamente inaccesibles.

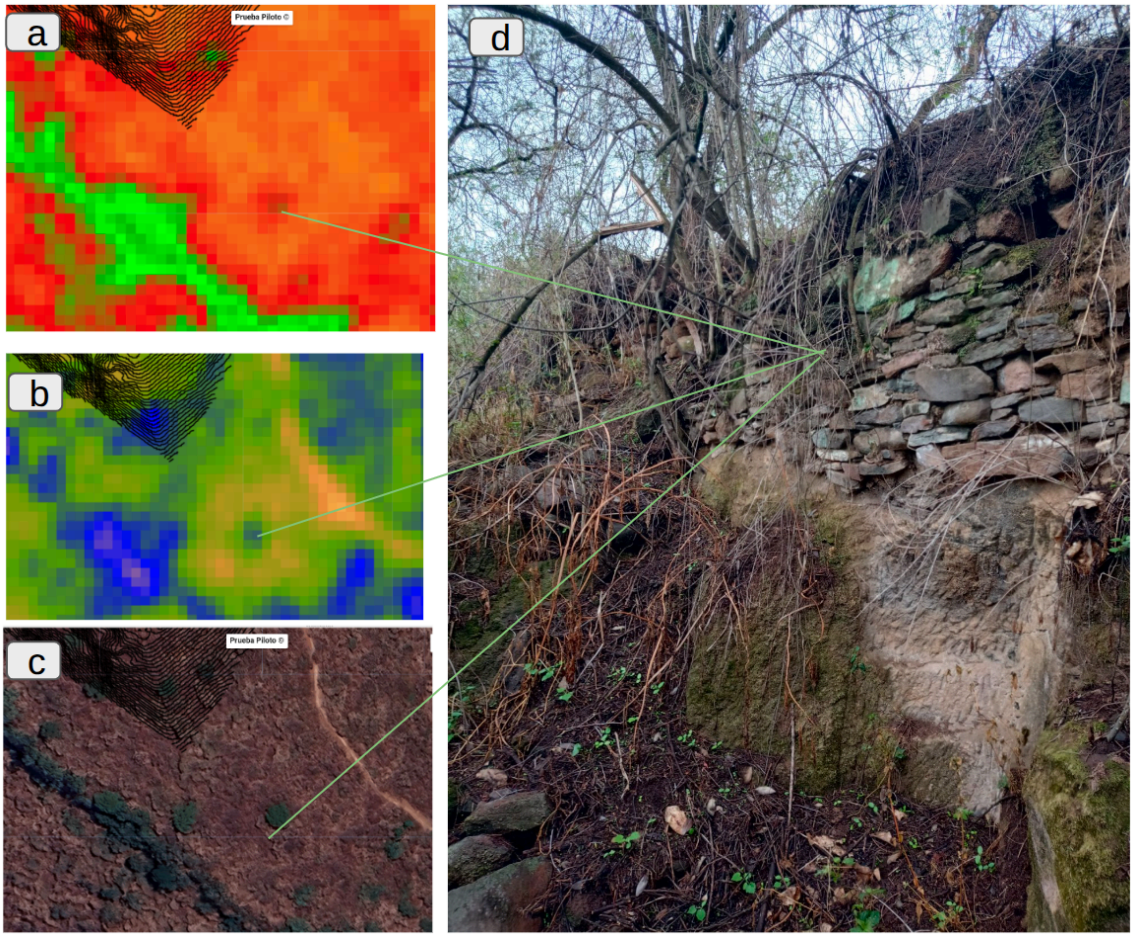


Figura 24 Validación en campo vs GEE. a) y b) NDVI Planet, c) imagen satelital y d) evidencia arqueológica identificada.

Apoyados por la información de las anomalías previamente cartografiadas, el trabajo de campo permitió documentar de manera inédita un extenso sistema de terrazas y estructuras prehispánicas en las inmediaciones de las áreas previamente registradas. Este hallazgo no sólo valida la capacidad de la metodología GEE-VANT-RGB-IR para revelar perturbaciones subsuperficiales, sino que redefine la comprensión de la extensión y complejidad de dicho asentamiento. La correlación espacial entre los nuevos registros y el umbral de NDVI identificado confirma que este valor es de utilidad para la prospección arqueológica en contextos geográficos similares.

6.3 El asentamiento prehispánico de jerarquía mayor, Cerro La Catarina en el contexto de la provincia de Matlatzinco.

Los asentamientos prehispánicos ya han sido estudiados en el sur del Estado de México, y es posible asociar la distribución de la evidencia arqueológica identificada en superficie con las provincias fiscales y las subdivisiones coloniales de la provincia de Matlatzinco.

Sitios de alta jerarquía como Tenancingo y Ocuilan (De la Peña *et al.*, 2008; Palma, 2014) han sido abordados en estudios sistemáticos de arqueología de superficie, geografía, relieve y vegetación, y se asemejan al paisaje observado en el Cerro La Catarina.

Los resultados de la aplicación de geotecnologías en esta investigación, en contraste con las fuentes documentales, ubican inicialmente a este sitio como un asentamiento ubicado estratégicamente entre la cuenca del río Balsas y los valles de Toluca (norte), Tenancingo y Ocuilan (este).

Además de un análisis de prospección integrada (NDVI/Morfometría) en otros sectores dentro de la misma forma superior y rutas superficiales intensivas, y un estudio exhaustivo del inventario artefacto recuperado hasta el momento, se ha perfilado al Cerro La Catarina como el remanente arqueológico de un asentamiento. desde antes de la conquista española; proponemos que es el altepetl de Xahualcingo.

Los estudios etnohistóricos en la región sur del Estado de México (González, 2010; García Castro, 2013) trazan los límites provisionales de la provincia de Matlatzinca con los pueblos chontales. Una vez iniciada la conquista militar por el imperio azteca alrededor de 1470 d.C., la reconfiguración del Matlatzinco introdujo cambios importantes entre estos movimientos poblacionales desde puntos estratégicos con acceso limitado a elementos geográficos mejor dotados de recursos.

Luego de esta conquista, la complejidad poblacional estuvo definida por las divisiones de la Triple Alianza (García-Castro, 1999; García-Castro, 2013); para los pueblos matlatzincas de la sección sur, la distribución estuvo encabezada por la provincia de Ocuilan, entre cuyos topónimos se encontraba Coatepec, considerado un altépetl. En la Matrícula de Tributos, la ciudad-estado de Coatepec corresponde al actual municipio de Coatepec Harinas. Informes del INAH indican que el asentamiento actual está asociado al período prehispánico; sin embargo, no existe información sólida correspondiente a Xahualcingo, entidad político-territorial, que luego del sometimiento azteca, reestructuró su asentamiento en el interior de la región.

En cuanto a la ubicación de este asentamiento en la periferia del Imperio Azteca, representa un sitio estratégico entre las cuencas y los pueblos cercanos a la montaña norte del actual estado de Guerrero, (Silverstein, 2001; Silverstein, 2017; Gutiérrez, 2017).

Además de las investigaciones históricas (Vázquez, 2008), datos etnográficos en la comunidad de Meyuca de Morelos, señalan el Cerro La Catarina y el antiguo asentamiento de Xahualcingo. Sin embargo, sin un estudio arqueológico y un trabajo de excavación exhaustivos, no es posible identificar claramente la función del sitio. Con las evidencias reunidas, proponemos que corresponde a una guarnición periférica bajo dominio azteca; se trata de asentamientos matlatzincas cercanos a etnias asociadas a la Cuenca del Balsas, lo que la convierte en una región de transición entre las etnias matlatzinca y chontal. Con los datos recopilados hasta la fecha aún no es posible distinguir claramente los límites entre estas provincias, pero sí es posible distinguir un asentamiento en la periferia que, durante el Posclásico tardío, concentró el dominio político-territorial de manera similar.

Ambos estuvieron sometidos al poder del imperio azteca, y la adaptación del paisaje guarda similitudes con Oztuma, asentamiento chontal donde es posible observar elementos paisajísticos similares a nuestra zona de interés: la cima del cerro con forma escalonada, andenes, elevaciones y accesos restringidos, similares a fuertes, guarniciones, muros de contención y sistemas de terrazas en laderas (Silverstein, 2001; Silverstein, 2017).

Basado en el modelo propuesto por Feuer (2016) y la evidencia derivada de la teledetección, este asentamiento pertenece a la semiperiferia del extremo oeste del imperio. Bajo esta estructura es posible identificar el remanente de comunidades matlatzinco alejadas de sus núcleos y centros de poder, que muestran áreas diferenciadas y límites entre grupos étnicos.

Se puede inferir que esta es una línea divisoria con límites aproximados en las guarniciones que se observan de manera heterogénea según González (2013). Para reforzar esta conjetura, es necesario expandirse a otros sectores dentro de la misma topografía. Esta prueba piloto permitió demostrar consistentemente, en los sectores de la cumbre y, en particular, en la vertiente oriental, el remanente arqueológico correspondiente a una jerarquía de asentamiento.

6.4 Contribución de los índices de vegetación y su desempeño en el Paisaje.

La exploración de diversos índices de vegetación, más allá del NDVI, como el EVI y SAVI, fue importante considerando los efectos atmosféricos sobre suelo, respectivamente, estos índices adquieren particular relevancia en entornos con vegetación heterogénea o cambios estacionales. El Índice de Vegetación Anómala (AVI), por su parte, demostró ser eficaz para resaltar patrones sutiles de estrés o vigor de la vegetación directamente relacionados con alteraciones antrópicas, un enfoque respaldado por la literatura en la identificación de marcas de cultivo (Agapiou et al., 2012).

Sin embargo, es fundamental considerar que el desempeño del NDVI, derivado de sensores multiespectrales, aunque aceptable en las condiciones del paisaje estudiado (Adamopouloss & Rinaudo, 2020) puede verse limitado por la densidad de la cobertura vegetal. La correlación entre la cobertura vegetal y los restos arqueológicos puede ser menos pronunciada en ciertas condiciones, como los pastizales o las estaciones secas (Broke & Clutterbuck, 2020), lo que sugiere que las condiciones de bajo rendimiento observadas en algunos estudios (Calleja *et al.*, 2018; O´Driscoll, 2018; Rouse y Krumnow, 2020) pueden deberse a una vegetación menos densa o a las características específicas del pastizal o los cultivos.

Un factor importante a considerar es la estación en la que se realizan las observaciones satelitales con GEE para este trabajo se propuso un periodo de tiempo del 01 de junio de 2022 al 01 de junio de 2022, sin embargo, para aumentar la certeza en el uso del NIR, sería valioso realizar un análisis comparativo en las estaciones de lluvias y secas, y así comparar su rendimiento respecto al desarrollo de la vegetación.

6.5 Certeza e Incertidumbre en los resultados de la Prospección Arqueológica.

Los resultados del NDVI derivados de datos satelitales de acceso libre, como Sentinel-2, si bien permitieron un enfoque general en el análisis, mostraron una precisión espacial de moderada a baja debido a su resolución inherente. No obstante, la disponibilidad de datos Sentinel-2 de acceso libre y *Planet* es una ventaja significativa para la prospección arqueológica en regiones donde los recursos son limitados, como la gran mayoría de latinoamérica. La interpretación de estas anomalías requiere cautela, ya que, como se ha observado, la presencia de estructuras geológicas naturales por ejemplo, fallas y fracturas asociadas al Graben de Coatepec (Servicio Geológico Mexicano, 2013) puede generar patrones similares a los rasgos antrópicos. Sin embargo, no se debe descartar la posibilidad de que antiguas poblaciones hubiesen buscado aprovechar estas características naturales al configurar sus asentamientos. Además de utilizar datos de Sentinel-2, trabajar con una resolución mayor como la de sensores Planet, permitió afinar la búsqueda y observación para que

de este modo, en contraste con los MDT derivados de restitución fotogramétrica se logren resultados más precisos para ser validados en campo.

La configuración del relieve es de suma importancia en trabajos de percepción remota para la identificación de rasgos antrópicos, especialmente en áreas con densa vegetación donde estos elementos pueden quedar ocultos en el paisaje. Factores como la altitud, la pendiente y la orientación de las laderas influyen directamente en la distribución y el tipo de vegetación, así como en los patrones de acumulación de agua y erosión.

Por ejemplo, la presencia de una microrelieve nivelado dentro de una ladera boscosa podría ser detectable a través de anomalías en la pendiente o en la regularidad del terreno que no corresponden con patrones naturales de modelado geomorfológico, aunque la cobertura vegetal sea densa.

De igual manera, las estructuras lineales como caminos o muros, aunque cubiertas por vegetación, pueden generar cambios sutiles en la topografía que los sensores utilizados en este trabajo podrían identificar diferenciando patrones de vegetación naturales y aquellos alterados por la actividad humana

Además, al comprender cómo el relieve incide sobre las características de la vegetación, es posible diferenciar entre patrones de vegetación naturales y aquellos alterados por la actividad humana, una vegetación inusualmente homogénea asociados a los valores de índices de vegetación que no se alinea con los patrones topográficos naturales, podría indicar la presencia de un rasgo antrópico subyacente.

La identificación de un porcentaje significativo de potencial evidencia arqueológica en los mapas binarios (26%) subraya la necesidad crítica del trabajo de campo para corroborar el grado de incertidumbre de las áreas potencialmente antrópicas.

Estudios arqueológicos previos han abordado la forma de aumentar la certeza y reducir los hallazgos de 'falsos positivos' (Banning *et al.*, 2006; Menze *et al.,* 2006; Soroush *et al.*, 2020), discutiendo diversas razones de confusión como el tamaño, la forma, la geometría y la asociación con elementos geográficos. La inspección visual, como la

que realizamos, puede descartar un porcentaje de estas anomalías por su origen natural. Aunque la tasa de falsos positivos es esencial para estimaciones más precisas, en un estudio arqueológico, la presencia de anomalías representa una ventaja, dada la intención de encontrar evidencia antrópica, lo que refuerza la fiabilidad de la investigación.

A pesar de la limitación de este trabajo a un estudio comparativo de dos sitios arqueológicos de jerarquía mayor, la selección intencional de los mismos proporcionó información por un criterio de presencia-ausencia para evaluar posibles resultados. La validación en campo confirmó evidencia antrópica del 60 al 75 % de las áreas prospectadas, lo que enfatiza la comprensión de las limitaciones de los datos y fomentan predicciones conservadoras (Yaworsky *et al.*, 2020). A futuro, la investigación deberá extender estas pruebas a un contexto más amplio para determinar las tasas de falsos positivos y, eventualmente, producir datos comparables en regiones adyacentes con características geográficas y culturales semejantes.

7. Conclusiones y propuesta de trabajos a futuro.

La teledetección ha proporcionado la adquisición de información sobre la superficie terrestre como un procedimiento eficaz para identificar anomalías registradas por sensores satelitales y vehículos aéreos no tripulados. La observación de fenómenos culturales y naturales ha beneficiado a la investigación arqueológica, a las imágenes satelitales de acceso abierto (Sentinel-2, SNAP, y GEE) utilizado para este proyecto, representa una amplia ventaja frente a las restricciones de otros recursos que presentan imágenes con una resolución superior a 10 m por píxel y software comercial.

Sin embargo, para los efectos de la investigación, el índice de vegetación estandarizado derivado de imágenes satelitales tuvo una resolución adecuada, y se logró una aproximación de rasgos imperceptibles al ojo humano. A pesar de la densidad de la vegetación y lo accidentado del relieve, se evidenció un patrón de distribución geométrica y densidad de la vegetación asociado a alteraciones en el suelo.

Esto sirvió de base, junto con la documentación anterior, para decidir dónde prospectar utilizando información precisa del VANT con sensores IR y RGB, mapas con mejores datos georeferenciados.

La combinación de diferentes herramientas es útil en investigaciones arqueológicas con recursos limitados. En términos de costo-tiempo-beneficio se han obtenido resultados satisfactorios, y en el mapa final de la Prueba Piloto Vertiente Oriental, las características anómalas equivalen al 26% de la superficie encuestada. Una vez identificadas, la validación en campo diferenció las anomalías antrópicas (75%) de las de origen natural (25%), demostrando el porcentaje de efectividad para el área piloto seleccionada.

La teledetección satelital de alta resolución, las imágenes VANT RGB y los sensores LiDAR pueden ser bastante efectivos para identificar y mapear elementos arqueológicos, todo lo cual requiere tiempo, mano de obra y recursos financieros. Esto implica una inversión para un enfoque regional.

El modelo propuesto es rentable y logra una precisión cercana a la de tecnologías más costosas y puede mejorarse una vez que una muestra más grande esté disponible y validada en el campo.

Este método integrado reduce la incertidumbre, el tiempo y el costo en comparación con otras herramientas utilizadas en la teledetección. Aunque existen procedimientos más efectivos y precisos, nuestra propuesta arroja resultados con precisión submétrica en términos de identificar y diferenciar evidencia arqueológica, brindando una alternativa a las necesidades de investigación en contextos con complejidad topográfica de vegetación en economías emergentes.

La percepción remota y el análisis geoespacial son herramientas valiosas para la prospección arqueológica en áreas con vegetación densa y topografía compleja. La metodología desarrollada en este estudio permitió la identificación de sitios arqueológicos en Meyuca de Morelos y Tenancingo, lo que demuestra el potencial de esta técnica para ampliar el conocimiento de los patrones de asentamiento prehispánico en la región. Se recomienda la aplicación de esta metodología en otras áreas con características similares, así como la integración de otras técnicas de prospección, como la geofísica, para obtener un panorama más amplio de los sitios arqueológicos.

Interesa destacar que el desarrollo de esta investigación y el trabajo de campo se llevó a cabo en un escenario complejo, marcado por dos limitantes significativos. Por un lado, la contingencia sanitaria de años anteriores condicionó los tiempos y las formas de acceso a las áreas de estudio, retrasando la fase de validación reconocimiento, recorrido y verificación en campo. Por otro lado, el reciente contexto de inseguridad en el municipio de Coatepec Harinas, obligó a implementar protocolos de seguridad muy estrictos en el trabajo de campo y afectó la logística respecto al tiempo disponible para la prospección in situ, limitando la cobertura regional que originalmente se había planeado. A pesar de estos desafíos, la metodología implementada demostró ser robusta y adaptable, incluso con las circunstancias antes mencionadas, permitiendo obtener resultados que validan la integración de técnicas de prospección arqueológica en condiciones adversas.

Por último hay que destacar que como parte de los productos académicos derivados de esta investigación, se ha logrado la divulgación de estos hallazgos contribuyendo con el artículo "Geospatial Integration in Mapping Pre-Hispanic Settlements within Aztec Empire Limits" publicado en la revista *Virtual Archaeology Review*, indexada en Scopus, donde se presenta el marco metodológico y los primeros resultados del proyecto. Paralelamente, el artículo "Cartografía de Sitios Prehispánicos en el Suroeste del Estado de México: Una Aproximación Geotecnológica" se encuentra en fase de revisión, profundizando en el análisis cartográfico y espacial de los sitios identificados con GEE. Estas publicaciones posicionan la investigación dentro de la discusión académica contemporánea sobre la aplicación de geotecnologías en la arqueología.

En conclusión, la combinación de la estrategia de registro arqueológico remoto empleada a diferentes escalas (satelital y VANT), demostró ser una herramienta notable para la detección y verificación de evidencia arqueológica en contextos de vegetación densa. Para el caso de estudio, se establece un precedente metodológico sólido que puede replicarse en otras áreas boscosas con relieves accidentados dentro de la región, optimizando los recursos de campo y aumentando significativamente la probabilidad de éxito en la identificación de sitios arqueológicos. La sinergia entre tecnologías de información geográfica, análisis mediante percepción remota y verificación en campo, se consolida así como una estrategia esencial para la arqueología de superficie en la actualidad.

7.1. Propuesta de trabajos a futuro.

El desarrollo mostrado en el presente trabajo ha sido importante, no sólo por ser un precedente en el contexto arqueológico de área de estudio sino por las estrategias empleados para la obtención de información, para próximas investigaciones se propone continuar con la aplicación de tecnologías de información geográfica con una perspectiva regional.

Para sitios de jerarquía mayor, se propone para el futuro de esta investigación trabajar sobre tres líneas de acción, en primer lugar, desarrollar una prospección a escala

diferente con la integración de métodos geofísicos sobre el subsuelo especialmente en la en la cima del cerro de la Catarina.

El uso del radar de penetración terrestre (GPR) aplicado sobre las anomalías con mayor potencial identificadas en el mapa binario, podría aportar información para que eventualmente sea considerado para futuras excavaciones y tener información más precisa de la configuración del patrón de asentamiento.

En segundo lugar, es importante considerar la replicabilidad del modelo de trabajo propuesto para la prospección y registro de datos (GEE, VANT y validación de campo) en los sitios identificados y que estén en condiciones de aportar mayor información y más importante aún, en regiones montañosas adyacentes que presenten características similares y que culturalmente formen parte de la denominada Provincia del Matlatzinco que contrastan con la características geológicas y de vegetación para evaluar y de ser necesario ajustar el grado de certidumbre y eficiencia del método contribuyendo con la generación y aplicación de un modelo más robusto.

Otro factor a considerar y desarrollar en investigaciones futuras, es la persistencia temporal de los rasgos, analizada mediante series de tiempo en GEE, Respecto a la certidumbre, el monitoreo multitemporal de índices de vegetación permitirá distinguir entre anomalías esporádicas y firmas espectrales consistentes, como por ejemplo, el umbral de NDVI (~0.2-0.4) en los sitios prospectados. Esta recurrencia estacional (lluvias y secas) validará que las señales responden a estructuras antrópicas subyacentes y no a variaciones vegetales puntuales, otorgándole un mayor grado de confianza.

Otra parte fundamental de la proyección de trabajos a futuro, es atender a las normativas que se rigen por la ley federal de monumento a históricos, al continuar con la redacción de un informe técnico para el Consejo de Arqueología que sistematice los hallazgos y la metodología, que además sirva de referente en la región. Derivado de este informe, se plantea formular una propuesta específica de intervención que contemple la realización de pozos de sondeo y excavaciones arqueológicas en los sitios detectados como de mayor potencial, lo que permitirá contrastar y verificar

físicamente las anomalías identificadas. Paralelamente, se propone incorporar el uso de inteligencia artificial con pruebas piloto, para optimizar el procesamiento de datos geoespaciales, automatizando la detección de patrones y contribuyendo a generar una metodología de prospección más robusta, eficiente y escalable.

Finalmente este trabajo es un intento para impactar de forma directa en la gestión patrimonial mediante los modelos y herramientas propuestos para agilizar la generación de polígonos de protección legal de los sitios arqueológicos identificados para la protección del patrimonio por las instituciones correspondientes.

Bibliografía

Abate, N., Elfadaly, A., Masini, N., & Lasaponara, R. (2020). Multitemporal 2016-2018 Sentinel-2 data enhancement for landscape archaeology: the case study of the Foggia Province, Southern Italy. *Remote Sensing*, *12*(8), 1309. https://doi.org/10.3390/rs12081309

Adamopouloss, E., & Rinaudo, F. (2020). UAS-Based Archaeological Remote Sensing: Review, Meta-Analysis and State-of-the-Art. *Drones*, *4*(46). https://doi.org/10.3390/drones4030046

Agapiou, A., Alexakis, D., Sarris, A., & Hadjimitsis, D. G. (2014). Evaluating the potentials of Sentinel-2 for archaeological perspective. *Remote Sensing*, *6*(3), 2176-2194. https://doi.org/10.3390/rs6032176

Agapiou, A., Hadjimitsis, D. G., & Alexakis, D. D. (2012). Evaluation of Broadband and Narrowband Vegetation Indices for the Identification of Archaeological Crop Marks. *Remote Sensing*, *4*.

Albores, Z. B. (2006). Una travesía conceptual del Matlatzinco al Valle de Toluca. *Anales de Antropología*, *10*(1), 253-282. http://www.revistas.unam.mx/index.php/antropologia/article/view/9961/pdf_123

Alexakis, D.D., Agapiou, A.A., Georgiu, A., Hadjimitsis, D.G., & Laoupi, A. (2021). Hyperspectral Remote Sensing for Archaeological Prospection: A Review. *Journal of Archaeological Science: Reports*, *37*. Retrieved Mayo 16, 2025, from https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-archaeological-science-reports

Anaya, A. (2023). *Modelos predictivos en arqueología. _ Sistemas de Información Geográfica (SIG) para arqueólogos. Repensando el espacio en contextos arqueológicos mesoamericanos* (A. Trujillo, Ed.). El Colegio de Michoacán, A.C.

Arana, R. M. (1990). *Proyecto Coatlán Área Tonatico-Pilcaya* (Instituto Nacional de Antropología e Historia - INAH ed.).

Ardizzone, F., Cardinali, M., Galli, M., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (2007). Identification and mapping of recent rainfall- induced landslides using elevation data collected by airborne Lidar. *Natural Hazards and Earth System Science*, *7*(6), 637–650. https://doi.org/10.5194/nhess-7-637-2007

Ashmore, W. (Ed.). (1981). *Lowland Maya Settlement Patterns*. University of New Mexico Press.

Banning, E. B., Hawkins, A. L., & Stewart, S. T. (2006). Detection functions for archaeological survey. *American Antiquity*, *71*(4), 723-742. https://doi.org/10.2307/40035886

Barlow, R. H. (1992). *La extensión del imperio de los culhua mexica* (E. Limón, Ed.; J. Monjarás-Ruiz, Trans.). INAH.

Bennett, R., Welham, K., Hill, R., & Ford, A. (2012). The application of vegetation indices for the prospection of archaeological features in grass-dominated environments. *Archaeological Prospection*, *19*(3). https://doi.org/10.1002/arp.1429

Berdan, F. (2017). Late Postclassic Mesoamerican trade networks and imperial expansion. *Journal of Globalization Studies*, *8*(1), 14-29. https://www.sociostudies.org/journal/articles/939197/

Berdan, F. F. (1996). *Aztec Imperial Strategies*. Dumbarton Oaks Research Library and Collection.

Berdan, F. F., & Smith, M. (1996). *Appendix 4: Province descriptions_Aztec Imperial Strategies*. Dumbarton Oaks Research Library and Collection.

Bertalanffy, L. v. (1976). *Teoría General de Los Sistemas: Fundamentos, Desarrollo, Aplicaciones*. Fondo de Cultura Económica.

Borejsza, A. (2018). Las nueve reencarnaciones de Matlatzinco. Comentarios acerca de la estructura del altepetl y un intento más de acomodar el rompecabezas terminológico matlatzinca. *Anales de Antropología*, *52*(2), 71-93. https://doi.org/10.22201/iia.24486221e.2018.2.64952

Bourgeau-Chavez, L., Lee, Y., Battaglia, M., Endres, S., Laubach, Z., & Scarbrough, K. (2016). Identification of woodland vernal pools with seasonal change PALSAR data for habitat conservation. *Remote Sensing*, *8*(6), 490. https://doi.org/10.3390/rs8060490

Brandolini, F., Domingo-Ribas, G., Zerboni, A., & Turner, S. (2021). A Google Earth Engine-enabled Python approach for the identification of anthropogenic palaeo-landscape features. *Journal of Cultural Heritage Open Research Europa*.

Broke, C., & Clutterbuck, B. (2020). Mapping heterogeneous buried archaeological features using multisensor data from Unmanned Aerial Vehicles. *Remote Sensing*, *12*(1). https://doi.org/10.3390/rs12010041

Buzai, G. D. (1999). *Geografía glob@l: el paradigma geotecnológico y el espacio interdisciplinario en la interpretación del mundo del siglo XXI*. Lugar Editorial.

Calleja, J. F., Requejo, O., Díaz-Álvarez, N., Peón, J., Gutiérrez, N., Martín-Hernández, E., Cebada, A., Rubio, D., & Fernández, P. (2018). Detection of buried archeological remains with the combined use of satellite multispectral data and UAV data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *73*(1), 555-573. https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.07.023

Campa, M. F., & Coney, P. J. (1983). Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico. *Canadian Journal of Earth Sciences*, *6*(20), 1040-1051. https://doi.org/10.1139/e83-094

Cantú Ayala, C. M., Estrada Arellano, J. R., Salinas Rodriguez, M. M., Marmolejo Monsiváis, J. G., & Estrada Castillón, E. A. (2013). Vacíos y omisiones en conservación de ecorregiones de montaña en México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *4*(17), 11-27. https://doi.org/10.29298/rmcf.v4i17.417

Capra, L., & Macías, J. L. (2000). Pleistocene cohesive debris flows at Nevado de Toluca Volcano, central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *1-2*(102), 149-167.

Carrasco Pizana, P. (1996). *Estructura político territorial del Imperio tenochca: la triple alianza de Tenochtitlan, Tetzcoco y Tlacopan*. Colegio de México, Fideicomiso Historia de las Américas.

Carver, M., Gaydarska, B., & Montón-Subías, S. (Eds.). (2014). *Field Archaeology from Around the World: Ideas and Approaches*. Springer International Publishing.

Castillo, L., Serván, F., & Patroni, K. (2019). Documenting archaeological sites on mountains and slopes with drones. *Advances in Archaeological Practice*, *7*(4), 337-352. https://doi.org/10.1017/aap.2019.35

Chase, A., Chase, D., & Chase, A. (2018). *Sensing the Past: From Artifact to Historical Site* (N. Masini & F. Soldovieri, Eds.). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-50518-3_4

Danese, M., Masini, N., Biscione, M., & Lasaponara, R. (n.d.). Predictive modelling for preventive archaeology: overview and case study. *Central European Journal of Geosciences*, *6*(1), 42-55. https://doi.org/10.2478/s13533-012-0160-5

De Laet, V., Paulissen, E., & Waelkens, M. (2007). Methods for the extraction of archeological features from very high- resolution Ikonos-2 remote sensing imagery, Hisar (Southwest Turkey). *Journal of Archaeological Science*, *34*(5), 830-834. https://doi.org/10.1016/j.jas.2006.09.013

De la Peña, R. G., Guevara, M., & Favila, H. (2007). Reconocimiento arqueológico del municipio de Ocuilan de Arteaga, Estado de México. *Expresión Antropológica*, *34*, 61-71.

De la Peña Virchez, R. G. (2006). *Proyecto Arqueológico Ocuilan de Arteaga, Estado de México. Tercera Etapa del Proyecto,*. INAH.

Delgado Mahecha, O. (2003). *Debates sobre el espacio en la geografía contemporánea*. Universidad Nacional de Colombia.

di Lernia, S., Gallinaro, M., & Zerboni, A. (2020). Invisible archaeology? Micro-topography, high-resolution satellite imagery and the detection of small-scale features in arid environments. *Remote Sensing*, *12*(3). https://www.mdpi.com/journal/remotesensing

Dollfus, O. (1990). *El Espacio Geográfico* (D. d. Bas, Trans.). Oikos-Tau, S.A. Ediciones.

Espa, G., Benedetti,, R., De Meo, A., Ricci, U., & Espa, S. (2006). IS based models and estimation methods for the probability of archaeological site location. *Journal of Cultural Heritage*, *7*(3). https://doi.org/10.1016/j.culher.2006.06.001

Espinosa, L. M., Balderas, M. A., & Cabadas, H. V. (2014). Caracterización geomorfológica del área natural protegida nevado de Toluca: complejo de volcanes nevado de Toluca y San Antonio. *Ciencia UAT,*, *9*(1), 6-14. : https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=441942932001

Estanqueiro, M., Šalamon, A., Molloy, B., & Jovanović, D. (2023). Sentinel-2 imagery analyses for archaeological site detection: an application to Late Bronze Age settlements in Serbian Banat, southern Carpathian Basin. *Journal of Archaeological Science: Reports*, *51*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352409X23003632

Fattore, C., Abate, N., Faridani, F., Masini, N., & Lasaponara, R. (2021, 21). Google Earth Engine as Multi-Sensor Open-Source Tool for Supporting the Preservation of Archaeological Areas: The Case Study of Flood and Fire Mapping in Metaponto, Italy. *Sensors*, *5*.

Fernández Christlieb, F. (2006). *Territorialidad y paisaje en el altepetl del siglo XVI* (F. Fernández Christlieb & A. J. García Zambrano, Eds.). Fondo de Cultura Económica.

Fernández-Lozano, J., & Gutiérrez-Alonso, G. (2016). Improving archaeological prospection using localized UAVs assisted photogrammetry: An example from the Roman GoldDistrict of the Eria River Valley (NW Spain). *Journal of*

Archaeological Science: Reports, *5*(1), 509-520. https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.01.007

Feuer, B. (2016). *Boundaries, Borders and Frontiers in Archaeology: A Study of Spatial Relationships*. McFarland, Incorporated, Publishers.

Firpi, A. (2016). Satellite Data for All? Review of Google Earth Engine for Archaeological Remote Sensing. Internet Archaeology. *Internet Archaeology*, (42).

Gándara Vázquez, M. (2011). *El análisis teórico en ciencias sociales: aplicación a una teoría del origen del estado en Mesoamérica*. El Colegio de Michoacán.

García Castro, R. (1999). *Indios, territorio y poder en la provincia Matlatzinca. La negación del espacio político de los pueblos otomianos, siglos XV-XVII.* Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social (CIESAS), El Colegio Mexiquense AC,.

García Castro, R. (Ed.). (2013). *Suma de visitas de pueblos de la Nueva España: 1548-1550*. Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Humanidades.

García Cortéz, G., López Alcalá, D., & Zizumbo Ruíz, Y. (2021). *El recurso suelo del cerro "La Catarina" y su relación con asentamientos humanos antiguos y modernos*. UAEMéx Tesis colectiva de grado de Licenciatura de Geología Ambiental y Recursos Hídricos.

García-Palomo, A., Macías, J. L., Arce, J. L., Capra, L., Garduño, V. H., & Espíndola, J. M. (2002). Geology of Nevado de Toluca Volcano and surrounding areas, central Mexico, Map and Chart Series MCH089. *Geological Society of America*, 1-26.

Garza, G., & Fernández, F. (2016). Los puertos de montaña de Atlatlahuca: un espacio estratégico en el siglo XVI. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, *9*(1), 137-151. https://doi.org/10.14350/rig.53179

Gerhard, P. (2000). *Geografía histórica de la Nueva España, 1519-1821*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Giordan, D., Cignetti, M., Baldo, M., & Godone, M. (2017). Unmanned aerial systems for precision forest inventory purposes: A review and case study. *The Forestry Chronicle*, *93*(1), 71–81. https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1391129

Golden, C., Murtha, T., Cook, B., Shaffer, D., Schroder, w., Hermitt, E., Alcover, O., & Scherer, A. (2016). Reanalyzing environmental Lidar data for archaeology: Mesoamerican applications and implications. *Journal of Archaeological Science: Reports*, *9*(1), 293-308. https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.07.029

Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M. T., & Ferrari, L. (2005). Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, *3*, 227-283. http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca04/5703/(2)Gomez.pdf

González, R. G. (2010). *Tierra y sociedad en la sierra oriental del valle de Toluca, siglos XV-XVIII. Del señorío otomiano a los pueblos coloniales.* (1st ed.). Secretaría de Educación del Gobierno del Estado de México.

González Reyes, G. (2013). *Señoríos, pueblos y comunidades: la organización político territorial en torno del Chicnahuitecatl, siglos XV-XVIII*. Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Humanidades.

Grave Tirado, L. A. (2000). La Región, Ese Multivalente Fragmento. Un Intento de Definición. *Boletín de Antropología Americana*, *37*, 119-129. http://www.jstor.org/stable/23565771.

Gutiérrez, G. (2017). *Aztec provinces of the Southern Highlands_The Oxford Handbook of the Aztecs* (D. L. Nichols & E. Rodríguez-Alegría, Eds.). Oxford University Press.

Gutiérrez, G., Erny, G., Friedman, A., Godsey, M., & Gradoz, M. (2016). Archaeological topography with small Unmanned Aerial Vehicles. *The SAA Archaeological Record*, *16*(2), 10-13. https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199341962.013.18

Gutierrez, J. G. (2013). *La investigación geográfica: fundamentos, métodos e instrumentos*. Dunken.

Hassig, R. (1988). *Aztec warfare : imperial expansion and political control*. University of Oklahoma Press.

Herndon, K. E., Griffin, R., Schroder, W., Murtha, T., Golden, C., Contreras, D. A., Cherrington, E., Wang, L., Bazarsky, A., Kollias, G. V., & Alcover Firpi, O. (n.d.). Google Earth Engine for archaeologists: An updated look at the progress and promise of remotely sensed big data. J*ournal of Archaeological Science: Reports*, *50*.

Hill, A. C. (2019). Economical drone mapping for archeology: comparison of efficiency and accuracy. J*ournal of Archaeological Science: Reports,*, *24*(1), 80-91. https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.12.011

Honojosa Baliño, I. (2016). Processing a detailed digital terrain model using photogrammetry and UAVS at Cerro de La Máscara, Sinaloa, Mexico. *The SAA Archaeological Record,*, *16*(2), 25-29.

INEGI. (2010). *Compendio de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Coatepec Harinas, México clave geoestadística 15021*. Instituto de Estadística e Información Geográfica, INEGI. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/15/15021.pdf

Informe de gestión institucional INAH 2018-2024. (n.d.). https://consejosdearea.inah.gob.mx/documentos/informes_consejeros/INFORME_DE_GESTION_INAH_2018_2024.pdf. Retrieved Mayo 16, 2025, from https://consejosdearea.inah.gob.mx/documentos/informes_consejeros/INFORME_DE_GESTION_INAH_2018_2024.pdf

Instituto Nacional de Antropología e Historia. (2025). Retrieved mayo 13, 2025, from https://inah.gob.mx/zonas-arqueologicas

Instituto Nacional de Geografía y Estadística. (1999). *Prontuario de información geográfica Coatepec Harinas.* Retrieved junio 15, 2025, from http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/15/15021.pdf

Instituto Nacional de Geografía y Estadística. (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010. Tenancingo, México.* Inegi. Retrieved June 22, 2025, from

https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/15/15088.pdf

Issac, B. L. (1983). The Aztec "Flowery War": A Geopolitical Explanation. *Journal of Anthropological Research*, *39*(4). https://doi.org/10.1086/jar.39.4.3629865

Jaramillo, R. (1987). *Proyecto Arqueológico del Valle de Malinalco y del Rio Chalma, Estado de México.* IIA-UNAM.

Jensen, J. L. R., & Mathews, A. J. (2016). Assessment of image-based point cloud products to generate a bare earth Surface and estimate canopy heights in a woodland ecosystem. *Remote Sensing*, *8*(1), 50. https://doi.org/10.3390/rs8010050

Kirk, S. D., Thompson, A. E., & Lippitt, C. D. (2016). *Predictive modelling for site detection using remotely sensed phenological data*, *4*(1), 87-101. https://doi.org/10.7183/2326-3768.4.1.87

Lasaponara, R., & Masini, N. (2016). Living in the golden age of digital archaeology. (O. Gervasi,M. Beniamino, M. Sanjay, M. Rocha-Carmelo, T. Torre-David,O. Bernady, E. Apduhan, & W. Stankova, Ed.). *Computational science and its applications-ICCSA 2016 Lecture Notes in Computer Science,*, *9787*, 597-610. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42108-7_47

Ledergerber-de-kohli, P. (1984). Planteamientos para promover el desarrollo de la arqueología de rescate en América Latina. *Boletín de Antropología Americana*, *10*(1), 109-117. http://www.jstor.org/stable/40977066

León-Portilla, M. (2000). Los Aztecas, disquisiciones sobre un gentilicio. *Estudios de Cultura Náhuatl*, *31*(1), 307-313. https://nahuatl.historicas.unam.mx/index.php/ecn/article/view/9231

Lepori, M., & Zamora, D. (2023). Análisis espacial mediante Google Earth Engine para el estudio y comprensión de las vías de circulación entre la Puna y los Valles Altos catamarqueños. *Relaciones*, *48 (Especial 1)*.

Lockhart, J. (1994). *The Nahuas After the Conquest: A Social and Cultural History of the Indians of Central Mexico, Sixteenth Through Eighteenth Centuries*. Stanford University Press.

López Wario, L. A. (2016). Arqueología de salvamento y programas constructivos en México. *Relaciones Estudios de Historia y Sociedad*, *148*, 101-129. https://www.scielo.org.mx/pdf/rz/v37n148/0185-3929-rz-37-148-00101.pdf

Lowe, D. G. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, *60(2)*, 91-110. DOI: 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94

Lugo Hubp, J. (2011). *Diccionario geomorfológico.* Instituto de Geografía, UNAM. https://publicaciones.geografia.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/32/32/95

Lull, V. (1988). Hacia una teoría de la representación en arqueología. *Occidente*, *81*, 62-76.

Malaperdas, G., & Zacharias, N. (2019). The habitation Model Trend Calculation (MTC): A new effective tool for predictive modelling in archeology. *eo-spatial Information Science*, *22*(4), 314-331. https://doi.org/10.1080/10095020.2019.1634320

Martínez-Rubí, O., Verhoeven, S., van Meersbergen, M., Schutz, M., van Oosterom, P., Goncalves, R., & Tijssen, T. (2015). Taming the beast: Free and open-source massive point cloud web visualization. *Capturing Reality Forum*.

Mateo Rodríguez, J. M. (2008). *Geografía de Los Paisajes: Primera Parte. Paisajes Naturales*. Editorial Universitaria.

McAnany, P. A., & Rowe, S. M. (2015). Re-visiting the field: Collaborative archaeology as paradigm shift. *Journal of Field Archaeology*, *40*(5), 499-507. https://doi.org/10.1179/2042458215Y.0000000007

Menze, B. H., Ur, J. A., & Sherratt, A. G. (2006). Detection of ancient settlement mounds. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, *72*(3), 321-327. https://doi.org/10.14358/PERS.72.3.321

Menze, B. H., Ur, J. A., & Sherratt, A. G. (2006). Detection of ancient settlement mounds. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing,*, *72*(3), 499-507. https://doi.org/10.14358/PERS.72.3.321

Mink, P., Ripy, J., Bailey, K., & Grossardt, T. (n.d.). Predictive archaeological modelling using GIS-Based Fuzzy set estimation: a case study in Woodford County, Kentucky, In Proceedings of ESRI Users Conference 2009. Paper 1495. *Kentucky: Kentucky Transportation Center Faculty and Researcher Publications*.

Murtha, T. M., Broadbent, E. N., Golden, C., Scherer, A., Schroder, W., Wilkinson, B., & Zambrano, A. A. (2019). Drone- mounted Lidar survey of Maya settlement and landscape. *Latinamerican Antiquity*, *30*(3), 630-636. https://doi.org/10.1017/laq.2019.51

Nieto, C. R. (2012). *De la Cuenca de México al Valle de Toluca: estudio de la interacción y desplazamientos poblacionales en la época prehispánica, Doctoral dissertation.* Universidad Nacional Autónoma de México. http://132.248.9.195/ptd2012/noviembre/0685954/Index.html

Nieto Hernández, R. (2010). *El concepto de región en arqueología Escenarios en la investigación regional* (M. T. Jarquín Ortega, Compiler). El Colegio Mexiquense.

Novak, J. D., & Gowin, D. B. (1984). *Learning How to Learn*. Cambridge University Press.

Noviello, M., Cafarelli, B., Calculli, C., Sarris, A., & Mairota, P. (2018). Investigating the distribution of archeological sites: multiparametric vs probability models and potentials for remote sensing data. *Applied Geography*, *95*(1), 34-44. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.04.005

O´Driscoll, J. (2018). Landscape applications of photogrammetry using unmanned aerial vehicles. *Journal of Archaeological Science: Reports*, *22*(1), 32-44. https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.09.010

Olay Barrientos, M. d. l. á. (2021). El patrimonio cultural de México: su pasado, presente y futuro. *Diario de Campo, Cuarta Época*, *8*(13), 9-31. https://revistas.inah.gob.mx/index.php/diariodecampo/article/view/21556

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (2022, Septiembre 29). *Declaración de Taskent sobre el Acceso Universal a la Información. UNESCO.* https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000383211_spa

Oudijk, M. R., & García Castro, R. L. (2024). *Tasaciones de tributos de pueblos y corregimientos de indios* (1st ed., Vol. I). Universidad Autónoma del Estado de México.

Palma Linares, V. (2014). Relaciones de poder y dominación entre los Matlatzincas de Tenantzinco. *Estudio de Cultura Otopame*, *9*, 20-38.

Parcak, S. H. (2009). *Satellite Remote Sensing for Archaeology*. Taylor & Francis.

Parsons, J. R. (1972). Archaeological Settlement Patterns. *Annual Review of Anthropology*, *1*(127-150). https://doi.org/10.1146/annurev.an.01.100172.001015

Patruno, J., Fitrzyk, M., & Delgado, J. M. (2020). Monitoring and detecting archaeological features with multi-frequency polarimetric analysis. *Remote Sensing*, *12*(1). https://doi.org/10.3390/rs12010001

Perfil Municipal Tenancingo, 2013 Estado de México. (2013). Portales SRE. Retrieved June 22, 2025, from https://portales.sre.gob.mx/coordinacionpolitica/images/stories/documentos_gobiernos/Perfiles/ptenancingo.pdf

Ramírez, J., & Avitia, J. (2018). *Corredor florícola del Estado de México: la percepción de la población del cambio climático Desarrollo regional sustentable y turismo* (E. Pérez & E. Mota, Eds.). Universidad Nacional Autónoma de México y Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional A.C.

Renfrew, C., & Bahn, P. (2011). *Arqueología: Teorías, métodos y prácticas* (D. Govantes Edwards, Trans.). Ediciones Akal.

Renfrew, C., & Bahn, P. (2011). *Arqueología: Teorías, métodos y prácticas* (D. Govantes Edwards, Trans.). Ediciones Akal.

Riley, S., Degloria, S., & Elliot, S. D. (1999). A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. *Intermountain Journal of Science*, *5*(1-4), 23-27.

Roman, A., Tudor-Mihai, U., Fărcaş, S., Opreanu, C. H., & Lăzărescu, V. (2019). Documenting ancient anthropogenic signatures by remotely sensing the current vegetation spectral and 3D patterns: a case study at Roman Porolissum archeological site (Romania). *Quaternary International*, *523*(1), 89-100. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.07.002

Rouse, L., & Krumnow, J. (2020). On the fly: strategies for UAV-based archeological survey in mountainous areas of Central Asia and their implications for landscape research. *Journal of Archaeological Science: Reports*, *30*(1). https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102275

Rouse, L., & Krumnow, J. (2020). On the fly: strategies for UAV-based archeological survey in mountainous areas of Central Asia and their implications for landscape research. *Journal of Archaeological Science: Reports*, *30*(1), 102-275. https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102275

Ruíz Zapatero, G., & Burillo Mozota, F. (1988). Metodología para la investigación en arqueología territorial. *MMUNIBE (Antropología y Arqueología)*, *6*, 45-64. https://www.aranzadi.eus/fileadmin/docs/Munibe/1988045064.pdf

Rusu, R., Blodow, N., & Beetz, M. (2009). Fast Point Feature Histograms (FPFH) for 3D registration. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 3212-3217.* https://www.semanticscholar.org/paper/Fast-Point-Feature-Histograms-(FPFH)-for-3D-Rusu-Blodow/940dd2fa074ad97d5e8efa7e867b1f4460cfb8d5

Ruz Barrio, M. B. (2019). Acercamiento al uso de la tierra en el valle de Matlatzinco a través de los mapas-códice coloniales. *Anales de Antropología*, *53*(2), 83-93. http://dx.doi.org/10.22201/iia.24486221e.2019.2.67095

Salach, A., Bakuła, K., Pilarska, M., Ostrowski, W., Górski, K., & Kurczyński, Z. (2018). Accuracy assessment of point clouds from LiDAR and dense image matching acquired using the UAV platform for DTM creation. *ISPRS International. Journal of Geo-Information*, *7*(9), 342. https://doi.org/10.3390/ijgi7090342

Sanders, W. T., Parsons, J. R., & Santley, R. S. (1979). *The Basin of Mexico: Ecological Processes in the Evolution of a Civilization*. Academic Press.

Sergheraert, M. (2016). *Aztec provinces of the Central Highlands_The Oxford Handbook of the Aztecs* (D. L. Nichols & E. Rodríguez-Alegría, Eds.). Oxford University Press.

Servicio Geológico Mexicano. (2013). *Carta Geológico-Minera Ixtapan de la Sal E14-A-57 escala 1:50,000.* Servicio Geológico Mexicano. Retrieved Junio 15, 2025, from https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/1614_E14-A57_GM.pdf

Silverstein, J. (2001). Aztec imperialism at Oztuma, Guerrero: Aztec-Chontal relations during the late postclassic and early colonial periods. *Ancient Mesoamerica*, *12*(1), 31-48. https://doi.org/10.1017/S0956536101121115

Silverstein, J. (2017). This land is my land. Identity and conflict on the Western frontier of the Aztec Empire. (C. D. Beaule, Ed.). In *Frontiers of Colonialism* (12th ed., Vol. 1, pp. 293-324). University Press of Florida. https://doi.org/10.1017/S0956536101121115

Skentos, A., & Ourania, A. (2017). Landform analysis using terrain attributes. A GIS application on the island of Ikaria (Aegean Sea, Greece). *Annals of Valahia, University of Targoviste Geographical Series*, *17*(1), 90-97.

Smith, M., & Sergheraert, M. (2016). *The Aztec Empire_The Oxford Handbook of Mesoamerican Archaeology* (D. L. Nichols & C. A. Pool, Eds.). Oxford University Press.

Smith, M. E. (2008). *Aztec city-state capitals*. University Press of Florida.

Sober, E. (2009). Absence of evidence and evidence of absence: evidential transitivity in connection with fossils, fishing, fine-tuning, and firing squads. *Philosophical Studies*, *143*(1), 63-90. https://doi.org/10.1007/s11098-008-9315-0

Soroush, M., Mehrtash, A., Khazraee,, E., & Ur, J. A. (2020). Deep learning in archaeological remote sensing: automated Qanat detection in the Kurdistan Region of Iraq. *Remote Sensing*, *12*(3), 500. https://doi.org/10.3390/rs12030500

Stone, C., Webster, M., Osborn, J., & Iqbal, I. (2016). Alternatives to LiDAR-derived canopy height models for softwood plantations: a review and example using photogrammetry. *Australian Forestry*, *79*(4), 271-282. https://doi.org/10.1080/00049158.2016.1241134

Stott, D., Boyd, D. S., Beck, A., & Cohn, A. (2015). Airborne LiDAR for the detection of archaeological vegetation marks using biomass as a proxy. *Remote Sensing*, *7*(2), 1594-1618. https://doi.org/10.3390/rs70201594

Sugiura, Y., & Nieto, R. (2014). *Una reflexión sobre la preservación del patrimonio arqueológico: el caso de los sitios de escala menor en el Estado de México*, *48*(2), 75-95. http://doi.org/10.1016/S0185-1225(14)70244-9

Tomaszewski, B. M., & Smith, M. (2011). Polities, territory and historical change in Postclassic Matlatzinco (Toluca Valley, central Mexico). *Journal of Historical Geography*, *37*(1), 22-39. https://doi.org/10.1016/j.jhg.2010.06.001

Trujillo, A. (2020). *De pixeles a paisajes. Un análisis geoespacial de la tradición Teuchitlan* (El Colegio Mexiquense A. C. ed.).

Ullmann, T., Möller, E., Baumhauer, R., Lange-Athinodorou, E., & Meister, J. (2022). A new Google Earth Engine tool for spaceborne detection of buried palaeogeographical features – examples from the Nile Delta (Egypt). *E&G Quaternary Sci. J*, *71*, 243–247.

Valente, R., Maset, E., & Lamoni, M. (2023). Three Years of Google Earth Engine-Based Archaeological Surveys in Iraqi Kurdistan: Results from the Ground. *Remote Sensing*, *16(22)*.

Van Valkenburgh, P., Cushman, K. C., Castillo Butters, L. J., Rojas Vega, C., Roberts, C., Kepler, C., & Kellner, J. (2020). Lasers without lost cities: using drone Lidar to capture architectural complexity at Kuelap, Amazonas, Peru. *Journal of Field Archaeology*, *45*(1), 75-88. https://doi.org/10.1080/00934690.2020.1713287

Vaughn, S., & Crawford, T. (2009). A predictive model of archeological potential: an example from northwestern Belize. *Applied Geography*, *29*(4), 542-555. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2009.01.001

Vázquez, M. M. (2008). *La formación de los pueblos de indios en el real de minas de Zacualpan, siglos XV-XII* (Universidad Autónoma del Estado de México, Mexico. ed.). Tesis de grado.

Villafañez, E. A. (2011). Entre la geografía y la arqueología: el espacio como objeto y representación. *Revista de geografía Norte Grande*, *50*, 135-150. http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022011000300008

Wallach, E. (2019). Inference from absence: the case of archeology. *Palgrave Communications*, *5*(94), 1-10. https://doi.org/10.1057/s41599-019-0307-9

Wasowski, J. (1998). Understanding rainfall-landslide relationships in man-modified environments: a case-history from Caramanico Terme, Italy. *Environmental Geology*, *35*, 197-209. https://doi.org/10.1007/s002540050306

Watson, P. J., LeBlanc, S. A., & Redman, C. L. (1987). *El método científico en arqueología* (M. Rivera Dorado, Trans.). Alianza Editorial, S. A.

Wilk, R. R., & Ashmore, W. (Eds.). (1988). *Household and Community in the Mesoamerican Past*. University of New Mexico Press.

Willey, G. R. (2017). *Prehistoric Settlement Patterns in the Virú Valley, Perú (Classic Reprint)*. Fb&c Limited.

Wiratama, W., & Sim, D. (2019). Fusion network for change detection of high-resolution panchromatic imagery. *Applied Sciences*, *9*(7), 1441. https://doi.org/10.3390/app9071441

Yaworsky, P. M., Vernon, K. B., Spangler, J. D., Brewer, S. C., & Codding, B. F. (2020). Advancing predictive modeling in archeology: An evaluation of regression and machine learning methods on the Grand Staircase-Escalante National Monument. *PLoS ONE*, *15*(10). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0239424