



**CONAHCYT**  
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES  
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



**CentroGeo**  
Centro de Investigación en  
Ciencias de Información Geoespacial, A.C.

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN  
CIENCIAS DE INFORMACIÓN GEOESPACIAL, A.C.  
CENTROGEO**

Centro Público de Investigación CONAHCYT

---

---

Los caminos reales de Huichapan, Hidalgo, 1760-1821.  
Detección desde las CIG

TESIS

Que para obtener el grado de

Maestra en Ciencias de Información Geoespacial

**Presenta**

Silvia Lorena Bello Nuñez

Directora de Tesis

Dra. Alejandra Aurelia López Caloca

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN  
CIENCIAS DE INFORMACIÓN GEOESPACIAL, A.C.  
CENTROGEO

Centro Público de Investigación CONAHCYT

Los caminos reales de Huichapan, Hidalgo, 1760-1821.  
Detección desde las CIG

## **TESIS**

Que para obtener el grado de

Maestra en Ciencias de Información Geoespacial

Presenta

**Silvia Lorena Bello Nuñez**

Directora de Tesis

***Dra. Alejandra Aurelia López Caloca***

Co-director de Tesis

***Dr. Fernando López Aguilar***

Sinodales

***Dra. Alejandra Aurelia López Caloca***

***Dr. Fernando López Aguilar***

***Dr. Camilo Alberto Caudillo Cos***

***Dra. Karine Annick Thérèse Lefebvre (sinodal  
externa)***

Ciudad de México, febrero 2024

## Resumen

Los caminos reales fueron las rutas de interés de la Corona española por su importancia comercial y fiscal. Funcionaron en todos los territorios hispanos europeos y americanos para transportar mercancías, personas, animales, recaudaciones fiscales, información e insumos de guerra. En México, tuvieron un abandono paulatino y diferenciado con la llegada de nuevas tecnologías de transporte como el ferrocarril y el automóvil, esto produjo que segmentos de dichos caminos se modernizaran, se perdieran o quedaran ocultos entre la maleza y la mancha urbana.

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar los caminos reales que conectaron Huichapan con Tlaxcalilla y Tecozautla, en actual estado de Hidalgo, durante el periodo del reformismo borbónico. Para ello, se propuso una metodología interdisciplinaria entre las Ciencias de Información Geoespacial (CIG), la Arqueología y la Historia. En términos de las CIG, se utilizó la Percepción Remota, aplicando el algoritmo de Máquinas de Soporte Vectorial en una imagen de alta resolución GeoEye-1; también se usaron los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en el análisis de costo mínimo para reconstruir secciones de los caminos que no se pudieron recuperar en campo, así como en la cuantificación del estado actual de los caminos. Por su parte, la Arqueología aportó el entendimiento de los procesos de uso y abandono que sufrieron los caminos y que son observables en la actualidad -a nivel pedestre, dron o satelital-; los cuales se pudieron recuperar con trabajo de campo de prospección arqueológica. Por último, la Historia permitió rastrear a los caminos reales en la cartografía histórica y condujo, desde una perspectiva económica, al entendimiento de estas rutas dentro de la región del Valle del Mezquital en una visión de larga duración, pero puntualizando su importancia para el virreinato durante la aplicación de las reformas borbónicas.

El algoritmo MSV predijo ambos caminos con una exactitud del 100%, mientras que el *recall* fue de 59% para el camino real Tlaxcalilla-Huichapan y de 83% para el camino real Huichapan-Tecozautla. Estas diferencias en el *recall* se explican por el grado de deterioro de los caminos y por la cobertura de la imagen satelital. Los resultados obtenidos en las fuentes y en campo sirvieron como constante retroalimentación del algoritmo y viceversa, haciendo visible la importancia de la interdisciplina para una comprensión más amplia de los objetos de estudio, así como la pertinencia de las nuevas tecnologías para el estudio del pasado y el conocimiento del pasado para las problemáticas actuales de las CIG.

## **Abstract**

The royal roads were routes of interest to the Spanish Crown, due to their commercial and fiscal importance. They operated in all Hispanic European and American territories, to transport goods, persons, animals, tax collections, information and war supplies. In Mexico, these roads were gradually abandoned in different ways, with the arrival of new transportation technologies such as the railroad and automobile. This resulted in segments of these roads either modernizing, being lost, or becoming hidden among the undergrowth and the urban areas.

The present work has as its objective to study the royal roads which connected Huichapan to Tlaxcalilla and Tecozautla in the current state of Hidalgo in Mexico, during the Bourbon Reforms period. For this purpose, an interdisciplinary methodology was proposed combining techniques and information from Geospatial Information Sciences (GIS), Archaeology and History. In terms of GIS, Remote Sensing was used, applying the Support Vector Machine Algorithm (SVM) to a high-resolution GeoEye-1 image. Geographic Information Systems were also used in the analysis of the minimum cost to reconstruct sections of the roads which could not be recovered in the field, as well as to quantify the present state of the roads. On the other hand, Archaeology contributed to understanding of how the roads were used and abandoned, which are processes that can be observed today – at the pedestrian, drone or satellite levels- and which were recovered through archaeological prospecting fieldwork. Finally, History allowed to track the royal roads in the historical cartography and, from an economic perspective, understanding these routes within the Mezquital Valley region in the long-term vision, but realizing their importance for the viceroyalty during the application of the Bourbon reforms.

The SVM algorithm predicted both roads with 100% accuracy, while the recall was 59% for the Tlaxcalilla-Huichapan royal road, and 83% for the Huichapan-Tecozautla royal road. These differences in recall are explained by the degree of deterioration of the roads and by the satellite image cover. The results obtained from sources and fieldwork served as constant feedback of the algorithm, and vice-versa, highlighting the importance of interdisciplinary studies for a broader understanding of study objects, as well as the pertinence of the new technologies for studying the past and knowledge of the past to solve current issues in GIS.

## **Agradecimientos**

Quiero expresar mi gratitud al Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial "Ing. Jorge L. Tamayo" A.C. (CentroGeo) y al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por brindarme la oportunidad de cursar la maestría en Ciencias de Información Geoespacial. Este programa ha sido una ventana hacia conocimientos innovadores que han cambiado mi perspectiva hacia los problemas de la Historia y la Arqueología, incentivándome a buscar la integración de las tres disciplinas. Asimismo, mi agradecimiento al Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) por proveerme con imágenes satelitales de alta resolución, un recurso crucial para el desarrollo de mi investigación.

A la Dra. Karine Lefebvre y al Dr. Camilo Caudillo por su tiempo, dedicación y valiosas observaciones a mi trabajo.

A la Dra. Alejandra Aurelia López Caloca, le estoy especialmente agradecida por el voto de confianza que me brindó desde el primer día, el trato amable y la escucha atenta. Los intercambios de ideas -desde nuestras respectivas áreas de especialización con un punto en común en la Percepción Remota- han sido extraordinariamente enriquecedores para mi desarrollo profesional. Sus enseñanzas han trascendido las aulas, mostrándome la verdadera pasión por la investigación, la fortaleza, el amor por la vida y por quienes la conforman.

Al Dr. Fernando López Aguilar, mi profundo agradecimiento por ser un pilar fundamental en mi formación académica y personal. En 2016 llegué al Proyecto Eje Valle del Mezquital (PEVM) como una estudiante inexperta en la teoría y en la práctica -una flor de asfalto-; sin embargo, me ofreciste la oportunidad de involucrarme en el proyecto y aprender de ti y del equipo. Ocho años después, valoro cada clase compartida, cada conversación y cada temporada de campo como aprendizajes continuos. Me has motivado a plantear preguntas que desafían los métodos tradicionales de la Arqueología, y esta tesis es apenas el inicio de un viaje en la búsqueda de respuestas.

A los miembros internos y externos del PEVM: Alejandra Castañeda, Rodrigo Vilanova, Sabrina Farías, Alejandro García, Fernando González, Rosa Brambila, Eloisa Romero, Ulises Perera, Renato López, Abel Romero, Juan García (Lupillo) y a los estudiantes de la ENAH que participaron en el Recorrido de Superficie con nosotros, por su apoyo emocional y sus invaluable contribuciones para que esta investigación se llevara a cabo.

A mi querido Valle del Mezquital que me ha dado tanto en tan poco tiempo. Desde la primera vez que pisé tu tierra y conocí tu gente, me dejaste prendida. Gracias por los amigos, los paisajes, las experiencias y por dejarme recorrer tus caminos al lado de personas tan apreciadas. Espero que este texto aporte un pedacito a tu rica historia.

Mi eterno agradecimiento a mis padres, Lorena y Alejandro, por siempre creer en mí y apoyarme incondicionalmente en todas mis aventuras. No habría llegado a este punto sin ustedes. Mamá, gracias por tu compañía en las noches de desvelo, tus palabras de consuelo y tus abrazos que reconfortan a cualquier alma acongojada. Papá, gracias por tu interés en mi desempeño y tu orientación profesional.

A Ale, más que una hermana, eres mi cómplice y mi mejor amiga. Gracias por estar a mi lado, por recorrer kilómetros con mamá solo para verme unas cuantas horas, por tu participación activa en cada aspecto de mi vida y permitirme ser parte de la tuya. También te agradezco por ser tan fuerte en las adversidades y tomar mi mano para atravesarlas juntas.

A Silvia Durán, mi bubbeh. Ya no estás aquí para compartir este logro que es tuyo tanto como mío. Me considero muy afortunada de haber tenido dos madres que me criaran, me cuidaran y me amaran. Tu sabiduría, mirada tierna, elegancia, el sonido de tu voz, tu sonrisa divertida y el sabor de tu comida, son recuerdos que me acompañarán toda la vida. Te llevo en mi nombre y en mi corazón. Te amo.

A mi familia. Especialmente, a los Hernández Durán, cuya compañía nunca me ha faltado; a las Bello Escamilla, por crear recuerdos juntas y permitirme ser parte de la vida de mis sobrinas; así como a los Bello Inglés, por su apoyo emocional en momentos clave y por recibirme con el corazón abierto.

A mis amigos, que han compartido distintas etapas conmigo. César y Johas, hemos crecido juntos y estoy orgullosa de las personas en las que nos convertimos. Vania, Regina, Marlene, Hoshi, Rafael, Beto y Alfredo, es un privilegio llamarlos familia; agradezco todos los momentos que hemos tenido y por estar cuando más nos hemos necesitado. Alejandro Paredes, gracias por ser una guía en el mundo académico y en la adultez, siempre dispuesto a tenderme una mano y darme aliento. Carlos, Sarahí y Raquel, qué maravilla coincidir con ustedes, gracias por transitar el camino de la Historia conmigo, ofreciéndome su apoyo y consejo. Quetzalcoatl y Omar, agradezco su dirección intelectual, la introducción a la Historia Económica y la confianza para colaborar juntos. Finalmente, a Dalía, Guillermo, Karin, Alex y

Abel, aunque tenemos poco tiempo de conocernos, han hecho mi experiencia en la maestría mucho más enriquecedora y disfrutable.

A todos los mencionados, que han dejado una huella imborrable en mi andar por la vida, el más sincero de los agradecimientos. Les quiero mucho.

## Tabla de contenido

<b>Resumen/ Abstract</b> .....	<b>ii</b>
<b>Agradecimientos</b> .....	<b>iv</b>
<b>Tabla de contenido</b> .....	<b>vii</b>
<b>1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Estado de la cuestión</b> .....	<b>4</b>
<b>3. Área de estudio</b> .....	<b>7</b>
<b>4. Metodología</b> .....	<b>10</b>
4.1. Marco metodológico y conceptual .....	10
4.2. Metodología histórica .....	12
4.2.1. El tiempo histórico .....	12
4.2.2. Las fuentes .....	13
4.3. Metodología arqueológica .....	16
4.3.1. Contexto arqueológico .....	16
4.3.2. Investigación en campo: Recorrido de superficie .....	17
4.4. Metodología de procesamiento de imágenes .....	18
4.4.1. Colección de datos de satélite .....	18
4.4.2. Preprocesamiento de las imágenes .....	20
4.2.2.1. Calibración de las imágenes .....	22
4.2.2.2. PCA y filtro de À trous .....	22
4.4.3. Procesamiento de las imágenes .....	24
4.4.3.1. Máquinas de Soporte Vectorial .....	24
4.4.3.2. Precisión de las clasificaciones .....	25
4.5. Metodología de análisis de SIG .....	27
4.5.1. Generación de Máscara binaria .....	27
4.5.2. Camino de costo mínimo .....	28
4.5.3. Cuantificación del status del camino actual.....	29
<b>5. Resultados obtenidos</b> .....	<b>31</b>
5.1. Resultados de prospección arqueológica .....	31
5.1.1. Camino Tlaxcalilla-Huichapan .....	31
5.1.2. Camino Huichapan-Tecoautla.....	41
5.2. Resultados del procesamiento de imágenes GeoEye-1 .....	51
5.2.1. Camino Tlaxcalilla-Huichapan .....	54
5.2.2. Camino Huichapan-Tecoautla.....	60
5.3. Resultados del análisis SIG.....	66
5.3.1. Camino Tlaxcalilla-Huichapan .....	67
5.3.2. Camino Huichapan-Tecoautla.....	70
<b>6. Una historia conjunta de los caminos reales: la configuración del espacio y sus alteraciones en el contexto de Huichapan</b> .....	<b>74</b>
6.1. Los caminos reales y su devenir histórico .....	74

6.1.1. Nueva España .....	74
6.1.2. Valle del Mezquital.....	80
6.2. El presente de los caminos reales .....	83
<b>7. Discusión y consideraciones finales.....</b>	<b>88</b>
<b>8. Índice de Tablas.....</b>	<b>92</b>
<b>9. Índice de Figuras .....</b>	<b>93</b>
<b>10. Fuentes consultadas .....</b>	<b>95</b>
10.1. Fuentes primarias.....	95
10.1.1. Archivos.....	95
10.1.2. Impresos.....	95
10.2. Bibliografía .....	95
10.3. Metadatos .....	102

## 1. Introducción

La detección de los caminos reales a partir de las más recientes tecnologías -junto con información histórico-arqueológica- sirve como elemento de análisis para estudios históricos, sociales y económicos; además de obtener una interpretación más amplia y mejor documentada de la sociedad novohispana. De esta forma, la presente investigación tiene como objetivo estudiar los caminos reales que funcionaron en la jurisdicción de Huichapan -hoy perteneciente al actual estado de Hidalgo- durante la aplicación de las reformas borbónicas para comprender la organización y conformación del espacio y las relaciones socioeconómicas de la región a partir de un enfoque interdisciplinario.

Para alcanzar dicho objetivo es necesario diseñar una metodología de procesamiento digital de imágenes en Percepción Remota aplicable a la detección de caminos usando imágenes de alta resolución; identificar y detectar el estado actual de los caminos reales mediante imágenes de satélite; reconstruir la conectividad de la red de caminos utilizando los Sistemas de Información Geográfica y reflexionar sobre la aplicabilidad de la metodología para el estudio de caminos en otras regiones y temporalidades.

A partir de lo anterior se derivan ciertos cuestionamientos interdisciplinarios que ayudan a profundizar en el tema y los resultados obtenidos:

- CIG: ¿Qué potencial tienen las imágenes de observación de la Tierra para cubrir grandes áreas de los caminos reales y detectar caminos históricos pavimentados y sin pavimentar? ¿Cómo implementar una metodología de percepción remota para la identificación de extracción de caminos con imágenes de alta resolución GeoEye-1? ¿Cómo los resultados de imágenes satelitales se combinan con los estudios de datos *in situ* -observaciones de dron- para la detección y reconstrucción de caminos novohispanos? ¿Cómo se puede reconstruir los caminos reales con el algoritmo de camino de costo mínimo desde los sistemas de información geográfica? ¿Cuáles son las posibilidades y limitaciones de una metodología con enfoque interdisciplinar que permita nuevos conocimientos sobre los caminos reales?
- Arqueología: ¿Cuál es la configuración actual de los caminos que conectan Huichapan con Tlaxcalilla y Tecozautla? ¿Qué procesos naturales y/o antrópicos sufrieron los caminos para que se conservaran o perdieran?
- Historia: ¿De qué manera las relaciones económicas y políticas de la sociedad novohispana se pueden observar a partir del análisis espacial?

Como se desarrollará más adelante, existen trabajos que brindan un importante antecedente metodológico para el estudio de los caminos reales desde los CIG, la Historia y la Arqueología; sin embargo, hace evidente el vacío que existe en el análisis de estos caminos novohispanos en el Valle del Mezquital, región a la que pertenece el área de estudio. Dicha región tiene relevancia porque fue un importante productor ganadero para el virreinato, además de un punto de paso y de abastecimiento necesario para las minas del norte; asimismo, contribuyó con la producción de plata por el corredor minero que va desde Pachuca hasta Zimapan.

En cuanto a la temporalidad, se parte de 1760 por ser la década en la que comenzó el auge del reformismo borbónico a cargo de Carlos III, las cuales impactaron en la Nueva España en diversas esferas como la económica -impuestos, minería, transporte, créditos, entre otros-, por lo que hubo cambios en el uso y mantenimiento de los caminos preexistentes. El corte es 1821 debido a la consumación de la independencia y porque en términos del contexto arqueológico, es lo más cercano a nuestra época; por tanto, permite identificar de mejor manera los caminos virreinales que se han conservado hasta el presente.

Los caminos fueron esenciales para que el virreinato estuviera conectado, ya que por ellos circularon mercancías, personas e información durante más de tres siglos. Si bien la construcción de los caminos fue paulatina, para el siglo XVIII existía una red densa y bien conectada, la cual propiciaba una mejor comunicación tanto dentro del Mezquital como con otras partes del virreinato. Dicha red ayudó a una particular configuración del espacio, que visto a nivel macro, da cuenta de las distintas interacciones económicas, sociales y políticas que tuvieron lugar en la región.

Por otro lado, el uso de las CIG nos permite someter los restos del pasado a procedimientos novedosos a partir del uso de la percepción remota y los Sistemas de Información Geográfica; de tal suerte que se pueden obtener nuevos datos para la comprensión de los caminos novohispanos, confirmando su pertinencia en los estudios históricos.

En este sentido, la investigación aquí propuesta pretende aportar una perspectiva interdisciplinaria para el estudio de esta problemática que sumaría a la historiografía de los caminos y ayudaría a una mejor comprensión de cómo la Nueva España estaba en constante comunicación. De igual forma, la visualización de la red de caminos permitiría explicar la complejidad de distintos procesos históricos en el Valle del Mezquital y el resto del virreinato. En términos metodológicos de Percepción Remota, se propone el uso del algoritmo supervisado

llamado Máquinas de Soporte Vectorial (*Support Vector Machine*, SVM), cuya eficacia para la detección de caminos reales no ha sido probada pero sí para la identificación de caminos rurales y urbanos actuales. (Song & Civco, 2004; Matkan, *et. al.*, 2014; Soni & Mehta, 2020)

La tesis está estructurada en siete apartados. El primero corresponde a la introducción, en donde se exponen la problemática, las preguntas de investigación, los objetivos, la justificación y los aportes. Un segundo capítulo detalla el estado de la cuestión en el que se inserta el estudio. El siguiente está dedicado al contexto histórico y regional del Valle del Mezquital para darle un panorama al lector en dónde se sitúa la investigación en términos espaciales. En la cuarta sección se desglosa la metodología y la colección de datos utilizados; mientras que en la quinta se expondrán los resultados obtenidos. En un sexto capítulo intitulado “Una historia conjunta de los caminos reales del norte del Valle del Mezquital: la configuración del espacio y sus interacciones”, se discutirán los resultados anteriores, integrando la interpretación desde las CIG con una explicación histórica y arqueológica de los procesos antrópicos que ocurrieron en los caminos y sus alrededores, identificando agentes de la época que incidieron en su uso, mantenimiento y abandono. Por último, se dará cierre a la investigación con las consideraciones finales.

## 2. Estado de la cuestión

Las Ciencias de Información Geoespacial (CIG) brindan la posibilidad de estudiar el espacio a partir de datos capturados por diversas tecnologías como los sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica (SIG), dicha información es susceptible de ser procesada, analizada e interpretada. La metodología y las herramientas que este campo brinda han sido retomadas por otras ciencias para una mejor comprensión de su objeto de estudio. Una de ellas es la Arqueología, la cual se ha dedicado en buena parte al análisis espacial para conocer los patrones de asentamiento de sociedades pasadas; claro ejemplo de ello son los trabajos de Kent Flannery (1976), David Clarke (1968; 1977) e Ian Hodder (Hodder & Clive, 1979; Hodder, 1988). Con el constante avance tecnológico, los arqueólogos han utilizado la Percepción Remota y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para responder a problemas de investigación y conservar el patrimonio arqueológico. (Wescott & Joe, eds., 2000; Wheatley & Mark, 2002; López García, 2005; Conolly & Mark, 2006; León Soriano, 2015; Mehrer & Konnie, eds., 2019)

Ahora bien, específicamente el estudio de los caminos reales novohispanos ha tenido mayor interés desde la Historia. El libro que realizó Aurelio de los Reyes (1991), *Los caminos de la plata*, sobre el camino que va de la ciudad de México a Zacatecas marcó un momento importante en la historiografía, ya que no solo recurrió a fuentes históricas, sino también hizo trabajo etnográfico y fotografió algunos tramos visibles para complementar su investigación. Una autora necesaria para el estudio de los caminos novohispanos es la historiadora Chantal Cramaussel (ed., 2016), cuya organización de coloquios sobre el tema ha dado como resultado publicaciones como *Los caminos transversales. La geografía histórica olvidada de México*, texto que reúne varios trabajos que ven a los caminos como espacios que producen una organización social y territorial particular, todo desde un enfoque regional.

Por otra parte, María Luisa Pérez (2001) rastrea las similitudes que tuvo la legislación hispana en América y en España en cuanto a la construcción y mantenimiento de los caminos, a la par que discute el concepto de “camino real”. En un esfuerzo por la interdisciplina, Claudia Martínez, Carlos Valdés y María Concepción Sánchez (2016), conjugan a la arqueología, la geografía y la historia para reconstruir el camino real de Coahuila y Texas junto con los asentamientos humanos que se articularon a partir de él. Dicho artículo forma parte del libro

colaborativo *El camino real de Coahuila y Texas, patrimonio cultural compartido*, en el que se explora dicha ruta desde distintas perspectivas. (Rodríguez Cepeda & Sorroche Cuerva, 2016)<sup>1</sup>

Sin duda, de todos los caminos reales, el Camino Real de Tierra Adentro fue el eje principal de esta intrincada red de comunicación, por lo que su estudio ha llamado la atención de múltiples investigadores.<sup>2</sup> Solo para citar un ejemplo, Miguel Santos Salinas (2016) analizó la forma en que dicho camino pasó a ser de interés patrimonial en la época actual, llevando a cabo un detallado resumen de la historiografía existente sobre el tema. El autor indica que el primero en interesarse por el Camino de la Plata fue Philip Powell cuando publicó su libro *Soldiers, Indians and Silver* en 1952.

Otra forma en la que se han estudiado los caminos reales es a partir de la arriería, actividad económica que permitió el movimiento de mercancías a lo largo del virreinato utilizando los caminos. El transporte de los productos y el tiempo promedio que demoraban los arrieros en trasladarse de un punto a otro lo trabajaron Peter Rees (1976), Sergio Florescano Mayet (1987) e Ignacio Cano (2005). Por su parte, Clara Suárez Argüello (1995; 2000; 2001) se ha dedicado a investigar el transporte novohispano: la situación del camino de México a Veracruz cuando se empezó a cobrar peaje a los convoyes en época de Carlos III y la forma bajo la cual se vio afectada la distribución de tabaco durante la crisis que sufrió el transporte en la década de 1790, por enlistar algunos. Guillermina del Valle (2007) es una historiadora que ha tratado el camino que conectaba el puerto comercial más importante del virreinato con la capital, analiza su construcción y su función en el siglo XVI junto con la vía que conectaba Puebla con el Atlántico. Por último, Bernd Hausberger (2014) en su artículo “En el camino. En busca de los arrieros novohispanos” expone los problemas que un investigador puede enfrentar al estudiar a los arrieros.

Recientemente, Beatriz Rojas (coord., 2021a) coordinó el libro *De caminos y puentes. Ordenamiento territorial en la Nueva España*, en el que historiadores estudian diversos caminos del virreinato novohispano para entender aspectos como su construcción y el papel de las corporaciones en su creación y mantenimiento. Los textos mencionados son ejemplos de las

---

<sup>1</sup> Estas perspectivas van desde el análisis del desarrollo socioeconómico de los poblados cercanos al camino, el estudio de larga duración de un sitio en particular y la conservación del patrimonio cultural.

<sup>2</sup> Para mayor bibliografía sobre el tema consultar los dos volúmenes de la obra colectiva: Piper, J. ed. (1999). *El Camino Real de Tierra Adentro. Vol. I and II*. New Mexico Bureau of Land Management.

contribuciones que se han hecho desde la disciplina histórica, ya que la historiografía sobre la materia es amplia, dando cuenta de la vigencia y pertinencia del tema.

Desde las CIG los caminos reales se han estudiado poco. En el libro colectivo *Nuevas tendencias en el estudio de los caminos*, Reinaldo Moralejo y Diego Gobbo (2017) analizaron la visibilidad acumulada del sitio El Shincal de Quimivil desde el Camino Inca en Argentina a partir de un SIG; para ello, usaron datos tomados en campo, fotografías aéreas, modelos digitales de elevación y cobertura vegetal.

Específicamente en Percepción Remota, se tienen como antecedentes el trabajo de Silver, et. al. (2015) en donde los autores aplicaron el filtro Sobel en imágenes Landsat, Spot y CORONA para detectar el camino antiguo que comunicaba Palmira con el río Eufrates; Zanni y De Rosa (2018) identificaron caminos romanos de Italia a Serbia a partir de índices de vegetación en imágenes Sentinel-2 y WorldView; mientras que Laugier y Casana usaron técnicas de prospección, registro de fotografía histórica y de dron y manipularon imágenes CORONA con gradiometría y NDVI para estudiar caminos arqueológicos en Irak; por mencionar algunos. En México, el Dr. Jorge Lira propone con Alejandro Rodríguez (Lira & Rodríguez, 2014) detectar caminos antiguos a partir de la extracción de texturas de imágenes en su artículo “Edge enhancement in multispectral satellite images”. En otro texto, Lira junto con el Dr. Pedro López (Lira & López, 2020) realizaron un análisis de tres segmentos de caminos reales al norte del país al fusionar imágenes Pleiades y aplicarles PCA y el operador Laplaciano. Por último, Rodrigo Solinis-Casparius (2022) hace un estudio de redes desde la arqueología sobre los caminos pedestres para entender el trazado urbano de Angamuco, Michoacán en época prehispánica, para ello utiliza datos LiDAR y observaciones de campo.

Para el caso del Valle del Mezquital no existen trabajos sobre caminos desde la percepción remota. Sin embargo, Francisco Jiménez y Verence Ramírez (2014b) estudiaron las rutas de Huichapan a partir de una perspectiva histórica, presentando información sobre las vías de comunicación y los productos que viajaban de la región al norte y a la capital de la Nueva España. De la misma forma, Fernando López y Patricia Fournier (2014), observaron de manera integral el camino real, la minería y la extracción de carbón por parte de los otomíes del Mezquital durante el dominio español.

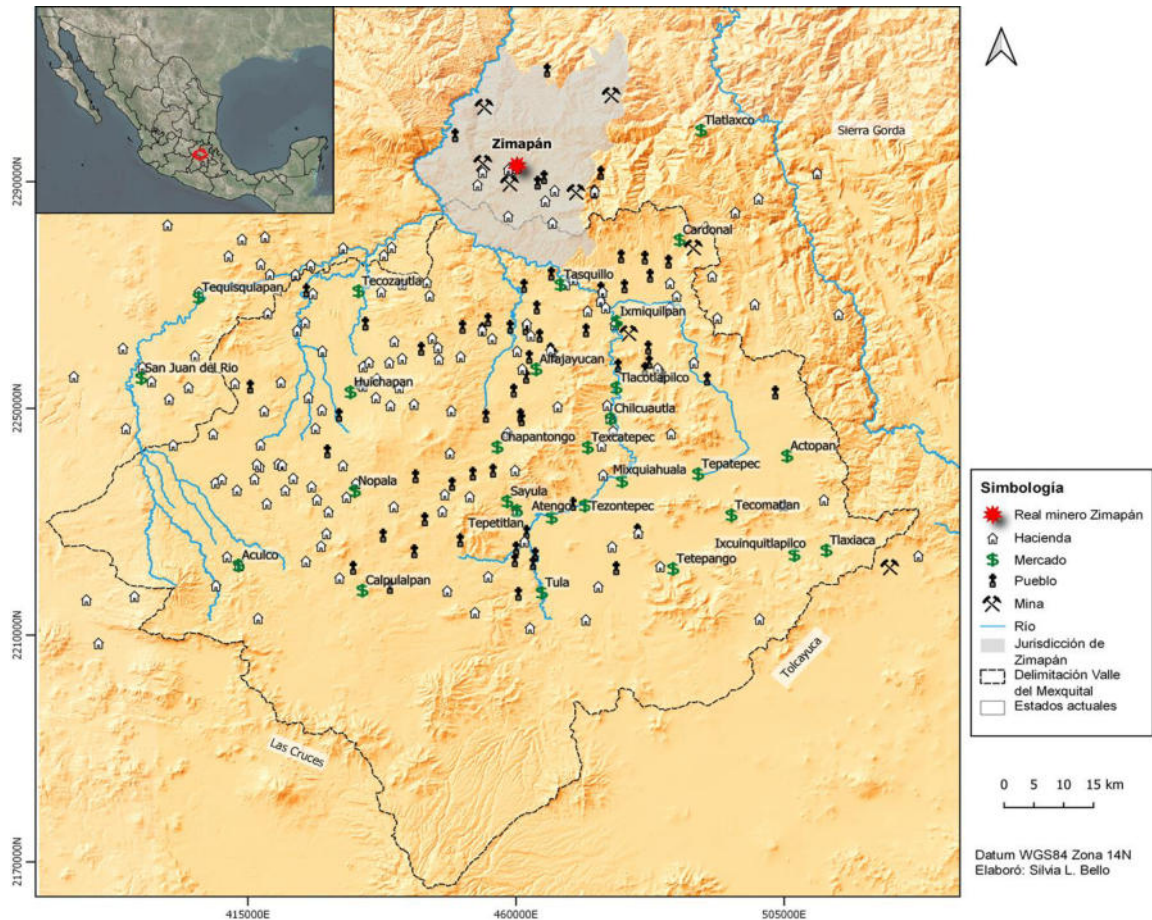
Lo más cercano a los objetivos planteados en esta investigación y a la región de estudio son textos que abordan los caminos reales de espacios vecinos. Pedro López y el citado

Fernando López (López Aguilar & López García, 2014) conjugaron las fuentes históricas y el procesamiento de imágenes satelitales Spot-5 con pansharpening, K-means, filtro Sobel y filtro Canny para identificar el segmento del Camino Real de Tierra Adentro de San Juan del Río. Andrés Torres, junto con otros autores (Torres, et. al., 2013), hacen lo propio para el estado de Querétaro en un intento de procurar la preservación del camino como patrimonio histórico, para ello hacen uso del trabajo de campo, Google Earth y de los SIG para procesar la información capturada. Para finalizar, Miguel Salinas (2014) -anteriormente mencionado- analizó la importancia de este mismo camino en el proceso de colonización de San Miguel y San Felipe durante el siglo XVI a partir de documentos de la época.

Como se puede observar, son pocos los trabajos sobre México, pero en otras latitudes se han estudiado los caminos antiguos a partir de las CIG, estableciendo importantes antecedentes metodológicos para el presente tema de investigación. De esta forma, se propone utilizar imágenes satelitales de alta resolución (GeoEye-1) para estudiar los caminos huichapenses. La tesis plantea procesar la información de las imágenes con el algoritmo de Máquinas de Soporte Vectorial (MSV) para la detección de los caminos reales, cuya localización e interpretación estará robustecida con información de campo recuperada a partir de técnicas propias de la Arqueología y con datos extraídos de la cartografía antigua. Por último, se usarán los SIG para conectar tramos discontinuos a partir del algoritmo ruta de mínimo costo (*Leas-cost Path*, LCP) que busca encontrar el camino de menor esfuerzo.

### 3. Área de estudio

Figura 3.1. Mapa de ubicación del Valle del Mezquital



Fuente: Retomado de Bello Nuñez (2022)

El Valle del Mezquital comprende el oeste y suroeste del estado de Hidalgo, una pequeña parte del sureste de Querétaro y el norte del Estado de México (Ver Figura 3.1). En términos hidrográficos, abarca ocho subcuencas del sistema Moctezuma-Pánuco e históricamente la región ha sido habitada por los *hñāhñū* u otomíes, que en época prehispánica convivieron con grupos aztecas (López Aguilar, 2005).

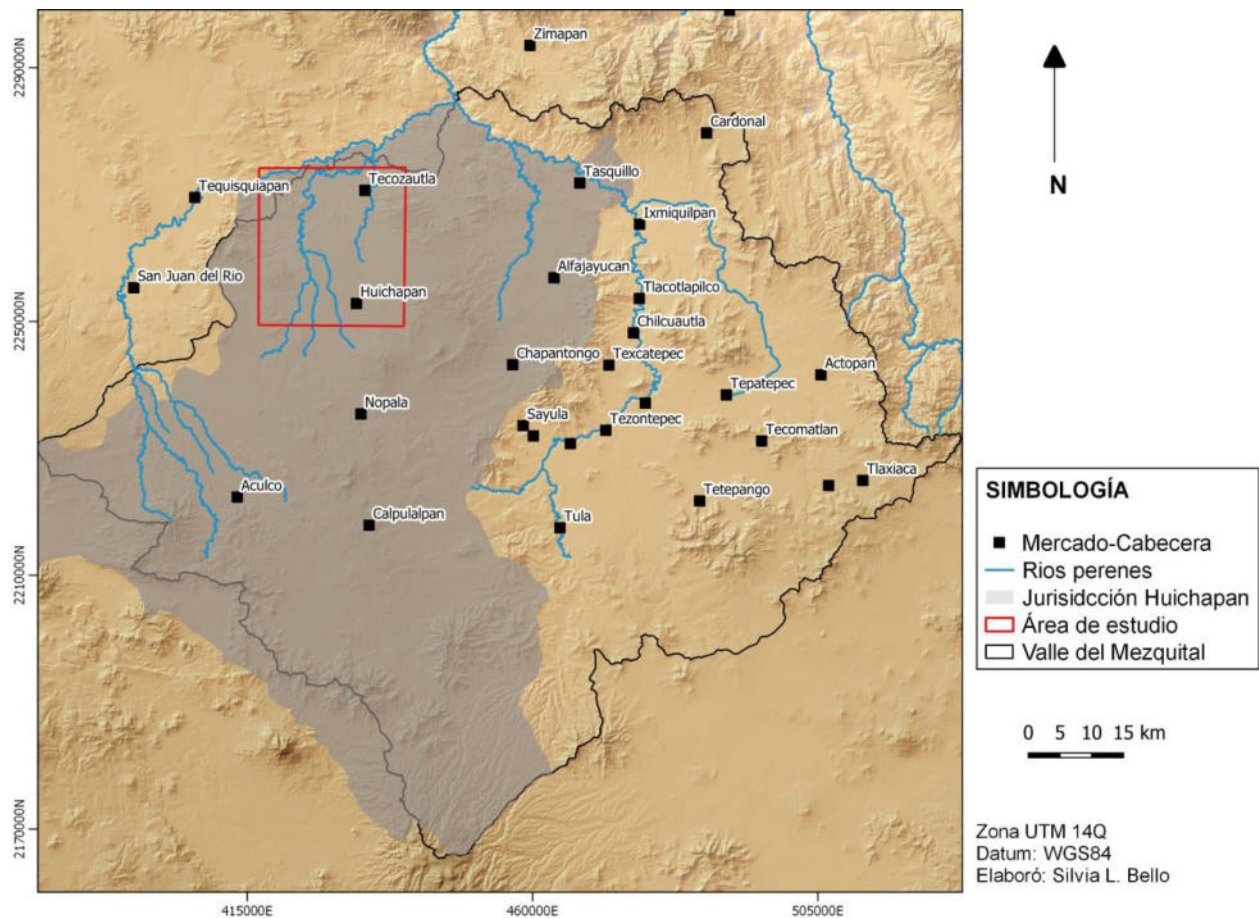
La región se caracteriza por tener un clima y vegetación de semidesierto. De acuerdo con Elinor Melville, esto se debe a un proceso de desertificación que se produjo en el siglo XVI con la introducción del ganado por parte de los españoles (Melville, 1994). Sin embargo, existen otras interpretaciones sobre la degradación ambiental que sufrió el territorio; Richard Hunter (2009) retoma la propuesta de Christopher Fisher y señala que la causa fue el abandono de las terrazas

agrícolas luego del colapso demográfico que sufrió la población india durante el proceso de conquista.

Ahora bien, los españoles identificaron en el Mezquital dos territorios: la Provincia de Jilotepec (oeste) y la Teotlalpan (este); y para un mejor control fiscal respetaron los altepemes prehispánicos y los convirtieron en cabeceras (López Aguilar, 2005). A raíz de las reformas borbónicas, el virreinato de la Nueva España se dividió en doce intendencias en la segunda mitad del siglo XVIII, siendo el Valle del Mezquital parte de la intendencia de México.

Para efectos de esta investigación, se estudiará la jurisdicción que comprendía la subdelegación de Huichapan (Stangle, 2019), específicamente las cabeceras de Tecozautla y Huichapan (Ver Figura 3.2). El corte se debe a la disponibilidad de las imágenes satelitales de alta resolución, las cuales no tienen cobertura en toda la región.

Figura 3.2. Mapa del área de estudio

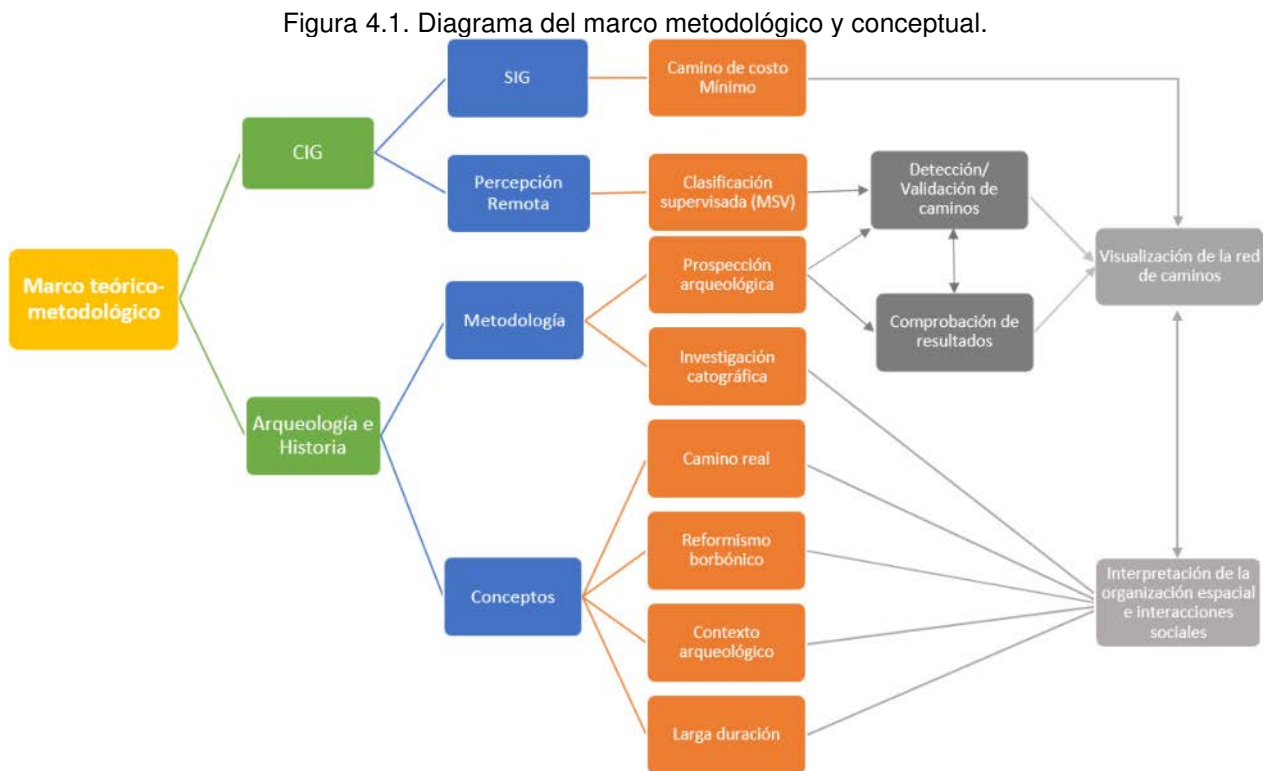


Fuente: Elaboración propia con base en López (2005) y Stangle (2019)

## 4. Metodología

### 4.1. Marco metodológico y conceptual

En la Figura 3.1 se observa que en el siglo XVIII el norte del Valle del Mezquital tenía asentamientos de pueblos, pueblos-cabecera, haciendas y minas, los cuales requirieron de una red de caminos para comunicarse, transportar mercancías o trasladar personas (Bello, 2022). Algunos ricos mineros tuvieron posesiones en reales mineros -por ejemplo, Zacatecas y Guanajuato- y haciendas en la región estudiada para abaratar costos de producción, como Gaspar de Rivadeneyra y Alonso de Villaseca-, por lo que invirtieron en su construcción durante el siglo XVI. Con el paso del tiempo se beneficiaron otros agentes como los arrieros, los comerciantes y la mano de obra que se empleaba tanto en las haciendas como en las minas; incluso estos caminos fueron muy importantes durante la guerra de independencia (Cubillo, 1991; Cubillo & Piedras, 2019).



Elaboración propia

La propuesta metodológica para aproximarse al tema de la detección de caminos reales converge tres disciplinas: Ciencias de Información Geoespacial (CIG), Arqueología e Historia, con la finalidad de tener una visión más amplia del objeto de estudio, una explicación más robusta de los procesos sociales implicados en la construcción y uso de estas vías de comunicación, además de contribuir a la creación de puentes interdisciplinarios (Ver Figura 4.1).

Dentro de las CIG, en el área de Percepción Remota, se usará el método de máquinas de aprendizaje -Máquinas de Soporte Vectorial- para identificar en imágenes satelitales de alta resolución distintos tipos de cobertura de suelo. También se utilizará el análisis de un trazado de mínimo costo desde los Sistemas de Información Geográfica para completar los trazos de los caminos reales identificados en el proceso de clasificación. La disciplina arqueológica contribuirá en el entendimiento de la formación del contexto desde el abandono de los caminos hasta el momento del estudio actual, su estudio en campo con técnicas de prospección y de etnoarqueología y su registro con observación de dron que permitirá verificar los resultados de clasificación. Por último, la Historia aporta la metodología de búsqueda y crítica de fuentes que ayuda a la identificación de caminos al mencionar su existencia o la conexión entre los pueblos; también contribuye a la explicación e interpretación de los resultados a partir del contexto histórico de larga y mediana duración, poniendo énfasis en la esfera económica (Ver Figura 4.2).

Figura 4.2. Diagrama de interdisciplina



Elaboración propia

## 4.2. Metodología histórica

### 4.2.1. El tiempo histórico

La Historia como disciplina trabaja con dos dimensiones principales: el tiempo y el espacio. Si bien, el presente trabajo descansa en su mayoría en la magnitud espacial, no se puede ignorar el papel que juega el tiempo en la construcción, uso y desuso de los caminos reales.

Fernand Braudel (1970) propuso desde la Historia estudiar la larga duración, entendida como una escala de análisis en la que se puede observar la estructura política, económica y social de un grupo determinado, cuyas características son estables y tardan en desgastarse varias generaciones. En contraparte, define a la corta duración como acontecimientos que suceden y concluyen en minutos u horas, son rápidos y coyunturales.

Otra forma de abordar la temporalidad es la teoría de los estratos de Reinhart Koselleck (2001). En ella, el tiempo no se trata linealmente, sino consta “de varios estratos que remiten unos a otros y sin que se puedan separar del conjunto” (Koselleck, 2001, p. 36). Define tres estratos: la unicidad, que es aquellos acontecimientos únicos que son irreversibles y son vividos como sorprendentes; el segundo es la repetibilidad, es decir, aquellos fenómenos de recurrencia que crean estructuras de repetición pero, a la par, generan condiciones para que la unicidad tenga lugar; por último, el estrato de la trascendencia contempla “depósitos de experiencia que estaban disponibles antes de las generaciones contemporáneas y que seguirán actuando muy probablemente tras las generaciones contemporáneas” (Koselleck, 2001, p. 41).

Estos son solo dos ejemplos de los esfuerzos que se han hecho para teorizar el tiempo; dependiendo del acontecimiento o proceso a estudiar es la definición de la escala temporal, debido a que las velocidades históricas son diversas y suceden sincrónicamente. Los caminos reales son objetos trascendentes -en términos de Koselleck- que se insertan en un análisis de larga duración, ya que las rutas son, posiblemente, las mismas que utilizaban las sociedades prehispánicas y que la Corona española consolidó con obras de infraestructura que se transitaron por más de tres siglos; asimismo, sufrieron modificaciones, destrucciones y rehabilitaciones que dan cuenta de la vida cotidiana de dichos caminos y los vínculos duraderos entre los asentamientos que conectaban. Para efectos de esta investigación, se pretende combinar los niveles de larga -siglos- y mediana duración -décadas- para caracterizar los caminos de Huichapan, identificar el impacto de las reformas borbónicas en ellos y comprender el devenir de sus restos materiales observables en la actualidad.

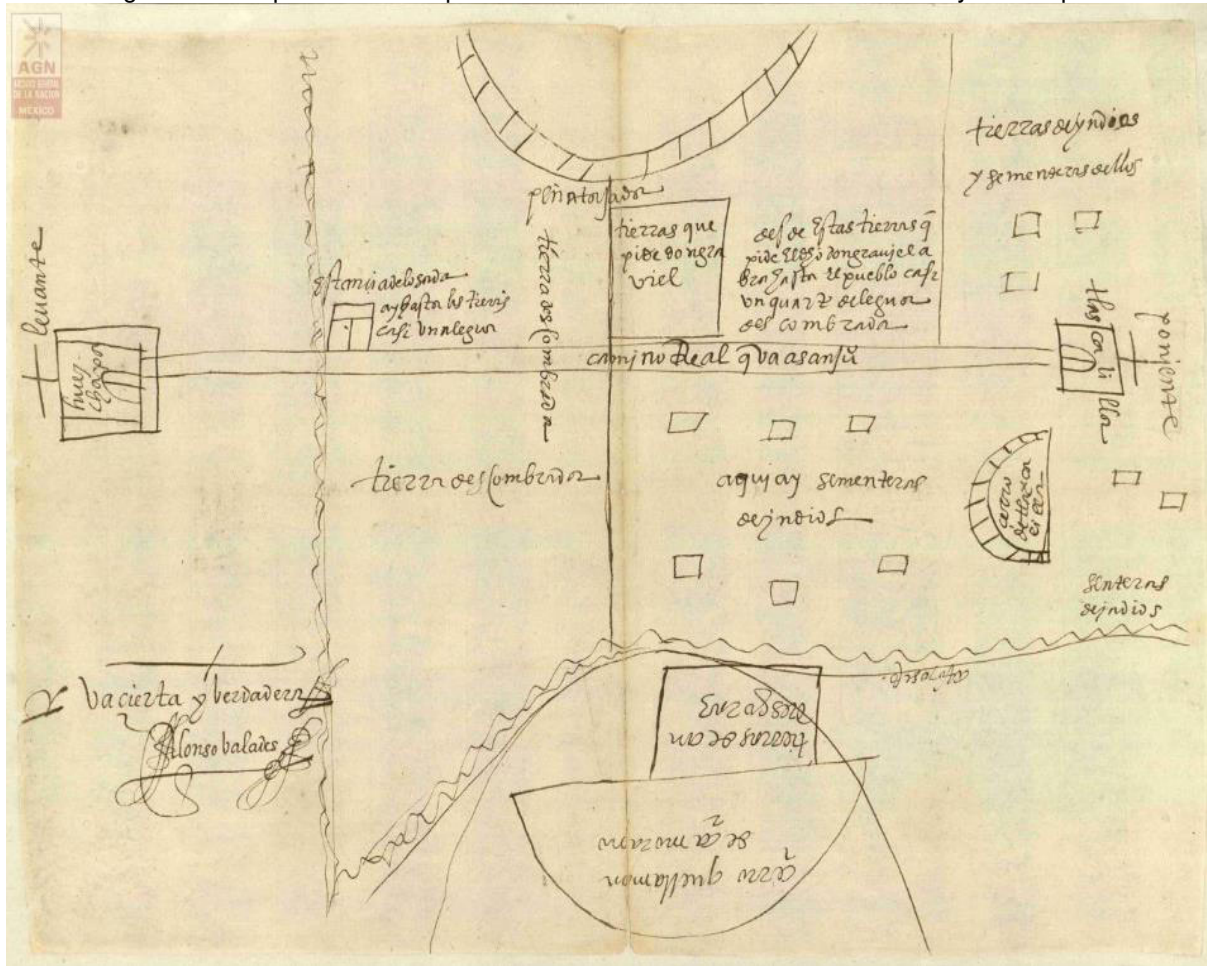
#### **4.2.2. Las fuentes**

Las fuentes históricas son aquellas que proveen de datos al investigador sobre el pasado; estas deben someterse a una exhaustiva crítica de fuentes, la cual permite discernir la autenticidad del material y contextualizar la información ahí contenida, tomando en cuenta al autor y las circunstancias que le dieron origen (Cipolla, 1991; Ordoñez, 2010).

La cartografía antigua es una fuente primaria importante para los estudios históricos, ya que permite conocer la percepción del espacio de sociedades pasadas, aunque disten de las convenciones de representación occidental actuales. Existen mapas de época novohispana que

dan cuenta de los caminos reales que comunicaban a distintas poblaciones, uno de ellos data del 1580 y muestra la conexión entre Tlaxcalilla (Tlascalilla) y Huichapan (Gueychapa), así como diversos elementos del paisaje que existen en el presente (Ver Figura 4.3). Este tipo de documento suele ser parte de solicitudes de mercedes o pleitos de tierras, en donde señalan la ubicación de la propiedad en cuestión.

Figura 4.3. Mapa del S. XVI que muestra el camino real entre Tlaxcalilla y Huichapan.

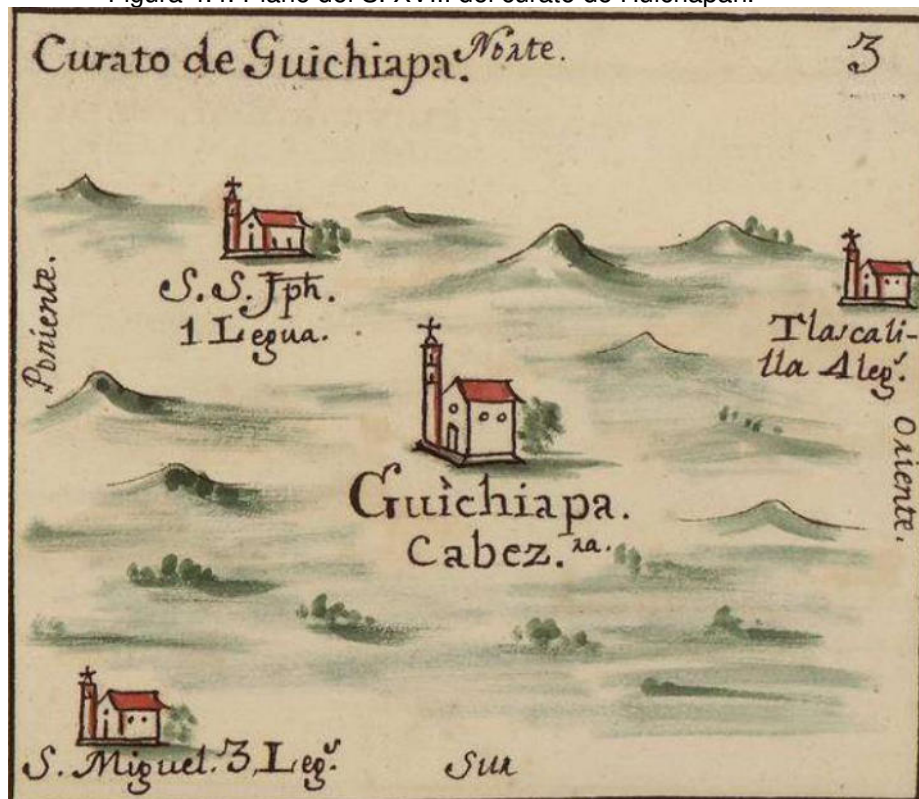


Fuente: *Tlascalilla y Gueychapa; Xilotepec. Hidalgo (atribuido)*, por AGN, Fondo MAPILU, Ramo Tierras, Volumen 2701, Expediente 19, Foja 7, 1580, Memórica México (<https://memoricamexico.gob.mx/swb/memorica/Cedula?old=WYllzXwBPiye2wrmB2b7>).

Las fuentes eclesiásticas también aportan información cartográfica, tal es el caso del *Atlas eclesiástico de el Arzobispado de México*, en el que se comprenden los curatos con sus vicarías

y lugares dependientes: dispuestos de orden del Yllustrisimo Señor Doctor Don Francisco Antonio Lorenzana Buytron dignissimo arzobispo de esta santa Yglesia Metropolitana realizado por José Antonio Alzate y Ramírez (1767); el cual, como el título indica, es un atlas de las jurisdicciones del arzobispado de México hecho por mandato de arzobispo Antonio Lorenzana a mediados del siglo XVIII. Uno de los curatos representados es el de Huichapan (Guichiapa), al cual pertenecen los pueblos de San José Atlán, Tlaxcalilla y San Miguel Caltepanitla -este último se encuentra en el paso del camino real hacia Tecozautla, ya que pertenecía a dicha cabecera política-. Es necesario mencionar que estos asentamientos estuvieron conectados por caminos bien establecidos para facilitar su administración (Ver Figura 4.4). Si bien, el plano tiene un error de orientación con respecto al Norte, tanto esta fuente como la anterior arrojan datos sobre la interacción que tenía Huichapan con Tlaxcalilla y Tecozautla en dos momentos de su historia - siglos XVI y XVIII-, que sirven para la localización de los caminos reales en campo y en la imagen satelital.

Figura 4.4. Plano del S. XVIII del curato de Huichapan.



Fuente: Alzate y Ramírez, 1767, p. 44.

Por último, los impresos de la época permiten conocer información social y económica de la región. Por ejemplo, en *Theatro Americano*, Villaseñor y Sánchez (1746) menciona las características de la población de la Provincia de Jilotepec, así como la producción local; y Henry G. Ward (1985) da un esbozo de la vida cotidiana de los caminos y describe los lugares que visita durante su recorrido diplomático a las minas del México independiente. Estas fuentes históricas, junto con estudios actuales, ayudan no solo a identificar la existencia de los caminos reales, sino a contextualizarlos en su época, conocer la vida en torno a ellos y el papel que tuvieron en la configuración espacial del Mezquital.

### **4.3. Metodología arqueológica**

#### **4.3.1. Contexto arqueológico**

Michael Schiffer (1991, 2010) estableció los principios teóricos de los procesos de formación del registro arqueológico, el cual es la evidencia de la conducta humana del pasado. Los define como “todos los eventos, actividades y procesos que afectan a los artefactos después de su uso inicial en un tipo particular de actividad y estos procesos pueden ser tanto culturales como no culturales” (Schiffer 1991, p. 40). De esta forma, distingue cuatro tipos de procesos culturales: reuso -que incluye el reciclaje y el uso secundario-, depósito cultural, reclamación y perturbación. Todo aquello que implique el uso del artefacto lo coloca en un contexto sistémico, mientras que el abandono, pérdida o desecho del mismo lo convierte en parte del contexto arqueológico (Schiffer 1991).

El contexto arqueológico sufre alteraciones de tipo antrópico y no culturales, es decir, se deteriora debido a la interacción con el medio, por lo que algunos de estos procesos se deben a agentes biológicos -flora y fauna-, o bien, a los elementos naturales como la lluvia, el aire, el sol, terremotos y actividad volcánica que producen con erosión, intemperismo, oxidación y formación de suelos y sedimentos (Schiffer 2010).

Los caminos reales forman parte del contexto arqueológico -aunque algunos tramos se siguen usando-, por lo que han sido modificados por los habitantes de la región y por la naturaleza desde que entraron en proceso de abandono. Algunas alteraciones antrópicas son la destrucción del empedrado para utilizar el material en la edificación de sus propiedades, cambiar el material

constructivo por uno moderno para continuar transitando en ellos o construir sobre el camino. Por otra parte, las principales alteraciones no culturales son la erosión y el crecimiento de vegetación.

Es importante considerar todos estos elementos para comprender el estado actual de los caminos reales al momento de recorrerlos y registrarlos en campo, así como entender su visualización en las imágenes de satélite a partir de la diversidad de coberturas que presentan.

#### **4.3.2. Investigación en campo: Recorrido de superficie**

La prospección es una metodología que tiene como objetivo detectar contextos y materiales arqueológicos en superficie y es considerada como la principal fuente de obtención de datos regionales. Existen múltiples técnicas no invasivas para realizar el reconocimiento de superficie y registrar los hallazgos; para efectos de esta investigación se utilizaron las siguientes (Schiffer, *et. al.*, 1978; Banning, 2002):

- Etnografía: Entrevista informal a los pobladores de la región sobre la ubicación del camino real e información de tradición oral respecto a él.
- Recorrido puntual: Caminata sobre parte del trazo antiguo del camino real que son accesibles. Se registró la trayectoria con el GPS, se midió el ancho del camino y se buscaron alteraciones del contexto arqueológico.
- Muestreo estratificado no probabilístico: Permite identificar estratos o subdivisiones de una población aparentemente homogénea (Banning, 2002). En este caso, cada estrato registrado corresponde a un cambio de cobertura o a un cambio importante en el ancho del camino. A la par, se identificaron elementos antrópicos que pudieron ser contemporáneos al uso del camino, así como alteraciones culturales y no culturales posteriores a su abandono para comprender su estado actual y entrenar de mejor forma a las máquinas de aprendizaje supervisado.

Se tomó evidencia tanto en libreta de campo como fotográfica. De manera complementaria, se hicieron vuelos puntuales de dron -marca Mavic Pro- para tener un registro de resolución intermedia entre el pedestre y el satelital. El dron se voló a una distancia de 100 m de altura y las características de la cámara son las siguientes:

- Fabricante: DJI
- Modelo: FC220
- Punto F: f 2.2
- Tiempo de exposición: 1/1250 s
- Velocidad ISO: ISO-100
- Distancia focal: 5 mm
- Apertura máxima: 2.27
- Longitud focal de 35 mm: 26
- Sin flash

Es importante mencionar que el trabajo descrito formó parte de las actividades del proyecto arqueológico Proyecto Eje Valle del Mezquital (PEVM) durante las temporadas de campo 2022-1 y 2023-1, realizadas en el mes de septiembre de su respectivo año. Dicho proyecto está a cargo del Dr. Fernando López Aguilar desde hace casi 40 años; se dedica a la investigación histórica, arqueológica y etnográfica de la región y a la formación profesional de los alumnos de la licenciatura en Arqueología de la Escuela Nacional de Antropología e Historia. Actualmente, los temas principales en la agenda del PEVM son la identificación de las unidades político-territoriales prehispánicas y su transformación en época novohispana, así como establecer las redes políticas y económicas de las cabeceras; esto implica el estudio de los caminos reales para entender la organización del espacio y la materialización de dichas redes.

#### **4.4. Metodología de procesamiento de imágenes**

##### **4.4.1. Colección de datos de satélite**

Para cumplir con los objetivos planteados se solicitaron al INEGI imágenes de alta resolución GeoEye-1, RapidEye y WorldView-2 con las siguientes características:

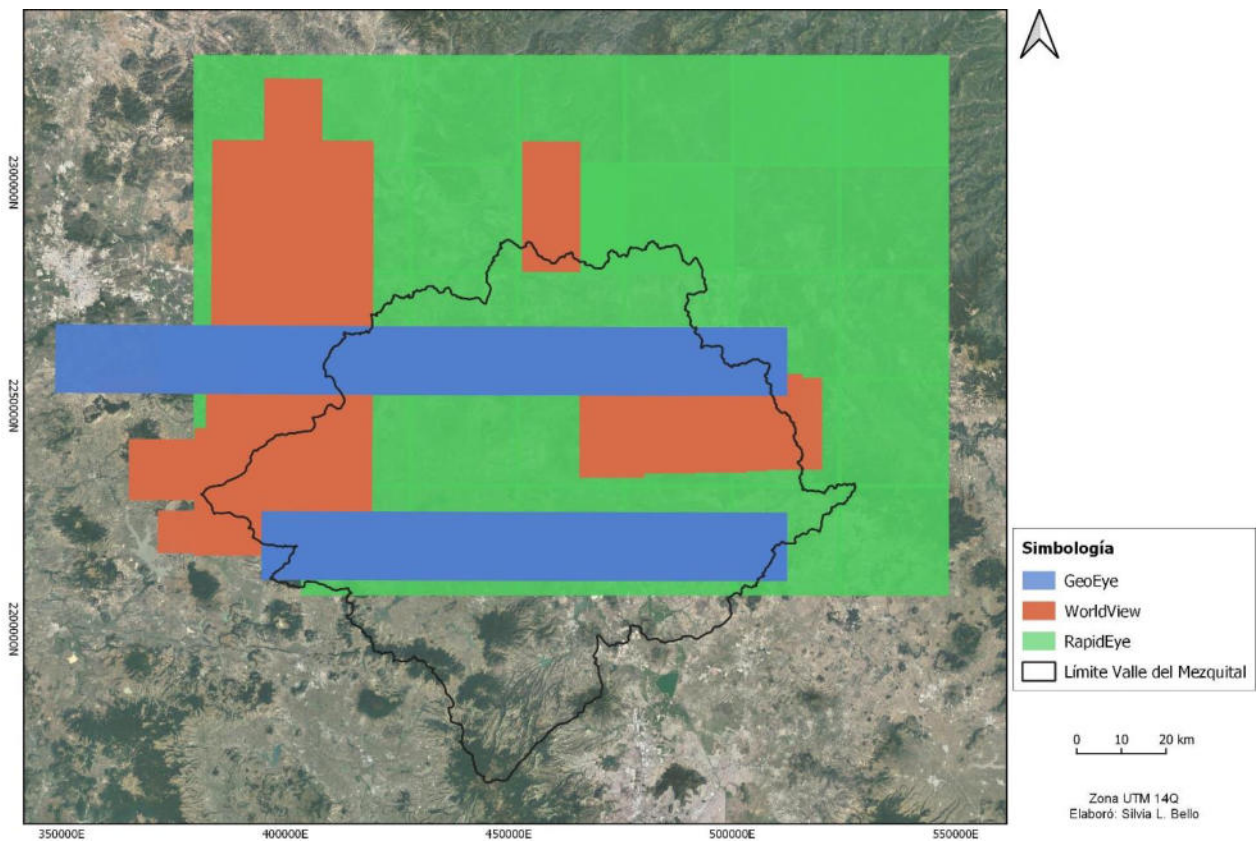
Tabla 4.1. Características de las imágenes satelitales

Característica	GeoEye-1	RapidEye	WorldView-2
Azul	0.450-0.510 nm	0.440-0.510 nm	0.450-0.510 nm
Verde	0.510-0.580 nm	0.520-0.590 nm	0.510-0.580 nm
Rojo	0.655-0.690 nm	0.630-0.685 nm	0.630-0.690 nm
Infrarrojo	0.780-0.920 nm	0.760-0.850 nm	0.770-0.895 nm
Borde rojo		0.690-0.730 nm	
Pancromática	0.450-0.800 nm		0.450-0.800 nm
Resolución multiespectral	1.65 m	5 m	1.84 m
Resolución pancromática	0.40 m		0.46 m
Temporalidad	2014	2011 y 2012	2016, 2017 y 2018

Elaboración propia

Las imágenes GeoEye-1 y WorldView-2 tienen una cobertura muy limitada de la región, mientras que RapidEye tiene una cobertura continua y completa, pero con menor resolución (Ver Figura 4.5). Para el área de estudio no hay escenas de WorldView-2; así que se decidió utilizar la imagen con mayor resolución disponible: GeoEye-1 capturada el 20 de enero de 2014.

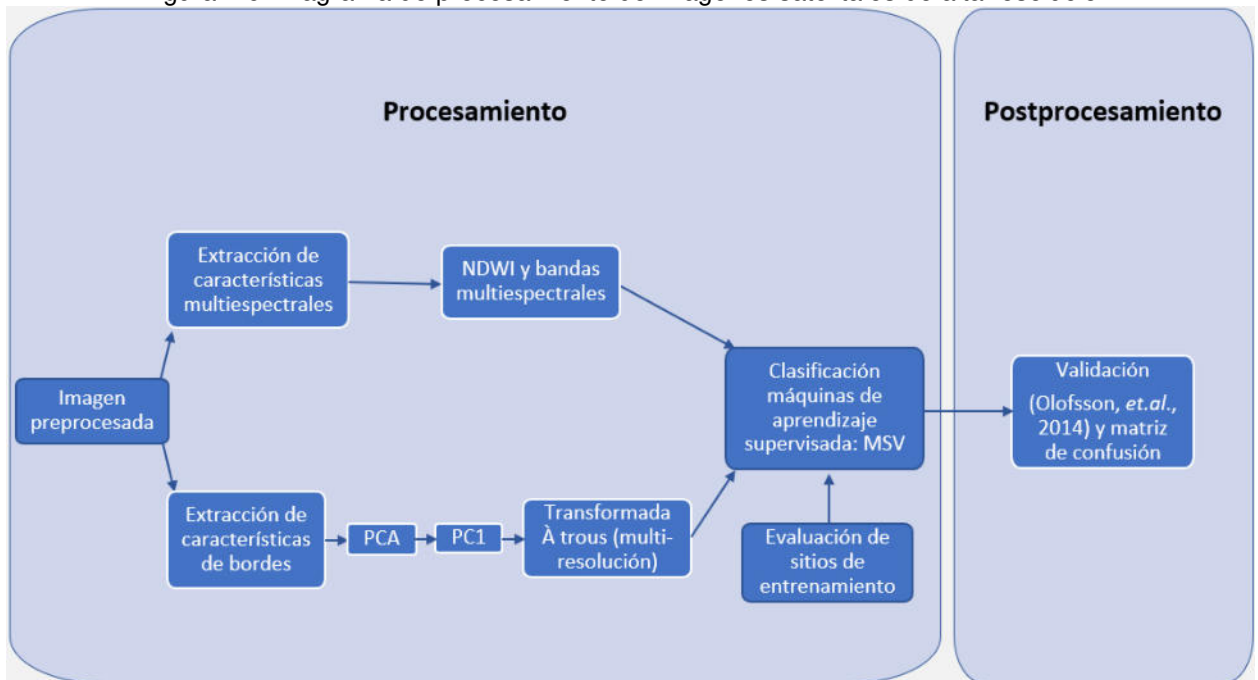
Figura 4.5. Mapa de cobertura de las imágenes satelitales de alta resolución (INEGI)



Elaboración propia

#### 4.4.2. Preprocesamiento de las imágenes

Figura 4.6. Diagrama de procesamiento de imágenes satelitales de alta resolución



Elaboración propia

En la Figura 4.6 se observan las distintas etapas que tuvo el tratamiento de las imágenes de alta resolución y que se desarrollarán a lo largo de los siguientes apartados. En un primer momento, se calibraron las imágenes a valores de reflectividad de superficie. Se procesaron las imágenes para la extracción de características de bordes mediante la aplicación del algoritmo de componentes principales (PCA); con el primer componente seleccionado se calcula la transformada Wavelet a partir del algoritmo de *À trous*. Las características espectrales de vegetación se obtienen a partir de las bandas multispectrales y calculando el índice NDWI. Después, se clasificaron las imágenes con máquinas de aprendizaje supervisado usando Máquinas de Soporte Vectorial con una selección de sitios de entrenamiento proporcionadas por interpretación visual. Por último, la imagen clasificada se validó de acuerdo a las buenas prácticas enunciadas por Olofsson, et. al. (2014) y calculando la matriz de confusión.

#### 4.2.2.1. Calibración de las imágenes

Una vez seleccionadas las imágenes multiespectrales, se sometieron a un preprocesamiento de corrección radiométrica y atmosférica a partir de la calibración y generando una imagen en reflectividad de superficie utilizando el software ENVI 5.5.

#### 4.2.2.2. PCA y filtro de À trous

El Análisis de Componentes Principales (PCA, por sus siglas en inglés) es un método estadístico que reduce la dimensionalidad de los datos. Se utilizó la transformación PCA a la imagen multiespectral. Primero se obtienen tantas componentes principales como número de bandas tenga la imagen multiespectral de alta resolución. De este modo, se extrajo el primer componente principal (PC1), el cual contiene información espacial, y las PC restantes la información espectral. Al primer PC1 se le aplicó el filtro de À trous.

El algoritmo de À trous está basado en la transformada de Wavelet y sirve para extraer los detalles espaciales de bordes y líneas que importan en el primer componente principal. Algunas de sus características es que funciona con independencia en la direccionalidad, es redundante -ya que tiene dos niveles de degradación consecutivos-, es invariante en el tiempo y es un método basado en el análisis multiresolución. Al utilizar la transformada de Wavelet no decimada, conserva el tamaño de la imagen original. (Gonzalo & Lillo-Saavedra, 2004; Lillo-Saavedra & Gonzalo, 2006)

Para el caso de estudio se usó la función de escalamiento b<sub>3</sub>-spline para el cómputo del algoritmo À trous, primero con un kernel de tamaño 5x5 y al resultado se reiteró el algoritmo con un kernel 9x9, cuyas matrices se muestran a continuación:

$$\frac{1}{256} \begin{pmatrix} 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 6 & 24 & 36 & 24 & 6 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\frac{1}{256} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 4 & 0 & 6 & 0 & 4 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 16 & 0 & 24 & 0 & 16 & 0 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 6 & 0 & 24 & 0 & 36 & 0 & 24 & 0 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 16 & 0 & 24 & 0 & 16 & 0 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 4 & 0 & 6 & 0 & 4 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

El algoritmo de *À trous* se representa con un paralelepípedo (González-Audicana, *et. al.*, 2004) por tener todas las imágenes al mismo tamaño. La base del paralelepípedo es la imagen original en este caso el PC1 y a medida que se asciende de nivel se hace una aproximación de la imagen original, pero cada vez con menos resolución espacial. De esta manera se obtiene un solo plano wavelet llamado  $w$ , que contiene el detalle espacial que se pierde al pasar de un nivel a otro cuando se realiza la diferencia entre dos imágenes de niveles consecutivos.

Para obtener el primer plano wavelet *À trous* se restó el PC1 menos la aproximación de la imagen con menos resolución espacial de kernel 5x5; mientras que para el segundo plano de wavelet *À trous* ( $w^2$ ), se restó  $w^1$  menos la transformada de kernel 9x9. Por último, con la finalidad de medir cuál de los planos Wavelet ( $w^1$  y  $w^2$ ) ayuda a obtener una mejor precisión en la clasificación supervisada, se hicieron dos stacks de la imagen multiespectral que se trabajaron de manera independiente:

Stack 1= Bandas multiespectrales + plano Wavelet *À trous*  $w^1$  + NDWI

Stack 2= Bandas multiespectrales + plano Wavelet *À trous*  $w^1$  + plano Wavelet *À trous*  $w^2$  + NDWI

### 4.4.3. Procesamiento de las imágenes

#### 4.4.3.1. Máquinas de Soporte Vectorial

Las Máquinas de Soporte Vectorial (MSV) o *Support Vector Machine* (SVM) es un algoritmo de aprendizaje supervisado que se utiliza en muchos problemas de clasificación incluidas aplicaciones de extracción de caminos. El objetivo del algoritmo MSV es encontrar un hiperplano que permita separar clases diferentes. (Song & Civco, 2004; Wang, *et. al.*, 2016; Bakhtiari, *et. al.*, 2017; Soni, *et. al.*, 2020) Es posible utilizarlo en dos casos diferentes: (Song & Civco, 2004)

- Lineal: Busca el hiperplano que tenga el mayor margen de distancia posible entre los vectores lineales más cercanos a dos clases.
- No lineal: Para separar dos clases se mapean los vectores en un espacio Euclidiano de mayores dimensiones y se busca un kernel que permita optimizar dicha separación. Los kernels más utilizados son la Función de Base Radial (Radial Basis Function, RBF), la Polinomial y el Perceptrón Multicapa (Multi-Layer Perceptron, MLP).

Para efectos de esta investigación se utilizó el kernel de Función de Base Radial debido a la naturaleza no lineal de las clases de interés.

Una vez obtenidos las características de bordes, se calculó el índice NDWI y el stack se sometió a las máquinas de aprendizaje supervisado. Las categorías de clasificación que se utilizaron fueron: camino pavimentado, camino de terracería, parcela húmeda, parcela seca, urbano, vegetación, sombra, agua y agua turbia (Ver Tabla 4.2); estos se determinaron por las características propias de la región que son visibles en las imágenes satelitales.

Tabla 4.2. Categorías de clasificación

Categoría	Descripción
Camino pavimentado	Camino moderno construido con pavimento.
Camino de terracería	Camino bien delimitado que se distingue por la ausencia de vegetación, dejando tierra expuesta en superficie. En esta categoría entran los caminos secundarios contemporáneos y el camino real.
Parcela húmeda	Parcela con tierra húmeda, o bien, parcela cultivada.
Parcela seca	Parcela sin cultivar y con un grado de humedad bajo.
Urbano	Elementos arquitectónicos modernos que conforman asentamientos humanos, puede ser un pueblo o una ciudad.
Vegetación	Zonas que presentan vegetación de manera continua, generalmente son ambientes no alterados antrópicamente.
Sombra	Sombra producida por cerros o mesetas en las partes bajas del relieve.
Agua	Cuerpos de agua como ríos, presas y jagüeyes.
Agua turbia	Cuerpos con alteraciones visibles en el agua, probablemente causadas por alta concentración de sedimentos.

Elaboración propia

Para las nueve clases se dibujaron áreas de entrenamiento (ROIs) usando el programa ENVI 5.5. Las áreas de entrenamiento se crearon a partir de la información de las imágenes espectrales y visita de campo. Se aplicó el algoritmo MSV con kernel RBF y se evaluó la separabilidad de los sitios entre clases.

#### 4.4.3.2. Precisión de las clasificaciones

El proceso de evaluación de la clasificación de una imagen requiere considerar datos de referencia de mayor resolución (Olofsson, *et. al.*, 2014). La evaluación de la precisión se realizó con la imagen pancromática (0.450-0.800 nm) de cada imagen de alta resolución menor a 50 cm

de resolución usando el software Focus de Geomática y siguiendo las buenas prácticas de Olofsson, *et. al.* (2014).

Primero se calculó el tamaño de muestra de puntos de muestreo ( $n$ ) utilizando las siguientes ecuaciones:

$$S_i = \sqrt{U_i(1 - U_i)} \quad (3)$$

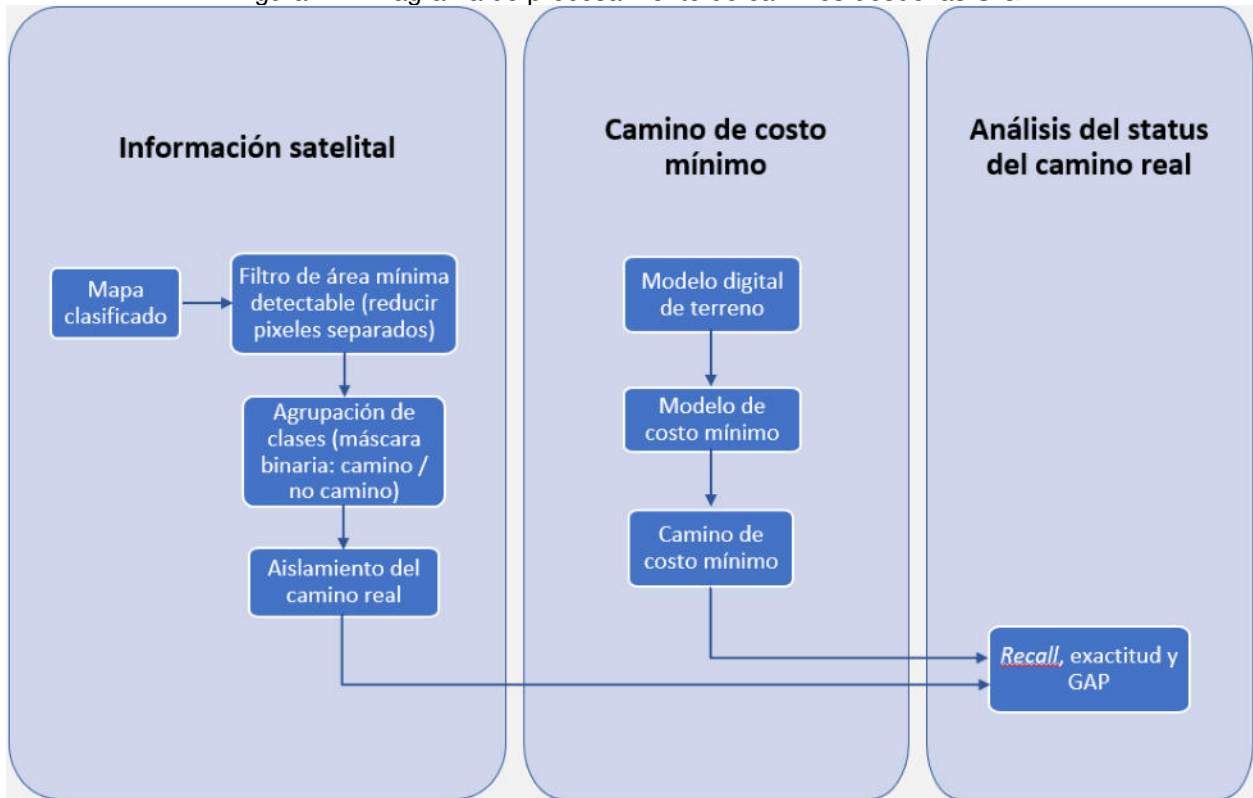
$$n = \left[ \frac{\sum W_i S_i}{s(\hat{0})} \right]^2 \quad (4)$$

Después se creó dicho número de puntos de manera aleatoria estratificada para determinar la posición de los puntos y se hizo la validación manual, siempre guardando que cada clase tuviera una representatividad mínima de 50 puntos por cada clase. (Schmidt & McCullum, 2018) Los datos de este proceso se utilizaron para la evaluación de precisión que se explica a continuación.

La evaluación de precisión se calcula a partir de la matriz de confusión. Dicha matriz es una tabulación cruzada de las categorías usadas en la clasificación de la imagen contra los datos de referencia del muestreo. Las clasificaciones correctas se expresan en la diagonal principal, mientras que el resto de los datos se interpretan como errores de omisión y comisión. Las matrices de confusión indican la información acerca de la precisión de un mapa clasificado respecto a datos de referencia basados en pixel. A partir de esta matriz de confusión se calcula una nueva con estimaciones de la proporción del área para cada clase. La evaluación de la precisión usando el área proporciona mejor información ya que tiene en cuenta el área de cada clase, así como el porcentaje de píxeles clasificados correctos. (Olofsson, *et. al.*, 2014; Schmidt & McCullum, 2018)

## 4.5. Metodología de análisis de SIG

Figura 4.7. Diagrama de procesamiento de caminos desde las SIG.



Elaboración propia

### 4.5.1. Generación de Máscara binaria

Una vez concluida la evaluación de la precisión, se realizó el postprocesamiento de las imágenes clasificadas, se aplicará un filtro morfológico de área mínima detectable para reducir el ruido - aquellos píxeles que se encuentren aislados y separados de las categorías clasificadas-. Después, se generó una máscara binaria entre la clase "Camino" y "No camino", en el primero se agruparon los caminos de terracería y los caminos pavimentados, mientras que en el segundo se agruparon el resto de las siete clases, ya que no son el objeto de interés del estudio aquí desarrollado. Posteriormente, se aislaron los caminos reales para evaluar su precisión.

Dos preguntas se plantearon para definir las métricas de calidad: ¿Cuán completo es el camino real extraído? y ¿cuán correcto es el camino real extraído? Para contestar dichos cuestionamientos se utilizaron las medidas cuantitativas propuestas por Heipke, *et al.* (1997), que

permiten una evaluación comparativa y son completitud, exactitud y *GAP* (*recall*, *correctness* y *GAP*) en una zona buffer de 15 metros en torno a cada camino real. La métrica *GAP* (palabra en inglés que significa 'brechahuco') se refiere al número de espacios sin conexiones en el proceso de extracción de un camino. (Heipke, *et al.* 1997; Zhang, *et al.*, 2018; Liu, *et al.*, 2018).

#### **4.5.2. Camino de costo mínimo**

La selección de rutas es uno de los problemas más importantes y útiles que debe resolver un sistema de información geográfica (Douglas 1994). El análisis de caminos de menor costo (*Least-cost Path*, *LCP*) se ha convertido en un enfoque utilizado en Arqueología (Herzog, 2014; Schild, 2016) para predecir el curso de caminos y sistemas de carreteras antiguos, de tal manera que se simula la trayectoria del camino en función de las variables de entrada.

El algoritmo de camino de costo mínimo determina la mejor manera de trazar una ruta de menor esfuerzo o más corta entre dos puntos. Para calcularlo se requiere la topografía de una superficie de costo acumulado que se crea a partir de una superficie de costo de paso o fricción para luego trazar la línea entre el punto de partida y el destino donde el costo acumulado sea menor. Ahora bien, por costo debe entenderse la resistencia a acelerar y estará en función del relieve, entre más abrupta sea la pendiente del terreno, mayor será el costo de desplazamiento (Douglas 1994).

En este estudio, el cálculo de caminos de costo mínimo se utilizó para aquellos tramos en donde la información obtenida en campo y la interpretación de la imagen satelital fueron insuficientes para reconstruir la ruta precisa del camino real. En el software Quantum GIS se calculó la fricción de la topografía a partir del modelo digital de elevación de 15 m de resolución disponible en la plataforma del INEGI. El resultado se usó como capa de entrada para determinar el costo acumulado del punto de partida hacia todas las direcciones del ráster y después computó la ruta de menor costo hacia el destino en formato vectorial (línea).

### 4.5.3. Cuantificación del status del camino actual

Se calculó la completitud (*recall*), la exactitud y el GAP entre el camino obtenido a partir del MSV -en formato vectorial- y el camino generado con la información de campo y el algoritmo de costo mínimo que servirá de referencia (Heipke, *et. al.*, 1997; Liu, *et. al.*, 2017).

La completitud o *recall* es el porcentaje de los datos de referencia que se explica por los datos extraídos, es decir, el porcentaje de la red de referencia que se encuentra dentro del búfer alrededor de los datos extraídos. El valor óptimo para la completitud es 1. (Heipke, *et. al.*, 1997; Liu, *et. al.*, 2017)

$$Recall = \frac{Longitud\ de\ referencia\ coincidente}{Longitud\ de\ referencia} \quad (5)$$

La exactitud representa el porcentaje de datos de carretera extraídos correctamente, es decir, el porcentaje de los datos extraídos que se encuentran dentro del búfer alrededor de la red de referencia. El valor óptimo para la corrección es 1. (Heipke, *et. al.*, 1997; Liu, *et. al.*, 2017)

$$Exactitud = \frac{Longitud\ de\ extracción\ coincidente}{Longitud\ de\ extracción} \quad (6)$$

El *GAP* es el número de vacíos, discontinuidades o lugares sin conexiones presentes en el camino resultante pero que sí existen en el camino de referencia. Es un indicador de la fragmentación de los resultados extraídos; en otras palabras, es aquellas partes que el algoritmo no detectó como camino. El valor óptimo para el gap es cero y se calcula por kilómetro. (Heipke, *et.al.*, 1997)

$$Gaps\ por\ km = \frac{Número\ de\ gaps}{Longitud\ de\ referencia\ en\ kilómetros} \quad (7)$$

Para obtener la evaluación de la exactitud, se calcula el porcentaje de las mismas métricas. Donde VP son verdadero positivo, FN Falso negativo y FP Falso positivo. La coincidencia de

datos extraídos se denota como verdaderos positivos con longitud VP, lo que indica que el algoritmo de extracción ha encontrado un camino, los datos extraídos que no coinciden se denotan como falso positivo con longitud FP, porque lo que el camino extraído es incorrecto. Para FN, la coincidencia se construye alrededor de los datos de caminos extraídos, y los datos de referencia que se encuentran en la zona buffer. En caso de baja redundancia, su longitud se puede aproximar con VP. Los datos de referencia no coincidentes se indican como falsos negativos con longitud FN. (Heipke, *et. al.*, 1997; Liu, *et. al.*, 2017)

$$\text{Porcentaje Recall} = \frac{VP}{VP + FN} \times 100 \quad (8)$$

$$\text{Porcentaje Exactitud} = \frac{VP}{VP + FP} \times 100 \quad (9)$$

## 5. Resultados obtenidos

### 5.1. Resultados de prospección arqueológica

#### 5.1.1. Camino Tlaxcalilla-Huichapan

En la Tabla 5.1 se muestran los puntos del camino real Tlaxcalilla-Huichapan registrados en campo. La información incluye la medida del ancho del camino, el tipo de cobertura y observaciones adicionales sobre referencias geográficas o elementos arquitectónicos asociados al camino.

Tabla 5.1. Datos recolectados en campo sobre el estado actual del camino real Tlaxcalilla-Huichapan, septiembre 2022 y 2023.

Punto	Ancho (m)	Cobertura	Observaciones
1a	5.77	Concreto con empedrado	Medida de la banqueta de una construcción antigua en la calle Insurgentes Centro a la banqueta contraria (norte).
1b	6.1	Concreto con empedrado	Medida de la barda de la construcción antigua a la banqueta contraria. (norte).
1c	6.92	Concreto con empedrado	Medida de banqueta a banqueta al oeste de la iglesia. El camino tiene una pendiente de Este a Oeste.
2	9.08	Concreto con empedrado	El camino se hace más ancho, la medida es tomada de la banqueta (sur) a la barda de una construcción antigua (norte).
3	4.66	Empedrado	La nomenclatura de la calle cambia a Benito Juárez García.
4	6.2	Empedrado	El camino se ensancha, a los lados se encuentran parcelas de cultivo y grandes mezquites.

5	2.9	Terracería y empedrado	El camino de empedrado se hace más angosto y en las orillas aparece toba expuesta, posiblemente por una ampliación posterior del camino, por lo que la medida corresponde solo al empedrado conformado por tres hileras de rocas de 93 cm cada una.
6	9.9	Empedrado	El camino se ensancha nuevamente y se conforma completamente de rocas. Del lado oeste del camino hay una sala con techo de bóveda y una inscripción en el dintel que permite fecharla a principios del siglo XIX.
7	8.74	Terracería	Cambio de cobertura.
8	10.32	Terracería	El camino de terracería se ensancha. Se encuentra una cruz tallada en un pequeño altar que construyeron en el tecorral Este que delimita el camino. Vuelo de dron al Este.
9	9.45	Caliche	Presencia de caliche por 400 metros, aproximadamente, posiblemente es la cobertura original del camino.
10	4	Pasto	Comienza la cobertura de pasto y el camino se convierte en una vereda de terracería, por lo que es complicado conocer el ancho original.
11	1 x .60 m	Pasto y terracería	Reaparece una sección del camino de entre los pastos y matorrales.
12	6	Pasto y terracería	El camino está limitado por rejas que sirven como linderos de las parcelas de cultivo, se midió la distancia que hay entre ellas.
13	4	Empedrado, terracería y pasto	La cobertura del camino se compone de rocas dispersas, las cuales formaron parte del empedrado original. Debido al intemperismo, entre las rocas hay presencia de suelo desnudo y pasto.
14	6	Pasto y terracería	El camino se interrumpe por la presencia de un jagüey.

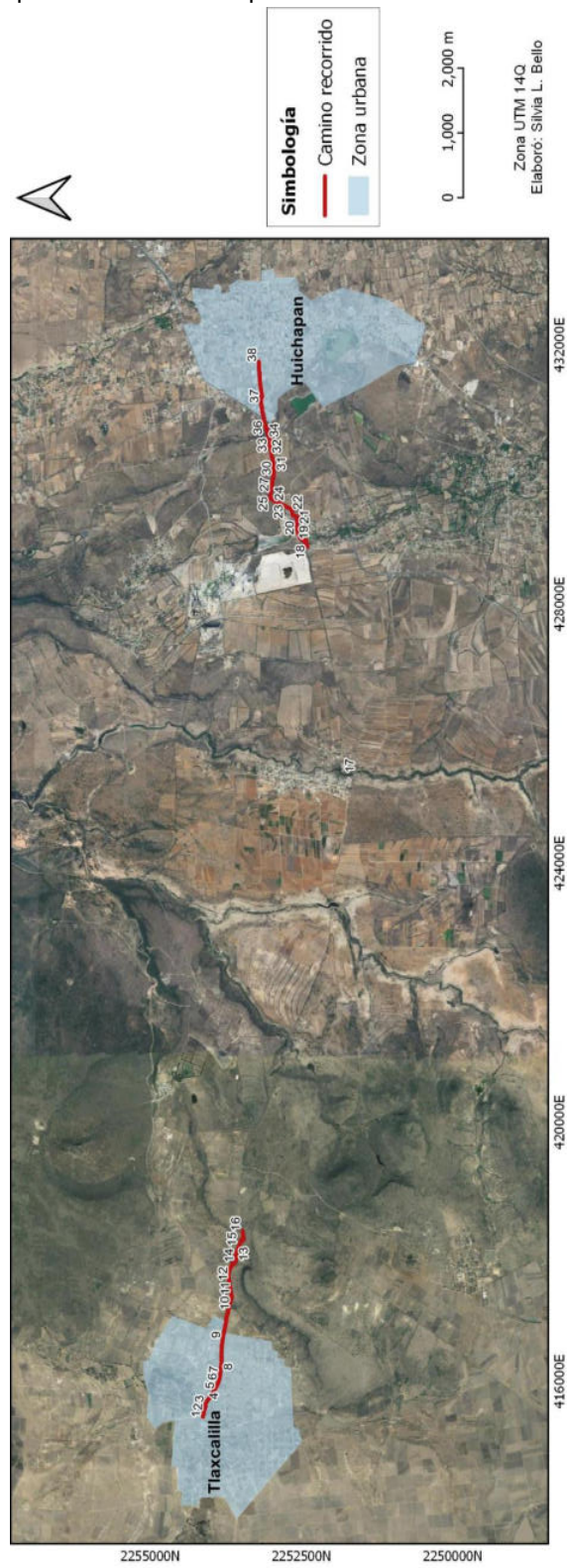
15	9	Pasto y empedrado	Reaparece el empedrado cubierto por vegetación que creció en las uniones. El camino gira ligeramente al este. Vuelo de dron al Este.
16	10	Pasto y terracería	El camino se pierde, pero hay tecorrales que posiblemente lo delimitaban, por ello se midió la distancia entre ellos.
17	4.3	Roca	Se siguió la carretera actual hacia Zothé hasta encontrar el puente de época novohispana que permitió cruzar el río Hondo y que formó parte del trazo del camino real.
18	5	Terracería	El camino real se vuelve a encontrar a la altura de la cementera (CEMEX).
19	4	Terracería	Cruzando el puente moderno.
20	4.6	Afloramiento rocoso	Afloramiento rocoso modificado por maquinaria. Al norte se observan los restos de un puente correspondiente al camino real junto con una ciénega.
21	7	Gravilla	El camino pasa por una pequeña zona urbana que corresponde a Dongoteay.
22a	7	Empedrado	Cruce de tres caminos reales señalado por una mojonera. El ancho corresponde al camino que se siguió desde Zothé.
22b	7.15	Terracería	Ancho del camino que se desvía al Este, llega a la actual carretera Huichapan-San José Atlán.
22c	6.5	Terracería y empedrado	Ancho de la continuación del camino que se recorrió hacia Huichapan.
23	8.4	Empedrado	Resto del empedrado antiguo con dimensiones de 2.40 x 3.20 m
24	9.1	Terracería	Cambio de ancho del camino y de cobertura.

25a	9.2	Terracería y empedrado	Hay dos mojoneras delimitando parcelas privadas y señalando que el camino cambia de dirección hacia el Este. Existen restos de empedrado antiguo en dimensiones de 5.70 x 4 m
25b	9.3	Afloramiento rocoso y terracería	El camino cambia de dirección al Este. Se observan restos del empedrado antiguo.
26	8.4	Afloramiento rocoso	Cambio de cobertura.
27	8.7	Afloramiento rocoso y empedrado	Se observan rocas sueltas del tamaño de cantos, posiblemente formaron parte del empedrado antiguo.
28	8.7	Empedrado	Restos del empedrado antiguo, se visualizan dos cajones de 2.20 x 4.20 m y 8.50 x 5.20 m, respectivamente.
29	8.7	Afloramiento rocoso	Los tecorrales que delimitan el camino de ambos lados se interrumpen. El tecorral Norte reaparece después de 11 m, aproximadamente.
30	8.4	Afloramiento rocoso	El tecorral Sur reaparece después de 15 m, aproximadamente.
31	9.40	Terracería y empedrado	Restos de una acequia antigua que atravesaba el camino formando un vado de 2.80 m de ancho.
32	9.5	Vegetación alta y empedrado	La vegetación cubre la mayor parte del camino, pero se visualizan rocas sueltas que conformaron el empedrado antiguo.
33	10.2	Afloramiento rocoso y terracería	Cambio de cobertura.
34	21.6	Afloramiento rocoso y terracería	Ensanchamiento del camino.

35	17.3	Afloramiento rocoso y terracería	El camino se hace más angosto.
36	8.27	Residuos plásticos	El camino está cubierto de restos pequeños de diferentes plásticos debido a la cercanía de un deshuesadero y asentamientos irregulares.
37	6.45	Pavimento	El camino cruza el libramiento 45 hacia el centro de Huichapan, siguiendo la calle Jorge Rojo Lugo.
38	8.21	Pavimento	Fin del registro en calle Jorge Rojo Lugo esquina con 16 de Enero, a la altura del centro de salud de Huichapan.

Los puntos enlistados corresponden a tres tramos del camino. El primero va desde el centro del pueblo de Tlaxcalilla hacia Zothé (punto 1 a 16), al no haber elementos suficientes para seguir el trazo antiguo, el siguiente punto registrado fue el puente de Zothé que cruzaba el río Hondo en época virreinal, actualmente la carretera pasa a un lado de los restos de dicho elemento arquitectónico. El último trayecto se recorrió desde la altura de la cementera hasta la parte urbana de Huichapan. (Ver Figura 5.1)

Figura 5.1. Mapa de datos de campo del camino real Tlaxcalilla-Huichapan.



Elaboración propia

El ancho mínimo registrado es de 2.9 m y el máximo es de 21.6 m. Asimismo, las coberturas son variadas a lo largo del camino, siendo las más recurrentes: terracería, empedrado y afloramiento rocoso, en algunas ocasiones acompañadas con vegetación. (Ver Figura 5.2) Por último, se identificaron estructuras antiguas, puentes, mojoneras y una acequia asociados al camino, así como restos del empedrado original que lo cubría. (Ver Figura 5.3) Es importante señalar que el camino está a un nivel más bajo que el resto de la superficie que lo rodea.

Figura 5.2. Fotografías en campo de coberturas del camino real Tlaxcalilla-Huichapan.



a) Concreto con empedrado



b) Empedrado moderno



c) Terracería



d) Pasto



e) Empedrado antiguo 1



f) Empedrado antiguo 2



g) Gravilla



h) Afloramiento rocoso



i) Residuos plásticos



j) Pavimento

Figura 5.3. Fotografías en campo de elementos asociados al camino real Tlaxcalilla-Huichapan.



a) Iglesia San Bartolomé Apóstol, Tlaxcalilla



b) Estructura antigua 1



c) Estructura antigua 2



d) Puente Zothé



e) Puente y ciénega



f) Mojonera



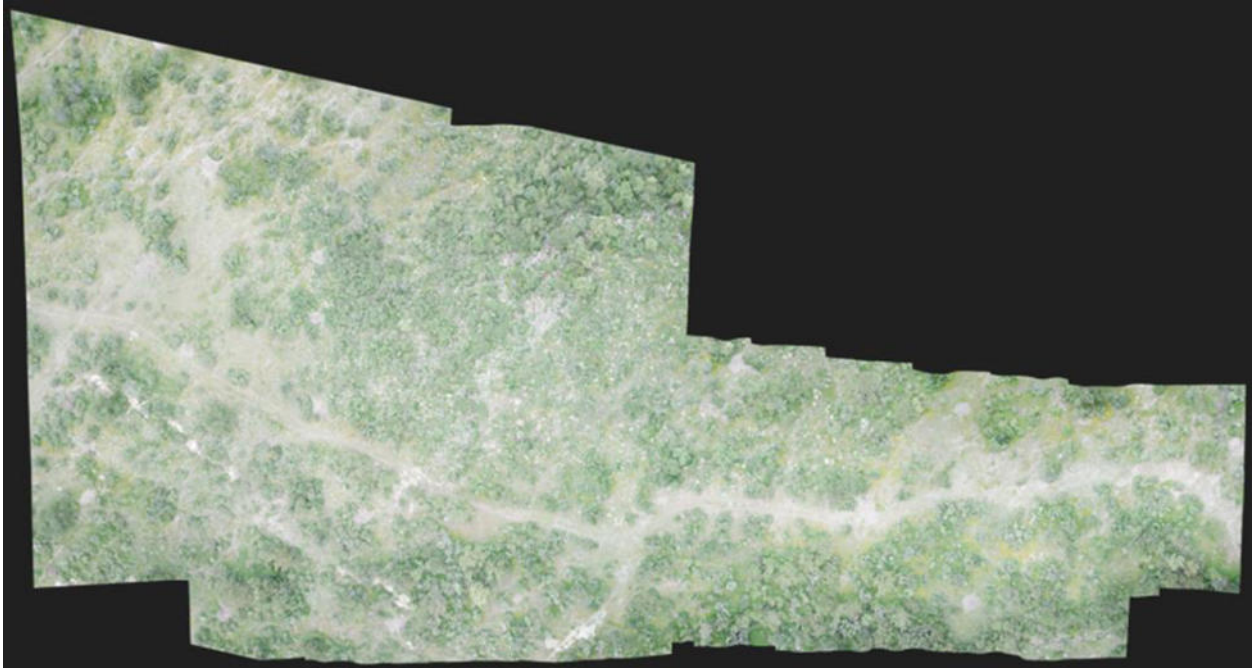
g) Acequia

Por último, se muestran las fotogrametrías que se tomaron con el dron en el camino de Tlaxcalilla -mencionados en los puntos 8 y 15 de la Tabla 5.1 con los registros de campo-. En la Figura 5.4 se observa el camino real con una cobertura de terracería todavía corresponde al área urbana del pueblo, del lado Norte hay unidades habitacionales y al Sur parcelas. Mientras que en la Figura 5.5 el camino apenas es una vereda cubierta por vegetación.

Figura 5.4. Fotogrametría de dron del punto 8, Tlaxcalilla-Huichapan.



Figura 5.5. Fotogrametría de dron del punto 15, Tlaxcalilla-Huichapan.



### **5.1.2. Camino Huichapan-Tecoautla**

A continuación, se muestran los puntos registrados en el camino Huichapan-Tecoautla. Se recorrió desde la presa Mamithí hasta 2 km al norte, aproximadamente, del rancho Zethé, comunidad Taguí. El ancho mínimo del camino fue de 6.3 m y el máximo de 14.3 (Ver Tabla 5.2 y Figura 5.6)

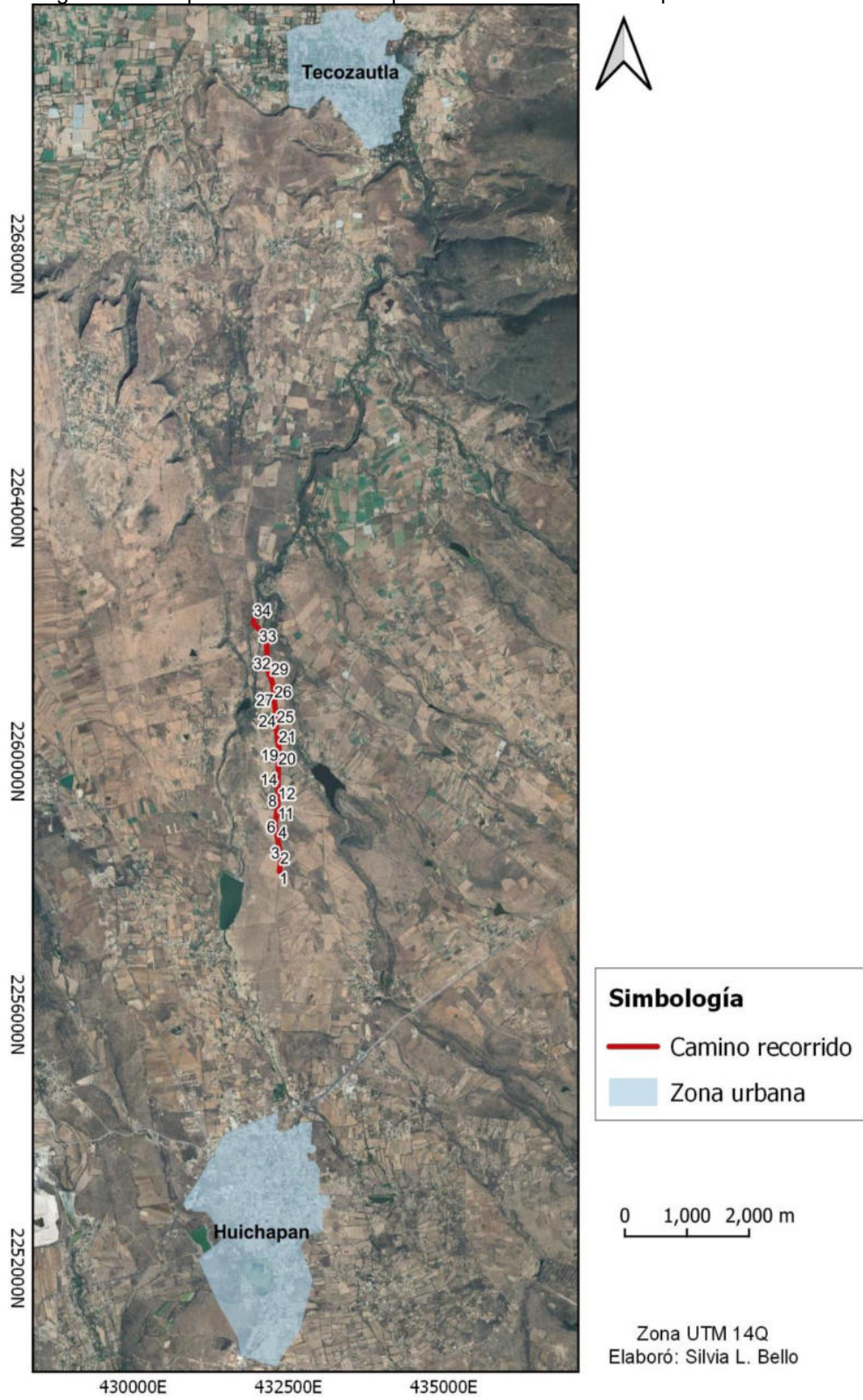
Tabla 5.2. Datos recolectados en campo sobre el estado actual del camino real Huichapan-Tecoautla, septiembre 2023.

Punto	Ancho (m)	Cobertura	Observaciones
1	7.84	Terracería	Primer punto registrado.
2	7.7	Afloramiento rocoso de toba	Cambio de cobertura.
3	9.72	Afloramiento rocoso de toba	Estructura posiblemente antigua con remodelaciones modernas.
4	7.5	Afloramiento rocoso de toba	La toba tiene alteraciones de origen antrópico.
5	7.77	Afloramiento rocoso de toba	Pequeños restos de empedrado antiguo.
6	8	Afloramiento rocoso de toba	Estructura moderna de 26.70 m de largo.
7	8.48	Terracería	Cambio de cobertura
8a	10.70	Terracería	Presencia de mojonera que indica el cruce de caminos y un alineamiento de 3 m, aproximadamente, en medio de dicho cruce. El ancho corresponde al camino hacia Tecoautla.
8b	6.8	Afloramiento rocoso de toba	Bifurcación del camino hacia la presa Taguú. Desnivel de afloramiento rocoso.
9	8.8	Afloramiento rocoso de toba	Cambio de cobertura.
10	7.73	Afloramiento rocoso de toba con vegetación	Cambio de cobertura.
11	10	Vegetación	El camino tiene vegetación densa, lo que impide continuar sobre él. A un lado se encuentran restos de una mojonera y un muro antiguos.
12	9.4	Terracería con rocas y vegetación	El camino vuelve a ser accesible, pero hay un socavón en el límite Este.

13	8	Afloramiento rocoso y vegetación	Afloramiento rocoso con erosión hídrica con vegetación.
14	6.96	Vegetación	El camino tiene vegetación densa, lo que dificulta recorrerlo.
15	7	Vegetación	Barda de 54 cm de altura atraviesa el camino, probablemente se colocó posterior a su abandono.
16	6.94	Terracería con vegetación	Cambio de cobertura.
17	6.3	Afloramiento rocoso de toba y rocas	Cambio de cobertura. El tecorral Este está derrumbado, por lo que las rocas se encuentran sueltas sobre el afloramiento de toba.
18	6.56	Terracería con vegetación	Cambio de cobertura.
19	6.96	Afloramiento rocoso de toba	Cambio de cobertura.
20	9.4	Afloramiento rocoso de toba	Ensanchamiento del camino.
21	6.47	Afloramiento rocoso de toba	El camino se hace más angosto. Los tecorrales están derrumbados.
22	6.83	Afloramiento rocoso de toba	Barda contemporánea que corta el camino de manera transversal.
23	9.34	Afloramiento rocoso de toba	Ensanchamiento del camino.
24	10.43	Terracería	Pequeños restos de empedrado. Vuelo de dron hacia el Sur.
25	7.86	Afloramiento rocoso erosionado	Camino con erosión hídrica, crece vegetación xerófila junto a los tecorrales.
26	8.65	Afloramiento rocoso y terracería	Al Oeste se encuentra una mojonera de forma cilíndrica con 86 cm de diámetro, su parte superior se encuentra destruida, por lo que presenta una

			altura al interior del camino de 2.40 m y de 1.86 m al exterior.
27	9.68	Vegetación	El camino se encuentra cubierto densamente por vegetación de matorral xerófilo y árboles de pirul, sin embargo, no impide su recorrido.
28	7.12	Afloramiento rocoso de toba	Cambio de cobertura. La toba tiene una tonalidad rojiza.
29	15.85	Afloramiento rocoso de toba	Ensanchamiento del camino. Modificación moderna para cruzar el camino antiguo y conectar las parcelas de ambos lados.
30	14.44	Afloramiento rocoso de toba	Alineamiento de toba de 66 cm de ancho por 26.18 m de largo, a la mitad del camino, está orientado a 322° al Norte, casi paralelo a los tecorrales.
31	14.3	Afloramiento rocoso de toba	A 10 m de distancia del alineamiento anterior, hay otro con dimensiones de 25 cm de ancho, 26.18 m de largo y con orientación de 322° al Norte.
32	14.3	Afloramiento rocoso de toba y empedrado	Restos de empedrado construido con la misma toba del sitio. Se encuentra un pequeño muro de 59 cm del lado Oeste del camino y a 5 m al norte, aproximadamente, se identifica una posible marca de rueda de carretera de 69 cm de ancho.
33	13.5	Afloramiento rocoso de toba	Alineamiento a la mitad del camino, paralelo a los tecorrales, orientado a 311° al Norte.
34	9.15	Terracería	Último punto recorrido. Se realizó un vuelo de dron hacia el Norte.

Figura 5.6. Mapa de datos de campo del camino real Huichapan-Tecoautla.



Elaboración propia

Del mismo modo que el caso anterior, este camino se encuentra a un nivel inferior en relación al resto de la superficie de ocupación. Las coberturas más recurrentes fueron el afloramiento rocoso de toba roja, terracería y vegetación densa que en ocasiones impidieron el paso por el camino. Los elementos antrópicos identificados fueron estructuras antiguas y modernas, mojoneras que determinan un cruce de caminos o el límite de tierras, empedrados originales, así como alineamientos que dividen dos el camino en ciertos tramos y un muro. Asociado a dichos alineamientos, se encontró una huella rectangular que podría corresponder en ancho y forma a una rueda de carreta. (Figuras 5.7 y 5.8)

Figura 5.7. Fotografías en campo de coberturas del camino real Huichapan-Tecoautla.



a) Erosión



b) Pasto con rocas



c) Vegetación densa



d) Afloramiento rocoso y vegetación



e) Empedrado original



f) Terracería

Figura 5.8. Fotografías en campo de elementos asociados al camino real Huichapan-Tecozautla.



a) Mojonera 1



b) Mojonera 2



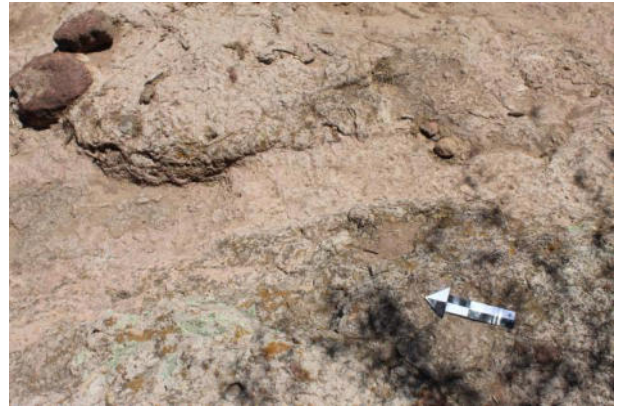
c) Estructura moderna



d) Alineamiento



e) Muro



f) Posible huella de rueda de carreta

Ahora bien, las Figuras 5.9 y 5.10 corresponden a las fotogrametrías tomadas con el dron. La primera se hizo al sur del rancho Zethé y su cobertura es de terracería y afloramiento rocoso de toba -punto 24-, mientras que la segunda tuvo lugar al norte, hacia Pathecito, cuya cobertura es de terracería -punto 34-.

Figura 5.9. Fotogrametría de dron del punto 24, Huichapan-Tecoautla.



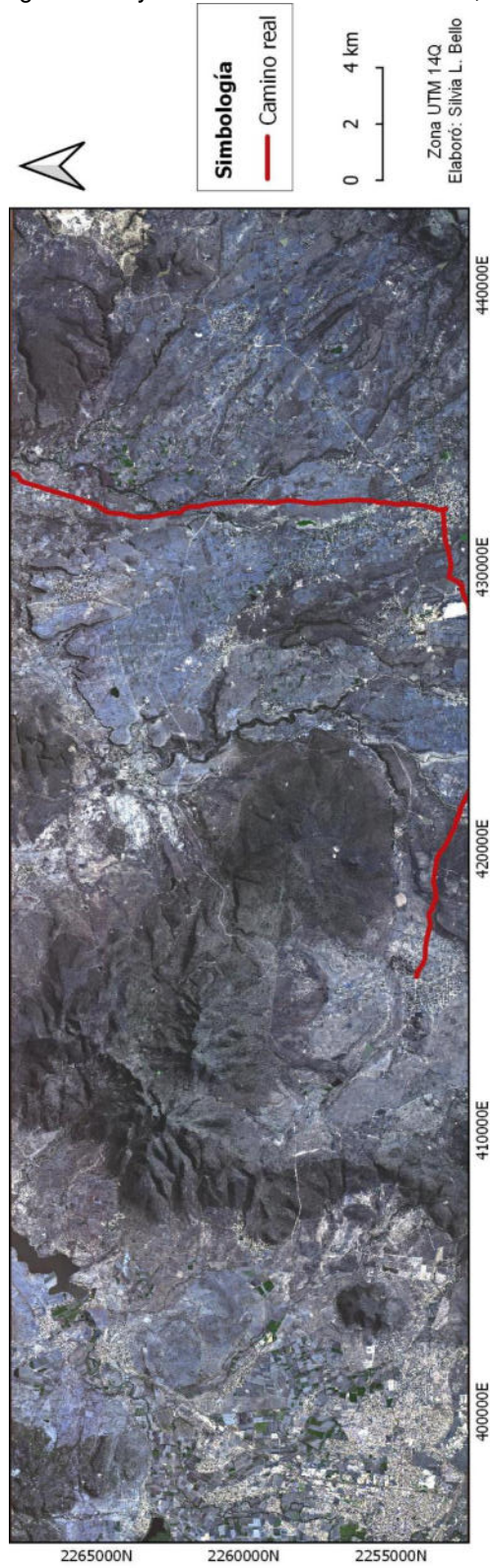
Figura 5.10. Fotogrametría de dron del punto 34, Huichapan-Tecozautla.



## **5.2. Resultados del procesamiento de imágenes GeoEye-1**

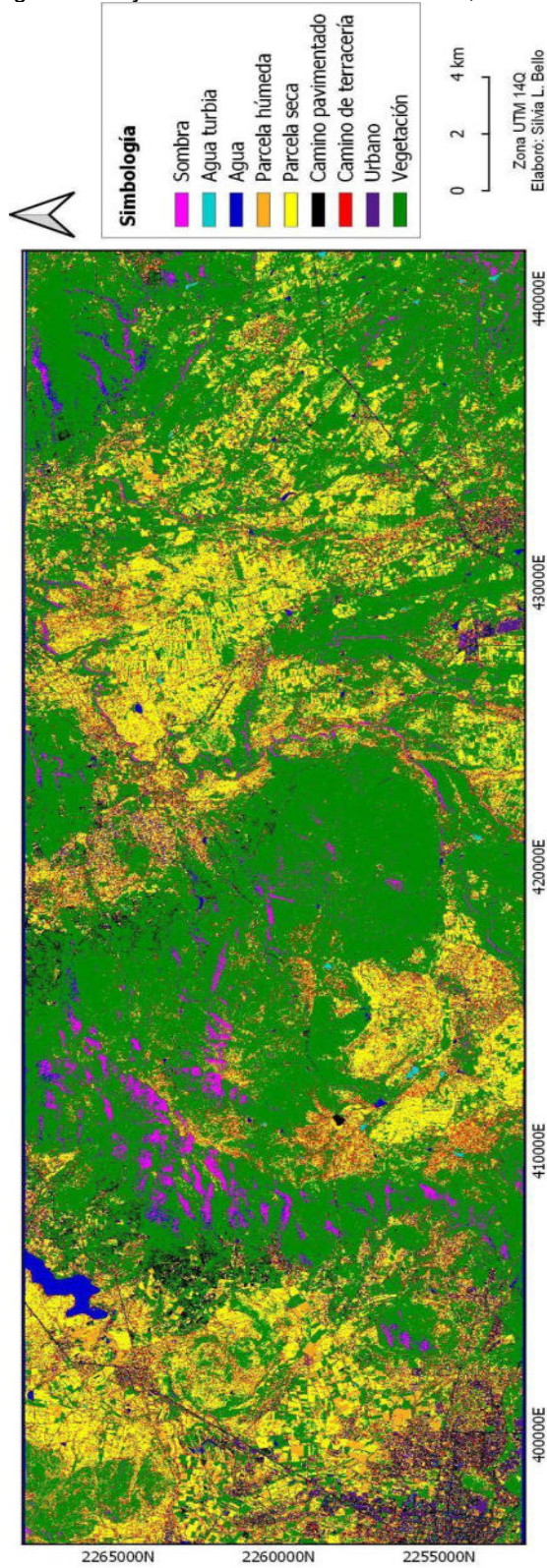
La escena procesada es del 20 de enero de 2014 y cubre tanto el camino real de Tlaxcalilla a Huichapan (dirección Oeste-Este), como el de Huichapan a Tecozautla (dirección Sur-Norte). La imagen se preprocesó completa y después se hicieron cortes en ambos caminos novohispanos para optimizar los procesos de obtención de características de bordes y multiespectrales, la fase de clasificación supervisada (MSV) y de validación. En la Figura 5.11 se observa la imagen GeoEye-1 y la ubicación de los caminos reales. En la Figura 5.12 el resultado de la imagen clasificada.

Figura 5.11. Imagen GeoEye-1 de 20 de enero de 2014, caminos reales.



Elaboración propia

Figura 5.12. Imagen GeoEye-1 de 20 de enero de 2014, clasificación por MSV.

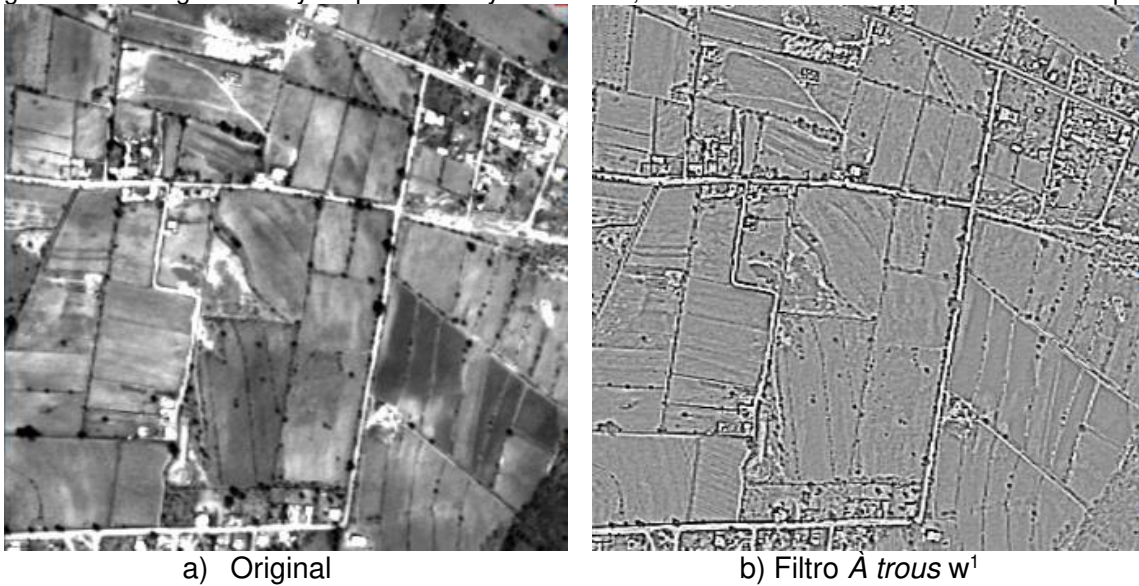


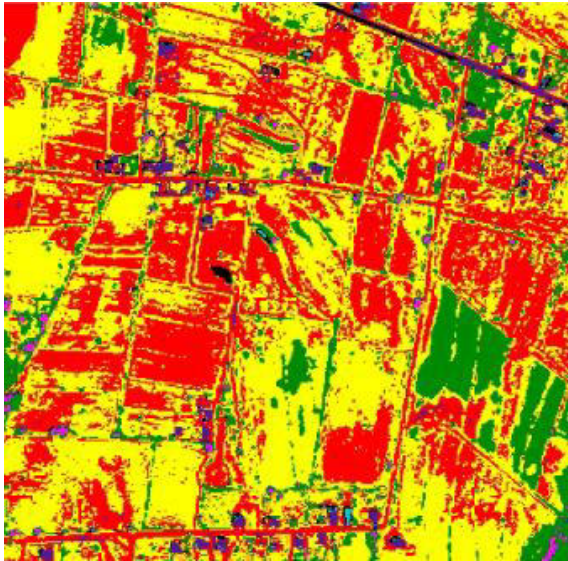
Elaboración propia

### 5.2.1. Camino Tlaxcalilla-Huichapan

En la Figura 5.13 se observa una parte del camino Tlaxcalilla-Huichapan (Figura 5.13a) procesada con el filtro *À trous* (Figura 5.13b) y el resultado de su clasificación (Figura 5.13c). Se aprecia que el realce de bordes se intensifica con cada plano de Wavelet, en la  $w^2$  existe mayor detección de borde (Figura 5.13d). Esto impacta en la clasificación (Figura 5.13e), ya que confunde menos los caminos de terracería con las parcelas secas; sin embargo, sigue conservando las líneas que dividen las parcelas debido a la propiedad del filtro. En términos de evaluación visual, se puede concluir que la imagen de plano de Wavelet  $w^2$  ayuda a una mejor separación de la clase 'camino de terracería', lo mismo que con 'camino pavimentado' al ser elementos lineales.

Figura 5.13. Imagen GeoEye-1 procesada y clasificada, MSV. Detalle camino Tlaxcalilla-Huichapan.

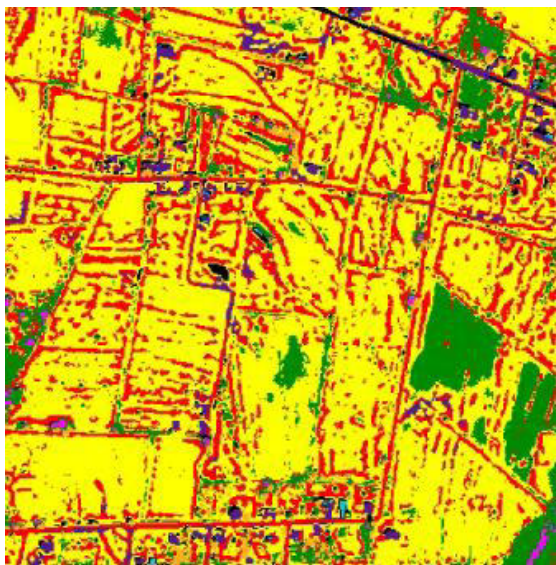




c) Filtro *A trous*  $w^1$  clasificada



d) Filtro *A trous*  $w^2$



e) Filtro *A trous*  $w^2$  clasificada



f) Simbología de categorías clasificadas, MSV

Se utilizaron 543 puntos jerárquicamente aleatorios para la validación, tanto de la imagen clasificada con la transformada de Wavelet  $w^1$ , como con la  $w^2$ . A pesar que el tamaño de muestra necesario era de 232 puntos, al momento de generarlos muchas categorías quedaron sin representación, por ello se consideró el trabajo de Olofsson, *et. al.* (2014) y se decidió que todas las clases contaran con al menos 50 puntos. (Ver Tabla 5.3)

Tabla 5.3. Puntos de muestreo aleatorios, algoritmo de  $\hat{A}$  *trous*  $w^1$  y  $w^2$ . Camino real Tlaxcalilla-Huichapan.

Categoría	Número de puntos
Camino pavimentado	50
Camino de terracería	50
Parcela húmeda	50
Parcela seca	84
Urbano	50
Vegetación	109
Sombra	50
Agua	50
Agua turbia	50
<b>Total</b>	<b>543</b>

Elaboración propia

Tabla 5.4. Matriz de estimaciones de área sin sesgo del algoritmo de  $\hat{A}$  *trous*  $w^1$ , camino real Tlaxcalilla-Huichapan

Class	Area (hectares)	± 95% CI	User's Accuracy (%)	Producer's Accuracy (%)	Overall Accuracy (%)
Sombra	125.20	394.06	100.0	50.3	73.8
Agua turbia	36.82	383.92	81.4	32.4	
Agua	18.28	344.96	100.0	87.3	
Parcela húmeda	347.31	535.54	96.0	8.6	
Parcela seca	970.84	604.34	90.2	79.1	
Camino pavimentado	167.80	624.22	86.5	11.1	
Camino terracería	346.21	681.43	60.3	72.2	
Urbano	64.39	738.65	83.3	47.1	
Vegetación	1,339.48	439.77	67.7	99.5	

Tabla 5.5. Matriz de estimaciones de área sin sesgo del algoritmo de  $\hat{A}$  *trous*  $w^2$ , camino real Tlaxcalilla-Huichapan

Class	Area (hectares)	$\pm$ 95% CI	User's Accuracy (%)	Producer's Accuracy (%)	Overall Accuracy (%)
Sombra	69.61	412.74	98.0	77.1	86.9
Agua turbia	20.33	402.13	87.0	62.5	
Agua	11.30	361.31	98.0	100.0	
Parcela húmeda	55.01	560.92	100.0	71.4	
Parcela seca	1,102.48	632.99	92.4	93.2	
Camino pavimentado	252.66	653.81	77.8	9.3	
Camino terracería	300.90	713.74	71.6	94.9	
Urbano	135.86	773.67	76.9	27.0	
Vegetación	1,630.15	460.62	86.6	99.3	

En las Tablas 5.4 y 5.5 se presentan los resultados de la matriz de confusión de estimación de precisión de área sin sesgo, los porcentajes de precisión general del algoritmo de Máquinas de Soporte Vectorial son de 73.8% y 86.9% para el algoritmo de  $\hat{A}$  *trous*  $w^1$  y  $w^2$ , respectivamente. En la precisión de usuario, para el caso de la transformada de Wavelet  $w^1$ , las categorías mejor clasificadas son 'Sombra' y 'Agua' con un 100%, seguidas de 'Parcela húmeda'. En contraparte, las que menor precisión tienen son 'Camino de terracería' (60.3%) y 'Vegetación' (67.7%); los cuales corresponden a errores de comisión, es decir, se incluyeron píxeles de una clase distinta. Para la precisión de productor, las categorías con mayor porcentaje son 'Vegetación' (99.5%) y 'Agua' (87.3%); y las de menor porcentaje de precisión son 'Parcela húmeda' (8.6%) y 'Camino pavimentado' (11.1%), siendo estos errores de omisión, ya que se excluyeron píxeles de la clase evaluada. (Schmidt & McCullum, 2018) En la Figura 5.14 se aprecia que los caminos de terracería están bien clasificados, igual que la parcela seca y la vegetación; mientras que en la Figura 5.15 las parcelas secas se confunden con caminos de terracería y unas partes de camino pavimentado están clasificadas como urbano.

Figura 5.14. Imagen GeoEye-1 con clasificación correcta, filtro  $\hat{A}$  trous  $w^1$ .

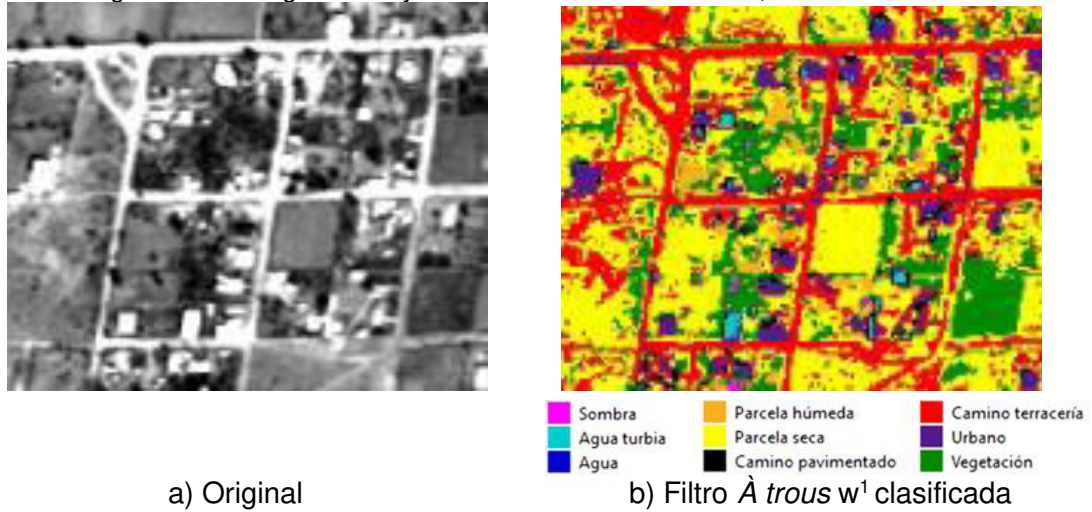
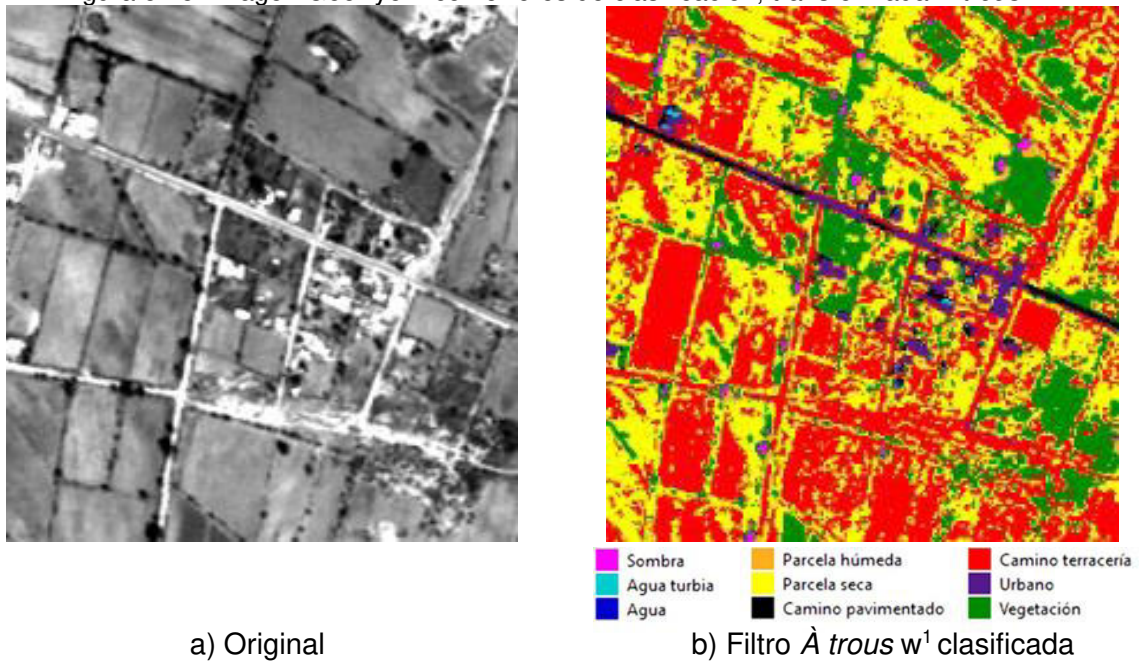


Figura 5.15. Imagen GeoEye-1 con errores de clasificación, transformada  $\hat{A}$  trous  $w^1$ .



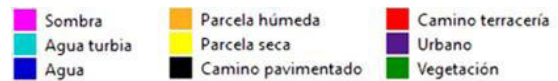
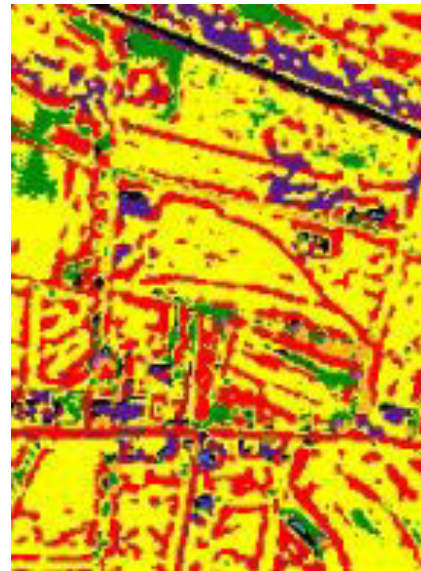
En las estadísticas de la transformada  $w^2$ , las clases con mayor error de comisión son 'Camino de terracería' (71.6%) y 'Urbano' (76.9%); así como 'Camino pavimentado' (9.3%) y 'Urbano' (27%) con error de omisión más alta. Mientras que los porcentajes más altos de precisión de usuario corresponden a las categorías de 'Parcela húmeda' (100%), 'Agua' (98%) y 'Sombra'

(98%); y 'Agua' (100%) y 'Vegetación' (99.3%) para la precisión de productor. En la Figura 5.16 se observa que los caminos de terracería, camino pavimentado, parcela seca, vegetación y la zona urbana están bien clasificados, pero en el caso de la Figura 5.17, el agua y unas áreas de vegetación se confunden con sombra, al igual que algunas partes de las zonas urbanas se clasificaron con agua turbia.

Figura 5.16. Imagen GeoEye-1 con clasificación correcta, filtro  $\hat{A}$  trous  $w^2$ .



a) Original

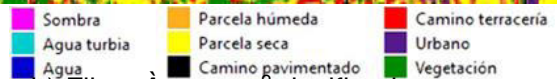
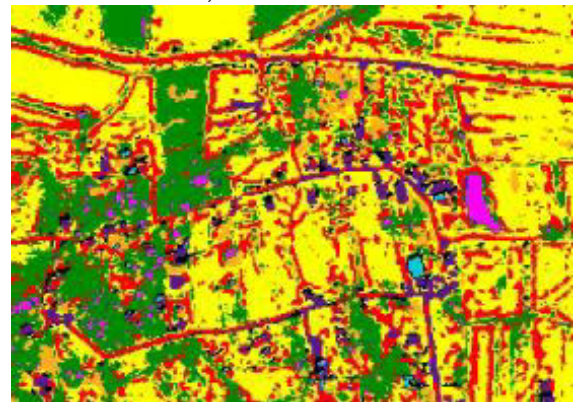


b) Filtro  $\hat{A}$  trous  $w^2$  clasificada

Figura 5.17. Imagen GeoEye-1 con errores de clasificación, filtro  $\hat{A}$  trous  $w^2$ .



a) Original

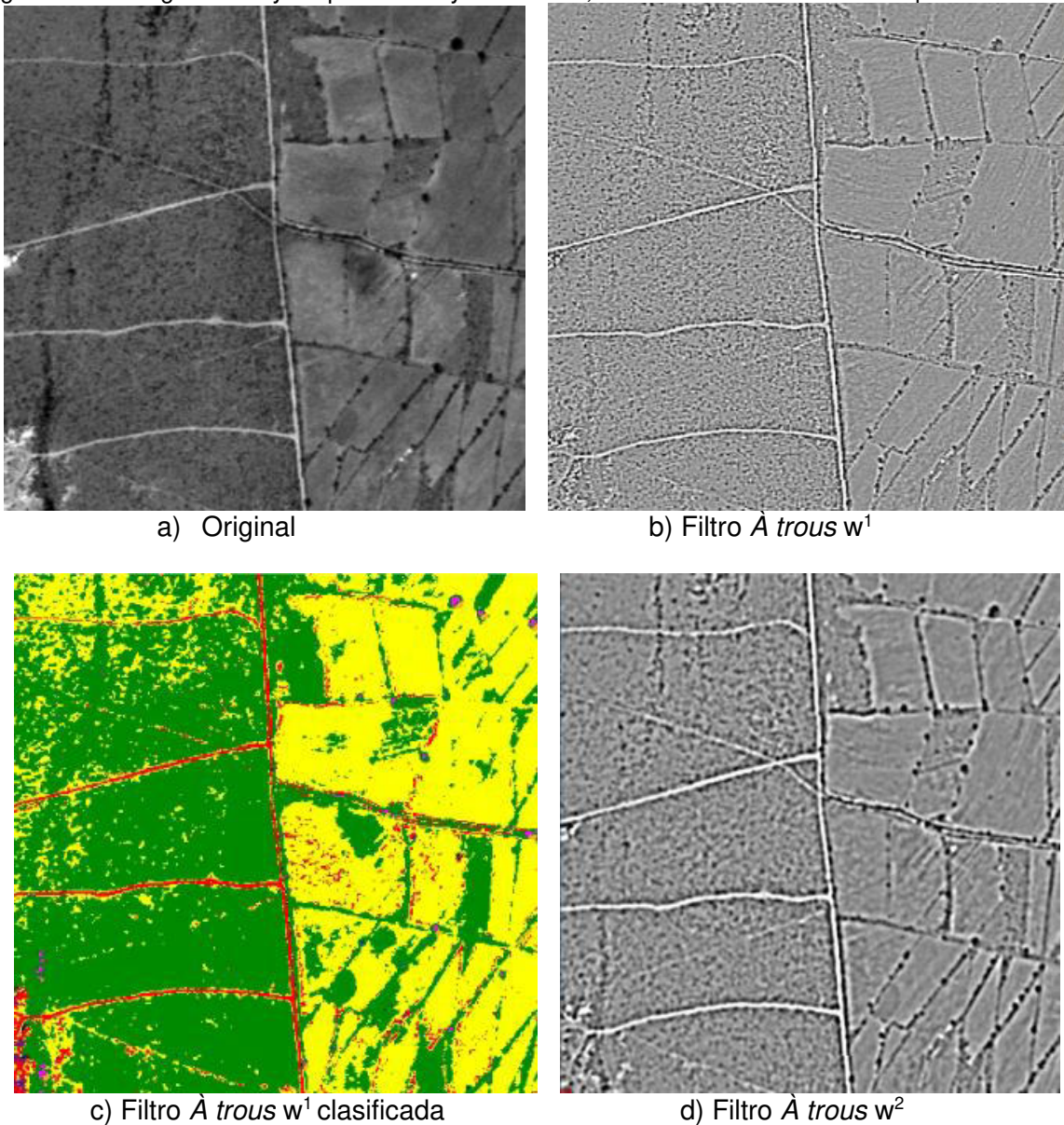


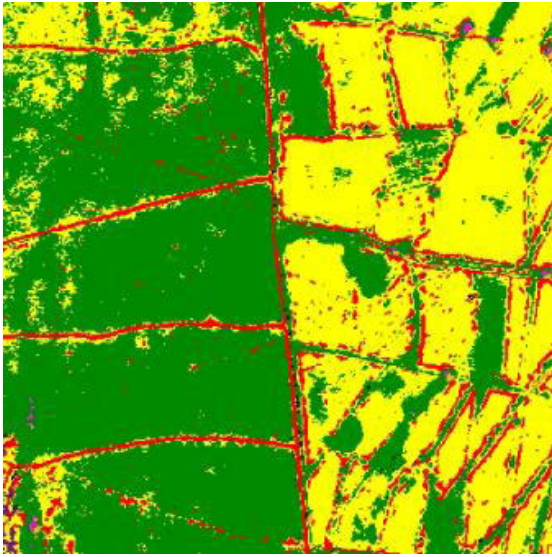
b) Filtro  $\hat{A}$  trous  $w^2$  clasificada

### 5.2.2. Camino Huichapan-Tecoautla

En la Figura 5.18 se muestra la comparación entre la imagen multispectral, las transformadas de Wavelet y el resultado de las clasificaciones por MSV de un segmento del camino real que va de Huichapan a Tecoautla, dirección Sur-Norte. Existe mayor realce de bordes en el filtro  $w^2$  - coincidente con los resultados esperados- y, por tanto, de los caminos de terracería, así como una mejora visual en la clasificación para las clases de parcela seca y vegetación.

Figura 5.18. Imagen GeoEye-1 procesada y clasificada, MSV. Detalle camino Huichapan-Tecoautla.





e) Filtro *À trous*  $w^2$  clasificada



f) Simbología de categorías clasificadas, MSV

De la misma forma que en el camino Tlaxcalilla-Huichapan, los puntos de precisión se ajustaron para que cada categoría tuviera un mínimo de 50 píxeles para su validación. La muestra contó con 543 puntos en total, siendo 'Parcela seca' y 'Vegetación' las clases con el mayor número de puntos con 84 y 109, respectivamente. (Ver Tabla 5.6)

Tabla 5.6. Puntos de muestreo aleatorios, filtro  $\hat{A}$  *trous*  $w^1$  y  $w^2$ . Camino Huichapan-Tecoautla.

Categoría	Número de puntos
Camino pavimentado	50
Camino de terracería	50
Parcela húmeda	50
Parcela seca	84
Urbano	50
Vegetación	109
Sombra	50
Agua	50
Agua turbia	50
<b>Total</b>	<b>543</b>

Elaboración propia

Tabla 5.7. Matriz de estimaciones de área sin sesgo del algoritmo de  $\hat{A}$  *trous*  $w^1$ , camino real Huichapan-Tecoautla

Class	Area (hectares)	$\pm$ 95% CI	User's Accuracy (%)	Producer's Accuracy (%)	Overall Accuracy (%)
Sombra	149.38	920.20	96.2	100.0	92.8
Agua turbia	60.77	896.55	100.0	20.7	
Agua	101.29	805.54	100.0	54.2	
Parcela húmeda	213.29	1,250.59	94.3	100.0	
Parcela seca	2,213.98	1,411.26	88.9	94.4	
Camino pavimentado	189.59	1,457.68	92.5	77.1	
Camino terracería	550.96	1,591.29	77.6	78.2	
Urbano	231.79	1,724.91	88.7	82.1	
Vegetación	4,266.79	1,026.95	96.9	96.5	

Tabla 5.8. Matriz de estimaciones de área sin sesgo del algoritmo de  $\hat{A} \text{ trous } w^2$ , camino real Huichapan-Tecozautla

Class	Area (hectares)	$\pm 95\% \text{ CI}$	User's Accuracy (%)	Producer's Accuracy (%)	Overall Accuracy (%)
Sombra	113.55	884.38	94.3	100.0	93.3
Agua turbia	52.13	861.64	100.0	24.1	
Agua	73.49	774.18	98.0	43.0	
Parcela húmeda	249.36	1,201.90	92.6	100.0	
Parcela seca	2,371.44	1,356.32	95.7	88.9	
Camino pavimentado	152.07	1,400.92	89.3	100.0	
Camino terracería	642.17	1,529.34	88.7	95.0	
Urbano	166.96	1,657.75	92.0	95.0	
Vegetación	3,846.05	986.97	93.1	96.8	

Para el camino real Huichapan-Tecozautla, la clasificación supervisada que presentó mejor resultado de precisión general fue la del algoritmo  $\hat{A} \text{ trous } w^2$  con 93.3%. Para el algoritmo de  $\hat{A} \text{ trous } w^1$  su precisión fue 92.8%. En la precisión de usuario, los porcentajes más altos son los de 'Agua' y 'Agua turbia' (100%), mientras que los más bajos son 'Camino de terracería' (77.6%) y 'Urbano' (88.7%). Igualmente, en la precisión de productor las clases con mayor porcentaje son 'Sombra' y 'Parcela seca' con 100% de precisión y los porcentajes menores corresponden a 'Agua turbia' con 20.7% y 'Agua' con 54.2%. (Ver Tabla 5.7)

Existen casos en los que la clasificación se hizo de manera correcta y otros en los que hubo errores. La Figura 5.19 ejemplifica cómo la parte urbana, la vegetación y el camino pavimentado se clasificaron adecuadamente. La Figura 5.20 muestra que algunas partes de vegetación fueron clasificadas por MSV como sombra, hay pixeles aislados de caminos de terracería y segmentos de parcela seca entre la vegetación.

Figura 5.19. Imagen GeoEye-1 con clasificación correcta, filtro  $\hat{A} \text{ trous } w^1$ .

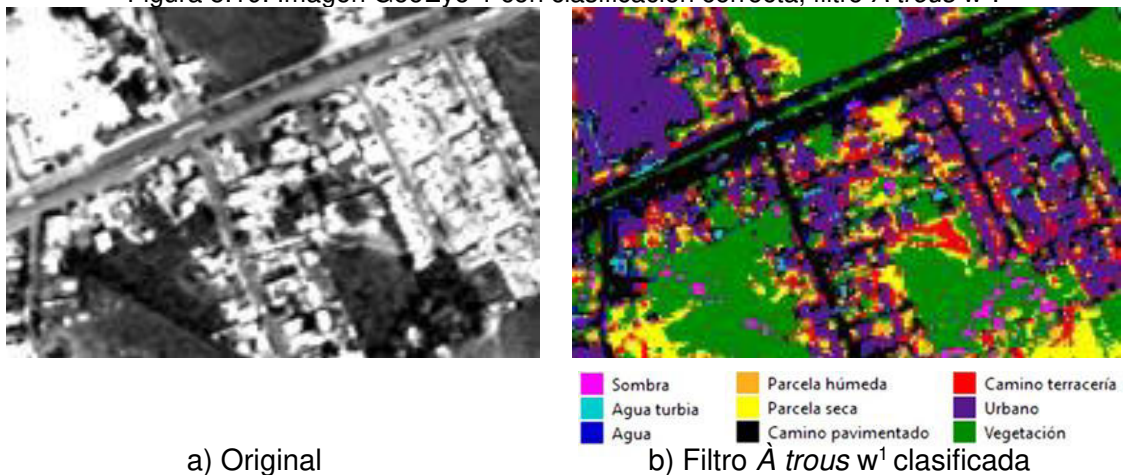
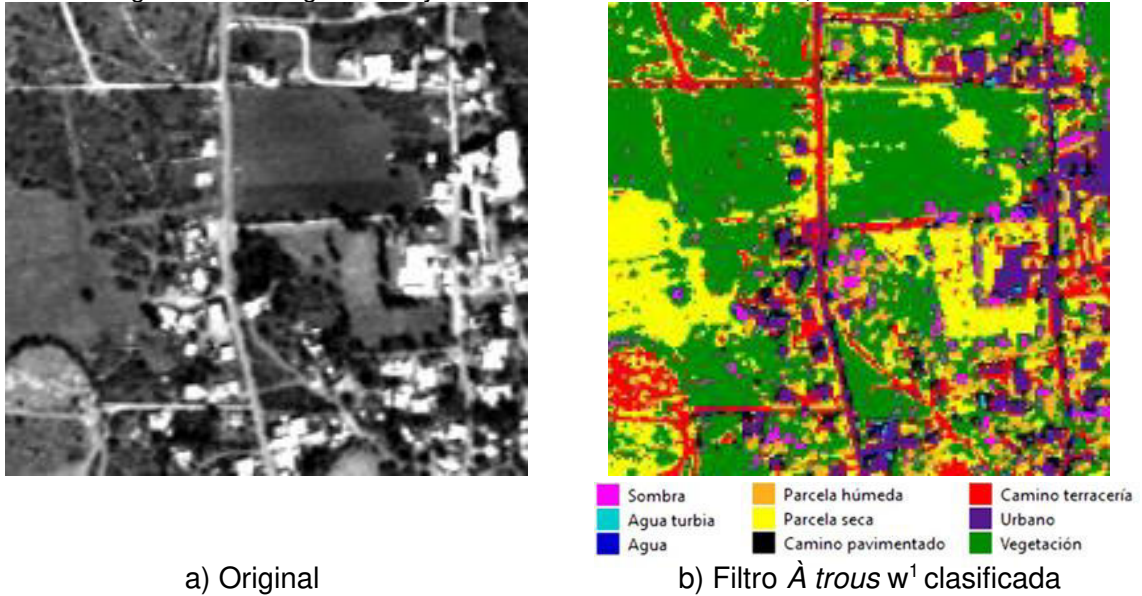


Figura 5.20. Imagen GeoEye-1 con errores de clasificación, filtro  $\hat{A}$  trous  $w^1$ .



Ahora bien, el filtro  $w^2$  arrojó un 93.3% de precisión global. De manera individual, 'Agua turbia' (100%) y 'Agua' (98%) tienen los mejores porcentajes de precisión de usuario, así como 'Sombra', 'Parcela húmeda' y 'Camino pavimentado' cuentan con el 100% de precisión de productor. Un alto valor de errores de comisión se presenta en 'Camino de terracería' (88.7%) y 'Camino pavimentado' (89.3%); mientras que en los errores de omisión están en 'Agua turbia' (24.1%) y 'Agua' (43%). (Ver Tabla 5.8)

En la Figura 5.21 se observa una correcta clasificación del algoritmo  $\hat{A}$  trous  $w^2$  de los caminos de terracería, vegetación y parcela seca. Por último, los errores de clasificación se presentan en la Figura 5.22, en donde el suelo desnudo es clasificado como urbano y parcela seca con zonas de parcela húmeda, cuando debió reconocerse como parte de la clase 'Camino de terracería'.

Figura 5.21. Imagen GeoEye-1 con clasificación correcta, filtro *À trous*  $w^2$ .

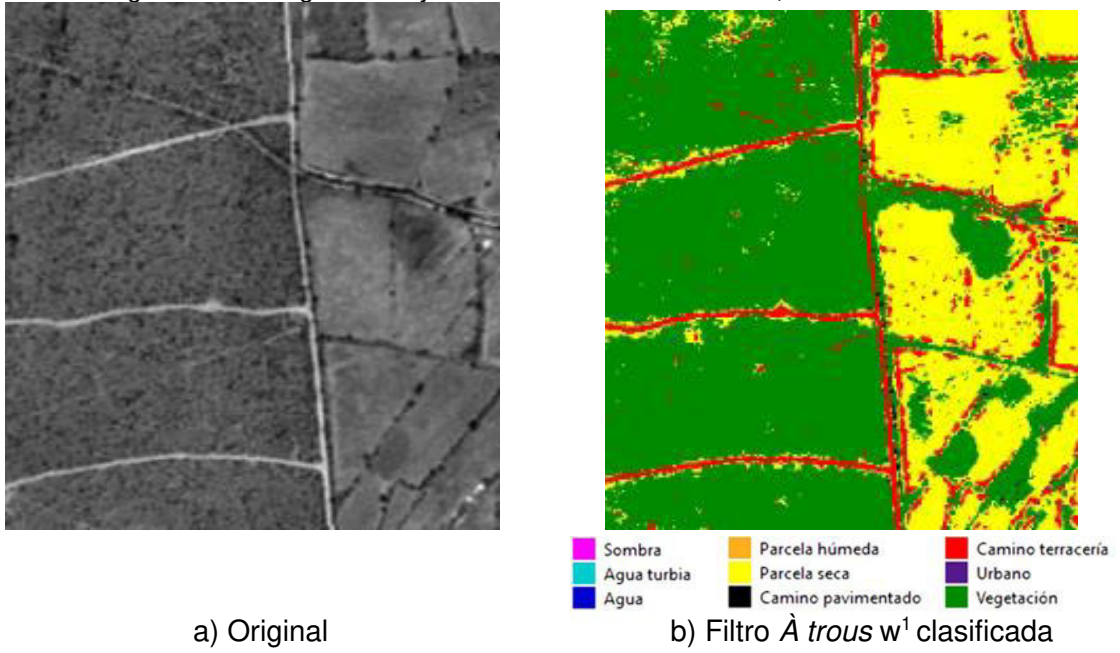
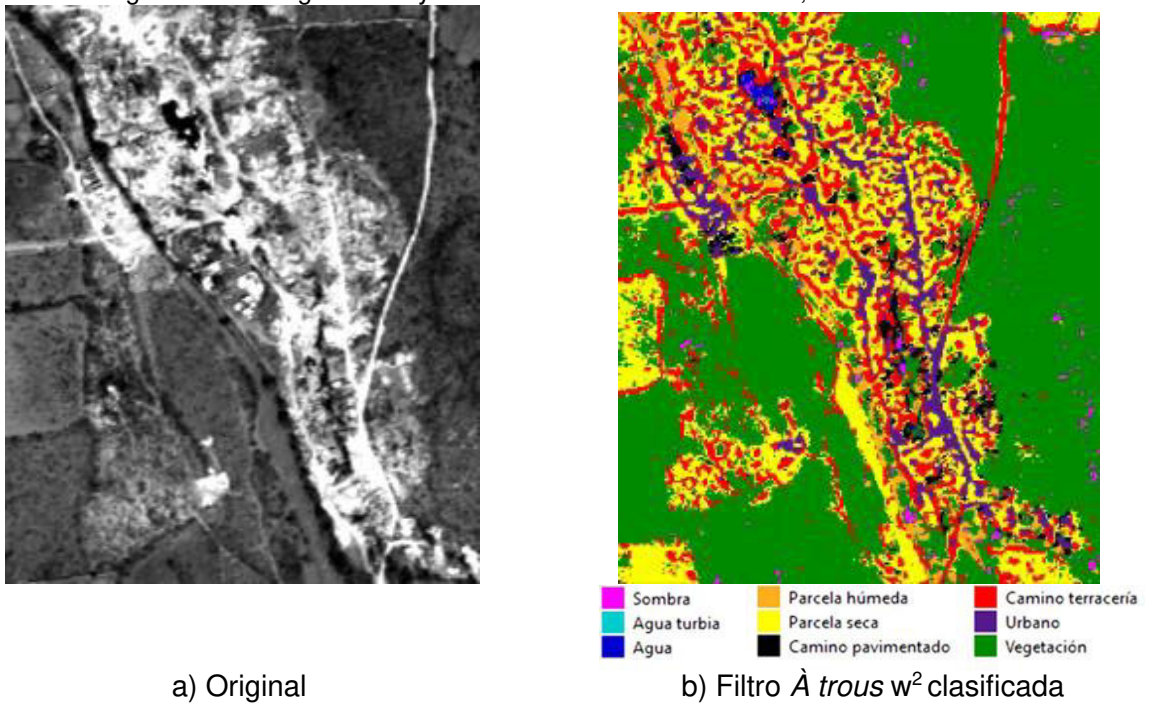
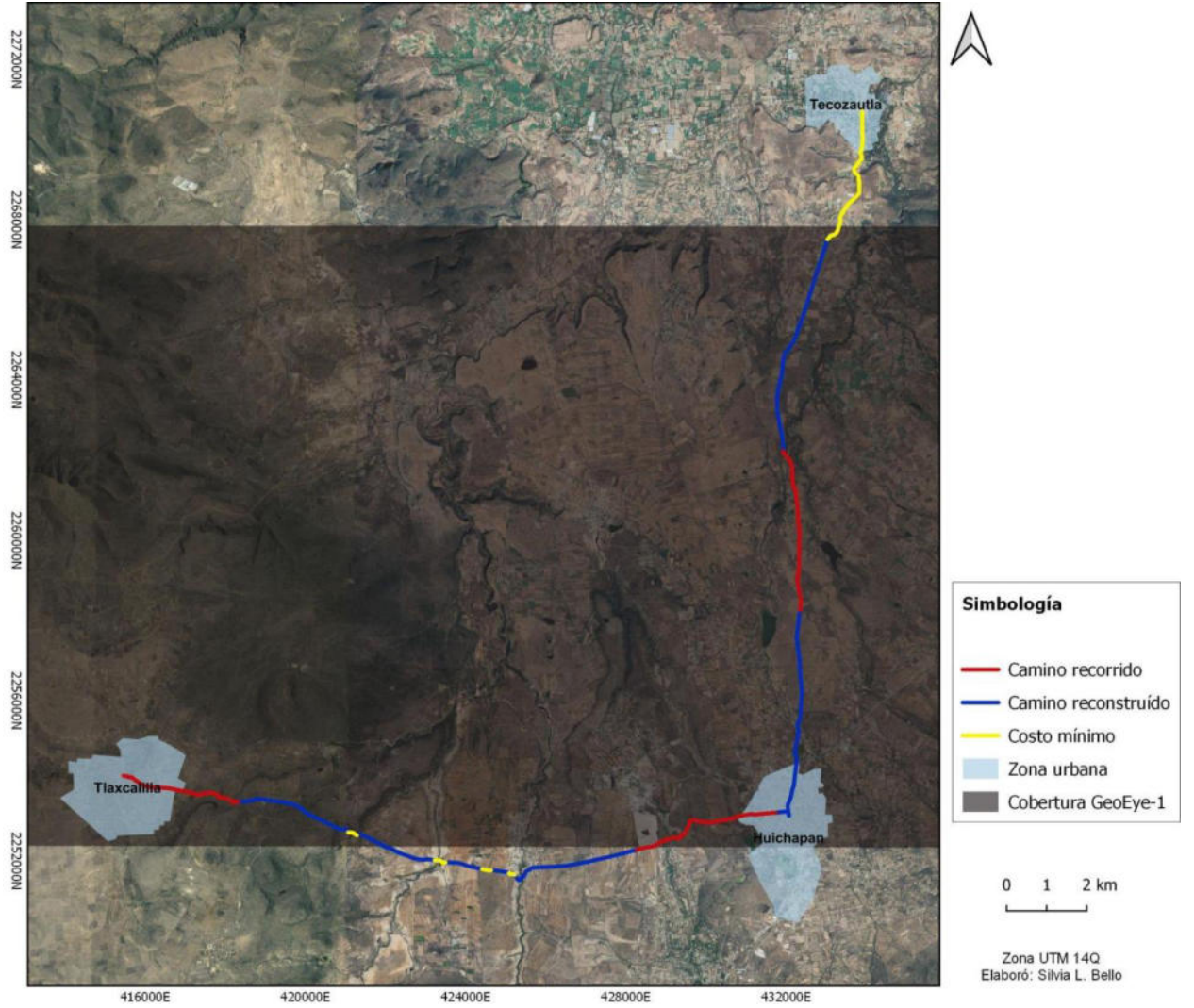


Figura 5.22. Imagen GeoEye-1 con errores de clasificación, filtro *À trous*  $w^2$ .



### 5.3. Resultados del análisis SIG

Figura 5.23. Mapa de caminos de costo mínimo

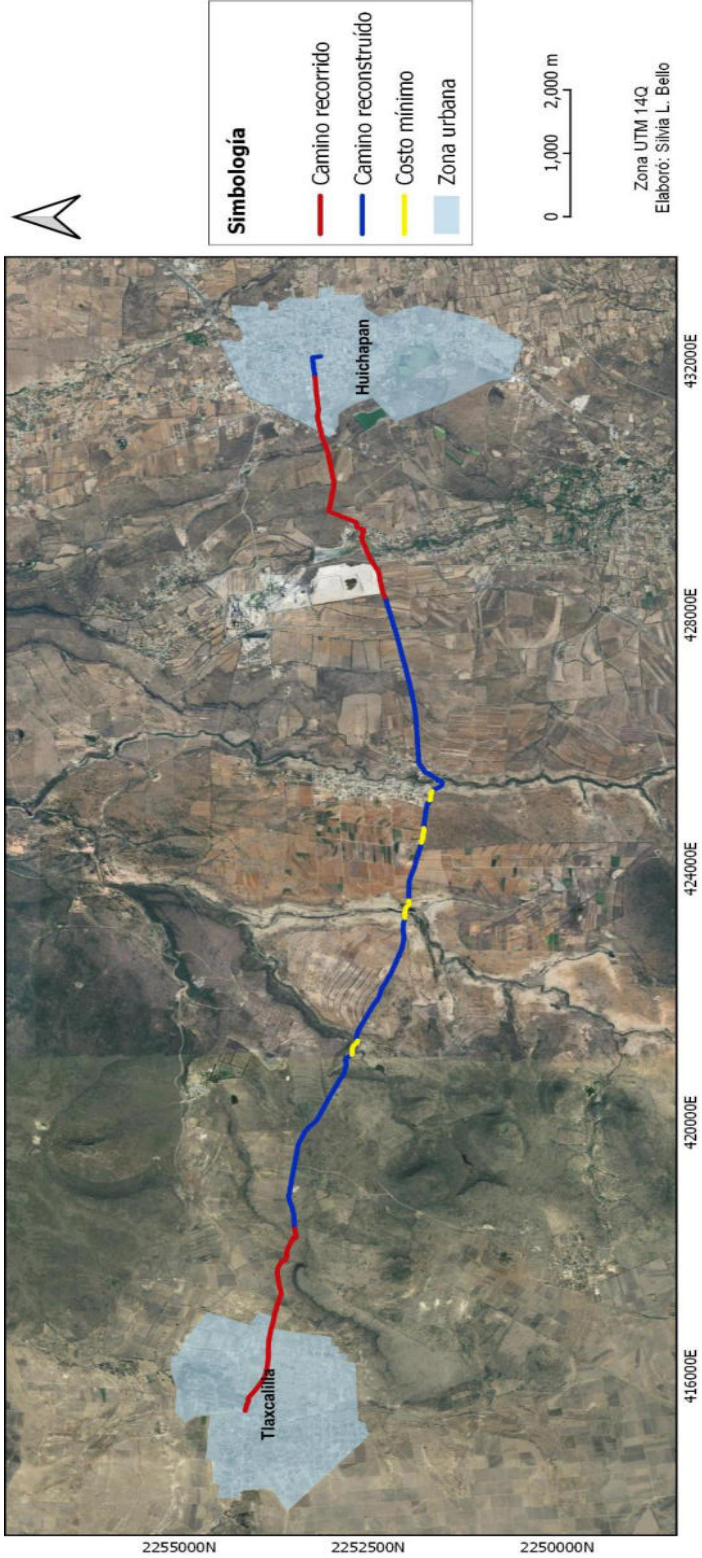


Elaboración propia

### **5.3.1. Camino Tlaxcalilla-Huichapan**

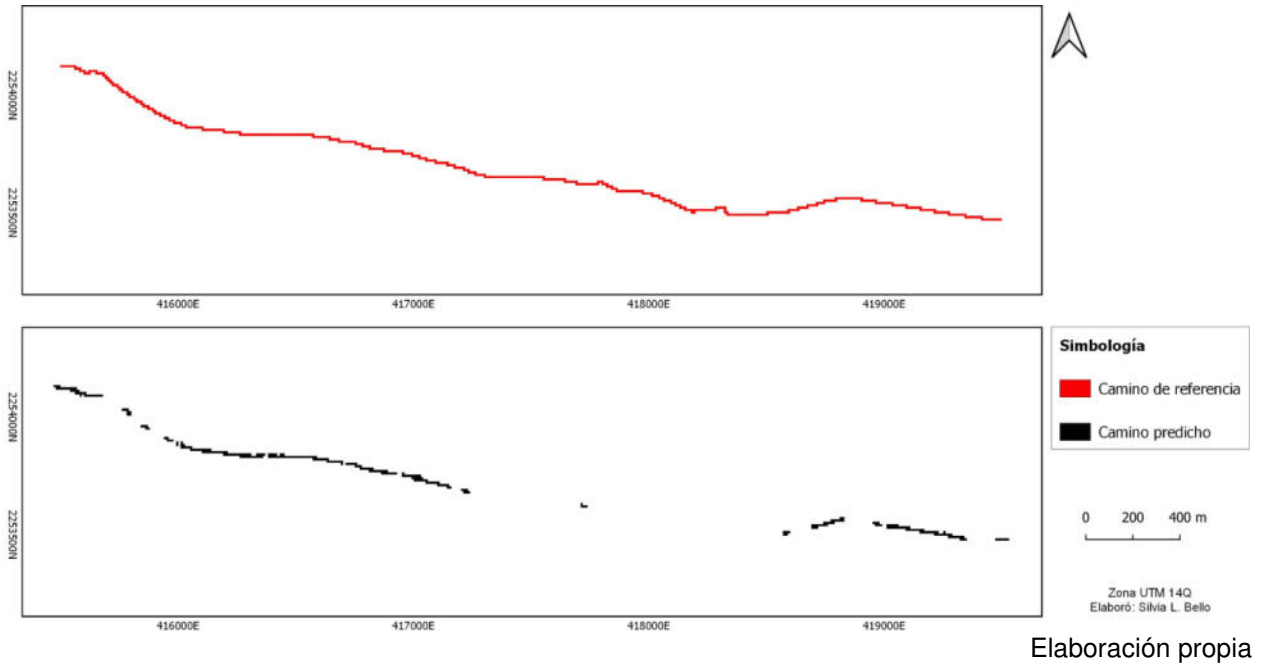
A partir del trabajo de campo arqueológico se reconstruyeron los caminos reales combinando los tracks recorridos y la interpretación de las imágenes satelitales; cuando la información no fue suficiente para seguir el trayecto del camino, se conectó mediante el algoritmo de costo mínimo. (Ver Figura 5.23) Esta información conformó el camino de referencia. Sin embargo, debido a la cobertura espacial de la imagen GeoEye-1, el camino real que va de Tlaxcalilla a Huichapan no aparece completo en la escena: el primer tramo abarca 4 km, aproximadamente, al Este de Tlaxcalilla, para encontrarse en un segundo segmento de casi 2 km desde la cementera hasta el centro de Huichapan. (Ver Figura 5.24)

Figura 5.24. Mapa de camino de costo mínimo Tlaxcalilla-Huichapan



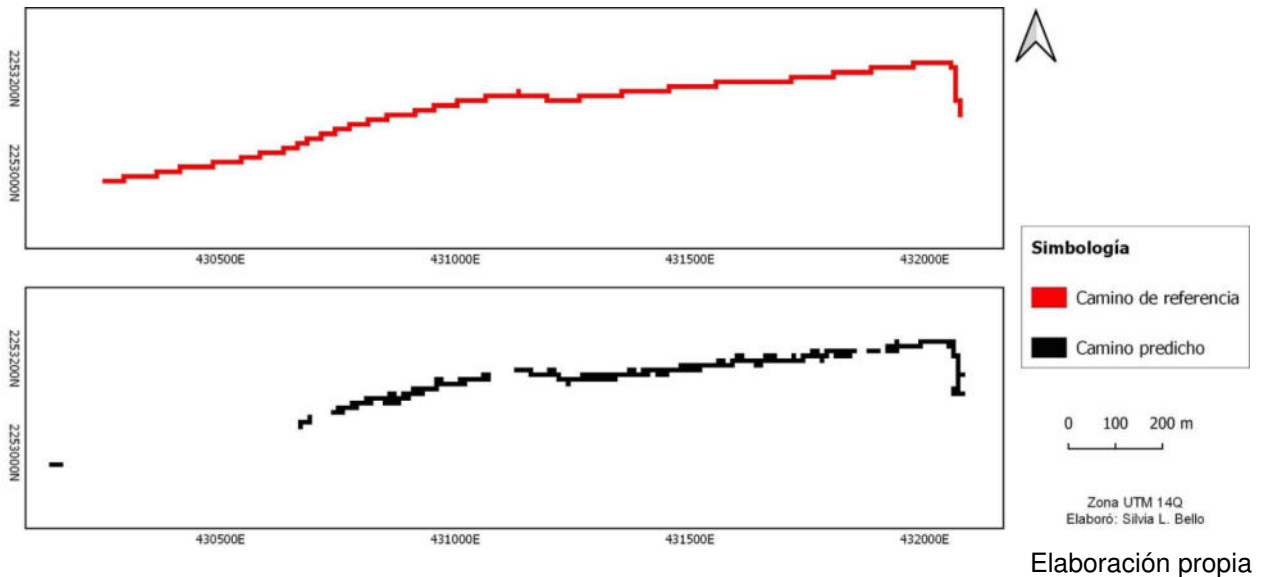
Elaboración propia

Figura 5.25. Mapa de camino de referencia y camino predicho, Tlaxcalilla.



Elaboración propia

Figura 5.26. Mapa de camino de referencia y camino predicho, Zothé-Huichapan.



Elaboración propia

En las Figuras 5.25 y 5.26 se muestra la comparación entre el camino de referencia y el camino predicho con el algoritmo MSV a una resolución espacial de 1.65 m de los dos tramos del camino real Tlaxcalilla-Huichapan. En la Tabla 5.9 están la longitud del camino de referencia, el camino

predicho (TP) y el camino no detectado (FN); así como el conteo de huecos y el resultado de las medidas *GAP*, *recall* y exactitud.

Tabla 5.9. Cuantificación del status actual del camino real Tlaxcalilla-Huichapan.

Medida	Valor
<b>Camino Referencia</b>	6.11 km
<b>Camino Predicho (TP)</b>	3.63 km
<b>Camino No Detectado (FN)</b>	2.48 km
<b>Huecos</b>	20
<b>Discontinuidades por km</b>	<b>3.28</b>
<b>Recall</b>	<b>59%</b>
<b>Exactitud</b>	<b>100%</b>

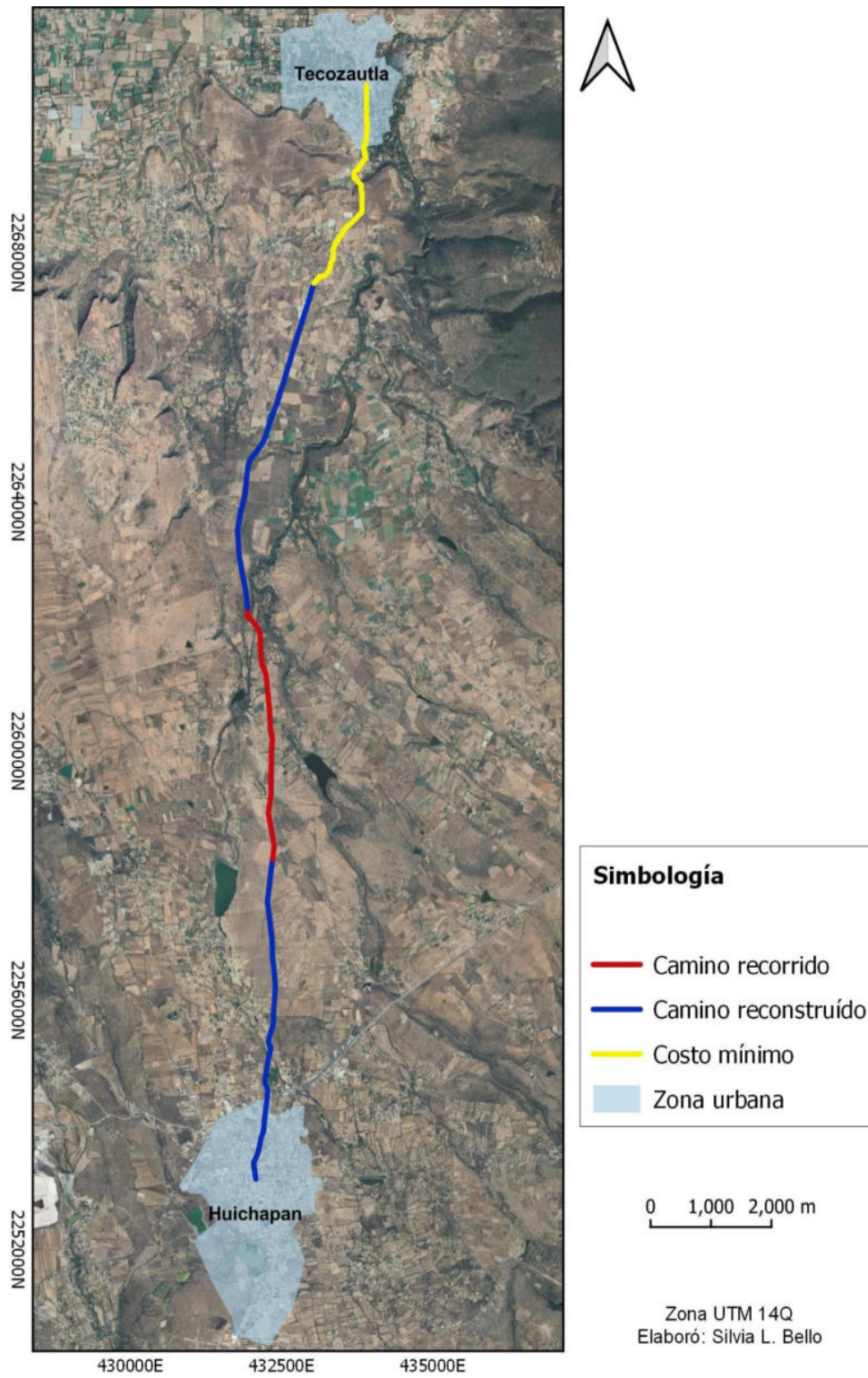
Elaboración propia

El camino de referencia mide 6.11 km de longitud total, mientras que el predicho mide 3.63 km, por lo que 2.48 km no fue detectado por el algoritmo MSV a una resolución de 1.65 m. La exactitud de predicción fue de 100%, el recall de 59% y 3.28 gaps por kilómetro.

### 5.3.2. Camino Huichapan-Tecozautla

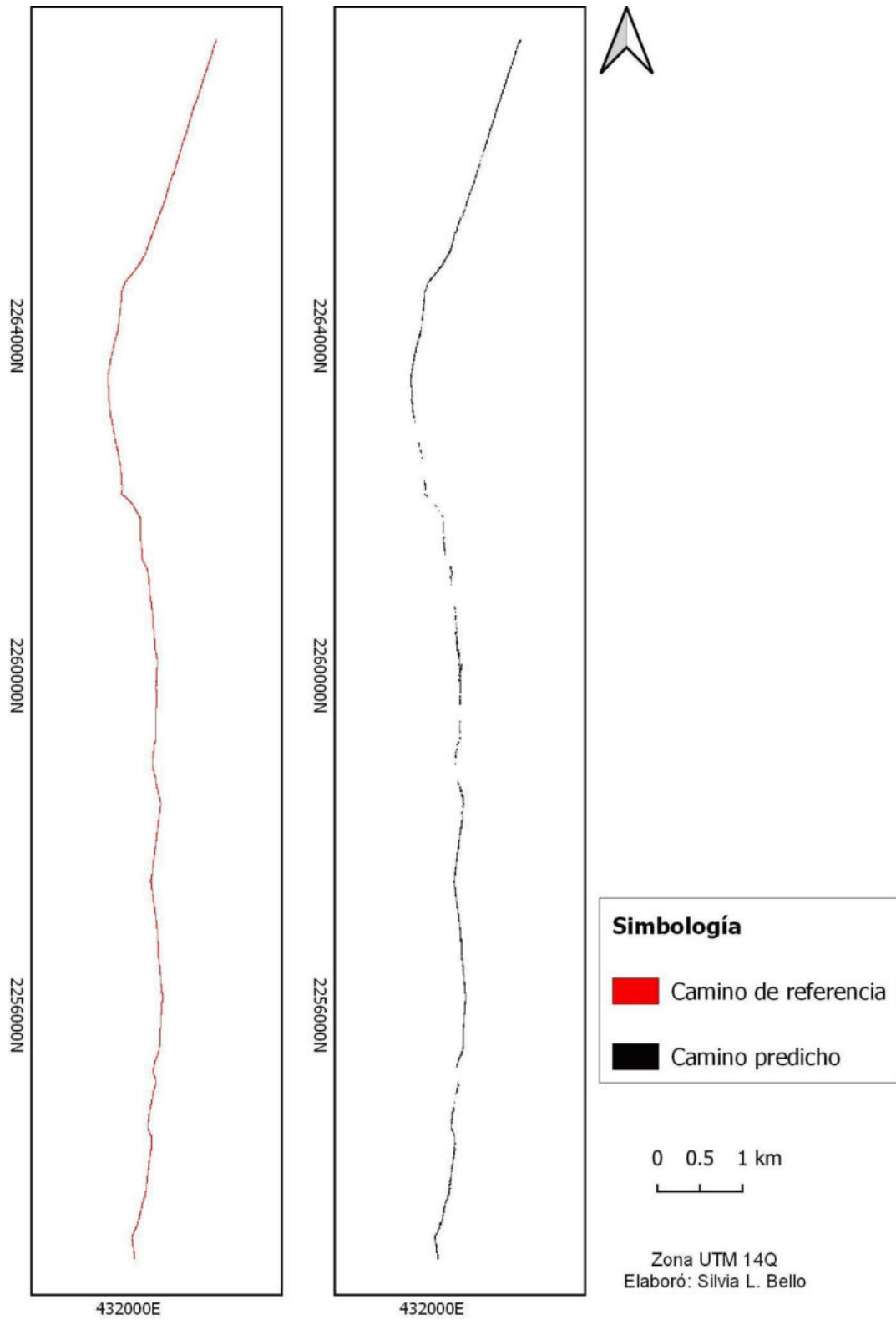
De la misma manera que el camino anterior, el camino de referencia de Huichapan a Tecozautla se reconstruyó a partir de los datos de campo, la interpretación de las imágenes satelitales y los resultados del algoritmo de costo mínimo. (Ver Figura 5.27)

Figura 5.27. Mapa de camino de costo mínimo Huichapan-Tecozautla



Elaboración propia

Figura 5.28. Mapa de camino de referencia y camino predicho, Huichapan-Tecoautla.



Elaboración propia

En la Figura 5.28 se visualizan los resultados del camino de referencia y el camino predicho. En términos de cuantificación del status actual del camino real, la longitud del camino de referencia es de 14.87 km, el camino predicho mide 12.38 km y el camino no detectado 2.50 km. Los resultados del *recall* y exactitud son 83% y 100%, respectivamente, así como 3.5 GAP por kilómetro. (Ver Tabla 5.10)

Tabla 5.10. Cuantificación del status actual del camino real Huichapan-Tecozautla.

Medida	Valor
<b>Camino Referencia</b>	14.87 km
<b>Camino Predicho (TP)</b>	12.38 km
<b>Camino No Detectado (FN)</b>	2.50 km
<b>Huecos</b>	52
<b>Discontinuidades por km</b>	<b>3.5</b>
<b>Recall</b>	<b>83%</b>
<b>Exactitud</b>	<b>100%</b>

Elaboración propia

## **6. Una historia conjunta de los caminos reales: la configuración del espacio y sus alteraciones en el contexto de Huichapan**

### **6.1. Los caminos reales y su devenir histórico**

#### **6.1.1. Nueva España**

El camino real es definido por el Diccionario de Autoridades como “el mas ancho, principal, fácil y cursado de los pasajeros, y el mas público: y por esso tienen obligación las Justicias de tenerle llano, y compuesto, y en partes empedrado. Llámase Real, porque es público, o guía a parages grandes, y se camina por él con mas conveniencia” (Diccionario de Autoridades, 1729). En otra entrada del mismo diccionario se lee: “Es lo mismo que Principal o Real [...] Caminos cabdales y públicos, que ván de una Cibdad a otra, son del Rey, y deben ser guardados y amparados por su Alteza” (Diccionario de Autoridades, 1729).

La historia jurídica de los caminos reales novohispanos remite a un recorrido de larga duración hasta el siglo XIII en España con Alfonso X y el código de Las Siete Partidas, en donde, por primera vez, la Corona reconoció el interés público sobre algunos caminos, pero adjudicó su construcción y mantenimiento a los beneficiados cuando las rentas comunes no alcanzaran. Lo que buscaba el rey era que los caminos denominados “reales” fueran aquellas rutas que permitieran una mejor comunicación y el tráfico comercial entre sitios económicamente importantes; así que debía garantizarse que la infraestructura estuviera en buenas condiciones y el trayecto fuera seguro, so pena de multa para los delincuentes. A finales del siglo XV, con los Reyes Católicos, la Corona adopta a los caminos como parte de sus regalías dándoles la protección real, ya que se veía beneficiada por el movimiento económico que se generaba en torno a estos caminos, no solo por el transporte de insumos, sino también por el cobro de impuestos de peaje. (Pérez, 2001)

El corpus legal castellano antes mencionado fue el que se adoptó en el virreinato de la Nueva España y en el resto de los territorios hispanos en América sintetizado en la *Recopilación de Leyes de los Reynos de Indias* de 1680 (Pérez, 2001). María Luisa Pérez advierte sobre los caminos reales que

Su ruta [...] puede variar o incluso ser alternativa, pero siempre es una ruta que articula el territorio en su totalidad según las directrices de la economía de la zona. Cuando se denomina a un camino “real”, subrayando su importancia y su utilidad, se recoge todo el bagaje legal peninsular y americano: la aspiración tradicional de la Monarquía por

consolidar al unísono el poder real, el estado y los elementos indispensables para sustentarlos.

[...]

En este sentido, el camino que conduce a los reales de minas podemos considerarlo camino real por antonomasia, puesto que las minas y las regalías de ellas derivadas constituyeron uno de los objetivos fundamentales para la expansión territorial y sostenimiento del Estado. (Pérez, 2001, p. 45)

Sin embargo, fueron los empresarios novohispanos o particulares con intereses en cierto territorio quienes financiaron la construcción y mantenimiento de los caminos, pero que el término de “camino real” les beneficiaba, pues al contar con la protección y reconocimiento de la Monarquía, la región adquiriría importancia. (Pérez, 2001)

El Camino Real de Tierra Adentro o el Camino de la Plata fue uno de los caminos reales más importantes de la época -junto con los de Veracruz y Acapulco-, pues fue el eje articulador del virreinato al conectar la ciudad de México con Santa Fe a través de, aproximadamente, 2900 km de infraestructura, así como diversos asentamientos del virreinato a partir de ramales secundarios. Su trayecto correspondió al descubrimiento de vetas de plata y el afianzamiento de la conquista del septentrión desde el siglo XVI. Por él circularon mercancías -telas, madera, productos agrícolas y ganaderos, minerales, etcétera-, personas, información e insumos de guerra de una región a otra. (Quiñones, coord., 2015; Lovera, 2001) (Ver Figura 6.1)

Figura 6.1. Mapa de caminos principales de la Nueva España.



Fuente: Instituto Regional del Patrimonio Mundial en Zacatecas, 2021

El camino real de Tierra Adentro tuvo tres etapas de construcción. La primera fue de la ciudad de México a Querétaro (1526-1538), la segunda de Querétaro a Zacatecas con ramales a Guadalajara y San Luis Potosí (1542-1550) y la tercera, de Durango a Santa Fe entre finales del siglo XVI y principios siglo XVII. (Lovera, 2001)

En los caminos tanto el clima como la topografía influyeron en los ritmos de transporte, especialmente en épocas de lluvias y heladas los viajeros humanos y el ganado se veían afectados, ya que los pastizales podían escasear en climas áridos cuando el frío era extremo y se requería llevar provisiones de granos para ellos. También existieron otro tipo de dificultades, por ejemplo: el peligro latente de ser atacado por la fauna silvestre e insectos, ser víctima de los bandidos e indios chichimecas que asaltaban a los transeúntes; o bien, que el medio de transporte

sufriera algún altercado -que el caballo o mula se lastimaran o se rompiera la rueda de la carroza-. (Calvo, 1997)

La vida en torno a los caminos no solo implicó el tránsito y los peligros que conllevaba, sino la construcción de sitios donde los viajeros pudieran pernoctar, alimentarse y descansar sus animales. Se pueden distinguir dos tipos de posadas: por un lado, los mesones que se ubicaron en el centro de los poblados y, por otro, las ventas, que se construyeron a lo largo de los caminos; de no tener acceso a alguna de las dos, las personas debían pasar la noche al aire libre. (Calvo, 1997)

Sobre la cotidianeidad de los caminos se tiene el testimonio del inglés Henry George Ward (1985), quien recorrió en la década de 1820 las rutas terrestres del recién país independiente para examinar el potencial de las minas para que Inglaterra invirtiera en ellas. En su texto *México en 1827*, describe que el camino de los llanos de San Pedro a Ixmiquilpan es “pedregoso y malo, con excepción de unas cuantas millas de arena cubiertas de maleza abierta” (Ward, 1985, p. 114); mientras que el camino a Zimapán es escabroso debido a que se interna en la cadena montañosa, “ni tampoco es menos monótono y fatigosa la bajada por el lado de Zimapán. Es muy empinada, y la vereda, cubierta con piedras sueltas es tan angosta que casi nunca pueden pasar dos personas juntas” (Ward, 1985, p. 115). Respecto a las inclemencias menciona que el camino de la hacienda de San Pedro a Ixmiquilpan fue muy cálido y seco, lo que provocó que uno de los caballos se enfermara y muriera, otro “se volvió completamente loco y cargaba con la mayor furia [...] trató de tirarse al precipicio, y en más de una ocasión casi lo logró” (Ward, 1985, p. 134). De igual forma, reconoce su temor de no poder cruzar el río Tula en su regreso a la capital debido a las lluvias, siendo su única opción desviarse a San Juan del Río donde estaba el único puente.

En términos de hospedaje y alimentación, Ward hace referencia a que “casi todas las ventas tienen cuatro o cinco cuartos pequeños que dan al patio; pero en las haciendas, donde el alojamiento consiste en una sala grande, único cuarto desocupado, es imposible intentar la subdivisión de apartamentos” (Ward, 1985, p. 152). También indica que en caso de no haber cazado nada en el camino -aves acuáticas, liebres y perdices-, llevaban comida en latas de estaño, pues conservaban muy bien el alimento a pesar del calor y el trote de las mulas. (Ward, 1985)

Por último, el inglés destaca un pasaje en el que viajó con su esposa, hijas y sirvientes hacia Guanajuato, incluida Chapita, la nana india que además se encargaba de la comida.

Durante la bajada de Cazadero a San Juan del Río se descompuso una rueda debido al calor, decidieron cabalgar hasta San Juan para pasar la noche -llegaron a las 4pm- y dejar el carro en el lugar del accidente hasta el día siguiente que se reparó la rueda en la carpintería de una hacienda. Una vez resuelto el problema, llegaron por ellos sus sirvientes en el carro a San Juan del Río a las 2:00 pm. Después, desayunaron en la hacienda del Sauz en donde encontraron “provisiones de todas clases en un pobre ranchito: leche y huevos, excelente pan, tortillas, por supuesto, y grandes platos de frijoles, especie de haba negra de que los mexicanos hacen un platillo en extremo sabroso” (Ward, 1985, p. 160). Esta anécdota ayuda a comprender los tiempos de viaje que implicaba un percance, así como una de las soluciones que daban las personas de la época ante tal situación.

Como se puede apreciar, las congregaciones y pueblos tuvieron un papel importante en la construcción de la red urbana, contribuyeron en la organización espacial y en la conectividad de las regiones del virreinato, siendo la ciudad de México, Veracruz y Puebla los nodos articuladores a principios del siglo XVI, dos centurias más tarde los asentamientos que adquirieron importancia fueron Guadalajara, Valladolid y Guanajuato. De acuerdo con Miño Grijalva, la dinámica de los pueblos y las ciudades obedeció a la actividad minera y del mercado internacional; ciudades como Querétaro, Puebla, Zacatecas, Guadalajara, Valladolid y San Luis Potosí organizaron la producción y distribución regional de bienes y servicios, algunas de estas mercancías llegaron a Europa y Asia por los puertos de Acapulco y Veracruz. (Miño, 2015)

En el siglo XVIII hubo un crecimiento demográfico y económico en el virreinato. La Nueva España fue el primer exportador de plata a nivel mundial, “para fines del siglo, la producción anual promedio de pesos de plata en la ceca mexicana superaba los 20 millones y la acuñación hispanoamericana, en conjunto, rebasaba los 30 millones de pesos de plata” (Marichal, 2015, p. 117). Como respuesta a esta expansión minera, se establecieron nuevas cajas reales en Guanajuato, Pachuca, Bolaños, Zimapán y Sombrerete de 1665 a 1753 para facilitar la recaudación fiscal. (Hausberger, 2015)

En la metrópoli, a partir de la década de 1760 con Carlos III en el poder, se llevaron a cabo una serie de reformas importantes en la administración española que impactó a los territorios de ultramar, estas afectaron los ámbitos administrativo, fiscal, militar, económico, social y cultural. Annick Lempérière sostiene que dichas reformas consolidaron el corporativismo de la monarquía y las regalías del rey, más que reflejar el espíritu del siglo de las luces; con ellas se

pretendió remediar abusos y hacer efectiva la legislación del Antiguo Régimen, pero con textos actualizados. Se deseó quitar los obstáculos del comercio y la producción para aumentar tanto la injerencia de la Corona (al interior y al exterior) como los recursos fiscales. (Lempérière, 2013)

Entre 1764 y 1771 el Visitador General José de Gálvez hizo una estancia en la Nueva España con el encargo real de reorganizar el sistema fiscal. Implementó las reformas borbónicas a través de una serie de medidas, algunas de ellas fueron: la reorganización territorial en 12 intendencias (1786), la creación del Cuerpo de Minería, el establecimiento del libre comercio (1778), el cambio del impuesto sobre la plata del quinto real al diezmo, el cobro de impuesto en la venta de productos de estancos y la administración directa del Estado sobre algunos estancos y en el resto obtuvo mayor control; también se siguieron cobrando los impuestos sobre el comercio como alcabalas -transacciones mercantiles- y pulques -sobre bebidas alcohólicas-, aunque los indios, iglesias, monasterios, prelados y clérigos estaban exentos del pago de la primera. Todas estas medidas implicaron un aumento en la recaudación entre 1780 y 1810; sin embargo, los fondos fiscales se destinaron a financiar gastos militares debido a las múltiples guerras que España tuvo con Inglaterra y Francia a lo largo de la segunda mitad del siglo. Sumado a los gastos de guerra contra los insurgentes novohispanos, provocó que a finales de la década de 1810 el virreinato tuviera una deuda pública de 32 millones de pesos. (Lempérière, 2013; Marichal, 2015)

En esta época hubo interés de la Corona en construir y mejorar caminos que consideraba importantes, mandando la reparación anual de los caminos reales después de la temporada de lluvias. Si bien, el rey destinaba parte de sus ingresos para el mantenimiento de los caminos, los pueblos también debían cooperar -generalmente los españoles lo hacían en especie y los indios con mano de obra-, así como los transportistas, dueños de recuas y carretas proporcionalmente a la carga que transportaban. Los encargados de la construcción de caminos, de puentes para cruzar los ríos y demás obras públicas, fueron los ingenieros, arquitectos y el gremio de constructores; estos trabajadores se profesionalizaron al inaugurarse la Academia de San Carlos en 1785, en donde se formaron ingenieros y arquitectos. (Rojas, 2021b)

Además de los caminos reales, existieron caminos locales que podían ser transitados a pie, caminos de herradura y de arriería para el ganado. (Lovera, 2001) Asimismo, los medios de transporte eran variados y algunos podían circular por caminos alternativos. Las formas de moverse por el virreinato fueron variadas; por ejemplo, los tamemes -cuyo trabajo como cargador

debió ser regulado para evitar abusos por parte de los españoles-, los carros, los caballos y las mulas; siendo estas últimas más caras, ya que eran más aptas para la carga y el acarreo e incluso podían transitar en terrenos escabrosos. (Rojas, 2021b)

### **6.1.2. Valle del Mezquital**

En época prehispánica, la provincia de Xilotepec -una de las principales regiones otomíes- tributaba a Tenochtitlan mantas de algodón hechas con pelo de conejo, plumas y madera; además, producía cal, tunas, frijol, maíz y miel. Huichapan y Tecozautla pertenecían a dicha provincia, por lo que contribuyeron con el tributo. Luego de la conquista, la Corona otorgó mercedes a los españoles en las zonas más productivas de la región, de las cuales destacan Huichapan, Tepeji, Alfajayucan, Atitalaquia, Sayula, Atotonilco y Mixquiahuala. (López Aguilar, 2005; Huicochea, 2021)

En las primeras décadas del siglo XVI se descubrieron yacimientos metalúrgicos en la región del Valle del Mezquital, lo que incentivó la creación de nuevos asentamientos. Del mismo modo, se configuró la subregión minera entre Ixmiquilpan, Cardonal y Zimapán, cuyos metales eran principalmente plomo, seguido por plata y oro. La mano de obra india fue fundamental para este trabajo extractivo, a veces como parte del repartimiento. Debido a que los empresarios con minas en esta subregión, en el norte o en el Bajío adquirieron tierras en el Mezquital para la producción agrícola, los vínculos económicos se materializaron con dos caminos reales importantes: uno que conectó a la Ciudad de México con el distrito minero de Ixmiquilpan y otro que iba de Zimapán a Huichapan y luego a Querétaro. (López & Fournier, 2014)

En época prehispánica, Nopala, Huichapan y Tecozautla formaban parte de los asentamientos más próximos a la frontera chichimeca. Si bien Huichapan ya existía como altépetl, los españoles fundaron el pueblo en 1531 bajo el nombre de Valle de San Mateo Huichapan, siendo atraídos no por su proximidad con las minas, sino por la fertilidad de su tierra para el cultivo de maíz y trigo, así como para desarrollar la ganadería menor y mayor. (González, 2014) En las congregaciones de indios de 1580, la infraestructura de los caminos influyó para elegir los asentamientos, ejemplo de esto es Tecozautla, un pueblo al norte de Huichapan conectados por un camino real. (López Aguilar, 2005) Tecozautla significa “lugar donde abunda la tierra amarilla” en náhuatl -nombre que le pusieron los mexicas- pero se sabe que el topónimo original en otomí

es *Māzofo*; al llegar los europeos, encontraron un pueblo amurallado como defensa de los ataques chichimecas -al igual que San Miguel Caltepanitla- y le asignaron como santo patrono a Santiago Apóstol. (López Aguilar, 2005; Huicochea, 2021)

Luis de Velasco envió en 1591 a 400 familias tlaxcaltecas a poblar la frontera cerca de San Juan del Río, se cree que pudieron ser los fundadores de Tlaxcalilla -sitio al Oeste de Huichapan-; del mismo modo, indios de Huichapan contribuyeron en la fundación de Monterrey y los indios de Tecozautla en la de Tolimán, Querétaro. De acuerdo con el Dr. Fernando López, los asentamientos prehispánicos seguían un módulo de 17.5 km entre ellos, este mismo patrón fue adoptado por los españoles y fundaron las cabeceras bajo este criterio, ejemplo de ello es Tecozautla-Huichapan, Huichapan-Tlaxcalilla y Tlaxcalilla-San Juan del Río. (López Aguilar, 2005)

Ahora bien, junto con la conquista militar avanzó la conquista espiritual. La evangelización de la parte sur y poniente del Valle del Mezquital se llevó a cabo por la orden franciscana, a su paso construyeron iglesias y conventos, prueba de ello son los conventos de San Mateo Huichapan y Tecozautla que datan de 1559 y 1571, respectivamente. (López Aguilar, 2005)

En el siglo XVI, Huichapan y Xilotepec ayudaron a centralizar y organizar el territorio, así como a apoyar en la conquista del norte. (González, 2014) La construcción del camino real de Tierra Adentro siguió la zona de paso hacia el Bajío que los indios ocuparon por siglos antes de la llegada de los españoles, ya que la ruta aprovechaba las llanuras y planicies, haciendo más fácil la circulación de los carros con la plata y el bastimento entre la capital y el norte del virreinato. El tránsito regular de viajeros por este camino trajo consigo la proliferación de ventas y mesones en la zona de Jilotepec, de la cuenca del río Alfajayucan y de la región de Cuautitlán; así como una afectación positiva en la economía local. Se hizo una bifurcación hacia Huichapan, Ixmiquilpan y Zimapán para conectar las minas de la región; esto propició el desarrollo de la ganadería -especialmente ganado vacuno y caballo- y se intensificó el cultivo por parte de los indios. (López Aguilar, 2005) Este mismo ramal que llegaba de Ixmiquilpan a Huichapan para después pasar por Tlaxcalilla y San Juan del Río es reconocido por el Mtro. González Dávila como una ruta tributaria del camino real de Tierra Adentro, en términos mercantiles. (González, 2014)

La jurisdicción de Xilotepec se conformó por las siguientes cabeceras: Xilotepec, Huichapan, Alfajayucan, Tecozautla, Tlautla, Soyaniquilpan, Acambay, Aculco, Chapa de Mota,

Timilpan, Tasquillo y Chapantongo. (Lovera, 2001) A mediados del siglo XVII, había justicias separadas en Xilotepec y Huichapan, pero con el tiempo, se nombró un teniente propio para Huichapan, recibiendo la categoría de Alcaldía Mayor de la Provincia de Xilotepec y Huichapan, destacando su importancia. (González, 2014; Jiménez & Ramírez, 2014a) En 1787, Huichapan pasó a ser subdelegación de la Intendencia de México, en toda la región se produjo ganado menor, mientras que en la cabecera, Tecozautla y Alfajayucan también se crío ganado mayor. (Jiménez & Ramírez, 2014a)

Para 1792, dentro de la jurisdicción de Huichapan, operaron 64 haciendas y 226 ranchos independientes.

La población total ascendía a 66,142 habitantes, de los cuales 16,237 eran indígenas tributarios. Los principales pueblos donde se concentraba la población eran: la cabecera de Huichapan con el 18.18% seguida de Xilotepec que albergaba el 17.07%, mientras que Alfajayucan concentraba el 13.63% del total de habitantes y Tecozautla tan solo en 13.40% (Jiménez & Ramírez, 2014b, sp).

En términos económicos, el cultivo de frutas, algodón, ají, maíz, vid, trigo y hortalizas se produjeron en zonas irrigadas del Mezquital como Tecozautla. (López Aguilar, 2005; Jiménez & Ramírez, 2014b) Villaseñor y Sánchez (1746) dio cuenta de ello cuando escribió que en la provincia de Xilotepec se comerciaban las frutas de dicho pueblo. Otros productos que aportó Tecozautla al mercado novohispano fueron leña, carbón, cal, tejidos de jarcia, mantas de algodón y bagres. (Huicochea, 2021) Cuando Henry Ward visitó el asentamiento lo describió como un valle fértil, con muchas huertas y aguas termales. (Ward, 1981)

Por su parte, Huichapan fue reconocido por la producción de ganado de arreo y de ganado mayor para consumo, el cual se destinó a carnicerías del Valle del Mezquital, de regiones vecinas y a la ciudad de México. (Jiménez & Ramírez, 2014b) Por tanto, en Huichapan hubo rutas que lo comunicaban con minas y centros urbanos y mercantiles; lo mismo que Ixmiquilpan, cuyos caminos lo conectaron con Zimapán, Cardonal, Pechuga y la capital. (Ward, 1981; Jiménez & Ramírez, 2014b) Estos caminos eran muy bien aprovechados por los ganaderos en los meses de agosto y septiembre debido a la abundancia de pastos que crecían pasada la temporada de lluvias. (Jiménez & Ramírez, 2014b)

En Huichapan y Tecozautla se vendían mercancías traídas de otras regiones como Araró, Bizarrón, Huazalingo, Jacala, Ixtlahuaca, Xilotepec, Jonacatepec, ciudad de México, Michoacán, Querétaro, San Juan del Río, Tejupilco, Tepecoacuilco, Tepeji del Río, Tequisquiapan y Toluca.

Entre las mercancías comercializadas destacan: sal, chile, maíz, frijol, garbanzo, zapatos, correas de timbre, incienso, medias suelas, pilón, piloncillo, jerez, telas, mantas, aceite y mezcal. (Jiménez & Ramírez, 2014b) De igual forma, para principios del XIX la región tenía nueve obrajes en Huichapan, Tecozautla, Alfajayucan, Texto y San Antonio. (Huicochea, 2021)

La hacienda fue la forma de explotación de la tierra más importante en época novohispana y sobrevivió hasta principios del siglo XX; tanto particulares como la Iglesia poseyeron tierras para su explotación, siendo el siglo XVIII la época dorada de esta unidad productiva. (Hausberger, 2015) Estas propiedades solían asentarse en los caminos reales o cerca de ellos para un tránsito eficiente de sus mercancías, de tal suerte que el camino real que parte de Nopala a Huichapan, tiene un ramal que lo conecta al poniente con la hacienda El Destello, mientras que en el camino real Huichapan-Tecozautla están las haciendas El Gavillero y El Cuervo. (Huicochea, 2021) Asimismo, los hacendados intervinieron en la vida económica, política, social y religiosa del virreinato; por ejemplo, en el siglo XVII financiaron trece capellanías y siete cofradías en Huichapan a través de donaciones de obras pías. (Lovera, 2001; Huicochea, 2021)

Huichapan, junto con San Juan del Río, Ixmiquilpan y otros pueblos vecinos fungieron como puntos estratégicos de control durante la guerra de independencia, ya que estaban en el camino entre el Bajío y la capital del virreinato. También fue tierra de insurgentes como Julián Villagrán, su hijo José María “Chito” Villagrán y Pedro María Anaya, quienes se acuartelaron en el pueblo y se apoderaron de los caminos de la región en múltiples ocasiones, los cerraban para impedir el paso de mercancías y provisiones armamentistas para el ejército realista hacia la ciudad de México. Por último, el pueblo es también reconocido por ser sede de la conmemoración del segundo aniversario del grito de Dolores en 1812 a cargo de Ignacio López Rayón para demostrar su liderazgo en el movimiento insurgente. (López Hernández, 2014)

## **6.2. El presente de los caminos reales**

Jared Diamond (2004) hace un recorrido amplio de la historia de la humanidad en la que teoriza sobre la creación y aceptación de innovaciones retomando diversos ejemplos alrededor del globo terráqueo. Siguiendo estas ideas, los caminos reales, en la mayoría de los casos, fueron una continuación de los utilizados durante época prehispánica, cuya infraestructura adaptaron para facilitar el tránsito de carros y ganado. Si bien, en su momento significaron la ruta de menor costo,

un cambio tecnológico en los medios de transporte provocó también un cambio en la red de caminos y, por tanto, un abandono paulatino de los novohispanos.

Antes de la conquista, los caminos eran veredas estrechas pensadas para recorrerse a pie en el menor tiempo y con el menor esfuerzo posible, salvo algunos como calzadas y *sacbé*s que poseían un significado en la cosmovisión mesoamericana más allá del mero desplazamiento de las personas. Dichas veredas sufrieron una alteración con la llegada del ganado y transporte español, los caminos se ensancharon, algunos se empedraron, en ocasiones se modificó un poco el trazo para adecuarlo al paso de los animales y recuas, también se construyeron puentes y demás elementos arquitectónicos asociados a los caminos como las mojoneras y las ventas. Muchas de estas rutas se convirtieron en caminos reales, siendo uno de los más importantes el camino real de Tierra Adentro, anteriormente mencionado. (García, 2006) Después de la independencia, este camino se conoció como el Camino Nacional y los demás como “caminos nacionales”, los cuales siguieron en funcionamiento. (Quiñones, coord., 2015)

Luego de trescientos años, la primera innovación importante llegó en el siglo XIX con la invención del ferrocarril, que tenía otras limitaciones en cuanto a la pendiente del terreno, por lo que las vías se construyeron en rutas diferentes a las de los caminos nacionales. Con los ferrocarriles, grandes distancias se recorrieron en tiempos más cortos y con carga más pesada, convirtiéndose en el principal medio de transporte para la economía y los habitantes de México. Un caso diagnóstico es el del ganado, antes transitaba por los caminos ordinarios o por caminos paralelos -exclusivos para estos animales con la intención de que no interfirieran con el tráfico habitual de los viajeros- y ahora se transportaba en los ferrocarriles. (García, 2014)

Si bien, este nuevo transporte conectaba a gran parte del país, había sitios a los que no accedía, así que la comunicación se complementó con rutas marítimas y el uso de los caminos antiguos; sin embargo, el flujo no se equiparó con el que otrora tuvieron, siendo muchos de ellos abandonados. Este proceso culminó con la llegada del automóvil a principios del siglo XX, el cual demandó un acondicionamiento de las carreteras y significó una alternativa incluso sobre el ferrocarril. En 1912 se construyeron 66 km de carretera en seis meses y posteriormente se hicieron túneles y viaductos. El uso de los automóviles fue en aumento -especialmente después de la Primera Guerra Mundial- e implicó no solo modernizar las carreteras de acuerdo a los nuevos requerimientos tecnológicos, sino también la existencia de ensambladoras en México. (García, 2006; García, 2014)

De acuerdo con la teoría schifferiana (Schiffer, 1991 y 2010), después del proceso de abandono los caminos reales -ahora nacionales- pasaron a formar parte del contexto arqueológico. Desde el momento en que se suspendió su mantenimiento hasta la actualidad, los caminos sufrieron una serie de alteraciones naturales y antrópicas. Para los casos de estudio, el abandono fue diferenciado, ya que existen secciones de los caminos que se siguen utilizando, solo sufrieron renovaciones para adaptarse al automóvil dentro de las poblaciones. De igual forma, las alteraciones naturales observadas fueron la erosión eólica e hídrica, el crecimiento de vegetación silvestre y el paso de animales no domesticados; mientras que las antrópicas fueron el emplazamiento de industria, casas habitacionales y basureros, fabricación de ojos de agua, reutilización de empedrados, aplanamiento y recubrimiento con terracería o pavimento, pastoreo de ganado, destrucción de los tecorrales originales, la destrucción o remodelación de las construcciones alrededor del camino y, recientemente, el uso esporádico por ciclistas y jinetes en cabalgatas.

Como se especificó en el apartado de resultados, una parte de los caminos reales se encuentra dentro de la zona urbana. Los pobladores han logrado mantener en la memoria colectiva el trazo de estas rutas antiguas mediante la tradición oral. Además, aún existen señales que indican por dónde pasaban estos caminos, como el nombre de los comercios en torno a una calle o el propio nombre de esta; por ejemplo, en San José Atlán existe una avenida llamada 'Camino Real' que corresponde con el trazo que en época novohispana conectaba al pueblo con Huichapan. (Ver Figura 6.2)

Figura 6.2. Fotografía de avenida 'Camino Real' en San José Atlán.



Fotografía tomada por Silvia Bello

Algunas de las estructuras asociadas a los caminos reales siguen funcionando hoy en día, como es el caso del rancho Zethé en el camino Huichapan-Tecozautla. También es importante señalar que, en el estado actual de estas rutas, algunos tramos se pueden recorrer en automóvil, unos solo a pie y otros casos en los que es imposible el paso. Esta complejidad de alteraciones y coberturas afectan directamente en su detección con las máquinas de aprendizaje.

En la cuantificación de los resultados de Máquinas de Soporte Vectorial sobre la imagen satelital de alta resolución GeoEye-1, el camino real de Tlaxcalilla-Huichapan, presentó la precisión general más alta en el algoritmo de  $\hat{A} \text{ trous } w^2$  con 86.9%, lo mismo sucedió con el camino real de Huichapan-Tecozautla, pero con un porcentaje de precisión de 93.3%. En la validación visual se observa que el realce de bordes ayudó a la definición de los caminos al ser líneas rectas; sin embargo, también contribuyó en los errores de clasificación, ya que confundió categorías como 'camino de terracería' con 'parcela seca', aunque no de manera significativa.

Ambos caminos reales presentan múltiples coberturas a lo largo del trayecto, siendo las más importantes el suelo desnudo -terracería y afloramiento rocoso-, pavimento y vegetación.

Esta última no tiene una extensión importante en el largo y ancho del camino, por lo que no está bien representada en la clasificación, tomando en cuenta la resolución de la imagen. Asimismo, dicha vegetación impacta en la obstrusividad de los caminos (Shiffer, *et. al.*, 1978), tanto para su identificación en campo, como a nivel dron y satelital.

Ahora bien, el algoritmo MSV detectó todos los caminos de terracería y pavimentados presentes en la escena. Es aquí donde se hace presente la importancia de la historia y la arqueología, puesto que sin la investigación documental y de campo, no se tendría criterio alguno para discriminar los caminos reales del resto de la red actual. Esto sin obviar el papel que jugaron los datos de recorrido de superficie para determinar las categorías de clasificación.

Los tracks registrados en campo se completaron con el análisis de camino de costo mínimo para generar caminos de referencia, los cuales se compararon con los caminos reales clasificados a partir del cálculo de las métricas *recall*, GAP y exactitud. Para el camino real Tlaxcalilla-Huichapan se detectó con el algoritmo de MSV 3.63 km de longitud de 6.11 km que mide el de referencia, teniendo un *recall* de 59% y un GAP de 3.28 por kilómetro; mientras que para el camino real Huichapan-Tecozautla el GAP fue de 3.5 por kilómetro y se predijeron 12.38 km de 14.87 km, significando un 83% de *recall*. En ambos casos la exactitud fue del 100%

Lo anterior indica que el algoritmo de aprendizaje supervisado predijo correctamente los caminos, ya que no hubo falsos positivos, pero no detectó el trazo completo, pues hubo tramos que no reconoció -falsos negativos-, probablemente esto se debe a los diversos cambios de cobertura que clasificó de manera incorrecta al no encontrar pixeles puros, o bien, a aquellos tramos en los que el camino era una vereda poco visible desde la resolución espacial de la imagen satelital.

Por último, es importante advertir las limitaciones y alcances que arrojó el uso de la metodología interdisciplinaria propuesta a lo largo de este trabajo, lo cual se discutirá en el siguiente apartado.

## **7. Discusión y consideraciones finales**

Los caminos son la huella visible de los vínculos socioeconómicos entre dos o más asentamientos humanos, por lo que han sido estudiados desde diferentes perspectivas y disciplinas. En la introducción, se enunció que el objetivo de la investigación aquí presentada fue estudiar los caminos reales huichapenses para comprender la organización espacial del territorio, así como sus relaciones sociales. Para ello, se desarrolló una metodología interdisciplinaria que reunió a las Ciencias de Información Geoespacial, la Arqueología y la Historia.

En el campo de Percepción Remota, se han hecho estudios para la identificación de caminos rurales y urbanos mediante Máquinas de Soporte Vectorial usando diversos tipos de imágenes de satélite. La imagen satelital de alta resolución GeoEye-1, utilizada en este trabajo, fue la que mejor resultados dio en comparación con WorldView-2 y RapidEye, debido a su resolución multiespectral de 1.65 m y su imagen pancromática de 0.40 m que sirvió para la validación de resultados; por otro lado, los obstáculos enfrentados fueron la cobertura discontinua e incompleta de la región de interés, así como la falta de acceso a imágenes más recientes. De esta manera, la escena GeoEye-1 elegida cubre los caminos reales que conectan Huichapan con Tlaxcalilla al oeste y con Tecozautla al norte.

El tema se mueve en una larga duración, desde la conquista hasta nuestros días, teniendo tres puntos de partida muy importantes: el periodo cuando actuaron las reformas borbónicas en el territorio novohispano (1760-1821); el año 2014, que corresponde a la escena capturada por el satélite y; la actualidad, específicamente de septiembre de 2022 a septiembre de 2023, fechas en las que se tomaron los registros en campo. La explicación de estos saltos temporales descansa en la teoría arqueológica. Como se abordó, los caminos reales se construyeron desde el siglo XVI y estuvieron en constante mantenimiento hasta su abandono en el siglo XIX. Dado que las reformas borbónicas promovieron la intensificación de la minería y la recaudación de impuestos, es muy probable que el tránsito en los caminos también aumentara, puesto que se debían mover animales, productos agrícolas y personas entre los centros de producción, los mercados, las cajas reales y las ciudades. Una mayor afluencia provoca mayor desgaste, impactando en el contexto en forma de reparaciones o con el deterioro de la infraestructura. Con la llegada de los ferrocarriles, el flujo en las rutas novohispanas disminuyó hasta que se detuvo de manera definitiva con el uso generalizado del automóvil; a partir de este momento, los caminos fueron víctimas de las alteraciones naturales y antrópicas distintas a las de su uso, dichas alteraciones han cambiado lentamente el contexto arqueológico, lo que permite reconstruirlo a

partir de los restos observables en el presente. Por tanto, si en más de un siglo -desde su abandono-, los caminos continúan visibles en superficie para su estudio y se conocen los procesos de formación del contexto, los cambios que pudieron haber sufrido entre la fecha de la imagen satelital y el presente -nueve años- son menores y casi imperceptibles.

En el trabajo de prospección arqueológica se recorrieron segmentos del antiguo trazo de los caminos reales, en donde no solo se registró el recorrido, sino las distintas coberturas que los conforman, sus anchuras y las estructuras asociadas que pudieron haber funcionado contemporáneas a ellos. Esto se hizo para saber cuántos píxeles cubrirían el ancho y si eso correspondía con el grado de resolución deseable para el banco de imágenes disponible; además, permitió conocer la complejidad del status actual de los objetos de estudio y planear la estrategia de clasificación temática. Por ello, se optó por entrenar a las máquinas de aprendizaje supervisado con nueve categorías, de las cuales, 'Camino de terracería' y 'Camino pavimentado' fueron las representativas de los caminos de la región. En campo también se hicieron observaciones de dron puntuales para tener datos *in situ* en lugares donde el camino real no era tan evidente o para reconocer las coberturas en secciones donde ya no se pudo recorrer.

Lo anterior, fue información útil al momento de probar el algoritmo de Máquinas de Soporte Vectorial en la fase de experimentación, ya que puso de manifiesto la necesidad de usar tanto el índice NDWI para mejorar la detección de cuerpos de agua y de humedad en la imagen, como el algoritmo  $\hat{A} \text{ trous } w^2$  para el realce de bordes, consiguiendo una mejora sustancial en la detección de los caminos. También se usaron los datos de campo para la validación de la clasificación temática. En esta etapa del procesamiento, como en la comparación del resultado con el camino de referencia, los porcentajes de precisión y *recall* más bajos pertenecen al camino real de Tlaxcalilla-Huichapan. Se pueden explicar porque el camino presenta mayor destrucción que el de Tecozautla, incluso hay partes en las que se vuelve irreconocible en campo y en la imagen satelital. Además, los límites de la escena GeoEye-1 no permite tener una cobertura completa del camino.

Los Sistemas de Información Geográfica jugaron un papel importante en el análisis de camino de costo mínimo. Si bien, la información histórica dio cuenta del vínculo que existió entre las poblaciones estudiadas -señalando la presencia de un camino real que las conectaba- y la arqueología permitió materializar dicho camino con las evidencias en campo, hubo secciones que no se pudieron reconstruir mediante esta información. Por ello, se recurrió a la computación de

rutas de menor costo, a partir de pendientes fáciles de transitar, para completar la conectividad entre las zonas urbanas.

Las interacciones entre Huichapan, Tecozautla y Tlaxcalilla son históricas. Las tres pertenecieron a la subdelegación de Huichapan en el siglo XVIII, pero tuvieron su fundación en el siglo XVI. Como se mencionó en el capítulo pasado, Huichapan y Tecozautla tienen su origen desde época prehispánica como parte de la provincia de Xilotepec, tributando a Tenochtitlan. Al ser Huichapan la cabecera y, los otros dos, pueblos de una jerarquía menor sujetos a esta, se evidencia la necesidad de crear caminos que los conecten, no solo para el intercambio mercantil, sino para una fiscalización y administración de justicia más efectivas dentro de la jurisdicción.

Ahora bien, estos tres asentamientos estuvieron insertos en un contexto histórico mayor. Se encontraban entre el camino real de Tierra Adentro y los yacimientos metalúrgicos del Valle del Mezquital, lo cual significó una zona de paso comercial hacia los reales mineros del Bajío y del norte del virreinato, así como a la ciudad de México. Además, fue punto de establecimiento de haciendas por parte de los empresarios novohispanos que tenían propiedades en distintas regiones, promoviendo la construcción de una red de caminos que comunicaran fácilmente los centros productivos. Del mismo modo, la parte poniente del Mezquital fungió como punto de avanzada en la conquista del septentrión. Estas relaciones se pueden estudiar desde una perspectiva espacial, tanto a partir de los caminos, como en la disposición de construcciones religiosas y civiles que dan cuenta del proceso de conquista, así como de las dinámicas económicas, sociales y políticas que se desarrollaron a lo largo de tres siglos.

Como se ha mencionado, los caminos novohispanos tuvieron un abandono paulatino y diferenciado. Hay tramos que siguen teniendo mantenimiento y renovando su cobertura - terracería o pavimento- para ser utilizados, especialmente aquellos que se encuentran dentro de la zona urbana. Otras secciones ya no se usan como vías de comunicación, pero los habitantes han realizado diversos esfuerzos para recuperar y conservar la memoria histórica de los caminos: han pedido a las autoridades arreglar algunas partes u ocupan las rutas como atracción turística para ciclistas, senderistas y jinetes. Un ejemplo de ello, para la conmemoración de la independencia de México, los charros de la región organizan cada año la “Cabalgata Patria” de Nopala a Huichapan por el trazo antiguo del camino real.

Un enfoque interdisciplinario como el planteado aquí permite una comprensión más completa de los procesos históricos que ha sufrido un territorio. Es necesario tener un

acercamiento previo con el objeto de estudio para alimentar de manera más apropiada los procesamientos CIG, así como tener una mejor interpretación de los resultados, que se vuelvan explicativos y, en ocasiones, que ayuden a una toma de decisiones realmente informada. Para el caso analizado a lo largo de estas páginas, las disciplinas arqueológica e histórica se volvieron esenciales para la implementación, mejora, discusión y explicación de los resultados arrojados por la Percepción Remota.

Una vez probada la efectividad del algoritmo de MSV para la detección de los caminos reales en el Valle del Mezquital, se considera que puede ser una metodología replicable en otras regiones del otrora virreinato de la Nueva España, o incluso, para el estudio de rutas antiguas alrededor del globo; bajo las limitaciones de que dichas rutas se encuentren en superficie, sean visibles en imágenes de satélite y que estas tengan una resolución alta. También habrán de tomarse en cuenta las condiciones ambientales de la zona de estudio, ya que los materiales constructivos y las alteraciones que sufrieron a lo largo del tiempo no son las mismas. De ser posible, se exhorta a cruzar los tres niveles de información: documental, en campo y satelital para una investigación más robusta.

Por último, la presente tesis abre líneas de trabajo futuras. La primera es continuar con la discusión sobre la pertinencia de las humanidades en problemáticas de las Ciencias de Información Geoespacial, así como la pertinencia del uso de métodos más tecnológicos en las disciplinas históricas. La siguiente, es usar otras metodologías de procesamiento digital de imágenes en Percepción Remota en la detección de los caminos reales y comparar los resultados con los del algoritmo de MSV; por ejemplo, Árboles de decisión (*Random Forest, RF*) o Redes Neuronales Convolucionales (*Convolutional Neural Network, CNN*). Una más, es estudiar otros caminos reales y rutas de otras temporalidades en el Valle del Mezquital. Por último, queda en el tintero la realización de una plataforma con fines educativos que permita modelizar caminos antiguos en México, tomando en cuenta variables como la pendiente, el medio de transporte y las condiciones climáticas.

## 8. Índice de Tablas

Tabla 4.1. Características de las imágenes satelitales.....	18
Tabla 4.2. Categorías de clasificación .....	25
Tabla 5.1. Datos recolectados en campo sobre el estado actual del camino real Tlaxcalilla-Huichapan, septiembre 2022 y 2023.....	31
Tabla 5.2. Datos recolectados en campo sobre el estado actual del camino real Huichapan-Tecoautla, septiembre 2023.....	42
Tabla 5.3. Puntos de precisión aleatorios, algoritmo de $\hat{A} \text{ trous } w^1$ y $w^2$ . Camino real Tlaxcalilla-Huichapan. ....	56
Tabla 5.4. Matriz de estimaciones de área sin sesgo del algoritmo de $\hat{A} \text{ trous } w^1$ , camino real Tlaxcalilla-Huichapan.....	56
Tabla 5.5. Matriz de estimaciones de área sin sesgo del algoritmo de $\hat{A} \text{ trous } w^2$ , camino real Tlaxcalilla-Huichapan.....	57
Tabla 5.6. Puntos de precisión aleatorios, filtro $\hat{A} \text{ trous } w^1$ y $w^2$ . Camino Huichapan-Tecoautla. ....	62
Tabla 5.7. Matriz de estimaciones de área sin sesgo del algoritmo de $\hat{A} \text{ trous } w^1$ , camino real Huichapan-Tecoautla .....	62
Tabla 5.8. Matriz de estimaciones de área sin sesgo del algoritmo de $\hat{A} \text{ trous } w^2$ , camino real Huichapan-Tecoautla .....	63
Tabla 5.9. Cuantificación del status actual del camino real Tlaxcalilla-Huichapan.....	70
Tabla 5.10. Cuantificación del status actual del camino real Huichapan-Tecoautla.....	73

## 9. Índice de Figuras

Figura 3.1. Mapa de ubicación del Valle del Mezquital.....	8
Figura 3.2. Mapa del área de estudio.....	9
Figura 4.1. Diagrama del marco metodológico y conceptual.....	10
Figura 4.2 Diagrama de interdisciplina.....	12
Figura 4.3. Mapa del S. XVI que muestra el camino real entre Tlaxcalilla y Huichapan .....	14
Figura 4.4. Plano del S. XVIII del curato de Huichapan.....	15
Figura 4.5. Mapa de cobertura de las imágenes satelitales de alta resolución (INEGI) .....	20
Figura 4.6. Diagrama de procesamiento de imágenes satelitales de alta resolución.....	21
Figura 4.7. Diagrama de procesamiento de caminos desde las SIG. ....	27
Figura 5.1. Mapa de datos de campo del camino real Tlaxcalilla-Huichapan. ....	36
Figura 5.2. Fotografías en campo de coberturas del camino real Tlaxcalilla-Huichapan. ....	37
Figura 5.3. Fotografías en campo de elementos asociados al camino real Tlaxcalilla - Huichapan. ....	39
Figura 5.4. Fotogrametría de dron del punto 8, Tlaxcalilla-Huichapan. ....	40
Figura 5.5. Fotogrametría de dron del punto 15, Tlaxcalilla-Huichapan.....	41
Figura 5.6. Mapa de datos de campo del camino real Huichapan-Tecoautla .....	45
Figura 5.7. Fotografías en campo de coberturas del camino real Huichapan-Tecoautla. ....	46
Figura 5.8. Fotografías en campo de elementos asociados al camino real Huichapan- Tecoautla. ....	47
Figura 5.9. Fotogrametría de dron del punto 24, Huichapan-Tecoautla.....	49
Figura 5.10. Fotogrametría de dron del punto 34, Huichapan-Tecoautla.....	50
Figura 5.11. Imagen GeoEye-1 de 20 de enero de 2014, caminos reales.....	52
Figura 5.12. Imagen GeoEye-1 de 20 de enero de 2014, clasificación por MSV.....	53
Figura 5.13. Imagen GeoEye-1 procesada y clasificada, MSV. Detalle camino Tlaxcalilla- Huichapan. ....	54
Figura 5.14. Imagen GeoEye-1 con clasificación correcta, filtro $\hat{A} \text{ trous } w^1$ .....	58
Figura 5.15. Imagen GeoEye-1 con errores de clasificación, transformada $\hat{A} \text{ trous } w^1$ .....	58
Figura 5.16. Imagen GeoEye-1 con clasificación correcta, filtro $\hat{A} \text{ trous } w^2$ .....	59
Figura 5.17. Imagen GeoEye-1 con errores de clasificación, filtro $\hat{A} \text{ trous } w^2$ .....	59
Figura 5.18. Imagen GeoEye-1 procesada y clasificada, MSV. Detalle camino Huichapan- Tecoautla. ....	60
Figura 5.19. Imagen GeoEye-1 con clasificación correcta, filtro $\hat{A} \text{ trous } w^1$ .....	63
Figura 5.20. Imagen GeoEye-1 con errores de clasificación, filtro $\hat{A} \text{ trous } w^1$ .....	64
Figura 5.21. Imagen GeoEye-1 con clasificación correcta, filtro $\hat{A} \text{ trous } w^2$ .....	65
Figura 5.22. Imagen GeoEye-1 con errores de clasificación, filtro $\hat{A} \text{ trous } w^2$ .....	65
Figura 5.23. Mapa de caminos de costo mínimo.....	66
Figura 5.24. Mapa de camino de costo mínimo Tlaxcalilla-Huichapan .....	68
Figura 5.25. Mapa de camino de referencia y camino predicho, Tlaxcalilla.....	69
Figura 5.26. Mapa de camino de referencia y camino predicho, Zothé-Huichapan. ....	69

Figura 5.27. Mapa de camino de costo mínimo Huichapan-Tecoautla .....	71
Figura 5.28. Mapa de camino de referencia y camino predicho, Huichapan-Tecoautla. ....	72
Figura 6.1. Mapa de caminos principales de la Nueva España. ....	76
Figura 6.2. Fotografía de avenida 'Camino Real' en San José Atlán.....	86

## 10. Fuentes consultadas

### 10.1. Fuentes primarias

#### 10.1.1. Archivos

AGN Archivo General de la Nación, Ciudad de México, México.

INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Ciudad de México, México.

Informes técnicos del Proyecto Eje Valle del Mezquital, INAH, Ciudad de México, México.

#### 10.1.2. Impresos

Alzate y Ramírez, Joseph Antonio (1767), *Atlas eclesiástico del Arzobispado de México*, Nueva España. <<https://bvpb.mcu.es/es/consulta/registro.cmd?id=397651>>

Real Academia Española (1726-1739), *Diccionario de Autoridades (1726-1739)*, España: Diccionario Histórico de la lengua española. <<https://apps2.rae.es/DA.html>>

Villaseñor y Sánchez, Joseph Antonio (1746), *Theatro americano: descripción general de los reynos y provincias de la Nueva España y sus jurisdicciones*, Nueva España: Viuda de Joseph Bernardo de Hogal, Biblioteca virtual Miguel de Cervantes. <<https://www.cervantesvirtual.com/obra-visor/teatro-americano-descripcion-general-de-los-reinos-y-provincias-de-la-nueva-espana-y-sus-jurisdicciones-su-author-d-joseph-antonio-de-villasenor-y-sanchez--0/html/>>

Ward, Henry George (1985), *México en 1827. Selección*. México: Lecturas Mexicanas, Fondo de Cultura Económica, Secretaría de Educación Pública.

## 10.2. Bibliografía

Bakhtiari, H. R. R., Abdollahi, A., & Rezaeian, H. (2017), "Semi-automatic road extraction from digital images", *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 20(1), pp. 117-123.

Banning, Edward Bruce (2002), *Archaeological Survey*. Nueva York: Springer Science, Business Media New York.

Bello Nuñez, Silvia Lorena (2022), "Las haciendas del norte del Valle del Mezquital y su vínculo con el real de minas de Zimapán en la época novohispana", *Revista De El Colegio De San Luis*, 12(23), pp. 1-34. <<https://doi.org/10.21696/rcsl122320221423>>

Braudel, Fernand (1970), *La historia y las ciencias sociales*, Madrid: Alianza Editorial.

- Calvo, Thomas (1997), *Por los caminos de Nueva Galicia. Transportes y transportistas en el siglo XVII*, México: Universidad de Guadalajara, Centre Français D'Études Mexicanos et Centraméricanes.
- Cano López, Ignacio Eduardo (2005), *La arriería y el transporte de mercancías en la ruta de México a Veracruz. Primera mitad del siglo XIX*, tesina para obtener el grado de licenciado en Historia, México: Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa.
- Cipolla, Carlo. (1991), *Entre la Historia y la Economía*, Barcelona: Crítica.
- Clarke, David L. (1968), *Analytical archaeology*, Estados Unidos: Methuen & Co.
- \_\_\_\_\_ (1977), *Spatial Archaeology*, Boston: Academic Press.
- Conolly, James y Lake, Mark (2006), *Geographical Information Systems in Archaeology*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Cramaussel, Chantal (ed.) (2016), *Los caminos transversales. La geografía histórica olvidada de México*, México: El Colegio de Michoacán, Universidad Juárez del Estado de Durango.
- Cubillo, Moreno Gilda (1991), *Los dominios de la plata: el precio del auge, el peso del poder. Empresarios y trabajadores en las minas de Pachuca y Zimapán, 1552-1620*, México: Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Cubillo, Moreno Gilda y Piedras Camargo, Carolina Montserrat (2019), "Relaciones socioeconómicas, alianzas y empresas en el sector minero de Pachuca a Zimapán, 1552-1620", *Dimensión Antropológica*, 26 (75), pp. 20-49. <<https://www.dimensionantropologica.inah.gob.mx/?p=14956>>
- De los Reyes, Aurelio (1991), *Los caminos de la plata*, México: Universidad Iberoamericana.
- Del Valle Pavón, Guillermina (enero-junio 2007), "Desarrollo de la economía mercantil y construcción de los caminos México-Veracruz en el siglo XVI", *América Latina en la Historia Económica*, Dr. José María Luis Mora, 27, pp. 5-49.
- Diamond, Jared (2004), *Armas, gérmenes y acero. Breve historia de la humanidad en los últimos trece mil años*. España: Editorial Debate.
- Douglas, David H. (1994), "Least-cost Path in GIS Using an Accumulated Cost Surface and Slope-lines", *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*. 31(3), pp. 37-51. <<https://doi.org/10.3138/D327-0323-2JUT-016M>>
- Flannery, Kent V. (ed.) (1976), *The Early Mesoamerican Village*, Reino Unido: Routledge.
- Florescano Mayet, Sergio (1987), *El camino México-Veracruz en la época colonial*, México: Universidad Veracruzana.
- García Martínez, Bernardo (2014), *Tiempos y lugares. Antología de estudios sobre poblamiento, pueblos, ganadería y geografía en México*, México: El Colegio de México.

- García Martínez, Bernardo (noviembre 2006), "Veredas y caminos en tiempos del automóvil", *Arqueología Mexicana*, 14 (81), pp. 66-69.
- González Dávila, Fernando (2014), "Huichapan en el camino", Fernando López, Aguilar y López Hernández, Haydeé (eds.), *Huichapan, tres momentos de su historia*, México: Consejo Estatal para la Cultura y las Artes de Hidalgo, pp. 95-127.
- González-Audicana, M., et. al. (2004), "Bondad de los algoritmos de descomposición Wavelet de Mallat y 'à trous' para la fusión de imágenes QuickBird", *Revista de Teledetección*, 21, pp. 79-84.
- Gonzalo, C., & Lillo-Saavedra, M. (2004), "Control de la calidad espacial y espectral de imágenes de satélite fusionadas mediante el algoritmo wavelet à trous", *Revista de Teledetección*, 22, pp. 47-53.
- Hausberger, Bernd (2014), "En el camino. En busca de los arrieros novohispanos", *Historia Mexicana*, El Colegio de México, 64 (1), pp. 65-104.
- Hausberger, Bernd (2015), "La economía novohispana, 1519-1760", Sandra Kuntz Ficker (coord.), *Historia económica general de México. De la Colonia a nuestros días*, México: El Colegio de México, Secretaría de Economía, pp. 41-82.
- Heipke, C., Mayer, H., Wiedemann, C., & Jamet, O. (1997), "Evaluation of automatic road extraction", *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 32 (3 SECT 4W2), pp. 151-160.
- Herzog, Irmela (2014), "Least-cost Paths – Some Methodological Issues", *Internet Archaeology*. (36). <<https://doi.org/10.11141/ia.36.5>>
- Hodder, Ian (1988), "From space to place: current trends in spatial archaeology", *Arqueología espacial*, 12, pp. 9-16.
- Hodder, Ian y Orton, Clive (1979), *Spatial Analysis in Archaeology. New Studies in Archaeology*, Inglaterra: Cambridge University Press.
- Huicochea Enríquez, María Guadalupe (2021), *El Camino Real de Tierra Adentro en la región otomí*, México: Editorial Praxis.
- Hunter, Richard (2009), "Positionality, perception, and possibility in Mexico's Valle del Mezquital", *Journal of Latin American Geography*, 8 (2), pp. 49-69.
- Jiménez Abollado, Francisco Luis y Ramírez Calva, Verence Cipatli (2014a), "Los bienes de comunidad de los pueblos de indios de la jurisdicción de Huichapan a fines del siglo XVIII", Luis Carlos, Quiñones Hernández, *Patrimonio e identidad en el Camino Real de Tierra Adentro y el Camino Nacional*, México: Universidad Juárez del Estado de Durango, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Escuela Nacional de Antropología e Historia, pp. 225-250.

- Jiménez Abollado, Francisco Luis y Ramírez Calva, Verence Cipatli (2014b) “Por los senderos paralelos del Camino Real de Tierra Adentro: Abasto, rutas y comercio de la jurisdicción de Huichapan en el siglo XVIII”, *Revista Xihmai*, Universidad La Salle Pachuca, 9 (18).
- Koselleck, Reinhart (2001), *Los estratos del tiempo: estudios sobre la historia*, España: Ediciones Paidós Ibérica e Instituto de Ciencias de la Educación de la Universidad Autónoma de Barcelona.
- Laugier, Elise Jakoby y Casana Jesse (2021), “Integrating Satellite, UAV, and Ground-Based Remote Sensing in Archaeology: An Exploration of Pre-Modern Land Use in Northeastern Iraq”, *Remote Sensing*, 13 (24), 5119, pp. 1-27. <<https://doi.org/10.3390/rs13245119>>
- Lempérière, Annick (2013), *Entre Dios y el rey: la república. La ciudad de México de los siglos XVI al XIX*, México: Fondo de Cultura Económica.
- León Soriano, Erika Guadalupe (2015), *Desde la prospección hasta la preservación del patrimonio arqueológico: el caso del sitio “El Japón” en San Gregorio Atlapulco. Aportaciones de la Geomática a la Arqueología*, tesis para obtener el grado de Maestra en Geomática, México: Centro de Investigación en Geografía y Geomática “Ing. Jorge L. Tamayo”.
- Lillo-Saavedra, M. y Gonzalo, C. (2006), “Influencia del nivel de degradación en la calidad de imágenes IKONOS fusionadas mediante el algoritmo À trous”, *Revista de teledetección: Revista de la Asociación Española de Teledetección*, (26), pp. 24-30.
- Lira, Jorge y López, Pedro (octubre 2020), “The recognition of the remnants of the royal road of the interior land using high-resolution multispectral satellite images”, *Geofísica Internacional*, Universidad Nacional Autónoma de México, 59 (4), pp. 273-284.
- Lira, Jorge y Rodríguez Alejandro (julio-septiembre 2014), “Edge enhancement in multispectral satellite images”, *Geofísica Internacional*, Universidad Nacional Autónoma de México, 53 (3), pp. 289-308. <[https://doi.org/10.1016/S0016-7169\(14\)71506-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7169(14)71506-5)>
- Liu, Jian, *et. al.* (octubre 2017), “Rural road extraction from high-resolution remote sensing images based on geometric feature inference”, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6 (10), 314, pp. 1-23. <<https://doi.org/10.3390/ijgi6100314>>
- López Aguilar, Fernando (2005), *Símbolos del tiempo*, México: Consejo Estatal para la Cultura y las Artes de Hidalgo.
- López Aguilar, Fernando y Fournier Patricia (2014), “El camino real, la minería y la producción de carbón entre los otomíes del Valle del Mezquital”, Luis Carlos, Quiñones Hernández, *Patrimonio e identidad en el Camino Real de Tierra Adentro y el Camino Nacional*, México: Universidad Juárez del Estado de Durango, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Escuela Nacional de Antropología e Historia.

- López Aguilar, Fernando y López García, Pedro (2014), "Identificación de redes de caminos utilizando imágenes digitales multispectrales y pancromáticas. El caso de los ramales del Camino Real de Tierra Adentro en San Juan del Río", *Revista Xihmai*, Universidad La Salle Pachuca, 9 (18).
- López García, Pedro Antonio (2005), *Modelación morfológica de sitios arqueológicos del área maya empleando imágenes de radar de alta resolución*, tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias de la Tierra, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- López Hernández, Haydeé (2014), "Escenas de guerra y bronce: Huichapan durante la independencia", Fernando, López Aguilar y Haydeé, López Hernández (eds.), *Huichapan, tres momentos de su historia*, México: Consejo Estatal para la Cultura y las Artes de Hidalgo, pp. 129-172.
- Lovera Limberg, Mauricio Alejandro (2021), "El camino real de Tierra Adentro y los caminos locales de Xilotepec y Soyaniquilpan en el siglo XVIII", Beatriz, Rojas (coord.), *De caminos y puentes. Ordenamiento territorial en la Nueva España*, México: Instituto Mora, El Colegio de Michoacán, pp. 153-177.
- Marichal, Carlos (2015), "La economía de la época borbónica al México independiente, 1760-1850", Sandra, Kuntz Ficker (coord.), *Historia económica general de México. De la Colonia a nuestros días*, México: El Colegio de México, Secretaría de Economía, pp. 143-170.
- Matkan, Aliakbar, et. al. (2014), "Road extraction from Lidar data using Support Vector Machine classification", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 80 (5), pp. 409-422.
- Mehrer, Mark W. y Wescott, Konnie L. (eds.) (2019), *GIS and Archaeological Site Location Modeling*, Londres: Taylor & Francis.
- Mehrer, Mark W. y Wescott, Konnie L. (eds.) (2019), *GIS and Archaeological Site Location Modeling*, Londres: Taylor & Francis.
- Melville, Elinor G. K. (1994), *Plaga de ovejas. Consecuencias ambientales de la Conquista de México*, México: Fondo de Cultura Económica.
- Miño Grijalva, Manuel (2015), "Las ciudades novohispanas y su función económica, siglo XVI-XVIII", Sandra, Kuntz Ficker (coord.), *Historia económica general de México. De la Colonia a nuestros días*, México: El Colegio de México, Secretaría de Economía, pp. 143-170.
- Moralejo Reinaldo, Andrés y Gobbo, J. Diego (2017), "Desde el camino: los SIG y El Shical de Quimivil (Londres, Catamarca, noreste argentino)", Sofía, Chacaltana, et. al. (eds.), *Nuevas tendencias en el estudio de los caminos*, Perú: Ministerio de Cultura, Proyecto Qhapaq Ñan, pp. 322-345.
- Olofsson, Pontus, et.al. (2014), "Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change", *Remote Sensing of Environment*, Elsevier, 148, pp. 42-57. <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>>

- Ordóñez Aguilar, Manuel (2010), "Principios básicos del análisis historiográfico", Ordoñez Aguilar, Manuel (coord.), *Introducción al análisis historiográfico. Problemas generales de teoría y filosofía de la historia y estudios de caso*, México: UNAM, pp. 13-28.
- Pérez González, María Luisa (2001), "Los caminos reales de América en la legislación y en la historia", *Anuario de Estudios Americanos*, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, tomo LVIII, I, pp. 33-60.
- Piper, June-el (ed.) (1999), *El Camino Real de Tierra Adentro. Vol. I and II*, Estados Unidos: New Mexico Bureau of Land Management.
- Quiñones Hernández, Luis Carlos (coord.) (2015), *Patrimonio e identidad en El Camino Real de Tierra Adentro y El Camino Nacional*, México: Universidad Juárez del Estado de Durango.
- Rees, Peter (1976), *Transportes y comercio entre México y Veracruz, 1519-1910*, México: Secretaría de Educación Pública.
- Rodríguez Cepeda, Ana Sofía y Sorroche Cuerva, Miguel Ángel (2016), *El camino real de Coahuila y Texas, patrimonio compartido*, México: Universidad Autónoma de Coahuila, Universidad de Granada.
- Rojas, Beatriz (2021b), "Se hace camino al andar: el desarrollo caminero del México colonial", Rojas, Beatriz (coord.), *De caminos y puentes. Ordenamiento territorial en la Nueva España*, México: Instituto Mora, El Colegio de Michoacán, pp. 9-57.
- Rojas, Beatriz (coord.) (2021a), *De caminos y puentes. Ordenamiento territorial en la Nueva España*, México: Instituto Mora, El Colegio de Michoacán.
- Salinas Ramos, Miguel Santos (julio-septiembre 2014), "El Camino Real de Tierra Adentro y la colonización en la jurisdicción de las villas de San Miguel y San Felipe en el siglo XVI", *Legajos*, Archivo General de la Nación, 8, 3 (1), pp. 45-71.
- \_\_\_\_\_ (octubre 2016), "Entre el reconocimiento y el abandono. La situación del Camino Real de Tierra Adentro en el norte de Guanajuato", *PASOS. Revista de Turismo y Patrimonio Cultural*, Universidad de La Laguna, 14 (5), pp. 1109-1122.
- Schiffer, Michael B. (julio 1991), "Los procesos de formación del registro arqueológico", *Boletín de Antropología Americana*, 23, pp. 39-45.
- Schiffer, Michael B., Hollenback, Kacy, et. al. (2010), *Behavioral Archaeology. Principles and practice*, Estados Unidos: Equinox Publishing.
- Schiffer, Michael B., Sullivan, Alan y Klinger, Timothy (junio 1978), "The design of archeological surveys" *World Archaeology*, 10 (1), pp. 1-28.
- Schild, Alex (2016), *Archaeological Least cost path modeling: A behavioral study of Middle Bronze Age merchant travel routes across the Amanus mountains, Turkey*, Tesis presentada para

obtener el título de Master of Science, Estados Unidos: Faculty of the USC Graduate School University of Southern California.

- Schmidt, C., McCullum, A. (2018), *Accuracy Assessment of a Land Cover Classification*, Estados Unidos: NASA Applied Remote Sensing Training Program (ARSET). <<https://appliedsciences.nasa.gov/join-mission/training/english/arset-accuracy-assessment-land-cover-classification>>
- Siart, Christoph, *et. al.* (eds.) (2018), *Digital Geoarchaeology: New Techniques for Interdisciplinary Human-Environmental Research (Natural Science in Archaeology)*, Estados Unidos: Springer International Publishing.
- Silver, Minna, *et. al.* (2015), "Remote sensing, landscape and archaeology tracing ancient tracks and roads between Palmyra and the Euphrates in Syria", *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2 (5), pp. 279-285. <<https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-W3-279-2015>>
- Solinis-Casparius, Rodrigo (2022), "A mesoamerican urban road network: an analysis of pedestrian pathways of Angamuco, Michoacán", *Latin American Antiquity*, 33(3), pp. 464-484.
- Song, M., y Civco, D. (2004), "Road extraction using SVM and image segmentation", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70 (12), pp. 1365-1371.
- Soni, P. K., Rajpal, N. y Mehta, R. (2020), "Semiautomatic road extraction framework based on shape features and LS-SVM from high-resolution images", *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 48, pp. 513-524. <<https://doi.org/10.1007/s12524-019-01077-4>>
- Stangl, Werner (2019), "Data: Territorial gazetteer for Spanish America, 1701-1808", *Harvard Dataverse*, Harvard, V3. <<https://doi.org/10.7910/DVN/YPEU5E>>
- Suárez Argüello, Clara Elena (1997), *Camino real y carrera larga: La arriería en la Nueva España durante el siglo XVIII*, México: CIESAS.
- \_\_\_\_\_ (invierno 2001), "De caminos, convoyes y peajes: los caminos de México a Veracruz, 1759-1835", *Relaciones. Estudios de historia y sociedad*, El Colegio de Michoacán, 22 (85), pp. 385-402.
- \_\_\_\_\_ (2000), "Fuentes para el estudio del transporte novohispano durante la segunda mitad del siglo XVIII", *América Latina en la Historia Económica*, Dr. José María Luis Mora, 7 (13-14), pp. 179-187.
- \_\_\_\_\_ (1995), "Sequía y crisis en el transporte novohispano en 1794-1795", *Historia Mexicana*, El Colegio de México, 44 (3), pp. 385-402.
- Torres, Andrés A., *et. al.* (septiembre-diciembre 2013), "Uso de las geotecnologías de información para la ubicación del camino real de Tierra Adentro en Querétaro, México", *Boletín de*

*Monumentos Históricos*, Instituto Nacional Autónoma de México, tercera época, 29, pp. 180-191.

Villafañez, Emiliano Alejandro (2011), “Entre la geografía y la arqueología: el espacio como objeto y representación”, *Revista de Geografía Norte Grande*, 50, pp. 135- 150.

Wang, W., Yang, N., Zhang, Y., Wang, F., Cao, T., y Eklund, P. (2016), “A review of road extraction from remote sensing images”, *Journal of traffic and transportation engineering (english edition)*, 3(3), pp. 271-282.

Wescott, Konnie L. y Brandon, Joe (eds.) (2000), *Practical Applications of GIS for Archaeologists: A Predictive Modelling Toolkit*, Londres: Taylor & Francis.

Wheatley, David y Gillings, Mark (2002), *Spatial Technology and Archaeology: The Archaeological Applications of GIS*, Londres: Taylor & Francis.

Zanni, Sara y De Rosa, Alessandro (2019), “Remote Sensing Analyses on Sentinel-2 Images: Looking for Roman Roads in Srem Region (Serbia)”, *Geosciences*, 9 (25), pp. 1-28. <<https://doi.org/10.3390/geosciences9010025>>

Zhang, Z., Zhang, X., Sun, Y. & Zhang, P. (2018), “Road centerline extraction from very-high-resolution aerial image and LiDAR data based on road connectivity”, *Remote Sensing*, MDPI, 10 (1284), pp. 1-18.

### 10.3. Metadatos

Figura 3.1: Bello Nuñez, Silvia Lorena (2022), “Las haciendas del norte del Valle del Mezquital y su vínculo con el real de minas de Zimapán en la época novohispana”, *Revista De El Colegio De San Luis*, 12(23), pp. 1–34. <<https://doi.org/10.21696/rcsl122320221423>>

Figura 6.1: Instituto Regional del Patrimonio Mundial en Zacatecas. (27 de diciembre de 2021). Visita en Zacatecas del Representante de la UNESCO Frédéric Vacheron Oriol a los sitios del Camino Real de Tierra Adentro, Itinerario cultural Patrimonio Mundial y la Zona Arqueológica La Quemada. *Noticias y Eventos*. Instituto Regional del Patrimonio Mundial en Zacatecas, UNESCO, Gobierno de Zacatecas. <<https://irpmzcc2.org/noticias/ver/52/visita-zacatecas-representante-unesco-frederic-vacheron-oriol-a-sitios-camino-real-tierra-adentro-itinerario-cultural-patrimonio-mundial-y-zona-arqueologica-la-quemada>>