



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO**

---

**MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y  
RECURSOS NATURALES**

**ZONIFICACIÓN AGROECOLÓGICA DEL CULTIVO DEL CAFÉ  
EN EL SUR DEL ESTADO DE MÉXICO**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS  
AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES**

**PRESENTA:**

**BIOL. MARICELA MORA ESCAMILLA**

**El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México.**

**Junio 2024**





**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO**

---

**MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS  
AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES  
ZONIFICACIÓN AGROECOLÓGICA DEL CULTIVO DEL CAFÉ  
EN EL SUR DEL ESTADO DE MÉXICO**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS  
AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES**

**PRESENTA:**

**BIOL. MARICELA MORA ESCAMILLA**

**COMITÉ DE TUTORES:**

**Dr. José Francisco Ramírez Dávila. Tutor académico**

**Dra. Xanat Antonio Némiga**

**Dr. Rodolfo Serrato Cuevas. Tutor adjunto**

**El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México.**

**Junio, 2024**



## Índice

1. Resumen.....	8
2. Abstract.....	10
3. Introducción.....	12
4. Revisión de literatura.....	13
4.1 Generalidades del cultivo.....	13
Origen del cultivo, historia e importancia en México.....	13
Descripción del cultivo.....	14
Variedades.....	18
Ciclo fenológico.....	20
Factores agroclimáticos asociados al café.....	20
Sistemas de producción.....	22
Productividad.....	22
Principales plagas y enfermedades del cultivo del café.....	23
4.2 Teledetección.....	24
Resoluciones de un sensor.....	25
Especificaciones de las imágenes.....	25
Tratamiento de imágenes.....	27
Análisis de imágenes.....	28
Firmas espectrales.....	29
Índices de vegetación.....	30
Algoritmo SAM (Bardman, J. W.).....	31
4.3 Modelo de Evaluación multicriterio.....	32
4.4 Zonificación agroecológica.....	32
5. Planteamiento del problema.....	34
6. Preguntas de investigación e Hipótesis.....	35
7 Justificación.....	35
8. Objetivo general.....	37
9. Objetivos específicos.....	37
10. Metodología.....	37
10.1 Área de estudio.....	37
10.2 Procedimiento.....	39

11. Resultados .....	43
12. Otros resultados.....	66
12.1 Cartografía de Sultepec y Temascaltepec.....	66
12.2 Evaluación multicriterio para la caracterización agroecológica de zonas óptimas para el cultivo del café. ....	67
12.2.1 Factores agroecológicos .....	69
Zonas de aptitud agroecológica.....	78
Interpretación de las zonas Optimas .....	81
13. Discusión general .....	89
14. Conclusiones generales.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
17. Referencias.....	93

### Índice de Figuras

Figura 1 Morfología y anatomía de la raíz de café. (Dedeca 1957, Adaptado de Suarez y Castro, 1954; tomado de Arcila Pulgarin, 2007).....	15
Figura 2 Etapas de floración del café y morfología de los carpelos. (Arcila, 2004; Tomado de Arcila, 2007). ....	17
Figura 3 Cultivo de café en el sur del Estado de México. ....	18
Figura 4 Índices basados en la estimación de la distancia a la línea del suelo (Muñoz, 2013). ....	31
Figura 5 Mapa de localización Área de estudio .....	38
Figura 6 Zonas con interés para nuevas plantaciones en Amatepec. Fuente: Google earth, 2024. ....	84
Figura 7 Zonas con interés para nuevas plantaciones en Sultepec. Fuente: Google earth, 2024. ....	86
Figura 8 Zonas con interés para nuevas plantaciones en Temascaltepec. Fuente: Google earth, 2024.....	89

### Índice de tablas.

Tabla 2 Nivel de procesamiento de imágenes Sentinel.....	26
Tabla 3 Matriz de pesos nivel de aptitud.....	41
Tabla 4 Asignación de pesos por nivel de aptitud.....	41
Tabla 5 Matriz de Saaty de las variables agroecológicas del cultivo del café.....	42
Tabla 6 Pesos de importancia de las variables agroecológicas asociadas al cultivo del café. .	42
Tabla 7 Clasificación supervisada por SAM y validación (Matriz de tabulación cruzada). .....	67
Tabla 8 Rangos de aptitud agroecológica para el cultivo del café por municipio.....	68
Tabla 9 Superficie grados de aptitud. Elaboración propia. ....	80

### Índice de Mapas.

Mapa 1 Superficie estimada del cultivo del café en Sultepec, Estado de México. Elaboración propia a través del algoritmo SAM en imagen sentinel 2. ....	66
Mapa 2 Superficie estimada del cultivo del café en Temascaltepec, Estado de México. Elaboración propia a través del algoritmo SAM en imagen sentinel 2 .....	67
Mapa 3 Tipos de suelos Amatepec. Fuente de datos Conjunto edafológico INEGI, 2013 <sup>a</sup> .....	70
Mapa 4 Tipos de suelos Sultepec. Fuente de datos Conjunto edafológico INEGI, 2013a.....	71
Mapa 5 Tipos de suelos Temascaltepec. Fuente de datos Conjunto edafológico INEGI, 2013 <sup>a</sup> . .....	71
Mapa 6 Precipitación anual Amatepec. Fuente Cuervo-Robayo et al., 2014 .....	72
Mapa 7 Precipitación anual Sultepec. Fuente Cuervo-Robayo et al., 2014. ....	72
Mapa 8 Precipitación anual Temascaltepec. Fuente Cuervo-Robayo et al., 2014.....	73
Mapa 9 Temperatura en Amatepec. Fuente INEGI, 2020a. ....	73
Mapa 10 Temperatura en Sultepec. Fuente INEGI, 2020 <sup>a</sup> . ....	74
Mapa 11 Temperatura en Temascaltepec. Fuente INEGI, 2020 <sup>a</sup> .....	74
Mapa 12 Altitud Amatepec. Fuente: elaboración propia a partir de datos del CEM (INEGI, 2013). .....	75
Mapa 13 Altitud Amatepec. Fuente: elaboración propia a partir de datos del CEM (INEGI, 2013). .....	75
Mapa 14 Altitud Temascaltepec. Fuente: elaboración propia a partir de datos del CEM (INEGI, 2013). .....	76

Mapa 15 Pendiente Amatepec. Fuente: elaboración propia a partir de datos del CEM (INEGI, 2013).....	77
Mapa 16 Pendiente Sultepec. Fuente: elaboración propia a partir de datos del CEM (INEGI, 2013).....	77
Mapa 17 Pendiente Sultepec. Fuente: elaboración propia a partir de datos del CEM, (INEGI, 2013).....	78
Mapa 18 Zonificación agroecológica del cultivo del café en Amatepec. Elaboración propia a partir de datos de INEGI (2014, 2020 y 2023) y Cuervo-Robayo et al., 2014. ....	79
Mapa 19 Zonificación agroecológica del cultivo del café en Sultepec. Elaboración propia a partir de datos de INEGI (2014, 2020 y 2023) y Cuervo-Robayo et al., 2014. ....	79
Mapa 20 Zonificación agroecológica del cultivo del café en Temascaltepec. Elaboración propia a partir de datos de INEGI (2014, 2020 y 2023) y Cuervo-Robayo et al., 2014. ....	80
Mapa 21 Interpretación de las zonas con grado de aptitud optimo y medio. Fuente: Elaboración propia y Marco geoestadístico INEGI, 2020. ....	82
Mapa 22 Zonas de interés para nuevas plantaciones en Amatepec, Estado de México. Fuente: Marco geoestadístico, 2020 para localidades y Uso de suelo y vegetación, 2018 para tipos de vegetación.....	83
Mapa 23 Interpretación de las zonas con grado de aptitud optimo y medio. Fuente: elaboración propia y Marco geoestadístico INEGI, 2020. ....	84
Mapa 24 Zonas de interés para nuevas plantaciones en Sultepec, Estado de México. Fuente: Elaboración propia. ....	85
Mapa 25 Zonas de interés para nuevas plantaciones y coberturas vegetales en Sultepec, Estado de México. Fuente: Uso de suelo y vegetación de INEGI, 2018. ....	86
Mapa 26 Interpretación de las zonas con grado de aptitud optimo y medio. Fuente: elaboración propia y Marco geoestadístico INEGI, 2020. ....	87
Mapa 27 Zonas de interés para nuevas plantaciones y coberturas vegetales en Temascaltepec, Estado de México. Fuente: Uso de suelo y vegetación de INEGI, 2018. ....	88

# 1. Resumen

El Café es una de las bebidas más populares y consumidas a nivel internacional. Representa un motor en la economía nacional y familiar de más de 500 000 productores en México. Este cultivo enfrenta diversas problemáticas que dificultan su rendimiento.

Una de las alternativas para eficientizar la agricultura, es el monitoreo de los cultivos. Esto facilita el manejo y conlleva a la optimización de los recursos naturales, económicos y agrícolas. Por ello, la presente investigación se enfocó en determinar la superficie estimada del cultivo de café en Amatepec, Sultepec y Temascaltepec. Y determinar el grado de aptitud agroecológico para poder identificar zonas de interés para nuevas plantaciones.

Para el cálculo de la superficie del cultivo del café, se empleó una clasificación supervisada empleando el algoritmo spectral angle mapper (SAM), y en el caso de Amatepec se emplearon 4 índices más: NDVI, EVI, ARI I y ARI II. Los datos se validaron con 170 puntos de control tomados en campo con un sistema de posicionamiento global diferencial (DGPS, modelo Trimble SPS361). y una matriz cruzada en la que se obtuvo el porcentaje de acierto (puntos control que coinciden con la clasificación) y el error de comisión (cuando un píxel resulta clasificado en una categoría y en realidad pertenece a otra). El algoritmo SAM exhibió mejor desempeño en la clasificación del cultivo.

Se estimó una superficie de 5 958 ha para el cultivo del café en Amatepec, con un porcentaje de acierto de 78% y un porcentaje de error de comisión de 7%. En el caso de Sultepec se estimó una superficie de 8 507.88. con un porcentaje de acierto de 80% y un porcentaje de error de comisión de 19%. En Temascaltepec se estimó una superficie del cultivo de café de 24024.88 ha con un porcentaje de acierto de 80% y con un porcentaje de error de comisión de 11%.

Para la determinación del potencial agroecológico del café se realizó una revisión bibliográfica para establecer los rangos óptimos en los que se desarrolla el cultivo del café, de la especie arábica. Por el método de Saaty se calculó el peso de las variables ponderando a la variable temperatura como la más relevante con una consistencia de 0.03 lo que determina una buena coherencia y pertinencia de la relación de criterios evaluados. Se emplearon factores climáticos y edáficos obtenidos de INEGI y Cuervo-Robayo et al., 2014.

Las zonas optimas se definen como montañas bajas, con pendientes suaves a moderadas (menor a 30%), precipitaciones entre 1500 a 2000 mm, en zonas semicálidas con un rango de temperatura de 17°C a 22°C y sobre suelos que presentan buen drenaje y ricos en materia orgánica.

Las zonas con potencial medio se indican en pendientes mayores a 30%, con precipitaciones medias anuales de 500-1000 mm y de 1500-1800mm. En zonas templadas y semicálidas con un rango de temperatura de 14°C a -17°C y de 22°C a 24°C, respectivamente.

Las zonas con grado de aptitud bajo y muy bajo se localizan en pendientes abruptas, en zonas semifrías y cálidas. En suelos susceptibles a la erosión y con baja profundidad,

En Amatepec se estimaron 105.262 ha (0.16% de la superficie municipal) con potencial agroecológico optimo. 5790.09 ha (9.26% de la superficie municipal) con grado de aptitud medio. El grado de aptitud agroecológico bajo es el más extenso con 36544.49 ha (58.5%). El grado de aptitud muy bajo presenta 20050.14 ha (32.08%).

En Sultepec, el grado de aptitud optimo tiene una extensión de 4060.5 ha (7.34%), medio 49990.5 ha (90.48%), bajo con 994 ha (1.79%) y muy bajo 205 ha (0.37%).

En Temascaltepec, el potencial agroecológico optimo cuenta con 3533.96 ha (6.46%). El potencial medio con 21627.883 (39.55%), bajo con 16682.78 ha (30.5%) y muy bajo 12835.368 (23.47%).

En Sultepec el factor más limitado es la precipitación. En Temascaltepec el factor más limitante es la altitud. Mientras que para Amatepec el factor limitante es el suelo. Se determinó que actualmente el cultivo de café en Amatepec y Sultepec se lleva a cabo en sitios diagnosticados con potencial agroecológico medio y en el caso de Temascaltepec con potencial agroecológico bajo.

Las zonas de interés para nuevas plantaciones para Amatepec corresponden a 129.737 ha. En Sultepec 17 930.448 ha y en Temascaltepec 18 468. 579 ha.

Las zonas de interés se identifican sobre coberturas de bosque de pino y encino, así como bosques en recuperación.



Es imprescindible una revaloración de la localización de las parcelas cafetaleras, sobre todo para Amatepec, que el cultivo representa una fuente de ingresos para más de 300 productores, así como el PIB del municipio.

## 2. Abstract

Coffee is one of the most popular beverages consumed internationally. It represents a driving force in the national and family economy of more than 500,000 producers in Mexico. This crop faces several problems that hinder its yield.

One of the alternatives to make agriculture more efficient is crop monitoring. This facilitates management and leads to the optimization of natural, economic and agricultural resources. Therefore, this research focused on determining the estimated area of coffee cultivation in Amatepec, Sultepec and Temascaltepec. And to determine the degree of agroecological aptitude to be able to identify zones of interest for new plantations.

A supervised classification using the spectral angle mapper (SAM) algorithm was used to calculate the area of coffee cultivation, and in the case of Amatepec, 4 more indices were used: NDVI, EVI, ARI I and ARI II. The data were validated with 170 control points taken in the field with a differential global positioning system (DGPS, Trimble SPS361 model) and a cross matrix in which the percentage of success (control points that coincide with the classification) and the error of commission (when a pixel is classified in one category and actually belongs to another) were obtained. The SAM algorithm exhibited better performance in crop classification.

An area of 5,958 ha was estimated for coffee cultivation in Amatepec, with a success rate of 78% and a commission error rate of 7%. In the case of Sultepec, an area of 507.88 hectares was estimated, with a correct percentage of 80% and a commission error percentage of 19%, under the SAM algorithm, sentinel 2 image dated March 27, 2023. In Temascaltepec an area of coffee cultivation of 24024.88 ha was estimated with a percentage of accuracy of 80% and with a percentage of commission error of 11%.

For the determination of the agroecological potential of coffee, a bibliographic review was carried out to establish the optimal ranges in which the cultivation of coffee of the Arabica species is developed. The Saaty method was used to calculate the weight of the variables, weighting the temperature variable as the most relevant with a consistency of 0.03, which

determines a good coherence and persistence of the relationship between the evaluated criteria. For this purpose, climatic and edaphic factors obtained from INEGI and Cuervo-Robayo et al., 2014 were used.

Optimal zones are defined as low mountains, with gentle to moderate slopes (less than 30%), rainfall between 1500 to 2000 mm, in semi-warm zones with a temperature range of 17°C to 22°C and on well-drained soils rich in organic matter.

Zones with medium potential are indicated on slopes greater than 30%, with average annual rainfall of 500-1000 mm and 1500-1800 mm. In temperate and semi-warm zones with a temperature range of 14°C to -17°C and 22°C to 24°C, respectively.

Areas with low and very low suitability are located on steep slopes, in semi-cold and warm zones. In soils susceptible to erosion and with low depth,

In Amatepec, 105,262 ha (0.16% of the municipal area) were estimated to have optimum agroecological potential. 5790.09 ha (9.26% of the municipal surface) with medium degree of aptitude. The low degree of agroecological suitability is the most extensive with 36544.49 ha. The very low degree of aptitude presents 20050.14 ha (32.08%).

In Sultepec, the optimum degree of suitability has an extension of 4060.5 ha (7.34%), medium 49990.5 ha (90.48%), low with 994 ha (1.79%) and very low 205 ha (0.37%).

In Temascaltepec, the optimum agroecological potential is 3533.96 ha (6.46%). The medium potential with 21627.883 (39.55%), low with 16682.78 ha (30.5%) and very low 12835.368 (23.47%).

In Sultepec, the optimum suitability degree has an extension of 4060.5 ha (7.34%), medium 49990.5 ha (90.48%), low with 994 ha (1.79%) and very low 205 ha (0.37%).

In Temascaltepec, the optimum agroecological potential has 3533.96 ha (6.46%). The medium potential with 21627.883 (39.55%), low with 16682.78 ha (30.5%) and very low 12835.368 (23.47%).

In Sultepec the most limited factor is precipitation. In Temascaltepec the most limiting factor is altitude. While for Amatepec the limiting factor is soil. It was determined that coffee cultivation

in Amatepec and Sultepec is currently carried out in sites diagnosed with medium agroecological potential and in the case of Temascaltepec with low agroecological potential.

The areas of interest for new plantations in Amatepec correspond to 129,737 ha. In Sultepec 17 930.448 ha and in Temascaltepec 18 468.579 ha.

The areas of interest are identified on pine and oak forest cover, as well as forests in recovery.

It is essential to reevaluate the location of the coffee plots, especially for Amatepec, where the crop represents a source of income for more than 300 producers, as well as the municipality's GDP.

### 3. Introducción

Los cultivos son de interés de forma general, pero existen cultivos denominados estratégicos que son fundamentales para la seguridad alimentaria y la supervivencia. En México existen las condiciones para producir cerca de 900 cultivos de los cuales 12 son considerados estratégicos, y el cultivo del café ocupa el tercer sitio (SIAP, 2020).

El café es una de las bebidas más consumidas a nivel mundial, y es considerado también como un motor económico en 50 países. Los países productores más importantes son Brasil, Vietnam y Colombia, con los primeros puestos (OIC, 2023).

México ocupa el onceavo lugar como productor de café a nivel mundial, pero se destaca por su alta calidad, atribuida a las variedades cultivadas, el modo de cultivo y a los factores agroclimáticos asociados, principalmente altitud y humedad. El cultivo de café en México representa el 0.66% del PIB agrícola nacional y el 1.34% de producción de bienes agroindustriales, empleando a más de 500 000 productores en 14 estados y 480 municipios (Gutiérrez, 2015; Gomez Posada, 2018; SIAP, 2020; Jiménez *et al.*, 2020).

En el caso del Estado de México, se produce un café de altura y de excelente calidad. Cerca de 1.7 Ton de café por ha, siendo los municipios de Amatepec, Sultepec y Temascaltepec los más destacados (Inforural, 2021).

Sin embargo, a través de los años el cultivo del café en México ha atravesado problemáticas considerables en su producción. Pero es a partir de 2015 que se detectó una disminución

importante pese a que la superficie sembrada aumentaba. Se citan tres factores principales: las plagas, el envejecimiento de los cultivos y los impactos climáticos. Como factores secundarios se cita el precio injusto que se paga al productor, la gran cantidad de intermediarios en su comercialización, la volatilidad del precio y la poca capacidad de los productores para implementar tecnologías de economías de escala (Del Pilar, 2015).

Ante esta problemática, es importante realizar estudios que permitan el uso y manejo adecuado de los recursos, minimicen los riesgos climáticos y fomenten el uso racional y sustentable de los insumos agrícolas.

En este sentido y para un seguimiento adecuado del cultivo del café, es importante la determinación actual de la superficie cultivada y la identificación del grado de aptitud agroecológico. Por lo que en la presente investigación se estimó la superficie del cultivo del café en Amatepec, Sultepec y Temascaltepec utilizando firmas espectrales y el grado de potencial agroecológico mediante un análisis de evaluación multicriterio de factores ambientales y edáficos. Generando mapas que se pueden considerar como una herramienta para el productor ante los retos que enfrenta el cultivo en nuestro estado. Guiándolo a una agricultura sustentable, respetuosa con el ambiente y sobre todo eficiente.

## 4. Revisión de literatura

### 4.1 Generalidades del cultivo

#### Origen del cultivo, historia e importancia en México

El origen del café está indicado en la región de la alta etiofia, pero en México, se estima que llegó al país en 1795 y fue cultivado de manera orgánica por más de dos siglos. Actualmente también es cultivado de manera agroindustrial.

Guerreo (2015) menciona que el cultivo del café en México está prácticamente restringido a variedades Arábica (97% de la producción) y que destacan 4 estados en la producción del café: Chiapas, Veracruz, Puebla y Oaxaca.

En el caso del Estado de México, se produce un café de altura y de excelente calidad, cerca de 1.7 Ton de café por ha, siendo los municipios de Amatepec, Sultepec y Temascaltepec los más destacados (Inforural, 2021).

Las plantaciones de café en el Estado de México van de 0 a 80 años, con variedades Típica, Caturra, Pacamara, Costa Rica, Sarchumor y Garnica. Bajo una producción tradicional con baja tecnificación. El manejo del cultivo es tradicional, dirigido al café orgánico, por lo que se emplean en menor cantidad productos agroquímicos para su producción o mantenimiento.

El municipio de Amatepec es el principal productor de café en nuestro estado, contribuye a más del 50% de la producción, y es el cultivo predominante en el municipio (Velázquez, 2020).

Si bien la producción de café en Amatepec es para autoconsumo, se ha ido formalizando a través de asociaciones formales que incluían productores del municipio y socios aledaños, como lo fue La Asociación de Productores Unidos de Café de Amatepec (PUCA) y como lo es hoy la Cooperativa de Café Orgánico de Amatepec, CAFOA, la cual mantiene contratos de venta importantes y está empleando estrategias para promover el café como un producto distintivo de Amatepec (cita).

Los productores de café en Temascaltepec han sido galardonados con primeros lugares en el distintivo concurso nacional de Taza de excelencia, donde se evalúa la calidad de los cafés producidos en nuestro país en un ambiente de alta competitividad. El caso más destacado es el de don Federico Barrueta Barrueta en su Finca “La ilusión”, quien en 2018 ganó el segundo lugar en el certamen, manteniéndose dentro de los primeros cinco lugares hasta 2021.

### Descripción del cultivo

El café pertenece a la familia de las Rubiaceae, del orden Rubiales de la clase Magnoliataea. Se describen más de 100 especies, pero las más relevantes desde el punto económico son *C. arabica* (Linneo, 1753) y *C. canephora* (robusta). *C. arabica* presenta una población genéticamente más estable con respecto a *C. Canephora*. (Rojo, 2014).

## Descripción botánica

### Raíz

La raíz es de tipo cónica y pivotante, alcanza de 50 cm. a 60 cm. de profundidad. La raíz pivotante central es muy fuerte y a menudo múltiple, y disminuye su diámetro abruptamente. Presenta dos tipos de raíces de segundo orden: las raíces de sostén o axiales y las raíces laterales, las raíces axiales son de cuatro a ocho, son profundas y penetran verticalmente hasta 2 o 3 m de profundidad, se originan de forma lateral o en la bifurcación de la raíz y se ramifican en todas direcciones. Mientras que las raíces laterales, contienen las raicillas encargadas del intercambio de nutrientes con el suelo; comprendiendo estas últimas más del 80% del sistema radical, clasificándose en 4 tipos, 1) Raíces laterales superficiales, 2) Raíces laterales subsuperficiales, 3) Raíces portadoras de raíces absorbentes y 4) Raíces absorbentes, Ver Fig 1. (Arcila Pulgarín, 2007).

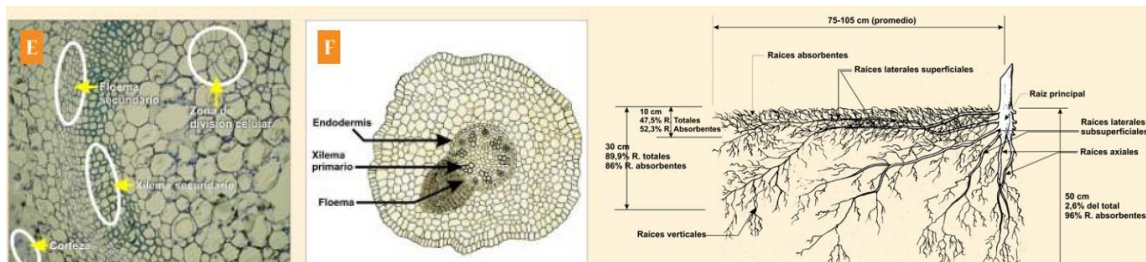


Figura 1 Morfología y anatomía de la raíz de café. En un corte transversal a) formación de la raíz secundaria en café b) y morfología y distribución de la raíz en *C. arabica* (Dedeca 1957, Adaptado de Suarez y Castro, 1954; tomado de Arcila Pulgarín, 2007)

### Tallo

Presenta un tallo central, con nudos y entrenudos formados por el crecimiento del ápice vegetativo. A partir del doceavo nudo aparecen las ramas primarias, dispuestas en inserción opuesta entre sí, formando pares alternados, con una arquitectura cónica. Las ramas laterales, donde se forman los frutos, surgen del lado superior de las axilas de las hojas que están insertadas al eje o tallo central. Estas ramas laterales o primarias forman a su vez, nuevas hojas y entrenudos, dando lugar a ramas secundarias y de estas a terciarias. Este esquema de formación sucesiva de ramas no se produce a cada nudo, sino en modo ocasional (González, 2010).

## *Hojas*

Las hojas son opuestas, de forma elíptica, generalmente acuminadas, levemente coriáceas, con la lámina y márgenes un poco ondulados y con estipulas interpeciolares. El color de las hojas varía de acuerdo con su maduración, ya que son de color verde claro cuando son jóvenes y verde oscuro cuando completan su desarrollo. La aparición del primer par de hojas verdaderas es a los 70 días después de la germinación (variedad caturra). El área promedio que alcanza una hoja a plena exposición solar es de 30 a 40 cm, y el número de hojas por árbol y el área foliar de la planta varía según la edad y la densidad de la población. La formación del follaje ocurre durante todo el año con picos crecientes a causa de condiciones climáticas favorables como temperatura y disponibilidad de agua (Arcila Pulgarín, 2007)

## *Flor*

El café exhibe inflorescencias denominadas glomérulos que se desarrollan a partir de las yemas ubicadas en las axilas foliares, en los nudos de las ramas, al ser de crecimiento opuesto, en cada axila se forman de 3 a 4 yemas o inflorescencias, por lo que en un nudo existen de 24 a 32 botones florales. Las flores son grandes de color blanco, olorosas y hermafroditas. El proceso de formación de flores, ocurre de la siguiente manera, cada yema tarda 12 semanas para dar origen a los botones florales, siendo un proceso en el que se distinguen 5 etapas principales: 1) Inducción floral (a nivel molecular y no diferenciable externamente, con una duración de 30 a 35 días), 2) desarrollo de botones florales en las yemas (con una duración de 45 días) 3) latencia (alcanzan de 4 a 6 mm, con una duración de 30 días que puede extenderse por factores agroclimáticos adversos), 4) rompimiento de latencia o preantesis (crecimiento de 3 a 4 veces más, con una duración de 6 a 10 días) y 5) antesis (apertura de la flor, con una duración promedio de 3 días) (Arcila Pulgarín, 2007).

Las flores del café poseen un cáliz descrito como rudimentario con forma de copa, el cual está fusionado al ovario y se desarrolla por encima de este, el cáliz está constituido por cinco hojas diminutas denominadas sépalos, la corola se desarrolla dentro del cáliz y aparece inicialmente como un tubo de color verdoso de 4 mm de largo, formado por la fusión de los cinco pétalos. Los carpelos (ovario, estilo y estigma; estructuras fértiles) presenta en su parte inferior al ovario, el cual encierra los óvulos, sobre el ovario y por debajo de la corola se inserta un estilo largo (Arcila Pulgarín, 2007).



Figura 2 Etapas de floración del café y morfología de los carpelos. A) Preantesis, B) y C) Antesis y D) Estructuras reproductivas, a la izquierda se observa el pistilo constituido por el ovario y estigma bifurcado, mientras que a la derecha se aprecian los estam estambres (Arcila, 2004; Tomado de Arcila, 2007).

### Fruto

El fruto es una drupa oblonga o esférica más o menos carnosa, encerrando dos núcleos delgados y pergaminosos. Los tejidos externos se separan en la madurez por una capa mucilaginoso del endocarpio, delgado, duro y coriáceo llamada pergamino. La pulpa de la cereza madura está formada por el exocarpio, que es la capa externa del fruto y representa el 43.2% del fruto en base húmeda, cuyo color varía (debido a la variedad o la madurez del fruto) desde el verde o amarillo hasta rojo o rojo intenso y algunas veces violeta hasta negro. Luego se encuentra el mesocarpio (11.8% del fruto en base húmeda), que está constituido por una capa gruesa de tejido esponjoso de 5 mm rico en azúcares y mucilagos que recubre los granos, los cuales se encuentran unidos por caras planas. La semilla está rodeada de una doble envoltura adherida al albumen, la primera membrana es el endocarpio, amarillo pálido y de consistencia dura y frágil, comúnmente llamado pergamino, representa el 6.1% del fruto en base húmeda; y la segunda, más fina que la anterior y adherida al grano (albumen), llamada película plateada (tegumento seminal), que representa el 0.2% del fruto en base húmeda. El endospermo, también llamado café verde, representa el 38.9 y 55.4% del fruto en base húmeda y base seca, respectivamente (Puerta et al., 1988).

El desarrollo del fruto dura de 220 a 240 días, dependiendo de la región, durante su desarrollo el fruto pasa por 5 etapas diferenciadas: 1) Primeras 7 semanas después de la floración (0-50 días), en la que ocurre un crecimiento lento, 2) semana 8 a 17 después de la floración (50-120 días), existe un crecimiento acelerado y el fruto adquiere su tamaño final, la semilla tiene consistencia gelatinosa, 3) semanas 18 a 25 (120-180 días) la semilla completa su desarrollo, adquiere consistencia sólida y gana peso, 4) semanas 26 a 32 después de la floración (180-



224 días) El fruto se encuentra fisiológicamente desarrollado y comienza a madurar y 5) después de la semana 32 (más de 224 días), el fruto se sobremadura y se torna de color violeta oscuro y finalmente se seca, en esta etapa el fruto generalmente pierde peso (Arcila Pulgarín, 2007).

Es importante considerar que el grado de maduración del fruto es considerado un factor preponderante en la calidad de la cosecha y el rendimiento en el beneficio y en la calidad en taza, de manera tradicional la cosecha ocurre de manera empírica cuando el fruto adquiere un color rojizo amarillo, aunque esto no siempre es signo de maduración.

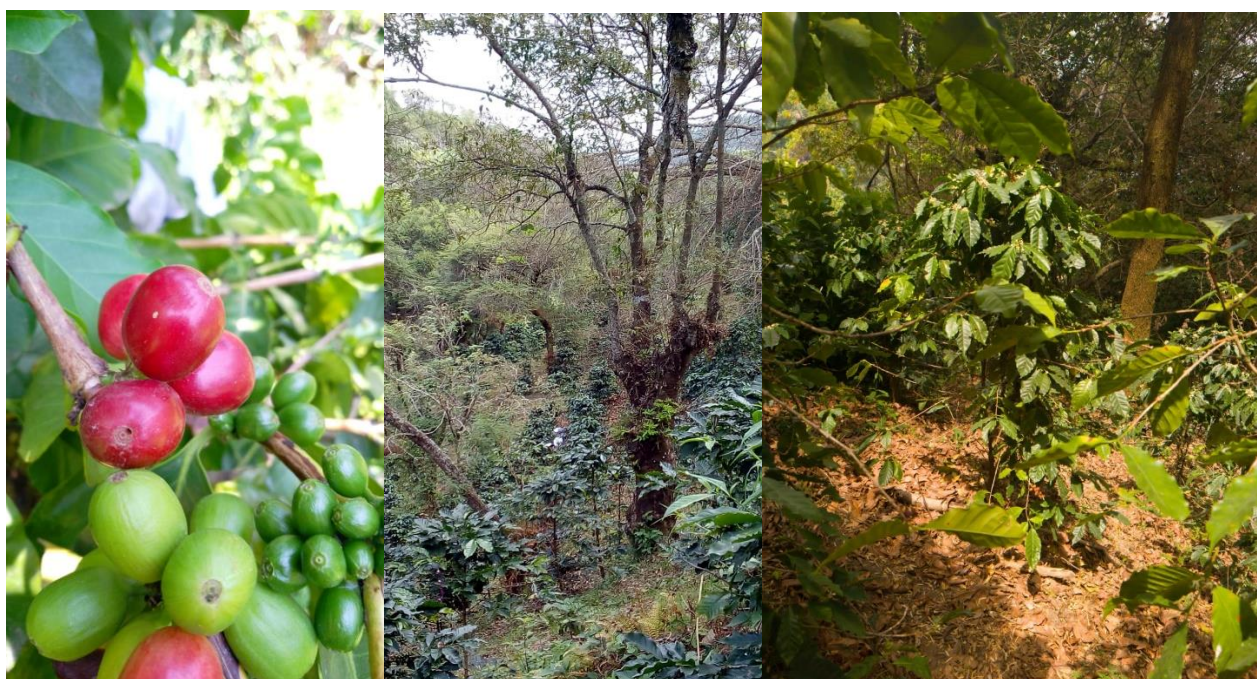


Figura 3 Cultivo de café en el sur del Estado de México. En A se observa el fruto en maduración, en B y C el sistema de cultivo tradicional bajo sombra; se aprecia vegetación nativa y un gran depósito.

### Variedades

Para el caso de la especie *C. arabica*, se conocen 57 variedades producidas en todo el mundo (WCR, 2024), y en México se distinguen 5 variedades cultivables; Typica, Bourbon, Maragogype, Caturra y Mundo Novo y dos híbridos: Garnica y Catimor (Cafés de México, 2020).

La variedad Typica es una de las más importantes a nivel internacional y en México, constituye una mayor diversidad genética. Originaria de Etiopía e introducido en México desde finales del siglo XVII, siendo la variedad mejor adaptada. Llamándose en algunas

zonas productoras como “Café criollo”. Con una excelente calidad en taza, pero con bajo rendimiento y alta susceptibilidad a plagas y enfermedades, así como a factores ambientales adversos (WCR, 2024).

La variedad Bourbon, tiene como origen la parte sur del continente africano, se piensa que su introducción en México fue a través de Chiapas procedente de Guatemala. Esta variedad se caracteriza por ser de porte alto y de excelente calidad en taza, aunque también es una especie susceptible con un rendimiento medio (Cafés de México, 2020 y WCR, 2024).

La variedad Maragogype es de porte alto con un rendimiento bajo, con hojas color bronce, una calidad muy buena en taza, de altura, con hojas muy grandes y entrenudos alargados, y constituye una mutación natural de la variedad Typica, descubierta en Maragogype, Brasil en 1870. El fruto es voluminoso y sensible a sequías (Cafés de México, 2020 y WCR, 2024).

Por otra parte, la variedad Caturra, presenta porte bajo, con hojas verdes, de buen rendimiento, con una calidad buena, de altura y con un tamaño promedio de grano, aunque también es una especie susceptible a plagas y enfermedades. Esta genéticamente relacionada con la variedad Bourbon, fue descubierta en Minas Gerais, Brasil. Es un cafeto que soporta inclemencias de viento, frío e insolación directa por lo que exige mayor cantidad de nutrientes y agua (WCR, 2024).

Mientras que la variedad Mundo novo, se caracteriza por hojas color verde y bronce, es de porte alto, con un tamaño de grano promedio, de alto rendimiento, de altura, con buen potencial en taza y es producto de un cruce natural entre Typica y Bourbon, en Brasil, descubierta en 1943 y llegó a México en 1951 (Cafés de México, 2020 y WCR, 2024).

Variedad Garnica, es el primer híbrido obtenido en México por cruzamiento de Mundo Novo 15, de maduración en rojo y Caturra Amarillo 13 producido por el Inmecafé en 1961. Su estructura esta constituida por tallos y ramas fuertes de frutos rojos, con alta producción (Cafés de México, 2020).

Por último, la variedad Catimor, es un híbrido artificial obtenido del Timor y Caturra Rojo, originario de Oeiras Portugal, cruzamiento efectuado en 1959. Es resistente a la Roya, los frutos y granos son semejantes a los de Caturra, su hibridación corresponde a la variedad Canéphora

y Árábica. -Híbridos resistentes a la Roya obtenidos en México No. CIFIC 5082 y No. CIFIC 1082 (Cafés de México, 2020).

### Ciclo fenológico

La escala “BBCH ampliada” (Hack et al.1992, y Hess et al., 1997) es una escala universal, con base en criterios fenológicos y mediante un conjunto de códigos numéricos consistentes. En esta escala se identifican los estados principales de crecimiento y desarrollo del café (del 0 a 9, correspondiente a la primera cifra en el código) y sus correspondientes estados secundarios (Arcila, 2007).

Por otra parte, Marín (2013) y Ramírez Builes (2014), indican que el ciclo fenológico del café comprende doce meses, con cuatro etapas bien marcadas siendo las siguientes:

- Floración: Las yemas se diferencian en flores o ramas, hay mayor desarrollo vegetativo, gran producción de ramas y hojas, máxima actividad radicular y mayor formación de pelos adsorbentes. Esta etapa presenta una duración de dos a tres meses.
- Desarrollo del fruto o llenado de grano: existe menor desarrollo vegetativo y una mayor intensidad del llenado del grano. Esta etapa presenta una duración de cuatro meses.
- Maduración: el crecimiento vegetativo es mínimo, se presenta la formación de nuevas yemas, menor actividad radicular y degradación de pelos adsorbentes. Esta etapa presenta una duración de tres meses.
- Descanso: existe cierto tipo de latencia, debido a que se inhibe el desarrollo de ramas y hojas, no hay adsorción de agua y nutrientes, las yemas se diferencian y crecen, pero no se abren. Esta etapa presenta una duración de dos meses.

En la zona de estudio, la floración ocurre en los meses de marzo a junio, pero en mayo se presentan las floraciones principales, el llenado del fruto se ha registrado de mayo a julio, la presencia de frutos maduros y consistente ocurre de julio a septiembre, mientras que la cosecha se distribuye de noviembre a abril (infografía).

### Factores agroclimáticos asociados al café

El cultivo del café está relacionado con la incidencia de elementos y factores del clima que benefician o afectan su desempeño. Los elementos del clima se describen como relativos a los fenómenos atmosféricos, es decir, temperatura, precipitación, viento, luz. Mientras que los

factores climáticos están relacionados con las condiciones del terreno como las geoformas y la pendiente.

Respecto a la temperatura, se menciona que ésta determina la calidad del producto del café, sobre todo en *C. arabica*. El rango óptimo se sitúa de 18°C a 22°C, si el intervalo de temperaturas es mayor al óptimo, se acelera el crecimiento vegetativo afectando la floración y fructificación, presentándose anomalías y aborto de la flor lo que reduce la producción y rendimiento de los cafetos. Por el contrario, las bajas temperaturas (inferiores a 7°C) afectan a la raíz, donde aparecen malformaciones, especialmente cuando se dan fuertes fluctuaciones a lo largo del día. La temperatura es un factor que está influenciado por el fenómeno de calentamiento global por lo que el cultivo puede ir desplazándose altitudinalmente a fin de obtener temperaturas más adecuadas. Se sabe que la temperatura influye en los procesos de infección, colonización, esporulación y sobrevivencia de patógenos, pero también en procesos fisiológicos como la fotosíntesis, evapo-transpiración, metabolismo entre otros (Loli, 2012).

Relacionado al factor de la temperatura, se encuentra la altitud, la cual modifica las características físicas del grano, el café de altura es de un color verde gris azulado, de menor tamaño, pero más denso y con una ranura irregular y cerrada, que desarrolla más atributos positivos como acidez y aroma por lo tanto exhibe un mejor sabor y calidad de bebida (Loli, 2012).

Por otra parte, la precipitación es un factor clave en el mantenimiento del cultivo, que para el café se requiere en un rango de 1 500 a 2 500 mm, con abastecimiento constante para un correcto crecimiento del cafeto (Loli, 2012).

En cuanto a la luminosidad, es considerada como un factor de acumulación que determina la productividad, este factor es medido a través de un componente denominado brillo solar. Se sabe que el café es una planta de días cortos, floreciendo en la temporada cuando la noche presenta mayor duración, el valor óptimo de brillo solar va de 4 a 7 horas de luz/día (Romero y Camilo, 2019).

Otro factor muy importante es el viento, el cual está relacionado con la evapo transpiración del suelo y la transpiración de las plantas a medida que aumenta su velocidad. Para el desarrollo

del cafeto es crucial que presente una baja velocidad, por lo que se utiliza el tutoreo de árboles en el cafetal para contrarrestar los efectos negativos viento (Romero y Camilo, 2019).

En cuanto a los factores del clima correspondientes a geoformas y pendientes se relacionan con un factor principal que es el suelo, las características óptimas del suelo para el cultivo del café son: un buen drenaje y permeabilidad, buena cantidad de materia orgánica, pendientes menores de 30% y de buena profundidad (igual o mayor a 0.7 m). Con respecto a las características químicas del suelo, el pH óptimo descrito para el café fluctúa de 5.5 a 6.5, un pH menor a este rango provoca toxicidad en la planta (Romero y Camilo, 2019).

### Sistemas de producción

Moguel y Toledo (1999) mencionan 5 sistemas productivos: rusticano, tradicional, policultivo comercial, monocultivo a sombra y monocultivo a sol. Siendo el rusticano el que presenta un menor impacto ecológico y el monocultivo a sol el que implica aspectos negativos al ambiente.

### Productividad

La productividad agrícola es un factor que integra la relación entre el rendimiento del cultivo (t/ha) y los insumos que se han invertido (dinero, mano de obra o agua).

El rendimiento promedio mundial del cultivo del café está alrededor de 0.7 t/ha, pero con producción más intensa en Brasil, Vietnam, Costa Rica, Colombia y Guatemala con un promedio de 1- 1.4 t/ha (Yara, 2024).

A nivel nacional, el rendimiento promedio es de 1.205 t/ha. Siendo Puebla el estado con el mayor rendimiento (2.543 t/ha) y Querétaro con el menor rendimiento (0.432 t/ha), mientras que el estado de México presenta un rendimiento de 1.184 t/ha (SIAP, 2020).

Por otra parte, Espinosa-García et al. (2016), realizan un estudio de la Productividad y rentabilidad potencial del cultivo del café (arábigo) en el trópico mexicano mediante escenarios de simulación y cartografía, encontrando que el cultivo del café es rentable cuando se produce 4.5 t/ha, identificando 381 000 ha con potencial para producir café en Veracruz, Puebla, Oaxaca, y Chiapas, siendo la región de Veracruz la que presentó mayor rendimiento.

Para poder elevar la productividad del cultivo del café, es necesario invertir en agricultura de precisión, maquinaria, aprender a utilizar correctamente los fertilizantes y mano de obra

calificada, para así minimizar efectos adversos de los factores que intervienen en la productividad.

Por otra parte, es necesario mencionar que el cultivo de café tiene un periodo de preproducción de tres años, con una vida productiva que puede alcanzar los 40 años. Se recomienda una densidad de siembra alta para maximizar rendimientos (Arcila, 2007).

La densidad de los cultivos es un tópico muy importante debido a factores como la competencia por los recursos y la maduración de las plantas. Y la respuesta del cafeto a la densidad de siembra depende de varios factores como: la variedad, el desarrollo foliar, el sistema de cultivo, las condiciones micro climáticas, entre otros. Por parte de la variedad, este factor está condicionado por el porte y el grado de exposición solar del cultivo, las variedades de porte bajo tienen menor expansión individual que las variedades de porte alto, existiendo una regla de que a menor expansión de la planta individual mayor será el óptimo de población y viceversa (Arcila, 2007).

Bajo condiciones de sombra plantas de porte alto y bajo, presentan mayor extensión con respecto a plantas a pleno sol. Mientras que la mayor respuesta obtenida ha sido a la fertilización nitrogenada y potásica (Arcila, 2007).

#### Principales plagas y enfermedades del cultivo del café

Para el café están reconocidas dos plagas principales, la broca y el minador de la hoja, la broca es un insecto coleóptero *Hypothenemus hampei* que afecta en su estado larval a los frutos del café y es exclusiva de este cultivo. Mientras que el minador de la hoja es una polilla *Perileucoptera coffeella*, que en estado larval consume el tejido de las hojas y ante infestaciones intensas producen defoliación, baja productividad y bajo rendimiento del cultivo. Para ambas plagas existen medidas de control, biológicas, químicas y culturales (Coral, 2012).

Por otra parte, se describen 5 enfermedades principales, pie negro, ojo de gallo, roya, nemátodo del café y arañero. La roya es la enfermedad más destructiva del café y de mayor importancia económica, provoca defoliación, reduciendo la capacidad fotosintética y el debilitamiento de árboles enfermos e incluso puede provocar muerte de ramas y árboles (SENASICA, 2016).



Para la zona de estudio, se han descrito dos plagas; broca y el minador de la hoja y las enfermedades: roya, ojo de gallo, mancha de hierro y fumagina (Pino-Miranda *et al.*, 2022; Barrera-Rojas *et al.*, 2023; Figueroa-Figueroa *et al.*, 2023 y Pérez-Constantino, 2023).

## 4.2 Teledetección

La teledetección es una técnica de adquisición de datos de la superficie terrestre que obtiene información del terreno sin estar en contacto físico, mediante satélites, que a través de la interacción electromagnética entre el terreno y el sensor generan una serie de datos los cuales son procesados para obtener información interpretable de la tierra (IGN, 2020).

La teledetección incluye cualquier tipo de fotografía, pero considera como base los siguientes elementos:

- 1) fuente de energía. Se tiene a la energía solar y Una fuente propia del sensor, tratándose de un foco externo al mismo (denominándose Teledetección pasiva) o un haz energético emitido por este (teledetección activa). Siendo la energía solar la fuente más importante.
- 2) Superficie terrestre. La superficie recibe la señal energética del sol o el sensor y la refleja o emiten de acuerdo con sus características físicas.
- 3) Un sistema sensor: constituido por el sensor y la plataforma que lo contiene, que capta la energía procedente de los diversos materiales del terreno, la codifica y graba o la envía directamente a un sistema de recepción terrestre
- 4) Un sistema de recepción-comercialización: en donde se reciben los datos recibidos de la plataforma, a los que se les realizan ciertas correcciones, y se graban en un formato apropiado para hacerlos accesibles a los potenciales usuarios
- 5) Un procesador: genera imágenes analógicas o digitales
- 6) Un intérprete: que analiza los productos generales emitidos por el procesador y genera un mapa temático interpretable
- 7) Un usuario final que analiza el producto temático final.

Sensores

### Resoluciones de un sensor.

Se describen 5 tipos de resoluciones distintas; espacial, radiométrica, espectral, temporal y angular. La resolución espacial nos indica el tamaño del pixel y el tipo de objetos que puede ser interpretado condicionando la escala de trabajo y la fiabilidad de la interpretación, en cuanto a la resolución radiométrica, la cual indica la capacidad del sensor para discriminar niveles o intensidades de radiancia, la resolución espectral, indica el número y anchura de las bandas espectrales que pueda discriminar el sensor. La resolución temporal indica el tiempo de paso de l satélite sobre la vertical de un punto, es decir la periodicidad de adquisición de imagenes de una misma zona, esta periodicidad está determinada por el tipo de órbita del sensor, el ángulo de barrido y la velocidad del satélite. En cuanto a la resolución angular, se refiere a la capacidad de un sensor de tomar imágenes oblicuas, lo que posibilita la toma de imágenes estereoscópicas para la reconstrucción de relieve (Pérez y Muñoz, 2006).

### Especificaciones de las imágenes

Las características de las imágenes dependen del satélite que las obtiene. En un principio el desarrollo de la teledetección es vinculado con la carrera armamentista, científica y tecnológica que libran las primeras potencias, donde primero se desarrolló el uso y análisis de fotografías aéreas, y posteriormente el alunizaje propicio el desarrollo de satélites, la primer fotografía de la tierra tomada desde el espacio fue en 1959 tomadas por el explorer y las primeras fotografías orbitales por el satélite Mercury-Atlas, fue en este punto que surge el concepto de teldetección o "Sensing remote". Debido a la gran cantidad de aplicaciones se pueden obtener de forma gratuita las imágenes satelitales en diversas plataformas como el programa Copernicus (Reuter, 2009).

Copernicus, permite la descarga de imágenes Sentinel, dichas imágenes deben su nombre al satélite que captura los datos, esta serie de satélites fueron puestos en órbita desde el 2014 por la Agencia Espacial Europea, con el fin de obtener información acerca de la agricultura de precisión, movimiento de suelos, algas marinas, gestión del agua, monitorea miento de bosques, monitorización del clima, entre otras (EUSPA, 2021).

Los satélites para el ámbito Land, son tres: Sentinel 1, Sentinel 2 y Sentinel 3. Donde el sentinel 1 obtiene datos de tipo radar mientras que sentinel 2 y 3 multiespectral (con 10 y 1 bandas



respectivamente). Sentinel 1 presenta mayor resolución (5-20 m). La captura de imágenes se realiza de manera periódica cada 6 días (G&B, 2019).

La resolución de las bandas en Sentinel 2 es diferente y parte desde 10m hasta los 60m, como se aprecia en la tabla 1(G&B, 2019).

*Tabla 1. Resolución de las diferentes bandas de Sentinel.*

	<i>Longitud de onda</i>	<i>Resolución</i>
<i>Banda 1 Aerosol</i>	0.43-0.45	60
<i>Banda 2 Blue</i>	0.45-0.52	10
<i>Banda 3 Green</i>	0.54-0.57	10
<i>Banda 4 Red</i>	0.65-0.68	10
<i>Banda 5 Red Edge 1</i>	0.69-0.71	20
<i>Banda 6 Red Edge 2</i>	0.73-0.74	20
<i>Banda 7 Red Edge 3</i>	0.77-0.79	20
<i>Banda 8 Near Infrared (NIR) 1</i>	0.78- 0.90	10
<i>Banda 8A Near Infrared (NIR) 2</i>	0.85-0.87	20
<i>Banda 9 Water vapour</i>	0.93-0.95	60
<i>Banda 10 Cirrus</i>	1.36-1.39	60
<i>Banda 11 SWIR 1</i>	1.56-1.65	20
<i>Banda 12 SWIR 2</i>	2.10-2.28	20

Las características de las imágenes y los productos obtenidos se mencionan en la tabla 2 (European Space Agency – ESA, 2020).

*Tabla 1 Nivel de procesamiento de imágenes Sentinel*

<b>Tipo de imagen</b>	<b>Nivel de procesamiento</b>
<i>Sentinel 2 - L1C</i>	Ortorectificadas sin corrección atmosférica (Con niveles de reflectancia por encima de la atmosfera TOA)

### Tratamiento de imágenes

El tratamiento de las imágenes previo a su análisis trata de restaurar la imagen, a través de dos correcciones, una geométrica y otra radiométrica (Pérez y Muñoz, 2006).

Las correcciones geométricas nos permiten reconstruir la geometría de la imagen, adaptándola a una determinada proyección cartográfica (georreferenciación). En este procesamiento se corrigen las distorsiones espaciales en los píxeles debido a la perspectiva cónica con que se toma la imagen desde el sensor, obteniéndose una perspectiva ortográfica; ortoimagen, además se incluye cualquier tipo de cambio de escala, giros o desplazamientos sobre la imagen, para este proceso se necesitan puntos de apoyo, de los cuales se conocen sus coordenadas y características (Pérez y Muñoz, 2006).

Las correcciones radiométricas, tienen el objetivo de restablecer los valores digitales de la imagen depurando cualquier anomalía en su registro, ya sea por defectos del sistema sensor o por las condiciones de la toma. En este proceso se toma en cuenta diferentes magnitudes físicas relativas a la radiación electromagnética, y se calibra el efecto de la atmosfera sobre la toma de la imagen. El efecto de la atmosfera se denomina atenuación, el cual influye sobre el valor de reflectancia del terreno, la reflectancia se obtiene a partir de la proporción de irradiancia  $E$  y radiancia  $L$ , la Irradiancia  $E$  se refiere a la cantidad de energía electromagnética que recibe un cuerpo desde la fuente que la ilumina (el sol o el propio satélite dependiendo el tipo de teledetección; pasiva o activa, respectivamente), mientras que la radiancia  $L$  se refiere al nivel de gris que se puede apreciar en la imagen (Pérez y Muñoz, 2006).

El valor de reflectancia es característico de cada material, si el valor es próximo a la unidad significan objetos muy claros o brillantes, mientras que si el valor de reflectancia es cercano a 0 significan objetos muy oscuros, este valor también depende de la longitud de onda o banda que se este analizando de la imagen (Pérez y Muñoz, 2006).

Existen múltiples programas con los que pueden realizarse las correcciones a las imágenes, sin embargo, para el caso de SNAP, el cual es un programa gratuito, las herramientas

destinadas a la corrección de imágenes, específicamente a la corrección atmosférica es la Sen2Cor, para pasar las imágenes de nivel 1C a 2ª, y para afinar la resolución de las bandas debido a que Sentinel no cuenta con una banda pancromática que estandarice todas las bandas a una misma resolución, se re muestrea la imagen a 10 m. con la herramienta Sen2Res (G & B., 2019).

### Análisis de imágenes.

Para el análisis de imágenes de satélite se toman en cuenta dos métodos, el primero es la fotointerpretación y el segundo es aplicar técnicas de tratamiento digital de información multiespectral (Pérez y Muñoz, 2006).

La interpretación visual o fotointerpretación requiere de un juicio experto, para poder extraer información temática a partir de las cualidades de la imagen, como son brillo, color, textura, forma y tamaño de los elementos que la componen (Pérez y Muñoz, 2006).

Mientras que el tratamiento digital se encamina al uso de técnicas matemáticas y estadísticas implementadas mediante algoritmos en programas informáticos relativos a los SIG. Estas técnicas se desarrollan en tres fases: entrenamiento, asignación y verificación (Pérez y Muñoz, 2006).

La fase de entrenamiento determina áreas piloto para cada una de las categorías en las que se pretende clasificar la imagen, de ellas se toman las medidas estadísticas de cada una de las bandas para interpolarlas al resto de la imagen (Pérez y Muñoz, 2006).

La fase de asignación tiene como objetivo la categorización de todos los píxeles de la imagen atribuyéndoles una categoría informacional, empleando múltiples criterios que se fundamentan en teorías probabilísticas y que reciben el nombre de clasificadores: de mínima distancia, de paralelepípedos, de máxima probabilidad, de lógica borrosa, redes neuronales, clasificadores en árbol, entre otros (Pérez y Muñoz, 2006).

La fase de verificación analiza la bondad de los resultados obtenidos en la clasificación de temática contrastándolos con datos tomados en campo (Pérez y Muñoz, 2006).

La definición del tamaño y forma de la muestra son muy importantes y se tienen que llevar a cabo de modo riguroso. El resultado obtenido se recoge en una matriz de confusión de la cual se infiere la fiabilidad de los resultados obtenidos (Pérez y Muñoz, 2006).

Clasificación supervisada

### Firmas espectrales

Por otra parte, las firmas espectrales, son una herramienta de la teledetección cuantitativa y hacen posible la identificación de distintos objetos de la tierra y del cielo, presentes en imágenes digitales. Debido a que los elementos que en ella se encuentran la hacen poseer características particulares que contiene información sobre la materia con la que interaccionó y es característica; única, siendo clave para la determinación de áreas similares del cultivo de café. En los últimos años se ha generalizado el uso de imágenes satelitales para detectar áreas homogéneas en campos tanto ganaderos como de siembra (Tosini, 2012).

Las firmas espectrales son analizadas como curvas específicas, donde el eje x representa las longitudes de onda y "Y" la reflectancia.

Para realizar el análisis de las firmas espectrales es importante considerar el tamaño del objeto de estudio, la escala de detalle y la temporalidad, factores que se encuentran ligados a los cuatro tipos de resolución de los satélites; 1) Resolución espacial: representada por píxeles y corresponde a la medida angular más pequeña que el sensor puede detectar, 2) Resolución espectral: el intervalo de las longitudes de onda al que es sensible un sensor y a la cantidad de sensores con los que cuenta un equipo, 3) Resolución radiométrica: que se refiere a la cantidad mínima de energía que se requiere para incrementar el valor de un píxel en un nivel digital (ND) y la resolución temporal; que se refiere al intervalo de tiempo entre adquisiciones de imágenes sucesivas de una misma porción de superficie.

Para este caso específico, donde el objeto de estudio es una especie vegetal, su comportamiento espectral, es decir, la cantidad de energía reflectante medida en cada individuo o planta a lo largo del espectro depende de la naturaleza de esta misma, de sus interacciones con factores climáticos como la radiación solar, de la disposición de nutrientes y agua, su estado fitosanitario y en muchos casos el estado fenológico en el que se encuentra. Los factores más dominantes en los análisis de reflectancia en las hojas son: los pigmentos

en las células mesofílicas retenedoras (clorofila, carotenos), células mesofílicas absorbedoras que controlan la reflexión y dispersión de energía en el infrarrojo, y cantidad de agua en la planta. (Ángel López, 2012)

### Índices de vegetación

Para categorizar la información que nos ofrecen las imágenes satelitales multirespectrales o multibanda se utilizan los índices, que para este caso específico permiten discriminar características de la vegetación (Muñoz, 2013).

Los índices son un conjunto de operaciones algebraicas efectuadas sobre los valores numéricos de los píxeles, usando dos o más bandas pertenecientes a una misma escena. Un índice de vegetación es definido como un parámetro calculado a partir de valores de la reflectancia a distintas longitudes de onda, y que es particularmente sensible a la cubierta vegetal y son utilizados para realizar una mejor discriminación entre el suelo y la vegetación reduciendo el efecto de relieve en la caracterización espectral de las diferentes cubiertas (Muñoz, 2013).

NDVI (Rouse et al. 1974)

Es el índice más conocido y utilizado, principalmente por la sencillez de su estimación y el rango de variación (-1 y +1) por lo cual es más fácil la interpretación, donde los valores cercanos a 0 se refieren a lugares donde empieza la ausencia de vegetación, sin embargo, es sensible a la reflectividad del suelo sobre el que se sitúa la especie vegetal, lo que limita su potencial de discriminación. Este índice utiliza las bandas de infrarrojo cercano y rojo mediante la siguiente ecuación:  $NDVI = (NIR - Red) / (NIR + RED)$  (Muñoz, 2013).

Índices basados en el cálculo de distancias

Por otra parte, existen índices que tratan de separar la información entre vegetación y suelo, ver Fig. 1. , basándose en el uso de una línea del suelo y la distancia desde ella, la línea representa una ecuación lineal que describen los valores de reflectancia de la banda roja e infrarrojo para los valores que representa el suelo desnudo, con esto se puede obtener la pendiente y la distancia al origen, así los valores que tienen la misma relación en los valores de reflectancia de las bandas rojas e infrarrojas son asumidos como suelo desnudo y los que

caen lejos de la línea de suelo con mayor reflectancia en el IR cercano, se consideran vegetación (Muñoz, 2013).

Figura 4 Índices basados en la estimación de la distancia a la línea del suelo (Muñoz, 2013).

Nombre del Índice de Vegetación	Fórmula	Características	Autor y año
PVI Perpendicular	$PVI = a IRC - R + b / (a2 + 1)^{1/2}$	Usa la distancia perpendicular de cada pixel a la línea del suelo.	Richardson y Wiegand 1974
DVI De diferencia	$DVI = a * IR\ cercano - Rojo$ a = pendiente de la línea de suelo	Un valor de cero indica suelo desnudo, los menores de cero, agua y los mayores de cero, vegetación.	Richardson y Everitt 1992
SAVI De suelo ajustado	$SAVI = [(IRC - R) / (IRC + R + L)] (1 + L)$	Incorpora una constante de suelo, la cual se usa de acuerdo con vegetación de baja, intermedia o alta densidad. Considera la influencia de la luz y del suelo oscuro en el índice.	Huete 1988
TSAVI De suelo ajustado transformado	$TSAVI_1 = \frac{a(NIR - a * RED - b)}{RED + a * NIR - a * b}$ a = pendiente de la línea de suelo b = Intercepto de la línea de suelo	Considera la pendiente y el intercepto de la línea de suelo. Mucho efecto del suelo de fondo. Tiene varias modificaciones de transformaciones.	Baret y Guyol 1991
MSAVI De suelo ajustado, transformado	$MSAVI = SAVI$ con $L = 1 - 2 * s * NDVI * WDVI$ $s = Pendiente\ de\ la\ línea\ de\ suelo$ $WDVI = IRC - s * R$	Índice de gama limitada: $-1 < MSAVI < 1$ . L no es a priori, sino que calculada. Reduce la incerteza del SAVI $\pm 2.5\%$ a $\pm 1.6\%$ . Es similar al WdVI en la reducción del ruido del suelo, pero sus valores de índice de vegetación son mayores.	Qi, Kerr, Chehbouni, Huete 1994
MSAVI2 2° de suelo ajustado transformado	$MSAVI2 = \frac{(1/2) * (2 * (NIR + 1) - \sqrt{(2 * NIR + 1)^2 - 8 * (NIR - red)})}{2}$ $^2 = Elevado\ al\ cuadrado$	Es la segunda modificación del SAVI. Es como una repetición del MSAVI que básicamente utiliza procesos iterativos y sustituye el factor L del MSAVI por $1 - MSAVI(n-1)$ . En el proceso, se elimina la necesidad de pre calcular WdVI, NDVI y encontrar la línea de suelo.	Qi et al. 1994
WDVI De diferencia Ponderada	$WDVI = IR - a * ROJO$ a = Pendiente de la línea de suelo	Es matemáticamente más simple. Como el PVI, el WdVI es muy sensible a las variaciones atmosféricas.	Clevers 1988

### Algoritmo SAM (Bardman, J. W.)

El algoritmo Spectral Angle Mapper (SAM), determina el ángulo formado entre el espectro de referencia y el espectro de la imagen, manejándolos como vectores en el espacio, con dimensionalidad igual al número de bandas de la imagen. El resultado de la comparación es la diferencia angular, expresada en radianes a partir de la siguiente expresión (Kuching, 2007):

$$SAMCD = \alpha = \cos^{-1} \frac{\sum_{i=1}^N X_i t_1 X_i t_2}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i t_1)^2 \sum_{i=1}^N (X_i t_2)^2}}$$

Donde: N: Número de bandas. Xi : Pixel

### 4.3 Modelo de Evaluación multicriterio

El propósito de la evaluación multicriterio es ofrecer alternativas a problemas complejos en los que interfieren múltiples variables, con diversos objetivos y criterios que deben incorporarse simultáneamente, generando “soluciones compromiso” y jerarquizaciones de las alternativas de acuerdo con su grado de atracción (Barredo, 1996). Estas variables pueden ser factores o restricciones y sirven de soporte para la diversidad de objetivos, frecuentemente relacionados con la toma de decisiones espaciales

El método se desarrolla bajo el modelo de datos espaciales raster, con la misma estructura. Se basa en la compensación y ponderación de variables, ya sean determinantes o factores de aptitud. El EMC permite obtener mapas que expresen la evolución potencial para cada categoría en el uso del suelo o sistemas productivos, donde se indiquen procesos o ponderaciones para cada factor

Estos modelos se basan en la teoría de decisión para explicar y predecir el comportamiento de los agentes que toman la decisión y los indicadores económicos, puede ser representado en una matriz P de m filas y n columnas denominada matriz de evaluación o impacto, cuyos elementos representan la evaluación de la alternativa j-esima en el iesimo criterio.

### 4.4 Zonificación agroecológica

La zonificación agroecológica de los cultivos es una estrategia implementada por la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y alimentación) desde 1978, con el objetivo de apoyar a los países, sobre todo en vías de desarrollo para una mejor producción de alimentos. El primer estudio, en África en 1978, sentó las bases para la determinación de zonas que tuviesen el potencial óptimo para cultivar ciertos cultivos de interés, de allí se elaboró una guía técnica que contenía todas las especificaciones del modelo, en primera instancia son clave los factores agroclimáticos, el suelo, y el rendimiento de los cultivos, a partir de esta fecha se han elaborado múltiples zonificaciones agroecológicas en cultivos de interés como en el caso de México de la vainilla, el cacao, la yuca, la caña de azúcar, el aguacate, por citar algunos (Jiménez *et al.*, 2004; Rivera *et al.*, 2012; Garrido, 2013).

En cuanto al tema específico de esta investigación, a nivel internacional se han realizado múltiples investigaciones para determinar zonas con potencial óptimo para el cultivo del café, en donde se destacan regiones, enfoques y metodologías. Por ejemplo, la investigación de

Chemura *et al.* (2021) que realizan una zonificación agroecológica con un programa de simulación y de inteligencia artificial en donde se analiza también el cambio climático, prediciendo la idoneidad actual y futura de seis cafés catalogados como especiales de primera calidad en Etiopía, en el modelo se evidencia la importancia de las variables climáticas para cafés de especialidad. Además, obtuvieron que el 27% de la superficie del país es apta para producir café, sin embargo, de este porcentaje sólo el 30% es apto para producir cafés especiales, siendo el café Nekemte el que posee mayor porcentaje de zonas aptas, y que el cambio climático afectará significativamente el sector etíope de cafés especiales en zonas específicas, recomendando que se deben adoptar medidas para incrementar la resiliencia al efecto en dichas zonas.

A nivel nacional para el cultivo del café tenemos las investigaciones de Schroth *et al.* (2009), Rivera *et al.* 2013, González y Hernández (2016), Aceves *et al.* (2018) y Aceves *et al.* (2020). González y Hernández (2016) realizan la determinación de zonas agroecológicas para el cultivo del café en Atoyac Guerrero el cual concentra la mayor superficie de producción, bajo un modelo teórico y basado en los preceptos de la FAO, encontrado 7, 163.47 ha de superficie con potencial óptimo, 28 143.75 ha con potencial medio, 62 130.65 ha con potencial bajo y 58 411.8 ha con potencial muy bajo. Sin embargo, esta investigación no contempla los efectos del cambio climático que como ya se mencionó con anterioridad es un factor clave para la estimación de zonas con potencial óptimo que podrían considerarse para futuras plantaciones y los factores evaluados se limitaron a factores climáticos y edáficos. Mientras que Schroth *et al.* (2009) y Aceves *et al.* (2020) realizan investigaciones predictivas (para el 2050) y consideran el factor de cambio climático en zonas productoras importantes del *C. arabica*. Schroth *et al.* (2009) en su investigación predicen una disminución del hábitat para el cultivo del café para la sierra madre de Chiapas para el año 2050 y una importante redistribución geográfica consecuente de los cambios negativos del cambio climático. Mientras que Aceves *et al.* (2020), encontraron resultados muy interesantes en la región de Tabasco, en primer lugar sus resultados demuestran que el café es producido en su mayoría en zonas que nos son aptas para este cultivo, determinan 59,400.24 ha con potencial óptimo contra las 2,034,227.52 ha que bajo las condiciones climáticas actuales existen, en segundo lugar determinan que para el 2050 se verán reducidas hasta 67% las actuales áreas edafoclimáticas más aptas para el cultivo del *C. arabica* en Tabasco.



Rivera et al. (2013), realizan un análisis de la vulnerabilidad de la producción del café ante el cambio climático, mediante un modelo teórico, encontrando que existe riesgo de la pérdida media de la producción de *Coffea arabica* de 7 a 10% en la región productora del estado de Veracruz, debido principalmente a la disminución de la precipitación, teniendo menor importancia el cambio de la temperatura del aire.

Aceves et al (2018) realizan una investigación de la determinación de zonas agroecológicas para el cultivo del café en el Estado de Tabasco, pero para la especie *C. canephora* o robusta, encontrando que la mayoría del estado presenta condiciones edafoclimáticas actuales aptas para el desarrollo de este cultivo, sin embargo, sólo el 5% de la superficie es considerada como muy apta, donde destacan el municipio de Cardenas. Por otra parte, la simulación para el 2050 se llevó a cabo bajo tres escenarios de simulación, donde se encontró que bajo ningún escenario existía reducción de la superficie apta para el cultivo de café robusta, pero que si existe diferencia en superficie muy apta (una disminución de hasta 92.46%) en el peor escenario de cambio climático.

A nivel estatal no se han encontrado investigaciones referentes a zonificaciones agroecológicas del cultivo del café.

## 5. Planteamiento del problema

A partir del 2015 se detectó una disminución de la producción del cultivo del café pese a que la superficie sembrada aumentaba, se citan tres factores principales: las plagas, el envejecimiento de los cultivos y los impactos climáticos. Como factores secundarios se indican el precio injusto que se paga al productor, la gran cantidad de intermediarios en su comercialización, la volatilidad del precio y la poca capacidad de los productores para implementar tecnologías de economías de escala (Del Pilar, 2015). México exporta alrededor del 80% de su producción, y se han realizado estimaciones de un aumento de la producción en un 400% para el 2030 (Del Pilar, 2015 y SADER, 2018), por ello es importante realizar estudios que permitan el uso y manejo adecuado de los recursos, que minimicen los riesgos climáticos y fomenten el uso racional y sustentable de los insumos agrícolas. La determinación y cuantificación de zonas óptimas para el cultivo del café puede resolver los tres problemas principales del cultivo del café, citados con anterioridad, al identificar los patrones y distribución

de las principales plagas (tipificación de riesgo fitosanitario), al realizar y fomentar nuevas plantaciones (que incentiven la diversidad genética de los cultivos) y al reducir los riesgos del impacto climático al seleccionar zonas que cuenten con los factores agroclimáticos óptimos descritos para el cultivo disminuyendo así el uso de insumos agrícolas. Por lo que en la presente investigación mediante un enfoque holístico se evaluarán los factores agroclimáticos asociados al cultivo, así como los problemas fitosanitarios que enfrenta el café y la determinación de áreas potenciales mediante firmas espectrales, que permita ser una herramienta para el productor ante los retos que enfrenta el cultivo en nuestro estado guiándolo a una agricultura sustentable, respetuosa con el ambiente y sobre todo eficiente.

Además, Medina-Meléndez identifica como sector clave el factor humano en la producción del café en un estudio de caso en Chiapas, mencionando la falta de tecnificación del cultivo, el mal manejo de la plantación, la falta de asesoría técnica para la transformación del cultivo convencional a cultivo orgánico. En este rubro, la determinación de zonas óptimas para el café constituye una herramienta para el cafecultor, debido a que se sintetiza la basta información disponible acerca de los requerimientos del cultivo del café, así como los factores de restricción del cultivo mediante un producto (mapa) de fácil comprensión, universal (que cualquier persona sin importar su capacitación o formación pueda comprenderlo), con precisión y claridad.

## 6. Preguntas de investigación e Hipótesis

Pregunta de investigación ¿Qué zonas presentan potencial óptimo para el establecimiento de nuevas plantaciones del cultivo del café en el Estado de México?

Hipótesis: Los factores agroecológicos, y firmas espectrales del cultivo del café permitirán determinar zonas óptimas para plantaciones futuras brindando un mayor beneficio en el establecimiento y fortalecimiento del cultivo del café en la entidad mexiquense.

## 7 justificación

El café se considera un cultivo estratégico debido a los ingresos que provee al país, provenientes en gran parte del café orgánico, haciendo destacar al país a nivel internacional (exportando 28 000 Ton), con aspectos ecológicos y sociales positivos, ya que está asociado

a comunidades indígenas y marginadas, siendo en su mayoría pequeños productores, lo cual incentiva el crecimiento económico de dichas comunidades y la calidad de vida de los individuos. Las cifras indican que el cultivo del café orgánico representa el 32.5% de la superficie cultivada para alimentos orgánicos, (PROFECO, 2018). En cuanto a los aspectos ecológicos de este tipo de cultivo, Moguel y Toledo (1999) mencionan “proteger los suelos de la acción erosiva, favorecer regímenes climáticos y ambientales locales y regionales y mantener una gran diversidad de plantas y animales, ya que imita la estructura, biodiversidad y ciclo de nutrientes del bosque aportando una cantidad importante de hojarasca para el ciclaje de nutrientes”.

Además, se proyecta un aumento para el 2030 en el consumo y producción nacional de 0.14 millones de toneladas y de 0.82 a 4.70 millones de toneladas, respectivamente, lo cual representa un crecimiento acumulado de 16.48 y 471.46% respectivamente (SADER, 2018).

Por otra parte, el estado de México ha tenido protagonismo en los últimos años por producir un café de excelente calidad, con una superficie de 549.06 ha de cultivo y una producción de 622.29 Ton (Con un rendimiento de 1.18 Ton/ha), siendo los municipios más representativos: Temascaltepec, Sultepec y Amatepec (El sol de Toluca, 2020; Inforural, 2021).

Aunque también es importante considerar la situación actual de los cultivos de café, los cuales son mermados por diferentes plagas y enfermedades que afectan la calidad, producción y el rendimiento del cultivo, que en consecuencia aumentan los insumos, y que de forma general producen la baja rentabilidad y grandes fluctuaciones en el precio internacional. Por lo tanto, es imprescindible proponer estrategias que permitan el manejo, gestión y planeación del cultivo del café, que muestren la información de forma dinámica, asertiva y detallada para identificar las zonas óptimas para el establecimiento de futuras plantaciones permitiendo al caficultor elevar la calidad y producción por ende el rendimiento de este cultivo. Considerando además que el cultivo del café en el Estado de México recibe apoyos económicos estatales para su expansión, por lo que para garantizar el éxito de este cultivo, es necesario identificar las zonas óptimas mediante un análisis multicriterio considerando los factores agroecológicos, fitosanitarios y de área potencial que requiere el cultivo, lo cual será encaminado a disminuir el uso de insumos químicos y la contaminación ambiental y aumentar la eficiencia y rendimiento del cultivo para fomentar una caficultura responsable y eficiente en el Estado.

Con la determinación de zonas óptimas para el cultivo del café en el estado de México, se proporcionara un marco global para la evaluación y planificación de los recursos, que maneje la amplia información descrita acerca de los requerimientos del café y que se adecue a las condiciones típicas y únicas de la zona de estudio, de esta manera, las tecnologías constituirán una herramienta para el ordenamiento de las plantaciones de café en el Estado de México que será utilizado como un instrumento de gestión adecuado en la solución de conflictos de uso de las tierras, así como también servirá como referente para las plantaciones futuras para con esto contribuir al mayor rendimiento y calidad de café.

## 8. Objetivo general

Identificar las zonas con mayor aptitud agroecológica para el cultivo del café, mediante firmas espectrales y un modelo de evaluación multicriterio de acuerdo con la metodología descrita por la FAO (1978) para generar un mapa que pueda ser empleado para la toma de decisiones para los cafecultores de la región.

## 9. Objetivos específicos.

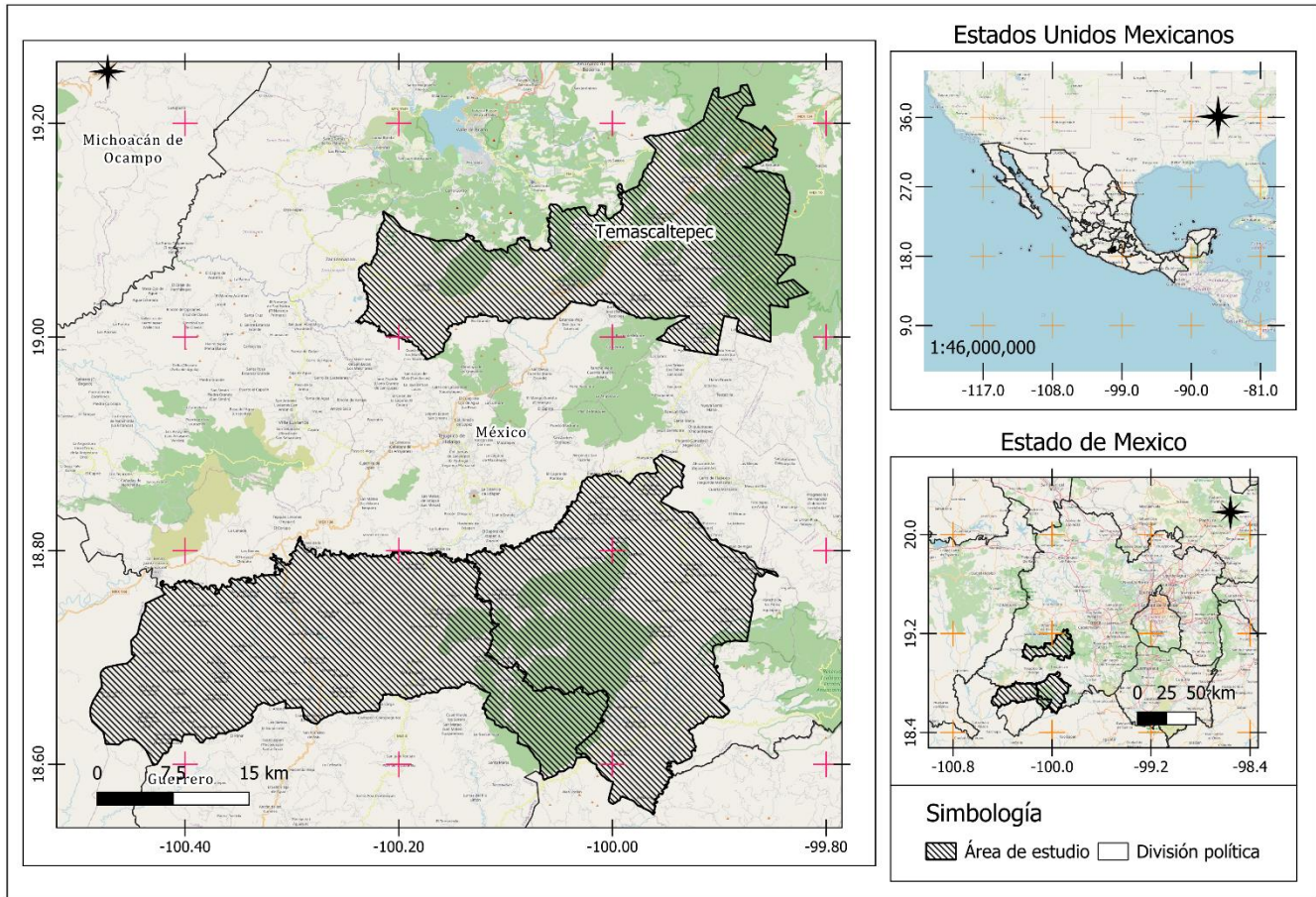
- Identificar la localización actual del cultivo del café en los municipios de Amatepec, Sultepec y Temascaltepec, mediante firmas espectrales, características edáficas, administrativas y climáticas.
- Elaborar mapas temáticos de los factores necesarios para el modelo de evaluación multicriterio con los valores obtenidos por la matriz de expertos y la matriz de pesos.
- Zonificar los factores agroecológicos en categorías de aptitud para el cultivo de café en la zona de estudio para las condiciones ambientales actuales y futuras.

## 10. Metodología

### 10.1 Área de estudio

El estudio se llevará a cabo durante un año en tres zonas productoras de café, Amatepec (cabecera municipal), Sultepec (Rincón del Cristo) y Temascaltepec (San Andrés de los Gama). Se realizará en parcelas con una mezcla de plantas de la variedad caturra y typica en edad productiva en un intervalo de 5 a los 20 años.

Figura 5 Mapa de localización Área de estudio



Fuente: INEGI, 2020.

En cuanto a las características de cada municipio, en general son similares, sólo en Temascaltepec las temperaturas son más heterogéneas. El municipio de Amatepec presenta una fisiografía principalmente compleja constituida por cañadas (79.9%), la temperatura promedio va de 16-28°C, con una precipitación promedio de 1, 100-2, 000mm, el clima es definido como cálido subhúmedo con lluvias en verano, con una humedad promedio de 58.66%. El suelo predominante es de tipo regosol (56.03%), y en cuanto a las características hidrológicas, pertenece a la región hidrológica del balsas. El uso de la tierra es principalmente destinado a la agricultura (0.68%) y zona urbana (0.35%), la vegetación predominante es bosque (37.74%) y se describen 262 localidades. En cuanto al cultivo del café este municipio consta de 400ha con viveros y plantíos que producen una medida de 600 a 700 kg/ha, de cuya producción el 70% es de tipo criollo, existen 300 productores en Amatepec (Estrada, 2017; INEGI, 2020).

En cuanto a Temascaltepec, el municipio ocupa una extensión de 547.5 km<sup>2</sup>, presenta un relieve muy accidentado, debido a que pertenece a las provincias fisiográficas del Eje Neovolcánico y Depresión del Balsas, a su vez, presenta un gradiente altitudinal que va de los 1 200 a los 3 600 m. Los tipos de suelo predominante son andosol húmico, andosol ócrico, feozem háplico, cambisol dístrico, cambisol éutrico, regosol éutrico, litosol y luvisol crómico. En cuanto al clima, se describen tres climas, uno para la región norte el clima es templado subhúmedo con lluvias en verano, con una temperatura promedio de 13°C y una precipitación anual de 1 115.3 mm. En el suroeste del municipio predomina el clima semicálido, con lluvias en verano con una temperatura media anual de 20°C y una precipitación anual de 1 242 a 1670mm. En el este existe un clima templado húmedo semifrío con una temperatura promedio de 10.2°C y una precipitación anual de 1 148 mm. En cuanto a la hidrología presenta ríos y cuerpos de agua provenientes del río Cutzamala. En cuanto a la vegetación con mayor riqueza específica, en Temascaltepec se observa mayor en el caso de bosques (Rojas *et al.* 2016).

Por otra parte, Sultepec, presenta una superficie de 564.04 km<sup>2</sup>, pertenece a tres series de montañas de gran importancia por lo que el relieve es también muy accidentado, se forman dos cuencas muy relevantes, el Río balsas y el río Cutzamala, el clima es semicálido y cálido. El tipo de vegetación predominante es bosque y selva baja (Gobierno de Sultepec, 2021).

## 10.2 Procedimiento.

Se realizará la localización geográfica y descripción de la zona de estudio, empleando cartografía digital de INEGI y del Atlas de Riesgos del Estado de México. Para ello se realizará la transformación y estandarización de formatos digitales, incluyendo la compatibilización de formatos, escala y topología. Se realizará la actualización de la información geográfica mediante imágenes satelitales y verificaciones del terreno (inspecciones visuales en campo con la ayuda de DGPS). Posteriormente se elaborará un Modelo digital de elevaciones (DEM) el cual va a ser verificado en campo con puntos de control DGPS (con sesiones de medición dinámica).

Para la localización y actualización cartográfica se utilizaron los límites administrativos del marco geoestadístico de INEGI, 2020. Se emplearon imágenes satelitales sentinel de la plataforma gratuita Copernicus perteneciente a la ESA (Acrónimo en inglés de la Agencia



espacial europea), correspondientes al 2021-2023. Las imágenes se calibraron geométrica y atmosféricamente. Se realizó una clasificación espacial no supervisada, mediante 3 índices de vegetación (NDVI, EVI, ARI I y ARI II), y una clasificación supervisada mediante el algoritmo SAM. Con ayuda de las firmas espectrales.

La firma espectral del café se estableció con el comportamiento espectral de los puntos control, depurando los puntos extremos y considerando el comportamiento típico de la vegetación y de referencias del comportamiento espectral del café, obteniendo un total de 100 puntos (Jensen, 1996). Los puntos control se tomaron en campo en 6 parcelas de 0.5 hectáreas de café con variedades típica y caturra. El método para la toma de puntos consistió en cuadrantes de 10 x10 para un total de 50 cuadrantes, en cada cuadrante se seleccionaron y georreferenciaron cuatro plantas al azar con un sistema de posicionamiento global diferencial (DGPS, modelo Trimble SPS361).

Las firmas espectrales de todas las coberturas se delimitaron de forma similar a la firma espectral del café, eliminando puntos extremos y considerando el comportamiento típico de cada cobertura, obteniendo un total de 100 puntos para cada cobertura (Chuvienco, 2008; ESA, 2014).

Posterior a esto se realizó un análisis de validación mediante una matriz de confusión obteniendo los porcentajes de fiabilidad, dicho procedimiento se llevó a cabo en el QGIS (Ariza, 2013). La superficie estimada se representó en mapas.

Para la zonificación agroecológica se realizó una búsqueda bibliográfica con los intervalos y valores óptimos para cada factor, asignándole el peso por experto de acuerdo con el método Saaty (1980) y la metodología desarrollada por Jaimes *et al.* (2012). Posteriormente se realizó la matriz de pesos de los factores para el Modelo de evaluación multicriterio, es necesario mencionar que este método pertenece a las técnicas de estadística multivalente donde existen múltiples factores asociados a una variable, es decir en evaluaciones complejas.

En el método de Saaty (1980) o comparación por pares, los criterios se disponen en una matriz cuadrada, estando en columnas y filas. Luego se comparan por pares de acuerdo con la importancia de cada uno de ellos con respecto a los demás, lo que permite establecer los

pesos y proporciona una medida cuantitativa de la consistencia de los juicios de valor entre pares de factores (Jaimes *et al.*, 2012).

La consistencia de la matriz permite valorar la coherencia y pertinencia de los factores o variables. Este valor es importante porque nos permite identificar la fiabilidad de la matriz, donde valores menores a 0.10 indican un nivel razonable de coherencia y pertinencia (Jaimes *et al.*, 2012).

En esta investigación se realizaron dos matrices de comparación, una para establecer en cada factor los rangos de aptitud y una segunda para determinar los pesos en el modelo de evaluación multicriterio. De esta manera todos los factores pertenecían a una misma escala (1, 2, 3, y 4; optimo, medio, bajo y muy bajo), ver tabla 3.

*Tabla 2 Matriz de pesos nivel de aptitud.*

temperatura	Optimo	Medio	Bajo	Muy bajo
Optimo	1			
Medio	1/3	1		
Bajo	1/5	1/2	1	
Muy bajo	1/9	1/6	1/4	1

Fuente: Elaboración en TerrSet.

Posteriormente se calculó el peso de cada rango, mediante el comando weight en TerrSet, como puede apreciarse en la tabla 4.

*Tabla 3 Asignación de pesos por nivel de aptitud.*

Optimo	0.5822
Medio	0.2381
Bajo	0.1348
Muy bajo	0.0449

Fuente: Elaboración en TerrSet. Consistencia 0.03

Luego se realizó la matriz cuadrada ponderando las variables de acuerdo con su importancia, siendo la temperatura la más importante, de acuerdo con la literatura (Fuente: Rojo, 2014;



González-González y Hernández-Santana, 2016; Aceves et al, 2020; SIAP, 2020; Chamurra et al, 2021), como puede verse en la Tabla 5.

*Tabla 4 Matriz de Saaty de las variables agroecológicas del cultivo del café.*

ATRIBUTO	Temperatura	Suelo	Precipitación	Altitud	Pendiente
Temperatura	1				
Suelo	1/3	1			
Precipitación	1/5	1/3	1		
Altitud	1/7	1/5	1/2	1	
Pendiente	1/9	1/7	1/2	1/3	1

Fuente: Elaboración en TerrSet

La matriz nos permitió calcular el peso de cada variable, mediante el comando weight en Terrset, como puede apreciarse en la tabla 6.

*Tabla 5 Pesos de importancia de las variables agroecológicas asociadas al cultivo del café.*

Temperatura	0.5234
Suelo	0.2684
Precipitación	0.1000
Altitud	0.0647
Pendiente	0.0435

Fuente: Elaboración en TerrSet. Consistencia 0.03

Teniendo la matriz de expertos se realizaron los mapas temáticos correspondientes; altitud y pendiente elaborados a partir del Continuo de Elevaciones Mexicano). Precipitación y temperatura medias anuales (obtenidas de Cuervo-Robayo et al., 2014 e INEGI, 2020<sup>a</sup>). Suelo (Perfiles de suelos, Continuo nacional, INEGI, 2013<sup>a</sup>).

Se homologaron los mapas en número de filas y columnas en formato raster para poder realizar el análisis de EMC en TerrSet.

El mapa resultante se vectorizó en QGis para realizar el cálculo en superficie de los diferentes grados de aptitud.

Los mapas resultantes se contrastaron con capas temáticas del marco geoestadístico: zona urbana, localidades, calles y carreteras. Polígonos y puntos de cuerpos de agua, pozos, escuelas entre otros. Realizando mapas con esta información.

Al intersectar las diferentes capas se obtuvieron zonas de interés potencial para nuevas plantaciones. Se describieron y se estimó su superficie.

## 11. Resultados



### Cartografía del cultivo del café en Amatepec, Estado de México

#### *Mapping of coffee cultivation in Amatepec, State of Mexico*

Maricela Mora Escamilla<sup>1\*</sup>

José Francisco Ramírez Dávila<sup>2</sup>

Xanat Antonio Némiga<sup>3</sup>

Rodolfo Serrato Cuevas<sup>4</sup>

### Resumen

El café es uno de los cultivos más importantes en el mundo y en México, es un cultivo con gran potencial en el Estado de México por su alta calidad en taza, principalmente en los municipios

<sup>1</sup> Universidad Autónoma del Estado de México, México1. [motyroll@gmail.com](mailto:motyroll@gmail.com) . <https://orcid.org/0000-0003-3037-3732>. \* Autor para la correspondencia

<sup>2</sup> Universidad Autónoma del Estado de México, México. [jframirez@uaemex.mx](mailto:jframirez@uaemex.mx). <https://orcid.org/0000-0002-8625-4655>

<sup>3</sup> Universidad Autónoma del Estado de México, México. [dxantonion@uaemex.mx](mailto:dxantonion@uaemex.mx). <https://orcid.org/0000-0002-8827-6575>

<sup>4</sup> Universidad Autónoma del Estado de México, México. [rserratoC@uaemex.mx](mailto:rserratoC@uaemex.mx). <https://orcid.org/0000-0002-5639-4542>

más representativos, como Amatepec, Sultepec y Temascaltepec; sin embargo, no existe un censo que especifique la superficie del cultivo, por lo que el objetivo de esta investigación fue probar métodos de índices de vegetación y el algoritmo Spectral angle mapper (SAM) en las imágenes del sensor Sentinel-2 para evaluar su desempeño en la identificación de áreas plantadas con el cultivo de café. Los resultados se validaron con una matriz de confusión y la comparación de los datos de referencia de entrenamiento y validación. El algoritmo SAM obtuvo una precisión de hasta 82%, mientras que los índices espectrales exhibieron resultados muy fluctuantes con precisiones desde 24% hasta 97% pero con una mayor sobrestimación por lo que no se recomiendan. Finalmente es importante destacar que esta metodología podría ser probada para la detección de otros cultivos de interés comercial, dado que Sentinel-2 muestra ser una alternativa viable para este tipo de estudios, teniendo una buena resolución espectral, además de ser de fácil acceso y manipulación.

**Palabras clave:** SAM, índices y firma espectral del café.

## **Abstract**

Coffee is one of the most important crops in the world and in Mexico, is a crop with great potential in the State of Mexico for its high quality in cup, mainly in the most representative municipalities, such as Amatepec, Sultepec and Temascaltepec; however, there is no census that specifies the area of the crop, so the objective of this research was to test methods of vegetation indices and the spectral angle mapper (SAM) algorithm in the Sentinel-2 sensor images to evaluate its performance in identifying areas planted with coffee crop. The results were validated with a confusion matrix and comparison of the training and validation reference data. The SAM algorithm obtained an accuracy of up to 82%, while the spectral indices exhibited highly fluctuating results with accuracies ranging from 24% to 97% but with a higher overestimation and are therefore not recommended. Finally, it is important to highlight that this methodology could be tested for the detection of other crops of commercial interest, given that Sentinel-2 shows to be a viable alternative for this type of studies, having a good spectral resolution, in addition to being easy to access and manipulate.

**Keywords:** SAM; spectral indices; spectral signature of coffee and Amatepec.

## **1. Introducción**

El cultivo del café es un bien agroindustrial importante para la economía mundial, con una producción de 171.3 millones de sacos y una ganancia de 165 mil millones de euros al año (OIC, 2023), por lo que se considera como un motor económico para las naciones productoras. Las especies más comercializadas son *C. arabica* y *C. canephora* (robusta), sin embargo, la especie arábica tiene protagonismo, ya que representa el 67.5% de la producción mundial de café y el 97% de la producción nacional (Benítez, 2014 y OIC, 2023).

De manera particular en México, el cultivo del café representa el 0.66% del PIB agrícola nacional y el 1.34% de producción de bienes agroindustriales, emplea a más de 500 000 productores de 14 estados y 480 municipios (SAGARPA, 2017). Los principales estados productores de café son Chiapas (30.3%), Puebla (29.1%) y Veracruz (29%) y aunque el Estado de México apenas supera la media nacional con 623 toneladas de café, cobra relevancia por la calidad de este aromático, la cual ha sido reconocida a través de los prestigiosos concursos del certamen “Taza de excelencia”, obteniendo primeros lugares a nivel nacional (SIAP,2020; Taza de excelencia, 2023). El Estado de México presenta ganancias económicas de 4, 827 millones de pesos por el cultivo del café, los municipios productores de café son Amatepec, Temascaltepec, Sultepec, Malinalco, Ocuilan, Tlatlaya y San Simón de Guerrero, sin embargo, el municipio de Amatepec cobra relevancia al producir el 54.3% de este aromático (Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), 2022; SIAP, 2023).

Debido a los factores agroclimáticos asociados, así como las variedades cultivadas y al modo tradicional de manejo del cultivo, el café en México y en nuestro estado presenta potencial para ser considerado café de especialidad (Gutiérrez, 2015; Jiménez et al., 2020). Teniendo la bondad de ser considerado a su vez como un cultivo que puede ser sustentable, ya que permite la conservación de especies nativas, imita la estructura natural de los bosques, evita el uso de herbicidas y fertilizantes, es hábitat de múltiples vertebrados y por la generación de hojarasca, su consecuente deposición de carbono y la regeneración de suelos (Moguel & Toledo, 1999; Ruelas Monjardín et al., 2014; SAGARPA, 2017).

Por lo que resulta de interés identificar estrategias para una producción sostenible con buenos rendimientos, donde la cartografía de los cultivos es una herramienta fundamental que nos permite la maximación de Potencial de Tierras, un mejor manejo del cultivo y la evaluación del rendimiento (Ramos-Reyes et al., 2004; Pérez-García et al., 2019; Morales-Espinosa *et al.*, 2021). Debido a las características propias de las regiones donde es cultivado el aromático, la teledetección representa una opción accesible y confiable, para ello, las imágenes Sentinel tienen un gran potencial, ya que son libres de costo, con una resolución espacial alta y abarcan una parte del espectro que permite el análisis, caracterización y clasificación de la vegetación (Rivera & Clavijo, 2016; Vales et al., 2017; Fernández-Gallo, 2018).

La metodología para identificar espacialmente un cultivo con imágenes multiespectrales se fundamenta en el concepto de reflectancia, que constituye la cantidad de luz que un objeto emite en diferentes longitudes de onda, denominado comportamiento espectral, lo cual resulta interesante debido a que dicha respuesta es única por la composición química y física de los objetos (firma espectral), por lo que la vegetación tiene un comportamiento espectral general, en donde existe baja reflectancia y transmitancia en el espectro visible, alta en el infrarrojo cercano (NIR) y baja con presencia de algunos picos en el infrarrojo de onda corta (SWIR), este comportamiento se explica por la absorbanza de los pigmentos foliares, ya que la energía es absorbida para sintetizar los componentes orgánicos (comportamiento en el espectro visible), la estructura de la planta sana (NIR) y por la cantidad de agua absorbida (SWIR), a consecuencia cada tipo de vegetación responde de diferente forma (Araque & Jiménez, 2009).

Por otra parte, los índices de vegetación, en Teledetección, son parámetros calculados a partir de los valores de reflectividad a distintas longitudes de onda (principalmente roja y NIR) que proveen información sobre la vegetación mediante la estimación indirecta de variables biofísicas. Aunque están sujetos a factores internos (propiedades ópticas de las hojas, arquitectura de los Fito elementos y sustrato o suelo) y externos (condición atmosférica y geometría del sensor) (Sobrino, 2001; Paz Pellat et al, 2014). El índice más utilizado es el NDVI, este índice presenta una escala de -1 a 1, donde los valores negativos corresponden a agua, zonas urbanas, nubes y nieve, mientras que los valores de 0.1 a 0.2 corresponden a suelo desnudo, por lo que la vegetación exhibe valores superiores a 0.2 (Murillo et al., 2010).

Por otra parte, el índice EVI, surge como una modificación al NDVI para reducir la influencia de la atmosfera y del suelo, especialmente en zonas de vegetación densa, y mitigar la saturación. El rango de valores corresponde al mismo que el NDVI, de -1 a 1 y para la vegetación sana varía de 0.2 a 0.8 (Mas, 2011).

Mientras que el índice ARI1 y ARI2, corresponden a un índice que evalúa la reflectancia de antocianinas, las cuales son pigmentos contenidos en las vacuolas de las células vegetales y responsables de los colores rojos, rosas y violetas de hojas, flores y frutos. Por lo que estos pigmentos son de interés ya que proveen información valiosa sobre el estado fisiológico de la vegetación. Por otra parte, la reflectancia de la antocianina es máxima alrededor de 550

nm. Sin embargo, la clorofila también refleja las mismas longitudes de onda. Para aislar las antocianinas, se resta la banda espectral de 700 nm, que refleja sólo la clorofila y no las antocianinas (Gitelson et al., 2009).

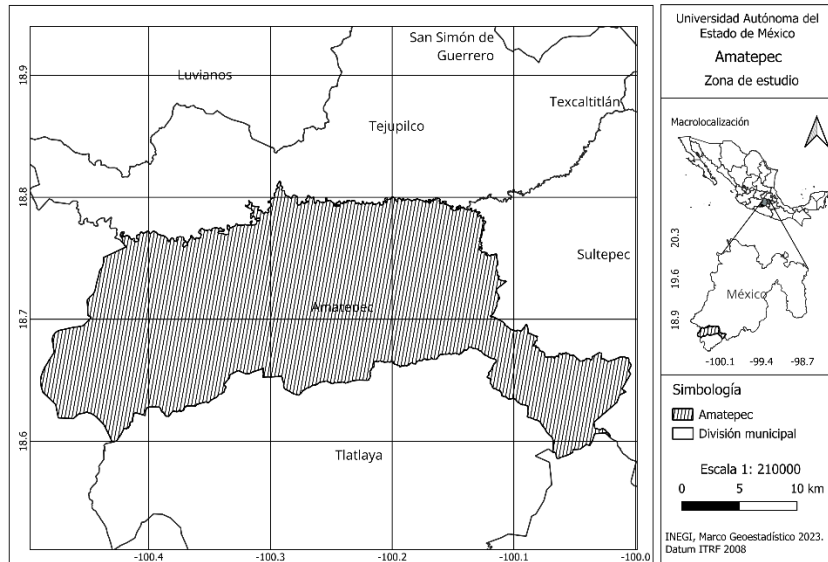
Ahora bien, los algoritmos de clasificación supervisada como el SAM (Spectral Angle Mapper) permiten identificar un pixel desconocido utilizando uno o más espectros de referencia, ya que compara la similitud espectral, tratándolos como vectores y calculando el ángulo espectral entre ellos, lo que permite una gran variedad de aplicaciones en teledetección (Denison et al., 2004; Gupta, 2021).

Finalmente, identificar la superficie actual del cultivo del café en el estado de México, particularmente en Amatepec, constituye una herramienta para la toma de decisiones en pro de una agricultura eficiente y sostenible. Por ello la presente investigación, siendo parte de un programa integral para el manejo del cultivo del café en el sur del Estado de México, tiene como objetivo identificar la cartografía del cultivo del café mediante firmas espectrales para generar un instrumento (mapa) que pueda ser empleado para la toma de decisiones para los cafeticultores de la región, empleando recursos gratuitos y de fácil acceso como imágenes libres preprocesadas (Sentinel 2A) y software gratuito (Qgis y SNAP).

## **2. Metodología**

### **2.1 Zona de estudio**

El trabajo se realizó en el municipio de Amatepec que se localiza en el extremo sur de la porción occidental del Estado de México, ver Fig. 1. El municipio presenta una fisiografía compleja constituida principalmente por cañadas (79.9%) con un suelo predominante de tipo regosol (56.03%) y un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano, su temperatura media anual es de 23°C con una precipitación media anual de 768 mm. Con respecto al uso de suelo y vegetación, es predominante el bosque (37.74%), seguido del pastizal (37.6%) y la selva (23.6%) mientras que la superficie destinada a agricultura y zona urbana es menor (0.68% y 0.35% respectivamente). El cultivo del café consta de 338 ha con viveros y plantíos que producen 393 ton, donde el 70% de la producción es de tipo criollo y se tiene registro de 300 productores (Estrada, 2017; Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2020).



## 2.2 Adquisición de datos

Para la realización de este trabajo, se tomaron como fuente de datos el comportamiento espectral de puntos control y puntos de validación del cultivo de café, así como de las diferentes coberturas identificadas, estos puntos se obtuvieron de manera independiente. Para los puntos control del cultivo de café, se establecieron 1200 puntos control, los cuales se tomaron en campo en 6 parcelas de 0.5 hectáreas de café con variedades típica y caturra. El método para la toma de puntos consistió en cuadrantes de 10 x10 para un total de 50 cuadrantes, en cada cuadrante se seleccionaron y georreferenciaron cuatro plantas al azar con un sistema de posicionamiento global diferencial (DGPS, modelo Trimble SPS361). Mientras que los puntos de validación corresponden a puntos extremos de cada una de las parcelas de café.

Por otra parte, para las demás coberturas (zona urbana, agua, cultivos temporales, cultivo de aguacate y suelo) se tomaron 1200 puntos control de forma remota y se validaron con un Quikmapservice en el software QGIS.

Además, se descargaron 8 imágenes satelitales Sentinel 2A preprocesadas de la plataforma gratuita Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA), correspondientes a los años 2021, 2022 y 2023 libres de nubes.

Y para el desarrollo de la cartografía también se empleó el conjunto geoestadístico nacional de INEGI (2023) y el Marco geoestadístico del Estado de México (INEGI, 2023) para la delimitación política. Para la elaboración del mapa final también se empleó el Modelo Digital de Elevaciones (DEM) obtenido a partir del Conjunto de Elevaciones Mexicano (CEM de INEGI, 2013) del municipio.

### **2.3 Procesamiento de las imágenes:**

Se realizaron dos realces a las imágenes para mejorar la calidad de los datos, la primera un remuestreo (donde se homologaron todas las bandas a 10m de resolución en el software SANAP), la segunda una calibración radiométrica con el complemento de Semiautomatic Classification plugging del software QGIS.

Se procesó cada imagen de acuerdo con la metodología descrita por Figueroa-Figueroa et al. (2020), empleando dos estrategias con el software QGIS, la primera mediante una clasificación supervisada con el algoritmo Spectral Angle Mapper (SAM) y la segunda a través de consultas lógicas de 4 índices de vegetación.

#### **Clasificación supervisada**

En este apartado se tiene la finalidad de clasificar de forma automática todos los píxeles en clases temáticas, que para la zona de estudio fueron identificadas 6, para lo cual se definen zonas de interés o ROIs (por sus siglas en inglés) que constituyen las firmas espectrales de cada clase.

La firma espectral del café se estableció con el comportamiento espectral de los puntos control, depurando los puntos extremos y considerando el comportamiento típico de la vegetación y de referencias del comportamiento espectral del café, obteniendo un total de 100 puntos (Jensen, 1996)

Las firmas espectrales de todas las coberturas se delimitaron de forma similar a la firma espectral del café, eliminando puntos extremos y considerando el comportamiento típico de cada cobertura, obteniendo un total de 100 puntos para cada cobertura (Chuvienco, 2008; ESA, 2014).

La clasificación supervisada fue elaborada con el complemento SCP (Semi- Automatic Classification Plugging) del software Qgis. Este complemento permite la clasificación supervisada



mediante varios métodos (Maxima verosimilitud, Random Forest, SAM) y generar un archivo de áreas de entrenamiento (ROIs establecidas con las firmas espectrales) además de previsualizar el resultado. En el caso de esta investigación se probó el algoritmo SAM (Spectral Angle Mapper) con varios ángulos de inclinación (0.1, 0.075, 0.05, 0.025), pero se identificó que se exhibían mejores resultados sin su establecimiento.

## Índices de vegetación

El presente trabajo se enfocó en el cálculo de 4 índices, el NDVI, EVI, ARI I y ARI II, los cuales ya han sido probados para la identificación de cultivos (Jafari et al., 2017; Figueroa- Figueroa et al., 2020; Morell-Monzó et al., 2022). El NDVI se calculó como el cociente de la diferencia de las reflectividades en la superficie de los canales 1 y 2 (Sobrino, 2001):

$$\text{NDVI} = \frac{\text{Reflectividad del canal 2} - \text{Reflectividad del canal 1}}{\text{Reflectividad del canal 2} + \text{Reflectividad del canal 1}}$$

Que para el caso de las imágenes sentinel 2, el canal uno corresponde al infrarrojo cercano o banda 8 y el canal 2 al rojo o banda 4.

Mientras que el Evi, presenta dos coeficientes C1 y C2 para corregir la dispersión de los aerosoles en la atmosfera y L para ajustar el fondo del suelo y del dosel de la vegetación, y se obtuvo de acuerdo con la siguiente ecuación (Mas, 2011):

$$\text{EVI} = 2.5 * ((\text{NIR} - \text{RED}) / ((\text{NIR}) + (\text{C1} * \text{RED}) - (\text{C2} * \text{BLUE}) + \text{L})).$$

El índice de reflectancia de Antiocianinas (ARI I), se calcula usando la banda espectral verde y una banda espectral de borde rojo, de acuerdo con la siguiente ecuación:  $\text{ARI I} = (1/\text{B03}) - (1/\text{B05})$ . Mientras que el índice de ARI II, que es una modificación del ARI I, se calcula con la siguiente ecuación  $\text{mARI(ARI2)} = ((1 / \text{B03}) - (1 / \text{B05})) * \text{B07}$  (Gitelson et al., 2009).

## 2.4 Consultas lógicas

Para poder obtener la expresión de la consulta lógica se analizaron los valores mínimo, medio y máximo de sitios con y sin café, con la ayuda de la firma espectral del café, estableciendo el valor de la condicional.

## 2.5 Realización de mapas y cálculo de área

Una vez obtenido el resultado de cada uno de los índices y del algoritmo de clasificación, se vectorizó la capa y se calculó el área de cada uno de los polígonos en hectáreas.

### **2.6 Validación de resultados**

El método de validación utilizado fue una matriz de confusión que permite calcular diferentes estadísticas que evalúan la calidad de los resultados, donde se obtiene el error de omisión y comisión, importantes para identificar la confiabilidad de los métodos de clasificación. (Baghdadi et al., 2020).

La matriz de confusión se calculó mediante columnas y filas, donde las columnas representan las diferentes categorías obtenidas de la clasificación (Agua, bosque, café, cultivos de temporal, cultivo de aguacate, suelo desnudo y zona urbana) y las filas constituyen los puntos de validación para cada clase, por lo tanto, los elementos encontrados de forma diagonal en la tabla hacen referencia a la cantidad de puntos que han sido correctamente clasificados (acierto). Mientras que los elementos de una misma fila exceptuando los de la diagonal, reflejan el número de puntos que perteneciendo a una misma clase fueron asignados a clases distintas, el llamado error de omisión; por otro lado, los elementos de una misma columna, exceptuando al de la diagonal, reflejan el número de puntos que fueron asignados a una clase cuando en realidad pertenecen a otras clases, el llamado error de comisión

Finalmente se analizaron los resultados y se obtuvo la cartografía con base a la mayor precisión y menor sobrestimación.

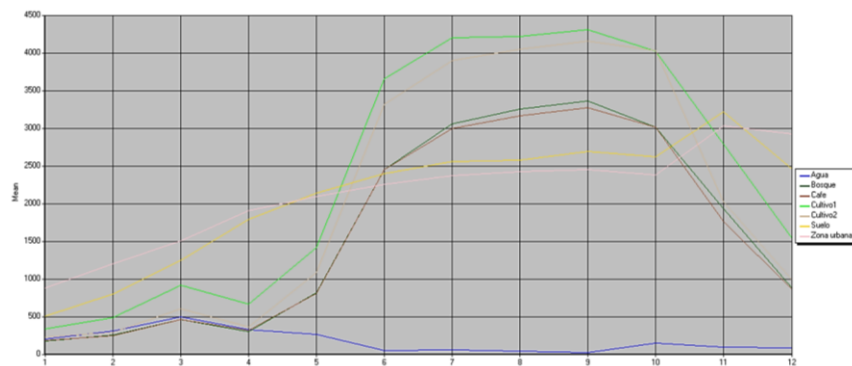
### **3. Resultados**

Las firmas obtenidas para las diferentes categorías nos muestran comportamientos espectrales diferentes, para la vegetación se observa un comportamiento típico, mostrando una curva con picos en las bandas correspondientes a las longitudes de onda del espectro visible (490- 665 nm), una meseta en la región del espectro correspondiente al infrarrojo cercano (740- 1375 nm) y un comportamiento descendente en el infrarrojo cercano de onda corta (1610-2190 nm), sin embargo hay mayor reflectividad en el cultivo de temporal (cultivo 1) y en el cultivo de aguacate (cultivo 2), ver figura 2. Por otra parte, las coberturas correspondientes al suelo desnudo y zona urbana presentan un comportamiento similar, con picos ascendentes en el infrarrojo cercano de onda corta (1610- 2190). Mientras que, para la categoría correspondiente al agua, se observa un comportamiento descendente con el mayor

porcentaje de absorbancia con respecto a las demás categorías hasta casi llegar a cero, aunque muestra también picos en la región del espectro visible.

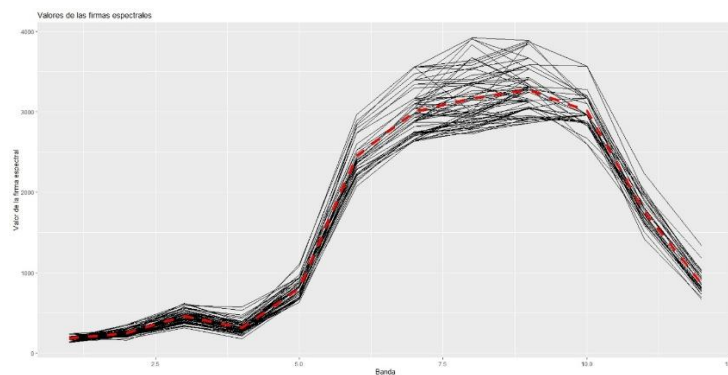
El comportamiento espectral del café, ver Figura 3, exhibe que el porcentaje de reflectancia es menor dentro del espectro visible a excepción por un pico creciente en la banda 3 (560 nm), posteriormente tiene un comportamiento creciente hasta llegar a una meseta en la longitud de onda en la región del infrarrojo cercano o NIR (883 nm), sitio en el que los datos presentan mayor dispersión, finalmente se observa un decremento en las bandas 10 y 11 (1376 – 1610 nm) correspondientes al infrarrojo cercano de onda corta (SWIR).

Fig 2. Firmas espectrales de las categorías



Grafica de las firmas espectrales para los distintos tipos de cultivos. Se exhibe el comportamiento espectral de cada una de las categorías a través de las 12 bandas que proporciona la imagen. Elaboración propia a partir de datos espectrales de las imágenes Sentinel 2 a.

Fig. 3. Firma Espectral Café



Grafica de la firma espectral del cultivo de café en Amatepec. Se observa la curva espectral a través de las 12 bandas que proporciona la imagen. Elaboración propia a partir de datos espectrales de las imágenes Sentinel 2 a.

En cuanto a los métodos de clasificación para detectar el cultivo del café, se observa que la clasificación supervisada obtenida con el algoritmo SAM, muestra un desempeño similar para todas las imágenes, alcanzando hasta 82% de acierto con un porcentaje de error del 15%, ver Tabla 1. Por otra parte, los índices de vegetación muestran resultados con mayor fluctuación, ver tabla 2, con valores de acierto desde 13% hasta 94% con errores de comisión de 24% y 3%, respectivamente.

Tabla 1. Clasificación supervisada por SAM y validación (Matriz de tabulación cruzada)

Fecha	Área	Píxel		Total	Porcentaje		
		Acierto	Error		Acierto	Error	E. C.
21-04-21	6997	97	76	173	56	44	34
21-05-21	4860	105	68	173	61	39	12
07-12-21	8758	133	40	173	77	23	16
16-02-22	14493	118	55	173	68	32	15
21-05-22	11208	133	40	173	77	23	10

07-12-22	40307	122	51	173	71	29	20
05-02-23	20389	141	32	173	82	28	15
27-03-23	5958	132	41	173	78	22	7

Se indican las imágenes por fecha, el algoritmo empleado, la superficie calculada del cultivo del café en hectáreas y la validación del método a través de una matriz de tabulación cruzada, donde se resaltan el acierto, erro total y el error de comisión por número de pixeles y en porcentaje. Todas las cifras fueron redondeadas.

Tabla 2. Clasificación supervisada por SAM y validación (Matriz de tabulación cruzada)

Fecha	Indices	Valor minimo	Valor Maximo	Valor de la condicional	Ha	Acierto	Error	Error de comisión
21-04-21	NDVI	0.0422	0.611	Value > 0.36 value < 0.57	10162	134 (78%)	39 (22%)	23 (13%)
	EVI	0.112487	0.544566	Value > 0.23 value < 0.52	2690	66 (39%)	107 (61%)	41 (34%)
	ARI1	1.48957	8.66243	Value > 3.07 value < 7.8	16372	117 (68%)	56 (32%)	29 (17%)
	ARI2	0.567381	4.20818	Value > 1.19 value < 3.7	36528	112 (65%)	61 (45%)	19 (11%)
21-05-21	NDVI	0.15272	0.792	Value > 0.26 value < 0.57	15308	148 (87%)	25 (13%)	20 (11.5%)
	EVI	0.110421	0.631228	Value > 0.24 value < 0.55	5470	89 (51%)	84 (49%)	33 (19%)
	ARI1	1.04867	8.59046	Value > 2.78 value < 6.9	25192	92 (53%)	81 (47%)	58 (34%)
	ARI2	0.004792	4.51857	Value > 2.08 value < 3.73	30141	100 (58%)	73 (42%)	36 (21%)
07-12-21	NDVI	0.28669	0.870	Value > 0.39 value < 0.76	917	162 (94%)	11 (6%)	5 (3%)
	EVI	0.14856	0.648365	Value > 0.39 value < 0.65	9191	93 (54%)	80 (46%)	21 (12%)

	ARI1	1.24171	53.2555	Value > 26.24 value < 34.25	12006	88 (51%)	85 (49%)	9 (5%)
	ARI2	0.66354	7.92022	Value > 2.89 value < 7.05	30326	145 (84%)	28 (16%)	12 (7%)
16-04-22	NDVI	0.10923	0.504	Value > 0.174 value < 0.47	1453	58 (34%)	115 (66%)	38 (22%)
	EVI	0.109234	0.504682	Value > 0.205 value < 0.476	1453	58 (34%)	115 (66%)	48 (28%)
	ARI1	0.812104	2.10889	Value > 1.03 value < 2.034	19762	97 (56%)	76 (44%)	8 (5%)
	ARI2	0.139831	0.600808	Value > 0.52 value < 0.583	4035	99 (58%)	74 (42%)	24 (14%)
21-05-22	NDVI	0.10080	0.487	Value > 0.174 value < 0.47	1003	39 (23%)	134 (77%)	30 (17%)
	EVI	0.100802	0.487056	Value > 0.205 value < 0.46	907	39 (23%)	134 (77%)	70 (40%)
	ARI1	0.80233	1.8607	Value > 1.12 value < 1.71	15111	65 (38%)	108 (62%)	59 (34%)
	ARI2	0.0858192	0.541812	Value > 0.2524 value < 0.52	2068	50 (29%)	123 (71%)	48 (28%)
07-12-22	NDVI	0.15687	0.552	Value > 0.300 value < 0.47	6261	84 (49%)	89 (51%)	42 (24%)
	EVI	0.156873	0.552955	Value > 0.30 value < 0.47	6261	83 (48%)	90 (52%)	54 (31%)
	ARI1	0.604961	2.17526	Value > 1.2391	28642	80 (46%)	93 (54%)	22 (13%)

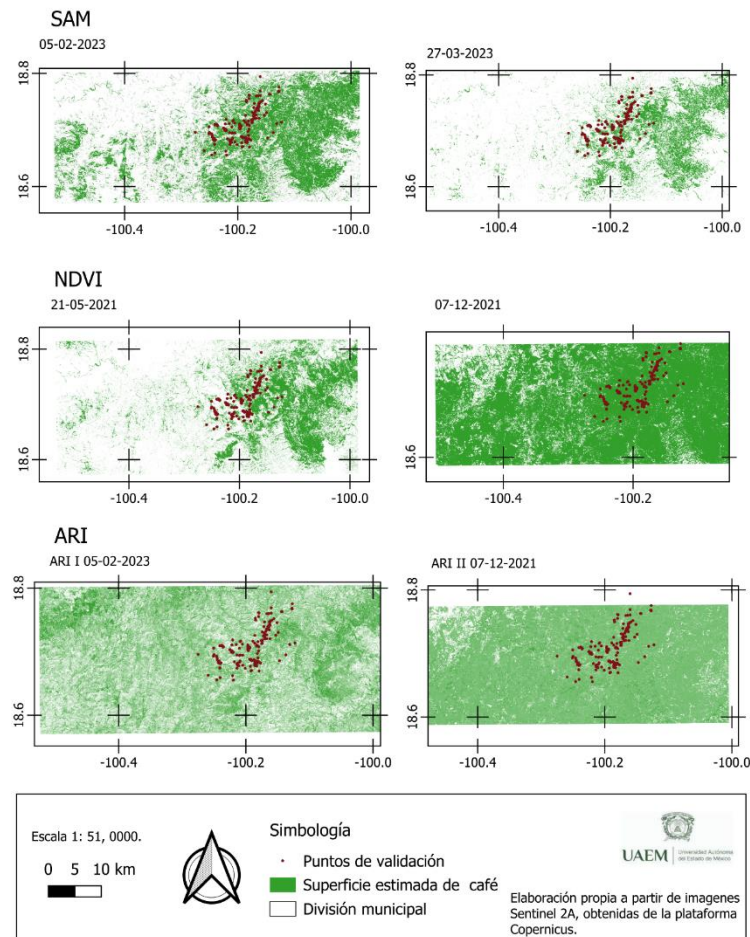
				value < 2.1451				
	ARI2	0.124049	0.728037	Value > 0.5538 value < 0.7048	8731	70 (40%)	103 (60%)	12 (7%)
05-02-23	NDVI	0.12334	0.482	Value > 0.42 value < 0.46	810	59 (34%)	114 (66%)	75 (43%)
	EVI	0.0205475	0.210131	Value > 0.06 value < 0.15	1663	51 (30%)	122 (70%)	83 (48%)
	ARI1	-0.084597	2.17601	Value > 0.9 value < 1.8	29410	154 (89%)	19 (11%)	6 (3%)
	ARI2	0.124049	0.728037	Value > 0.519 value <0.7048	8731	70 (40%)	103 (60%)	18 (10%)
27-03-23	NDVI	0.10628	0.507	Value > 0.36 value < 0.46	3442	54 (31%)	119 (69%)	43 (25%)
	EVI	0.106279	0.506719	Value > 0.39 value < 0.47	1466	54 (31%)	119 (69%)	58 (34%)
	ARI1	0.839005	2.21628	Value > 1.2363 value < 2.08	24099	95 (55%)	78 (44%)	12 (7%)
	ARI2	0.10804	0.41999	Value > 1.2363 value < 2.08	439	22 (13%)	151 (87%)	41 (24%)

Se indican las imágenes por fecha, el algoritmo empleado, la superficie calculada del cultivo del café en hectáreas y la validación del método a través de una matriz de tabulación cruzada, donde se resaltan el acierto, el error total y el error de comisión por número de píxeles y en porcentaje. Todas las cifras fueron redondeadas. Elaboración propia.

Por ende, se obtuvieron como resultados principales las escenas del 05-02- 2023 y 27-03 2023 para el algoritmo SAM, con un porcentaje de acierto de 82% y 78%, respectivamente. Mientras que para los índices se destacan para el NDVI las escenas del 21-05-2021 y el 07-12-2021 con un porcentaje de acierto de 87% y 94%, mientras que para el algoritmo ARI I se obtuvo como mejor resultado la escena del 05-02-2023 con un porcentaje de acierto de 89% y para el

ARI II se obtuvo como mejor resultado la escena del 07-12-2021 con 84%, ver Fig. 4. Es importante indicar que los resultados obtenidos para el índice EVI exhibieron el peor desempeño, con porcentajes de acierto inferiores al 50% por lo que no se consideraron.

Fig. 4. Mapas con puntos de validación



Finalmente, para obtener el mapa final de la cartografía se consideró el desempeño del método (porcentaje de acierto y de error de comisión) y la menor sobreestimación, teniendo como resultado final el mapa de cartografía del cultivo correspondiente a la escena del 27-03-2023, ver fig. 5.





nm) correspondientes al infrarrojo cercano de onda corta (SWIR) y que nos aporta información acerca del contenido de agua, que en este caso al ser decreciente nos permite inferir que el cultivo no presenta estrés hídrico.

El comportamiento espectral de la curva del café se relaciona con los resultados obtenidos por Lamparelli et al. (2012), para cultivo de café arábigo en el municipio de Montes Claros, Brasil, con las variedades Bourbon, Icatu, Vermelho, Mundo novo, Catuaí, Amarelo, a las que clasificaron por la densidad de follaje, exhibiendo picos decrecientes en la banda 2 y 4 y ascendente en la banda 3 (548 nm), obteniendo que los cultivos con menor follaje presentan mayor porcentaje de reflectancia en el espectro visible, superior a 5, o 500 nm en el caso de nuestros datos al no encontrarse en porcentaje, y ya que nuestros resultados exhiben una reflectancia cercana a 2 o 200 nm, se puede inferir que se trata de cultivos con buenas condiciones. Además, las curvas espectrales obtenidas por Lamparelli et al (2012) indican reflectancias máximas que no superan el 40%, en nuestro caso los 4 000 nm concordando con nuestros resultados.

Por otra parte, la dispersión de los datos en la meseta de la firma espectral puede deberse a que se presenta más de una variedad en la zona de estudio, siendo más representativas las variedades típica (criollo) y caturra, que si bien están estrechamente relacionadas, se diferencian en el porte principalmente, ya que caturra descendiente de Bourbon y es de porte bajo mientras que típica es de porte alto, además se diferencian en la forma y color de las cerezas y en el tamaño y color de las hojas y brotes (González- Razo et al., 2019; World Coffee Research (WCR), 2024), lo que afecta la uniformidad del porcentaje de reflectancia.

Con respecto a los métodos para la estimación del cultivo del café, en los resultados de validación se observa que el algoritmo SAM exhibe resultados más uniformes, con una precisión superior al 50% hasta llegar al 82% para detectar café, ver tabla 1, en contra parte los índices mostraron porcentajes de acierto muy fluctuantes, ver tabla 2, por lo que se considera que es más efectivo el algoritmo SAM para la detección de café. Este resultado es similar con el desempeño de este algoritmo para aguacate (Figuroa-Figuroa et al, 2020), vegetación (Makinde et al., 2016) y para otros cultivos como arroz (Petropoulos et al. 2013).

El desempeño del algoritmo SAM fue similar en comparación con el método de máxima verisimilitud para la detección del cultivo de café, que fue empleado en la investigación de

Smith-Harsh *et al.* (2013) en donde encontraron porcentajes de exactitud de hasta 86 %, con imágenes landsat.

El índice NDVI, tubo porcentajes de acierto de 31% a 87%, ver tabla 2, donde en la mayoría de las escenas fue menor al 50%, esto puede deberse a que como menciona Avila-Velez y Royero-Benabides (2021) el desempeño de este índice llega a limitarse por el punto de saturación, que como puede verse en los valores de las condicionales en las consultas lógicas, eran próximos al límite superior del índice.

En cuanto al índice EVI, que es un índice mejorado, exhibió los peores resultados, con porcentajes desde 24% a 54% de porcentaje de acierto, ver Tabla 2, esto puede explicarse a que este índice no considera efectos topográficos como planicies y elevaciones como lo es la zona de estudio, los cuales contribuyen significativamente con el ruido y sesgo, (Holben & Justice, 1981).

Por otro lado, el índice ARI1 y ARI2, obtuvieron en escena porcentajes de acierto desde 13% a 97% de precisión, pero con una sobrestimación muy importante, ver Tabla 2, por lo que no se recomiendan. Su bajo desempeño podría deberse a que la mayoría de las imágenes son de momentos en lo que sufren cambios fisiológicos la vegetación a causa de los factores climáticos.

Por lo que los mapas de validación permiten observar los mejores resultados para el algoritmo SAM y los índices de vegetación NDVI, ARI I y ARI II, ver Fig. 2. siendo las mejores escenas el 5 de febrero de 2023 y el 27 de marzo de 2023 para el algoritmo SAM, mientras que para el NDVI las mejores imágenes corresponden al 21 de mayo de 2021 y 7 de diciembre de 2021, mientras que para el ARI I la imagen más sobresaliente de acuerdo con el porcentaje de validación corresponde al 5 de febrero de 2023 y para el ARI II corresponde a la escena del 7 de diciembre de 2021.

Es necesario mencionar que todos los resultados muestran una sobreestimación de la superficie real reportada (338 ha), lo que concuerda con las investigaciones anteriores (Figuroa-Figuroa, 2020; Hunt *et al.*, 2020). Como menciona Cordero-Sancho y Sader (2007) y Lamparelli *et al.* (2012), indicando que la precisión para la cartografía del café por satélite es baja por lo complejo que es el sistema agrícola en el que se desarrolla el cultivo, principalmente

en las selvas, la nubosidad persistente y los efectos topográficos que si bien se tratan de reducir con los realces de las imágenes y con correcciones topográficas no existe un aumento significativo en el porcentaje de precisión en métodos orientados a pixel. Además, el comportamiento espectral del café es muy parecido al comportamiento espectral del bosque asociado, y de acuerdo con Cordero-Sancho y Sader (2007), la imprecisión aumenta cuando los bosques de sombra se encuentran con baja densidad, esto puede identificarse en los resultados, ya que se obtuvieron mayores porcentajes de acierto en las imágenes que corresponden al periodo de primavera en la localidad, momento en que la vegetación asociada renueva su follaje al ser caducifolia.

Aun así, el resultado más equilibrado fue para la escena del 27 de marzo de 2023, ver Figura 3, con una estimación de 4,125 ha y con 71% de precisión, muestra confiabilidad al exponer sitios con alta probabilidad de estar sembrados con cultivo de café. En cuanto a la información espectral, la curva roja y ondas infrarrojas de onda corta (SWIR) para la cartografía de la vegetación, así como la banda azul fueron importantes para obtener la presencia del cultivo de café en el área de estudio.

## 5. Conclusiones

El algoritmo SAM y las imágenes de acceso libre del sensor Sentinel-2, muestran potencial para la identificación de áreas plantadas con el cultivo de café, como métodos sencillos y de fácil acceso. La imagen Sentinel-2 procesada con el algoritmo SAM tiene un gran potencial para estudios de identificación de vegetación, mostrando una alta resolución y precisión. Los índices espectrales exhiben resultados de precisión muy fluctuantes, por lo que no se recomiendan para la detección de cultivos como el café que corresponden a sistemas agrícolas complejos.

## Financiación

Se agradece el apoyo del CONACHYT, por la asignación de la beca de maestría para la realización de esta investigación.

## Referencias

Araque, L., & Jiménez, A. (2009). Caracterización de firma espectral a partir de sensores remotos para el manejo de sanidad vegetal en el cultivo de palma de aceite. *Revista Palmas*, 30(3), 63-79.

Ávila-Vélez, E. F., & Royero-Benavides, B. (2021). Aplicación de índices vegetales en café (*Coffea arabica* L.). *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 24(2). <https://doi.org/10.31910/rudca.v24.n2.2021.1584>

Baghdadi, N., Mallet, C., & Zribi, M. (2020). *QGIS y sus aplicaciones en la agricultura y la silvicultura* (Vol. 2). ISTE Group.

Benítez-García, E. (2014). Transmisión de los precios internacionales del café y su relación con los precios que reciben los productores de la Sierra Norte de Puebla. Colegio de Postgraduados, Campus Puebla. Posgrado en estrategias para el desarrollo agrícola regional. [Benitez\\_Garcia\\_E\\_MC\\_EDAR\\_2014.pdf \(2.695Mb\)](#)

Chuvieco S. E. 2008. *Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el Espacio* (3ª ed.). Ariel.

Cordero-Sancho, S., & Sader, S. A. (2007). Spectral analysis and classification accuracy of coffee crops using Landsat and a topographic-environmental model. *International Journal of Remote Sensing*, 28(7), 1577-1593. <https://doi.org/10.1080/01431160600887680>.

Dennison, P. E., Halligan, K. Q., & Roberts, D. A. 2004. A comparison of error metrics and constraints for multiple endmember spectral mixture analysis and spectral angle mapper. *Remote Sensing of Environment*, 93(3), 359-367. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.07.013>

ESA. 2014. Firmas espectrales. <https://www.esa.int> (consultado el 16 de enero de 2023).

Estrada, M. 2017. Producción en Amatepec genera 16 mdp anuales. *Quadratin*. Edo. Méx.

Fernandez-Gallo, B. I. 2019. *Producción de cartografía agrícola mediante análisis multitemporal de imágenes satélite (Sentinel 2) y cartografía catastral* Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de Valencia.

Figueroa-Figueroa, D. K., Ramírez-Dávila, J. F., Antonio-Némiga, X., & González Huerta, A. (2020). Cartografía del aguacate en el sur del estado de México mediante tratamiento digital de imágenes sentinel-2. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 11(4), 865-879. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i4.2173>

Gitelson, A. A., Chivkunova, O. B., & Merzlyak, M. N. (2009). Nondestructive estimation of anthocyanins and chlorophylls in anthocyanic leaves. *American Journal of Botany*, 96(10), 1861-1868. <https://doi.org/10.3732/ajb.0800395>

González Razo, F. D. J., Sangerman-Jarquín, D. M., Rebollar Rebollar, S., Omaña Silvestre, J. M., Hernández Martínez, J., & Morales Hernández, J. L. (2019). El proceso de comercialización del café en el sur del Estado de México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10(6), 1195-1206. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i6.2057>

Gupta, S. K., & Pandey, A. C. 2021. Spectral aspects for monitoring forest health in extreme season using multispectral imagery. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(3), 579-586. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.07.001>

Gutiérrez, N. (2015). Cultivo del Café. Agricultura y Desarrollo Rural, Jalisco. Consultado en línea en: [sader.jalisco.gob.mx](http://sader.jalisco.gob.mx).

Holben, B. & C. Justice. (1981). An examination of spectral band ratioing to reduce the topographic effect on remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 2:2, 115-133, DOI: 10.1080/01431168108948349

Hunt, D. A., Tabor, K., Hewson, J. H., Wood, M. A., Reymondin, L., Koenig, K., ... & Follett, F. (2020). Review of remote sensing methods to map coffee production systems. *Remote Sensing*, 12(12), 2041. <https://doi.org/10.3390/rs12122041>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). Compendio de información municipal: Amatepec. Consultado en línea: [www.amatepec.gob.mx](http://www.amatepec.gob.mx).

Jafari, R., Bashari, H., & Tarkesh, M. 2017. Discriminating and monitoring rangeland condition classes with MODIS NDVI and EVI indices in Iranian arid and semi-arid lands. *Arid land research and management*, 31(1), 94-110. <https://doi.org/10.1080/15324982.2016.1224955>

Jensen, J.R. (1996). *Introductory Digital Image Processing*. (New Jersey: Prentice Hall)

Jiménez, Z. T. I., Gómez, P. O., & Villaseñor, A. J. L. (2020). Competitividad de los productos agrícolas estratégicos de México en América del Norte. *Repositorio de la Red Internacional de Investigadores en Competitividad*, 14(14).

Lamparelli, R. A., Johann, J. A., Santos, É. R. D., Esquerdo, J. 9C., & Rocha, J. V. (2012). Use of data mining and spectral profiles to differentiate condition after harvest of coffee plants. *Engenharia Agrícola*, 32, 184-196. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162012000100019>

Makinde, E. O., Salami, A. T., Olaleye, J. B., & Okewusi, O. C. (2016). Object based and pixel based classification using rapideye satellite imager of ETI-OSA, Lagos, Nigeria. *Geoinformatics FCE CTU*, 15(2), 59-70. <https://doi.org/10.14311/gi.15.2.5>

Mas, J. F. (2011). Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio. SEMARNAT, UNAM y CIGA. México. [651\\_2011\\_Aplicaciones\\_sensor\\_MODIS\\_monitoreo\\_territorio.pdf \(4.785Mb\)](#)

Moguel, P., & Toledo, V. M. (1999). Café, luchas indígenas y sostenibilidad; el caso de México. *Ecología Política*, 23-36.

Morales-Espinoza, I. D. C., Ortiz-Solorio, C. A., Gutiérrez-Castorena, M. D. C., & Gutiérrez-Castorena, E. V. (2021). Estudio Etnoedafológico para el reconocimiento de tipos de usos asociados con cadenas productivas en el ejido de Santa Cruz, Durango. *Terra Latinoamericana*, 39. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.853>

Morell-Monzó, S., Estornell, J. & Sebastiá-Frasquet, M.T. (2022). Clasificación del estado de parcelas de cítricos utilizando datos multitemporales Sentinel-2. En *Teledetección para una Agricultura Sostenible en la era del Big Data*, Actas del XIX Congreso de la Asociación Española de Teledetección, pp. 35-38. 2022, Pamplona. Disponible en <http://www.aet.org.es/?q=congresos>

Murillo, A. U., Llobet, J. B., & Martín, A. E. (2010). *Tecnología de suelos: estudio de casos* (Vol. 179). Universidad de Zaragoza.

Organización Internacional de Café (OIC). 2023. Tomado de <https://icocoffee.org>. (Consultado diciembre 2023)

Paz Pellat, F., Romero Sánchez, M. E., Palacios Vélez, E., Bolaños González, M., Valdez Lazalde, J. R., & Aldrete, A. (2014). Alcances y limitaciones de los índices espectrales de la vegetación: marco teórico. *Terra Latinoamericana*, 32(3), 177-194.

Perez-Garcia, C. A., Pérez-Atray, J. J., Hernández-Santana, L., Gustabello-Cogle, R., & Becerra-de Armas, E. (2019). Sistema de Información Geográfica para la agricultura cañera en la provincia de Villa Clara. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 13(2), 30-46.

Petropoulos, G. P., Vadrevu, K. P., & Kalaitzidis, C. (2013). Spectral angle mapper and object based classification combined with hyperspectral remote sensing imagery for obtaining land use/cover mapping in a Mediterranean region. *Geocarto international*, 28(2), 114-129. <https://doi.org/10.1080/10106049.2012.668950>

Ramos-Reyes, R., Palma-López, D. J., Ortiz-Solorio, C. A., Ortiz-García, C. F., & Díaz-Padilla, G. (2004). Cambios de uso de suelo mediante técnicas de sistemas de información geográfica en una región cacaotera. *Terra Latinoamericana*, 22(3), 267-278.

Reyes, J. C., Rubi, M., & Aguilar, J. (1995). Manejo organico en el cultivo del aguacate. *Memorias Fundacion Salvador Sanchez Colin, CICTAMEX*, 29-37.

Rivera, A. F. G. & Clavijo, F. V. (2016). Agricultura de precisión y sensores multiespectrales aerotransportados. Recuperado de [http://cici.unillanos.edu.co/media2016/memorias/cici\\_2016\\_paper\\_106.pdf](http://cici.unillanos.edu.co/media2016/memorias/cici_2016_paper_106.pdf)

Ruelas-Monjardín, L. C., Nava-Tablada, M. E., Cervantes, J., & Barradas, V. L. (2014). Importancia ambiental de los agroecosistemas cafetaleros bajo sombra en la zona central montañosa del estado de Veracruz, México. *Madera y bosques*, 20(3), 27-40.

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2022). Cultivo de café en México. <https://www.gob.mx> (consultado septiembre de 2023)

Secretaría de Agricultura, Ganadería, desarrollo rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2017. Planeación Agrícola Nacional 2017-2030: Café Mexicano. 1ª ed. México.

SIAP. 2020. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. <https://www.gob.mx> (consultado junio 2022)

SIAP. 2023. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/807476/Cafe\\_Enero.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/807476/Cafe_Enero.pdf) (consultado diciembre de 2023)



Schmitt-Harsh, M., Sweeney, S. P., & Evans, T. P. (2013). Classification of coffee-forest landscapes using Landsat TM imagery and spectral mixture analysis. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 79(5), 457-468. <https://doi.org/10.14358/PERS.79.5.457>

Sobrino, J. A. (2001). *Teledetección*. Universitat de Valencia.

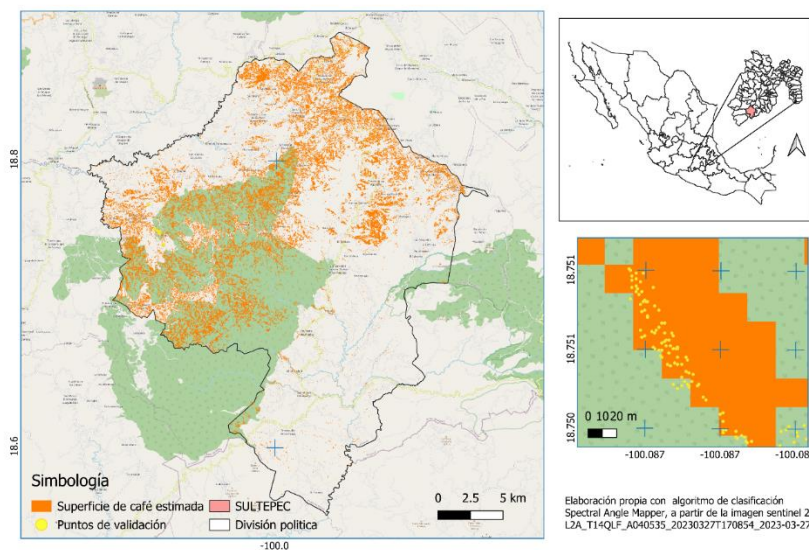
Taza de excelencia. (2023). Ganadores 2023. <https://tazadeexcelenciamexico.org> (consultado octubre 2023).

World Coffe Research (WCR). 20234. Variedades consultado en línea en: <https://varieties.worldcoffeeresearch.org/es/variedades/tipica>

## 12. Otros resultados

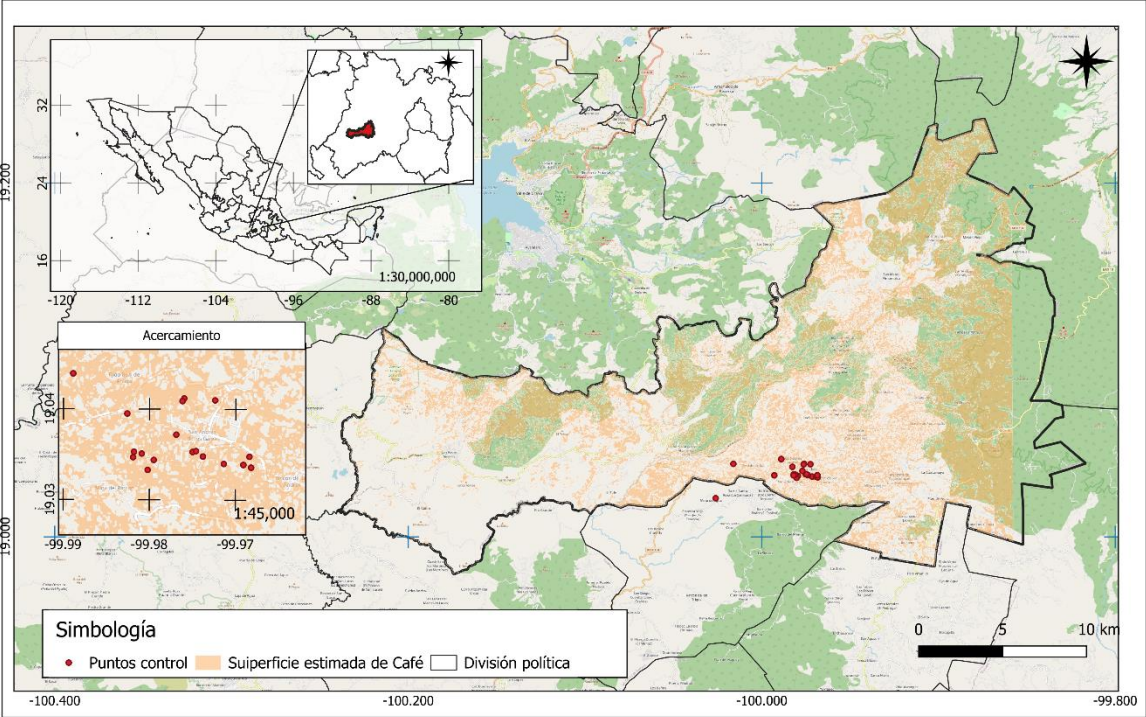
### 12.1 Cartografía de Sultepec y Temascaltepec

La superficie de café en Sultepec, estimada mediante el algoritmo SAM, consta de 8507.676 ha distribuidas principalmente en la región central y norte del municipio. Con un nivel de confianza de 78% de acierto y un error de comisión de 19%, ver Mapa 1 y Tabla 5.



Mapa 1 Superficie estimada del cultivo del café en Sultepec, Estado de México. Elaboración propia a través del algoritmo SAM en imagen sentinel 2.

En Temascaltepec, la superficie estimada de café consta de 24024.882 ha, distribuidas en todo el municipio. Con un nivel de exactitud de 80% y un error de comisión de 11%, ver Mapa 2 y Tabla 7.



Mapa 2 Superficie estimada del cultivo del café en Temascaltepec, Estado de México. Elaboración propia a través del algoritmo SAM en imagen sentinel 2

Tabla 6 Clasificación supervisada por SAM y validación (Matriz de tabulación cruzada).

Lugar	Fecha	Área	Píxel			Porcentaje		
			Acierto	Error	Total	Acierto	Error	E. C.
Sultepec	27-03-2023	8507.882	85	35	120	70.8	29.2	19
Temascaltepec	21-04-2023	24024.882	20	5	25	80	20	11

12.2 Evaluación multicriterio para la caracterización agroecológica de zonas óptimas para el cultivo del café.

A continuación, se comentan los resultados del análisis EMC para la valoración agroecológica para la identificación de sitios con condiciones favorables para el cultivo del café en Amatepec, Sultepec y Temascaltepec, Estado de México.

La tabla 6 indica los valores de factibilidad con diferentes rangos de aptitud, los cuales fueron determinados a través de bibliografía consultada (Rojo, 2014; González-González y Hernández-Santana, 2016; Aceves et al, 2020; SIAP, 2020; Chamurra et al, 2021). Las zonas optimas se definen como montañas bajas, con pendientes suaves a moderadas (menor a 30%), precipitaciones entre 1500 a 2000 mm, en zonas semicálidas con un rango de temperatura de 17°C a 22°C y sobre suelos que presentan buen drenaje y ricos en materia orgánica.

Las zonas con potencial medio se indican en pendientes mayores a 30%, con precipitaciones medias anuales de 500-1000 mm y de 1500-1800mm. En zonas templadas y semicálidas con un rango de temperatura de 14°C a -17°C y de 22°C a 24°C, respectivamente.

Las zonas con grado de aptitud bajo y muy bajo se localizan en pendientes abruptas, en zonas semifrías y cálidas. En suelos susceptibles a la erosión y con baja profundidad, ver Tabla 8.

*Tabla 7 Rangos de aptitud agroecológica para el cultivo del café por municipio.*

ATRIBUTO	RANGO	OPTIMO	MEDIO	BAJO	Muy bajo
ALTITUD	700-1300 MSNM	1 000 y 1500	500-1000 y 1500-1800	400-500	1800- ≥2000
PENDIENTE	MENOR A 18°, 30%	Menor a 30%	30 -60%	61-80%	Mayor a 80%
PRECIPITACION	1000-2000	1500-2000	1200-1500	1000-1200 y 2000 a 2500	800 a 1000
TEMPERATURA	15°-25°	17 -22	14-17; 22- 24	12-14; 24- 26	26-28
SUELO					
sultepec		cambisol			regosol
amatepec		Feozem	Cambisol	Luvisol,	regosol
Temascaltepec		Andisol,	Feozem Cambisol	Luvisol	

Fuente: Rojo, 2014; González-González y Hernández-Santana, 2016; Aceves et al, 2020; SIAP, 2020; Chamurra et al, 2021.

### 12.2.1 Factores agroecológicos

El factor más heterogéneo es el suelo, debido a que en los municipios la constitución es variada. Amatepec presenta suelos de tipo Regosol, Cambisol, feozem y Luvisol, ver mapa 3. La clasificación de los suelos en este municipio se realizó con base al pH y el contenido de materia orgánica, ya que todos presentaban una clase textural media. Catalogando a los suelos de tipo feozem como óptimos, cambisol como medianamente óptimos, luvisol con aptitud baja y regosol con aptitud muy baja (Álvarez-Sánchez y Naranjo-García, 2003; INEGI, 2023).

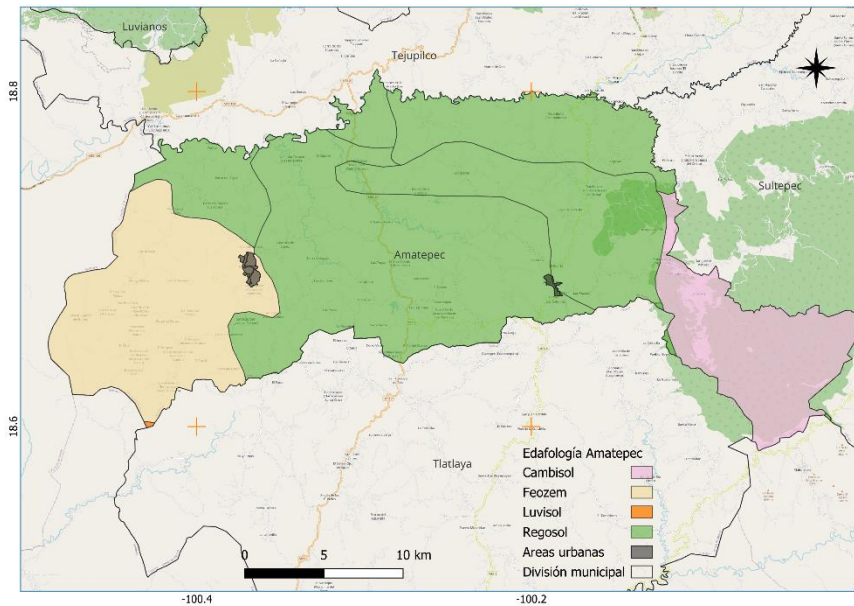
El suelo de tipo Feozem, exhibe características positivas para el cultivo del café. Se trata de suelos con una profundidad de hasta 1 m, son propios de zonas áridas y semiáridas, fértiles y pueden soportar una gran variedad de cultivos, aunque son muy susceptibles a la erosión. Estos suelos constituyen 13, 295 ha en Amatepec, equivalentes al 21.3% de la superficie total del municipio, ver mapa 3 (INEGI, 2004).

Los suelos de tipo cambisol se distinguen por tener una profundidad optima, buen drenaje al ser porosos y tener buen contenido de materia orgánica. Además de presentar pH ácidos y exhibir una mayor capacidad de intercambio catiónico. En Amatepec, los suelos de tipo cambisol constituyen 8 451 ha, lo que representa el 13.5% de la superficie total del municipio, ver mapa 3 (Álvarez-Sánchez y Naranjo-García, 2003; INEGI,2004).

El suelo de tipo Luvisol, exhibe características que restringirían un poco el cultivo del café. Presenta profundidades de 25 a 125 cm, y como característica distintiva es la presencia de un horizonte con acumulación de arcilla, que si bien ayuda a la retención de agua puede ser un problema con encharcamientos y generar la pudrición de raíces. Este tipo de suelo es el menos representativo en Amatepec con una superficie de 17.6 ha equivalente al 4.5% de la superficie total de Amatepec, ver mapa 3.

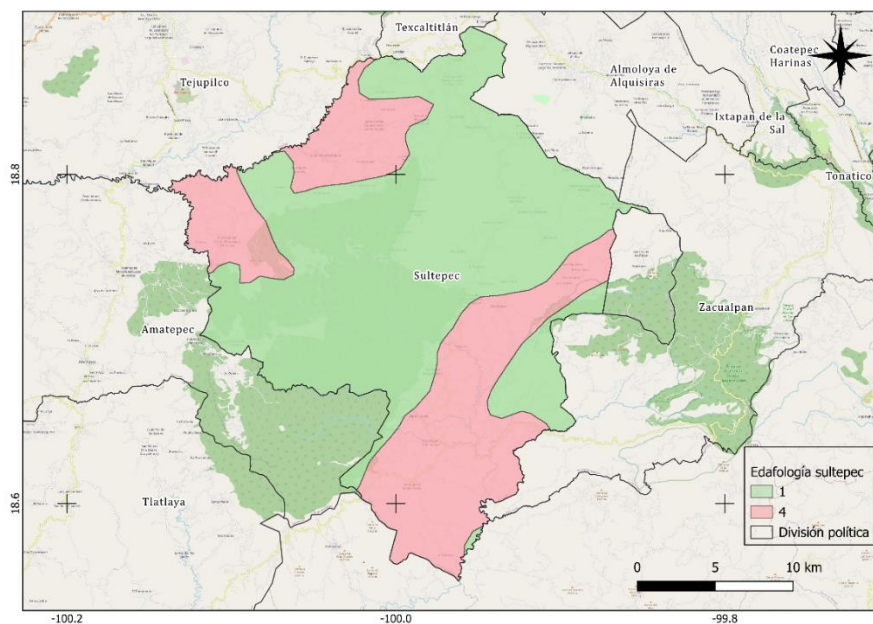
El suelo predominante en Amatepec es de tipo Regosol, con 41863 ha (60.7 % de la superficie del municipio), ver mapa 3. Este tipo de suelo no es recomendable para el cultivo del café debido a su baja profundidad, bajo contenido en nutrientes y materia orgánica, así como una fertilidad baja y ser susceptible a la erosión (Álvarez-Sánchez y Naranjo-García, 2003; INEGI,2004).





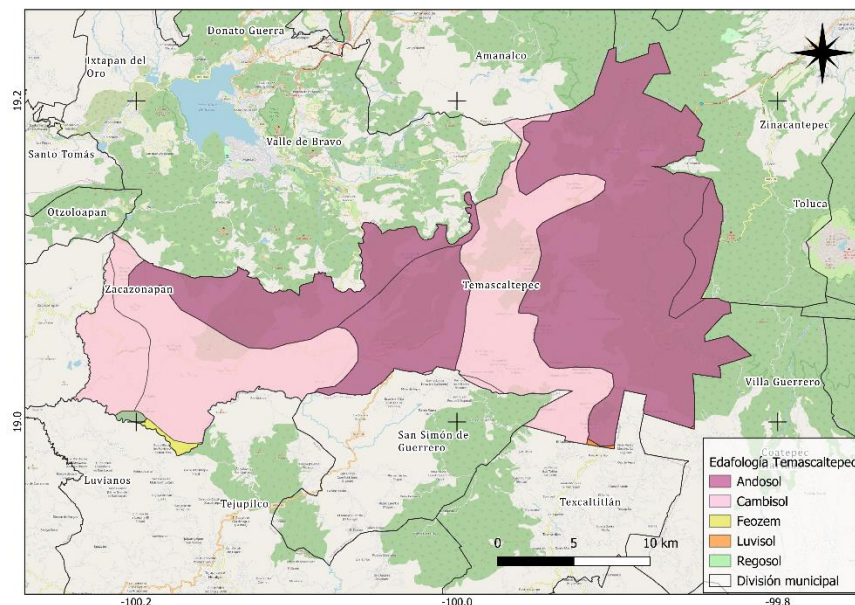
Mapa 3 Tipos de suelos Amatepec. Fuente de datos Conjunto edafológico INEGI, 2013<sup>a</sup>.

En Sultepec solo existen dos tipos de suelos, cambisol y regosol, por lo que solo presenta dos potenciales de grado de aptitud: optimo y muy bajo, respectivamente. Los suelos de tipo cambisol tienen una extensión de 36094.12 ha, que equivalen al 63.7 % de la superficie total del municipio. Mientras que los suelos de tipo regosol corresponden a 20520.44 ha que equivalen al 36.24% de la superficie total del municipio, ver mapa 4.



*Mapa 4 Tipos de suelos Sultepec. Fuente de datos Conjunto edafológico INEGI, 2013a*

En Temascaltepec los suelos son de tipo andosol, cambisol, regosol, feozem y luvisol. El suelo de tipo andosol es el más representativo al tener una extensión de 35986.38 ha correspondientes al 63.3% de la superficie total del municipio. Este tipo de suelo se consideró con potencial óptimo, debido a su extensión y a sus características. Los suelos de tipo andosol son suelos muy fértiles, con buen drenaje y permiten el buen anclaje radical. El suelo de tipo cambisol, es el segundo más representativo en extensión, cuenta con 20495.8 ha que equivalen al 36% y se consideró como medianamente óptimo. Mientras que los suelos de tipo regosol, feozem y luvisol corresponden al 6 % de la superficie del municipio, ver mapa (Álvarez-Sánchez y Naranjo-García, 2003; INEGI,2004).

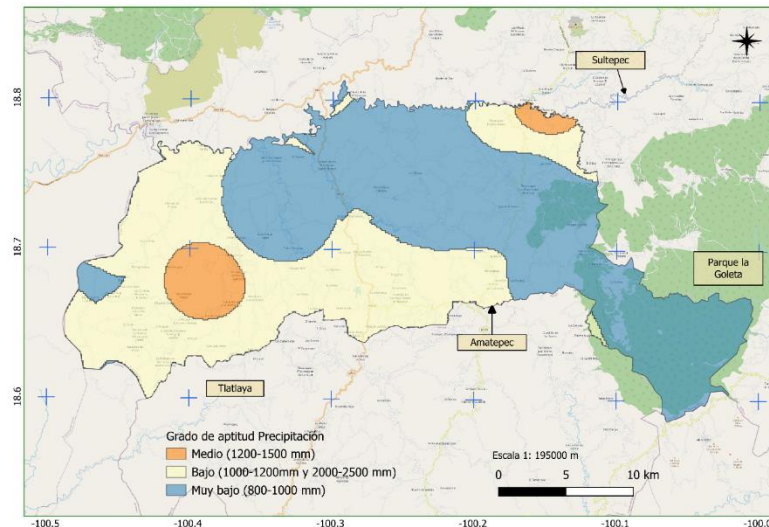


*Mapa 5 Tipos de suelos Temascaltepec. Fuente de datos Conjunto edafológico INEGI, 2013<sup>a</sup>.*

En cuanto a los factores del clima como temperatura y precipitación se identifican condiciones distintas para cada municipio, pero en ningún municipio se obtuvo el valor óptimo de precipitación. Esta condición es más severa para el municipio de Sultepec.

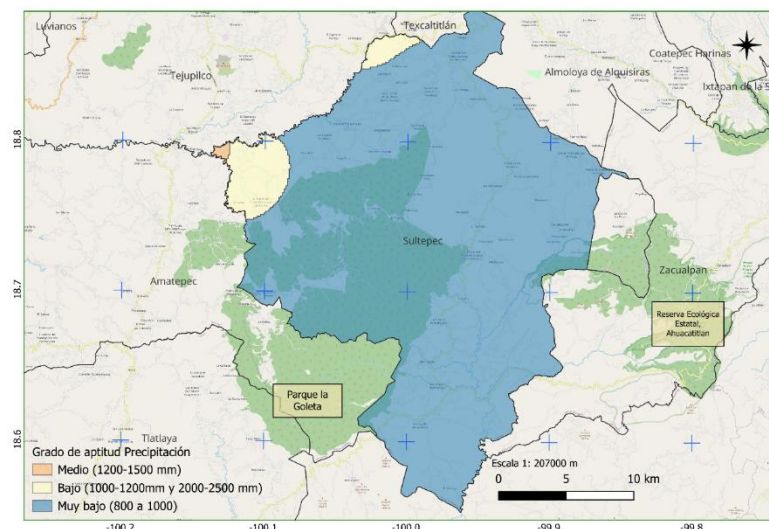
En Amatepec, el grado de aptitud de precipitación media anual con mayor superficie es el muy bajo correspondiente al intervalo de 800-1000 mm, con una superficie de 33379.15 ha (53.41% de la superficie del municipio). Seguido del potencial bajo, con intervalos de 1000-1200 mm y

de 2000-2500 mm, con una superficie de 25692.98 ha (41.11% del territorio). Y el intervalo medio, de 1200-1500 mm, con una superficie de 3341.5 ha (5.34% del municipio), ver Mapa 6.



*Mapa 6 Precipitación anual Amatepec. Fuente Cuervo-Robayo et al., 2014*

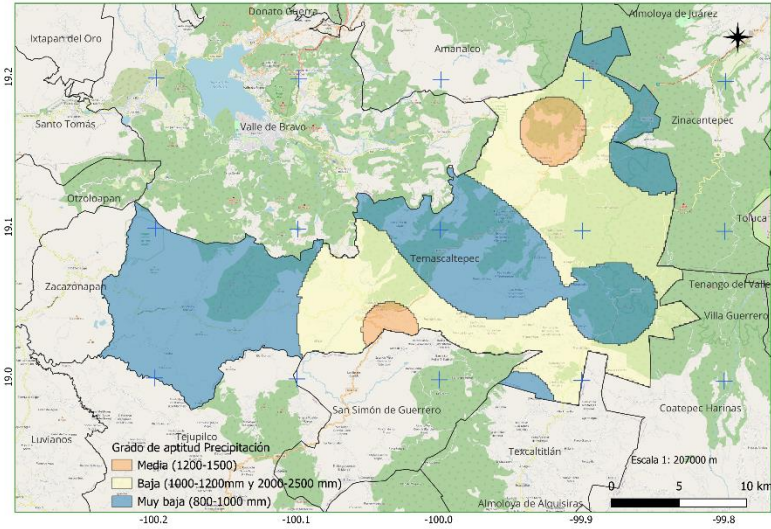
En Sultepec el grado de aptitud de Precipitación predominante es el muy bajo, con 52481.3 ha (94.98% del municipio). El nivel bajo presenta 2619.67 ha (4.7 % del municipio) y con aptitud media 111.99 ha (0.20%), ver Mapa 7.



*Mapa 7 Precipitación anual Sultepec. Fuente Cuervo-Robayo et al., 2014.*

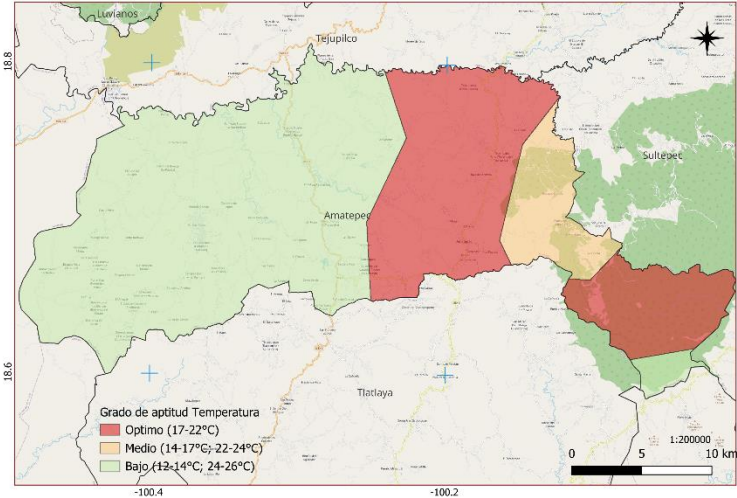


En Temascaltepec, en el factor precipitación, exhibe mayor extensión en superficie el grado de aptitud muy bajo con 27 822.55 ha (50.88% del municipio), seguido del bajo con 24086.71 ha (44.05%) y medio con 2770.72 ha (5.06%), ver Mapa 8.



Mapa 8 Precipitación anual Temascaltepec. Fuente Cuervo-Robayo et al., 2014.

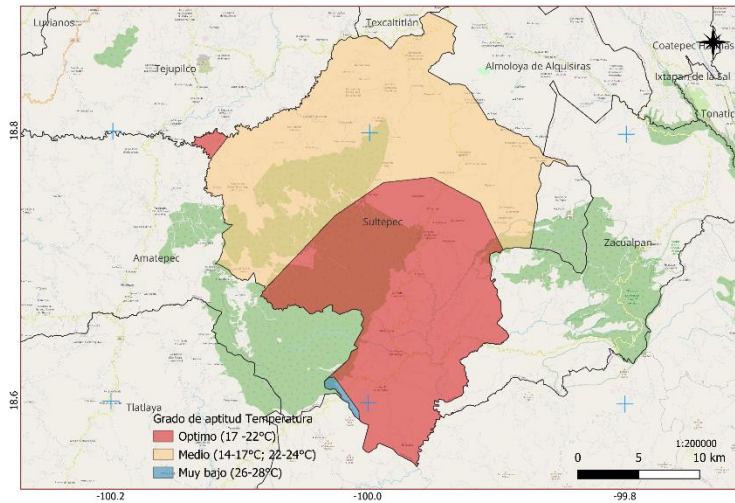
En cuanto a la temperatura en Amatepec, el grado de aptitud bajo es el más extenso con 36727 ha (58.7%). Luego del potencial óptimo con 20557.73 (32.89%) y por último del potencial medio con 5195.69 (8.31%), ver mapa 9.



Mapa 9 Temperatura en Amatepec. Fuente INEGI, 2020a.

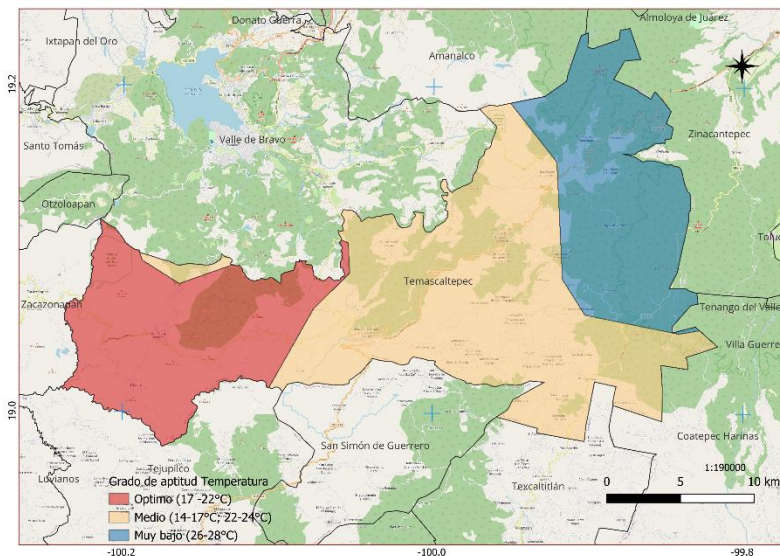


Sultepec tiene mayor extensión del grado de aptitud medio en el factor temperatura con 29987 ha (54.27%), luego del grado optimo con 25033 (45.3%) y grado muy bajo con 230 ha (0.41%), ver mapa 10.



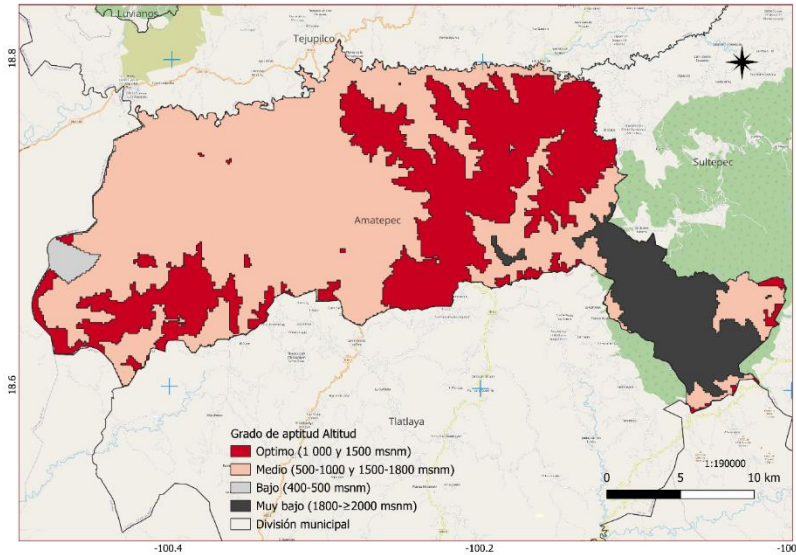
Mapa 10 Temperatura en Sultepec. Fuente INEGI, 2020<sup>a</sup>.

En Temascaltepec, en el factor temperatura, el grado de aptitud medio es el más extenso con 26850 ha (49.04%), luego el grado optimo con 14360 ha (26.22%) y el grado muy bajo 13540 ha (24.73%), ver mapa 11.



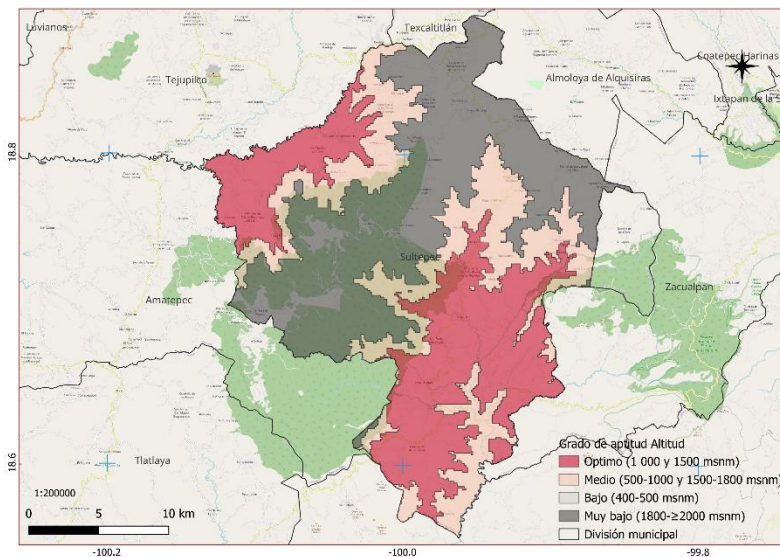
Mapa 11 Temperatura en Temascaltepec. Fuente INEGI, 2020<sup>a</sup>.

En cuanto altitud en Amatepec, el grado optimo presenta 17755.06 ha (28.41% del municipio), el grado de aptitud medio con 37249.97 ha (59.60%), bajo con 1024.21 ha (1.3%) y muy bajo con 6459.83 ha (10.33%).



*Mapa 12 Altitud Amatepec. Fuente: elaboración propia a partir de datos del CEM (INEGI, 2013).*

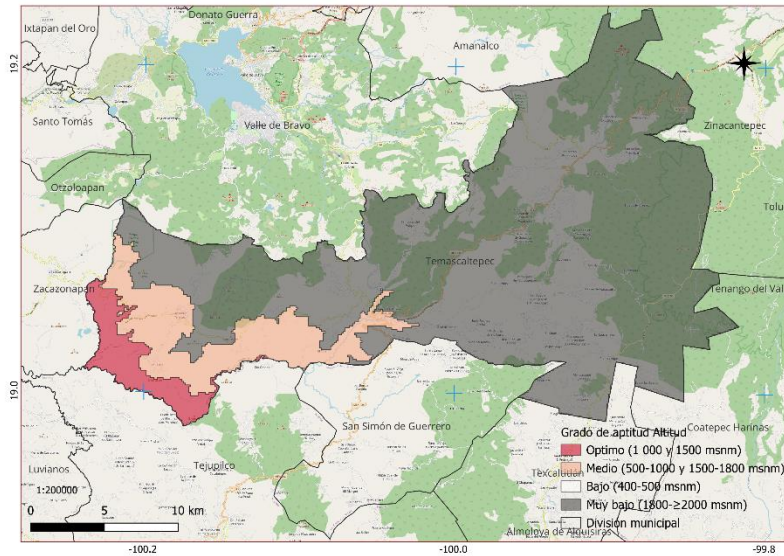
En Sultepec, el grado de aptitud muy bajo para el factor Altitud, es el más extenso con 22838.23 ha (41.33% del municipio). Posteriormente el grado optimo con 18044.44 ha (32.65%), luego el grado bajo con 254.227 (0.46%) y grado medio con 14113.06 ha (25.54%), ver mapa 13.



*Mapa 13 Altitud Amatepec. Fuente: elaboración propia a partir de datos del CEM (INEGI, 2013).*

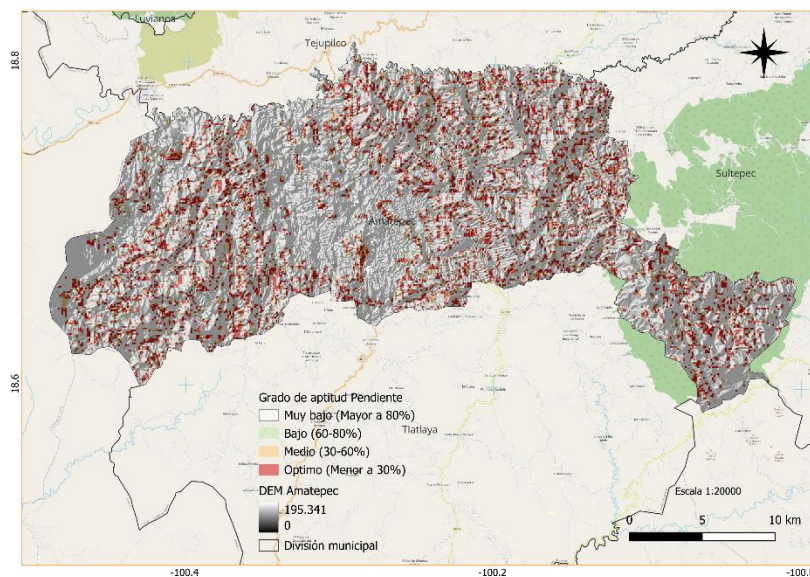


En Temascaltepec la altitud se encuentra distribuida por 4 grados de aptitud, donde el más representativo en extensión es el muy bajo con 45685.02 (83.44%), posteriormente el grado de aptitud medio con 6366.46 (11.62%), el grado optimo con 2393.32 ha (4.37%) y bajo con 305.2 ha (0.55%), ver mapa 14.



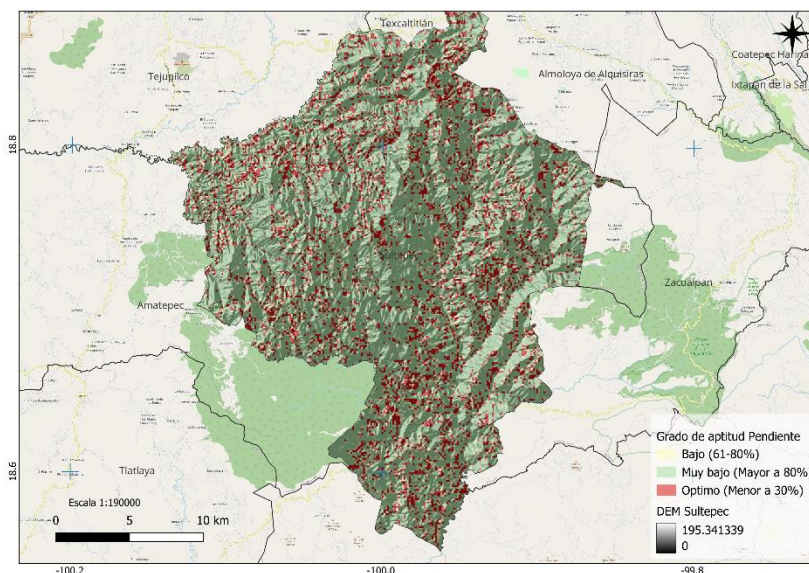
*Mapa 14 Altitud Temascaltepec. Fuente: elaboración propia a partir de datos del CEM (INEGI, 2013).*

En cuanto a pendiente, en Amatepec el grado más distintivo es el muy bajo con 43474.92 ha (69.57%), seguido del optimo con 10216.31 ha (16.34%), medio con 5728.83 ha (9.16%) y bajo con 3069.92 ha (4.91%), ver mapa 15.



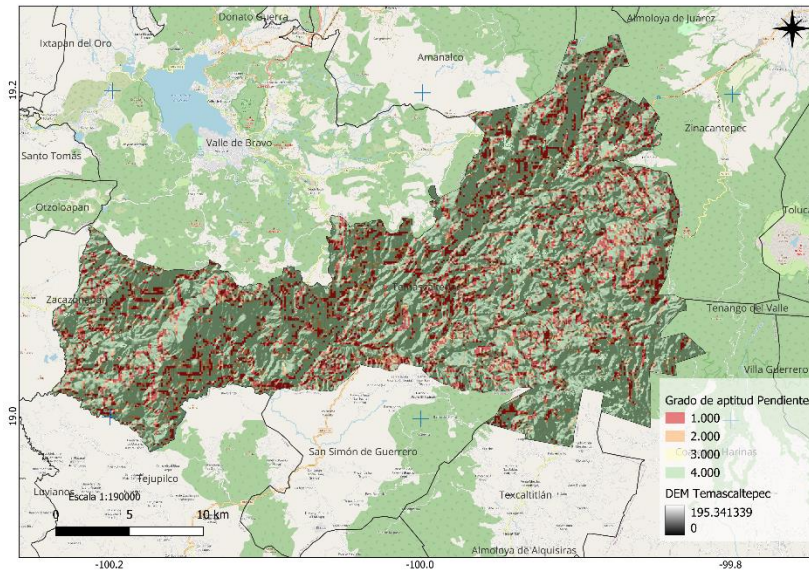
*Mapa 15 Pendiente Amatepec. Fuente: elaboración propia a partir de datos del CEM (INEGI, 2013).*

En Sultepec el factor de pendiente está constituido por tres grados de aptitud: óptimo, bajo y muy bajo. El grado de aptitud con mayor extensión es el muy bajo con 36540 ha (66.13% de la superficie municipal). Seguido del grado óptimo con 10210 ha (18.47% del municipio) y bajo con 8500 ha (15.38%), ver mapa 16.



*Mapa 16 Pendiente Sultepec. Fuente: elaboración propia a partir de datos del CEM (INEGI, 2013).*

En Temascaltepec la pendiente tiene una representación mayor del grado de aptitud muy bajo, con 36100.26 ha (66.02%), seguido del nivel óptimo con 9549.21 ha (17.29%), grado medio 6020.22 ha (11%) y muy bajo 3100.22 ha (5.66%), ver mapa 17.



*Mapa 17 Pendiente Sultepec. Fuente: elaboración propia a partir de datos del CEM, (INEGI, 2013).*

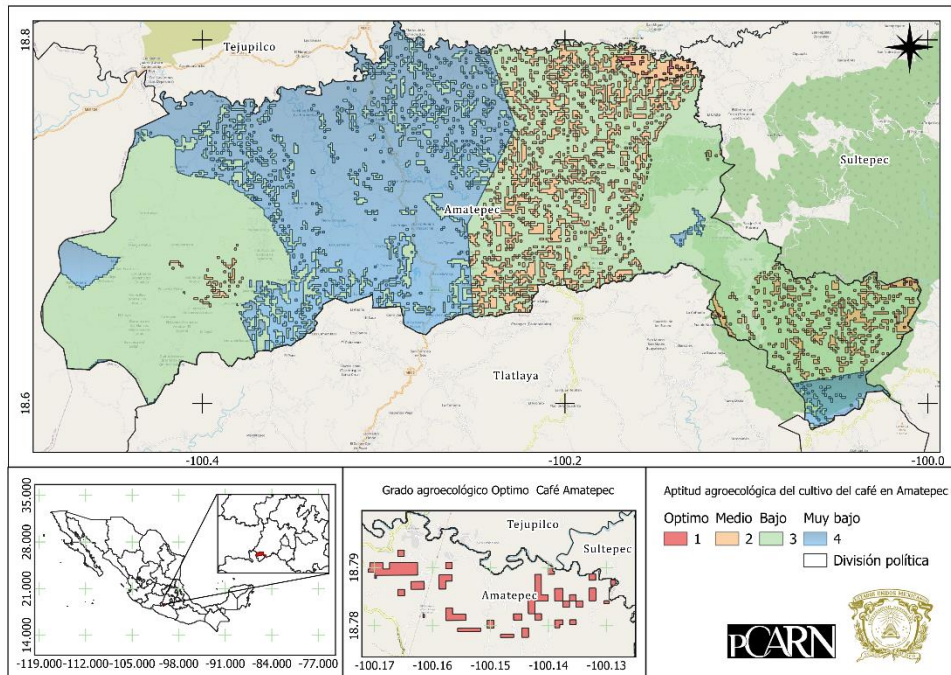
### Zonas de aptitud agroecológica

De acuerdo con el Modelo de evaluación multicriterio que se desarrolló en esta investigación, se obtuvo como predominante las zonas de aptitud con grado medio en Sultepec y Temascaltepec. En Amatepec el grado de aptitud más extenso es el grado bajo.

Para Amatepec el grado de potencial agroecológico óptimo está representado por 105.262 ha (0.16% del municipio) y se encuentra ubicado en la zona noroeste. El grado de potencial agroecológico medio está constituido por 5 790.09 ha (9.26% del municipio), ubicado en la parte media y en los extremos del sur del municipio de Amatepec, ver mapa 18 y tabla 7.

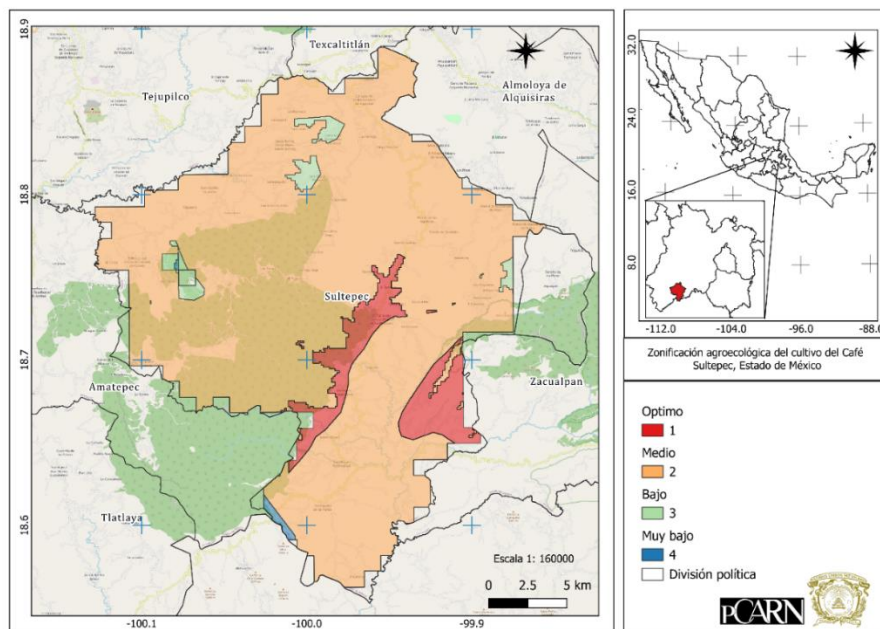
En Amatepec, el grado de aptitud bajo es el más extenso, con 36 544.49ha, más de la mitad de la superficie municipal. El grado de aptitud muy bajo es el segundo más extenso con 20050.14 ha (32.08% del municipio), ver mapa 18 y tabla 9.





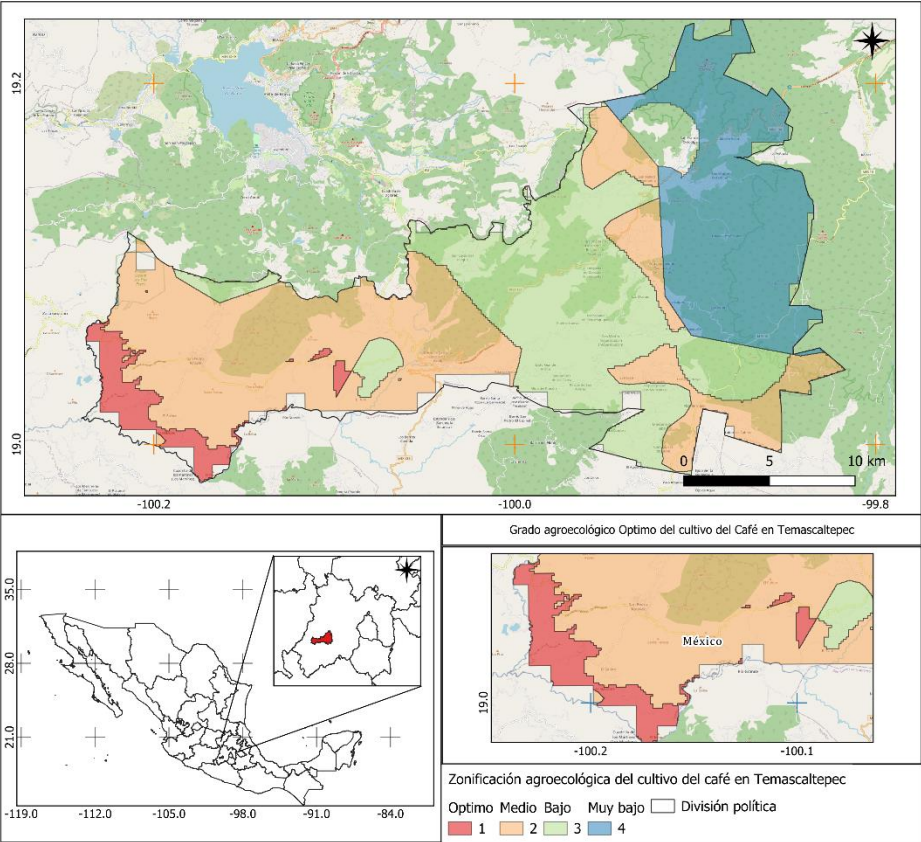
Mapa 18 Zonificación agroecológica del cultivo del café en Amatepec. Elaboración propia a partir de datos de INEGI (2014, 2020 y 2023) y Cuervo-Robayo et al., 2014.

En el municipio de Sultepec el grado de aptitud agroecológica predominante es el grado medio, con 49990.5 ha con más del 90% de la superficie municipal. Posteriormente el grado optimo con 4 060.5 (7.34%), localizado en el centro del municipio, ver mapa 19 y tabla 7.



Mapa 19 Zonificación agroecológica del cultivo del café en Sultepec. Elaboración propia a partir de datos de INEGI (2014, 2020 y 2023) y Cuervo-Robayo et al., 2014.

En Temascaltepec el grado de aptitud agroecológica con mayor superficie es el grado medio con 21627.88 ha (39.55%), distribuido principalmente en la parte oeste del municipio. Luego del grado bajo con 16682.78 ha (30.5%). El grado muy bajo con 12835.36 ha (23.47%) ubicado en la parte noreste de Temascaltepec y el grado optimo con 3533.96 (6.46%) localizado en el suroeste del municipio, ver mapa 20 y tabla 9.



Mapa 20 Zonificación agroecológica del cultivo del café en Temascaltepec. Elaboración propia a partir de datos de INEGI (2014, 2020 y 2023) y Cuervo-Robayo et al., 2014.

Tabla 8 Superficie grados de aptitud. Elaboración propia.

	Superficie en hectáreas por grado de aptitud				
Municipio	Muy bajo 4	Bajo 3	Medio 2	Alto 1	Total
Amatepec	20050.1496 (32.08%)	36544.497 (58.48%)	5790.091 (9.26%)	105.262 (0.16%)	62490 (100%)

Sultepec	205 (0.37%)	994 (1.79%)	49990.5 (90.48%)	4060.5 (7.34%)	55250
Temascaltepec	12835.368 (23.47%)	16682.78 (30.5%)	21627.883 (39.55%)	3533.969 (6.46%)	54680

### Interpretación de las zonas Optimas

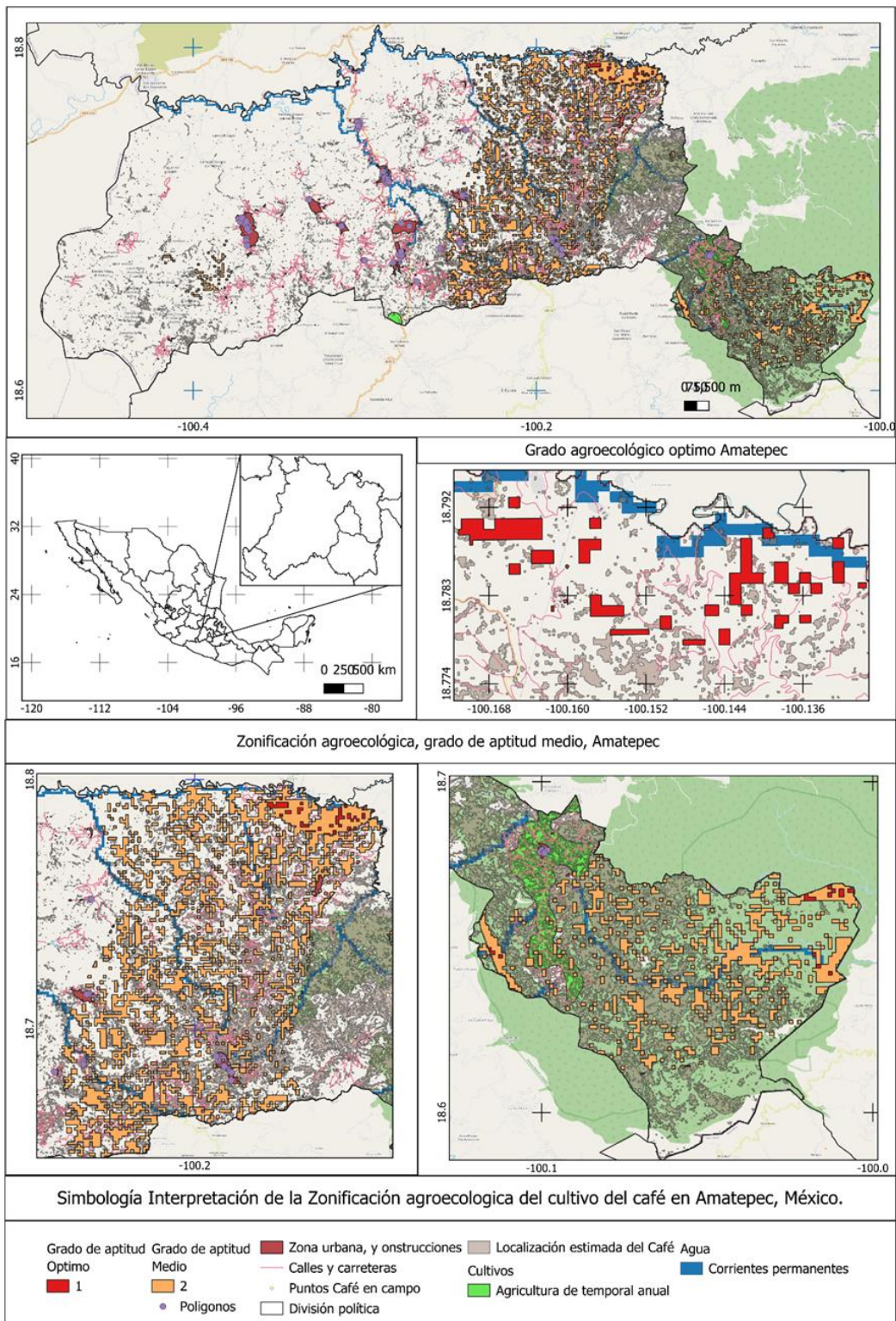
En este apartado a través de sobreposición de mapas cartográficos de carreteras y caminos, zonas urbanas, corrientes de agua, vegetación, superficie estimada del café y áreas de protección ecológica, se identificaron zonas en donde verdaderamente se podrían implementar nuevas plantaciones del cultivo del café para los tres municipios. Por lo que se consideró únicamente los grados de aptitud agroecológica optimo y medio.

En Amatepec, el potencial de grado optimo, se sobrepone con pocas carreteras y caminos. Algunos pequeños polígonos con corrientes de agua. Como puede verse en el mapa 21. Amatepec cuenta con pocas localidades o zonas urbanas y extensas regiones de bosque y pastizal en las que se podría desarrollar el cultivo.

La cartografía obtenida de la superficie estimada del cultivo del café en Amatepec se encuentra localizada en las zonas con potencial medio, ver mapa 21.

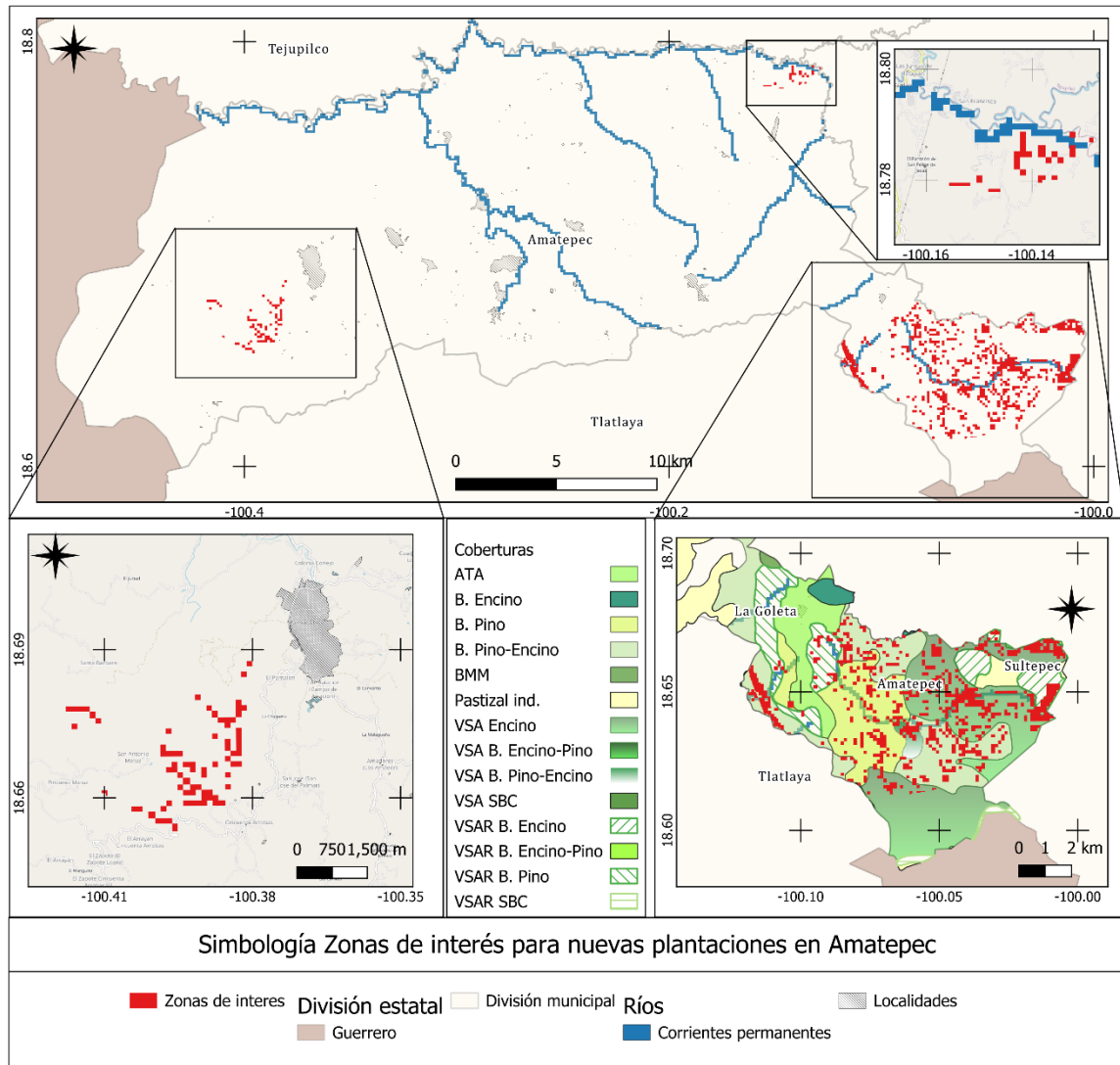
En Amatepec se identificaron tres regiones donde se podrían establecer nuevas plantaciones. Estas son libres de construcciones, carreteras y caminos, cuerpos de agua y de los puntos de control tomados en parcelas productoras de 34 localidades (donde ya se encuentra el cultivo). Las zonas potenciales para nuevas plantaciones para el cultivo del café en Amatepec se encuentran en la parte Noreste del municipio, con grado de aptitud optimo. En la región sureste (siendo la más extensa), donde se encuentran grandes cantidades de bosque. Y en la zona suroeste, debajo de la localidad de Palmar chico. Estas zonas corresponden a 1294.737 ha. Algunas de ellas se encuentran cerca de corrientes permanentes de agua, ver mapas 21 y 22.





Mapa 21 Interpretación de las zonas con grado de aptitud optimo y medio. Fuente: Elaboración propia y Marco geoestadístico INEGI, 2020.

En la zona sureste de Amatepec, donde se describen zonas de interés para nuevas plantaciones se encuentran coberturas como bosque de pino, vegetación secundaria arbórea de bosque de Pino-Encino, vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino y de pino, ver mapa 22 y figura .

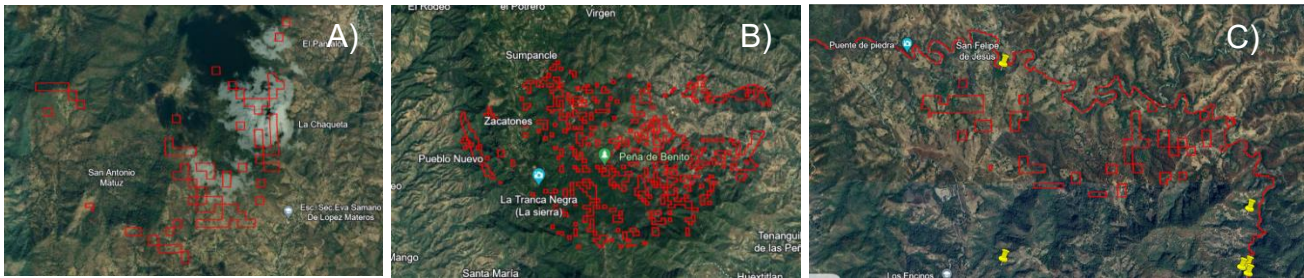


Mapa 22 Zonas de interés para nuevas plantaciones en Amatepec, Estado de México. Fuente: Marco geoestadístico, 2020 para localidades y Uso de suelo y vegetación, 2018 para tipos de vegetación.

Las zonas de interés para nuevas plantaciones de café cuentan con coberturas arbóreas, como se puede ver en la Figura 6. Y es de especial interés la parte sureste, donde el bosque se

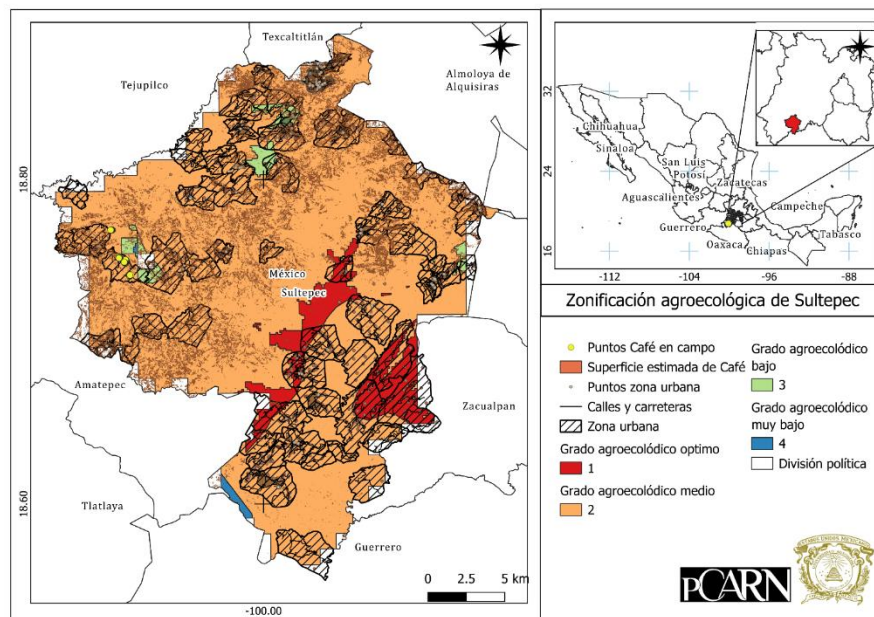


encuentra en recuperación, ya que como puede verse en el mapa anterior, existen grandes extensiones de vegetación secundaria arbórea principalmente de pino y encino.



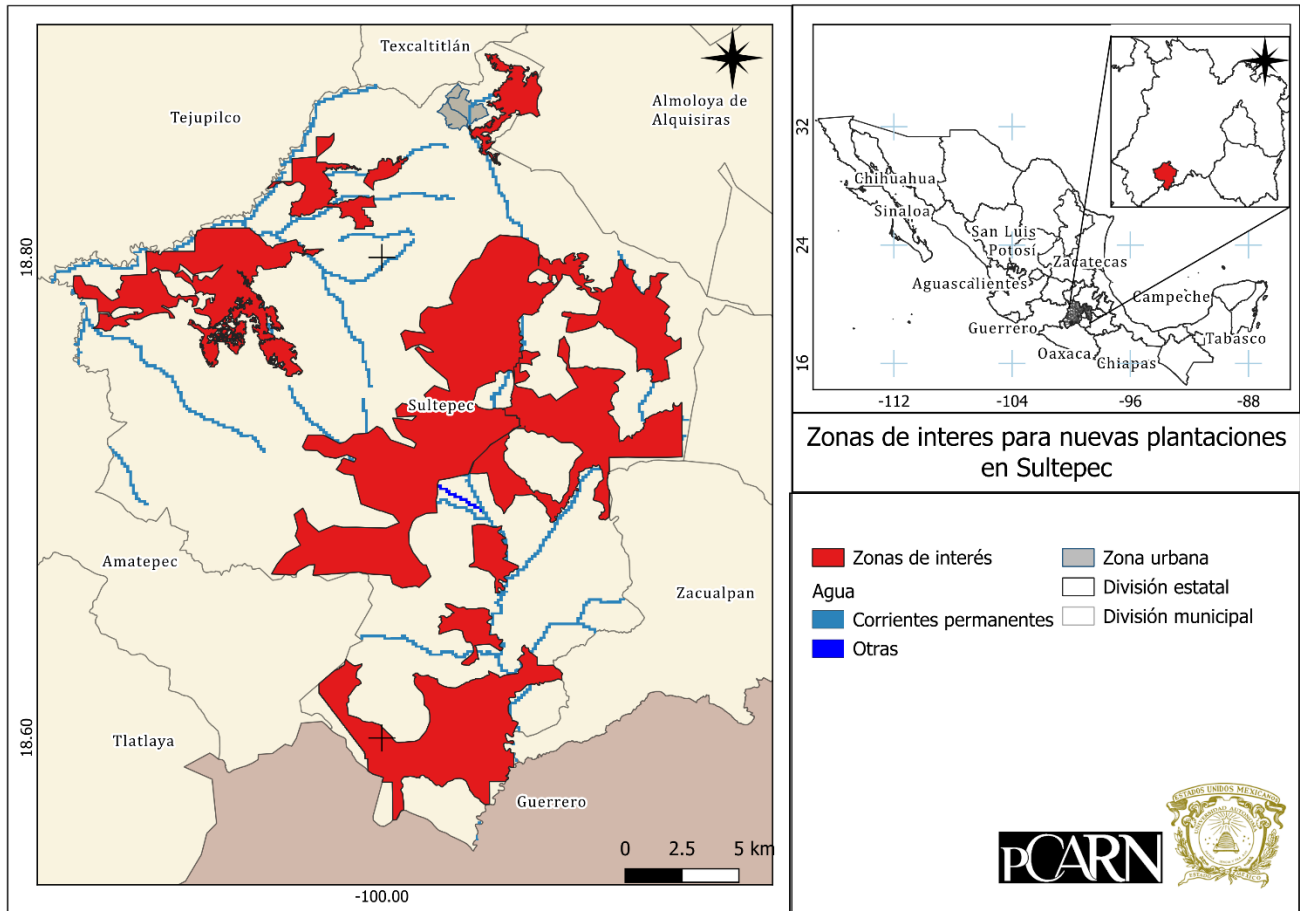
*Figura 6 Zonas con interés para nuevas plantaciones en Amatepec En A) apreciamos la zona noroeste, con grado de aptitud medio, cercana a las comunidades de El paraíso, La chaqueta y San Antonio Matuz. En B) se localiza la zona sureste, con grado de aptitud medio, cercana a Pueblo nuevo, Zacatones y Sumpancle. En C) se muestra la zona noreste, con grado de aptitud optimo, cerca de San Felipe de Jesús. Fuente: Google earth, 2024.*

La cartografía de Sultepec nos permite ver que el municipio cuenta con varias localidades distribuidas en todo el municipio. En ellas se concentran carreteras y caminos. Además, podemos observar que tanto los puntos de control, como la superficie estimada del cultivo del café se encuentran distribuidos en regiones con potencial agroecológico medio, ver mapa 23.



*Mapa 23 Interpretación de las zonas con grado de aptitud optimo y medio. Fuente: elaboración propia y Marco geoestadístico INEGI, 2020.*

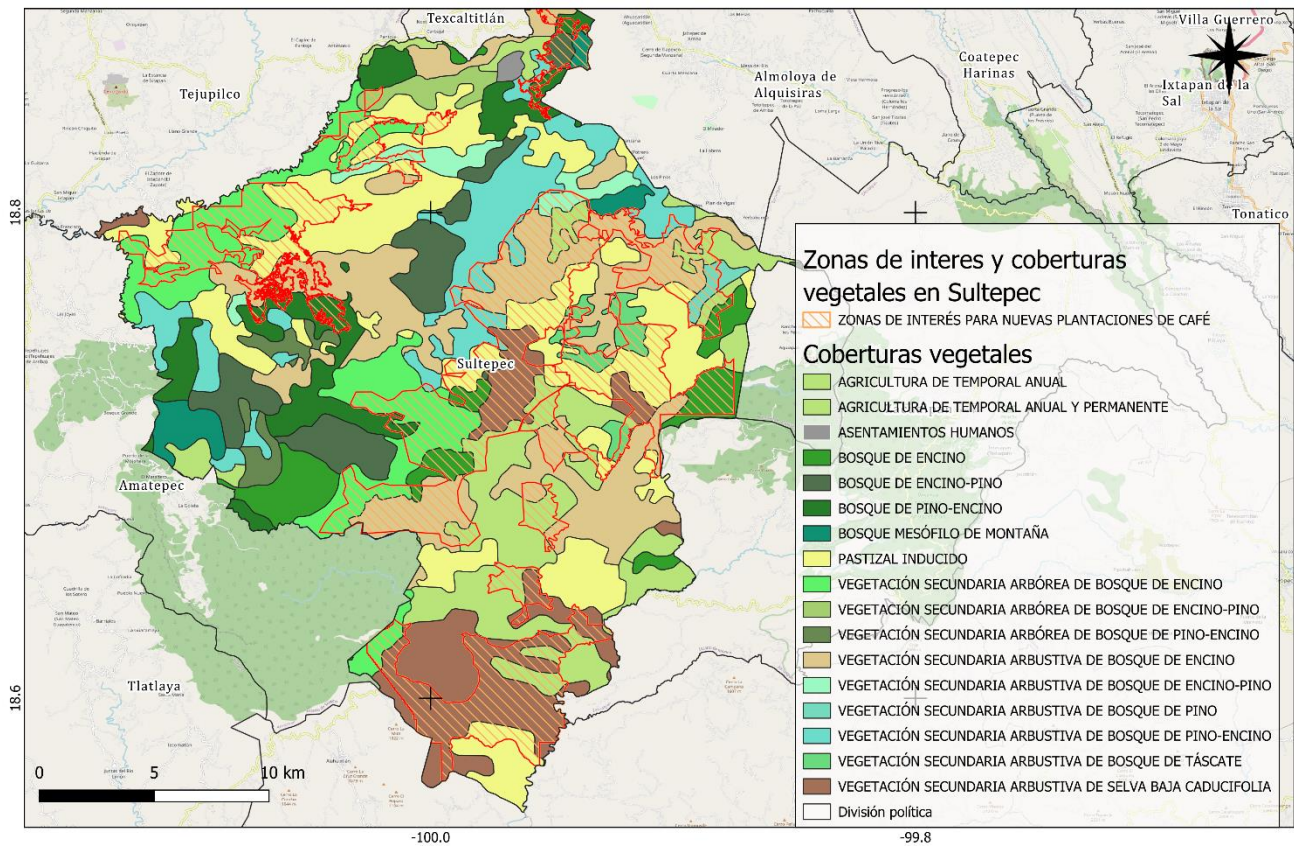
En Sultepec, las zonas de interés se distribuyen alrededor de todo el municipio y cubren una extensión de 17930.448 ha (32.45% de la superficie del municipio). La mayoría de ellas próximas a corrientes permanentes de agua. Es de especial interés la zona noreste, cercana a la localidad de Capula y Sultepec de San Pedro Ascencio de Alquisiras y la parte noroeste, arriba de la localidad de Puenteillas. Aquí se encuentran zonas de interés con grandes coberturas de bosques, principalmente de Pino-Encino, ver Mapa 24, Mapa 25 y Figura 7.



*Mapa 24 Zonas de interés para nuevas plantaciones en Sultepec, Estado de México. Fuente: Elaboración propia.*

En la región central y sur de Sultepec, las zonas de interés se encuentran representadas por comunidades de vegetación que se están recuperando, como vegetación secundaria arbórea y arbustiva de encino, vegetación secundaria arbórea de encino-pino y vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia. La mayoría de estas comunidades vegetales presentan menor densidad además de ubicarse en sitios con muchas pendientes, ver Mapa 24 y Figura 7.





Mapa 25 Zonas de interés para nuevas plantaciones y coberturas vegetales en Sultepec, Estado de México. Fuente: Uso de suelo y vegetación de INEGI, 2018.

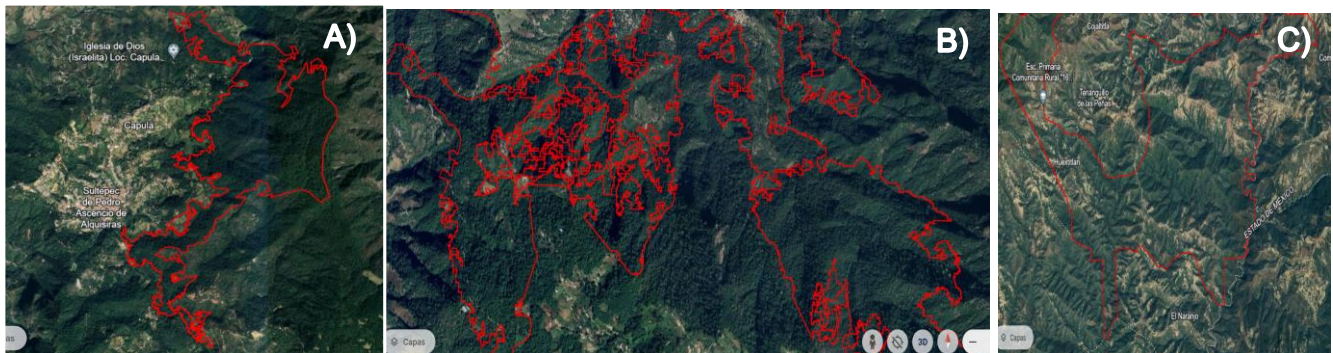


Figura 7 Zonas con interés para nuevas plantaciones en Sultepec. En A) apreciamos la zona noreste, con grado de aptitud medio, cercana a las comunidades Sultepec de Pedro Ascencio de Alquisiras y Capula. En B) se localiza la zona oeste, con grado de aptitud medio, cercana a Puentecillas. En C) se muestra la zona sur, con grado de aptitud medio, cerca de Tenanguillo de las Peñas y Huixtitlan. Fuente: Google earth, 2024.

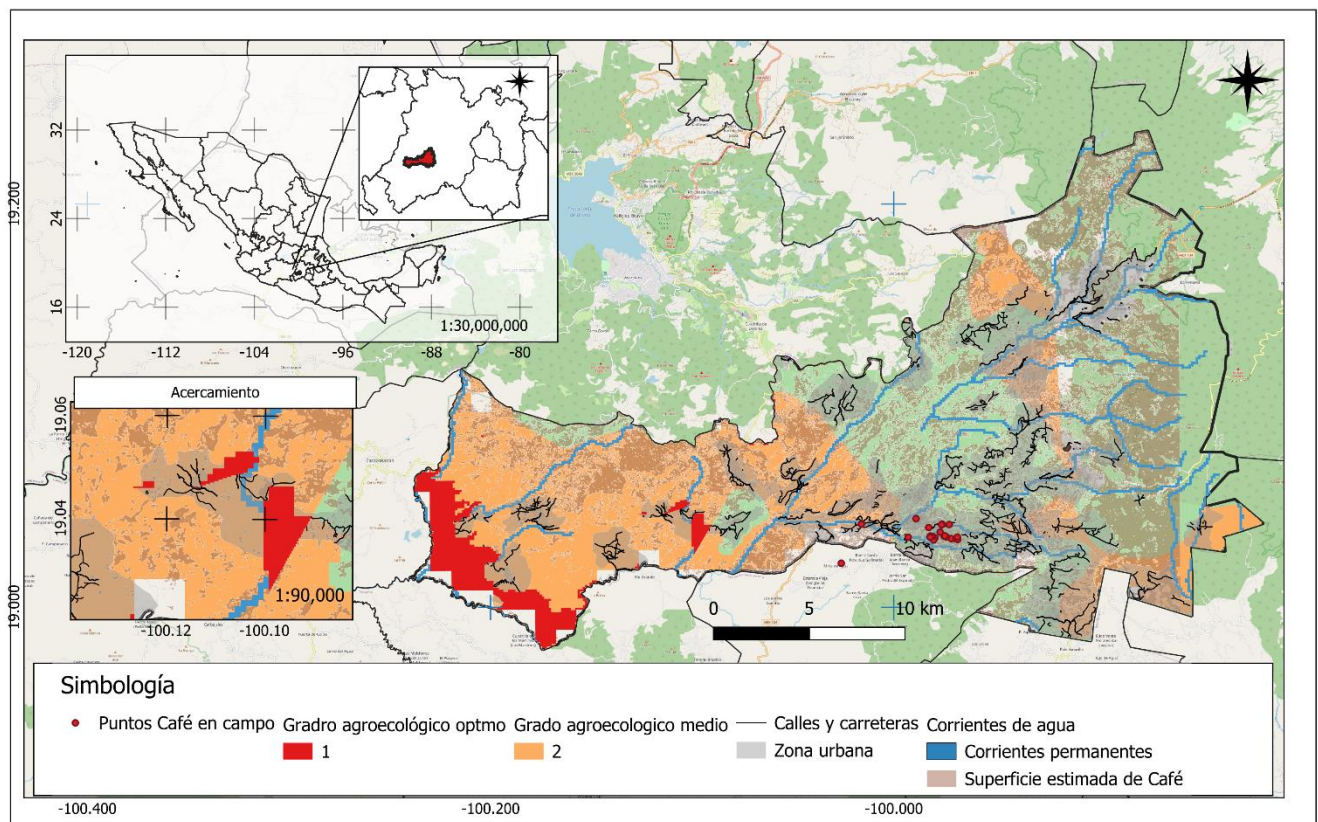
Temascaltepec cuenta con varias localidades distribuidas alrededor del municipio y cercanas a ríos. Estas localidades se encuentran más concentradas en la zona este, en donde se describe



en su mayoría el potencial agroecológico bajo y muy bajo. Además, esta zona está adscrita a áreas naturales protegidas, siendo parte del APFF del Nevado de Toluca y del APRN de Amanalco

De acuerdo con los resultados, el cultivo actual, tomando como referencia los puntos de control en campo, se desarrolla en el potencial agroecológico bajo.

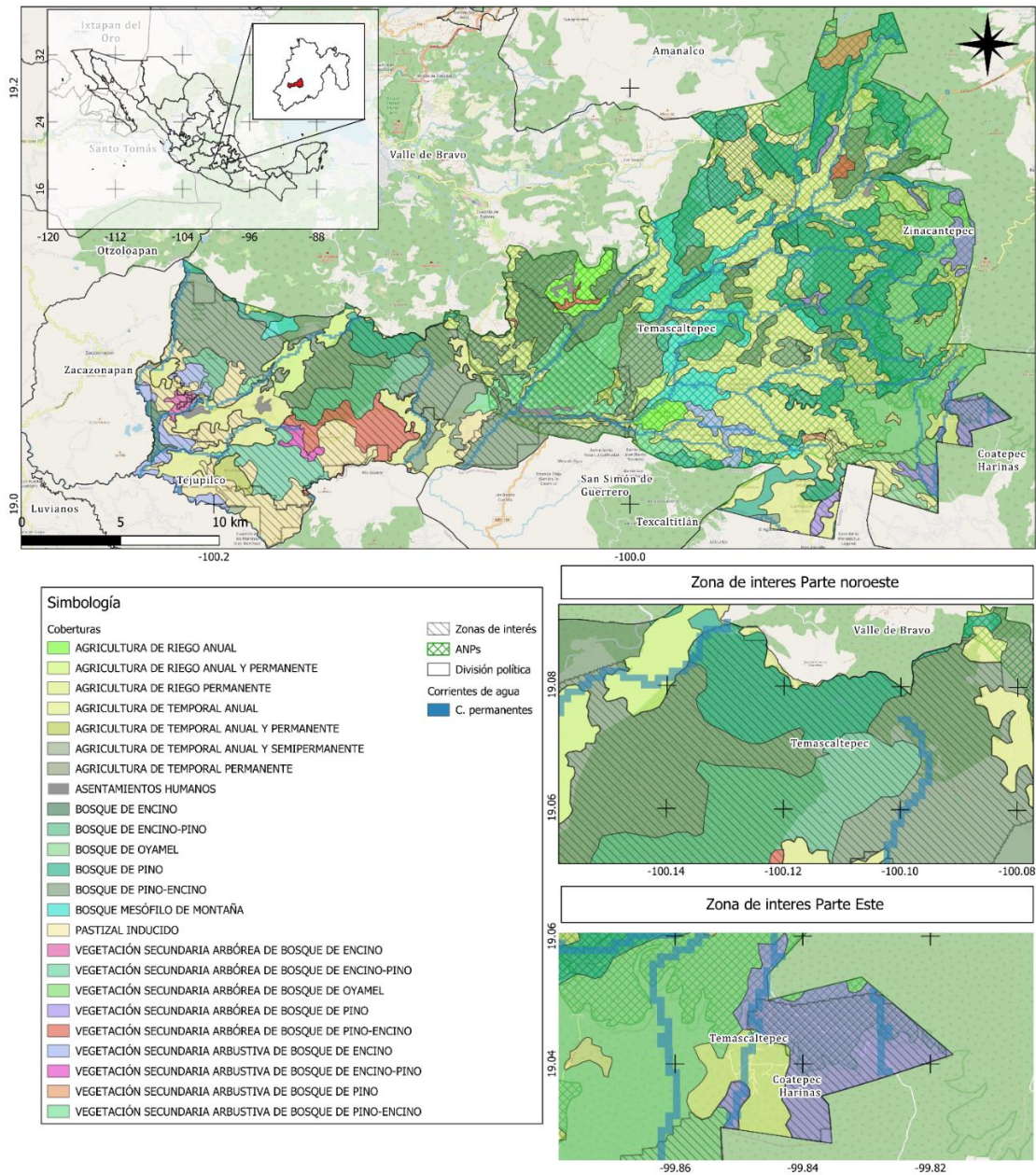
Las zonas con potencial agroecológico óptimo se desarrollan al suroeste del municipio, cercanas a las localidades de El Salitre y la Finca Temascaltepec de González. Cercano al centro del municipio, se encuentran dos polígonos con aptitud óptima, cercanos a la comunidad del Peñón, ver Mapa 25 y 26.



Mapa 26 Interpretación de las zonas con grado de aptitud óptimo y medio. Fuente: elaboración propia y Marco geoespacial INEGI, 2020.

En Temascaltepec las zonas de interés corresponden a 18468.579 ha, en estas regiones se presentan múltiples coberturas con baja densidad de la cobertura arbórea. Es de especial interés esta cobertura porque está relacionada con el amortiguamiento a altas temperaturas,

viento y erosión edáfica. En este sentido, la zona noroeste, cercana a la comunidad San Pedro Tenayac, es de especial interés, con comunidades de pino y pino encino.



Mapa 27 Zonas de interés para nuevas plantaciones y coberturas vegetales en Temascaltepec, Estado de México. Fuente: Uso de suelo y vegetación de INEGI, 2018.



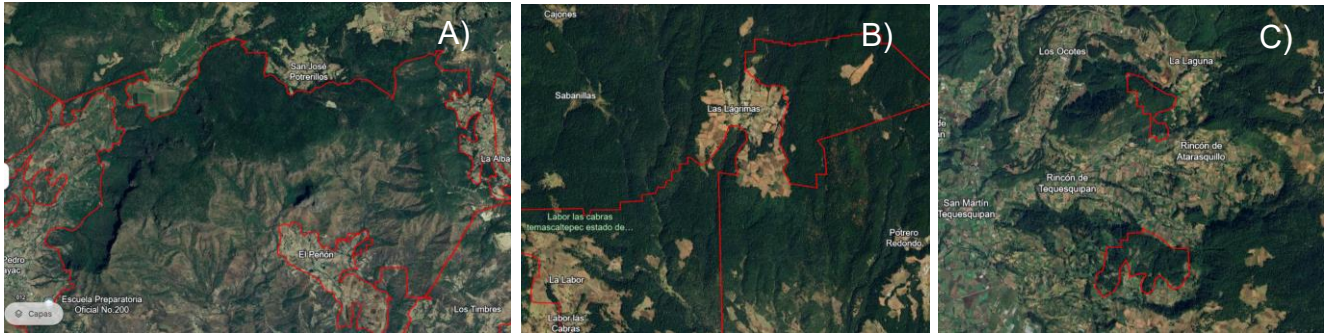


Figura 8 Zonas con interés para nuevas plantaciones en Temascaltepec. En A) apreciamos la zona noroeste, con grado de aptitud medio, cercana a las comunidades San Pedro Tenayac. En B) se localiza la zona sureste, con grado de aptitud medio, cercana a Las lágrimas. En C) se muestra la zona este, con grado de aptitud medio, cercana a las localidades de Rincón de Tequesquipan y Rincón de Atarasquillo. Fuente: Google earth, 2024.

### 13. Discusión general

Se identificó el método de clasificación supervisada mediante el algoritmo SAM como mejor método para la estimación del cultivo. Debido a que los demás índices presentan limitantes, como saturación del espectro y por efectos de pendiente (Cordero-Sancho y Sadar, 2007; Royero Benavides, 2021).

La superficie estimada del cultivo del café para Amatepec consta de 5,958 ha, bajo un porcentaje de error de 78% y un porcentaje de error de comisión de 7%.

Para Sultepec la superficie estimada del cultivo de café de 8 507.88 ha con un porcentaje de acierto de 80% y un porcentaje de error de comisión de 19%, ver tabla 7.

En Temascaltepec la superficie estimada para el cultivo fue de 24024.88 ha, con un porcentaje de acierto de 80% y un porcentaje de error de comisión de 11%, ver tabla 7.

La superficie del cultivo del café posee una sobreestimación, que concuerda con investigaciones anteriores (Figuroa-Figuroa, 2020; Hunt et al., 2020), explicándose por la complejidad del cultivo, principalmente en selvas donde la vegetación es más diversa, también por la nubosidad persistente y los efectos topográficos (Cordero-Sancho y Sadar, 2007 &



Lamparelli et al., 2012). Además, el comportamiento espectral del café es muy parecido al comportamiento espectral del bosque asociado, y de acuerdo con Cordero-Sancho y Sader (2007), la imprecisión aumenta cuando los bosques de sombra se encuentran con baja densidad.

El modelo de evaluación multicriterio ponderó como variable más importante a la temperatura, con base a la literatura (Loli, 2012; FAO, 2014; Rojo, 2014; González-González y Hernández-Santana, 2016; Aceves et al 2020; SIAP, 2020; Chemurra et al, 2021), ya que se cita importante en la brotación de flores y maduración de frutos (Arcila-Pulgarín, 2007). Este factor permitió que la mayoría de la superficie de Sultepec se considerara como medianamente optima (más del 90% de la superficie). Sin embargo, al realizar la interpretación de resultados estas zonas se restringieron a 184, 68.579 ha. (32.45% de la superficie; es decir, menos de la mitad estimada), ver mapas 19, 22 y tabla 7.

El buen desarrollo del café se lleva a cabo en regiones cálidas subhúmedas, con temperaturas medias anuales por encima de los 20°C. Como se aprecia en los principales estados productores de café, Chiapas, Veracruz y Oaxaca. Pero este factor está relacionado con la humedad y la precipitación, como menciona Alfonse et al., 2018, siendo la precipitación el factor determinante en las variaciones en la producción del café.

Las zonas optimas son las menos extensas, esto podría deberse a que el factor de precipitación no es el adecuado para el cultivo en los tres municipios, ver mapas 18, 19,20. Este factor presenta mayor extensión para los grados de aptitud bajo y muy bajo, ver mapas 6,7 y 8. Además, los cuerpos de agua son mínimos en los tres municipios. El factor de precipitación se ve más afectado en el municipio de Sultepec, ver mapa 7. Esto se agrava al tener pocos cuerpos de agua, y si bien existen corrientes permanentes se encuentran en un estado deficiente como para emplear el agua para riego (Osorio Montor, 2018; Ayuntamiento Sultepec, 2020).

Los sitios con café se encuentran en lugares con aptitud media y baja por lo que puede relacionarse con los bajos rendimientos, ver mapas 21-27 (SIAP, 2021). Aunado al manejo agronómico tendiente a lo orgánico. Estos resultados también han sido encontrados en otras investigaciones como la de González -González y Hernández-Santana (2016) Aceves et al. (2020)., donde indican rendimientos bajos del cultivo del café que coinciden con áreas con potencial agroecológico bajo, así como una sobrestimación del potencial agroecológico.

Los resultados indican que las plantaciones actuales se llevan a cabo en regiones con limitaciones climáticas y edáficas. En el caso de Amatepec, se observa que la mayor limitante es el potencial edáfico, aquí las plantaciones se localizan sobre suelos de tipo regosol. Como ya se mencionó este tipo de suelo no es recomendable para el cultivo, ya que son suelos de baja profundidad, baja fertilidad por su bajo contenido en nutrientes y materia orgánica, así como ser susceptible a la erosión.

En Amatepec, existe una zona de potencial óptimo en la zona suroeste, ver mapa 21 y 22, a pesar de que, en todos los factores, a excepción del factor edáfico, presenta aptitud baja (ver mapas 3, 6, 9, 12 y 15). El Factor edafológico es óptimo para esta zona, ver mapa 3.

Además, es de especial interés, la zona sureste del municipio de Amatepec. En esta zona se describe suelos de tipo cambisol que tienen buenos rendimientos para la agricultura y potencial para el cultivo del café, ver mapa 3. El grado de aptitud para el factor precipitación es muy bajo, pero el factor temperatura es óptimo, aunado a que en esta zona se localizan zonas densas de bosques que ayudan a la humedad del ambiente, por procesos de evapotranspiración, ver mapas 3, 9 y 22.

En Sultepec, el cultivo se lleva a cabo en zonas con potencial medio, ver mapa 23, esto coincide con los informes del SIAP, 2021, en donde el rendimiento por hectárea es superior con respecto a los demás municipios.

Las zonas de interés en Sultepec se localizan sobre suelos de tipo cambisol con temperaturas con potencial medio y alto, pero con precipitaciones con un valor de aptitud muy bajo, ver mapas 4, 7 y 10.

En Temascaltepec el cultivo se desarrolla sobre potencial agroecológico bajo, ver mapas 26 y 27. En Temascaltepec la región boscosa, ubicada en la parte este del municipio se catalogó con potencial bajo y muy bajo debido a que en esta zona el clima es semifrío. Además de que el relieve juega un papel limitante ver mapa 27.

Los resultados de la presente investigación son un recurso importante para el reordenamiento del cultivo de café en Amatepec, Sultepec y Temascaltepec y para la optimización del uso de suelo. Si se quiere implementar un plan de desarrollo, es preciso un censo a nivel catastral de

las plantaciones cafetaleras y de la integración de todos los actores sociales como menciona González-González y Hernández-Santana (2016) para el municipio de Atoyac, Guerrero

Es importante aprovechar los bosques implementando el cultivo con sistema tradicional. Esto coadyubara a la preservación del bosque y los suelos. En un proceso de transición que permita la valoración y evaluación de las nuevas plantaciones como menciona

### Conclusiones generales

Se estimó una superficie de 5 958 ha para el cultivo del café en Amatepec, con un porcentaje de acierto de 78% y un porcentaje de error de comisión de 7%. Para imagen Sentinel 2 A con fecha de 23 de marzo de 2023. Siendo el método más eficaz el del algoritmo SAM.

En el caso de Sultepec se estimó una superficie de 8 507.88. con un porcentaje de acierto de 80% y un porcentaje de error de comisión de 19%, bajo el algoritmo SAM, imagen sentinel 2 de la fecha del 27 de marzo de 2023.

En Temascaltepec se estimó una superficie del cultivo de café de 24024.88 ha con un porcentaje de acierto de 80% y con un porcentaje de error de comisión de 11%.

En Amatepec se estimaron 105.262 ha (0.16% de la superficie municipal) con potencial agroecológico optimo. 5790.09 ha (9.26% de la superficie municipal) con grado de aptitud medio. El grado de aptitud agroecológico bajo es el más extenso con 36544.49 ha (). El grado de aptitud muy bajo presenta 20050.14 ha (32.08%).

En Sultepec, el grado de aptitud optimo tiene una extensión de 4060.5 ha (7.34%), medio 49990.5 ha (90.48%), bajo con 994 ha (1.79%) y muy bajo 205 ha (0.37%).

En Temascaltepec, el potencial agroecológico optimo cuenta con 3533.96 ha (6.46%). El potencial medio con 21627.883 (39.55%), bajo con 16682.78 ha (30.5%) y muy bajo 12835.368 (23.47%).

En Sultepec el factor más limitado es la precipitación. En Temascaltepec el factor más limitante es la altitud. Mientras que para Amatepec el factor limitante es el suelo.

Las zonas de interés para nuevas plantaciones para Amatepec corresponden a 129.737 ha. En Sultepec 17 930.448 ha y en Temascaltepec 18 468. 579 ha.

Las zonas de interés se identifican sobre coberturas de bosque de pino y encino, así como bosques en recuperación.

Es imprescindible una revaloración de la localización de las parcelas cafetaleras, sobre todo para Amatepec, que el cultivo representa una fuente de ingresos para más de 300 productores, así como el PIB del municipio.

#### Recomendaciones.

Las condiciones agroecológicas son distintas para los tres municipios. El análisis de Evaluación multicriterio ponderó las variables con respecto a la temperatura, por lo que las zonas de interés deben acompañarse de evaluaciones en campo y recomendaciones con respecto al resto de factores.

Como pudo observarse la característica común de las zonas de interés para nuevas plantaciones es que se encuentran en zonas con bosques densos o en recuperación. Por ello se recomiendan análisis de impacto ecológico antes del establecimiento del cultivo en alguna de ellas. Hay que recordar que pocos de estos sitios se encuentran bajo alguna categoría de protección ecológica.

Además, es importante mencionar que podrían existir conflictos de interés debido a la tala, ya que los bosques citados corresponden a madera con alto valor económico.

Además de ello se requiere de estudios sociales, ya que factores como el crimen organizado limitan el potencial en estas zonas.

## 17. Referencias

Aceves N., L. A., Rivera H., B., López C., A., Palma L., D. J., González M., R., & Juárez L., J. F. 2018. Áreas potenciales y vulnerabilidad del cultivo de café tipo robusta (*Coffea canephora* P.) al cambio climático en el estado de Tabasco, México. *Nova scientia*, 10(20), 369-396.

Aceves N., L. A., Rivera H., B., Santillán F., A., Juárez L., J. F., & Gutiérrez B., R. (2020). Impacto del cambio climático en la adaptación del cultivo de café (*Coffea arabica* L.) en Tabasco, México. *Agro Productividad*, 13(4).

- Alfonse, A. A., Trejo García, J. C., & Martínez García, M. Á. (2018). Opción climática para la producción de café en México. *Ensayos. Revista de economía*, 37(2), 135-154.
- Álvarez-Sánchez, J., & Naranjo-García, E. (2003). *Ecología del suelo en la selva tropical húmeda de México*. UNAM.
- Ariza, A. (2003). Productos LDCM-Landsat 8. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá. Colombia.
- Arcila Pulgarín, J. (2007). Crecimiento y desarrollo de la planta de café. *Sistemas de producción de café en Colombia. Cenicafe, Chinchina, Colombia*, 21-60.
- Avalos, Ortiz, D. (2004). Análisis espacial de subsidencias por el abatimiento del acuífero a partir de Imágenes Multiespectrales y el comparativo de dos Técnicas InSAR. Estudio de caso: Cuenca Alta del Río Lerma. Tesis de maestría. UAEM. Toluca. México.
- Barredo, C, J. (1996). Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la orientación del territorio. Editorial. RA-MA. España.
- Cafés de México. (2020). Variedades de café. <https://cafesdemexico.com/variedades-de-cafe> (consultado en línea el 15 de febrero de 2023).
- Chemura, A., Mudereri, B. T., Yalew, A. W., & Gornott, C. (2021). Climate change and specialty coffee potential in Ethiopia. *Scientific reports*, 11(1), 1-13.
- Cordero-Sancho, S., & Sader, S. A. (2007). Spectral analysis and classification accuracy of coffee crops using Landsat and a topographic-environmental model. *International Journal of Remote Sensing*, 28(7), 1577-1593. <https://doi.org/10.1080/01431160600887680>.
- Cuervo-Robayo, A. P., Téllez-Valdés, O., Gómez-Albores, M. A., Venegas-Barrera, C. S., Manjarrez, J., Martínez-Meyer, E., (2014). 'Precipitación anual en México (1910-2009)', escala: 1:1000000. modificado por CONABIO (2015). México, D. F..
- Del Pilar, D. 2015. ¿Por qué está en problemas el cultivo de café en México? Economía Real. Imagen Digital. dineroenimagen.com (consultado el 28 de febrero de 2024).

Du, Y. 2014. New hyperspectral discrimination measure for spectral characterization. *Optical Engineering*. 43(8), 1777-1786.

Edomex produce 1.7 toneladas de café por hectárea. (2020). *El Sol De Toluca*. Recuperado de [www.elsoldetoluca.com.mx](http://www.elsoldetoluca.com.mx).

Espinosa-García, J. A., Uresti-Gil, J., Vélez-Izquierdo, A., Moctezuma-López, G., Uresti-Durán, D., Góngora-González, S. F., & Inurreta-Aguirre, H. D. (2016). Productividad y rentabilidad potencial del café (*Coffea arabica* L.) en el trópico mexicano. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 7(8), 2011-2024.

Estrada, M. 2017. Producción en Amatepec genera 16 mdp anuales. *Quadratin*. Edo. Méx.

European Unionn Agency for the Space Programme. EUSPA. 2021. Earth Observation Satellites. Consulta en línea en: [www.euspa.europa.eu](http://www.euspa.europa.eu).

FAO. 1978. Report on the Agro-Ecological Zones Project. Vol. 1. Methodology and Results for Africa. Roma. FAO.

Figueroa-Figueroa, D. K., Ramírez-Dávila, J. F., Lara-Vázquez, F., Mora-Escamilla, M., & Galacho-Jiménez, F. B. (2023). DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA ESCAMA VERDE Y FUMAGINA EN CAFETALES DE AMATEPEC, ESTADO DE MÉXICO. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 46(4), 419-419.

Garrido R., E. R. 2013. Áreas potenciales para el cultivo de Aguacate (*Persea americana* L.) cultivas" Hass" en el Estado de Guerrero, México. *Agro Productividad*, 6(5).

Gobierno municipal de Sultepec. Medio físico. Consultado en línea en: [sultepec.gob.mx](http://sultepec.gob.mx).

Gómez, G. (2010). Cultivo y beneficio del café. *Revista de Geografía Agrícola*, (45), 103-193.

González González, H. A., & Hernández Santana, J. R. (2016). Zonificación agroecológica del *Coffea arabica* en el municipio Atoyac de Álvarez, Guerrero, México. *Investigaciones geográficas*, (90), 105-118.

Gutierrez, N. 2015. Cultivo del Café. *Agricultura y Desarrollo Rural*, Jalisco. Consultado en línea en: [sader.jalisco.gob.mx](http://sader.jalisco.gob.mx).

G&B. 2017. Combinaciones RGB de imágenes de satélite Landsat y Sentinel. Consultado en línea en: [www.gisandbeers.com](http://www.gisandbeers.com).

G&B. 2019. Todo lo que deberías saber sobre imágenes Sentinel. Consultado en línea en: [www.gisandbeers.com](http://www.gisandbeers.com).

H. Ayuntamiento de Sultepec. 2020.

HACK, H., H. BLEIHOLDER, L. BUHR, U. MEIER, U. SCHNOCK-FRICKE, R. STAUSS, E. WEBER, A. WITZENBERGER, 1992: Einheitliche Codierung der phänologischen Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen. – Erweiterte BBCH-Skala, Allgemein –. Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd. 44 (12), 265-270.

Hess, M., Barralis, G., Bleiholder, H., Buhr, L., Eggers, T. H., Hack, H., & Stauss, R. (1997). Use of the extended BBCH scale—general for the descriptions of the growth stages of mono; and dicotyledonous weed species. *Weed research*, 37(6), 433-441.

Holben, B. & C. Justice. (1981). An examination of spectral band ratioing to reduce the topographic effect on remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 2:2, 115-133, DOI: 10.1080/01431168108948349

Hunt, D. A., Tabor, K., Hewson, J. H., Wood, M. A., Reymondin, L., Koenig, K., ... & Follett, F. (2020). Review of remote sensing methods to map coffee production systems. *Remote Sensing*, 12(12), 2041. <https://doi.org/10.3390/rs12122041>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). Compendio de información municipal: Amatepec. Consultado en línea: [www.amatepec.gob.mx](http://www.amatepec.gob.mx).

IGN. 2020. Teledetección. Instituto Geográfico Nacional. España. Consultado en línea en: <https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/OBS-Teledeteccion.pdf>.

INEGI. 2013. Conjunto de Elevaciones Mexicano (CEM). Consultado en línea en:

INEGI. 2013<sup>a</sup>. Perfiles de suelos, Continuo nacional. Consultado en línea en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825266707>.

INEGI. 2018. Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación VII. Consultado en línea en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463842781>

INEGI. 2020. Marco geostadístico. Consultado en línea en; <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463807469>.

INEGI. 2020<sup>a</sup>. Climas. Consultado en línea en <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463769361>.

Inforural. 2021. Impulsan producción de café en el Estado de México.

Jaimes, N. B. P., Sendra, J. B., Delgado, M. G., Plata, R. F., Némiga, X. A., & Solís, L. R. M. (2012). Determination of optimal zones for forest plantations in the State of Mexico using multi-criteria spatial analysis and GIS. *Journal of Geographic Information System*. 4(3), 204-218. [10.4236/jgis.2012.43025](https://doi.org/10.4236/jgis.2012.43025)

Jiménez, Z. T. I., Gómez, P. O., & Villaseñor, A. J. L. (2020). Competitividad de los productos agrícolas estratégicos de México en América del Norte. *Repositorio de la Red Internacional de Investigadores en Competitividad*, 14(14).

Kuching, S. (2007). The performance of maximum likelihood, spectral angle mapper, neural network and decision tree classifiers in hyperspectral image analysis. *Journal of Computer Science*, 3(6), 419-423.

Lamparelli, R. A., Johann, J. A., Santos, É. R. D., Esquerdo, J. C., & Rocha, J. V. (2012). Use of data mining and spectral profiles to differentiate condition after harvest of coffee plants. *Engenharia Agrícola*, 32, 184-196. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162012000100019>

Loli, F. O. (2012). Guía técnica "Análisis de suelos y fertilización en el cultivo de café". San Martín-Perú: Agrobanco.

Marín, G. (2013). Control de calidad del café. Manual técnico. Equipo Técnico del proyecto Fondoempleo. Programa Selva Central - Desco.(1ra ed.). Lima-Perú: Fondo.

Medina-Meléndez, J. A., Ruiz-Nájera, R. E., Gómez-Castañeda, J. C., Sánchez-Yáñez, J. M., Gómez-Alfaro, G., & Pinto-Molina, O. (2016). Estudio del sistema de producción de café (*Coffea arabica* L.) en la región Frailesca, Chiapas. *CienciaUAT*, 10(2), 33-4



Moguel, P., & Toledo, V. M. (1999). Café, luchas indígenas y sostenibilidad; el caso de México. *Ecología Política*, 23-36.

González G., H. A., & Hernández S., J. R. 2016. Zonificación agroecológica del Coffea arabica en el municipio Atoyac de Álvarez, Guerrero, México. *Investigaciones geográficas*, (90), 105-118.

Monterroso, T, M. (2013). Guía práctica: clasificación de imágenes satelitales.

Osorio Montor, T. G. 2018. Evaluación de la calidad del agua de la subcuenca del Río Temascaltepec, mediante el uso de indicadores biológicos.

Pérez G., C & Muñoz N., A. L. 2006. Teledetección: Nociones y Aplicaciones. Universidad de Salamanca. España. 359 pp.

Pérez-Constantino, A., Ramírez-Dávila, J. F., Gutiérrez-Rodríguez, F., & Pérez-López, D. D. J. (2023). Comportamiento espacial de roya del cafeto en Amatepec, Estado de México. *Acta universitaria*, 33.

Pino-Miranda, E., Ramírez-Dávila, J. F., Serrato-Cuevas, R., Mejía-Carranza, J., & Tapia-Rodríguez, A. (2022). Spatial and temporal distribution of ojo de gallo (*Mycena citricolor*) in coffee plantations of the State of Mexico. *Revista mexicana de fitopatología*, 40(3), 433-446.

PROFECO. 2018. Alimentos orgánicos. Procuraduría Federal del Consumidor. Consultado en línea el 3 de octubre del 2021 en: [www.gob.mx](http://www.gob.mx).

Ramírez D., J. F., & Porcayo C., E. 2010. Estudio comparativo de la distribución espacial del muérdago enano (*Arceuthobium* sp.) en la ladera norte del Parque Nacional Nevado de Toluca, México. *Bosque (Valdivia)*, 31(1), 28-38.

Rivera H., B., Aceves N., L. A., Juárez L., J., Palma L., D. J., González M., R., & González J., V. 2012. Zonificación agroecológica y estimación del rendimiento potencial del cultivo de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz) en el estado de Tabasco, México. *Avances en investigación agropecuaria*, 16(1), 29-47.

Rivera Silva, M. D. R., Nikolskii Gavrilov, I., Castillo Álvarez, M., Ordaz Chaparro, V. M., Díaz Padilla, G., & Guajardo Panes, R. A. (2013). Vulnerabilidad de la producción del café (*Coffea arabica* L.) al cambio climático global. *Terra Latinoamericana*, 31(4), 305-313.

Rojas Z., E. C., Orozco V., M., Romero R. I., S., & Montoya A, R. (2016). Vegetación y flora del municipio de Temascaltepec, Estado de México, México. *Polibotánica*, (42), 43-89.

Rojo Jiménez, E., & Pérez-Urria Carril, E. (2014). Café I (G. *Coffea*). *Reduca Biología*, 7(2), 113-132.

SADER. 2018. México, onceavo productor mundial de café. Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural. Consultado en línea el 4 de octubre del 2021 en: [www.gob.mx](http://www.gob.mx).

SAGARPA. 2017. Planeación Agrícola Nacional 2017-2030: Café Mexicano. 1ª ed. México.

Schroth, G., Laderach, P., Dempewolf, J., Philpott, S., Haggan, J., Eakin, H., Castillejos, T., Garcia, M.J., Pinto, L.S., Hernandez, R., Eitzinger, A., Ramirez-Villegas, A. 2009. "Towards a climate change adaptation strategy for coffee communities and ecosystems in the Sierra Madre de Chiapas, Mexico". *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 14(7): 605-625.

SENASICA, (2014). Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. <https://www.gob.mx/senasica> (consulta: 2 junio 2021).

SIAP. 2020

SIAP. 2021

Tosini, M. A., y Pantaleone, L. (2012). Clasificación de cultivos a partir de imágenes satelitales LANDSAT EM. In *XVIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*. [www.cedrssa.gob.mx](http://www.cedrssa.gob.mx).

Velázquez, L. (7 de octubre de 2020). Café mexiquense, de los mejores del país. La Noticia Hecha periódico. [www.elvalle.com.mx](http://www.elvalle.com.mx).

SENASICA. 2016. Roya del Cafeto *Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome. Ficha Técnica No. 40.

Coral, L.M. 2012. Manejo integrado de plagas en el cultivo del café. Guía técnica. Agrobanco. Perú.

World Coffe Research (WCR). 20234. Variedades consultado en línea en:

<https://varieties.worldcoffeeresearch.org/es/variedades/tipica>

Yara. 2024. Café producción global. [/www.yara.com.mx](http://www.yara.com.mx) (consultado en línea en febrero 2024)