

CONESCAPANHONDURAS2025paper153.pdf

 Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)

Document Details

Submission ID

trn:oid::14348:477708525

Submission Date

Jul 31, 2025, 9:42 PM CST

Download Date

Aug 12, 2025, 6:35 PM CST

File Name

CONESCAPANHONDURAS2025paper153.pdf

File Size

521.6 KB

6 Pages




4,538 Words

26,565 Characters

22% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Top Sources

- 21%  Internet sources
- 15%  Publications
- 0%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags




0 Integrity Flags for Review

No suspicious text manipulations found.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

Top Sources

21%  Internet sources
15%  Publications
0%  Submitted works (Student Papers)

Top Sources

The sources with the highest number of matches within the submission. Overlapping sources will not be displayed.

1	Internet	www.hindawi.com	2%
2	Internet	downloads.hindawi.com	1%
3	Internet	repositorio.unal.edu.co	<1%
4	Internet	ieecp-conference.org	<1%
5	Internet	assets-eu.researchsquare.com	<1%
6	Internet	www.thefreelibrary.com	<1%
7	Internet	repository.um-surabaya.ac.id	<1%
8	Publication	Doreen A. Lyimo, V. Lakshmi Narasimhan, Zablon A. Mbero. "Sensitivity Analysis ...	<1%
9	Internet	ijict.iaescore.com	<1%
10	Internet	www.centroamerica360.com	<1%
11	Internet	assets.researchsquare.com	<1%

12	Internet	repositorio.ufla.br	<1%
13	Internet	www.mdpi.com	<1%
14	Internet	www.sbicafe.ufv.br	<1%
15	Publication	Paulo Prates Júnior, José Maria Rodrigues da Luz, Sandro Lucio Silva Moreira, Bru...	<1%
16	Internet	colposdigital.colpos.mx:8080	<1%
17	Internet	www.spiedigitallibrary.org	<1%
18	Internet	www.centa.gob.sv	<1%
19	Internet	alliancebioiversityciat.org	<1%
20	Internet	brage.inn.no	<1%
21	Internet	www.researchgate.net	<1%
22	Internet	baixardoc.com	<1%
23	Internet	cgspace.cgiar.org	<1%
24	Internet	efdinitiative.org	<1%
25	Internet	nanopdf.com	<1%

26	Internet	revistas.unicauca.edu.co	<1%
27	Internet	buleria.unileon.es	<1%
28	Internet	repositorio.uileam.edu.ec	<1%
29	Internet	bvs.sld.cu	<1%
30	Internet	repositorio.una.ac.cr	<1%
31	Internet	uamerica.edu.co	<1%
32	Publication	Y. Tanabe. "Biochemical-genetic relationships among Asian and European dogs a...	<1%
33	Internet	link.springer.com	<1%
34	Internet	reliefweb.int	<1%
35	Internet	tailieu.vn	<1%
36	Internet	upcommons.upc.edu	<1%
37	Internet	www.greenworldjournal.com	<1%
38	Internet	www.jove.com	<1%
39	Internet	www.produce.gob.pe	<1%

40	Publication	Ailton Paulo de Oliveria Júnior, Flávia Helena Pereira, Diego Marques de Carvalho,...	<1%
41	Publication	J.J. Jiménez-Osornio, A. Gomez-Pompa. "Human role in shaping of the flora in a w...	<1%
42	Publication	Lynda Louise Laurin. "Anaerobic Performance and Competitive Experience inELIT...	<1%
43	Publication	Perez de Arce Claro, Ramon. "Understanding and Optimizing the Design Layout o...	<1%
44	Internet	era.ujat.mx	<1%
45	Internet	es.slideshare.net	<1%
46	Internet	repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080	<1%
47	Internet	repositorio.xoc.uam.mx	<1%
48	Internet	www.coursehero.com	<1%
49	Publication	IX Congreso Colombiano De Botanica. "Memorias IX Congreso Colombiano de Bot...	<1%
50	Internet	agritrop.cirad.fr	<1%
51	Internet	issuu.com	<1%
52	Internet	repositorio-socioecologia.conahcyt.mx	<1%
53	Internet	repositoriodirplan.mop.gob.cl	<1%

54	Internet	silو.tips	<1%
55	Internet	tesis.pucp.edu.pe	<1%
56	Internet	winona.info.unlp.edu.ar	<1%
57	Internet	www.incagro.gob.pe	<1%
58	Internet	www.paraguayglobal.com	<1%
59	Publication	Francisco José da Silva Neto, Kátia Priscilla Gomes Morinigo, Nathalia de França G...	<1%
60	Publication	Pierre Mokondoko, Veronique Sophie Avila-Foucat, J. Mauricio Galeana-Pizaña. "B...	<1%
61	Publication	Tropical Forestry Handbook, 2016.	<1%

Detection and Classification of Land for Coffee Cultivation in El Salvador Using Artificial Intelligence and Clustering Techniques

4
7

line 1: 1st Given Name Surname
line 2: dept. name of organization
(of Affiliation) line 3:
name of organization
(of Affiliation) line
4: City, Country
line 5: email address or ORCID

line 1: 2nd Given Name Surname
line 2: dept. name of organization
(of Affiliation) line 3:
name of organization
(of Affiliation) line
4: City, Country
line 5: email address or ORCID

line 1: 3rd Given Name Surname
line 2: dept. name of organization
(of Affiliation) line 3:
name of organization
(of Affiliation) line
4: City, Country
line 5: email address or ORCID

21

Abstract—Coffee production in El Salvador has significantly declined in recent years due to rising temperatures, soil degradation, and low international prices, leaving vast areas of potentially suitable land underutilized. This study presents an automated artificial intelligence-based model to identify suitable areas for coffee cultivation through spatial analysis and unsupervised clustering. The approach integrates agroecological variables derived from elevation (SRTM), climate (WorldClim), and soil (FAO-UNESCO) data, including altitude, slope, aspect, minimum and maximum temperature, precipitation, and soil type. Principal component analysis (PCA) and clustering algorithms were applied to 17,532 georeferenced locations with high coffee-growing potential across Latin America. Five distinct agroecological zones were identified, with PCA explaining 86.8 percent of the total variance. Optimal ranges included elevations between 545 and 1,935 meters, temperatures from 16.1 to 30.4 degrees Celsius, precipitation from 23.0 to 193.5 millimeters, and slopes from 4.5 to 16.6 degrees. The resulting zoning for El Salvador reveals a heterogeneous spatial distribution, highlighting high-mountain profiles and optimal microzones outside traditional growing regions. These findings provide a data-driven strategic tool to guide land rehabilitation efforts and inform public policies aimed at revitalizing El Salvador’s coffee sector.

54

Keywords—coffee cultivation, underutilized lands, remote sensing, principal component analysis, unsupervised clustering, agroecological zoning, machine learning, geographic information systems

I. INTRODUCCIÓN

En El Salvador, el cultivo de café ha sido durante décadas una fuente fundamental de empleo y desarrollo económico, especialmente en regiones como Apaneca y Ataco. Sin embargo, en los últimos años la producción ha disminuido considerablemente debido a factores como el cambio climático, el deterioro de los suelos y los bajos precios en el mercado internacional [1], [2]. De acuerdo con el Instituto Salvadoreño del Café (ISC), en octubre de 2024 se recolectaron únicamente 1,918 quintales, casi la mitad de lo obtenido en el mismo mes del año anterior [3]. Esta caída ha afectado directamente a miles de familias productoras, reduciendo sus ingresos y oportunidades de sustento [2].

A pesar del contexto crítico, existen numerosas tierras con condiciones agroecológicas favorables para el cultivo de café que actualmente se encuentran subutilizadas. Este estudio propone un modelo automatizado basado en inteligencia artificial que, mediante análisis espacial y técnicas de clusterización, permita identificar dichas áreas con potencial productivo. El modelo integra variables relacionadas con el

36

58

39

clima, el tipo de suelo, las prácticas agrícolas y factores sociales como el acceso al crédito y la asistencia técnica.

A partir de esta información, se generarán mapas que identifiquen zonas aptas para el café, considerando el perfil de los productores (pequeños, medianos o cooperativas). Este trabajo busca ofrecer una herramienta tecnológica útil para mejorar la producción, apoyar a las familias que viven del café y proponer soluciones basadas en tecnología para reactivar el sector cafetalero salvadoreño.

II. ANTECEDENTES: DECLIVE EN LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ EN EL SALVADOR

Durante las últimas tres décadas, la producción de café en El Salvador ha mostrado una tendencia decreciente significativa, como lo demuestra el historial proporcionado por el Instituto Salvadoreño del Café (ISC) [4]. Mientras que en la cosecha 1992/93 se registraron más de 4.3 millones de quintales oro-uva, para el periodo 2024/25 (dato preliminar) la producción se ha reducido a menos de 600 mil quintales. Este descenso, representado en la Fig. 1, ha sido atribuido a diversos factores como el cambio climático, el deterioro de los suelos, la falta de inversión y los bajos precios internacionales. Como resultado, vastas extensiones de tierras que anteriormente fueron utilizadas para el cultivo de café se encuentran actualmente subutilizadas o en abandono. Esta realidad evidencia la necesidad de nuevas herramientas que permitan identificar aquellas tierras que aún conservan condiciones óptimas para la producción de café.

HISTORIAL PRODUCCION DE CAFÉ					
Cosecha	QQ Oro-Uva	Sacos 60 kg**	Cosecha	QQ Oro-Uva	Sacos 60 kg**
1989/90	3,636,500	2,749,148	2009/10	1,500,306	1,134,212
1990/91	3,537,100	2,674,003	2010/11	2,614,000	1,976,151
1991/92	3,153,700	2,384,157	2011/12	1,624,211	1,227,883
1992/93	4,306,200	3,255,433	2012/13	1,730,000	1,307,858
1993/94	3,403,300	2,572,852	2013/14	700,025	529,210
1994/95	3,360,600	2,540,571	2014/15	925,160	699,409
1995/96	3,239,100	2,448,719	2015/16	784,740	593,253
1996/97	3,305,900	2,499,219	2016/17	845,600	639,263
1997/98	3,002,400	2,269,776	2017/18	905,425	684,490
1998/99	2,621,900	1,982,123	2018/19	955,115	722,055
1999/00	3,712,600	2,806,679	2019/20	740,100	559,506
2000/01	2,406,098	1,818,980	2020/21	790,920	597,926
2001/02	2,383,076	1,801,575	2021/22	922,040	697,051
2002/03	1,963,400	1,484,306	2022/23	878,560	664,180
2003/04	1,911,281	1,444,904	2023/24	893,326	675,343
2004/05	1,858,020	1,404,640	2024/25*	587,686	444,283
2005/06	1,935,185	1,462,975			
2006/07	1,740,025	1,315,437			
2007/08	2,119,810	1,602,550			
2008/09	1,985,625	1,501,107			

* Datos preliminares al 31 de enero de 2025
** 1 qq = 45 35924 kg

Tabla 1. Historial de producción de café en El Salvador (1989–2025).

III. TIERRAS SUBUTILIZADAS Y LA TRANSFORMACIÓN DEL USO DEL SUELO

El abandono progresivo de fincas cafetaleras ha generado una transformación en el uso del suelo rural en El Salvador. Muchas áreas tradicionalmente dedicadas al café han sido convertidas en pastizales, lotes de subsistencia o simplemente han quedado en desuso, reduciendo no solo la productividad agrícola sino también la cobertura forestal y los servicios ecosistémicos asociados al café de sombra [5].

La "subutilización" de tierras en este estudio se refiere a parcelas que, aun contando con condiciones agroecológicas favorables, no están siendo aprovechadas para la producción agrícola o se encuentran infrautilizadas respecto a su capacidad potencial. Esta situación responde a múltiples factores: falta de acceso a financiamiento, migración del capital humano rural, disminución de la rentabilidad del café frente a otros cultivos y deterioro parcial del suelo.

En respuesta a estos desafíos, en 2015 se conformó un grupo gestor técnico multidisciplinario en El Salvador, con la participación de instituciones como el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), el Ministerio de Medio Ambiente (MARN), el CENTA, la Universidad de El Salvador y organismos internacionales como CIAT, USDA y CRS. Este grupo impulsó la creación del Mapeo Digital de Suelos (MDS), una herramienta moderna que permite representar digitalmente la distribución espacial de las propiedades funcionales del suelo [6].

El MDS se fundamenta en datos cuantitativos recolectados en campo y en laboratorio, e incluye variables críticas para la agricultura como: textura (arena, limo, arcilla), profundidad efectiva, materia orgánica, acidez (pH), y niveles de nutrientes como fósforo, potasio, magnesio, calcio, hierro, entre otros. Esta herramienta representa un avance sustancial para la planificación agrícola nacional, ya que proporciona a productores y tomadores de decisiones información clave sobre las capacidades, limitaciones y riesgos del suelo.

Sin embargo, a pesar de su potencial, el MDS no ha sido plenamente explotado para identificar tierras subutilizadas con potencial específico para cultivos estratégicos como el café. El presente trabajo busca cerrar esa brecha integrando los datos del MDS en un modelo de inteligencia artificial orientado a detectar zonas viables para la recuperación de la caficultura.

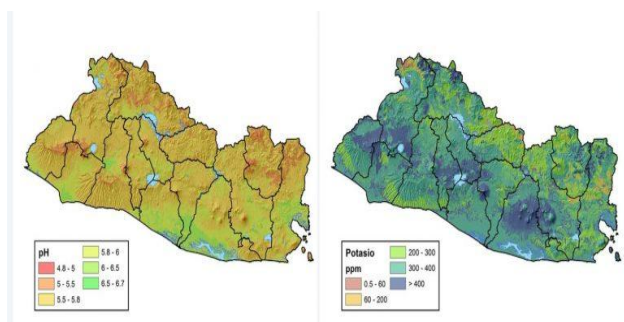


Figura 1. Mapa Digital de Suelos de El Salvador.

IV. METODOLOGÍA

Esta investigación es de carácter cuantitativo, exploratorio y transversal, y se basa en el análisis de datos geoespaciales para detectar y clasificar tierras óptimas para el cultivo de café en El Salvador. Se aplicaron técnicas de reducción de dimensionalidad (PCA) y clusterización no supervisada (k-means) a variables ambientales y edáficas extraídas de fuentes satelitales abiertas. Las operaciones fueron realizadas mediante Python, bibliotecas especializadas en ciencia de datos, y sistemas de información geográfica. El proceso metodológico se dividió en cuatro fases, descritas a continuación.

A. Variables Biofísicas

La selección de variables biofísicas para el modelo de detección de tierras subutilizadas se fundamenta en los requerimientos agroecológicos específicos del cultivo de café (*Coffea arabica*), considerando que esta especie presenta alta sensibilidad a las condiciones ambientales y edáficas [7]. A continuación, se detallan las variables seleccionadas y su justificación científica:

1) Variables Topográficas

Altitud

Los datos de elevación se obtuvieron del modelo digital de elevación SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) con resolución espacial de 30 metros. La altitud constituye un factor crítico en la caficultura, ya que determina las condiciones microclimáticas necesarias para el desarrollo óptimo del café arábica. Según DaMatta [8], el café arábica requiere altitudes entre 600-2000 metros sobre el nivel del mar, siendo el rango óptimo entre 1000-1800 metros. En El Salvador, las zonas productoras tradicionales como Apaneca-Ilamatepec se ubican en elevaciones entre 800-1800 metros [9]. La altitud influye directamente en la temperatura, humedad relativa y calidad del grano, siendo fundamental para determinar la aptitud de una parcela para el cultivo.

Pendiente

La pendiente del terreno se calculó a partir del modelo digital de elevación mediante algoritmos de análisis espacial. Este parámetro afecta directamente la erosión del suelo, el drenaje y la mecanización agrícola. Estudios en Centroamérica indican que pendientes moderadas (8-30%) son ideales para café, ya que facilitan el drenaje sin aumentar excesivamente la erosión [10]. Pendientes superiores al 45% requieren prácticas intensivas de conservación, mientras que terrenos muy planos pueden presentar problemas de encharcamiento [11].

Orientación

La orientación de las laderas se determinó mediante el análisis de aspecto del modelo digital de elevación. Este parámetro determina la exposición solar y los patrones de viento, factores que influyen en la temperatura microclimática y la humedad del suelo. En el hemisferio norte, las laderas con orientación norte y este generalmente proporcionan mejores condiciones para el café, al ofrecer protección contra la radiación solar excesiva durante las horas más calurosas del día [12].

2) Variables Climáticas

Temperatura mínima y máxima

Los datos de temperatura se obtuvieron de la base de datos WorldClim versión 2.1 en el periodo de 2020 a 2024, que proporciona promedios climáticos mensuales con resolución espacial de 1 km². La temperatura constituye el factor climático más limitante para el café arábica. El rango óptimo se encuentra entre 18-24°C, siendo crítico que la temperatura no supere los 30°C ni descienda por debajo de 13°C [13]. Las fluctuaciones térmicas diarias (8-15°C) son beneficiosas para el desarrollo del grano y la acumulación de compuestos aromáticos [14]. En El Salvador, el cambio climático ha elevado las temperaturas, reduciendo las áreas aptas para café en elevaciones menores mediante validación experimental.

Precipitación

Los datos de precipitación se obtuvieron del WorldClim 2.1 para promedios en el periodo de 2020 a 2024. El café arábico requiere entre 1200-2000 mm de precipitación anual, con una distribución estacional que incluya una época seca de 2-4 meses para permitir la floración y maduración [16]. La precipitación irregular o excesiva puede causar enfermedades fúngicas como la roya (*Hemileia vastatrix*), mientras que la escasez hídrica reduce significativamente la productividad mediante validación experimental.

3) Variables Edáficas

Los datos del suelo se obtuvieron de la clasificación FAO-UNESCO con resolución de 1 kilómetro, desarrollada por el International Soil Reference and Information Centre (ISRIC). La clasificación según tipo de suelo incorpora implícitamente características como pH, contenido de materia orgánica, drenaje y profundidad efectiva, proporcionando una evaluación integral de la aptitud edáfica.

Los tipos de suelo propicios para la siembra de café son los Andosoles [30] y Nitisoles [31]. Los Ferralsoles [31] y Acrisoles [32] también pueden producir café, sin embargo, presentan más desafíos en su crecimiento.

El análisis ha empleado datos actualizados de todos los parámetros, utilizando conjuntos de datos oficiales y reconocidos. Con el objetivo de comparar la rigurosidad de los resultados, a continuación, se presenta un cuadro resumen de los parámetros teóricos óptimos para el cultivo de café, elaborado a partir de los estudios citados previamente.

Propiedad	Altitud	Pendiente	Temperatura	Precipitación	Tipos de suelo
Parámetros óptimos	1000 m-1800 m	8% - 30%	18°C - 24°C	1200-2000 mm	Andosoles, Nitisoles

Tabla 2. Parámetros óptimos para el cultivo del café. Elaboración propia.

B. Área de estudio

Para el desarrollo de la investigación de las áreas propicias para la siembra de café, utilizamos datos recopilados de toda latinoamérica. Sin embargo, la detección de las áreas óptimas para la siembra de café se ha realizado solamente sobre el territorio salvadoreño.

C. Procesamiento de datos

Los conjuntos de datos recopilados pertenecen a fuentes reconocidas internacionalmente como SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), WorldClim [34], Google Earth [36] y FAO-UNESCO [35]. Los datos se almacenan en formato TIF (Tagged Image File Format), un estándar geoespacial que permite el almacenamiento de datos raster georreferenciados con metadatos de proyección cartográfica y coordenadas geográficas precisas.

Todos los conjuntos de datos fueron estandarizados a un sistema de referencia común (WGS84, EPSG:4326) para asegurar la compatibilidad espacial entre las diferentes fuentes. Los datos originales presentaban resoluciones espaciales heterogéneas, desde 30 metros (SRTM) hasta 1 kilómetro (WorldClim), por lo que se aplicó un remuestreo bilineal para homogeneizar la resolución a 0.008° (aproximadamente 1 km en el ecuador). Esta resolución representa un compromiso óptimo entre detalle espacial y eficiencia computacional para análisis regionales.

La pendiente topográfica se calculó a partir del modelo digital de elevación utilizando el algoritmo de Horn (1981) [28], que considera la variación de elevación en las ocho direcciones adyacentes para cada píxel:

$$\text{Pendiente} = \arctan(\sqrt{((dz/dx)^2 + (dz/dy)^2)}) \times 180/\pi \quad (1)$$

Donde dz/dx y dz/dy representan los gradientes de elevación en las direcciones este-oeste y norte-sur, respectivamente.

La orientación de laderas (aspecto) se extrajo simultáneamente a partir del mismo modelo de elevación, calculando los grados azimutales de las pendientes mediante la siguiente expresión [29]:

$$\text{Aspecto} = \arctan2(dz/dy, -dz/dx) \times 180/\pi \quad (2)$$

Donde $\arctan2$ es la función arco-tangente de dos argumentos que preserva el cuadrante correcto, proporcionando valores entre 0° y 360° (donde 0° representa el norte).

Finalmente, se utilizó un dataset de validación obtenido de Google Earth Engine para predicción de zonas cafeteras basado en análisis de imágenes satelitales. Se compararon los parámetros del modelo propuesto con 17,532 ubicaciones de alta probabilidad cafetera (>99.6%) identificadas mediante técnicas de machine learning, con el objetivo de calibrar y validar los rangos óptimos para el cultivo de café en condiciones reales de campo.

Se procesaron sistemáticamente los archivos TIF de las diferentes variables que influyen en la aptitud cafetera. Para cada variable espacial, se extrajeron valores representativos de 17,532 ubicaciones georreferenciadas distribuidas a lo largo de Latinoamérica. Estos datos se compilaron en un dataset unificado en formato CSV que contiene:

- Coordenadas geográficas (latitud, longitud)
- Probabilidad de aptitud cafetera observada
- Variables climáticas (temperatura mínima, máxima, precipitación)
- Variables topográficas (elevación, pendiente, aspecto)
- Clasificación edáfica (tipo de suelo según FAO-UNESCO)

D. Análisis exploratorio de los datos

Utilizando el archivo CSV generado en el paso anterior, se realizó un resumen estadístico de la información, calculando la media, mediana, moda, cuartiles y desviación estándar de cada uno de los parámetros registrados. Posteriormente, se llevó a cabo una comparativa entre cada parámetro del estudio y su relación con la probabilidad de que una zona sea apta para el cultivo de café. Finalmente, se implementaron algoritmos de clusterización, para identificar patrones en las zonas con presencia de café. Como resultado, se identificaron gráficamente los rangos óptimos para el desarrollo del café en la región.

Posteriormente, se exportaron algunos mapas de la región salvadoreña, en la que, a partir de los rangos analizados previamente, se presentan las zonas clasificadas según diferentes clústeres con características diferenciadas entre sí.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis descriptivo de las variables climáticas y topográficas reflejó una amplia diversidad de condiciones en la zona de estudio. La elevación varía significativamente desde los 3 m hasta los 3,448 m, con una media de 865.1 m. Las temperaturas mínimas promedian 18.0 °C y las máximas 28.7°C, mientras que la precipitación presenta un rango extenso (0 a 586 mm).

A partir del subconjunto de datos con una probabilidad de aptitud superior al 95%, se definieron los rangos óptimos para el cultivo de café en la región de estudio.

El rango intercuartílico (Q1-Q3) para cada variable se estableció como el intervalo ideal. Los rangos óptimos identificados son temperaturas de 16.1°C a 30.4°C. Precipitación de 23.0 a 193.5 mm, elevación de 545 - 193.5 m y pendientes de 4.5 a 16.6 °. Estos rangos, presentados en la tabla de la Figura 2 y en los diagramas de caja de la Figura 3, representan las condiciones bajo las cuales el modelo predice la máxima idoneidad para el café.

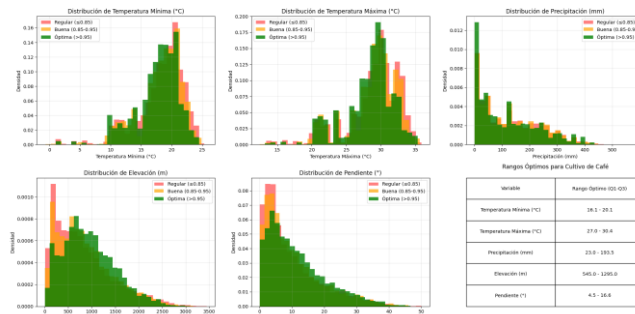


Figura 2. Distribución de variables ambientales por nivel de aptitud y rangos óptimos para el cultivo de café.

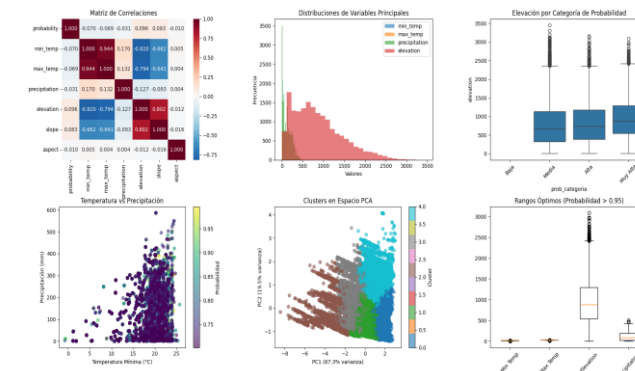


Figura 3. Análisis multivariado de la aptitud del café y caracterización de zonas agroecológicas.

El análisis de correlación muestra que ninguna variable ambiental por sí sola tiene una fuerte correlación lineal con la probabilidad de aptitud. Esta baja correlación individual sugiere que la aptitud del café es el resultado de interacciones complejas entre múltiples factores, justificando un enfoque multivariado.

Para identificar zonas con características ambientales homogéneas, se realizó un Análisis de Componentes Principales (PCA) seguido de un análisis de clústeres. El PCA redujo la dimensionalidad del dato, con los dos primeros componentes explicando el 86.8% de la varianza total (PC1: 67.3%, PC2: 19.5%). El análisis de clústeres sobre los componentes principales reveló cinco zonas agroecológicas distintas. Las características medias de cada grupo se resumen en la tabla 3.

Clúster	Número de puntos	Probabilidad media	Temperatura mínima	Temperatura máxima	Precipitación	Elevación media	Pendiente media	Suelo Dominante
3	2799	0.8913659691	16.54449357	27.4276304	132.6971886	1329.976777	19.42097215	Vertisols
1	4731	0.8882257671	18.43106021	28.99648953	52.76532262	801.6432044	8.073499886	Andosols
2	2371	0.8825249601	10.77520034	21.3699652	84.07757123	1851.962885	23.60832017	Vertisols
4	3894	0.8735027309	19.90079931	30.24075501	276.3311746	560.3882897	6.010461623	Vertisols
0	3737	0.8573638362	21.37555956	32.2761291	82.65779226	288.8488092	3.364783098	Vertisols

Tabla 3. Promedio de variables encontradas por clúster.

El análisis revela cinco zonas agroecológicas distintas (clústeres), cada una con un perfil ambiental único:

- Clúster 3: Presenta la probabilidad de aptitud media más alta (0.891). Se caracteriza por elevaciones altas (1330 m), pendientes pronunciadas (19.4°) y

temperaturas moderadas, perfilándose como la zona con las condiciones más óptimas.

- Clúster 2: Corresponde al ambiente de café de estricta altura. Se define por tener la mayor elevación (1852 m) y la pendiente más pronunciada (23.6°), lo que resulta en las temperaturas más frías de todo el estudio.
- Clúster 1: Aunque tiene una alta aptitud, se distingue por ser la zona con la menor precipitación (52.8 mm) y por tener un tipo de suelo único (Andosols). Agrupa al mayor número de puntos en elevaciones intermedias (801 m).
- Clúster 4: Se caracteriza por ser, con diferencia, la zona con la mayor precipitación (276 mm), combinada con temperaturas cálidas y pendientes suaves en elevaciones más bajas (560 m).
- Clúster 0: Representa las condiciones más extremas y menos favorables, con la elevación más baja (289 m), las temperaturas más altas (hasta 32.3°C) y el terreno más plano (3.4°), resultando en la menor aptitud media (0.857).

Utilizando estos análisis y resultados, se ha elaborado un mapa de El Salvador que presenta gráficamente las zonas adecuadas para la plantación del café, el cual se puede observar en la figura 4.



Figura 4. Mapa con las zonas detectadas como apropiadas para el cultivo del café y clasificadas según clusters detectados.

El análisis de la distribución espacial de las zonas agroecológicas para el cultivo de café en El Salvador revela una geografía productiva compleja y heterogénea. El territorio está predominantemente caracterizado por dos perfiles de alta montaña, correspondientes a los Clusters 2 y 4, que constituyen la base de la caficultura establecida. Un hallazgo relevante es que las zonas de aptitud óptima (Clúster 3) no forman regiones continuas, sino que se distribuyen como micro-zonas específicas con un alto potencial para cafés de especialidad. Además, el modelo identifica nuevas áreas con alta precisión agroecológica fuera de las áreas de cultivo tradicionales, notablemente en las regiones altas del norte del país.

El mapa de zonificación resultante revela datos ocultos y sustanciales acerca de los patrones existentes en las zonas de cultivo de El Salvador y se espera que esta información trascienda un estudio descriptivo para obtener un estudio integral acerca de las mejoras y estrategias agronómicas que

se pueden implementar en el país para fortalecer el sector cafetalero nacional.

VI. CONCLUSIÓN

En este trabajo se desarrolló e implementó un modelo automatizado basado en inteligencia artificial para la detección y clasificación de tierras subutilizadas con potencial para el cultivo de café en El Salvador. A través de la integración de 17 532 localidades georreferenciadas y la aplicación de Análisis de Componentes Principales (PCA) y técnicas de clustering, se identificaron cinco zonas agroecológicas homogéneas que explican el 86,8 % de la varianza total de las variables biofísicas. Los rangos óptimos hallados (elevaciones de 545–1 935 m, temperaturas entre 16,1 °C y 30,4 °C, precipitaciones de 23–193,5 mm y pendientes de 4,5°–16,6°) coinciden con los requerimientos teóricos del café arábica en la literatura y validan la capacidad del método para reproducir perfiles tradicionales de cultivo (cluster 2 y 4) y, al mismo tiempo, detectar microzonas de alta aptitud (cluster 3) fuera de las áreas históricas.

El mapa resultante revela una distribución heterogénea en la que las zonas de mayor aptitud no forman grandes bloques continuos, sino parches dispersos que podrían aprovecharse para cafés de especialidad. Asimismo, el modelo resalta nuevas áreas con condiciones favorables en la región norte

VII. RECOMENDACIONES

Para asegurar una transición desde el análisis teórico hacia aplicaciones prácticas y optimizar el impacto de los resultados, se formulan a continuación las recomendaciones dirigidas a investigadores, autoridades y productores:

1. Validación de campo. Llevar a cabo campañas de muestreo y estudios agronómicos en las microzonas identificadas (cluster 3) con el fin de corroborar in situ las características del suelo y del microclima, así como refinar los parámetros del modelo mediante datos empíricos.
2. Incorporación de variables socioeconómicas. Ampliar el modelo para integrar indicadores de infraestructura vial, acceso a financiamiento y redes de comercialización, con el propósito de evaluar la viabilidad económica y operativa de las zonas recomendadas.
3. Actualización dinámica del modelo. Implementar un esquema de reentrenamiento periódico que incorpore proyecciones climáticas y cambios en el uso del suelo, a fin de valorar la resiliencia de las áreas óptimas frente al cambio climático.
4. Desarrollo de una plataforma de apoyo a la decisión. Diseñar e implementar un sistema GIS web interactivo que permita visualizar mapas temáticos, filtrar parámetros de aptitud y exportar informes personalizados para productores y tomadores de decisión.
5. Transferencia tecnológica y capacitación. Organizar talleres y cursos para extensionistas, técnicos agrícolas y cooperativas sobre técnicas de teledetección y aprendizaje automático, garantizando la apropiación local del modelo y su mantenimiento sostenible a largo plazo.

REFERENCES

- [1] Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), "Perspectivas del sector cafetalero en América Latina," FAO, 2020.
- [2] "Más de 50,000 familias afectadas por crisis del café," La Prensa Gráfica, May 16, 2014. [Online]. Available: <https://www.laprensagrafica.com/economia/Mas-de-50000-familias-afectadas-por-crisis-del-cafe-20140516-130.html>
- [3] Instituto Salvadoreño del Café (ISC), "Informe de primera corta: ciclo cafetalero 2024–2025," ISC, Oct. 2024.
- [4] Instituto Salvadoreño del Café (ISC), "Histórico de producción de café." [Online]. Available: <https://www.isc.gob.sv/download/historico-de-produccion-2/> [Accessed: Jul. 6, 2025].
- [5] "El café salvadoreño sufre abandono de fincas por migración y alto costo de producción," Centro América 360. [Online]. Available: <https://www.centroamerica360.com/economia/el-cafe-salvadoreno-sufre-abandono-de-fincas-por-migracion-y-alto-costo-de-produccion/>
- [6] "Mapa Digital de Suelos," Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA). [Online]. Available: <https://www.centa.gob.sv/mapa-digital-de-suelos/>
- [7] F. DaMatta and A. Ramalho, "Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review," *Brazilian Journal of Plant Physiology*, vol. 18, no. 1, pp. 55–81, 2006.
- [8] F. M. DaMatta, "Exploring drought tolerance in coffee: a physiological approach with some insights for plant breeding," *Brazilian Journal of Plant Physiology*, vol. 16, no. 1, pp. 1–6, 2004.
- [9] J. Avelino et al., "The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008–2013): impacts, plausible causes and proposed solutions," *Food Security*, vol. 7, no. 2, pp. 303–321, 2015.
- [10] C. A. Harvey et al., "Extreme vulnerability of smallholder farmers to agricultural risks and climate change in Madagascar," *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, vol. 369, no. 1639, pp. 20130089, 2014.
- [11] P. Läderach et al., "Climate change adaptation of coffee production in space and time," *Climatic Change*, vol. 141, no. 1, pp. 47–62, 2017.
- [12] J. F. Barradas and J. A. Fanjul, "Microclimatic characterization of shaded and open-grown coffee (*Coffea arabica* L.) plantations in Mexico," *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 38, no. 1–3, pp. 101–112, 1986.
- [13] J. A. Camargo, "Impact of climatic variability and change on coffee production in Colombia," *Climate Change*, vol. 144, no. 2, pp. 279–293, 2010.
- [14] F. Bertrand et al., "Climatic factors directly impact the volatile organic compound fingerprint in green Arabica coffee bean as well as coffee beverage quality," *Food Chemistry*, vol. 135, no. 4, pp. 2575–2583, 2012.
- [15] P. Läderach et al., "Predicting the future climatic suitability for cocoa farming of the world's leading producer countries, Ghana and Côte d'Ivoire," *Climatic Change*, vol. 119, no. 3–4, pp. 841–854, 2013.
- [16] J. D. Carr, "Patterns, causes and consequences of land use change in Costa Rica: a quantitative and remote sensing analysis," Ph.D. dissertation, University of North Carolina, Chapel Hill, 2002.
- [17] J. Avelino et al., "Effects of slope exposure, altitude and tree shading on the rainfall interception in coffee plantations," *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 155, pp. 69–78, 2012.
- [18] P. J. Cochran et al., "Soil pH and nutrient availability in coffee plantations," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 65, no. 4, pp. 1185–1190, 2001.
- [19] J. Bornemisza and A. Alvarado, "Soil management in tropical America," North Carolina State University, Raleigh, 1975.
- [20] J. A. Hagggar and K. Schepp, "Coffee and climate change: impacts and options for adaptation in Brazil, Guatemala, Tanzania and Vietnam," Natural Resources Institute, University of Greenwich, 2012.
- [21] C. A. Palm et al., "Soil organic matter dynamics in coffee agroecosystems," *Agroecology and Sustainable Food Systems*, vol. 38, no. 2, pp. 216–243, 2014.
- [22] J. M. Harmand et al., "Effects of agroforestry systems on soil organic matter," *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 129, no. 1–3, pp. 24–35, 2009.
- [23] J. Beer et al., "Shade management in coffee and cacao plantations," *Agroforestry Systems*, vol. 38, no. 1–3, pp. 139–164, 1998.
- [24] J. C. Jiménez-Osornio and S. del Amo, "An intensive Mexican traditional agroecosystem: the pet kot," *Agroforestry Systems*, vol. 4, no. 1, pp. 269–291, 1986.
- [25] F. Montagnini et al., "Sistemas agroforestales: principios y aplicaciones en los trópicos," 2nd ed., San José, Costa Rica: CATIE, 2006.
- [26] J. Ricketts et al., "Soil compaction effects on coffee root development and yield," *Soil Science*, vol. 169, no. 4, pp. 303–312, 2004.
- [27] A. Cannavo et al., "Agroforestry associating coffee and Inga densiflora results in complementarity for water uptake and decreases deep drainage," *Plant and Soil*, vol. 343, no. 1–2, pp. 165–180, 2011.
- [28] C. Chemura et al., "Bioclimatic modelling of current and projected climatic suitability of coffee (*Coffea arabica*) production in Zimbabwe," *Regional Environmental Change*, vol. 16, no. 2, pp. 473–485, 2016.
- [29] U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, "Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys," 2nd ed. Washington, DC: U.S. Government Printing Office, 1999.
- [30] "Por qué algunos cafés se cultivan peligrosamente cerca de volcanes," Green Plantation. [Online]. Available: <https://www.greenplantation.es/a/por-que-algunos-cafes-se-cultivan-peligrosamente-cerca-de-volcanes>
- [31] J. I. Ibáñez and F. J. Manríquez Cosío, "Nitisoles (Nitisoles): Uso y Manejo (Suelos Ferralíticos)," *madrimasd*, Apr. 10, 2013. [Online]. Available: <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2013/04/10/143811>
- [32] S. Sadeghian, "Acidez del suelo para el cultivo de café," in *Guía más agronomía, más productividad, más calidad*, 3rd ed., Chinchiná, Colombia: Cenicafe, 2021, pp. 95–99. [Online]. Available: <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/4284/1/95-99.pdf>
- [33] NASA JPL, "NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second," NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5067/MEaSUREs/SRTM/SRTMGL1.003>
- [34] S. E. Fick and R. J. Hijmans, "WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas," *Int. J. Climatol.*, vol. 37, no. 12, pp. 4302–4315, 2017, doi: 10.1002/joc.5086.
- [35] T. Hengl et al., "SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning," *PLoS One*, vol. 12, no. 2, e0169748, 2017, doi: 10.1371/journal.pone.0169748.
- [36] Forest Data Partnership, "Community models 2025a: Coffee suitability predictions for Central America," 2025. [Online]. Available: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/projects_forestdatapartnership_assets_coffee_model_2025a# Citations