

Análisis

multicriterio para determinar la aptitud edafoclimática de café robusta en El Oro (Ecuador), utilizando geoinformática

Multicriteria analysis to determine the soil and climatic suitability of robusta coffee in El Oro (Ecuador), using geoinformatics

Recibido: 09/07/24
Aceptado: 25/03/25
Publicado: 09/06/25

Stefanny Lisseth Herrera Ramírez^{1*}

E-mail: sherrera4@utmachala.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4200-8847>

Paola Alicia Gálvez Palomeque¹

E-mail: pgalvez@utmachala.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4080-2019>

José Nicasio Quevedo Guerrero¹

E-mail: jnquevedo@utmachala.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8974-5628>

Irán Rodríguez Delgado¹

E-mail: irodriguez@utmachala.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6453-2108>

¹Universidad Técnica de Machala, El Oro, Ecuador.

*Autor para correspondencia:

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Herrera Ramírez, S. L., Gálvez Palomeque, P. A., Quevedo Guerrero, J. N. y Rodríguez Delgado, I. (2025). Análisis multicriterio para determinar la aptitud edafoclimática de café robusta en El Oro (Ecuador), utilizando geoinformática. *Revista Científica Agroecosistemas*, 13, e768. <http://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/768>

RESUMEN

En Ecuador, la caficultura constituye una de las principales fuentes económicas de un amplio tejido social, con alrededor de 199215 hectáreas distribuidas en las 24 provincias del territorio nacional. Sin embargo, la productividad de este cultivo se ha visto mermada por diversas causas como pérdida por plagas, material genético desconocido, reducción del área cultivada, plantaciones antiguas, suelos inapropiados y limitadas innovaciones tecnológicas en los sistemas de producción. El objetivo principal del estudio fue determinar la idoneidad de áreas para el cultivo de café robusta en la provincia de El Oro (Ecuador), mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y superposición ponderada de capas, para la gestión adecuada del uso del territorio y el aumento de la productividad del cultivo. Para ello, se crearon mapas temáticos basados en criterios climáticos, edafológicos y topográficos, utilizando sistemas de información geográfica (SIG) y geoestadística, que se integraron con la técnica de superposición en el lenguaje de programación R (v 4.3.2) para generar un mapa de idoneidad de áreas para el cultivo de café robusta. El mapa final de idoneidad reveló que las áreas “moderada”, “marginal” y “no apta” abarcan 367496,19 ha (63,41%), 211999,68 ha (36,58%) y 41,31 ha (0,01%), respectivamente. No se presentaron áreas “óptimas” para el cultivo.

Palabras clave:

Idoneidad de áreas, Café robusta, AHP, SIG, Kriging.

ABSTRACT

In Ecuador, coffee farming is one of the main economic sources of a broad social fabric, with around 199215 hectares distributed in the 24 provinces of the national territory. However, the productivity of this crop has been reduced by various causes such as loss due to pests, unknown genetic material, reduction of cultivated area, old plantations, inappropriate soils and limited technological innovations in production systems. The main objective of the study was to determine the suitability of areas for the cultivation of robusta coffee in the province of El Oro (Ecuador), through the Hierarchical Analytical Process (AHP) and weighted layering of layers, for the proper management of land use and the increase of crop productivity. To this end, thematic maps were created based on climatic, soil and topographic criteria, using geographic information systems (GIS) and geostatistics, which were integrated with the overlay technique in the R programming language (v 4.3.2) to generate a map of suitability of areas for the cultivation of robusta coffee. The final suitability map revealed that the “moderate”, “marginal” and “unfit” areas cover 367496.19 ha (63.41%), 211999.68 ha (36.58%) and 41.31 ha (0.01%), respectively. There were no “optimal” areas for cultivation.

Keywords:

Suitability of areas, Robusta coffee, AHP, GIS, Kriging.

INTRODUCCIÓN

La agricultura es una práctica con 10000 años de antigüedad, que provee al hombre de alimentos, materias primas y empleo, convirtiéndose así en la principal fuente de ingresos económicos para la mayoría de los países del mundo. A partir del siglo XX, la industrialización agrícola transformó drásticamente las actividades, adoptando un enfoque hacia la maximización de la producción y el beneficio (García-Llorente et al., 2018).

En África, Asia y América Latina los cultivos tropicales perennes, como el café (*Coffea* spp.), el banano (*Musa paradisiaca*), el cacao (*Theobroma cacao*), la palma de aceite (*Elaeis guineensis*), entre otros, constituyen la base del sustento económico para los agricultores de dichas regiones. En lo que respecta al cultivo de café, América Latina concentra la mayor producción mundial, destacándose los países de Brasil y Colombia con el 32,6% y 8,8%, respectivamente (Figuroa-Hernández et al., 2019).

De las 103 especies descritas en café, solo dos son comercialmente más importantes: arábica (*Coffea arabica*) y robusta (*Coffea canephora*). Los granos de café arábigo tienen un aroma y acidez pronunciados debido a que acumulan más sacarosa y contienen menos cafeína. Por el contrario, café robusta posee granos con aroma menos intenso y mayor cuerpo, lo cual se debe a su contenido alto en cafeína y bajo nivel de sacarosa. Adicionalmente, en esta especie, los compuestos fenólicos, como taninos, es más abundante, otorgando así una mayor astringencia a la bebida (Lachenmeier et al., 2020).

En Ecuador, el café es fuente económica de un amplio tejido social con alrededor de 199215 hectáreas distribuidas en las 24 provincias del país. El 68% de esta superficie corresponde a café arábigo y el 32% a robusta. Las variedades arábicas más cultivadas son: Típica, Caturra, Bourbon, Pacas, Catuaí, Geisha, Catimor y Sachimor. En la especie robusta se distinguen dos variedades botánicas: Conilón y Robusta (COFENAC, 2013).

En 2017, el país registró bajos rendimientos para las especies arábica y robusta (0,22 t ha⁻¹ y 0,48 t ha⁻¹). Esta baja productividad tiene como causas: pérdida por plagas, material genético desconocido, reducción del área cultivada, plantaciones antiguas, suelos inapropiados y limitadas innovaciones tecnológicas en los sistemas de producción (Duicela-Guambi et al., 2019).

La agricultura inteligente es una técnica moderna orientada hacia la optimización de la producción y rendimiento en cultivos, recursos hídricos y energía mediante la implementación de Tecnologías de Información y Comunicación (TIC), como Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), el Internet de las Cosas (IoT), sensores, drones, Sistemas de Información Geográfica (SIG), entre otros. En particular, los SIG constituyen un sistema de base de datos conformado por un hardware y software destinado, a la compilación, almacenamiento, análisis, edición y visualización

de datos georreferenciados para la generación de mapas (Dhanaraju et al., 2022).

La geoinformática es un campo científico y tecnológico que emplea la infraestructura de la ciencia de la información para resolver desafíos en disciplinas como geografía, geodesia, la cartografía, la fotogrametría, el GPS, el SIG y ramas relacionadas de la ciencia y la ingeniería de la Tierra. En este campo, es importante destacar el entorno y lenguaje de programación R, el cual posee un sistema de bibliotecas para análisis espaciales con amplias opciones de visualización, interpolación y geoestadística (Filchev et al., 2020).

La integración de los SIG y Análisis de Decisiones Multicriterio (MCDA), combina y modifica datos espaciales y juicios de valor a fin de obtener información para la toma de decisiones en problemas complejos de decisión espacial como selección de zonas. En el ámbito agrícola, se ha empleado en estudios sobre idoneidad de áreas por su aplicación universal en cuanto a tipos de cultivos, ubicación y tamaño del área. No obstante, su potencial está limitado al conocimiento del cultivo por un experto sobre el clima, suelo, agua, altitud y otros (Saltuk & Artun, 2019).

El objetivo del estudio fue determinar la idoneidad de áreas para el cultivo de café robusta en la provincia de El Oro (Ecuador), mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y superposición ponderada de capas, para la gestión adecuada del uso del territorio y el aumento de la productividad del cultivo.

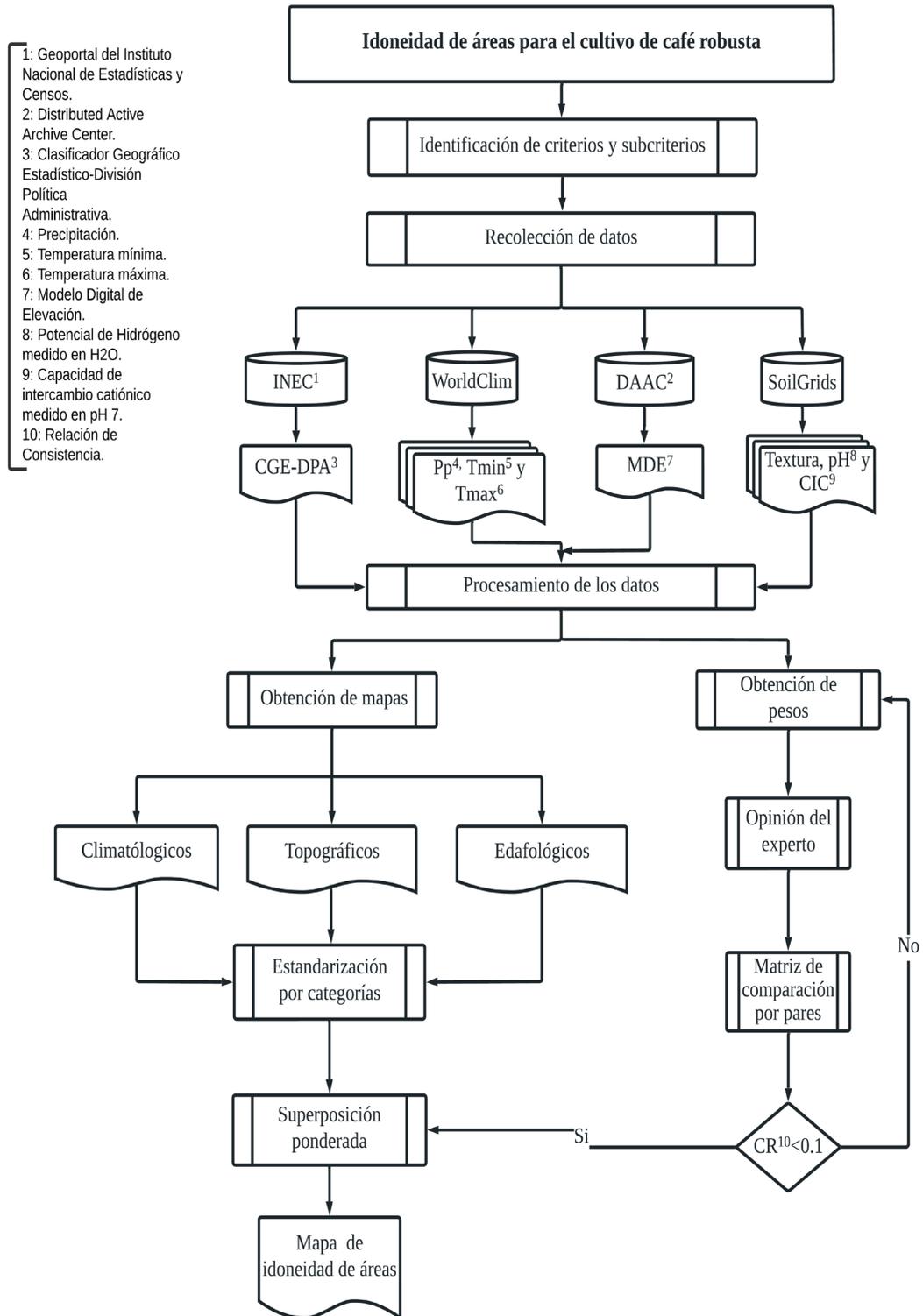
MATERIALES Y MÉTODOS

La provincia de El Oro se localiza al sur del Ecuador entre las latitudes de 3° 2' y 3° 53' S y longitudes de 79° 21' y 80° 26' O; la altitud oscila de 0 a 3000 msnm; limita al norte con las provincias de Guayas y Azuay, al sur y este con la provincia de Loja y al oeste con el Océano Pacífico. La región presenta variedad de microclimas con temperaturas de 19,9°C a 27°C, precipitación anual comprendida entre 500 y 1000 mm, generalmente de diciembre a mayo. Además, los suelos son de origen aluvial y se clasifican en los órdenes Inceptisol, Afisol y Entisol (Villaseñor et al., 2015).

Estructura metodológica

En la figura 1, se presenta la metodología empleada en el análisis de idoneidad de áreas para el cultivo de café robusta en la provincia de El Oro. De forma general, se identificaron los criterios y subcriterios con posible influencia en el crecimiento y producción del cultivo. Se elaboró mapas para cada subcriterio y se estandarizó en cuatro categorías. A su vez, se implementó la matriz de comparación por pares para comparar y priorizar estos subcriterios. Finalmente, las capas se superpusieron en base a los pesos de importancia.

Fig. 1: Diagrama de flujo de la metodología utilizada para el modelado de idoneidad de áreas para el cultivo de café robusta en la provincia de El Oro, Ecuador.



- 1: Geoportal del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos.
- 2: Distributed Active Archive Center.
- 3: Clasificador Geográfico Estadístico-División Política Administrativa.
- 4: Precipitación.
- 5: Temperatura mínima.
- 6: Temperatura máxima.
- 7: Modelo Digital de Elevación.
- 8: Potencial de Hidrógeno medido en H₂O.
- 9: Capacidad de intercambio catiónico medido en pH 7.
- 10: Relación de Consistencia.

Fuente: Elaboración propia en base a López et al. (2020).

Identificación de criterios y subcriterios

Los criterios y subcriterios que condicionan el crecimiento y producción de café robusta en la provincia de El Oro fueron seleccionados con apoyo de un experto en la materia, manuales técnicos y artículos sobre idoneidad de áreas para cultivos. Luego, se realizó una jerarquía basada en tres criterios (climatológicos, topográficos y edafológicos) con ocho subcriterios. El criterio socioeconómico no se consideró por falta de datos espaciales para el área de estudio. Los subcriterios se reclasificaron en umbrales de idoneidad para el territorio, obteniéndose cuatro diferentes categorías: "Óptimo (1)", "Moderado (2)", "Marginal (3)", "No apta (4)".

Recolección de los datos

El dato geográfico con la delimitación exacta de las provincias, cantones y parroquias que conforman el Ecuador conocido como Clasificador Geográfico Estadístico-DPA fue obtenido del Geoportal del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) en formato Shapefile (representación vectorial que almacena la localización y atributos de una entidad geométrica) hasta el año 2012 (<https://www.ecuadorencifras.gob.ec/category/geoportal/>).

Los datos climáticos se descargaron de la base de datos WorldClim 2.1 para el periodo 2000-2021 con resolución espacial de 2,5 minutos (~21 km²) (<https://worldclim.org/>). En esta última actualización de WorldClim, las predicciones de temperatura fueron mejoradas en un rango de 5 a 15% al incorporar datos de teledetección. A nivel global, las correlaciones exhiben valores satisfactorios de 0,99 para las variables climáticas temperatura y humedad. Si bien las predicciones actuales son aceptables, se reconoce la necesidad de continuar refinándolas con enfoque en la expansión de las redes de datos provenientes de estaciones meteorológicas.

Los datos topográficos se generaron a partir del Modelo Digital de Elevación (MDE) incluido en el paquete del producto ALOS PALSAR RTC con resolución espacial de 30 m, descargado de Distributed Active Archive Center (DAAC) de la Instalación de Satélites de Alaska (ASF) (<https://search.asf.alaska.edu/>).

Los datos edafológicos se obtuvieron del sistema de cartografía global de suelos SoilGrids 2.0, que elabora mapas con métodos de aprendizaje automático a una resolución de 250 m de tamaño de celda (<https://soilgrids.org/>).

Procesamiento de los datos

Se aplicó una función personalizada en R a los datos históricos mensuales de precipitación, temperatura máxima y mínima, obteniéndose tres conjuntos de datos raster con 12 capas cada uno desde enero hasta diciembre para el periodo 2000-2021. Para evaluar estas variables climáticas, se procesaron los conjuntos de datos para reducirlos a una sola capa. La precipitación anual se calculó sumando uno por uno los meses, mientras que, la temperatura máxima y mínima se promedió cada mes, obteniéndose dos capas, las cuales se promediaron para obtener la temperatura media anual.

El índice estandarizado de precipitación y evaporación (SPEI), es un índice multiescalar empleado para la determinación del inicio, la duración e intensidad de las condiciones de sequía en cultivos. En el presente estudio, el cálculo se realizó con el paquete SPEI (v1.8.1), siguiendo la metodología descrita por Vicente-Serrano et al. (2010), la cual incorpora en su formulación el balance hídrico determinado a partir de la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración (ETP). La ETP se calculó utilizando datos históricos climáticos de la precipitación acumulada y de la temperatura mínima y máxima mediante el método de Hargreaves. Posteriormente, se promediaron los 12 meses obtenidos del SPEI para generar una única capa ráster a evaluar.

Los rasters de textura, pH y capacidad de intercambio catiónico (CIC), se sometieron a un proceso de transformación de escalas, dividiéndose por un valor de 10 cada uno. Este procedimiento fue necesario ya que la base de datos por defecto los presenta en números enteros. El 96% de las raíces de café se encuentran en los primeros 50 cm de profundidad del suelo, lo que implicó con algebra de mapas realizar una media ponderada (Ecuación 1) sobre las capas de profundidades 0-5 cm, 5-15 cm, 15-30 cm y 30-60 cm para obtener una capa de salida en cada subcriterio.

$$\bar{x}_p = \frac{\sum_{k=1}^n x_k p_k}{N} \quad (1)$$

El PALSAR MDE fue remuestreado a una resolución de 90 m con la técnica de convoluciones cúbicas para generar el correspondiente mapa de altitud. A partir de este nuevo MDE, se calculó la pendiente mediante el Polinomio de Taylor bivariado de tercer orden.

El kriging o Krigeaje es un método de inferencia espacial que permite estimar valores en base a la varianza espacial cuando existe limitación de los datos de puntos y se requiere mapear toda un área (Arabameri et al., 2019). En este estudio, se empleó una variante conocida como Kriging Ordinario (OK), basado en un modelo de variograma que se ajustó automáticamente a las observaciones usando el paquete automap (v1.1-9), para interpolar los mapas obtenidos de los criterios climatológicos y edafológicos, los cuales previamente se transformaron en pseudopuntos. El estimador de este método se basa en la ecuación 2 Arabameri et al. (2019):

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (2)$$

Donde \hat{Z} es el valor estimado en una ubicación no observada, Z es el valor observado en la ubicación muestreada, y λ_i son los pesos de kriging. Los pesos son calculados de acuerdo al análisis de autocorrelación del modelo de variograma.

El nmax es un argumento cuyo límite y valor por defecto corresponden al número total de observaciones. Un aumento en el número de vecinos conlleva una disminución del error cuadrático medio (RMSE) y un incremento del coeficiente de determinación (R²), lo que supone una mayor precisión en la estimación de valores de la interpolación, pero

implica una mayor carga computacional. Por consiguiente, en lugar de utilizar un número de forma arbitraria, se utilizó una cantidad representativa del total de los puntos, que se consideraran como la población de estudio. Este enfoque de muestreo es una técnica sugerida por Ramírez (2023). Para ello, se realizó el cálculo del mínimo tamaño muestral, con la utilización de un algoritmo matemático (Ecuación 3). Este algoritmo se aplicó a un total de 437 datos climáticos y 167200 datos edafológicos. Como resultado, se obtuvieron muestras de 143 y 210 observaciones, respectivamente, seleccionadas de manera aleatoria.

$$n = \frac{N * Z_{1-\alpha/2}^2 * S^2}{d^2 * (N - 1) + Z_{1-\alpha/2}^2 * S^2} \quad (3)$$

Donde n es tamaño de la muestra, N representa el tamaño total de la población, Z es el valor Z asociado con el nivel de confianza deseado, S^2 es la varianza y d corresponde a la precisión.

La normalización de la suma de las tres clases de tamaño de partículas (arena, limo y arcilla) a un total del 100% y la determinación de la clase textural conforme al triángulo de textura del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), fueron realizadas a partir del mapa de

textura interpolado con el paquete *soiltexture* (v1.5.3). Por último, los mapas de cada uno de los subcriterios se ajustaron al perímetro de la provincia de El Oro. Todos estos procesos espaciales se llevaron a cabo utilizando el lenguaje de programación R (v4.3.2).

Estandarización de subcriterios por categorías de idoneidad

Previo a la superposición ponderada, los mapas de cada subcriterio se estandarizaron reclasificándolos en cuatro categorías (Tabla 1). Las categorías utilizadas son las siguientes: “Óptimo” se refiere al territorio donde las condiciones naturales de clima, suelo y topografía son las más favorables para el cultivo. En “Moderado”, las condiciones de clima, suelo y topografía presentan limitaciones moderadas que pueden mejorarse con prácticas de manejo adecuadas. “Marginal” describe territorios con limitaciones severas de clima, suelo y topografía que impiden el crecimiento y desarrollo adecuado del cultivo en su entorno natural. Finalmente, “No apta” se refiere a territorios con limitaciones tan severas que no permiten en condiciones naturales el establecimiento del cultivo. Los mapas temáticos reclasificados para cada subcriterio se muestran en la figura 2.

Tabla 1: Reclasificación de subcriterios preliminares para el establecimiento de café robusta.

Criterio/ Subcriterio	Óptima 1	Moderada 2	Marginal 3	No apta 4
Climatológico				
Temperatura (°C)	28 - 30	30 - 34	18 - 28	<18; >34
Precipitación (mm/año)	>1700	1500 - 1700	1000 - 1500	<1000
SPEI	Moderadamente húmedo (1,00 a 1,49), Ligeramente húmedo (0,50 a 0,99)	Cerca de lo normal (-0,49 a 0,49), Levemente seco (-0,99 a -0,50)	Severamente húmedo (1,50 a 1,99), Moderadamente seco (-1,49 a -1,00), Severamente seco (-1,99 a -1,50)	Extremadamente húmedo (valores mayores a 2), Extremadamente seco (valores menores a -2)
Edafológico				
Clase textural	Franco, Franco limoso, Franco arcilloso, Franco arcillo-arenoso.	Franco arenoso, Franco arcillo-limoso.	Areno francoso, Limoso, Arcillo-arenoso, Arcillo-limoso.	Arenoso, Arcilloso
CIC (meq/100g)	>15	10-15	5-10	<5
pH	5,5 - 7	4,0 - 5,5	7 - 8	>8; <4
Topográfico				
Altitud (msnm)	200 - 700	0-200	700-1200	>1200
Pendiente (%)	< 8	8-16	16-30	>30

Fuente: Elaboración propia en base a Anil Kumar et al. (2010); Hidayat et al. (2020); Nam et al. (2015); Muliasari & Dewi (2022).

Análisis de Decisiones Multicriterio (MCDA)

Arabameri et al. (2019), manifiestan que los métodos MCDA son empleados para seleccionar, clasificar y ordenar diferentes alternativas en un conjunto de criterios, con el objetivo de identificar las opciones más óptimas. AHP es uno de estos métodos, que permite a un experto realizar comparaciones por pares para evaluar y comparar

múltiples criterios de forma estructurada y jerárquica. Su integración con los SIG posibilita el uso de un sistema robusto de apoyo a la toma de decisiones para fines de planificación espacial.

Los juicios de AHP se ingresaron en una matriz cuadrada donde se compararon y ponderaron los criterios entre sí con cada grupo jerárquico según la escala de importancia

(1= igual de dominante, 3 = moderadamente dominante, 5 = fuertemente dominante, 7 = muy fuertemente más dominante, 9 = extremadamente más dominante). Los valores 2, 4, 6 y 8 son valores intermedios de importancia en la escala de 1 a 9 de Saaty (Saaty & Tran, 2007).

Los puntos de vista del experto tienen mucho valor por su experiencia en el cultivo, pero existe la posibilidad de preferencias subjetivas que conlleven a inconsistencias. Por tanto, se debe calcular la Relación de Consistencia (CR) (Índice de Consistencia (CI) / Índice Aleatorio (RI) de

la matriz). CI es una medida para definir el coeficiente de consistencia de la matriz denotándose en su fórmula λ_{max} (valor propio) y n (número de columnas y filas) (Ecuación 4). Los valores de RI están condicionados por el valor n (Tabla 2).

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

Tabla 2: Índice aleatorio (RI) para cada “n” en AHP.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49

Fuente: Saaty y Tran (2007).

Superposición ponderada

El análisis de superposición ponderada se llevó a cabo con el producto de los mapas temáticos estandarizados (Figura 2), por los pesos creados con AHP para cada subcriterio. Las capas resultantes se sumaron y se creó un mapa de idoneidad de áreas para el cultivo de café robusta (Ecuación 5).

$$S = \sum_{i=0}^n (W_i X_i) \quad (5)$$

Donde S es la idoneidad, W_i es el peso del subcriterio, y X_i es la capa estandarizada del subcriterio.

RESULTADOS-DISCUSIÓN

La matriz de comparación por pares (Tabla 3), indica que la topografía es el criterio más importante en la determinación de la idoneidad de áreas para café robusta en la provincia de El Oro, destacándose los subcriterios de la altitud y pendiente con un peso combinado de 36%, lo que coincide con lo reportado por López et al. (2020), quienes utilizaron enfoques AHP, SIG y teledetección para elaborar mapas de idoneidad del territorio para el cultivo de café en Perú. Además, la relación de consistencia de la matriz es satisfactoria, según lo manifiestan Saaty & Tran (2007), al no exceder el valor de 0,1 establecido para el parámetro CR. De lo contrario, los autores recomiendan que el experto reconsidere el grado de importancia de las variables.

Tabla 3: Matriz comparada por pares de los subcriterios.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	Peso
C1	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	0,33
C2	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	0,23
C3	0,33	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	0,16
C4	0,25	0,33	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	0,11
C5	0,20	0,25	0,33	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	0,07
C6	0,17	0,20	0,25	0,33	0,50	1,00	2,00	3,00	0,05
C7	0,14	0,17	0,20	0,25	0,33	0,50	1,00	2,00	0,03
C8	0,13	0,14	0,17	0,20	0,25	0,33	0,50	1,00	0,02

C1= Altitud; C2= SPEI; C3= pH; C4= Clase textural; C5= Temperatura; C6= CIC; C7= Pendiente; C8= Precipitación; CI=0,06; RI=1,4; CR=0,043.

Fuente: Elaboración propia

Idoneidad climática

El subcriterio de la temperatura en el área es marginal (3) con 508517,19 ha (87,75%) y no apta (4) con 71019,99 ha (12,25%). De igual manera, la precipitación resultó no apta (4) con 480717,18 ha (82,95%) (Tabla 4) lo cual se justifica en la figura 2. La temperatura interviene en el crecimiento y fotosíntesis neta de las plantas de café; un incremento de esta afecta los contenidos de trigonelina, grasa y cafeína

en granos, mientras que una disminución favorece la acumulación de sacarosa y proteína en las células. Por otro lado, la precipitación influye en la calidad y productividad de granos (Zhang et al., 2022).

En la figura 2 y tabla 4, se presenta las condiciones de sequía reclasificadas del SPEI para una serie de tiempo analizada de 21 años. Los resultados muestran que existe un área optima (1) de 195437,61 ha (33,72%) y moderada

(2) de 273747,60 ha (47,24%), precedido por la categoría marginal (3), con 110351,97 ha (19,04%). El estrés hídrico es una respuesta fisiológica de las plantas inducida por la sequía, especialmente relevante en el cultivo del café. Durante períodos prolongados de sequía, se observa un incremento en la concentración de azúcares en los granos, superando el rango óptimo de 15 a 24 grados brix. Por otra parte, al registrarse precipitaciones, estos valores disminuyen debido al almacenamiento de agua en los granos. En ambos escenarios, la calidad y el proceso de maduración del café se ven comprometidas (Astudillo et al., 2022).

Idoneidad topográfica

Para el subcriterio de la altitud, el área óptima (1) es del 20,50% (118831,05 ha), seguido de la moderada (2) con el 40,56% (235043,37 ha), mientras que las áreas marginal (3) y no apta (4) corresponden al 15,45% (89530,11 ha) y 23,49% (136132,65 ha), respectivamente. En cuanto a la pendiente, los resultados revelan un área óptima (1) del 45,01% (260866,98 ha), un área moderada (2) del 19,66% (113957,28 ha), un área marginal (3) del 28,48% (165023,73 ha) y un área no apta (4) del 6,85% (39689,19 ha), como se muestra en la figura 2 y tabla 4. Según Zhang et al. (2022), la altitud influye sobre el periodo de floración, maduración y atributos organolépticos como sabor, cuerpo, balance y acidez de los granos de café. Aunque altitudes elevadas afectan negativamente la temperatura y precipitación, en contraposición, la pendiente del terreno determina la profundidad y la textura del suelo, así como la utilización de nutrientes por parte de las plantas.

Idoneidad edafológica

El pH del suelo en el área de estudio como se indica en la tabla 4 y figura 2 es de aptitud óptima (1) para la mayor parte del territorio con 554574,60 ha (95,69%). El pH es un indicador clave de la solubilidad y disponibilidad de elementos potenciales para el crecimiento de las plantas. En suelos muy ácidos, las concentraciones de Hierro (Fe), Zinc (Zn), Manganeseo (Mn) y Cobre (Cu) son elevadas, lo que puede reducir la disponibilidad de macronutrientes importantes como Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K). Para los cafetos, el rango de pH adecuado en suelos va de ligeramente a fuertemente ácido (Hidayat et al., 2020).

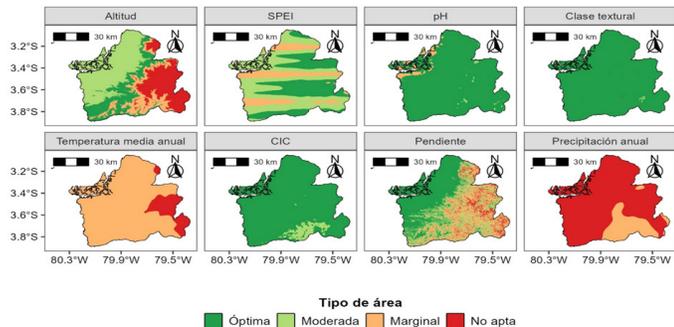
Con relación a la clase textural, en la figura 2 se puede apreciar que los suelos francos dominan ampliamente el área con el 99,79 % (578298,69 ha), como se detalla en la tabla 4. De acuerdo con Anil Kumar et al. (2010) estos suelos son ideales para el cultivo de café. Mientras tanto, Muliasari & Dewi (2022) indican que la CIC es una forma de conocer el grado de fertilidad del suelo. Los suelos con baja CIC carecen de materia orgánica, requieren una mayor adición de fertilizantes y están sujetos a la lixiviación. Los resultados, según la figura 2 y la tabla 4, evidencian que el área en su mayoría es óptima (1) y moderada (2), con un 94,39% (546997,86 ha) y un 5,61% (32510,97 ha), respectivamente.

Tabla 4: Superficie y distribución porcentual de las categorías de idoneidad de áreas por subcriterios en la provincia de El Oro, Ecuador.

Subcriterios	Categorías	Área	
		ha	%
Altitud	Óptima	118831,05	20,50
	Moderada	235043,37	40,56
	Marginal	89530,11	15,45
	No apta	136132,65	23,49
	Total	579537,18	100,00
pH	Óptima	554574,60	95,69
	Moderada	3467,61	0,60
	Marginal	21494,97	3,71
	Total	579537,18	100,00
Temperatura media anual	Marginal	508517,19	87,75
	No apta	71019,99	12,25
	Total	579537,18	100,00
Pendiente	Óptima	260866,98	45,01
	Moderada	113957,28	19,66
	Marginal	165023,73	28,48
	No apta	39689,19	6,85
	Total	579537,18	100,00
Precipitación anual	Marginal	98820,00	17,05
	No apta	480717,18	82,95
	Total	579537,18	100,00
CIC	Óptima	546997,86	94,39
	Moderada	32510,97	5,61
	Marginal	28,35	0,005
	Total	579537,18	100,00
SPEI	Óptima	195437,61	33,72
	Moderada	273747,60	47,24
	Marginal	110351,97	19,04
	Total	579537,18	100,00
Clase textural	Óptima	578298,69	99,79
	Moderada	954,18	0,16
	Marginal	57,51	0,01
	No apta	226,80	0,04
	Total	579537,18	100,00

Fuente: Elaboración propia

Fig. 2: Mapas temáticos de los subcriterios climatológicos, edafológicos y topográficos.



Fuente: Elaboración propia

Idoneidad total

Los resultados de la superposición ponderada de los subcriterios generaron un mapa detallado y completo de la idoneidad de áreas para el cultivo (Figura 3). El tamaño de las categorías de idoneidad se detalla en la tabla 5. En la provincia de El Oro solo 367496,19 ha, que representan el 63,41 % del territorio, son moderadamente idóneas para café robusta. Estas áreas se caracterizan por temperaturas que oscilan entre 30 y 34°C, precipitaciones de 1500 y 1700 mm anuales y un SPEI cuyas condiciones húmedas oscilan entre lo cercano a lo normal y lo levemente seco. Los suelos son predominantemente francos arenosos y francos arcillo-limosos, con una CIC 10 a 15 meq/100g y pH de 4,0 a 5,5. Se localiza a altitudes de 0 a 200 msnm y pendientes del 8 al 16% distribuidas al norte y suroeste en los cantones de Las Lajas, Arenillas, Machala, Santa Rosa, Guabo, Pasaje, Marcabelí y parcialmente en Balsas y Piñas.

Las áreas marginales cubren 211999,68 ha, lo que representa el 36,58% de la provincia. En este tipo de área las temperaturas fluctúan entre 18 y 28°C, con precipitaciones de 1000 y 1500 mm anuales. Las condiciones varían desde ser severamente húmedas hasta moderadamente secas y severamente secas según indica el SPEI. En cuanto al suelo, las clases texturales que exhiben son areno francoso, limoso, arcillo-arenoso y arcillo-limoso, con una CIC de 5 a 10 meq/100g y pH de 7 a 8. Se encuentran a altitudes de 700 a 1200 msnm, con pendientes del 16 al 30% y distribuyen hacia el este y sureste en los cantones Atahualpa, Chilla, Zaruma, Portovelo. Así como en parte de Piñas y Balsas. En menor proporción, también existen algunas áreas aisladas al noreste y noroeste en los cantones Guabo, Pasaje, Huaquillas, Arenillas y Machala.

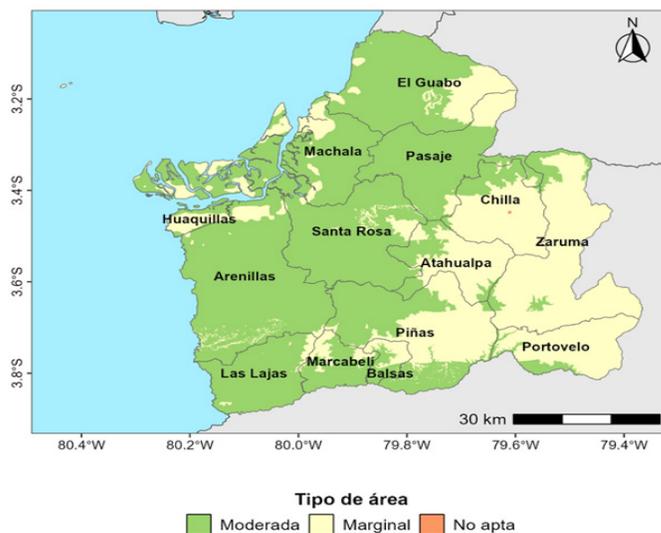
Las áreas categorizadas como no aptas presentaban temperaturas inferiores a 18°C y superiores a 34 °C, precipitaciones menores a 1000 mm anuales y un SPEI que indica condiciones extremadamente húmedas y secas. Los suelos son arenosos y arcillosos, con baja CIC menor a 5 meq/100g y un pH menor a 4 o mayor a 8. Estas zonas se encuentran a altitudes mayores a 1200 msnm y pendientes mayores al 30%. Su superficie abarca 41,31 ha (0,01%).

Tabla 5: Superficie y distribución porcentual de las categorías de idoneidad de áreas en la provincia de El Oro, Ecuador.

Categorías	Área	
	ha	%
Moderada	367496,19	63,41
Marginal	211999,68	36,58
No apta	41,31	0,01
Total	579537,18	100,00

Fuente: Elaboración propia

Fig. 3: Mapa general de idoneidad de áreas para el cultivo de café robusta en la provincia de El Oro, Ecuador.



Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

Este estudio determinó la idoneidad de áreas para el cultivo de café robusta mediante la combinación de técnicas AHP y superposición ponderada, considerando tres criterios fundamentales (climatológicos, topográficos y edafológicos) y ocho subcriterios. Según el análisis del experto, los subcriterios de mayor relevancia para el cultivo de café son la altitud (33%), y el índice de sequía (22%). Los submodelos edafológicos resultantes exhiben la mayor extensión de áreas óptimas, en contraste con el submodelo de la precipitación, que presenta una superficie significativa de áreas no aptas. En la provincia de El Oro, basado en el mapa final de idoneidad, las áreas “moderada”, “marginal” y “no apta” abarcan 367496,19 ha (63,41%), 211999,68 ha (36,58%) y 41,31 ha (0,01%). No se presentaron áreas “óptimas” para el cultivo.

El resultado final de esta investigación sirve como apoyo al proceso de toma de decisiones para la producción y planificación agrícola del cultivo de café robusta por parte de agricultores, ingenieros agrónomos y gobiernos locales, y contribuye a la consecución de varios Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con la vida de ecosistemas terrestres, producción y consumo responsables, acción por el clima, agua limpia y hambre cero. Los hallazgos

permiten la identificación de zonas con potencial natural para el desarrollo del cultivo y de aquellas con limitaciones donde es necesario implementar un manejo adecuado de nutrientes, riego y medidas de conservación de suelos para mejorar la idoneidad actual de estas áreas en la provincia. Finalmente, los criterios considerados son factores esencialmente estructurales del paisaje como clima, suelo y relieve, lo cual se recomienda la incorporación de variables socioeconómicas a fin de mejorar los resultados de idoneidad de áreas en el sitio de estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anil Kumar, K. S., Krishnan, P., Natarajan, A., Nair, K. M., & Journal, A. I. (2010). Integration of physiological and phenological attributes of coffee species with land and climate to maximize coffee production in Karnataka. *BTAIJ*, 4(2).
- Arabameri, A., Pradhan, B., Rezaei, K., & Conoscenti, C. (2019). Gully erosion susceptibility mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis techniques. *Catena*, 180, 282–297. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.04.032>
- Astudillo Herrera, J. E., Quevedo Guerrero, J. N., & García Batista, R. M. (2022). Metodología para medir la Capacidad de Producir Semillas de Calidad en Plantas élite de Café. *Revista Científica Agroecosistemas*, 10(2), 35–43. <https://aes.ucf.edu/cu/index.php/aes>
- COFENAC. (2013). *Situación del sector cafetalero ecuatoriano. Consejo Cafetalero Nacional*. <https://www.yumpu.com/es/document/read/31064219/situacion-sector-cafe-ecu-2013-consejo-cafetalaro-nacional>
- Dhanaraju, M., Chenniappan, P., Ramalingam, K., Pazhanivelan, S., & Kaliaperumal, R. (2022). Smart Farming: Internet of Things (IoT)-Based Sustainable Agriculture. *Agriculture (Switzerland)*, 12(10), 1745. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101745>
- Duicela-Guambi, L. A., Martínez-Soto, M. E., Loo-Solórzano, R. G., Rodríguez-Monroy, C., & Morris-Díaz, A. (2019). Knowledge management and organizational innovation based on the government-company-academy-producers alliance to reactivate the robusta coffee chain, in ecuador. *Proceedings in Food System Dynamics*, 244–259. <https://doi.org/https://doi.org/10.18461/pfsd.2019.1924>.
- Figuroa-Hernández, E., Pérez-Soto, F., Godínez-Montoya, L., & Perez-Figueroa, R. A. (2019). Coffee prices in production and exports worldwide. *Revista Mexicana de Economía y Finanzas Nueva Época*, 14(1), 41–56. <https://doi.org/10.21919/remef.v14i1.358>
- Filchev, L., Pashova, L., Kolev, V., & Frye, S. (2020). Surveys, Catalogues, Databases/Archives, and State-of-the-Art Methods for Geoscience Data Processing. In *Knowledge Discovery in Big Data from Astronomy and Earth Observation: Astrogeoinformatics* (pp. 103–136). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819154-5.00016-3>
- García-Llorente, M., Rubio-Oliver, R., & Gutierrez-Briceño, I. (2018). Farming for life quality and sustainability: A literature review of green care research trends in Europe. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(6), 1282. <https://doi.org/10.3390/ijerph15061282>
- Hidayat, E., Afriliana, A., Gusmini, G., & Harada, H. (2020). Land Suitability Evaluation of Coffee in Tokunoshima Island, Japan. *Journal of Applied Agricultural Science and Technology*, 4(2), 146–154. <https://doi.org/10.32530/jaast.v4i2.169>
- Lachenmeier, D. W., Teipel, J., Scharinger, A., Kuballa, T., Walch, S. G., Grosch, F., Bunzel, M., Okaru, A. O., & Schwarz, S. (2020). Fully automated identification of coffee species and simultaneous quantification of furfuryl alcohol using NMR spectroscopy. *Journal of AOAC International*, 103(2), 306–314. <https://doi.org/10.1093/JAOCINT/QSZ020>
- López, R. S., Fernández, D. G., Silva López, J. O., Rojas Briceño, N. B., Oliva, M., Terrones Murga, R. E., Trigos, D. I., Castillo, E. B., & Barrera Gurbillón, M. Á. (2020). Land suitability for coffee (Coffea arabica) growing in Amazonas, Peru: Integrated use of AHP, GIS and RS. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(11). <https://doi.org/10.3390/ijgi9110673>
- Muliasari, A. A., & Dewi, H. (2022). Estimated Yield Potential of Robusta Coffee (Coffea canephora Pierre ex A. Froehner) at Bogor District. *E3S Web of Conferences*, 348. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202234800020>
- Nam, W.-H., Hayes, M. J., Wilhite, D. A., & Svoboda, M. D. (2015). Projection of Temporal Trends on Drought Characteristics using the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) in South Korea. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers*, 57(1), 37–45. <https://doi.org/10.5389/ksae.2015.57.1.037>
- Ramírez Castañeda, J. L. (2023). Metodología para el desarrollo de modelos geotécnicos en 3D mediante el kriging ordinario. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 26(51), e24970. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v26i51.24970>
- Saaty, T. L., & Tran, L. T. (2007). On the invalidity of fuzzifying numerical judgments in the Analytic Hierarchy Process. *Mathematical and Computer Modelling*, 46(7–8), 962–975. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2007.03.022>

- Saltuk, B., & Artun, O. (2019). Multi-criteria decision analysis for greenhouse site selection in gediz basin, Turkey using geographic information systems (gis). *Fresenius Environmental Bulletin*, 28(8), 6358–6365.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Villaseñor, D., Chabla, J., & Luna, E. (2015). Caracterización física y clasificación taxonómica de algunos suelos dedicados a la actividad agrícola de la Provincia de El Oro. *Cumbres*, 1(2), 28–34. <https://doi.org/10.48190/cumbres.v1n2a5>
- Zhang, S., Liu, B., Liu, X., Yuan, Q., Xiao, X., & Zhou, T. (2022). Maximum Entropy Modeling for the Prediction of Potential Plantation Distribution of Arabica coffee under the CMIP6 Mode in Yunnan, Southwest China. *Atmosphere*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/atmos13111773>