

Zonificación agroecológica para el cultivo de café (*Coffea arabica* L) en el departamento de Santander mediante el método multicriterio en QGIS

Agroecological Zoning for Coffee crop (*Coffea arabica* L) in the Department of Santander Using the Multicriteria Method in QGIS

Laura Alejandra Agudelo Mayorga¹ 
Tatiana Santos Bohórquez² 

Resumen

Este artículo tiene como objetivo delimitar zonas para el cultivo de café (*Coffea arabica* L) en la zona sureste del departamento de Santander utilizando la metodología de multicriterio AHP, esto con el propósito de hallar nuevas formas para la zonificación agroecológica de este producto, dado, que la adaptación de este cultivo cada vez es más problemática debido a la variabilidad climática y fenómenos extremos como el Niño o la Niña. Se consideraron criterios como condiciones climáticas, disponibilidad de nutrientes en el suelo, índices espectrales, susceptibilidad fitosanitaria. Se asignaron pesos a cada criterio y se generó un mapa de aptitud mediante QGIS, revelando que la parte central del área de estudio tiene aptitud alta y media para el cultivo de café. El municipio de Páramo se identificó como el más apto, con un 40,58% de área adecuada, seguido por Valle de San Juan, Suaita y Jordán.

Palabras clave:

análisis multicriterio, aptitud, café, cartografía, producción, variabilidad climática, zonificación agroecológica.

Cómo citar

Agudelo Mayorga, L. A., Santos Bohórquez, T. (2024). Zonificación agroecológica para el cultivo de café (*Coffea arabica* L) en el departamento de Santander mediante el método multicriterio en QGIS. *Análisis Geográficos*, 57(1), 102 - 121.

Abstract

This article aims to delineate zones for coffee growing (*Coffea arabica* L.) in the southeastern region of the Santander department using the Analytic Hierarchy Process (AHP) methodology, with the purpose of finding new ways for the agroecological zoning of this product, given that the adaptation of this crop is becoming increasingly problematic due to climatic variability and extreme phenomena such as El Niño or La Niña. Criteria such as climatic conditions, soil nutrient availability, spectral indices, and phytosanitary susceptibility were considered. Weights were assigned to each criterion, and an aptitude map was generated using QGIS, revealing that the central part of the study area has high and medium suitability for coffee growing. The municipality of Páramo was identified as the most suitable, with 40.58% of suitable area, followed by Valle de San Juan, Suaita, and Jordán.

Keyword:

Multi-criteria analysis, suitability, coffee, mapping, production, climatic variability, agroecological zoning.

Introducción

El café es el tercer producto alimenticio más importante en el mundo, después del trigo y de la azúcar (Osorio et al., 2015). La producción de café emplea alrededor de 125 millones de personas en regiones tropicales y subtropicales de Asia, África y América Latina (Wintgens, 2009). En Colombia, el cultivo de café se introdujo en el siglo XVIII, ha posicionado al país de manera permanente en mercados internacionales desde finales del siglo pasado, convirtiéndose en la columna vertebral del comercio exterior colombiano (Cárdenas Gutiérrez, 2020). Colombia logró este reconocimiento mundial gracias a la producción de café de alta calidad, dada su ubicación geográfica, su oferta agroecológica, las características de sus suelos y toda una historia y tradición en el cultivo del café que hacen de este un referente mundial reconocido y apreciado por millones de consumidores (Henao Arismendy, 2015).

Al igual que todo cultivo, el café presenta límites de adaptación a las diferentes condiciones climáticas (Rojas, 1987), por lo cual se debe definir zonas aptas para el adecuado desarrollo del mismo. Para esto se usan metodologías como la zonificación agroecológica que es definida como la división de un área en unidades más pequeñas, que tienen similares características relacionadas con su aptitud y potencial de producción (Pérez-Portilla y Geisert-Kientz, 2006). Como resultado de este proceso, se identifican las regiones más favorables para el desarrollo de un cultivo, cuando las condiciones climáticas, edafológicas, fitosanitarias son las adecuadas (Salazar et al., 2015). La utilización combinada de los sistemas de información geográfica (SIG) y las técnicas de evaluación multicriterio se constituyen herramientas útiles para la aplicación en los procesos de evaluación ambiental y territorial (Jiménez y Ocaña, 2014). Este trabajo utiliza la zonificación agroecológica con el objetivo de delimitar regiones con condiciones aptas para la producción de café por el método de multicriterio. Dando pesos a cada uno de los criterios seleccionados de aptitud que fueron clasificados en cuatro categorías (climatológicas, edafológicas, índices espectrales y fitosanitarias) cada una con sus respectivos índices. Además, se pretende clasificar cada indicador y así hallar un AHP para cada categoría y de esta manera lograr la clasificación y zonificación de las áreas de interés.

Estas categorías se establecieron a partir de la literatura revisada, con énfasis en el documento Zonificación de aptitud para el cultivo de café (*Coffea Arabica* L.) escala 1:100.000, en Colombia de la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA, 2021), que se encuentra en proceso de publicación. Los criterios evaluativos establecen que compilan diversa geodata extraída de metadatos de instituciones gubernamentales como Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

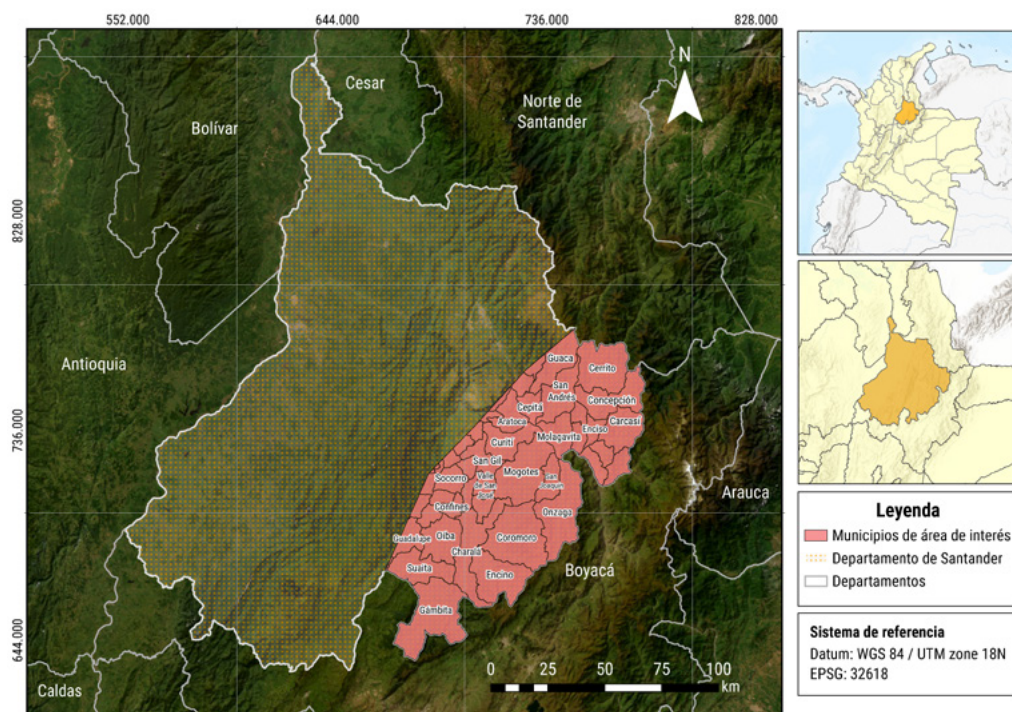
Metodología

Después de recopilar los datos, incluidos los registros de diversas estaciones meteorológicas de la zona, se utilizan las herramientas disponibles en QGIS 3.16. Estas herramientas abarcan desde la evaluación de la proximidad hasta la superposición de capas, aplicando filtros y técnicas de interpolación, entre otras funcionalidades. Todo ello con el propósito de generar una zonificación agroecológica óptima para el cultivo del café.

Área de estudio

El área de estudio escogida es el departamento de Santander, esto se debe a que, actualmente el café hace presencia en todos los municipios con aproximadamente 51.840 hectáreas sembradas, cuenta con tecnificación del 99,87%, así mismo, cuenta con variedades resistentes a la roya como Colombia, Castillo y Tabi, con 79% bajo sombra de excelente manejo, convirtiéndose así en una de las caficulturas más jóvenes y productivas del país (Federación Nacional de Cafeteros, 2021). Los municipios con mayor cantidad de hectáreas y producción de café son Socorro, Valle de San José y San Gil, las cuales tienen más del 97,35% de variedades resistentes a roya del café (Arciniegas et al, s.f.). Por lo anterior, se escogió una zona cercana a estos municipios como se muestra en la Figura 1, para su análisis y de esta manera delimitar áreas cercanas para el acondicionamiento e implementación del cultivo del café.

Figura 1 - Área de estudio



Metodología de multicriterio empleada: definición de los criterios

En cuanto a la secuencia de la evaluación multicriterio, se definió su objetivo: generar una capa de información que muestra una zonificación o clasificación del lugar estudiado con una puntuación asignada a cada área o zona del territorio en función de su capacidad, dependiendo de la categoría (Jiménez y Ocaña, 2014).

El Proceso Analítico Jerárquico (AHP) es un método utilizado para tomar decisiones en situaciones complejas y multidimensionales. Fue propuesto por el profesor Thomas L. Saaty en la década de los setenta y se ha aplicado en diversos campos como la empresa, la economía y la investigación de operaciones (Yepes, Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP), 2018). A continuación, se proporciona una explicación del AHP, citando literatura relevante:

1. Estructura jerárquica: en el AHP, se organiza el problema en una estructura jerárquica similar a un árbol familiar. El objetivo final se encuentra en el nivel superior, mientras que los criterios y subcriterios se ubican en niveles inferiores. Es fundamental definir bien los criterios y subcriterios, asegurándose de que estén bien definidos, relevantes y mutuamente excluyentes. (Yepes, Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP), 2018)

2. Comparación por pares: se comparan los criterios y alternativas mediante matrices de comparación pareadas y se utiliza una escala fundamental (por ejemplo, del 1 al 9) para comparar las preferencias entre dos criterios o alternativas. La Ley de Weber-Fechner respalda esta escala logarítmica, que se adapta bien al proceso de comparación. (Yepes, Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP), 2018) (Ruiz, 2019).

3. Cálculo de pesos: se obtiene una matriz de decisión a partir de las comparaciones. Luego, se calcula el auto vector principal (vector de preferencia) utilizando el teorema de Perron-Frobenius. (Yepes, El blog de Victor, 2022) El auto vector representa los pesos relativos de los criterios y alternativas.

4. Índice de consistencia (CI): mide la consistencia de la jerarquía, se calcula como la diferencia entre la suma de los autovalores y el número de criterios, dividida por el número de criterios menos uno, un valor de CI más bajo indica mayor consistencia. (Mendoza, 2019)

5. Radio de consistencia (CR): este criterio ajusta el CI según el tamaño de la matriz, se divide el CI entre un valor de referencia tabulado para el tamaño de la matriz. Si el CR es menor que un valor específico (generalmente 0,1), la jerarquía se considera aceptable en términos de consistencia. (Mendoza, 2019)

En resumen, el AHP permite evaluar la consistencia de las ponderaciones asignadas por los evaluadores, garantizando decisiones confiables y estables. Para más detalles y ejemplos, puedes consultar la literatura citada.

Se han utilizado la herramienta de análisis de decisiones multicriterio (AHP) para priorizar cada característica en la zonificación del cultivo del café para el departamento de Santander. La evaluación se efectúa sobre alternativas existentes, cada una de ellas adquiere un conjunto de características comunes que la diferencian de otra, se consideran cuatro características principales:

1. Climatología: variables continuas en el espacio y variables de ocurrencia.
2. Características edafológicas: disponibilidad de nutrientes y de oxígeno, capacidad de laboreo y aptitud, uso del suelo.

- 3. Índices espectrales: EVI, NDVI, NDWI, BSI y MSI.
- 4. Susceptibilidad fitosanitaria: temperatura asociada a la broca del café.

La ejemplificación de cada categoría con sus atributos está en el Anexo 1. Para evaluar cada criterio se ha seleccionado una serie de indicadores basados en la revisión de la literatura, como se observa en la Figura 2.

Climatología

La climatología estudia el estado físico medio de la atmósfera y su variación en el tiempo y espacio (Navara, 2021). Un índice bioclimático tiene aplicación en la determinación de las condiciones que prevalecen antes de un evento fisiológico y permiten evaluar la duración del ciclo vegetativo y productivo del cultivo y su relación con las condiciones genéticas y de manejo (Salazar et al., 2015). Se dividió la climatología en dos grandes grupos: climatología de variables continuas en el espacio y climatología de variables de ocurrencia, cada una con los siguientes indicadores:

Climatología de variables continuas en el espacio

- 1. *Temperatura media anual*: medida del estado térmico del aire con respecto a su habilidad de comunicar calor a su alrededor; depende principalmente de la latitud y altitud, se toma generalmente como un índice de balance calórico, expresado en grados centígrados (UPRA, 2021). Los rangos térmicos de ubicación del cultivo en Colombia se relacionan con la altitud, estas temperaturas varían de 17°C a 25°C con un rango óptimo entre 19°C y 22°C (Ramírez et al., 2013).
- 2. *Humedad relativa*: como sucede con todos los productos naturales, la humedad en el café es un elemento importante y decisivo en su calidad final. Esto aplica para todo el ciclo de vida del café, desde que empieza el cultivo hasta su preparación (Puerta Quintero, 2006). La humedad relativa en las zonas productoras de café oscila entre el 70% y el 85%, este factor presenta altas variaciones entre el día y la noche; en el día puede descender hasta 45% y subir en la noche hasta alrededor de 100%.

- 3. *Evapotranspiración del cultivo*: la determinación del consumo hídrico por las plantas es importante en diversas áreas de la agricultura, tales como los estudios de la demanda y el manejo del riego, saneamiento agrícola, estimación de la producción y estudios hidrológicos en general. La evapotranspiración de cultivo está directamente relacionada a tales estudios y es definida como la cantidad de agua consumida por un determinado cultivo (Cisneros et al., 2015). La evapotranspiración del cultivo en las zonas cafeteras de Colombia varía de 1.100 a 1.500 mm siendo el rango óptimo hasta 1.400 mm (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC], 2003).
- 4. *Altitud*: la altitud tiene un impacto directo en el tamaño, forma y sabor del café. Los granos más buscados son cultivados en más de 1.300 m.s.n.m., su alta densidad se debe en parte al crecimiento lento que ocurre en un ambiente de gran altura. Por otro lado, a una menor altura los granos tienden a ser menos densos (Molina, 2016).

Posterior al análisis de la matriz de pesos se obtiene la siguiente información:

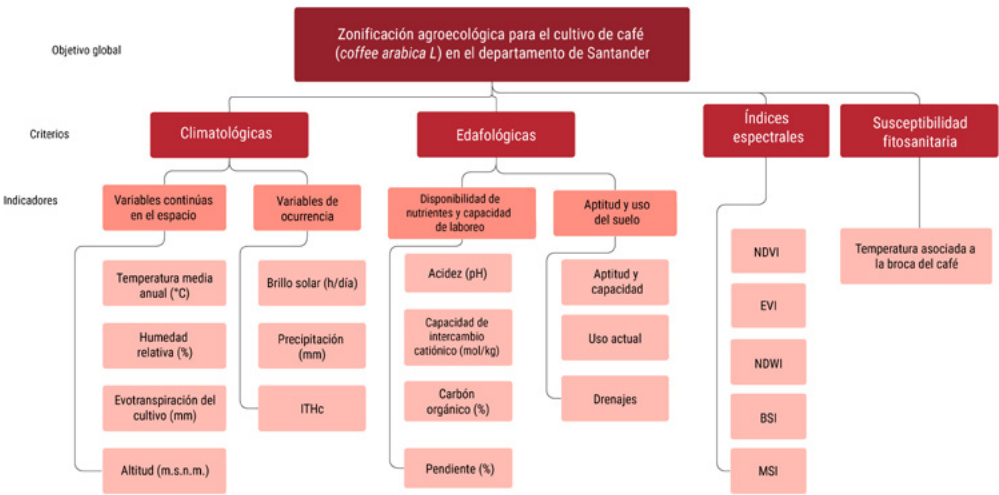
Tabla 1 - Pesos para la climatología continua

Climatología continua	
Temperatura media anual (°C)	27,3%
Altitud	42,3%
Evapotranspiración del cultivo	14,4%
Humedad relativa	16,2%
CI	0,02
CR	2,0%

Climatología de variables ocurrentes

- 1. *Brillo solar*: es el principal factor que determina el microclima del cultivo; su energía condiciona la temperatura del aire y del suelo, el movimiento del viento, la evapotranspiración y la fotosíntesis, de tal manera que la intensidad de la radiación, el grado de interceptación y la eficiencia en el uso de la energía radiante son determinantes en la tasa de crecimiento de las plantas (Jaramillo et al., 2006). Las condiciones óptimas de brillo solar

Figura 2 - Metodología de multicriterio AHP



para el cultivo están en un rango de 4 a 6 horas al día, menos de 3 horas del sol al día no es recomendable, el abuso de sobra es la causa aparente de los bajos rendimientos (Rojas, 1987).

- 2. *Precipitación*: el café se puede producir con dos periodos secos y dos periodos lluviosos al año como en la mayoría de la zona cafetera del país, o en zonas con tendencia a presentar una sola estación lluviosa al año (ICONTEC, 2003). Se requiere una precipitación por encima de 1000 mm/año, con una distribución adecuada según la etapa fisiológica. Los valores críticos por exceso se observan a partir de los 2.800 (Salazar et al. 2015).
- 3. *IDHC* es el índice de la relación mensual adimensional entre la evapotranspiración actual, refiriéndose a la cantidad de agua que suministra la precipitación en dicho mes, que es evapotranspirada y, la evapotranspiración mensual del cultivo de café, siendo un rango óptimo para el cultivo de café de 0,7 a 1,5 (UPRA, 2021).

Posterior al análisis de la matriz de pesos se obtiene la siguiente información:

Tabla 2 - Pesos para la climatología de ocurrencia

Climatología de ocurrencia	
Brillo solar	54,9%
Precipitación	24,1%
ITHC	21,1%
CI	0,01
CR	2,0%

Por medio de la literatura recopilada y para efectos de la zonificación del cultivo del café, se tomaron como referencia rangos y valores para categorizar los diferentes indicadores, en categorías competitivas como: aptitud alta (3), aptitud media (2), aptitud baja (1) y no apta (0), como se observa a continuación:

Tabla 3 - Aptitud para cada índice de la climatología

			Aptitud					
Categoría	Criterios	Unidad	Alta	Media	Baja	No apta	Datos	
Climatológica	Variables continuas en el espacio	Temperatura media anual	°C	19-22	16-19 y 22-24	24-25	< 16 y > 25	Promedios climatológicos IDEAM
		Humedad relativa	%	70-85%	65-70%	< 65%	> 80%	Promedios climatológicos IDEAM
		Evapotranspiración del cultivo	mm/año	1.400-1.100	1.400-1.500	> 1500	< 1.100	Promedios climatológicos IDEAM
		Altitud	m.s.n.m.	1300-1700	1700-2.000	1.000-1.300	< 1.000 y > 2.000	DEM Vertex a los pasar
	Variables de ocurrencia	Brillo solar	h/día	5-6	6-7	< 5	-	Promedios climatológicos IDEAM
		Precipitación	mm/año	> 2.800	1.400-2.800	< 1.400	-	Promedios climatológicos IDEAM
ITHC		rango	0,7-1,5	1,5-2,0	2,0-2,5	> 2,5 y < 0,7	Promedios climatológicos IDEAM	

Edafología

Los suelos dedicados al cultivo del café son de origen variado en el mundo, algunos son derivados de ceniza volcánicas, a menudo laterizados como en Colombia. Estos suelos y los de origen aluvial presentan condiciones excelentes para el cultivo del café, pero este se caracteriza por su gran adaptabilidad respecto a los suelos (Jackson, 1958; Rojas, 1987). En este trabajo se escogió como indicadores: la disponibilidad de nutrientes, la capacidad de laboreo, la aptitud, el uso del suelo y la disponibilidad de oxígeno para el análisis multicriterio, como se presenta a continuación.

Disponibilidad de nutrientes y capacidad de laboreo

- 1. *Acidez (pH)*: la acidez del cultivo debe estar a nivel pH óptimo, que es entre 5,0 y 5,5 (UPRA, 2021). En este rango la planta tiene mayor capacidad de absorber los nutrientes y esto da como resultado más cerezas de café y menos problemas relacionados con las plagas y enfermedades (Oliveira, 2019).
- 2. *Capacidad de intercambio catiónico*: la capacidad de intercambio de cationes y aniones es una de las características más importantes del suelo, independientemente de otras interpretaciones, determina el intercambio de la mayoría de los elementos requeridos para la nutrición vegetal y constituye gran parte de la capacidad reguladora del medio (Cortés y Nalagón, 1984). La capacidad de intercambio catiónico óptima para el cultivo de café es mayor a 19 mol/kg (UPRA, 2021).
- 3. *Carbono orgánico*: el carbono orgánico del suelo se deriva de residuos orgánicos de plantas y animales, así como de microorganismos vivos y muertos, presentes en el humus. Algunas formas pueden estar altamente condensadas, casi en forma de carbono elemental (Jackson, 1958). El porcentaje de carbono orgánico óptimo para el cultivo de café es mayor a 3,5.
- 4. *Pendiente*: grado de inclinación de una superficie desde la horizontal generalmente expresada en porcentaje o grados (Soil Science Society of America [SSSA], 2018). Se relaciona con las condiciones para desplazamiento de las personas y elementos de trabajo a través del cultivo, la pendiente apta para el cultivo de café debe ser menores a 25% (Ocampo López, 2018).

Posterior al análisis de la matriz de pesos se obtiene la siguiente información:

Tabla 4 - Pesos para la disponibilidad de nutrientes

Disponibilidad de nutrientes	
Acidez (pH)	21,5%
Capacidad de intercambio catiónico	11,0%
Carbono orgánico	26,5%
Pendiente	41,0%
CI	0,05
CR	6,0%

Aptitud, uso del suelo y disponibilidad de oxígeno

- 1. *Aptitud*: capacidad de un lugar específico para producir un cultivo determinado en base a los condicionamientos agroclimáticos y de suelos (Salvatore et al., 2010).
- 2. *Uso actual*: es la actividad que se desarrolla en un determinado espacio geográfico, en el momento de la elaboración del estudio de zonas homogéneas físicas (Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital [UAECD], 2021).

3. Drenaje: rapidez y grado de remoción de agua del suelo por la escorrentía y el flujo a través del suelo a los espacios subterráneos (United State Department of Agriculture [USDA], 1961).

Posterior al análisis de la matriz de pesos se obtiene la siguiente información:

Tabla 5 - Pesos para aptitud, uso del suelo y disponibilidad de oxígeno

Aptitud, uso del suelo y disponibilidad de oxígeno	
Aptitud	31,0%
Uso Actual	19,8%
Drenajes	49,0%
CI	0,03
CR	5,0%

Por medio de la literatura recopilada y para efectos de la zonificación del cultivo del café, se tomaron como referencia rangos y valores para categorizar los diferentes indicadores, en categorías competitivas como: aptitud alta (3), aptitud media (2), aptitud baja (1) y no apta (0), como se observa a continuación:

Tabla 6 - Aptitud para cada índice de la edafología

Categoría	Criterios	Unidad	Aptitud			
			Alta	Media	Baja	No apta
Edafológicos	Disponibilidad de nutrientes y capacidad de laboreo	Acidez (pH)	5,0-5,5	5,5-6,0	< 5,0 y > 6,0	-
		Capacidad de intercambio catiónico	> 19	10-19	< 10	-
		Carbono orgánico	> 35	25-35	< 25	-
		Pendiente	< 25	25-75	> 75	-
	Aptitud y uso del suelo	Aptitud	Cultivos tecnificados de café en suelos profundos y moderadamente profundos para cultivos permanentes.	Aptas para cultivos de ciclo vegetativo corto.	Con adecuadas prácticas de manejo de pastos, ganadería.	Reforestación, bosques protector y otros.
		Uso actual	Cupus	Cupus	Cupus	Cupus

Índices espectrales

La firma espectral es la variación entre la radiación incidente y reflectante en función a la longitud de onda (Los sistemas de observación de la tierra LANDSAT, SPOR y Sentinel entre otros, ofrecen imágenes multitemporales que son usadas ampliamente para evaluar y monitorear el estado de la vegetación, en los niveles

global, regional, nacional y local (Muñoz Aguayo, 2013). Para este artículo se utiliza el satélite Sentinel 2, que provee imágenes multispectrales de alta resolución en órbita polar, se introdujeron los índices de vegetación y suelos para tener una idea de las condiciones del momento actual.

La respuesta espectral en un cultivo se relaciona con la interacción entre la radiación electromagnética y las características relacionadas con la vegetación, como la estructura de la vegetación, el estado fenológico, su densidad y la orientación espacial y efectos de fondo del suelo (Galvão et al., 2005). Los índices de vegetación obtenidos a partir de las imágenes multispectrales fueron escogidos para la implementación del cultivo de café (*Coffea arabica* L) se tuvo en cuenta la frontera agrícola del departamento y las áreas boscosas del mismo. De esta manera se escogieron los siguientes indicadores para esta categoría:

1. NDVI: el índice de vegetación diferencial normalizado, dispone de un rango de variación fijo (entre -1 y +1) lo que permite establecer umbrales y comparar imágenes. Valores muy bajos de NDVI, del orden de 0,1 que corresponden a áreas rocosas, arenosas o nevadas. Valores de 0,2 a 0,3 pueden pertenecer a áreas pobres con arbustos o pasturas naturales (Muñoz, 2013). Los valores negativos representan superficies sin vegetación.
2. EVI: el índice de vegetación mejorado e inventado por Liu y Huete (1995 para corregir simultáneamente los resultados del NDVI cuando hay influencias atmosféricas y respecto a las señales de fondo del suelo, especialmente en zonas con una cubierta vegetal denso. El rango de valores para el EVI es de -1 a +1, y para la vegetación sana varía entre 0,2 y 0,8 (EOS Data Analytics, 2022).
3. BSI: el índice de suelo desnudo Bare Soil Index (BSI) fue diseñado para identificar la diferencia en el comportamiento espectral entre áreas de suelo desnudo y áreas con escasa vegetación (Lamar et al., 2018). Los valores bajos de BSI están asociados a suelos cubiertos con vegetación, agua, entre otras coberturas, mientras que los valores altos significan áreas correspondientes a suelo desnudo (Kumar et al., 2016).
4. NDWI: este índice se utiliza para medir la cantidad de agua que posee la vegetación o el nivel de saturación de humedad que posee el suelo. Los valores que se obtienen oscilan entre -1 y +1, para las zonas con menos humedad (Muñoz Aguayo, 2013).
5. MSI: es un índice de vegetación identificado por las siglas del nombre en inglés Moisture Stress Index. Las aplicaciones de este índice incluyen el análisis del estrés del dosel, la predicción de la productividad y el modelamiento, análisis del estado del riesgo de incendio, y los estudios de la fisiología del ecosistema. Los valores más altos indican un mayor estrés hídrico y por lo tanto un menor contenido de agua. El valor de este índice varía de 0 a más de tres. El intervalo común para la vegetación verde es de 0,4 a 2,0 (Villatoro, 2020).

Posterior al análisis de la matriz de pesos se obtiene la siguiente información:

Tabla 7 - Pesos para los índices espectrales

Índices espectrales	
Indicador	Pesos
EVI	35%
NDVI	27%
BSI	13%

Índices espectrales	
Indicador	Pesos
NDWI	12%
MSI	12%
CI	0,08
CR	7%

Teniendo en cuenta que la utilización de los índices espectrales tiene como objetivo la zonificación de áreas agroecológicas, se toman los valores de la literatura para áreas sin vegetación o con vegetación moderada y suelos desnudos, como se observa a continuación:

Tabla 8 - Aptitud para cada índice de los índices espectrales

		Aptitud				Referencia
Categoría	Criterios	Alta	Media	Baja	No apta	
Índices	Índices espectrales	EV1	0,2-0,5	-	0,5-0,8	-1,0 y > 0,8
		NDVI	0,2-0,4	0,41-0,5	0,6-1,0	-1,0
		BSI	> 0,5	0,4-0,1	-	< 0,1
		NDWI	-0,5	0,5-0,6	0,7-0,8	> 0,85
	MSI	0,4-1,0	1,0-0,2	2-0,3	> 3,0	Imágenes espectrales del Sentinel 2

Fitosanitario
Condiciones que explican la aparición, desarrollo y propagación de plagas y/o enfermedades que, para el caso del cultivo de café, está referida a la broca del cafeto en Colombia (UPRA, 2021). Por esto se seleccionó el indicador de la temperatura.

1. *Temperatura asociada a la broca del café:* la temperatura determina la biología reproductiva de la broca siendo directamente proporcional a su desarrollo, es decir, a mayor temperatura mayor progenie (UPRA, 2021).

2.

Tabla 9 - Aptitud para la temperatura asociada a la broca del café

			Aptitud					
Categoría	Criterios		Unidad	Alta	Media	Baja	No apta	Referencia
Susceptibilidad fitosanitaria	Temperatura asociada a la broca del café	Temperatura media	°C	< 22	22-24	> 24	-	Promedios climatológicos IDEAM

Resultados y discusión

Al obtener los valores de las diferentes variables, estos fueron subidos a QGIS, donde se hizo una interpolación para cada índice de los criterios, algunos por el método IDW y otros por el método de Kriging. Para la altitud se hizo un modelo digital de elevación (DEM). Luego se hizo una clasificación para cada índice para así poder hacer un AHP para cada criterio y luego obtener un AHP donde se muestran las regiones con aptitudes óptimas para la producción del cultivo de café, para su implementación en el área indicada. A continuación, se muestran los resultados obtenidos en QGIS.

Climatología

Temperatura media anual

La temperatura media anual se interpoló mediante el método de Kriging debido a un RMSE significativamente menor en comparación con la interpolación IDW, lo que indica una precisión superior. La Figura 3a se presenta la interpolación con isotermas y la clasificación para la temperatura media anual. En la interpolación, las zonas con temperaturas más altas, alrededor de 25°C, se representan en rojo, mientras que las más frías, aproximadamente 12°C, en azul. En la clasificación, como se observa en la Figura 5a las zonas aptas se identifican con un valor de 3 en verde, y las de baja aptitud con un valor de 1 en rojo, indicando una predominancia de regiones con aptitud alta y media en comparación con aquellas de aptitud baja y no apta.

Humedad relativa y evapotranspiración del cultivo

Se utilizó la interpolación de IDW en lugar de Kriging para la humedad relativa y la evapotranspiración debido a un RMSE similar, como se muestra en la Figura 3c de los resultados en QGIS. Las áreas con humedad relativa superior al 78% se representan en azul oscuro, mientras que las zonas con humedad inferior al 68% varían en tonalidades de azul menos intenso hasta blanco, indicando predominantemente altos niveles de humedad en el área de interés. La Figura 5c de clasificación resalta en verde las regiones con alta aptitud (3) para el cultivo de café, lo que sugiere que la mayoría de la zona posee una humedad relativa adecuada. En la Figura 4b, la interpolación muestra regiones verdes con mayor evapotranspiración (1.400 mm) y moradas con menor (800 mm), indicando principalmente valores de 1.000 a 1.150 mm en la zona. Como se observa en la Figura 6c la clasificación no permite distinguir claramente entre regiones aptas y no aptas, sin revelar zonas de aptitud media o baja.

Altitud y brillo solar

Para la altitud se realizó un DEM el cual da una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2021). En la Figura 3d, se muestra un DEM en el que las altitudes más bajas, alrededor de 1.000 m.s.n.m., se representan en tonos rosados, mientras que las altitudes más altas, alrededor de 4.000 m.s.n.m., aparecen en rojo oscuro, indicando que el centro del departamento de Santander tiene altitudes más bajas y es apto para el cultivo de café. En su clasificación como se observa en la Figura 5d, encontramos aptitudes medias y altas para la zona occidental del lugar de interés. Para la interpolación del brillo solar, se empleó el método IDW en QGIS. En la Figura 4a, los colores oscuros del mapa representan regiones con aproximadamente cinco horas de luz solar al día, mientras que los colores más claros indican áreas con siete horas de luz solar diarias, como se observa en la Figura 6a sugiere una alta aptitud de radiación solar para el cultivo de café en la mayoría de la zona de interés.

Precipitación e ITHc

Se utilizó el método de Kriging para interpolar la precipitación debido a su menor RMSE en comparación con la temperatura media anual. En la Figura 3b, el azul oscuro representa áreas con alrededor de 3.200 mm de precipitación, mientras que el azul claro o blanco indica aproximadamente 1.400 mm. La mayoría de la zona de interés muestra aptitud media de precipitación en el mapa de

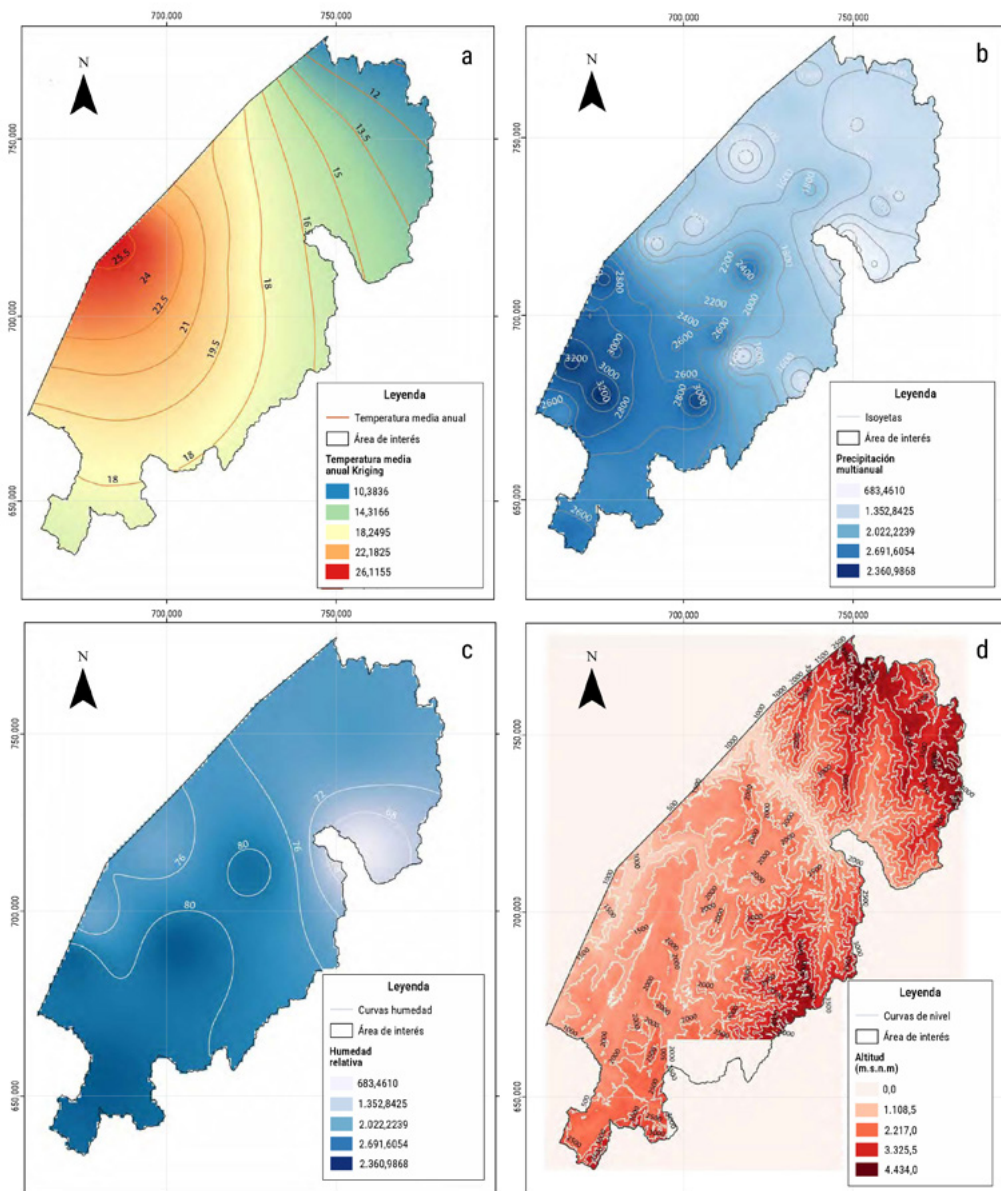
clasificación (véase figura 5b). En la Figura 4c, la interpolación del Índice de la Relación Mensual entre la Evapotranspiración Actual (ITHC) mediante el método IDW muestra valores bajos en colores oscuros y altos en colores claros. La clasificación revela áreas casi iguales de aptitudes alta, media y baja, con una pequeña zona no apta en el sur de la región. (véase figura 6c). El IDHC refleja la relación entre la evapotranspiración actual, relacionada con la precipitación mensual, y la evapotranspiración mensual del cultivo de café.

Fitosanitario

Temperatura asociada a la broca del café

Para la clasificación de la temperatura asociada a la broca del café se tomó la interpolación de la temperatura media anual la cual se muestra en la Figura 6d y a partir de esto se hizo la clasificación para esta temperatura.

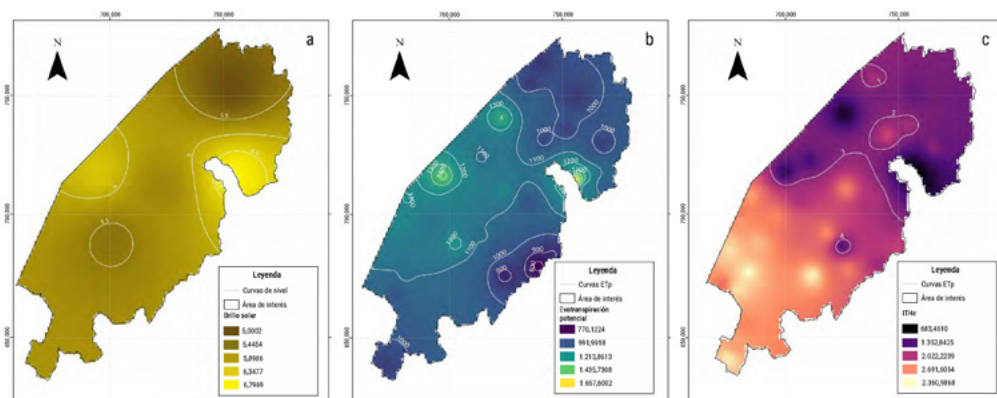
Figura 3 - Interpolaciones para las diferentes variables climáticas



Fuente: IDEAM <http://dhimeideam.gov.co/atencionciudadano/> y del DEM de Vertex de <https://search.asf.alaska.edu/> /

Nota: a) temperatura media anual (°C) b) precipitación multianual (mm/año) c) humedad relativa (%) d) altitud (m.s.n.m).

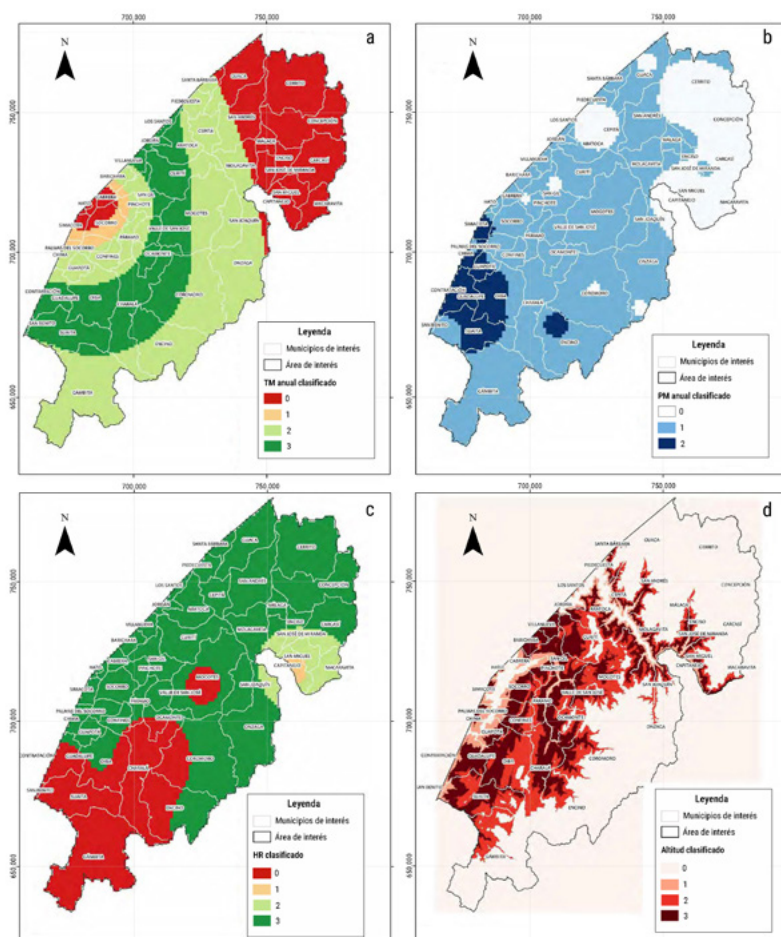
Figura 4 - Interpolaciones para las diferentes variables climatológicas



Fuente: IDEAM <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>.

Nota: a) brillo solar (h/día) b) evapotranspiración del cultivo (mm/año) c) ITHC.

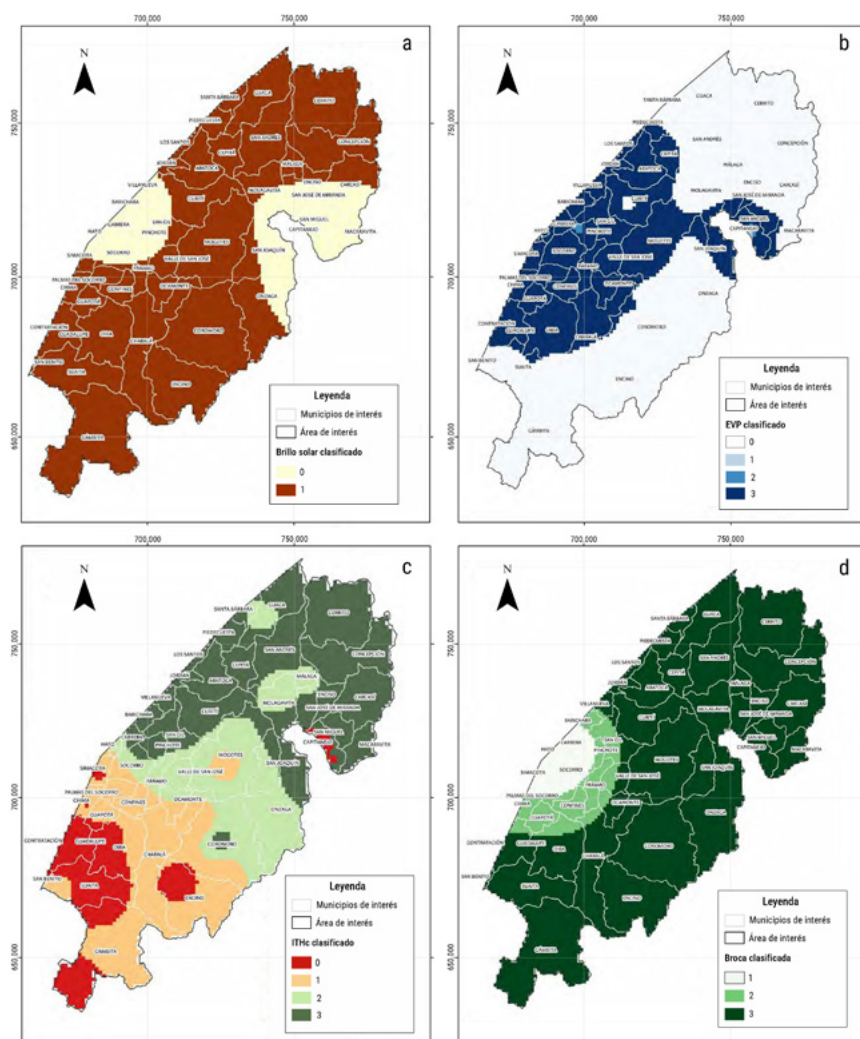
Figura 5 - Clasificación de aptitud para las diferentes variables climatológicas



Fuente: IDEAM <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/> y del DEM de Vertex de <https://search.asf.alaska.edu/>.

Nota: a) temperatura media anual (°C), b) precipitación multianual (mm/año), c) humedad relativa (%), y d) altitud (m.s.n.m).

Figura 6 - Clasificación de aptitud para las diferentes variables climatológicas

Fuente: IDEAM <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>

Nota: a) brillo solar (h/día), b) evapotranspiración del cultivo (mm/año), c) ITHc, y d) temperatura asociada a la broca (°C).

Edafología

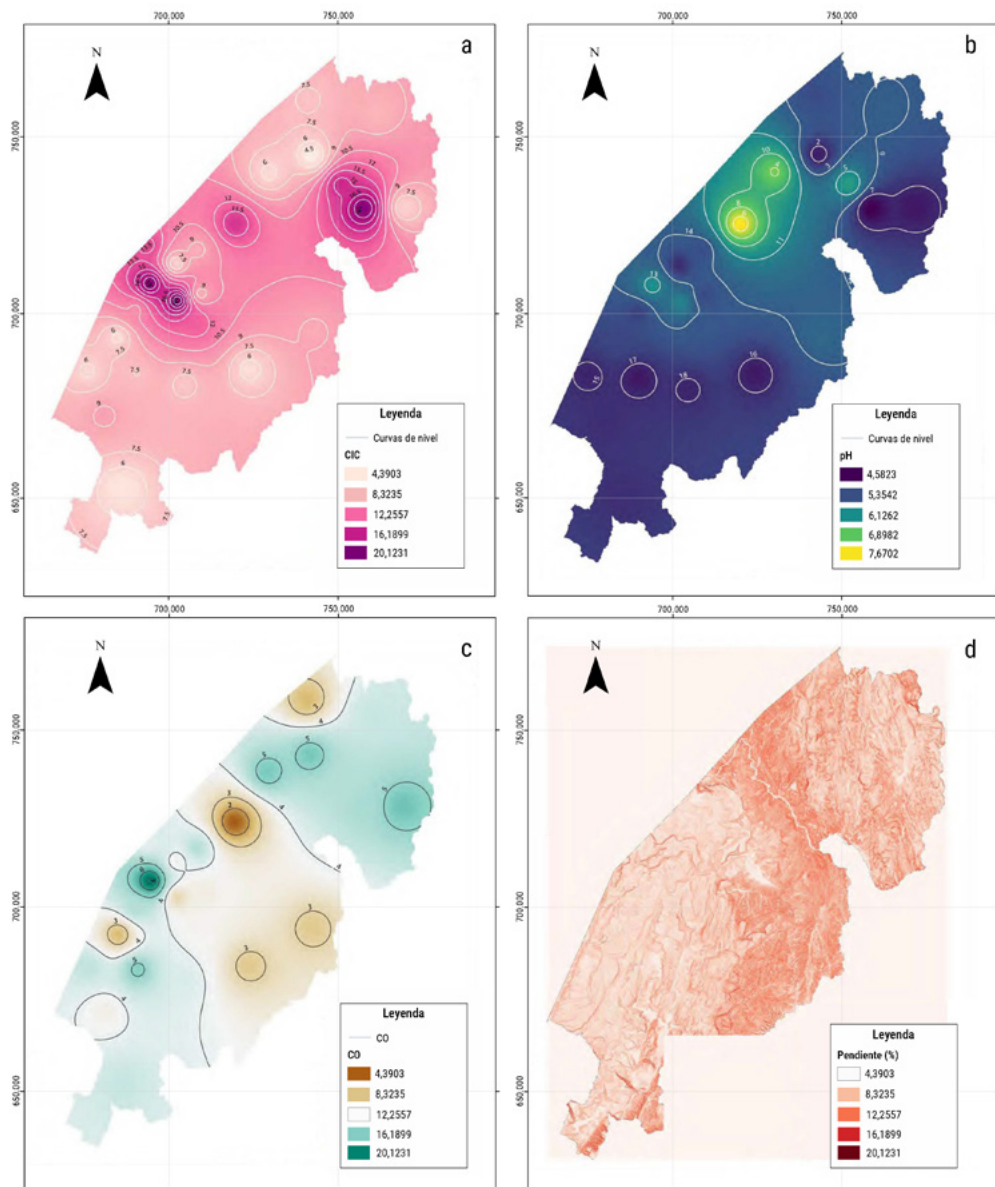
Acidez (pH) y capacidad de intercambio catiónico

En la Figura 7b, la interpolación por IDW del pH del suelo muestra valores altos de pH (alrededor de 7,7) en amarillo y valores bajos (alrededor de 5,0) en morado. La clasificación revela aptitud alta de pH para el cultivo de café en la zona de estudio, con algunas áreas no aptas (véase figura 8b). En la Figura 7a, la interpolación por IDW de la capacidad de intercambio catiónico muestra valores altos (más de 18 mol/kg) en azul y valores bajos (menos de 8 mol/kg) en tonos naranja y rojo. La clasificación indica que la mayoría de la zona tiene aptitud baja, aunque la región central presenta aptitud media para el cultivo de café. (véase figura 8a).

Carbono orgánico y pendiente

Como se observa en la Figura 7c la interpolación por IDW para el carbono orgánico en el suelo muestra colores café para valores bajos y la clasificación indica que la mayoría de la zona tiene aptitud 3 para el cultivo de café, es decir, es altamente apta como se ilustra en la Figura 8c. La pendiente se calculó a partir del DEM y se clasificó en porcentaje, revelando que la aptitud alta (3) se encuentra en el área central y sur, mientras que el resto de la zona tiene aptitud media y baja debido a pendientes superiores al 25% (véase figura 7d y 8d).

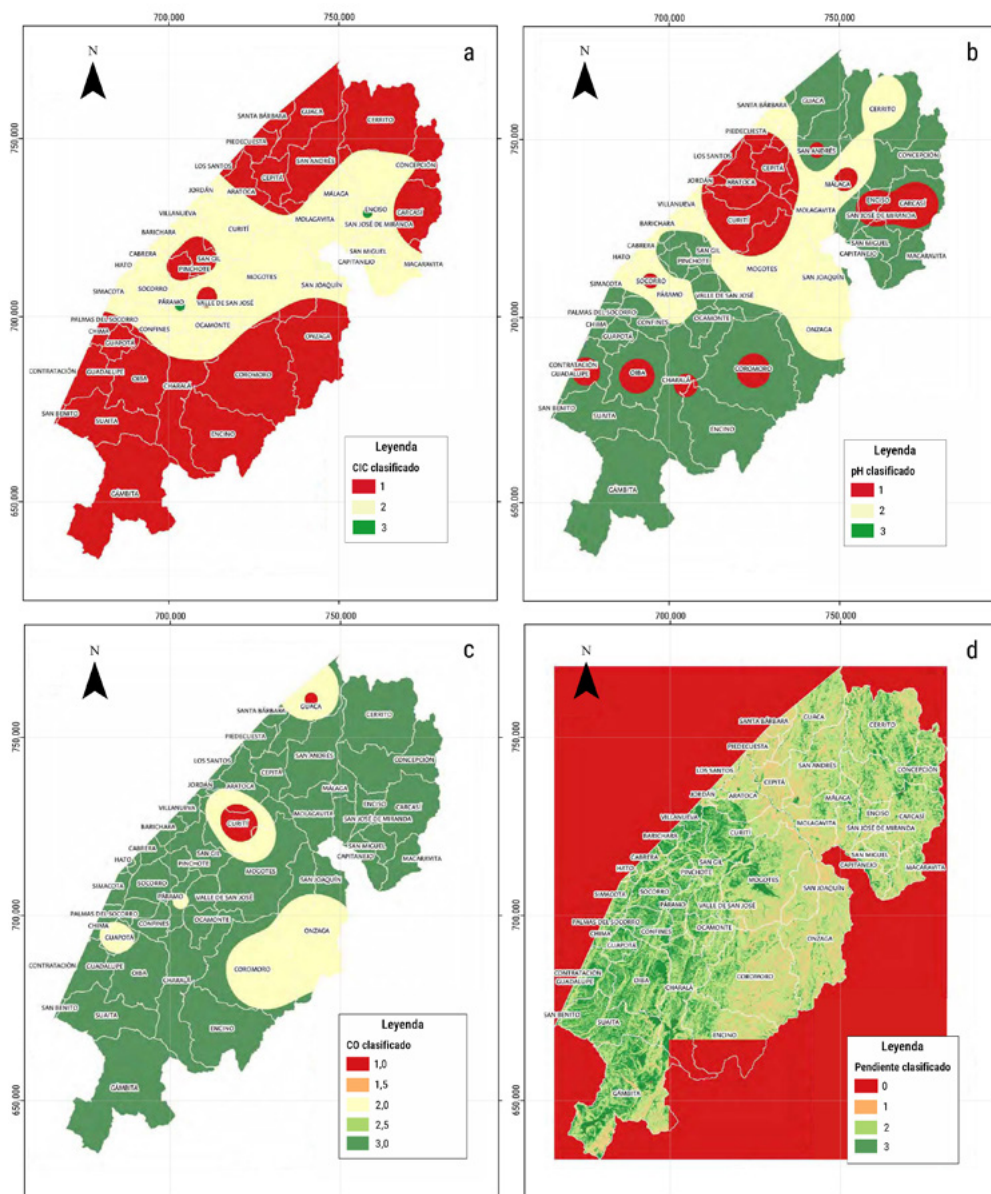
Figura 7 - Interpolaciones para las diferentes variables edafológicas



Fuente: IDEAM <https://geoportaligac.gov.co/contenido/datos-abiertos-agrologia>.

Nota: a) capacidad de intercambio catiónico CIC (mol/kg), b) acidez (pH), c) carbón orgánico (%), y d) pendiente (%).

Figura 8 - Clasificación de aptitud para las diferentes variables edafológicas



Fuente: IDEAM <https://geoportal.ligac.gov.co/contenido/datos-abiertos-agrologia>.

Nota: a) capacidad de intercambio catiónico CIC (mol/kg), b) acidez (pH), c) carbono orgánico (%), y d) pendiente (%).

Aptitud, uso del suelo y disponibilidad de oxígeno

Para la aptitud del suelo se clasificó por medio de un filtro en QGIS donde se agregó un nuevo atributo y se le asignó el valor de 0 a 3 dependiendo la aptitud. Luego de esto se procedió a hacer una interpolación y así se clasificó, donde se obtuvo lo siguiente.

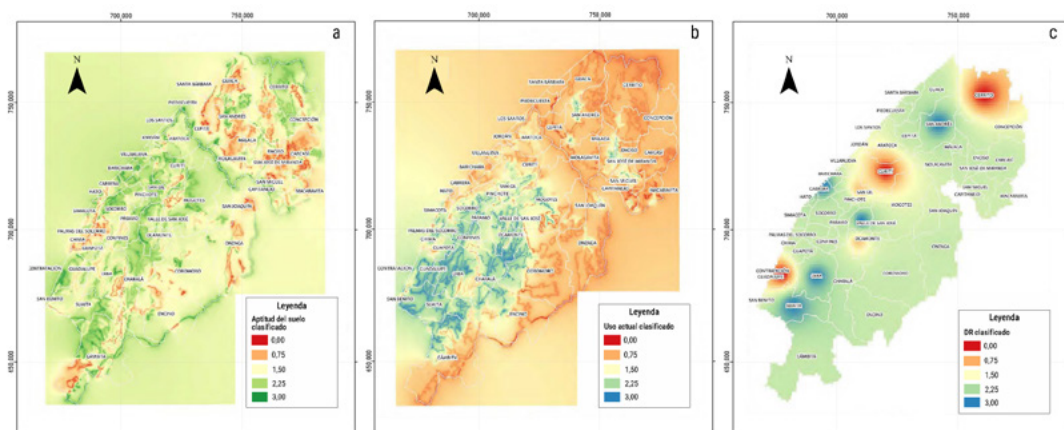
En la Figura 9a se muestra en color verde las zonas con altitud alta y en color naranja las zonas con aptitud baja, que según la Tabla 6 las regiones con aptitud alta presentan cultivos tecnificados de café, suelos profundos y moderadamente profundos, y para aptitud baja se requiere de suelos con prácticas de manejo de pastos, y ganadería.

Uso actual y drenajes

Como la aptitud se clasificó con un filtro donde se creó un nuevo atributo que asignaba la aptitud a cada índice. En la Figura 9b, se muestra una aptitud alta para un drenaje muy bueno, aptitud media para drenaje bueno, aptitud baja para drenaje regular y no apto para drenaje muy regular, con regiones en azul representando aptitud alta y el color rojo indicando regiones no aptas. Esto revela que la mayoría de la zona de estudio tiene aptitud media, es decir, drenaje bueno.

De estas clasificaciones se obtiene como resultado la Figura 9c donde se observa aptitud media y alta distribuidas de diferente manera para la zona de interés para el departamento de Santander.

Figura 9 - Clasificación de aptitud para las diferentes variables edafológicas



Fuente: IDEAM <https://geoportaligac.gov.co/contenido/datos-abiertos-agrologia>.

Nota: a) aptitud del suelo, b) drenaje del suelo, y c) uso actual del suelo.

Índices espectrales

Se adquirieron múltiples imágenes satelitales de Sentinel-2 para calcular índices de vegetación. Luego, se aplicó la corrección atmosférica utilizando el complemento SCP en QGIS para cada imagen. Posteriormente, se calculó el conjunto de índices de interés y se combinaron las capas correspondientes. En los municipios del sureste no se pudo obtener una imagen satelital para una pequeña área.

EVI y NDVI

El índice EVI muestra valores de 0 a 0,5 en toda el área, indicando vegetación saludable en general, con algunos valores de 1 correspondientes a zonas boscosas (véase figura 10a). La clasificación resulta en una aptitud alta-media alta-media en toda la zona de interés como se observa en la Figura 11a. En contraste, el índice NDVI presenta valores entre -0,2 y -0,9 en toda la superficie, sugiriendo áreas arenosas, rocosas, arbustos y vegetación variada, incluyendo bosques (véase figura 10e). Como se observa en la Figura 11e la clasificación revela principalmente una aptitud media en la mayor parte del terreno, con zonas de aptitud alta al norte del departamento.

BSI y NDWI

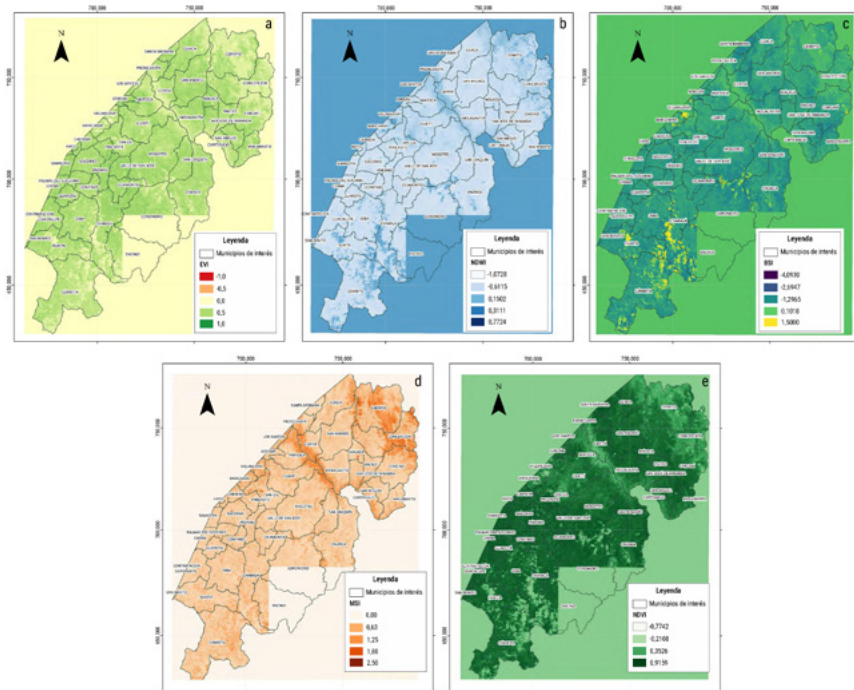
El índice de suelo desnudo (BSI) muestra valores entre 0,16 y 1,54 en todo el terreno, indicando escasas áreas sin cobertura vegetal

(véase figura 10c). La clasificación refleja una aptitud baja y media en toda la zona como se ilustra en la Figura 11c. Por otro lado, el índice NDWI detecta zonas con mayor humedad y cuerpos de agua, como el río Chicamocha que atraviesa los municipios de Piedecuesta a Molagavita, y pequeños lagos en el norte y centro de la zona (véase figura 10b). Como se observa en la Figura 11b la clasificación revela una pequeña área de aptitud alta y áreas de aptitud media en el norte, mientras que en el resto de la zona se observa una aptitud baja, debido a los rangos utilizados para identificar zonas sin cobertura vegetal y con baja humedad.

MSI

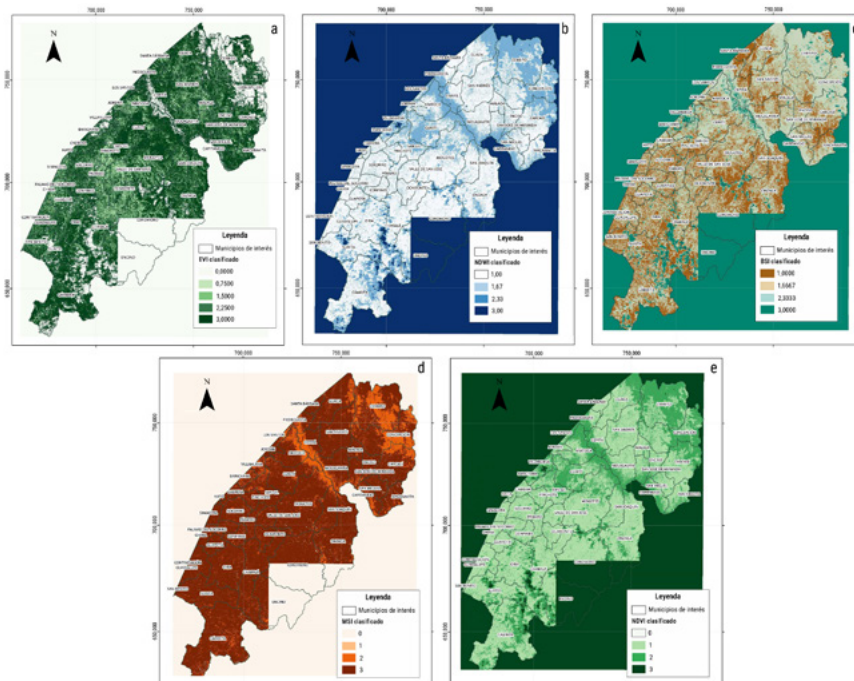
Para este índice se obtuvieron valores en la región entre 0-1,88, por lo que se sobre entiende que se tienen valores bajos de estrés hídrico y un rango medio de contenido de agua en toda la superficie (véase figura 10d). En la clasificación observamos que para el terreno buscando coberturas vegetales con menor o poco estrés hídrico (0,4-1,0), toda la zona presenta una aptitud alta como se ilustra en la Figura 11d.

Figura 10 - Índices espectrales para la zona de interés



Fuente: Imágenes satelitales de <https://search.asf.alaska.edu/#/>
Nota: a) EVI, b) NDWI (pH), c) BSI, d) MSI, y e) NDVI.

Figura 11 - Clasificación de índices espectrales para la zona de interés



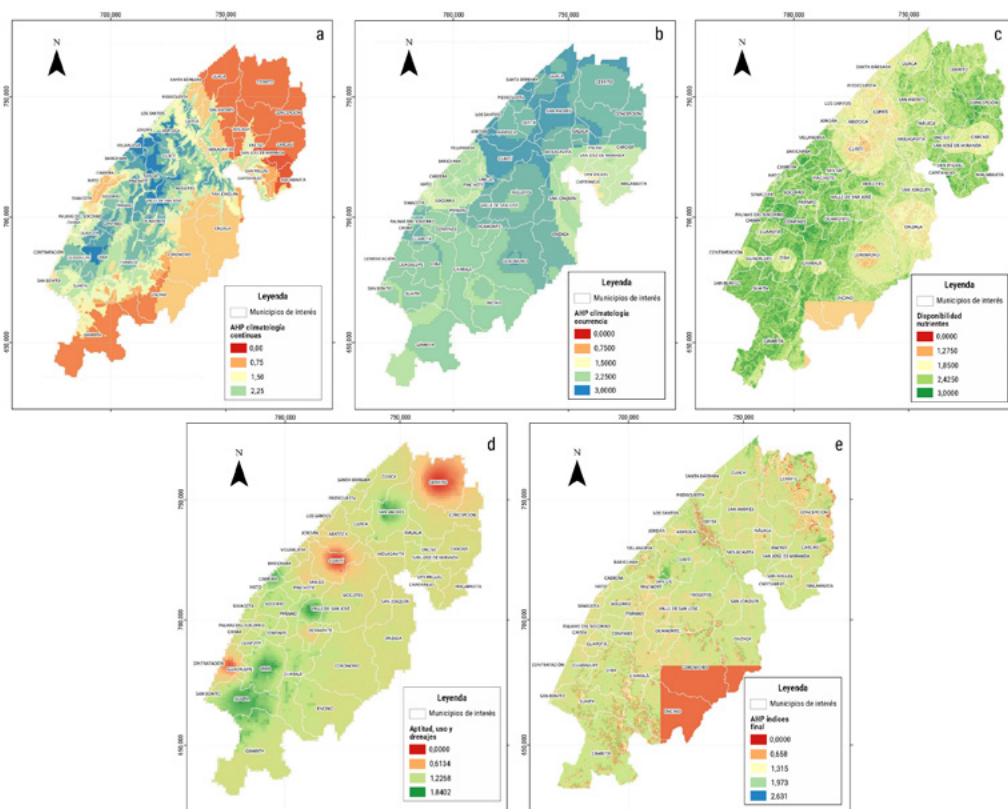
Fuente: Imágenes satelitales de <https://search.asf.alaska.edu/#/>
Nota: a) EVI, b) NDWI (pH), c) BSI, d) MSI, y e) NDVI.

Como resultado y teniendo en cuenta los pesos de las matrices de cada uno de los criterios se obtuvo un AHP o evaluación multicriterio de la multiplicación ponderada por los pesos para cada uno de los indicadores como se presenta a continuación. Como se observa en la Figura 12 a y b) para las variables climatológicas la clasificación tiene como resultado que la aptitud alta y media predomina en toda la región central del área de interés.

Para las clasificaciones anteriores podemos observar que para las variables edafológicas predominan la zona sur del territorio

(véase figura 12 d y e), mientras que la clasificación de los índices espectrales se encuentra una aptitud media para toda la zona, excluyendo algunas zonas de centro, sur y norte del área como se ilustra en la Figura 12e. Finalmente se obtuvo el AHP final donde se consideró la suma ponderada de cada uno de los criterios anteriormente vistos y se encontró la zonificación agroecológica para el cultivo del café (*Coffea arabica* L.) como se observa en la Figura 12.

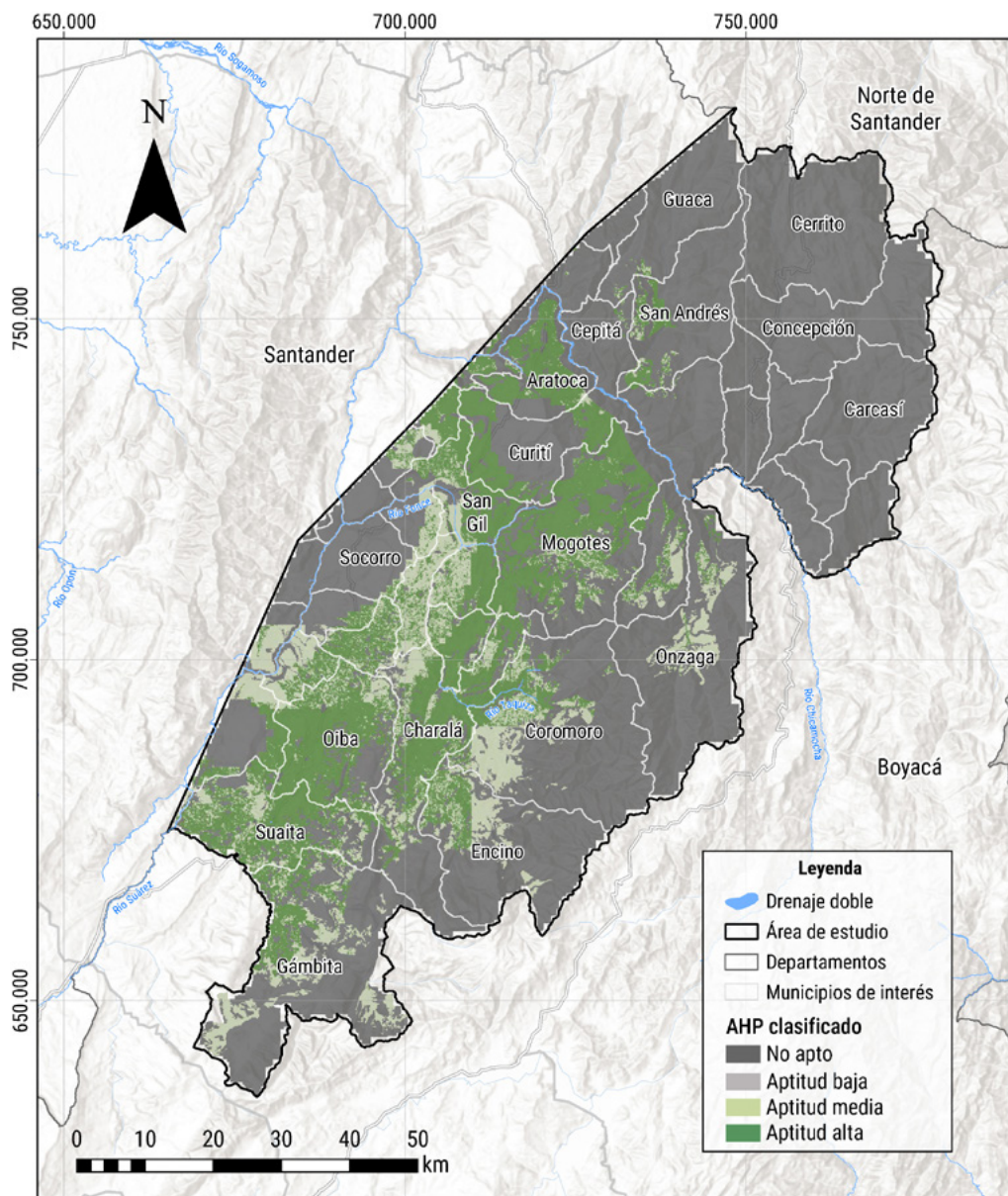
Figura 12 - AHP de clasificación de criterios



Nota: a) climatología para variables continuas, b) climatología de variables de ocurrencia, c y d) criterios edafológicos para disponibilidad de nutrientes, capacidad de laboreo y aptitud, uso y drenajes y e) clasificación para índices espectrales.

Sin embargo y dando alusión a que en la reclasificación no se encontraron zonas no aptas para el cultivo de café, esto se debe en gran parte al método empleado de suma ponderada, por lo que se procede a multiplicar esta capa con todas las variables que tengan un rango de valor de (0) no apto, como resultado y teniendo en cuenta la frontera agrícola también como variable se obtiene lo siguiente:

Figura 13 - Clasificación de multicriterio (AHP) para zonificación agroecológica del cultivo del café en el departamento Santander



Y a su vez se logró sacar las estadísticas por municipios, como se presenta en las siguientes tablas, para la aptitud media (2) y alta (3).

Tabla 10 - Área de aptitud media (2) para cada municipio

Aptitud	Municipio	Área municipio (m²)	Área de aptitud (m²)	Porcentaje (%)
2	Aratoca	169791551,80	5297300	3,12
2	Barichara	137275811,70	14202800	10,35
2	Cepitá	107967109,00	1952000	1,81
2	Charalá	419231350,60	222993700	53,19
2	Chima	173219022,10	1882800	1,09
2	Confinés	71421700,43	18067400	25,30
2	Coromoro	577495746,00	45645400	7,90
2	Curití	244222737,00	3349700	1,37
2	Encino	400432691,40	107083200	26,74
2	Gámbita	608233066,10	71577300	11,77
2	Guaca	302398263,80	2123200	0,70
2	Guadalupe	146330709,40	30692600	20,97
2	Guapotá	67300363,97	54388100	80,81
2	Jordán	398991775,1	2587100	6,48
2	Los Santos	290125188,40	208900	0,07
2	Mogotes	483970127,30	26759300	5,53
2	Molagavita	180471702,00	1124500	0,62
2	Ocamonte	75221279,09	18714900	24,88
2	Oiba	286066747,70	54475000	19,04
2	Onzaga	489228436,90	50061600	10,23
2	Palmas del Socorro	58541119,72	6696700	11,34
2	Páramo	72981118,90	30348100	41,58
2	Piedecuesta	484572309,20	129300	0,03
2	Pinchote	55535419,04	767300	1,38
2	San Andrés	281558855,20	42132000	14,96
2	San Ebnito	59113022,18	5976700	10,11
2	San Gil	146877274,10	20892100	14,22
2	Socorro	127825834,90	2265300	1,77
2	Suaita	285195534,00	8100900	28,44
2	Valle de San José	81114938,89	16514400	20,36
2	Villanueva	97606913,27	7575800	7,76

Tabla 11 - Área de aptitud alta (3) para cada municipio

Aptitud	Municipio	Área municipio (m²)	Área de aptitud (m²)	Porcentaje (%)
3	Aratoca	169791551,80	661900	0,39
3	Barichara	137275811,70	7899800	5,75
3	Cepitá	107967109,00	7957100	7,37
3	Charalá	419231350,60	21513600	5,13
3	Chima	173219022,10	2462700	1,42
3	Confinés	71421700,43	3004800	4,21
3	Coromoro	577495746,00	37239600	6,45
3	Curití	244222737,00	503300	0,21
3	Encino	400432691,40	3690400	0,92
3	Gámbita	608233066,10	19888500	3,27
3	Guaca	302398263,80	3339700	1,10
3	Guadalupe	146330709,40	3138200	2,14
3	Guapotá	67300363,97	1073700	1,60
3	Jordán	398991775,1	8269500	20,73
3	Los Santos	290125188,40	1563000	0,54
3	Mogotes	483970127,30	19266700	3,98
3	Molagavita	180471702,00	10737200	5,95
3	Ocamonte	75221279,09	5220700	6,94
3	Oiba	286066747,70	9092200	3,18
3	Onzaga	489228436,90	50063100	10,23
3	Palmas del Socorro	58541119,72	6425400	10,98
3	Páramo	72981118,90	30345500	41,58
3	Piedecuesta	484572309,20	220400	0,05
3	Pinchote	55535419,04	6844600	12,32
3	San Andrés	281558855,20	42770300	15,19
3	San Ebnito	59113022,18	646100	1,09
3	San Gil	146877274,10	21989400	14,97

Aptitud	Municipio	Área municipio (m²)	Área de aptitud (m²)	Porcentaje (%)
3	Socorro	127825834,90	813700	0,64
3	Suaita	285195534,00	78333800	27,47
3	Valle de San José	81114938,89	16274500	20,06
3	Villanueva	97606913,27	7455300	7,64

En la Tabla 10 se observa que el municipio de Guapota tiene aproximadamente 80% de área con aptitud media, y los municipios de Valle de San José, Suaita, Ocamonte, Páramo, Guadalupe Encino, Confinés y Charalá presentan más de 20% de área con aptitud media. En la Tabla 11 se observa que el municipio del Páramo tiene 41,5% de aptitud alta en su territorio, y los municipios de Valle de San José, Suaita, y Jordán tienen más del 20% de su área con esta aptitud para el cultivo de café.

Discusión

El análisis de las tablas proporcionadas revela información relevante sobre la distribución de la aptitud para el cultivo de café en diferentes municipios del departamento de Santander. La presencia de áreas con aptitud media y alta sugiere un potencial significativo para la producción de café en la región. Sin embargo, también es importante considerar cómo factores como el cambio climático podrían influir en la producción de café y las variedades cultivadas en esta área.

Como se esbozaba anteriormente el café es una planta sensible al clima y su producción está estrechamente ligada a las condiciones ambientales, incluyendo la temperatura, la humedad, la precipitación y la altitud. Santander, conocido por su diversidad climática y variedad de microclimas, ofrece variedades de café cultivadas en el departamento que varían según la altitud y la oferta agroclimática específica de cada área. En altitudes más bajas, donde las temperaturas tienden a ser más altas, se cultivan variedades como Caturra y Castillo, que son más resistentes al calor y a las enfermedades. Por otro lado, en áreas de mayor altitud, donde las temperaturas son más frescas, se prefieren variedades como Típica y Bourbon, que requieren condiciones más frescas para un óptimo desarrollo.

Sin embargo, el cambio climático presenta desafíos significativos para la producción de café en Santander y en todo el mundo. El aumento de las temperaturas, los cambios en los patrones de precipitación y la proliferación de plagas y enfermedades pueden afectar negativamente la producción de café y la calidad del grano. Por ejemplo, temperaturas más altas pueden provocar un aumento en la incidencia de enfermedades como la roya del café, mientras que la variabilidad en las precipitaciones puede afectar el desarrollo y la maduración de los granos.

La zonificación mediante el método multicriterio emerge como una herramienta potencial para abordar el cambio climático y mejorar la adaptabilidad de cultivos altamente sensibles a la temperatura, como el café. Esta metodología se perfila como una alternativa valiosa para el análisis, al emplear criterios comparativos que consideran variables directamente influenciadas por el clima.

Conclusiones

Se realiza la zonificación agroecológica para la implementación y adecuación del cultivo de café (*Coffea arabica* L.) y el análisis de multicriterio para la zona de interés donde se presenta una

aptitud alta de 41,5% de su área para el municipio del Páramo y 20% para los municipios de Valle de San José, Suaita, y Jordán. Para la aptitud media se presenta el municipio de Guapota con un 80% de su área con esta aptitud y los municipios de Valle de San José, Suaita, Ocamonte, Paramo, Guadalupe, Encino, Confinés y Charalá, con un 20% de esta aptitud sobre su área. Según el análisis multicriterio propuesto se presentan los municipios no aptos y con aptitud Baja, entre ellos se encuentra todo el norte y algunas áreas del centro oriente del territorio entre ellos se destacan los municipios de Cerrito, Concepción, Carcasí, Enciso y San Miguel. Posterior a la zonificación para la adecuación del cultivo de café, se debería hacer un análisis de las variedades de café que tengan mejor rendimiento, sabor en taza, entre otros que mejoren la evaluación agrícola y comercial del producto final.

La implementación de índices espectrales para el análisis del terreno ofrece una perspectiva más detallada y actualizada de las condiciones del suelo y su idoneidad para el cultivo de café. Además, estos índices pueden ser valiosos para el seguimiento fenológico del cultivo, lo que permite una gestión más eficiente y precisa de las plantaciones. Es importante destacar que los municipios con mayor aptitud para la producción de café coinciden con aquellos que ya poseen una cantidad significativa de hectáreas sembradas, según lo indicado por la literatura revisada. Esto sugiere una correlación entre la aptitud del terreno y la actividad cafetalera actual en la región.

En relación con el cambio climático y los fenómenos extremos de variabilidad climática, como El Niño o La Niña, estos resultados son relevantes ya que ofrecen una visión más clara de cómo las condiciones climáticas influyen en la distribución y adaptabilidad del cultivo de café. La zonificación agroecológica y el análisis multicriterio pueden ser herramientas útiles para mitigar los impactos de estos fenómenos, al identificar áreas con mayor resiliencia climática y adaptabilidad para el cultivo de café. En conclusión, la integración de la zonificación agroecológica, el análisis multicriterio y el uso de índices espectrales proporciona un enfoque holístico y basado en datos para la planificación y gestión del cultivo de café en contextos cambiantes, como los asociados al cambio climático y la variabilidad climática extrema. Este enfoque es fundamental para promover la sostenibilidad y la resiliencia de la industria cafetalera frente a los desafíos climáticos actuales y futuros.

Referencias

- Arceiniegas, A., Carvajal, S. y Ovalles, V. (s.f.). Top siete de municipios cafeteros de Santander. *Periodico15*. <https://www.periodico15.com/top-siete-de-municipios-cafeteros-de-santander/>
- Federación Nacional de Cafeteros. (Agosto de 2021). *La caficultura santandereana*. Café de Santander. <https://santander.federaciondecafeteros.org/cafe-de-santander/>
- Cárdenas Gutiérrez, J. (2020). Editorial. La industria del café en Colombia. *Presentación de un país productor: Colombia Federación Nacional de Cafeteros de Colombia*. San José de Costa Rica, 17 de noviembre de 1993. <https://federaciondecafeteros.org/static/files/Cardenas%20-%20Industria%20del%20cafe%20en%20Colombia.pdf>
- Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital. (Agosto de 2021). Uso actual del suelo. Glosario Catastral. <https://www.catastrobogota.gov.co/glosario-catastral/uso-actual-de-suelo>
- Cisneros Zayas, E., Rey García, R., Martínez Varona, R., López Seijas, T. y González Robaina, F. (2015). Evapotranspiración y coeficientes de cultivo para el café en la provincia de Pinar del Río. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 24(2), 23-30.
- Cortés, A. y Nalagón Castro, D. (1984). *Los levantamientos agrológicos y sus aplicaciones múltiples*. Bogotá DC: Universidad Jorge Tadeo Lozano.
- EOS Data Analytics. (12 de 08 de 2022). Índices de vegetación en la agricultura digital. Tecnología Agrícola. <https://eos.com/es/blog/indices-de-vegetacion/>
- Galvão, L. S., Formaggio, A. R. y Tisot, D. A. (2005). Discrimination of Sugarcane Varieties in Southeastern Brazil With EO-1 Hyperion Data. *Remote Sensing of Environment*, 94 (4), 523-534. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.012>
- Henao Arismendy, J. (2015). *Evaluación del proceso de secado del café y su relación con las propiedades físicas, composición química y calidad en taza*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/56186/11282704502016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- IDH. (2016). *Laboratorio de radiometría espectral*. España: Universidad de Cantabria.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2003). *Guía técnica colombiana gtc 91. Guía para el cultivo y beneficio de café orgánico*. ICONTEC. <https://acortar.link/CV1JvZ>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2021). Modelos digitales de elevación (MDE)-descripción. *INEGI*. <https://www.inegi.org.mx/contenidos/temas/mapas/relieve/continental/metadatos/mdpdf>
- Jackson, M. L. (1958). *Soil Chemical Analysis Englewood*. Prentice Hall, Inc.
- Jaramillo, A., Arcila, J., Montoya, E. y Quiroga, F. (2006). La radiación solar; consideraciones para su estudio en las plantaciones de café (*coffea arabica* L). En editores (ed), *La radiación solar; consideraciones para su estudio en las plantaciones de café (coffea arabica* L) (pp. 12-22). Meteorología Colombia. URL
- Jiménez, G. y Ocaña, O. (2014). Tratamiento con SIG y técnicas de evaluación multicriterio de la capacidad de acogida del territorio para usos urbanos: residenciales y comerciales. En M. T: Camacho Olmedo, J. A. Cañete Pérez y J. J. Lara Valle (Ed). *El acceso a la información espacial y las nuevas tecnologías geográficas* (pp. 1509-1525). Universidad de Málaga.
- Kumar, P., Pandey, P. Ch., Singh, B. K., Katiyar, S., Mandal, V. P., Rani, M., Tomar, V. y Patariya, S. (2016). Estimation of Accumulated Soil Organic Carbon Stock in Tropical Forest Using Geospatial Technology. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 19 (1), 109-123. <https://doi.org/10.1016/j.jeirs.2015.12.003>

- Manzano Lamar, D. A. y Oña Hidalgo, D. L. (2018). *Análisis de la espectroscopia de reflectancia para la determinación de las propiedades químicas de suelos agrícolas en la parroquia de Lloa*. [Tesis de Ingeniería, Universidad de las Fuerzas Armadas]. <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/15265/1/T-ESPE-040525.pdf>
- Molina, A. y Karla, L. (2016, agosto 31). ¿Cómo Influye la altura en el café y su sabor en la taza? *Perfect Daily Grind*. <https://acortar.link/Wg9ybJ>
- Muñoz Aguayo, P. (2013). *Apuntes de teledetección: Índices de Vegetación*. Centro de Información de Recursos Naturales. <https://acortar.link/S7QVQr>
- Navarra. (2021). *Climatología. Meteorología y climatología de Navarra*. <http://medio.navarra.es/definiciones/climatologia.cfm>
- Ocampo López, O. L. (2018). *Modelación hidrológica y agronómica de los efectos del cambio y variabilidad climática en la producción cafetera en Caldas*. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/63694>
- Oliveira, R. (2019, octubre 22). *Cultivo de café: cómo mejorar la calidad del suelo*. Perfect Daily Grind. <https://perfectdailygrind.com/es/2019/10/22/cultivo-de-cafe-como-mejorar-la-calidad-del-suelo/>
- Osorio Hernandez, R., Guerra García, L. M., Ferreira- Tinôco, I., Osorio-Saraz, J. A. y Aristizábal-Torres, I. D. (2015). Simulation of a Thermal Environment in Two Buildings for the Wet Processing of Coffee. *DYNA*, 82(194), 214-222. <https://doi.org/10.15446/dynav.82n194.49526>
- Pérez-Portilla, E. y Geissert-Kientz, D. (2006). Zonificación agroecológica de sistemas agroforestales: el caso café (*Coffea arabica* L.) – palma camedor (*Chamaedorea elegans* Mart.). *Interciencia*, 31(8), 556-562.
- Puerta Quintero, G. I. (2006, octubre). *La humedad controlada del grano preserva la calidad del café*. Avances Técnicos 352, Cenicafé. Gerencia Técnica – Programa de Investigación Científica. Chinchiná: Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/418/1/avto352.pdf>
- Ramírez, V., Jaramillo, J. y Arcila, J. (2013). Factores climáticos. *Manual cafetero colombiano*, (Vol. 1) (pp. 205-237). Bogotá DC: FCN-Cenicafé.
- Restrepo Salazar, J. C. (2005). La evaporación y la evapotranspiración. *Clima andino y café en Colombia* (pp. 80-97). Chinchiná, Colombia: Cenicafé.
- Rojas, O. E. (1987). *Zonificación agroecológica del café (coffea arabica) en Costa Rica* ICCA. San Jose, Costa Rica, Instituto interamericano de cooperación para la agricultura.
- Salazar, S., Hoyos, J., Quiroga-Mosquera, A. y García-López, J. C. (2019). Zonas Agroecológicas, Aplicación de ciencia, tecnología e innovación en el cultivo del café ajustado a las condiciones particulares del Huilaparticulares del Huila. *Zonas Agroecológicas, Aplicación de ciencia, tecnología e innovación en el cultivo del café ajustado a las condiciones particulares del Huilaparticulares del Huila* (10-3). Bogotá, DC, Colombia: Cenicafé.
- Salvatore, M., Kassam, A., Guitiérrez, C., Bloise, M. y Marinelli, M. (2010). *Metología de evaluación de aptitud de tierras En Bioenergía y seguridad alimentaria BEFS: el análisis BEFS para el Perú*. Lima: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Soil Science Society of America. (1995). Statement on Soil Quality. *Agron. News*, 6-7.
- Soil Science Society of America. (2018). *Glossary of Soil Science Terms* <https://www.soils.org/publications/soils-glossary#>
- Unidad de Planificación Rural Agropecuaria. (2021). *Zonificación de aptitud para el cultivo de café (Coffea arabica L.) escala 1:100.000, en Colombia*. Bogotá DC: UPRA.
- United State Departament of Agriculture. (1961). *Land Capability Classification. Agricultura Hanbook* 210. Soil Conservation Service. <https://www.govinfo.gov/content/pkg/GOVPUB-A-PURL-gp020777/pdf/GOVPUB-A-PURL-gp020777.pdf>
- Villatoro, B. (2020). *Uso de índices de vegetación NDWI y MSI obtenidos de imágenes satelitales Sentinel-2 y Landsat 8 para monitoreo de humedad, como indicador de momento óptimo de cosecha en caña de azúcar*. Memoria Presentación de resultados de investigación Zafra. Guatemala, Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar (CENGICAÑA).
- Wintgens, J. N. [ed.]. (2009). *Coffee: Growing, processing, Sustainable Production: Aguidebook For Growers, Processors, traders and researchers*. Reino Unido: Wiley-VCH.

Anexos

Anexo 1 - Tabla resumen

Categoría	Reglas de decisión	Criterios	Parámetro	Parámetro espacial	Aptitud				Zona más favorable	Peso según clasificación
					Alta	Media	Baja	No apta		
Climatológica	Condiciones climáticas	Variables continuas en el espacio	Temperatura media anual	°C	Isotermas	19-22	16-19 y 22-24	24-25	<16 y >25	14,5
			Humedad relativa	%	Área de aproximación	70-85%	65-70%	< 65%	> 80%	15,9
			Evapotranspiración del cultivo	mm/año	Área de aproximación	1.400-1.100	1.400-1.500	> 1500	< 1100	0,0
			Altitud	m.s.n.m.	Área de aproximación	1300-1700	1700-2000	1.000-1300	<1.000 y >2.000	8,5
		Variables de ocurrencia	Brillo solar	h/día	Área de aproximación	5-6	6-7	<5	-	0,0
			Precipitación	mm/año	Isoyetas	>2800	1.400-2800	<1400	-	16,3
			Índice trófico	rango	Área de aproximación	0,7 - 1,5	1,5 - 2	2-2,5	> 2,5 y < 0,7	11,1
Edafológicas	Suelos y características	Disponibilidad de nutrientes y capacidad de laboreo	Acidez (pH)		Capa tipo shape de clases	5,0 - 5,5	5,5 - 6,0	< 5,0 y > 6,0	-	13,7
			Capacidad de intercambio catiónico	mol/kg	Capa tipo shape de clases	>19	10-19	<10	-	6,0
			Carbono orgánico	%	Capa tipo shape de clases	> 3,5	2,5 - 3,5	< 2,5	-	10,0
			Pendiente	Porcentaje	Capa DEM	< 25	25-75	> 75	-	26,0
		Aptitud y uso del suelo	Aptitud	Capas	Capa DEM	Cultivos tecnificados de café en suelos profundos y moderadamente profundos para cultivos permanentes	Aptas para cultivos de ciclo vegetativo corto	Con adecuadas prácticas de manejo de pastos, ganadería	Reforestación bosques protector y otros	15,7
			Uso Actual	Capas	Capa tipo shape de clases	Sin cobertura y con aptitud agrícola	Cultivos transitorios	Cultivos permanentes	Bosques o reservas ecológicas o zonas urbanas	8,0
			Drenajes	Rango	Capa tipo shape de clases	Buen drenaje	Bueno	Regular	-	22,5
Índices	Índices espectrales	Aptitudes de Vegetación	EVI	Rango	Determinar áreas para café	0,2-0,5	0,5-0,8	-1,0 y > 0,8	-	35,5
			NDVI	Rango	Determinar áreas para café	0,2-0,4	0,41-0,5	0,6 - 1,0	-1 - 0	26,9
			BSI	Rango	Determinar áreas para café	> 0,1	0,1 - 1	< 1	-	13,2
			NDWI	Rango	Determinar áreas para café	-0,1 -0,7	- 0,1 - -0,6	-0,6 - 1	-	12,4
			MSI	Rango	Determinar áreas para café	0,4 - 1	1 - 2	2 - 3	> 3	12,1
Fitosanitario	Susceptibilidad fitosanitaria	Temperatura asociada a la boca del café	Temperatura media	Rango	Isotermas	< 22	22-24	> 24	-	100,0

Fuente: literatura citada