

Modelación geoespacial para la caracterización agroecología-económica para el desarrollo de los cultivos de agroexportación, unidad hidrográfica Piura, Perú

Geospatial modeling for Agroecological - Economic characterization for the development of Agro-Export Crops, Piura Hydrographic Unot, Peru

Recibido: abril 12 de 2024 | Revisado: mayo 05 de 2024 | Aceptado: junio 14 de 2024

NIELL WILSON RIVAS MEZA¹
NÉSTOR MONTALVO ARQUÍÑIGO¹
ISSAAK RAFAEL VÁSQUEZ ROMERO¹

RESUMEN

El estudio tuvo como objetivo crear un modelo geoespacial para identificar zonas agroecológicas y económicamente viables para los cultivos de agroexportación en Piura. Se utilizó un Sistema de Información Geográfica (SIG) y se consideró los requisitos biofísicos de los cultivos. La investigación buscó delimitar zonas con alta aptitud (agroecológico como socioeconómico). Siguiendo la metodología de zonificación agroecológica de la FAO, se superpusieron diversas capas de información espacial para definir áreas con niveles específicos de idoneidad. Se recopilaron y analizaron datos de fuentes gubernamentales (SENAMHL, el Ministerio de Agricultura y el Gobierno Regional de Piura) para identificar zonas más óptimas por cada cultivo. El proceso incluyó el desarrollo de un Modelo Cartográfico utilizando la herramienta Model Builder de ArcGIS, simplificando la creación de zonificación agroecológica y económica para cada cultivo. Finalmente, se determinaron zonas óptimas para el cultivo de ají paprika, limón, mango, maracuyá y uva. Se establecieron asignaciones específicas de tierras, incluyendo 21284.9 hectáreas para ají paprika, 9501.9 hectáreas para limón, 4868.3 hectáreas para mango, 16577.1 hectáreas para maracuyá y 7450.9 hectáreas para uva. Este enfoque integral, combina tecnología GIS, metodología FAO y datos gubernamentales, resultó en un modelo preciso que facilita decisiones estratégicas en el cultivo de agroexportación.

Palabras clave: zonificación agroecológica económica, sistemas de información geográfica, modelamiento geoespacial, unidad hidrográfica

ABSTRACT

The study aimed to create a geospatial model to identify agroecologically and economically viable zones for the main agro-export crops in the Piura hydrographic unit. Utilizing a Geographic Information System (GIS) and considering the bio-physical requirements of the crops, the research sought to delineate areas with high aptitude from both agroecological and socio-economic perspectives. Following the FAO's agroecological zoning methodology, various layers of spatial information were overlaid to define areas with specific suitability levels. Data were collected and analyzed from governmental sources such

¹ Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú

Autor de correspondencia:
wriwas@lamolina.edu.pe

© Los autores. Este artículo es publicado por la Revista Campus de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de San Martín de Porres. Este artículo se distribuye en los términos de la Licencia Creative Commons Atribución No-Comercial – Compartir-Igual 4.0 Internacional (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite el uso no comercial, distribución y reproducción en cualquier medio siempre que la obra original sea debidamente citada. Para uso comercial contactar a: revistacampus@usmp.pe.

<https://doi.org/10.24265/campus.2024.v29n37.06>

as SENAMHI, the Ministry of Agriculture, and the Regional Government of Piura to identify zones most optimal for each crop, closely approximating reality. The process included developing a Cartographic Model using the ArcGIS Model Builder tool, simplifying the creation of agroecological and economic zoning for each crop. Ultimately, optimal zones for the cultivation of paprika pepper, lemon, mango, passion fruit, and grape were determined. Specific land allocations were established, including 21284.9 hectares for paprika pepper, 9501.9 hectares for lemon, 4868.3 hectares for mango, 16577.1 hectares for passion fruit, and 7450.9 hectares for grape. This comprehensive approach, combining GIS technology, the FAO methodology, and governmental data, resulted in a precise model facilitating strategic decisions in agro-export cultivation.

Keywords: economic agroecological zoning, geographic information systems, geospatial modeling, hydrographic unit

Introducción

La Zonificación Agroecológica establece zonas en función de las combinaciones de suelo, fisiografía y características climáticas (FAO, 1997). Los parámetros específicos utilizados en esta definición se centran en los requisitos climáticos y edáficos de los cultivos, así como en los sistemas de manejo bajo los cuales prosperan. La agricultura, en términos generales, está estrechamente vinculada al clima, las condiciones físico-geográficas, las propiedades del suelo y la disponibilidad de agua.

De manera más específica, el conocimiento detallado de variables como la cantidad de lluvia, humedad, temperaturas máximas y mínimas del entorno, y propiedades físicas y químicas del suelo (pH, CE, profundidad, textura, etc.), así como la calidad del agua superficial y subterránea (pH, CE, etc.), nos permite identificar las potencialidades y limitaciones de cada zona. Los componentes climáticos, edáficos y hídricos se caracterizan por su variación espacio-temporal, influenciada por factores fisiográficos como la altitud, latitud, relieve y posición geográfica. (Alva et al., 2013)

En el contexto peruano y en la mayoría de Latinoamérica, el sector agropecuario desempeña un papel crucial en la producción de alimentos, constituyendo la principal fuente de la canasta agroindustrial y de exportación. Además de ser un generador de empleo, ingresos y divisas, tiene un impacto significativo en factores sociales y económicos. Los avances tecnológicos, especialmente la Zonificación Agroecológica, ha surgido como respuesta a las consecuencias del uso indebido de los recursos, permitiendo la mejora de sistemas y la aplicación de diversos métodos de planificación de la producción con la debida optimización y preservación de la riqueza. (Jiménez et al., 2004). Varios estudios resaltan la relevancia de examinar las características ambientales, incluyendo la altitud, la precipitación y la disponibilidad de agua, entre otros aspectos, para la implementación y planificación de cultivos agrícolas. (Resende et al., 2020)

En la unidad hidrográfica Piura, la actividad agropecuaria se destaca como un recurso valioso, proporcionando una diversidad de cultivos de agroexportación como ají paprika, mangos, limones, maracuyá, uva, entre otros.

Para potenciar la productividad de los principales cultivos agrícolas destinados a la exportación, resulta crucial llevar a cabo, inicialmente, una zonificación tanto agroecológica como económica. Esta zonificación es de vital importancia ya que fundamenta la planificación y coordinación de actividades agrícolas y el manejo sostenible del suelo. La identificación precisa de zonas agroecológicas destaca aquellas regiones con un potencial notable para el avance agrícola. Dichas áreas, al beneficiarse de una acumulación de recursos técnicos y financieros, pueden experimentar un desarrollo acelerado en un periodo de tiempo relativamente breve.

Con la disponibilidad de datos actuales, la zonificación propuesta posibilitará una gestión más eficiente del patrimonio natural. Además, el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) facilitará un estudio comparativo basado en diversos factores, incluyendo datos climáticos, económicos y sociales relevantes en la unidad hidrográfica. Este enfoque integrado proporcionará una visión más completa y precisa para la toma de decisiones, contribuyendo así a estrategias más informadas y sostenibles para mejorar la productividad agrícola. (González et al., 2016).

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se han revelado como herramientas excepcionales para el análisis eficaz de datos espaciales, elevando notablemente la exactitud en su manejo. Esta mejora en la precisión es clave para aumentar la productividad agrícola, ya que permite una evaluación detallada de los criterios necesarios para determinar el mejor uso de la tierra (Nabatia et al.,

2020). La investigación actual subraya la importancia de comprender cómo la interacción entre el clima y las necesidades de los cultivos, dentro del marco de la caracterización agroclimática, facilita la identificación de alternativas tecnológicas destinadas a contrarrestar las restricciones climáticas (Baltazar da-Silva et al., 2020).

En base a lo expuesto, el objetivo general del presente trabajo de investigación es: Generar un modelo geoespacial para determinar las mejores zonas agroecológicas y económicamente aptas para los principales cultivos de agroexportación en la unidad hidrográfica Piura. Este modelo no solo contribuirá al ordenamiento territorial, sino que también buscará mejorar y mantener de manera sostenible la productividad agraria.

Método

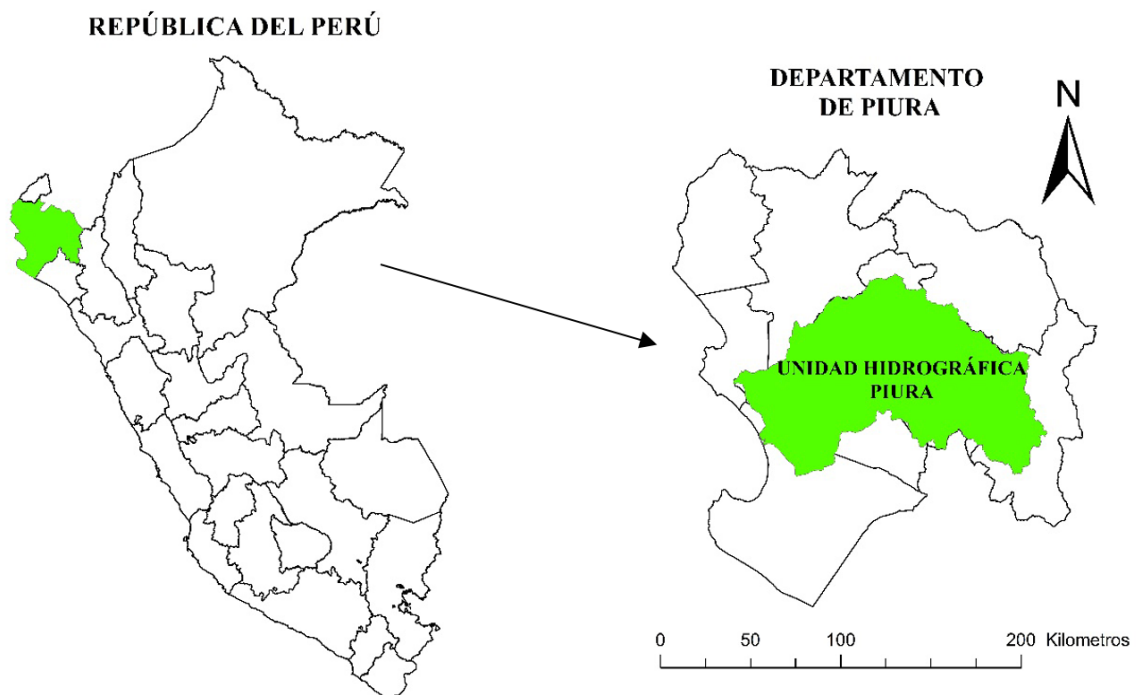
Área de estudio

La unidad hidrográfica del río Piura abarca un área de drenaje de 12,216 km² (Figura 1), desde su nacimiento a 3,600 m. s. n. m. en la divisoria de la cuenca del río Huancabamba. Fluye en dirección sur a norte, cruza las provincias de Morropón y Piura a lo largo de un cauce de 280 km. Las coordenadas geográficas de su ubicación abarcan desde los 04°42' hasta los 05°45' de Latitud Sur y desde los 79°29' hasta los 81° de Longitud Oeste.

La trayectoria del río presenta una curvatura desde la quebrada San Francisco hasta la caída de Curumuy, seguida por una dirección sur-oeste hasta su desembocadura en el Océano Pacífico a través del Estuario de Virrillá.

Figura 1

Mapa de ubicación de la zona de estudio, unidad hidrográfica Piura, Perú



Datos utilizados

Este estudio requiere información disponible sobre precipitación, temperaturas, topografía, suelo y variables socioeconómicas.

Disponibilidad climática

Para llevar a cabo este estudio, fue necesario contar con extensas series temporales de datos sobre lluvia, temperatura máxima y mínima, con resolución mensual. En este sentido,

se utilizó la información proveniente de la base de datos grillada de lluvia PISCOp V2.1 (Peruvian Interpolated data of SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations), la cual fue desarrollada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) para el periodo 1981-2016, con actualizaciones en curso. Esta base de datos ofrece una resolución espacial de 0.1°. Se seleccionaron estaciones meteorológicas en el interior y cerca del área de estudio.

Tabla 1
Datos meteorológicos obtenidos

Estación meteorológica	Coordenadas UTM (WGS 84-17S)			Precipitación total anual (mm)	Temperatura (°C)	
	Este	Norte	Altitud (msnm)		Máxima	Mínima
Barrios	645196.64	9417940.66	736	538.6	30.8	20.0
Bernal	529469.75	9380700.10	11	61.16	28.5	18.2
Canchaque	656136.39	9408626.99	1808	592.2	27.9	17.3
Chalaco	630780.51	9445658.48	2379	1048.09	21.9	7.7
Chignia	645329.75	9383028.49	540	564.05	29.9	19.9
Chulucanas	593623.44	9438710.56	89	447.56	31.7	19.3
Chusis	520425.99	9393630.79	8	82.88	28.6	18.1
Corral del medio	625073.49	9429192.45	670	698.25	29.9	17.5
Cruceta	582606.50	9464522.96	150	366.12	31.2	19.5
El tablazo	560508.47	9462901.70	124	317.51	30.9	19.5
Hacienda Bigote	635930.00	9412537.88	200	537.01	31.9	20.5
Hacienda Pabur	608467.00	9425708.40	100	540.65	31.9	19.5
Hacienda Yapatera	597603.50	9442347.03	139	509.07	32.1	20.0
Hualtaco	577103.62	9466404.95	178	388.49	31.2	19.3
Huapalas	593887.82	9438708.10	100	447.56	31.7	19.3
Huarmaca	665632.84	9386456.67	2606	670.04	21.7	13.7
Laguna Ramón	546158.36	9395186.55	50	152.11	29.4	18.0
Malacasi	624906.83	9414506.03	272	583.92	31.5	18.3
Malingas	584347.19	9455323.17	100	395.06	31.1	19.5
Miraflores	544154.10	9431889.52	34	198.27	31.1	19.3
Montenegro	534753.22	9411808.09	25	142.02	29.9	18.3
Morropon	614028.81	9429315.32	290	647.3	31.2	18.7
Paltashaco	627000.18	9436520.74	1491	868.46	28.9	16.5
Pasapampa	656461.17	9436187.98	2772	782.14	22.3	8.9
Pirgas	654447.42	9375571.44	1279	694.56	27.3	18.5
Piura	544117.19	9428215.13	39	198.27	31.1	19.3
San Isidro	582696.97	9473693.17	201	441.95	31.3	19.2
San Joaquin	573605.02	9435254.17	220	287.67	30.4	18.6
San Miguel	536724.61	9424625.95	24	183.46	30.8	18.8
San Pedro	608626.98	9440390.15	695	682.37	30.8	18.0
Santo Domingo	625255.97	9445718.80	2099	951.06	23.2	9.2
Tambo Grande	576994.16	9455397.41	60	390.3	31.1	19.6
Tejedores	586410.57	9477323.24	261	419.11	30.9	18.9
Virrey	614142.62	9390756.44	282	375.82	30.8	19.1

Nota. Pisco – SENAMHI

Modelo de elevación digital

Este estudio utilizó un modelo digital de elevación (DEM) obtenido a partir

del sensor ALOS PALSAR de la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA), el cual fue descargado del sitio web del Alaska Satellite Facility en formato

.TIFF con una resolución espacial de 12.5 metros. Los ocho ráster descargados que cubrían el área de la unidad hidrográfica se detallan a continuación: AP_23121_FBD_F7080_RT1, AP_23121_FBD_F7070_RT1, AP_25309_FBD_F7080_RT1, AP_25309_FBD_F7070_RT1, AP_25061_FBD_F7080_RT1, AP_25061_FBD_F7070_RT1, AP_24886_FBD_F7080_RT1 y AP_24886_FBD_F7070_RT1. Con la asistencia del programa ARCGIS10.X, se llevó a cabo la integración de los ocho ráster en un mosaico, del cual se extrajo, exclusivamente, el área correspondiente de la unidad hidrográfica Piura.

Datos edafológicos y uso actual

Los mapas de suelos y el uso actual del terreno fueron generados utilizando la información provista por la Zonificación Ecológica-Económica del Gobierno Regional de Piura, a una escala de 1/100000.

Variables socio-económicas

Se recopiló información socioeconómica, incluyendo el Índice de Desarrollo Humano (IDH), datos sobre infraestructura vial, porcentaje de pobreza y ubicación de Centros Poblados, a través de los geoservidores de diversas instituciones, tales como el Ministerio del Ambiente (MINAM), la Autoridad Nacional del Agua, el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), y el Gobierno Regional de Piura, entre otros.

Método

Requerimientos agroecológicos de los cultivos

Los cultivos de agroexportación seleccionados para el estudio de zonificación agroecológica fueron elegidos a partir del catálogo exportador de la región Piura elaborado por la Dirección Regional de Comercio Exterior y Turismo de la región Piura. Según el equipo técnico, la unidad hidrográfica está mayoritariamente destinada a la producción de cultivos como limón, uva, ají paprika, maracuyá y mango, considerando los más relevantes en el sector y, por ende, seleccionándolos para este estudio.

Los requerimientos agroecológicos de estos cultivos se establecieron conforme a los datos generados que figuran en el libro “Requerimientos Agroecológicos de Cultivos” del SAGARPA (2013) y en las fichas técnicas de los cultivos seleccionados del Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI). Los parámetros considerados como requisitos agroecológicos óptimos, adaptados para la zonificación agroecológica dentro de la unidad hidrográfica Piura, incluyen la precipitación, temperatura media, pendiente, textura del suelo, profundidad del suelo, pH del suelo, pedregosidad del suelo, drenaje del suelo, salinidad del suelo y altitud sobre el nivel del mar (este último tomado únicamente como referencia para el desarrollo de cada cultivo).

(Jaramillo Sánchez, 2021) sugiere que, ante los cambios climáticos, es posible identificar nuevas zonas que podrían volverse aptas para el cultivo de ciertas especies, favoreciendo así la redistribución espacial de áreas adecuadas para la agricultura, lo cual abre la posibilidad de registrar zonas con nueva aptitud agroecológica. (Tabla 2)

Tabla 2
Requerimientos agroecológicos de los cultivos

CULTIVO	Ají paprika	Limón	Mango	Maracuyá	Uva
Nombre científico	Capsicum annum L.	Citrus Limon L.	Mangifera indica L.	Passiflora edulis	Vitis vinifera L.
Familia	Solanaceae	Rutaceae	Anacardiaceae	Passifloraceae	Vitaceae
Requerimientos edafológicos y climáticos					
Altitud (msnm)	0 a 2000	0 a 1800	0 a 1200	0 a 1300	0 a 3000
Isoyetas (mm)	600 a 1250	500 a 1600	400 a 2500	600 a 2500	400 a 1100
Isotermas (°C)	16 a 30	13 a 35	10 a 35	21 a 32	10 a 35
Pendientes (%)	< 12%	< 25%	< 12%	< 12%	< 12%
Textura	Franco arcilloso, Franco arenoso	Franco, Franco arcilloso, franco arenoso	Limo arenoso, Arcilloso arenoso, franco arenoso	Franco, franco arcilloso	Franco arenoso
Profundidad	Profundo	Profundo	Profundo	Profundo	Profundo
Drenaje	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
pH	6 a 7	5.5 a 7	5.5 a 7.5	5.5 a 7	5.5 a 7
Salinidad	Sin	Sin	Sin	Sin	Sin
Pedregosidad	Sin o muy pocas	Sin o muy pocas	Sin o muy pocas	Sin o muy pocas	Sin o muy pocas

Nota. SAGARPA (2013)

Construcción de la base de datos geoespaciales

La comparación sistemática entre las condiciones edafológicas, climáticas, requerimientos agroecológicos de los cultivos, y aspectos socioeconómicos de un sector determinado forman la zonificación agroecológica - económica. Cada tributo o descripción se le asigna un nivel para el modelo geoespacial.

La sectorización del territorio en base a criterios ecológicos determina las condiciones ambientales ideales para las especies vegetales, buscando alcanzar el máximo potencial de producción. Este enfoque integra y considera diversos

factores que influyen en el desarrollo de los cultivos, incluyendo las condiciones climáticas y edafológicas. Identificar áreas con características propicias para el establecimiento de cultivos es fundamental en la planificación de estrategias de desarrollo agrícola, tanto a nivel local como regional. Por tanto, este estudio permitirá una gestión sostenible, teniendo en cuenta la capacidad productiva de los recursos naturales y la conservación de los ecosistemas relevantes (Orlando et al., 2019).

La clasificación del factor pendiente se ha determinado en base a los diferentes rangos de pendiente presentes en la unidad hidrográfica. Este factor adquiere

relevancia debido a su estrecha relación con la resistencia del suelo ante la erosión hídrica, y tiene un impacto directo en las prácticas culturales, tanto agronómico como mecánico, aplicadas en el cultivo. La clasificación se hizo en seis niveles, con las siguientes descripciones y rangos: pendiente débil (0-5), pendiente suave (5-12), pendiente moderada (12-25), pendiente fuerte (25-70), pendiente muy fuerte (50-70), y pendiente abrupta (>70), respectivamente.

características exhiben similitudes en términos de sus propiedades físico-químicas y morfológicas, lo que indica potencialidades similares y la posibilidad de aplicar un manejo uniforme. La caracterización del suelo se percibe como un atributo susceptible de medición o estimación. Las propiedades físicas y químicas, son cuantificables y poseen impactos significativos en los cultivos. Se definen de acuerdo a criterios adjuntos, los cuales se describen detalladamente en la Tabla 3.

Las unidades de suelo y sus

Tabla 3
Indicadores del suelo

NIVELES	TEXTURA		PROFUNDIDAD EFECTIVA		SALINIDAD		PH DEL SUELO		PEDREGOSIDAD DEL SUELO		DRENAJE DE SUELO
	Descripción	Clasificación	Centímetros	Descripción	Rango (mmhos/cm)	DESCRIPCIÓN	Rango (%)	Descripción	RANGO (%)	Descripción	Descripción
1	Arenosa (fina, media, gruesa) Arenoso franco	Gruesa	0 - 20	Superficial	0 - 2	Sin	< 4.5	Muy ácido	< 10	Sin o muy pocas piedras	Bueno
2	Franco arenoso (fino a grueso) Franco limoso	Moderadamente gruesa	21 - 50	Poco profundo	2 - 4	Ligera	4.5 - 5.5	Ácido	11 - 25	Con pocas piedras	No tomar en cuenta
3	Franco Limoso Franco arcilloso (< 35% de arcilla) Franco arcilloso arenoso Franco arcilloso limoso	Media	51 - 100	Moderadamente profundo	4 - 8	Media	5.6 - 6.5	Ligeramente ácido	26 - 50	Con frecuentes piedras	--
4	Franco arcilloso (>35% de arcilla) Arcilloso Arcillo arenoso Arcillo limoso	Fina	> 100	Profundo	8 - 16	Alta	6.6 - 7.5	Neutro	51 - 75	Con abundantes piedras	--
5	Arcilloso	Muy fina	--	--	> 16	Muy alta	7.5 - 8.5	Moderadamente alcalino	> 75	Pedregoso	--
6	--	--	--	--	--	--	> 8.5	Alcalino	--	--	--

El desarrollo de los cultivos se produce cuando las variaciones térmicas no afectan adversamente las funciones fundamentales de las plantas, tales como el crecimiento, la germinación, la fotosíntesis, la absorción de agua y nutrientes, y la respiración. Con el propósito establecido en la metodología, se ha definido de manera secuencial y ordenada parámetros (niveles) para los grados de temperatura, de la siguiente manera: nivel 1 al 11, se le asignó la temperatura media en centígrados entre 15 a mayor de 25 grados.

Mediante el análisis de las precipitaciones medias mensuales y anuales de las estaciones meteorológicas, se obtiene una representación de la distribución de las etapas de la precipitación, conocidas como isoyetas. Con la capa de isoyetas, se asignó parámetros (niveles) de manera secuencial y ordenada a los atributos de precipitación, dividiendo los rangos en incrementos de 100 mm.

La generación de las variables de vías y centros poblados implicó la creación de un área de influencia. Esta área se fundamenta en las condiciones sociales y económicas que respaldan la conectividad e interrelación de las actividades diarias en los ámbitos socioeconómicos, políticos y culturales donde se desenvuelve la población en una determinada región. Se asignaron los niveles 1 y 2 para dentro del buffer y afuera del buffer, respectivamente, para la capa de red vial y la capa de área de los centros urbanos.

El uso actual del suelo en la cuenca hidrográfica fue evaluado, otorgándole una mayor prioridad a las zonas agrícolas. Los niveles se asignaron del 1 al 10 para zona agrícola, bosque de montaña, bosque

seco, desierto costero, cuerpos de agua, matorral, manglar, páramo, río Piura, y zona urbana, respectivamente.

El criterio para evaluar el nivel es que las poblaciones con niveles más altos/bajos de pobreza exhiben una mayor/menor participación en la actividad agropecuaria, con el mismo criterio se clasifico el IDF. Los niveles se clasificaron del 1 al 4 para los rangos de pobreza bajo (9.8 - 24.15%), medio (24.15 - 38.5%), alto (38.5 - 52.85%), y muy alto (52.85 - 67.2%), y para los niveles de rango de IDH fueron muy alto (0.448 - 0.555), alto (0.341 - 0.448), medio (0.233 - 0.341), y bajo (0.126 - 0.233), respectivamente.

Modelo geoespacial de zonificación agroecológica económica

(Aghaloo et al., 2023) sugieren en su estudio que la elección de un método de interpolación óptimo puede diferir según la región, haciendo indispensable realizar análisis y comparaciones detalladas para identificar el método más adecuado para una área de estudio específica.

Por otro lado, (Salas López et al., 2017) en su investigación sobre microzonificación agroecológica, destacan que a través del uso de técnicas de álgebra de mapas es posible generar un ráster final. Este proceso permite cuantificar las potencialidades y limitaciones de las parcelas agrícolas, proponiendo un plan de manejo de suelos. Dicha gestión incluye la recomendación de alternativas de uso que armonicen con los requerimientos específicos de las especies cultivadas y las condiciones locales existentes.

El modelo conceptual revela la estructura de los campos considerados

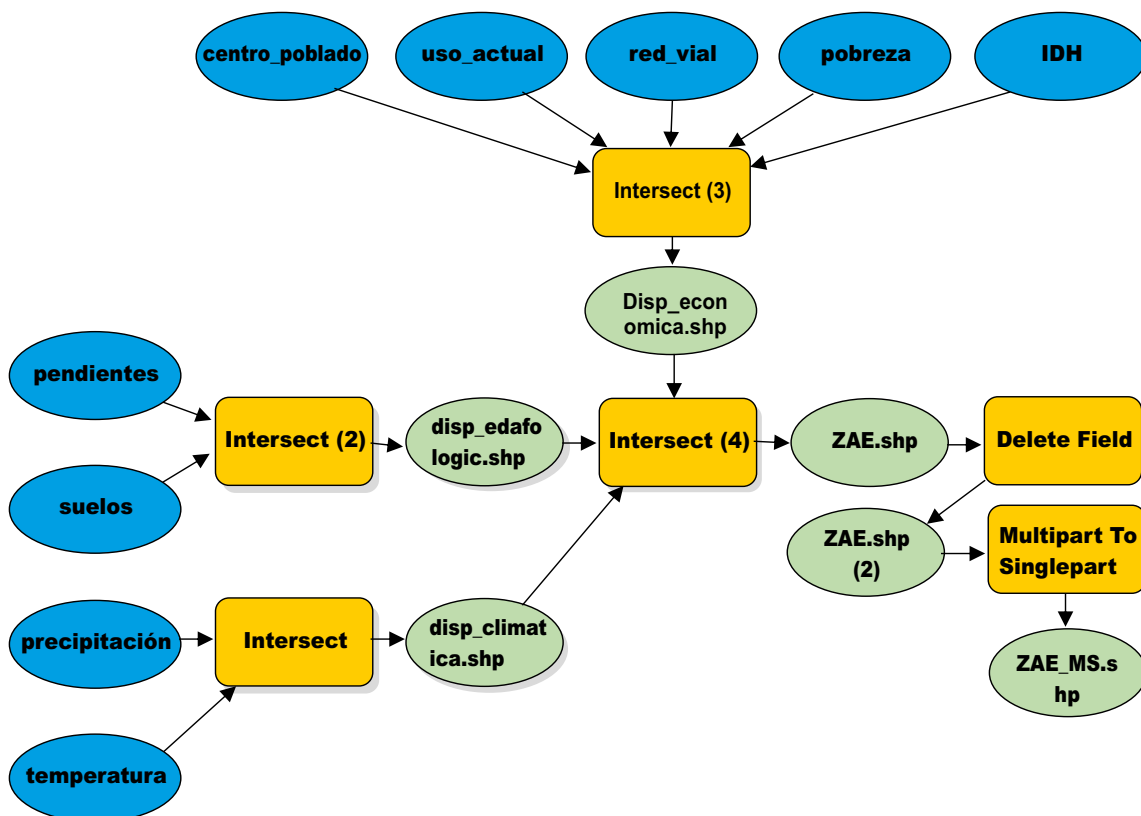
para identificar las zonas agroecológicas económicas óptimas para los cultivos seleccionados en la unidad hidrográfica Piura.

En la presente investigación, la construcción del modelo se realizó

priorizando las variables más relevantes e influyentes en el objetivo del modelo. Posteriormente, se llevó a cabo la calificación en las unidades de cada variable utilizando el sistema de información geográfica con el software ArcGIS y la herramienta Model Builder.

Figura 2

Modelo geoespacial para la determinación de la zonificación agroecológica económica.



Elaboración del lenguaje estructurado de consulta (SQL)

El lenguaje de consulta estructurado (SQL) es fundamental en la especificación de diversas operaciones en bases de datos, sirviendo como un lenguaje de control ampliamente incorporado en numerosas operaciones de los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

(Moreno et al., 2018) por su parte,

exponen en su estudio que el modelo agrológico se basa en una función matemática. Esta función, utilizando SQL para consultar los atributos de los mapas agroecológicos, identifica zonas óptimas caracterizadas por las mejores condiciones edafológicas y climáticas para el cultivo. Como resultado, se producen mapas que representan áreas según el tipo de cultivo. Además, varios autores argumentan que las zonas donde la zonificación propuesta coincide con el uso actual de los cultivos obtendrán

mejores resultados. Esto contribuye a una mayor competitividad, satisfaciendo las necesidades alimentarias de la canasta básica familiar e incrementando las exportaciones a partir de los excedentes.

Este modelo propuesto de zonificación se concibe como una función matemática que, mediante el lenguaje estructurado de consulta a los atributos del mapa agroecológico dentro de un Sistema de Información Geográfica (SIG),

genera zonas óptimas caracterizadas por condiciones edafológicas y climáticas más propicias para el cultivo. El resultado final se presenta en mapas que representan áreas con condiciones homogéneas ya sean limitantes o satisfactorias para el desarrollo de los cultivos. En la ejecución de este proceso, la Tabla 4 resume los parámetros utilizados conforme a los requerimientos agroecológicos de los cultivos de ají paprika, limón, mango, maracuyá y uva.

Tabla 4
Parametrización de los requerimientos agroecológicos

Requerimientos	Ají paprika		Limón		Mango		Maracuyá		Uva	
Isoyetas (mm) / nivel	600 a 1250	6 al 11	500 a 1600	5 al 11	400 a 2500	4 al 11	600 a 2500	6 al 11	400 a 1100	4 al 11
Isotermas (°C) / nivel	16 a 30	2 al 11	13 a 35	1 al 11	10 a 35	1 al 11	21 a 32	7 al 11	10 a 35	1 al 11
Pendientes (%) / nivel	< 12%	1,2	12% a 25%	3	< 12%	1,2	< 12%	1,2	< 12%	1,2
Textura / nivel	Franco arcilloso, Franco arenoso	2,3	Franco, Franco arcilloso, franco arenoso	2,3	Limo arenoso, Arcilloso arenoso, franco arenoso	2,3,4	Franco, franco arcilloso	3	Franco arenoso	2
Profundidad / nivel	Profundo	3	Profundo	3	Profundo	3	Profundo	3	Profundo	3
Drenaje / nivel	Bueno	1	Bueno	1	Bueno	1	Bueno	1	Bueno	1
pH / nivel	6 a 7	3,4	5.5 a 7	2,3,4	5.5 a 7.5	2,3,4	5.5 a 7	2,3,4	5.5 a 7	2,3,4
Salinidad / nivel	Sin	1	Sin	1	Sin	1	Sin	1	Sin	1
Pedregosidad / nivel	Sin o muy pocas	1	Sin o muy pocas	1	Sin o muy pocas	1	Sin o muy pocas	1	Sin o muy pocas	1

Según la parametrización de los requerimientos agroecológicos, y a partir de los atributos de la base de datos agroecológicos obtenida con las intersecciones, la selección para el caso del cultivo ají paprika:

- i. Realizar la consulta SQL para el rango de isoyetas que en consideraciones óptimas se encuentre entre 600 a 1250 mm, esto quiere decir que le corresponde las clases del 6 al 11.
- ii. En la misma selección escogemos

los restantes parámetros, como las isotermas entre 16 a 30°C, equivalente a las clases del 2 al 11.

- iii. En seguida la pendiente del 0 al 12%, equivalente a las clases 1 y 2.
- iv. Luego la textura de tipo franco arcilloso y franco arenoso, equivalente a las clases 2 y 3
- v. En la misma selección escogemos la profundidad profunda, equivalente a la clase 3.
- vi. Después el drenaje para el ají paprika es bueno, equivale a la clase 1.
- vii. De la anterior selección escogemos el pH con un rango 6 a 7, equivalente a las clases 3 y 4
- viii. Posteriormente identificamos la salinidad establecida como sin sales, equivalente a la clase 1
- ix. Y finalmente se selecciona la pedregosidad, sin o muy pocas piedras, equivalente a la clase 1.

Este mismo proceso fue llevado a cabo para obtener la zonificación agroecológica de los demás cultivos. Para definir las Zonas Agroecológicas Económicas Aptas por cultivo, se considerarán aquellas áreas que cumplan con las condiciones parametrizadas de infraestructura vial, centros poblados y uso actual, siendo identificadas como las de mejores condiciones socioeconómicas. Para generar la capa de zonas agroecológicas económicas óptimas se usaron los siguientes factores: uso actual (zona agrícola - nivel 1), vías de comunicación (dentro del buffer - nivel 1), centros poblados (dentro del buffer - nivel 1), pobreza (bajo o medio – niveles 1-2), e IDH (muy alto o alto – niveles 1-2). Estos factores fueron determinados mediante el uso de lenguaje estructurado de consulta (SQL).

Conforme a lo indicado en las condiciones óptimas para las zonas agroecológicas económicas, y con los atributos de las zonas socioeconómicas para el cultivo del ají paprika, (la misma secuencia para los demás cultivos en el presente estudio) se escogió así:

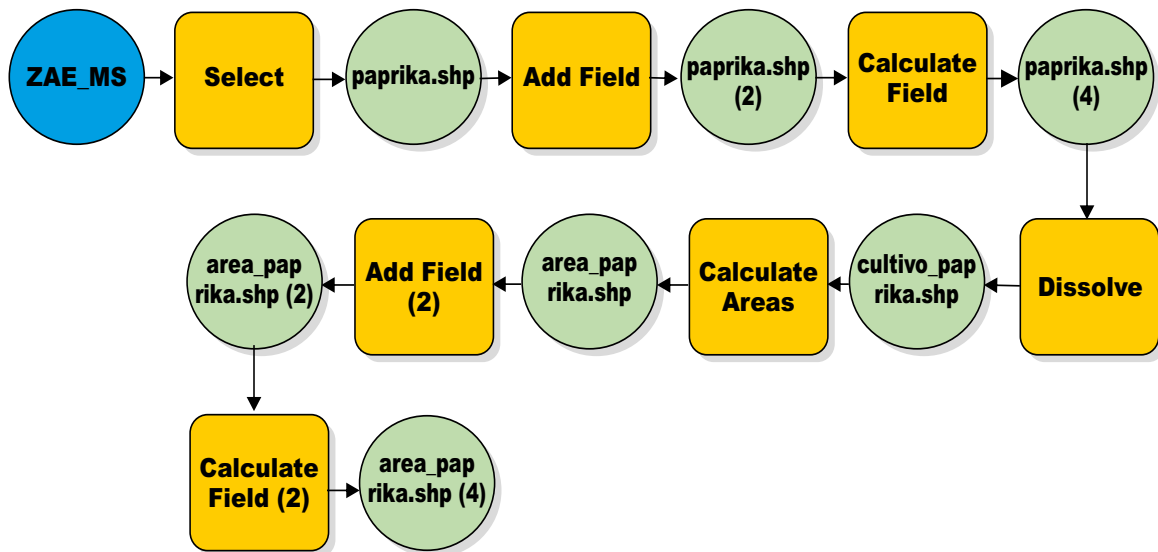
- i. Se selecciona una consulta SQL para la categoría de vías de comunicación que en condiciones óptimas es el área de influencia a 2000 m, es decir la clase 1.
- ii. En esta escogemos las características de centros poblados con un área de influencia según lo explicado anteriormente, con clase 1.
- iii. Después se selecciona el uso actual de tipo zonas agrícolas, correspondiéndole la clase 1.
- iv. Se elige los distritos cuyo rango de IDH sea “Alto” o “Muy Alto”, es decir las clases 1 y 2.
- v. Finalmente, los distritos que tengan un rango de pobreza “Bajo” y “Medio”, con las clases 1 y 2.

Por lo tanto, la consulta SQL para el cultivo ají paprika sería de la siguiente manera:

```
“Nivel_pend” <= 2 AND “Nivel_prep”
>= 6 AND “Nivel_Tmed” >= 2 AND
(“Nivel_text” >= 2 AND “Nivel_text” <=
3) AND “Nivel_pedr” = 1 AND “Nivel_
prof” = 3 AND (“Nivel_pH” >= 3 AND
“Nivel_pH” <= 4) AND “Nivel_sali” = 1
AND “Nivel_dren” = 1 AND “Nivel_via”
= 1 AND “Nivel_CP” = 1 AND “Nivel_
UA” = 1 AND “Nivel_pobr” <= 2 AND
“Nivel_IDH” <= 2
```

Figura 3

Modelo geoespacial para la determinación de las zonas agroecológicas económicas aptas para el cultivo del ají paprika



Resultados y Discusión

Zonas aptas para el cultivo ají paprika

De acuerdo con los resultados obtenidos a través de la consulta SQL que abarcó todos los requisitos agroecológicos necesarios para el cultivo del ají paprika, se identificó un área de 10,327.25 hectáreas en zonas aptas. Estos resultados destacan la idoneidad del cultivo en los distritos de Buenos Aires, Morropón, Chulucanas y Tambo Grande, donde se presenta un entorno óptimo para su desarrollo. Esta área representa el 3.09% de la superficie total de las zonas agrícolas dentro de la unidad hidrográfica.

Zonas aptas para el cultivo limón

Los resultados de la consulta SQL sobre los requerimientos agroecológicos y económicos para el cultivo de limón revelaron un área de 43,931.24 hectáreas de zonas aptas, lo que representa el 13.15% de las zonas agrícolas. Estas

áreas son principalmente localizadas en los distritos de Buenos Aires, Morropón, Chulucanas y Tambo Grande, ubicados en la parte alta de la unidad hidrográfica.

Zonas aptas para el cultivo mango

La superficie apta para el cultivo de mango abarca el 18.05% de las zonas agrícolas lo que totaliza 60,301.9 hectáreas, dentro de la unidad hidrográfica Piura. Estas zonas óptimas se encuentran mayoritariamente en los distritos de Buenos Aires, Morropón, Chulucanas y Tambo Grande.

Zonas aptas para el cultivo maracuyá

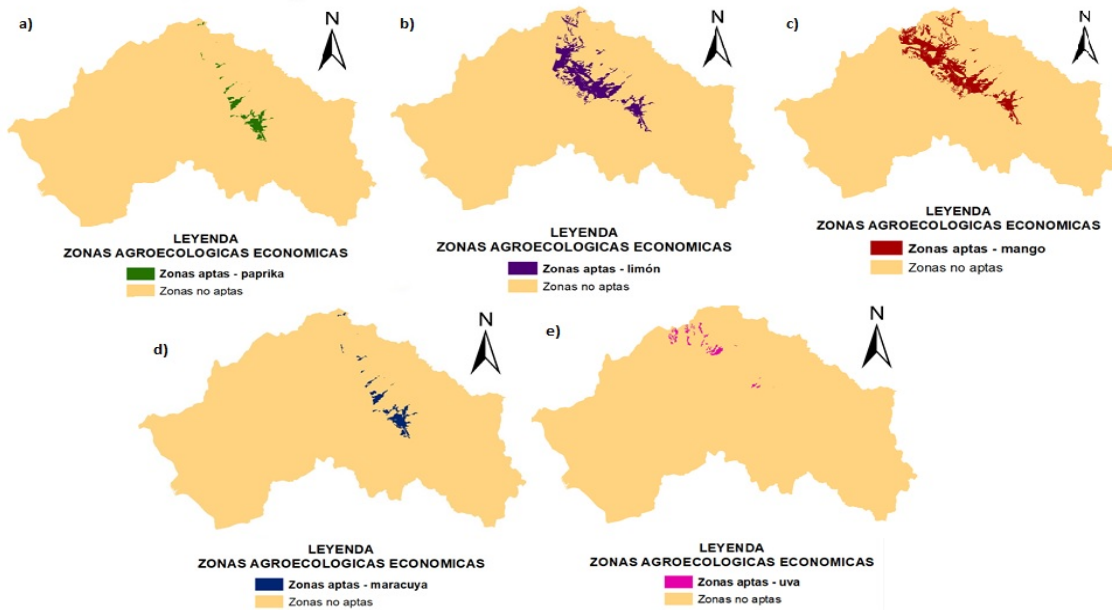
El cultivo de maracuyá abarca solo una superficie óptima de 10,267.12 hectáreas, equivalente al 3.07% de las zonas agrícolas. Estas zonas aptas para el cultivo se encuentran dispersas mayoritariamente en los distritos de Morropón, Buenos Aires, Chulucanas y Tambo Grande.

Zonas aptas para el cultivo uva

Con base en los datos recopilados, se identificó que el 1.36% de las zonas agrícolas de la unidad hidrográfica Piura (4548.76 ha) cumple con

los requerimientos agroecológicos y económicos para el cultivo de la uva. Estas zonas aptas se encuentran predominantemente en los distritos de Morropón, Buenos Aires, Chulucanas y Tambo Grande.

Figura 4
Zonificación agroecológica-económica (a-e)



En el presente estudio, se efectuó una zonificación agroecológica focalizada en los cultivos clave destinados a la exportación dentro de la región seleccionada para la investigación, siguiendo las directrices de clasificación propuestas por el Ministerio del Ambiente (MINAM, 2010). Este análisis implicó una evaluación de los requisitos agroecológicos y económicos específicos de cada cultivo. A cada variable se les asignó niveles conforme a los umbrales establecidos, revelando que los cultivos analizados podrían ser compatibles en términos de requerimientos de suelo, lo que sugiere una optimización en la distribución espacial de los cultivos.

La zonificación realizada se centró exclusivamente en identificar zonas

óptimas para el crecimiento de los cultivos examinados, destacando aquellas áreas con condiciones naturales favorables.

Este trabajo subraya la necesidad de expandir la investigación a la zonificación agroecológica económica de cultivos no incluidos en el análisis actual. Futuras investigaciones en esta dirección podrían desvelar potenciales oportunidades para maximizar los beneficios económicos de los agricultores y proporcionar recomendaciones estratégicas para una redistribución de cultivos más coherente con sus características agroecológicas y económicas intrínsecas.

Conclusiones

La unidad hidrográfica Piura abarca una superficie total de 1,093,010.7 hectáreas,

de las cuales solo 331,397 hectáreas son zonas agrícolas, representando un 30.31% de su territorio apto para la actividad agropecuaria. Se implementó una metodología de zonificación agroecológica económica en esta unidad hidrográfica, identificando áreas aptas o lugares con vocación natural para los cultivos de ají paprika, limón, mango, maracuyá y uva.

Los cultivos estudiados alcanzaron extensiones en las zonas agrícolas: 10,327.25 hectáreas (3.09%) para ají paprika, 43,931.24 hectáreas (13.15%) para limón, 60,301.9 hectáreas (18.05%) para mango, 10,267.12 hectáreas (3.07%) para maracuyá y 4,548.76 hectáreas (1.36%) para uva. La integración de

variables como disposición edafológica, disposición climática y caracterización socioeconómica en el modelo permitió identificar áreas óptimas para el desarrollo de cada cultivo.

Se desarrolló un model builder para automatizar la identificación de zonas óptimas, donde cualquier cultivo puede idealmente prosperar y ser más productivo debido a condiciones climáticas, edafológicas y socioeconómicas adecuadas. Es importante destacar que estas exigencias no excluyen la posibilidad de plantar los cultivos en otros lugares con condiciones y requisitos similares, aunque su productividad pueda verse reducida o no cumpla con los planes adecuados de conservación y protección.

Referencias

- Aghaloo, K., & Sharifi, A. (2023). A GIS-based agroecological model for sustainable agricultural production in arid and semi-arid areas: The case of Kerman Province, Iran. *Current Research in Environmental Sustainability*, 6, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2023.100230>
- Alva, H., & Chaca, B. (2013). Determinación de zonas potenciales para cultivos frutícolas en la región Tacna, mediante sistemas de análisis espacial. *Espacio y Desarrollo*, 25, 123-135. <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/espacioydesarrollo/article/view/10626>
- Baltazar-da Silva, D. F., Morejón-García, M., Díaz-Pita, A., De Almeida, F. M., Ferreira, J., & Gonzalves, V. (2020). Caracterización agroclimática de la provincia Uigé, Angola en función del desarrollo del Café Robusta. *Instituto Nacional de Ciencias Agrícola, Cultivos Tropicales*, 41(1), 1-12. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362020000100001&lng=es&tlng=es
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (1997). *Zonificación agro-ecológica: Guía general*. https://www.faoswalim.org/resources/Land/Land_resource_Mgt/pdfdocs/aezs.pdf
- González, H. A., & Hernández, J. R. (2016). Zonificación agroecológica del Coffea arábica en el municipio Atoyac de Álvarez, Guerrero, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín*, 53, 105-118. <https://doi.org/10.14350/rig.49329>

- Jaramillo Sánchez, L. A. (2021). *Zonificación agroecológica del cultivo de café (Coffea arabica L.) en la provincia de Loja bajo escenarios de cambio climático* (Tesis de máster, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador). <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/55448>
- Jiménez, C. A., Vargas, T., Salinas, C., Aguirre, M., & Rodríguez, C. (2004). Aptitud agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el sur de Tamaulipas, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín*, 53, 58-74. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112004000100005&lng=es&tlng=es.
- MINAM (Ministerio del Ambiente). (2010). *Reglamento sobre el uso, manejo y conservación de tierras*. Lima, Perú: MINAM. http://www.inta.go.cr/Normativa/Reglamento_Ley_Suelos.pdf
- Moreno Izquierdo, V. J., Lasso Benítez, L. P., Reyes Pozo, M. D., Haro Prado, R. X., & Cruz Espinosa, G. I. (2018). Aptitud agroecológica de tres cultivos estratégicos (maíz, arroz y caña de azúcar) en 14 cantones de la cuenca baja del río Guayas. *Pro Sciences: Revista de Producción, Ciencias e Investigación*, 2(13), 15-24. <https://doi.org/10.29018/issn.2588-1000vol2iss13.2018pp15-24>
- Nabati, J., Nezami, A., Nematollahi, E., & Morteza, A. (2020). GIS-based agro-ecological zoning for crop suitability using fuzzy inference system in semi-arid regions. *Ecological Indicators*, 117, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106646>
- Salas López, R., Rodríguez Calampa, N. J., Barboza Castillo, E., Mendoza Chchiple, M. E., & Oliva, M. (2017). Microzonificación agroecológica de sistemas agrosilvopastoriles empleando un modelo de procesamiento basado en SIG en parcelas en la provincia de Bongará, Amazonas (Perú). *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 1(2), 40-50. <https://doi.org/10.25127/aps.20172.361>
- Resende, R.T., Kuki, K.N., Corrêa, T.R., Zaidan, Ú.R., Mota, P.H., Telles, L.A., Gonzáles, D.G., Motoike, S.Y., Resende, M.D., Leite, H., & Lorenzon, A.S. (2020). Data-based agroecological zoning of Acrocomia aculeata: GIS modeling and eco-physiological aspects into a Brazilian representative occurrence area. *Industrial Crops & Products*, 154, 112749. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112749>
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2013). *Requerimientos agroecológicos de los cultivos*. México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/105805/2013_12_13_MAT_sagarpa4a_2_.pdf