

**Escenarios de idoneidad agrícola para cultivos peruanos *Musa paradisiaca L.* y *Coffea arabica L.* con modelamiento EcoCrop-FAO-SIG, 2021-2040 y 2041-2060**

Agricultural suitability scenarios for Peruvian crops *Musa paradisiaca L.* and *Coffea arabica L.* with EcoCrop-FAO-GIS modelling, 2021-2040 and 2041-2060

Cristhian Nicolás Aldana Yarlequé<sup>1</sup>, Carlos Adrián Lecarnaqué Arevalo, Wilmer Moncada Sosa; Gustavo Adolfo Mendoza Rodríguez; Luis Ramón Trelles Pozo.

Instituto de Investigación en Economía y Eficiencia Productiva  
Universidad Nacional de Frontera, Sullana, Piura, Perú.

**RESUMEN**

El análisis de idoneidad agrícola-ambiental contribuye a una adecuada planificación del uso y distribución de tierras y agricultura sostenible. Mediante escenarios futuros de idoneidad agrícola 2021-2040 y 2041-2060 para cultivos peruanos *Musa paradisiaca L.* y *Coffea arabica L.*, se evaluó si las condiciones agroclimáticas entre 1970-2000, rangos marginales y óptimos de temperatura, precipitación, periodo de crecimiento a partir de días de germinación Gmin y Gmax, son adecuados en una dinámica espacio-temporal. El modelo EcoCrop-FAO e información SIG extraída de WorldClim y procesada con QGIS, generó mapas de distribución espacial a partir de datos agroclimáticos-ambientales; obteniendo tres índices de salida, idoneidad del cultivo respecto a la temperatura (Tsuit), idoneidad del cultivo respecto a la precipitación (Rsuit) y el Índice de idoneidad futura del cultivo (SUIT). El cultivo del *Coffea arabica L.* (café) en Amazonas, San Martín y Junín conservarían su idoneidad agrícola al 2040 con un grado de idoneidad óptima mayor al 83%; mientras que, Piura con un SUIT menor al 17% dejaría de tener condiciones climáticas óptimas para el desarrollo de dicho cultivo. La idoneidad de la *Musa paradisiaca L.* (banano), presentaría condiciones favorables para su desarrollo, siendo Loreto quien mayor presencia de áreas con cambios positivos.

**Palabras clave:** Productividad, rendimiento, agroclimático, prospectiva productiva, análisis espacio-temporal

**ABSTRACT**

The analysis of agricultural-environmental suitability contributes to adequate planning of land use and distribution and sustainable agriculture. Using future agricultural suitability scenarios 2021-2040 and 2041-2060 for Peruvian crops *Musa paradisiaca L.* and *Coffea arabica L.*, it was evaluated whether the agroclimatic conditions between 1970-2000, marginal and optimal ranges of temperature, precipitation, growing period at from germination days Gmin and Gmax, are suitable in a space-time dynamic. The EcoCrop-FAO model and GIS information extracted from WorldClim and processed with QGIS, generated spatial distribution maps from agroclimatic-environmental data; obtaining three output indices, crop suitability with respect to temperature (Tsuit), crop suitability with respect to precipitation (Rsuit) and the Future Crop Suitability Index (SUIT). The cultivation of *Coffea arabica L.* (coffee) in Amazonas, San Martín and Junín would retain its agricultural suitability by 2040 with a degree of optimal suitability greater than 83%; while, Piura with a SUIT less than 17% would no longer have optimal climatic conditions for the development of said crop. The suitability of the *Musa paradisiaca L.* (banana) would present favorable conditions for its development, with Loreto having the greatest presence of areas with positive.

**Keywords:** Productivity, yield, agroclimatic, productive prospective, spatio-temporal analysis.

<sup>1</sup> Instituto de Investigación en Economía y Eficiencia Productiva, Universidad Nacional de Frontera, [caldana@unf.edu.pe](mailto:caldana@unf.edu.pe), <https://orcid.org/0000-0002-6890-5370>, Sullana, Piura, Perú.

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente los agricultores enfrentan muchos riesgos frente a los efectos adversos del cambio climático, como plagas, enfermedades y cambios en los precios de los cultivos (Mulder et al., 2019, Thompson et al., 2018), siendo el cambio climático uno de los mayores desafíos que enfrenta la humanidad en la actualidad, y tiene implicaciones significativas para nuestro futuro. Según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), el aumento de la temperatura global es "inequívoco" y la acción humana es la principal causa de este fenómeno (IPCC, 2014).

El cambio climático se manifiesta a través de una serie de impactos, incluyendo el aumento del nivel del mar, la acidificación de los océanos, la disminución de los glaciares y el cambio en los patrones de precipitación y temperatura (IPCC, 2014). Estos impactos tienen consecuencias significativas para la biodiversidad, la seguridad alimentaria, la salud humana y el desarrollo sostenible. A pesar de los esfuerzos internacionales para abordar el cambio climático, la situación sigue siendo preocupante. Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM), el año 2020 fue uno de los tres años más cálidos registrados en la historia, y la temperatura media mundial ha aumentado en más de 1°C desde la era preindustrial (OMM, 2021). Tal es así que, el aumento de la temperatura global, las sequías y las inundaciones son algunos de los efectos del cambio climático que pueden tener graves consecuencias económicas (UNEP FI, 2021) y sociales a nivel mundial (Stern, 2006).

Algunos autores han evidenciado que a nivel mundial el sector agrícola podría sufrir efectos adversos progresivos de rendimiento y producción en los próximos cien años (IPCC, 2021; Thornton, 2014; Lobell, 2011). Tal es así que, ante ello se vienen dando adaptaciones a este tipo de cambios graduales en las condiciones climáticas medias locales; sin embargo, es necesario una mejor comprensión de los impactos de los extremos climáticos en la producción agrícola (Iles et al., 2016; Zampieri et al., 2017), de tal manera que, se puedan prever importantes implicaciones para la salud humana y la nutrición (Myers et al., 2014); ya que, existe evidencia científica sobre los impactos del cambio climático en la salud humana, teniendo la necesidad de adaptarse a los efectos del cambio climático (Kjellstrom y Weaver, 2009), especialmente en los países más vulnerables (Campbell-Lendrum, D et al., 2007).

La sequía, como fenómeno meteorológico extremo, es una de las principales limitaciones climáticas para el rendimiento de los cultivos (Iles et al., 2016). Además, la productividad de los cultivos disminuirá en algunas regiones debido a las condiciones climáticas más adversas, lo que puede afectar negativamente la economía y la seguridad alimentaria en esas áreas (Schlenker & Roberts, 2009). Es vital que los investigadores consideren importante el estudio de la idoneidad agrícola en función del cambio climático (Bjørn Møller et al., 2021), pues la agricultura cumple un rol fundamental en la seguridad alimentaria. El cambio climático además de afectar la producción y rendimiento, también está afectando la calidad de los cultivos, con la aparición de problemas como la disminución del contenido de nutrientes y el aumento de las toxinas en los alimentos.

El suelo y/o la tierra de diversas zonas geográficas no poseen la misma adecuación para los cultivos, por ello, el desarrollo de modelamientos espaciales para evaluar la idoneidad de la tierra integrando diferentes técnicas de sistemas de información geográfica (SIG), diversos requerimientos agroclimáticos como materia orgánica, índices de calidad puede brindar información relevante (El Baroudy, 2016) que permita desarrollar acciones estratégicas que protejan los recursos hídricos, tierra y así implementar sistemas agrícolas sostenibles (Han et al., 2021). Existen diferentes enfoques de evaluación de la idoneidad de la tierra (Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2020), entre ellos el enfoque de la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO) denominado modelo ECOCROP (Requerimientos de cultivos ecológicos)

(De Rhys et al., 2020) (Remesh et al., 2019), que se aplica en la evaluación de la idoneidad de la tierra, el cual contiene una base de datos global de cultivos disponible relacionada a diferentes parámetros ambientales denominados requerimientos agroclimáticos que intervienen en el análisis de la productividad de cultivos (FAO, s.f.), permitiendo predecir el comportamiento del clima en una determinada zona.

Por otro lado, la aplicación de técnicas de evaluación multicriterio para el desarrollo de modelos de idoneidad de la tierra acompañadas con SIG, permiten obtener información espacial a partir de la implementación de mapas temáticos de idoneidad que evidencian que regiones son adecuadas para determinados cultivos en el futuro de manera sostenible (Emre et al., 2020).

De lo anteriormente descrito, se ha evidenciado que, existen limitada evidencia científica relacionada a la idoneidad de la tierra con la producción de cultivos como la *Musa paradisiaca L.* y *Coffea arabica L.*; en tal sentido y teniendo en cuenta que el análisis de idoneidad agrícola-ambiental contribuye a una adecuada planificación del uso y distribución de tierras y agricultura sostenible a partir del desarrollo de escenarios futuros de idoneidad agrícola; la presente investigación propuso evaluar para los periodos temporales del 2021-2040 y 2041-2060 si las condiciones agroclimáticas entre 1970-2000, rangos marginales y óptimos de temperatura, precipitación, periodo de crecimiento a partir de días de germinación  $G_{min}$  y  $G_{max}$ , son adecuados en una dinámica espacio-temporal. Para ello, se trabajó con el modelo EcoCrop-FAO e información SIG extraída de WorldClim y procesada con QGIS, generando mapas de distribución espacial a partir de datos agroclimáticos-ambientales; obteniendo tres índices de salida, idoneidad del cultivo respecto a la temperatura (Tsuit), idoneidad del cultivo respecto a la precipitación (Rsuit) y el Índice de idoneidad futura del cultivo (SUIT).

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Área de estudio

El área de estudio, corresponde a la República del Perú, ubicado como país soberano en América del Sur en el lado oeste del mismo, con un total de 24 regiones o departamentos geográficos. En la zona oeste del Perú se encuentra el océano Pacífico, el cual bordea la costa peruana, limitando con Ecuador y Colombia al norte, Brasil al este, y Bolivia y Chile al sureste. Su territorio se compone de diversos paisajes: valles, las mesetas y las altas cumbres de los Andes se despliegan al oeste hacia la costa desértica y el este hacia la Amazonia. Es uno de los países con mayor diversidad biológica y mayores recursos minerales del mundo. Posee regiones de costa, sierra y selva.

Cabe indicar que, el comportamiento climático del Perú se encuentra determinado por su situación geográfica; ya que, el país se encuentra dentro de la zona intertropical de la Tierra, es decir, a baja latitud y cerca del ecuador terrestre. Esto implica que no haya grandes diferencias entre las temperaturas medias de invierno y verano en todo el país, además determina que al oriente tenga un clima tropical lluvioso. Asimismo, la presencia imponente de la cordillera de los Andes, determina una variedad de climas de altura que van del clima templado de montaña al clima gélido de alta montaña. Finalmente, las corrientes marinas frías y los vientos alisios provenientes del anticiclón del Pacífico Sur, determinan que en la costa prevalezca el clima subtropical árido.

Por otro lado, es preciso mencionar que básicamente son cuatro factores: Posición o localización del Perú en el mundo como un país tropical, influencia de las corrientes marinas, influencia de los vientos e influencia de una topografía dominada por la (cordillera de los Andes). A estos factores habría que añadir a las anomalías o fenómenos climáticos extraordinarios como El Niño-Oscilación del Sur.

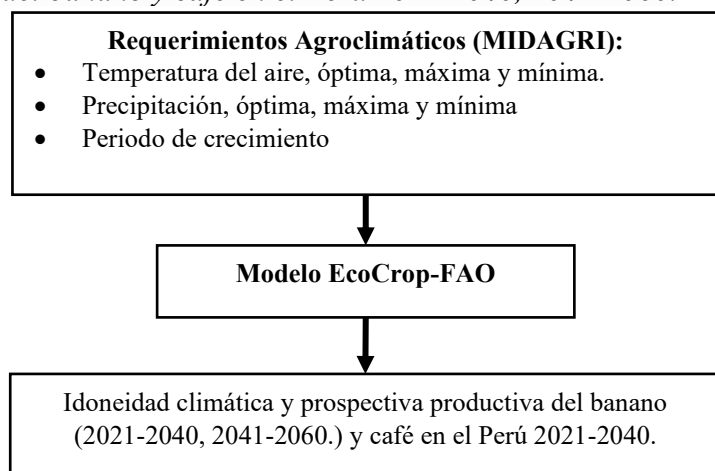
## 2.2. Diseño metodológico

La figura 1, presenta el diseño metodológico para prever la idoneidad climática y la perspectiva productiva del *Coffea arabica L.* (café) y *Musa paradisiaca L.* (banano) en el Perú en dos periodos de estudio. Este proceso implicó, en primer lugar, la creación de una base de datos para el período de estudio 2021-2040, abarcando *Musa paradisiaca L.* y *Coffea arabica L.*, así como el desarrollo de otra base de datos para *Musa paradisiaca L.* en el periodo 2041-2060, incorporando parámetros climáticos como el comportamiento de la temperatura y precipitaciones.

En segundo lugar, se determinó los requisitos específicos de temperatura y precipitaciones para cada cultivo, además de llevar a cabo la calibración del modelo. En tercer lugar, se procedió a estimar la idoneidad climática de los cultivos mediante la utilización de los modelos de circulación general (GCM, por sus siglas en inglés) de Ecocrop. Finalmente, se evaluaron los resultados obtenidos sobre dicha idoneidad de los cultivos de banano y café en diversas zonas de cultivo del Perú.

### Figura 1.

*Esquema metodológico para la estimación de la idoneidad climática y prospectiva productiva del banano y café en el Perú 2021-2040, 2041-2060.*



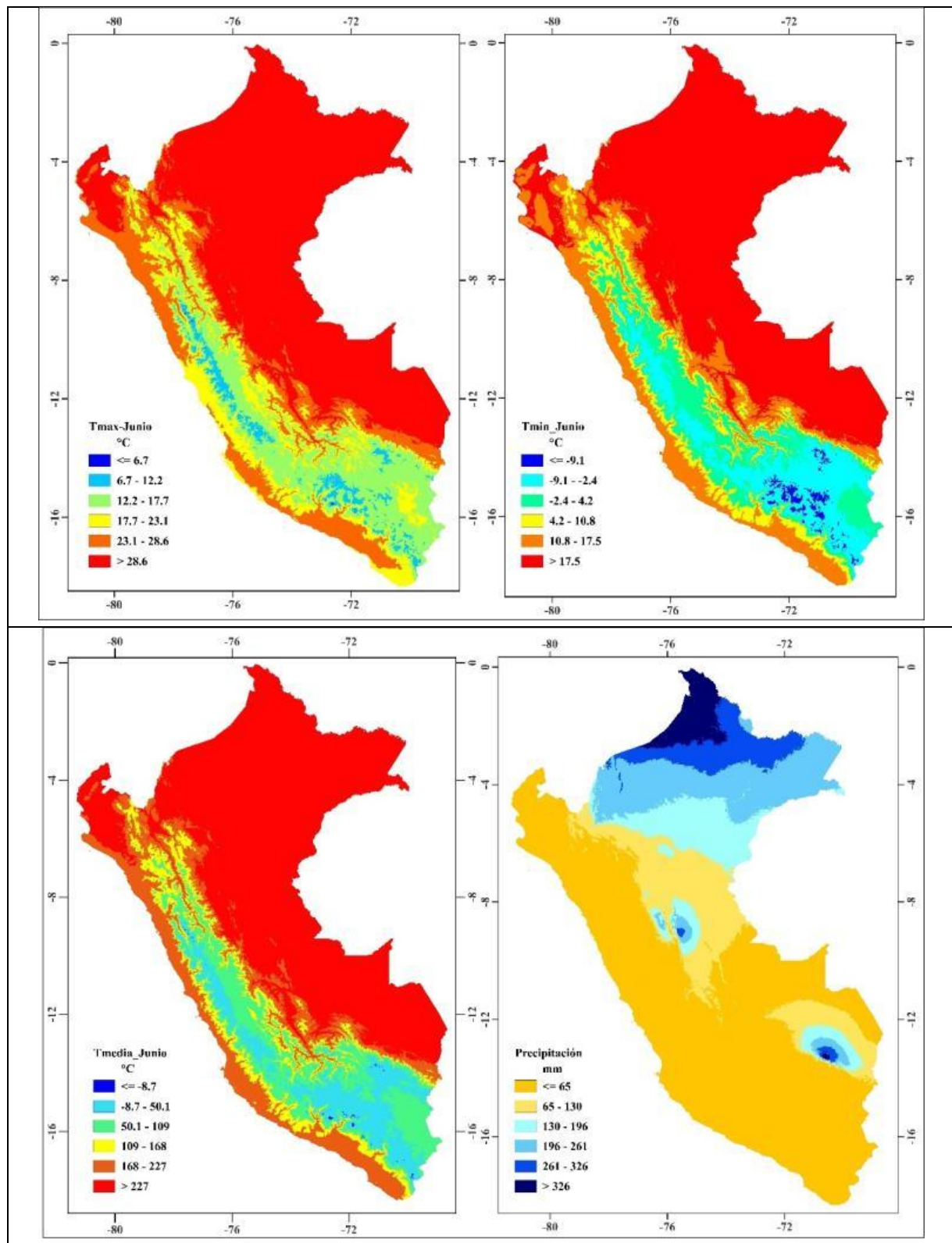
## 2.3. Caracterización de variables

En la figura 2, se exhiben los mapas que detallan la distribución espacial de los valores medios ( $T_{media}$ ) de la temperatura máxima ( $T_{max}$ ), mínima ( $T_{min}$ ) medida en °C; así como de los niveles medios de precipitación expresados en mm durante el mes de junio del período de 1970 a 2000. Dichos datos fueron extraídos de la base de información proporcionada por WorldClim y posteriormente procesados utilizando el software QGIS.

Es importante señalar que la información contenida en los datos rasters (consisten en una cuadrícula de píxeles de tamaño regular) de  $T_{max}$ ,  $T_{min}$ ,  $T_{media}$  y precipitación, que se incorporaron al modelo EcoCrop-FAO, correspondiendo ello a los valores medios registrados en el mes de junio lo largo del período entre 1970 y 2000. Este enfoque temporal proporcionó una perspectiva integral de las condiciones climáticas durante ese lapso, sirviendo como base para la evaluación de la idoneidad climática y la perspectiva productiva de los cultivos analizados.

**Figura 2.**

Mapas de distribución espacial de la temperatura máxima ( $T_{max}$ ), mínima ( $T_{min}$ ) y media ( $T_{media}$ ) del aire ( $^{\circ}C$ ) y de la precipitación (mm). Los valores medios del mes de junio corresponden a los años entre 1970 al 2000.



## 2.4. Caracterización fenológica y productiva del banano y café en el Perú

El banano (*Musa paradisiaca L.*), es una planta de producción permanente en el Perú, se establece inicialmente instalando una semilla madre para posteriormente mantener una selección de los mejores retoños de la misma semilla en todas las siguientes generaciones. La duración del crecimiento de la planta madre y el retoño es diferente, lo que tiene implicaciones para el modelo de idoneidad del cultivo en el sentido de que la diferencia de tiempos en su desarrollo implicaría que no sea temporal. Dado que el banano retoño se cosecha con más frecuencia que la madre, se calcula la idoneidad del cultivo de banano retoño considerando el número de días de germinación mínima (Gmin) de 210 días y máxima (Gmax) de 270 días. Idealmente, se debe considerar la variación del clima dentro del año para determinar el momento óptimo de selección de retoños, evitando malas condiciones climáticas (poca lluvia) durante los períodos clave de crecimiento. Por lo tanto, las fechas posteriores de manejo y selección de retoños se uniformizan hasta considerarse equivalentes a la fecha ideal de siembra con respecto a otros cultivos (MIDAGRI, 2021).

**Tabla 1**

Caracterización fenológica de la *Musa paradisiaca L.* y *Coffea Arabica L.*

Nombre Científico	Tipo de cultivo	Gmin (días)	Gmax (días)
<i>Musa paradisiaca L.</i>	Permanente	210	270
<i>Coffea Arabica L.</i>	Permanente	210	330

Fuente: MIDAGRI

El café (*Coffea Arabica L.*), es uno de los principales productos agrícolas de exportación en el Perú, que beneficia económicamente a más de 223 mil familias, entre pequeños, mediano y grandes productores. De las 10 principales regiones productoras en el Perú, con 425 400 ha sembradas de café, se concentra el 91% de productores con áreas cultivables (Cafes del Perú, 2022). La diversidad y matices de microclimas, suelos, precipitación y luz solar constituye un escenario óptimo para los distintos perfiles en relación con el sabor, aroma y acidez, dando lugar a diferentes variedades como Typica (70%), Caturra (20%) y otros tipos (10%). Se calcula la idoneidad del cultivo de café considerando el número de días de germinación mínima (Gmin) de 210 días y máxima (Gmax) de 330 días. Idealmente, se debe considerar la variación del clima dentro del año para determinar de manera óptima los parámetros de temperatura del aire y precipitación apropiados para el desarrollo del cultivo dentro de los requerimientos agroclimáticos del café (MIDAGRI, 2021).

## 2.5. Características del modelo EcoCrop-FAO

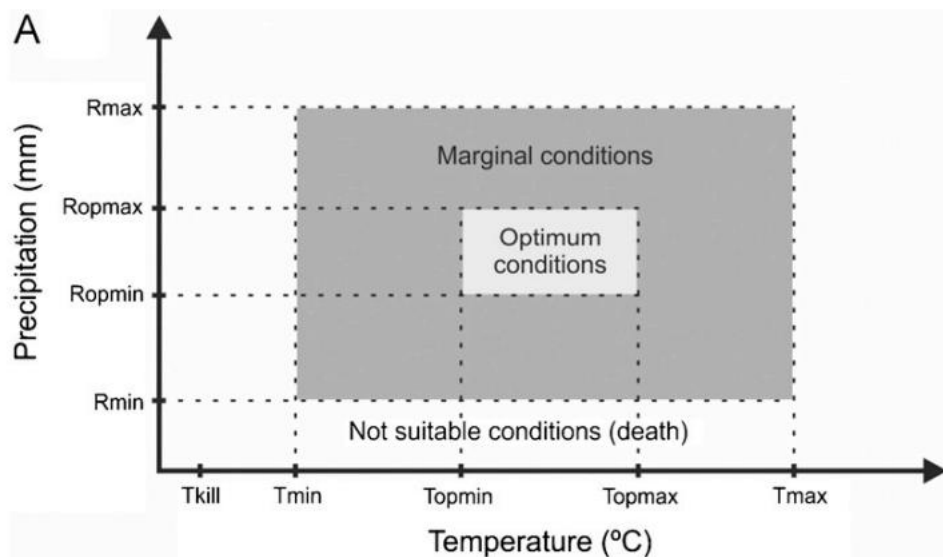
El sistema EcoCrop se dedica a examinar y evaluar la adecuación de un entorno propicio para el cultivo en cuestión. Para lograr esto, se lleva a cabo un análisis comparativo entre los requisitos agroclimáticos absolutos y los óptimos específicos del cultivo en términos de temperatura y precipitación, utilizando datos climáticos. Este modelo, desarrollado originalmente por Hijmans et al. (2001), opera de manera determinística y resulta muy útil para evaluar la idoneidad de un cultivo, así como para identificar el comportamiento o la idoneidad climática asociada a un producto en particular y en un momento específico. Los datos agroclimáticos ambientales se utilizan como entrada para el modelo, que luego genera un índice de idoneidad como información de salida, expresado en una escala porcentual de 0 a 100, según lo establecido por la FAO en 2000.

La particularidad de este modelo radica en la presencia de dos intervalos agroclimáticos, uno absoluto y otro óptimo, que abarcan las variables de temperatura y precipitación. En el rango

absoluto, la temperatura absoluta mínima es  $T_{min}$  y la temperatura absoluta máxima es  $T_{max}$ , la precipitación absoluta mínima es  $R_{min}$  y la precipitación absoluta máxima es  $R_{max}$ . En el rango óptimo, la temperatura mínima óptima es  $T_{opmin}$  y la temperatura máxima óptima es  $T_{opmax}$ , la precipitación mínima óptima es  $R_{opmin}$  y la precipitación máxima óptima es  $R_{opmax}$ . Además, se contempla la utilización de una temperatura límite para el cultivo ( $T_{kill}$ ), la cual se emplea para reconocer aquella temperatura que excede los límites absolutos de la temperatura mínima.

**Figura 3.**

Diagrama del modelo EcoCrop-FAO, extraído del trabajo de J. Ramirez-Villegas et al, 2013)



### 2.5.1. Condiciones agroclimáticas para el cálculo de la idoneidad de cultivo

En la ecuación 1, se calcula la idoneidad del cultivo respecto a la temperatura ( $T_{suit}$ ) comparando los diferentes parámetros del cultivo (requerimientos agroclimáticos) con la temperatura absoluta y óptima del cultivo en una zona determinada.

$$T_{suit} = \begin{cases} 0 & T_{min_i} < T_{kill} \\ 0 & T_{mean_i} < T_{min_i} \\ a_{T1} + m_{T1} * T_{mean_i} & T_{min_i} \leq T_{mean_i} < T_{opmin_i} \\ 100 & T_{opmin_i} \leq T_{mean_i} < T_{opmax_i} \\ a_{T2} + m_{T2} * T_{mean_i} & T_{opmax_i} \leq T_{mean_i} < T_{max_i} \\ 0 & T_{mean_i} \geq T_{max_i} \end{cases} \quad (1)$$

Donde,  $T_{suit}$  se refiere a los diferentes parámetros respecto al índice de idoneidad para la temperatura a diferentes rangos y con una puntuación correspondiente;  $T_{min_i}$ ,  $T_{opmin_i}$ ,  $T_{opmax_i}$  y  $T_{max_i}$  se definen en función del cultivo;  $a_{T1}$  y  $m_{T1}$  son la intersección y la pendiente de la curva de regresión entre  $[T_{min_i}, 0]$  y  $[T_{opmin_i}, 100]$ ;  $a_{T2}$  y  $m_{T2}$  son la intersección y la pendiente de la curva de regresión entre  $[T_{opmax_i}, 100]$  y  $[T_{max_i}, 0]$ .

Si la temperatura media en el tiempo "i" está por debajo del umbral mínimo  $T_{min_i}$ , la puntuación es 0 %. Si está dentro del rango de temperatura óptima, entre  $T_{opmin_i}$  y  $T_{opmax_i}$ , la puntuación es 100 %. Si está por encima del umbral máximo  $T_{max_i}$  la puntuación vuelve a ser 0 %.

Por su parte, en la ecuación 2, se calcula la idoneidad del cultivo respecto a la precipitación ( $R_{suit}$ ) comparando la lluvia total de la temporada de crecimiento del cultivo (precipitación

acumulada de todos los meses durante la temporada de crecimiento), con la precipitación absoluta y óptima del cultivo en una zona determinada.

$$R_{suit} = \begin{cases} 0 & R_{total} < R_{min_i} \\ a_{R1} + m_{R1} * R_{total} & R_{min_i} \leq R_{total} < R_{opmin_i} \\ 100 & R_{opmin_i} \leq R_{total} < R_{opmax_i} \\ a_{R2} + m_{R2} * R_{total} & R_{opmax_i} \leq R_{total} < R_{max_i} \\ 0 & R_{total} \geq R_{max_i} \end{cases} \quad (2)$$

Donde,  $R_{suit}$  es el indicador de idoneidad de la precipitación;  $R_{total}$  es la precipitación total de la temporada de crecimiento del cultivo de la zona de estudio;  $R_{min_i}$ ,  $R_{opmin_i}$ ,  $R_{opmax_i}$  y  $R_{max_i}$  se definen en función del cultivo;  $a_{R1}$  y  $m_{R1}$  son el intercepto y la pendiente de la curva de regresión entre  $[R_{min_i}, 0]$  y  $[R_{opmin_i}, 100]$ ;  $a_{R2}$  y  $m_{R2}$  son el intercepto y la pendiente de la curva de regresión entre  $[R_{opmax_i}, 100]$  y  $[R_{max_i}, 0]$ .

En la ecuación 2, también se muestra una estructura de condiciones que evalúa la idoneidad de la precipitación. Si la precipitación acumulada es menor que  $R_{min_i}$ , la idoneidad se establece en 0 %. Si la precipitación acumulada está dentro de un rango específico entre  $R_{opmin_i}$  y  $R_{opmax_i}$  la idoneidad se establece en 100 %. Si la precipitación acumulada es mayor que  $R_{max_i}$  la idoneidad se establece en 0.

En la ecuación 3, se calcula el índice de idoneidad futura del cultivo ( $SUIT$ ) a partir del producto de las idoneidades de temperatura y precipitación dadas por las ecuaciones (1) y (2).

$$T_{suit} * R_{suit} = SUIT \quad (3)$$

### 2.5.2. Calibración del modelo EcoCrop-FAO

En la tabla 1, se consideró los parámetros agroclimáticos ambientales (temperatura y precipitación absoluta y óptima) para la calibración del modelo EcoCrop-FAO. Estos parámetros de cultivo también son conocidos como requerimientos agroclimáticos.

**Tabla 2**

*Parámetros agroclimáticos ambientales para la calibración del modelo EcoCrop-FAO.*

	Temperatura		Precipitación	
De muerte ( $T_{kill}$ )	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
Absoluta	$T_{min}$	$T_{max}$	$R_{min}$	$R_{max}$
Óptima	$T_{opmin}$	$T_{opmax}$	$R_{opmin}$	$R_{opmax}$

Asimismo, es necesario conocer la estación de crecimiento en días e incorporarlo en el análisis del número de días de germinación mínima ( $G_{min}$ ) y máxima ( $G_{max}$ ) para cada cultivo, los cuales representan el periodo de crecimiento para diferentes especies de un mismo cultivo, tal como se detalla en la tabla 2, para el caso del banano como cultivo permanente el  $G_{min}$  y el  $G_{max}$  corresponde al valor medio de los días de crecimiento de la madre y los retoños.

**Tabla 3**

*Parámetros agroclimáticos para los cultivos de café (Coffea arabica L.) y banano (Musa paradisiaca L), temperatura (°C) y precipitación acumulada anual (mm)*

Cultivo	$G_{min}$	$G_{max}$	$T_{kill}$	$T_{min}$	$T_{opmin}$	$T_{opmax}$	$T_{max}$	$R_{min}$	$R_{opmin}$	$R_{opmax}$	$R_{max}$
Banano	210	270	80	16	20	30	37	1800	1900	2000	2200
Café	210	330	0	18	22	25	29	750	1400	2300	4200

La FAO presenta parámetros generales de referencia para una lista de cultivos como el café extraídos del enlace <https://gaez.fao.org/pages/ecocrop>, muy útiles para alimentar el modelo EcoCrop, sin embargo, es considerable el uso de la información del banano brindada por MIDAGRI extraída del enlace <https://repositorio.midagri.gob.pe/handle/20.500.13036/1284>, cuya información específica permitió ajustar el modelo en gran medida con la zona en estudio, los valores de temperatura y precipitación en los rasters aparecen multiplicados por 10 para evitar el uso de decimales.

## 2.6. Modelado de idoneidad de cultivos

### 2.6.1. Datos climáticos

El modelo de idoneidad de cultivos considera los valores medios mensuales de las condiciones agroclimáticas entre 1970 al 2000 para la generación de un escenario futuro entre el 2021 al 2040. Los datos mensuales recopilados de precipitación y temperatura (mínima y media) se extrajeron del WorldClim, versión 2.1 (Fick y Hijmans, 2017). Las capas de datos se ensamblaron a una resolución espacial de 30 s de arco ( $\sim 1 \text{ km}^2$  en el ecuador).

### 2.6.2. Ejecución del modelo EcoCrop-FAO

Se ejecuta en RStudio con el paquete *dismo-package*, el cual permitió procesar el modelo EcoCrop y trabajar en un entorno de desarrollo amigable mientras se implementó, calibró y ejecutó el modelo EcoCrop utilizando las capacidades estadísticas y de programación de R. Posteriormente al procesamiento de los datos, se visualizaron los resultados y la gestión del flujo de trabajo. Finalmente, la ejecución del modelo ofrece una aproximación basada en información científica de los efectos del cambio climático y la idoneidad agroclimática de cultivos (Hijmans, 2017; Hijmans et al., 2001). Este modelo proporciona un valor de idoneidad que va de 0% a 100% basado en la evaluación de las condiciones climáticas a partir de los requerimientos agroclimáticos del cultivo o cultivos en estudio, donde 0 % significa la ausencia total de idoneidad y 100 % significa la presencia de idoneidad perfecta u óptima.

### 2.6.3. Cálculo de la idoneidad futura del cultivo

El modelo EcoCrop, calcula la idoneidad futura del cultivo definida como tierra de cultivo en un raster de resolución espacial de  $1 \text{ km}^2$  a través de la disponibilidad de los modelos de circulación general GCM (Global Climate Model) o modelo climático global que es una herramienta utilizada para simular y predecir el comportamiento del clima a nivel global. Estos modelos utilizan complejas ecuaciones matemáticas y representaciones computacionales de los procesos atmosféricos, oceánicos, terrestres y de interacción entre ellos. (Xiong et al., 2017).

Tal y como se detalla en la ecuación 3, el índice de idoneidad futura del cultivo (*SUIT*) es la resultante entre el producto de *Tsuit* y *Rsuit* a partir del producto de las idoneidades de temperatura y precipitación dadas por las ecuaciones (1) y (2).

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 3.1. Temperatura y precipitación idónea para el cultivo del café y del banano

En la figura 2, se observan los mapas de distribución espacial de la temperatura y la precipitación idóneas acumulada por celda de un 1 km<sup>2</sup> proyectada al 2021-2040 para los cultivos del café y del banano en el Perú, respectivamente, con un índice de banda de 0 al 100 %, donde 0 a 17 % es idoneidad nula, de 17 % a 33 % es idoneidad deficiente, de 33 % a 50 % es baja idoneidad, de 50 % a 67 % es idoneidad moderada, de 67 % a 83 % es idoneidad buena y de 83 % a 100 % es idoneidad perfecta.

**Tabla 4**

*Clasificación del índice de idoneidad.*

%	Grado de Idoneidad
0-17	Nula
17-33	Deficiente
33-50	Baja
50-67	Moderada
67-83	Buena
83-100	Perfecta

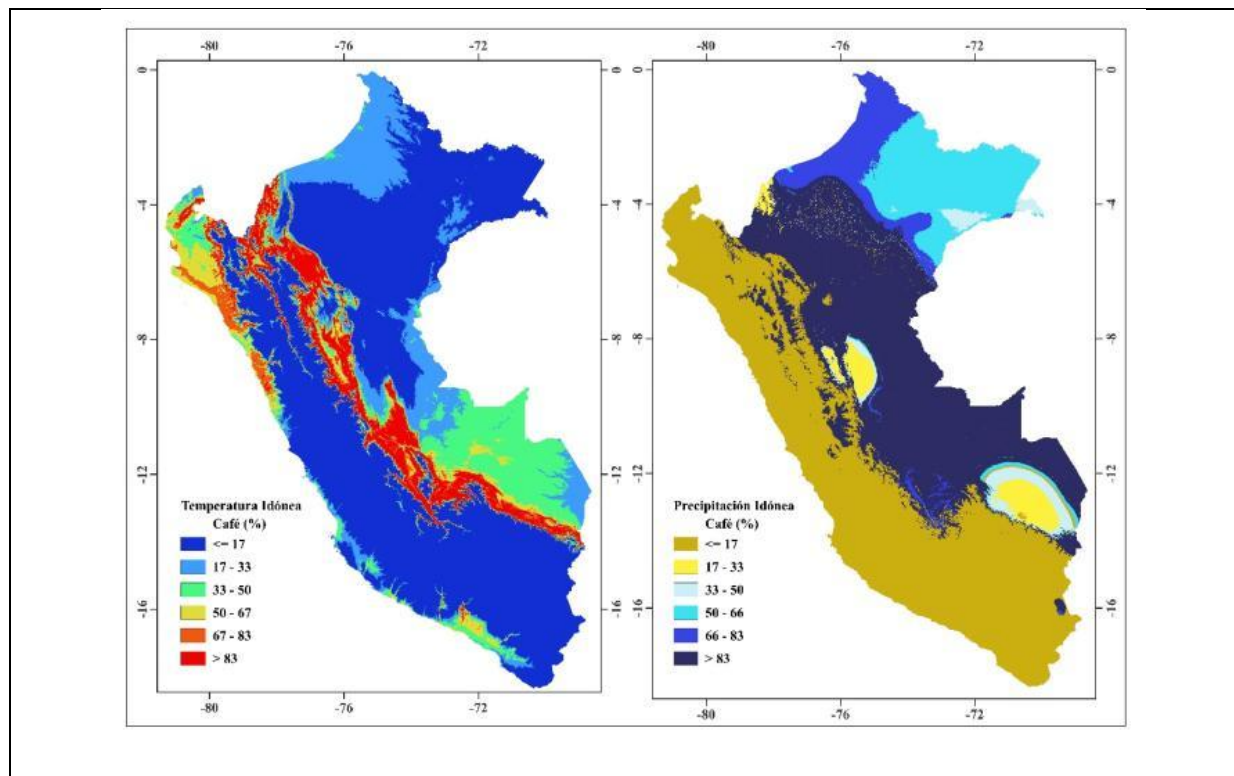
En la figura 4 (a), se puede observar las zonas con idoneidad de temperatura perfecta óptimas para el cultivo del café corresponde a las zonas en color rojo (>83%), de igual forma para el caso de la idoneidad de precipitación que corresponde a las zonas en color azul (>83%), figura 3 (b).

También se observan en la figura 4 (c), las zonas con idoneidad de temperatura perfecta óptimas del cultivo de banano y corresponde a las zonas en color rojo (>83%), de igual forma para el caso de la idoneidad de precipitación que corresponde a las zonas en color azul (>83%), figura 3 (d).

En la figura 4 (a, b, c, y d) se observa un análisis individual respecto a la idoneidad climática de la temperatura y precipitación para el caso del café y banano, donde se puede afirmar que existen regiones del país con temperaturas perfecta (83 % a 100 %) respecto a la idoneidad del cultivo, y a su vez esas mismas regiones no cuentan con precipitaciones aptas para el desarrollo del cultivo (café y banano).

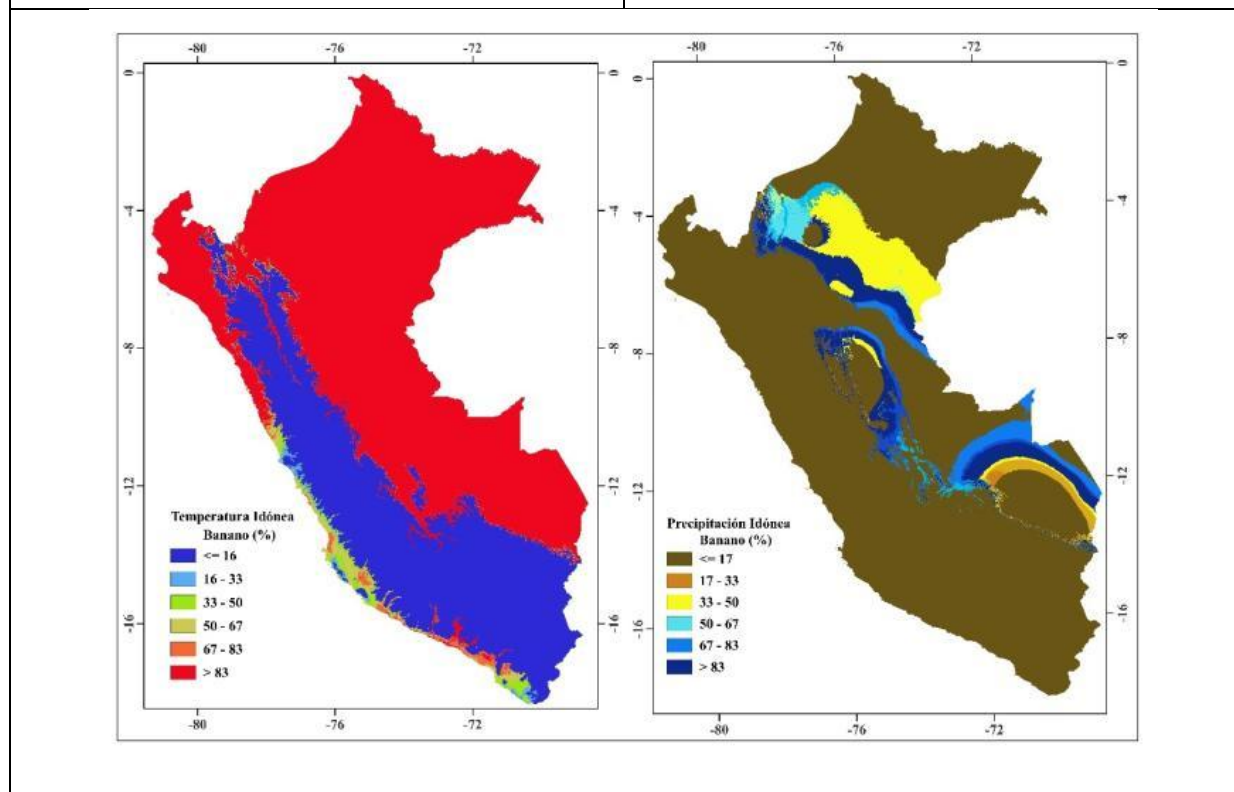
**Figura 4.**

*Parámetros agroclimáticos idóneos para la ubicación de zonas óptimas en el cultivo del café y banano en el Perú, periodo comprendido entre el 2021 al 2040.*



(a) Temperatura idónea para el cultivo del café

(b) Precipitación idónea para el cultivo del café



(c) Temperatura idónea para el cultivo del banano

(d) Precipitación idónea para el cultivo del banano

### 3.2. Idoneidad de cultivo del *Coffea arabica L.* y *Musa paradisiaca L.* 2021-2040.

En la figura 4, se observa la idoneidad de cultivo del café y banano con un índice de idoneidad que va desde el 0% hasta el 100%, donde las zonas con idoneidad perfecta óptimas corresponden a las zonas en color verde (>83%).

En el caso del café, ver figura 4 (a), se destacan diversas regiones con áreas de cultivo de climas óptimos para su desarrollo productivo. Entre estas regiones se encuentran Loreto, Amazonas, Cajamarca, San Martín, Huánuco, Cerro de Pasco, Ucayali, Huancayo, Madre de Dios, Cuzco, Puno, Junín y Ayacucho. Cada una de estas regiones presenta áreas específicas con características adecuadas para el cultivo del café. Asimismo, se pueden identificar extensiones significativas en regiones como Amazonas, San Martín, Huánuco, Pasco, Junín y Cuzco, que son especialmente propicias para el desarrollo de este cultivo.

En los últimos años el departamento de Junín, Cajamarca, Amazonas y San Martín se ha caracterizado por tener actitudes climáticas óptimas para el desarrollo del cultivo de café, es más actualmente son los departamentos con mayor producción (Cafes del Perú, 2022), y solo Amazonas, San Martín y Junín conservarían su aptitud climática para el 2040. Actualmente los departamentos menos productivos de café por sus características climáticas son: Piura, Huánuco, Ayacucho y Puno (Cafes del Perú, 2022), de estos 4 departamentos solo Piura dejaría de tener condiciones climáticas óptimas para el desarrollo de cultivo y Huánuco, Ayacucho junto a Puno continuarían desarrollando el cultivo de café, ver figura 4 (a).

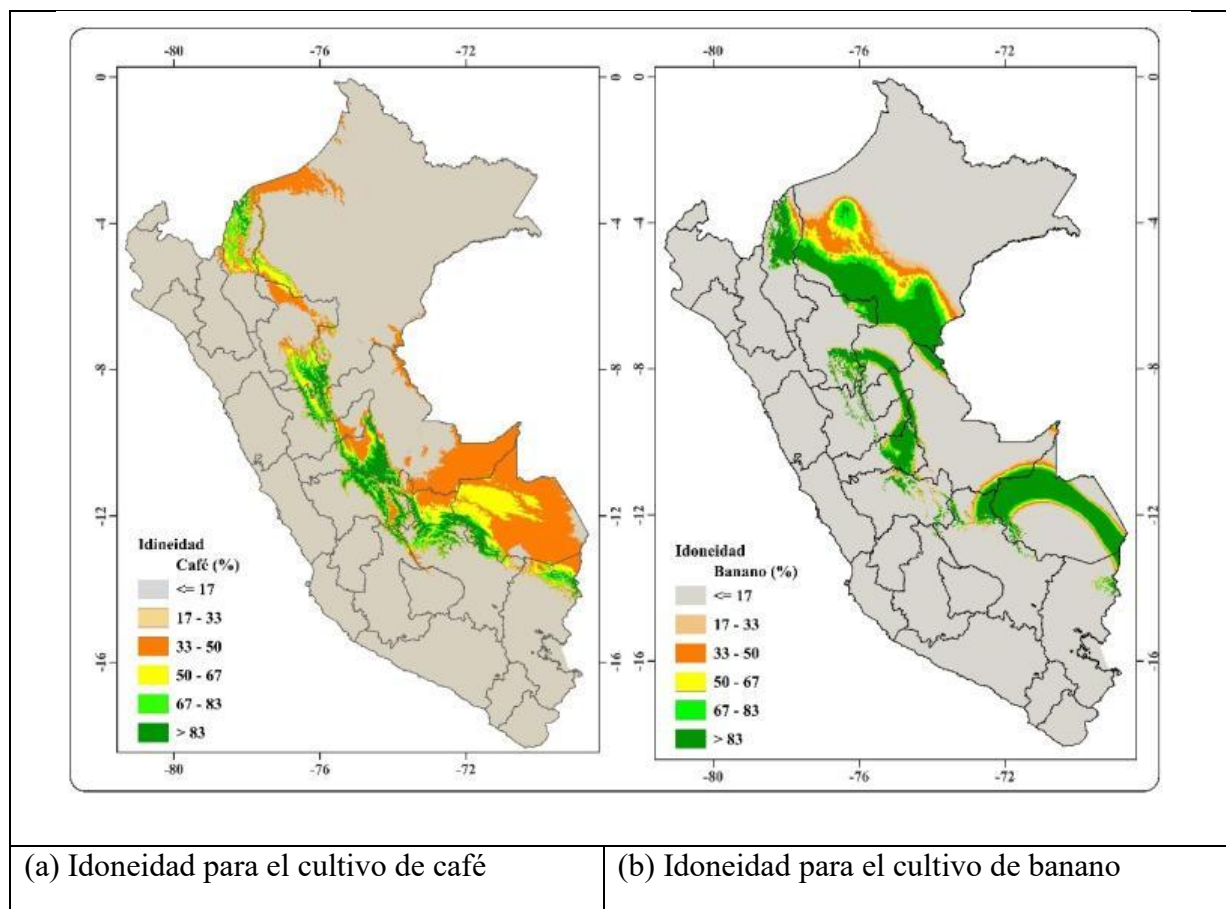
En la figura 4 (b), se evidencia la idoneidad de banano y las diferentes regiones con áreas de cultivo de climas óptimos para su desarrollo productivo. Entre estas regiones se encuentran Loreto, Amazonas, San Martín, Huánuco, Cerro de Pasco, Ucayali, Huancayo, Madre de Dios, Cuzco, Puno, y Junín. Cada una de estas regiones cuenta con áreas específicas que ofrecen condiciones óptimas para el cultivo del banano. Además, se pueden identificar extensiones en regiones como Amazonas, Loreto, Cerro de Pasco y Madre de Dios, las cuales presentan condiciones favorables para el desarrollo de este cultivo.

Actualmente los departamentos de Piura, San Martín, Loreto, Ucayali, Huánuco y Junín se han caracterizado por tener cualidades climáticas óptimas para el desarrollo del cultivo de banano, y además son los departamentos con mayor producción (SIEA, 2023). Para el año 2040, se proyecta que solo las regiones de San Martín y Loreto mantendrán niveles altos de producción en el cultivo, gracias a su extensa área adecuada para esta actividad productiva. Por otro lado, Huánuco y Junín experimentarán una disminución en su participación en comparación con su contribución actual, pero aún conservarán condiciones climáticas favorables para el desarrollo de la producción y Piura pasaría a tener una idoneidad 0%.

En la actualidad, según (SIEA, 2023) los departamentos menos productivos de banano por sus características climáticas son: Tumbes, Lambayeque, La Libertad, Amazonas y Cerro de Pasco (SIEA, 2023), de estos 5 departamentos Tumbes, Lambayeque y la Libertad dejarían de tener condiciones climáticas óptimas para el desarrollo del cultivo y Amazonas junto a Cerro de Pasco continuarían desarrollando el cultivo de banano, ver figura 4 apartado (b).

**Figura 5.**

*Porcentaje de idoneidad de cultivo del Café y Banano del 2021 al 2040*



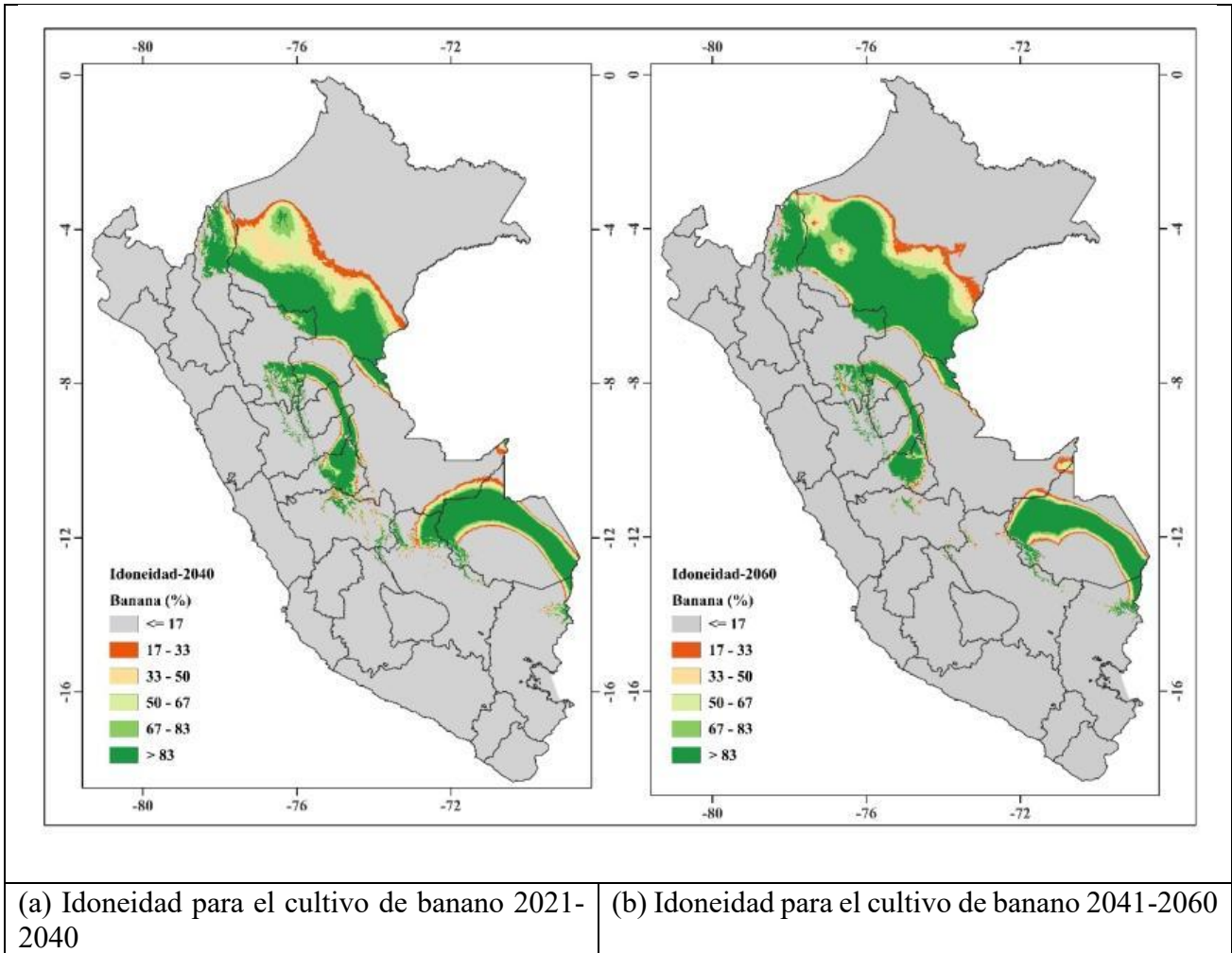
**3.3. Idoneidad de cultivo del Banano 2021-2040 y 2041-2060.**

En la figura 5 se observa la idoneidad de cultivo del Banano para el 2021-2040 y 2041-2060 con un índice de idoneidad que va desde el 0% hasta el 100%, donde las zonas con idoneidad perfecta óptimas corresponden a las zonas en color verde (>83%) y la zona con idoneidad nula corresponde al color gris (<=17%). En la Figura 5(a) se observan los cambios proyectados en la idoneidad climática del cultivo de Banano para el período comprendido entre 2041 y 2060, donde se puede identificar que la región de Loreto experimentará los mayores cambios en cuanto a la idoneidad climática del Banano. Es interesante observar que las zonas que mostraban una idoneidad climática baja (33% - 50%) durante el período 2021-2040 se verán favorecidas, ya que se espera que alcancen una idoneidad climática perfecta (83% y 100%) para el período 2041-2060.

Los hallazgos sugieren un panorama positivo para el cultivo de Banano principalmente en el departamento de Loreto durante las próximas décadas. Además de los cambios mencionados, también se puede observar en la figura que otras regiones presentan variaciones (positivas y negativas) en la idoneidad climática del cultivo de Banano para el periodo 2041-2060. Por ejemplo, se aprecian cambios negativos en la idoneidad climática en zonas de la región de Ucayali.

**Figura 6.**

*Porcentaje de idoneidad de cultivo del Banano del 2021 al 2040 y 2041 al 2060*



**3.4. Análisis de la movilidad de las áreas con idoneidad climática del Banano periodo 2021 al 2040 y 2041 al 2060.**

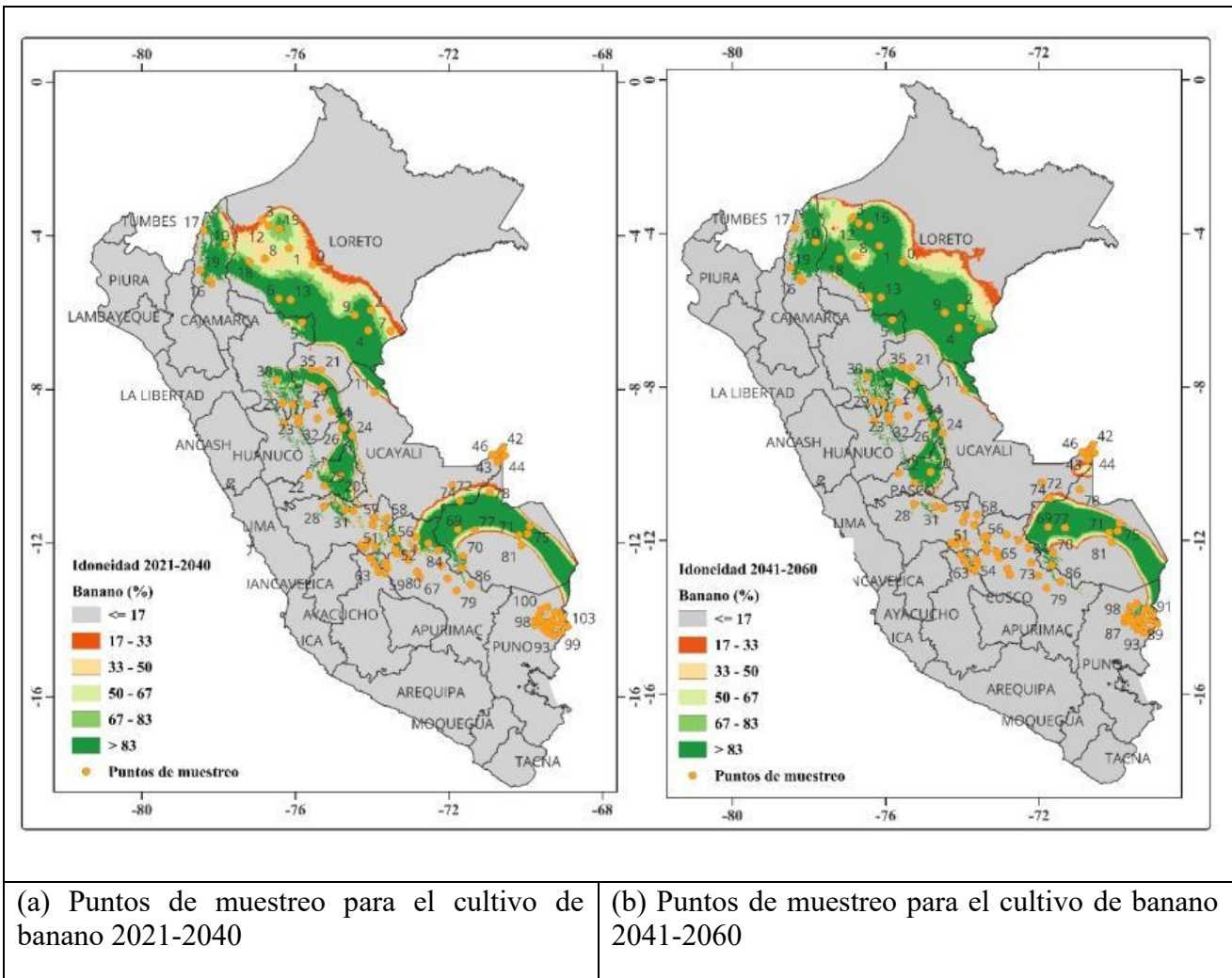
Para realizar un análisis detallado relacionado a los cambios de idoneidad climática de Banano periodo 2021 al 2040 y 2041 al 2060 se han generado puntos de muestreo aleatorios a través del software QGIS haciendo uso de la caja de herramientas “creación de vectores” en la opción “puntos aleatorios sobre áreas”. En total, se han generado 107 puntos de muestreo distribuidos aleatoriamente en las diversas regiones que abarcan desde un 0% hasta un 100% de idoneidad climática, ver figura 6.

La generación de puntos de muestreo aleatorios juega un papel crucial en la identificación de cambios en la idoneidad climática del cultivo de Banano en el periodo 2041-2060 (a) en comparación con el periodo 2021-2040 (b), estos puntos ofrecerán información relacionada a los cambios que afrontarán determinadas áreas en las diferentes regiones del país.

Por lo que, ambos escenarios permiten obtener información relevante sobre los cambios que enfrentarán áreas específicas en diferentes regiones del país. Este análisis proporcionará una comprensión más completa y precisa de los efectos del cambio climático en la idoneidad del cultivo de Banano en los próximos años.

**Figura 7.**

*Análisis de la movilidad de las áreas con idoneidad climática del banano periodo 2021 al 2040 y 2041 al 2060.*



**3.4.1 Evaluación de la movilidad de las áreas con idoneidad climática del Banano 2041 al 2060 respecto al periodo 2021 al 2040.**

En la figura 7 se observa la evaluación de la movilidad de las áreas con idoneidad climática del banano 2041 al 2060 respecto al periodo 2021 al 2040 (a y b).

La figura 7 (a) muestra la distribución de los 107 puntos muestrales sobre las regiones del país y los cambios (positivos y negativos) en la idoneidad climática que pueden experimentar para el periodo 2041-2060. Por ejemplo, Loreto es la región con mayor presencia de áreas con cambios positivos respecto a la idoneidad climática para el periodo 2041-2060, llegando a experimentar cambios de hasta el 60%. Este hallazgo sugiere un panorama alentador para el cultivo de Banano en dicha región durante las próximas décadas. Para el caso de Ucayali sucede todo lo contrario, es la región con mayor presencia de áreas que sufrirá cambios negativos respecto a la idoneidad climática para el periodo 2041-2060, llegando a sufrir cambios de hasta -72%.

En la figura 7 (b) muestra los cambios de la idoneidad climática en función de la altitud, donde podemos afirmar que los cambios (positivos y negativos) de la idoneidad climática se concentran en un rango de altitud entre [121-1980], por debajo y encima del rango los cambios son cero, es decir la idoneidad climática se moverá en zonas no menores a 121m y no mayores a 1980m



Además, la suma de cuadrados dentro de los grupos es sustancialmente mayor que la suma de cuadrados entre los grupos, lo que sugiere que la variabilidad dentro de cada período es menos relevante y que las diferencias entre los períodos estudiados si presenta variabilidad.

En resumen, según el análisis de varianza, se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los períodos de cultivo de banano en relación con las variables analizadas.

**Tabla 5**

*Análisis de varianza presentan resultados relacionados con el cultivo de banano en dos períodos distintos (2021-2041 y 2041-2060).*

**RESUMEN**

Grupos	Cuenta	S	M	s <sup>2</sup>
Banano 2021-2041	107	3284	30.6916	1533.44
Banano 2041-2060	107	3115	29.1121	1839.19

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

Origen de las variaciones	SS	GL	MSS	F	P>t	Valor crítico para F
Entre grupos	133.463	1	133.463	0.07914	0.779	3.885696511
Dentro de los grupos	357499	212	1686.32			
Total	357633	213				

**4. CONCLUSIONES**

El modelo de evaluación de la idoneidad de la tierra propuesto, consideró variables agroclimáticas determinantes para la idoneidad de un cultivo en una zona específica. Se destaca el considerable potencial de este enfoque para evaluar los problemas de seguridad alimentaria a nivel mundial y regional, las limitaciones climáticas generales y los cambios regionales en la idoneidad de los cultivos en el contexto del cambio climático.

Dicho modelo logró prever zonas óptimas a partir de requerimientos agroclimáticos y cómo interactúan las variables (temperatura y precipitación) para generar una salida (idoneidad de cultivo a futuro). El cultivo del *Coffea arabica L.* (café) en Amazonas, San Martín y Junín conservarían su idoneidad agrícola al 2040 con un grado de idoneidad óptima mayor al 83%; mientras que, Piura con un SUIT menor al 17% dejaría de tener condiciones climáticas óptimas para el desarrollo de dicho cultivo.

La idoneidad de la *Musa paradisiaca L.* (banano) en Amazonas, Loreto, Cerro de Pasco, San Martín, Pucallpa y Madre de Dios, presentaría condiciones favorables para su desarrollo, siendo Loreto quien mayor presencia de áreas con cambios positivos posea respecto a la idoneidad climática para el periodo 2041-2060, con tendencia variable hasta el 60%.

En Ucayali, Cuzco, Junín, Madre de Dios y Puno sucede todo lo contrario, regiones con mayor presencia de áreas que sufrirían cambios negativos respecto a la idoneidad climática para el periodo 2041-2060, con cambios de hasta -72%. Finalmente, las zonas con mayor presencia de cambios en la idoneidad del cultivo de *Musa paradisiaca L.* serían aquellas de altitud comprendida por el rango [121-1980] ms.n.m. de tal manera que las zonas por debajo de 121 ms.n.m y por encima de 1980 ms.n.m no se verían afectadas.

Posteriormente a ello, mediante análisis ANOVA, se determinó que existen diferencias estadísticamente significativas entre los períodos de cultivo de banano en relación con las variables consideradas, afirmando que, el *Coffea arabica L.* presenta una clara demarcación entre

la situación pasada y la proyección futura, con desplazamientos de la idoneidad climática hacia diferentes zonas dentro de cada departamento. El departamento de Junín exhibía condiciones propicias y abundantes para el desarrollo del cultivo de café, siendo entonces el líder en producción junto con el departamento de San Martín (Cafés del Perú, 2022), y ambos conservaban su idoneidad climática hasta el año 2040. En contraste, los departamentos menos productivos para el café debido a sus características climáticas, como Piura, Huánuco, Ayacucho y Puno (Cafés del Perú, 2022), perdían su idoneidad para la producción de café.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bjorn Moller, A., Mulder, V., & Heuvelink, G. (2021). Can We Use Machine Learning for Agricultural Land Suitability Assessment? *agronomy*. doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy11040703>
- Cafes del Perú. (2022). *Producción del Café*. Retrieved from <https://sites.peru.info/es-pe/cafesdelperu/produccion-en-el-peru>
- Campbell-Lendrum, D., Woodruff, R., Prüss-Üstün, A., Corvalán, C., & Organización Mundial de la Salud . (2007). Cambio climático: cuantificación del impacto en la salud a nivel nacional y local / Diarmid Campbell-Lendrum, Rosalie Woodruff; editores, Annette Prüss-Üstün, Carlos Corvalán. Retrieved from <https://apps.who.int/iris/handle/10665/43708>
- De Rhys , M., Varela-Ortega , C., & Van Etten , J. (2020). Idoneidad de los cultivos de leguminosas y pseudocereales ricos en proteínas en los climas europeos actuales y futuros. *European Journal of Agronomy*, 113(125974). doi:<https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125974>
- El Baroudy, A.A. (2016). Mapping and evaluating land suitability using a GIS-based model. *CATENA*, Volume 140, Pages 96-104, ISSN 0341-8162, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.12.010>.
- Emre Tercan, Mehmet Ali Dereli. (2020). Development of a land suitability model for citrus cultivation using GIS and multi-criteria assessment techniques in Antalya province of Turkey, *Ecological Indicators*, Volume 117, 106549, ISSN 1470-160X, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106549>.
- FAO. (n.d.). *Crop Ecological Requirements Database (ECOCROP)*. Retrieved 2 de mayo de 2023, from <http://www.fao.org/land-water/land/land-governance/land-resources-planning-toolbox/category/details/en/c/1027491/>
- Han C, Chen S, Yu Y, Xu Z, Zhu B, Xu X, Wang Z. (2021). Evaluación de la idoneidad de las tierras agrícolas basada en RS, AHP y MEA: un estudio de caso en la provincia de Jilin, China. *Agricultura*.11(4):370. <https://doi.org/10.3390/agriculture11040370>
- Hijmans, R., & Fick, E. (2017). WorldClim 2: nuevas superficies climáticas de resolución espacial de 1 km para áreas terrestres globales. *International Journal of climatology*. doi: <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- IPCC. (2021). *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/>
- lesk , C., Rowhani , P., & Ramankutty, N. (2016). Influencia de los desastres meteorológicos extremos en la producción agrícola mundial. *Nature*. doi:<https://doi.org/10.1038/nature16467>
- Lobell , D. (2011). Global scale climate–crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environmental Research* .
- MIDAGRI. (2020). *Cartilla N° 11: Condiciones agroclimáticas del Banano*. Retrieved from [https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/biblioteca-virtual/estados-fenologicos/platano\\_condiciones\\_agroclimaticas.pdf](https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/biblioteca-virtual/estados-fenologicos/platano_condiciones_agroclimaticas.pdf)

- MIDAGRI. (2021). *Condiciones agroclimáticas del banano*. Retrieved from [https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/biblioteca-virtual/estados-fenologicos/platano\\_condiciones\\_agroclimaticas.pdf](https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/biblioteca-virtual/estados-fenologicos/platano_condiciones_agroclimaticas.pdf)
- MIDAGRI. (2022). *Atlas agropecuario*. Retrieved from <https://www.gob.pe/midagri>
- Mulder, V., van Eck, C., Friedlingstein, P., Arrouays, D., & Regnier, P. (2019). Controlling factors for land productivity under extreme climatic events in continental Europe and the Mediterranean Basin. *Catena*, 182(104124). doi:<https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104124>
- Myers, S., Zanobetti, A., Kloog, I., & et al. (2014). El aumento de CO<sub>2</sub> amenaza la nutrición humana. *Nature*. Retrieved from <https://www.nature.com/articles/nature13179>
- OMM. (2021). *Organización Meteorológica Mundial*. Retrieved from <https://public.wmo.int/es>
- Ramírez-Villegas, J., Jarvis, A., & Laderach, P. (2013). Enfoques empíricos para evaluar los impactos del cambio climático en la agricultura: el modelo EcoCrop y un estudio de caso con sorgo en grano. *Agricultural and Forest Meteorology*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.09.005>
- Remesh, K., Byju, G., Soman, S., Raju, S., & Ravi, V. (2019). Future changes in mean temperature and total precipitation and climate suitability of yam (*Dioscorea* spp.) in major yam-growing environments in India. *Current Horticulture*, 7. doi:10.5958/2455-7560.2019.00005.0
- Schlenker, W., & Roberts, M. (2009). Los efectos no lineales de la temperatura indican daños severos a los rendimientos de los cultivos de EE. UU. debido al cambio climático. *PNAS*. doi:<https://doi.org/10.1073/pnas.090686510>
- SIEA. (2023). *Sistema integral de estadísticas agrarias*. Retrieved from <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNzEzNTU2MmUtY2EzZC00YjQ2LTg5YzUtYzJjODRhZjg5NGY5IiwidCI6IjdmMDg0NjI3LTdmNDAtNDg3OS04OTE3LTk0Yjg2ZmQzNWYzZiJ9>
- Taghizadeh-Mehrjardi R, Nabiollahi K, Rasoli L, Kerry R, Scholten T. (2020). Evaluación de la idoneidad de la tierra y sostenibilidad de la producción agrícola mediante modelos de aprendizaje automático. *Agronomía*. 10(4):573. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040573>
- Thompson, N., Bir, C., & Widmar, N. (2018). Percepciones de riesgo de los agricultores en 2017. *Agrobusiness*, 35, 182–199. doi: <https://doi.org/10.1002/agr.21566>
- Thornton, P. (2014). Variabilidad climática y vulnerabilidad al cambio climático: una revisión. *Global Change Biology*.
- UNEP FI. (2021). *Grupo de trabajo sobre finanzas del clima de las Naciones Unidas*. Retrieved from <https://www.unepfi.org/>
- Zampieri, M., Ceglar, A., Dentener, F., & Toreti, A. (2017). Pérdida de rendimiento de trigo atribuible a olas de calor, sequía y exceso de agua a escala mundial, nacional y subnacional. *Environmental Research Letters*. doi:10.1088/1748-9326/aa723b
- Kjellstrom T, Weaver HJ. Climate change and health: impacts, vulnerability, adaptation and mitigation. *N S W Public Health Bull*. 2009 Jan-Feb;20(1-2):5-9. doi: 10.1071/nb08053. PMID: 19261209.