

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA  
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**“ZONIFICACIÓN AGROECOLÓGICA DEL DURAZNERO, USANDO  
SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN EL DISTRITO  
DE SAN PABLO DE PILLAO, HUÁNUCO”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO AGRÍCOLA**

**LEONARDO FLAVIO GUTIERREZ LOPE**

**LIMA-PERÚ**

**2020**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

**“ZONIFICACIÓN AGROECOLÓGICA DEL DURAZNERO, USANDO  
SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN EL DISTRITO DE  
SAN PABLO DE PILLAO, HUÁNUCO”**

TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE:

**INGENIERO AGRÍCOLA**

Presentado por:

**BACH. LEONARDO FLAVIO GUTIERREZ LOPE**

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Dr. VÍCTOR LEVINGSTON PEÑA GUILLÉN  
Presidente

Dr. RAÚL ARNALDO ESPINOZA VILLAR  
Asesor

Arq. TAÍCIA HELENA NEGRIN MARQUES  
Miembro

Mestre JORGE LUIS DÍAZ RIMARACHIN  
Miembro

LIMA – PERU

2020

## **DEDICATORIA**

“Dedicado a mis familiares por su apoyo y aportes durante el desarrollo de cada etapa de  
mi vida”

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi asesor de tesis, Dr. Espinoza Villar Raúl, por su colaboración con sus conocimientos y en especial por el tiempo brindado en cada etapa del desarrollo de la investigación. A mis jurados: Dr. Victor Peña, Arq. Taicia Negrín e Ing. Jorge Díaz por su colaboración, paciencia y tiempo otorgado durante el desarrollo del proyecto de tesis y la tesis.

A los desarrolladores y colaboradores del software libre de código abierto a nivel mundial y a los divulgadores de esta información a nivel nacional e internacional. Al Circulo de Investigación y Desarrollo de los Recursos Hídricos (CIDRHI), por las oportunidades de acceder a conocimientos innovadores y al acercamiento a investigadores nacionales e internacionales en las áreas de recursos hídricos y de sistemas de información geográfica.

A los pobladores del distrito de San Pablo de Pillao, Huánuco por su atención, apoyo y guía para el desarrollo de campo de esta investigación.

## Índice general

<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. OBJETIVOS . . . . .	2
1.1.1. OBJETIVO GENERAL . . . . .	2
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS . . . . .	2
<b>II. REVISIÓN LITERARIA</b>	<b>3</b>
2.1. Duraznero . . . . .	3
2.1.1. Origen . . . . .	3
2.1.2. Descripción taxonómica . . . . .	4
2.1.3. Descripción botánica . . . . .	4
2.1.4. Variedad huayco rojo . . . . .	5
2.1.5. Ciclo fenológico . . . . .	6
2.1.6. Requerimientos agroecológicos . . . . .	7
2.1.7. Producción a nivel mundial . . . . .	12
2.1.8. Producción en Perú . . . . .	12
2.1.9. Producción en Huánuco . . . . .	12
2.1.10. Producción en San Pablo de Pillao . . . . .	14
2.2. Ordenamiento territorial . . . . .	15
2.3. Agroecología . . . . .	15
2.4. Zonificación . . . . .	15
2.4.1. Meso-zonificación . . . . .	15
2.4.2. Zonificación Agroecológica (ZAE) . . . . .	16
2.4.3. Zonificación Económica Ecológica (ZEE) . . . . .	16
2.5. Factores determinantes en la Zonificación Agroecológica del duraznero . .	16
2.5.1. Geomorfología . . . . .	16

2.5.2.	Hipsometría . . . . .	17
2.5.3.	Climatología . . . . .	17
2.5.4.	Edafología . . . . .	19
2.6.	Modelo de Zonificación Agroecológica . . . . .	22
2.7.	Sistema de Información Geográfica . . . . .	22
2.7.1.	Representación espacial de datos . . . . .	23
2.7.2.	Aplicación en la Zonificación Agroecológica . . . . .	23
2.8.	Teledetección . . . . .	24
2.8.1.	Plataformas de Teledetección . . . . .	24
2.8.2.	Sensores de Teledetección . . . . .	24
2.8.3.	Satélites y productos de observación terrestre . . . . .	25
2.8.4.	Productos satelitales de observación climática . . . . .	26
2.9.	Análisis multicriterio de decisiones (MCDA) . . . . .	28
2.9.1.	Aplicación en la identificación de zonas agroecológicas . . . . .	29

### **III.METODOLOGÍA** **31**

3.1.	Ubicación de la zona de estudio . . . . .	31
3.1.1.	Ubicación geográfica . . . . .	31
3.1.2.	Ubicación política . . . . .	32
3.1.3.	Distribución de la superficie agrícola . . . . .	32
3.1.4.	Clima . . . . .	33
3.2.	Etapa preliminar . . . . .	34
3.2.1.	Recopilación de información del duraznero . . . . .	34
3.2.2.	Recopilación de información geográfica, climática y de suelos del distrito . . . . .	34
3.2.3.	Estimaciones climáticas . . . . .	36
3.2.4.	Modelo de Zonificación Agroecológica . . . . .	41
3.3.	Identificación de variables agroecológicas . . . . .	43
3.4.	Preparación de mapas base . . . . .	43
3.5.	Determinación de pesos de sub-criterios y criterios . . . . .	43

3.5.1.	Estimación de pesos de sub-criterios y criterios . . . . .	43
3.5.2.	Análisis de consistencia . . . . .	45
3.6.	Etapa de campo . . . . .	46
3.6.1.	Ubicación de calicatas . . . . .	46
3.6.2.	Toma de muestras de calicatas . . . . .	47
3.7.	Etapa de laboratorio . . . . .	47
3.7.1.	Análisis de muestras de suelos . . . . .	47
3.8.	Etapa de geoprocesamiento . . . . .	47
3.8.1.	Determinación de errores de mapas de sub-criterios . . . . .	48
3.8.2.	Estandarización de mapas . . . . .	51
3.8.3.	Mapa de sub-criterios ponderados . . . . .	51
3.8.4.	Restricciones del mapa de Zonificación Agroecológica . . . . .	51
3.8.5.	Mapa de Zonificación Agroecológica final . . . . .	52
 <b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES</b>		<b>54</b>
4.1.	Variables agroecológicas del duraznero . . . . .	54
4.2.	Mapas de sub-criterios . . . . .	56
4.2.1.	Mapa de altitudes . . . . .	56
4.2.2.	Mapa de pendientes . . . . .	57
4.2.3.	Mapa de precipitación acumulada multi-anual . . . . .	58
4.2.4.	Análisis de la precipitación . . . . .	59
4.2.5.	Mapa de temperatura media . . . . .	60
4.2.6.	Análisis de la temperatura . . . . .	62
4.2.7.	Mapa de horas frío . . . . .	63
4.2.8.	Mapa de humedad relativa . . . . .	65
4.2.9.	Mapa de texturas de suelo . . . . .	66
4.2.10.	Mapa de materia orgánica . . . . .	67
4.2.11.	Mapa de pH . . . . .	68
4.2.12.	Mapa de salinidad . . . . .	68
4.2.13.	Mapa de taxonomía de suelos . . . . .	70

4.3. Análisis espacio-temporal de sequías hidrológicas . . . . .	70
4.3.1. Identificación de sequías . . . . .	70
4.3.2. Análisis de distribución espacial de probabilidad de sequías . . . . .	72
4.4. Determinación y validación de pesos de sub-criterios . . . . .	74
4.5. Ubicación de calicatas . . . . .	75
4.6. Análisis de muestras de suelos . . . . .	76
4.7. Determinación de errores de mapas de sub-criterios . . . . .	78
4.8. Estandarización de mapas . . . . .	79
4.9. Mapa de Zonificación Agroecológica preliminar . . . . .	84
4.10. Mapa de Restricciones . . . . .	85
4.11. Mapa de zonificación agroecológica del duraznero . . . . .	86
<b>V. CONCLUSIONES</b>	<b>89</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES</b>	<b>90</b>
<b>VII. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>91</b>
<b>VIII. ANEXOS</b>	<b>99</b>

## Índice de tablas

1.	<b>Rango de requerimientos agroecológicos del duraznero</b>	11
2.	<b>Rango de clasificación de salinidad</b>	26
3.	<b>Especificaciones técnicas de los datos raster</b>	35
4.	<b>Categorías de sequías definidas por el valor del índice SPI</b>	40
5.	<b>Escala de comparación pareada</b>	44
6.	<b>Índice de Consistencia Aleatorio (ICA)</b>	46
7.	<b>Criterios seleccionados para zonificación</b>	55
8.	<b>Probabilidad de ocurrencia de sequías promedio en el distrito de San Pablo de Pillao</b>	73
9.	<b>Determinación de pesos e índices de consistencia</b>	74
10.	<b>Ubicación de calicatas</b>	75
11.	<b>Resultados procesados de laboratorio</b>	77
12.	<b>Análisis de error</b>	78
13.	<b>Áreas y porcentajes de las zonas agroecológicas preliminares para el duraznero huayco rojo</b>	85
14.	<b>Áreas y porcentajes de la aptitud de la Z.E.E. de Huánuco</b>	86
15.	<b>Áreas y porcentajes de las zonas agroecológicas finales para el duraznero</b>	87
16.	<b>Resumen de áreas y porcentajes de zonas agroecológicas para el duraznero</b>	88

## Índice de figuras

1.	<b>Planta de duraznero . . . . .</b>	5
2.	<b>Comparación de precios de duraznero: variedad huayco rojo y blanquillo</b>	6
3.	<b>Durazno, variedad huayco Rojo . . . . .</b>	6
4.	<b>Variación temporal de indicadores económicos del duraznero en Perú .</b>	13
5.	<b>Variación temporal de indicadores económicos del duraznero en el departamento de Huánuco . . . . .</b>	13
6.	<b>Variación temporal de indicadores económicos del duraznero en San Pablo de Pillao . . . . .</b>	14
7.	<b>Diagrama de flujo de la investigación . . . . .</b>	31
8.	<b>Ubicación política . . . . .</b>	32
9.	<b>Distribución de la superficie agrícola en San Pablo de Pillao . . . . .</b>	33
10.	<b>Mapa Climático Nacional . . . . .</b>	34
11.	<b>Diagrama de flujo del geoprocesamiento de la ZAE . . . . .</b>	42
12.	<b>Mapa de restricción correspondiente al área de conservación “El Carpish” - Huánuco . . . . .</b>	52
13.	<b>Mapa de altitudes . . . . .</b>	56
14.	<b>Mapa de pendientes . . . . .</b>	57
15.	<b>Mapa de precipitación promedio . . . . .</b>	58
16.	<b>Análisis exploratorio de datos de precipitación 1990-2019 . . . . .</b>	60
17.	<b>Mapa de temperatura promedio . . . . .</b>	61
18.	<b>Análisis exploratorio de datos de temperatura promedio 1990-2019 . .</b>	63
19.	<b>Mapa de horas frío . . . . .</b>	64
20.	<b>Mapa de humedad relativa . . . . .</b>	65
21.	<b>Clasificación de suelos por triangulo textural . . . . .</b>	66

22.	<b>Mapa de texturas de suelo . . . . .</b>	67
23.	<b>Mapa de materia orgánica . . . . .</b>	68
24.	<b>Mapa de pH . . . . .</b>	69
25.	<b>Mapa de Salinidad . . . . .</b>	69
26.	<b>Mapa de distribución geográfica de taxonomía de suelos USDA . . . . .</b>	70
27.	<b>Serie temporal de SPI a escalas de 3, 6 y 12 meses . . . . .</b>	71
28.	<b>Distribución espacial de la probabilidad de ocurrencia de sequías . . . . .</b>	73
29.	<b>Mapa de ubicación de calicatas . . . . .</b>	76
30.	<b>Distribución espacial del nivel de aptitud de la altitud . . . . .</b>	79
31.	<b>Distribución espacial del nivel de aptitud de pendientes . . . . .</b>	80
32.	<b>Distribución espacial del nivel de aptitud de precipitación . . . . .</b>	80
33.	<b>Distribución espacial del nivel de aptitud de temperatura . . . . .</b>	81
34.	<b>Distribución espacial del nivel de aptitud de humedad relativa . . . . .</b>	81
35.	<b>Distribución espacial del nivel de aptitud de horas frío . . . . .</b>	82
36.	<b>Distribución espacial del nivel de aptitud de pH . . . . .</b>	82
37.	<b>Distribución espacial del nivel de aptitud del contenido de materia orgánica . . . . .</b>	83
38.	<b>Distribución espacial del nivel de aptitud de salinidad . . . . .</b>	83
39.	<b>Distribución espacial del nivel de aptitud de textura de suelo . . . . .</b>	84
40.	<b>Mapa preliminar de niveles de aptitud del duraznero huayco rojo . . . . .</b>	85
41.	<b>Mapa de restricciones . . . . .</b>	86
42.	<b>Mapa final de niveles de aptitud del duraznero . . . . .</b>	87
43.	<b>Mapa de zonificación agroecológica del duraznero y ubicación de centros poblados . . . . .</b>	88

## Índice de anexos

ANEXO 1: Mapas de la zona de estudio . . . . .	100
ANEXO 2: Tablas de matriz y análisis de pesos . . . . .	102
ANEXO 3: Gráficos de identificación de sequías . . . . .	104
ANEXO 4: Fotos de análisis de suelo . . . . .	105
ANEXO 5: Resultados de análisis de suelos . . . . .	107
ANEXO 6: Mapa de ZAE del duraznero . . . . .	109
ANEXO 7: Nivel de aptitud puntual del mapa de ZAE . . . . .	110

## RESUMEN

La planificación agrícola en las zonas rurales a través de la Zonificación Agroecológica (ZAE), es una herramienta útil para la agricultura de precisión y el desarrollo sostenible. Con este propósito, en el distrito de San Pablo de Pillao con un área de 59284.20 ha, se determinaron las áreas óptimas para el duraznero, frutal con un valor estable en el mercado y de mayor rentabilidad en Huánuco. Para aplicar los diversos sub-criterios determinantes en la ZAE (elevación, pendientes, precipitación, temperatura, horas frío, humedad relativa, salinidad, contenido de materia orgánica, acidez del suelo y clase textural), se requirió de técnicas geoestadísticas de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Luego, se empleó la metodología del Proceso Analítico Jerarquizado (APH), para determinar los pesos de cada sub-criterio, considerando su Relación de Consistencia (RC) y las opiniones de expertos en árboles frutales. Después, las áreas de la ZAE del duraznero fueron obtenidas al relacionar todos los mapas de sub-criterios con sus pesos respectivos. Finalmente, se determinó que el 3.9 % (2312.16 ha) del área de estudio tiene un nivel de aptitud óptimo, 14.36 % (8513.54 ha) aptitud media, 22.02 % (13053.28 ha) aptitud baja y el 59.72 % (35405.23 ha) no es apta para el cultivo del duraznero. Además, la evaluación de la probabilidad de ocurrencia de sequías extremas tiene una probabilidad de ocurrencia menor al 5 % y la existencia de tendencias significativas leves en las series temporales de precipitación y temperatura, indican que la variabilidad climática en la zona de estudio respecto a los rangos de tolerancia climática del duraznero, no afectarían su desarrollo a largo plazo. La aplicación de las metodologías de esta investigación para obtener la ZAE del duraznero, demuestran que con los sub-criterios usados, el distrito de San Pablo de Pillao presenta un alto potencial para la producción del duraznero.

**Palabras Clave:** Zonificación Agroecológica, Duraznero, Proceso Analítico Jerarquizado, Sistemas de Información Geográfica, San Pablo de Pillao, Sequías.

## ABSTRACT

Agricultural planning in rural areas through Agroecological Zoning (ZAE) is a useful tool for precision agriculture and sustainable development. For this purpose, in the district of San Pablo de Pillao with an area of 59284.20 ha, the optimal areas for the peach tree were determined, a fruit tree with a stable market value and the highest profitability in Huánuco. To apply the various determining sub-criteria in the ZAE (elevation, slopes, precipitation, temperature, cold hours, relative humidity, salinity, organic matter content, soil acidity and textural class), geostatistical techniques of the Systems of Geographic Information (GIS). Then, the methodology of the Hierarchical Analytical Process (APH) was used to determine the weights of each sub-criterion, considering their Consistency Ratio (CR) and the opinions of experts in fruit trees. Afterwards, the areas of the peach tree ZAE were obtained by relating all the sub-criteria maps with their respective weights. Finally, it was determined that 3.9 % (2312.16 ha) of the study area has an optimal suitability level, 14.36 % (8513.54 ha) medium suitability, 22.02 % (13053.28 ha) low suitability and 59.72 % (35405.23 ha) is not suitable for peach cultivation. In addition, the evaluation of the probability of occurrence of extreme droughts has a probability of occurrence of less than 5 % and the existence of slight significant trends in the time series of precipitation and temperature indicate that the climatic variability in the study area with respect to The ranges of climatic tolerance of the peach tree would not affect its long-term development. The application of the methodologies of this research to obtain the ZAE of the peach tree, show that with the sub-criteria used, the district of San Pablo de Pillao presents a high potential for the production of the peach tree.

**Key Words:** Agroecological Zoning, Peach, Hierarchical Analytical Process, Geographic Information Systems, San Pablo de Pillao, Droughts.

## I. INTRODUCCIÓN

En el distrito de San Pablo de Pillao en el departamento de Huánuco, la principal actividad de la Población Económicamente Activa Ocupada (PEAO) son las labores agropecuarias con un 86.57 %, según el Censo Nacional del 2017 (INEI, 2018). Sin embargo, debido a la falta de la planificación agroecológica en el aprovechamiento de las tierras de cultivo, esta actividad se realiza con un precario conocimiento de los potenciales de los recursos naturales del territorio. Por ello, el rendimiento económico de la actividad agrícola se reduce notablemente.

La mayoría de la población que realiza actividades agropecuarias, está orientada al cultivo de la papa, con una proporción de 64.9 %, como indica la Dirección Regional de Agricultura de Huánuco (DRAH, 2019). La papa posee una baja rentabilidad económica, con un rendimiento promedio de 15.636 Tn/ha (SIEA, 2018) y un precio promedio en chacra que varía entre S/. 0.47 a S/.1.19 por kilogramo (SIEA, 2018). La baja rentabilidad de la papa es consecuencia de la inestabilidad de los precios del mercado, falta de planificación de las campañas agrícolas y al bajo rendimiento por una inadecuada fertilidad de los suelos (Campos Blanco, 2014). Por ello, se requiere realizar la re-conversión productiva del cultivo de la papa hacia cultivos de mayor rentabilidad y demanda, con el objetivo de mejorar la economía familiar de los agricultores y su calidad de vida.

En esta investigación se propone identificar y evaluar la distribución espacial de las áreas con óptimo potencial para la siembra del duraznero, específicamente de la variedad Huayco rojo, debido a su alta aceptación en el mercado y requerimientos agroclimáticos presentes en el área de estudio (Castillo et al., 2012), mayor valor económico en el mercado, que alcanza en promedio el valor de S/. 3.50 por kilogramo (Herrera Sopla, 2018). Además, se elige el duraznero por recomendaciones de especialistas de Sierra y Selva Exportadora, que es un organismo público ejecutor adscrito al Ministerio de Agricultura (Daga, 2018).

La aplicación del Método de Análisis Multicriterio de Decisiones, empleando recursos de teledetección y de los sistemas de información geográfica (Zambrano, 2018), nos permitirán conocer la distribución espacial de las potencialidades de la zona de estudio óptimas para el duraznero. Este método permite identificar las superficies territoriales con características edafológicas, fisiográficas y climáticas óptimas para alcanzar el máximo rendimiento del duraznero, variedad huayco rojo.

Finalmente, la zonificación agroecológica nos permitirá hacer una gestión sostenible de los recursos naturales en la zona de estudio, mediante la planificación basada en el conocimiento territorial. En términos de ordenamiento territorial, la zonificación agroecológica a escala distrital es un aporte a las políticas y decisiones gubernamentales o empresariales para la planificación y el fomento de múltiples cultivos, como el duraznero.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 OBJETIVO GENERAL**

Elaborar una propuesta de Zonificación Agroecológica (ZAE) para el cultivo del duraznero en el distrito de San Pablo de Pillao, en Huánuco, a partir del análisis de las condiciones fisiogeográficas, climáticas y edáficas con el fin de lograr el máximo rendimiento del duraznero variedad Huayco rojo.

### **1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Analizar la influencia de la variabilidad climática multi-anual y los eventos extremos como sequías, en la propuesta de zonificación agroecológica.
2. Comparar la calidad física y química del suelo de los modelos digitales, con muestras representativas de suelo en la zona de estudio.
3. Clasificar la distribución espacial de los niveles de aptitud en la zona de estudio, teniendo en cuenta su fisiogeografía, edafología y climatología.

## II. REVISIÓN LITERARIA

### 2.1 Duraznero

#### 2.1.1 Origen

El duraznero o melocotonero, es un árbol frutal distribuido ampliamente por las zonas templadas del todo el mundo. Nava et al. (2005), precisan que esta fruta tuvo su origen en las riveras altas del valle de Río Amarillo, provincias de Shaanxi y Gangsu China, posteriormente fue introducido por los persas a Grecia para después extenderse hacia el Norte de Europa. Luego, en los siglos XV y XVI se diseminó a Inglaterra, Bélgica, Países Bajos y Alemania. Llegando a ser conocidos allí como fruta pérsica, de ahí el nombre científico *Prunus pérsica*. Nava et al. (2005) señala la posibilidad de la introducción del duraznero en Florida en el siglo XVI, extendiéndose en casi todas las entidades de Estados Unidos hasta llegar a diversos países latinoamericanos, como Perú.

Gratacós (2004), expone que como consecuencia del continuo trabajo de mejoramiento genético, el duraznero ha evolucionado muchísimo desde su estado silvestre hasta nuestros días. Es el frutal con mayor número de variedades, apareciendo constantemente nuevos cultivares, con mejores características, especialmente en su fruta.

### 2.1.2 Descripción taxonómica

Baíza (2004) y Coz et al. (2010), manifiestan que el melocotonero tiene la siguiente clasificación taxonómica:

- Reino: Vegetal
- Clase: Dicotiledóneas
- Subclase: Dicotiledoneae
- Orden: Drupáceas
- Familia: Rosacea
- Subfamilia: Prunoidea
- Genero: *Prunus*
- Especie: *Prunus persica* L. Batsh
- Nombre común: Duraznero, Melocotonero

### 2.1.3 Descripción botánica

La descripción botánica del melocotón según Baíza (2004), consiste de un sistema radical profundo con una raíz central muy larga. Su tallo corresponde al de un árbol pequeño con tronco medianamente grueso, su copa mide de 5 a 6 metros, de forma ovalada y aplomada. Las hojas son simples, lanceoladas, medianas y de bordes aserrados que se encuentran espaciadas, colocadas en forma alterna en las ramas, las cuales son gruesas y divergentes. Sus flores son generalmente solitarias, pequeñas y de color rosa a rojo (Figura 1). El fruto es una drupa de gran tamaño, con forma semiesférica; con un surco longitudinal muy marcado. Posee una epidermis delgada y lisa con tonalidades amarillas, rojas y púrpuras. El mesocarpo es succulento de color blanco, amarillo o rojizo, mientras que el endocarpo, de hueso o carozo contiene una semilla.



**Figura 1: Planta de duraznero**

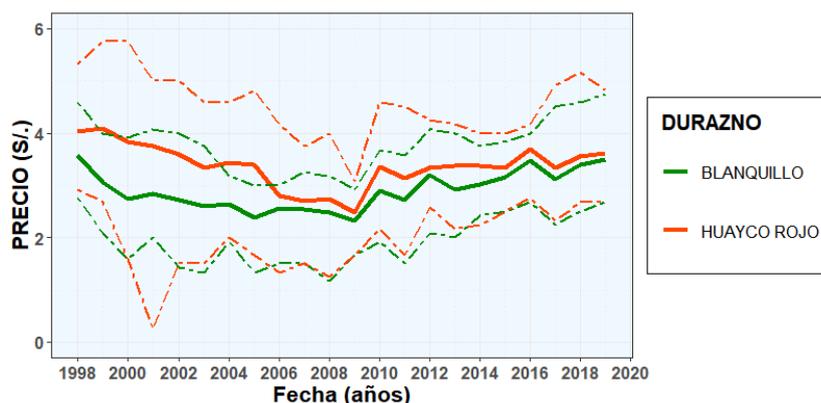
**Fuente: Baráibar et al. (2014)**

#### **2.1.4 Variedad huayco rojo**

Existen diversas variedades de duraznero, para la elección dependerá de los siguientes factores como la adaptación a las condiciones climáticas de la zona y la demanda del mercado, según ilustran Castillo et al. (2012).

Según las investigaciones de Coz et al. (2010), la variedad de duraznero que más se adapta al clima de la provincia de Huánuco es la variedad huayco rojo, además, presenta características deseables para la comercialización, frutos de buena calidad y tamaño para la comercialización e industrialización alimentaria.

Existen otras variedades cultivadas en la provincia de Huánuco, una de ellas es la variedad blanquillo, presentada por Coz et al. (2010). Sin embargo, al comparar las series de tiempo de los precios promedio entre la variedad de duraznero huayco rojo y blanquillo en el periodo 1998 al 2019, el Sistema de Abastecimiento y Precios (SISAP) posiciona como ligeramente superior a la variedad huayco rojo, específicamente en el 2019 esta variedad alcanza un precio máximo por kilo de S/. 4.83, promedio de S/. 3.62 y mínimo de S/. 2.67 (Figura 2).



**Figura 2: Comparación de precios de duraznero: variedad huayco rojo y blanquillo**

**Fuente: Castillo et al. (2012)**

El huayco rojo es descrito por Castillo et al. (2012) como un cultivo con ciclo productivo promedio de 7 meses, inicio de producción al tercer año de siembra, caracterizado por tener un fruto de mediano a pequeño tamaño, de forma redondeada, con la cascara de color amarillo y cubierto con chapas rojas que la cubren casi en su totalidad; tiene una pulpa consistente, fibrosa y jugosa, de sabor agradable, con ligera acidez; y presenta un ligero aroma en relación a otras variedades de duraznero. A continuación, se presenta en la Figura 3, esta variedad de duraznero.



**Figura 3: Durazno, variedad huayco Rojo**

**Fuente: Castillo et al. (2012)**

### **2.1.5 Ciclo fenológico**

La fenología del duraznero muestra un comportamiento característico de dos etapas definidas: una fase de actividad vegetativa y otra de dormancia o reposo, en donde se distinguen claramente las fases de caída de hojas, desnudamiento, hinchamiento de yemas, formación de cáliz, floración, caída de pétalos, desarrollo y madurez del fruto; según explica Baíza

(2004).

En términos generales, Merlet et al. (1989) determinan que el duraznero tiene una fenología por estaciones como sigue a continuación: el hinchamiento de las yemas a fines de invierno (agosto), la floración se realiza a inicios de la primavera (agosto-septiembre), seguido por el desarrollo del fruto en plena primavera e inicios del verano (octubre-diciembre); luego el fruto se cosecha y el duraznero entra en una etapa de caída de las hojas a mediados de otoño y en invierno (mayo-junio).

Baíza (2004) señala que la producción del duraznero inicia después del cuarto año de su siembra, desde este año la producción se incrementa progresivamente hasta alcanzar su producción plena en el noveno año. Una investigación sobre el estudio de mercado de este frutal en Cuzco (Abiega Peña, 2019), sugiere renovar las plantaciones de duraznero cada 20 o 25 años con el objetivo de mantener su flujo de producción anual.

### **2.1.6 Requerimientos agroecológicos**

Los requerimientos agroecológicos del duraznero son determinados a partir de una revisión bibliográfica de diversas investigaciones que identifican las condiciones mínimas y óptimas para el desarrollo del duraznero. Al final de esta sección se sintetizarán estos requerimientos en la Tabla 1.

#### **Clima**

El clima templado es el más adecuado para el duraznero, igualmente se ha adaptado a climas sub-tropicales y tropicales de altura (Baíza, 2004). Castillo et al. (2012), sostienen que la temperatura óptima para el duraznero está entre 21 a 27 C°. Asimismo, Silva et al. (2013), mencionan que las temperaturas favorables para el cultivo están en el rango de 4 a 26 C°. Por otro lado, Nava et al. (2005), reportan que para el desarrollo del cultivo la temperatura base o mínima es de 8 C° y el límite máximo es de 40 C°. Adicionalmente, Pinzón et al. (2014) fundamentan que las temperaturas alrededor de los 18 C° son adecuadas para el crecimiento, floración y desarrollo de los frutos de caducifolios como el duraznero.

Pinzón et al. (2014), exponen que la temperatura promedio del mes más frío no debe ser menor a 1 C°, debido a que se produciría daño o impedimento en el desarrollo de los frutos. Además, recomienda que las temperaturas mínimas no deben ser mayores a 13 C°.

Las etapas de floración y dormancia del duraznero requieren un número promedio de horas frío (HF) entre las 400 y 800 horas, con valores cercanos a los 7 C° durante la mayor parte del día por un espacio de dos meses, según recomiendan Castillo et al. (2012). Los efectos de la ausencia de las horas frío tienen efectos negativos en el fruto del duraznero que van desde desarrollo lento de la vegetación (déficit < 50 HF) hasta la pérdida total de la cosecha (déficit > 250 HF) según reporta Gratacós (2004). En efecto, Díaz et al. (2009), establecen como zonas con potencial alto a las que poseen un rango de 400 a 600 HF, potencial medio con valores entre 250 y 400 HF y zonas no aptas a las que tienen menos de 250 y más de 600 HF. Por último, Merlet et al. (1989), mencionan que los requerimientos de horas frío deben estar en el rango de 500 a 1000 para este cultivo.

Baíza (2004), advierte que el duraznero no debe cultivarse en lugares con heladas tardías frecuentes (temperaturas menores a 0 C°), ya que afectan a los árboles, provocando la muerte de las yemas y órganos sensibles del cultivo por efecto de las bajas temperaturas.

La radiación solar tiene una íntima relación con la fisiología de la planta, ya que el acortamiento de las horas luz por efectos, como nubosidad o neblina, pueden ocasionar suspensión del crecimiento del árbol o procesos de dormancia profunda. Por otra parte, al presentarse una radiación demasiado alta durante el reposo se puede impedir la brotación, debido al aumento de la temperatura de las yemas (Pinzón et al., 2014). En los estudios que realiza Karagiannis et al. (2016), se relaciona directamente la radiación solar con la obtención de color y concentración de azúcares.

Pinzón et al. (2014), consideran que un régimen de precipitaciones bimodal son las más favorables para el duraznero, ya que, se tiene un periodo seco que favorece la fase de pos-recolección y una época húmeda, esencial para la fase de desarrollo y crecimiento del fruto. Asimismo, el autor recomienda que para mantener los durazneros sanos y con buena calidad de frutos, las zonas más apropiadas son las que reciben menos de 1500 mm de lluvia anual,

en la fase reproductiva del árbol.

Por otro lado, Silva et al. (2013), indican que las precipitaciones anuales adecuadas se encuentran entre los 400 mm a 800 mm. En paralelo, Baíza (2004), recomienda zonas con precipitaciones a lo largo del año entre 1400 mm a 2200 mm.

Las condiciones de humedad relativa para el duraznero no deben ser superiores al 75 %, debido a la incidencia de enfermedades fungosas, especialmente por presencia de neblina o alta nubosidad (Baíza, 2004). Del mismo modo, estas condiciones deben ser superiores a los 40 % , ya que se correlaciona con incidencia de quemado de sol en frutos, especialmente al asociarse con temperaturas elevadas como detalla Gratacós (2004).

Por ultimo, Baíza (2004) recomienda que para efectos de la polinización natural y fructificación la velocidad del viento debe ser menor a 4 km/h. En tal sentido, la incidencia de fuertes vientos favorece la dispersión de plagas y enfermedades, incrementan el consumo de agua por una mayor evaporación desde el suelo y transpiración del follaje.

## **Suelo**

El duraznero se adapta a una gran variedad de suelos, de preferencia con texturas medias, bien aireados, profundos y de acidez del suelo (pH) moderada (Gratacós, 2004). La elección del suelo determinara la productividad y el tiempo de vida del cultivo, sostienen Castillo et al. (2012).

Baíza (2004) considera que el duraznero puede establecerse en suelos con textura arcillosa, siempre que se le incorpore abundante materia orgánica; las texturas francas, francoarenosas y francoarcillosas son las recomendadas. Del mismo modo, Silva et al. (2013), define los suelos franco arenosos como los óptimos para el duraznero. Según detallan Nava et al. (2005), las texturas con limitación moderada para este cultivo son aquellas con textura fina y textura muy gruesa. En este mismo contexto, Castillo et al. (2012), califican los suelos arcillosos, pesados y compactos como perjudiciales para el duraznero, porque permiten encharcamientos que causan asfixia radicular. Adicionalmente, Merlet et al. (1989) indican que los suelos con textura muy gruesa como los suelos arenosos, tienen una limitación moderada sobre este

cultivo.

Con respecto al contenido de materia orgánica Baíza (2004), establece que debe ser alto, con valores del 2.5 al 3.5 %; aunque en suelos demasiado arcillosos, deben contener del 3 al 4 %, para volverlo más esponjoso, suelto y con mayor aireación. Igualmente, Gratacós (2004), recomienda suelos con materia orgánica en el rango de 2 a 3.5 %. Mientras tanto, Castillo et al. (2012), presentan valores entre 1.3 % y 2.5 % como favorables para el desarrollo del cultivo.

El valor de pH ideal para este cultivo esta entre 6.2 a 6.8, el valor mínimo debe ser de 5.5 y el máximo de 7, como designa Baíza (2004). Otros autores como Castillo et al. (2012), recomiendan un rango moderado de 6 a 7.5; mientras que Nava et al. (2005), clasifican como rango óptimo a valores entre 5.6 a 7.1, con mínimos tolerados de 4.3 y máximos de 8.7. Por ultimo, Silva et al. (2013), definen el ph adecuado para este cultivo entre 6 a 7.

La tolerancia a la salinidad es moderada, para este cultivo. Según exponen Nava et al. (2005), el valor máximo tolerado de conductividad eléctrica para este cultivo es de 1.8 mmhos/cm, mientras que el valor critico es de 4.1 mmhos/cm. Paralelamente, Gratacós (2004) define como rango normal a valores menores a 2.6 dS/m, para el desarrollo del duraznero. De manera similar, Baíza (2004) especifica valores menores a 2 mmhos/cm como adecuados para los suelos del cultivo de duraznero.

Finalmente, Gratacós (2004) y Castillo et al. (2012) sugieren suelos con una profundidad no inferior a 1 m. Paralelamente, Nava et al. (2005) recomiendan niveles de pedregosidad optimas menores al 35 %, niveles de limitación moderada entre 35 y 60 % y una limitación severa para valores con pedregosidad mayor a 60 %.

### **Físico-geográficos**

Las zonas altitudinales para el cultivo del duraznero, están en función de las condiciones micro-climáticas particulares definidas por las irregularidades orográficas o fisiográficas, se sugieren estudios de las variaciones de la temperatura ambiental de los últimos 25 años para definir la ubicación de las plantaciones (Baíza, 2004). Por otro lado, el autor mencionado

considera ideal las áreas comprendidas entre las altitudes de 1500 y 2500 msnm, en zonas tropicales.

Pinzón et al. (2014), reportan que en Colombia las zonas con cultivos comerciales de duraznero se ubican en altitudes entre 1600 y 3300 msnm. Paralelamente, Coz et al. (2010), reportan que en Huánuco los cultivos comerciales de duraznero se encuentran entre las altitudes de 2670 a 2970 msnm. Por su parte, Silva et al. (2013), determinan un amplio rango altitudinal para el cultivo, desde 0 a 3200 msnm, siendo las altitudes óptimas entre 1400 a 2600 msnm.

Baíza (2004), sugiere ubicar las plantaciones en terrenos con topografía de pendiente plana, semiplana (5 %) a escarpada (45 %) para el desarrollo adecuado del duraznero. De la misma forma, Nava et al. (2005), clasifican las pendientes para este cultivo de la siguiente forma: sin limitaciones (2-6 %), con limitación leve (6-10 %) y con limitación moderada (> 10 %).

En síntesis, los requerimientos agroecológicos del duraznero recomendados por los autores mencionados, se encuentran en el rango de valores mínimos y máximos de la Tabla 1.

**Tabla 1: Rango de requerimientos agroecológicos del duraznero**

Requerimiento	Rango de aptitud
Precipitación (mm)	400 - 2200
Temperatura (°C)	4 - 40
Horas Frío (horas)	200 - 900
Humedad Relativa (%)	30 - 85
Materia Orgánica (%)	1.3 - 4.0
pH	4.3 - 8.7
Salinidad (dS/cm)	0 - 4.1
Altitud (msnm)	0 - 3200
Pendiente (%)	0 - 45

### **2.1.7 Producción a nivel mundial**

La producción mundial es de 9.6 millones de toneladas, distribuidas principalmente en Europa (46.9 %), Asia (21.8 %), América del Norte (16.7 %) y América del Sur aporta con el 6.9 % (Coz et al., 2010). De la producción mundial indicada, un 20 % es destinado a la industrialización y el 70 % al consumo en fresco, mientras que solo el 10 % es destinado a la exportación.

### **2.1.8 Producción en Perú**

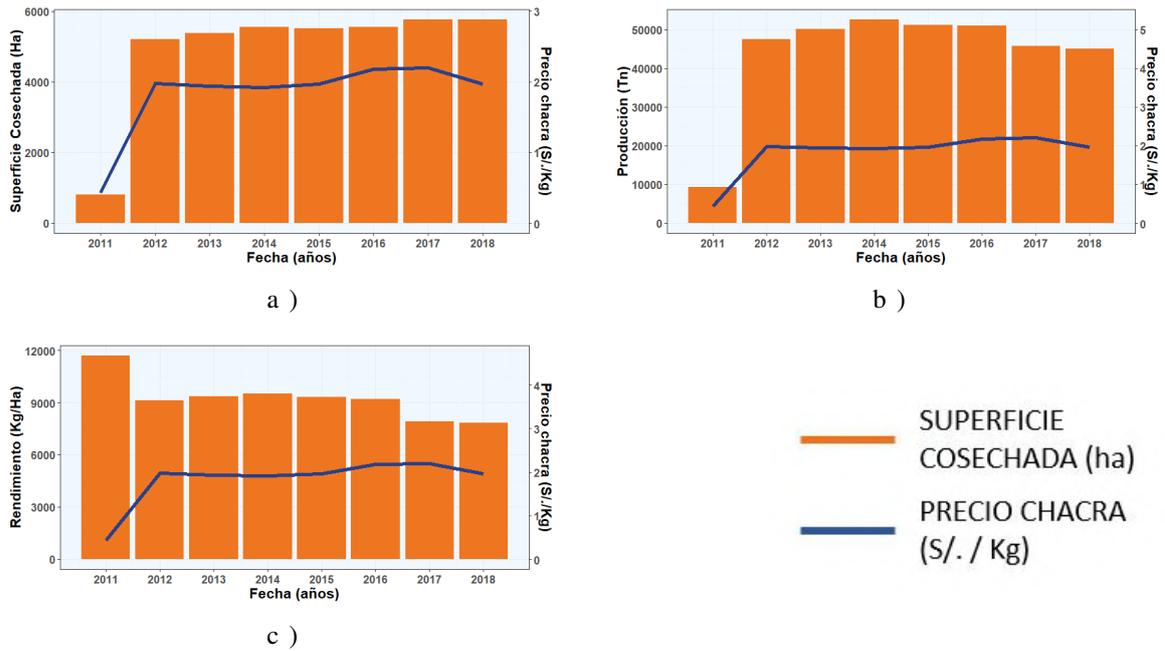
Espinoza (2016), reporta que el Perú ha dejado de importar el 70 % de los duraznos que requiere la industria nacional de jugos, estimado en 25 mil toneladas, gracias a que ahora ese volumen lo producen agricultores de diversas zonas del país integrados en el programa Sierra Exportadora. La producción nacional tuvo un incremento de 12.5 a 25 toneladas/hectárea y un mejoramiento de la calidad de 30 % de primera a 60 %.

A nivel comercial se realiza exportaciones principalmente a Ecuador y Brasil. La rentabilidad de la producción del duraznero, variedad de Huayco Rojo, esta relacionada directamente a la exportación, como manifiestan Vasquez et al. (2018).

Según los registros del Ministerio de Agricultura y Riego, mediante la Dirección de Estadística Agraria, la producción del duraznero a nivel nacional se ha incrementado entre los años 2012 al 2018 (Figura 4.b), pasando de 9345.4 Tn a 45114, mientras que el rendimiento se ha reducido de 11696.5 Kg/ha en 2011 a 7827 Kg/ha en 2018 (Figura 4.c). Por otro lado, el precio en chacra promedio anual, se ha incrementado de S/. 0.43 por kilogramo en 2011 hasta alcanzar un máximo en el 2017 de S/. 2.2 por kilogramo (Figura 4).

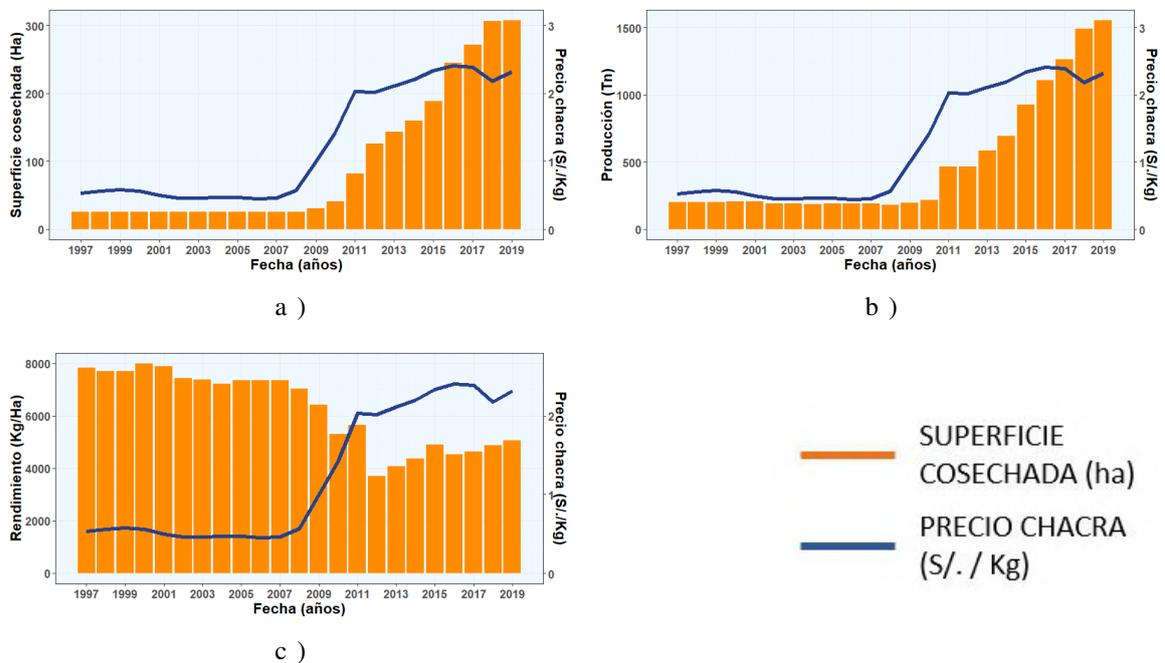
### **2.1.9 Producción en Huánuco**

A nivel regional, según la Dirección Regional de Agricultura de Huánuco la superficie cosechada del duraznero se incrementó notablemente desde 26 ha en 2008 hasta 307.5 ha en 2019 (Figura 5.a), mientras que el rendimiento del duraznero aumentó ligeramente desde 3690.5 Kg/ha en 2012 hasta 5053.7 Kg/ha en 2019 (Figura 5.c). Por otra parte, el precio en chacra promedio anual, se ha incrementado de S/. 0.45 por kilogramo en 2006 hasta S/. 2.32



**Figura 4: Variación temporal de indicadores económicos del duraznero en Perú**  
**a) Superficie cosechada - Precio chacra, b) Producción - Precio chacra, c) Rendimiento - Precio chacra.**  
**Fuente: Gerencias/Direcciones Regionales de Agricultura - Sistema Nacional de Estadística Agrícola (SIEA)**

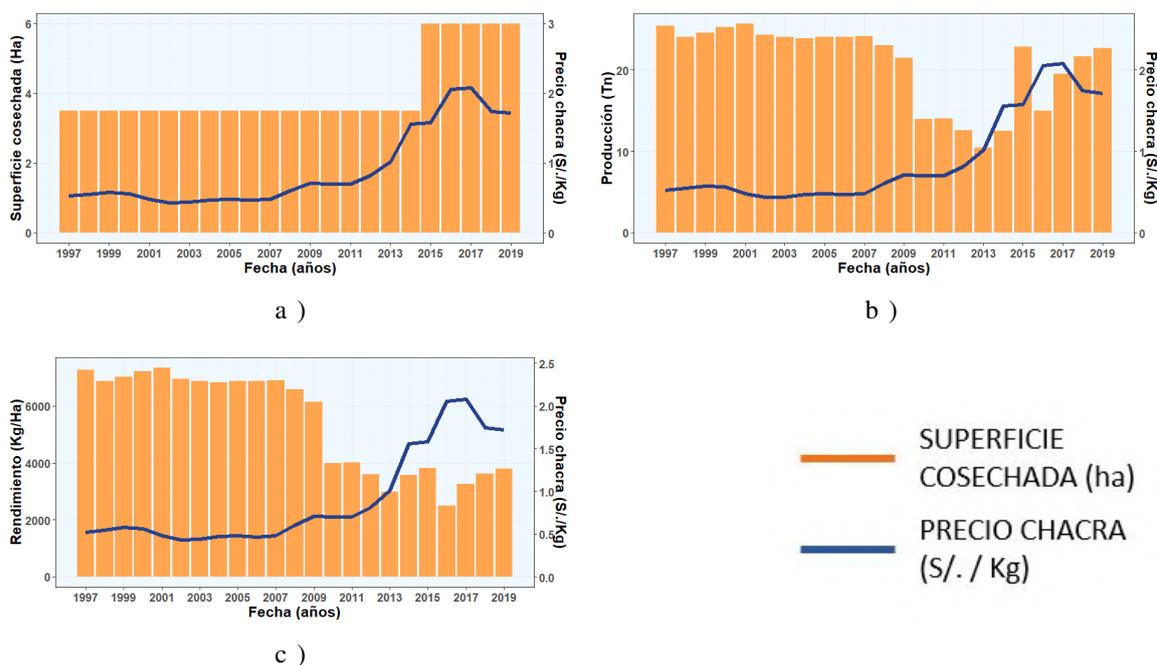
por kilogramo en el 2019 (Figura 5).



**Figura 5: Variación temporal de indicadores económicos del duraznero en el departamento de Huánuco**  
**a) Superficie cosechada - Precio chacra, b) Producción - Precio chacra, c) Rendimiento - Precio chacra.**  
**Fuente: Dirección Regional de Agricultura de Huánuco (DRAH)**

## 2.1.10 Producción en San Pablo de Pillao

En el distrito de San Pablo de Pillao, según la Dirección Regional de Agricultura de Huánuco la producción del duraznero se incrementó desde 10.4 Tn en 2013 hasta 22.7 Tn en 2019 (Figura 6.b), mientras que el rendimiento del duraznero se ha reducido desde 7279.5 Kg/ha en 1997 hasta 3783.3 Kg/ha en 2019 (Figura 6.c). Por otra parte, el precio en chacra promedio anual, se ha incrementado de S/. 0.44 por kilogramo en 2003 hasta S/. 1.72 por kilogramo en el 2019 (Figura 6).



**Figura 6: Variación temporal de indicadores económicos del duraznero en San Pablo de Pillao**  
a) Superficie cosechada - Precio chacra, b) Producción - Precio chacra, c) Rendimiento - Precio chacra.  
Fuente: Dirección Regional de Agricultura de Huánuco (DRAH)

## **2.2 Ordenamiento territorial**

Guimarey (2018) conceptualiza el ordenamiento territorial como un instrumento que forma parte de la política de estado sobre el desarrollo sostenible, para orientar la regulación y promoción espacial de las actividades económicas, sociales y ambientales. Adicionalmente, se indica que el ordenamiento territorial, en Perú, es una normativa del Ministerio del Ambiente (N° 010-2006-CONAM-CD), que regula el uso del suelo para las diversas áreas en que se ha dividido el territorio, ya sea el país como un todo, o una división administrativa del mismo.

## **2.3 Agroecología**

La agroecología, como describen Lipa et al. (2018), es una disciplina científica que define, clasifica y estudia los sistemas agrícolas desde una perspectiva ecológica y socio-económica. Además, incorpora ideas sobre una agricultura más ligada al medio ambiente, centrada no solo en la producción, sino también en la sustentabilidad ecológica del sistema. Surge como un nuevo enfoque al desarrollo agrícola, considerando las complejidades de la agricultura local, al ampliar los criterios agrícolas como la seguridad alimentaria, estabilidad biológica, conservación de recursos y óptima producción.

## **2.4 Zonificación**

La zonificación divide la superficie territorial en unidades más pequeñas en base a la distribución espacial de su climatología, edafología y fisiografía. Según el Consejo Nacional del Ambiente (CONAM, 2006), el objetivo de la zonificación con finalidades de planificación del uso de los recursos naturales es separar las áreas con similares potencialidades y limitaciones para el desarrollo de una actividad específica.

### **2.4.1 Meso-zonificación**

En la normativa del CONAM (2006), se describe la Meso-zonificación como la generación de información sobre las potencialidades y limitaciones del territorio que sirva de base para la elaboración, aprobación y promoción de los proyectos de desarrollo, planes de manejo en áreas y temas específicos en el ámbito local.

Se aplica a nivel regional y a nivel de provincias y distritos, cuencas hidrográficas y otros ámbitos espaciales con superficies relativamente no muy grandes, incluyendo el área de influencia de zonas metropolitanas, delimitando unidades espaciales del territorio a semi-detalle, con criterios físicos, biológicos, sociales, económicos y culturales.

#### **2.4.2 Zonificación Agroecológica (ZAE)**

De acuerdo con González et al. (2016), la Zonificación Agroecológica se define como la delimitación cartográfica de la capacidad natural para un determinado cultivo, de acuerdo con las características agroclimáticas, edáficas y fisio-geográficas de cada zona y las necesidades de un cultivo seleccionado a determinadas condiciones ambientales, así como, a su capacidad de conservación del potencial productivo de la zona.

#### **2.4.3 Zonificación Económica Ecológica (ZEE)**

Definido por GOREHCO (2016), la Zonificación Económica Ecológica es un proceso dinámico y flexible para la identificación de diferentes alternativas de uso sostenible de un territorio determinado, basado en la evaluación de sus potencialidades y limitaciones con criterios físicos, biológicos, sociales, económicos y culturales. Uno de los objetivos principales de la ZEE, es conciliar los intereses nacionales de la conservación del patrimonio natural con el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales. Por ello, las zonas con restricciones de uso de suelo delimitadas en la ZEE de Huánuco, serán excluidas de la ZAE propuesta en esta investigación.

### **2.5 Factores determinantes en la Zonificación Agroecológica del duraznero**

La optimización de producción del duraznero está determinada con la incidencia de diferentes factores que se presentan a continuación: geomorfología, climatología y edafología.

#### **2.5.1 Geomorfología**

El factor geomorfológico nos permite analizar las características del relieve de terreno para propósitos prácticos, en este caso se identificará la potencialidad para el duraznero, la pendiente del terreno es un parámetro necesario (Baíza, 2004).

## **Pendiente del terreno**

La distribución espacial de la pendiente del terreno nos permite comprender la relación entre la forma y el uso de la tierra (Rasheed et al., 2009). El ángulo de las pendientes o *slope angle*, tiene relevancia morfométrica como factor causante de diversos procesos de erosión, que se convierten en factores restrictivos para la agricultura y un papel importante en la gestión de la tierra, ya que influye en la accesibilidad y los costos (Rosça et al., 2015).

El aspecto de la pendiente o *slope aspect*, es un parámetro cuantitativo que influye como factor restrictivo sobre los procesos geo-morfológicos que tienen lugar en las laderas, mediante la distribución desigual de parámetros climáticos como la radiación solar, insolación, precipitación y la temperatura, como lo señalan Rosça et al. (2015).

### **2.5.2 Hipsometría**

La hipsometría, que es el área de la topografía que se ocupa de la medición de las alturas, es un factor que tiene una relación directa sobre la temperatura ya que influye directamente en la temperatura de cada sitio, disminuyendo a medida se asciende sobre el nivel del mar. Boshell (1982), sustenta que la temperatura disminuye con el aumento de la altitud, a una razón de 0,6°C por cada 100m.

En la especie *Prunus pérsica*, se observa claramente que cada variedad necesita una elevación mínima para lograr satisfacer sus necesidades de horas frío (Westood et al., 1993).

La etapa fenológica de maduración del duraznero, está significativamente relacionada con la apariencia estética de la fruta y la aceptación del consumidor. Este proceso de maduración está influenciado con la altitud del cultivo, como sustentan Karagiannis et al. (2016).

### **2.5.3 Climatología**

Es la ciencia que estudia el clima y las variaciones del conjunto de las condiciones atmosféricas que se presentan a lo largo del tiempo. Analiza a largo plazo las características climáticas como temperatura, humedad relativa, radiación solar, precipitación y otros (Bravo et al., 2014). El clima influye en la producción de cultivos, alterando sus períodos de crecimiento,

necesidades hídricas y su programación del riego. Las áreas con aptitud para el desarrollo de las tierras agrícolas están determinadas por el clima y la disponibilidad de agua (Khalil et al., 2011).

### **Precipitación**

La medición del volumen, intensidad y duración de la precipitación permite estimar la recarga de agua en el perfil del suelo, prever inundaciones y pronosticar la presencia de enfermedades por humedad en el ambiente, entre otras (Bravo et al., 2014).

Baíza (2004), indica que el duraznero requiere un suministro de agua para la etapa de crecimiento del fruto, de preferencia lluvias con régimen distribuido a lo largo del año; de lo contrario se obtienen frutos resquebrajados por efecto de canículas prolongadas o el alargamiento de la estación seca. La irregularidad de las lluvias provoca la reducción de flores y frutos, en consecuencia bajas cosechas. Además, si las lluvias son frecuentes en las épocas de cosecha y no se aplican tratamientos fito-sanitarios, los cultivos estarán infestados por enfermedades fúngicas.

### **Sequía meteorológica**

La sequía meteorológica está definida como la escasez de precipitación, según presenta Mirakbari et al. (2010). Los eventos de sequías están caracterizados por su gravedad, duración y magnitud. La duración de un evento de sequía meteorológica es medida desde el inicio al final de la sequía, mientras que su gravedad, es determinada por el déficit acumulado de precipitación durante el evento. Por otro lado, la magnitud de la sequía meteorológica es expresada como un valor relativo respecto a las condiciones normales de precipitación. Una de las formas de expresar este valor relativo es el Índice de Precipitación Estandarizada (SPI).

### **Temperatura**

Los valores de temperatura y sus variaciones representan la acumulación de energía en los cultivos. De este modo, las temperaturas máximas tendrán que ver con el estrés térmico y las mínimas con la acumulación de horas frío, tan importantes en los frutales caducifolios como el duraznero (Bravo et al., 2014).

Baíza (2004), señala que la temperatura es responsable de la regulación del crecimiento de los árboles frutales del tipo caducifolio. Para la finalización del periodo de dormancia en los frutales caducifolios, como el duraznero, y que entren en actividad vegetativa, se requieren bajas temperaturas, aspecto denominado con el término de Hora Frío (HF). Farag et al. (2010) detallan que una mejor medición de las unidades de frío se realiza en una escala de tiempo mediante la determinación de un umbral de temperatura mínima, si la temperatura desciende de este umbral por una hora se acumulará una unidad de Hora Frío; para los cultivos caducifolios, bajo un escenario de cambio climático, este umbral será de 10 °C.

### **Humedad relativa**

El monitoreo de la humedad relativa junto a la temperatura permite determinar si existen condiciones para la aparición de plagas y enfermedades que afectan a los cultivos. Además, esta variable es usada para pronosticar heladas (Bravo et al., 2014).

### **Radiación solar**

Mediante esta variable climática se puede conocer los niveles de energía absorbidos por el cultivo y de este modo determinar un rendimiento aproximado. La radiación del sol que llega a la tierra varía según la época del año por dos razones: la duración del día (foto-periodo) y la distancia al sol (Bravo et al., 2014).

Baíza (2004), indica que el requerimiento de radiación solar le confiere una mayor calidad al fruto del duraznero, por ello, es importante elegir terrenos con la mayor cantidad de radiación solar posible. Por otro lado, el tronco y las ramas sufren con una insolación excesiva.

#### **2.5.4 Edafología**

Este factor estudia las propiedades del suelo en relación a la producción vegetal. Para tal efecto, Molina (2007) sostiene que mediante el análisis de suelos se pretende determinar el grado de suficiencia o deficiencia de los nutrientes del suelo, así como las condiciones adversas que pueden perjudicar a los cultivos, tales como la acidez excesiva, la salinidad, y la toxicidad de algunos elementos.

## **Contenido de materia orgánica**

El contenido de materia orgánica es usado para cuantificar todos los compuestos orgánicos provenientes de la descomposición de residuos con origen biológico presentes en el suelo como rastrojos, hierbas, abonos verdes y residuos animales (Villarroel, 1988). Este contenido está expresado en % , además Molina (2007), sostiene que es un índice para estimar en forma aproximada las reservas de Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Azufre (S) en el suelo, y su comportamiento en la dinámica de los nutrientes. La materia orgánica mejora muchas propiedades químicas, físicas y biológicas que favorecen el crecimiento de los cultivos.

## **Acidez del suelo (pH)**

La reacción del suelo o pH, definido por Villarroel (1988), es usada para expresar el contenido de iones de hidrógeno que se encuentran en forma activa en una solución o en una suspensión de cualquier material. Entre los principales efectos del pH en el crecimiento de los cultivos, está la asimilabilidad de los macronutrientes del duraznero (Xie et al., 1995).

## **Conductividad eléctrica**

La salinidad de los suelos es un problema presente en todas las zonas cultivadas con riegos, a pesar de que inicialmente contengan una proporción reducida de sales. El contenido de las sales solubles es estimado mediante la conductividad eléctrica (Villarroel, 1988).

## **Textura**

La capacidad productiva de los suelos agrícolas dependen de sus características físicas, determinadas por la proporción en la que se encuentran las partículas minerales del suelo (Villarroel, 1988). Dentro de este marco, la textura le otorga propiedades particulares al suelo en cuanto al drenaje o porosidad y se puede proyectar respecto a la concentración de nutrientes (Quisbel et al., 2018). Villarroel (1988), realiza la clasificación textural, mediante el empleo del Triángulo de Texturas, que comprende doce denominaciones en base a los porcentajes de arena, limo y arcilla.

- Arena: Son suelos sueltos, de baja capacidad de retención de humedad, pobres en elementos nutritivos, su productividad en general es baja.

- **Areno Francoso:** Son suelos con baja capacidad de retención de la humedad y reducido contenido de nutrientes.
- **Franco Arenoso:** Sus características agrícolas en general son adecuadas para toda clase de plantas y son muy productivas si se las maneja correctamente.
- **Franco:** Estos suelos son los mas adecuados para la agricultura, presentan muy buena capacidad de retención de la humedad y condiciones físicas favorables e ideales, la presencia de nutrientes en general es adecuada.
- **Franco Limoso:** Son suelos semejantes al franco, pero comienzan a manifestar características físicas poco deseables, en especial cuando la arena se reduce mucho, son fértiles.
- **Franco Arcilloso:** Con manejo adecuado, estos suelos son altamente productivos, en general, se considera como suelos agrícolas de alta calidad.
- **Franco Arcillo Arenoso:** En términos agrícolas estos suelos son excelentes y con manejo adecuado son altamente productivos. Puede presentar problemas menores si el contenido de arena se reduce al mínimo y la arcilla alcanza su valor máximo.
- **Franco Arcillo Limoso:** En general, son considerados suelos agrícolas excelentes, su manejo puede presentar algunos problemas cuando el contenido de arena es bajo y el de arcilla es alto.
- **Limo:** Son suelo que presentan problemas físicos si se observa un predominio de partículas semifinas, que con el riego tienden a la formación de costras superficiales. Poseen elevada fertilidad y requiere manejo adecuado del agua de riego.
- **Arcilla:** Son suelos altamente fértiles, su manejo resulta difícil por el elevado contenido de arcilla que contiene.
- **Arcillo Arenoso:** Son suelos de buena calidad, sus características, pueden mejorarse haciendo un manejo adecuado del agua de riego y con labores agrícolas oportunas.
- **Arcillo Limoso:** Son suelos altamente fértiles, la presencia de arcilla y limos finos, pueden hacer difícil el manejo de estos suelos, debido a la formación de costras superficiales, o a la poca estabilidad estructural.

## **Taxonomía de suelos**

La clase taxonómica de los suelos esta definida por las características fisico-químicas de los horizontes identificados en un perfil de suelo, en esta investigación se siguió la clasificación de acuerdo a USDA (2010). Siguiendo esta clasificación y en relación a los requerimientos edáficos del duraznero, detallados en la Tabla 1, Jafarzadeh et al. (2010) recomienda que los suelos óptimos para el desarrollo de este frutal son del orden Inceptisol, suborden Xerepts y gran grupo Calcixerepts y Haploxerepts.

### **2.6 Modelo de Zonificación Agroecológica**

Para la realización del modelo de zonificación agroecológica se analizarán variables climáticas, edáficas y fisio-geográficas, con la información de los requerimientos agroecológicos del cultivo, según el método desarrollado por Gallegos et al. (2007a), y adaptado por González et al. (2016). El objetivo de este método es la identificación de zonas de aptitud óptima, media, baja y no apta, para su evaluación en diferentes cultivos a nivel zonal, regional o nacional.

En el análisis geo-espacial y procesamiento de los mapas de zonificación agroecológica, se conjugan las zonas con aptitud a la producción de un determinado cultivo en condiciones naturales y la valoración cualitativa de la infraestructura de apoyo a la producción. En el resultado se obtiene el análisis de las potencialidades y limitaciones agroecológicas del territorio para el cultivo analizado.

### **2.7 Sistema de Información Geográfica**

El Sistema de Información Geográfica (SIG), según Bajjali (2017), es una herramienta informática que nos permite visualizar la información espacial con sus patrones y relaciones. La capacidad de resolver preguntas complejas sobre datos espaciales, analizar gran cantidad de características a la vez, y luego ver instantáneamente los resultados en un mapa, hace que el SIG sea aplicado en múltiples disciplinas, como la gestión de recursos, ordenamiento territorial, agricultura, hidrología, etc. El SIG esta compuesto principalmente por tres partes:

- Geográfica: La ubicación geográfica en el mundo real (sistema de coordenadas)

- Información: La base de datos
- Sistemas: El hardware y el software

### **2.7.1 Representación espacial de datos**

Los datos espaciales son un componente fundamental en el entorno SIG. Bajjali (2017), expone que los datos están basados en la percepción del mundo por sus características. Cada característica se puede describir por su atributo o propiedad, y su localización se puede mapear con un sistema de coordenadas. Las representaciones mas comunes de los datos espaciales que miden nuestro entorno es mediante datos discretos (modelo vectorial) y datos continuos (modelo raster).

#### **Modelo de datos vectoriales**

El modelo vectorial, como describe Bajjali (2017), es una representación del mundo por sus distintas características, límites definidos, identidades y forma específica como puntos, líneas y polígonos. Los datos vectoriales están estructurados con dos elementos específicos: vértices y coordenadas. Este modelo es útil para almacenar datos que tienen límites discretos como ciudades, ríos y lagos; por último, cada dato tiene una dimensión, límite y ubicación.

#### **Modelo de datos raster**

El modelo raster, como sintetiza Bajjali (2017), es una representación de un área o región como una superficie dividida en una cuadrícula de celdas. Es útil para almacenar datos que varían continuamente, como una fotografía aérea, imagen satelital o un modelo de elevación digital. La celda es la unidad mínima de mapeo y el tamaño más pequeño en el que se puede representar cualquier entidad de paisaje.

### **2.7.2 Aplicación en la Zonificación Agroecológica**

Las investigaciones con mejores resultados en la elaboración de una ZAE están compuestas por bases de datos espaciales almacenados en un sistema de información geográfica y relacionadas con modelos matemáticos, que contienen múltiples aplicaciones potenciales en el manejo de los recursos naturales y planificación del uso de suelo (Zambrano, 2018).

González et al. (2016), señalan que la implementación de un software SIG, como herramienta en el análisis espacial contribuye al proceso automatizado de evaluación de las potencialidades del cultivo de estudio y su zonificación agroecológica. Por ello, este enfoque y metodología puede ser implementado en cualquier extensión geográfica, con una escala adecuada y la evaluación de sus apreciaciones agroecológicas.

## **2.8 Teledetección**

Guo et al. (2020), conceptualizan la teledetección o percepción remota como la observación no intrusiva de la Tierra utilizando ondas electromagnéticas desde una plataforma a cierta distancia del objeto de estudio. Actualmente, se utilizan diversos tipos de sensores ópticos, termales, de radar y de microondas para obtener grandes conjuntos de datos con alta precisión y resolución para la atmósfera, océano y tierra. La frecuencia de adquisición de datos generalmente varían de una vez al mes a una vez por minuto, la resolución espacial varía de escalas de kilómetros a milímetros, y el espectro electromagnético cubre bandas de ondas que en su mayoría varían desde la luz visible hasta las longitudes de ondas de radar. El progreso tecnológico en los sensores de teledetección nos permite obtener datos a escala global, ampliando la comprensión de nuestro entorno.

### **2.8.1 Plataformas de Teledetección**

La teledetección como manifiestan Guo et al. (2020), se refiere a diversas actividades de observación y exploración del entorno que involucran humanos y dispositivos fotoeléctricos transportados por satélites, naves espaciales, aviones, vehículos cercanos al espacio, drones y varias plataformas terrestres. Los satélites artificiales que llevan sensores para capturar imágenes de la superficie de la Tierra se denominan satélites de sensoramiento remoto.

### **2.8.2 Sensores de Teledetección**

Como mencionan Guo et al. (2020), existen varios tipos de sensores de observación de la Tierra, como los sensores fotográficos, de imágenes de escaneo y de imágenes de radar. Los sensores se pueden clasificar por su longitud de onda que utilizan (ópticos, termales y radares) y por el tipo de obtención de la imagen (barredura mecánica, electrónica e instantánea). Los sensores fotográficos funcionan como una cámara digital. Los sensores de imágenes de

escaneo capturan imágenes bidimensionales escaneando punto por punto y línea por línea en una secuencia de tiempo. Estos son ampliamente utilizados hoy en día; dichos sensores se pueden dividir en sensores de escaneo de superficie y escaneo de imágenes. El radar de imágenes es un sensor activo que emite ondas electromagnéticas para formar un perfil lateral.

### **2.8.3 Satélites y productos de observación terrestre**

Guo et al. (2020), califican a los satélites de observación terrestre como los que están dedicados a la investigación del medio ambiente terrestre, el pronóstico del estado de los cultivos y el monitoreo de desastres naturales. Las variables terrestres tienen una dispersión de radiación o firma espectral propia para cada objeto. Las variables terrestres se pueden clasificar considerando la dirección, escala y sensibilidad para establecer una relación entre las ondas electromagnéticas y la superficie del suelo para la observación espacial.

#### **Satélites ALOS-I**

La JAXA, Japan Space Agency, lanzó el satélite ALOS-I en 2006, el cual utiliza tecnologías avanzadas de observación de la tierra para obtener datos de observación de la Tierra flexibles y de mayor resolución espacial que pueden aplicarse al mapeo, observación regional y otros campos, como manifiestan Guo et al. (2020).

#### **Modelo de elevación digital ALOS PALSAR**

El Modelo Digital de Elevaciones (DEM) de ALOS PALSAR tiene como principales características técnicas una resolución espacial de 12.5 m, resolución radio-métrica de 16 bits, extensión temporal es del 2006 al 2011 y de referencia vertical el *North American Vertical Datum of 1988* (NAVD 88).

#### **Producto SoilGrids250m**

El producto SoilGrids250m (Hengl et al., 2017), fue elaborado por el *International Soil Reference Information Centre* (ISRIC) y es un producto de predicción global de las diversas propiedades físico-químicas del suelo (pH, componentes de la textura del suelo, materia orgánica, pedregosidad entre otros) a siete profundidades estándar (0, 5, 15, 30, 60, 100 y 200 cm), con una resolución espacial de 250 m.

Para elaborar este producto se emplearon datos de 150000 perfiles de suelo distribuidos a nivel mundial, para poder entrenar un total de 158 productos globales provenientes de satélites de observación terrestre y climática (en general derivados de los productos MODIS, DEM SRTM, WorldClim y mapas litológicos), ambas fuentes de datos fueron utilizadas para elaborar los modelos de *machine learning* necesarios para la obtención y evaluación de precisión del producto SoilGrids250m, como describe Hengl et al. (2017).

### Mapa global de salinidad de suelo

El mapa global de salinidad de suelo elaborado por Ivushkin et al. (2019) del ISRIC, consiste en el mapeo de la distribución espacial de rangos de salinidad definidos en la Tabla 2, usando como datos base: 15188 registros de salinidad superficial de suelo y de productos satelitales de observación terrestre (SoilGrids e imágenes termales del USGS Landsat 8), para poder elaborar una clasificación con algoritmos de *machine learning* y obtener un mapeo global de salinidad de resolución espacial de 90 m.

**Tabla 2: Rango de clasificación de salinidad**

Clase	Salinidad (dS/m)
No salino	< 2
Salinidad ligera	2 - 4
Salinidad moderada	4 - 8
Salinidad alta	8 - 16
Salinidad extrema	> 16

Fuente: Ivushkin et al. (2019)

#### 2.8.4 Productos satelitales de observación climática

Los satélites meteorológicos se han convertido en una fuente indispensable de los recursos básicos y estratégicos para el desarrollo económico y social a nivel mundial, como describen Guo et al. (2020). A medida que los problemas de contaminación ambiental, la escasez de recursos y los desastres naturales aumenten, la función de los satélites meteorológicos en el pronóstico del tiempo, monitoreo ambiental, mitigación y prevención de desastres se ha vuelto más importante que nunca.

## **Producto satelital CHIRPS**

CHIRPS (*Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations*), es resumido por Méndez et al. (2016), como un conjunto de datos desarrollados por el servicio geológico de EEUU (U.S. Geological Survey, USGS) y el CHG (*Climate Hazard Group*) de la Universidad de California. CHIRPS utiliza un procedimiento de estimación de precipitación bajo el enfoque de “interpolación inteligente” para crear una grilla espacialmente continua desde datos de puntos sin procesar. Los datos de entrada para el algoritmo CHIRPS son:

- Climatologías de precipitación mensual (CHIRPclim)
- Observaciones satelitales de sensores IR GEO proporcionados por la NASA: el Centro de Predicción Climática (CPC) y el Centro Nacional de Datos Climáticos (NCDC).
- Producto TRMM 3B42 de la NASA
- Datos de precipitación estimadas por el modelo atmosférico del sistema de pronósticos climáticos de la NOAA, version 2 (CFSv2)
- Datos observados en superficie proporcionados por varios servicios meteorológicos nacionales y regionales.

La extensión temporal de este producto es desde 1981 hasta la actualidad, su resolución temporal es diaria y su resolución espacial e de  $0.05^\circ$  (5 km aproximadamente).

## **Producto PISCO de precipitación**

El producto *Peruvian Interpolate data of the SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations* (PISCO) de precipitación (Aybar et al., 2017), fue elaborado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y actualmente está disponible la versión 2.1. Contiene datos de precipitación acumulada a nivel diario y mensual, obtenidas de la combinación geoestadística de la red de estaciones meteorológicas del SENAMHI (441 estaciones climáticas) y del producto CHIRPM derivado del producto satelital de precipitación CHIRPS.

La resolución espacial de este producto es de  $0.1^\circ$  (10 km), tiene una resolución temporal diaria y mensual, por ultimo, su área de estudio es a nivel nacional en Perú. El espacio

temporal de este producto inicia desde enero de 1981 hasta la actualidad, en su versión operativa.

### **Producto satelital MOD11 A1**

Entre los productos de MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), están los MOD11. Este producto, como presenta Wan (2013), representa los datos diarios de temperatura superficial terrestre y de emisividad, tienen una resolución espacial de 1km y fueron producidos mediante un algoritmo generalizado entre los tipos de cobertura terrestre, el vapor de agua de la columna atmosférica y la temperatura de la superficie del aire límite inferior.

Las especificaciones técnicas del producto satelital MOD11 A1 tiene una resolución espacial de aproximadamente 1km (0.928 km), resolución temporal diaria y una extensión temporal desde el 2000 hasta la actualidad.

### **Producto PISCO de temperatura**

El producto *Peruvian Interpolate data of the SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations* (PISCO) de temperatura (Huerta et al., 2018), fue elaborado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y su versión disponible es la 1.1. Contiene datos de temperatura máxima y mínima a nivel diario y mensual, obtenidas de la combinación geoestadística de la red de estaciones meteorológicas del SENAMHI (178 estaciones climáticas) y del producto MYD11A2 derivado del producto MOD11. De este producto se usaron las imágenes satelitales del día y de la noche como covariables del producto PISCO de temperatura máxima y mínima respectivamente.

La resolución espacial de este producto es de  $0.1^\circ$  ( 10 km), tiene una resolución temporal diaria y mensual, por último, su área de estudio es a nivel nacional en Perú. El espacio temporal de este producto inicia desde enero de 1981 hasta el 2016, en su versión estable.

## **2.9 Análisis multicriterio de decisiones (MCDA)**

Malczewski (2006), sostiene que el análisis multicriterio de decisiones está fundamentado en la teoría y conceptos de la toma de decisiones. Del mismo modo, Malczewski (2006)

manifiesta que el MCDA ofrece una amplia colección de técnicas y procedimientos para estructurar problemas de decisión con el objetivo de diseñar, evaluar y priorizar decisiones alternativas.

El MCDA proporciona un marco para manejar el debate sobre la identificación de componentes de un problema de decisión, organizar los elementos en una estructura jerárquica, comprender las relaciones entre los componentes del problema y estimular la comunicación entre los participantes. Proporciona mecanismos para revelar las preferencias de los tomadores de decisiones, y para identificar y explorar alternativas de compromiso (Malczewski, 2006).

Zambrano (2018), expone que debido a que el resultado final del análisis es una valoración numérica de las opciones, permite tomar una decisión que se puede justificar tanto cualitativa como cuantitativamente; al cabo del análisis se puede explicar, en detalle, las razones de la elección.

### **2.9.1 Aplicación en la identificación de zonas agroecológicas**

El Análisis Multicriterio de Decisiones en los Sistemas de Información Geográfica (MCDA-GIS) nos permite procesar y sintetizar gran cantidad de valores de decisión cualitativas y conjuntos de datos espaciales (Malczewski, 2006), es empleado para evaluar la identificación de zonas agroecológicas de diversos cultivos.

El Ministerio del Ambiente (MINAM), mediante el Consejo Nacional del Ambiente presentó la metodología para la Zonificación Ecológica y Económica (CONAM, 2006). En este documento se detalla que según los sub-modelos seleccionados para la zonificación, se preparan matrices en las cuales los especialistas temáticos determinan el peso de las variables y los atributos. Después, se asigna las correspondientes calificaciones a cada atributo de cada submodelo y mediante las herramientas del SIG, se obtienen los mapas con la zonificación deseada.

Existen diversas técnicas complementarias para esta aplicación, entre ellas se encuentran el Proceso Analítico Jerarquizado (AHP), lógica difusa, entre otros; usados por diversos auto-

res, que matemáticamente combinan los criterios y sus pesos para seleccionar la alternativa más deseable en la identificación de zonas agroecológicas para un cultivo definido.

### III. METODOLOGÍA

La metodología se ha dividido en 4 etapas, una etapa preliminar de recopilación de datos, identificación de variables y preparación de mapas base, una etapa de campo para la validación la información de los mapas base, seguido por una etapa de laboratorio de análisis de las muestras y finalmente una etapa de geoprocésamiento para la elaboración y análisis de la ZAE (Figura 7).

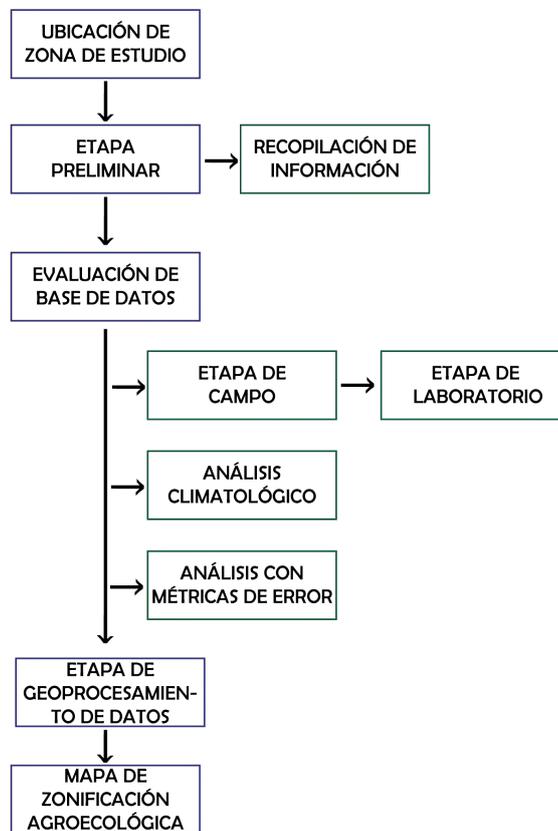


Figura 7: Diagrama de flujo de la investigación

#### 3.1 Ubicación de la zona de estudio

##### 3.1.1 Ubicación geográfica

Geográficamente abarca la siguiente extensión:

- Longitud : 75°79' - 76°08'

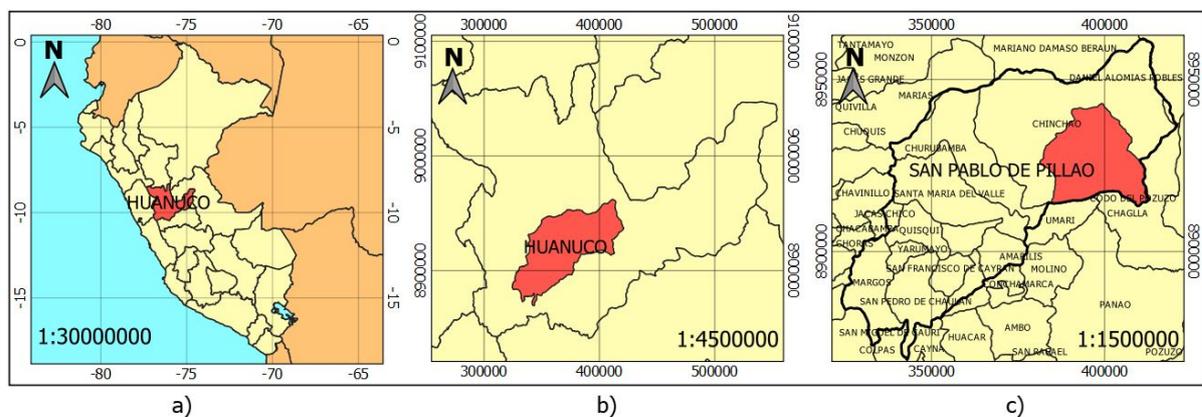
- Latitud : 9°57' - 9°84'

El distrito de estudio tiene un área de 59284 ha, con un rango de altitudes desde los 784.93 msnm hasta los 3664.63 msnm.

### 3.1.2 Ubicación política

El área de estudio de la investigación se desarrolló en el distrito de San Pablo de Pillao que está ubicado administrativamente en el departamento de Huánuco. En la Figura 8 se observa con mas detalle la ubicación. Limita por el sur con la provincia de Pachitea y sus distritos de Umari y Chaglla; por el norte y oeste con el distrito Chinchao de la provincia de Huánuco.

- País: Perú
- Departamento: Huánuco
- Provincia: Huánuco
- Distrito: San Pablo de Pillao



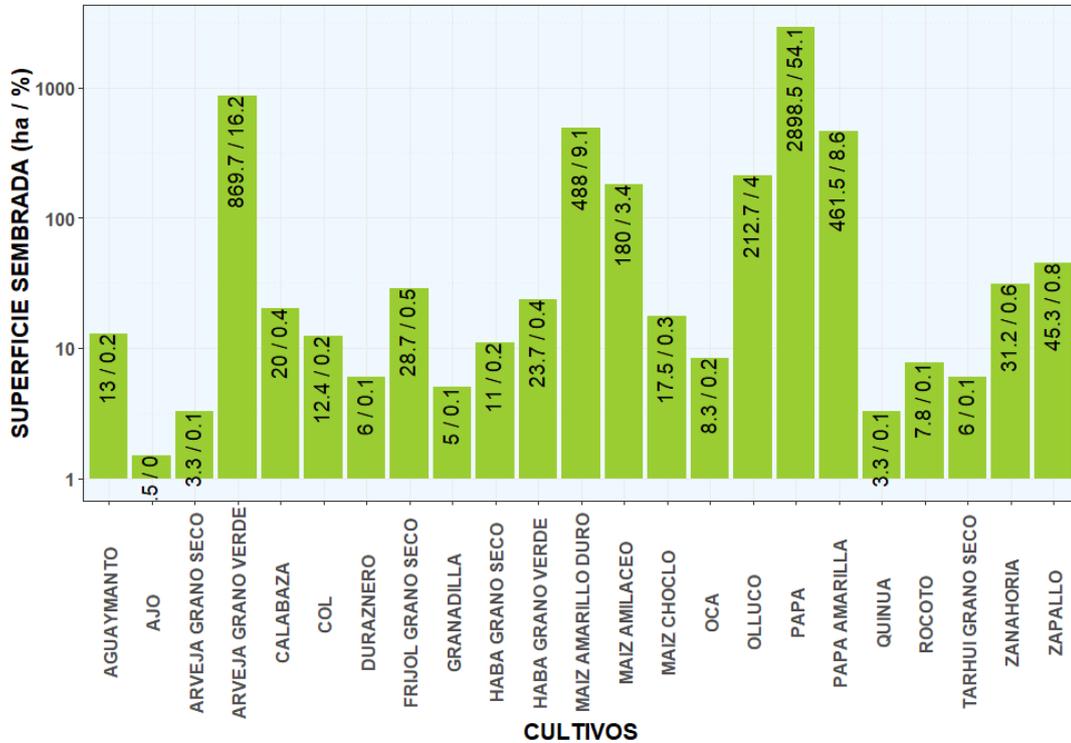
**Figura 8: Ubicación política**

**Fuente: Elaborado con datos del Instituto Geográfico Nacional (IGN)**

### 3.1.3 Distribución de la superficie agrícola

El distrito de San Pablo de Pillao se dedica a la siembra de una amplia variedad de cultivos, presentados en la Figura 9. Para estimar las áreas dedicadas a la producción de cada cultivo se promediaron las superficies agrícolas, destinadas a cada cultivo, de las campañas agrícolas 2016-2017, 2017-2018 y 2018-2019 a nivel distrital, de acuerdo a los registros de

la Dirección Regional de Agricultura de Huánuco. El cultivo con mayor superficie agrícola es la papa (blanca, amarilla, nativa, etc) con 3360 ha, seguido por la arveja con 889.7 ha, mientras que para la producción del duraznero se destinaron 6 ha.



**Figura 9: Distribución de la superficie agrícola en San Pablo de Pillao**

Fuente: Elaborado con datos de la Dirección Regional de Agricultura de Huánuco (DRAH)

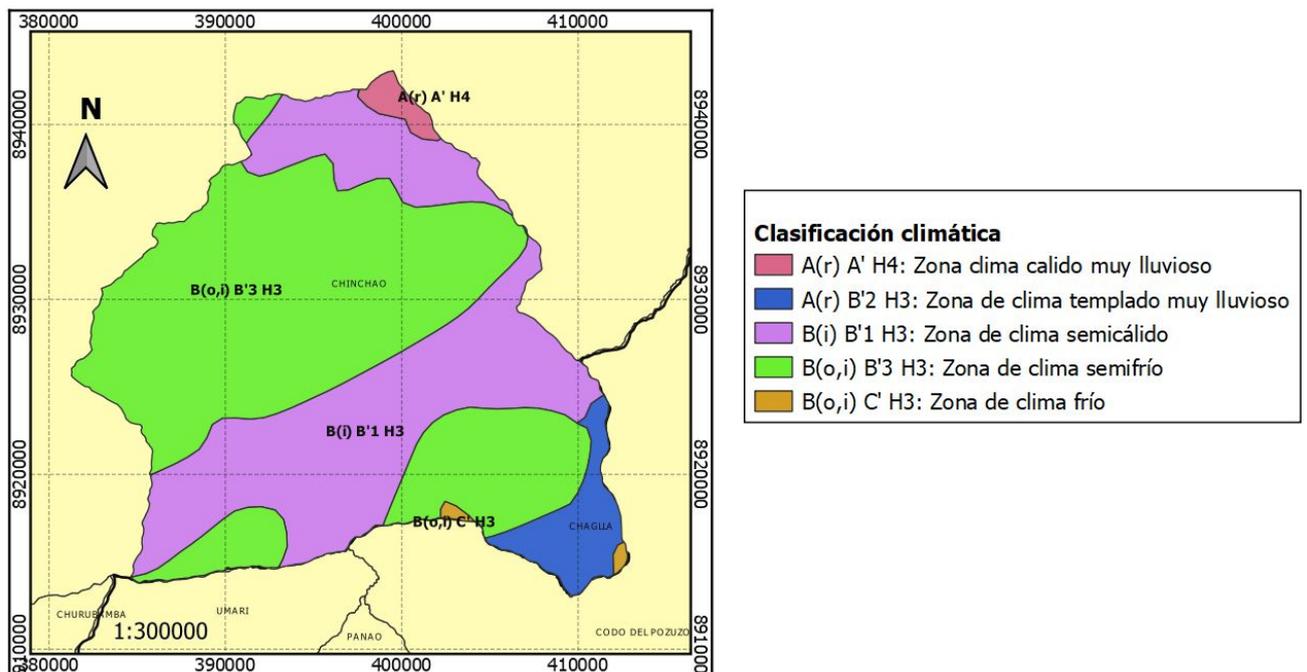
### 3.1.4 Clima

Según la clasificación climática de Thornthwaite elaborada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI, 2018), el distrito de San Pablo de Pillao, está ubicado en las siguientes regiones climáticas:

- B(o,i)B'3H3: Zona de clima semifrío, lluvioso, con deficiencia de lluvias en otoño e invierno, con humedad relativa calificada como húmeda.
- B(i)B'1H3: Zona de clima semicálido, lluvioso, con deficiencia de lluvia en invierno, con humedad relativa calificada como húmeda.
- A(r)A'H4: Zona de clima cálido muy lluvioso, con precipitaciones abundantes en todas las estaciones del año, con humedad relativa calificada como muy húmeda.

- B(o,i)C'H3: Zona de clima frío, lluvioso, con deficiencia de lluvias en otoño e invierno, con humedad relativa calificada como húmeda.
- A(r)B'2H3: Zona de clima templado muy lluvioso, con precipitaciones abundantes en todas las estaciones del año, con humedad relativa calificada como húmeda.

En la Figura 10, se observa la distribución de estos climas a nivel nacional.



**Figura 10: Mapa Climático Nacional**

Fuente: SENAMHI (2018)

## 3.2 Etapa preliminar

### 3.2.1 Recopilación de información del duraznero

Los requerimientos agroclimáticos, edafológicos y físico-geográficos del duraznero se recopilieron de diversos autores, en la sub-sección 2.1.6.

### 3.2.2 Recopilación de información geográfica, climática y de suelos del distrito

En esta etapa se recopiló la información espacial, para realizar la ZAE del duraznero, de las variables mencionadas en la sub-sección 3.2.1. Se usaron los productos del mapeo de suelos de SoilGrids (Hengl et al., 2017), bases de datos de estaciones automáticas meteorológicas

del SENAMHI y el producto PISCO (Aybar et al., 2017) elaborado por la misma institución, fotografías satelitales del área de estudio, imágenes satelitales, y modelos digitales de elevación de ALOS-PALSAR.

El producto PISCO del SENAMHI, logra una mayor incertidumbre si la zona de estudio esta cerca de estaciones meteorológicas, ya que, se usaron los registros observados para la elaboración de este producto mediante la metodología explicada en la sub-sección 2.8.4. Para ello se identificaron las estaciones cercanas en el Anexo 1.3.

Los diversos datos raster, definidos en la sección 2.8, son empleados para elaborar los mapas base de cada sub-criterio. Las especificaciones técnicas de los datos raster se presentan en la Tabla 3.

**Tabla 3: Especificaciones técnicas de los datos raster**

Datos Raster	Año	Fuente	Mapa base de sub-criterios
Modelo de elevación digital (DEM)	2010	ALOS-PALSAR (JAXA/METI)	Mapa de elevación Mapa de pendientes
Precipitación mensual	2020	PISCO (SENAMHI)	Mapa de precipitación promedio
Temperatura diaria mínima y máxima	2018	PISCO (SENAMHI)	Mapa de temperatura promedio Mapa de horas frío Mapa de humedad relativa
Textura	2017	SoilGrids250m (ISRIC)	Mapa de textura
Materia orgánica	2017	SoilGrids250m (ISRIC)	Mapa de materia orgánica
PH	2017	SoilGrids250m (ISRIC)	Mapa de pH
Salinidad	2019	EcoGIS Center-ISRIC	Mapa de salinidad

Los mapas climáticos están basados en la información del producto PISCO de precipitaciones mensuales (Aybar et al., 2017) y temperaturas diarias (Huerta et al., 2018), elaboradas por el SENAMHI. Por otro lado, se usaron dos productos espaciales para elaborar los mapas

de las propiedades físicas y químicas del suelo, el primero fue SoilGrids250m desarrollado por Hengl et al. (2017) del *International Soil Reference Information Centre (ISRIC)* y el segundo es un mapa global de salinidad de suelo elaborado por Ivushkin et al. (2019) del ISRIC y del centro EcoGIS. El modelo de elevación digital elegido es el Alos-Palsar de la JAXA, detallado en la sección 2.8.3.

Toda esta información geográfica, se integró en una base de datos general, y en un sistema de información geográfica GIS para realizar las siguientes etapas.

### 3.2.3 Estimaciones climáticas

#### Método de Interpolación: *Inverse Distance Weighting (IDW)*

El IDW (Fotheringham, 1997), es un método matemático de interpolación que asume que el valor de un punto espacial esta más relacionado con los puntos más cercanos a su ubicación espacial, por ello, tienen mayor peso e influencia sobre un punto a estimar. Se expresa matemáticamente por la Ecuación 1.

$$Z(S_o) = \sum_{i=1}^N \lambda_i \times Z(S_i) \quad (1)$$

Donde:

$Z(S_o)$  = Valor a estimar

N = Número de muestras alrededor del punto a predecir

$\lambda_i$  = Pesos asignados a cada punto cercano

$Z(S_i)$  = Valores medidos

Además, los pesos de los puntos cercanos están dados por la Ecuación 2.

$$\lambda_i = \frac{d_{io}^{-p}}{\sum_{i=1}^N d_{io}^{-p}} \quad (2)$$

Donde:

d = Distancia entre el lugar de predicción ( $S_o$ ) y el lugar muestral ( $S_i$ )

P = Factor de reducción de peso, este valor minimiza el error cuadrático medio

### **Modelos de estimación de las horas frío**

La estimación de las horas frío para poder identificar las zonas óptimas de esta variable climática, fue calculado a partir de las temperaturas mínimas y máximas del producto PISCO del SENAMHI. El modelo empleado fue el Sánchez-Capuccino, que tiene un buen ajuste con menor error estándar, reportado por García et al. (2009). La Ecuación 3, se siguió para el cálculo de las horas frío acumuladas anualmente.

$$hf = 36[(10 - m)/(M - m)]$$
$$HF = \sum hf \quad (3)$$

Donde:

M = Temperatura máxima diaria

m = temperatura mínima diaria

hf = horas de frío acumulado en un día

HF = horas de frío acumuladas durante el año

La temperatura umbral para la acumulación de las horas frío es de 10 °C, el cual esta detallado en la sub-sección 2.5.3.

### **Modelos de estimación de humedad relativa**

Para la estimación de la humedad relativa se empleó el método presentado por Thornton et al. (1997). En este método se requirió los registros de la temperatura mínima (Tmin) y máxima (Tmax). Además, el método está basado en la suposición que la temperatura mínima diaria es igual a la temperatura del punto de rocío (Tpr). La temperatura promedio diaria (Tprom), siguiendo el método presentado, se calculó usando la Ecuación 5.

$$T_{pr} = T_{min} \quad (4)$$

$$T_{prom} = 0,606 \times T_{max} + 0,394 \times T_{min} \quad (5)$$

Donde:

$T_{pr}$  = Temperatura del punto de rocío

$T_{prom}$  = Temperatura promedio diaria

$T_{min}$  = Temperatura mínima

$T_{max}$  = Temperatura máxima

Una vez definidas las temperaturas promedio y de punto de rocío, se pudo estimar la presión actual de vapor en Kilo Pascales (KPa), mediante la Ecuación 6 y la presión de vapor saturado en Pascales (Pa), a través de la Ecuación 7. Finalmente, la humedad relativa en porcentaje es calculado con la Ecuación 8.

$$P_{va} = 0,61078 \times e^{\left(\frac{17,269 \times T_{pr}}{237,3 + T_{pr}}\right)} \quad (6)$$

$$P_{vs} = 0,61078 \times e^{\left(\frac{17,269 \times T_{prom}}{237,3 + T_{prom}}\right)} \quad (7)$$

$$HRp = 100 \times \frac{P_{va}}{P_{vs}} \quad (8)$$

Donde:

$P_{va}$  = Presión de vapor del aire

$P_{vs}$  = Presión de vapor saturado

$HRp$  = Humedad relativa porcentual

$T_{pr}$  = Temperatura del punto de rocío

$T_{prom}$  = Temperatura promedio diaria

### **Análisis de tendencias de precipitación y temperatura**

Para detectar y estimar las tendencias en las series de tiempo de temperatura y precipitación, se aplicó una prueba estadística no-paramétrica. La prueba estadística seleccionada de

Mann-Kendall, definido por Mann (1945) y Kendall (1948). Esta prueba se caracteriza por estar basada en el espacio muestral de los datos y no en los datos individuales, por ello, es robusta frente a los registros atípicos. Se determinó estadísticamente la existencia de tendencias significativas con un nivel de confianza ( $> 99\%$ ,  $> 95\%$  y  $> 90\%$ ) en las series de tiempo, como se presenta en la investigación de Rojas et al. (2010).

La magnitud de la tendencia se estimó usando el método de Sen (Sen, 1968), que asume como estimativo la tendencia a la mediana para evaluar todas las posibles pendientes que pueden ser calculadas a partir de los datos de las series de tiempo. La pendiente estimativa de la tendencia B, esta definido por la Ecuación 9.

$$B = \text{mediana}\left(\frac{x_i - x_j}{i - j}\right) \quad (9)$$

Donde,  $i$  y  $j$  son dos posiciones dentro de la serie de tiempo, además se cumple que  $i > j$ . Siguiendo la metodología de Rojas et al. (2010), las series de precipitación acumulada a nivel mensual se sumaron por cada año en el periodo analizado, con el objetivo de conocer las variaciones promedio anuales. De la misma manera, las series de tiempo de temperatura promedio a nivel mensual se promediaron para obtener las variaciones promedio anuales. Ambas series climáticas fueron obtenidas directamente de las grillas del producto PISCO en la zona de estudio.

### **Análisis espacio-temporal de sequías hidrológicas**

Para el análisis de la variabilidad espacio-temporal de las sequías en la zona de estudio se usaron 30 años de registros de precipitación mensual del producto PISCO del SENAMHI. Este análisis estuvo basado en la metodología de Ashraf et al. (2015), que recomienda usar el Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) a diferentes escalas temporales (3, 6 y 12 meses), para identificar la intensidad de las sequías. Para la estimación espacial de las sequías, se usó el método de la Distancia inversa Ponderada (IDW), para cada intensidad de sequía: Moderada, Severa y Extrema, que se reconoce según la Tabla 4.

## Índice de Precipitación Estandarizado - SPI

Vega-Jácome (2015) describe el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) como un indicador de probabilidad para representar los periodos secos y húmedos anormales; cuantificando el déficit de precipitación en distintas escalas de tiempo, las escalas de 3 y 6 meses son recomendadas para evaluar las sequías meteorológicas. Están basadas en el análisis de las series de tiempo de precipitación mensual y un correspondiente ajuste a la función de distribución de probabilidad Gamma, que posteriormente es transformada en una función de distribución normal. Debido al ajuste y la transformación, los valores obtenidos del SPI representan un número de desviaciones estándar que un dato está alejado de la media muestral.

El SPI es calculado mediante la Ecuación 10 y se clasifica en función a la Tabla 4, según propone Campos-Aranda (2014).

$$g(x) = \frac{x^{\alpha-1} \times e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^{\alpha} \times \Gamma(\alpha)} \text{ para } x > 0 \quad (10)$$

Donde,  $\alpha > 0$  y es el parámetro de forma,  $\beta > 0$  es el parámetro de escala, X es la cantidad de precipitación y  $\Gamma(\alpha)$  es la función gamma.

**Tabla 4: Categorías de sequías definidas por el valor del índice SPI**

Valor de SPI	Categoría de sequía	Probabilidad en %
$SPI \leq -2,0$	Sequía extrema	2.3
$-2,0 < SPI \leq -1,5$	Sequía severa	4.4
$-1,5 < SPI \leq -1,0$	Sequía moderada	9.2
$-1,0 < SPI \leq 1,0$	Normal	34.1
$1,0 < SPI \leq 1,5$	Moderadamente húmedo	9.2
$1,5 < SPI \leq 2,0$	Severamente húmedo	4.4
$SPI > 2,0$	Extremadamente húmedo	2.3

Fuente: Campos-Aranda (2014)

Actualmente el SENAMHI emplea el indicador SPI para la identificación de sequías meteo-

rológicas y el monitoreo mensual de sequías a nivel nacional.

### **3.2.4 Modelo de Zonificación Agroecológica**

Se siguió el diagrama metodológico representado en la Figura 11, para la obtención del modelo de Zonificación Agroecológica. Cada etapa se siguió según las siguientes secciones y sub-secciones.

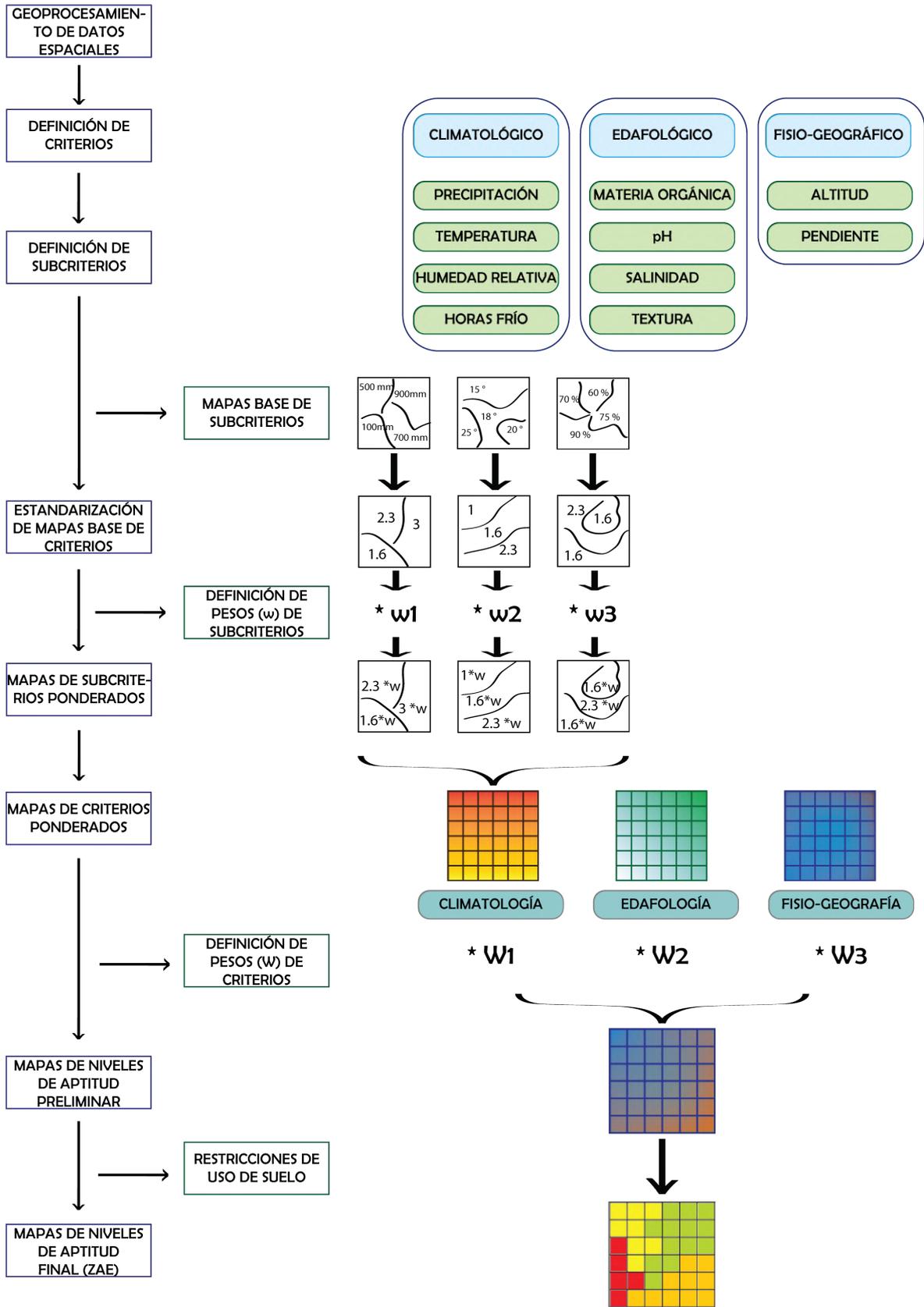


Figura 11: Diagrama de flujo del geoprocesamiento de la ZAE

### **3.3 Identificación de variables agroecológicas**

Se identificaron los criterios, en los cuales se agruparon los sub-criterios de cada mapa base que se presentan en los siguientes pasos.

### **3.4 Preparación de mapas base**

Se realizó un pre-procesamiento del modelo de elevación digital y las imágenes satelitales. Además, se realizaron las interpolaciones adecuadas para cada tipo de información climática. Luego se realizó una re-clasificación de los raster, para una mejor identificación visual de la variabilidad espacial de cada sub-criterio. Este proceso se realizó en el lenguaje de programación R para tener un mayor control y entendimiento del procesamiento de los datos.

### **3.5 Determinación de pesos de sub-criterios y criterios**

Los criterios y sub-criterios para la zonificación agroecológica que están determinados en la sub-sección 3.3, obtendrán sus pesos según la metodología explicada a continuación.

#### **3.5.1 Estimación de pesos de sub-criterios y criterios**

Este proceso se realizó siguiendo la metodología del Proceso Analítico Jerarquizado (APH), fundamentado por Wind et al. (1980). El cual, según explican Gallegos et al. (2007a), es una de las técnicas de toma de decisiones más versátiles de la época, ya que, permite mejorar la consistencia de los juicios de los expertos mediante revisión de las encuestas a partir de las cuales se hacen las comparaciones pareadas, y la incorporación de nueva información consistente que se haya generado en el proceso.

En el método de APH, los sub-criterios seleccionados se comparan por pares, para evaluar la influencia de cada elemento respecto al otro. Se asumirá que los sub-criterios a comparar tienen un mismo orden de magnitud, como explican Karami et al. (2016).

En este proceso, los números del 1 al 9 son asignados en una escala estándar para determinar la importancia de las alternativas, de igual a una importancia absoluta, entre sí, la Tabla 5 muestra esta asignación. Se asignó valores numéricos a los juicios hechos por las personas

consideradas expertos en el problema de estudio y principalmente por literatura citada.

**Tabla 5: Escala de comparación pareada**

Intensidad de Importancia	Definición
1	Igual importancia
3	Débil importancia de uno sobre otro
5	Importancia esencial o fuerte
7	Importancia demostrada
9	Importancia absoluta
2,4,6,8	Valores intermedios entre los valores de escala
Recíproco distinto a cero	Si se asigna $a_{ji}$ al comparar la actividad i con la j, entonces se asigna $a_{ji} = 1/a_{ji}$ al comparar la j con la i

Fuente: Wind et al. (1980)

Los expertos temáticos consultados para la determinación de los coeficientes para elaborar la matriz de comparación pareada fueron profesores especialistas en frutales de la facultad de Agronomía de la UNALM. Además, se consultó con ingenieros de extensión agraria de la Dirección Regional de Agricultura de Huánuco.

De la literatura recopilada para la determinación de las intensidades de importancia entre los sub-criterios seleccionados en la sección 3.3, se usaron los valores de las investigaciones realizadas en cultivos relacionados taxonómicamente con el duraznero (familia, subfamilia, genero), especificadas en la sub-sección 2.1.2.

Por ejemplo, Quinta-Nova and Ferreira (2020), realizan un análisis de optimización de tierras multicriterio para *Prunus dulcis* (almendros), *Juglans regia* (nogales), *Pistacia vera* (pistacheros) y *Fragaria vesca* (frutillas). Otros autores como: Kim et al. (2018), Karami et al. (2016) y Sönmez et al. (2019), proponen una zonificación para la evaluación de tierras usando la metodología AHP, MCAD y SIG para el cultivo del *Malus domestica* (manzano).

### 3.5.2 Análisis de consistencia

El análisis de consistencia de los pesos estimados se realizó para validar los pesos asignados por los expertos a cada criterio y sub-criterio, que podrían ser inconsistentes, como resultado de comparaciones pareadas erróneas o incoherentes. Para ello, el Proceso Analítico Jerarquizado de Wind et al. (1980), incluyen el cálculo de una Relación de Consistencia (RC), que mide la fortaleza de las comparaciones y muestra la probabilidad de que los valores de importancia sean generados de manera aleatoria.

La estimación de consistencia de los pesos sigue la metodología de Berumen et al. (2007). En primer lugar, la matriz ( $A'$ ) que contiene las comparaciones pareadas entre las alternativas es operado con su vector propio ( $w'$ ) mediante la Ecuación 11, resultando el máximo valor ( $\lambda_{max}$ ). La desviación de la consistencia entre el número de alternativas ( $n$ ) y el  $\lambda_{max}$ , esta representado por el Índice de Consistencia ( $IC$ ), que se calculó con la Ecuación 12.

$$(A') \times (w') = \lambda_{max} \times (w') \quad (11)$$

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{(n - 1)} \quad (12)$$

Donde:

$A'$  = Matriz de comparaciones pareadas

$w'$  = Vector propio de matriz  $A'$

$\lambda_{max}$  = Máximo valor

IC = Índice de Consistencia

n = Número de alternativas

Finalmente, la Relación de Consistencia (RC), es calculada como la relación entre el Índice de Consistencia obtenido en la Ecuación 12 y el Índice de Consistencia Aleatorio (ICA), mediante la Ecuación 13. El ICA es obtenido a partir de la Tabla 6 y esta en función del número de alternativas que se comparan en la matriz.

$$RC = \frac{IC}{(ICA)} \quad (13)$$

Donde:

RC = Relación de consistencia

IC = Índice de consistencia

ICA = Índice de consistencia aleatorio

**Tabla 6: Índice de Consistencia Aleatorio (ICA)**

Número de elementos que se comparan	1	2	3	4
Índice de Consistencia Aleatorio (ICA)	0	0	0.58	0.89

Fuente: Berumen et al. (2007)

Un valor de la Relación de Consistencia menor a 0.10 se considera aceptable en las comparaciones, como señalan Malczewski (2006) y Berumen et al. (2007). Una vez obtenidos los resultados de la RC, se procedió a una modificación de los pesos, en el caso de un RC inaceptable, caso contrario se determinó como el peso de cada sub-criterio y criterio.

### 3.6 Etapa de campo

El estudio de campo se realizó para validar los mapas base de suelos que se usan en el análisis multicriterio de la Zonificación Agroecológica (ZAE) del duraznero.

#### 3.6.1 Ubicación de calicatas

Para ubicar las calicatas se requirió identificar zonas no homogéneas y con la mayor cantidad de puntos espaciales representativos del mapa de clasificación taxonómica (USDA) de suelos de SOILGRIDS; además, se tuvo en cuenta las zonas sin restricción de uso agrícola en la zona de estudio, y la accesibilidad a la zona de estudio, para finalmente identificar la ubicación para la excavación de 15 calicatas, las cuales se ubicaron en campo a través de su geo-referenciación con un GPS navegador.

### **3.6.2 Toma de muestras de calicatas**

Para una mayor identificación de los perfiles de suelo y de sus horizontes las calicatas tuvieron una profundidad mínima de 0.9 m, según las recomendaciones del MINAM (2014). En cada una, se realizó con un análisis visual de sus horizontes, identificado el espesor, estructura, consistencia, presencia de raíces, límite, profundidad de cada horizonte.

Seguidamente, de la lectura de las calicatas se procedió a la extracción de muestras que fue de 1 kg aproximadamente por horizonte, a los 30, 60 y 90 cm de profundidad, para luego ser analizados en el laboratorio de suelos.

### **3.7 Etapa de laboratorio**

En esta etapa, los análisis de suelos se realizaron en el Laboratorio de Riegos de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la UNALM y en el laboratorio de suelos externo CORCOPROSE-RIN E.I.R.L.

#### **3.7.1 Análisis de muestras de suelos**

Para caracterizar las propiedades físicas y químicas de dichos suelos, se realizó un análisis de suelo siguiendo los siguientes métodos para cada propiedad. Una muestra de los resultados certificados se muestran en el Anexo 5.2.

- Textura: Método de la pipeta
- Materia orgánica: Método de Walkley y Black modificado
- PH: Método electro-métrico
- Conductividad eléctrica: Método de conductividad eléctrica del extracto de saturación

### **3.8 Etapa de geoprocusamiento**

En esta etapa se realizaron todos los análisis y operaciones geo-espaciales, usando software y lenguajes de programación para la manipulación de sistemas de información geográfica como R y Quantum GIS.

### 3.8.1 Determinación de errores de mapas de sub-criterios

Los datos de validación para el cálculo de error dependieron de la naturaleza de cada criterio estudiado. Para los mapas climáticos, se usaron series de tiempo mensuales y diarias de la estación meteorológica Tingo María, ya que es la más cercana al distrito y está ubicada en la misma Región de Precipitación de la zona de estudio, determinada por Tupac-Yupanqui et al. (2017). Las series de tiempo de la estación seleccionada pasaron por un control de calidad, para ser comparadas de forma puntual con los productos PISCO de temperatura diaria y precipitación acumulada mensual.

Los mapas de suelos de SOILGRIDS se evaluarán mediante su comparación con los resultados del laboratorio de la sección 3.6 de calicata geo-referenciada (promedio de sus horizontes). Los mapas físico-geográficos, provenientes de un Modelo de Elevación Digital (DEM) serán evaluados mediante la comparación con altitudes puntuales geo-referenciados por el Instituto Geográfico Nacional (IGN).

La determinación de los errores de los mapas de sub-criterios se realizó para evaluar el error de los mapas base de entrada al análisis multicriterio, para ello se usaron los siguientes parámetros estadísticos:

#### **Error Medio Absoluto (MAE)**

El Error Medio Absoluto (MAE), es empleado para demostrar la magnitud promedio del error entre un conjunto de datos verdaderos y otro de predicción (Hamner et al., 2018). El MAE está calculado con la Ecuación 14.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N (X_P - X_V)}{(N)} \quad (14)$$

Donde  $X_V$  y el  $X_P$  son los datos verdaderos y de predicción respectivamente.  $N$  es el número de observaciones del conjunto de datos.

### **Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)**

La Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) es similar al MAE, sin embargo, denota mayor prioridad al cálculo de la magnitud media del error entre un conjunto de datos verdaderos y de predicción (Hamner et al., 2018). La RMSE está calculado por la Ecuación 15.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_P - X_V)^2} \quad (15)$$

Donde  $X_V$  y el  $X_P$  son los datos verdaderos y de predicción respectivamente. N es el número de observaciones.

### **Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE)**

El Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE), es uno de los más comunes indicadores estadísticos para medir la precisión de los datos de predicción. Es usado para comparar conjuntos de datos diferentes, independientemente de su escala, a través del promedio de los errores porcentuales (Makridakis et al., 1982). El MAPE está calculado por la Ecuación 16.

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(X_V - X_P)}{(X_V)} \times 100 \quad (16)$$

Donde  $X_V$  y el  $X_P$  son los datos verdaderos y de predicción respectivamente. N es el número de observaciones del conjunto de datos. El MAPE está expresado en porcentaje.

### **Coefficiente de Correlación de Pearson (r)**

El Coeficiente de Correlación de Pearson es usado ampliamente para representar la relación entre los datos verdaderos y los datos de predicción. La relación de correlación perfecta tiene como resultado un valor cercano a +1 (Martinez, 2009). El r está calculado por la Ecuación 17.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (X_P - \overline{X_P})(X_V - \overline{X_V})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_P - \overline{X_P})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (X_V - \overline{X_V})^2}} \quad (17)$$

Donde  $X_V$  y el  $X_P$  son los datos verdaderos y de predicción respectivamente. N es el número de observaciones.

### **Coefficiente de Determinación ( $r^2$ )**

El Coeficiente de Determinación es un parámetro estadístico resultante del cuadrado del r. Está definida como la proporción de la varianza total de la variable expresada por una regresión. El resultado del  $r^2$  oscila entre 0 y 1, si este valor es más cercano a 1, mayor será el ajuste de la regresión a la variable que estamos prediciendo (Martinez, 2009). El  $r^2$  está calculado por la Ecuación 18.

$$r^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^N (X_P - \overline{X_P})(X_V - \overline{X_V})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_P - \overline{X_P})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (X_V - \overline{X_V})^2}} \right)^2 \quad (18)$$

Donde  $X_V$  y el  $X_P$  son los datos verdaderos y de predicción respectivamente. N es el número de observaciones.

### **Bias**

El Bias o sesgo, expresa la varianza media entre los datos verdaderos y los del modelo de predicción. Un sesgo positivo indica una sub-estimación y el negativo una sobre-estimación respecto a los datos de entrenamiento (Hamner et al., 2018). El Bias se calcula con la Ecuación 19

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^N (X_P - X_V)}{(N)} \quad (19)$$

Donde  $X_V$  y el  $X_P$  son los datos verdaderos y de predicción respectivamente. N es el número de observaciones.

### **3.8.2 Estandarización de mapas**

En esta fase, se estandarizaron los mapas base, es decir, se asignó una misma resolución espacial (50 m), mismo sistema de coordenadas geográficas (proyección UTM-18S, DATUM WGS-84) y una misma extensión geográfica.

Además, el análisis multicriterio requiere que los datos de ingreso estén definidos en una escala de medición común. Por ello, los mapas resultantes de cada sub-criterio se clasificaron en cuatro clases o niveles de aptitud, de la siguiente manera:

- Aptitud Optima: 3
- Aptitud Media: 2.6
- Aptitud Baja: 1.3
- No Apto: 1

La clasificación propuesta responde a la necesidad de identificar con claridad las áreas de mayor aptitud, mediante la aplicación de la lógica difusa, como sugieren (Gallegos et al., 2007b).

### **3.8.3 Mapa de sub-criterios ponderados**

Los mapas estandarizados por cada sub-criterio se multiplicaron por su peso correspondiente, determinado en la sección 3.5, para obtener los mapas de sub-criterios ponderados. Después, los mapas ponderados se sumaron, y dieron como resultado el mapa de ZAE preliminar.

### **3.8.4 Restricciones del mapa de Zonificación Agroecológica**

En esta etapa, el mapa de aptitud preliminar fue editado mediante procedimientos de álgebra booleana para discriminar del análisis, las áreas que según la Zonificación Económica Ecológica (ZEE) de Huánuco, elaborado por el Ministerio de Agricultura, no son aptas para su uso como tierras de producción de cultivos, por diferentes razones: legales (áreas forestales arboladas, áreas de conservación biológica), uso permanente definido (urbano, carreteras, cuerpos de agua), mayor rentabilidad (agricultura intensiva), y otros, como recomiendan Hernández-Zaragoza et al. (2019).

## Usos de suelo no apto para cultivos

Como se define en la sección 2.4.3, los resultados de la Zonificación Económica Ecológica, identifica los usos de la tierra en diversas zonas productivas. Por ello, las zonas determinadas como áreas de protección no serán aptas para el desarrollo de la agricultura (GOREHCO, 2016).

La principal zona de protección en el distrito de estudio, es el Área de Conservación Regional “El Carpish”, ya que comprende unidades de Bosque Sub Montano Muy Húmedo de Laderas de Montañas, Bosque Matorralado Montano Bajo Muy Húmedo de Laderas de Montañas, Herbazales Secundarios con uso temporal pecuario, Cultivos permanentes arbustivos y Bosque Montano Húmedo de Laderas de Montañas. Su distribución geográfica en la zona de estudio se presenta en la Figura 12

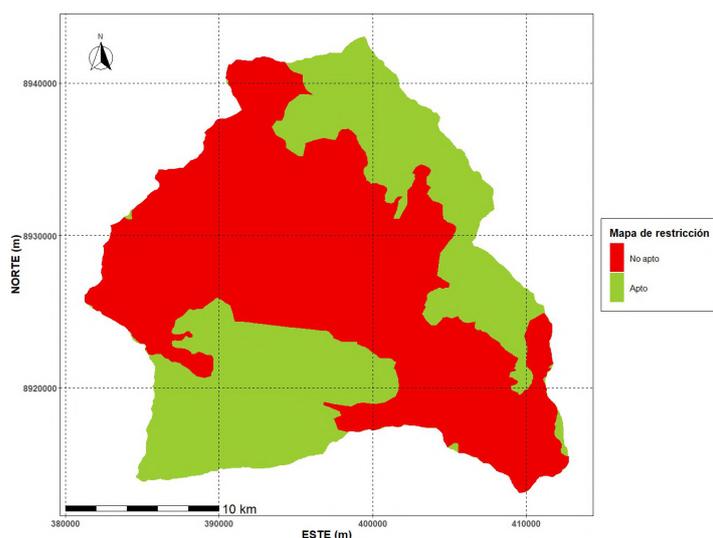


Figura 12: Mapa de restricción correspondiente al área de conservación “El Carpish” - Huánuco

### 3.8.5 Mapa de Zonificación Agroecológica final

En esta sección, se realizó una última clasificación del mapa preliminar con las restricciones de uso para poder obtener las áreas de potencialidad óptima, media y baja de la zona de estudio, de la siguiente forma:

- Aptitud Óptima: 2.5 - 3
- Aptitud Media: 2 - 2.5

- Aptitud Baja: 1.45 - 2
- Aptitud Marginal(No apta): 1 - 1.45

Finalmente, se hará un análisis de la identificación de las áreas obtenidas en esta clasificación por cada nivel de aptitud, para cuantificar la frontera agrícola del duraznero huayco rojo.

## **IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

### **4.1 Variables agroecológicas del duraznero**

Los requerimientos agroclimáticos, edafológicos y físico-geográficos del duraznero, están basados en las investigaciones de diversos autores detallados en la sub-sección 2.1.6. La síntesis de las variables cualitativas y cuantitativas por cada criterio y sub-criterio seleccionados se presentan en la Tabla 7. Las aptitudes se definen como Óptimo, Medio, Bajo y No Apto.

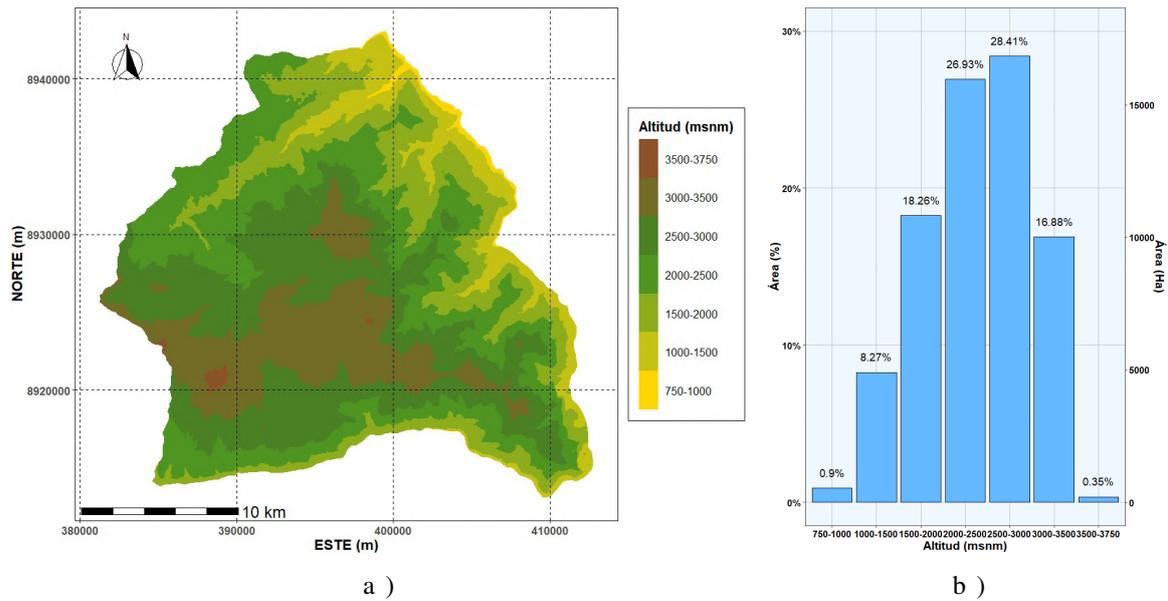
**Tabla 7: Criterios seleccionados para zonificación**

Criterios	Subcriterios	Nivel de aptitud			
		Óptimo	Medio	Bajo	No Apto
Físico-Geográfico	Altitud (msnm)	1600 – 2500	1400 – 1600 $y$	0 – 1400 $y$	> 3200
	Pendiente (%)	0 – 5,0	5,0 – 10,0	10 – 45,0	> 45
Climatología	Precipitación(mm)	800 – 1400	600 – 800 $y$ 1400 – 1500	400 – 600 $y$ 1500 – 2200	< 400 $y$ > 2200
	Temperatura(°C)	21 – 26	14 – 21 $y$ 26 – 27	8 – 14 $y$ 27 – 40	< 8 $y$ > 40
	HF(horas)	400 – 800	300 – 400	200 – 300 $y$ 800 – 900	< 200 $y$ > 900
	HR(%)	50 – 65	40 – 50 $y$	40 – 30 $y$	< 30 $y$
			65 – 75	75 – 85	> 85
	Edafología	MO(%)	2,5 – 3,5	2 – 2,5	1,3 – 2 $y$ 3,5 – 4
6,2 – 6,8				5,5 – 6,2 $y$ 6,8 – 7,5	4,3 – 5,5 $y$ 7,5 – 8,7
PH					
CE(dS/cm)		< 1,8	1,8 – 2,6	2,6 – 4,1	> 4,1
	Textura	<i>Fr.A</i>	<i>Fr.Ar.A,</i> <i>Fr, A.Fr</i>	<i>Ar.A, Fr.L.,</i> <i>Fr.Ar, A</i>	<i>Otros</i>

## 4.2 Mapas de sub-criterios

### 4.2.1 Mapa de altitudes

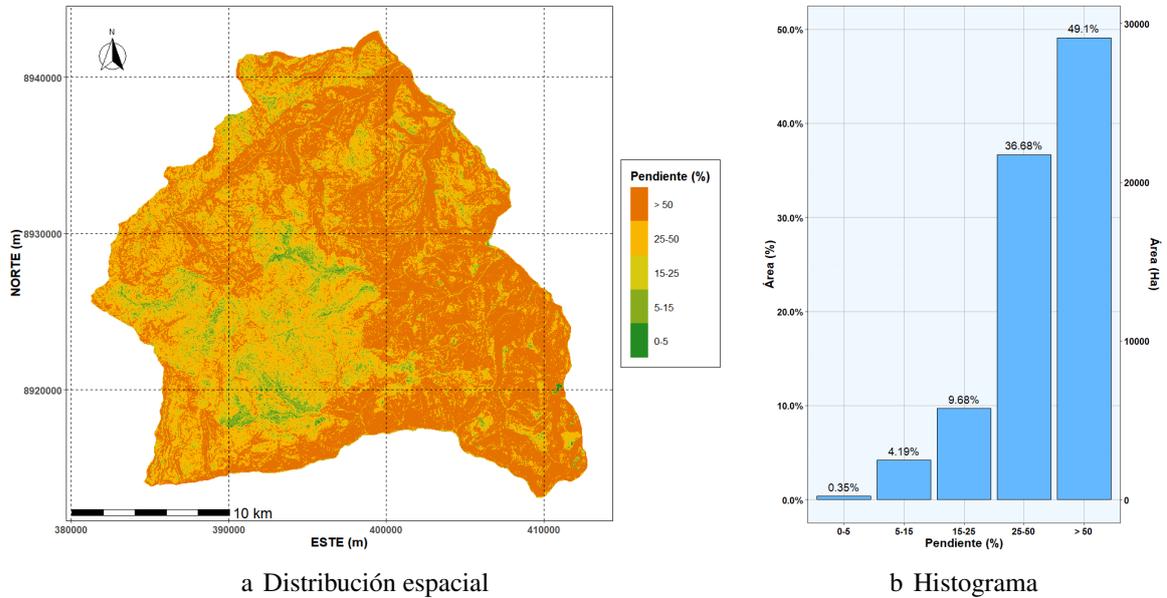
En este mapa, las altitudes se encuentran en el rango de 750 a 3750 msnm. La mayor parte del territorio comprende las alturas de 2000 a 3000 msnm, como se describe en el histograma de distribución de altitudes en la Figura 13.b.



**Figura 13: Mapa de altitudes**  
a) Distribución espacial, b) Histograma de frecuencias

## 4.2.2 Mapa de pendientes

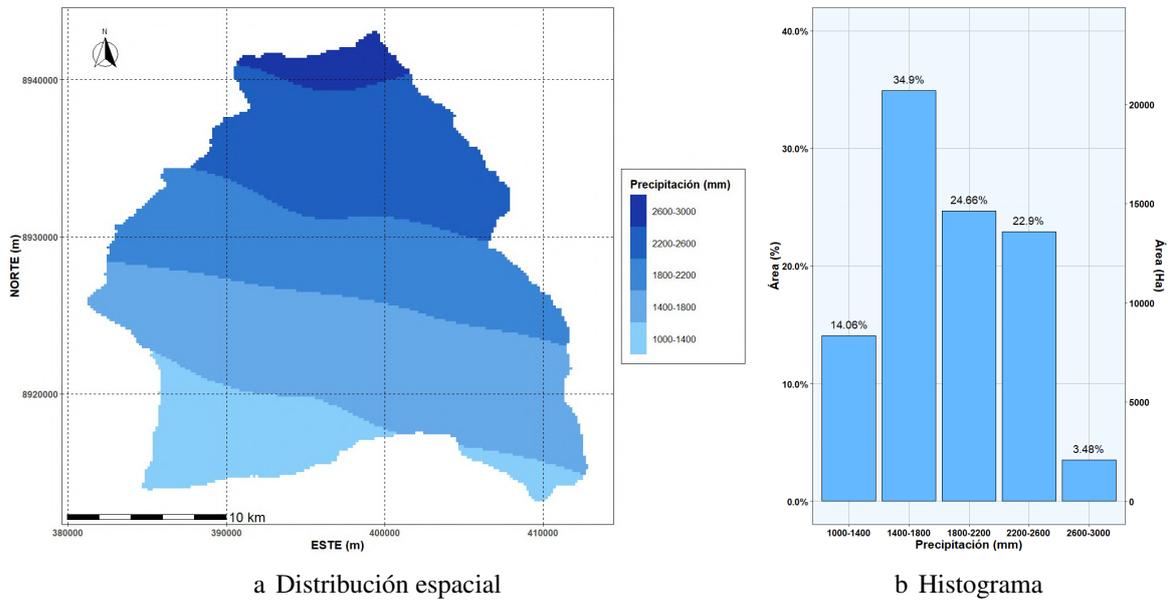
En este mapa, presentado en la Figura 14, las pendientes comprenden el rango de 0 a > 100 %. La mayor parte del territorio, tiene una pendiente entre 25 % a 100 %. Las pendientes planas de 0 a 5 %, corresponden a una menor proporción de territorio.



**Figura 14: Mapa de pendientes**  
a) Distribución espacial, b) Histograma de frecuencias

### 4.2.3 Mapa de precipitación acumulada multi-anual

En la Figura 15, se presenta el mapa de precipitación promedio, el cual se obtuvo a partir de un procesamiento de la información del producto PISCO mensual. Se realizó un promedio multi-anual de la precipitación acumulada, de una serie histórica de 30 años, desde enero de 1990 hasta diciembre del 2019. Se usó el método de Kriging ordinario para la interpolación de la información, para obtener mejores resultados como recomiendan Vicente-Serrano et al. (2003), para las zonas montañosas.



**Figura 15: Mapa de precipitación promedio**  
a) Distribución espacial, b) Histograma de frecuencias

#### 4.2.4 Análisis de la precipitación

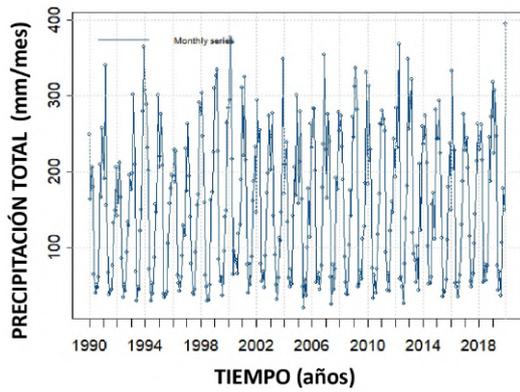
El análisis exploratorio de la precipitación se presenta en la Figura 16 y está definido desde enero de 1990 hasta diciembre de 2019 (30 años), los resultados presentados son calculados a partir del promedio de precipitación acumulada mensual, de la zona de estudio.

En la serie de tiempo de precipitaciones mensuales de la Figura 16.a, la precipitación mínima mensual es 20 mm y la máxima es 400 mm. También, se muestran los diagramas de cajas de las precipitaciones mensuales, según el tamaño de estas cajas se infiere que existe una importante variabilidad mensual de la precipitación principalmente durante los meses de septiembre a abril, el resto del año la variabilidad es menor (Figura 16.b). Además, según los histogramas de frecuencia de la precipitación mensual, podemos afirmar que el rango de mayor probabilidad de ocurrencia o precipitación mensual más frecuente es de 0 a 50 mm/mes, durante el año (Figura 16.c).

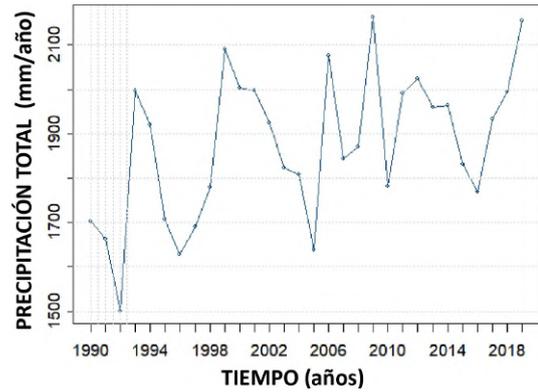
Respecto a las series de precipitación anuales, según el diagrama de cajas, existe una alta variabilidad de precipitación acumulada con un rango desde 1500 a 2160 mm/año (Figura 16.e). El histograma de frecuencias nos indica que el rango de mayor probabilidad de precipitación anual más frecuente es de 1900 a 2000 mm/año (Figura 16.f).

Después, se determinó una tendencia generalizada al incremento de la precipitación acumulada anual (Figura 16.b) en toda la zona de estudio. Las series de precipitación acumulada anual analizadas, presentan un incremento significativo con un nivel de confianza entre 90 % a 99 %, las tasas de aumento están en el rango de 5.13 a 19.65 mm/año, con un valor medio de 9.41 mm/año. El promedio de la serie de precipitación acumulada en el área de estudio describe una tendencia incremental de 9.59 mm/año con un nivel de confianza de 95 %.

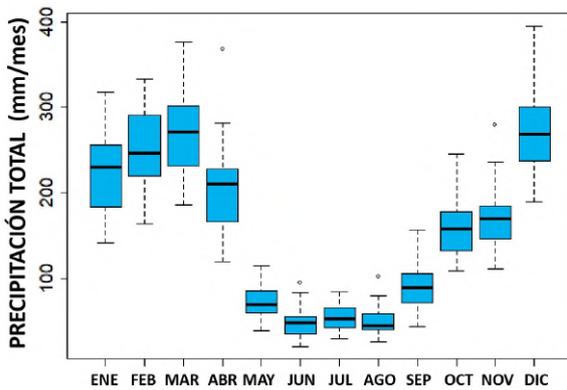
Finalmente, sabiendo que la mediana de la precipitación total anual en la zona de estudio es de 1900 mm/año y que la tendencia incremental es de 9.59 mm/año, realizando una proyección futura del duraznero a 20 años, tiempo recomendado para la renovación de este frutal en la sub-sección 2.1.5, el valor central de precipitación será de 2091.8 mm/año. Este valor de precipitación permanecerá en el nivel de aptitud Bajo, según la tabla 7.



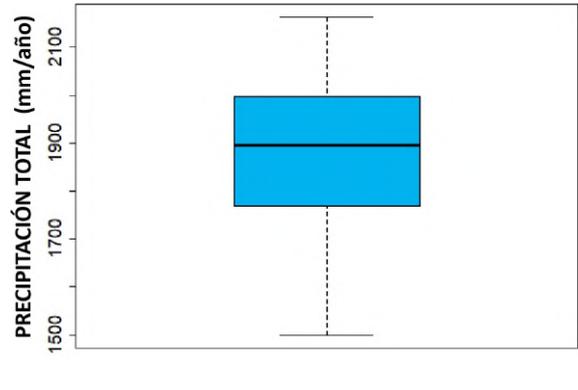
a )



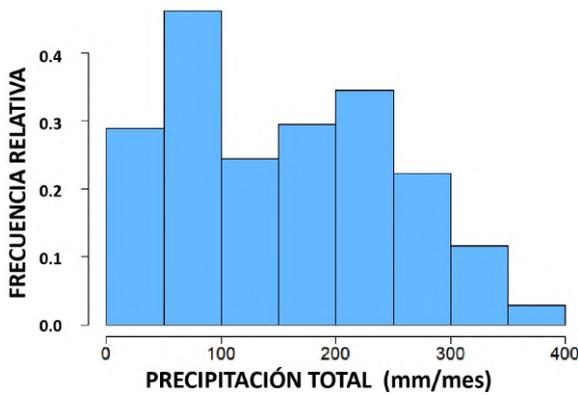
b )



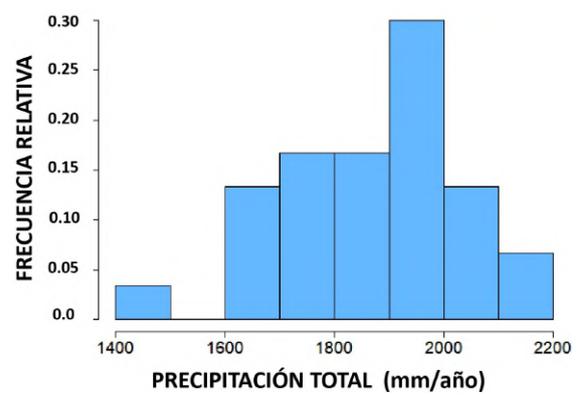
c )



d )



e )



f )

**Figura 16: Análisis exploratorio de datos de precipitación 1990-2019**

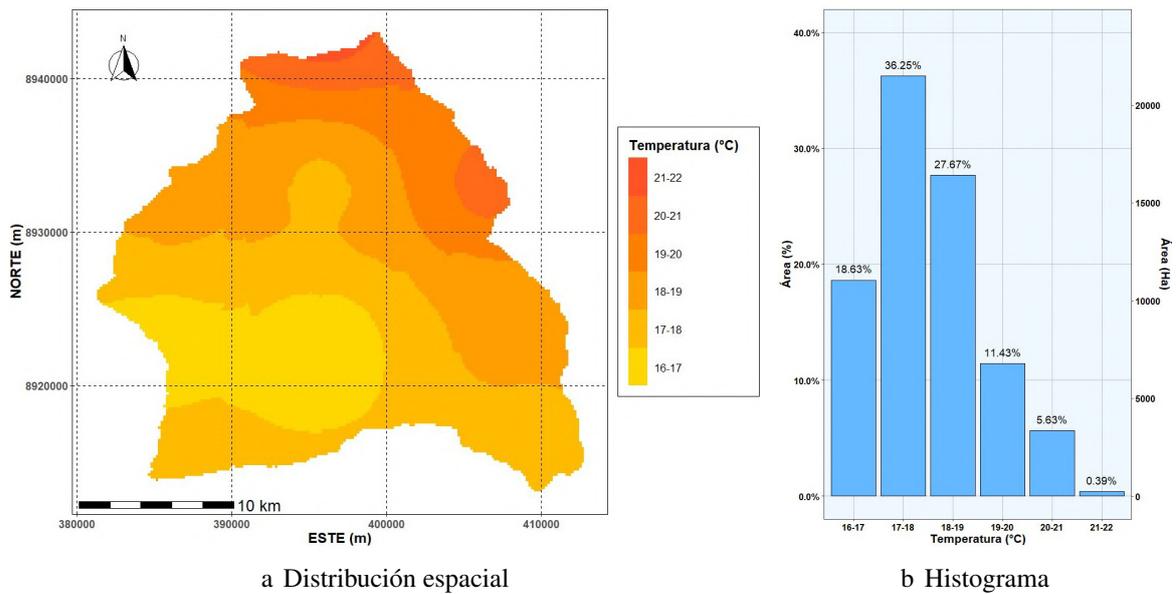
a) Serie de tiempo mensual, b) Diagrama de cajas mensual, c) Histograma mensual, d) Serie de tiempo anual, e) Diagrama de cajas anual, f) Histograma anual

#### 4.2.5 Mapa de temperatura media

En la Figura 17, se presenta el mapa de temperatura promedio, el cual se obtuvo a partir de un procesamiento de la información del producto PISCO diario. Se realizó un promedio multi-anual de la temperatura, de una serie histórica de 30 años, desde enero de 1987 hasta diciembre del 2016. La interpolación de la información se realizó con el método de IDW,

como recomiendan Vicente-Serrano et al. (2003). Las temperaturas promedio se van incrementando en dirección noreste, desde 16 °C en la zona central sur hasta los 22 °C en el norte y noreste de la zona de estudio.

A partir del histograma presentado en la Figura 17.b, podemos afirmar que el rango de temperatura más frecuente es de 17 a 18 °C, y que la variabilidad en promedio es desde 16 a 22 °C.



**Figura 17: Mapa de temperatura promedio**  
**a) Distribución espacial, b) Histograma de frecuencias**

#### 4.2.6 Análisis de la temperatura

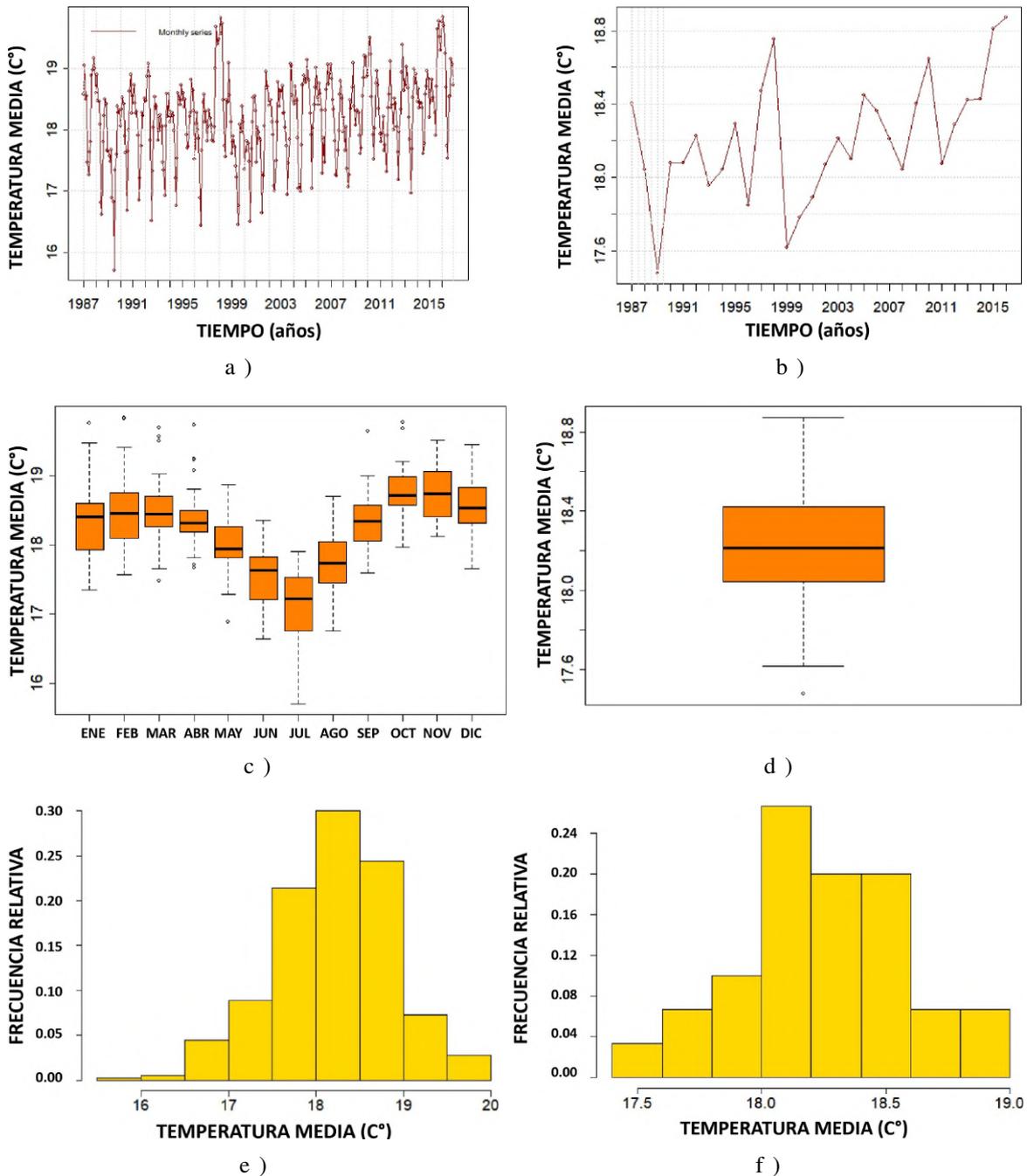
El análisis exploratorio de la temperatura se presenta en la Figura 18 y está definido desde enero de 1987 hasta diciembre de 2016 (30 años). Los resultados presentados son calculados a partir del promedio areal de temperatura, de la zona de estudio.

En la serie de tiempo de temperaturas mensuales de la Figura 18.a, la temperatura mínima mensual es 15.5 °C en 1989 y la máxima es 19.8 °C en 2016. También, se muestran los diagramas de cajas de las temperaturas mensuales, según el tamaño de estas cajas se infiere que existe una mayor variabilidad mensual de la temperatura mayor, durante los meses de diciembre a febrero y de mayo a agosto, el resto del año la variabilidad es menor (Figura 18.b). Además, según los histogramas de frecuencia de las temperaturas mensuales, podemos afirmar que el rango de mayor probabilidad de ocurrencia o temperatura mensual más frecuente es de 18 a 18.5 °C, durante el año (Figura 18.c).

Respecto a las series de temperatura anuales de la Figura 18.d, según el diagrama de cajas, existe una baja variabilidad de temperatura con un rango desde 17.6 a 18.8 °C (Figura 18.e). El histograma de frecuencias nos indica que el rango de mayor probabilidad de temperatura anual más frecuente es de 18 a 18.2 °C (Figura 18.f).

Finalmente, se determinó una tendencia generalizada al incremento de la temperatura promedio anual (Figura 18.b) en toda la zona de estudio. Las series de temperatura promedio anual analizadas, presentan un incremento significativo con un nivel de confianza de 99 %, las tasas de aumento están en el rango de 0.018 a 0.023 °C/año, con un valor medio de 0.02 °C/año. El promedio de la serie de temperatura promedio en el área de estudio describe una tendencia incremental de 0.019 °C/año con un nivel de confianza de 99 %.

Finalmente, sabiendo que la mediana de la temperatura promedio anual en la zona de estudio es de 18.21 °C/año y que la tendencia incremental es de 0.019 °C/año, realizando una proyección futura del duraznero a 20 años, tiempo recomendado para la renovación de la plantación de este frutal en la sub-sección 2.1.5, el valor central de temperatura será de 18.59 °C/año. Este valor de temperatura permanecerá en el nivel de aptitud Medio, según la tabla 7.



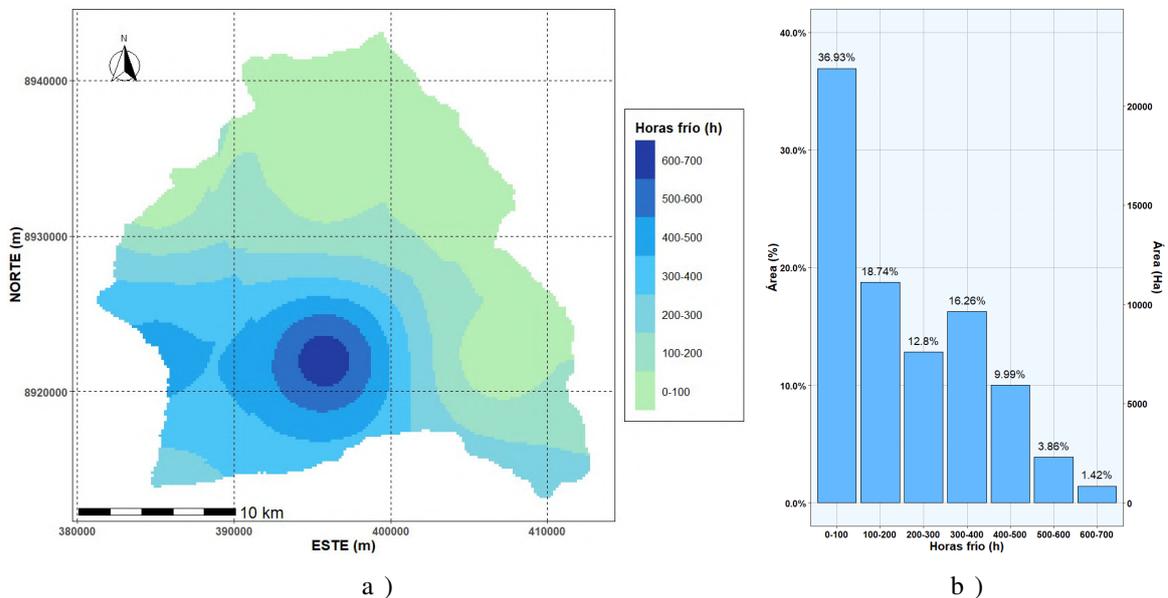
**Figura 18: Análisis exploratorio de datos de temperatura promedio 1990-2019**  
a) Serie de tiempo mensual, b) Diagrama de cajas mensual, c) Histograma mensual, d) Serie de tiempo anual, e) Diagrama de cajas anual, f) Histograma anual

#### 4.2.7 Mapa de horas frío

En la Figura 19, se presenta el mapa de horas frío, que se estimó a partir de un procesamiento de la información del producto PISCO diario de temperaturas mínimas y máximas, como se indica en la sección 3.2.3. Se realizó un promedio multi-anual de las horas frío acumuladas por cada año, de una serie histórica de 30 años, desde enero de 1987 hasta diciembre del

2016. La interpolación de la información se realizó con el método IDW, como recomiendan Vicente-Serrano et al. (2003).

Según la distribución espacial de las horas frío (Figura 19), la acumulación anual de las horas frío está relacionada con las altitudes, en una relación directamente proporcional. Por ello, en la zona central de la zona de estudio, donde la altitud es mayor a 3000 msnm (13), hay una disponibilidad promedio superior a las 300 horas frío por año. Además, según el histograma de frecuencias (Figura 19.b), el rango de horas frío por año más frecuente está entre 0 y 100 horas.

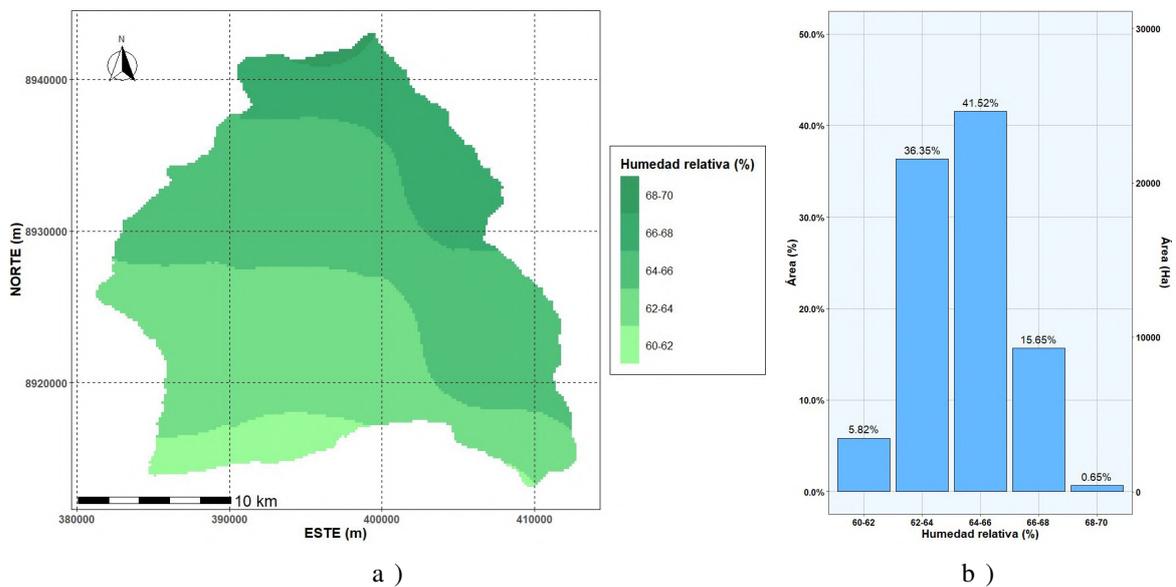


**Figura 19: Mapa de horas frío**  
a) Distribución espacial, b) Histograma de frecuencias

#### 4.2.8 Mapa de humedad relativa

En la Figura 20, se presenta el mapa de humedad relativa, que se estimó a partir de un procesamiento de la información del producto PISCO diario de temperaturas mínimas y máximas, con la metodología detallada en la sección 3.2.3. Se realizó un promedio multi-anual de la humedad relativa por cada año, de una serie histórica de 30 años, desde enero de 1987 hasta diciembre del 2016. La interpolación de la información se realizó con el método IDW, como recomiendan Vicente-Serrano et al. (2003).

Según la Figura 20, la humedad relativa tiene una relación directamente proporcional con la temperatura promedio de la Figura 17. Por ello, existe una tendencia al incremento de la humedad relativa en dirección noreste desde 60 a 70 %. Además, según el histograma de frecuencias de la Figura 20.b, el rango de humedad relativa promedio más frecuente está entre 64 y 66 %.

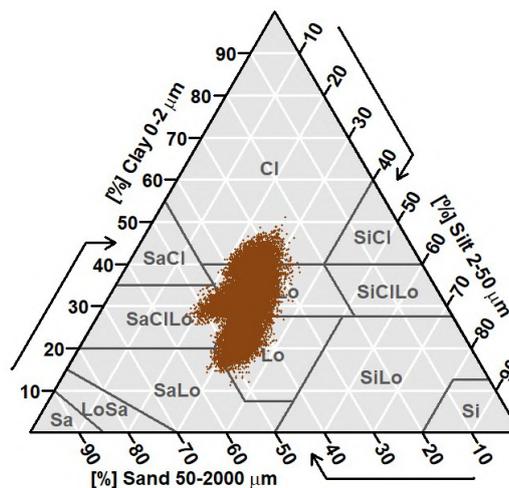


**Figura 20: Mapa de humedad relativa**  
a) Distribución espacial, b) Histograma de frecuencias

#### 4.2.9 Mapa de texturas de suelo

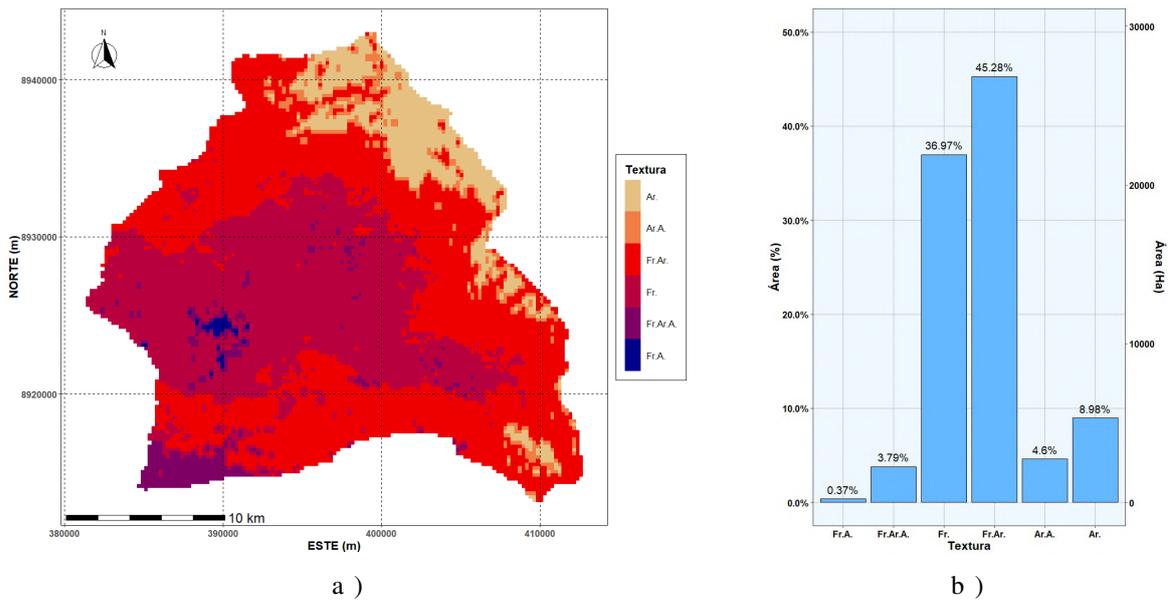
En la Figura 22, se presenta el mapa de texturas de suelo, que se estimó a partir de un procesamiento de la información de propiedades físicas del suelo del producto SoilGrids de arena, arcilla y limo; la textura se determinó mediante la clasificación del triángulo de texturas de USDA de la Figura 21.

Según la Figura 21, las texturas finas y medias son predominantes. Respecto a la distribución espacial de las texturas según la Figura 22, la ubicación de las texturas finas, constituidas por las arcillas, están al este del distrito y las texturas gruesas, constituidas por suelos franco arenosos y franco arcillo-arenosos, se ubican en el suroeste del distrito. Además, según el histograma de frecuencias de la Figura 22.b, el rango de texturas más frecuente es del tipo franco arcilloso, seguido por las texturas francas.



**Figura 21: Clasificación de suelos por triángulo textural**

**Clay:** Arcilla, **Silt:** Limo, **Sand:** Arena, **Cl:** Arcilla, **SaCl:** Arcilla Arenosa, **SiCl:** Limoso Arcilloso, **SaLo:** Franco Arcilloso, **SiClLo:** Franco Limoso Arcilloso, **SaClLo:** Franco Arcilloso Arenoso, **Lo:** Franco, **SaLo:** Franco Arenoso, **SiLo:** Franco Limoso, **LoSa:** Franco Arenoso, **Sa:** Arena, **Si:** Limo

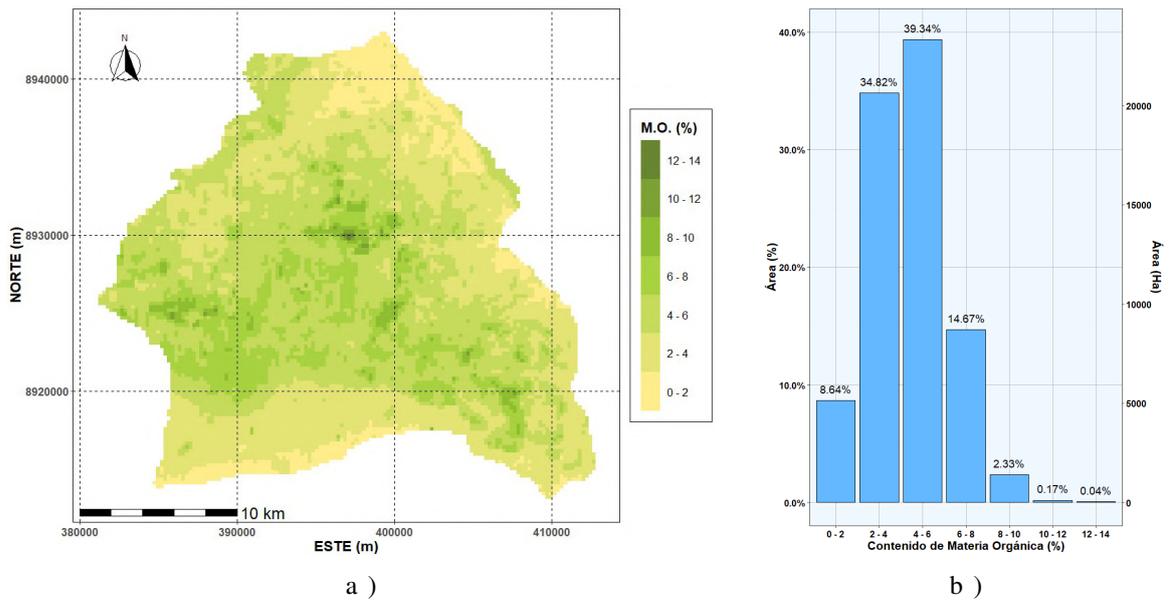


**Figura 22: Mapa de texturas de suelo**  
a) Distribución espacial, b) Histograma de frecuencias. Fr.A.: Franco Arenoso, Fr.Ar.: Franco Arcilloso Arenoso, Fr.: Franco, Fr.Ar.: Franco Arcilloso, Ar.A.: Arcillo Arenoso, Ar.: Arcilloso

#### 4.2.10 Mapa de materia orgánica

En la Figura 23, se presenta el mapa de distribución de la materia orgánica en el suelo, que se estimó a partir de un procesamiento de la información de propiedades físicas del suelo del producto SoilGrids.

Según la Figura 23.a la distribución espacial de la materia orgánica alcanza un máximo valor de 14 % en el centro de la zona de estudio, descendiendo en dirección noreste y suroeste hasta llegar a un valor cercano de 0 %. Además, según el histograma de frecuencias de la Figura 23.b, el rango de contenido de materia orgánica más frecuente es de 4 a 6 %.



**Figura 23: Mapa de materia orgánica**  
a) Distribución espacial, b) Histograma de frecuencias

#### 4.2.11 Mapa de pH

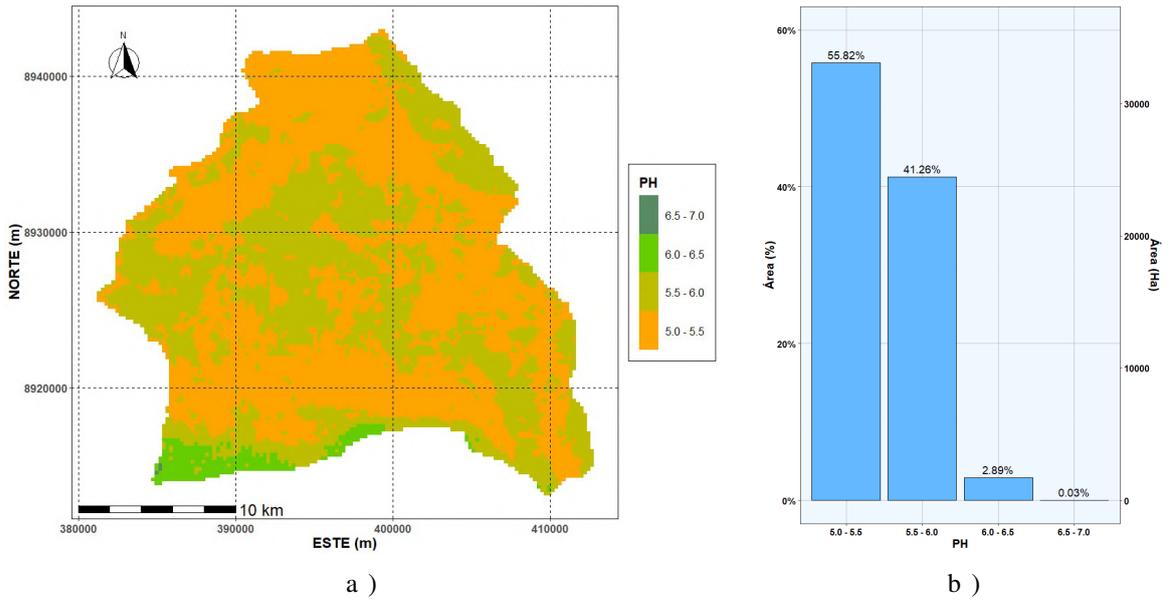
En la Figura 24, se presenta el mapa de distribución de la acidez del suelo, que se estimó a partir de un procesamiento de la información de propiedades químicas del suelo, del producto SoilGrids.

Según la Figura 24.a la distribución espacial del pH alcanza un máximo valor de 7 en una zona puntual ubicada al suroeste de la zona de estudio, mientras que en el resto del distrito el valor de pH se distribuye equitativamente entre los rangos de 5 a 6. Además, según el histograma de frecuencias de la Figura 24.b, el rango de pH más frecuente es de 5 a 5.5.

#### 4.2.12 Mapa de salinidad

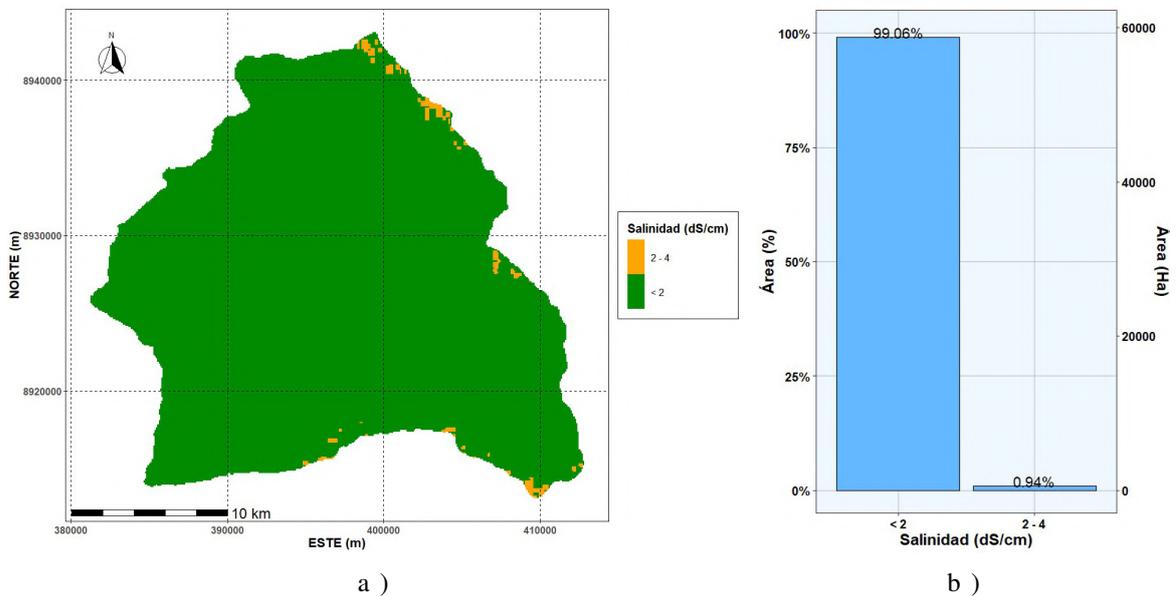
En la Figura 25, se presenta el mapa de distribución de la salinidad en el suelo, que se estimó a partir de un procesamiento de la información de salinidad del suelo estimado por Ivushkin et al. (2019).

Según la Figura 25.a la distribución espacial de la salinidad alcanza un máximo valor de 4 dS/cm en zonas puntuales ubicadas al sureste y noreste de la zona de estudio, donde la al-



**Figura 24: Mapa de pH**  
a) Distribución espacial, b) Histograma de frecuencias

itud es menor a los 1000 msnm, según la Figura 13.a. El resto de la zona de estudio posee una salinidad estimado menor a 1 dS/cm. Además, según el histograma de frecuencias de la Figura 25.b, el rango de salinidad más frecuente es de 0 a 1 dS/cm.



**Figura 25: Mapa de Salinidad**  
a) Distribución espacial, b) Histograma de frecuencias

### 4.2.13 Mapa de taxonomía de suelos

Según el producto de SoilGrids, en el distrito de San Pablo de Pillao se identifican los siguientes tipos de suelo: Andisoles, Entisoles, Inceptisoles, Mollisoles, Oxisoles, Spodosoles, Ultisoles, con una distribución espacial en la zona de estudio representado en la Figura 26.

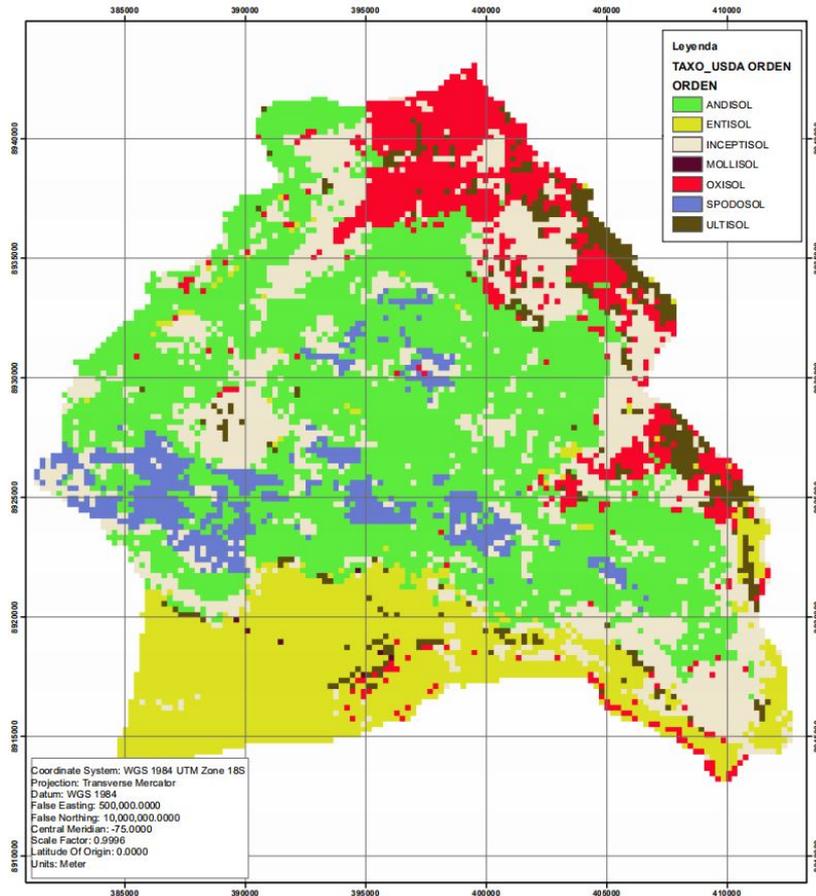


Figura 26: Mapa de distribución geográfica de taxonomía de suelos USDA

## 4.3 Análisis espacio-temporal de sequías hidrológicas

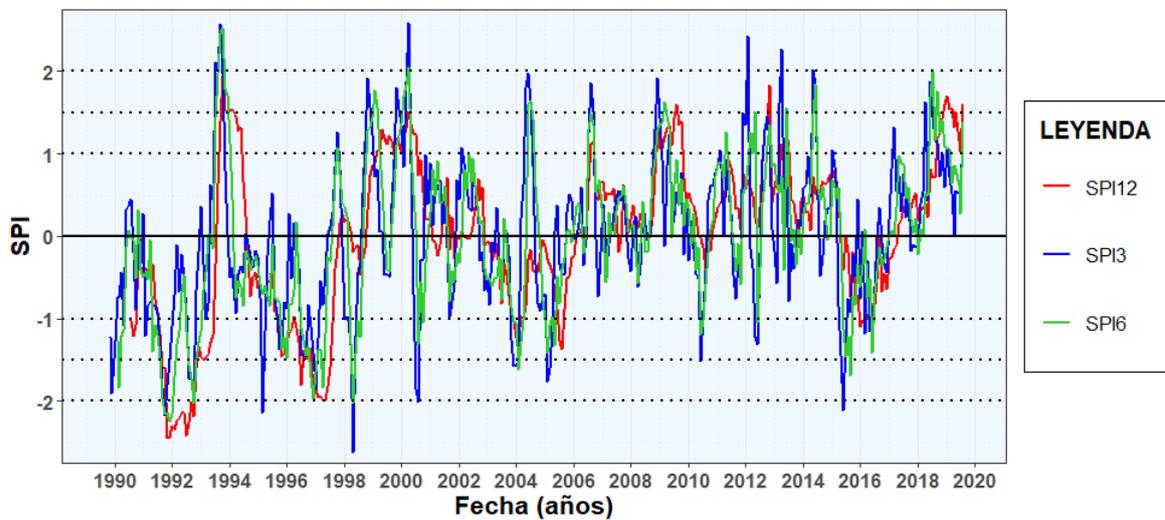
### 4.3.1 Identificación de sequías

La identificación de la frecuencia e intensidad de los eventos secos se realizó mediante el índice SPI a diferentes escalas mensuales, como se detalla en la sección 3.2.3. Este procedimiento está basado en la variabilidad respecto a la media de la serie de precipitación mensual (Figura 16.a), presentada en la sub-sección 4.2.4.

La identificación de las sequías severas con el índice SPI a 3 meses, registró estos eventos

en los años 1990, 1993, 1997, 2001, 2004, 2005 y 2011. Por otro lado, el índice de SPI a 6 meses, identificó estos eventos severos en el año 1990, 1997, 1998, 2004 y 2016. Mientras tanto, el índice de SPI a 12 meses, identificó estos eventos severos en el año 1996 y 1997, como se muestra en la Figura 27.

La identificación de las sequías extremadamente secas con el índice SPI a 3 meses, registró estos eventos en los años 1992, 1995, 1998 y 2016. Mientras que con el índice de SPI a 6 meses y 12 meses, se registró estos eventos extremos de larga duración en el año 1992 y uno menor en 1993; a partir de este año no se volvieron a registrar sequías extremas, como se muestra en la Figura 27.



**Figura 27: Serie temporal de SPI a escalas de 3, 6 y 12 meses**

**Estimación del Índice Estandarizado de Precipitaciones (SPI), a partir de series de precipitación acumulada mensual desde 1990 a 2020**

Endara et al. (2019), señalan que los episodios de sequías de intensidades máximas de la región de Huánuco, ocurrieron en 1990, 1992, 2004 y 2016, las cuales fueron registradas perfectamente por los índices SPI presentados en la Figura 27. Los mismos autores de la investigación señalada, recomiendan que los índices SPI a 3 y 6 meses, muestran las características de la anomalía de la precipitación para evaluar las sequías agrícolas.

Finalmente, para una visualización de la variabilidad del Índice Estandarizado de Precipitación a sus diferentes escalas mensuales, la figuras se presentan en el Anexo 3 de esta investigación.

### **4.3.2 Análisis de distribución espacial de probabilidad de sequías**

El análisis de la distribución de probabilidad de sequías a múltiples escalas temporales, se realizó con la metodología presentada en la sección 3.2.3. En general, el indicador SPI-12 presenta mayor probabilidad de ocurrencia de las sequías, respecto a las distribuciones espaciales obtenidas con los indicadores SPI-6 y SPI-3, sin embargo estas probabilidades no superan la probabilidad de ocurrencia de 19 %, para sequías moderadas, 11 % para sequías severas y el 6 % para sequías extremas, como se presenta en la Figura 28 y la Tabla 8.

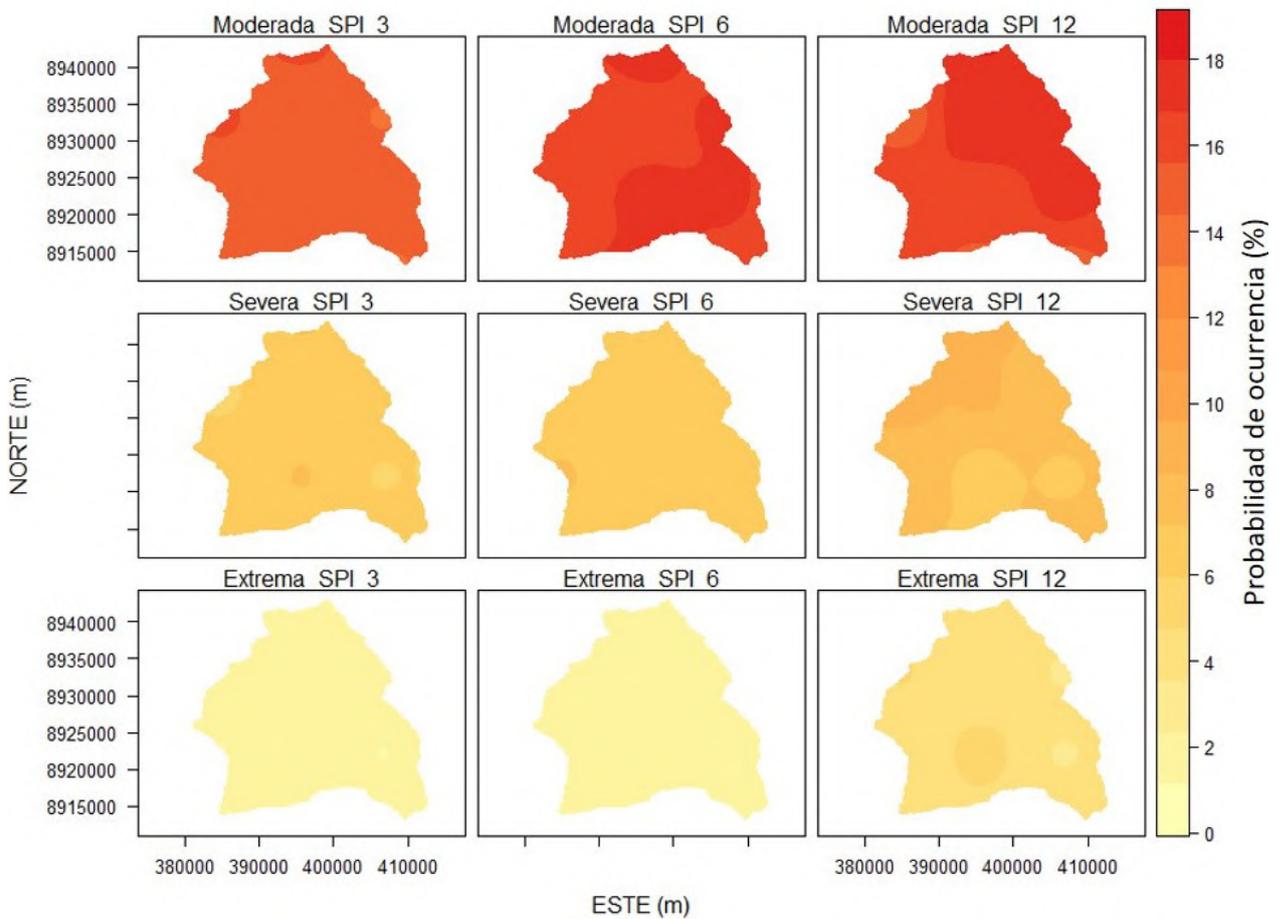
En la Figura 28 y la Tabla 8, también muestra que la distribución de las sequías moderadas es más homogénea y ocurren con menor frecuencia con el periodo de 3 meses. Con el aumento de la escala temporal a 6 meses, las áreas ubicadas en el norte y sudeste, incrementan su probabilidad de ocurrencia de sequías moderadas. A una escala temporal de 12 meses la tendencia a incrementar la ocurrencia de sequías se traslada al noreste de la zona de estudio. Sin embargo, existen zonas aisladas con descenso de ocurrencia de sequías en el sur y noroeste de la zona estudiada.

En la Figura 28 y la Tabla 8, además muestra que la distribución de las sequías severas es uniforme, a excepción de dos áreas al noroeste y sudeste del distrito donde ocurren con menor frecuencia y un área central donde la ocurrencia aumenta a una escala temporal de 3 meses. Con el aumento de la escala temporal a 6 meses, la ocurrencia de sequías severas es más homogénea, solo existe un área ubicada en el noroeste que incrementan su probabilidad de ocurrencia. A una escala temporal de 12 meses la tendencia a incrementar la ocurrencia de sequías se ubica en el noroeste de la zona de estudio. No obstante hay zonas centrales aisladas con un descenso de la ocurrencia de sequías severas.

En la Figura 28 y la Tabla 8, se muestra que la distribución de ocurrencia de las sequías extremas es uniforme a escalas temporales de 3 y 6 meses. Con el aumento de la escala temporal a 12 meses, la ocurrencia de sequías severas se incrementa. Además, en una zona central la ocurrencia de sequías extremas se incrementa, mientras que en dos áreas menores ubicadas al este del distrito la ocurrencia de sequías se reduce.

**Tabla 8: Probabilidad de ocurrencia de sequías promedio en el distrito de San Pablo de Pillao**

Índice de SPI	Categoría de sequías	Probabilidad de ocurrencia (%)		
		3 meses	6 meses	12 meses
-1.0 a -1.49	Moderada	14.96	16.41	16.33
-1.5 a -1.99	Severa	6.26	6.65	8.01
-2.0 a más	Extrema	1.73	1.72	4.00



**Figura 28: Distribución espacial de la probabilidad de ocurrencia de sequías**  
**Probabilidad de ocurrencia de sequías de intensidades: moderadas, severas y extremas, a partir del**  
**análisis de frecuencias del Índice Estandarizado de Precipitaciones (SPI), siguiendo la metodología de**  
**Ashraf et al. (2015)**

#### 4.4 Determinación y validación de pesos de sub-criterios

La síntesis de la determinación de los coeficientes de los criterios se presenta en la Tabla 9. Los cálculos detallados de las comparaciones pareadas y análisis de consistencia se presentan en el Anexo 2.

**Tabla 9: Determinación de pesos e índices de consistencia**

Criterios	Sub-criterios	Peso Relativo	Peso absoluto	Ratio de consistencia	
Climatología	Precipitación	0.389	0.229	0.589	0.044
	Temperatura Media	0.257	0.151		
	Horas Frío	0.226	0.133		
	Humedad Relativa	0.128	0.076		
Edafología	Materia Orgánica	0.428	0.108	0.252	0.050
	Textura	0.322	0.081		
	PH	0.177	0.045		
	Conductividad Eléctrica	0.073	0.018		
Físico-Geográfico	Altitud	0.667	0.106	0.159	0.0
	Pendiente	0.333	0.053		

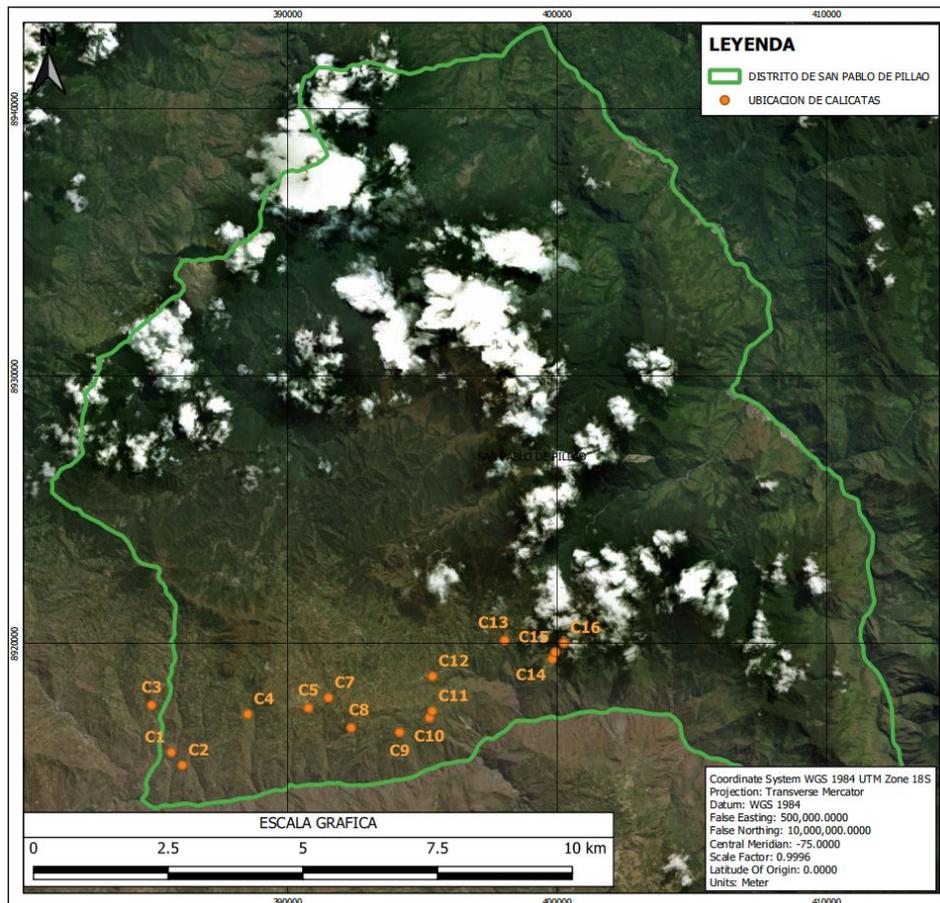
#### 4.5 Ubicación de calicatas

El mapa de la Figura 26 nos permitió distinguir los tipos de suelos según su taxonomía, para determinar la ubicación de las calicatas (Tabla 10), con el objetivo de evaluar los diferentes tipos de suelos presentes en la zona de estudio determinadas en la Figura 29

**Tabla 10: Ubicación de calicatas**

CALICATA	NORTE (m)	ESTE (m)
C-1	8915944	385679
C-2	8915456	386084
C-3	8917707	384947
C-4	8917371	388511
C-5	8917600	390763
C-6	8920032	400249
C-7	8917983	391507
C-8	8916859	392351
C-9	8916688	394151
C-10	8917230	395253
C-11	8917483	395360
C-12	8918788	395367
C-13	8920127	398047
C-14	8919431	399814
C-15	8919683	399918

Se resalta, que la accesibilidad a la zona de estudio y la ubicación de los centros poblados, también fue tomada en cuenta para la ubicación de las calicatas, las cuales se representan en los mapas de accesibilidad y centros poblado de la zona de estudio, en los Anexos.



**Figura 29: Mapa de ubicación de calicatas**

#### **4.6 Análisis de muestras de suelos**

Se realizó análisis de salinidad y pH en el laboratorio de Riegos de la UNALM y el análisis de materia orgánica y clases texturales en un laboratorio de suelos externo. Los resultados procesados se muestran en la Tabla 11.

**Tabla 11: Resultados procesados de laboratorio**

CALICATA	pH	MO(%)	CE(dS/m)	TEXTURA
C-1	7.98	3.14	1.75	Fr.L.
C-2	8.27	2.47	1.50	Fr
C-3	8.31	0.76	4.27	Fr.Ar.L.
C-4	8.18	2.01	2.90	Fr.
C-5	8.34	1.81	9.69	Fr.Ar.
C-6	8.64	0.95	3.17	Fr.
C-7	8.72	2.42	3.77	Fr.
C-8	8.83	1.20	3.07	Fr.
C-9	8.85	1.52	2.98	Fr.L.
C-10	8.66	1.80	3.65	Fr.
C-11	8.88	2.10	3.45	Fr.Ar.
C-12	8.50	1.41	5.88	Fr.
C-13	8.80	1.68	2.71	Fr.L.
C-14	8.57	1.24	4.36	Fr.L.
C-15	8.70	1.43	4.66	Fr.L.

Fr.L.: Franco Limoso, Fr.Ar.: Franco Arenoso

Fr.Ar.L.: Franco Arenoso Limoso, Fr.: Franco

#### 4.7 Determinación de errores de mapas de sub-criterios

Se sigue la metodología de la sección 3.8.1, los diferentes tipos de error determinados se presentan en la Tabla 12. Los datos base para el criterio fisio-geográfico tienen el más alto  $R^2$ , mientras que el mapa base del sub-criterio materia orgánica, posee el más bajo  $R^2$ . Los productos de textura de suelo de SoilGrids, poseen un RMSE variable en el rango de 12.3 a 21.9 %.

La estación meteorológica seleccionada para la determinación de errores fue la estación Tingo María, ubicada al noreste de la zona de estudio, como se presenta en el Anexo 1.3. Los resultados indican que el producto PISCO de temperatura tiene un RMSE máximo de 1.34 °C; mientras que el producto de precipitación mensual posee un RMSE de 85 mm, sin embargo, presenta un mayor índice de determinación respecto a los productos de temperatura.

**Tabla 12: Análisis de error**

Variable	BIAS	MAE	MAPE	MSE	RMSE	R	$R^2$
Tmín.	-0.445	0.847	0.044	1.126	1.061	0.620	0.385
Tmáx.	-0.681	1.112	0.039	1.810	1.345	0.830	0.689
Ppm.	-5.553	62.706	0.307	7308.585	85.490	0.843	0.711
pH	3.001	3.001	0.350	9.212	3.035	-0.455	0.207
MO	-1.423	1.423	1.084	2.572	1.604	-0.022	0
Sl.	1.321	1.321	0.293	4.240	2.059	0.585	0.342
Arn.	-6.909	8.601	0.367	150.295	12.259	-0.093	0.009
Lm.	20.090	20.090	0.402	482.550	21.967	0.192	0.037
Arc.	-13.111	14.711	1.696	291.663	17.078	-0.199	0.040
Alt.	4.332	7.848	0.003	79.760	8.931	1.0	1.0

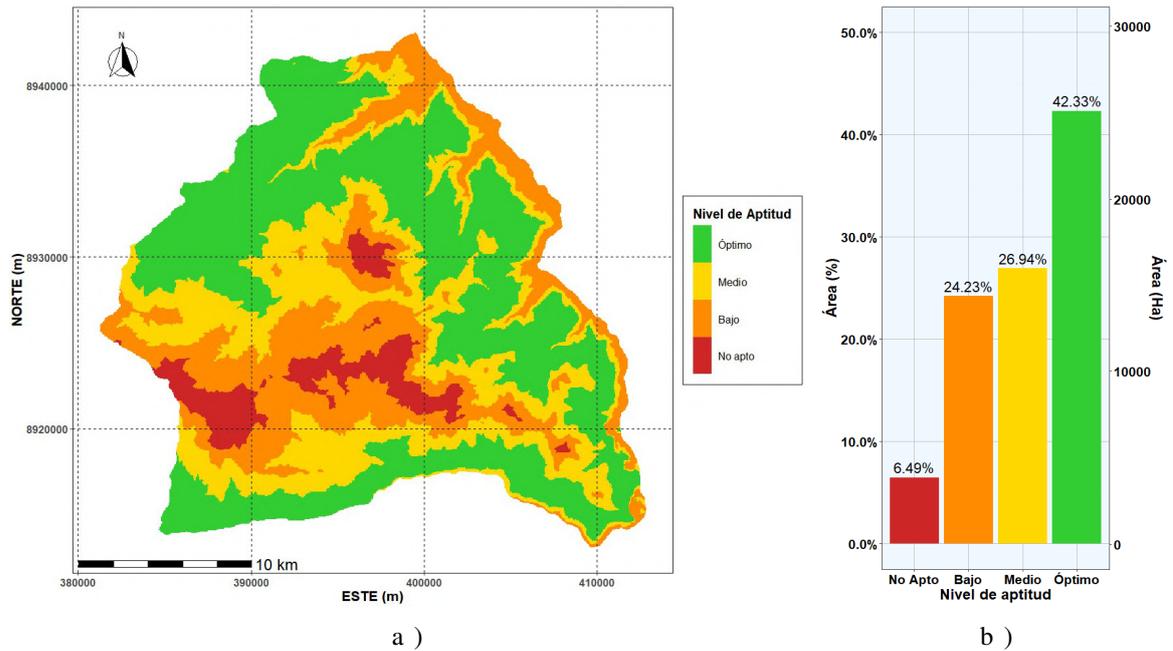
Tmín.: Temperatura mínima, Tmáx.: Temperatura máxima, Ppm: Precipitación media, pH: acidez del suelo

MO: Contenido de materia orgánica, Sl.: Salinidad, Arn.: Proporción de arena, Lm.: Proporción de limo

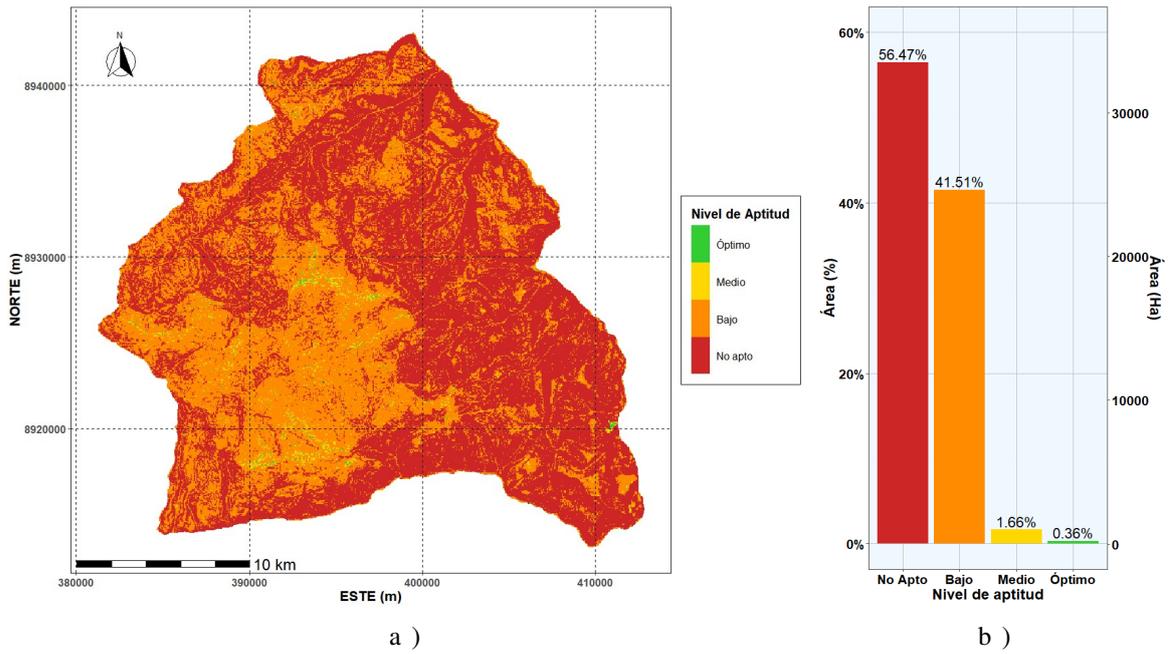
Arc.: Proporción de arcilla, Alt.: Altitud

#### 4.8 Estandarización de mapas

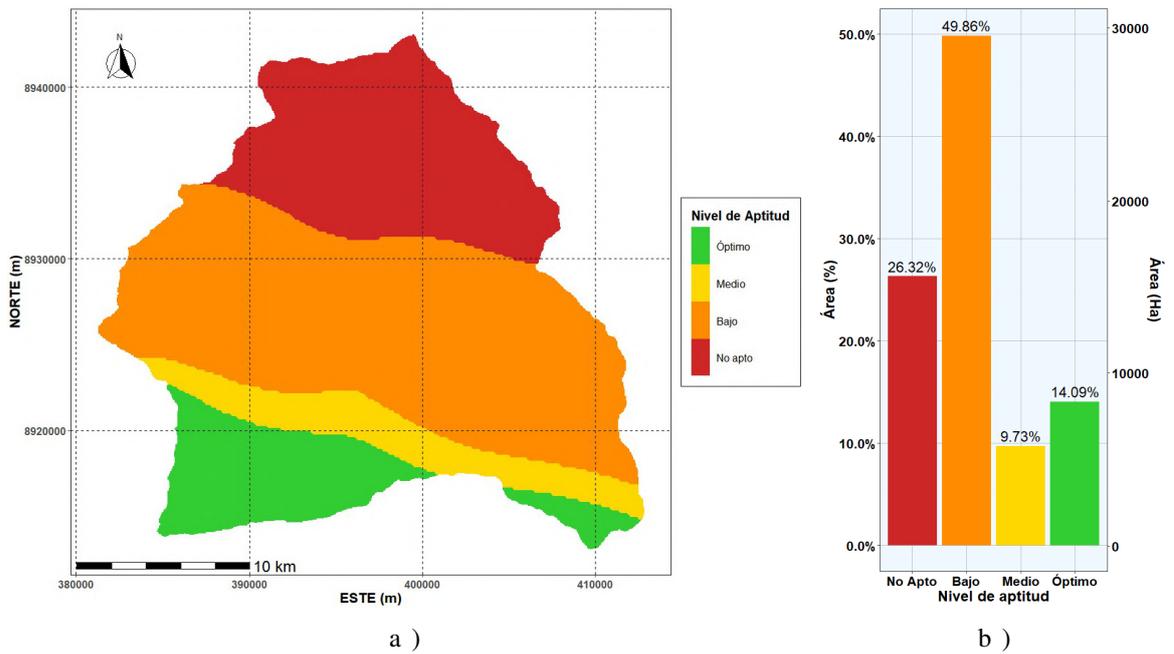
Los mapas de cada sub-criterio, fueron estandarizados por el método de la lógica difusa que se detalla en la sub-sección 3.8.2 y los niveles de aptitud se clasifican en función a la Tabla 7. El resultado de la distribución espacial y sus histogramas correspondientes se presentan desde la Figura 30 hasta la Figura 39.



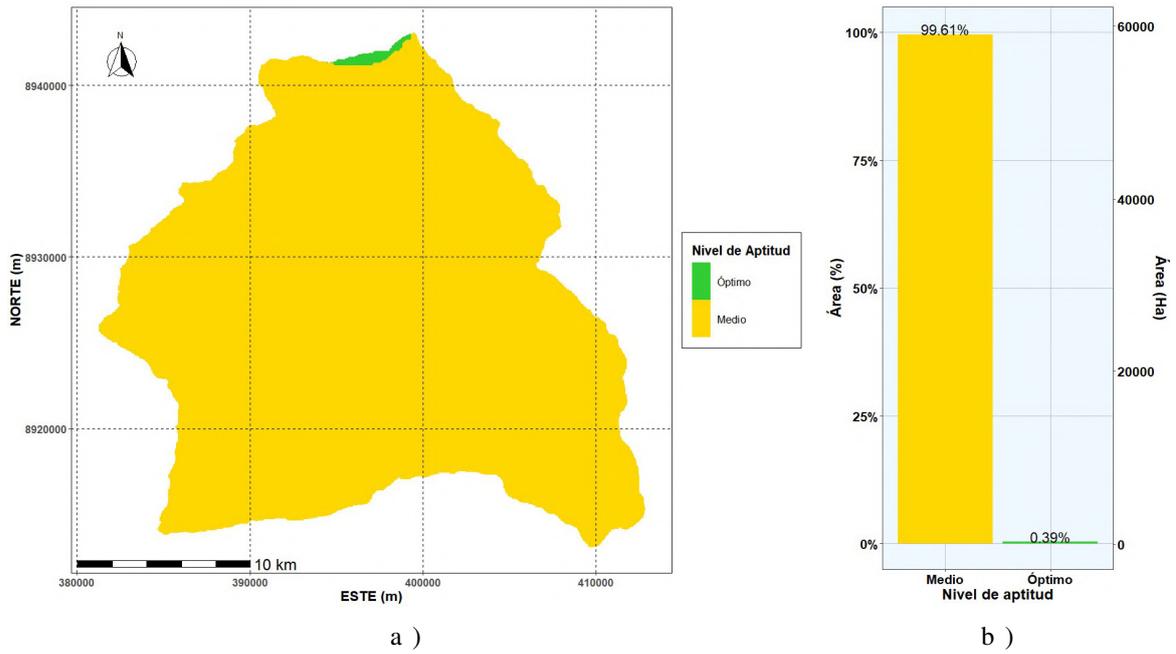
**Figura 30: Distribución espacial del nivel de aptitud de la altitud**  
a) Mapa de nivel de aptitud, b) Histograma de frecuencias



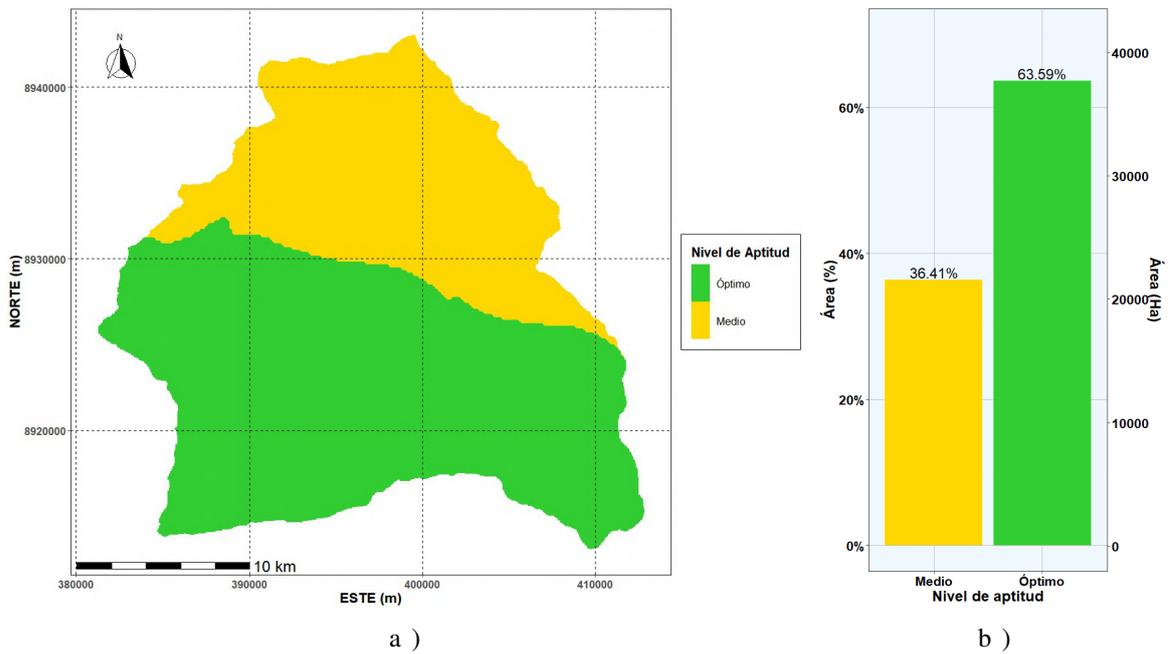
**Figura 31: Distribución espacial del nivel de aptitud de pendientes**  
a) Mapa de nivel de aptitud, b) Histograma de frecuencias



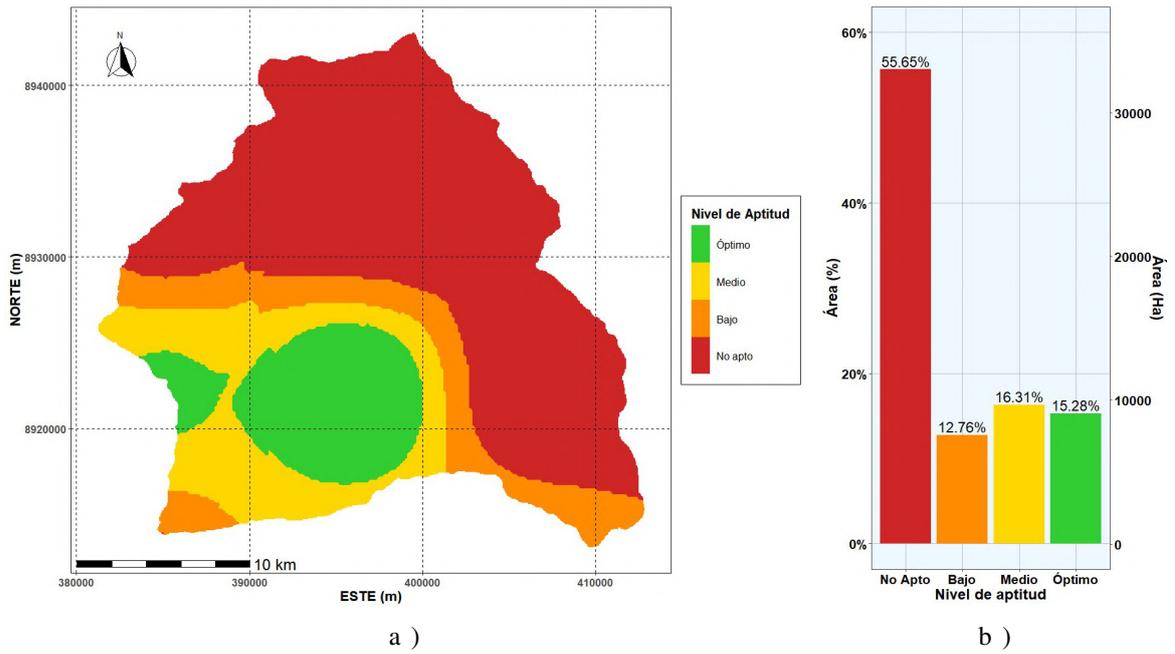
**Figura 32: Distribución espacial del nivel de aptitud de precipitación**  
a) Mapa de nivel de aptitud, b) Histograma de frecuencias



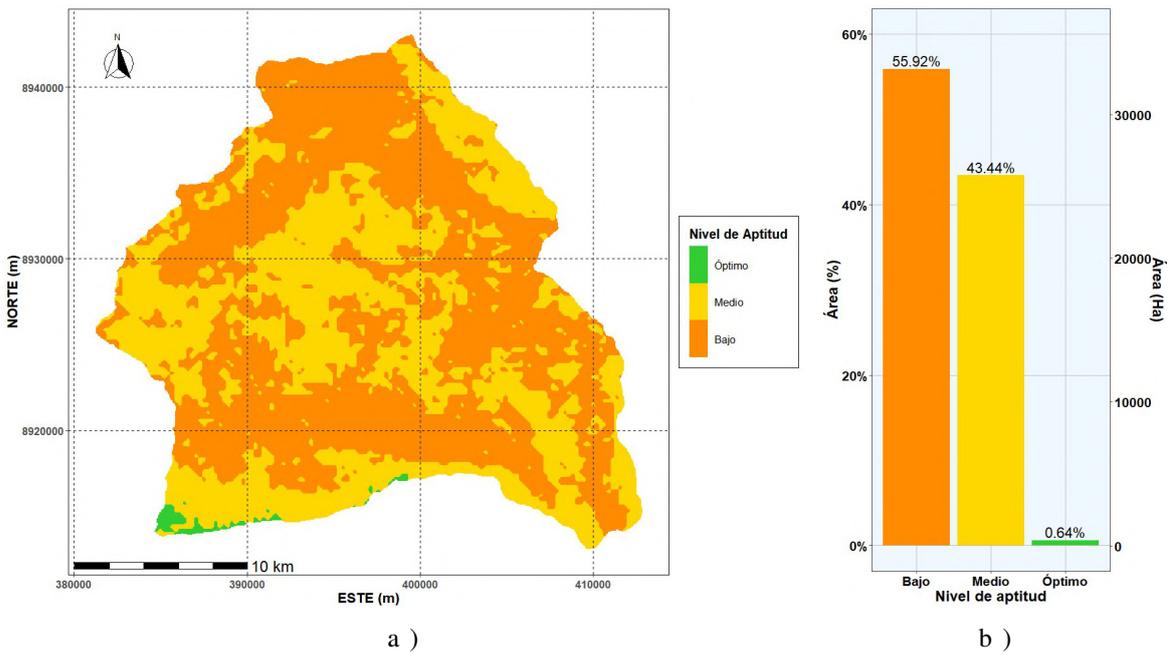
**Figura 33: Distribución espacial del nivel de aptitud de temperatura**  
 a) Mapa de nivel de aptitud, b) Histograma de frecuencias



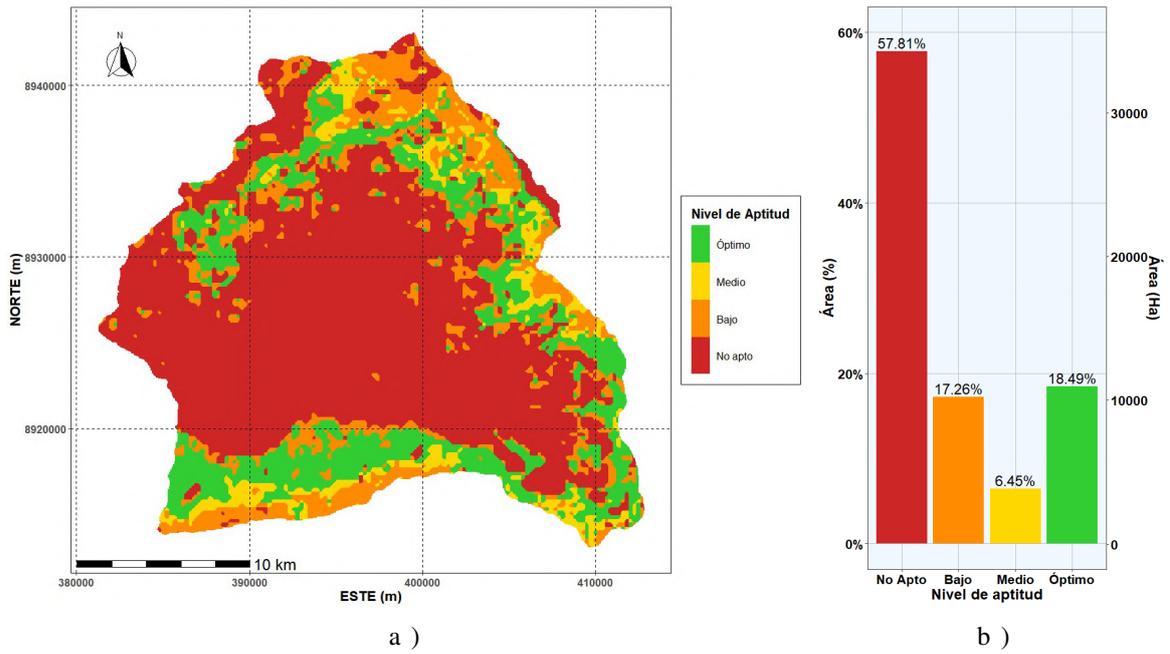
**Figura 34: Distribución espacial del nivel de aptitud de humedad relativa**  
 a) Mapa de nivel de aptitud, b) Histograma de frecuencias



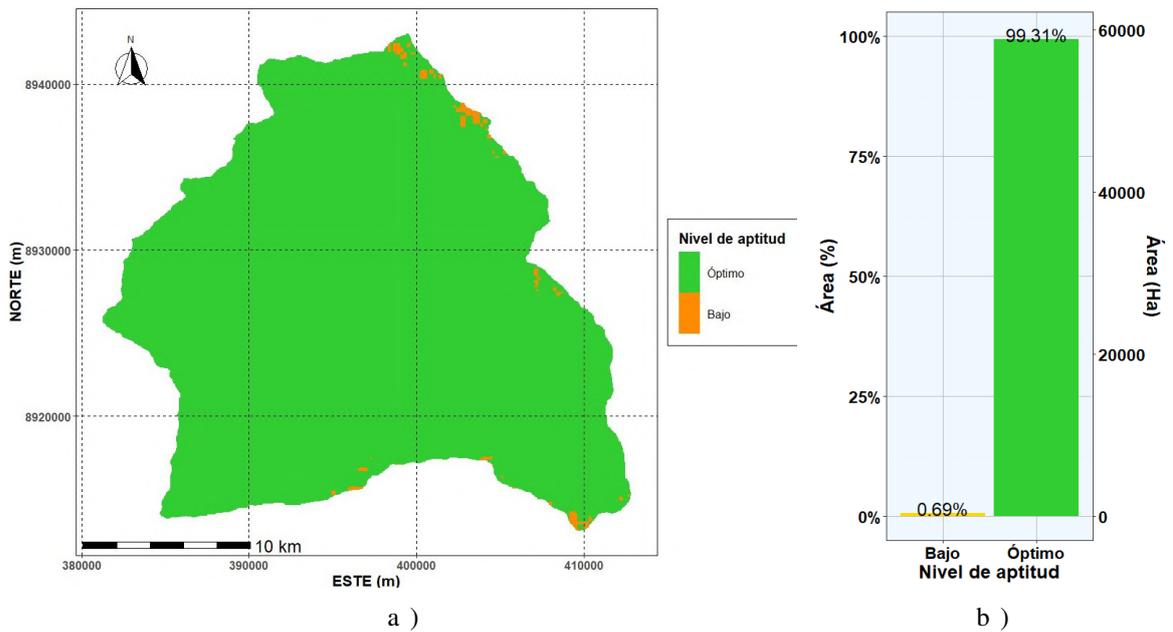
**Figura 35: Distribución espacial del nivel de aptitud de horas frío**  
a) Mapa de nivel de aptitud, b) Histograma de frecuencias



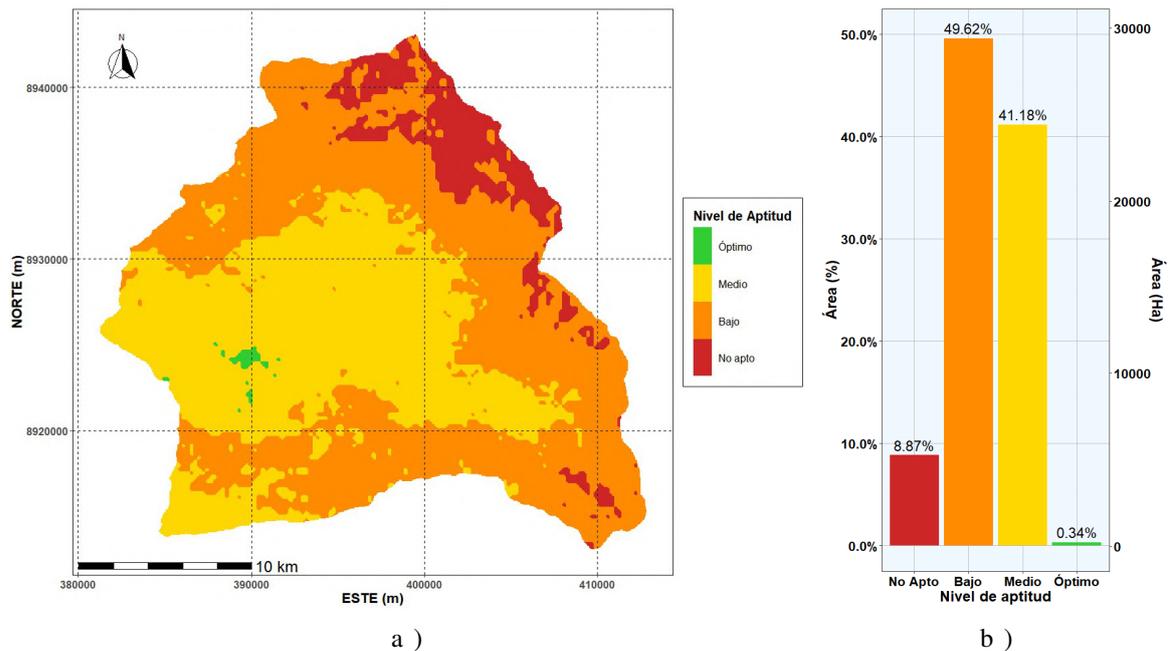
**Figura 36: Distribución espacial del nivel de aptitud de pH**  
a) Mapa de nivel de aptitud, b) Histograma de frecuencias



**Figura 37: Distribución espacial del nivel de aptitud del contenido de materia orgánica**  
a) Mapa de nivel de aptitud, b) Histograma de frecuencias



**Figura 38: Distribución espacial del nivel de aptitud de salinidad**  
a) Mapa de nivel de aptitud, b) Histograma de frecuencias



**Figura 39: Distribución espacial del nivel de aptitud de textura de suelo**  
a) Mapa de nivel de aptitud, b) Histograma de frecuencias

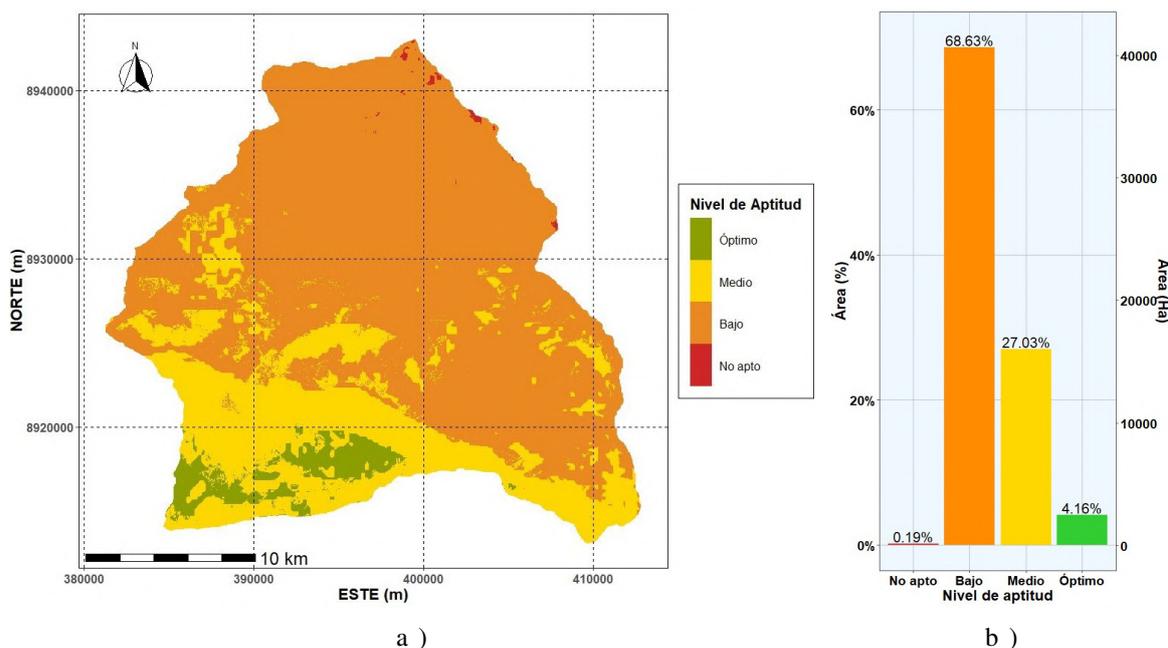
#### 4.9 Mapa de Zonificación Agroecológica preliminar

El mapa de Zonificación Agroecológica preliminar de los niveles de aptitud del duraznero huayco rojo, se determinó a partir de la Ecuación 20, para realizar la ponderación de los mapas de sub-criterios, a partir de los pesos absolutos de la Tabla 9.

$$\begin{aligned}
ZAE = & 0,106 \times ALT + 0,053 \times SLP + \\
& 0,229 \times PRE + 0,151 \times TMP + 0,133 \times HFR + 0,076 \times HMR + \\
& 0,108 \times MOR + 0,081 \times TXT + 0,045 \times PHX + 0,018 \times SAL \quad (20)
\end{aligned}$$

Donde: *ZAE*: Zonificación Agroecológica del duraznero huayco rojo, *ALT*: Altitud, *SLP*: Pendiente, *PRE*: precipitación, *TMP*: Temperatura, *HFR*: Horas frío, *HMR*: Humedad relativa, *MOR*: Materia orgánica, *TXT*: Textura, *PHX*: pH, *SAL*: Salinidad.

El mapa de la Zonificación Agroecológica preliminar de la Figura 40, posee una casi nula área de nivel de no aptitud de 1.08 km<sup>2</sup> equivalente al 0.18 % del área de estudio, según la Tabla 13. Por otra parte la mayor área de la zonificación preliminar, corresponde al nivel de aptitud bajo, con un total de 407.32 km<sup>2</sup>, equivalente al 68.71 % del distrito.



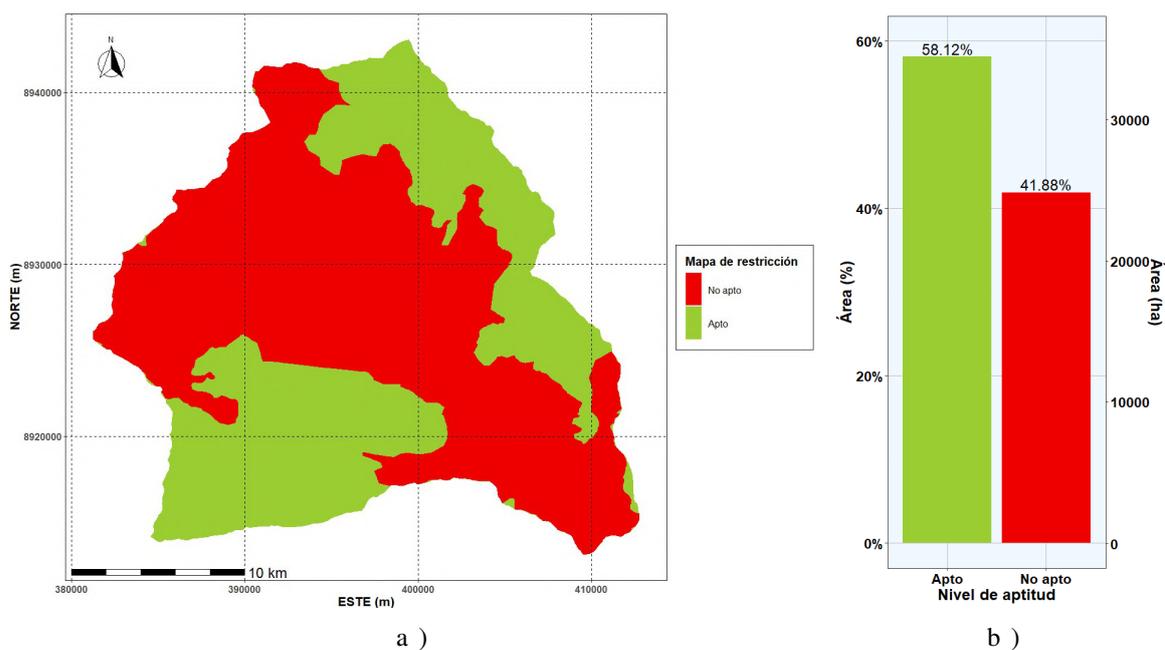
**Figura 40: Mapa preliminar de niveles de aptitud del duraznero huayco rojo**  
a) Mapa de nivel de aptitud, b) Histograma de frecuencias

**Tabla 13: Áreas y porcentajes de las zonas agroecológicas preliminares para el duraznero huayco rojo**

Nivel de Aptitud	Áreas de ZAE preliminar		
	$km^2$	ha	%
No Apto	1.08	108.49	0.18
Bajo	407.32	40732.13	68.71
Medio	159.88	15988.30	26.97
Óptimo	24.55	2455.28	4.14
Total	592.84	59284.20	100

#### 4.10 Mapa de Restricciones

Como se explicó en la sub-sección 3.8.4, la principal área de la Z.E.E. de Huanuco, que no es apta para el uso de suelo en actividades agrícolas, corresponde al área de conservación de “El Carpish”. Esta área está ubicada en la mayor parte del distrito, equivalente al 59.51 %, como se presenta en la Tabla 14. Cabe resaltar que “El Carpsih” contiene áreas de bajo a óptimo nivel de aptitud para el duraznero, que no podrán ser aprovechadas por estar destinadas a un distinto uso de suelo.



**Figura 41: Mapa de restricciones**  
a) Mapa de aptitud, b) Histograma de frecuencias

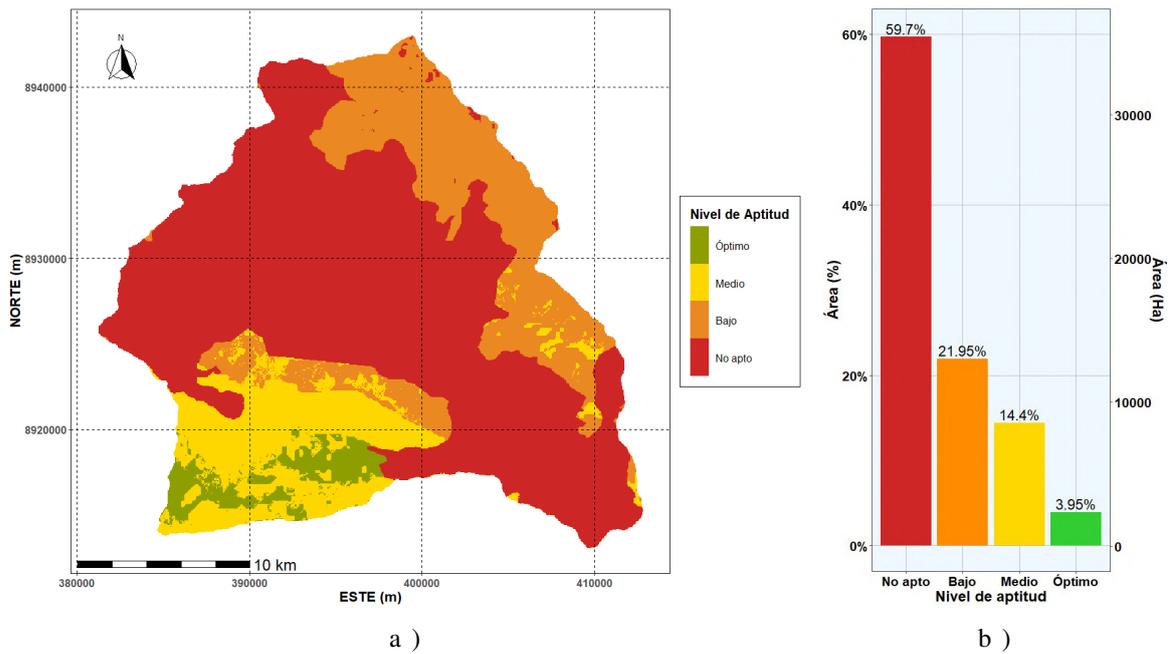
**Tabla 14: Áreas y porcentajes de la aptitud de la Z.E.E. de Huánuco**

Nivel de Aptitud	Áreas de ZAE final		
	$km^2$	ha	%
No Apto	352.82	35281.60	59.51
Apto	240.03	24002.60	40.49
Total	592.84	59284.20	100

#### 4.11 Mapa de zonificación agroecológica del duraznero

Finalmente, el mapa de Zonificación Agroecológica del duraznero (Figura 42), posee una mayor área de no aptitud para el duraznero, equivalente al 59.72 % del distrito, espacio que principalmente corresponde al área de conservación “El Carpish”. La distribución espacial de las zonas de media y óptima aptitud del duraznero, se encuentran en el suroeste de la zona de estudio, que es la zona con mejor accesibilidad y mayor cantidad de centros poblados del distrito, representados en en Anexo 1.2.

Las zonas con nivel de aptitud baja son equivalentes al 22 %, mientras que las zonas de aptitud Media representan al 14.36 % del área de estudio, según la Tabla 15. Las zonas con



**Figura 42: Mapa final de niveles de aptitud del duraznero**  
a) Mapa de nivel de aptitud, b) Histograma de frecuencias  
Clasificación de niveles de aptitud en función a la Tabla 7

un nivel de aptitud óptimo para el duraznero son en total  $23.12 \text{ km}^2$ , correspondientes al 3.90 % del distrito de San Pablo de Pillao.

**Tabla 15: Áreas y porcentajes de las zonas agroecológicas finales para el duraznero**

Nivel de Aptitud	Áreas de ZAE final		
	$\text{km}^2$	ha	%
No Apto	354.05	35405.23	59.72
Bajo	130.53	13053.28	22.02
Medio	85.14	8513.54	14.36
Óptimo	23.12	2312.16	3.90
Total	592.84	59284.20	100

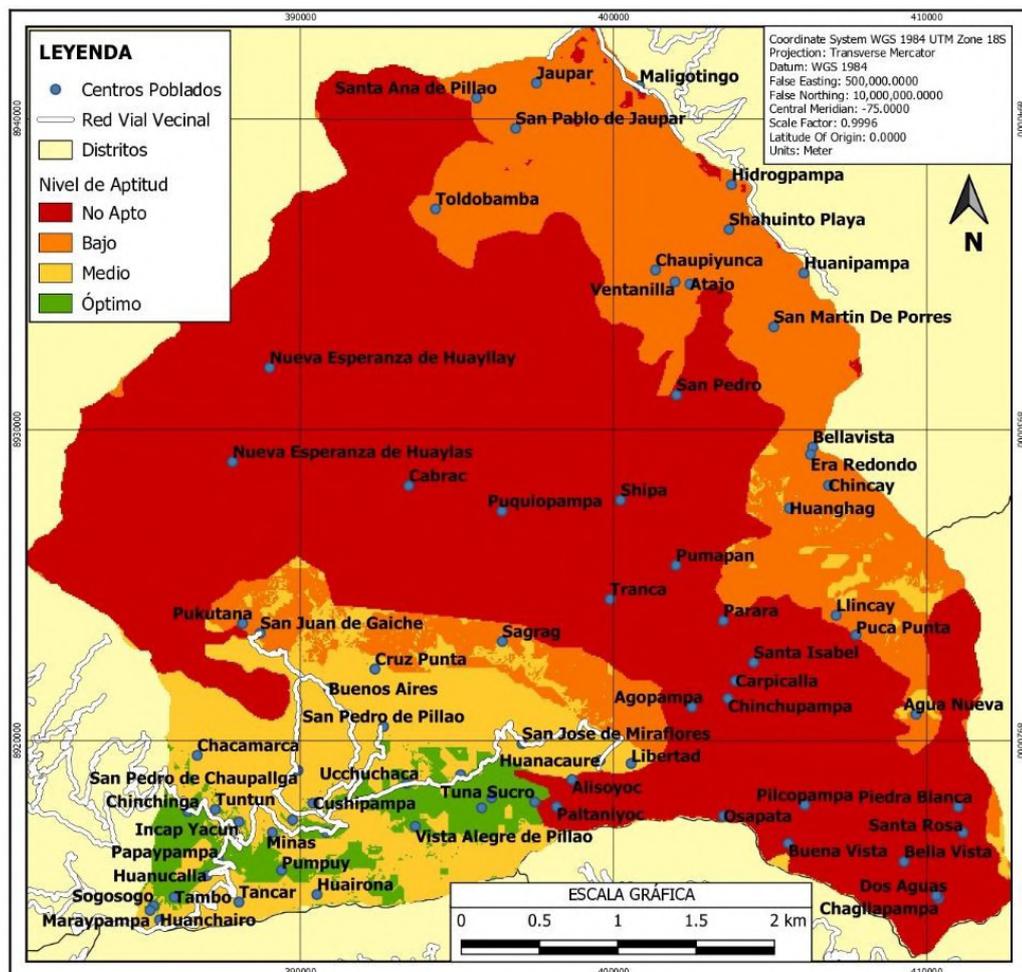
**Tabla 16: Resumen de áreas y porcentajes de zonas agroecológicas para el duraznero**

Nivel de Aptitud	Áreas					
	ZAEp		ZEEr		ZAEf	
	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%
No Apto	1.08	0.18	352.82	59.51	354.05	59.72
Bajo	407.32	68.71			130.53	22.02
Medio	159.88	26.97	240.03	40.49	85.14	14.36
Óptimo	24.55	4.14			23.12	3.90
Total	592.84	100	592.84	100	592.84	100

ZAEp: Zonificación Agroecológica preliminar

ZEEr: Restricciones de aptitud de la Zonificación Económica Ecológica

ZAEf: Zonificación Agroecológica final



**Figura 43: Mapa de zonificación agroecológica del duraznero y ubicación de centros poblados**

## V. CONCLUSIONES

1. La variabilidad climática multi-anual muestra una tendencia significativa al aumento de la precipitación promedio anual a una tasa de 9.59 mm/año, que favorece al duraznero; una tendencia significativa de incremento de la temperatura promedio en una tasa de 0.023 °C/año, que no afectaría significativamente al duraznero, ya que posee un amplio rango de adaptación a la variabilidad de las temperaturas máximas y mínimas. Mientras que la probabilidad de ocurrencia de sequías extremas en la zona de estudio es menor al 4 %, por ello, no representa un peligro para el desarrollo agrícola del duraznero.
2. Los análisis de laboratorio en general muestran un potencial bajo a óptimo de los diversos sub-criterios edafológicos, a excepción de la materia orgánica con muestras clasificadas con potencial no apto para el cultivo. Esta información se refuerza con los mapas de distribución espacial de sus niveles de aptitud. A pesar de ello, estos bajos potenciales se reducen con la ponderación de sub-criterios para la obtención de la zonificación agroecológica.
3. La determinación de las zonas agroecológicas del duraznero usando metodologías SIG basadas en un análisis multicriterio de decisiones, nos permitió conocer los niveles de aptitud para el cultivo con mayor confiabilidad y precisión de resultados, debido a las evaluaciones de consistencia del Proceso Analítico Jerarquizado (AHP). La ubicación geográfica del distrito de San Pablo de Pillao determina condiciones naturales para el cultivo del duraznero, a través de la ecuación:  $ZAE = 0,106 \times ALT + 0,053 \times SLP + 0,229 \times PRE + 0,151 \times TMP + 0,133 \times HFR + 0,076 \times HMR + 0,108 \times MOR + 0,081 \times TXT + 0,045 \times PHX + 0,018 \times SAL$ , se podrá identificar el nivel de aptitud para el duraznero. En términos de la Zonificación Agroecológica, las áreas con un nivel de aptitud óptima representan un total de 2312.2 ha, aptitud media con 8513.5 ha y aptitud baja con 13053.3 ha para el desarrollo sostenible del duraznero con aprovechamiento eficiente de los recursos naturales del clima, suelo y fisio-geografía.

## **VI. RECOMENDACIONES**

1. Añadir más variables en el análisis de zonificación agroecológica como radiación solar, velocidad del viento, contenido de diversos micro-elementos en el suelo, tipo de suelos, entre otros. Para ampliar las posibilidades de comparación entre las sub-criterios o criterios y dar una mayor validez a los resultados de la ZAE.
2. Efectuar estudios socio-económicos en el área de estudio para adquirir una visión integral para incentivar a la participación de los pobladores y la cooperación de las instituciones públicas y privadas en la toma de decisiones.
3. Usar los resultados de la investigación como aporte en los proyectos de re-conversión productiva agraria financiados por el programa AGROIDEAS del Ministerio de Agricultura y Riego.
4. Realizar zonificaciones agroecológicas para otros cultivos de importancia económica en el distrito de San Pablo de Pillao, para un ordenamiento territorial agrario sostenible.
5. El modelo de zonificación agroecológica desarrollado puede ser utilizado para la realización de estudios agroecológicos con objetivos similares en otras regiones del país o el mundo.

## VII. BIBLIOGRAFÍA

- Abiega Peña, D. I. (2019). *Estudio de mercado del durazno (prunus persica l.) en la cuenca del río Santo Tomás, provincia de Chumbivilcas-Cusco*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco]. <http://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/UNSAAC/5082>
- Ashraf, M., Routray, J. (2015). *Spatio-temporal characteristics of precipitation and drought in Balochistan Province, Pakistan*. *Natural Hazards*, 77(1).
- Aybar, C. C., Lavado, C.W., Huerta, J. A., Fernández, P. C., Vega, J. F., Sabino Rojas, E., y Felipe Obando, O. G. (2017). *Uso del producto grillado pisco de precipitación en estudios, investigaciones y sistemas operacionales de monitoreo y pronóstico hidrometeorológico*. Lima, Perú.
- Bajjali, W. (2017). *ArcGIS for environmental and water issues*. Springer.
- Baráibar, J., Pisano, J. (2014). *MANUAL DEL DURAZNERO. La planta y la cosecha. VARIETADES DE DURAZNERO Y NECTARINA PARA EL URUGUAY*. Boletín de Divulgación N° 108. INIA
- Baíza, A. V. (2004). *Guía técnica del cultivo del melocotón*. Technical report, IICA, San Salvador (El Salvador) Ministerio de Agricultura y Ganadería
- Berumen, S. A., Redondo, F. L. (2007). *La utilidad de los métodos de decisión multicriterio (como el AHP) en un entorno de competitividad creciente. Cuadernos de administración*.
- Boshell, J. (1982). *Condiciones meteorológicas generales de Colombia. Fruticultura tropical*. Federecafé, Bogotá.

- Bravo, M. E., Cano, G. M. A ., López, P. L., Mariles, F. V., Maciel, P. L. H., González, G. M. A ., y González, J. L. A. (2014). *Aplicaciones de la red de estaciones agroclimatológicas automatizadas del estado de Oaxaca*.
- Campos-Aranda, D. F. (2014). *Comparación de tres métodos estadísticos para detección y monitoreo de sequías meteorológicas*. *Agrociencia*, 48
- Campos Blanco, C. R. (2014). *Efecto de la fertilización en el rendimiento y características biométricas del cultivo de papa variedad huayro en la comunidad de aramachay, valle del Mantaro*.
- Castillo, B., Flores, D., Llanos, A., Paredes, G., y Toledo, L. (2012). *Cultivo de melocotonero: Guía técnica*. Perú. Swisscontact Peru.
- CONAM (2006). *Metodología para la zonificación ecológica y económica*.
- Coz, T. Y., Gonzales, P. F. (2010). *Identificación in situ de ecotipos de durazno (Prunus persica L.) con aptitudes potencialmente comerciales en el distrito de Churubamba - Huánuco*
- Daga, W. (2018). *Brasil, oportunidad de oro para el durazno de Perú*.
- Díaz, P., Luna, F. (2009). *Potencial productivo de especies agrícolas en el distrito de desarrollo rural Zacatecas, Zacatecas. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Regional Norte Centro, Campo Experimental Zacatecas, Calera de VR, Zacatecas*. México. Publicación técnica, (3):209.
- DRAH, D. R. d. A. d. H. (2019). *Informe cualitativo de la producción agrícola 2018 – 2019 por región, provincia y distrito*.
- Endara, S., Acuña, D., Vega-Jácome, F., Febre, C., Correa, K., y Avalos, G. (2019). *Caracterización espacio temporal de la sequía en los departamentos altoandinos del Perú (1981- 2018)*.

- Espinoza, A. N. Z. (2016). Diagnóstico de la producción y mercado del cultivo de durazno (*Prunus persica*) de las Provincias de Huánuco, Ambo y Pachitea - 2015.
- Farag, A., Khalil, A., Hassanein, M., et al. (2010). Chilling requirement for deciduous fruits under climate change in Egypt. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 6(6), 815-822.
- Fotheringham, A. S. (1997). *Trends in quantitative methods i: stressing the local*. *Progress in Human Geography*, 21(1):88–96
- Gallegos, U. E. O., Lazalde, J. R. V., Aldrete, A., Guillén, M. d. J. G., y Castillo, G. V. (2007). *Áreas con aptitud para establecer plantaciones de maguey cenizo: Definición mediante análisis multicriterio y SIG*. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 30(4):411–419
- García, M. S., Leva, P. E., Valtoria, S. E., Gariglio, N., y Toffoli, G. (2009). *Disponibilidad de horas de frío para la localidad de Rafaela (Santa Fe, Argentina): Modelos de estimación*. *Rev. Facultad de Agronomía UBA*, 29(3):163–168.
- González, G. H. A., Hernández, S. J. R. (2016). *Zonificación agroecológica del Coffea arabica en el municipio Atoyac de Álvarez, Guerrero, México*. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 2016(90):105–118.
- GOREHCO, G. R. d. H. (2016). Zonificación ecológica económica base para el ordenamiento territorial de la región Huánuco, provincias: Huánuco, Marañón, Leoncio Prado, Pachitea y Puerto Inca.
- Gratacós, E. (2004). *El cultivo del duraznero Prunus persica (L.) Batsch*. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile.
- Guimarey, M. P. A. (2018). Propuesta de zonificación agroecológica para el manejo ambiental de la subcuenca del Bolsón Cuchara, Región Huánuco
- Guo, H., Goodchild, M. F., y Annoni, A. (2020). *Manual of Digital Earth*
- Hamner, B., Frasco, M., y LeDell, E. (2018). Package “metrics”.

- Hengl, T., Mendes de Jesus, J., Heuvelink, G., Ruiperez Gonzalez, M., Kilibarda, M., y Blagotic, A. (2017). *SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning*.
- Hernández-Zaragoza, P., Valdez-Lazalde, J. R., Aldrete, A., y Martínez-Trinidad, T. (2019). *Evaluación multicriterio y multiobjetivo para optimizar la selección de áreas para establecer plantaciones forestales*. *Madera y Bosques*, 25(2).
- Herrera Soplá, R. (2018). *Diagnóstico de la producción y mercado del durazno (prunus persica) de las provincias de yarowilca, dos de mayo y huamalies*.
- Huerta, J. A., Aybar, C. C., y Lavado, C. W. (2018). *PISCO temperatura*.
- INEI (2018). *Resultados definitivos población económicamente activa de Huánuco*.
- Ivushkin, K., Bartholomeus, H., Bregt, A. K., Pulatov, A., Kempen, B., y De Sousa, L. (2019). *Global mapping of soil salinity change*. *Remote Sensing of Environment*, 231:111260.
- Jafarzadeh, A. A., Shahbazi, F., et al. (2010). *Suitability of peach in souma area (Iran), using almagra model*. In 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, pages 1–6.
- Karagiannis, E., Tanou, G., Samiotaki, M., Michailidis, M., Diamantidis, G., Minas, I. S., y Molassiotis, A. (2016). *Comparative physiological and proteomic analysis reveal distinct regulation of peach skin quality traits by altitude*. *Frontiers in plant science*, 7:1689.
- Karami, M., Asadi, M. (2016). *Zoning of apple trees in province of khorasan razavi, Iran*. *International Journal of Scientific and Technology Research*.
- Kendall, M. G. (1948). *Rank correlation methods*.
- Khalil, F., Ouda, S., Osman, N., y Khamis, E. (2011). *Determination of agro-climatic zones in Egypt using a robust statistical procedure*. In *Fifteenth international water technology conference*. IWTC-15, Alexandria, Egypt.

- Kim, H., Shim, K. (2018). *Land suitability assessment for apple (malus domestica) in the republic of Korea using integrated soil and climate information, MLCM, and AHP*. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 11(2):139–144.
- Lipa, Q., Helly, G., and Goyzueta Hanco, Y. (2018). *Zonificación y modelamiento agroecológico para el cultivo de café (Coffea arábica L.) utilizando la tecnología de SIG y teledetección en el CIP Tambopata–Sandia–Puno*.
- Makridakis, S., Andersen, A., Carbone, R., Fildes, R., Hibon, M., Lewandowski, R., Newton, J., Parzen, E., y Winkler, R. (1982). *The accuracy of extrapolation (time series) methods: Results of a forecasting competition*. Journal of forecasting, 1(2):111–153.
- Malczewski, J. (2006). *Gis-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature*. International Journal of Geographical Information Science, 20(7):703–726.
- Mann, H. B. (1945). *Nonparametric tests against trend*. Econometrica: Journal of the econometric society, pages 245–259..
- Martinez, O. R. (2009). *El coeficiente de correlación de los rangos de spearman caracterización*. Revista Habanera de Ciencias Médicas, 8(2).
- Méndez, R. R. A. et al. (2016). *Productos de precipitación satelital de alta resolución espacial y temporal en zonas de topografía compleja*.
- Merlet, H., D’Etigny, M. (1989). *Requerimientos de clima y suelo: Frutales de hoja caduca*. Pub. IREN N° 83.
- MINAM (2014). *Guía para muestreo de suelos*. Ministerio del Ambiente.
- Mirakbari, M., Ganji, A., y Fallah, S. (2010). *Regional bivariate frequency analysis of meteorological droughts*. Journal of Hydrologic Engineering, 15(12):985–1000.
- Molina, E. (2007). *Análisis de suelos y su interpretación*. José, CR, CIA-UCR-Amino Grow International.

- Nava, V. A., Macias Hernandez, M., Reyes L´opez, A. D., y Alonso Velasco, R. D. (2005). *Cultivo y manejo de el durazno (prunus persica l.)*.
- Pinzón, E. H., Cruz Morillo, A., y Fischer, G. (2014). *Aspectos fisiológicos del duraznero (prunus persica [l.] batsch) en el trópico alto.: Una revisión*. Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica, 17(2):401–411.
- Quinta-Nova, L. y Ferreira, D. (2020). *Land suitability analysis for emerging fruit crops in Central Portugal using GIS*. Agriculture and Forestry/Poljoprivreda i Sumarstvo, 66(1):41–48.
- Quisbel, L., Helly, G., y Goyzueta Hanco, Y. (2018). *Zonificación y modelamiento agroecológico para el cultivo de café (coffea arábica l.) utilizando la tecnología de SIG y teledetección en el CIP Tambopata–Sandia–Puno*.
- Rasheed, S., Venugopal, K. (2009). *Land suitability assessment for selected crops in Vellore district based on agro-ecological characterisation*. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 37(4):615–629.
- Rojas, E., Arce, B., Peñna, A., Boshell, F., y Ayarza, M. (2010). *Cuantificación e interpolación de tendencias locales de temperatura y precipitación en zonas alto andinas de cundinamarca y Boyacá (Colombia)*. Corpoica. Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 11(2):173–182.
- Rosca, S. M., Bilasco, S., Pacurar, I., Marcel, O., Negrusier, C., y Petrea, D. (2015). *Land capability classification for crop and fruit product assessment using gis technology. Case study: the Niraj river basin (transylvania depression, Romania)*. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, 43(1):235–242.
- Sen, P. K. (1968). *Estimates of the regression coefficient based on kendall's tau*. Journal of the American statistical association, 63(324):1379–1389.
- SENAMHI (2018). *Mapa de Clasificación Climática del Perú. Catálogo Nacional de Metadatos del Perú*.

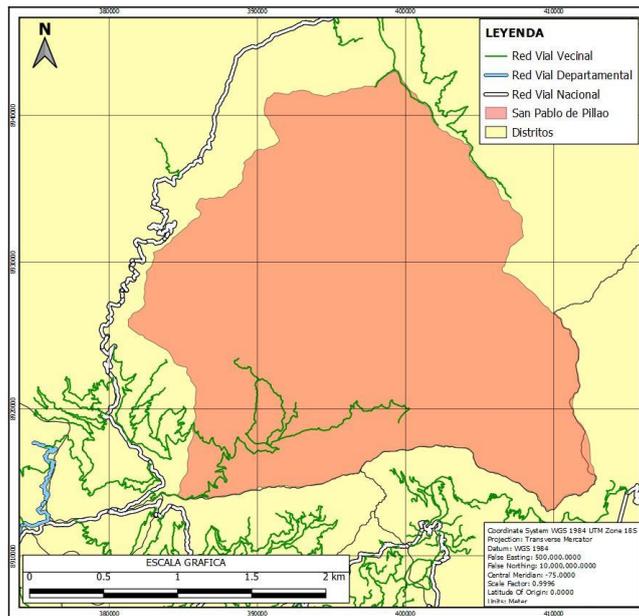
- SIEA, D. d. E. A. (2018). *Informe cualitativo de la producción agrícola 2018 - 2019 por región, provincia y distrito.*
- Silva, W., Meza, J. (2013). *Manual técnico agrario: El melocotón en el Callejón de Huaylas.* Dirección Regional de Agricultura de Ancash, agencia agraria Carhuaz edition.
- Sonmez, N. K., Sönmez, S., Çoşlu, M., y Türkan, H. R. (2019). *Determination of Suitable Areas of Apple (Malus Domestica) Cultivation with AHP and GIS Techniques.* International Journal of Agriculture Forestry and Life Sciences, 3(1):1–8.
- Thornton, P. E., Running, S. W., White, M. A., et al. (1997). *Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain.* Journal of hydrology, 190(3-4):214–251.
- Tupac-Yupanqui, V. R. A., Lavado-Casimiro, W., y Felipe-Obando, O. (2017). *Regionalización de las precipitaciones máximas en el Perú.*
- USDA, N. (2010). *Keys to soil taxonomy. Soil Survey Staff, Washington.*
- Vasquez, E., Irene, L. (2018). *Exportación del durazno (huayco rojo) al mercado ecuatoriano y la rentabilidad de los productores de muzga, huacho-2017.*
- Vega-Jácome, F. (2015). *Regionalización y caracterización de sequeas en el Perú.*
- Vicente-Serrano, S. M., Saz-Sánchez, M. A., y Cuadrat, J. M. (2003). *Comparative analysis of interpolation methods in the middle ebro valley (spain): application to annual precipitation and temperature.* Climate research, 24(2):161–180.
- Villarreal, J. (1988). *Manual práctico para la interpretación de análisis de suelos en laboratorio.*
- Wan, Z. (2013). *Modis land surface temperature products users' guide.*
- Westwood, M. N., Westwood, M. N. (1993). *Temperate-Zone Pomology: Physiology and Culture.*

- Wind, Y., Saaty, T. (1980). *Marketing applications of the analytic hierarchy process*. Management science, 26(7):641–658.
- Xie, H. S., Cummings, G. A. (1995). *Effect of soil pH and nitrogen source on nutrient status in peach: I. Macronutrients*. Journal of Plant Nutrition, 18(3):541–551.
- Zambrano, M. G. A. (2018). *Evaluación de zonas agroecológicas sostenibles para el cultivo de plátano (musa paradisiaca) mediante análisis multicriterio, Manabí*. B.S. thesis, Calceta: ESPAM

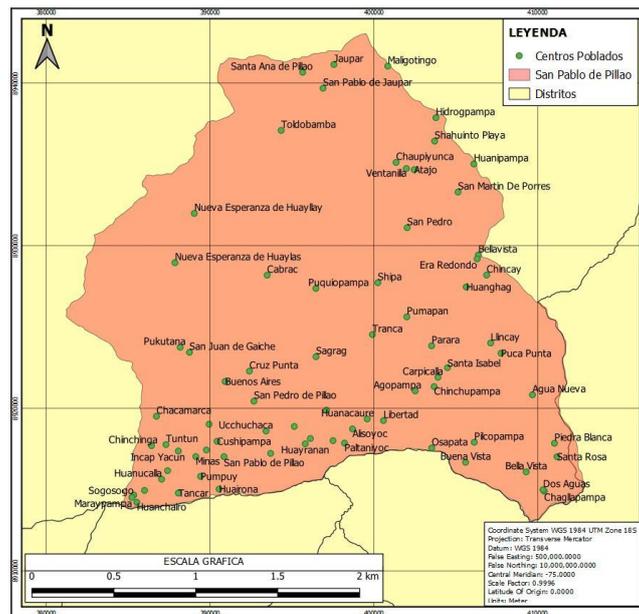
## VII. ANEXOS

### ANEXO 1: Mapas de la zona de estudio

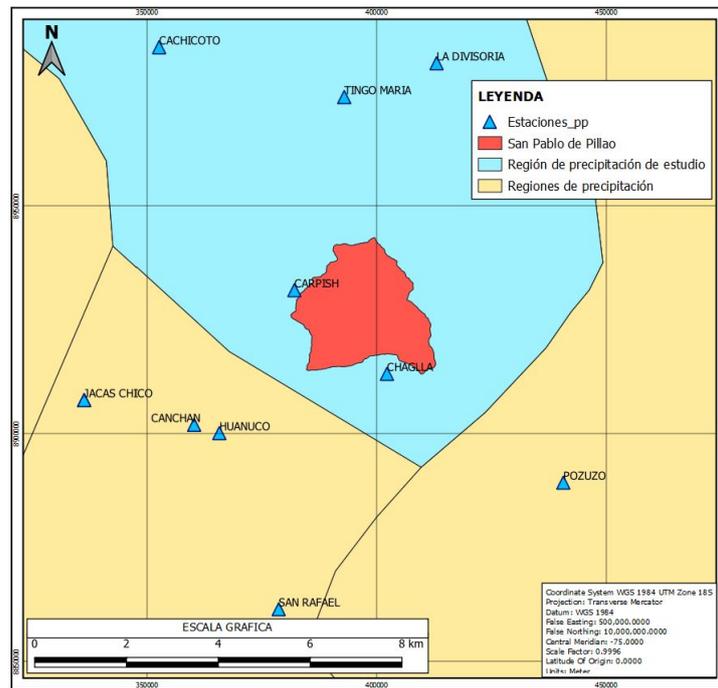
Anexo 1.1: Mapa de accesibilidad del distrito de San Pablo de Pillao



Anexo 1.2: Mapa de los centros poblado del distrito de San Pablo de Pillao



### Anexo 1.3: Mapa de ubicación de las estaciones de validación del producto PISCO de SENAMHI



## ANEXO 2: Tablas de matriz y análisis de pesos

**Anexo 2.1:** Derivado de Matriz de comparación y matriz de comparación bidireccional normalizada de criterios

Criterios	Matriz de comparación			Matriz de comparación bidireccional normalizada		
	Cl	Edf	Fg	Cl	Edf	Fg
Climatología (Cl)	1	3	3	0.600	0.667	0.500
Edafología (Edf)	1/3	1	2	0.200	0.222	0.222
Físico-geográfico (Fg)	1/3	1/2	1	0.200	0.111	0.167

**Anexo 2.2:** Derivado de Matriz de comparación y matriz de comparación bidireccional normalizada del sub-criterio Físico-geográfico

Sub-criterios	Matriz de comparación		Matriz de comparación bidireccional normalizada	
	Alt	Slp	Alt	Slp
Altitud (Alt)	1	2	0.667	0.667
Pendiente (Slp)	1/2	1	0.333	0.333

**Anexo 2.3:** Derivado de Matriz de comparación y matriz de comparación bidireccional normalizada del sub-criterio Climatológico

Sub-criterios	Matriz de comparación				Matriz de comparación bidireccional normalizada			
	Pp	Tm	Hf	Hr	Pp	Tm	Hf	Hr
Precipitación (Pp)	1	2	2	2	0.400	0.462	0.444	0.250
Temperatura (Tm)	1/2	1	1	3	0.200	0.231	0.222	0.375
Horas Frío (Hf)	1/2	1	1	2	0.200	0.231	0.222	0.250
Humedad Relativa (Hr)	1/2	1/3	1/2	1	0.200	0.077	0.111	0.125

**Anexo 2.4:** Derivado de Matriz de comparación y matriz de comparación bidireccional normalizada del sub-criterio Edafológico

Sub-criterios	Matriz de comparación				Matriz de comparación bidireccional normalizada			
	Mo	Tx	Ph	SI	Mo	Tx	Ph	SI
Materia Orgánica (Mo)	1	2	2	5	0.455	0.558	0.316	0.385
Textura (Tx)	1/2	1	3	4	0.227	0.279	0.474	0.308
PH (Ph)	1/2	1/3	1	3	0.227	0.093	0.158	0.231
Salinidad (SI)	1/5	1/4	1/3	1	0.091	0.070	0.053	0.077

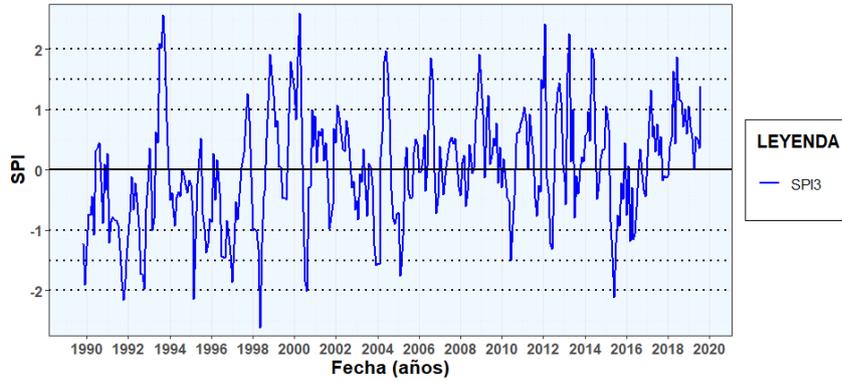
**Anexo 2.5:** Cálculo de las relaciones de consistencia

Sub-criterios	Variable	$\lambda_{max}$	$\lambda_{maxp.}$	Criterios			Z.A.E.		
				C.I.	R.I.	C.R.	$\lambda_{max}$	C.I.	R.I.
Altitud		2							
Pendiente		2	2	0	0	0			
Precipitación		4.141							
Temperatura		4.132							
Horas Frío		4.136	4.119	0.039	0.9	0.044			
Humedad Relativa		4.064					3.053	0.027	0.58
Materia Orgánica		4.178							
Textura		4.132							
PH		4.136	4.136	0.045	0.9	0.050			
Salinidad		4.064							

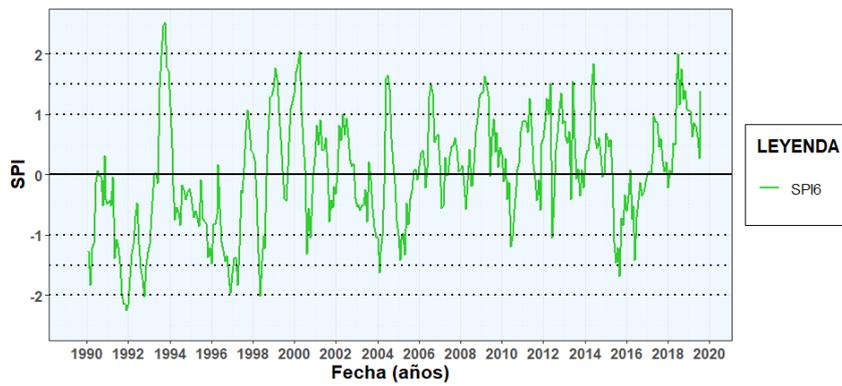
$\lambda_{max}$ : máximo valor,  $\lambda_{maxp.}$ : máximo valor promedio, C.I.: Índice de consistencia, R.I.: Índice aleatorio  
C.R.: Relación de consistencia

### ANEXO 3: Identificación de sequías

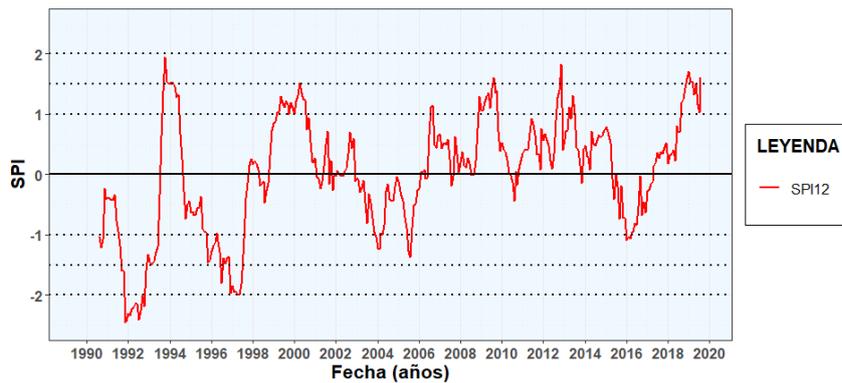
Anexo 3.1: Valores del SPI promedio (periodo 1990-2019) de San Pablo de Pillao, Huánuco



a SPI a 3 meses



b SPI a 6 meses



c SPI a 12 meses

## ANEXO 4: Fotos de análisis de suelo

### Anexo 4.1: Grupo 1 de calicatas



d Calicata 1



e Calicata 2



f Calicata 3



g Calicata 4



h Calicata 5



i Calicata 6



j Calicata 7



k Calicata 8



l Calicata 9

**Anexo 4.2: Grupo 2 de calicatas**



m Calicata 10



n Calicata 11



ñ Calicata 12



o Calicata 13



p Calicata 14



q Calicata 15

**Anexo 4.3: Análisis físico-químico de suelos en laboratorio**



## ANEXO 5: Resultados de análisis de suelos

### Anexo 5.1: Resultados de análisis de suelos

NUM	CALIC.	HZ.	PROF(m)	NORTE(m)	ESTE(m)	PH	MO%	CE	ARENA%	LIMO%	ARCILLA%	TEXTURA
1	C-1	A	0.3	8915944	385679	8.05	2.43	29	52	38	10	Franco Arenoso
2	C-1	B	0.6	8915944	385679	7.9	4.12	402	21	76	3	Franco Limoso
3	C-1	C	0.9	8915944	385679	7.98	2.86	94.5	14	48	38	Franco Arenoso Limoso
4	C-2	A	0.3	8915456	386084	8.01	3.21	134.2	59	28	13	Franco Arenoso
5	C-2	B	0.6	8915456	386084	7.96	3.46	47.2	23	74	3	Franco Limoso
6	C-2	C	0.9	8915456	386084	8.84	0.73	270	48	26	26	Franco Arcilloso Arenoso
7	C-3	A	0.3	8917707	384947	8.22	0.82	386	16	49	35	Franco Arcilloso Limoso
8	C-3	B	0.6	8917707	384947	8.28	0.62	561	12	58	30	Franco Arcilloso Limoso
9	C-3	C	0.9	8917707	384947	8.42	0.85	333	14	55	31	Franco Arcilloso Limoso
10	C-4	A	0.3	8917371	388511	8.14	3.19	291	56	19	25	Franco Arcilloso Arenoso
11	C-4	B	0.6	8917371	388511	8.14	1.92	208	53	29	18	Franco Limoso
12	C-4	C	0.9	8917371	388511	8.26	0.92	371	19	49	32	Franco Arcilloso Limoso
13	C-5	A	0.3	8917600	390763	8.18	2.68	426	38	41	21	Franco
14	C-5	B	0.6	8917600	390763	8.39	1.78	1710	16	48	36	Franco Arcilloso Limoso
15	C-5	C	0.9	8917600	390763	8.45	0.96	772	11	42	47	Arcilloso Limoso
16	C-7	A	0.3	8917983	391507	8.32	2.79	352	61	24	15	Franco Arenoso
17	C-7	B	0.6	8917983	391507	9.05	3.24	400	49	14	37	Arcilloso Arenoso
18	C-7	C	0.9	8917983	391507	8.8	1.24	380	22	74	4	Franco Limoso
19	C-8	A	0.3	8916859	392351	8.95	1.92	269	58	26	16	Franco Arenoso
20	C-8	B	0.6	8916859	392351	8.84	0.82	299	52	36	12	Franco Arenoso
21	C-8	C	0.9	8916859	392351	8.69	0.87	353	21	76	3	Franco Limoso
22	C-9	A	0.3	8916688	394151	8.75	2.68	210	22	75	3	Franco Limoso
23	C-9	B	0.6	8916688	394151	9.08	0.91	459	22	74	4	Franco Limoso
24	C-9	C	0.9	8916688	394151	8.71	0.98	226	62	22	16	Franco Arenoso
25	C-10	A	0.3	8917230	395253	8.77	1.98	345	21	74	5	Franco Limoso
26	C-10	B	0.6	8917230	395253	8.6	2.54	419	48	24	28	Franco Arcilloso Arenoso
27	C-10	C	0.9	8917230	395253	8.6	0.87	332	48	14	38	Arcilloso Arenoso
28	C-11	A	0.3	8917483	395360	8.97	1.56	375	48	14	38	Arcilloso Limoso
29	C-11	B	0.6	8917483	395360	8.88	3.82	310	11	58	31	Franco Arcilloso Limoso
30	C-11	C	0.9	8917483	395360	8.8	0.91	351	17	45	38	Franco Arcilloso Limoso
31	C-12	A	0.3	8918788	395367	8.38	1.95	455	52	39	9	Franco Arenoso
32	C-12	B	0.6	8918788	395367	8.59	0.89	675	54	32	14	Franco Arenoso
33	C-12	C	0.9	8918788	395367	8.53	1.38	633	21	76	3	Franco Limoso
34	C-13	A	0.3	8920127	398047	8.88	0.83	235	24	75	1	Franco Limoso
35	C-13	B	0.6	8920127	398047	8.75	0.96	266	59	29	12	Franco Arenoso
36	C-13	C	0.9	8920127	398047	8.78	3.26	311	23	74	3	Franco Limoso
37	C-14	A	0.3	8919431	399814	8.66	1.88	561	23	75	2	Franco Limoso
38	C-14	B	0.6	8919431	399814	8.58	0.88	393	24	75	1	Franco Limoso
39	C-14	C	0.9	8919431	399814	8.48	0.97	354	58	32	10	Franco Arenoso
40	C-15	A	0.3	8919683	399918	8.38	2.48	374	22	76	2	Franco Limoso
41	C-15	B	0.6	8919683	399918	8.92	0.94	598	22	75	3	Franco Limoso
42	C-15	C	0.9	8919683	399918	8.81	0.86	427	48	26	26	Franco Arcilloso Arenoso
43	C-16	A	0.3	8920032	400249	8.81	0.94	440	52	29	19	Franco Arenoso
44	C-16	B	0.6	8920032	400249	8.58	0.97	299	23	74	3	Franco Limoso
45	C-16	C	0.9	8920032	400249	8.53	0.94	212	38	24	38	Franco Arcilloso

## Anexo 5.2: Documento de resultados de análisis de suelos



**CORPORACION CONS & PROYECT SERVICIOS DE INGENIERIA**

www.corcoproserin.com / rap14066@hotmail.com

Teléfono: 487-4399/cel. 963346787

SOLICITANTE : PIERO JOAQUIN CONTRERAS BLAS  
PROYECTO : ESTUDIO EDAFOLOGICO CON FINES DE ZONIFICACION AGROECOLOGICO  
USANDO SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA EN SAN PABLO DE  
PILLO, HUANUCO, HUANUCO  
FECHA : CARABAYLLO, 18 FEBRERO 2019

### ANALISIS DE SUELO

FECHA DE CAMPO: 01-02 Febrero 2019

MUESTRA	ANALISIS MECANICO			CLASE TEXTURAL	M.O (%)
	ARENA (%)	LIMO (%)	ARCILLA (%)		
C-48	38.00	24.00	38.00	Fr.Ar.	0.94

Textura: Moderadammente fina

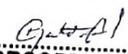
Denominacion:

A= Arena, A.Fr.= Arena Franca; Fr.A. = Franco Arenoso; F.r.= Franco; Fr.L.= Franco Limoso; L = Limoso;

Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso; Fr.Ar. = Franco Arcilloso; Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso;

Ar.A. = Arcillo Arenoso; Ar.L. = Arcillo Limoso; Ar. = Arcilloso

Expediente: 2020/AS29-45

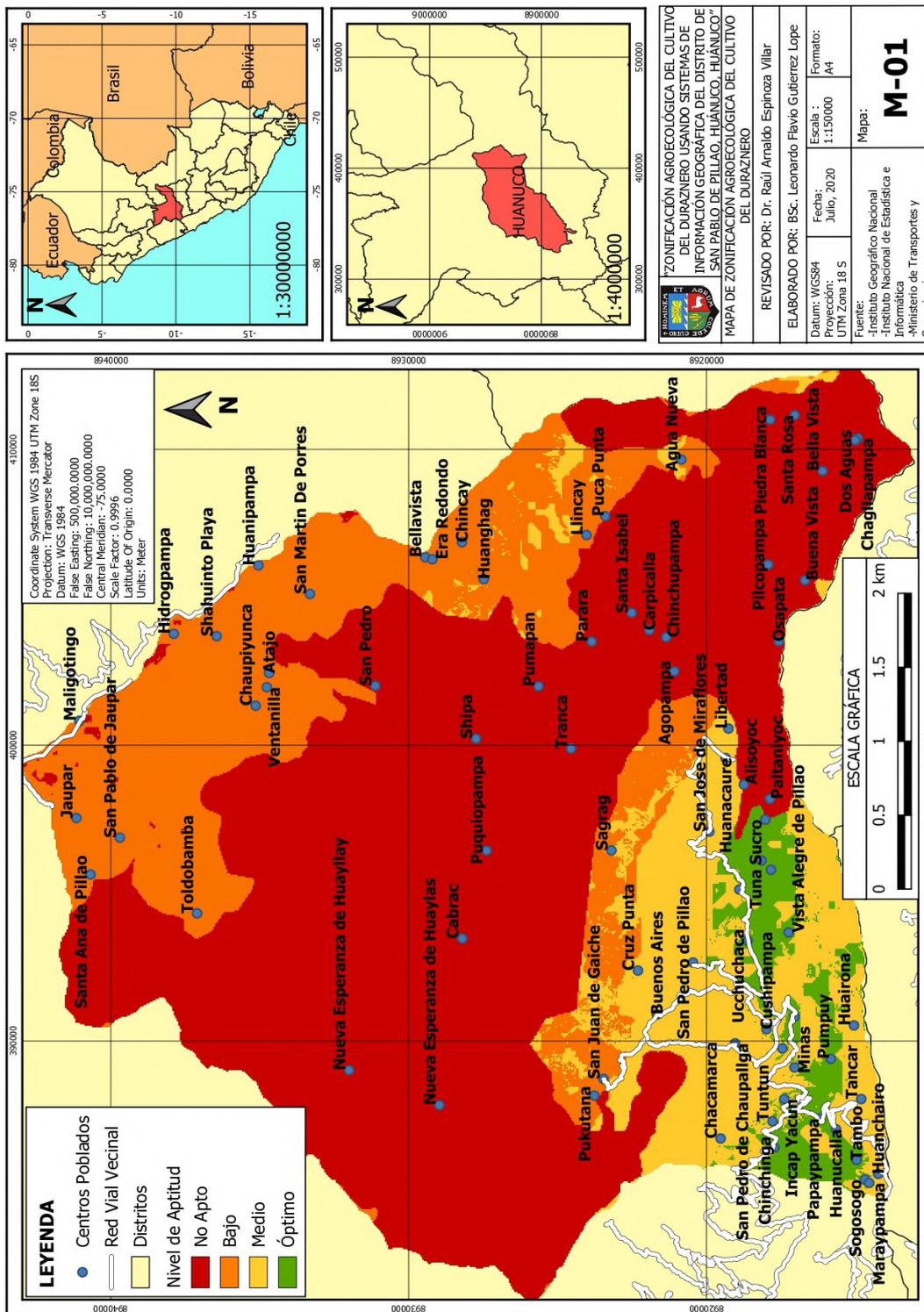
  
CORCOPROSERIN  
E.I.R.L.  
Ronald Avila Pareja  
INGENIERO RESPONSABLE  
LABORATORIO  
CIP 221333

**GEOTECNIA, LABORATORIO MECANICA DE SUELOS Y CONCRETO, CONTROL DE CALIDAD**

Calle Francisco Túpac Amaru Nro. 156 Urb. Tungasuca 2da Et. Carabayllo - Lima

# ANEXO 6: Mapa de ZAE del duraznero

## Anexo 6.1: Mapa final de ZAE del duraznero



## ANEXO 7: Nivel de aptitud puntual del mapa de ZAE

**Anexo 7.1:** Tabla de evaluación de aptitud puntual de la ZAE

ID	ESTE (m)	NORTE (m)	ALTITUD	PENDIENTE	PRECIPITACIÓN PROMEDIO	TEMPERATURA PROMEDIO	HORAS FRÍO	HUMEDAD RELATIVA	SALINIDAD	MATERIA ORGÁNICA	TEXTURA	PH
1	385657.2	8915919.8	Óptimo	No apto	Óptimo	Medio	Medio	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Bajo	Medio
2	385947.1	8915667.9	Óptimo	Medio	Óptimo	Bajo	Medio	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Bajo	Medio
3	385409.1	8915456.3	Óptimo	Medio	Óptimo	Bajo	Medio	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Bajo	Óptimo
4	385945.9	8915207.0	Óptimo	No apto	Óptimo	Medio	Medio	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Bajo	Óptimo
5	386562.9	8916832.0	Óptimo	Medio	Óptimo	Bajo	Medio	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Bajo	Medio
6	386403.1	8917607.6	Medio	Medio	Óptimo	Bajo	Bajo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Bajo	Medio
7	387131.8	8917515.4	Medio	Medio	Óptimo	Bajo	Bajo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Bajo	Medio
8	387621.3	8917217.5	Medio	No apto	Óptimo	Medio	Bajo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Bajo	Medio
9	388344.8	8916605.8	Medio	No apto	Óptimo	Medio	Bajo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Bajo	Medio
10	388120.2	8916046.2	Medio	No apto	Óptimo	Medio	Bajo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Bajo	Medio
11	389819.5	8915786.5	Óptimo	No apto	Óptimo	Medio	Medio	Óptimo	Óptimo	Medio	Bajo	Bajo
12	390264.3	8917163.6	Medio	Medio	Óptimo	Bajo	Bajo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Bajo	Medio
13	391477.4	8917226.4	Medio	Medio	Óptimo	Bajo	Bajo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Bajo	Medio
14	391053.0	8917956.3	Medio	Medio	Óptimo	Bajo	Bajo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Bajo	Medio
15	392262.3	8918235.1	Medio	Medio	Óptimo	Bajo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Bajo	Medio
16	393421.4	8918535.2	Medio	Medio	Óptimo	Bajo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Bajo	Medio
17	395058.7	8917697.5	Medio	Medio	Óptimo	Bajo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Bajo	Medio
18	393487.4	8917311.1	Medio	Medio	Óptimo	Bajo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Bajo	Medio
19	395361.0	8918799.7	Medio	Medio	Óptimo	Bajo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Bajo	Medio
20	385824.9	8917924.1	Óptimo	No apto	Óptimo	Medio	Medio	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Bajo	Medio
21	395946.4	8919291.6	Medio	Medio	Óptimo	Bajo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Bajo	Medio
22	396086.5	8918082.6	Medio	Medio	Óptimo	Bajo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Bajo	Medio
23	395050.2	8918277.1	Medio	Medio	Óptimo	Bajo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Bajo	Medio
24	395364.3	8918319.4	Medio	No apto	Óptimo	Medio	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Bajo	Medio
25	395563.1	8917711.8	Medio	Medio	Óptimo	Bajo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Bajo	Medio
26	395354.3	8917260.5	Medio	Medio	Óptimo	Bajo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Bajo	Medio
27	392627.0	8919822.3	Medio	Medio	Óptimo	Bajo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Bajo	Medio
28	396569.6	8918269.8	Medio	Medio	Óptimo	Bajo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Bajo	Medio
29	393910.5	8918045.5	Medio	Medio	Óptimo	Bajo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Bajo	Medio
30	392037.8	8916167.9	Óptimo	Medio	Óptimo	Bajo	Medio	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Bajo	Medio

## Anexo 7.2: Mapa de nivel de aptitud puntual de la ZAE

