

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA



TESIS:

**Utilización del Arduino en la frecuencia de riego por goteo
en el cultivo de palto (*Persea americana* Mill.), Huanchac,
Huanta, 2025**

Para optar el título profesional de:
INGENIERO AGRÓNOMO

PRESENTADO POR:
Bach. Erick HUACCACHI ALFARO

ASESOR:
Ing. Hoover NÚÑEZ ALFARO

AYACUCHO - PERÚ

2026

DEDICATORIA

A Dios, por darme la vida y salud necesarias para lograr mis metas trazadas.

Con profundo agradecimiento y con mucho cariño a mis padres Bruno Huaccachi Llamocca y Gregoria Alfaro Huamán; a mis hermanos, Marycruz, Neri, Omar, Nimer y Gael quienes son testigos de mi formación profesional.

A mis estimados compañeros, amigos y mis docentes cuya dedicación tanto en el aula y en el campo me ayudaron a tener también base para defenderme en el aspecto profesional, que también siguen compartiendo su sabiduría don el transcurrir del tiempo.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi alma mater, la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, segunda universidad más antigua del Perú, Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela Profesional de Agronomía por aceptarme ser parte de ella y abrirme muchas puertas para así seguir forjando mi formación profesional y también como ciudadano.

A los docentes de la Escuela Profesional de Agronomía, por compartir todo su conocimiento, saberes e instrucciones que me favorecieron mi desarrollo profesional, quienes lograron proporcionarme las guías teóricas y prácticas y así convertirme en profesional apto y capacitado.

Deseo manifestar también mi sincera gratitud y reconocimiento al Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) por autorizarme de realizar la ejecución de esta investigación en la E.E.A Huanchac.

Agradezco al Ing., Hoover Núñez Alfaro, amigo y asesor de este trabajo, por haberme brindado la oportunidad de recurrir a su conocimiento científico, su capacidad de solucionar problemas y sobre todo por la asesoría de este trabajo de investigación.

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo determinar la frecuencia de riego por goteo en el cultivo de palto (*Persea americana* Mill.) mediante el uso de sensores conectados a tecnología Arduino durante la etapa de floración en Huanchac, Huanta, Ayacucho, 2025. Se evaluó la precisión de los sensores DHT11 y FC – 28 comprándolos con la estación meteorológica HOBO, obteniéndose coeficientes de determinación elevados, evidenciando una adecuada confiabilidad en el registro de datos de temperatura, humedad relativa y humedad de suelo.

La evapotranspiración del cultivo fue calculada mediante la ecuación de Penman - Monteith FAO – 56 utilizando variables meteorológicas por el sistema Arduino. Los valores de evapotranspiración de referencia oscilaron alrededor de 4.03 mm día⁻¹ y 3.9 mm día⁻¹ en el Arduino 1 (A1) y Arduino 2 (A2) respectivamente, determinándose una frecuencia de riego aproximada de 6 a 7 días.

Asimismo, el análisis del comportamiento de humedad del suelo mostro mayor variabilidad en la profundidad de 30 cm respecto a 60 cm, debido a la mayor extracción de agua por las raíces y pérdidas por evapotranspiración. Se concluye que el uso de sensores conectados a Arduino permitió monitorear adecuadamente las condiciones hídricas del cultivo y determinar oportunamente la frecuencia de riego durante la etapa de floración.

Palabras clave: Frecuencia de riego, Arduino, humedad del suelo, evapotranspiración, palto.

ABSTRACT

The objective of this research was to determine the drip irrigation frequency in avocado cultivation (*Persea americana* Mill.) using sensors connected to Arduino technology during the flowering stage in Huanchac, Huanta, Ayacucho, 2025. The accuracy of the DHT11 and FC-28 sensors was evaluated by comparing their measurements with the HOBO weather station, obtaining high determination coefficients, which demonstrated adequate reliability in recording temperature, relative humidity, and soil moisture.

Crop evapotranspiration was calculated using the FAO-56 Penman-Monteith equation based on meteorological variables recorded by the Arduino system. The reference evapotranspiration values were approximately 3.9 mm day^{-1} , determining an irrigation frequency of approximately 6 days for Arduino 1 and 7 days for Arduino 2.

Likewise, the analysis of soil moisture behavior showed greater variability at 30 cm depth compared to 60 cm depth, due to higher water extraction by roots and evapotranspiration losses. It is concluded that the use of sensors connected to Arduino technology allowed adequate monitoring of crop water conditions and timely determination of irrigation frequency during the avocado flowering stage.

Keywords: Irrigation frequency, Arduino, soil moisture, evapotranspiration, avocado

INDICE GENERAL

RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
INTRODUCCIÓN	2
Objetivo general	3
Objetivos específicos	3
CAPITULO I	MARCO TEÓRICO
1.1	Antecedentes de la investigación
1.2	Generalidades del cultivo palto (<i>Persea americana</i> Mill.)
1.2.1	Origen del palto
1.2.2	Importancia del palto
1.2.3	Taxonomía del palto y descripción botánica del palto
1.2.4	Descripción botánica:
1.2.5	Estados fenológicos
1.2.6	Demanda hídrica del palto
1.2.7	Requerimiento hídrico por los estados fenológicos del cultivo
1.3	Evapotranspiración del cultivo (ET_c y ET_o)
1.3.1	Evapotranspiración del cultivo (ET_c)
1.3.2	Evapotranspiración de referencia (ET_o)
1.3.3	Concepto de ET_o
1.3.4	Coeficiente de cultivo de palto (K_c)
1.3.5	Humedad del suelo y niveles críticos
1.3.6	Humedad aprovechable (HA)
1.4	Suelo y disponibilidad de agua
1.4.1	Tipos de suelo
1.4.2	Textura (franco, franco – arenoso, etc.)
1.4.3	Profundidad efectiva
1.5	Propiedades físicas del suelo
1.5.1	Retención de agua
1.5.2	Curva de humedad del suelo (Curva de retención de agua)
1.6	Riego por goteo
1.6.1	Principios del riego por goteo

1.6.2	Uniformidad de riego	19
1.6.3	Caudal	20
1.6.4	Emisores	20
1.6.5	Presión	20
1.6.6	Ventajas: eficiencia, ahorro de agua.....	20
1.7	Frecuencia de riego.....	21
1.8	Sistema Arduino	22
1.8.1	Software	22
1.8.2	Lenguaje Arduino (SDK).....	22
1.8.3	Software ampliable y de código abierto.....	22
1.8.4	Hardware	22
1.8.5	Hardware ampliable y código abierto	22
1.8.6	Arduino	23
1.9	Descripción de la placa Arduino UNO R3.	24
1.10	Estructura del Arduino IDE.....	26
1.10.1	Función de configuración.....	26
1.10.2	Función de bucle	26
1.11	Sensores utilizados en la investigación	27
1.11.1	Sensor FC – 28 de humedad del suelo	27
1.11.2	Sensor DHT11 (temperatura y humedad relativa).....	28
1.12	Calibración de sensores.....	29
1.12.1	Error absoluto	30
1.12.2	Error relativo	30
1.12.3	Error medio absoluto (MAE)	30
1.12.4	Raíz del error cuadrático medio (RMSE)	30
CAPITULO II METODOLOGÍA.....		31
2.1	Tipo y diseño de investigación	31
2.2	Nivel de investigación	31
2.3	Población y muestra:	31
2.3.1	Población:	31
2.3.2	Muestra	32
2.4	Ubicación del estudio.....	32
2.5	Variables del estudio	32
2.5.1	Variable independiente	32

2.5.2	Variable dependiente.....	33
2.6	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	33
2.6.1	Instrumentos utilizados.....	33
2.6.2	Técnica de recolección.....	33
2.7	Parámetros de evaluación.....	33
2.8	Conducción del ensayo	34
2.9	Procedimiento de recolección de datos	35
2.9.1	Muestreo de suelo	35
2.9.2	Diseño e instalación del sistema Arduino	37
2.9.3	Armado y configuración del sistema Arduino.	37
2.9.4	Instalación de los sensores FC – 28.	40
2.9.5	Instalación del sensor DHT11.....	40
2.9.6	Configuración del Arduino con Arduino IDE.	41
2.10	Procesamiento y análisis de datos.	42
2.10.1	Calibración de los sensores conectados a Arduino con la estación meteorológica automática HOBO.	42
2.10.2	Determinación de humedad Crítica y Frecuencia de Riego	44
2.10.3	Cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET _o)	44
2.10.4	Comparación de los datos de humedad del suelo con el umbral crítico.	46
2.10.5	Cálculo de evapotranspiración del cultivo (ET _c):.....	46
2.10.6	Cálculo de la frecuencia hídrica a partir del ET _c del cultivo.	46
2.10.7	Evaluar el comportamiento temporal de la humedad del suelo a diferentes profundidades (30 y 60 cm) durante la etapa de floración del cultivo de palto.....	46
CAPITULO III RESULTADOS Y DISCUSIONES		48
3.1	Evaluación la precisión de los sensores conectados a la Tecnología Arduino en la etapa de floración.	48
3.1.1	Evaluación de la precisión del sensor de temperatura y Humedad Relativa (DHT – 11) y del sensor de humedad de suelo FC – 28.....	48
3.2	Determinación de la frecuencia de riego del cultivo de palto durante la etapa de floración en al Arduino 1 planta 1	52
3.2.1	Determinación de la frecuencia de riego mediante la Humedad del suelo y umbral critico de riego	52
3.2.2	Determinación de la frecuencia de riego mediante la evapotranspiración de cultivo con la fórmula de Penman Monteith en el Arduino 1 (A1).	54
3.3	Determinación de la frecuencia de riego del cultivo de palto durante la etapa de floración en al Arduino 2 planta 2	58

3.3.1	Determinación de la frecuencia de riego mediante la Humedad del suelo y umbral crítico de riego	58
3.3.2	Determinación de la frecuencia de riego mediante la evapotranspiración del cultivo con la fórmula de Penman Monteith en el Arduino 2 (A2)	59
3.4	Comportamiento temporal de la humedad del suelo a diferentes profundidades (30 y 60 cm)	62
3.4.1	Matriz de correlación de Pearson	65
CONCLUSIONES		66
RECOMENDACIONES		67
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....		68
ANEXOS		73

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Composición nutricional de la palta.	7
Tabla 1.2	Fenología de acuerdo a la demanda hídrica.....	11
Tabla 1.3	Estados e desarrollo floral del cultivo de palto	12
Tabla 1.4	Kc del cultivo de palto según a la etapa fenológica	14
Tabla 2.1	Ensamblaje del circuito en protoboard con los siguientes sensores.....	37
Tabla 3.1	Datos obtenidos mediante el Arduino 1 (A1) y la estación meteorológica automática HOBO obtenida diaria con datos del A -1.....	54
Tabla 3.2	Parámetros de medición para el cálculo de la evapotranspiración de referencia en el Arduino 1 (A1)	55
Tabla 3.3	Resultado del análisis	56
Tabla 3.4	Datos obtenidos mediante el Arduino 1 (A1) y la estación meteorológica automática HOBO obtenidas diaria con datos de A-2	59
Tabla 3.5	Parámetros de medición para el cálculo de la evapotranspiración de referencia en el Arduino 2	60
Tabla 3.6	Parámetros hídricos	61

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Estados fenológicos de la fase vegetativa	10
Figura 1.2	Estados fenológicos de la fase reproductiva del palto	11
Figura 1.3	Descripción de la placa Arduino UNO R3	24
Figura 1.4	Función de configuración (setup) y la función bucle (loop) en el programa Arduino IDE	27
Figura 1.5	Modulo Sensor de humedad de suelo.....	27
Figura 1.6	Modulo sensor DHT 11	29
Figura 2.1	Mapa de ubicación de la Parcela.....	32
Figura 2.2	Flujograma metodológico de conducción del ensayo	35
Figura 2.3	Puntos de selección para el muestreo de suelo	35
Figura 2.4	Excavación de 60 cm de profundidad en los puntos estratégicos para el muestreo	36
Figura 2.5	Cuarteo de la muestra de suelo	36
Figura 2.6	Diseño del Protoboard del sistema Arduino en el programa Fritzing....	37
Figura 2.7	Sensores conectados al sistema Arduino	38
Figura 2.8	Script y programación de los sensores a través del lenguaje Arduino en la aplicación Arduino IDE.	39
Figura 2.9	Instalación de los sensores FC – 28 a dos niveles de 30 y 60 cm.....	40
Figura 2.10	Instalación del sensor DHT11 en campo	40
Figura 2.11	Programación y configuración del sistema Arduino para realizar la lectura	41
Figura 2.12	Medición y lectura de Arduino A1 y A2 con sus respectivos sensores. ..	41
Figura 2.13	Previo riego para iniciar la lectura y colección de datos.	42
Figura 2.14	Gráficos de dispersión (Arduino vs HOBO) con sus respectivos línea de tendencia y su coeficiente de correlación.....	43
Figura 3.1	Evaluación de la precisión del sensor de temperatura del sistema Arduino con la estación HOBO	48
Figura 3.2	Evaluación de la precisión del sensor de humedad relativa del sistema Arduino con la Estación HOBO.....	50
Figura 3.3	Evaluación de la precisión del sensor de humedad de suelo (FC-28)	51
Figura 3.4	determinación de la frecuencia de riego mediante el contenido de humedad del suelo a 30 y 60 cm de profundidad medidos en el Arduino 1 (A1).....	52
Figura 3.5	Determinación de la frecuencia de riego mediante el contenido de humedad del suelo a 30 y 60 cm de profundidad medidos en el Arduino 2 (A2).....	58

Figura 3.6 Comportamiento temporal de la humedad del suelo a 30 y 60 cm de profundidad en el Arduino 1 62

Figura 3.7 Comportamiento temporal de la humedad del suelo a 30 y 60 cm de profundidad en el Arduino 2 64

Figura 3.8 Matriz de correlación de Pearson con respecto a los parámetros medidos 65

INDICE DE ANEXO

Anexo 1	Sistema de monitoreo y sensores	73
Anexo 2	Calibración de sensores.....	74
Anexo 3	Datos climáticos y del suelo del sistema Arduino 1 (A-1)	75
Anexo 4	Datos climáticos y del suelo del sistema Arduino 2 (A-2)	75
Anexo 5	Cálculo de la evapotranspiración con datos del Arduino 1 (A-1)	76
Anexo 6	Cálculo de la evapotranspiración con datos del Arduino 2 (A-2)	77
Anexo 7	Determinación del umbral hídrico y frecuencia de riego	78
Anexo 8	Resultados del análisis de suelo	79
Anexo 9	Selección de plantas de palto para la medición.....	80
Anexo 10	Datos medidos diarios en intervalo de 30 minutos en el Arduino 1 (A-1)	81
Anexo 11	Datos medidos diarios en intervalo de 30 minutos en el Arduino 2 (A-2)	94

INTRODUCCIÓN

El cultivo de palto (*Persea americana Mill.*) constituye una de las actividades agrícolas de mayor importancia económica y social en diversas regiones del Perú, debido a su creciente demanda en los mercados nacional e internacional. No obstante, su producción se ve condicionada por una adecuada gestión del recurso hídrico, especialmente en zonas donde la disponibilidad de agua es limitada y las condiciones climáticas presentan alta variabilidad. En este contexto, el riego tecnificado y su correcta programación se convierten en herramientas fundamentales para garantizar un desarrollo adecuado del cultivo y una producción sostenible.

Durante la etapa de floración más específico en el Estado 8 del desarrollo (más conocido como la etapa de coliflor) el cultivo de palto presenta una elevada sensibilidad al déficit hídrico luego de entrar a un estado de reposo para fomentar la inducción floral, ya que el estrés por falta de agua puede provocar la caída de flores, reducción del cuajado de frutos y en consecuencia, disminución del rendimiento. Por ello, la determinación de la frecuencia de riego en esta etapa fenológica resulta esencial para mantener el suelo dentro de rangos óptimos de humedad que aseguren la disponibilidad de agua para el sistema radicular del cultivo.

En los últimos años, la tecnología Arduino ha sido ampliamente utilizada como plataforma de bajo costo y fácil implementación para el monitoreo agrícola, permitiendo la integración de sensores de humedad del suelo, temperatura y humedad relativa del aire, así como el almacenamiento y procesamiento de datos en tiempo real. La aplicación de estos sistemas facilita la toma de decisiones basadas en información objetiva y continua, contribuyendo a una agricultura más precisa y sostenible.

En este marco, la presente investigación se orienta a determinar la frecuencia de riego del cultivo de palto durante la etapa de floración mediante el uso de sensores conectados a la tecnología Arduino. Para ello, se realizó la calibración de los sensores con una estación meteorológica automática, se estimó la evapotranspiración del cultivo y se estableció un umbral crítico de humedad del suelo a partir de parámetros edáficos como la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente. Los resultados obtenidos permitirán proponer una programación de riego basada en datos reales de campo, contribuyendo al uso eficiente del agua y al fortalecimiento de la agricultura tecnificada en el cultivo de palto.

Objetivo general

Utilizar el sistema Arduino para determinar la frecuencia de riego por goteo en el cultivo de palto (*Persea americana Mill.*), Huanchac, Huanta, 2025.

Objetivos específicos

- Evaluar la precisión de los sensores conectados a la Tecnología Arduino.
- Determinar la frecuencia de riego a partir de la evapotranspiración del cultivo, mediante el uso de sensores de variables meteorológicos.
- Analizar la relación entre los datos registrados por los sensores conectados a Arduino y las condiciones hídricas del cultivo.

CAPITULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes de la investigación

Velázquez (2021) en su investigación titulado “Desarrollo de un sensor de humedad de suelo para sistemas de riego automatizado”. Universidad Nacional Agraria, Nicaragua indica que

Esta investigación se enfocó en el diseño y análisis de un sensor de humedad de suelo para sistemas de riego automatizados, utilizando materiales de fácil acceso y bajo costo. El sensor desarrollado fue operado con un microcontrolador Arduino Mega 2560, permitiendo una integración eficiente de sistemas de riego automatizados.

Apaza & La torre (2017) en su investigación titulado “diseño e implementación de un sistema automatizado para riego tecnificado basado en el balance de humedad de suelo con tecnología Arduino en el laboratorio de control y automatización EPIME 2016”. Universidad Nacional del Altiplano se dice lo siguiente:

En esta investigación se centra en el diseño de riego automatizado que utiliza sensores de humedad del suelo y tecnología Arduino para optimizar el uso del agua en sistemas de riego tecnificado. El objetivo principal fue realizar un balance de humedad del suelo para lograr un uso eficiente del agua, integrando componentes eléctricos y electrónicos controlados por Arduino.

Gutiérrez & Rodríguez (2021) en su estudio “Automatización de riego tecnificado por goteo, con el desarrollo e implementación de un software con tecnología Arduino” Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac nos dice:

Que en esta investigación abordan la automatización del riego por goteo mediante el desarrollo de un software basado en el sistema Arduino. Se integraron sensores de

humedad y temperatura para controlar las condiciones del suelo y mejorar la eficiencia del riego. El sistema desarrollado permite regular el flujo de agua de manera precisa, contribuyendo a la optimización del uso del recurso hídrico.

Huamán (2023) en su investigación “Diseño de un prototipo de riego para pequeños huertos agroecológicos utilizando Arduino en zonas desérticas urbanas de Lima, Universidad Nacional Agraria La Molina” indica que:

En este proyecto se integró la tecnología y la agricultura para mejorar la distribución del agua en huertos agroecológicos. Se utilizó un microcontrolador Arduino conectado con sensores y actuadoras para controlar parámetros de humedad del suelo y flujo de agua. Los datos arrojados por los sensores fueron validados a través de su calibración, asegurando la precisión del sistema.

Cuba (2022) en su estudio “Diseño e implementación de un sistema de control de riego por aspersión automatizado en el fundo Seirean de la comunidad Cojela, distrito de Pusi, Provincia de Huancané, Puno – Perú. Universidad Nacional del Altiplano” indica que:

Este estudio se enfocó en diseñar e implementar un sistema de riego por aspersión automatizado utilizando sensores de humedad del suelo y un microcontrolador Arduino. El objetivo fue mejorar las condiciones de humedad para optimizar el crecimiento de los cultivos, contribuyendo a la eficiencia en el uso del agua en la región Puno.

Ríos (s.f.) en su investigación Planeamiento, diseño y evaluación técnico-económica del sistema de riego por goteo en frutales, desarrollada en la Universidad Nacional Agraria La Molina, sostiene que:

El estudio tuvo como finalidad diseñar un sistema de riego por goteo eficiente para cultivos frutales como palto, mango y cítricos. Se aplicaron métodos de cálculo técnico para determinar la frecuencia de riego en función de la evapotranspiración, coeficientes de cultivo y humedad del suelo. Si bien no utilizó Arduino, el análisis de frecuencia con base en datos agronómicos es directamente comparable con lo que se busca automatizar en la presente investigación mediante sensores programados.

Salazar (2022) en su investigación Riego por goteo en el rendimiento de papa (*Solanum tuberosum*) Canaán 2750 msnm, Ayacucho, realizada en la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, indica que:

El objetivo fue evaluar el efecto del riego por goteo en el cultivo de papa en condiciones altoandinas. Aunque el cultivo no es frutal, se abordó la frecuencia y cantidad de agua aplicada, así como el comportamiento del cultivo ante variaciones hídricas. Se registraron mejoras en el rendimiento y eficiencia en el uso del agua. Este estudio sirve como referencia para adaptar la frecuencia de riego por goteo a las condiciones agroclimáticas de Huanta, siendo útil para el diseño experimental del sistema con Arduino.

González & Pérez (2024) en su estudio “Ajuste osmótico y rendimiento de dos variedades de palta (*Persea americana* Mill.) bajo riego por goteo en Ayacucho, publicado en la revista *Ciencia Agraria*”, indica que:

El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto del riego por goteo en el rendimiento y ajuste osmótico de las variedades de palta Hass y Fuerte en condiciones agroclimáticas de Ayacucho. Se implementó un sistema de riego tecnificado por goteo en parcelas experimentales, comparando su eficacia con el riego tradicional por gravedad. Los resultados demostraron que el riego por goteo mejoró significativamente el rendimiento y la eficiencia hídrica en ambas variedades. Aunque el estudio no incorporó tecnología Arduino, proporciona una base sólida para la implementación de sistemas automatizados de riego en cultivos de palto durante la etapa de floración.

1.2 Generalidades del cultivo palto (*Persea americana* Mill.)

El cultivo de palto (*Persea americana* Mill), constituye una actividad agrícola que consiste en la siembra, manejo y producción del árbol de palta o aguacate, una fruta de origen subtropical o tropical. Que requiere condiciones agroclimáticas específicas como temperatura, altitud, humedad, tipo de suelo, agua. Este frutal es valorado por su alto contenido de aceite y materia seca que tiene una alta demanda comercial especialmente en mercados de exportación (FAO, 2021).

1.2.1 Origen del palto

El palto, es una especie frutal originaria de Mesoamérica, particularmente de las zonas altas y bajas del sur de México, Guatemala y parte de Centroamérica. Se menciona que fue domesticado hace más de 7000 años, quienes lo cultivaban eran las culturas Aztecas y Mayas quienes ya tenían el conocimiento de su valor nutracéutico. Existen tres variedades

como la mexicana, guatemalteca y la antillana que cada una se adaptan a diferentes altitudes y climas. (Galindo et al., 2008).

1.2.2 Importancia del palto

El palto (*Persea americana* Mill.) es una de las especies frutales más importante a nivel global debido a su alto valor nutricional, comercial y agroindustrial, ya que este es rico en grasas saludables, fibra, vitaminas y minerales. Su cultivo también aporta beneficios ecológicos y sociales en zonas rurales (USDA, 2022).

Tabla 1.1
Composición nutricional de la palta.

Componente	Cantidad por 100 g
Energía	160 kcal
Agua	73.2 g
Proteína	2.0 g
Grasas totales	15.0 g
- Grasas monoinsaturadas	9.8 g
- Grasas poliinsaturadas	1.8 g
- Grasas saturadas	2.1 g
Carbohidratos	8.5 g
Fibra dietética	6.7 g
Azúcares	0.7 g
Vitamina E	2.1 mg
Vitamina C	10.0 mg
Vitamina K	21.0 µg
Ácido fólico (B9)	81.0 µg
Potasio	485.0 mg
Magnesio	29.0 mg
Hierro	0.6 mg

Nota: Datos obtenidos de la base de datos nutricional del USDA (2022)

1.2.3 Taxonomía del palto y descripción botánica del palto

La palta como fruto también conocido como aguacate (México), abocado (EEUU, Centroamérica, el Caribe, España), en el Perú se le conoce más como “palta” así como en los países de Bolivia, Argentina, Chile y Uruguay cuyo fruto es de buena calidad alimenticia y contiene un promedio de 8 a 30% de aceite, según la variedad (Romero, 2015, como se citó en Mamani, 2019).

Morales (2006), citado por Mamani. G (2019, p.12), nos dice que la clasificación taxonómica del palto es de la siguiente manera:

Reino: Vegetal

División: Magnoliopsida

Clase: Magnoliopsida

Orden: Laurales

Familia: Lauraceae

Género: Persea

Especie: Persea americana

Nombre científico: *Persea americana*
Mill

1.2.4 Descripción botánica:

Según Mamani (2006) la descripción botánica se conforma de la siguiente manera:

1.2.4.1 Raíz.

La mayor parte del sistema radicular más específico las raíces absorbentes, se encuentran a 30 a 60 cm debajo del suelo, el cultivo aguacate no tiene la necesidad de adaptarse a suelos profundos debido que su raíz principal es corta y débil.

1.2.4.2 Tallo

El palto tiene un tallo recto y leñoso, con corteza lisa agrietada el tejido leñoso y de color crema con vasos anchos, mayormente llegan a tener una altura de 5 metros, con numerosas ramas delgadas, no soportan altas y bajas temperaturas extremas.

1.2.4.3 Hojas

Las hojas son simples y permanentes, alternas, enteras, elípticas, alargadas y pedunculares, con nervaduras pinnadas con inserción peciolada, generalmente existe defoliación que indica su adaptación a lugares no apropiados para la renovación del cultivo.

1.2.4.4 Flores

Posee una flor hermafrodita con androceo, gineceo, cáliz y corola, es de tipo gamosépalo y conforman el cáliz, tiene nueve estambres con buena fertilidad, con incompatibilidad dicogámica, del grupo A, se comporta como femenino en las mañanas y masculino por las tardes del día siguiente, y del grupo B todo lo contrario.

1.2.4.5 Fruto

Es una drupa carnosa, periforme, ovoide, alargada, su color varía desde verde claro a verde oscuro y de violeta negro dependiendo de la variedad también con consistencia de su cascara y la parte comestible también dependen de la variedad.

1.2.4.6 Semilla.

La semilla es ovalada, con cubierta membranosa mediana a gruesa, en otras variedades delgadas, es muy importante la relación de fruto y semilla, siendo ideal una mayor parte de pulpa. También se dice que es monoembriónica, es decir un solo tallo, a veces se observa de uno a más embriones.

1.2.5 Estados fenológicos

1.2.5.1 Fase vegetativa

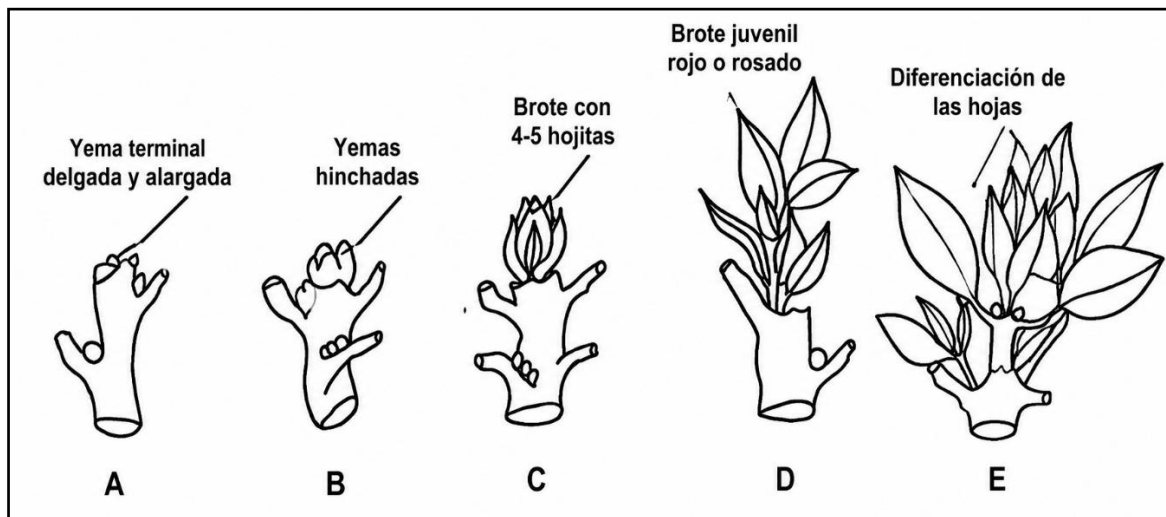
Rodríguez (1982), citado por Espinoza (2015), indica que los estados fenológicos el cultivo se identificaron en 5 estados (A, B, C, D y E) esto de acuerdo a la evolución y desarrollo de las yemas vegetativas

- ✓ **Estado inicial A.** Cuando la rama ya está crecida presenta una yema terminal por ser delgada y de forma alargada, axilas de las hojas y las yemas axilares anticipadas. Esta fase continuara si no entra en reposo el cultivo de palto, lo cual se le conoce como fase vegetativa.
- ✓ **Estado B.** Corresponde a la actividad meristemática, donde las yemas comienzan a desarrollarse. Estas tienen forma más hinchada y las escamas que los cubren empiezan a desvincularse, esto se debe a la presión de la división celular que se ocasiona dentro de la yema. Las yemas tienden a tener un color amarillento, mientras los entrenudos inician a agostarse o están con indicios de agostamiento.
- ✓ **Estado C.** El proceso donde la separación de las escamas continúa y donde también aparecen en el extremo del brote entre 4 a 5 hojas jóvenes, mientras las yemas anticipadas adyacentes tienden a evolucionar, donde la dominancia de las yemas apicales es relativa.
- ✓ **Estado D.** Cuando el brote joven ya tiene un estado avanzado, las yemas originales ya son hojas jóvenes. Las hojas no son totalmente funcionales y tienen una coloración de color rojo intenso a rosado, en variedades como Pollok y Collison son de color rojo y en la Lula y Hall es rosado pálido.

- ✓ **Estado E.** Es el estado de nuevo brote, donde el brote nuevo tiene más diferencia en las hojas, separándolas, aunque mantiene su coloración y el limbo todavía no es funcional en su totalidad, donde finaliza con la maduración de las hojas, estas tienen una coloración u verde característico conectado a la espiral vegetativa, ósea este último estado con el inicial estado A.

Figura 1.1

Estados fenológicos de la fase vegetativa



Fuente: Espinoza – Mendoza (2015)

1.2.5.2 Fase reproductiva

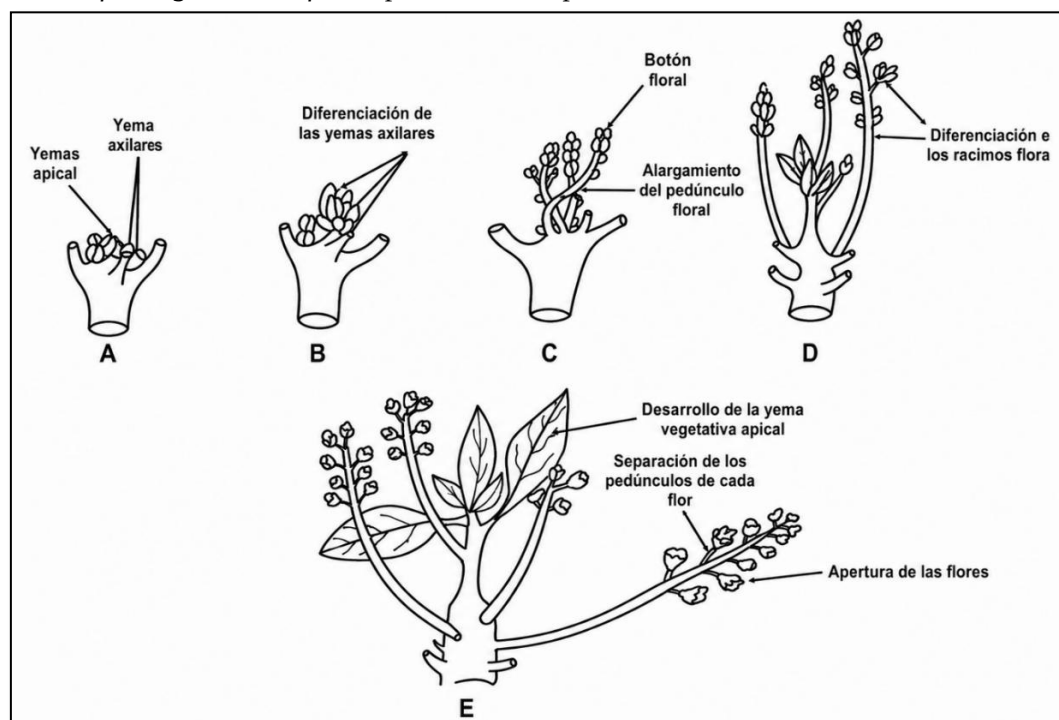
Del mismo modo Rodríguez (1982), citado por Espinoza (2015), indica que los estados fenológicos en la fase reproductiva son A, B, C, D y E:

- ✓ **Estado A.** Este estado se refiere cuando el árbol ha entrado a un proceso general de desarrollo y las yemas hinchadas presentan un color amarillento y la separación de las escamas superiores, es decir, tiene el mismo aspecto del estado B de la fase vegetativa. Cerca a yema apical aparecen una o más yemas axilares de color verde claro de donde nacerán las inflorescencias y tienden a ser vegetativas.
- ✓ **Estado B.** en este estado el ápice terminal detiene su desarrollo relativamente, las yemas verdes laterales tienen una mayor diferenciación y se ven los esbozos de las nuevas inflorescencias, es el estado donde se distinguen claramente los botones florales.
- ✓ **Estado C.** Es donde los pedúnculos florales se alargan, mientras el ápice puede detenerse o desarrollarse al mismo tiempo que los otros órganos adyacentes.

- ✓ **Estado D.** Es cuando el pedúnculo floral alcanza su máximo crecimiento, luego los racimos de las flores constituirán una panícula, es decir, el racimo de los racimos está suficientemente diferenciados, viéndose alrededor del eje central de la inflorescencia. Este puede continuar con las características del estado C de la fase vegetativa o permanecer sin desarrollo.
- ✓ **Estado E.** Es cuando los pedúnculos florales se separan y se abren los pétalos con características dicogámica. En caso de que la yema terminal evolucionó a lo largo de la antesis, en este presentará su estado juvenil con 4 a 5 hojitas rojas o rosadas con desarrollo de sus limbos.

Figura 1.2

Estados fenológicos de la fase reproductiva del palto



Fuente: Espinoza – Mendoza (2015)

Tabla 1.2

Fenología de acuerdo a la demanda hídrica.

Etapa fenológica	Duración aproximada	Demanda hídrica relativa	Recomendación de riego
Brotación	2–4 semanas	Media	Mantener humedad constante
Floración	~1 mes	Alta	Evitar déficit hídrico
Cuajado	2–3 semanas	Media	Riegos ligeros y frecuentes
Crecimiento de fruto	4–6 meses	Muy alta	Riego regular }}
Maduración	1–2 meses	Media-baja	Reducir ligeramente el riego
Reposo	1–2 meses	Baja	Mantener humedad mínima

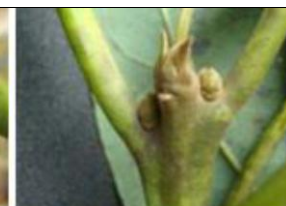
Fuente: FAO, 2016

1.2.5.3 Estados de desarrollo floral del cultivo de palto

Según Genovez (2023) los estados del desarrollo floral son E-1, E-2, E-3, E-4, E-5, E-6, E-7, E-8, E-9, E-10 y E-11 como se indica en la tabla 1.3

Tabla 1.3

Estados e desarrollo floral del cultivo de palto

E-1	Yema puntiaguda cerrada del extremo más distal de dos hojas no expandidas de los brotes.		
E-2	Yemas puntiagudas cerradas, las dos hojas más distales y maduras.		
E-3	Yema puntiaguda cerrada, senescencia parcial de las escamas de las yemas.		
E-4	Escamas de las yemas separada, Brácteas de la inflorescencia se expanden a todos los lados.		
E-5	Aumento en las dimensiones de la yema y las escamas claramente separadas.		
E-6	Yema redonda, bases de las escamas más externas permanecen. Están presentes las brácteas de las inflorescencias que rodean y cierran la inflorescencia.		
E-7	Las brácteas se abren y la inflorescencia comienza a emerger.		

E-8	Elongación obvia de los ejes secundarios (estado de coliflor). Los ejes terciarios todavía están cubiertos por las brácteas y se presentan flores pequeñas.		
E-9	Se elongan los ejes terciarios. La cima de las flores es evidente. La yema vegetativa en el ápice de la inflorescencia es más notoria.		
E-10	Las flores están totalmente diferenciadas, pero no abiertas		
E-11	Flor en antesis. En inflorescencia indeterminada, se rompe la yema vegetativa del ápice, iniciando el flujo vegetativo en primavera.		

Fuente: Genovez (2023)

1.2.6 Demanda hídrica del palto

La demanda hídrica del palto se refiere a la cantidad de agua necesaria para mantener el crecimiento, desarrollo y producción óptima del cultivo, dependiendo de su evapotranspiración (ET_c), condiciones climáticas, estado fenológico y características del suelo. Según Allen et al. (1998), la demanda hídrica de un cultivo está determinada por la evapotranspiración del cultivo (ET_c), la cual se obtiene multiplicando la evapotranspiración de referencia (ET_o) por el coeficiente de cultivo (K_c). En el caso del palto, la demanda hídrica es relativamente alta debido a su estructura foliar, gran área evaporativa y raíces superficiales que requieren humedad constante (Salazar & Lazcano, 2019).

En etapas productivas, el palto puede demandar entre 700 y 1200mm anuales, dependiendo del clima y manejo del riego. En zonas semiáridas, la demanda puede aumentar por mayor evaporación (Carranza et al., 2020).

1.2.7 Requerimiento hídrico por los estados fenológicos del cultivo

El requerimiento hídrico del palto varía según la etapa fenológica. De acuerdo con Salazar y Lazcano (2019), el ciclo del palto incluye brotación, floración, cuajado y crecimiento del fruto, llenado y maduración. Cada etapa presenta distinta sensibilidad al estrés hídrico.

Los coeficientes de cultivo (Kc) cambian según la etapa, afectando directamente el requerimiento de agua:

Tabla 1.4

Kc del cultivo de palto según a la etapa fenológica

Etapa fenológica	Kc aproximado	Comportamiento hídrico
Brotación	0.60 – 0.70	Demanda moderada
Floración	0.85 – 0.95	Etapa crucial
Cuajado	0.90 – 1.00	Demanda alta
Desarrollo del fruto	1.00 – 1.10	Máximas requerimientos
Madurez	0.85 – 0.95	Demanda disminuye

Fuente: Salazar y Lazcano, 2019

Según Allen et al., (2006), el Kc aumenta durante etapas con mayor demanda fisiológica, como floración y desarrollo del fruto, lo que incrementa el requerimiento hídrico.

1.2.7.1 Sensibilidad al déficit hídrico (estado de desarrollo floral “E.8”)

El palto es muy sensible al déficit hídrico, especialmente durante el estado de desarrollo floral (E-8) más conocido como el estado de coliflor que es un estado más crítico del ciclo productivo. Durante este estado, el estrés hídrico puede reducir la apertura floral luego de un reposo para fomentar la inducción floral, afectar la polinización y provocar caída prematura de flores (Whiley et al., 2002). La falta de agua puede ocasionar reducción significativa del amarre de frutos, debido a que la floración requiere estabilidad hídrica para sostener la transpiración y el transporte de nutrientes.

Salazar (2022), indica que se debe mantener dentro de los rangos óptimos de contenido de humedad de suelo para garantizar el rendimiento de producción del cultivo de palto, ya que la planta prioriza la supervivencia sobre la reproducción. Además, según los estudios fisiológicos muestran que el palto reduce su conductancia estomática cuando hay déficit hídrico o estrés hídricos, esto disminuye la fotosíntesis afectando la formación del fruto (Bower et al., 2018).

1.3 Evapotranspiración del cultivo (ET_c y ET_o)

La evapotranspiración (ET) es la pérdida conjunta de agua por evaporación del suelo y transpiración de la planta. Según Allen et al. (2006), representa el principal componente del consumo hídrico de los cultivos y se usa para determinar el riego necesario.

1.3.1 Evapotranspiración del cultivo (ET_c).

Es la evapotranspiración específica de un cultivo en una etapa particular, considerando su desarrollo y condiciones de manejo.

$$ET_c = K_c \times ET_o$$

1.3.2 Evapotranspiración de referencia (ET_o)

Es la evapotranspiración de una superficie de referencia (pasto), bajo condiciones estándar de humedad y sin limitación de agua y se usa para calcular la ET_c .

1.3.3 Concepto de ET_o

La evapotranspiración de referencia (ET_o) es la tasa de pérdida de agua de una superficie vegetal (generalmente césped bien regado y en crecimiento activo).

De acuerdo con Allen et al. (2011), la ET_o representa la demanda atmosférica de agua y depende principalmente de:

- Radiación solar,
- Temperatura del aire,
- Humedad relativa,
- Velocidad del viento.
- Presión de vapor.

1.3.4 Coeficiente de cultivo de palto (K_c)

El coeficiente de cultivo (K_c) del palto cambia según la etapa fenológica, variando típicamente entre 0.85 y 1.05.

1.3.5 Humedad del suelo y niveles críticos

La humedad del suelo es la cantidad de agua almacenada en los poros del suelo y disponible para las plantas. Esta humedad se expresa comúnmente en porcentaje o en

unidades de potencial matricial. Según Hillel (2004), la humedad del suelo determina la disponibilidad de agua para la planta y controla procesos como la absorción radicular. La transpiración y el crecimiento.

Los niveles críticos de humedad representan los puntos en los que el agua disponible pasa de ser óptima a limitante. Entre ellos:

- Capacidad de campo (CC).
- Punto de marchitez permanente (PMP)
- Humedad aprovechable
- Relación CC – PMP para riego.

ocurre típicamente entre 10 a 33 kPa de potencial mátrico, dependiendo del tipo de suelo.

1.3.6 Humedad aprovechable (HA)

La humedad aprovechable (HA) o agua disponible es la cantidad de agua que las raíces pueden absorber entre la CC y el PMP.

$$HA = CC - PMP$$

Este valor varía según el tipo de suelo y profundidad de raíces. Según Hillel (2004), representa la fracción de agua más importante para manejo de riego, ya que es la que realmente puede ser utilizada por la planta antes de sufrir estrés hídrico.

1.3.6.1 Relación CC – PMP para riego

El manejo de riego se basa en aplicar agua cuando el suelo ha consumido aproximadamente la mitad de la humedad aprovechable, especialmente en cultivos sensibles como el palto (Allen et al., 1998).

La relación entre capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) permite determinar:

- El agua útil (HA),
- El umbral de riego,
- La frecuencia de riego,
- Y el grado de estrés hídrico permitido.

Según la FAO (1998), el riego debe aplicarse cuando el suelo ha agotado entre 40 % y 60 % de la humedad aprovechable, dependiendo de la sensibilidad del cultivo, para el palto, especialmente en floración, el riego debe iniciarse antes de que la humedad del suelo baje de 50 % de la HA, para evitar estrés hídrico.

$$Umbral\ de\ riego = CC - (HA \times 0.50)$$

1.4 Suelo y disponibilidad de agua

La disponibilidad de agua en el suelo es la cantidad de agua que puede ser absorbida y utilizada por las plantas. Estudios recientes en suelos agrícolas latinoamericanos señalan que esta disponibilidad depende de la textura, estructura, profundidad efectiva y densidad aparente del suelo (Araya & Barría, 2020). Cuando el suelo tiene buena retención de humedad, plantas pueden mantener la transpiración y fotosíntesis sin experimentar estrés hídrico.

1.4.1 Tipos de suelo

Los suelos se clasifican según su proporción de arena, limo y arcilla, lo cual determina su comportamiento físico e hídrico. Suelos arenosos presentan baja retención de agua, mientras que suelos arcillosos retienen más agua, pero presentan menor facilidad de drenaje. Investigaciones en la región andina destacan que los suelos franco – arenosos y francos son los más apropiados para cultivos frutales debido a su equilibrio entre aireación y retención de humedad (Mendoza & Rojas).

1.4.2 Textura (franco, franco – arenoso, etc.)

La textura del suelo se refiere a la proporción relativa de partículas minerales: arena, limo y arcilla. Esta característica controla la velocidad de infiltración, la retención de humedad y disponibilidad de nutrientes. Según estudios actuales en suelos ibéricos, los suelos francos tienen una distribución equilibrada de partículas y proporcionan condiciones óptimas de retención y disponibilidad de agua (García Serrano, 2019). Los francos – arenosos permiten una buena aireación y drenaje, pero requieren riegos más frecuentes debido a su menor capacidad de retención.

1.4.3 Profundidad efectiva

La profundidad efectiva del suelo es la profundidad en la cual las raíces pueden crecer y extraer agua y nutrientes de manera eficiente. Investigaciones recientes en cultivos frutales

en Chile indican que la profundidad efectiva depende de la presencia de capas compactadas, piedras o sales, y que profundidades superiores a 30 cm permiten un mejor desarrollo radicular y un mayor volumen de agua disponible (Pérez & Álvarez, 2022). En cultivos perennes como el palto, la profundidad efectiva es clave para determinar la lámina útil de riego.

1.5 Propiedades físicas del suelo

Las propiedades físicas del suelo son aquellas características que determinan su comportamiento ante la presencia de agua, aire y raíces. Incluyen la textura, estructura, densidad aparente, porosidad, capacidad de infiltración y retención de humedad. Investigaciones recientes en suelos agrícolas latinoamericanos señalan que estas propiedades condicionan directamente el movimiento del agua, la aireación y la disponibilidad hídrica para las plantas, influyendo en el crecimiento radicular y la eficiencia del riego (Villarreal & Peña, 2021).

1.5.1 Retención de agua

La retención de agua del suelo se refiere a la capacidad del suelo para almacenar agua en sus poros después de un evento de riego o lluvia. Depende principalmente de la textura y estructura, así como del contenido de materia orgánica.

Suelos con alta proporción de arcilla retienen más agua, pero la liberan más lentamente mientras que suelos arenosos retienen menos agua y requieren riegos más frecuentes. Estudios recientes destacan que la retención de agua es un indicador clave para determinar la eficiencia del riego y la programación hídrica en cultivos frutales (López et al., 2019).

1.5.2 Curva de humedad del suelo (Curva de retención de agua)

La curva de humedad o curva de retención de agua describe la relación entre el contenido de agua del suelo y el potencial hídrico o presión matricial. Permite identificar puntos críticos como:

1.5.2.1 Capacidad de campo (CC)

La capacidad de campo (CC) se define como el contenido de humedad que retiene el suelo después de haber sido saturado y de que el exceso de agua haya drenado libremente por acción de la gravedad. En este estado, el agua permanece retenida en los poros del suelo

y se encuentra disponible para las plantas, representando el límite superior del agua aprovechable en la zona radicular (FAO, 2011).

Asimismo, la capacidad de campo depende de las propiedades físicas del suelo, principalmente de su textura y estructura, siendo mayor en suelos de textura fina y menor en suelos de textura arenosa. Este parámetro es fundamental para la planificación del riego, ya que permite establecer el volumen máximo de agua que puede almacenarse en el suelo sin provocar pérdidas por percolación profunda (Hillel, 2013).

1.5.2.2 Punto de marchitez permanente (PMP)

El Punto de marchitez permanente (PMP) corresponde al contenido de humedad del suelo en el cual las plantas ya no pueden absorber agua en cantidad suficiente para mantener sus funciones fisiológicas, provocando una marchitez irreversible. En esta condición, aun cuando el suelo conserve cierta cantidad de agua, esta se encuentra retenida con una fuerza mayor a la capacidad de absorción del sistema radicular, por lo que deja de estar disponible para la planta (FAO, 2011).

El punto de marchitez permanente representa el contenido de agua del suelo por debajo del cual las plantas no pueden extraer agua suficiente y presentan marchitez irreversible, aun bajo condiciones atmosféricas saturadas (Torres et al., 2021).

1.6 Riego por goteo

1.6.1 Principios del riego por goteo

El riego por goteo es un sistema de riego presurizado que aplica el agua de forma localizada y controlada directamente en la zona radicular del cultivo mediante emisores de bajo caudal. Su principio fundamental consiste en suministrar pequeñas cantidades de agua con alta frecuencia, manteniendo la humedad del suelo cercana a la capacidad de campo y reduciendo las pérdidas por evaporación, escorrentía superficial y percolación profunda, lo que incrementa la eficiencia del uso del agua (FAO, 2011; Keller & Bliesner, 1990).

1.6.2 Uniformidad de riego

La uniformidad de riego es el grado de homogeneidad con el que el agua es distribuida dentro de un sistema de riego. En el riego por goteo, una alta uniformidad garantiza que todas las plantas reciban volúmenes similares de agua, evitando zonas con déficit o exceso hídrico. La uniformidad es un indicador clave del desempeño hidráulico del

sistema y está directamente relacionada con el diseño, la presión de operación y el estado de los emisores (Burt et al., 1997; Keller & Bliesner, 1990).

1.6.3 Caudal

El caudal se define como el volumen de agua que entrega un emisor por unidad de tiempo, generalmente expresado en litros por hora ($L\ h^{-1}$). En los sistemas de riego por goteo, el caudal depende del tipo de emisor y de la presión de trabajo del sistema. La correcta selección del caudal es fundamental para satisfacer los requerimientos hídricos del cultivo sin provocar saturación del suelo ni pérdidas de agua (FAO, 2011).

1.6.4 Emisores

Los emisores son dispositivos hidráulicos instalados en las tuberías del sistema de riego por goteo cuya función es regular y dosificar el agua aplicada al suelo. Estos dispositivos permiten la descarga controlada del agua en forma de gotas o pequeños caudales continuos. Existen emisores compensados y no compensados, los cuales presentan diferente comportamiento frente a variaciones de presión, influyendo directamente en la uniformidad del riego (Keller & Bliesner, 1990).

1.6.5 Presión

La presión es la fuerza que impulsa el agua a través del sistema de riego y permite su adecuada distribución hasta los emisores. En el riego por goteo, la presión debe mantenerse dentro de un rango óptimo para asegurar que los emisores funcionen correctamente y entreguen el caudal diseñado. Variaciones excesivas de presión pueden provocar una distribución desigual del agua y reducir la eficiencia del sistema (Burt et al., 1997).

1.6.6 Ventajas: eficiencia, ahorro de agua

La eficiencia en el uso del agua se refiere a la relación entre el agua aplicada y el agua efectivamente aprovechada por el cultivo. El riego por goteo presenta una alta eficiencia debido a la aplicación localizada del agua en la zona radicular, lo que minimiza las pérdidas por evaporación y escorrentía, permitiendo un mayor aprovechamiento del recurso hídrico (FAO, 2011).

El ahorro de agua es una de las principales ventajas del riego por goteo y se logra mediante la aplicación precisa y controlada del agua según las necesidades del cultivo. Este

sistema permite reducir el consumo de agua en comparación con métodos tradicionales de riego, contribuyendo a una gestión sostenible del recurso hídrico, especialmente en zonas con limitada disponibilidad de agua (FAO, 2020).

1.7 Frecuencia de riego

La frecuencia de riego se define como el intervalo de tiempo que transcurre entre dos aplicaciones consecutivas de agua al cultivo, el cual depende de la demanda hídrica de la planta, las características del suelo y las condiciones climáticas del lugar. Este parámetro permite programar el riego de manera que el contenido de humedad del suelo se mantenga dentro de rangos adecuados, evitando tanto el déficit hídrico como el exceso de agua en la zona radicular (Allen et al., 2011).

Calculo por ETc:

$$I = \frac{\text{Lamina util}}{ETc}$$

-Lamina útil

$$LU = (CC - PMP) \times Z \times Da \times 10$$

La frecuencia de riego en cultivo de palto depende principalmente de la evapotranspiración, las propiedades físicas del suelo y las condiciones climáticas de la zona de producción. En investigaciones realizadas en valles interandinos de Ayacucho, se reportó intervalos de riego que varían entre 7 a 14 días, especialmente durante etapas fenológicas de alta demanda hídrica como la floración y el cuajado de frutos (Tineo et al., 2018). Asimismo, se señala que el monitoreo de la humedad del suelo permite establecer de manera más precisa el momento adecuado para aplicar riego y evitar condiciones de estrés hídrico.

Del mismo modo, Meneses y Sulca (2020) mencionan que la programación del riego basada en la evapotranspiración y el contenido de humedad del suelo mejora la eficiencia del uso del agua y contribuye a mantener condiciones óptimas para el desarrollo fisiológico del palto, especialmente en sistemas de riego tecnificado.

1.8 Sistema Arduino

1.8.1 Software

Según Campderrich (2005) es el conjunto de programas asociados a un computador o a un equipo tecnológico que tenga funciones específicas esto dependerá de la programación de control de los tratamientos y entre otros.

1.8.2 Lenguaje Arduino (SDK)

Cervantes (2016) nos dice que “el Arduino está basado en el entorno de programación de procesing con lo que el estudiante que aprenda a programar en este entorno se sentirá familiarizado con el entorno de desarrollo” (p.12). en entorno a lo dicho su lenguaje es fácil el uso en principiantes y para los usuarios más avanzados ya son muy flexibles

1.8.3 Software ampliable y de código abierto

El software Arduino esta publicado bajo una licencia libre y preparada para ser ampliado por programadores experimentados. El lenguaje puede ampliarse a través de librerías de C++, si se está interesado em profundizar en los detalles técnicos, se puede dar el salto a la programación en el lenguaje AVR C en el que está basado y de igual manera se puede añadir directamente código en AVR C en los programas (Arduino, 2012).

1.8.4 Hardware

Según Cervantes (2016) El hardware son componentes físicos de equipos tecnológicos, industriales esto quiere decir todo lo que puede tocarse o palpar con la mano es la parte intangible de un equipo tecnológico o computadora.

1.8.5 Hardware ampliable y código abierto

Arduino está basado en los micros controladores ATMEGA168, ATMEGA328 y ATMEGA1280. Los planos de los módulos están publicados bajo la licencia Creative commons, por lo que diseñadores de circuitos con experiencia pueden hacer su propia versión del módulo, ampliándolo u optimizándolo. Incluso usuarios relativamente inexpertos pueden construir la versión para la placa de desarrollo para entender cómo funciona y ahorrar dinero (Cervantes, 2016).

1.8.6 Arduino

Según Cervantes (2016) indica que “es una plataforma de prototipos electrónica de código abierto (Open source) basada en hardware y software flexibles y fáciles de usar. Está pensado para artistas, diseñadores, como trabajo, hobby y para cualquier interesado en crear objetos o entornos interactivos”. El Arduino puede sentir su entorno mediante la recepción de entradas desde una variedad de sensores y puede afectar a su alrededor mediante el control de luces, motores y otros artefactos así lo define Evans (2010).

1.8.6.1 Placa Arduino

Arduino es una herramienta para hacer que los ordenadores puedan sentir y controlar el mundo físico a través de un ordenador personal. Es una plataforma de desarrollo de computación física (physical computing) de código abierto, basada en una placa con un sencillo micro controlador y un entorno de desarrollo para crear software (programas) para la placa (Pomares, 2009).

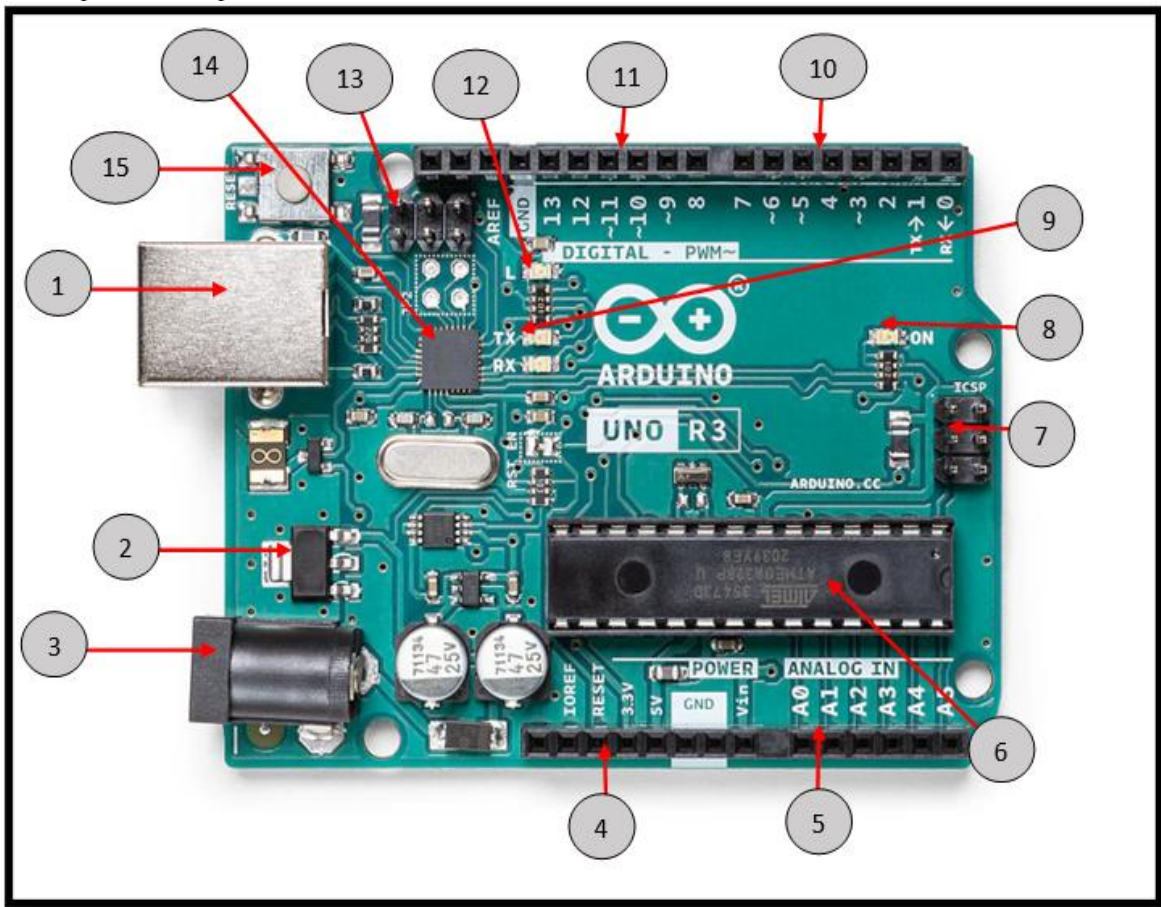
1.8.6.2 Características de la placa Arduino

Las placas han ido evolucionando como su software, al inicio las primeras placas utilizaban un chip FTDI “FT232RL” para comunicarse por puerto USB al computador y un procesador para ser programado, luego se utilizó un microcontrolador especial para cumplir esta función como en el caso de Arduino “uno”, que tenían un micro para ser programado y otro para la comunicación, en la actualidad se usa un único microcontrolador que se compromete en llevar a cabo la comunicación y sobre el que también se descargan las instrucciones a ejecutar (Arduino, 2011).

1.9 Descripción de la placa Arduino UNO R3.

Figura 1.3

Descripción de la placa Arduino UNO R3



Fuente: Arduino

1. Conector USB

Proporciona la comunicación para la programación y la toma de datos, también provee una fuente de 5v para alimentar el Arduino, pero de baja corriente por lo que no sirve para alimentar motores de gran potencia.

2. Regulador de voltaje de 5v

Se encarga de convertir el voltaje ingresado por el plug 3, en un voltaje de 5v regulado necesario para el funcionamiento de la placa y para alimentar circuitos externos.

3. Plug de conexión para fuente de alimentación externa

Es el voltaje que se suministra que debe ser directo y estar entre 6v y 18v o hasta generalmente 20v. se debe tener cuidado de que el terminal del centro de plug quede conectado a positivo ya que algunos adoptadores traen la opción de intercambiar la polaridad de los cables.

4. Puertos de conexión.

Está constituido por 6 pines de conexión con las funciones de RESET que permite resetear el micro controlador al enviarle un cero lógico. Pin 3 3V provee de una fuente de 3.3VDC para conectar dispositivos externos como en la protoboard, por ejemplo. Pin 5V en una fuente de 5VDC para conectar dispositivos externos.

5. Puertos de entradas análogas

Lugar donde se conectan las salidas de los sensores análogos. Estos pines solo funcionan como entradas recibiendo voltajes entre cero y cinco voltios directos.

6. Micro controlador ATMEGA 328

Implementando con los Arduino uno y Arduino mega en la versión SMD del Arduino uno R3, se usa el mismo micro controlador pero en montaje superficial, en este caso las únicas ventajas son la reducción del peso y ganar un poco de espacio.

7. Pines de programación ICSP

Son usados para programar micro controladores en protoboard o sobre circuitos impresos sin tener que retirarlos de su sitio.

8. Led on

Enciende cuando el Arduino está conectado o encendido con el voltaje correcto.

9. Leds de recepción y transmisión

Se encienden cuando la tarjeta se comunica con el PC. El T indica transmisión de datos y el Rx recepción.

10. Puertos de conexiones de pines de entradas o salidas digitales

La configuración como entrada o salida debe ser incluida en el programa cuando se usa la terminal serial es conveniente no utilizar los pines cero (Rx) y Uno (Tx). Los pines 3, 5 y 6 están precedidos por el símbolo, lo que indica que permiten su uso como salidas controladas por ancho de pulso PWM.

11. Puerto de conexiones 5 entradas o salidas

Las salidas 9, 10 y 11 permiten el control por ancho de pulso, la salida 13 es un poco diferente pues tiene conectada una resistencia en serie, lo que permite conectar un led directamente entre ella y tierra. Finalmente hay una salida a tierra GND y un pin AREF que permite ser empleado como referencia para las entradas análogas.

12. Led PIN 13

Indica el estado en que se encuentra.

13. Pines de programación ICSP

Son usados para programar micro controladores en protoboard o sobre circuitos impresos sin tener que retirarlo de su sitio.

14. Chip de comunicación

Permite la conversión de la señal USB sus partes y características se muestran en la siguiente figura

15. Botón reset

Permite restear el micro controlador haciendo que reinicie el programa

1.10 Estructura del Arduino IDE

Para poder crear el lenguaje Arduino se necesitará un programa llamado Arduino IDE que es un editor que nos ayudara crear nuestro propio código Arduino para poder entrar en funcionamiento los sensores, para ello se utilizara un cable USB para conectar el sistema para poder cargar un programa al sistema Arduino.

La conexión USB permite transmitir datos entre el sistema Arduino y la computadora conectada, estos muestran en un monitor serie que está disponible en el editor de código de Arduino. Esto ayuda para reconocer errores y verificar el perfecto funcionamiento de los sensores conectados.

Este programa se conoce como boceto por que el lenguaje Arduino crea rápidamente un programa, al igual que un boceto o un dibujo rápido.

Todos los programas de Arduino deben incluir estas dos funciones principales:

1.10.1 Función de configuración

Se realiza solo una vez al iniciar el programa, el código agregado es el <setup ()> función, esto se realiza para poder configurar los modos de los pines para las entradas y salidas de un dispositivo y entre otros.

1.10.2 Función de bucle

Esto se debe ejecutar luego del <setup ()>, al momento de completarse esta función, realiza varias repeticiones o infinitas repeticiones hasta que se apague el dispositivo, el código que se usa para ello es la <loop ()>, esta función es que se encarga de realizar las tareas principales del programa del dispositivo.

Figura 1.4

Función de configuración (setup) y la función bucle (loop) en el programa Arduino IDE

```
void setup() {  
  // put your setup code here, to run once:  
}  
  
void loop() {  
  // put your main code here, to run repeatedly:  
}
```

Fuente: *Arduino IDE*

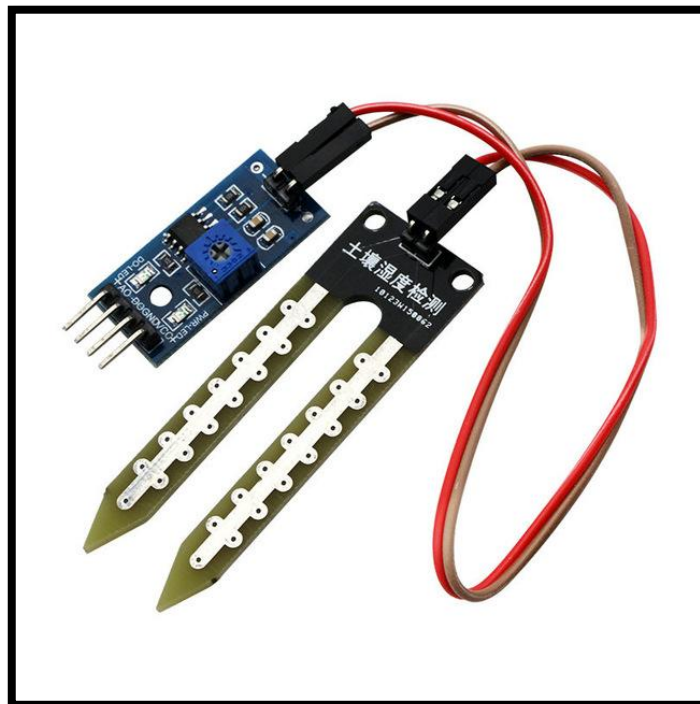
1.11 Sensores utilizados en la investigación

1.11.1 Sensor FC – 28 de humedad del suelo

El sensor FC-28 de humedad del suelo es un dispositivo electrónico de bajo costo que se emplea para estimar el contenido de agua en el suelo mediante la medición de la conductividad eléctrica entre dos electrodos metálicos. Este sensor es ampliamente utilizado en proyectos de monitoreo agrícola y sistemas de riego automatizado debido a su facilidad de integración con plataformas de microcontroladores como Arduino, permitiendo obtener lecturas continuas de la humedad del suelo para apoyar la toma de decisiones en el manejo del riego (Universidad Politécnica Salesiana, 2020).

Figura 1.5

Modulo Sensor de humedad de suelo



Fuente: INTECX

1.11.1.1 Función resistiva

El principio de funcionamiento del sensor FC-28 es de tipo resistivo, ya que la resistencia eléctrica entre sus electrodos varía en función del contenido de agua del suelo. Cuando el suelo presenta mayor humedad, la conductividad eléctrica aumenta y la resistencia disminuye; por el contrario, en condiciones de suelo seco, la conductividad es menor y la resistencia aumenta. Esta relación permite al sensor generar una señal analógica proporcional al nivel de humedad del suelo, la cual puede ser interpretada por el microcontrolador para aplicaciones de monitoreo y control del riego (Wilderness Labs, 2021)

1.11.1.2 Limitaciones (Sensibilidad a sales)

pesar de su utilidad, el sensor FC-28 presenta limitaciones importantes, principalmente relacionadas con su alta sensibilidad a la composición del suelo. La presencia de sales solubles, fertilizantes y variaciones en la textura del suelo afecta la conductividad eléctrica, lo que puede generar lecturas erróneas de humedad. Por esta razón, sensores de tipo resistivo como el FC-28 no son recomendados para mediciones de alta precisión sin un proceso previo de calibración y control de las condiciones edáficas (Silva et al., 2020).

1.11.1.3 Necesidad de calibración

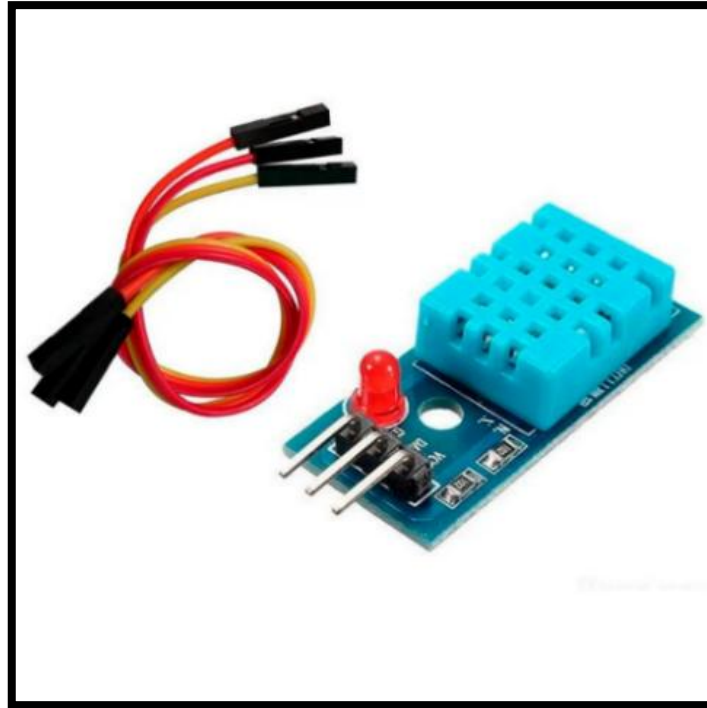
Debido a la influencia de factores como la textura del suelo, la salinidad y la temperatura, el sensor FC-28 requiere una calibración específica para cada tipo de suelo y condición de campo. La calibración permite relacionar la señal eléctrica del sensor con valores reales de humedad del suelo, mejorando la confiabilidad de los datos obtenidos. Diversos estudios señalan que, sin calibración, los sensores resistivos solo proporcionan información cualitativa, por lo que su uso en aplicaciones agrícolas cuantitativas debe realizarse con precaución (Silva et al., 2020).

1.11.2 Sensor DHT11 (temperatura y humedad relativa)

El sensor DHT11 es un dispositivo digital integrado que permite medir simultáneamente la temperatura del aire y la humedad relativa, siendo ampliamente utilizado en sistemas de monitoreo ambiental de bajo costo. Este sensor combina un termistor para la medición de temperatura y un sensor capacitivo para la humedad relativa, integrados con un microcontrolador interno que procesa las señales y entrega los datos en formato digital, lo

que reduce el ruido y facilita su comunicación con plataformas como Arduino (Aosong Electronics, 2018)

Figura 1.6
Modulo sensor DHT 11



Fuente: INTECX

1.11.2.1 Funcionamiento digital

El funcionamiento del DHT11 se basa en la transmisión de datos mediante un protocolo digital de un solo hilo, en el cual el sensor envía paquetes de información codificados que contienen los valores de temperatura y humedad relativa previamente procesados internamente. Este sistema digital evita la necesidad de conversión analógica externa, disminuyendo interferencias eléctricas y permitiendo una lectura más estable en aplicaciones de monitoreo ambiental y agrícola (Aosong Electronics, 2018).

1.12 Calibración de sensores

La calibración de sensores es el proceso mediante el cual se establece la relación entre los valores medidos por un sensor y los valores reales o de referencia obtenidos con un instrumento patrón de mayor exactitud. Este procedimiento permite corregir desviaciones sistemáticas, mejorar la confiabilidad de los datos registrados y garantizar que las mediciones sean representativas de las condiciones reales del sistema evaluado (JCGM, 2012; Fraden, 2016).

1.12.1 Error absoluto

El error absoluto se define como la diferencia entre el valor medido por el sensor y el valor real o de referencia. Este error permite cuantificar directamente la magnitud de la desviación de una medición respecto al valor verdadero y se expresa en las mismas unidades de la variable medida (JCGM, 2012).

1.12.2 Error relativo

El error relativo es el cociente entre el error absoluto y el valor real o de referencia, generalmente expresado como un porcentaje. Este indicador permite evaluar la magnitud del error en relación con el tamaño de la medición, facilitando la comparación del desempeño de sensores que miden diferentes rangos de valores (Taylor, 1997).

1.12.3 Error medio absoluto (MAE)

El error medio absoluto (Mean Absolute Error, MAE) es un indicador estadístico que representa el promedio de los valores absolutos de las diferencias entre los datos medidos y los valores de referencia. El MAE permite evaluar la precisión promedio de un sensor sin considerar la dirección del error, siendo ampliamente utilizado en estudios de validación y calibración de sensores ambientales y agrícolas (Willmott & Matsuura, 2005).

1.12.4 Raíz del error cuadrático medio (RMSE)

La raíz del error cuadrático medio (Root Mean Square Error, RMSE) es una medida estadística que cuantifica la magnitud promedio del error entre los valores medidos y los valores de referencia, otorgando mayor peso a los errores grandes. Este indicador es utilizado frecuentemente para evaluar la exactitud global de un sensor o modelo, siendo especialmente útil en estudios de calibración y comparación de instrumentos de medición (Chai & Draxler, 2014).

CAPITULO II

METODOLOGÍA

2.1 Tipo y diseño de investigación

El estudio es de tipo descriptiva aplicada, debido a que busca resolver un problema práctico relacionado con la programación de riego de cultivo de palto mediante uso de tecnologías de monitoreo.

El enfoque es cuantitativo, pues se emplean mediciones numéricas de humedad del suelo, temperatura ambiental y humedad relativa para analizar tendencias y relaciones entre variables.

El diseño es no experimental, de tipo observacional y longitudinal, dado que no se manipulan las variables, si no que se registran continuamente durante un periodo específico correspondiente a la etapa de floración.

2.2 Nivel de investigación

El nivel del estudio es descriptivo y correlacional:

Descriptivo, porque caracteriza el comportamiento de la humedad del suelo y las condiciones ambientales.

Correlacional, porque analiza la relación entre la humedad del suelo, la humedad relativa y la temperatura del aire, así como su influencia en la frecuencia hídrica.

2.3 Población y muestra:

2.3.1 Población:

Cultivo de palto ubicadas en Huanchac, Huanta, Ayacucho.

2.3.2 Muestra

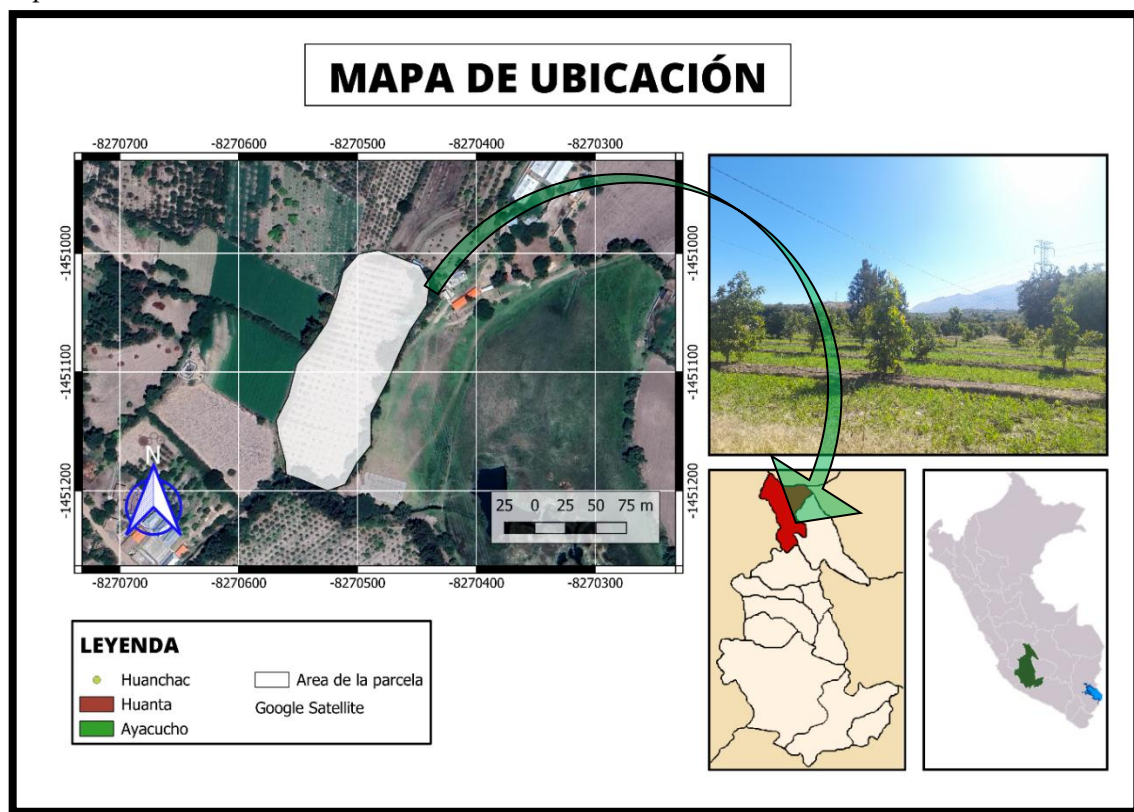
Una parcela representativa seleccionada por accesibilidad y uso previo por el agricultor, donde se instalaron sensores a dos niveles de profundidad (30 cm y 60 cm).

2.4 Ubicación del estudio

El estudio se realizó en el centro poblado de Huanchac, distrito de Luricocha, provincia de Huanta, Ayacucho, ubicado aproximadamente 2650 m.s.n.m., zona con predominio de riego por goteo en cultivos de palto.

Figura 2.1

Mapa de ubicación de la Parcela



2.5 Variables del estudio

2.5.1 Variable independiente

- Utilización del sistema Arduino

2.5.1.1 Indicadores

- Tipo y numero de sensores instalados
- Algoritmo de programación del sistema Arduino.
- Capacidad de almacenamiento y registro de datos (uso de modulo micro SD)

2.5.2 Variable dependiente

- Frecuencia hídrica del cultivo de palto.

2.5.2.1 Indicadores

- Intervalo de días entre riego (días).
- Humedad del suelo (%).
- Lamina de riego aplicada (milímetros mm).
- Evapotranspiración del cultivo (ETc estimada).

2.6 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

2.6.1 Instrumentos utilizados

- ✚ Arduino Uno R3
- ✚ Sensores FC – 28 para humedad del suelo (profundidades: 30 cm y 60 cm)
- ✚ Sensor DHT11 para temperatura ambiental y humedad relativa.
- ✚ Modulo MicroSD para almacenamiento de datos.
- ✚ Estación meteorológica de referencia (HOBOWare).
- ✚ Batería portátil de 15 000 mAh para autonomía del sistema.

2.6.2 Técnica de recolección

- ✚ Registro automático cada 30 minutos de las variables:
- ✚ Humedad del suelo
- ✚ Temperatura del aire
- ✚ Humedad relativa

2.7 Parámetros de evaluación

Los parámetros evaluados durante la investigación fueron la humedad del suelo, temperatura ambiental, humedad relativa, evapotranspiración del cultivo y frecuencia de riego del cultivo de palto durante la etapa de floración.

La humedad del suelo fue evaluada en campo a profundidades de 30 y 60 cm mediante sensores FC – 28 conectados a un sistema Arduino Uno R3. Las lecturas fueron registradas y almacenadas en modulo microSD.

La temperatura ambiental y la humedad relativa fueron evaluadas mediante el sensor DHT11 instalado a 1.5 m de altura sobre la superficie del suelo. Protegido de interferencias directas

La precisión de los sensores se realizó mediante comparación con una estación meteorológica automática HOBO U30, utilizando indicadores estadísticos como error absoluto, error relativo, MAE, RMSE y coeficiente de determinación (R^2).

La evapotranspiración de referencia (E_{To}) fue determinada mediante la ecuación de Penman – Monteith FAO – 56, mientras que la evapotranspiración del cultivo (E_{Tc}) se calculó utilizando el coeficiente de cultivo ($K_c=0.9$), correspondiente a la etapa de floración del palto.

Finalmente, la frecuencia de riego fue determinada a partir de la humedad aprovechable del suelo, considerando la capacidad de campo y punto de marchitez permanente y fracción de agotamiento permisible.

2.8 Conducción del ensayo

La investigación se desarrolló durante la etapa de floración del cultivo de palto en condiciones de campo.

En la primera fase se realizó el reconocimiento y selección de las plantas de palto donde se instalaron los sistemas de monitoreo, posteriormente se efectuó el muestreo de suelo para determinar sus propiedades físicas e hídricas, incluyendo capacidad de campo, punto de marchitez permanente y textura del suelo.

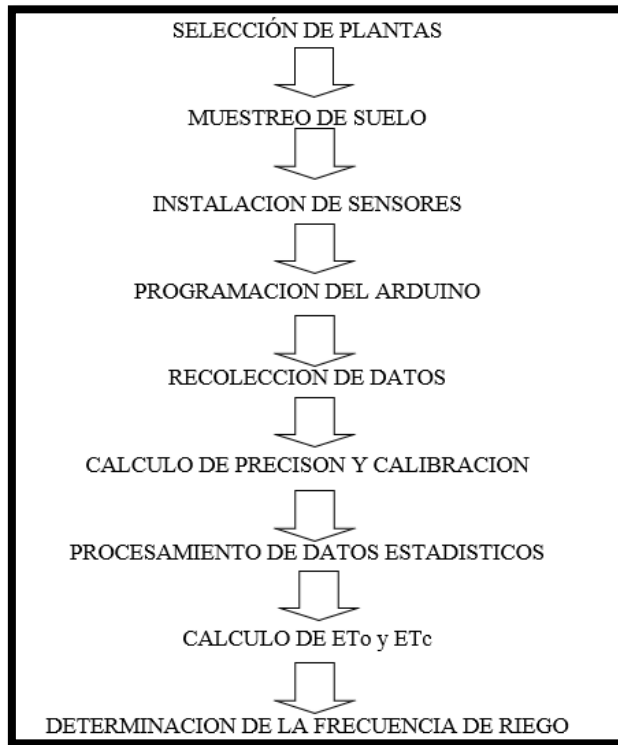
En la segunda etapa se realizó el diseño, ensamblaje y programación del sistema Arduino R3 utilizando sensores FC-28 para humedad del suelo y DHT11 para temperatura y humedad relativa del aire. Asimismo, se integró un módulo microSD para el almacenamiento automático de datos.

Posteriormente se instalaron los sensores de humedad a profundidades de 30 y 60 cm, mientras que el sensor DHT11 fue colocado a 1.5 m de altura para registrar variables ambientales. Luego se realizó el monitoreo continuo de las variables ambientales cada 30 minutos durante el periodo de evaluación.

En la fase de gabinete se efectuó la descarga, organización y procesamiento de datos registrados en el Arduino. Posteriormente se realizó la calibración y cálculo de precisión de los sensores mediante comparación con la estación meteorológica HOBO y se calcularon los indicadores estadísticos correspondientes.

Finalmente, se determinó la evapotranspiración de referencia (ET_o), evapotranspiración del cultivo (ET_c). Humedad crítica y frecuencia de riego del cultivo de palto de acuerdo al comportamiento del suelo y sus condiciones ambientales.

Figura 2.2
Flujograma metodológico de conducción del ensayo



2.9 Procedimiento de recolección de datos

2.9.1 Muestreo de suelo

- a) Se seleccionó varios puntos para realizar el muestreo en zic zac.

Figura 2.3
Puntos de selección para el muestreo de suelo



- b) Se tomaron muestras de 60 cm de profundidad ya que la profundidad efectiva es de esa longitud.

Figura 2.4

Excavación de 60 cm de profundidad en los puntos estratégicos para el muestreo



- c) Luego se extrajo el suelo y se colocó en una bandeja limpia hasta obtener mínimo un kilogramo de suelo, las muestras fueron homogeneizadas mediante el método del cono o cuarteo.

Figura 2.5

Cuarteo de la muestra de suelo



- d) Y por último se almacena en un recipiente para su respectivo análisis, físico, químico en un laboratorio de análisis de suelo.

2.9.2 Diseño e instalación del sistema Arduino

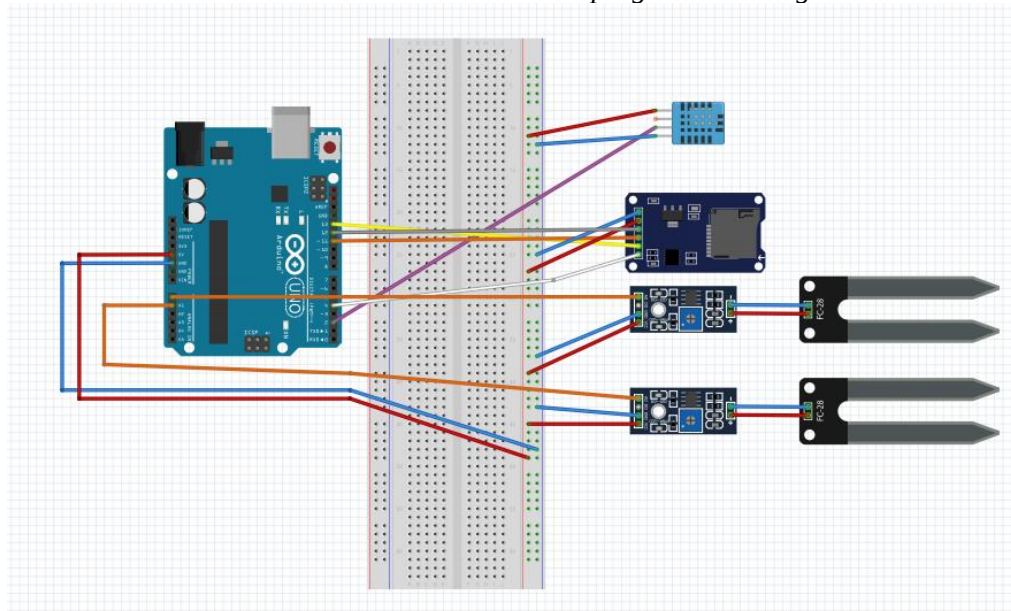
Tabla 2.1

Ensamblaje del circuito en protoboard con los siguientes sensores

Parámetro	Instrumento/sensor	Tecnología usada
Humedad del suelo	2 sensores de humedad FC 28	Arduino Uno
Temperatura ambiental y humedad relativa.	Sensor DHT 11	Arduino Uno

Figura 2.6

Diseño del Protoboard del sistema Arduino en el programa Fritzing



2.9.3 Armado y configuración del sistema Arduino.

El armado del sistema Arduino y realizo con el propósito de garantizar el funcionamiento adecuado de los sensores y la integridad del registro de datos antes de su instalación en campo.

1. Ensamblaje de componentes:

El sistema se conformó por:

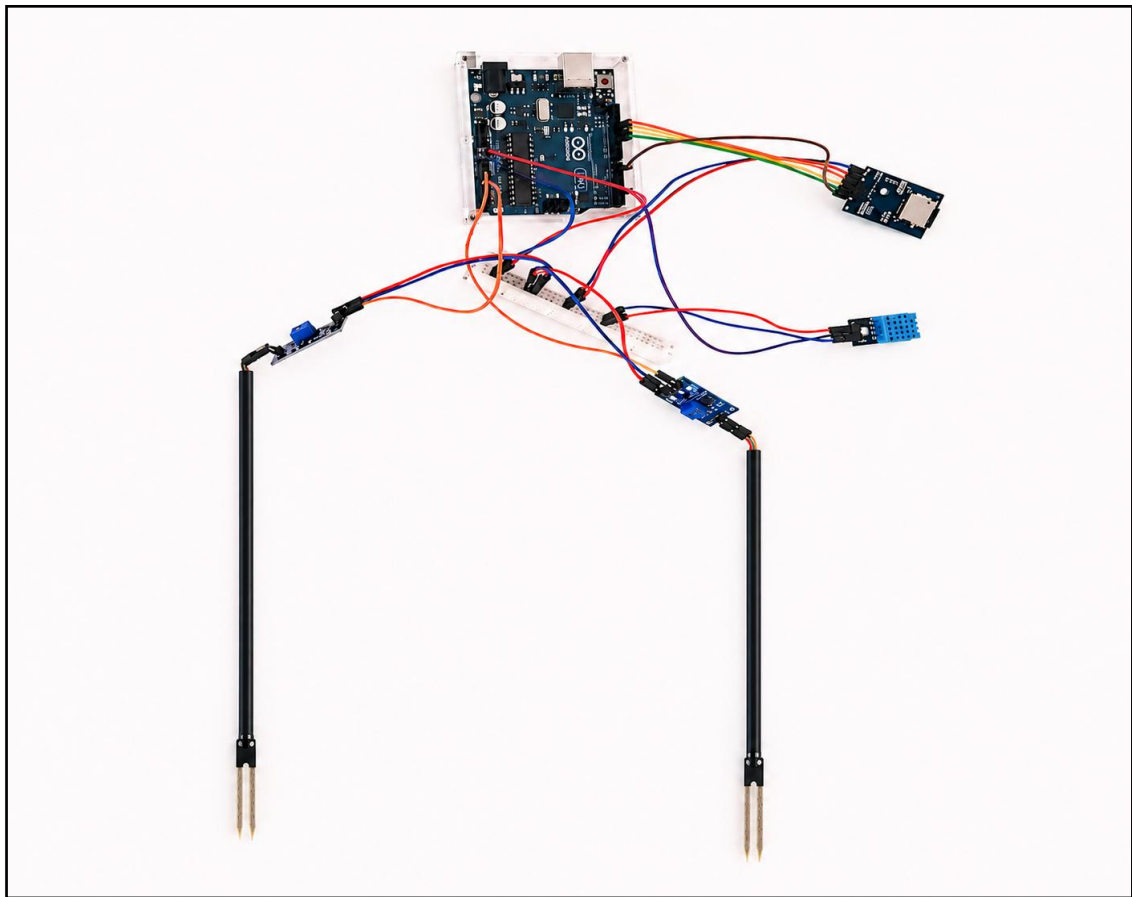
- Arduino Uno R3
- Dos sensores FC – 28 para humedad del suelo.

- Sensor DHT11 para temperatura y humedad relativa del aire.
- Módulo microSD para almacenamiento de datos
- Protoboard y cableado Dupont
- Batería portátil de 15 000 mAh

2. Conexión del Hardware.

Los pines analógicos A0 y A1 fueron asignados a los sensores FC – 28, el sensor DHT11 se conectó al pin digital 7, el módulo microSD se conectó mediante protocolo SPI (pines 10 – 13), se verificaron voltajes de salidas y consumo de corriente para evitar sobrecargas, y el sistema quedo como la siguiente figura:

Figura 2.7
Sensores conectados al sistema Arduino



3. Programación del microcontrolador

- Se desarrolló un script en Arduino IDE que permitió:
- Leer datos cada 30 minutos.
- Convertir las señales analógicas del FC – 28 en porcentajes.
- Registrar temperatura y humedad relativa mediante el DHT11.

Figura 2.8

Script y programación de los sensores a través del lenguaje Arduino en la aplicación Arduino IDE.

```
1  #include <Wire.h>
2  #include <SD.h>
3  #include <SPI.h>
4  #include <DHT.h>
5  #include <Adafruit_MLX90614.h>
6
7  #define DHTPIN 2
8  #define DHTTYPE DHT11
9  #define chipSelect 10
10
11 DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
12 Adafruit_MLX90614 mlx = Adafruit_MLX90614();
13
14 int sensorSuelo1 = A0;
15 int sensorSuelo2 = A1;
16
17 void setup() {
18   Serial.begin(9600);
19   dht.begin();
20   mlx.begin();
21
22   if (!SD.begin(chipSelect)) {
23     Serial.println("Error al inicializar la tarjeta SD");
24     while (1)
25       ;
26   }
27   Serial.println("Tarjeta SD lista");
28
29   File dataFile = SD.open("datos.csv", FILE_WRITE);
30   if (dataFile) {
31     dataFile.println("H_Suelo1(%),H_Suelo2(%),H_Aire(%),T_Aire(C),T_Foliar(C)");
32     dataFile.close();
33   }
34 }
35
36 void loop() {
37
38   int h1 = map(analogRead(sensorSuelo1), 1023, 0, 0, 100);
39   int h2 = map(analogRead(sensorSuelo2), 1023, 0, 0, 100);
40   float hAire = dht.readHumidity();
41   float tAire = dht.readTemperature();
42   float tFoliar = mlx.readObjectTempC();
43
44   Serial.print("Suelo1: ");
45   Serial.print(h1);
46   Serial.print("% | ");
47   Serial.print("Suelo2: ");
48   Serial.print(h2);
49   Serial.print("% | ");
50   Serial.print("H.Aire: ");
51   Serial.print(hAire);
52   Serial.print("% | ");
53   Serial.print("T.Aire: ");
54   Serial.print(tAire);
55   Serial.print("°C | ");
56   Serial.print("T.Foliar: ");
57   Serial.println(tFoliar);
58
59   File dataFile = SD.open("datos.csv", FILE_WRITE);
60   if (dataFile) {
61     dataFile.print(h1);
62     dataFile.print(",");
63     dataFile.print(h2);
64     dataFile.print(",");
65     dataFile.print(hAire);
66     dataFile.print(",");
67     dataFile.print(tAire);
68     dataFile.print(",");
69     dataFile.println(tFoliar);
70     dataFile.close();
71   } else {
72     Serial.println("No se pudo escribir en SD");
73   }
74
75   delay(1800000);
76 }
77 }
```

2.9.4 Instalación de los sensores FC – 28.

Se excavaron en hoyos a 30 cm y 60 cm de profundidad, cada sensor se colocó horizontalmente, en contacto directo con el suelo.

Figura 2.9

Instalación de los sensores FC – 28 a dos niveles de 30 y 60 cm



*Instalación del Sensor FC-28 a 60
cm de profundidad*



*Instalación del Sensor FC – 28 a
30 cm de profundidad*

2.9.5 Instalación del sensor DHT11.

Se colocó a 1.5 metros de altura, libre al sol y al ambiente, para una correcta lectura.

Figura 2.10

Instalación del sensor DHT11 en campo



2.9.6 Configuración del Arduino con Arduino IDE.

Figura 2.11

Programación y configuración del sistema Arduino para realizar la lectura

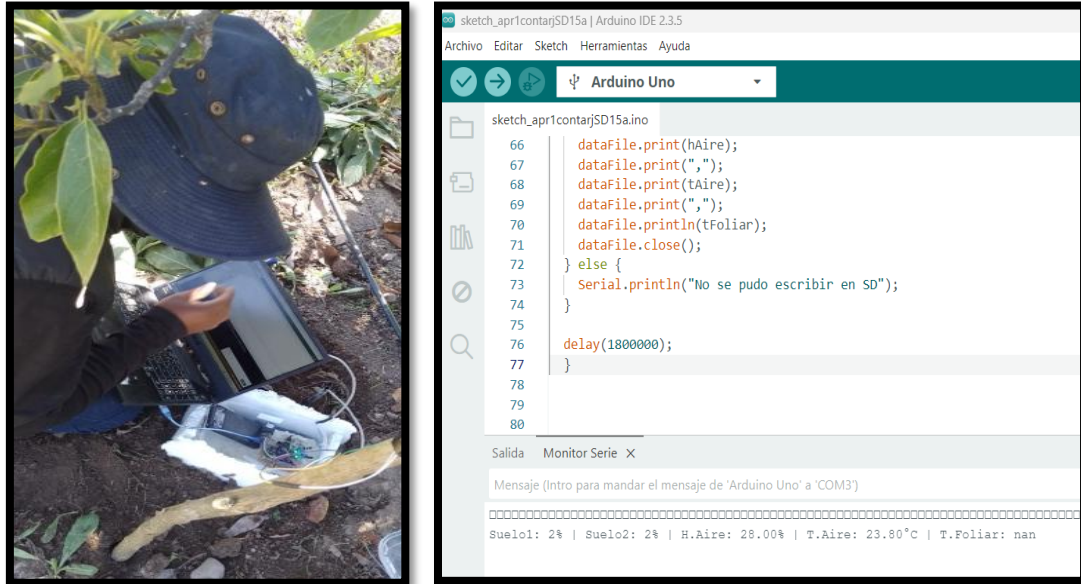


Figura 2.12

Medición y lectura de Arduino A1 y A2 con sus respectivos sensores.



Medición de humedad de suelo, temperatura ambiental y humedad relativa en el Arduino 1

Medición de humedad de suelo, temperatura ambiental y humedad relativa en el Arduino 2

Figura 2.13

Previo riego para iniciar la lectura y colección de datos.



2.10 Procesamiento y análisis de datos.

2.10.1 Calibración de los sensores conectados a Arduino con la estación meteorológica automática HOBO.

Con el fin de cumplir el primer objetivo específico, orientado a la calibración de los sensores conectados a la tecnología Arduino, se realizó un estudio comparativo entre datos registrados por el sistema Arduino y los obtenidos por la estación meteorológica automática HOBO, considerada como sistema de referencia.

La calibración se desarrolló durante la etapa de floración del cultivo de palto, bajo condiciones reales de campo. Los sensores de temperatura ambiental y humedad relativa fueron instalados en proximidad a la estación HOBO, garantizando condiciones ambientales similares durante el periodo de medición.

Los datos fueron registrados a intervalos de 5 minutos y posteriormente procesados para obtener promedios diarios, con el objetivo de homogenizar la escala temporal de análisis. Previo al análisis estadístico, se realizó una depuración de datos para eliminar registros atípicos o valores inconsistentes.

La calibración de los sensores se efectuó mediante el análisis de precisión, calculándose los indicadores estadísticos de Error absoluto (EA), como se muestra en la ecuación (1); Error Relativo (ER), ecuación (2); Error absoluto Medio (MAE), ecuación (3); Error porcentual

Medio Absoluto (MAPE), ecuación (4) y la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE), ecuación (5). Así mismo, se elaboraron gráficos de dispersión y se aplicó un análisis de regresión lineal simple, obteniéndose la pendiente recta y el coeficiente de determinación (R^2), con el fin de evaluar del grado de concordancia entre sensores Arduino y la estación HOBO.

Se exportaron los datos y se emparejaron por fecha y hora, se calcularon usando las siguientes formulas:

a) Error Absoluto (EA)

$$EA = |Arduino - HOBO| \dots \dots \dots Ecuación (1)$$

b) Error Relativo (ER%)

$$ER = \frac{|Arduino - HOBO|}{HOBO} * 100 \dots \dots \dots Ecuación (2)$$

c) MAE (Error absoluto medio)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |Arduino - HOBO| \dots \dots \dots Ecuación (3)$$

d) Error porcentual absoluto Medio (MAPE)

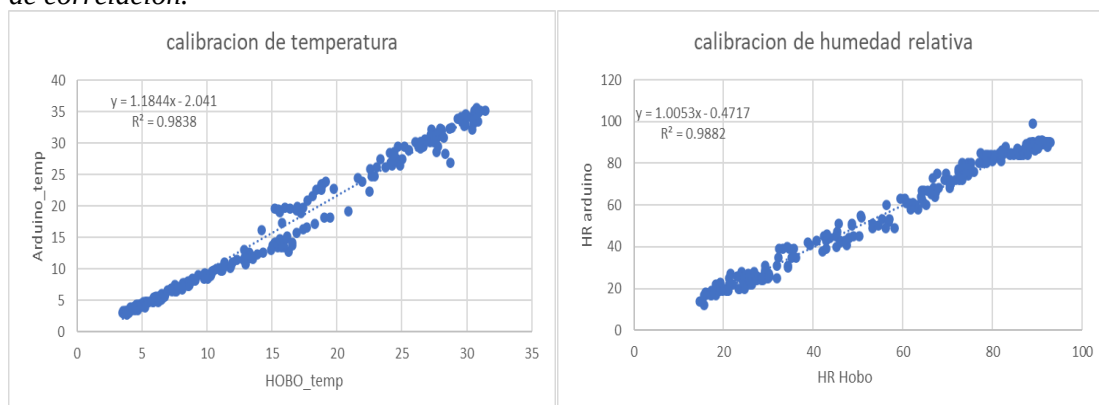
$$MAPE = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{Arduino - HOBO}{HOBO} \right| * 100 \dots \dots Ecuación (4)$$

e) Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (Arduino - HOBO)^2} \dots \dots Ecuación(5)$$

Figura 2.14

Gráficos de dispersión (Arduino vs HOBO) con sus respectivos línea de tendencia y su coeficiente de correlación.



2.10.2 Determinación de humedad Crítica y Frecuencia de Riego

Para el cumplimiento del segundo objetivo específico, orientado a determinar la frecuencia de riego del cultivo de palto durante la etapa de floración, se utilizaron los datos de humedad del suelo registrados por los sensores conectados a la tecnología Arduino, instalados a profundidades de 30cm y 60 cm, así como los datos de temperatura ambiental y humedad relativa del aire.

La determinación de la frecuencia de riego se realizó a partir de la caracterización hídrica del suelo, considerando la capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) que según al análisis de caracterización realizado en el laboratorio LABSAF CANAAN (Pro suelos y agua) perteneciente al Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) se obtuvieron los siguientes parámetros:

Posteriormente, se estableció el umbral crítico de riego, definido como el 50% de la humedad aprovechable, de acuerdo con criterios técnicos de manejo del riego en cultivos permanentes se calcula de la siguiente manera:

1. Cálculo de humedad Aprovechable:

$$HA = CC - PMP \dots\dots\dots \text{Ecuación (6)}$$

$$HA = 28.18 - 12.62$$

$$HA = 15.56\%$$

2. Definición del umbral de riego:

$$Umbral = CC - (0.50 \times HA) \dots\dots\dots \text{ecuación (7)}$$

$$Umbral = 28.18 - (0.50 \times 15.56)$$

$$Umbral = 20.4\%$$

Interpretación:

- Si humedad $\geq 28.18\%$ $\rightarrow$ suelo saturado / recién regado
- Si humedad $20.4-28.18\%$ $\rightarrow$ zona óptima
- Si humedad $\leq 20.4\%$ $\rightarrow$ momento de regar
- Si baja a 10% $\rightarrow$ estrés hídrico severo

2.10.3 Cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_o)

La evapotranspiración de referencia (ET_o) fue estimada mediante el método de Penman – Monteith FAO – 56, recomendado por la organización de las Naciones unidas para la

alimentación y la agricultura (FAO) como estándar para la estimación de la demanda atmosférica de agua en cultivos agrícolas.

Para el cálculo de la ET_o se utilizaron los datos diarios de temperatura máxima, mínima y media del aire, humedad del aire, radiación solar y velocidad del tiempo, en estos últimos los datos se tomaron medidas semanalmente registrados de la estación meteorológica automática HOBO durante el periodo de estudio. Previamente, los datos meteorológicos fueron procesados para obtener valores diarios representativos.

La evapotranspiración de referencia se calculó mediante la siguiente expresión:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{med} + 273} \mu_2(e_s + e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34\mu_2)} \dots\dots\dots Ecuacion (8)$$

Donde:

ET_o : Evapotranspiración de referencia (mm.dia⁻¹)

Δ : Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa. °C⁻¹)

R_n : Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ.m⁻².dia⁻¹)

G : Flujo de calor del suelo (MJ.m⁻².dia⁻¹), asumido como cero para escala diaria.

γ : constante psicométrica (KPa. °C⁻¹)

T_{med} : Temperatura media diaria del aire (°C)

μ_2 : Velocidad del viento a 2 m de altura (m.s⁻¹)

e_s : Presión de vapor de saturación (kPa)

e_a : presión de vapor real (kPa)

La radiación solar registrada en W.m⁻² fue convertida a MJ.m⁻².dia⁻¹ mediante la integración diaria de los valores medidos cada 30 minutos, la velocidad del viento registrada en millas por hora (mph) fue convertida a metros por segundo (m.s⁻¹), conforme a las conversiones estándar. El flujo de calor del suelo fue considerado nulo, debido a que el análisis se realizó a escala diaria.

La ET_o diaria obtenida fue empleada posteriormente para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) y la determinación de la frecuencia de riego durante la etapa de floración del cultivo de palto.

2.10.4 Comparación de los datos de humedad del suelo con el umbral crítico

Los datos de humedad del suelo registrados por los sensores conectados a la tecnología Arduino, instalados a profundidades de 30 cm y 60 cm, fueron comparados con el umbral crítico de riego previamente establecido a partir de la capacidad de campo y humedad aprovechable del suelo. Esta comparación permitió identificar los momentos en los cuales el contenido de humedad del suelo descendió hasta niveles críticos, indicando la necesidad de aplicar riego al cultivo de palto durante la etapa de floración.

La evaluación se realizó a escala diaria, utilizando valores promedio de humedad del suelo, con el fin de reducir la variabilidad de las mediciones instantáneas y obtener una representación adecuada del estado hídrico del suelo. Los resultados de esta comparación fueron utilizados para definir los intervalos de riego y analizar el comportamiento hídrico del cultivo en relación con las condiciones ambientales registradas

2.10.5 Cálculo de evapotranspiración del cultivo (ET_c):

Se calculo la evapotranspiración usando la formula,

$$ET_c = K_c \times ET_o$$

2.10.6 Cálculo de la frecuencia hídrica a partir del ET_c del cultivo.

$$F = \frac{L}{ET_c}$$

Donde:

F: Frecuencia de riego (días)

L: Lámina de agua disponible o utilizable (mm)

ET_c : Evapotranspiración del cultivo (mm/día)

2.10.7 Evaluar el comportamiento temporal de la humedad del suelo a diferentes profundidades (30 y 60 cm) durante la etapa de floración del cultivo de palto.

Para evaluar el comportamiento temporal de la humedad del suelo, se utilizaron los datos registrados por los sensores de humedad instalados a profundidades de 30 cm y 60 cm en el cultivo de palto. Los registros obtenidos a intervalos de tiempo constantes fueron procesados mediante el cálculo de promedios diarios, con la finalidad de reducir la variabilidad de corto plazo y facilitar el análisis temporal.

Posteriormente, se elaboraron gráficos de series temporales para ambas profundidades, permitiendo visualizar la evolución diaria de la humedad del suelo, identificar periodos de incremento y disminución del contenido hídrico, así como evaluar la respuesta del suelo frente a los eventos de riego.

Asimismo, se realizó una comparación entre las profundidades evaluadas (30 y 60cm), con el fin de analizar la dinámica de la humedad en el perfil del suelo y su relación con la zona radicular activa.

CAPITULO III

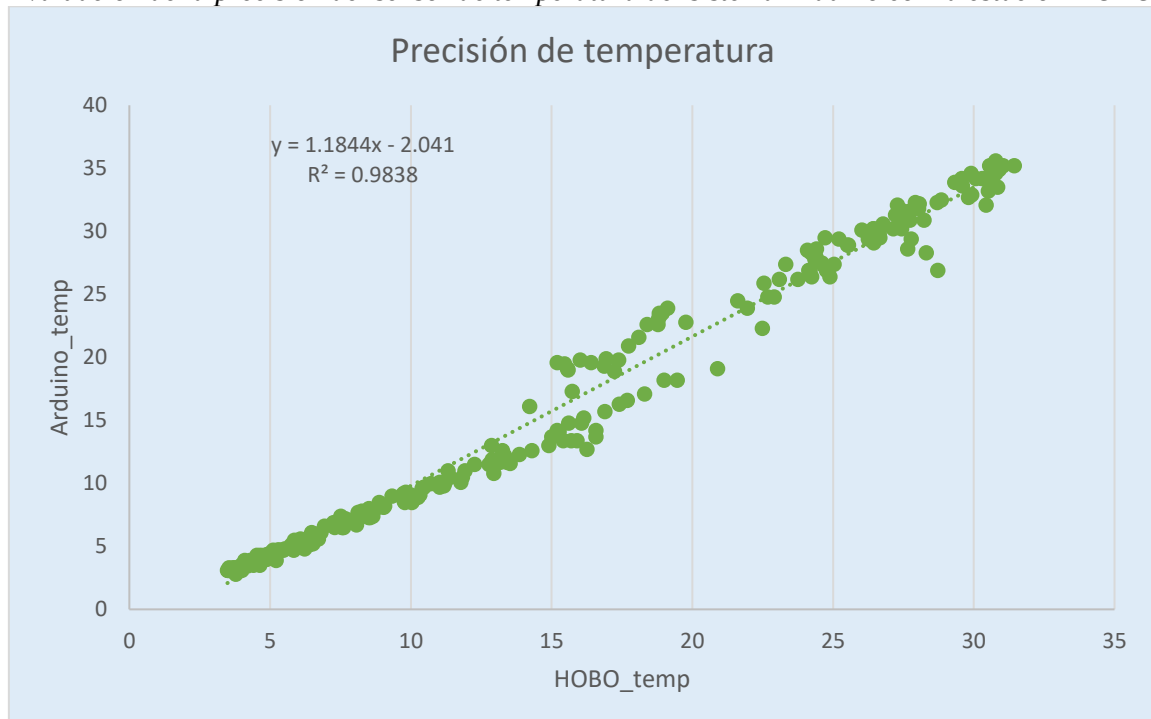
RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Evaluación la precisión de los sensores conectados a la Tecnología Arduino en la etapa de floración.

3.1.1 Evaluación de la precisión del sensor de temperatura y Humedad Relativa (DHT – 11) y del sensor de humedad de suelo FC – 28.

Figura 3.1

Evaluación de la precisión del sensor de temperatura del sistema Arduino con la estación HOBO



La figura 3.1 muestra la relación entre valores de temperatura registrados por sensor DHT11 conectado al sistema Arduino y los datos obtenidos mediante la estación meteorológica HOBO durante el periodo de evaluación.

El análisis de regresión lineal presentó la siguiente ecuación: $y=1.1844x - 2.041$, con un coeficiente de determinación de $R^2= 0.9838$, lo que evidencia una alta relación lineal entre ambos sistemas de medición.

Los resultados obtenidos indican que el sensor DHT11 presentó una elevada precisión en el registro de temperatura ambiental respecto a la estación meteorológico HOBO, debido a la reducida dispersión de los datos respecto a la línea de tendencia y al elevado coeficiente de determinación obtenido.

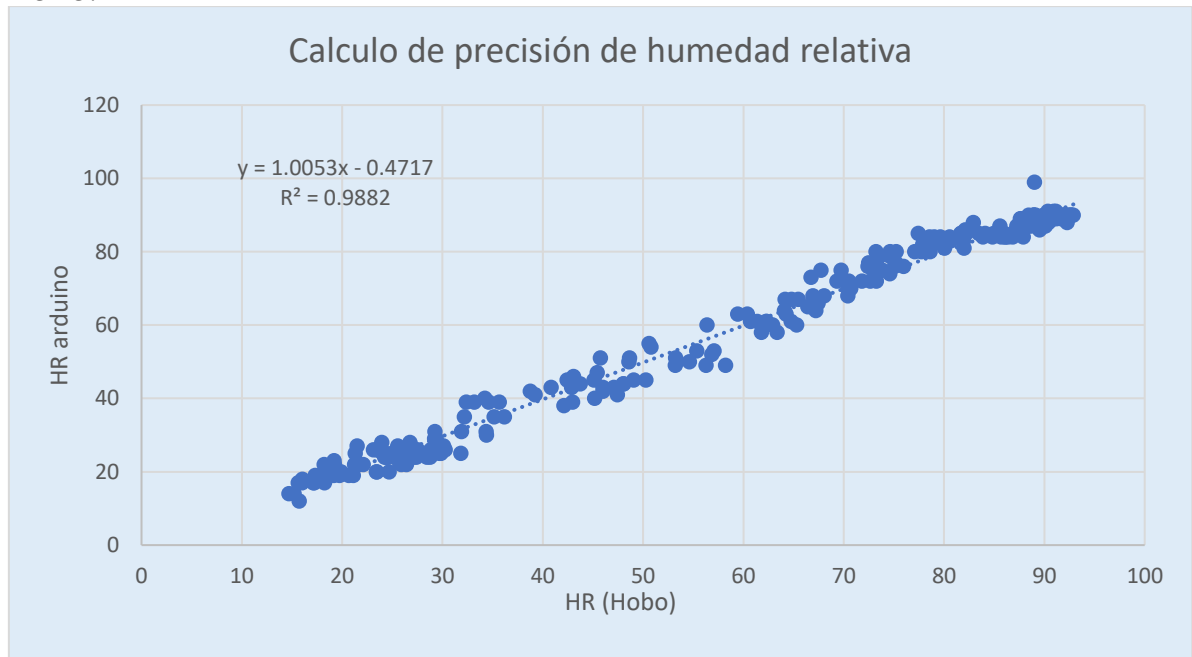
Asimismo, los errores observados entre ambos sistemas fueron mínimos y se mantuvieron dentro de rangos aceptables para aplicaciones de monitoreo agrícola. Sin embargo, se observó una ligera sobreestimación de temperatura por parte del sensor Arduino a valores elevados, posiblemente debido a diferencias en sensibilidad, tiempo de respuesta y condiciones de exposición ambiental.

Los resultados coinciden con lo reportado por Velázquez (2021), quien menciona que los sensores de bajo costo conectados a sistemas Arduino pueden Alcanzar niveles adecuados de precisión cuando son implementados bajo condiciones controladas de monitoreo. Del mismo modo, Huamán (2023) señala que la validación estadística mediante coeficientes de correlación y regresión lineal permite evaluar la confiabilidad de sensores aplicados a sistema de riego automatizado.

En consecuencia, los sensores conectados al sistema Arduino demostraron un comportamiento adecuado para el monitoreo de variables ambientales relacionados con la programación del riego en el cultivo de palto.

Figura 3.2

Evaluación de la precisión del sensor de humedad relativa del sistema Arduino con la Estación HOBO.



La figura 3.2 muestra la relación entre valores de humedad relativa registrados por el sensor DHT11 conectado al sistema Arduino y los datos obtenidos mediante la estación meteorológica automática HOBO durante el periodo de evaluación.

El análisis de regresión lineal presento la siguiente ecuación: $y = 100053x - 0.4717$ con un coeficiente de determinación de $R^2=0.9882$ lo que evidencia una alta correlación entre ambos sistemas de medición.

Los resultados obtenidos indican que el sensor DHT11 presentó una alta precisión en el registro de humedad relativa respecto a la estación meteorológica HOBO, debido a la proximidad de los datos experimentales respecto a la línea de tendencia y al alto coeficiente de determinación obtenido. Asimismo, la pendiente cercana a la unidad evidencia una relación proporcional adecuada entre valores registrados por ambos sistemas.

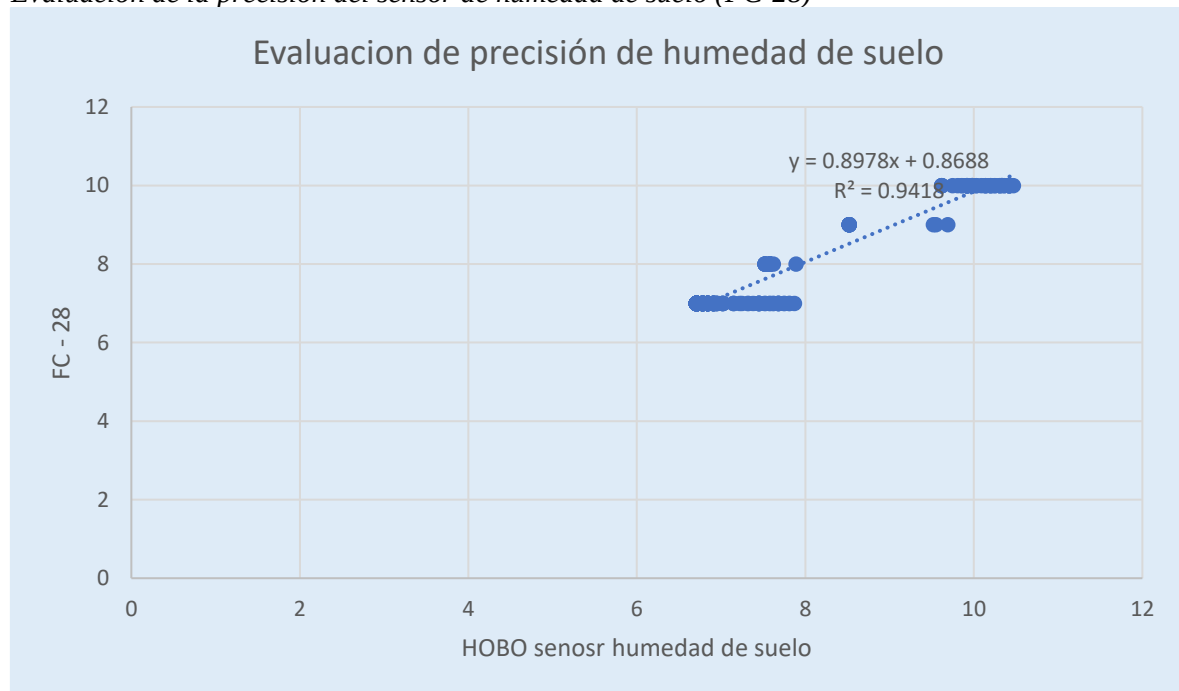
La dispersión observada entre los datos fue reducida, indicando estabilidad en las mediciones realizadas por el sistema Arduino durante el periodo de monitoreo. Además, el intercepto cercanos cero sugiere una diferencia mínima entre los valores registrados por el sensor DHT11 y la estación HOBO.

Los resultados coinciden con lo reportado por Huamán (2023), quien señala que los sensores ambientales conectados a sistemas Arduino presentan adecuada confiabilidad para aplicaciones agrícolas cuando son comparados con equipos meteorológicos de referencia. Del mismo modo, Velázquez (2021) menciona que la validación estadística mediante regresión lineal y coeficiente de determinación permite evaluar la precisión de sensores de bajo costo utilizados en sistemas automatizados de monitoreo agrícola.

En consecuencia, el sensor de humedad relativa conectado al sistema Arduino presentó un comportamiento adecuado para el monitoreo ambiental en el cultivo de palto, permitiendo obtener registros confiables para la estimación de variables relacionadas con el monitoreo.

Figura 3.3

Evaluación de la precisión del sensor de humedad de suelo (FC-28)



En la figura 3.3 muestra la relación entre los valores de humedad del suelo registrados por el sensor FC – 28 conectado al sistema Arduino y los datos obtenidos mediante el sensor de humedad de suelo de la estación meteorológica HOBO durante el periodo de evaluación.

El análisis de regresión lineal presentó la siguiente ecuación: $Y=0.8978x + 0.8688$ con un coeficiente de determinación $R^2= 0.9418$, lo que evidencia una adecuada relación lineal entre ambos sistemas de medición.

Los resultados obtenidos indican que el sensor FC – 28 presentó un comportamiento aceptable en la medición de humedad de suelo respecto al sensor de referencia conectado a HOBO, debido a la proximidad de los datos experimentales con la línea de tendencia y al elevado coeficiente de determinación obtenido. Sin embargo, el valor de la pendiente inferior a la unidad evidencia una ligera subestimación de los valores de humedad registrados por el sensor resistivo FC – 28 frente a variaciones de conductividad eléctrica, compactación del suelo y contenido de sales presentes en el perfil evaluado.

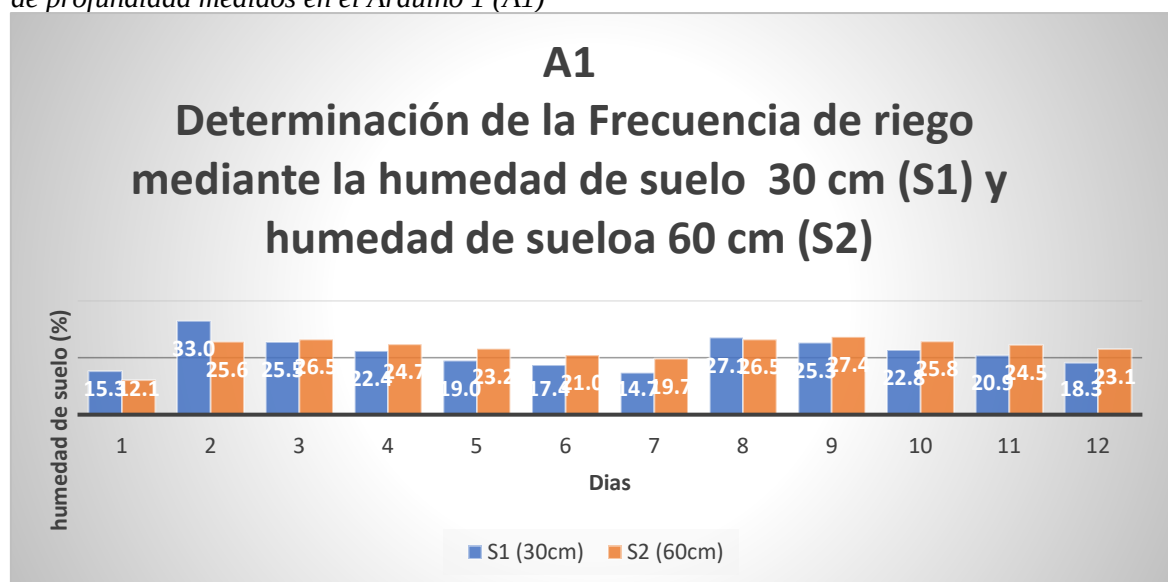
Coinciden con lo reportado por Velázquez (2021), quien menciona que los sensores resistivos de humedad de suelo conectados a sistemas Arduino presentan variaciones en precisión dependiendo de las condiciones físicas y químicas del suelo. Del mismo modo, Huamán (2023) señala que la validación estadística mediante regresión lineal permite evaluar la confiabilidad de sensores de bajo costo utilizados en sistemas de monitoreo agrícola.

3.2 Determinación de la frecuencia de riego del cultivo de palto durante la etapa de floración en al Arduino 1 planta 1

3.2.1 Determinación de la frecuencia de riego mediante la Humedad del suelo y umbral crítico de riego

Figura 3.4

determinación de la frecuencia de riego mediante el contenido de humedad del suelo a 30 y 60 cm de profundidad medidos en el Arduino 1 (A1)



Nota: Comportamiento del contenido de humedad del suelo a 30 cm (S1) y 60 cm (S2) durante el periodo de evaluación, riego aplicado al segundo día y al octavo día.

La figura 3.4 muestra el comportamiento del contenido de humedad de suelo a profundidades de 30 cm (S1) y 60 cm (S2) durante el periodo de evaluación en el sistema Arduino 1 (A1). Los resultados permitieron determinar la frecuencia de riego a partir del monitoreo continuo de la humedad del suelo y del establecimiento del umbral crítico de riego.

De acuerdo a los parámetros hídricos obtenidos en el análisis de suelo, se estableció una capacidad de campo (CC) de 28.18 % y un punto de marchitez permanente (PMP) de 16.62 %. Asimismo, considerando una fracción de agotamiento permisible de 50 %, se determinó como umbral crítico de riego un contenido de humedad aproximado de 20.4 %. En ese sentido, cuando la humedad del suelo fue mayor o igual a 28.18 %, el suelo se consideró en condición de saturación o recién regado, mientras que valores comprendidos entre 20.4 % y 28.18 % representaron una zona óptima de disponibilidad hídrica para el cultivo. Por otro lado, valores iguales o menores a 20.4 % indicaron la necesidad de aplicar riego para evitar estrés hídrico en el cultivo.

Durante el periodo de evaluación se observó que la humedad del suelo disminuyó progresivamente conforme transcurrieron los días posteriores al riego, debido al consumo hídrico del cultivo y al proceso de evapotranspiración. En la profundidad de 30 cm (S1) la humedad presentó mayores fluctuaciones respecto a la profundidad de 60 cm (S2), debido a que las capas superficiales del suelo pierden agua con mayor rapidez por evaporación y absorción radicular.

Asimismo, se identificó que en determinados días la humedad del suelo descendió hasta valores cercanos al umbral crítico de riego, permitiendo establecer un intervalo aproximado de 6 días para la aplicación de riego en el cultivo instalado el Arduino 1 (A1).

Estos resultados coinciden con Allen et al. (2011), quienes indican que la frecuencia de riego debe determinarse considerando la evapotranspiración y la humedad aprovechable del suelo, evitando que el cultivo alcance niveles críticos de déficit hídrico. Del mismo modo, Hillel (2004) señala que el monitoreo de la humedad del suelo constituye una herramienta fundamental para optimizar el manejo del riego y mejorar la eficiencia del uso del agua.

3.2.2 Determinación de la frecuencia de riego mediante la evapotranspiración de cultivo con la fórmula de Penman Monteith en el Arduino 1 (A1).

Tabla 3.1

Datos obtenidos mediante el Arduino 1 (A1) y la estación meteorológica automática HOBO obtenida diaria con datos del A -1

fecha	Temperatura			HR	Ra	Velocidad del viento (U ₂)
	promedio	máximo	Mínimo	promedio		
24/06/2025	11.1910431	27.4693878	2.36734694	38.468832	22.3253211	0.23342584
25/06/2025	12.4750567	30.0544218	2.23129252	37.0129593	22.3253211	0.23342584
26/06/2025	12.9129819	28.4217687	3.59183673	40.5398622	22.3253211	0.23342584
27/06/2025	12.9129819	28.4217687	3.59183673	40.5398622	22.3253211	0.23342584
28/06/2025	12.9129819	28.4217687	3.59183673	40.5398622	22.3253211	0.23342584
29/06/2025	12.8293651	27.877551	3.59183673	40.5603675	22.3253211	0.23342584
30/06/2025	12.319161	26.0408163	2.23129252	34.1422244	22.3253211	0.23342584
01/07/2025	12.9314059	25.0884354	2.0952381	31.9276575	22.3253211	0.23342584
02/07/2025	12.319161	26.0408163	2.23129252	31.9071522	22.3253211	0.23342584
03/07/2025	12.9314059	25.0884354	2.0952381	30.4307743	22.3253211	0.23342584
04/07/2025	12.319161	26.0408163	2.23129252	29.4465223	22.3253211	0.23342584
05/07/2025	12.9314059	25.0884354	2.0952381	28.7903543	22.3253211	0.23342584
promedio	12.5821759	27.0045351	2.66213152	35.3588692	22.3253211	0.23342584

La tabla 3.1 indica los valores obtenidos durante la lectura de la época de floración del palto, son promedios diarios de cada parámetro medido con los sensores de Arduino y también con la ayuda de la estación HOBO se midió los valores de velocidad del viento (U₂) y radiación solar (Ra) y al final se sacó la media aritmética de los datos diarios para hacer el cálculo de la evapotranspiración.

3.2.2.1 Formula final de ETo (Penman – Monteith) con datos de A-1

Tabla 3.2

Parámetros de medición para el cálculo de la evapotranspiración de referencia en el Arduino 1 (A1)

(1) PRESION DE VAPOR DE SATURACIÓN (e_s)	
$e_s (T_{max})$	0.7271807
$e_s (T_{min})$	0.73978703
$e_s (promedio)$	0.73348386
(2) PRESION REAL DE VAPOR (e_a)	
0.2593516	
(3) DEFICITIT DE PRESION DE VAPOR ($e_s - e_a$)	
0.474132264	
(4) PENDIENTE DE LA CURVA DE PRESION DE VAPOR (Δ)	
0.095643853	
(5) CONSTANTE PSICOMETRICA (γ)	
0.067	a 2600 m.s.n.m
(6) RADIACION NETA (R_n)	
16.74399086	
ETo final	4.03

En la tabla 3.2 se presentan los parámetros empleados para el cálculo de la ETo, entre ellos la presión de vapor de saturación promedio es 0.733 kPa, presión real de vapor (e_a) de 0.259 kPa, déficit de presión de vapor ($e_s - e_a$) de 0.474 kPa, pendiente de la curva de presión de vapor (Δ) de 0.095, constante psicométrica (γ) de 0.067 y radiación neta (R_n) de 16.74 MJ m⁻² dia⁻¹. A partir de estos datos se obtuvo una evapotranspiración de referencia final de 4.03 mm dia⁻¹.

El valor obtenido de ETo refleja la demanda atmosférica de agua durante el periodo de evaluación, influenciada principalmente por las condiciones de temperatura, humedad relativa y radiación solar presentes en la zona de estudio. Asimismo, este resultado evidencia una demanda hídrica moderadamente alta durante la etapa de floración del cultivo de palto, etapa considerada crítica debido a su sensibilidad al déficit hídrico.

Según Allen et al. (2006), la ecuación de Penman – Monteith FAO – 56 constituye el método estándar internacional para estimar la evapotranspiración de referencia, debido a que integra variables meteorológicas fundamentales que controlan la pérdida de agua hacia la atmosfera. Del mismo modo, FAO (2011) señala que valores elevados de ETo incrementan la necesidad de aplicar riego con mayor frecuencia para evitar estrés hídrico en cultivos frutales.

3.2.2.2 Evapotranspiración del cultivo.

Con coeficiente de cultivo (Kc) de 0.9 se calculó la evapotranspiración del cultivo con un valor de 3.63 mm.día^{-1} .

La determinación de la frecuencia de riego se realizó a partir de la caracterización hídrica del suelo, considerando la capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) que según al análisis de caracterización realizado en el laboratorio LABSAF CANAAN (Pro suelos y agua) perteneciente al Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) se obtuvieron los siguientes parámetros

Tabla 3.3

Resultado del análisis

Parámetros hídricos	unidad	valores
Densidad Aparente	g/cm ³	1.21
Humedad CC	%	28.18
Humedad PM	%	12.62
Umbral de riego critico	%	20.4

3.2.2.3 Humedad aprovechable

$$HA = CC - PMP = 28.18 - 12.62 = 15.56\%$$

A partir de las características físicas del suelo, se determinó una capacidad de campo (CC) de 28.18% y un punto de marchitez permanente (PMP) de 12.62% obteniéndose una humedad aprovechable total de 15.56%.

3.2.2.4 Humedad aprovechable utilizable.

$$HA_{\text{utilizable}} = 0.5 \times 15.56 = 7.78\%$$

Para el manejo del riego durante la etapa de floración del cultivo, se consideró una fracción de agotamiento permisibles (p) de 0.5, valor recomendado para cultivos perennes sensibles al estrés hídrico. En función de ello la humedad aprovechable utilizable fue de 7.78%.

3.2.2.5 Conversión de humedad aprovechable a lámina de agua.

$$HA \text{ (mm)} = 7.78 \times 0.30 \times 10 = 23.34 \text{ mm}$$

Considerando una profundidad radicular efectiva de 0.30m, correspondiente a la zona radicular activa del palto, se realizó la conversión de humedad aprovechable a lámina de agua con un valor de 23.34 mm.

3.2.2.6 Frecuencia de riego

$$Frecuencia = \frac{23.34}{3.63} = 6.44 \text{ días}$$

Por lo tanto, la frecuencia de riego estimada fue de aproximadamente 6 días

La frecuencia de riego obtenida (6 días) refleja un equilibrio adecuado entre la capacidad de almacenamiento de agua del suelo y la demanda hídrica del cultivo. El uso de una fracción de agotamiento permisible de 50% permitió evitar que el contenido de humedad del suelo descendiera por debajo del umbral crítico.

Asimismo, la consideración de una profundidad efectiva de 30 cm resultó apropiada, dado que el palto concentra una parte significativa de su actividad radicular en los estratos superficiales del suelo, los cuales responden más rápidamente a la evapotranspiración y al riego. Este comportamiento fue corroborado por los registros de humedad del suelo obtenidos mediante sensores conectados a tecnología Arduino, donde se observó una disminución más acelerada de la humedad a 30 cm en comparación con 60 cm.

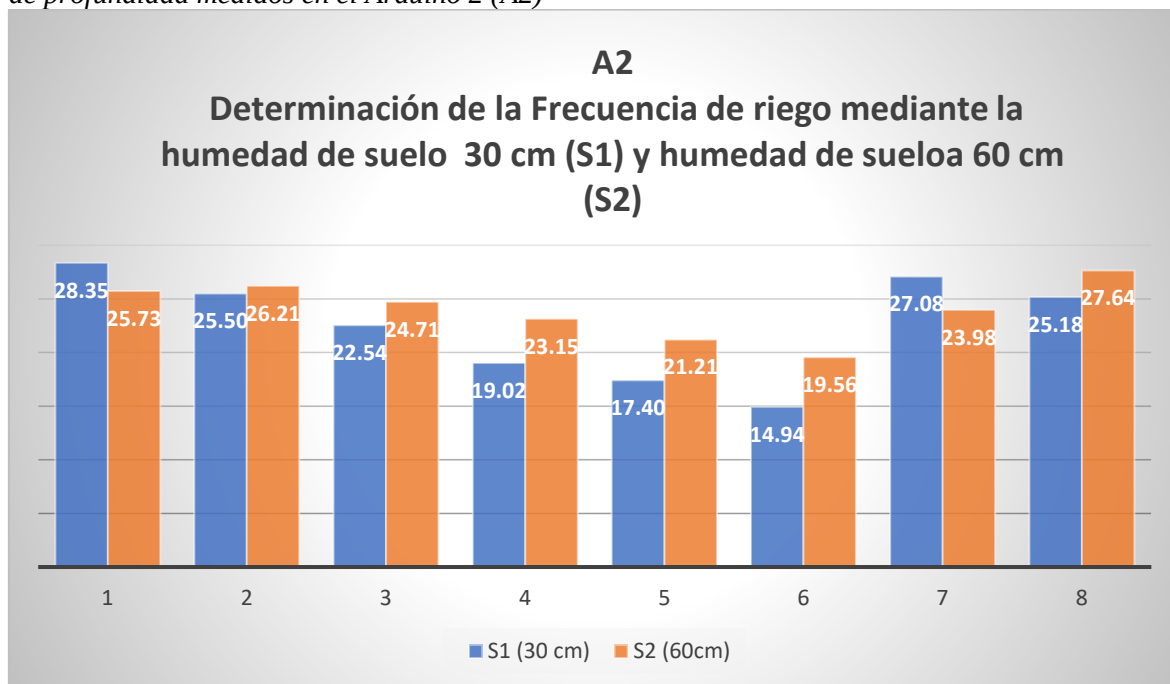
La frecuencia de riego calculada es coherente con la evapotranspiración del cultivo ($ET_c = 3.63 \text{ mm día}^{-1}$) y con las condiciones climáticas de la zona de estudio, caracterizadas por alta radiación solar y baja humedad relativa. En consecuencia, la programación del riego cada 6 días permitió mantener la humedad del suelo dentro del rango óptimo, favoreciendo el desarrollo del cultivo durante la floración.

3.3 Determinación de la frecuencia de riego del cultivo de palto durante la etapa de floración en al Arduino 2 planta 2

3.3.1 Determinación de la frecuencia de riego mediante la Humedad del suelo y umbral crítico de riego

Figura 3.5

Determinación de la frecuencia de riego mediante el contenido de humedad del suelo a 30 y 60 cm de profundidad medidos en el Arduino 2 (A2)



En la figura 3.5 correspondiente al Arduino 2, se observa el comportamiento de la humedad del suelo a 30 cm (S1) y 60 cm (S2) registrados mediante el sistema Arduino 2 (A2). Considerando los parámetros hídricos del suelo, se estableció una capacidad de campo (CC) de 28.18 % y un punto de marchitez (PMP) de 12.62 %. Asimismo, con una fracción de agotamiento permisible de 50 % se determinó como umbral crítico de riego un contenido de humedad aproximado de 20.4 %. En ese sentido, valores de humedad mayores a 28.18 % indicaron condiciones de suelo aturado o recientemente regado, mientras que contenidos entre 20.4 % y 28.18 % se consideró necesario iniciar el riego para evitar estrés hídrico.

Durante el periodo de evaluación se observó una disminución progresiva del contenido de humedad del suelo conforme transcurrieron los días posteriores al riego. En la profundidad de 30 cm (S1) la humedad descendió con mayor rapidez, alcanzando valores de 19.02 %, 17.40 % y 14.94% en determinados días de evaluación, evidenciando agotamiento hídrico

en la capa superficial del suelo. Por otro lado, a 60 cm de profundidad (S2) la disminución de humedad fue más gradual debido a una mayor conservación del agua en capas profundas.

Los resultados muestran que el contenido de humedad del suelo alcanzo el umbral critico aproximadamente del sexto y séptimo día después del riego, permitiendo establecer una frecuencia de riego cercana a 7 días para el sistema Arduino 2 (A2). Esto evidencia que el monitoreo continuo de humedad mediante sensores conectados a Arduino permitió identificar oportunamente el momento adecuado para aplicar riego y mantener y condiciones óptimas de humedad durante la etapa de floración.

Estos resultados coinciden con lo reportado por Tineo et al. (2018), quienes señalan que n las zonas productoras de palto de los valles interandinos de Ayacucho el riego se realiza con frecuencia de 7 a 14 días, dependiendo de la disponibilidad hídrica y las condiciones climáticas. Asimismo, en la Estación experimental Agriarí Canaán del INI se reportó la aplicación de riego cada 7 días durante evaluaciones de estrés hídrico en cultivares de palto, resultados similares a los obtenidos en el presente estudio.

3.3.2 Determinación de la frecuencia de riego mediante la evapotranspiración del cultivo con la fórmula de Penman Monteith en el Arduino 2 (A2)

Tabla 3.4

Datos obtenidos mediante el Arduino 1 (A1) y la estación meteorológica automática HOBO obtenidas diaria con datos de A-2

fecha	T_Aire(C)			H_Aire (%)	Ra	Velocidad del viento (U29)
	promedio	máximo	mínimo			
09/07/2025	11.4036281	28.0816327	2.0952381	53.1710958	22.3253211	0.23342584
10/07/2025	11.5751134	25.4285714	2.0952381	51.5921916	22.3253211	0.23342584
11/07/2025	12.1292517	24.0680272	3.72789116	55.1806102	22.3253211	0.23342584
12/07/2025	12.2001134	24.0680272	4.20408163	61.0451115	22.3253211	0.23342584
13/07/2025	11.6147959	26.4489796	3.18367347	56.4929462	22.3253211	0.23342584
14/07/2025	11.8512274	25.4285714	3.25170068	54.8489601	22.3253211	0.23342584
15/07/2025	11.5680272	24.0680272	2.97959184	48.4343832	22.3253211	0.23342584
16/07/2025	11.7999382	24.0680272	2.0952381	45.9420634	22.3253211	0.23342584
promedio	11.7677619	25.207483	2.95408163	53.3384203	22.3253211	0.23342584

La siguiente tabla indica los valores obtenidos durante la lectura de la época de floración del palto, son promedios diarios de cada parámetro medido con los sensores de Arduino y también con la ayuda de la estación HOBO se midió los valores de velocidad del viento (U_2)

y radiación solar (R_a) y al final se sacó la media aritmética de los datos diarios para hacer el cálculo de la evapotranspiración

3.3.2.1 FORMULA FINAL DE ET_o (Penman – Monteith) en el A-2

Tabla 3.5

Parámetros de medición para el cálculo de la evapotranspiración de referencia en el Arduino 2

(1) PRESION DE VAPOR DE SATURACIÓN (e_s)	
$e_s (T_{\max})$	0.74216588
$e_s (T_{\min})$	0.75530041
e_s (promedio)	0.74873314
(2) PRESION REAL DE VAPOR (e_a)	
0.39936243	
(3) DEFICITIT DE PRESION DE VAPOR ($e_s - e_a$)	
0.34937071	
(4) PENDIENTE DE LA CURVA DE PRESION DE VAPOR (Δ)	
0.09124367	
(5) CONSTANTE PSICOMETRICA (γ)	
0.067	a 2600 m.s.n.m
(6) RADIACION NETA (R_n)	
16.74399086	
ET_o final	3.92

La tabla 3.5 presenta parámetros metrológicos utilizados para el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_o) mediante la ecuación de Penman – Monteith FAO – 56 utilizando los datos registrados por el sistema Arduino 2 (A2). Entre los principales parámetros evaluados se consideraron la presión de vapor saturación promedio (e_s) con un valor de 0.748 kPa, la presión real de vapor (e_a) de 0.3994 kPa, el déficit de presión de vapor ($e_s - e_a$) de 0.3494 kPa, la pendiente de la curva de presión a vapor (Δ) de 0.0912 y la constante psicométrica (γ) de 0.067 calculada para una altitud aproximada de 2600 m.s.n.m. Asimismo, la radiación neta obtenida neta fue de 16.74 MJ m⁻²dia⁻¹, determinándose finalmente una evapotranspiración de referencia de 3.92 mm dia⁻¹.

3.3.2.2 Evapotranspiración del cultivo

Con coeficiente de cultivo (K_c) de 0.9 se calculó la evapotranspiración del cultivo con un valor de 3.92 mm.dia⁻¹.

Tabla 3.6

Parámetros hídricos

Parámetros hídricos	unidad	valores
Densidad Aparente	g/cm ³	1.21
Humedad CC	%	28.18
Humedad PM	%	12.62

3.3.2.3 Humedad aprovechable

$$HA = CC - PMP = 28.18 - 12.62 = 15.56\%$$

A partir de las características físicas del suelo, se determinó una capacidad de campo (CC) de 28.18% y un punto de marchitez permanente (PMP) de 12.62% obteniéndose una humedad aprovechable total de 15.56%.

3.3.2.4 Humedad aprovechable utilizable.

$$HA_{utilizable} = 0.5 \times 15.56 = 7.78\%$$

Para el manejo del riego durante la etapa de floración del cultivo, se consideró una fracción de agotamiento permisibles (p) de 0.5, valor recomendado para cultivos perennes sensibles al estrés hídrico. En función de ello la humedad aprovechable utilizable fue de 7.78%.

3.3.2.5 Conversión de humedad aprovechable a lámina de agua.

$$HA \text{ (mm)} = 7.78 \times 0.30 \times 10 = 23.34 \text{ mm}$$

Considerando una profundidad radicular efectiva de 0.30m, correspondiente a la zona radicular activa del palto, se realizó la conversión de humedad aprovechable a lámina de agua con un valor de 23.34 mm.

3.3.2.6 Frecuencia de riego

$$Frecuencia = \frac{23.34}{3.52} = 6.62 \text{ dias}$$

Por lo tanto, la frecuencia de riego estimada fue de aproximadamente 7 días

La frecuencia de riego obtenida (7 días) refleja un equilibrio adecuado entre la capacidad de almacenamiento de agua del suelo y la demanda hídrica del cultivo. El uso de una fracción

de agotamiento permisible de 50% permitió evitar que el contenido de humedad del suelo descendiera por debajo del umbral crítico.

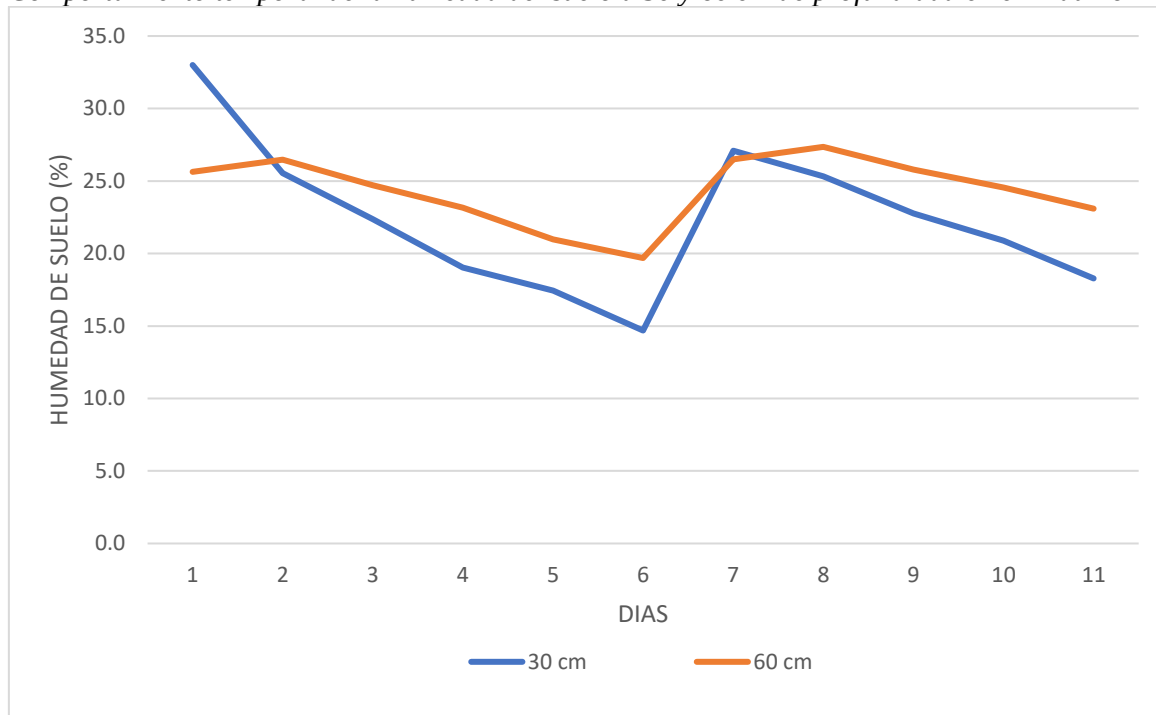
Asimismo, la consideración de una profundidad efectiva de 30 cm resultó apropiada, dado que el palto concentra una parte significativa de su actividad radicular en los estratos superficiales del suelo, los cuales responden más rápidamente a la evapotranspiración y al riego. Este comportamiento fue corroborado por los registros de humedad del suelo obtenidos mediante sensores conectados a tecnología Arduino, donde se observó una disminución más acelerada de la humedad a 30 cm en comparación con 60 cm.

La frecuencia de riego calculada es coherente con la evapotranspiración del cultivo ($ET_C = 3.52 \text{ mm día}^{-1}$) y con las condiciones climáticas de la zona de estudio, caracterizadas por alta radiación solar y baja humedad relativa. En consecuencia, la programación del riego cada 6 días permitió mantener la humedad del suelo dentro del rango óptimo, favoreciendo el desarrollo del cultivo durante la floración.

3.4 Comportamiento temporal de la humedad del suelo a diferentes profundidades (30 y 60 cm)

Figura 3.6

Comportamiento temporal de la humedad del suelo a 30 y 60 cm de profundidad en el Arduino 1



La figura 3.6 muestra el comportamiento temporal de la humedad del suelo a profundidades de 30 y 60 cm en el Arduino 1 durante el periodo de evaluación. Los resultados evidencian que la humedad del suelo a 30 cm presento una mayor variación en comparación con la profundidad de 60 cm, observándose un descenso progresivo desde cercanos a 33 % hasta aproximándose 15 % antes de aplicar el riego. Posteriormente, después del riego, la humedad incremento nuevamente alcanzando valores próximos a capacidad de campo.

En la profundidad de 60 cm, la humedad del suelo presentó un comportamiento más estable, manteniéndose entre aproximadamente 20 % y 27 % durante el periodo evaluado. Esta menor variabilidad se relaciona con la mayor capacidad de campo de retención hídrica del perfil profundo del suelo y la menor influencia directa de la evapotranspiración superficial.

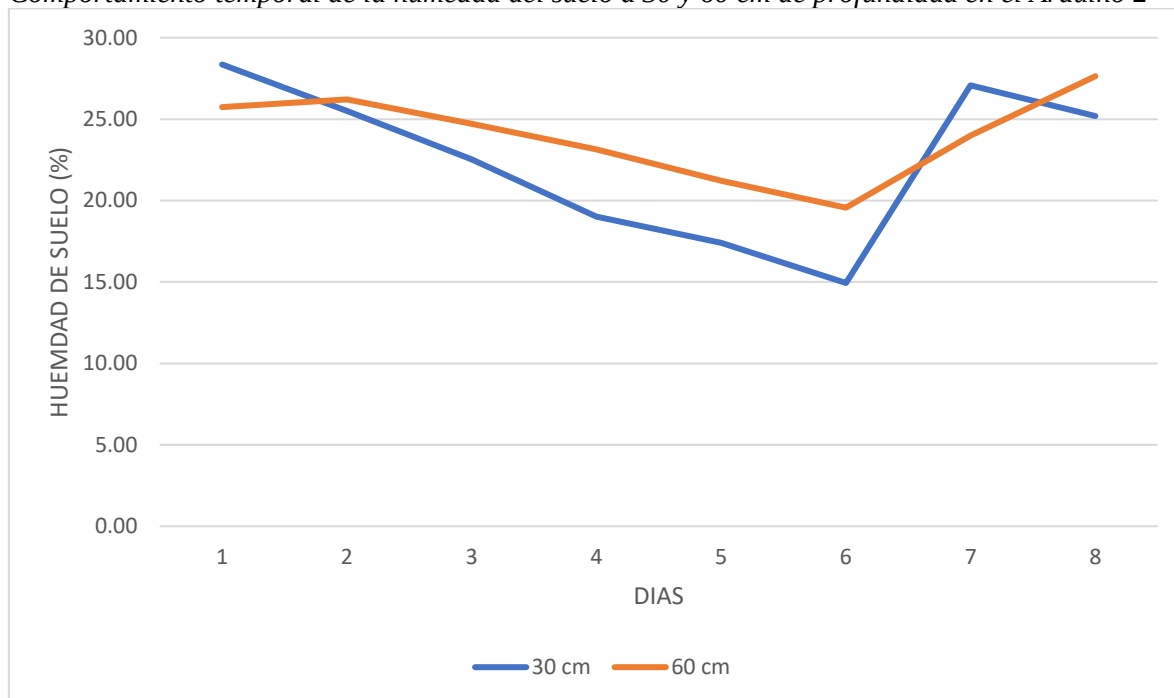
Asimismo, los resultados indican que la capa superficial del suelo respondió más rápidamente tanto al agotamiento hídrico como a la reposición de agua mediante el riego, debido a la mayor actividad radicular y exposición a las condiciones atmosféricas. En contraste, la profundidad de 60 cm mostro cambios más graduable en el contenido de humedad, evidenciando una dinámica hídrica más estable y menor actividad radicular en el perfil profundo.

Los resultados obtenidos coinciden con Neira (2024), quien nos indica que, bajo el riego por goteo en cultivo de palto, los primeros 30 cm del suelo presentan una mayor variación de humedecimiento y agotamiento hídrico debido a la mayor concentración de raíces absorbentes y a la distribución del bulbo húmedo generado por los emisores.

De igual manera, los resultados son similares a los reportados de Jaimes (2019), quien indica que las capas superficiales del suelo presentan mayor variabilidad de humedad debido a la evapotranspiración y extracción radicular, mientras que los perfiles profundos conservan mayor estabilidad hídrica durante el periodo de evaluación.

Figura 3.7

Comportamiento temporal de la humedad del suelo a 30 y 60 cm de profundidad en el Arduino 2



La Figura 3.7 muestra el comportamiento temporal de la humedad del suelo a profundidades de 30 y 60 cm en el Arduino 2 durante el periodo de evaluación. Los resultados evidencian que la humedad del suelo a 30 cm presentó una disminución progresiva desde valores cercanos a 28 % hasta aproximadamente 15 % al sexto día de evaluación, reflejando un agotamiento hídrico más acelerado en la capa superficial del suelo. Posteriormente, luego de la aplicación del riego, la humedad incrementó nuevamente alcanzando valores a 27 %.

En la profundidad de 60 cm, la humedad del suelo mostro un comportamiento más estable en comparación con la profundidad superficial de 30 cm, manteniéndose entre aproximadamente 19 % y 28 % durante el periodo evaluado, esta respuesta más gradual se relaciona con la mayor capacidad de almacenamiento de agua en el perfil profundo y la menor influencia directa de la evaporación superficial.

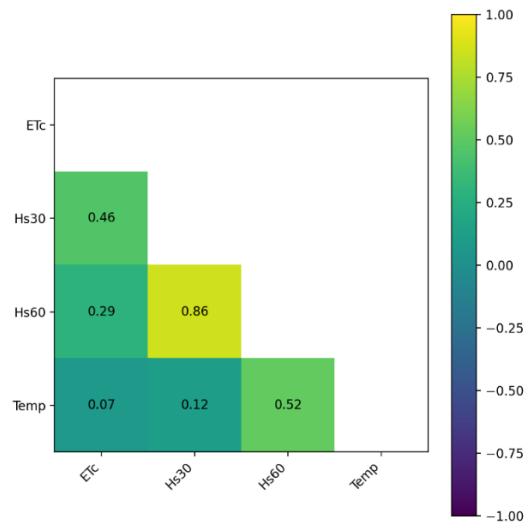
Asimismo. Los resultados indican que la capa de 30 cm respondió rápidamente tanto al consumo hídrico del cultivo como la reposición de agua mediante el riego, debido a la mayor concentración de raíces en la zona superficial. En consecuencia, la humedad del suelo 60 cm presento menores fluctuaciones, evidenciado una dinámica hídrica estable y menor actividad radicular en el perfil profundo del suelo.

Los resultados coinciden con Neira (2024), señala que bajo sistemas de riego por goteo el bulbo húmedo presenta una mayor variabilidad en los primeros centímetros de suelo, debido a la mayor concentración de raíces absorbente y la que está expuesto al ambiente, mientras el perfil profundo presenta menor variabilidad y una mayor estabilidad de humedad.

3.4.1 Matriz de correlación de Pearson

Figura 3.8

Matriz de correlación de Pearson con respecto a los parámetros medidos



La figura 3.8, nos muestra la correlación de Pearson, donde mostro que la humedad del suelo a 30 cm y 60 cm presento una correlación positiva muy fuerte ($r=0.86$). indicando que ambas profundidades presentan un comportamiento similar durante el periodo de evaluación. La ET_c presentó una correlación positiva moderada con la humedad del suelo a 30 cm ($r= 0.46$) y una correlación positiva débil con la humedad del suelo a 60 cm ($r = 0.29$), lo que indica una asociación positiva entre la demanda hídrica del cultivo y la humedad del suelo.

Asimismo, la temperatura promedio presentó una correlación positiva moderada con la humedad del suelo a 60 cm ($r =0.52$) y una correlación débil con la ET_c ($r = 0.007$) y con la humedad del suelo a 30 cm ($r=0.12$). estos resultados sugieren que, durante el periodo analizado, la variación de la temperatura fue reducida porque también es dependiente de otros parámetros de medición, mientras que la humedad del suelo fue la variable que mostro el comportamiento más consistente para el seguimiento de la frecuencia de riego en el cultivo de palto.

CONCLUSIONES

- ✚ Se evaluó la precisión de los sensores conectados a Arduino para el monitoreo de las condiciones hídricas del cultivo, obteniéndose coeficientes de determinación (R^2) de 0.9838 para la temperatura ambiental, 0.9882 para la humedad relativa correspondiente al sensor DHT11 y 0.9418 para el sensor FC- 28 que mide la humedad de suelo.
- ✚ Se determinó la frecuencia de riego mediante la estimación de la evapotranspiración de cultivo (ET_C). Obteniéndose valores comprendidos entre 3.63 mm.día^{-1} a 3.92 mm.día^{-1} , obteniéndose un intervalo de riego entre 6 a 7 días.
- ✚ Se analizó la relación entre las variables registradas por el sistema Arduino y las condiciones hídricas del cultivo, encontrándose una correlación positiva entre humedad suelo a 30 cm y 60 cm ($r=0.86$), entre la evapotranspiración presentó una correlación moderada ($r=0.46$) permitiendo un intervalo de riego de 6 a 7 días por el comportamiento y buena dinámica en el perfil del suelo.

RECOMENDACIONES

- ✚ Se recomienda promover el uso de herramientas más sofisticadas para tener datos más continuos como puertos y módulos de internet, SIM o Wifi, para tener una facilidad el monitoreo de los parámetros requeridos.
- ✚ Se recomienda evaluar en diferentes niveles de profundidad, con el fin de interpretar la dinámica del agua en el perfil del suelo y optimizar el uso de los recursos hídricos.
- ✚ Del mismo modo, se recomienda realizar la verificación y calibración periódica de los sistemas de monitoreo para garantizar la calidad y confiabilidad de los datos para la medición de los parámetros hídricos.
- ✚ Finalmente, se recomienda que futuras investigaciones amplíen el periodo de estudio y consideren diferentes condiciones edafoclimáticas y etapas fenológicas del cultivo de palto, con la finalidad de generar información más integral que permita fortalecer las estrategias de manejo hídrico y mejorar la eficiencia en el uso del agua en sistemas agrícolas similares.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (Estudio FAO Riego y Drenaje N.º 56). FAO. <https://www.fao.org/4/x0490s/x0490s00.htm>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2011). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (Estudio FAO Riego y Drenaje N.º 56). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>
- Aosong Electronics. (2018). DHT11 Humidity & Temperature Sensor Datasheet. <https://www.aosong.com/en/products-21.html>
- Apaza Mamani, D. F., & La Torre Javier, I. J. (2017). *Diseño e implementación de un sistema automatizado para riego tecnificado basado en el balance de humedad de suelo con tecnología Arduino en el laboratorio de control y automatización EPIME 2016*. Universidad Nacional del Altiplano. Recuperado de <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/5970>
- Araya, C., & Barriá, P. (2020). *Disponibilidad de agua en suelos agrícolas y su relación con el manejo del riego*. *Agro Sur*, 48(1), 45–57. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2020.v48n1-06>
- Arduino. (2025). *Arduino Uno microcontroller board: technical overview and features*. In Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Arduino_Uno
- Bower, J. P., Wolstenholme, B. N., & de Villiers, E. A. (2018). *The avocado: Botany, production and uses* (2nd ed.). CABI. <https://doi.org/10.1079/9781780644662.0000>
- Carranza, C., Díaz, M., & Ortega, R. (2020). Water requirements of avocado under different climatic conditions. *Agricultural Water Management*, 240, 106272. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106272>

- Cervantes Rodríguez, W. R., & Moreira Moreira, F. R. (2016). *Diseño e implementación de sistema de riego automatizado y controlado por una placa Arduino para finca “La Lucía”*. <https://redi.cedia.edu.ec/document/148307>
- Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? *Geoscientific Model Development*, 7(3), 1247–1250. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>
- Cuba Ochoa, J. J. (2022). *Diseño e implementación de un sistema de control de riego por aspersión automatizado en el fundo Sejrean de la comunidad Cojela, distrito de Pusi provincia de Huancané, Puno-Perú*. Universidad Nacional del Altiplano. Recuperado de <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/18951>
- Espinoza Mendoza, C. (2015). *Caracterización fenológica del palto (Persea americana Mill.) Hass en Pichiurara a 2594 m.s.n.m – Huanta*. (Tesis de pregrado – Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga). <https://repositorio.unsch.edu.pe/items/1b5d3742-c09a-4ce1-be0c-8b6e3c9100a6>
- FAO. (2011). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (Estudio FAO Riego y Drenaje N.º 56). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>
- Fraden, J. (2016). *Handbook of modern sensors: Physics, designs, and applications* (5th ed.). Springer.
- Galindo-Tovar, M. E., Arzate-Fernández, A. M., Ogata-Aguilar, N., & Landero-Torres, I. (2008). Avocado: A Mexican pride. *Economic Botany*, 62(3), 293–299. <https://doi.org/10.1007/s12231-008-9037-9>
- García, A., & Serrano, M. (2019). *Influencia de la textura del suelo en la retención de agua y productividad agrícola*. *Spanish Journal of Soil Science*, 9(3), 150–162. <https://doi.org/10.3232/SJSS.2019.V9.N3.02>

- Genovez Palomino, H. D. (2023). *Fenología del cultivo palto “Hass” en el norte del Perú* (presentación). <https://es.scribd.com/document/658138658/Fenologia-del-palto-Hass-en-el-norte-del-Peru>
- González, L., & Pérez, A. (2021). *Automatización del riego por goteo con Arduino y sensores de humedad en frutales cítricos*. *Revista Ingeniería Agrícola*, 42(3), 55–62. <https://revistas.uclv.edu.cu/index.php/ingagricola/article/view/2785>
- Gutiérrez, J. A., & Rodríguez, L. A. (2021). *Automatización de riego tecnificado por goteo, con el desarrollo e implementación de un software con tecnología Arduino*. Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac. Recuperado de <https://repositorio.unamba.edu.pe/handle/UNAMBA/1555>
- Hillel, D. (2013). *Introducción a la física del suelo* (2.^a ed.). Editorial Reverté. <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/AE496>
- Huamán Gutiérrez, L. M. (2023). *Diseño de un prototipo de riego automatizado para pequeños huertos agroecológicos utilizando Arduino en zonas desérticas urbanas de Lima*. Universidad Nacional Agraria La Molina. Recuperado de <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/5971>
- Jaimes Tarazona, A. K. (2019). *Relación humedad del suelo, evapotranspiración y parámetros biométricos del crecimiento de dos variedades de camote en condiciones de déficit hídrico* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional UNALM. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/items/f8d40916-fc5a-47b9-9eb9-94f83ced79a2>
- JCGM. (2012). *Vocabulario internacional de metrología: Conceptos fundamentales y generales y términos asociados (VIM)* (3.^a ed.). Joint Committee for Guides in Metrology. https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/VIM_3rd_edition_ES.pdf
- López-Serrano, F., Díaz, M., & Ortega, R. (2019). *Retención de agua y propiedades hidráulicas en suelos mediterráneos usados para frutales*. *Spanish Journal of Soil Science*, 9(3), 175–187. <https://doi.org/10.3232/SJSS.2019.V9.N3.03>
- Mendoza, J., & Rojas, P. (2021). *Clasificación de suelos agrícolas y su aptitud productiva en zonas andinas*. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 15(2), 399–412. <https://doi.org/10.17584/rcch.2021v15i2.12476>

- Meneses Rojas, R. A., & Sulca Castilla, O. F. (2020). *Régimen de riego del cultivo de palto en valle río Pampas Apurímac-Ayacucho 2019*. Investigación, 28(1), 73–81. <https://doi.org/10.51440/unsch.revistainvestigacion.28.1.2020.358>
- Neira Quicaño, W. L. (2024). *Determinación del bulbo de humedecimiento en palto (Persea americana) bajo riego por goteo sometidos a diferentes descargas y textura de suelo, Ayacucho–2023* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. Repositorio Institucional UNSCH. <https://repositorio.unsch.edu.pe/handle/20.500.14612/7231>
- Pérez, L., & Álvarez, D. (2022). *Profundidad efectiva y desarrollo radicular en frutales bajo condiciones de riego tecnificado*. AgriScientia, 39(1), 55–67. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/agris/article/view/36917>
- Ríos Uceda, L. D. (s.f.). *Planeamiento, diseño y evaluación técnico-económica del sistema de riego por goteo en frutales*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio UNALM. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/items/4cda07c3-ce1a-460f-a9d8-ee26c4b63433/full>
- Salazar, A. B. (2022). *Riego por goteo en el rendimiento de papa (Solanum tuberosum) ‘Canaán’ a 2750 msnm, Ayacucho* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. Repositorio institucional UNSCH. <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/594>
- Salazar-García, S., & Lazcano-Ferrat, I. (2019). *Avocado phenology and growth*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-11334-7>
- Sensor de humedad de suelo FC-28. (s. f.). *Descripción técnica y especificaciones del sensor de humedad del suelo FC-28*. Intecx Store. <https://store.intecx.com.pe/product/sensor-de-humedad-de-suelo-fc-28/>
- Silva, R. M., Santos, J. A., & Oliveira, L. F. (2020). *Evaluación del desempeño de sensores resistivos de humedad del suelo para aplicaciones agrícolas*. Revista Nativa, 8(4), 490–498. <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/9152>

- Taylor, J. R. (1997). *An introduction to error analysis: The study of uncertainties in physical measurements* (2nd ed.). University Science Books.
- Tineo Canchari, J. I., et al. (2018). *Manejo integrado del cultivo de palto en valles interandinos del Perú*. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). https://pgc-aulavirtual.inia.gob.pe/pluginfile.php/611/mod_resource/content/1/MODULO-I.pdf
- Torres, L. C., et al. (2021). Impacts of soil type and crop species on permanent wilting of plants. *Geoderma*, 384, 114798. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114798>
- United States Department of Agriculture (USDA). (2022). FoodData Central: Avocados, raw, all commercial varieties. <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/171705/nutrients>
- Universidad Politécnica Salesiana. (2020). *Diseño e implementación de un sistema de monitoreo de humedad del suelo usando sensores resistivos y Arduino* (Tesis). <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/20297/1/UPS%20-%20TTS365.pdf>
- Velásquez Muñoz, O. S. (2021). *Desarrollo de un sensor de humedad de suelo para sistemas de riego automatizados* [Tesis de ingeniería, Universidad Nacional Agraria]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional. <https://repositorio.una.edu.ni/id/eprint/4341>
- Villarroel, G., & Peña, A. (2021). *Propiedades físicas del suelo y su impacto en la disponibilidad hídrica para cultivos bajo riego tecnificado*. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, 21(3), 755–770. <https://revistas.uchile.cl/index.php/RCSN/article/view/65471>
- Whiley, A. W., Schaffer, B., & Wolstenholme, B. N. (2002). The avocado tree physiology. In E. A. de Villiers (Ed.), *The avocado: Botany, production and uses* (pp. 321–350). CABI. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/10.1079/9780851993577.0000>
- Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, 30, 79–82. <https://doi.org/10.3354/cr030079>.

ANEXOS

Anexo 1

Sistema de monitoreo y sensores



Anexo 2

Calibración de sensores



Anexo 3

Datos climáticos y del suelo del sistema Arduino 1 (A-1)

fecha	humedad suelo 1 (30cm) %				humedad suelo 2 (60cm) %				temperatura (C°)							humedad relativa por dia (%)	
	promedio	maximo	minimo	desv. Estand	promedio	maximo	minimo	desv. Estand	promedio	calibrado	maximo	calibrado	minimo	calibrado	desv. Estand	promedio	calibrado
24/06/2025	15.3	17.0	14.0	0.9	12.1	15.0	11.0	1.3	12.4	11.2	36.3	27.5	-0.6	2.4	10.3	37.77	38.47
25/06/2025	33.0	33.0	27.0	1.6	25.6	29.0	11.0	4.8	14.3	12.5	40.1	30.1	-0.8	2.2	12.6	36.29	37.01
26/06/2025	25.5	27.0	24.0	1.2	26.5	27.0	26.0	0.5	14.9	12.9	37.7	28.4	1.2	3.6	11.6	39.88	40.54
27/06/2025	22.4	24.0	21.0	0.9	24.7	26.0	24.0	0.6	14.9	12.9	37.7	28.4	1.2	3.6	11.6	39.88	40.54
28/06/2025	19.0	21.0	18.0	0.8	23.2	24.0	22.0	0.7	14.9	12.9	37.7	28.4	1.2	3.6	11.6	39.88	40.54
29/06/2025	17.4	19.0	16.0	1.0	21.0	22.0	20.0	0.8	14.8	12.8	36.9	27.9	1.2	3.6	11.4	39.90	40.56
30/06/2025	14.7	16.0	14.0	0.8	19.7	20.0	19.0	0.5	14.0	12.3	34.2	26.0	-0.8	2.2	12.0	33.38	34.14
01/07/2025	27.1	29.0	26.0	0.9	26.5	30.0	19.0	3.1	14.9	12.9	32.8	25.1	-1.0	2.1	11.7	31.13	31.93
02/07/2025	25.3	26.0	24.0	0.6	27.4	28.0	27.0	0.5	14.0	12.3	34.2	26.0	-0.8	2.2	12.0	31.10	31.91
03/07/2025	22.8	24.0	22.0	0.8	25.8	27.0	25.0	0.5	14.9	12.9	32.8	25.1	-1.0	2.1	11.7	29.60	30.43
04/07/2025	20.9	22.0	20.0	0.8	24.5	25.0	24.0	0.5	14.0	12.3	34.2	26.0	-0.8	2.2	12.0	28.60	29.45
05/07/2025	18.3	20.0	17.0	0.9	23.1	24.0	22.0	0.6	14.9	12.9	32.8	25.1	-1.0	2.1	11.7	27.94	28.79
									14.4	12.6	35.6	27.0	-0.2	2.7			35.36

Anexo 4

Datos climáticos y del suelo del sistema Arduino 2 (A-2)

fecha	H_Suelo1(%)				H_Suelo2(%)				H_Aire(%)					T_Aire(C)						
	promedio	maximo	minimo	desv.estd	promedio	maximo	minimo	desv.estd	promedio	calibrado	maximo	minimo	desv.estd	promedio	calibrado	maximo	calibrado	minimo	calibrado	desv.estand
09/07/2025	28.35	29	27	0.79	25.73	29	12	4.16	52.71	53.17	98.00	13.00	29.44	12.68	11.40	37.20	28.08	-1.00	2.10	10.72
10/07/2025	25.50	27	24	1.07	26.21	27	25	0.62	51.10	51.59	97.00	15.00	28.29	12.94	11.58	33.30	25.43	-1.00	2.10	10.43
11/07/2025	22.54	25	21	1.18	24.71	26	24	0.77	54.75	55.18	100.00	15.00	30.26	13.75	12.13	31.30	24.07	1.40	3.73	9.70
12/07/2025	19.02	21	18	0.89	23.15	24	22	0.62	60.71	61.05	100.00	17.00	29.76	13.85	12.20	31.30	24.07	2.10	4.20	9.36
13/07/2025	17.40	19	16	0.98	21.21	22	20	0.80	56.08	56.49	97.00	16.00	28.19	12.99	11.61	34.80	26.45	0.60	3.18	10.39
14/07/2025	14.94	16	14	0.70	19.56	20	19	0.50	54.41	54.85	98.00	15.00	29.65	13.34	11.85	33.30	25.43	0.70	3.25	10.35
15/07/2025	27.08	29	26	0.94	23.98	29	19	3.12	47.90	48.43	88.00	16.00	24.82	12.93	11.57	31.30	24.07	0.30	2.98	10.57
16/07/2025	25.18	26	24	0.84	27.64	29	27	0.57	45.36	45.94	91.00	15.00	26.15	13.27	11.80	31.30	24.07	-1.00	2.10	10.58

Anexo 5

Cálculo de la evapotranspiración con datos del Arduino 1 (A-1)

FÓRMULA FINAL DE ETo (Penman–Monteith)

PRESION DE VAPOR DE SATURACIÓN (es)

e_s (Tmax)	0.7271807
e_s (Tmin)	0.73978703
e_s (promedio)	0.73348386

PRESION REAL DE VAPOR (ea)

0.2593516

DEFICITIT DE PRESION DE VAPOR (es - ea)

0.474132264

PENDIENTE DE LA CURVA DE PRESION DE VAPOR (Δ)

0.095643853

CONSTANTE PSICOMETRICA (γ)

0.067

a 2600 m.s.n.m

RADIACION NETA (Rn)

16.74399086

FLUJO DE CALOR DEL SUELO (G)

0

ET_o FINAL

4.02928728

K_c

0.9

ET_c

3.63

$$ET_o = \frac{0,408 \times \Delta \times (Rn - G) + \gamma \times \frac{900}{(T + 273)} \times U_2 \times (es - ea)}{\Delta + \gamma \times (1 + 0,34 \times U_2)}$$

Anexo 6

Cálculo de la evapotranspiración con datos del Arduino 2 (A-2)

FÓRMULA FINAL DE ETo (Penman–Monteith)

PRESION DE VAPOR DE SATURACIÓN (es)

$e_s(T_{max})$	0.74216588
$e_s(T_{min})$	0.75530041
$e_s(\text{promedio})$	0.74873314

PRESION REAL DE VAPOR (ea)

0.39936243

DEFICIT DE PRESION DE VAPOR (es - ea)

0.34937071

PENDIENTE DE LA CURVA DE PRESION DE VAPOR (Δ)

0.09124367

CONSTANTE PSICOMETRICA (γ)

0.067

a 2600
m.s.n.m

RADIACION NETA (Rn)

16.7439909

FLUJO DE CALOR DEL SUELO (G)

0

ET_o FINAL

3.91660531

K_c

0.9

ET_c

3.52

$$ET_o = \frac{0,408 \times \Delta \times (Rn - G) + \gamma \times \frac{900}{(T + 273)} \times U_2 \times (es - ea)}{\Delta + \gamma \times (1 + 0,34 \times U_2)}$$

Anexo 7

Determinación del umbral hídrico y frecuencia de riego

DETERMINACIÓN DE FRECUENCIA DE RIEGO EN A - 1					
CC	28.18				
PMP	12.62				
CALCULO DE HUMEDAD APROVECHABLE					
HA=	28.18	-	12.62		
HA=	15.56				
FRACCION DE AGOTAMIENTO PERMISIBLE (P)					
P=	0.5				
HA utilizable=	0.5	x	15.56		
HA utilizable=	7.78				
PROFUNDIDAD EFECTIVA					
Z=	0.3 m (30 cm)				
conversion:					
HA (mm) =	7.78	x	0.3	x	10
HA (mm) =	23.34				
FRECUENCIA DE RIEGO					
Frecuencia=	23.34				
	3.63				
frecuencia=	6.43620858				
	6 días				

DETERMINACIÓN DE FRECUENCIA DE RIEGO EN A - 2					
CC	28.18				
PMP	12.62				
CALCULO DE HUMEDAD APROVECHABLE					
HA=	28.18	-	12.62		
HA=	15.56				
FRACCION DE AGOTAMIENTO PERMISIBLE (P)					
P=	0.5				
HA utilizable=	0.5	x	15.56		
HA utilizable=	7.78				
PROFUNDIDAD EFECTIVA					
Z=	0.3 m (30 cm)				
conversion:					
HA (mm) =	7.78	x	0.3	x	10
HA (mm) =	23.34				
FRECUENCIA DE RIEGO					
Frecuencia=	23.34				
	3.52				
frecuencia=	6.62138031				
	7 días				

Anexo 8

Resultados del análisis de suelo



Instituto Nacional de Innovación Agraria

**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE - 200**



INACAL
DA - Perú
Laboratorio de Ensayo
Acreditado
Registro N° LE - 200

INFORME DE ENSAYO
LABSAF CANAAN
N° 061927-25 / SU / CA



I. INFORMACIÓN GENERAL

Cliente	: Erick Huaccachi Alfaro
Propietario / Productor	: Erick Huaccachi Alfaro
Dirección del cliente	: Huanta - Ayacucho
Solicitado por	: Erick Huaccachi Alfaro
Muestreado por	: Erick Huaccachi Alfaro
Referencia del muestreo	: Reservado por el Cliente
Procedencia de muestra(s) (***)	: Huanchacc-Huanta-Ayacucho
Fecha(s) de muestreo (***)	: 2025-05-14
Fecha de recepción de muestra(s)	: 2025-05-15
Lugar de ensayo	: LABSAF CANAAN
Fecha(s) de análisis	: Del 2025-05-23 al 2025-06-04
Cotización del servicio	: 057-25-CA
Fecha de emisión	: 2025-06-04

II. RESULTADO DE ANALISIS

			1	2	3	4	5	6
Código de Laboratorio			SU324-CA-25	-	-	-	-	-
Matriz Analizada			Suelo	-	-	-	-	-
Fecha de Muestreo (***)			14/05/2025	-	-	-	-	-
Hora de Inicio de Muestreo (h) (***)			10:00	-	-	-	-	-
Código/Identificación de la Muestra por el Cliente (***)			-	-	-	-	-	-
Ensayo	Unidad	LC	Resultados					
pH	unid. pH	0,1	8,1	-	-	-	-	-
Conductividad Eléctrica	mS/m	1,0	24	-	-	-	-	-
Materia Orgánica	%	0,2	3,7	-	-	-	-	-
Textura	-	-	-	-	-	-	-	-
Arena	%	-	36,48	-	-	-	-	-
Arcilla	%	-	30,45	-	-	-	-	-
Limo	%	-	33,07	-	-	-	-	-
Clase Textural	-	-	Franco	-	-	-	-	-
Parámetros Hídricos	-	-	-	-	-	-	-	-
Densidad Aparente	g/cm3	-	1.21	-	-	-	-	-
Humedad CC	%	-	28.18	-	-	-	-	-
Humedad PM	%	-	12.62	-	-	-	-	-

Anexo 9

Selección de plantas de palto para la medición.

		
<i>Planta 1</i>	<i>Planta 2</i>	<i>Planta 3</i>
		
<i>Plantones palto (etapa 8 del desarrollo floral o la etapa de coliflor)</i>		

Anexo 10

Datos medidos diarios en intervalo de 30 minutos en el Arduino 1 (A-1)

H_Suelo1(%)	H_Suelo2(%)	H_Aire(%)	T_Aire(C)	24/06/2025
17	15	11	21.5	13:30
17	15	11	20.3	14:00
17	15	12	20.3	14:30
17	15	14	21.2	15:00
15	14	17	24.8	15:30
15	14	17	23.2	16:00
15	13	17	23.8	16:30
15	13	17	23.8	17:00
15	13	17	21.9	17:30
15	13	18	16.1	18:00
15	13	19	14.5	18:30
15	13	31	11.7	19:00
16	13	29	10.9	19:30
16	13	28	11.3	20:00
16	13	21	12.6	20:30
16	13	22	10.5	21:00
16	13	26	9.2	21:30
16	12	43	6.7	22:00
16	12	36	8.1	22:30
16	12	47	5.3	23:00
16	12	43	5.5	23:30
16	12	46	5	00:00
16	12	50	4.1	00:30
16	12	53	3.4	01:00
16	12	53	3.4	01:30
15	12	49	4.4	02:00
15	12	65	2.1	02:30
15	11	64	2.4	03:00
15	11	67	1.7	03:30
15	11	71	1.2	04:00
15	11	73	1	04:30
15	11	77	0.5	05:00
15	11	78	0.3	05:30
15	11	78	-0.6	06:00
15	11	80	-0.6	06:30
15	11	83	-0.6	07:00
15	11	84	0	07:30
15	11	60	4.6	08:00
15	11	37	9.6	08:30
14	11	21	14	09:00
14	11	18	17	09:30

14	11	17	21	10:00
14	11	17	23.4	10:30
14	11	17	25.8	11:00
14	11	16	28.9	11:30
14	11	17	26.7	12:00
14	11	13	35.6	12:30
14	11	13	36.3	13:00
H_Suelo1(%)	H_Suelo2(%)	H_Aire(%)	T_Aire(C)	25/06/2025 aplicó riego
33	11	11	40.1	13:30
33	11	13	37.4	14:00
32	12	12	39.9	14:30
32	14	14	33.8	15:00
32	20	17	25.3	15:30
32	20	17	23.8	16:00
32	20	17	24.1	16:30
32	20	17	22.6	17:00
30	25	17	21.8	17:30
30	25	17	22.6	18:00
30	25	18	17.4	18:30
30	25	30	12.2	19:00
30	25	31	11.1	19:30
30	26	19	15.2	20:00
30	26	21	11.1	20:30
30	28	24	10.2	21:00
30	28	28	9.3	21:30
30	28	31	8.9	22:00
30	28	37	6.8	22:30
29	28	37	6.5	23:00
29	28	46	4.8	23:30
29	28	51	4.3	00:00
29	29	52	3.7	00:30
29	29	48	4.1	01:00
29	29	47	4.4	01:30
29	29	53	3.2	02:00
29	29	62	1.9	02:30
29	29	62	2.1	03:00
29	28	58	2.6	03:30
28	28	59	1.8	04:00
28	28	72	0.6	04:30
28	28	74	0.2	05:00
28	28	76	-0.8	05:30
28	28	79	-0.6	06:00
28	28	82	-0.1	06:30
28	28	79	-0.8	07:00
28	28	78	0.4	07:30
28	28	53	5	08:00

28	28	34	10.4	08:30
28	28	21	14.1	09:00
28	28	18	18.9	09:30
28	28	17	22.2	10:00
28	28	17	24.8	10:30
28	27	17	25.3	11:00
28	27	17	27.1	11:30
28	27	15	32.8	12:00
27	27	14	34.2	12:30
27	27	13	37.7	13:00
H_Suelo1(%)	H_Suelo2(%)	H_Aire(%)	T_Aire(C)	26/06/2025
27	27	14	34.7	13:30
27	27	13	36.9	14:00
27	27	14	34.2	14:30
27	27	15	32.8	15:00
27	27	17	24.5	15:30
27	27	17	24.5	16:00
27	27	17	23.8	16:30
27	27	17	24.1	17:00
27	27	17	23.8	17:30
27	27	18	20.2	18:00
27	27	27	14.5	18:30
27	27	18	19	19:00
27	27	18	17.8	19:30
27	27	20	15.7	20:00
27	27	20	13.3	20:30
26	27	29	12.2	21:00
26	27	38	9.6	21:30
26	27	41	8.9	22:00
26	27	41	8.1	22:30
26	27	50	6.4	23:00
26	27	52	5.8	23:30
26	27	50	5.7	00:00
26	27	61	4.5	00:30
25	26	59	4.8	01:00
25	26	59	4.5	01:30
25	26	63	3.9	02:00
25	26	68	3.3	02:30
25	26	61	4.5	03:00
25	26	72	2.4	03:30
25	26	77	2.3	04:00
25	26	77	2.4	04:30
25	26	77	2.1	05:00
25	26	85	1.7	05:30
25	26	83	2.1	06:00
25	26	85	1.2	06:30

25	26	89	1.3	07:00
24	26	84	2.1	07:30
24	26	58	6.4	08:00
24	26	36	11.3	08:30
24	26	24	14.8	09:00
24	26	20	17.6	09:30
24	26	19	23.5	10:00
24	26	18	24.5	10:30
24	26	17	25.8	11:00
24	26	17	27.1	11:30
24	26	15	32.8	12:00
24	26	14	34.2	12:30
24	26	13	37.7	13:00
H_Suelo1(%)	H_Suelo2(%)	H_Aire(%)	T_Aire(C)	27/06/2025
24	26	14	34.7	13:30
24	26	13	36.9	14:00
24	26	14	34.2	14:30
24	26	15	32.8	15:00
24	25	17	24.5	15:30
23	25	17	24.5	16:00
23	25	17	23.8	16:30
23	25	17	24.1	17:00
23	25	17	23.8	17:30
23	25	18	20.2	18:00
23	25	27	14.5	18:30
23	25	18	19	19:00
23	25	18	17.8	19:30
23	25	20	15.7	20:00
23	25	20	13.3	20:30
23	25	29	12.2	21:00
23	25	38	9.6	21:30
23	25	41	8.9	22:00
23	25	41	8.1	22:30
23	25	50	6.4	23:00
23	25	52	5.8	23:30
23	25	50	5.7	00:00
23	25	61	4.5	00:30
22	25	59	4.8	01:00
22	25	59	4.5	01:30
22	25	63	3.9	02:00
22	25	68	3.3	02:30
22	25	61	4.5	03:00
22	25	72	2.4	03:30
22	25	77	2.3	04:00
22	24	77	2.4	04:30
22	24	77	2.1	05:00

22	24	85	1.7	05:30
22	24	83	2.1	06:00
22	24	85	1.2	06:30
22	24	89	1.3	07:00
22	24	84	2.1	07:30
22	24	58	6.4	08:00
21	24	36	11.3	08:30
21	24	24	14.8	09:00
21	24	20	17.6	09:30
21	24	19	23.5	10:00
21	24	18	24.5	10:30
21	24	17	25.8	11:00
21	24	17	27.1	11:30
21	24	15	32.8	12:00
21	24	14	34.2	12:30
21	24	13	37.7	13:00
H_Suelo1(%)	H_Suelo2(%)	H_Aire(%)	T_Aire(C)	28/06/2025
21	24	14	34.7	13:30
20	24	13	36.9	14:00
20	24	14	34.2	14:30
20	24	15	32.8	15:00
20	24	17	24.5	15:30
20	24	17	24.5	16:00
20	24	17	23.8	16:30
20	24	17	24.1	17:00
20	24	17	23.8	17:30
20	24	18	20.2	18:00
20	24	27	14.5	18:30
20	24	18	19	19:00
20	24	18	17.8	19:30
20	24	20	15.7	20:00
20	24	20	13.3	20:30
19	24	29	12.2	21:00
19	24	38	9.6	21:30
19	23	41	8.9	22:00
19	23	41	8.1	22:30
19	23	50	6.4	23:00
19	23	52	5.8	23:30
19	23	50	5.7	00:00
19	23	61	4.5	00:30
19	23	59	4.8	01:00
19	23	59	4.5	01:30
19	23	63	3.9	02:00
19	23	68	3.3	02:30
19	23	61	4.5	03:00
18	23	72	2.4	03:30

18	23	77	2.3	04:00
18	23	77	2.4	04:30
18	23	77	2.1	05:00
18	23	85	1.7	05:30
18	23	83	2.1	06:00
18	23	85	1.2	06:30
18	23	89	1.3	07:00
18	23	84	2.1	07:30
18	23	58	6.4	08:00
18	23	36	11.3	08:30
18	22	24	14.8	09:00
18	22	20	17.6	09:30
18	22	19	23.5	10:00
18	22	18	24.5	10:30
19	22	17	25.8	11:00
19	22	17	27.1	11:30
19	22	15	32.8	12:00
19	22	14	34.2	12:30
19	22	13	37.7	13:00
H_Suelo1(%)	H_Suelo2(%)	H_Aire(%)	T_Aire(C)	29/06/2025
19	22	14	34.7	13:30
19	22	13	36.9	14:00
19	22	14	34.2	14:30
19	22	15	32.8	15:00
19	22	17	24.5	15:30
19	22	17	24.5	16:00
19	22	17	23.8	16:30
19	22	17	24.1	17:00
19	22	17	23.8	17:30
18	22	18	20.2	18:00
18	22	27	14.5	18:30
18	22	18	19	19:00
18	22	18	17.8	19:30
18	22	20	15.7	20:00
18	22	20	13.3	20:30
18	22	29	12.2	21:00
18	21	38	9.6	21:30
18	21	41	8.9	22:00
18	21	41	8.1	22:30
18	21	50	6.4	23:00
18	21	52	5.8	23:30
18	21	50	5.7	00:00
17	21	61	4.5	00:30
17	21	59	4.8	01:00
17	21	59	4.5	01:30
17	21	63	3.9	02:00

17	21	68	3.3	02:30
17	21	61	4.5	03:00
17	21	72	2.4	03:30
17	21	77	2.3	04:00
17	21	77	2.4	04:30
17	20	77	2.1	05:00
17	20	85	1.7	05:30
17	20	83	2.1	06:00
17	20	85	1.2	06:30
17	20	89	1.3	07:00
17	20	84	2.1	07:30
17	20	58	6.4	08:00
16	20	36	11.3	08:30
16	20	24	14.8	09:00
16	20	20	17.6	09:30
16	20	19	23.5	10:00
16	20	18	24.5	10:30
16	20	17	25.8	11:00
16	20	16	28	11:30
16	20	15	31.3	12:00
16	20	14	34.3	12:30
16	20	15	32.3	13:00
H_Suelo1(%)	H_Suelo2(%)	H_Aire(%)	T_Aire(C)	30/06/2025
16	20	15	32.3	13:30
16	20	14	34	14:00
16	20	15	32.3	14:30
16	20	15	30.2	15:00
16	20	17	24.5	15:30
16	20	17	24.5	16:00
16	20	17	24.1	16:30
16	20	17	22.2	17:00
16	20	19	19	17:30
16	20	18	20.6	18:00
15	20	20	15.2	18:30
15	20	29	11.5	19:00
15	20	28	10.5	19:30
15	20	28	9.5	20:00
15	20	34	8.1	20:30
15	20	35	7.3	21:00
15	20	35	6.4	21:30
15	20	35	6.3	22:00
15	20	38	5.3	22:30
15	20	42	4.4	23:00
15	20	41	4.6	23:30
15	20	44	3.7	00:00
15	20	42	4.2	00:30

14	20	46	3.2	01:00	
14	20	49	2.8	01:30	
14	20	49	2.9	02:00	
14	20	53	1.6	02:30	
14	20	55	2.6	03:00	
14	20	57	1.2	03:30	
14	20	56	1.2	04:00	
14	20	61	1.2	04:30	
14	20	59	1.7	05:00	
14	20	67	0.2	05:30	
14	19	65	0.2	06:00	
14	19	64	-0.8	06:30	
14	19	68	0.5	07:00	
14	19	53	3.8	07:30	
14	19	24	12.2	08:00	
14	19	18	19.8	08:30	
14	19	17	24.5	09:00	
14	19	17	25.3	09:30	
14	19	17	25.4	10:00	
14	19	17	25.8	10:30	
14	19	15	31.3	11:00	
14	19	15	30.8	11:30	
14	19	16	29.3	12:00	
14	19	14	34.2	12:30	
14	19	15	31.8	13:00	
H_Suelo1(%)	H_Suelo2(%)	H_Aire(%)	T_Aire(C)	01/07/2025	aplico riego y cambio de sensores de humedad
29	19	15	32.6	13:30	
29	19	15	32.8	14:00	
29	19	15	32.3	14:30	
28	20	15	31	15:00	
28	22	17	24.5	15:30	
28	22	17	26.7	16:00	
28	22	17	26.2	16:30	
28	23	17	24.8	17:00	
28	23	17	23.4	17:30	
28	23	18	17.8	18:00	
28	24	18	17.8	18:30	
28	24	18	17.5	19:00	
28	25	18	16.3	19:30	
28	25	23	11.2	20:00	
28	26	19	14.9	20:30	
28	26	19	12.2	21:00	
28	28	21	10.3	21:30	
27	28	21	10.5	22:00	
27	29	22	9.6	22:30	

27	29	37	6.5	23:00
27	29	43	5	23:30
27	29	42	4.4	00:00
27	29	46	3.8	00:30
27	29	43	4.2	01:00
27	29	43	3.6	01:30
27	29	44	3.4	02:00
27	29	57	1.7	02:30
27	30	45	3.4	03:00
27	29	47	2.6	03:30
27	30	58	1.2	04:00
27	28	64	0.7	04:30
27	28	67	0	05:00
26	28	64	0	05:30
26	28	67	0.2	06:00
26	28	69	-0.5	06:30
26	28	73	-1	07:00
26	28	53	3.4	07:30
26	28	24	11.3	08:00
26	28	18	20.3	08:30
26	28	18	22.3	09:00
26	28	18	23.5	09:30
26	28	17	24.5	10:00
26	28	17	26.8	10:30
26	28	17	28.3	11:00
26	28	16	29.4	11:30
26	28	15	30.9	12:00
26	28	15	31.6	12:30
26	28	15	32.7	13:00
H_Suelo1(%)	H_Suelo2(%)	H_Aire(%)	T_Aire(C)	02/07/2025
26	28	15	32.3	13:30
26	28	14	34	14:00
26	28	15	32.3	14:30
26	28	15	30.2	15:00
26	28	17	24.5	15:30
26	28	17	24.5	16:00
26	28	16	24.1	16:30
26	28	16	22.2	17:00
26	28	17	19	17:30
26	28	17	20.6	18:00
26	28	18	15.2	18:30
26	28	18	11.5	19:00
26	28	18	10.5	19:30
26	28	20	9.5	20:00
26	28	19	8.1	20:30
26	28	23	7.3	21:00

26	28	21	6.4	21:30
26	27	21	6.3	22:00
26	27	22	5.3	22:30
26	27	37	4.4	23:00
25	27	43	4.6	23:30
25	27	42	3.7	00:00
25	27	46	4.2	00:30
25	27	43	3.2	01:00
25	27	43	2.8	01:30
25	27	44	2.9	02:00
25	27	57	1.6	02:30
25	27	45	2.6	03:00
25	27	47	1.2	03:30
25	27	58	1.2	04:00
25	27	62	1.2	04:30
25	27	67	1.7	05:00
25	27	65	0.2	05:30
25	27	67	0.2	06:00
25	27	69	-0.8	06:30
25	27	73	0.5	07:00
25	27	53	3.8	07:30
25	27	24	12.2	08:00
25	27	19	19.8	08:30
25	27	19	24.5	09:00
25	27	18	25.3	09:30
25	27	18	25.4	10:00
25	27	17	25.8	10:30
25	27	17	31.3	11:00
24	27	16	30.8	11:30
24	27	15	29.3	12:00
24	27	15	34.2	12:30
24	27	15	31.8	13:00
H_Suelo1(%)	H_Suelo2(%)	H_Aire(%)	T_Aire(C)	03/07/2025
24	27	14	32.6	13:30
24	27	15	32.8	14:00
24	26	15	32.3	14:30
24	26	15	31	15:00
24	26	16	24.5	15:30
24	26	17	26.7	16:00
24	26	17	26.2	16:30
24	26	16	24.8	17:00
24	26	17	23.4	17:30
24	26	17	17.8	18:00
23	26	17	17.8	18:30
23	26	18	17.5	19:00
23	26	18	16.3	19:30

23	26	18	11.2	20:00
23	26	20	14.9	20:30
23	26	23	12.2	21:00
23	26	21	10.3	21:30
23	26	22	10.5	22:00
23	26	22	9.6	22:30
23	26	35	6.5	23:00
23	26	37	5	23:30
23	26	40	4.4	00:00
23	26	42	3.8	00:30
23	26	43	4.2	01:00
23	26	43	3.6	01:30
23	26	44	3.4	02:00
23	26	45	1.7	02:30
22	26	46	3.4	03:00
22	26	46	2.6	03:30
22	26	44	1.2	04:00
22	26	50	0.7	04:30
22	26	55	0	05:00
22	26	58	0	05:30
22	26	67	0.2	06:00
22	26	69	-0.5	06:30
22	26	73	-1	07:00
22	25	53	3.4	07:30
22	25	24	11.3	08:00
22	25	19	20.3	08:30
22	25	19	22.3	09:00
22	25	18	23.5	09:30
22	25	18	24.5	10:00
22	25	17	26.8	10:30
22	25	17	28.3	11:00
22	25	16	29.4	11:30
22	25	15	30.9	12:00
22	25	15	31.6	12:30
22	25	15	32.7	13:00
H_Suelo1(%)	H_Suelo2(%)	H_Aire(%)	T_Aire(C)	04/07/2025
22	25	14	32.3	13:30
22	25	15	34	14:00
22	25	15	32.3	14:30
22	25	16	30.2	15:00
22	25	16	24.5	15:30
22	25	17	24.5	16:00
22	25	17	24.1	16:30
22	25	16	22.2	17:00
22	25	17	19	17:30
22	25	17	20.6	18:00

22	25	17	15.2	18:30
21	25	17	11.5	19:00
21	25	18	10.5	19:30
21	25	18	9.5	20:00
21	25	21	8.1	20:30
21	25	20	7.3	21:00
21	25	21	6.4	21:30
21	25	22	6.3	22:00
21	25	22	5.3	22:30
21	25	35	4.4	23:00
21	25	37	4.6	23:30
21	25	40	3.7	00:00
21	25	42	4.2	00:30
21	25	43	3.2	01:00
21	25	43	2.8	01:30
21	25	44	2.9	02:00
21	24	44	1.6	02:30
21	24	45	2.6	03:00
21	24	46	1.2	03:30
21	24	46	1.2	04:00
21	24	50	1.2	04:30
20	24	51	1.7	05:00
20	24	51	0.2	05:30
20	24	52	0.2	06:00
20	24	55	-0.8	06:30
20	24	67	0.5	07:00
20	24	53	3.8	07:30
20	24	24	12.2	08:00
20	24	19	19.8	08:30
20	24	19	24.5	09:00
20	24	18	25.3	09:30
20	24	18	25.4	10:00
20	24	17	25.8	10:30
20	24	17	31.3	11:00
20	24	16	30.8	11:30
20	24	15	29.3	12:00
20	24	15	34.2	12:30
20	24	15	31.8	13:00
H_Suelo1(%)	H_Suelo2(%)	H_Aire(%)	T_Aire(C)	05/07/2025
20	24	14	32.6	13:30
20	24	4	32.8	14:00
20	24	15	32.3	14:30
19	24	15	31	15:00
19	24	15	24.5	15:30
19	24	16	26.7	16:00
19	24	16	26.2	16:30

19	24	17	24.8	17:00
19	24	16	23.4	17:30
19	24	17	17.8	18:00
19	24	17	17.8	18:30
19	24	18	17.5	19:00
19	23	18	16.3	19:30
19	23	20	11.2	20:00
19	23	21	14.9	20:30
19	23	20	12.2	21:00
19	23	21	10.3	21:30
19	23	22	10.5	22:00
19	23	22	9.6	22:30
19	23	35	6.5	23:00
19	23	37	5	23:30
19	23	38	4.4	00:00
18	23	40	3.8	00:30
18	23	42	4.2	01:00
18	23	42	3.6	01:30
18	23	43	3.4	02:00
18	23	44	1.7	02:30
18	23	44	3.4	03:00
18	23	45	2.6	03:30
18	23	46	1.2	04:00
18	23	46	0.7	04:30
18	23	48	0	05:00
18	23	48	0	05:30
18	23	50	0.2	06:00
18	23	55	-0.5	06:30
18	23	67	-1	07:00
17	23	53	3.4	07:30
17	23	24	11.3	08:00
17	23	19	20.3	08:30
17	23	19	22.3	09:00
17	23	18	23.5	09:30
17	22	18	24.5	10:00
17	22	17	26.8	10:30
17	22	17	28.3	11:00
17	22	16	29.4	11:30
17	22	16	30.9	12:00
17	22	15	31.6	12:30
17	22	15	32.7	13:00

Anexo 11

Datos medidos diarios en intervalo de 30 minutos en el Arduino 2 (A-2)

H_Suelo1(%)	H_Suelo2(%)	H_Aire(%)	T_Aire(C)	09/07/2025	aplicación de riego
29	12	13	37.2	13:45	
29	12	15	33.3	14:15	
29	13	17	27.6	14:45	
29	20	16	28.5	15:15	
29	20	16	28.5	15:45	
29	20	16	29	16:15	
29	24	18	26.7	16:45	
29	24	18	25.3	17:15	
29	24	26	22.2	17:45	
29	24	34	17.4	18:15	
29	25	39	15	18:45	
29	25	49	12.6	19:15	
29	25	47	12.2	19:45	
29	25	51	11.4	20:15	
29	26	42	12.7	20:45	
29	26	45	10.9	21:15	
29	26	46	9.8	21:45	
29	26	61	7.3	22:15	
29	29	53	8.6	22:45	
29	29	67	5.9	23:15	
29	29	64	5.6	23:45	
29	29	71	4.4	00:15	
29	29	75	3.9	00:45	
29	29	77	3.5	01:15	
29	29	78	3.2	01:45	
29	28	77	3.9	02:15	
28	28	85	2.3	02:45	
28	28	88	1.8	03:15	
28	28	89	1.7	03:45	
28	28	92	1.3	04:15	
28	28	93	1.1	04:45	
28	28	94	0.9	05:15	
28	28	96	0.3	05:45	
28	28	95	-1	06:15	
28	28	97	-1	06:45	
28	28	98	-0.9	07:15	
28	28	98	0.3	07:45	
28	28	80	5	08:15	
28	28	51	9.7	08:45	
27	27	41	12.7	09:15	
27	27	39	14.1	09:45	
27	27	31	16.5	10:15	

27	27	26	19	10:45
27	27	21	24.8	11:15
27	27	23	21.4	11:45
27	27	19	23	12:15
27	27	21	23.4	12:45
27	27	22	25.8	13:15
H_Suelo1(%)	H_Suelo2(%)	H_Aire(%)	T_Aire(C)	10/07/2025
27	27	19	26.2	13:45
27	27	15	33.3	14:15
27	27	17	28.5	14:45
27	27	17	27.9	15:15
27	27	17	27.6	15:45
27	27	17	28.5	16:15
27	27	18	27.6	16:45
27	27	22	24.1	17:15
27	27	33	22.6	17:45
27	27	20	22.8	18:15
27	27	33	18.7	18:45
26	27	45	14.1	19:15
26	27	48	11.7	19:45
26	27	31	17	20:15
26	27	45	11.5	20:45
26	26	44	11.3	21:15
26	26	45	10.6	21:45
26	26	50	9.7	22:15
26	26	53	7.8	22:45
26	26	56	7	23:15
26	26	66	5.2	23:45
26	26	70	4.7	00:15
26	26	73	3.9	00:45
25	26	71	3.6	01:15
25	26	75	3.5	01:45
25	26	77	3.2	02:15
25	26	83	2.2	02:45
25	26	85	1.7	03:15
25	26	84	1.8	03:45
25	26	85	1.8	04:15
25	26	90	0.9	04:45
25	26	93	0.6	05:15
25	26	94	0.4	05:45
25	26	95	-1	06:15
25	26	97	-0.9	06:45
25	26	97	-0.8	07:15
25	26	96	0.4	07:45
25	26	76	5.4	08:15
24	26	52	10	08:45

24	26	42	13.3	09:15
24	26	38	14.1	09:45
24	26	32	19.4	10:15
24	26	28	19.4	10:45
24	25	19	27.6	11:15
24	25	25	21.8	11:45
24	25	22	23.1	12:15
24	25	24	23	12:45
24	25	19	24.1	13:15
H_Suelo1(%)	H_Suelo2(%)	H_Aire(%)	T_Aire(C)	11/07/2025
25	26	18	25.3	13:45
24	26	15	31.3	14:15
24	26	17	28.3	14:45
24	26	17	28.5	15:15
24	26	16	28.5	15:45
24	26	18	27.1	16:15
24	26	18	25.8	16:45
24	26	18	24.8	17:15
24	26	19	23.8	17:45
24	25	23	22.2	18:15
24	25	43	16.6	18:45
24	25	34	19.4	19:15
23	25	31	19.1	19:45
23	25	32	17.4	20:15
23	25	38	15.2	20:45
23	25	52	11.4	21:15
23	25	56	10.1	21:45
23	25	62	8.5	22:15
23	25	60	8.5	22:45
23	25	69	7	23:15
23	25	72	6.2	23:45
23	25	72	6	00:15
23	25	81	4.8	00:45
23	25	83	4.7	01:15
23	25	86	4.2	01:45
23	24	85	4.3	02:15
22	24	89	3.6	02:45
22	24	89	3.9	03:15
22	24	90	3.2	03:45
22	24	95	3	04:15
22	24	96	2.7	04:45
22	24	97	2.4	05:15
22	24	98	2.1	05:45
22	24	98	1.8	06:15
22	24	98	1.5	06:45
21	24	100	1.4	07:15

21	24	97	2.2	07:45
21	24	84	6	08:15
21	24	57	10.6	08:45
21	24	45	13.9	09:15
21	24	42	14.8	09:45
21	24	35	17.3	10:15
21	24	33	19.8	10:45
21	24	30	23.8	11:15
21	24	32	23.8	11:45
21	24	31	23.4	12:15
21	24	32	24.5	12:45
21	24	25	25.3	13:15
H_Suelo1(%)	H_Suelo2(%)	H_Aire(%)	T_Aire(C)	12/07/2025
21	24	26	26.2	20:34
21	24	17	31.3	14:15
20	24	27	27.1	07:56
20	24	21	27.6	01:37
20	24	18	28.1	19:18
20	24	22	28	12:59
20	24	23	25.8	06:40
20	24	28	24.5	00:21
20	24	26	24.1	18:02
20	24	30	22.2	11:43
20	24	55	17.7	05:24
20	24	61	14.3	23:05
20	24	53	14.8	16:46
20	23	50	14.8	10:27
20	23	57	12.5	04:08
19	23	62	10.5	21:49
19	23	71	9.3	15:30
19	23	74	8.9	09:11
19	23	76	7.9	02:52
19	23	74	7.8	20:33
19	23	84	6.6	14:14
19	23	79	6.7	07:55
19	23	81	6.2	01:36
19	23	80	6.4	19:17
18	23	92	5	12:58
18	23	93	4.6	06:39
18	23	97	4.2	00:20
18	23	95	4.2	18:01
18	23	97	3.9	11:42
18	23	99	3.4	05:23
18	23	99	3	23:04
18	23	100	3	16:45
18	23	100	2.6	10:26

18	23	100	2.6	04:07
18	23	100	2.6	21:48
18	23	100	2.1	15:29
18	23	100	3	09:10
18	23	84	7.7	02:51
18	23	55	12.3	20:32
18	23	47	14.8	14:13
19	23	40	16.1	07:54
19	23	35	19.8	01:35
19	22	35	20.6	19:16
19	22	35	20.6	12:57
19	22	31	24.2	06:38
19	22	32	23.4	00:19
19	22	29	25.3	18:00
19	22	24	26.7	11:41
H_Suelo1(%)	H_Suelo2(%)	H_Aire(%)	T_Aire(C)	13/07/2025
19	22	27	26.7	13:45
19	22	16	34.8	14:15
19	22	20	29.3	14:45
19	22	18	28.9	15:15
19	22	18	29.8	15:45
19	22	18	28.5	16:15
19	22	19	27.1	16:45
18	22	24	24.8	17:15
18	22	33	23	17:45
18	22	45	18.6	18:15
18	22	49	15.7	18:45
18	22	40	15.6	19:15
18	22	47	12.2	19:45
18	22	49	11.3	20:15
18	22	54	9.7	20:45
18	22	58	8.9	21:15
18	22	63	7.7	21:45
18	22	64	7.3	22:15
18	22	66	6.8	22:45
18	22	72	6	23:15
18	22	74	5.5	23:45
18	21	80	4.9	00:15
17	21	81	4.2	00:45
17	21	82	3.8	01:15
17	21	86	3.4	01:45
17	21	87	3	02:15
17	21	86	2.7	02:45
17	21	89	2.5	03:15
17	21	86	2.5	03:45
17	21	92	2.1	04:15

17	21	93	1.7	04:45
17	21	89	2.1	05:15
17	21	95	1.4	05:45
17	21	94	1.2	06:15
17	21	97	0.6	06:45
17	21	95	0.7	07:15
17	21	96	1.2	07:45
17	20	74	6	08:15
16	20	49	10.9	08:45
16	20	39	13.9	09:15
16	20	36	15.2	09:45
16	20	32	18.7	10:15
16	20	30	20.7	10:45
16	20	29	21.9	11:15
16	20	27	23	11:45
16	20	29	23.8	12:15
16	20	23	25.8	12:45
16	20	22	27.6	13:15
H_Suelo1(%)	H_Suelo2(%)	H_Aire(%)	T_Aire(C)	14/07/2025
16	20	20	27.6	13:45
16	20	15	33.3	14:15
16	20	16	28.9	14:45
16	20	16	28.5	15:15
16	20	16	29.8	15:45
16	20	17	29.8	16:15
16	20	18	27.2	16:45
16	20	18	26.2	17:15
16	20	19	24.1	17:45
16	20	41	19.4	18:15
15	20	47	15.7	18:45
15	20	48	14.5	19:15
15	20	38	17	19:45
15	20	43	14.5	20:15
15	20	35	18.6	20:45
15	20	44	12.1	21:15
15	20	44	11.8	21:45
15	20	62	8.5	22:15
15	20	62	7.7	22:45
15	20	66	6.8	23:15
15	20	74	5.6	23:45
15	20	77	5	00:15
15	20	79	4.6	00:45
15	20	82	4.2	01:15
15	20	84	3.8	01:45
15	20	83	3.5	02:15
15	20	86	3.1	02:45

15	19	84	3.4	03:15
15	19	87	3	03:45
15	19	91	2.1	04:15
15	19	94	1.7	04:45
15	19	92	2.1	05:15
15	19	94	1.5	05:45
15	19	95	1.3	06:15
15	19	98	0.7	06:45
14	19	94	1.1	07:15
14	19	96	1.5	07:45
14	19	78	5.9	08:15
14	19	54	10.9	08:45
14	19	43	14.2	09:15
14	19	38	14.8	09:45
14	19	29	17.6	10:15
14	19	22	23.8	10:45
14	19	25	23.8	11:15
14	19	20	25.8	11:45
14	19	19	26.7	12:15
14	19	18	28.5	12:45
14	19	17	30.6	13:15

					Aplicación de riego y cambio de sensores
H_Suelo1(%)	H_Suelo2(%)	H_Aire(%)	T_Aire(C)	15/07/2025	
29	19	16	31.3	13:45	
29	19	16	28.5	14:15	
29	19	17	28.9	14:45	
28	19	16	28.9	15:15	
28	19	17	29.3	15:45	
28	19	16	28	16:15	
28	19	18	26.2	16:45	
28	20	21	23.8	17:15	
28	20	38	20.5	17:45	
28	20	24	21.8	18:15	
28	20	41	15.5	18:45	
28	20	45	12.7	19:15	
28	21	46	11.3	19:45	
28	21	47	10.2	20:15	
28	21	51	9	20:45	
28	22	52	7.8	21:15	
28	22	51	7	21:45	
27	22	55	6.1	22:15	
27	22	54	6.4	22:45	
27	23	62	4.7	23:15	
27	23	62	4.7	23:45	
27	23	63	4.2	00:15	
27	23	64	4	00:45	

27	24	69	3.2	01:15
27	24	73	3.2	01:45
27	24	73	2.6	02:15
27	24	74	2.2	02:45
27	25	77	1.3	03:15
27	25	77	1.3	03:45
27	25	77	1.8	04:15
27	26	82	0.8	04:45
27	26	84	0.4	05:15
26	26	84	0.4	05:45
26	27	85	0.3	06:15
26	27	86	0.3	06:45
26	27	88	0.4	07:15
26	28	78	3.1	07:45
26	28	47	13.3	08:15
26	28	41	13	08:45
26	29	34	14.5	09:15
26	29	19	22.8	09:45
26	29	25	19.1	10:15
26	29	24	22.2	10:45
26	29	28	23	11:15
26	29	22	23.5	11:45
26	29	22	24.5	12:15
26	29	19	25.3	12:45
26	29	19	27.1	13:15
H_Suelo1(%)	H_Suelo2(%)	H_Aire(%)	T_Aire(C)	16/07/2025
26	29	15	31.3	13:45
26	29	17	28.5	14:15
26	28	17	28.8	14:45
26	28	17	28.9	15:15
26	28	16	29.3	15:45
26	28	16	28.5	16:15
26	28	17	27.2	16:45
26	28	18	25.8	17:15
26	28	18	24.1	17:45
26	28	27	20.6	18:15
26	28	27	19.4	18:45
26	28	22	20.2	19:15
26	28	20	19	19:45
26	28	39	13.3	20:15
26	28	22	17	20:45
26	28	26	14.8	21:15
26	28	37	12.6	21:45
26	28	47	10.9	22:15
26	28	43	10.1	22:45
26	28	53	7.8	23:15

25	28	58	6.4	23:45
25	28	63	4.7	00:15
25	28	66	4.3	00:45
25	28	65	3.9	01:15
25	28	66	3.4	01:45
25	28	65	3.5	02:15
25	27	73	2.2	02:45
25	27	75	2	03:15
25	27	71	2.2	03:45
25	27	78	1.3	04:15
25	27	83	0.8	04:45
25	27	86	0.4	05:15
24	27	82	0.4	05:45
24	27	85	-1	06:15
24	27	86	0.3	06:45
24	27	91	-0.9	07:15
24	27	84	2	07:45
24	27	46	12.3	08:15
24	27	37	12.6	08:45
24	27	33	13.8	09:15
24	27	27	23	09:45
24	27	24	19	10:15
24	27	19	26.7	10:45
24	27	19	22.3	11:15

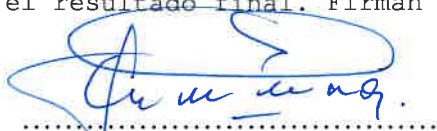
ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS
Bach. ERICK HUACCACHI ALFARO
R.D. N° 255-2026-UNSCH-FCA-D

En la ciudad de Ayacucho, a los diecisiete días del mes de julio del año dos mil veintiséis, siendo las dieciocho horas, se reunieron en el auditorio de la Facultad de Ciencias Agrarias, bajo la presidencia del Dr. Felipe Escobar Ramírez Decano de la Facultad de Ciencias Agrarias; los miembros del jurado conformado por el M.Sc. Francisco Condeña Almora, Ing. Hoover Núñez Alfaro como asesor, Ing. Orlando Fidel Sulca Castilla y el Dr. Eleazar Chuchón Angulo; actuando como secretario de actas el Mtro. Rodolfo Alca Mendoza, para recibir la sustentación de la Tesis titulado: **Utilización del Arduino en la frecuencia de riego por goteo en el cultivo de palto (*Persea americana* Mill.)**, Huanchac, Huanta, 2025, para obtener el Título Profesional de Ingeniero Agrónomo, presentado por el Bachiller **ERICK HUACCACHI ALFARO**.

El señor Decano previa verificación de los documentos exigidos solicitó se proceda con la sustentación y posterior defensa de la tesis en un periodo de cuarenta y cinco minutos de acuerdo al reglamento de grados y títulos vigente. Terminado la exposición, los miembros del Jurado, formularon sus preguntas, aclaraciones y/o observaciones correspondientes. Luego se invitó a los miembros del jurado pasar a otra aula para la deliberación y calificación del trabajo de tesis, teniendo el siguiente resultado:

Jurado evaluador	Exposición	Respuestas a las preguntas	Generación de conocimiento	Promedio
M.Sc. Francisco Condeña Almora	14	13	13	13
Ing. Hoover Núñez Alfaro	16	17	17	17
Ing. Orlando Fidel Sulca Castilla	16	15	15	15
Dr. Eleazar Chuchón Angulo	15	14	15	15
PROMEDIO GENERAL				15

Acto seguido se invita a la sustentante y público en general para dar a conocer el resultado final. Firman el acta.



.....
M.Sc. Francisco Condeña Almora
Presidente



.....
Ing. Hoover Núñez Alfaro
Asesor



.....
Ing. Orlando Fidel Sulca Castilla
Jurado



.....
Dr. Eleazar Chuchón Angulo
Jurado



.....
Mtro. Rodolfo Alca Mendoza
Secretario Docente

CONSTANCIA DE CONTROL DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE TESIS

El que suscribe, miembro de la comisión de docentes instructores responsables de operativizar, verificar, garantizar y controlar la originalidad de los trabajos de **TESIS** de la Facultad de Ciencias Agrarias, de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, autorizado por **R.D N° 213-2025-UNSCH-FCA-CF**; hace constar que el trabajo titulado:

Utilización del Arduino en la frecuencia de riego por goteo en el cultivo de palto (*Persea americana* Mill.), Huanchac, Huanta, 2025

Autor : Erick Huaccachi Alfaro
Asesor : Hoover Nuñez Alfaro

Ha sido sometido al control de originalidad mediante el software TURNITIN UNSCH, acorde al Reglamento de originalidad de trabajos de tesis, aprobado mediante RCU 039-2021-UNSCH-CU, arrojando un resultado de **diecisiete (17%)** de índice de similitud, con exclusión de citas y bibliografía, y de coincidencias menores de 30 palabras.

En consecuencia, se otorga la presente Constancia de Originalidad para los fines pertinentes.

Nota: Se adjunta el resultado con identificador de la entrega: 3002726457

Ayacucho, 24 de Julio de 2026

Atentamente,



UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
Facultad de Ciencias Agrarias
Prof. Dr. Eleazar Cruchón Angulo
DNI: 42682714

Utilización del Arduino en la frecuencia de riego por goteo en el cultivo de palto (*Persea americana* Mill.), Huanchac, Huanta, 2025

por Erick Huaccachi Alfaro

Fecha de entrega: 24-jul-2026 11:06a. m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 3002726457

Nombre del archivo: Tesis-Erick.pdf (4.73M)

Total de palabras: 27739

Total de caracteres: 131060

Utilización del Arduino en la frecuencia de riego por goteo en el cultivo de palto (Persea americana Mill.), Huanchac, Huanta, 2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

17%

INDICE DE SIMILITUD

17%

FUENTES DE INTERNET

7%

PUBLICACIONES

9%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.esпам.edu.ec	Fuente de Internet	3%
2	repositorio.ujcm.edu.pe	Fuente de Internet	2%
3	repositorio.unasam.edu.pe	Fuente de Internet	2%
4	repositorio.unsch.edu.pe	Fuente de Internet	2%
5	qdoc.tips	Fuente de Internet	1%
6	repositorio.lamolina.edu.pe	Fuente de Internet	1%
7	Submitted to Universidad Francisco de Vitoria	Trabajo del estudiante	1%
8	revistas.unsch.edu.pe	Fuente de Internet	<1%
9	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga	Trabajo del estudiante	<1%
10	Submitted to Universidad Nacional del Santa	Trabajo del estudiante	<1%
11	repositorio.ucss.edu.pe	Fuente de Internet	<1%
12	Escarabajal Henarejos, David. "Application of digital image processing techniques for estimating water requirements of lettuce (Lactuca sativa L.) in the southeast of Spain.", Proquest, 2015.	Publicación	<1%
13	docplayer.es	Fuente de Internet	<1%

14	sedici.unlp.edu.ar Fuente de Internet	<1 %
15	www.casadelriegoecuador.com Fuente de Internet	<1 %
16	ciqa.repositorioinstitucional.mx Fuente de Internet	<1 %
17	Diego Fernando Gutierrez Junco, Daniel Felipe Diaz Caro, Michael Sebastian Cruz Forero, Ilber Adonayt Ruge Ruge. "Agrometeorological monitoring station based microcontroller and bluetooth communication", 2015 IEEE 2nd Colombian Conference on Automatic Control (CCAC), 2015 Publicación	<1 %
18	avocadosource.com Fuente de Internet	<1 %
19	www.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
20	Rutilo López-López, Ramón Arteaga-Ramírez, Mario A. Vázquez-Peña, Irineo L. López-Cruz, Ignacio Sánchez-Cohen. "EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE TOMATE DE CÁSCARA (Physalis ixocarpa Brot.) ESTIMADA MEDIANTE EL POTENCIAL MÁTRICO DEL SUELO", Revista Fitotecnia Mexicana, 2010 Publicación	<1 %
21	Submitted to Universidad del Valle de Guatemala Trabajo del estudiante	<1 %
22	Submitted to Universidad Popular del César,UPC Trabajo del estudiante	<1 %
23	Submitted to Escuela Superior Politécnica del Litoral Trabajo del estudiante	<1 %
24	repositorio.unas.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
25	es.slideshare.net Fuente de Internet	<1 %
26	repositorioinstitucional.buap.mx Fuente de Internet	<1 %
27	Jorge E. Gómez, Samir Castaño, Teobaldis Mercado, Alexánder Fernandez, Jose Garcia. "Sistema de internet de las cosas (IoT) para el monitoreo de cultivos protegidos", Ingeniería e Innovación, 2018 Publicación	<1 %

28	Dagoberto Durán Hernández, Olivia Tzintzun Camacho, Onécimo Grimaldo-Juárez, Daniel González-Mendoza et al. "Compendio Científico en Ciencias Agrícolas y Biotecnología (Vol 2)", Omnia Publisher SL, 2019	Publicación	<1 %
29	hdl.handle.net	Fuente de Internet	<1 %
30	repositorio.ipicyt.edu.mx	Fuente de Internet	<1 %
31	Submitted to Universidad Nacional Agraria La Molina	Trabajo del estudiante	<1 %
32	dspace.ucuenca.edu.ec	Fuente de Internet	<1 %
33	rcta.unah.edu.cu	Fuente de Internet	<1 %
34	Submitted to Universidad Autónoma de Aguascalientes	Trabajo del estudiante	<1 %
35	cazalac.org	Fuente de Internet	<1 %
36	www.carehospitals.com	Fuente de Internet	<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias

< 30 words

Excluir bibliografía

Activo

Utilización del Arduino en la frecuencia de riego por goteo en el cultivo de palto (*Persea americana* Mill.), Huanchac, Huanta, 2025

Use of Arduino in drip irrigation frequency in avocado cultivation (*Persea americana* Mill.), Huanchac, Huanta, 2025

Erick Huaccachi Alfaro¹,

Erick.huaccachi.01@unsch.edu.pe

Hoover Nuñez Alfaro²

hoover.nunez@unsch.edu.pe

Área de investigación: Medio Ambiente

Línea de investigación: Manejo y conservación de recursos hídricos

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo determinar la frecuencia de riego por goteo en el cultivo de palto (*Persea americana* Mill.) mediante el uso de sensores conectados a tecnología Arduino durante la etapa de floración en Huanchac, Huanta, Ayacucho, 2025. Se evaluó la precisión de los sensores DHT11 y FC – 28 comprándolos con la estación meteorológica HOBO, obteniéndose coeficientes de determinación elevados, evidenciando una adecuada confiabilidad en el registro de datos de temperatura, humedad relativa y humedad de suelo.

La evapotranspiración del cultivo fue calculada mediante la ecuación de Penman - Monteith FAO – 56 utilizando variables meteorológicas por el sistema Arduino. Los valores de evapotranspiración de referencia (ET_o) oscilaron alrededor de 4.03 mm día^{-1} y 3.9 mm día^{-1} en el Arduino 1 (A1) y Arduino 2 (A2) respectivamente, determinándose una frecuencia de riego aproximada de 6 a 7 días.

Asimismo, el análisis del comportamiento de humedad del suelo mostro mayor variabilidad en la profundidad de 30 cm respecto a 60 cm, debido a la mayor extracción de agua por las raíces y pérdidas por evapotranspiración. Se concluye que el uso de sensores conectados a Arduino permitió monitorear adecuadamente las condiciones hídricas del cultivo y determinar oportunamente la frecuencia de riego durante la el periodo de desarrollo floral.

Palabras clave: Frecuencia de riego, Arduino, humedad del suelo, evapotranspiración, palto.

ABSTRACT

The study aimed to determine the drip irrigation frequency for avocado (*Persea americana* Mill.) crops using sensors connected to Arduino technology during the flowering stage in Huanchac, Huanta, Ayacucho (2025). The accuracy of the DHT11 and FC-28 sensors was evaluated by comparing them with a HOBO weather station; high-performance parameters were obtained, demonstrating reliable data recording for temperature, relative humidity, and soil moisture. Crop evapotranspiration was calculated using the FAO-56 Penman-Monteith equation, utilizing meteorological variables captured by the Arduino system. Reference evapotranspiration (ET_o) values averaged approximately 4.03 mm/day for Arduino 1 (A1) and 3.9 mm/day for Arduino 2 (A2), resulting in an estimated irrigation frequency of 6 to 7 days. Additionally, the analysis of soil moisture behavior revealed greater variability at a depth of 30 cm compared to 60 cm, attributed to higher root water uptake and evapotranspiration losses. It is concluded that the use of Arduino-connected sensors enabled effective monitoring of crop water conditions and the timely determination of irrigation frequency during the floral development period.

Keywords: Irrigation frequency, Arduino, soil moisture, evapotranspiration, avocado.

I. INTRODUCCIÓN

La producción de palto constituye una actividad agrícola de gran importancia económica debido a la creciente demanda nacional e internacional (FAO, 2021). Por otro lado, Cervantes (2021), indica que tiene importancia por sus propiedades nutraceuticas, alto en contenido de aceite y materia seca. Sin embargo, el manejo eficiente del recurso hídrico representa uno de los principales desafíos para garantizar una producción, especialmente en zonas con disponibilidad limitada de agua. Salazar (2022), indica que se debe mantener dentro de los rangos óptimos de humedad de suelo para evitar déficit hídrico, imbibición o un riego pesado para evitar la alteración del estado de desarrollo floral y en consecuencia disminuir rendimiento de producción del cultivo. Actualmente, el desarrollo de tecnologías de agricultura de precisión permite monitorear variables ambientales y del suelo mediante sensores electrónicos de bajo costo. Entre estas tecnologías, la plataforma Arduino destaca por su facilidad de implementación, flexibilidad y de capacidad para integrar diferentes sensores destinados al monitoreo agrícola.

Objetivo general

Determinar la frecuencia de riego por goteo en el cultivo de palto mediante sensores conectados a tecnología Arduino durante el desarrollo floral del cultivo de palto en Huanchac, Huanta, Ayacucho.

Objetivos específicos

1. Evaluar la precisión de los sensores conectados a la Tecnología Arduino en la etapa de floración.
2. Determinar la frecuencia de riego a partir de la evapotranspiración del cultivo, mediante el uso de sensores de variables meteorológicos.

3. Analizar la relación entre los datos registrados por los sensores conectados a Arduino y las condiciones hídricas del cultivo.

II. MATERIALES Y METODOS

2.1 Ubicación del estudio

El estudio se realizó en Huanchac, distrito de Luricocha, provincia de Huanta, de la región Ayacucho (Figura 2.1), a una altitud de 2650 m.s.n.m.

Figura 2.1

Mapa de ubicación del estudio



2.2 Variables del estudio

a. Variable independiente

Utilización del sistema Arduino

Indicadores

- ✓ Tipo y numero de sensores instalados.
- ✓ Algoritmo de la programación del sistema Arduino.
- ✓ Capacidad de almacenamiento y registro de datos (uso de modulo micro SD).

b. Variable dependiente

Frecuencia hídrica del cultivo de palto.

Indicadores

- ✓ Intervalo de días entre riego (días).
- ✓ Humedad del suelo (%)
- ✓ Lamina de riego aplicada (mm).
- ✓ Evapotranspiración del cultivo (ET_c)

2.3 Materiales e instrumentos utilizados

- ✓ Arduino Uno R3
- ✓ Sensores FC-28 para humedad del suelo (profundidades: 30 cm y 60 cm).
- ✓ Sensor DHT11 para temperatura ambiental y humedad relativa.
- ✓ Modulo MicroSD para almacenamiento de datos.
- ✓ Batería portátil de 15 000 mAh para autonomía del sistema.
- ✓ Estación meteorológica automática para la calibración (HOBO - U30).

2.4 Parámetros de evaluación

Humedad de suelo. Fue evaluada en campo a profundidades de 30 cm y 60 cm mediante sensores FC-28 conectados a un sistema Arduino Uno R3.

La temperatura ambiental y la humedad relativa. Fueron evaluadas mediante el sensor DHT11 instalado a 1.5 m de altura sobre la superficie del suelo.

La precisión. Se realizo mediante la comparación con una estación meteorológica HOBO U30, utilizando indicadores estadísticos, su grafico de dispersión con su ecuación de ajuste y su coeficiente de determinación.

Evapotranspiración de referencia (ET_o). Fue determinada mediante la ecuación de Penman – Monteith FAO – 56, mientras que la evapotranspiración del cultivo (ET_c) se calculo utilizando el coeficiente de determinación (K_c = 0.9) que corresponde al E-8 del desarrollo floral del cultivo.

Frecuencia de riego. Fue determinada mediante la relación de lamina de riego con la evapotranspiración del cultivo y también mediante el comportamiento de la humedad de suelo de 30 cm y 60 cm de profundidad.

2.5 Descripción del estudio

Se instalaron dos sistemas de Arduino Uno R3 equipados con sensores DHT11 para registrar temperatura y humedad relativa del aire y sensores FC-28 para monitorear la humedad del suelo a profundidades de 30 y 60 cm. Los datos fueron almacenados en módulos microSD para su posterior procesamiento (Tabla 2.1).

Tabla 2.1

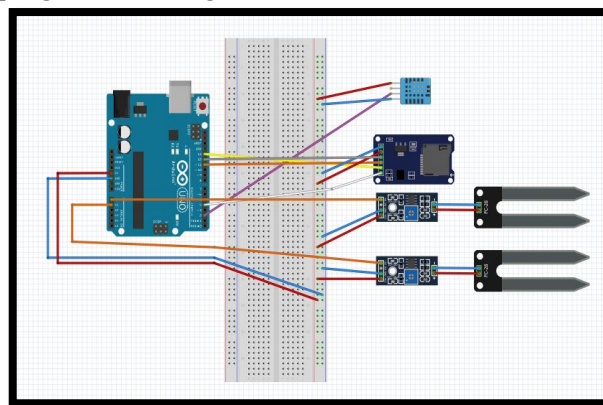
Ensamblaje del circuito en protoboard con los siguientes sensores

Parámetro	Instrumento/sensor	Tecnología usada
Humedad del suelo	2 sensores de humedad FC 28	Arduino Uno
Temperatura ambiental y humedad relativa.	Sensor DHT 11	Arduino Uno

Los pines analógicos A0 y A1 fueron asignados a los sensores FC – 28, el sensor DHT11 se conecto al pin digital 7, el modulo microSD se conectó mediante protocolo SPI (pines 10 – 13). Se verificaron voltajes de salidas para evitar sobrecargas como se observa en la figura 2.2.

Figura 2.2

Diseño del Protoboard del sistema Arduino en el programa Fritzing



2.6 Programación del microcontrolador

Se desarrollo un algoritmo o script en el Arduino IDE (Figura 2.3) que permitió:

- ✓ Incluir librerías para el sensor DHT11 y FC-28 cada 30 minutos.
- ✓ Convertir las señales analógicas del FC-28 en porcentajes.

- ✓ Registrar los datos de temperatura y humedad relativa mediante el DHT11 cada 30 minutos.
- ✓ Guardar los datos en formato CSV en tarjeta SD.

Figura 2.3

Script de programación de los sensores a través del lenguaje Arduino en Arduino IDE

```

1  #include <Wire.h>
2  #include <SD.h>
3  #include <SPI.h>
4  #include <DHT.h>
5  #include <Adafruit_MLX90614.h>
6
7  #define DHTPIN 2
8  #define DHTTYPE DHT11
9  #define chipSelect 10
10
11 DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
12 Adafruit_MLX90614 mlx = Adafruit_MLX90614();
13
14 int sensorSuelo1 = A0;
15 int sensorSuelo2 = A1;
16
17 void setup() {
18   Serial.begin(9600);
19   dht.begin();
20   mlx.begin();
21
22   if (!SD.begin(chipSelect)) {
23     Serial.println("Error al inicializar la tarjeta SD");
24     while (1)
25       ;
26   }
27   Serial.println("Tarjeta SD lista");
28
29   File dataFile = SD.open("datos.csv", FILE_WRITE);
30   if (dataFile) {
31     dataFile.println("H_Suelo1(%),H_Suelo2(%),H_Aire(%),T_Aire(C),T_Foliar(C)");
32     dataFile.close();
33   }
34 }
35
36 void loop() {
37
38   int h1 = map(analogRead(sensorSuelo1), 1023, 0, 0, 100);
39   int h2 = map(analogRead(sensorSuelo2), 1023, 0, 0, 100);
40   float hAire = dht.readHumidity();
41   float tAire = dht.readTemperature();
42   float tFoliar = mlx.readObjectTempC();
43
44   Serial.print("Suelo1: ");
45   Serial.print(h1);
46   Serial.print("% | ");
47   Serial.print("Suelo2: ");
48   Serial.print(h2);
49   Serial.print("% | ");
50   Serial.print("H.Aire: ");
51   Serial.print(hAire);
52   Serial.print("% | ");
53   Serial.print("T.Aire: ");
54   Serial.print(tAire);
55   Serial.print("°C | ");
56   Serial.print("T.Foliar: ");
57   Serial.print(tFoliar);
58   Serial.println(tFoliar);
59
60   File dataFile = SD.open("datos.csv", FILE_WRITE);
61   if (dataFile) {
62     dataFile.print(h1);
63     dataFile.print(",");
64     dataFile.print(h2);
65     dataFile.print(",");
66     dataFile.print(hAire);
67     dataFile.print(",");
68     dataFile.print(tAire);
69     dataFile.print(",");
70     dataFile.print(tFoliar);
71     dataFile.close();
72   } else {
73     Serial.println("No se pudo escribir en SD");
74   }
75   delay(1800000);
76 }
77

```

2.7 Instalación de los sensores en campo de estudio.

Se excavaron dos hoyos a 30 cm y 60 cm de profundidad (Figura 2.4), cada sensor se colocó horizontalmente en contacto directo con el suelo.

Figura 2.4

Instalación de los sensores FC-28



Instalación del Sensor FC-28 a 60 cm de profundidad



Instalación del Sensor FC-28 a 30 cm de profundidad

Se colocó 1.5 metros de altura (Figura 2.5), libre al sol y al ambiente.

Figura 2.5

Instalación del sensor DHT11



2.8 Programación y configuración del Arduino IDE en campo

Se realizó la programación y configuración del Arduino conectado a los sensores y monitorear la lectura en el monitor serie del software (Figura 2.6). La lectura se hizo en dos cultivos de palto de las mismas características fenológicas y fisiológicas (Figura 2.7).

Figura 2.6

Programación y configuración del sistema Arduino

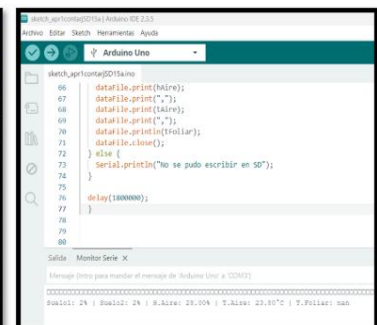


Figura 2.7
Medición y lectura de Arduino A1 y A2 con sus respectivos sensores

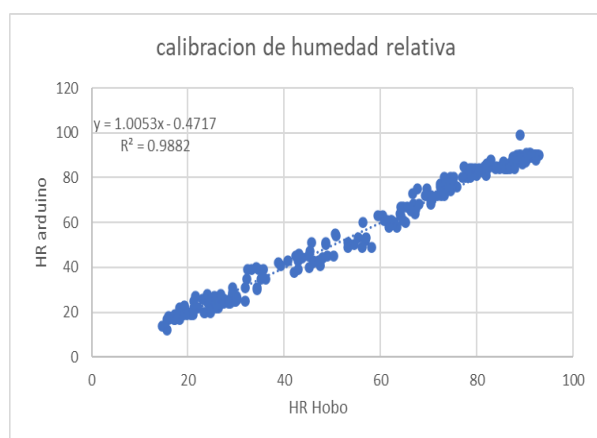


Medición de humedad de suelo, temperatura ambiental y humedad relativa en el Arduino 1
Medición de humedad de suelo, temperatura ambiental y humedad relativa en el Arduino 2

2.9 Procesamiento y análisis de datos

La precisión de los sensores fue evaluada mediante comparación con una estación meteorológica automática HOBO, se determinó mediante cálculos estadísticos y su grafico de dispersión con su ecuación de ajuste y su coeficiente de determinación (Figura 2.8). La evapotranspiración de referencia fue estimada utilizando la metodología Penman-Monteith FAO-56 y posteriormente se calculó la evapotranspiración del cultivo mediante coeficientes de cultivo correspondientes a la etapa fenológica evaluada.

Figura 2.8
Gráficos de dispersión (Arduin vs HOBO U30)



La frecuencia de riego se determinó a partir de la humedad aprovechable del suelo, considerando una capacidad de campo de 28.18 %, un punto de marchitez permanente de 12.62 % y una fracción de agotamiento permisible del 50 %, estableciéndose un umbral crítico de riego de 20.4 % según al análisis de

suelo de sus parámetros hídricos (Tabla 2.2). También se determinó en relación a la evapotranspiración del cultivo con la lámina de riego, en consecuencia, el intervalo de riego.

Tabla 2.2
Parámetros hídricos

Parámetros hídricos	unidad	valores
Densidad Aparente	g/cm ³	1.21
Humedad CC	%	28.18
Humedad PM	%	12.62
Umbral de riego crítico	%	20.4

Del mismo se evaluó el comportamiento temporal de la humedad de suelo, donde se utilizaron datos promedios diarios de las profundidades de 30 cm y 60 cm, luego elaborar gráficos de serie para identificar la evolución diaria de la humedad de suelo, además de ello se hizo la matriz de correlación de Pearson con los parámetros medidos con el fin de analizar la dinámica de la humedad en el perfil del suelo.

III. RESULTADOS Y DISCUSION

3.1 Precisión de los sensores conectados al Arduino

Los sensores evaluados mostraron una alta concordancia respecto a la estación meteorológica HOBO. El sensor DHT11 registró una elevada precisión para temperatura ambiental, alcanzando un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.9838$ (Figura 3.1), mientras que para humedad relativa presentó un $R^2 = 0.9882$ (Figura 3.2). Asimismo, el sensor FC-28 mostró también un coeficiente de correlación de $R^2 = 0.9418$ respecto al sensor de referencia (Figura 3.3). Estos resultados coinciden con Velázquez (2021), quien menciona que los sensores de bajo costo pueden alcanzar a tener altos índices de precisión si están adecuadamente monitoreados. De igual manera Huamán (2023), señala que mediante coeficientes de correlación y regresión lineal se puede

determinar la confiabilidad de sensores utilizados en riego.

Figura 3.1

Precisión y calibración de temperatura ambiental (DHT11)

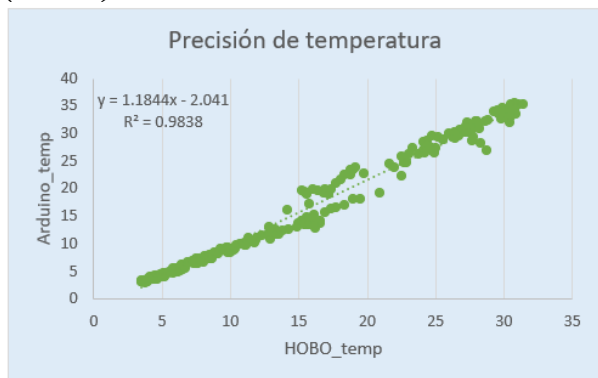


Figura 3.2

Precisión y calibración de humedad relativa (DHT11)

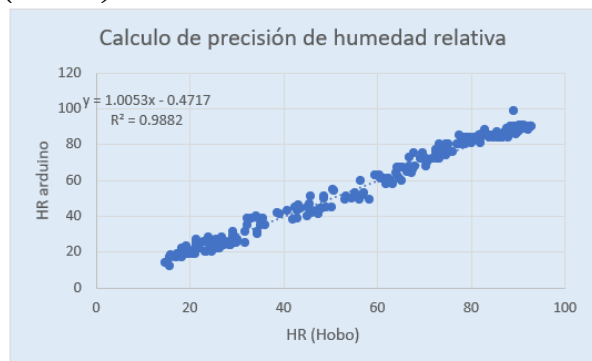
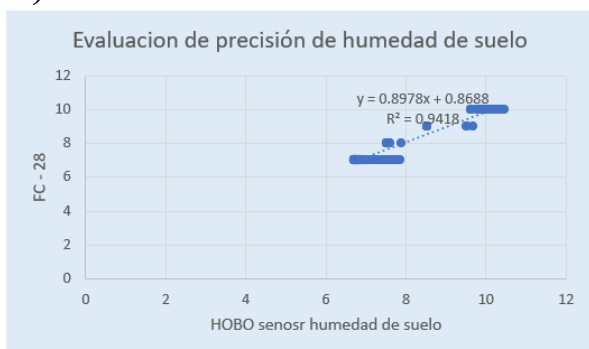


Figura 3.3

Precisión y calibración de humedad de suelo (FC-28)



3.2 Determinación de la frecuencia de riego

La humedad a 30 cm de profundidad descendió mas rápidamente que a 60 cm, alcanzando el umbral critico de 20.4 %, de 19.7 en el Arduino 1 (Figura 3.4) y 19.56 % en el Arduino 2 (Figura 3.5) momento en el que fue necesario aplicar riego, por lo tanto, el intervalo de riego

es de 6 a 7 días. Estos resultados coinciden con Allen et al. (2006), quienes indican que la frecuencia de riego se puede determinar considerando la humedad aprovechable, su umbral de riego y así evitando que el cultivo entre a un déficit hídrico.

La evapotranspiración del cultivo durante la etapa de floración presentó valores cercanos a 4.06 mm.dia⁻¹ en el Arduino 1 (Tabla 3.1) y 3.92 mm.dia⁻¹ en el Arduino 2 (Tabla 3.2), con un coeficiente de cultivo (Kc=0.9) se determinó una evapotranspiración de cultivo de 3.63 mm.dia⁻¹ y 3.92 mm.dia⁻¹ respectivamente, permitiendo estimar con una lámina de riego de 23.34 mm un intervalo de riego aproximado de 6 a 7 días respectivamente. Según la FAO (2011) la evapotranspiración se puede estimar mediante la ecuación de Penman-Monteith FAO-56 porque integrar muchos variables meteorológicas.

Figura 3.4

Determinación de la frecuencia de riego mediante el contenido de humedad del suelo a 30 y 60 cm de profundidad en el Arduino 1 (A1)



Tabla 3.1

Determinación de la evapotranspiración de referencia mediante la fórmula de Penman Monteith FAO-23 en Arduino 1 (A1)

(1) PRESION DE VAPOR DE SATURACIÓN (es)	
$e_s(T_{max})$	0.7271807
$e_s(T_{min})$	0.73978703
$e_s(\text{promedio})$	0.73348386
(2) PRESION REAL DE VAPOR (e_a)	
	0.2593516
(3) DEFICITIT DE PRESION DE VAPOR ($e_s - e_a$)	
	0.474132264
(4) PENDIENTE DE LA CURVA DE PRESION DE VAPOR (Δ)	
	0.095643853
(5) CONSTANTE PSICOMETRICA (γ)	
	0.067 a 2600 m.s.n.m
(6) RADIACION NETA (R_n)	
	16.74399086
ETo final	4.03

Figura 3.5

Determinación de la frecuencia de riego mediante el contenido de humedad del suelo a 30 y 60 cm de profundidad en el Arduino 2 (A2)

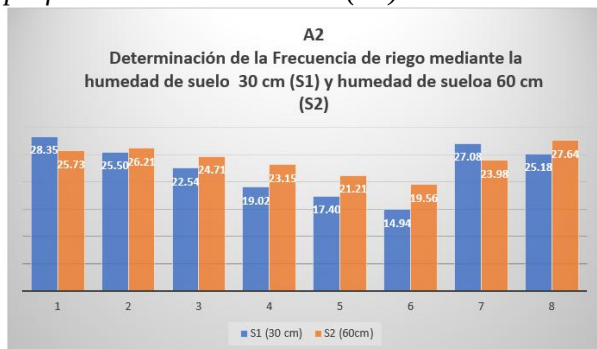


Tabla 3.2

Determinación de la evapotranspiración de referencia mediante la fórmula de Penman Monteith FAO-23 en Arduino 1 (A1)

(1) PRESION DE VAPOR DE SATURACIÓN (es)	
e _s (Tmax)	0.74216588
e _s (Tmin)	0.75530041
e _s (promedio)	0.74873314
(2) PRESION REAL DE VAPOR (e _a)	
	0.39936243
(3) DEFICIT DE PRESION DE VAPOR (e _s - e _a)	
	0.34937071
(4) PENDIENTE DE LA CURVA DE PRESION DE VAPOR (Δ)	
	0.09124367
(5) CONSTANTE PSICOMETRICA (γ)	
0.067	a 2600 m.s.n.m
(6) RADIACION NETA (R _n)	
	16.74399086
Eto final	3.92

3.3 Comportamiento de la humedad del suelo

La humedad del suelo presentó mayor variabilidad a 30 cm de profundidad, registrándose valores desde aproximadamente 33 % hasta 15 % en el Arduino 1 (Figura 3.6) y 28 % hasta 15% en el Arduino 2 (Figura 3.7). En contraste, 60 cm la humedad se mantuvo mas estable, con valores comprendidos entre 20 % y 27 % en ambos Arduino. Los resultados obtenidos coinciden con Neira (2024), quien nos indica que, bajo riego por goteo en el cultivo de palto, los primeros 30 cm del suelo presentan una mayor variación de humedecimiento y agotamiento hídrico debido a la presencia de mayor área radicular y factores de evaporación o temperatura. De igual manera Jaimes (2019) indica que bajo 60 cm de profundidad mantiene una buena dinámica y una buena estabilidad hídrica por que la humedad se mantiene y no hay mucho desgaste hídrico en el perfil del suelo.

Figura 3.6

Comportamiento temporal de la humedad del suelo a 30 y 60 cm de profundidad en el Arduino 1

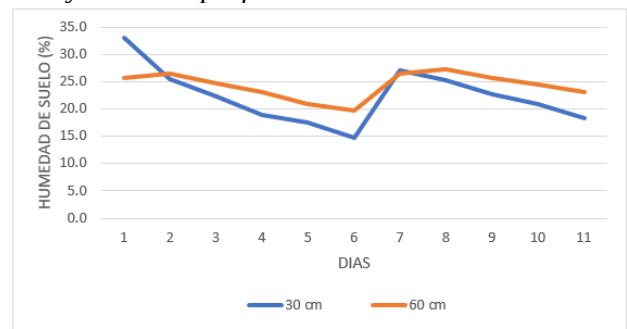


Figura 3.7

Comportamiento temporal de la humedad del suelo a 30 y 60 cm de profundidad en el Arduino 2

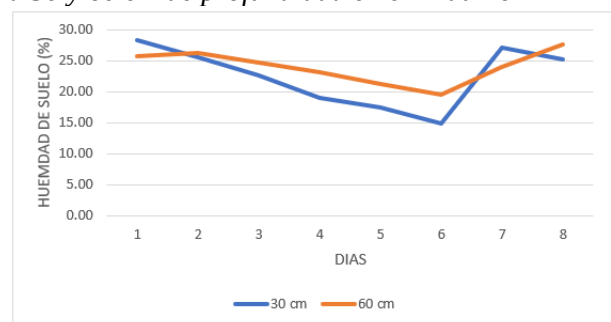
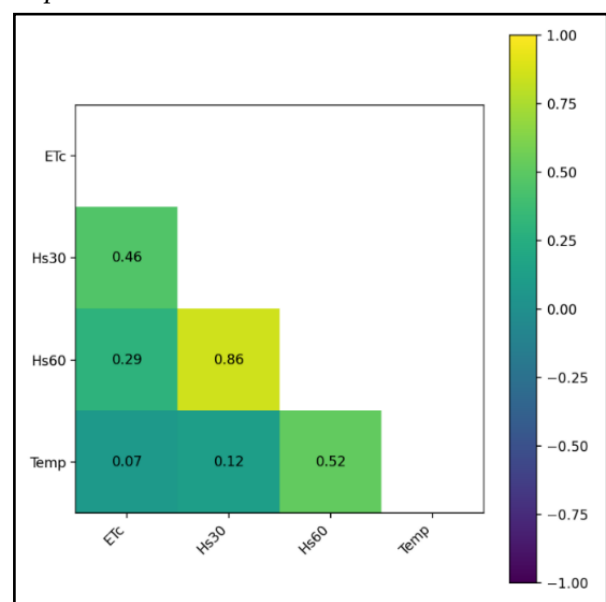


Figura 3.8

Matriz de correlación de Pearson con respecto a los parámetros medidos



CONCLUSIONES

Se evaluó la precisión de los sensores conectados a Arduino para el monitoreo de las condiciones hídricas del cultivo, obteniéndose coeficientes de determinación (R^2) de 0.9838 para la temperatura ambiental, 0.9882 para la humedad relativa correspondiente al sensor DHT11 y 0.9418 para el sensor FC- 28 que mide la humedad de suelo.

Se determinó la frecuencia de riego mediante la estimación de la evapotranspiración de cultivo (ETC). Obteniéndose valores comprendidos entre 3.63 mm.día-1 a 3.92 mm.día-1, obteniéndose un intervalo de riego entre 6 a 7 días.

Se analizó la relación entre las variables registradas por el sistema Arduino y las condiciones hídricas del cultivo, encontrándose una correlación positiva entre humedad suelo a 30 cm y 60 cm ($r = 0.86$), entre la evapotranspiración presentó una correlación moderada ($r = 0.46$) permitiendo un intervalo de riego de 6 a 7 días por el comportamiento y buena dinámica en el perfil del suelo.

REFERENCIA

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (Estudio FAO Riego y Drenaje N.º 56). FAO. <https://www.fao.org/4/x0490s/x0490s00.htm>

Cervantes-Paz, B., & Yahia, E. M. (2021). *Avocado oil: Production and market demand, bioactive components, implications in health, and tendencies and potential uses* [Aceite de aguacate: Producción y demanda del mercado, componentes bioactivos, implicaciones para la salud, tendencias y usos potenciales]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(4), 4120–4158.

<https://doi.org/10.1111/1541-4337.12784>

- FAO. (2011). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (Estudio FAO Riego y Drenaje N.º 56). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>
- Huamán Gutiérrez, L. M. (2023). *Diseño de un prototipo de riego automatizado para pequeños huertos agroecológicos utilizando Arduino en zonas desérticas urbanas de Lima*. Universidad Nacional Agraria La Molina. Recuperado de <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/5971>
- Jaimes Tarazona, A. K. (2019). *Relación humedad del suelo, evapotranspiración y parámetros biométricos del crecimiento de dos variedades de camote en condiciones de déficit hídrico* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional UNALM. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/items/f8d40916-fc5a-47b9-9eb9-94f83ced79a2>
- Neira Quicaño, W. L. (2024). *Determinación del bulbo de humedecimiento en palto (Persea americana) bajo riego por goteo sometidos a diferentes descargas y textura de suelo, Ayacucho–2023* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. Repositorio Institucional UNSCH. <https://repositorio.unsch.edu.pe/handle/20.500.14612/7231>
- Organización de las Naciones unidas para la Alimentación y Agricultura. (2021). *El*

estado mundial de la agricultura y la alimentación 2021: Lograr que los sistemas agroalimentarios sean más resistentes a las perturbaciones y tensiones.

FAO.

<https://doi.org/10.4060/cb7351es>

Velásquez Muñoz, O. S. (2021). *Desarrollo de un sensor de humedad de suelo para sistemas de riego automatizados* [Tesis de ingeniería, Universidad Nacional Agraria]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional.

<https://repositorio.una.edu.ni/id/eprint/4341>